www.nifs.go.kr

수산분야 기후변화 평가 백서

Assessment Report on Fisheries Impacts in a Changing Climate

해양수산부
국립수산과학원

수산분야 기후변화 평가 백서

해양수산부
국립수산과학원

발간등록번호
11-1192266-000265-13

과학원간행물번호
SP-2019-ME-045

수산분야 기후변화 평가 백서

Assessment Report on Fisheries Impacts in a Changing Climate

해양수산부
국립수산과학원

수산분야
기후변화 평가 백서

Assessment Report on Fisheries Impacts in a Changing Climate

Ministry of Oceans and Fisheries
National Institute of Fisheries Science

국립수산과학원 **한인성, 이준수, 김중진, 도용현, 박명희, 고우진**

포항공대 **이기택**

부경대 **김도훈, 김봉태**

수산자원생태연 **박경동**

발간에 즈음하여

> *본 백서는 지난 5년간 국립수산과학원을 중심으로*
> *수행한 기후변화에 관한 연구결과와*
> *전 세계 해양수산 분야의 기후변화 동향을 자세히 기술함으로써*
> *기후변화 대응과 적응을 위한 과학적 정보를 제공하는데*
> *큰 의의가 있다고 할 수 있습니다.*

전 지구적으로 해양은 기후 조절자, 생물 종 다양성의 보고, 지속적인 인류의 식량자원 제공 등 매우 중요한 역할을 하고 있음에도 불구하고 기후변화에 의해 이와 같은 역할들이 약해질 것으로 우려하고 있습니다. 특히 우리나라는 좁은 해양 면적에서 높은 어획 강도를 보이는 가운데, 세계에서 가장 높은 수온 상승률을 나타내는 해역 중 하나로 해양수산 분야의 기후변화 취약성은 매우 높다고 할 수 있습니다.

최근에는 기후변화에 기인한 이상 수온 발생, 주변 해역의 어획량 급변, 유해생물의 대량 출현 및 아열대성 어종의 빈번한 출현과 같은 이상 현상들이 우리나라 해역에 나타나고 있어 해양수산 분야에서의 기후변화 대응은 이제 더 이상 미룰 수 없는 국가적인 요구가 되고 있습니다.

해양수산부는 이와 같은 기후변화 위기에 대응하기 위하여 지난 2016년 “제 3차 기후변화 대응 해양수산부문 종합계획”을 수립하였으며, 내년에는 “제 4차 기후변화 대응 해양수산부문 종합계획(’21~’25)”이 수립될 전망입니다. 이와 함께 국립수산과학원에서는 수산분야의 기후변화 영향 및 리스크 파악과 이에 대한 대응 방안 마련을 위하여 2015년부터 지속적으로 “수산분야 기후변화 영향 및 취약성 평가 연구”를 추진해 오고 있습니다.

본 백서는 지난 5년간 국립수산과학원을 중심으로 수행한 기후변화에 관한 연구결과와 전 세계 해양수산 분야의 기후변화 동향을 자세히 기술함으로써 기후변화 대응과 적응을 위한 과학적 정보를 제공하는데 큰 의의가 있다고 할 수 있습니다. 또한 어업현장과 정책현장에서 기후변화를 이해하고, 이에 대한 대응 전략을 수립하는데도 좋은 정보가 될 것입니다.

이번 백서 발간이 해양수산 분야에서 기후변화에 대한 과학적 이해를 높이고, 정책, 연구 및 산업현장에서 유용하게 활용될 수 있기를 기대합니다.

2019년 12월

국립수산과학원장 **최 완 현**

contents

제 1장 서론 13

제 2장 기후변화에 따른 우리나라 해양/수산 영향 분석 17

제 1절 기후변화에 따른 전 지구 영향 분석 18
1) 전 세계 해양의 물리적 변화 19
2) 전 세계 해양의 생지화학적 변화 21
3) 전 세계 해양의 생물학적 변화 24
4) 전 세계 해양의 수산업 관련 영향 및 예상 26
5) 관측되고 예측되는 전 세계 해양 경향 30

제 2절 우리나라 해역 수온 및 열용량 변화 30
1) 우리나라 해역 표층수온 장기변동 경향 30
2) 우리나라 해역 열용량의 변동 경향 37

제 3절 우리나라 해역 생지화학적 요소 변화 43
1) 염분 44
2) 용존산소 46
3) 영양염류 51

제 4절 우리나라 해역 해양산성화 영향 분석 57

제 5절 주요 수산자원의 기후변화 영향분석 68
1) 연근해 어업생산량 변동 및 주요 어종 변화 68
2) 해역별 어업생산 변동 및 주요 어종 변화 69
3) 기후변화 모니터링 대상 어종별 어획현황 71
4) 우리나라 주변 아열대성 어종 출현 현황 75

제 6절 주요 양식생물의 기후변화 영향 분석 76
1) 양식생물 피해발생 현황(경상남도) 76
2) 기후변화에 따른 양식생물 취약분야 실태조사 77
3) 기후변화에 따른 수산질병 취약분야 실태조사 80
4) 양식분야 기후변화 대응 방안 82

제 3장 최근 이상기후에 따른 수산업 피해 발생 원인 분석 85

제 1절 전 지구 해양의 이상기후 발생 경향 86
1) 관측된 이상 고수온의 주요 프로세스와 속성 86
2) 이상 고수온의 전망 및 영향 88

제 2절 이상기후에 따른 이상 수온 발생 경향 분석 91
1) 최근 10년간 우리나라 해역의 수온 양극화 현상 91
2) 2010년 이후 이상수온 발생 경향 94
3) 고수온기와 저수온기의 우리나라 연안 수온 변화 특성 99

제 3절 이상기후에 따른 양식생물 대량 폐사/특보 발령 103
1) 이상 수온 대응 특보 발령 기준 마련 103
2) 실시간 해양환경 어장정보시스템 운영 106
3) 이상수온 특보 발령 현황(2017년 하계~) 108

제 4장 수산분야 기후변화 영향 및 취약성 평가 결과 113

제 1절 수산업의 기후변화 영향 및 취약성 평가 기법 개발 114
1) 취약성의 개념 및 접근 방식 114
2) 취약성 평가의 목적 117
3) 영향 및 취약성 평가 방법 119

제 2절 연근해어업(남해안)의 기후변화 영향 및 취약성 평가 결과 123
1) 평가 방법 및 대상 123
2) 평가 결과 126

제 3절 양식업 취약성 평가 133
1) 평가 방법 분석 방법 133
2) 평가 결과 138
3) 요약 및 결론 142

제 4절 어업인의 기후변화 취약성 인식조사 결과 143
1) 추진 배경 143
2) 재료 및 방법 143
3) 결과 145

제 5장 미래 우리나라 주변해역 기후변화 예측 155

제 1절 2100년까지 우리나라 주변해역 변화 특성 156
1) 전지구 기후모델 및 다운스케일링을 통한 상세화 156
2) 우리나라 주변해역 장기 해양변동 분석 161

제 2절 해양변화에 따른 주요 어종 산란장 및 양식적지 변화 예측 168
1) 기후변화에 따른 주요 어종 산란장 변화 예측 168
2) 기후변화에 따른 양식생물의 양식 적지 변화 예측 170

제 6장 요약 179

제 7장 결언 187

참고문헌 191

List of Figures

19 그림 2-1-1 25개의 CMIP5 ESMs에 의한 재현치, RCP 2.6, RCP 8.5 및 관측치의 2000~2100 기간에 대비한 전 세계 해양의 상층부 2,000m까지의 해양 열용량 시간 변동 경향
20 그림 2-1-2 전 세계 해양의 상층부 2,000m에서 수온, 밀도 및 염분의 변화 경향 및 예측
21 그림 2-1-3 20년 평균으로 위도별로 나타낸 해양 상층부 200m에 대한 평균 성층 정도
22 그림 2-1-4 각 대양별 위도별 평균한 1994~2007년까지 인위적인 이산화탄소에 의한 변화에 대한 연직적 분포 경향
23 그림 2-1-5 최근 50년(1960~2010년) 사이에 0~1,200m 수층, 1,200m~해저면까지 수층에서 용존산소의 절대적 감소 경향
24 그림 2-1-6 1850~1900년을 기준으로 RCP 2.6 및 RCP 8.5 시나리오에서 산소 농도가 80 μmol L-1 이하인 100~600m 층에서 해양의 부피 변화 예상
25 그림 2-1-7 순 기초생산력이 성장과 생체량의 결합에 의해 영향을 받는가를 영양염, 빛, 수온의 요소로 제한하여 나타낸 모식도
26 그림 2-1-8 해양 주요 인자; 표층수온, 표층 pH, 100~600m 산소농도, 0~100m 질산염 및 0~100m 순 기초생산력의 위험 발생 시기
27 그림 2-1-9 FISMIP에 의해 예측된 1986~2005년 대비 2085~2099년의 총 해양 생물 생체량의 변화
28 그림 2-1-10 1986~2005년 대비 2081~2100년에 예상되는 순 기초 생산력, 총 해양생물 생체량, 최대 잠재 어획량의 공간적 변화 예상
29 그림 2-1-11 해양/빙권에서 과거와 미래의 변화 예측
31 그림 2-2-1 국립수산과학원의 1960년 이전 정선 해양관측점 위치도 (1960년 이전)
31 그림 2-2-2 국립수산과학원에서 현재 운영중인 정선 해양관측 정점 위치도 (1961~현재)
32 그림 2-2-3 1968~2018년까지 최근 51년간 우리나라 주변 및 전 지구 평균의 연평균 표층수온 장기변동 경향
33 그림 2-2-4 1968~2018년까지 최근 51년간 동해, 서해 및 남해의 연평균 표층수온 장기변동 경향
33 그림 2-2-5 1968~2018년까지 최근 51년간 우리나라 주변해역 연평균 표층수온의 공간적 상승 경향 분포
35 그림 2-2-6 JMA COBE-SST에 의한 우리나라 주변 해역 구분도
36 그림 2-2-7 JMA COBE-SST에 동해중부, 동해남서부, 황해 및 동중국해 북부해역의 장기 수온 변동 경향
38 그림 2-2-8 0~2000m 층에 대한 전지구 해양의 연평균 및 월평균 열용량 변화
38 그림 2-2-9 0~300m 층에 대한 동해의 40년간(1968~2007년) 해양열용량의 평균, 표준편차 및 경향성
39 그림 2-2-10 해양열용량 산정에 사용된 정선해양관측지점의 위치
40 그림 2-2-11 최근 19년간(2000~2018년) 연평균 우리나라 전체 및 해역별 연평균 표층수온변동 경향
41 그림 2-2-12 2005~2015년간 평균 수온 대비 평균 표층수온 변동 경향
41 그림 2-2-13 최근 19년간(2000~2018년) 해역별 연평균 해양열용량의 변동 경향
42 그림 2-2-14 2005~2014년간 평균 해양열용량 대비 평균 해양열용량의 변동 경향
43 그림 2-2-15 연평균 해양열용량과 수온의 상관관계
44 그림 2-3-1 수치모델로 재현 및 예측된 전지구 상층(0~100m) 질산염 변화
44 그림 2-3-2 동아시아 표층 염분 기후장

45 그림 2-3-3 최근 51년간(1968~2018년) 우리나라 전체 및 해역별 연평균 표층염분 변동 경향
45 그림 2-3-4 전 지구 해양 58년간(1950~2008년) 표층 염분변화
46 그림 2-3-5 전지구 표층 용존산소 기후값 분포
47 그림 2-3-6 전지구 500m 용존산소 기후값 분포
47 그림 2-3-7 동해 중심부의 온위 및 용존산소 변화
48 그림 2-3-8 서해 용존산소 연변동
49 그림 2-3-9 동중국해 용존산소 연별 변동
50 그림 2-3-10 표층 용존산소 연별 겨울 및 여름 변화
51 그림 2-3-11 1999~2013년의 동해 영양염 변화
52 그림 2-3-12 1995~2014년의 동해 연평균 표층 영양염 변화
54 그림 2-3-13 표층 질산염 연별 겨울 및 여름 변화
55 그림 2-3-14 표층 인산염 연별 겨울 및 여름 변화
56 그림 2-3-15 표층 규산염 연별 겨울 및 여름 변화
57 그림 2-4-1 화석연료를 태워 대기 중으로 방출된 CO_2 중 해양으로 녹아들어간 CO_2량
58 그림 2-4-2 인위적 CO_2로 인한 아라고나이트 포화도가 1인 (Ω_A = 1) 수심의 변동 깊이 (m)
59 그림 2-4-3 동아시아 주변해 지도
60 그림 2-4-4 한국 해안 지역의 지도. 원은 해수 샘플링 위치를 나타내며, 회색 화살표는 여름에 주요 해류의 흐름 방향을 나타냄
61 그림 2-4-5 2015 년 4, 8, 10 월 표층 해수의 pH, pCO_2 및 의 공간 분포
62 그림 2-4-6 2016 년 4, 8, 10 월 표층 해수의 pH, pCO_2 및 Ω_A 의 공간 분포
63 그림 2-4-7 2017 년 4, 8, 10 월 표층 해수의 pH, pCO_2 및 Ω_A 의 공간 분포
64 그림 2-4-8 2018 년 4, 8, 10 월 표층 해수의 pH, pCO_2 및 Ω_A 의 공간 분포
66 그림 2-4-9 2015 년 4, 8, 10 월 저층 해수의 pH, pCO_2 및 Ω_A의 공간 분포
67 그림 2-4-10 2016 년 4, 8, 10 월 저층 해수의 pH, pCO_2 및 Ω_A의 공간 분포
68 그림 2-5-1 1970~2018년의 연근해 연간 어업생산량
69 그림 2-5-2 연근해 주요종의 연대별 어획비율
69 그림 2-5-3 1980년~2018년 해역별 어획량 변동
70 그림 2-5-4 남해구 어획량 및 어종별 어획량
70 그림 2-5-5 서해구 어획량 및 어종별 어획량
71 그림 2-5-6 동해구 어획량 및 어종별 어획량
72 그림 2-5-7 방어류 지역별 어획량변동
72 그림 2-5-8 방어류 해역별 어획량
73 그림 2-5-9 해역별 대구 어획량
74 그림 2-5-10 해역별 삼치류 어획량
76 그림 2-6-1 국내 양식 및 어업 생산량 변화
77 그림 2-6-2 경남권역 양식생물 피해발생 건수
77 그림 2-6-3 1999년과 2016년 참굴 각고 및 육중량 분포도
78 그림 2-6-4 연도별 참굴의 연체부지수 월별 변화
79 그림 2-6-5 해만가리비 생존율 및 연체부지수 월별 변화
80 그림 2-6-6 고성군 자란만 해역의 식물성 플랑크톤 농도 변화
81 그림 2-6-7 양식넙치에서 관찰되는 포자충류
82 그림 2-6-8 점액포자충 rDNA 유전자의 보존서열 탐색
82 그림 2-6-9 유전자 분석을 이용한 미동정 점액포자충의 동정
87 그림 3-1-1 최근 20년 고수온 현상이 나타난 해역과 이상 고수온에 따른 영향에 대한 모식도
89 그림 3-1-2 전 세계 및 지역별 이상 고수온 발생 확률 변화
91 그림 3-2-1 1968~2018년까지 최근 51년간 국립수산과학원 정선해양관측에서 얻어진 2월과 8월의 표층 수온 평년편차의 변동 경향
92 그림 3-2-2 국립수산과학원 정선해양관측에서 얻어진 8월과 2월 표층수온의 차이값(연진폭)의 1968~2009년과 2009~2018년의 변동 경향
93 그림 3-2-3 JMA COBE-SST 자료를 이용한 10년 평균 해역별 겨울철 및 여름철의 해면수온 변동 경향
95 그림 3-2-4 미국 NASA에서 제공한 2018년 2월 및 7월의 전 지구 평년편차 기온분포
96 그림 3-2-5 2013년, 2016년, 2017년 및 2018년의 8월 평균 해면수온의 평년편차 분포
97 그림 3-2-6 2016년, 2017년, 2018년 및 2019년의 7~8월 발생 태풍의 진로
98 그림 3-2-7 2011년 2월, 2012년 12월 및 2018년 2월의 월평균 해면수온의 평년편차 분포
99 그림 3-2-8 국립수산과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템에서 관측된 보령 효자, 여수 신월, 남해 강진, 통영 풍화의 7월 및 8월의 월평균 표층수온의 격년 변동 경향
100 그림 3-2-9 2016년 8월 폭염시 기온과 수온의 상관성 분석을 위한 관측지점과 해역별 수온-기온의 상호상관계수 및 지연시간 분석
101 그림 3-2-10 2016년 8월 그림 3-2-9의 각 관측지점에서 기온과 수온의 상호상관함수 분석
102 그림 3-2-11 2017년 12월부터 2018년 2월까지 국립수산과학원 남해 및 서해 연안 6개 지점의 표층수온과 북극 진동지수와의 상호상관계수 및 지연시간 분석 결과
104 그림 3-3-1 2011~2015년까지 5년간 국립수산과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템 26개소에서 관측한 8월 중순 및 2월 중순의 관측소별 평균 수온
107 그림 3-3-2 2019년 9월 현재 국립수산과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템 관측소 위치
108 그림 3-3-3 2017년 하계 고수온 특보발령 현황
109 그림 3-3-4 2018년 하계 고수온 특보발령 현황
110 그림 3-3-5 2019년 하계 고수온 특보발령 현황
110 그림 3-3-6 2017/18년 동계 저수온 특보발령 현황
111 그림 3-3-7 2018/19년 동계 저수온 특보발령 현황
116 그림 4-1-1 IPCC의 취약성 개념(AR3)
117 그림 4-1-2 IPCC의 위험(risk) 개념(AR5)
118 그림 4-1-3 적응 대책의 수립·이행의 과정
120 그림 4-1-4 기후변화 영향 및 취약성 평가 방법
125 그림 4-2-1 연근해 주요 어종의 기후변화 민감도 분석 결과

140 그림 4-3-1 양식업 취약성 평가 결과
141 그림 4-3-2 양식업 취약성 평가 결과(2차원 평면)
144 그림 4-4-1 권역별 조사 대상
145 그림 4-4-2 설문조사 방법 사진(단체설문조사, 어업인 회의 참석조사)
156 그림 5-1-1 IPCC 1~4차 평가보고서에 사용된 기후모델의 공간해상도 및 구성 요소 모식도
157 그림 5-1-2 공간 해상도에 따른 지형 및 수심 표현 모식도
157 그림 5-1-3 지난 35년간의 기후모델의 발전
158 그림 5-1-4 CMIP5와 기후연구 활동을 조정하기 위한 국제기구 및 IPCC 등과의 관계도 및 CMIP5 예측 요약
159 그림 5-1-5 역학적 다운스케일링 및 통계적 다운스케일링 모식도
160 그림 5-1-6 14개 CORDEX 영역 및 CORDEX-동아시아 영역
163 그림 5-1-7 RCP 8.5 시나리오 예측 표층 수온
163 그림 5-1-8 RCP 8.5 시나리오 연평균 해역별 수온 변동 그래프
164 그림 5-1-9 RCP 8.5 시나리오 2월과 8월의 해역별 수온 변동 그래프
164 그림 5-1-10 RCP 4.5 시나리오 예측 표층 수온
165 그림 5-1-11 RCP 8.5 시나리오 예측 수심 30m 수온
165 그림 5-1-12 RCP 8.5 시나리오 예측 수심 100m 수온
166 그림 5-1-13 RCP 시나리오별 2100년 겨울·여름 표층염분 분포 및 차이
166 그림 5-1-14 RCP8.5(상)와 RCP4.5(하) 시나리오별 2030년(좌), 2050년(중), 2100년(우)의 표층염분 편차 분포
167 그림 5-1-15 연평균 해역별 표층염분 변동 그래프(RCP 8.5(좌), RCP 4.5(우) 시나리오)
169 그림 5-2-1 RCP 8.5 및 4.5 시나리오의 살오징어 가을 산란군 산란장 분포 변화
169 그림 5-2-2 RCP 8.5 및 4.5 시나리오의 살오징어 겨울 산란군 산란장 분포 변화
170 그림 5-2-3 RCP 8.5 및 4.5 시나리오의 고등어 산란장 분포 변화
171 그림 5-2-4 시기별 넙치 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오)
171 그림 5-2-5 시기별 넙치 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오)
173 그림 5-2-6 시기별 참돔 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오)
173 그림 5-2-7 시기별 참돔 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오)
174 그림 5-2-8 시기별 우렁쉥이 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오/수심 10m)
174 그림 5-2-9 시기별 우렁쉥이 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오/수심 30m)
175 그림 5-2-10 시기별 우렁쉥이 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오/수심 10m)
175 그림 5-2-11 시기별 우렁쉥이 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오/수심 30m)
177 그림 5-2-12 시기별 참전복 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오/수심 5m)
177 그림 5-2-13 시기별 참전복 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오/수심 5m)

List of Tables

15 표 1-1-1 산업화 이전 대비 2100년 1.5℃ 및 2.0℃ 온도 상승에 따른 요소별 차이
34 표 2-2-1 정선해양관측조사에 의한 동해, 남해, 서해 및 우리나라 전체의 2000년 이후 연도별 평균 연평균 수온 변동 경향
52 표 2-3-1 서해의 연평균, 여름, 겨울의 환경요소 변화율
53 표 2-3-2 동중국해 북부 20년간(1995~2014년)의 영양염류 연평균 및 계절평균
75 표 2-5-1 제주주변해역 아열대성 어종 출현종 리스트(65종)
105 표 3-3-1 우리나라 주요 양식 품종별 서식수온 및 한계수온
115 표 4-1-1 취약성 접근 방법
116 표 4-1-2 취약성 접근 방법
119 표 4-1-3 평가 방법 종류와 특징
123 표 4-2-1 연근해어업 평가 지표
125 표 4-2-2 연근해 어종의 기후변화 민감도 평가 기준
127 표 4-2-3 연근해 업종별 수온 지표(원값)
128 표 4-2-4 연근해 업종별 염분 지표(원값)
129 표 4-2-5 연근해 업종별 기후노출 지표(표준화 값)
131 표 4-2-6 연근해 업종별 수산생물 위험도 및 어업인의 능력 세부 지표(원값)
132 표 4-2-7 연근해 업종별 기후변화 영향 및 취약성 평가 결과
133 표 4-3-1 양식업 취약성 평가 지표
134 표 4-3-2 수온 지표의 측정 규모
135 표 4-3-3 품종별 적정 수온과 서식 수온의 상한
137 표 4-3-4 취약성 평가 대상종
139 표 4-3-5 취약성 평가 결과
144 표 4-4-1 조사연도별 조사해역
146 표 4-4-2 조사 대상자의 어업종류별 성비(%)
147 표 4-4-3 어업종류별 연령구성과 비율(%)
147 표 4-4-4 어업종류별 연간조업일수 응답수와 비율(%)
148 표 4-4-5 어업종류별 어업종사기간 응답수와 비율(%)
149 표 4-4-6 어업종류별 어업소모비용 응답수와 비율(%)
149 표 4-4-7 어업종류별 어업소모비용 내용과 비율(%)
150 표 4-4-8 어업종류별 기후변화가 어업생산에 미치는 영향에 대한 의견
151 표 4-4-9 어업종류별 기후변화가 어업생산에 미치는 부정적 영향에 대한 의견
152 표 4-4-10 조사대상 어업인의 기후변화의 영향에 따른 환경요인 변동에 대한 의견
154 표 4-4-11 조사대상 어업인의 기후변화 대응책에 대한 의견
171 표 5-2-1 지역별 넙치 연간 생산량(2006년~2017년 평균)
171 표 5-2-2 지역별 참돔 연간 생산량(2006년~2017년 평균)
174 표 5-2-3 지역별 우렁쉥이 연간 생산량(2006년~2017년 평균)
176 표 5-2-4 지역별 전복류 연간 생산량(2006년~2017년 평균)

제 1장 ▶ 서론

제 1장 _ 서론

바다는 대기에서 인위적으로 급증된 이산화탄소와 열을 흡수하고 조절하면서 지구 시스템 내의 기후조절자 역할을 하고 있다. 뿐만 아니라 해양은 많은 인구들의 단백질 보급 창고로서 다양한 생물들이 서식하고 필요한 영양분을 제공하고 있다. 특히 저개발 국가 및 연안 인접 국가들에게 주는 해양 생물의 역할은 식량 안보적인 측면에서 그 중요성이 상당히 높다. 또한 해양은 대기와 상호 작용을 통하여 다양한 물리적, 화학적 작용을 하고 있으며, 기후변화의 영향을 받으면서도 기후에 영향을 주는 역할도 병행하고 있다.

최근 정부 간 기후변화 협의체(IPCC; Intergovernmental Panels on Climate Change)에서는 "해양 및 빙권에 관한 특별보고서(SROCC; Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate)"를 승인하면서 기후변화에 따른 해양의 중요성을 더욱 강조하고 있다. 이 보고서는 2014년 이후에 발간된 다양한 참고문헌과 모델 개발 자료를 통하여 과거와 미래의 해양 변화를 이야기하고, 변화하는 해양에 대응하기 위한 전략에 대해서도 기술하고 있다. 또한 최근 기후변화에 따른 이상 고수온 현상이나 급격한 해수면 상승에 대한 해양 환경의 많은 문제점들을 지적하고 있다.

2015년 체결된 파리기후변화 협약(Paris Agreement)에서는 기후변화 측면에서 매우 중요한 합의 사항을 도출하였다. 우선 기온 상승률을 산업혁명 이전에 대비하여 2100년에 1.5℃ 상승으로 제한하기 위하여 전 세계의 국가들이 노력을 기울여야 할 것이라고 하였다. 이에 과거 온실가스의 주요 배출국이었던 선진국들은 2020년부터 매년 1,000억 달러씩 개발도상국의 기후변화 대응 사업을 위해 지원하기로 하였고, 가능한 빠른 시일 내에 온실가스의 배출량을 감축하여 2050년까지 지구촌 온실가스 배출량을'0'으로 하는 것을 목표로 합의 하였다. 또한 선진국들이 우선적으로 온실가스 감축에 앞장서야 하며, 개발도상국들도 온실가스 감축을 위한 노력을 증가시킬 것을 권고하였다. 실질적으로 온실가스 감축이 각국에서 이루어지는지를 확인하기 위하여 2023년을 시작으로 매 5년 마다 온실가스 감축 이행점검(Global Stocktake)을 하도록 협의 하였고, 해수면 상승으로 인한 소형 도서 국가 등 기후변화에 의해 피해가 취약한 국가에 대해 전 세계의 국가들이 도움을 결집하기로 하였다.

이와 같은 목표 달성을 위하여 IPCC에서는 기후변화 위험에 대한 전 지구적 대응 강화, 지속가능한 발전, 빈곤 퇴치 노력 측면에서 산업화 이전 수순 대비 지구온난화 1.5℃의 영향과 관련된 온실가스 배출 경로에 대한 특별보고서(지구온난화 1.5℃ 특별 보고서)를 지난 2018년 승인·채택하였다. 이 보고서에서는 지구 온도를 2100년에 산업화 이전 대비 1.5℃ 상승으로 제한하였을 때와 2.0℃까지 상승하였을 때의 차이에 대하여 비교하고 있다. 특히 1.5℃로 온도 상승을 제한하였을 경우, 연안의 위험인구가 1,000만 명 줄어들 수 있

으며, 어획량의 감소를 절반 이상 줄일 수 있다는 부분은 해양/수산 분야의 기후변화 대응과도 중요한 연결점이 있다.

표 1-1-1 산업화 이전 대비 2100년 1.5℃ 및 2.0℃ 온도 상승에 따른 요소별 차이

[출처 IPCC 1.5℃ 특별보고서]

요소	1.5℃ 상승	2.0℃ 상승	비고
배양용기	0.26~0.77m	0.30~0.93m	2.0도 상승 대비 1.5℃ 상승의 경우 연안 위험인구 1천만 명 적음
중위도 폭염일	3℃까지 상승	4.5℃까지 상승	
생물다양성 변화	곤충 6% 식물 8% 척추동물 4%	곤충 18% 식물 16% 척추동물 8%	기후 지리적 분포범위 절반 이상을 잃는 동식물 비율
북극 얼음 녹아 없어질 확률	100년에 한 번	10년에 한 번	
산호초 피해	70~90% 감소	99% 이상 감소	
어획량	150만t 감소	300만t 감소	

현재 우리나라는 다양한 분야에서 기후변화 대응을 위하여 노력하고 있다. 환경부를 중심으로 관계부처 및 전문가 그룹에서는 "2050 장기 저탄소 발전전략"수립을 추진하면서 2030년까지의 단기적인 온실가스 감축이 아닌 2050년까지 장기적으로 분야별 온실가스 감축량을 확보하기 위한 다양한 노력이 일어나고 있다. 또한 환경부와 관련 전문가 그룹은 제 3차 기후변화 적응 대책 준비를 하고 있다. 2011~2015년까지 제 1차 국가 기후변화 적응대책, 2016~2020년까지 제 2차 국가 기후변화 적응대책에 이르는 동안 각 분야에서는 기후변화 감시, 예측, 적응 능력 향상, 취약성 및 리스크 분석, 대응 기술 개발 등을 위한 다양한 R&D와 사업을 연계하여 추진해 오고 있다. 제 3차 기후변화 적응 대책에서는 각 분야별 실질적인 기후변화 리스크를 도출하는 작업하면서 우선순위에 대응하는 정책 수립을 강조할 계획이다.

해양수산부에서는 현재 제 3차 기후변화대응 해양수산부문 종합계획이 만들어져 진행되고 있다. 이 계획은 "기후변화 적응형 해양경제 구현"이라는 비전을 가지고 "해양 기후변화 현상에 대한 과학적 이해 제고", "해양수산 온실가스 배출 저감·감축 기술 상용화", "기후변화 사전 대응력 확보를 통한 피해 최소화" 및 "기후변화 대응체계 효과성 제고를 위한 이행 기반 확립"을 계획의 정책 목표로 설정하고 있다. 2016년부터 2020년까지를 계획 기간으로 설정하고 있어 내년에는 새로운 해양수산부의 기후변화 대응계획이 수립될 예정이며, 이 때 IPCC의 해양 및 빙권 특별보고서에서 기술하고 있는 전 지구적 혹은 지역해(Regional Seas)의 다양한 문제점과 대응 방안이 참고로 활용될 것으로 판단된다.

우리나라의 해역은 전 지구 평균에 비하여 월등히 높은 수온 상승률과 어업면적 대비 높은 어획강도로 인하여 취약성이 매우 높은 해역으로 알려져 있다. 또한 많은 습지를 보유하고 있으며, 생물다양성 감소, 외래침입종의 증가, 백화현상 등 연안 서식환경 악화와 같은 다양한 문제점들이 나타나고 있다. 이와 같은 기후 동인에 의한 문제점뿐만 아니라 인위적인 비기후 동인들, 예를 들면 연안 오염 악화, 연안 개발, 중국 어선의 불법 어획, 선박 온실가스 배출 증가 등은 기후적인 요소에 의한 부정적인 요소를 가중시키는 역할을 하게 된다.

또한 최근 급증하고 있는 이상기후에 의한 고수온, 저수온 현상은 대표적인 수산 재해로서 최근에는 적조에 의한 양식생물 피해액을 초과하여 수산업 내에서 가장 큰 재해 요소로 대두되고 있다. 이상 수온이 나타나고 있는 다른 외국에서 양식업에 대한 피해가 집계되지 않는 것에 비하여, 우리나라는 대부분 좁고, 얕은 해역을 중심으로 양식업이 광범위하게 이루어짐에 따라 이상 수온에 따른 피해가 더욱 크게 나타나고 있는 것으로 사료된다.

국립수산과학원에서는 지난 2015년부터 “수산분야 기후변화 영향 및 취약성 평가 연구”라는 제목으로 연구 과제를 수행하고 있으며, 이 과제에서는 주로 우리나라 중심의 해양기후 모델 구축, 기후변화 관련 해양수산분야 빅데이터 구축, 예측자료 기반의 수산분야 시나리오 구축, 수산업 각 분야의 취약성 실태조사, 취약 특성의 정량적 분석, 수산분야 기후변화 취약성 평가 기법 개발 등과 같은 다양한 연구를 수행하고 있다. 또한 기후변화에 따른 해양산성화 영향 및 예측, 기후변화에 따른 수온상승이 주요 양식생물 질병 발생에 미치는 영향 분석, 어업인들의 기후변화 인식 조사와 같은 연구와 병행하여 이상 수온 발생 메커니즘 규명과 이상 수온 대응 특보 발령과 같은 현업 위주의 업무도 같이 수행되고 있다.

이와 같은 다양한 분야와 다양한 기법을 통하여 연구한 결과를 결집하여 이번 “수산분야 기후변화 평가 백서”를 발간하게 되었다. 본 보고서에서는 전 지구적 기후변화 영향 분석을 시작으로 우리나라 해역의 물리적, 화학적 변화를 살펴보고, 해양산성화의 영향 분석도 다루어질 것이다. 또한 주요 수산자원 및 양식생물의 기후변화 영향 분석에 대한 내용도 포함된다. 2010년 이후 급증하고 있는 이상 수온 현상에 대하여 전 지구적인 경향을 살펴보고, 우리나라 해역의 이상 수온 발생 경향과 원인에 대하여도 고찰하면서, 이를 현업의 차원으로 이상 수온 특보 발령 기준 마련과 적용에 대해서도 알아본다. 상기 과제의 초기 단계에 수행되었던 수산분야의 기후변화 취약성 평가 기법 개발과 경제학적 분석 결과를 되돌아보면서, 우리나라 전 연안의 어업인 인식조사 결과도 정리할 것이다. 마지막으로는 국립수산과학원에서 구축한 해양 기후모델에 기반을 둔 우리나라 해역의 변화상과 이에 따른 수산자원 산란장 및 양식적지의 미래를 예측하는 내용으로 기술된다.

본 백서는 국립수산과학원을 중심으로 해양과 수산분야에서 최근에 관측되고, 예측되면서, 연구되었던 내용이 모두 포함되며, 최근 IPCC와 같은 전 지구의 기후변화를 다루는 기구의 최신 연구 결과도 포함함으로써 해양수산부의 정책담당자, 지자체의 기후변화 및 해양수산분야 담당자 등 정책분야 담당자들에게 매우 중요한 정보가 제공될 것으로 판단된다. 또한 관련분야 연구자들과 현업에 종사하시는 어업인들에게도 우리나라 해역의 변화를 이해하는데 큰 도움이 될 것이다.

제 2장 ▶ 기후변화에 따른 우리나라 해양/수산 영향 분석

제 1절 기후변화에 따른 전 지구 영향 분석
제 2절 우리나라 해역 수온 및 열용량 변화
제 3절 우리나라 해역 생지화학적 요소 변화
제 4절 우리나라 해역 해양산성화 영향 분석
제 5절 주요 수산자원의 기후변화 영향분석
제 6절 주요 양식생물의 기후변화 영향 분석

제 2장 _ 기후변화에 따른 우리나라 해양/수산 영향 분석

제 1절 기후변화에 따른 전 지구 영향 분석

정부간 기후변화 협의체(IPCC; Intergovernmental Panels on Climate Change)는 해양이 기후변화에 미치는 영향의 중요성을 고려하여 “해양 및 빙권에 관한 특별보고서(SROCC; Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate)”를 지난 2019년 9월에 승인하였다. 이 보고서는 총 6개의 장으로 구분되어 있으며, 1장은 개요, 2장은 고산지대, 3장은 극 지역, 4장은 해수면 상승, 5장은 해양 및 생태계 변화 및 6장은 극한 해양현상을 주요 내용으로 다루고 있다. 즉, 고산지대 및 극지방의 얼음면적 및 빙하의 감소에 따른 연안의 영향에서 외양에 미치는 영향까지를 폭넓게 다루고 있다. 이 보고서는 IPCC 제 5차 평가보고서(AR5; Assessment Report)에서 다루어진 내용의 이후에 나온 최근의 참고문헌을 기반으로 기술되어 있어 가장 최근에 관측되고 예측되어진 해양의 변화를 이해하는데 가장 좋은 보고서라 말할 수 있다.

세계 대양은 전 지구 면적의 약 71%를 점하고 있으며, 해양은 지구의 물 중 약 97%를 점하며, 지구의 생물학적으로 서식가능한 공간의 약 99%를 점하고 있다. 또한 지구의 기초 생산력의 약 절반 정도를 점하고 있다. 전 지구의 해약의 평균 깊이는 약 3,700m이며, 최대 수심은 10,000m를 넘고 있다. 태양광은 수괴 내에서 약 50~200m까지 투과되어 식물플랑크톤에 의한 기초 생산력을 생산하고 있다. 특히 해양은 계절적 혹은 장기적인 시간 스케일로 기본적인 기후 조절자로서의 역할을 하고 있다. 해수는 공기에 비하여 열용량(heat capacity)이 4배 이상 높으며, 많은 용존 탄소를 보관하고 있다. 열, 수증기, 생지화학적으로 관련된 기체(용존산소 등)와 이산화탄소 교환이 대기와 해양의 표면을 통하여 교환되고 있으며, 바람, 조석, 파랑, 밀도차에 의한 다양한 혼합 현상이 나타나며 해류와 함께 세계 대양을 통하여 해수의 분포가 변화되고 있다.

인간 활동에 의한 탄소 배출은 해양 온난화, 산성화, 산소 부족과 함께 영양염 순환 및 기초생산력의 변화의 원인이 되고 있다. 해양 온난화는 다양한 영양 단계에서 해양생물에 영향을 끼쳐 식량 생산과 인간 군집에 매우 중요한 수산업에 대해서도 영향을 미치고 있다. 기존의 해양 및 어업 거버넌스의 효과에 대한 우려가 이미 보고되고 있으며 적극적인 완화 및 적응 대응의 필요성이 강조되고 있다.

최근 연구결과가 집대성 되어 있는 IPCC SROCC에서 보고하고 있는 최근의 연구 결과를 바탕으로 기후변화에 기인한 전 세계의 해양 영향을 살펴보고자 한다.

1) 전 세계 해양의 물리적 변화

2005년부터 해양의 온난화 속도가 더욱 급격해지면서 IPCC 제 5차 평가보고서에 기록된 명백한 수십 년간의 해양 온난화 추세가 계속되고 있다. 온난화 경향은 지난 10여 년간 더욱 발전된 해양 수온 관측 결과에 의해 더욱 신뢰도가 높아졌다. 해양의 0~700m 및 700~2,000m 층은 2005년부터 2017년까지 각각 5.31 ±0.48 ZJ yr^{-1} 및 4.02±0.97 ZJ yr^{-1} 의 속도로 더워지고 있다. 0~700m 및 700~2,000m 층에 대한 장기적인 경향은 1970년부터 2017년까지 각각 4.35±0.8 ZJ yr^{-1} 및 2.25±0.64 ZJ yr^{-1} 의 속도를 보였으며, 최근의 더욱 온난화되는 추세가 높은 이유는 인위적인 영향이 크게 작용하고 있기 때문이다. 2,000m 이심의 심층 및 심해에서 해양 온난화(특히 남반구 해역)도 지속되었을 가능성이 있는 것으로 판단된다.

해양의 온난화 경향은 1993년부터 더욱 증가했을 가능성이 높다. 0~700m 및 700~2,000m 층에서 1970년부터 1993년까지는 3.22±1.61 ZJ yr^{-1} 및 0.97±0.64 ZJ yr^{-1} 로 온난화 된 반면, 1993년부터 2017년까지는 6.28±0.48 ZJ yr^{-1} 및 3.86±2.09 ZJ yr^{-1} 로 온난화되었다. 이는 적어도 두 배 이상 열의 흡수가 증가된 것을 나타내고 있다.

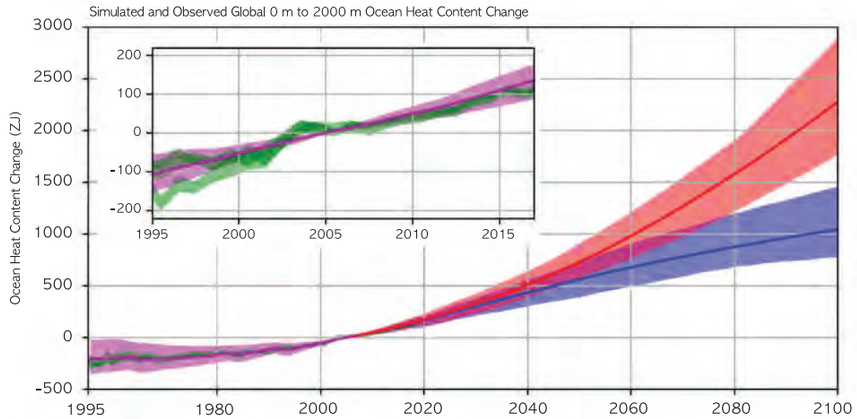


그림 2-1-1 47개의 CMIP5(Climate Model Inter-comparison Project, Phase 5)의 ESMs(EcoSystem Models)에 의한 재현치(보라색), RCP 2.6(파란색), RCP 8.5(붉은색) 및 관측치(초록색)의 2000~2100 기간에 대비한 전 세계 해양의 상층부 2,000m까지의 해양 열용량(Ocean Heat content) 시간 변동 경향

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

1970년 이후 해양의 상층부는 성층화가 심각하게 진행되고 있다. 관측된 온난화와 고위도에서의 염분 감소는 심층 해양에 비교하여 시간이 갈수록 표층부의 밀도를 감소시키고 이는 표층과 심층의 교환을 억제하는 효과를 나타낸다. 상층 200m에서 성층은 1970년부터 2017년까지 2.18%에서 2.42%의 범위에서 더욱 증가하였다.

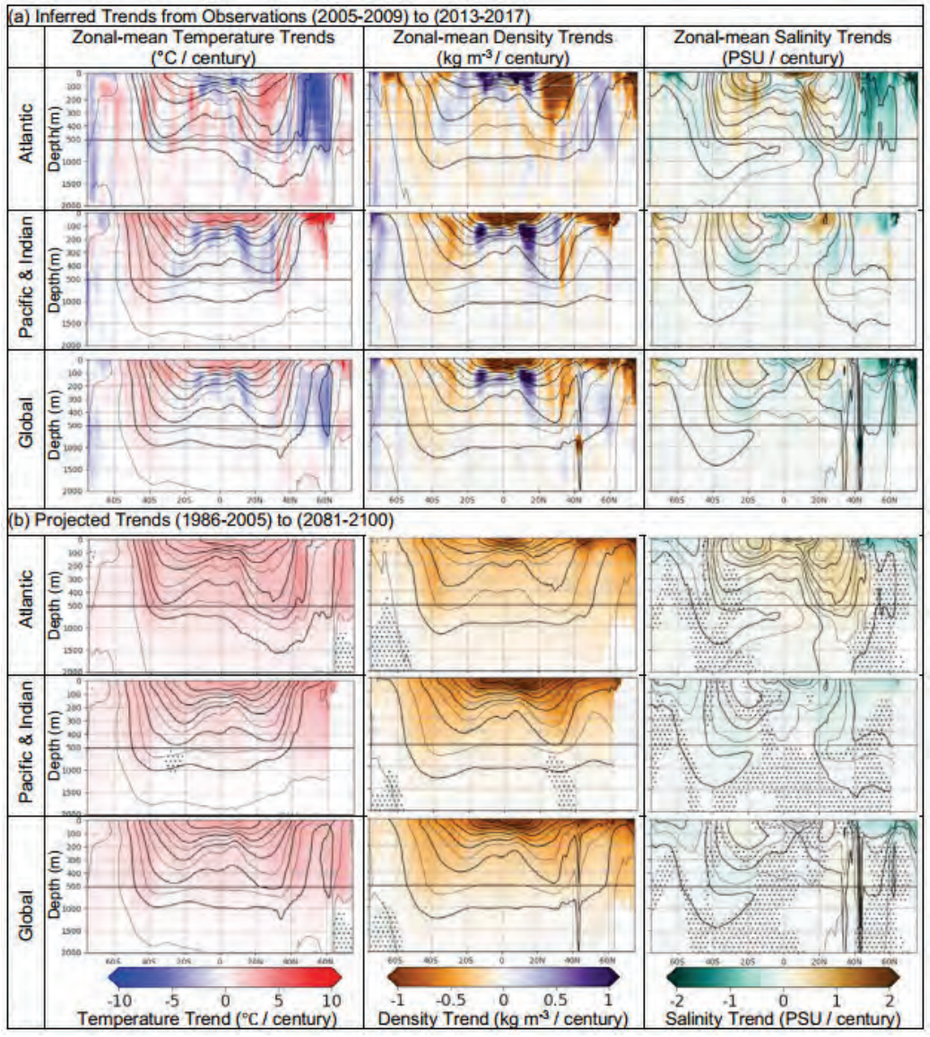


그림 2-1-2 전 세계 해양의 상층부 2,000m에서 수온, 밀도 및 염분의 변화 경향 및 예측 (a) 관측에 의한 2013~2017년 평균치에서 2005~2009년 평균치의 차이 (b) RCP 8.5 시나리오에 의한 CMIP5에서 계산된 2081~2100년 예측치에서 1986~2005년치의 차이

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

2100년까지 해양은 1970년 이후 관측된 변화에 비하여 온실가스 저배출 시나리오(RCP 2.6; Representative Concentration Pathway 2.6)의 경우 2~4배, 고배출 시나리오(RCP 8.5)의 경우 5~7배 더욱 온난화될 것으로 전망되고 있다. 0~2,000m층의 해양은 RCP 8.5 시나리오에서 2017에서 2100년 사이에 약 2,150 ZJ(1,710~2,790 ZJ)까지

온난화 될 것으로 전망하고 있다. 또한 RCP 2.6 시나리오에서는 0~2,000m 층은 약 900 ZJ(650~1,340 ZJ)로 전망되면서 복사열이나 평균 수온이 안정화되더라도 해양의 온난화는 이번 세기에 지속적으로 나타날 것으로 전망하고 있다. 전 세계 해양의 상층부는 더욱 성층화 될 것으로 전망된다. 이번 세기 말까지 상층부 200m의 연평균 성층은 RCP 2.6과 RCP 8.5에서 위도 60°N~60°S에서 1986~2005년까지 평균치에 비하여 각각 1~9% 및 12~30%로 증가할 것으로 예상된다. 대부분의 연안지역은 21세기 동안 조석 진폭에서 통계적으로 유의미한 변화를 경험할 가능성이 높으며, 조석 진폭 및 신호의 지역적 변화는 인간의 연안 적응 조치와 기후 동인에 의하여 영향을 받을 것으로 전망되고 있다.

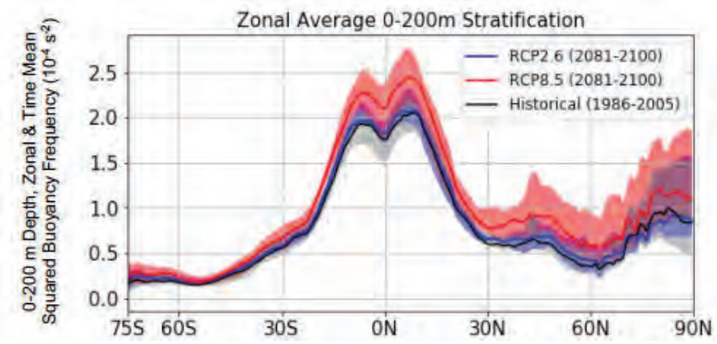


그림 2-1-3 20년 평균으로 위도별로 나타낸 해양 상층부 200m에 대한 평균 성층 정도
(검은색 및 회색 : 재현치, 푸른색 : RCP 2.6, 붉은색 : RCP 8.5)

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

2) 전 세계 해양의 생지화학적 변화

다양한 관측 자료와 모델 결과에 따르면 대기 중 이산화탄소 농도가 증가함에 따라 대기 중 이산화탄소의 해양 흡수 속도는 최근 20년 동안 계속 강화되고 있다. 최근 20년간 총 인위적인 배출의 약 20~30%가 해양에 흡수되었다. 특히 전 세계 해양 탄소 흡수에 영향을 크게 주고 있는 남극해에서의 해양 탄소 흡수원은 최근 10년 사이 역동적으로 증가하고 있다는 증거가 나타나고 있다.

지속적인 해양 탄소 흡수에 의해 해양은 계속 산성화되고 있다. 대양에서 표층해수의 pH는 15년 이상 지속되고 있는 각 시계열 관측결과를 통해 살펴보면, 1980년대 이후부터 10년당 0.017~0.027의 범위로 감소하고 있음이 관측되었다. 인위적인 해수중 pH 변화는 1950년 이후 3/4에 해당하는 해양 표층에서 위험이 나타나고 있으며, 전 세계 해양의 약 95%에서 이미 영향을 받고 있다. 이와 같은 pH 변화는 용승 해역과 고위도 해양을 중심으로 탄산 이온 농도의 감소로 인한 탄산칼슘 형태로 미네랄 형태의 안정성을 감소시키고 있다.

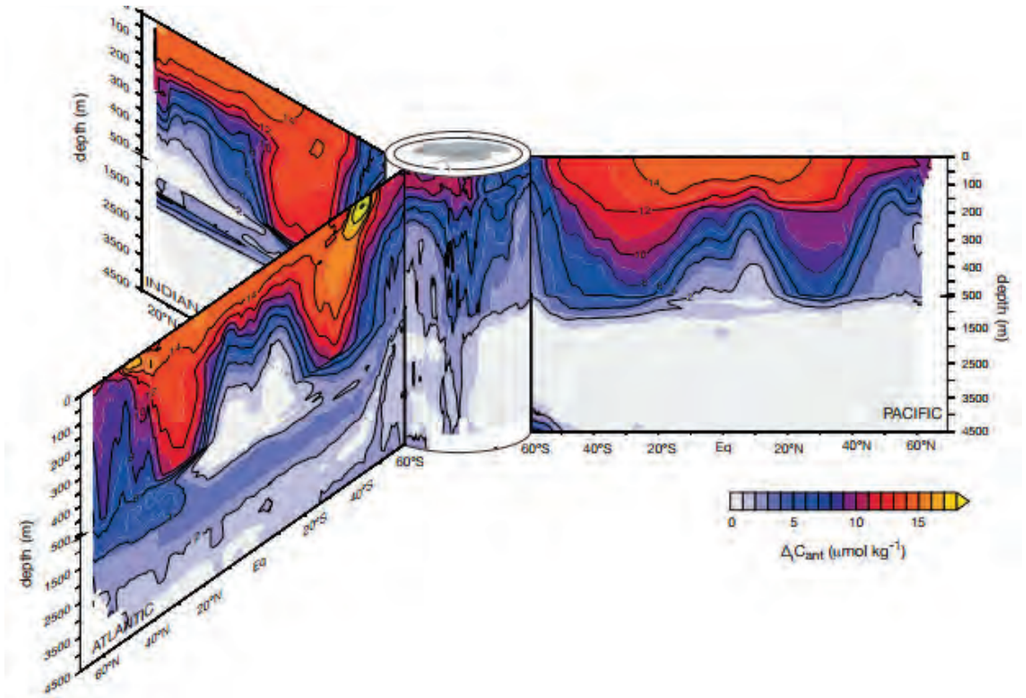


그림 2-1-4 각 대양별 위도별 평균한 1994~2007년까지 인위적인 이산화탄소에 의한 변화에 대한 연직적 분포 경향

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

1970년부터 2010년 사이에 해양 표층부터 1,000m 수심까지 약 0.5~3.3%의 산소 감소 양상이 나타난다는 인식이 강화되고 있다. 지구 온난화로 인한 산소 손실은 해양 물리 및 생지화학과 관련된 다른 과정에 의해 강화되고 있으며, 이는 관측된 산소 감소의 주요 원인으로 작용하고 있다. 산소 최소 해역(Oxygen minimum zones)은 열대 해역에서 3~8% 범위로 확장되고 있지만, 열대 지역의 인간 활동에 따른 전체 산소 감소의 속성이 미치는 영향에 의해 10년 단위로 변동이 크게 나타나고 있다.

해양 온난화와 성층 강화로 인하여, 외양역에서 영양염 순환은 교란되고 있으며, 지역적인 기초 생산자에게 다양한 영향을 미치고 있다. 하지만 현장 관측자료 및 시계열 자료 부족과 함께 위성 관측에서 얻어진 결과를 포함하더라도 과거의 해양 생산성 경향을 평가하기에는 아직 신뢰도가 매우 낮은 상태이다.

2006~2015년에 비하여 2081~2100년까지 RCP 2.6과 RCP 8.5 시나리오에서 해양 표층의 pH가 각각 0.036~0.042 및 0.287~0.29 만큼 감소할 것이 거의 확실하다. 이러한 pH의 변화는 북극해 및 남극해뿐만 아니라, 북태평양과 북서부 태평양에서 주요 탄산염 형태의 탄산칼슘에 대한 부식을 유발할 가능성이 RCP

8.5 시나리오 상에서 매우 가능성이 높지만, 이와 같은 변화는 RCP 2.6에서는 피해갈 수 있을 가능성이 있다. RCP 8.5 시나리오에서 2000년에 비해 수소 이온 농도의 계절주기 진폭이 2100년까지 71~90%까지 증가할 가능성이 높아짐에 따라 특히 고위도 해역에서 산성화 조건에 대한 계절적 노출 증가의 증거가 늘어나고 있다.

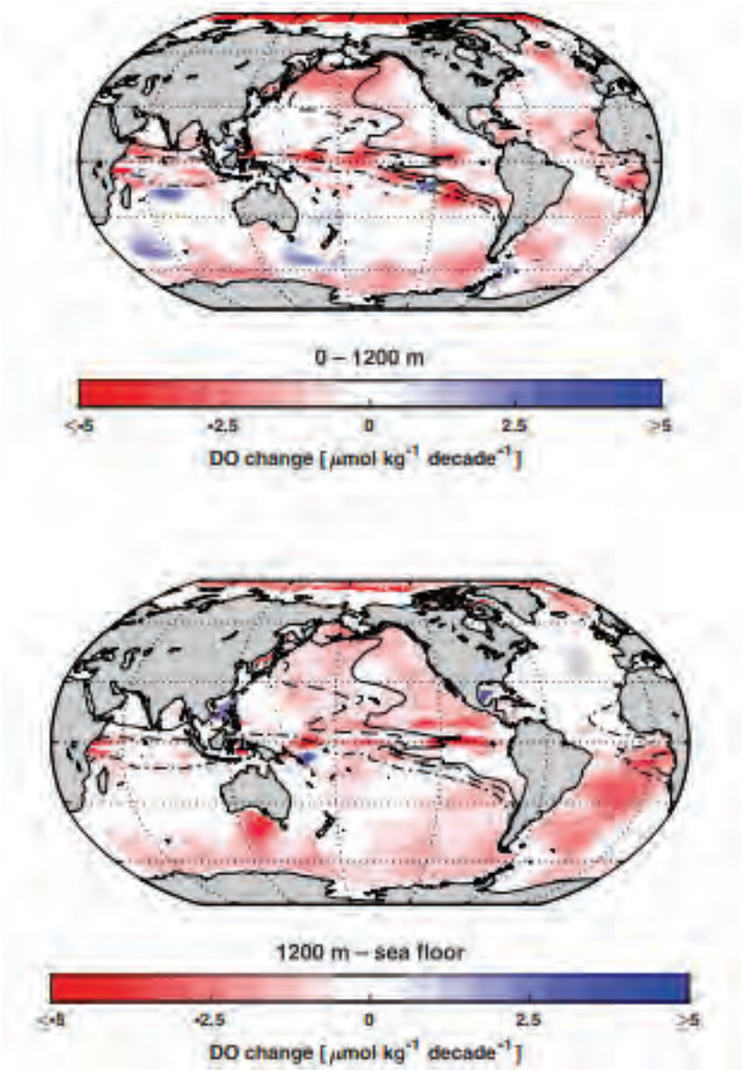


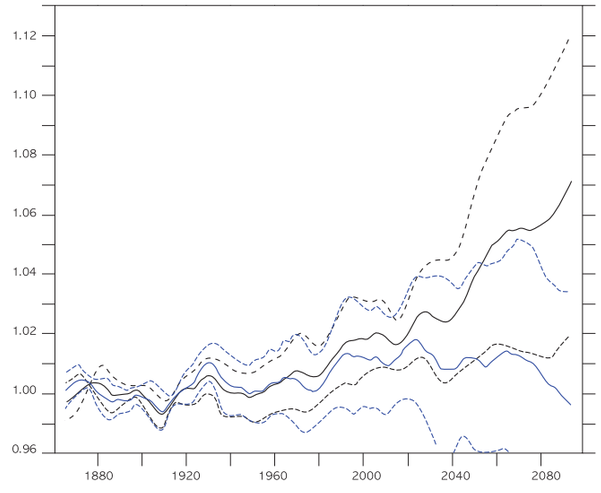
그림 2-1-5 최근 50년(1960~2010년) 사이에 (a) 0~1,200m 수층, (b) 1,200m~해저면까지 수층에서 용존산소의 절대적 감소 경향

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

산소는 향후 더욱 감소할 것으로 예상된다. 전 세계적으로 해양의 산소 함량은 2006~2015년 대비 2081~2100년까지 RCP 8.5 시나리오에서 약 3.2~3.7%, RCP 2.6 시나리오에서 약 1.6~2.0% 감소할 가능성이 매우 높다. 산소 최소 해역의 부피는 1850~1900년에 대비하여 2100년에는 RCP 8.5 시나리오에서 약 7.0 ±5.6% 범위로 증가할 것으로 예상된다. RCP 8.5 시나리오에서 산소 감소의 기후적 신호는 매우 위험한 상황을 맞게 될 것으로 예상되며, 2031~2050년에는 전체 해역의 59~80%가 2081~2100년에는 79~91%가 이에 대한 영향을 받을 것으로 예상된다. 산소 감소의 위험성은 RCP 2.6 시나리오에서 21세기 내에 공간적으로 발생률이 훨씬 감소되며, 2090년에 위험 해역의 감소 추세가 나타날 수 있다.

전반적으로 전 세계 해양의 성층 강화로 인하여 CMIP5 결과에 따르면 2006~2015년에 비하여 2081~2100년에 표층 100m에서 질산염의 농도가 9~14% 감소할 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다.

그림 2-1-6 1850~1900년을 기준으로 RCP 2.6(푸른색) 및 RCP 8.5(검은색) 시나리오에서 산소 농도가



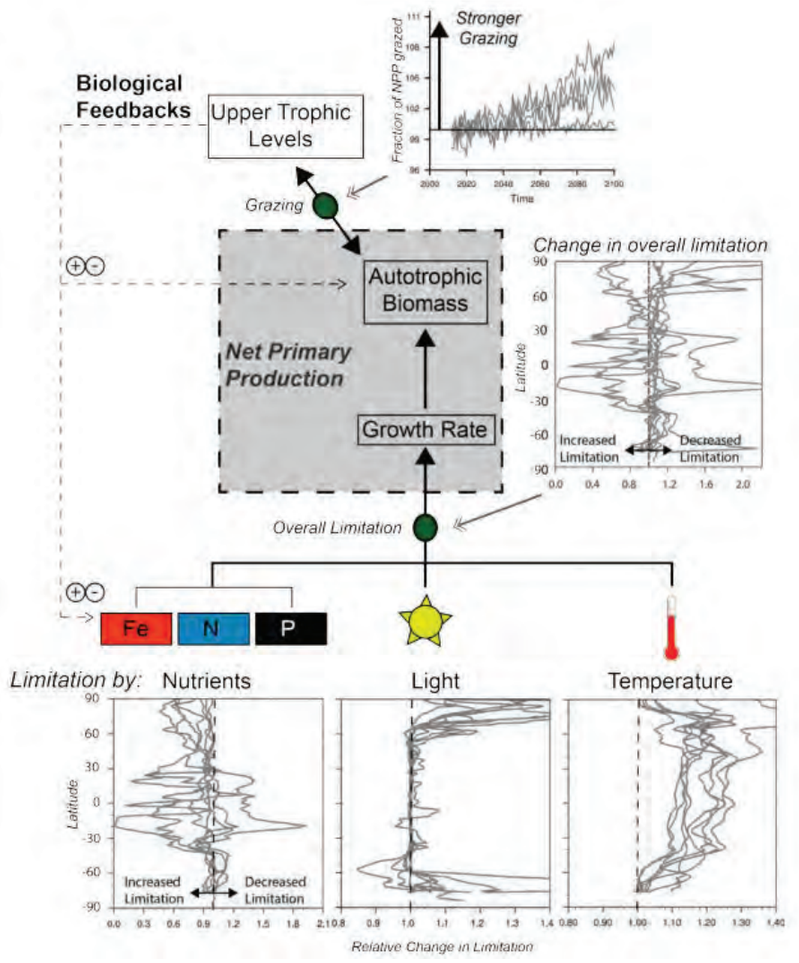
80 μmol L-1 이하인 100~600m 층에서 해양의 부피 변화 예상 (점선은 CMIP5에 의한 90% 신뢰도 구간)

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

3) 전 세계 해양의 생물학적 변화

해양 온난화에 의하여 식물플랑크톤에서 대형 해양 포유류에 이르는 해양생물들의 지리적 분포 변화가 관측되고 있으며, 어떤 경우에는 군집 구조의 조성 및 해양생물 간의 상호 작용에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 1950년대 이후 관측된 해양 생물의 이동 범위는 표층부에서는 약 51.5±33.3 km/decade, 저서부에서는 약 29.0±15.5 km/decade로 추정되고 있다. 표층부 해양생물의 이동 방향은 온난화에 대한 반응과 매우 일치함을 확인할 수 있다.

그림 2-1-7 순 기초생산력이 성장과 생체량의 결합에 의해 영향을 받는가를



영양염, 빛, 수온의 요소로 제한하여 나타낸 모식도

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

해양 온난화에 따른 열대성 종들의 고위도 확장은 일부 산호초, 암초, 해조류 서식지 및 표영 생태계에서 섭이 지역 확대로 나타나면서 해양 생태계의 변화를 가져오고 있다. 온난화, 해수면 상승, 삼각주에서의 강화된 영양염 농도와 퇴적물은 하구역에서의 염분 증가와 산소감소에 기여하며 저서 및 표영 생물계의 상류역에서 분포 변화의 원인이 되고 있다.

기후 모델들은 순 기초 생산력(Net Primary Productivity)이 2006~2015년에 비하여 2081~2100년에는 RCP 8.5 시나리오 상에서 약 4~11% 감소할 것으로 예상하고 있다. 이와 같은 감소 원인은 온난화, 성층화,

빛의 투과, 영양염 및 포식 등의 결과가 결합된 것으로 판단하며 저위도와 고위도에서 지역적 차이를 나타낼 것으로 예상한다. 열대 해역의 순 기초 생산력은 RCP 8.5 시나리오에서 약 7~16% 감소할 것으로 예상하였다. 전 세계적으로 해양 상층부에서 해저로 유입되는 유기물의 침강 플럭스는 특히 열대해역에서 성층 강화와 영양염 공급 감소로 인하여 RCP 8.5 시나리오 상에서 약 9~16% 감소할 가능성이 매우 높으며 또한 심해 생태계로의 유기탄소의 공급을 감소시킬 것으로 내다보았다.

다양한 기후변화 지수를 통해 새로운 해양 상태는 앞으로 다가올 세기에 해양의 상당한 부분에 점진적으로 위기를 가져올 것으로 내다보았다. 생태계 모델에서는 우선 pH, 그 다음은 표층 수온, 해양 내부의 산소, 해양 상층부 영양염 마지막으로는 순 기초 생산력의 순서로 위기가 다가올 것임을 말하고 있다.

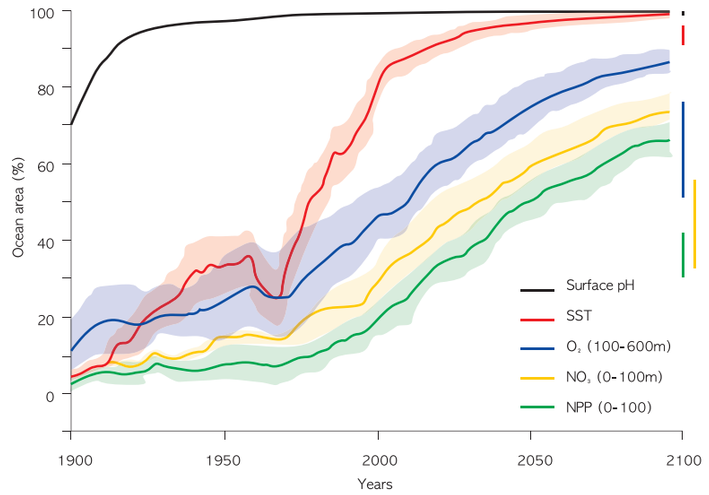


그림 2-1-8 해양 주요 인자; 표층수온, 표층 pH, 100~600m 산소농도, 0~100m 질산염 및 0~100m 순 기초 생산력의 위험 발생 시기

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

4) 전 세계 해양의 수산업 관련 영향 및 예상

이미 많은 해역에서 잡는 어업과 그들의 구성이 온난화 및 기초 생산력 변화에 따른 성장, 재생산, 수산자원의 생존에서 영향을 받고 있다. 20세기의 해양 온난화와 기초 생산력 변화는 약 3 %/decade의 규모로 종사 인구의 감소를 가져오며, 약 4.1%의 최대 잠재 어획량의 감소를 가져오면서 많은 수산자원의 생산성 변화에 영향을 주고 있다. 전 세계 대양의 많은 대륙붕 해역 생태계에서 1970년 이후 잡는 어업의 주요 종은 주로 난류성 어종(Warm-water species)이 지배적으로 증가하고 있다.

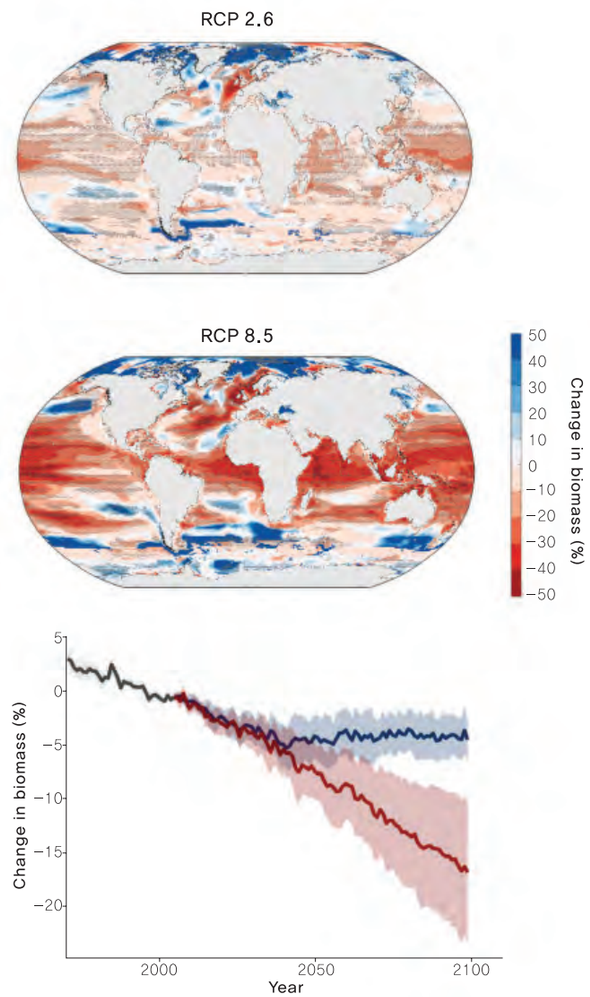


그림 2-1-9 FISMIP(Fisheries & Marine Ecosystems Impact Model Intercomparison Project)에 의해 예측된 1986~2005년 대비 2085~2099년의 총 해양 생물 생체량의 변화

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

온난화로 인한 수산자원의 공간적 분포와 풍도의 변화는 이미 중요한 어업 관리 및 경제적 이익에 도전하고 있다. 기존의 국제 및 국내 해양과 수산 거버넌스의 경우, 수산자원에 대한 기후 영향으로 관측된 생태적, 경제적, 사회적으로 감소되는 효율성에 대한 우려가 제기되고 있다.

21세기 동안 예측되는 해양 온난화와 순 기초 생산력 변화는 변화의 방향과 크기에 따라 지역적 차이를 보

이겠지만, 전 세계 해양 생물의 생체량과 수산자원의 최대 잠재 어획량 감소를 일으켜 해양생물의 군집 구조에 큰 변화를 줄 것이다. 수산자원을 포함한 해양 생물의 전 지구 생체량은 1986~2005년 대비 2080~2099년까지 RCP 2.6과 RCP 8.5 시나리오에서 각각 4.3±2.0% 및 15.0±5.9% 정도로 감소할 것으로 예상되고 있다. 최대 잠재 어획량은 RCP 2.6에서 2.8~9.1%, RCP 8.5에서는 16.2~25.5%까지 감소할 것으로 예측하고 있다.

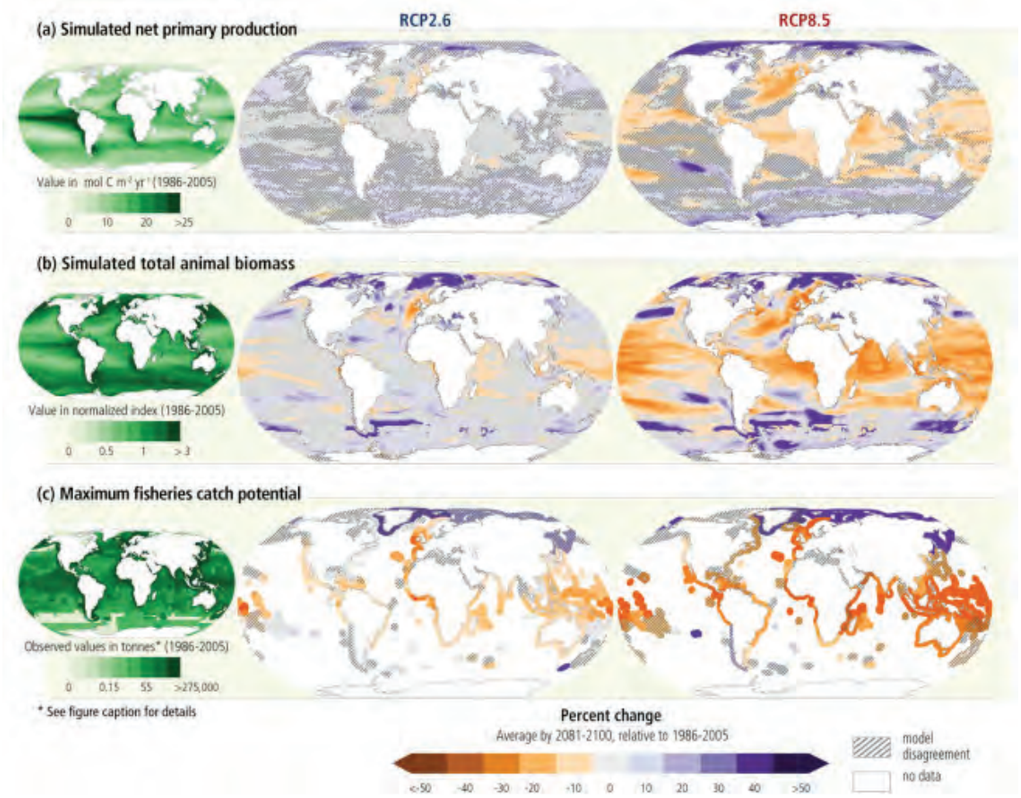


그림 2-1-10 1986~2005년 대비 2081~2100년에 예상되는
(a) 순 기초 생산력, (b) 총 해양생물 생체량, (C) 최대 잠재 어획량의 공간적 변화 예상

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

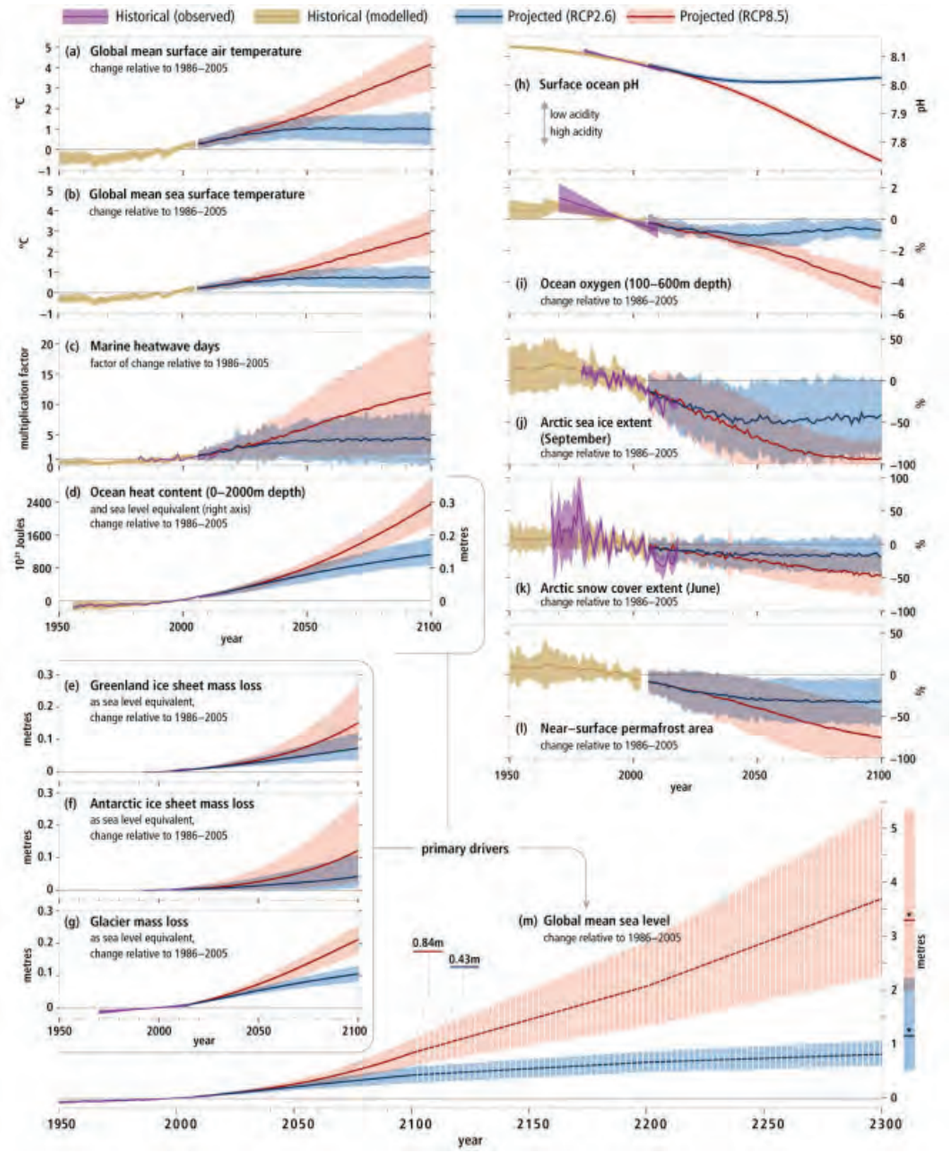


그림 2-1-11 해양/빙권에서 과거와 미래의 변화 예측
(a) 전지구 평균 기온, (b) 전 지구 평균 수온, (c) 이상 고수온 발생일수, (d) 해양 열용량, (e) 그린랜드 빙상 질량 감소, (f) 남극 빙상 질량 감소, (g) 빙하 질량 감소, (h) 표층 pH, (i) 해양 산소, (j) 북극 얼음 면적, (k) 북극 눈 덮임 면적, (l) 영구동토층, (m) 전지구 해수면 상승

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

전 세계 해양생물의 생체량 및 잠재 어획량의 예상되는 감소는 해양 수산에 의존적인 인간 공동체의 수입, 생계 및 식량안보에 대한 위험을 상승시킬 것이다. 또한 어업에 대한 기후변화의 영향으로 예상되는 어획 지역 사용자와 정부 또는 같은 국가 내의 다른 지역 사회 간의 잠재적인 갈등의 위험이 높아질 수 있다.

1980년대 초반부터 연안지역을 중심으로 온난화, 산소 감소 및 부영양화의 영향으로 유해조류(Harmful Algal Bloom)의 대량 출현 및 병원성 유기체(예, 비브리오 등)의 발생 증가가 나타났으며, 이는 식량 공급, 관광, 경제 및 인간의 건강 등에 부정적인 영향을 미쳤다. 이러한 영향은 기후변화와 인간 활동에 의한 상호작용에 따른 종간의 반응에 의한 효과로 판단된다. 모니터링이 이루어지지 않은 해역의 인간 군집에는 이와 같은 생물학적 위협이 가장 취약하게 나타날 수 있다.

5) 관측되고 예측되는 전 세계 해양 경향

앞서 살펴본 바와 같이 기후변화에 의하여 전 세계 해양은 물리적, 생지화학적, 생물학적 및 수산업에도 많은 변화가 발견되었으며, 예측되고 있다. 이를 종합하면 지구의 기온은 상승하고, 수온도 상승할 것이며, 이상 고수온 발생이 급격히 증가하고, 해양 내부의 열용량도 증가할 것이다. 남극, 그린랜드 및 빙하의 질량은 감소하고, 북극의 얼음 면적과 눈 덮임 면적은 감소할 것이다. 표층의 pH 감소는 해양산성화를 강화할 것이며, 해양 내부의 산소 농도는 급격히 줄어들 것이다. 이와 같은 영향으로 해양 표층부의 성층화는 심화되면서 영양염의 표층 공급은 급격히 줄어들 것이다. 온난화와 성층의 영향에 의하여 기초생산력은 막대한 영향을 받을 것이며, 이로 인하여 해양생물의 공간적 이동과 생체량의 감소가 나타날 것이다. 뿐만 아니라 수산업의 영향을 받아 전체적으로 최대 잠재 어획량이 이번 세기말에 가면 급격히 감소할 것이다. 이와 같은 영향은 정도의 차이는 있으나 IPCC의 모든 온실가스 배출 시나리오에서 예상되고 있으며, 배출 정책 강화에 따라 그 피해 및 규모를 줄일 수 있을 것이다.

제 2절 우리나라 해역 수온 및 열용량 변화

1) 우리나라 해역 표층수온 장기변동 경향

한반도 연근해역의 장기 해황변동을 이해하고, 장단기 해어황 예측을 위한 기초자료 축적 및 기후변화와 관련된 해양변동을 파악하기 위한 한국 연근해 해양조사는 1921년, 국립수산과학원의 구. 중앙 수산시험장 시절부터 시작되었다. 1921년부터 1960년까지 해양조사는 수온, 염분, 용존산소 등 10개 항목에 대하여 실시되었으며, 조사정점은 한국 연근해 14개 정선, 122개 정점(그림 2-2-1)에 대하여 난센채수기, 전도온도계, BT 장비 등을 이용하여 년 2~6회의 조사를 수행하였다.

1961년부터 보다 상세한 조사를 하기 위하여 (구)국립수산진흥원은 종전 14개 정선을 전면 개편하여 22개

정선을 신설하였으며, 년 6회 조사를 정기적으로 실시하여 해·어황 예보를 실시하였다. 조사항목은 수온, 염분, 용존산소, 영양염류, 동식물 플랑크톤 등 13개 항목으로 늘었으며, 조사방법도 BT, 전도온도계, 난센 채수기에서 1980년대 후반부터 CTD(Conductivity Temperature Depth)로 전환되었으며, 1990년대에 들어서 Rossette Water Sampler를 이용한 채수를 수행하게 되었다. 또한 1995년부터 동중국해 3개선 32개 정점이 추가되어, 현재 총 25개 정선, 207개 정점(그림 2-2-2)이 운용되고 있으며 동·서·남해 해양조사는 각 해역 연구소(동해수산연구소, 서해수산연구소, 남해수산연구소)에서 년 6회(2, 4, 6, 8, 10 및 12월)에 걸쳐 전담 운영하고 있으며, 동중국해 해양조사는 국립수산과학원 기후변화연구과에서 년 4회(2, 5, 8 및 11월)에 걸쳐 운영하고 있다.

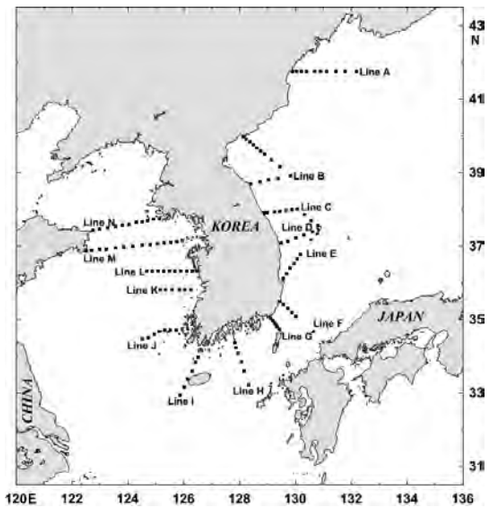


그림 2-2-1 국립수산과학원의 1960년 이전 정선 해양관측점 위치도 (1960년 이전)

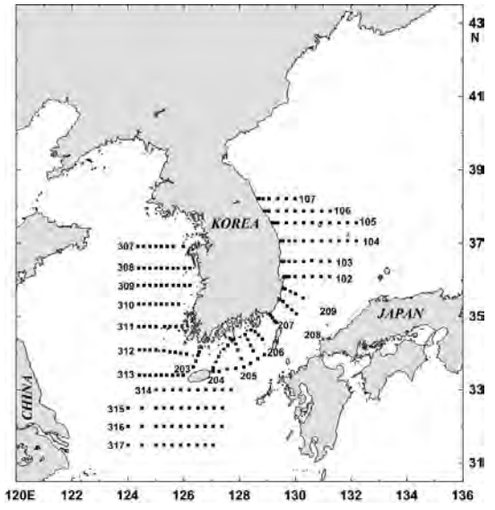


그림 2-2-2 국립수산과학원에서 현재 운영중인 정선 해양관측 정점 위치도 (1961~현재)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

이로부터 얻어진 자료는 한국해양자료센터를 통하여 온라인으로 배포되고 있으며, "해양조사연보"를 통하여 오프라인으로 유관기관 및 하계에 배포되어 지고 있다. 이 자료를 이용하여 최근 51년간의 우리나라 연근해 연평균 표층수온의 변동 경향을 살펴보면, 최근 51년간(1968~2018년)은 1.23℃ 상승하였으며 연간 0.0241℃ 상승하는 양상을 나타내어 같은 기간 전 세계 연평균 표층수온 상승률(0.49℃/51yrs, 0.0096℃/yr)의 2.5배 내외 높은 수준을 나타내었다(그림 2-2-3).

해역별로 살펴보면 동해의 연평균 표층수온 상승률이 가장 높아 최근 51년간(1968~2018년) 1.43℃ 증가한 것으로 나타난 반면, 서해는 같은 기간 1.23℃ 증가하였으며, 남해는 우리나라 해역 중 가장 수온 상승률이

낮아 같은 기간 1.03℃ 상승하는데 머물렀다(그림 2-2-4). 이와 같이 남해나 서해에 비하여 동해의 수온 상승률이 높은 이유는 최근 50여년 사이 동해 중부해역에 위치하고 있는 아극전선(Sub-polar front)의 북상이 중요한 이유로 판단되며, 상대적으로 조류의 영향이 강한 서해나 남해에서 연안역의 강한 연직 혼합에 의해 수온 상승률이 낮게 나타나는 것이 주된 원인으로 판단된다.

실제로 최근 51년간 우리나라 주변 해역의 연평균 표층수온 상승 경향을 공간적으로 살펴보면, 동해 외해역 및 서해남부 외해역에서 수온 상승이 가장 높게 나타나 최근 51년간 1.6℃ 이상 표층수온이 상승한 것을 확인할 수 있다(그림 2-2-5). 반면 남해 연안 및 서해 남부 연안의 수온 상승률은 매우 낮게 나타나는 특징을 보이고 있으며, 이는 조석 혹은 바람 등에 의한 강한 연직 혼합이 작용하는 해역으로 이에 대한 영향이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

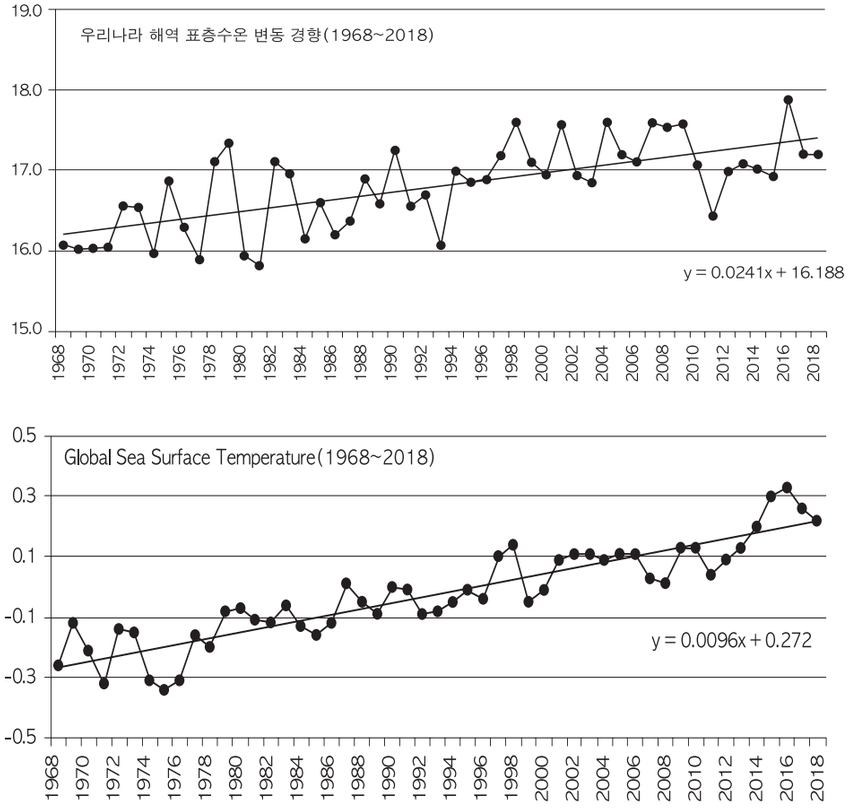


그림 2-2-3 1968~2018년까지 최근 51년간 우리나라 주변(상) 및
전 지구 평균(하)의 연평균 표층수온 장기변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

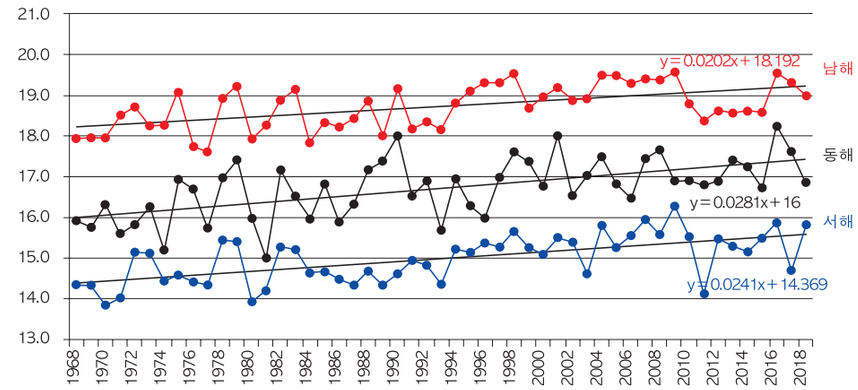


그림 2-2-4 1968~2018년까지 최근 51년간 동해, 서해 및 남해의 연평균 표층수온 장기변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

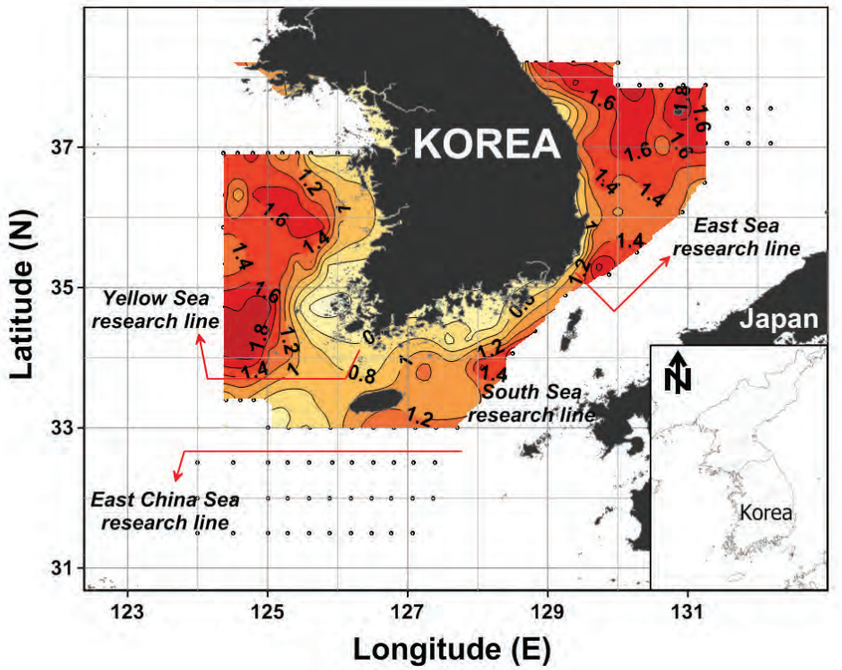


그림 2-2-5 1968~2018년까지 최근 51년간 우리나라 주변해역 연평균 표층수온의 공간적 상승 경향 분포

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

표 2-2-1 정선해양관측조사에 의한 동해, 남해, 서해 및 우리나라 전체의 2000년 이후 연도별 평균 연평균 수온 변동 경향

[출처 국립수산과학원 기후변화연구과]

연도	동해	남해	서해	우리나라 전체
2000	16.8	19.0	15.1	16.9
2001	18.0	19.2	15.5	17.6
2002	16.6	18.9	15.4	16.9
2003	17.0	18.9	14.6	16.9
2004	17.5	19.5	15.8	17.6
2005	16.8	19.5	15.3	17.2
2006	16.5	19.3	15.6	17.1
2007	17.5	19.4	16.0	17.6
2008	17.7	19.4	15.6	17.5
2009	16.9	19.6	16.3	17.6
2010	16.9	18.8	15.5	17.1
2011	16.8	18.4	14.1	16.4
2012	16.9	18.6	15.5	17.0
2013	17.4	18.6	15.3	17.1
2014	17.3	18.6	15.2	17.0
2015	16.7	18.6	15.5	16.9
2016	18.2	19.6	15.9	17.9
2017	17.6	19.3	14.7	17.2
2018	16.9	19.0	15.8	17.2

표 2-2-1은 국립수산과학원의 정선해양관측에서 얻어진 표층 수온자료를 기반으로 2000년 이후 동해, 서해, 남해 및 우리나라 전체 해역의 연평균 표층수온의 연별 변화 경향을 나타내고 있다. 해역별 및 우리나라 전체 해역의 연평균 표층수온은 연간 변화가 매우 크게 나타나고 있다는 것을 확인할 수 있다.

JMA(Japan Meteorological Agency)는 COBE-SST(Centennial in situ Observation-Based Estimates of the variability of sea surface temperature and marine meteorological variables-Sea Surface Temperature)를 구축하였으며, 이 자료를 활용하여 동아시아 주변 해역의 장기 해면수온 자료를 분석하였다. JMA는 13개 해역을 구분하여 장기 해면수온 변동 경향을 살펴보았지만, 우리나라에 직접적인 영향이 있는 4개 해역(동해 중부, 동해 남서부, 황해 및 동중국해 북부)에 대한 장기 변동 경향을 살펴보았다(그림 2-2-6).

동해중부해역의 경우, 연평균의 경우 100년을 기준으로 연평균 1.70℃ 상승하는 경향을 보였으며, 계절

별로는 겨울(1~3월)이 2.28℃, 가을(10~12월)이 1.92℃, 봄(4~6월)이 1.77℃, 여름(7~9월)이 0.96℃로 겨울철 수온 상승 경향이 여름철에 비하여 두 배 이상 높은 것으로 나타났으며, 1907년 이후 연평균 해면수온이 가장 높은 다섯 해는 2010년(+1.3℃), 1998년(+0.9℃), 1953년(+0.9℃), 2017년(+0.8℃), 2008년(+0.6℃)로 나타났다(평년치 : 1981~2010년의 30년간 평균)(그림 2-2-7).

그림 2-2-6 JMA COBE-SST에 의한 우리나라 주변 해역 구분도

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

동해 남서부 해역은 100년을 기준으로 연평균 1.29℃ 상승하는 경향이었으며, 가을이 1.59℃, 겨울은 1.52℃, 봄은 1.39℃, 여름은 0.77℃ 상승하는 것으로 나타났다. 동해 남서부의 경우, 가을과 겨울의 수온 상승이 높았으며, 역시 여름철에 비하여 두 배 이상 높은 상승 경향을 나타내었다. 1908년 이후 연평균 해면수온이 가장 높은 다섯 해는 1998년(+1.4℃), 1954년(+0.9℃), 2016년(+0.8℃), 2001년(+0.7℃), 1975년(+0.7℃)이다.

황해의 경우, 100년을 기준으로 연평균 1.27℃ 해면 수온이 상승하였으며, 겨울은 1.86℃, 가을이 1.28℃, 봄은 1.28℃, 여름이 0.62℃ 상승하는 경향을 나타내었다. 황해의 경우는 여름철의 수온 상승에 비하여 겨울의 수온 상승이 3배 내외 높은 특색을 나타내었다. 1900년 이후 연평균 해면수온이 가장 높은 다섯 해는 1997년(+1.0℃), 2017년(+0.8℃), 1948년(+0.8℃), 1998년(+0.6℃), 1961년(+0.6℃) 이다.

동중국해 북부해역은 100년 기준으로 1.23℃ 상승하는 경향을 나타내었으며, 겨울은 1.54℃, 가을이 1.51℃, 봄은 1.06℃, 여름은 0.76℃ 상승하였다. 동중국해 북부해역 역시 여름에 비하여 겨울 혹은 가을의 수온 상

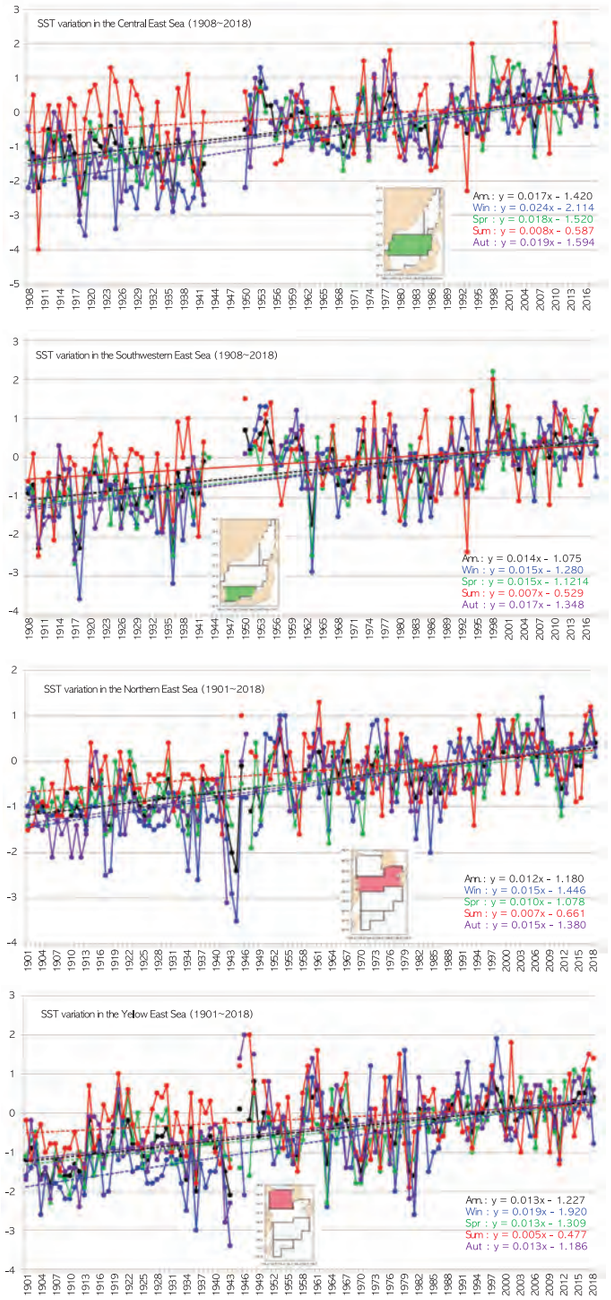


그림 2-2-7 JMA COBE-SST에 동해중부, 동해남서부, 황해 및 동중국해 북부해역의 장기 수온 변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

승률이 두 배 이상 높게 나타났다. 1900년 이후 연평균 해면수온이 가장 높은 다섯 해는 2017년(+0.9℃), 1998년(+0.9℃), 2016년(+0.7℃), 2007년(+0.7℃), 2001년(+0.7℃)이다.

4개 해역의 100년 이상 해면수온 상승경향에 대한 연평균 및 계절별 특성을 살펴보면, 우리나라 주변해역의 경우 저위도에서 고위도로 올라갈수록 수온 상승률이 높은 특징을 보이고 있다. 여름에 비하여 겨울의 수온 상승경향이 두 배에서 3.5배까지 높은 특징을 보이고 있어, 우리나라 주변해역의 장기 해면수온 상승 경향은 겨울/가을철 수온 상승이 지배적으로 나타나고 있다. 같은 데이터(COBE-SST)로 분석한 전 세계 해면수온의 평균 상승률 0.54℃/100년, 북태평양 해면수온의 평균 상승률 0.51℃/100년에 비하여 동해 중부해역의 경우 3배 이상, 그 외 동해 남서부해역, 황해 및 동중국해 북부해역의 경우는 2배 이상 높은 경향을 나타낸다. 또한 110년 이상의 관측기간 중의 각 해역별로 가장 높은 연평균 해면수온을 나타낸 다섯 해를 분석한 결과, 2000년 이후 가장 높은 연평균 수온의 상위 다섯 해에 포함된 숫자는 동해 중부 해역이 3년(2008, 2010, 2017년), 동해 남서부 해역이 2년(2001, 2016년), 황해 해역이 1년(2017년), 동중국해 북부해역이 4년(2001, 2007, 2016, 2017년)으로 나타나 최근 20여년 사이 우리나라 주변해역의 해면수온이 높은 해가 집중적으로 분포하고 있음을 확인할 수 있었다.

2) 우리나라 해역 열용량의 변동 경향

태양으로부터 유입되는 열은 지구의 온도를 적절하게 데워주고, 유입된 양만큼 다시 열이 지구 밖으로 빠져나감으로써 지구의 온도를 일정하게 유지될 수 있다. 태양으로부터 유입된 열의 일부는 대기와 해양의 온도를 변화시키는데 이 열의 양은 대기나 해수의 비열, 밀도 그리고 온도변화에 의해 결정된다(조, 2004).

최근 전 지구적으로 기후의 변화가 가중되는 것은 온실가스의 급속한 증가 때문으로 알려져 있다. 이러한 온실 가스는 지구의 온도를 상승시킬 뿐만 아니라 지구에너지 순환에 심각한 불균형을 초래한다(Rhein et al., 2013; Trenberth et al., 2014; Von Schuckman et al., 2016). 이렇게 발생된 에너지의 93%는 바다에 흡수되어 해양열용량(OHC, Ocean Heat Content)을 급속히 상승시킨다. 해양에서의 열용량은 얼마나 많은 열을 저장하는지를 나타내는 수치이며, 해양열용량의 변화는 일정한 체적의 해수가 가지는 평균수온의 변화에 밀접히 비례하고 여기서 기준이 되는 기간으로부터의 편차로 정의된다(Bindoff et al., 2007). 또한 해양열용량은 해양의 기후학적 시스템을 이해하는데 중요한 정보를 담고 있다(Cheng et al., 2019).

전 세계 해양은 부영양화, 과도한 어업, 서식지 파괴, 저산소 심화, 새로운 종의 유입 등 인간 활동에 의해 영향을 받지 않은 해역은 거의 없으며(Richardson and Poloczanska, 2008; 이 등, 2010), 최근 연구에서는 상층 해양과 깊은 수심에서의 열용량은 수십 년간 인간 활동에 의해 증가한다고 밝혔다(Abraham et al., 2013; 김대혁, 2016)

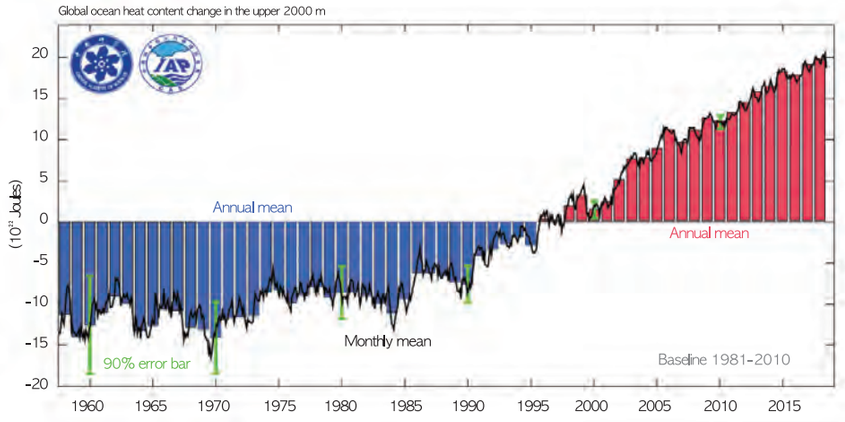


그림 2-2-8 0~2000m 층에 대한 전지구 해양의 연평균 및 월평균 열용량 변화

(기준 : 1981~2010년 의 평균값)

[출처 : IAP(Institute of Atmospheric Physic) ocean analysis]

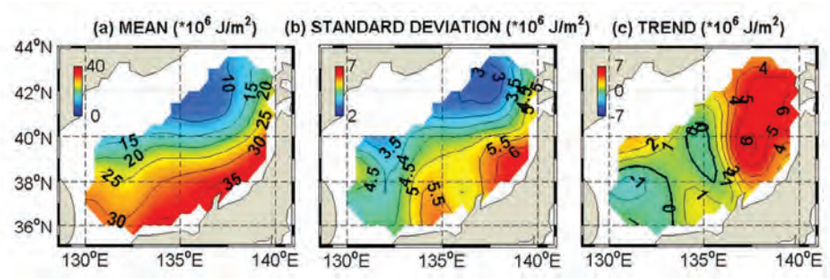


그림 2-2-9 0~300m 층에 대한 동해의 40(1968~2007)년간 해양열용량의 a)평균, b)표준편차 및 c)경향성

[출처 : Na et al., 2012]

IPCC 제 4차 평가보고서(AR4)에 의하면 1961~2013년 기간 동안 전지구 해양의 온도는 표층부터 700m 수심까지 0.10℃ 증가했다. 제 3차 평가보고서(TAR)는 해양의 상부 3000m에 대한 해양열용량의 변화를 보고하였고(Bindoff et al., 2007), Lyman et al.(2010)은 전 세계 바다의 상층 300m 해양의 지구온난화에 대해서는 수십 년 동안 연구가 되어 왔으며, 지구 전체 에너지의 흡수는 대부분 상층 해양에서 일어난다고 보고하였다. Cheng et al.(2019)은 1955~2010년 까지 전 세계 해양에서 0~700m와 0~2000m 층에서의 열용량을 분석한 결과 전 세계 해양에서 0~700m와 0~2000m의 열용량은 지난 56년 동안 각각 0.27W/m^2 과 0.39W/m^2 증가한 것으로 밝혔다. Cheng et al.(2019)은 IAP(Institute of Atmospheric Physic)에서 실시한 해양온도분석 자료를 이용하여 수심 2000m까지의 해양열용량은 1981~2010년에 평균값과 비교하여 2018년에 19.67×1022 Joules 로 가장 높게 나타났으며, 이는 2017년 중국 총발전량보

다 388배가 높은 값이라고 밝히기도 했다(그림 2-2-8).

Na et al.(2012)은 1968~2007년까지 40년간 수온 및 염분 자료를 이용하여 수심 300m까지 동해의 해양열용량 변동성 살펴본 결과 평균과 표준편차는 우리나라 연안 근처보다 일본의 서측에서 비교적 높고, 동해의 북서쪽이 낮게 나타났으며, 해양열용량은 100m에서의 평균 수온과 0.99의 높은 상관성을 나타낸 것으로 제시하였다(그림 2-2-9).

본 절에서는 최근 우리나라 해역의 열용량 변화를 알아보고자 지난 19년간(2000~2018년) 정선해양관측자료를 이용하여 상층해양의 수온과 열용량의 장기변동성 제시하고자 한다.

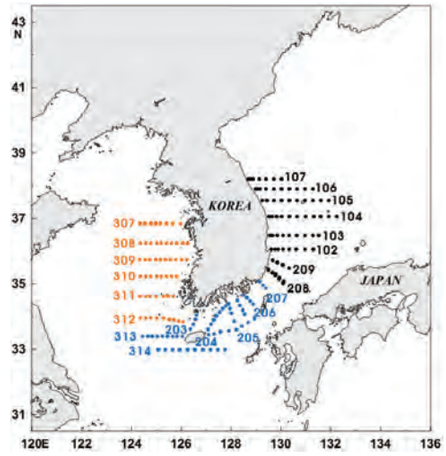


그림 2-2-10 해양열용량 산정에 사용된 정선해양관측지점의 위치

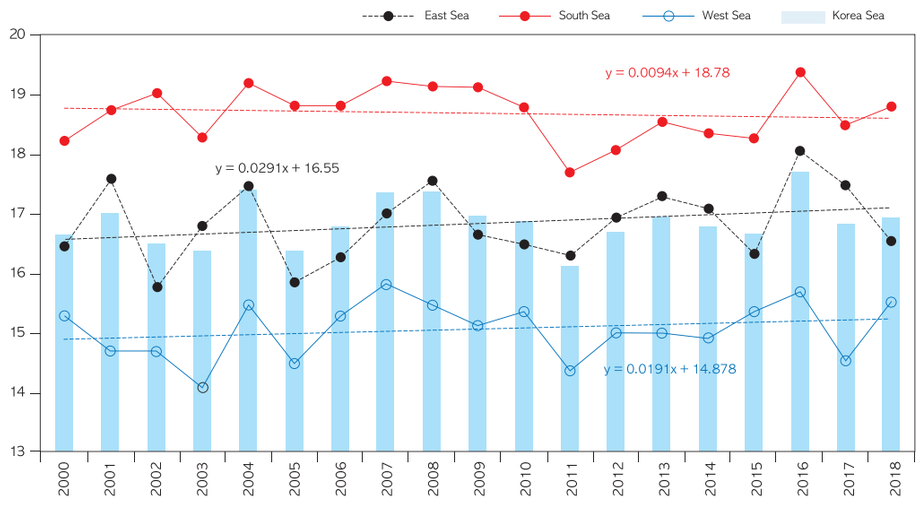
[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

해양열용량을 산정을 위해 사용한 수온관측 정점은 국립수사과학원의 정선해양관측자료 중에서 동해 8개선 63개 정점, 남해 8개선 54개 정점, 서해 6개선 52개 정점 등 총 22개선 169개 정점(그림 2-2-10)이며, 분석기간은 최근 19년간(2000~2018년)으로 정하였다. 이는 국립수산과학원에서 1997년 이후 정선별 관측정점의 수를 11(동해 5, 남해 5, 서해 1)개 추가하였을 뿐만 아니라, 모든 해역에서 본격적으로 CTD를 이용한 수심별 수온을 관측하기 시작함으로써 해양열용량 산정시 해역별로 보다 정확도가 높은 결과를 산출할 수 있을 것으로 판단하여 선정하였다. 정선해양관측조사는 6회/년(2, 4, 6, 8, 10, 12월) 선박을 이용하여 실시되며, 관측 수심은 정점별로 차이가 있다. 해양의 열용량을 계산하기 위해 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$Ocean\ Heat\ Content = \int_{-H}^{0} \rho C_p T(z) dz$$

여기서, H는 수심, ρ는 밀도, Cp는 비열, T는 수온을 나타낸다. 수심(H)은 정선해양관측자료의 정점별 실제 관측된 수심을 바탕으로 동해는 500m, 남해는 100m, 서해는 75m를 기준으로 하였다. 밀도(ρ)는 동·서·남해 동일하게 1025kg/m^3, 비열(Cp)은 동해는 3850J/kg·℃, 남해와 서해는 3993J/kg·℃를 적용하였다.

그림 2-2-11 최근 19(2000~2018)년간 연평균 우리나라 전체 및 해역별 연평균 표층수온변동 경향



[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

국립수산과학원에서 제공하는 정선해양관측자료를 기반으로 최근 19년간(2000~2018년) 연평균 표층수온 변동을 살펴보면, 우리나라 연근해 연평균 표층수온은 연간 0.0121℃상승하여, 최근 19년간(2000~2018년) 0.23℃상승하였다. 이는 최근 51년간(1968~2018년) 연간 0.0241℃ 상승한 것 보다 낮아 과거에 비해 최근 표층수온 상승률이 낮아졌음을 알 수 있다. 해역별 연평균 표층수온을 살펴보면 동해는 0.52℃, 서해는 0.34℃ 상승한 것으로 나타난 반면 남해는 0.17℃ 감소하였다(그림 2-2-11). 앞 절에서 제시한 남해의 최근 51년간(1968~2018년)의 연평균 표층수온은 연간 0.0201℃ 상승한 것으로 나타났으나, 최근 19년간(2000~2018년)의 연평균 표층수온은 연간 0.0089℃ 감소하는 것으로 나타났다. 그림 2-2-12에서 최근 19년간(2000~2018년) 평균 수온 대비 각 연도별 표층 수온편차의 변동을 살펴보았다. 동해는 수온편차의 뚜렷한 주기성이 없으며, 2011년 이후 양의 경향성 나타내었다. 남해 역시 동해와 같이 뚜렷한 주기성은 없었으나, 2010년을 기점으로 그 이전에는 양의 값을 이후에는 음의 값의 경향성이 뚜렷하였다. 반면 서해는 3~4년을 주기로 변동성을 나타내었다.

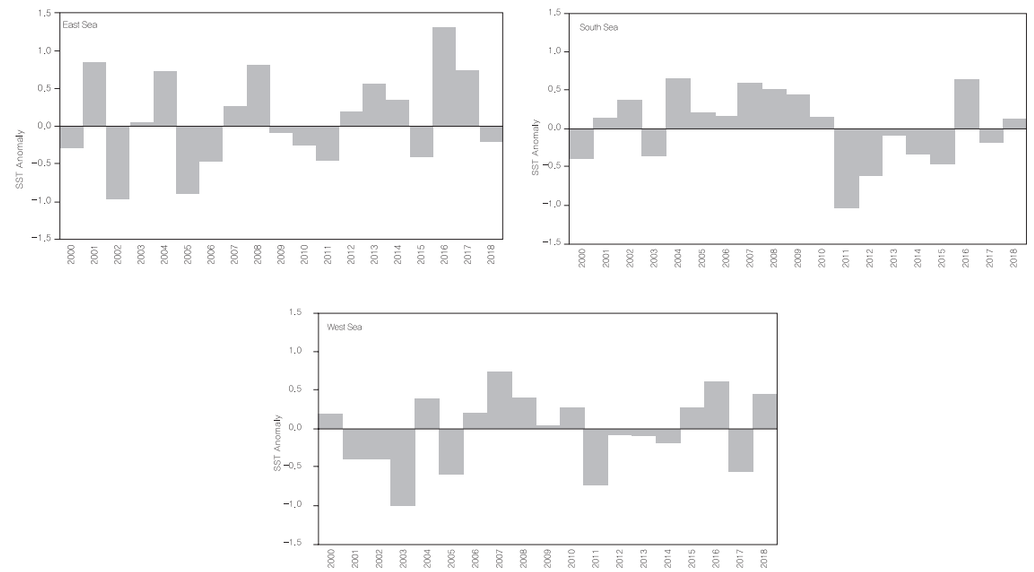


그림 2-2-12 2005~2015년간 평균 수온 대비 평균 표층수온 변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

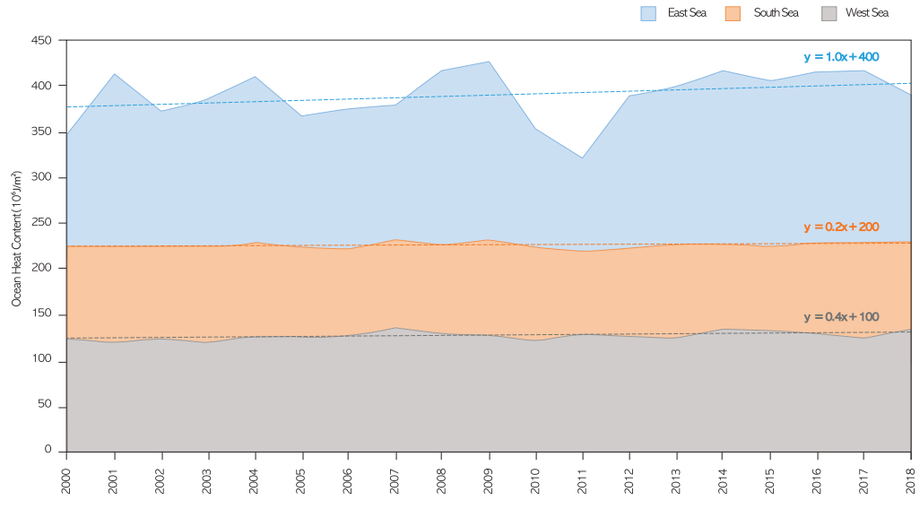


그림 2-2-13 최근 19(2000~2018)년간 해역별 연평균 해양열용량의 변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

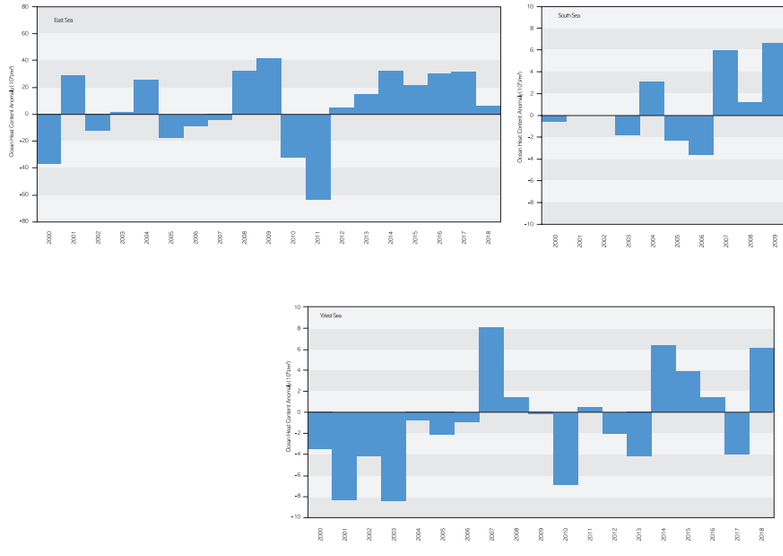


그림 2-2-14 2005~2014년간 평균 해양열용량 대비 평균 해양열용량의 변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

최근 19년간(2000~2018년) 해양열용량의 시계열 변화를 그림 2-2-13에 나타내었다. 그 결과를 살펴보면 전 해역에서 해양열용량의 상승 경향을 확인할 수 있다. 동해는 연평균 $18\times10^{6}Jm^{-2}$, 남해는 $3.6\times10^{6}Jm^{-2}$, 서해는 $7.2\times10^{6}Jm^{-2}$ 상승하여, 동해의 해양열용량 상승경향이 가장 높게 나타났다. 그림 2-2-14은 지난 10년간(2005~2014년)의 평균 해양열용량 대비 각 연도별 연평균 해양열용량의 편차를 나타낸 것으로 동해는 최근 7년간(2012~2018년) 평균편차가 $20\times10^{6}Jm^{-2}$ 으로 지난 10년간(2005~2014년)의 평균 해양열용량 대비 높은 값을 나타내었다. 남해는 2010~2012년을 제외하고 최근 13년간(2007~2018년) 평균편차가 $2.4\times10^{6}Jm^{-2}$로 지난 10년간(2005~2014년)의 평균 해양열용량 대비 높은 값을 나타내었다. 서해는 동·남해와는 달리 2014년 이전에는 지난 10년간(2005~2014년) 평균 해양열용량 대비 평균 $-2.5\times10^{6}Jm^{-2}$ 값을 나타낸 반면 최근 5년간(2014~2109년) 평균 $2.8\times10^{6}Jm^{-2}$값을 나타내었다.

해양열용량은 위에서 제시한 식과 같이 수온과 밀도를 이용하여 계산한다. 해양에서의 밀도는 일반적으로 큰 변화가 없으므로, 해양의 열용량은 수온에 의한 영향을 크게 받는다. 또한 해양의 열에너지는 대기로부터의 열에너지를 흡수·방출하여 상층 수온이 증가하거나 감소하게 된다. 이러한 해양은 대기의 바람에 의해 혼합이 이루어지며, 이는 깊은 심층까지 대기의 열에너지가 전달하는 역할을 한다(김, 2016).

따라서 전체 19년간의 분석기간에서 해양열용량과 전 수심에 대한 평균수온의 상관성을 살펴보기 위해 상관분석을 실시하고 그림 2-2-15에 제시하였다. 상관분석 결과 동해는 0.92, 남해 0.85, 서해 0.92로 전 해역에서 높은 상관성을 나타내었다.

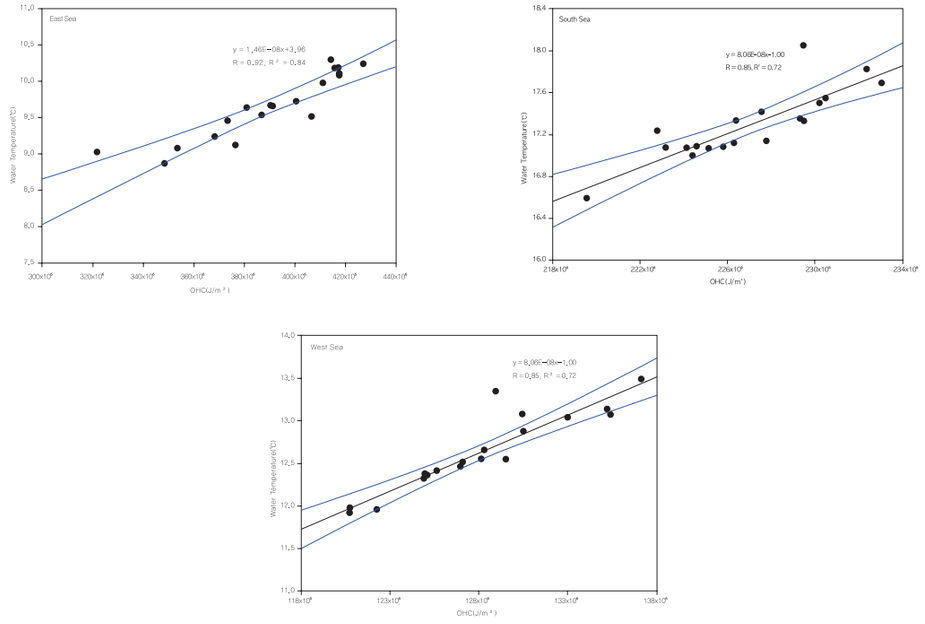


그림 2-2-15 연평균 해양열용량(OHC)과 수온의 상관관계(파란색 선은 95% 신뢰구간)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

제 3절 우리나라 해역 생지화학적 요소 변화

2019년 9월에 승인된 IPCC의 "해양 및 빙권에 관한 특별보고서"에 기술된 것처럼 전 지구적으로 해양의 용존산소가 감소하는 경향(그림 2-1-5)을 보여주고 있고, 질산염도 감소하는 경향을 나타낸다(그림 2-3-1). 해양의 생지화학적 요소의 변화는 해양의 기초생산에 직접적인 영향을 주고, 저차 및 고차 생태계까지 그 영향이 전달된다는 점에서, 우리나라 바다의 장기적인 생지화학적 요소 변화에 대한 분석은 반드시 필요하다고 말할 수 있다.

국립수산과학원은 선박을 이용하여 정기적으로 정선해양관측을 실시해왔고, 이를 통해 우리나라 연근해에 대한 장기간의 생지화학 요소 변동을 모니터링하고 있다. 본 절에서는 기후변화에 따른 염분, 용존산소, 영양염류(질산염, 인산염, 규산염)의 변화에 대해 기존 연구를 분석하고, 정선해양관측 자료를 이용하여 최근 4년간의 생지화학적 요소 변화에 대해 기술하였다.

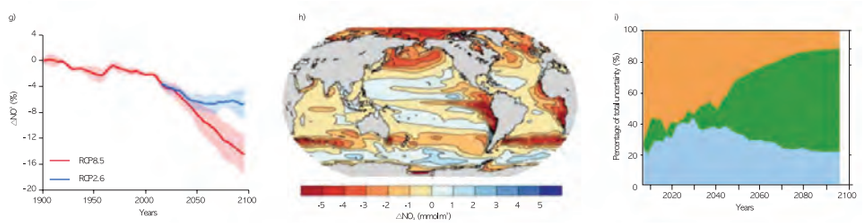


그림 2-3-1 수치모델로 재현 및 예측된 전지구 상층(0~100m) 질산염 변화(1850~1900년 평균값에 대한 편차)

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

1) 염분

염분은 해수를 담수와 구분하게 하는 성분으로 1kg의 물속에 녹아있는 염의 양(g)을 나타낸다. 염분은 수온과 함께 해수의 밀도를 결정하고 해양의 열염순환을 만드는 중요한 요소이다.

국립수산과학원은 미국 해양대기청(NOAA)과 한·미 과학기술 협력사업의 한 프로젝트로서 공동 연구를 통해 고해상도 동아시아해역 수온·염분 아틀라스를 제작하였고 이를 현재 NOAA의 국가환경정보센터(NCEI)에서 운영하는 세계해양자료센터 홈페이지에 제공하고 있다. 겨울철과 여름철의 표층 염분 장기 평균 분포도(염분 기후장)를 통해 우리나라 바다의 계절별 염분 분포 특성을 확인할 수 있다(그림 2-3-2). 일반적으로 겨울철에 비해 강수량이 급증하고 더불어 하천을 통한 담수 유입이 증가하는 여름철에 전체적으로 표층 염분이 감소하는 특징을 보여준다. 수심이 낮고 반폐쇄성 해역으로 육지의 영향을 많이 받는 서해와 발해는 계절과 무관하게 북서태평양에 비해 상대적으로 저염의 특성이 나타난다. 여름철에는 발해 및 서해의 저염화가 강화되며 특히 장강저염수의 확장에 의해 서해 남부와 동중국해 북부가 저염화된다. 그리고 그 영향은 동해에까지 나타난다.

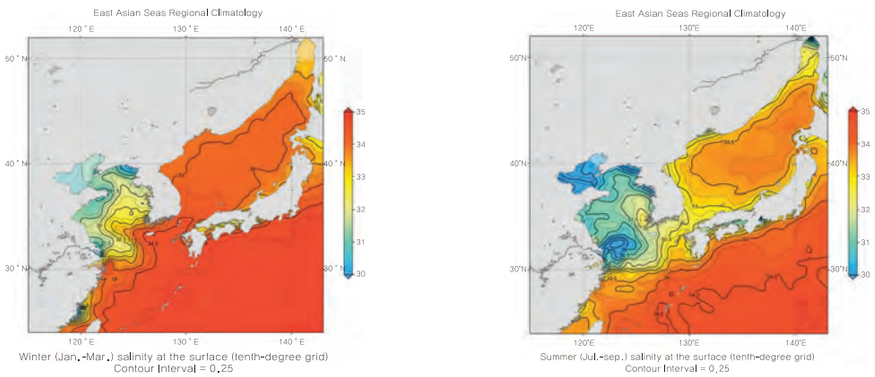


그림 2-3-2 동아시아 표층 염분 기후장 (좌) 겨울철, (우) 여름철

[출처 : 미국 NOAA/NCEI]

국립수산과학원은 1920년대부터 우리나라 바다의 수온과 염분 변화를 모니터링하고 있고, 이로부터 염분의 장기 변동을 계산하여 기후변화의 영향을 파악하였다(그림 2-3-3).

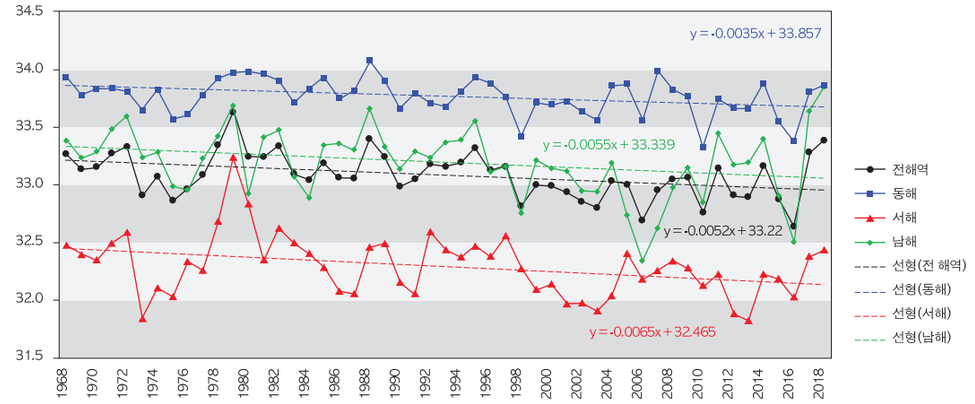


그림 2-3-3 최근 51년간(1968~2018) 우리나라 전체 및 해역별 연평균 표층염분 변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

염분의 장기 변동을 분석하면 지난 1968~2018년까지 51년간 동해는 약 0.18 psu, 서해는 약 0.33 psu, 남해는 약 0.28 psu, 전해역은 약 0.27 psu가 감소하였다. 이러한 저염화 경향은 전 세계적인 증발(E)-강수(P)값의 감소에 따른 표층 염분 저염화 경향((Rhein et al., 2013)과 일치하고, 특히 북서태평양의 염분 변화 값과 유사한 경향을 보였다(그림 2-3-4).

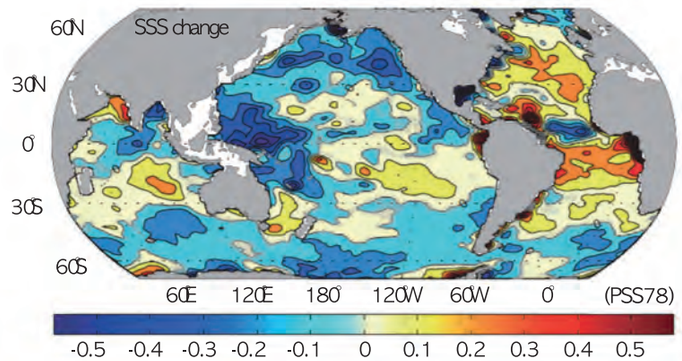


그림 2-3-4 (좌) 전 지구 해양 58년간(1950~2008) 표층 염분변화

[출처 : IPCC AR5 WG1 보고서(2013)]

2) 용존산소

해수중의 용존산소는 해양-대기의 교환을 통한 대기 중 산소의 공급, 식물플랑크톤 및 해조류 등의 광합성에 의한 생산, 수중생물의 호흡에 의한 소비, 유기물의 산화과정 등을 통해 조절된다.

미국 해양대기청(NOAA)의 국가환경정보센터(NCEI)에서 제공하는 세계해양아틀라스 2018 (WOA 2018)의 용존산소 기후값(1960~2018년 평균값)의 표층(그림 2-3-5) 분포를 보면, 우리나라 해역의 용존산소 분포가 대체적으로 등수온선 분포와 유사하게 나타난다는 것을 확인할 수 있고, 수온이 상대적으로 낮은 고위도 해역은 용존산소 농도가 높게, 수온이 높은 저위도 해역은 용존산소가 낮게 나타난다는 것을 알 수 있다. 즉, 온도가 상승하면 산소의 포화용해도가 감소하고, 온도가 하강하면 포화용해도가 증가한다는 일반적인 과학상식과 잘 일치하는 패턴을 보여준다.

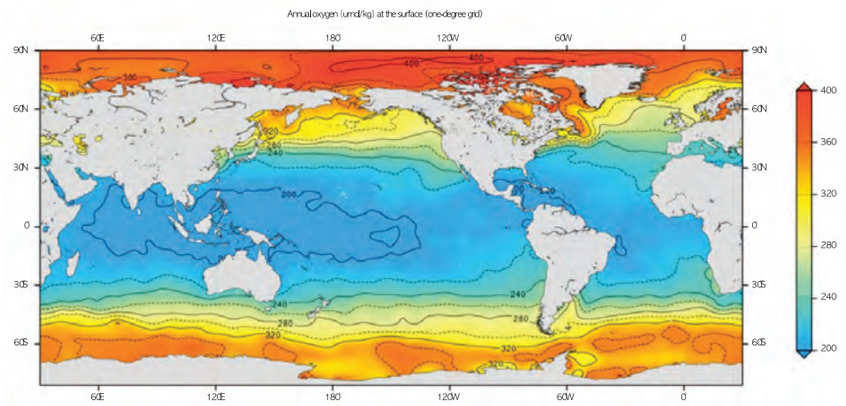


그림 2-3-5 전지구 표층 용존산소 기후값 분포

[출처 : 미국 NOAA/NCEI]

이와 다르게 대기의 영향을 직접적으로 받지 않는 수심 500m의 공간분포(그림 2-3-6)를 보면, 우리나라 주변해역의 독특한 특징을 확인할 수 있다.

특히 동해는 같은 위도에 위치한 북태평양의 다른 해역과 달리 용존산소의 농도가 2배 이상 높고, 동해 내에서도 겨울철 블라디보스톡 외해에서 냉각된 표층해수가 침강하여 저층으로 퍼져나가는 북부가 높은 농도를 나타내고 있다. 이는 밀도가 높은 표층수가 침강하여 형성되는 열염순환과 표층 순환이 서로 엮여서 만들어지는 대양의 큰 순환 고리를 일컫는 "컨베이어 벨트"와 유사한 현상이 비록 그 공간적 크기는 작지만 동해에도 존재한다는 것을 명확하게 보여주는 것이다.

또한 그림 2-3-6의 북태평양의 위도 30도 부근에서 일본 남동쪽에 혀처럼 길게 뻗어있는 상대적으로 용존산소 농도가 높은 해역을 확인할 수 있고, 이는 고온·고염의 쿠로시오와 저온·저염의 오야시오 해류가 만

나서 동쪽으로 흘러가며 혼합되는 해역 표층에서 침강하여 남쪽방향으로 확장되어 수심 300~1,000m에 형성된 북태평양 중층수(NPIW)로서(Talley et al., 1995) 높은 용존산소를 갖는다는 특징을 명확히 보여준다. 북태평양중층수의 공간범위는 서쪽으로 동중국해 남부까지 도달하고, 서안경계류의 형태로 대만 동쪽을 지나 동중국해로 유입되는 쿠로시오의 수괴 형성에 영향을 미치며, 형성되는 시간스케일이 1~1.5년(Shimizu et al., 2004)이라는 점에서, 우리나라 바다의 용존산소 변화에 영향을 미칠 수 있는 또 하나의 요소가 될 수도 있다.

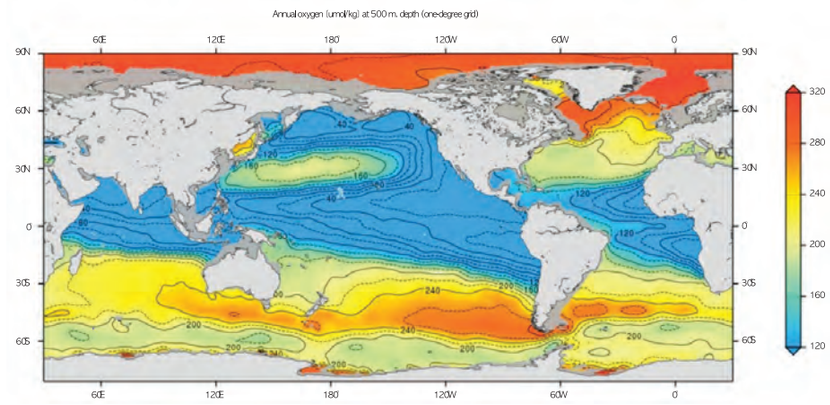


그림 2-3-6 전지구 500m 용존산소 기후값 분포

[출처 : 미국 NOAA/NCEI]

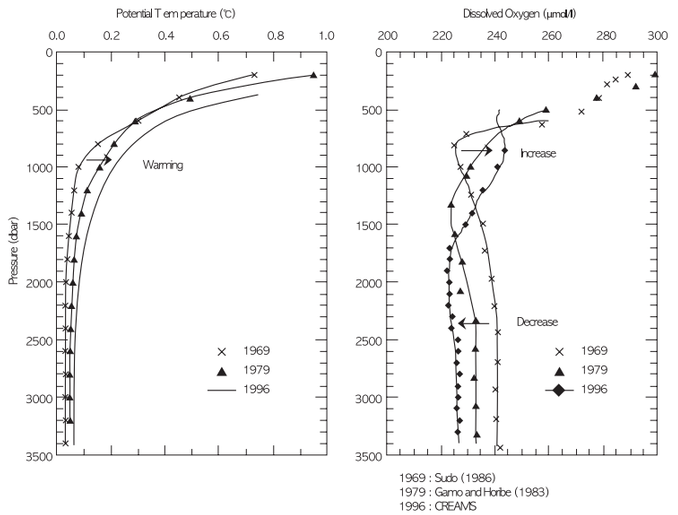


그림 2-3-7 동해 중심부의 온위 및 용존산소 변화

[출처 : Kim et al.(2004)]

한반도 주변해역에 대한 용존산소 장기 변동에 대한 연구는 일반적으로 해역별로 수행되어왔다. 동해의 용존산소 장기 변동과 관련하여 Kim et al.(2004)은 수심 400~1,500m에 0.12~0.6℃의 수온을 갖는 동해중앙수(ESCW)의 용존산소는 1969년 이후로 증가하는 반면 그 보다 깊은 수심에 존재하는 동해심층수(ESDW)와 동해저층수(ESBW)에서는 용존산소가 감소하고 있다고 밝혔다(그림 2-3-7). 이는 지구온난화로 인해 동해 북부 블라디보스톡 외해의 표층수 침강으로 시작되는 열염순환에 변화가 생긴 것으로, 저층까지 침강해야하는 표층수가 중층까지만 침강하여 퍼져나가게 되는 것이다.

서해의 용존산소 장기변동과 관련하여 Lin et al.(2005)은 25년간(1976~2000년)의 용존산소 관측자료로부터 서해의 전층에서 용존산소가 감소하는 경향을 보이고 있고, 25년간 전 수층 평균 59.1 μmol/L(약 1.32 ml/L)가 감소하였다고 보고하였다(그림 2-3-8). 이는 연 감소율 약 0.053 ml/L에 해당하는 값이다. 표층의 연 감소율은 약 0.055 ml/L, 저층의 연 감소율은 약 0.075 ml/L로 보고되었다.

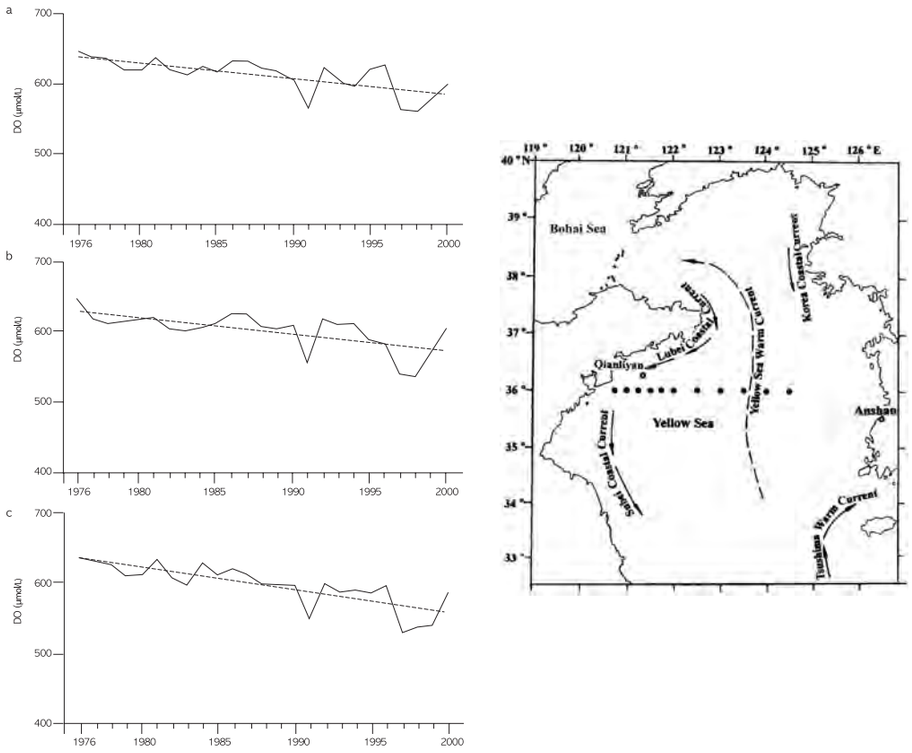


그림 2-3-8 서해 용존산소 연변동 (a) 전 수층 (b) 표층 (c) 저층 평균

[출처 : Lin et al.(2005)]

동중국해의 용존산소 장기변동과 관련하여 Ning 등(2011)은 21년간(1975~1995년)의 용존산소 관측 자료를 분석하여 전 수층 평균 연 감소율이 0.019 mg/L (0.0133 ml/L)이고, 표층 연 감소율은 0.014 mg/L

(0.0098 ml/L), 저층 연 감소율은 0.023 mg/L (0.0161 ml/L)으로 보고하였다(그림 2-3-9).

서해가 동중국해보다 용존산소 감소율이 4배 이상 높게 나타나고 있지만, 두 해역의 공통점은 전 층에 걸쳐 용존산소가 감소하고 있고, 표층보다 저층의 감소율이 크게 나타난다는 점이다.

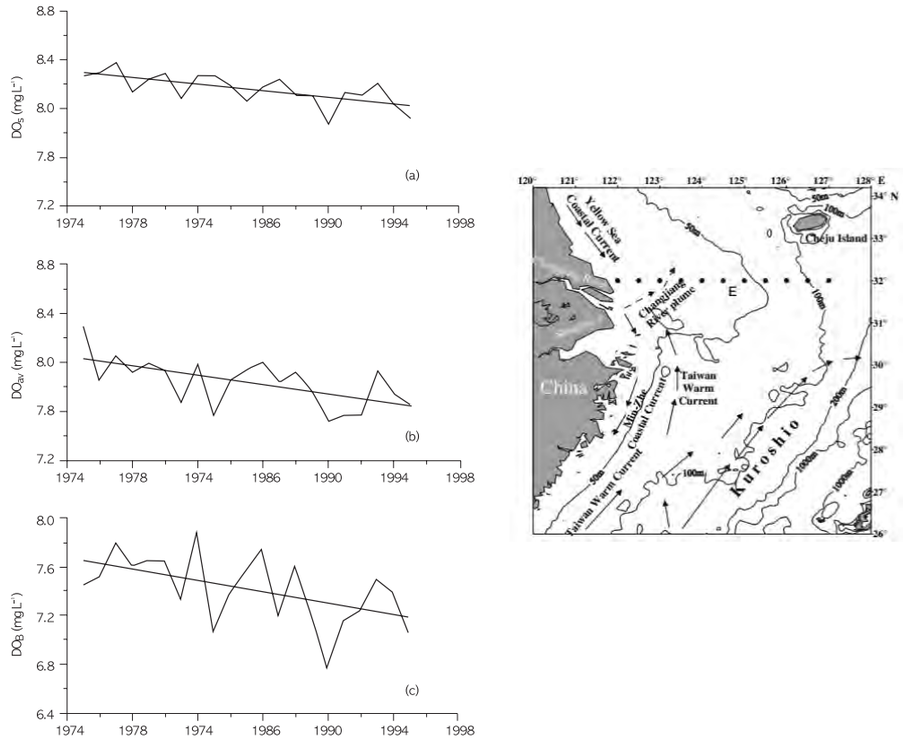


그림 2-3-9 동중국해 용존산소 연별 변동 (a) 표층 (b) 전 수층 (c) 저층 평균

[출처 : Lin et al.(2005)]

우리나라 바다의 최근 변동 경향을 확인하기 위해 국립수산과학원의 정선해양관측 자료를 이용하여 용존산소 변동을 살펴보았다. 최근 4년간(2015~2018년)의 2월과 8월 용존산소 공간 분포를 그림 2-3-10에 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 겨울철(2월)의 표층 용존산소 농도가 여름철(8월)의 농도와 비교해서 전체적으로 높고, 특히 겨울철 서해의 용존산소가 높게 나타났다. 이는 수심이 얕은 서해가 겨울철 표층 냉각으로 다른 해역에 비해 수온이 낮기 때문에 산소의 포화용해도 증가로 용존산소 농도가 높아진 것으로 해석을 할 수 있다. 여름철에는 표층의 수온이 전 해역에서 높아지기 때문에 용존산소 농도의 해역별 차이가 크게 나타나지 않았다.

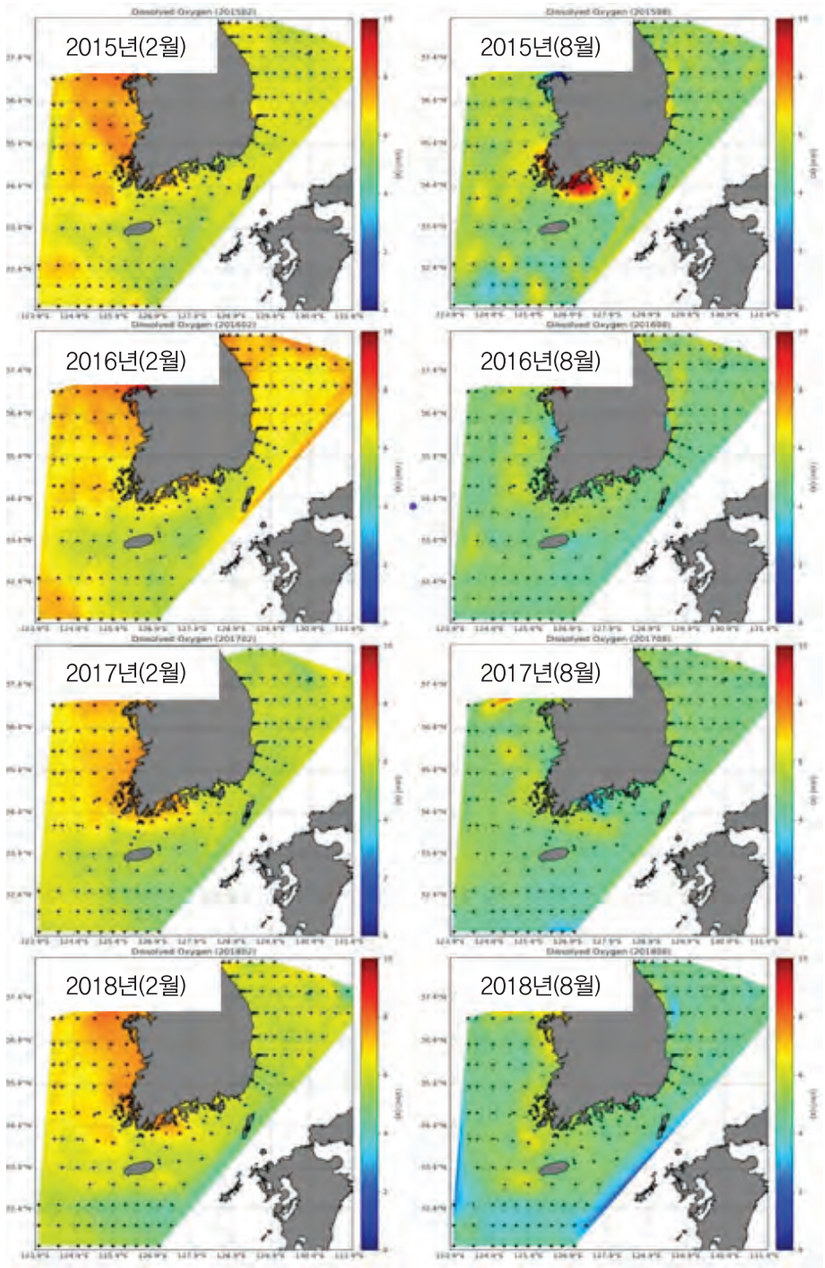


그림 2-3-10 표층 용존산소 연별 겨울 및 여름 변화

[출처 : 국립수산과학원]

3) 영양염류

해수중의 영양염류는 광합성을 하는 식물플랑크톤의 증식과 성장에 의해 사용되는 화학물질로서, 대표적으로 질소(N), 인(P), 규소(Si)가 산화된 이온의 형태인 질산염(NO_3^-), 인산염(PO_4^{3-}), 규산염(SiO_2)으로 수중에 존재하게 된다. 수중에서 영양염류는 식물플랑크톤에 의해 사용되고, 유기물 분해 등으로 재생산되고 공급되며, 외적으로는 대기 및 하천 등을 통해 해양으로 공급된다.

동해는 세계의 주요 강이라 할 수 있을 정도로 큰 강을 통한 직접적인 담수 유입이 없기 때문에, 동해의 주된 영양염류 공급원은 대한해협을 통한 영양염류 공급과 산업화에 따른 대기를 통한 인간 활동 기원의 질소 유입이라 할 수 있다. Rho et al.(2016)에 따르면 동해의 저층은 지난 15년간(1999~2013년) 질산염과 인산염의 뚜렷한 계절변동 패턴이나 상승 또는 하강 경향이 나타나지 않았다(그림 2-3-11). 반면 동해의 상층은 계절적인 생물활동에 따라 계절 변동이 뚜렷하게 나타난다.

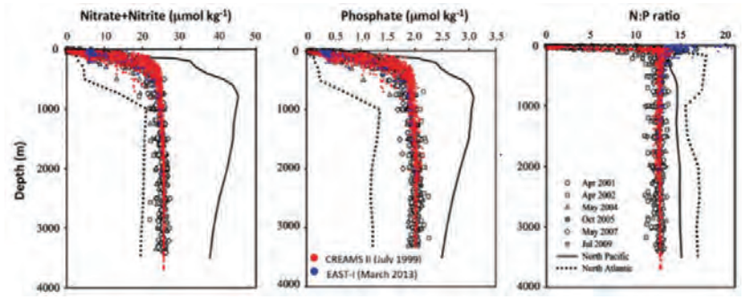


그림 2-3-11 1999~2013년의 동해 영양염 변화 (좌) 질산염+아질산염 (중) 인산염 (우) N:P 비

[출처 : Rho et al.(2016)]

국립수산과학원 정선해양관측자료를 분석한 윤(2015)에 따르면 동해의 연평균 표층 영양염은 질산염, 인산염, 규산염 모두 20년간(1995~2014년) 하강하는 추세를 보였다(그림 2-3-12). 또한 질산염은 모든 계절에서 감소하는 추세를 보이고, 특히 춘계와 추계에 큰 감소 추세를 나타냈다. 인산염은 겨울을 제외한 모든 계절에서 감소하는 추세를 보이고, 하계에 상대적으로 큰 감소 추세를 나타낸다. 규산염도 모든 계절에서 감소하는 추세를 보이고, 춘계에 비교적 큰 감소 추세를 나타냈다.

서해의 영양염 장기변동과 관련하여 Lin et al.(2005)은 17년간(1984~2000년)의 영양염 관측 자료로부터 서해의 전 수층에서 연평균 및 여름·겨울의 인산염과 규산염이 감소하는 경향을 보이고 있다는 것과, 이와는 반대로 용존 무기질소(질산염+아질산염+암모늄염)가 전 수층에서 연평균 및 여름·겨울에 증가하고 있음을 보였다(표 2-3-1). 그들은 서해의 용존 무기질소의 증가 원인을 강수와 장강을 통한 담수 유입 증가에서 찾았고, 인산염과 규산염 감소는 황하강 담수 유입의 급감으로 발해만에서 서해로 교환되는 해수의 영양염 감소가 원인이라고 설명하였다.

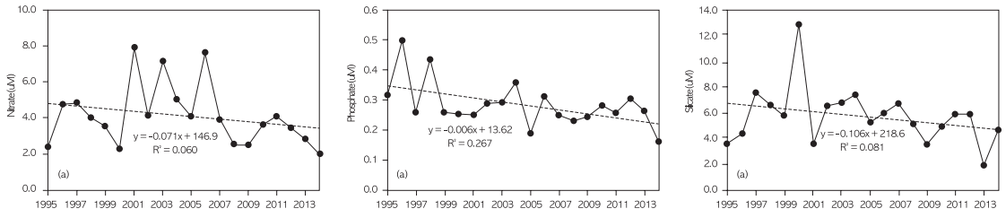


그림 2-3-12 1995~2014년의 동해 연평균 표층 영양염 변화 (좌) 질산염 (중) 인산염 (우) 규산염

[출처 : 윤(2015)]

표 2-3-1 정선해양관측조사에 의한 동해, 남해, 서해 및 우리나라 전체의 2000년 이후 연도별 평균 연평균 수온 변동 경향

[출처 국립수산과학원 기후변화연구과]

Parameter	Sea surface layer			Sea bottom layer			Average for water column		
	Annual	Summer	Winter	Annual	Summer	Winter	Annual	Summer	Winter
T	0.094	0.081	0.083	0.038	0.048	0.067	0.068	0.056	0.081
S	0.013	0.014	0.020	0.007	0.001	0.018	0.007	0.001	0.011
DO	-2.451	-2.266	-2.986	-3.360	-3.843	-2.669	-2.364	-3.305	-1.267
PO$_4$-P	-0.003	-0.001	-0.007	-0.002	0.003	-0.008	-0.004	-0.002	-0.009
SiO$_4$-Si	-0.219	-0.117	-0.146	-0.184	-0.174	-0.199	-0.157	-0.095	-0.175
NO$_2$-N	0.060	0.026	0.005	0.011	0.103	0.011	0.011	0.075	0.006
NO$_3$-N	0.048	0.024	0.085	0.086	0.110	0.088	0.083	0.034	0.107
NH$_4$-N	0.064	0.085	0.072	0.089	0.069	0.009	0.073	0.034	0.072
DIN	0.136	0.115	0.153	0.058	0.051	0.106	0.119	0.078	0.148
N:P	0.548	0.589	0.570	0.210	0.215	0.391	0.641	0.319	0.685

The unit is ℃ year□for temperature, psu year□for salinity and μmol L□year□for the rest, except for N:P.

동중국해의 장기 영양염류 변동과 관련하여 윤(2015)은 국립수산과학원 정선해양관측자료를 분석하여 표층과 저층, 전 수층에서의 계절별, 연별 평균 변화율을 계산하고 변동패턴을 분석하였다(표 2-3-2). 그의 연구에 따르면, 인산염은 계절 및 수층과 무관하게 감소 경향을 뚜렷하게 보였고, 규산염도 동계를 제외하면 대체적으로 감소 경향을 나타내었다. 질산염은 추계를 제외하고 대체적으로 증가 경향을 나타내었다. 그는 질산염의 증가 원인을 기존 연구들을 토대로 중국의 산업화에 따른 장강을 통한 도시 오·폐수 및 질소계 화학비료 사용 증가, 연안역 양식 활동 증가 등 인간 활동에 의한 영향으로 설명하였다. 인산염의 감소 원인은 장강희석수, 대마난류수, 황해저층냉수, 쿠로시오 기원수의 인산염 농도 감소로 설명하였고, 특히 장강희석수와 대마난류수가 2010년 이후 0.1 μM이하의 낮은 농도로 유입되고, 인산염 농도가 높은 쿠로시오 기원수의 세력이 약화된 것을 주된 원인으로 분석하였다. 또한, 중국 장강 중·하류에 건설된 산샤댐의 1, 2차 물

막이 공사가 진행되던 2003~2008년과 건설이 완공된 2009년 이후로 동중국해의 영양염류 농도와 구성 비율의 변화가 급격히 커졌음을 보이고, 규산염 감소의 원인을 산샤댐 건설에 의한 장강을 통한 Si 유입량 감소로 설명하였다.

표 2-3-2 동중국해 북부 20년간(1995~2014년)의 영양염류 연평균 및 계절평균 변화율

[출처 : 윤(2015)]

변수		NO_3-N [uM·year^{-1}]	PO_4-P [uM·year^{-1}]	SiO_2-Si [uM·year^{-1}]
표층	연평균	0.017	-0.009	-0.041
	겨울	0.095	-0.015	0.106
	봄	-0.035	-0.004	0.029
	여름	0.004	-0.009	-0.159
	가을	-0.032	-0.008	-0.157
저층	연평균	0.041	-0.011	-0.066
	겨울	0.134	-0.016	0.169
	봄	0.037	-0.003	-0.009
	여름	0.004	-0.011	-0.215
	가을	-0.023	-0.013	-0.195
전 수층 평균	연평균	0.015	-0.009	-0.058
	겨울	0.092	-0.015	0.091
	봄	0.019	-0.004	-0.004
	여름	0.022	-0.010	-0.135
	가을	-0.055	-0.009	-0.152

우리나라 바다의 최근 변동 경향을 확인하기 위해 국립수산과학원의 정선해양관측 자료를 이용하여 영양염류 변동을 살펴보았다. 최근 4년간(2015~2018년)의 2월과 8월 질산염(그림 2-3-13), 인산염(그림 2-3-14), 규산염(그림 2-3-15) 공간 분포를 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 겨울철(2월)의 표층 영양염 농도가 여름철(8월)의 농도와 비교해서 전체적으로 높게 나타나고 있다. 이는 여름철에 식물플랑크톤의 생장을 위해 해수중의 영양염이 많이 소모가 된 것이 원인이라 할 수 있다. 특히 겨울철 서해의 영양염이 높게 나타나는데 이는 수심이 얕은 서해가 겨울철 연직 혼합으로 인해 저층의 영양염이 표층과 혼합되어 높은 농도를 보이고, 추가적인 원인으로 겨울철 북서풍을 타고 중국으로부터 날아온 높은 농도의 질소산화물이 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

우리나라 바다의 영양염류의 농도 및 비율의 변화는 식물플랑크톤 뿐만 아니라, 어종의 종수, 풍도, 다양성 등에도 영향을 미쳐 결국 해양생태계 전반에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 기후변화에 따른 우리나라 바다의 생태계 변화를 이해하고 대응하기 위해 앞으로도 지속적인 모니터링이 필요하다.

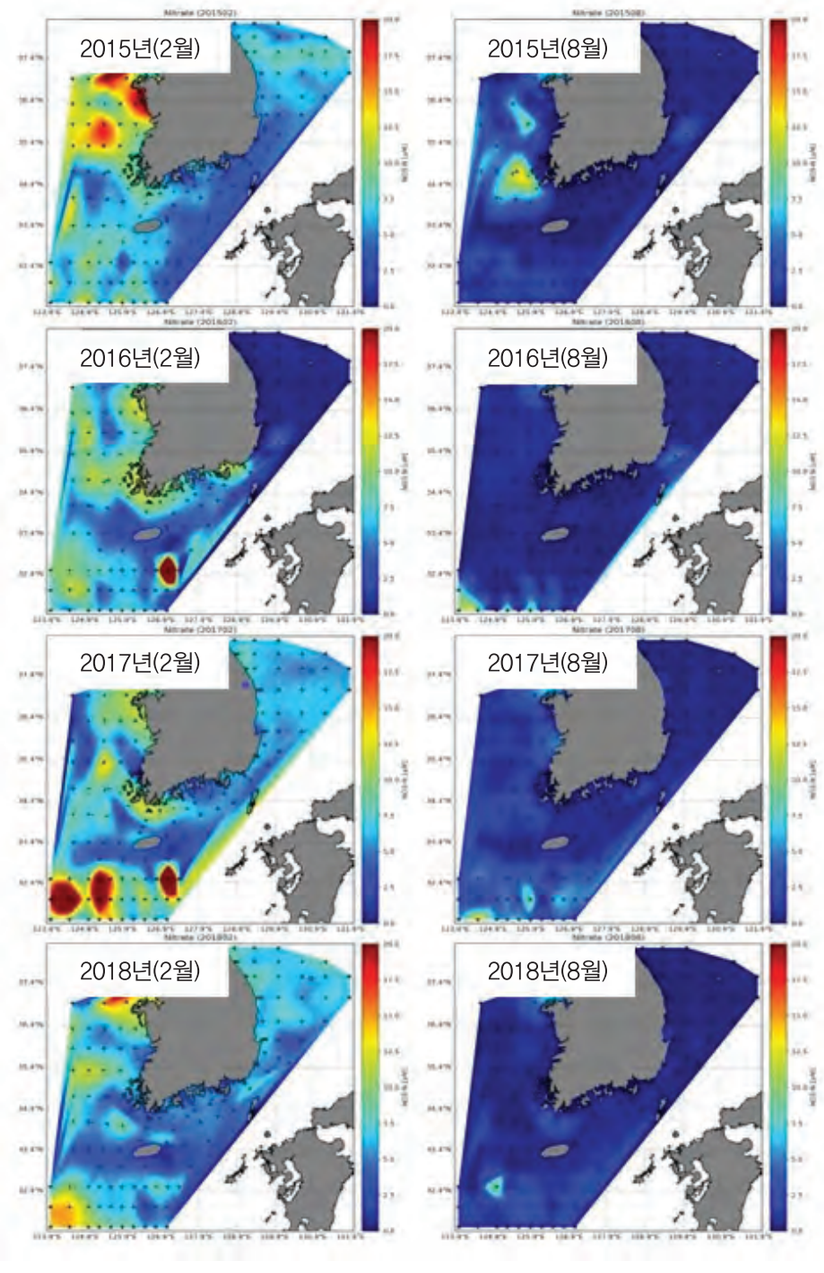


그림 2-3-13 표층 질산염 연별 겨울 및 여름 변화

[출처 : 국립수산과학원]

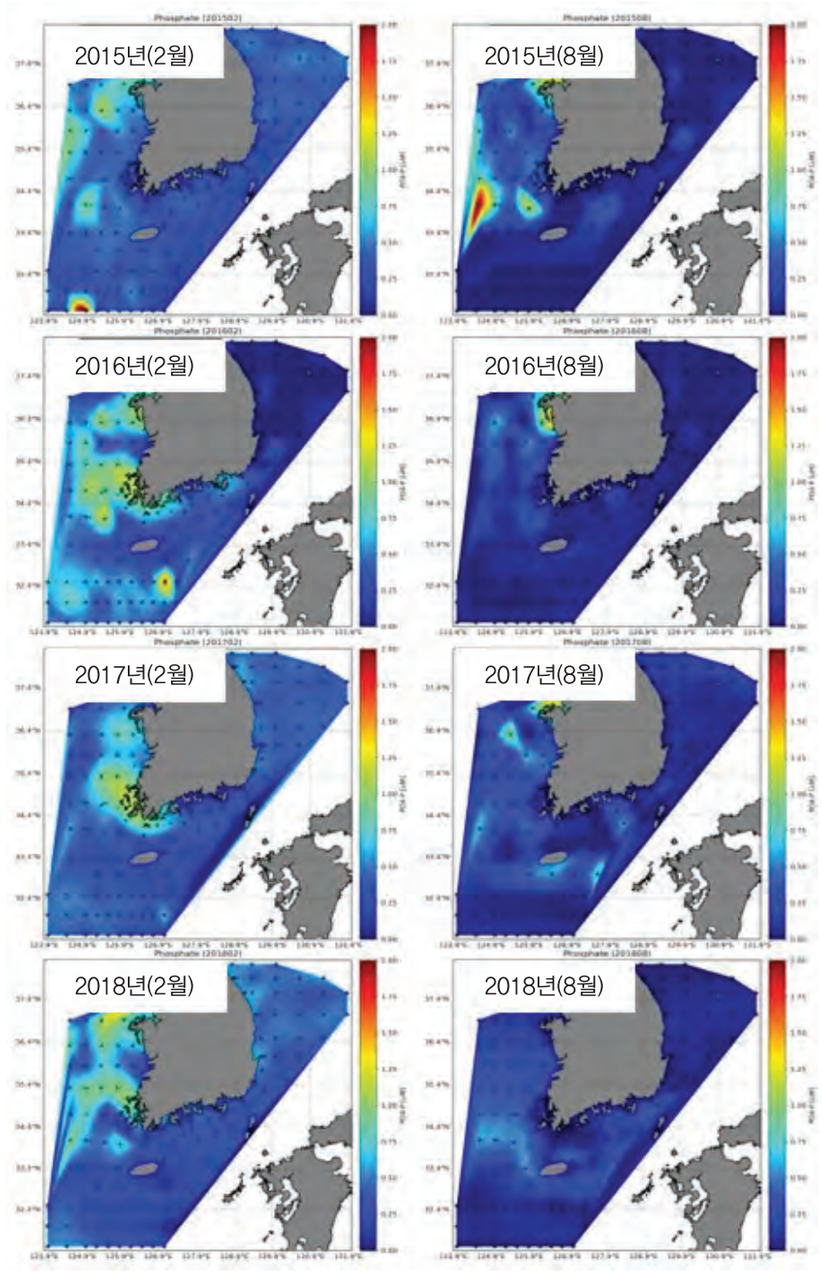


그림 2-3-14 표층 인산염 연별 겨울 및 여름 변화

[출처 : 국립수산과학원]

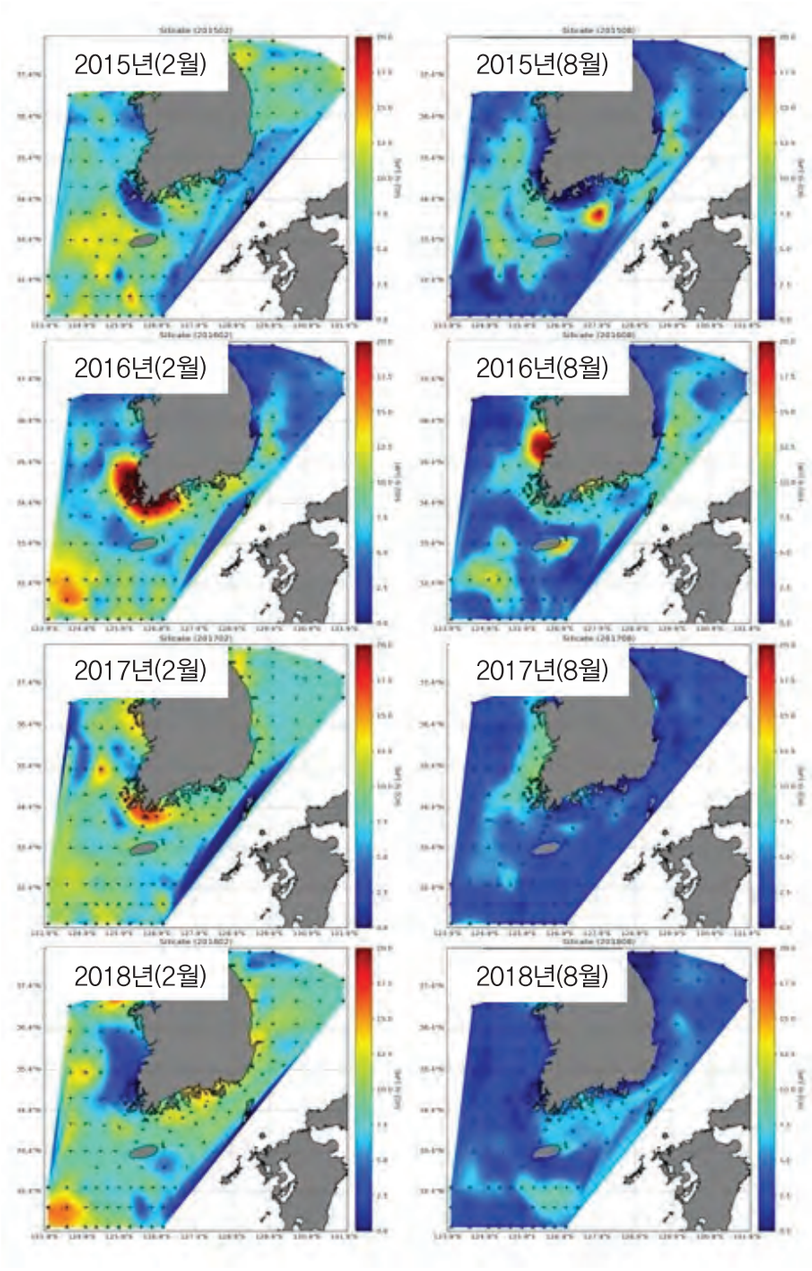


그림 2-3-15 표층 규산염 연별 겨울 및 여름 변화

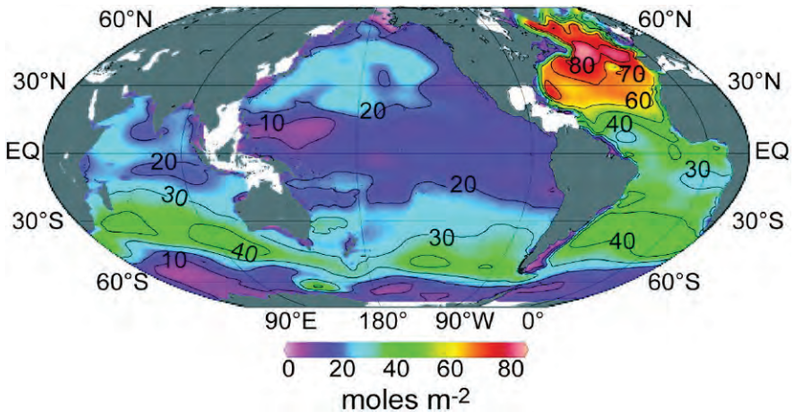
[출처 : 국립수산과학원]

제 4절 우리나라 해역 해양산성화 영향 분석

1950년대 후반, 화석연료 사용 때문에 증가한 이산화탄소 중 많은 부분이 해양으로 흡수된다는 연구 결과가 발표된 이후(Revelle and Suess 1957), 1970년대 초반에는 대기와 해양 사이의 이산화탄소 교환으로 인해 해양 내의 탄소시스템 변화가 나타나 해수의 pH 조성을 낮춘다는 의미의 "해양산성화"라는 용어가 처음 사용되었다(Broecker et al. 1979). 그 후, 20여 년 동안 해양산성화에 따른 해수의 화학조성 변화는 지역적으로 차이가 있지만, 해양생물에 미치는 영향은 명확하지 않았다. 그러나 해양산성화 영향을 평가할 수 있는 장비가 발달함에 따라, 90년대 후반부터 해상산성화가 해양생물에 미치는 영향이 크게 나타날 것이라는 연구가 지속적으로 발표되었다. 2000년대 이후부터 기후변화에 따라 해양에서 나타나는 중요한 현상 중의 하나로 해양산성화가 부각되었으며, IPCC의 기술보고서에 해양산성화 연구에 대한 결과들이 포함되기 시작하였고, 2014년에 발간된 IPCC 5차보고서에는 해양산성화가 해양생물에 미치는 영향은 심각한 것으로 분석되었다(IPCC, 2014).

Science(2004)에 출판된 연구에 따르면 대기 중으로 배출된 화석 연료 CO_2의 약 30%가 해양으로 흡수되어 해양이 대기 CO_2 농도 조절에 핵심적인 역할을 했던 것으로 밝혀졌다(그림 2-4-1). 하지만 해양의 CO_2 흡수에 따라 해양의 CO_2 제거 능력이 점차 약화되어 미래에 대기 중 CO_2 농도 증가가 가속될 것이라 예상되고 있다.

그림 2-4-1 화석연료를 태워 대기 중으로 방출된 CO_2 중 해양으로 녹아들어간 CO_2량



[출처 : Sabine et al., 2004]

김 등은 1992, 1999 및 2007 년에 깊이 50~1000m에서 얻은 해양 탄소인자 (TA, pH 및 DIC) 데이터를 사용하여, 아라고나이트 포화 수평선 깊이(Ω_A = 1)에 대한 인위적 CO_2의 영향을 추정했다. 인위적인 CO_2 축적은 동해 유역 전체의 여러 위치에서 포화 깊이를 50~250m 위로 이동시켰다(그림 2-4-2). 아라고나이트 포화도(Aragonite saturation state: Ω_A)는 산성화 지표 중 하나로써, 아라고나이트(석회석)는 수용성이기 때문에 산성도에 더욱 민감하며 굴유생이 패각을 형성하는데 필요한 필수성분이다. 화학적으로 아라고나이트 포화도가 1 이상에서는 탄산칼슘이 녹지 않고, 1 이하에서 녹기 시작한다. 아라고나이트 포화도가 1.5 이하로 떨어지면 일부 패각형성 생물들은 유생시기에 패각을 형성할 수 없어 빠르게 사망하기도 한다. 아라고나이트 포화도가 낮은 지역에서는 표면에 탄산칼슘 껍질을 갖는 생물들의 경우 성장이 저해될 수 있다.

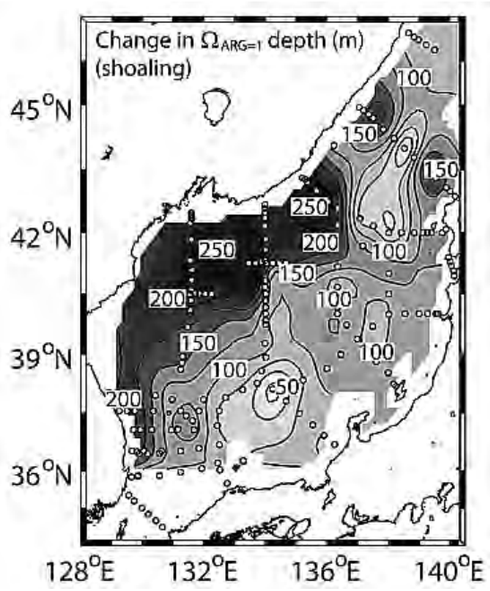


그림 2-4-2 인위적 CO_2로 인한 아라고나이트 포화도가 1인 (Ω_A = 1) 수심의 변동 깊이(m).
원은 1999년 여름 샘플링 위치이며, 등고선은 25 및 50 m 간격의 아라고나이트 포화도 깊이

[출처: Kim et al., 2010]

우리나라가 속한 아시아의 동해안에는 캄차카 반도로 둘러싸인 일련의 주변 바다와 북쪽의 쿠릴 섬에서 일본 및 오키나와를 거쳐, 남쪽의 필리핀에 이르는 섬 사슬이 있다. 넓은 대륙붕과 수천 미터 깊이의 유역을 모두 포함하고 있는 이 폐쇄된 바다 사슬은 지구상의 어느 곳과도 비교할 수 없는 해양학적으로 독특한 환경이다. 사람들은 수천 년 동안 이 바다에서 물고기와 다른 해양 생물을 수확해 왔다(Christian et al., 2018).

동아시아 주변 바다, 특히 일본과 아시아 본토 사이의 지역에는 대양 북태평양과 유사한 특징의 독립적인 심층

대류 시스템과 아극전선이 있다. Chen et al.(2017)은 이 지역이 인위적 온난화 하에서 전 세계 해양에 대한 유사체가 될 수 있다고 제안 한다.

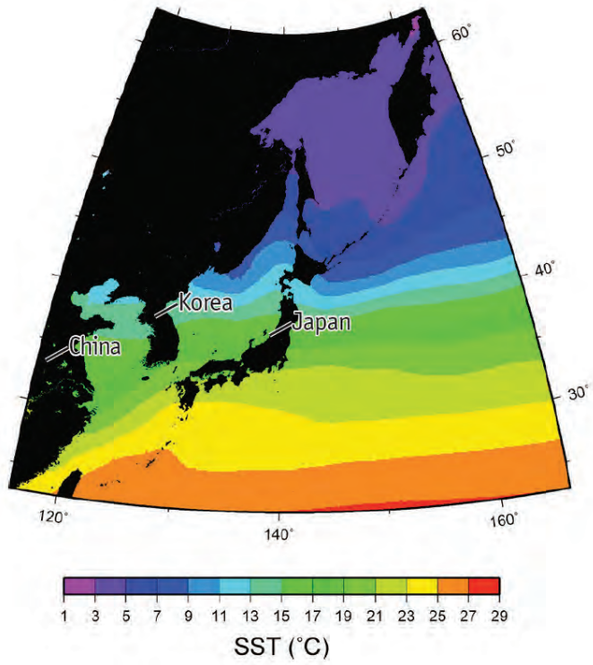


그림 2-4-3 동아시아 주변해 (East Asian Marginal Seas) 지도. 색상 구분은 연간 평균 해수면 온도
(SST; sea surface temperature)

[출처 : PICES SPECIAL PUBLICATION 6, 2018]

한국은 해안선이 많은 나라로서 동해안과 남해안은 해양수와 더 많이 접해 있는 반면, 서해안은 황해의 연안수에 인접 해 있다. 후자는 큰 조석(4~8m), 강한 계절성 식물 플랑크톤 번성(blooms) 및 상당한 강 유입의 특성을 가지고 있다. 낙동강, 섬진강, 영산강의 3대 강이 남해안 인근 해역으로 유입되고, 인간생활과 산업활동은 서쪽과 남쪽 해안을 따라 가장 풍부하다.

해양산성화는 CO_2 용해 이외에도 부영양화, 용승, 산성 물질 침적, 생물 활동, 해양 순환에 의해서 영향을 받는다. 한반도 주변 해는 다양한 산성화 유발 원인이 집약적으로 나타나는 지역으로, 연안 산성화 연구의 최적지이다. 동해 연안은 용승이 발생하고 해양 수직 순환에 영향을 받는 지역이기 때문에 두 요소가 산성화에 미치는 영향이 클

것으로 예상되고, 남해는 적조 발생과 부영양화에 이은 유기물 분해 등에 의한 산성화 발생이 주를 이룰 것으로 예상된다. 인접국 중국으로부터 대기를 통해 유입된 질소 및 황 오염물질의 침적은 한반도 모든 해역의 산성화에 기여할 것이다. 이와 같이, 한반도 해역의 특성별로 해양산성화가 시간에 따라 어떻게 변화하는지, 다양한 해양환경 조건에서 발생할 수 있는 해양산성화를 지속적으로 모니터링 하는 것은 미래 기후변화에 따른 해양산성화 예측을 위한 근거자료 축적을 위해서도 매우 중요하다.

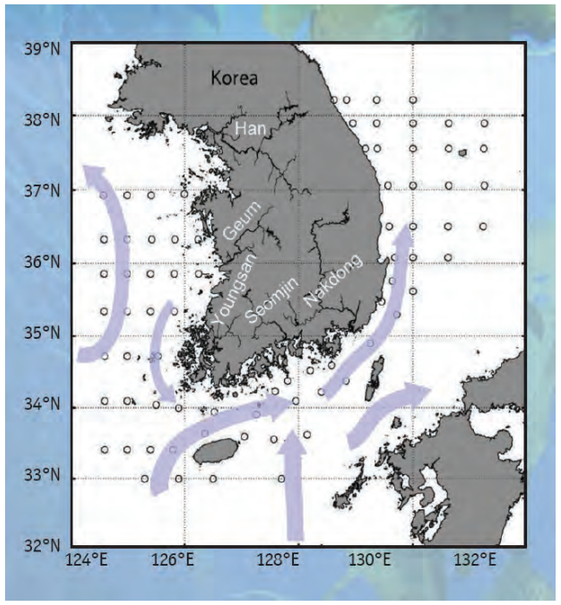


그림 2-4-4 한국 해안 지역의 지도. 원은 해수 샘플링 위치를 나타내며,
회색 화살표는 여름에 주요 해류의 흐름 방향을 나타냄

[출처 : PICES SPECIAL PUBLICATION 6, 2018]

국립수산과학원과 포항공대는 우리나라 연근해 전체 해역을 따라 82 개의 채수 정점(sampling station)이 있는 해양산성화 모니터링을 도입했다(그림 2-4-4). 샘플링 깊이는 바닥 깊이에 따라(평균 바닥 깊이: 동해 〉 200m, 서/남해 50~100m) 표-중-저층이 모두 포함되도록 깊이별로 채수하였다. 이 관측은 국립 수산과학원에서 관리하며, 해수 샘플은 2015년부터 계절별로(4, 8, 10 월) 수집되고 있다.

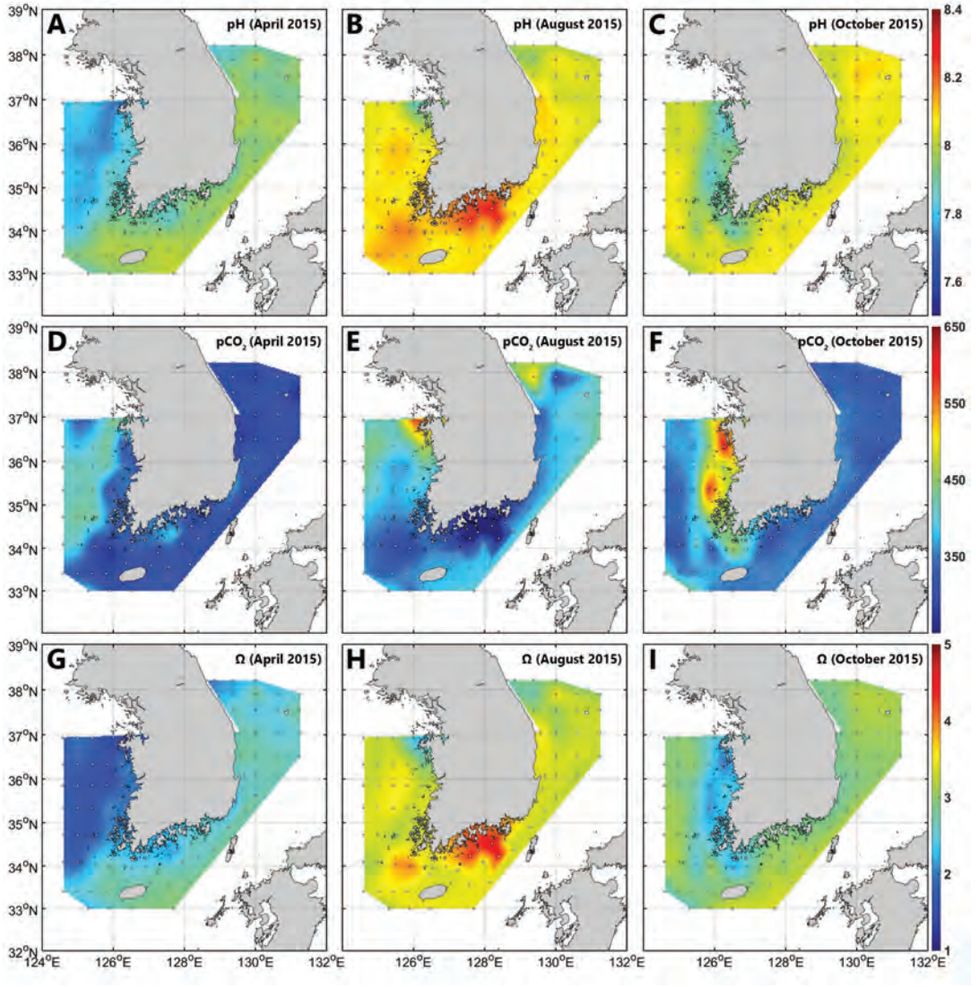


그림 2-4-5 2015 년 4 월 표층 해수의 pH, pCO_2 및 Ω_A (A, D 및 G)의 공간 분포; 8 월 분포 (B, E 및 H); 10 월 분포 (C, F 및 I). 원은 한국 해안을 따라 해수가 샘플링 된 위치를 나타내며, 색 눈금은 표층 해수의 수소 이온 농도 (pH), 기체 CO_2 (pCO_2, μatm) 및 아라고나이트 포화 상태 (Ω_A)를 나타냄

[출처 : 포항공과대학교]

이 표본의 결과로써 표층 pH는 2015년 4월 7.8~8.0, 8월 8.1~8.3, 10월 7.9~8.0 범위로 나타났다(그림 2-4-5). 이로써 생물학적 생산성(식물성 플랑크톤이 표층수에서 CO_2를 소비하여 pCO_2를 줄이면서 Ω_A와 pH를 증가시킴)으로 인해 여름에 pH가 약 0.3 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 8월에 pH가 증가하는 경향은 2015~2018년 4년간 모두 비슷하게 나타났다.

수온의 계절 변화도 이러한 변동에 기여한다. 4월과 10월에 서해안은 동해안과 남해안에 비해 낮은 Ω_A와 pH를 나타냈다. 이것은 서해안이 얕은 수심(약 50 m)과 강한 조석의 특성을 가지기 때문일 수 있다. 조석의 강한 흐름은 높은 용존 무기탄소(DIC; Dissolved Inorganic Carbon) 농도를 가지는 바다의 저층수를 표층수와 혼합시키므로 표층의 Ω_A와 pH가 낮아지게 된다.

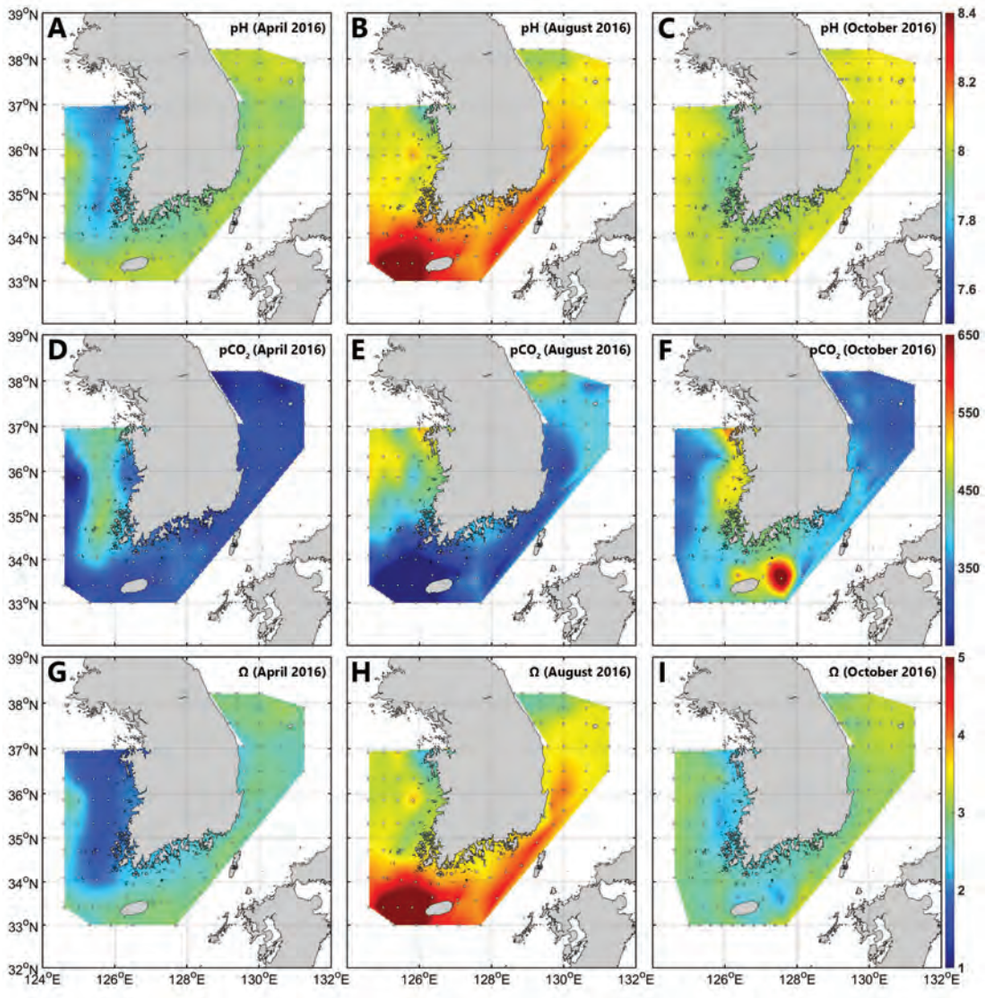


그림 2-4-6 2016 년 4 월 표층 해수의 pH, pCO_2 및
Ω_A (A, D 및 G)의 공간 분포; 8 월 분포 (B, E 및 H); 10 월 분포 (C, F 및 I)

[출처 : 포항공과대학교]

온도가 증가함에 따라 pCO_2는 증가하고(온도 1℃ 증가에 따라 4% 증가) 생물의 광합성에 의해 감소한다. 저층에서는 유기물의 산화로 인해 pCO_2가 증가하므로 저층에서 물이 용승한 경우 표층 값이 높아지는 경향을 보인다. 2015~2018 년 자료를 비교해 보면 4 월 표층은 서해가 높은 비슷한 분포를 보인다.

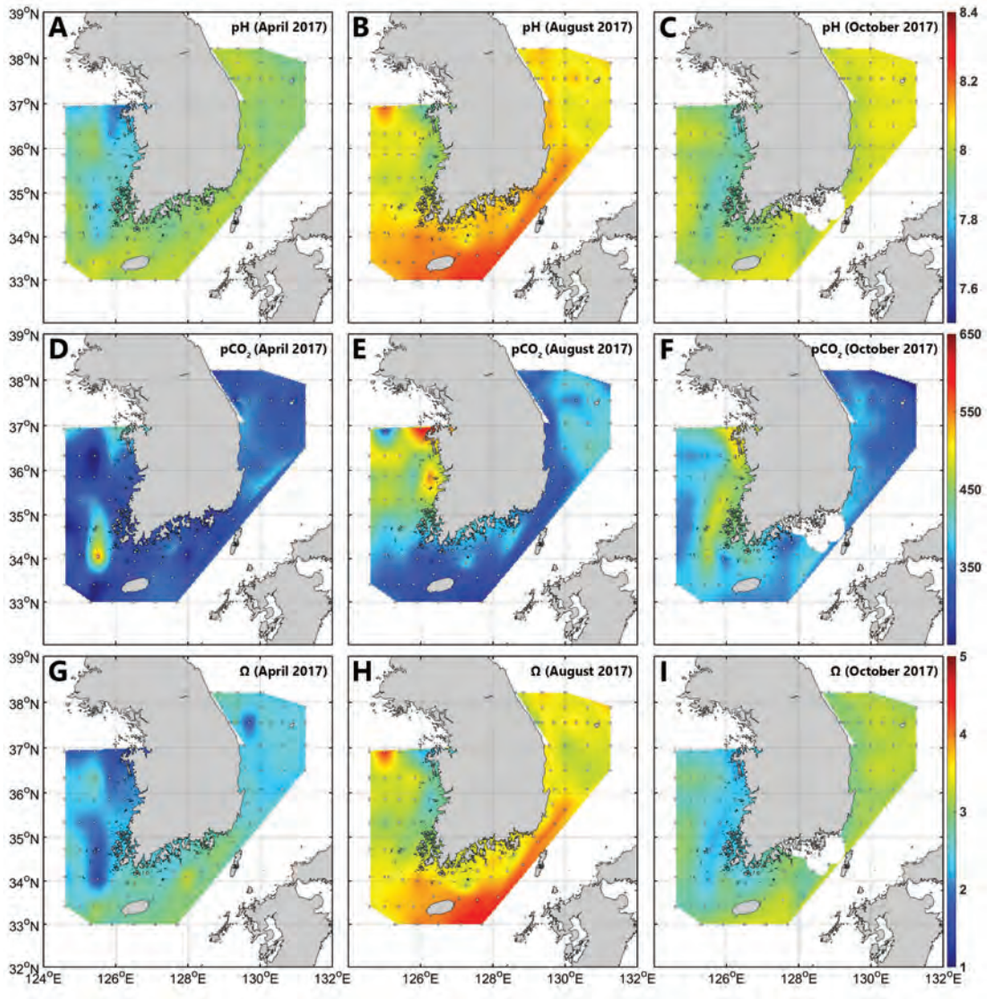


그림 2-4-7 2017 년 4 월 표층 해수의 pH, pCO_2 및
Ω_A (A, D 및 G)의 공간 분포; 8 월 분포 (B, E 및 H); 10 월 분포 (C, F 및 I)

[출처 : 포항공과대학교]

아라고나이트 포화도(Ω_A)는 pH와 비슷한 분포를 보이는데 한국의 바다가 일반적으로 탄산염 아라고나이트에 대해 과포화 되어 있지만 계절에 따라 상당한 차이가 있음을 보여 준다. 2015 년 표층 Ω_A는 4월에 2.0~3.0 이었으며 서해는 과포화 지역이 가장 적게 나타났다. 아라고나이트 포화도 범위는 10월에도 4월과 비슷하게 나타났으며, 8월에는 4.3 정도로 높았다. 8월 남해안에서 가장 높은 값이 관찰되었는데, 이것은 이 지역에서 생물학적 생산성이 상당히 높음을 나타낸다(그림 2-4-5).

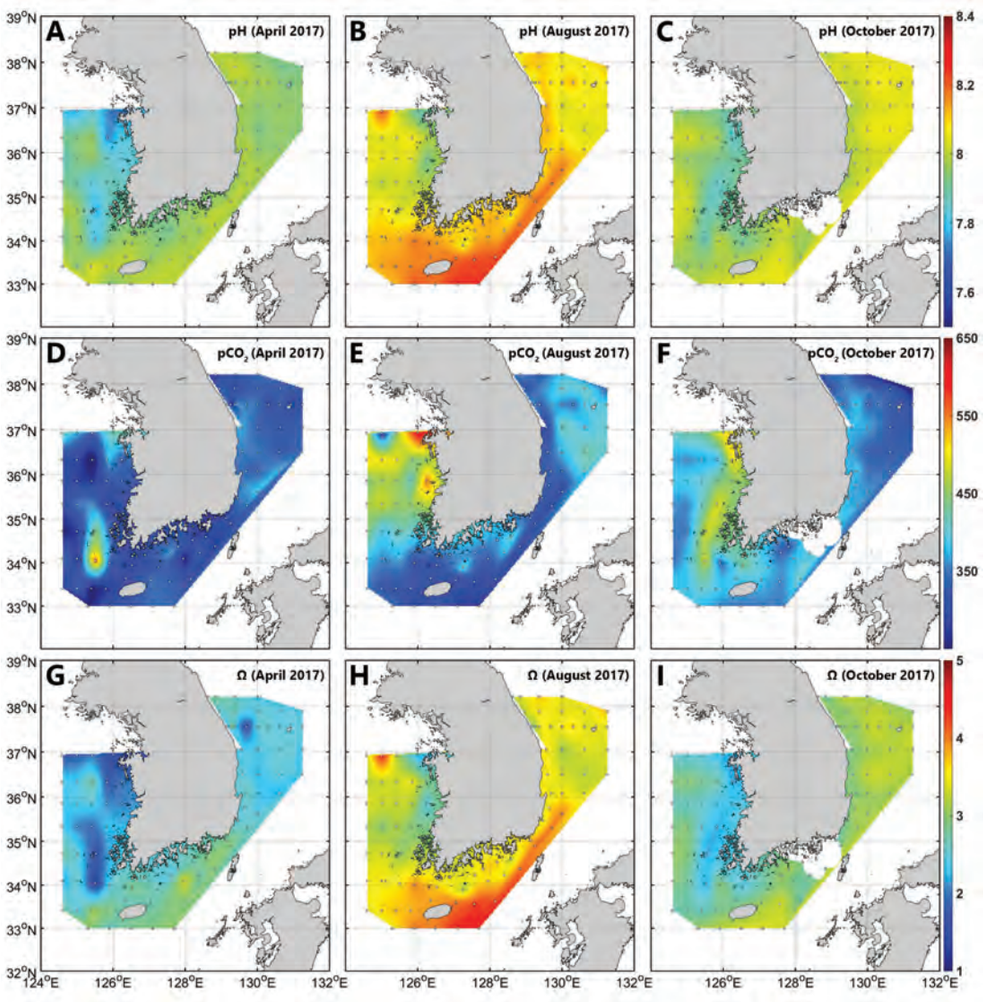


그림 2-4-8 2018 년 4 월 표층 해수의 pH, pCO_2 및 Ω_A (A, D 및 G)의 공간 분포; 8 월 분포 (B, E 및 H); 10 월 분포 (C, F 및 I)

[출처 : 포항공과대학교]

2016년 표층 해수 탄산염 매개변수의 공간적 변화는 대부분 2015년과 비슷하지만 남서부에서는 인접 수역에 비해 Ω_A 및 pH가 높고 pCO_2가 더 낮은 비정상적인 물 덩어리가 감지되었다(그림 2-4-6). 이는 북동쪽으로 퍼지는 장강의 물 흐름 영향에 기인 한 것으로(Lee and Kim, 1998; Lie et al., 2003), 일반적으로 장강이 동중국해로 배출되면 해수와 혼합되어 희석수가 형성된다. 이 희석된 물은 겨울에 중국 해안을 따라 남쪽으로 흐르지만 여름철 몬순 시기에는 두 방향으로 흐르며, 하나는 중국의 남동쪽 해안을 따라, 다른 하나는 북동쪽으로 이동 한다(Mao et al., 1963; Beardsley et al., 1985). 2016년 8월 제주도 근처에서 채수된 표층 해수 시료는 염도가 낮게(< 30) 나타났으며, 이때 기록된 최저 염분은 21.8 이었다. 해수면 온도 상승과 해양산성화 변화의 복합적인 효과는 연안의 해양 생태계에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 4월에는 4년간 Ω_A의 큰 변화가 감지되지 않았다. 그러나 8월에 ΩA는 일부 지역의 해수면 온도가 약 30 ℃로 증가했을 때 큰 변화를 보였다.

2015년과 2016년에 저층 수역에서 관측된 계절적 변화는 표층수(그림 2-4-9 및 2-4-10)와 비교하여 큰 의미가 없는데, 이것은 주로 표층수 조건의 변화에 대한 심해의 반응이 느리기 때문이다. 뚜렷한 지역 변화가 관찰되었지만 이는 주로 각 지역에서 서로 다른 바닥 깊이(가장 깊은 샘플링 깊이로 인한; 평균 바닥 깊이)를 가지기 때문이다. 서해에서 관찰된 상대적으로 높은 pH는 이 지역의 얕은 깊이와 큰 조석 범위에 기인한다.

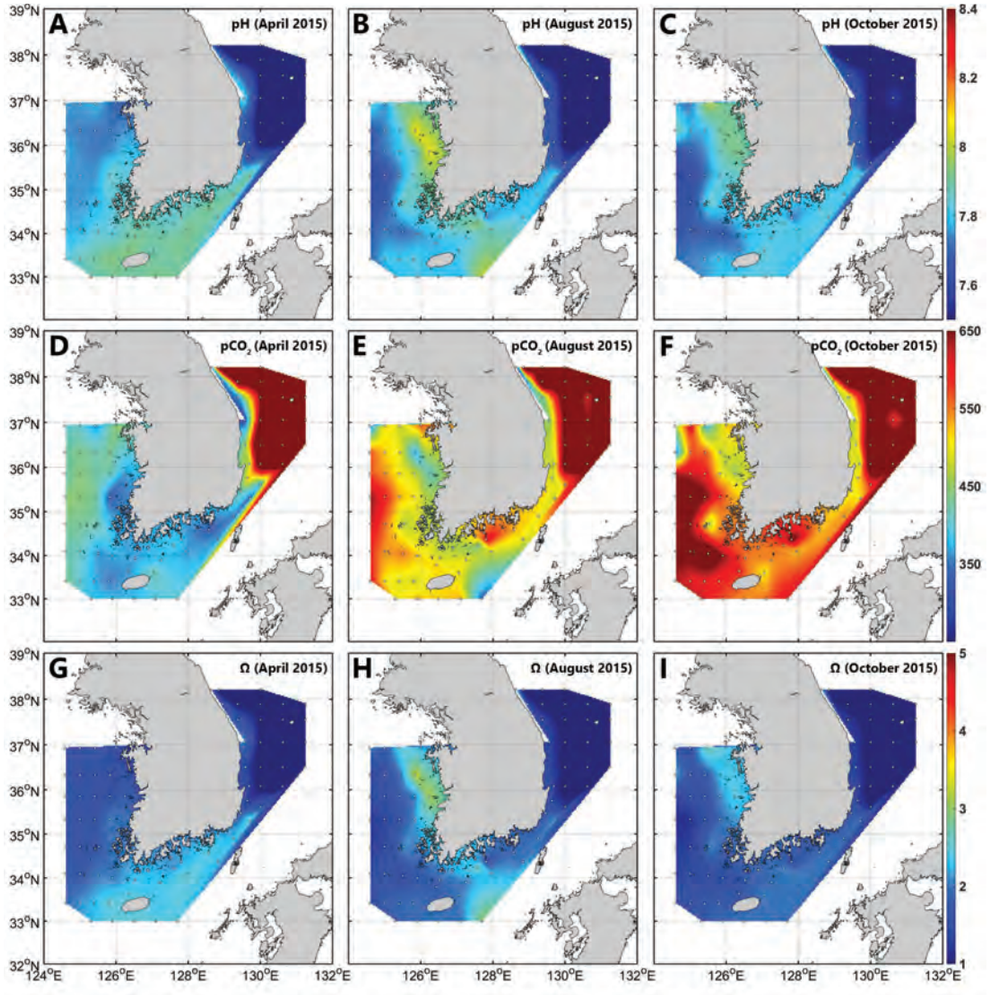


그림 2-4-9 2015 년 4 월 바닥근처 저층 해수의 pH, pCO_2 및
Ω_A (A, D 및 G)의 공간 분포; 8 월 분포 (B, E 및 H); 10 월 분포 (C, F 및 I)

[출처 : 포항공과대학교]

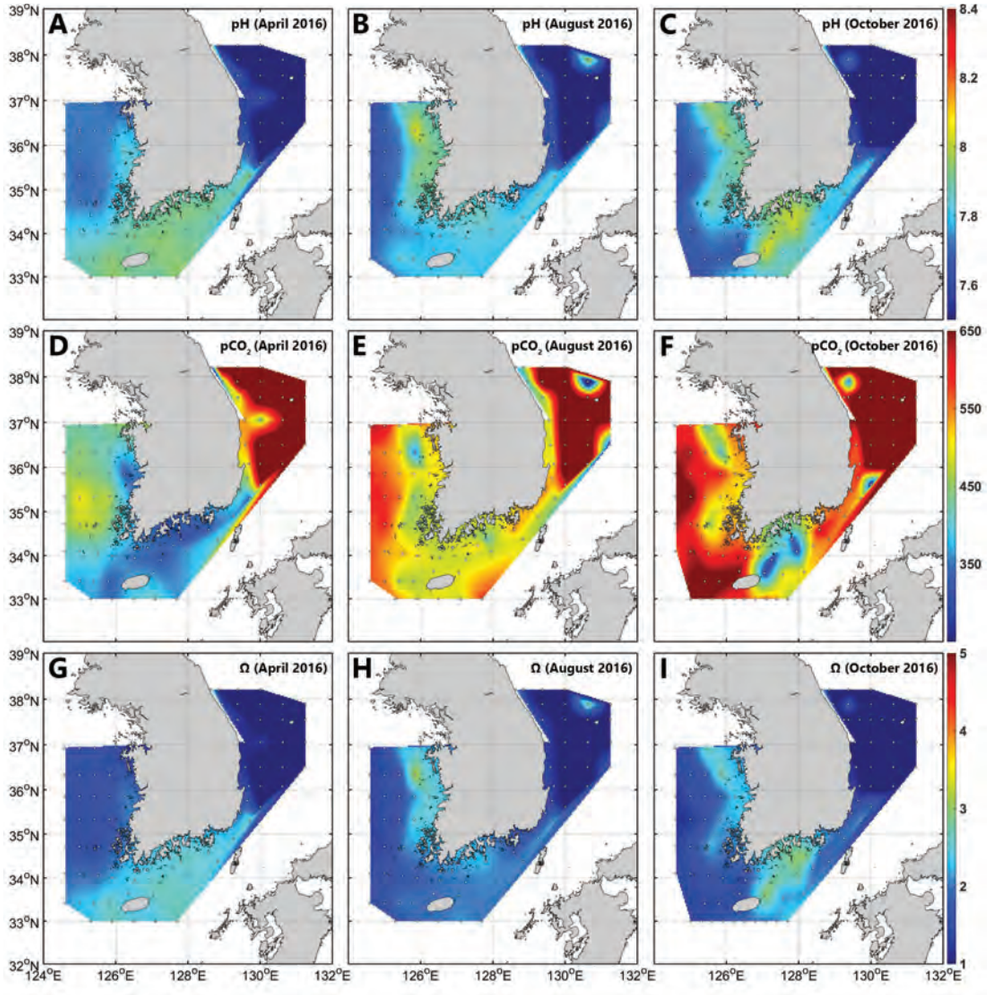


그림 2-4-10 2016 년 4 월 바닥근처 저층 해수의 pH, pCO_2 및
Ω_A (A, D 및 G)의 공간 분포; 8 월 분포 (B, E 및 H); 10 월 분포 (C, F 및 I)

[출처 : 포항공과대학교]

제 5절 주요 수산자원의 기후변화 영향분석

1) 연근해 어업생산량 변동 및 주요 어종 변화

가) 연근해어업생산량 변동

연근해어업생산량은 1970년대 120만 톤에서 1980년대 152만 톤으로 급격하게 증가했으나, 1990년대에는 137만 톤 수준으로 감소하였다(그림 2-5-1). 이후 감소 추세가 지속되면서 2000년대에는 115만 톤, 2010년에는 104만 톤 수준까지 감소하였다. 특히 지난 2016년에는 1972년 이후 44년 만에 100만 톤 미만의 어획을 기록한 바 있다. 주요 어획량 감소원인으로는 어획성능향상 및 조업경쟁 심화에 따른 과도어획, 어업협상 및 배타적 경제수역 설정에 따른 조업어장 축소, 불법어업 증가, 해양환경오염, 그리고 기후변화에 따른 어장생태계 변화 영향 등이 있다.

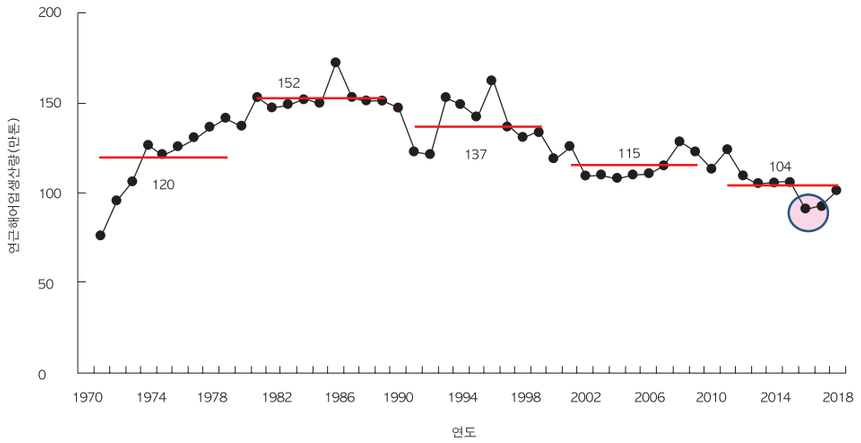


그림 2-5-1 1970~2018년의 연근해 연간 어업생산량

[출처 : 통계청]

나) 주요 어종 변화

1980년 이후 연근해에서 어획된 연대별 어종별 비율은 과거에 비해 어종이 단순화(특정 어종이 높은 어획비율 차지) 되고 있으며, 한류성 어종(명태, 도루묵)의 어획량은 감소하고 난류성 어종(고등어, 오징어, 멸치)의 어획량은 증가하는 특징을 보이고 있다(그림 2-5-2). 또한 표층성 부어류(고등어, 오징어, 멸치)는 증가한 반면, 갈치, 강달이류 등 일부 저어류는 감소하였다.

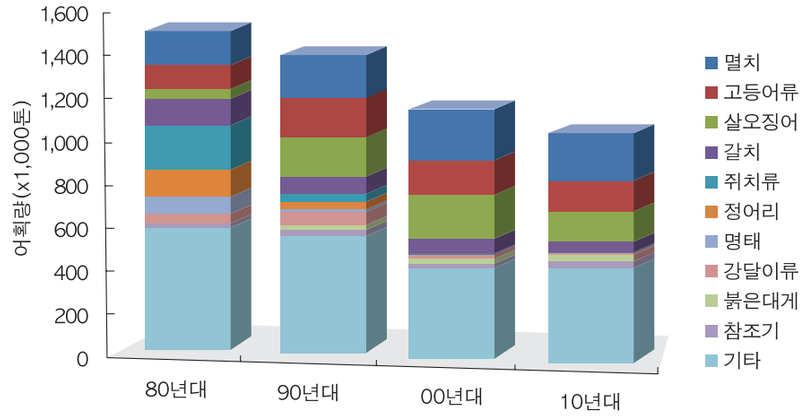


그림 2-5-2 연근해 주요종의 연대별 어획비율

[출처 : 국립수산과학원 연근해자원과]

2) 해역별 어업생산 변동 및 주요 어종 변화

가) 해역별 어업생산량 변동

남해는 우리나라 전체어획량에서 가장 높은 비중을 차지하는 해역으로 80년대 106만 톤 수준을 기록했으나 90년대 100만 톤, 00년대 81만 톤, 10년대 73만 톤 수준까지 지속적으로 감소하였다(그림 2-5-3). 서해는 80년대 21만 톤 수준에서 90년대 19만 톤, 00년대 14만 톤까지 감소하였고, 10년대에는 13만 톤 수준을 유지하였다. 동해는 80년대부터 00년대까지 21만 톤 수준을 유지하였으나, 최근 10년대에 들어 18만 톤 수준의 어획량을 기록하고 있다.

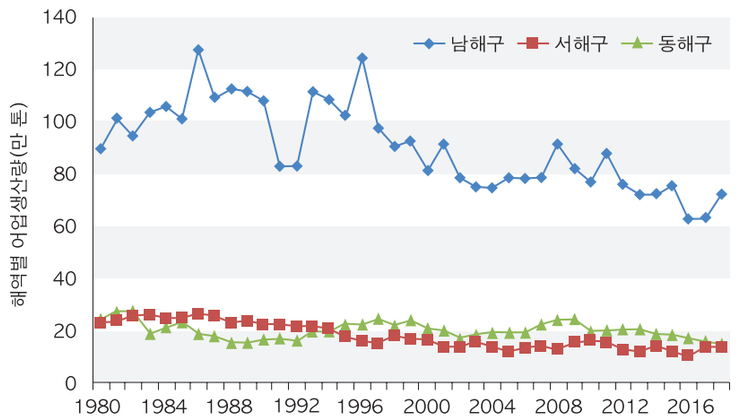


그림 2-5-3 1980년~2018년 해역별 어획량 변동

[출처 : 국립수산과학원 연근해자원과]

나) 해역별 주요 어종 변화

남해는 1980년대 이후 멸치, 고등어, 살오징어, 삼치 등의 어획량이 증가했고, 갈치, 강달이 등의 어획량은 감소했다(그림 2-5-4). 쥐치류와 정어리는 80~90년대 높은 어획량을 기록했으나, 현재는 자원이 거의 고갈된 상태이다. 서해는 멸치, 꽃게, 굴류 등의 어획량이 증가했고, 갈치, 강달이, 갑오징어, 뱅어류는 감소했다(그림 2-5-5). 동해는 살오징어, 붉은대게, 문어류, 청어, 가자미류 등이 증가했고, 멸치, 쥐치류, 꽁치, 양미리 등은 감소했다. 명태는 80년대 높은 어획고를 기록했으나, 90년대 크게 감소하였고 이후 자원이 고갈되었다(그림 2-5-6).

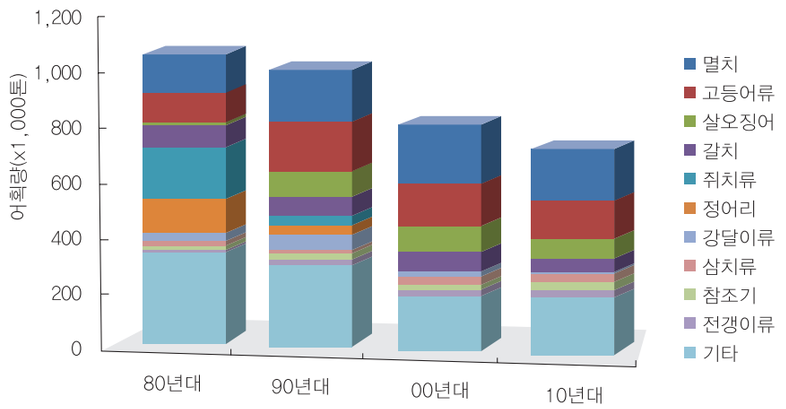


그림 2-5-4 남해구 어획량 및 어종별 어획량

[출처 : 국립수산과학원 연근해자원과]

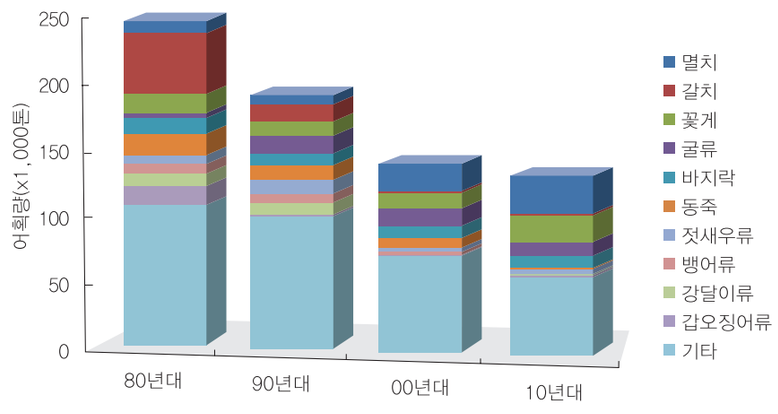


그림 2-5-5 서해구 어획량 및 어종별 어획량

[출처 : 국립수산과학원 연근해자원과]

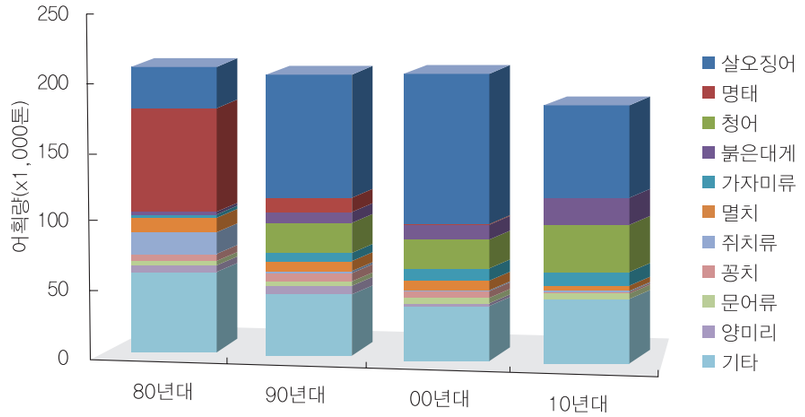


그림 2-5-6 동해구 어획량 및 어종별 어획량

[출처 : 국립수산과학원 연근해자원과]

3) 기후변화 모니터링 대상 어종별 어획현황

기후변화에 따른 어획량 변동 및 해역(행정구역)간 어획량 변동이 비교적 크게 나타나고 있는 어종(방어, 대구, 삼치) 등을 대상으로 세부적인 변동경향을 분석하였다.

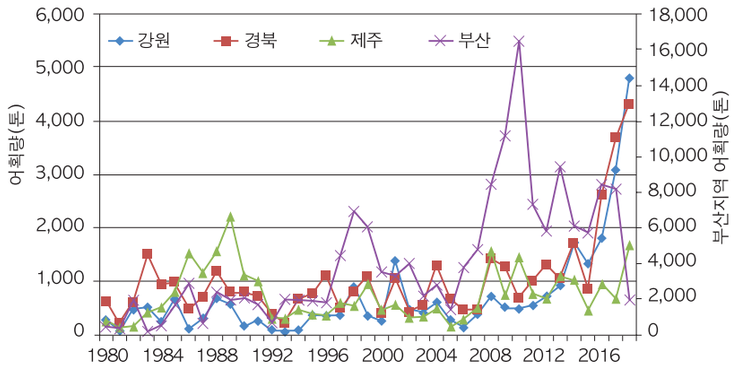
가) 방어류

방어류 어획량의 가장 높은 비중을 차지하는 부산지역에서 80년대는 1,700톤 수준이었으나 90년대 3,000톤, 00년대 4,500톤, 10년대 8,000톤으로 지속적인 증가추세를 보였다(그림 2-5-7). 그러나 최고 어획량을 기록한 2010년(16,000톤) 이후에는 급격한 감소추세를 보이고 있으며, 특히 지난해에는 1,983톤으로 크게 저조한 어획을 기록하면서 강원(4,802톤), 경북(4,302톤) 보다 낮은 어획량을 기록하였다. 제주는 80년대 900톤 수준이었으나 90년대와 00년대는 각각 500~600톤 수준으로 감소하였고 10년대에는 다시 1,000톤 수준까지 증가하였다. 경북은 80년대 800톤, 90년대 700톤, 00년대 800톤 수준으로 비교적 안정적인 어획량을 나타냈으나, 10년대에는 1,900톤 수준까지 크게 증가했다. 특히 최근 3년간 어획량은 2016년 2600톤, 2017년 3675톤, 2018년 4302톤으로 급격한 증가를 보이고 있다. 강원은 80~90년대 300~400톤 수준을 기록했고, 00년대에는 500톤으로 다소 증가한 후 10년대 들어 1,700톤 수준까지 급격한 증가추세를 보였다. 특히 방어류 어획량의 장기적인 변동은 같은 지역 내에서도 해마다 증감이 반복되는 연변동성이 크게 나타났다. 이는 방어류 어획량이 해양환경 변동에 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 장기 어획량 변동에서 80년대~00년대 초반까지는 뚜렷한 증가추세를 발견하기 어려우나 00년대 중반에 들어서면서 부산, 제주, 강원, 경북 전 지역에서 어획량이 증가하기 시작했다. 그러나 부산과 제주는

2010년 이후 감소추세를 보인 반면, 강원 및 경북은 최근까지 증가추세가 이어지고 있다. 특히 2016년 이후에는 급격한 증가추세를 보이고 있는데, 이는 지난 3년간 우리나라 주변해역에서 강하게 나타났던 연근해 고수온 현상과의 연관성에 대해 추가적인 분석이 필요할 것이다. 해역별로 구분한 동해와 남해의 어획량은 지난해 약 35년 만에 동해 어획량이 남해 어획량을 넘어섰다(그림 2-5-8).

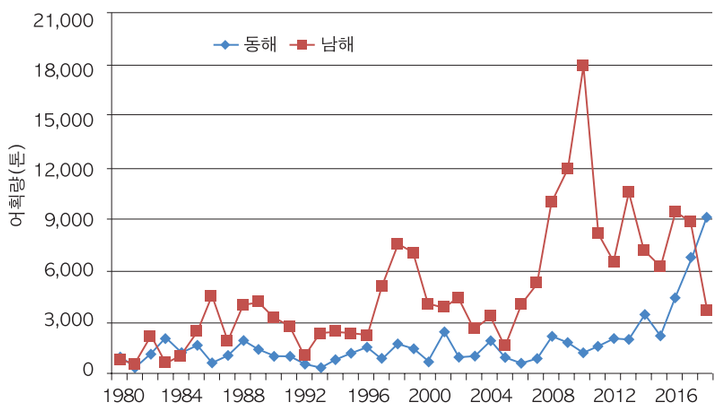
전반적으로 동해와 남해의 최근 어획량 대체현상은 수온상승에 따른 어종 분포이동 및 어장 이동의 결과일 가능성이 있으나, 이러한 급격한 어획량 대체가 최근 3년간 발생하고 있는 점에서는 기후변화의 영향으로 어장이 이동하였다고 단정 짓기는 어렵다. 향후 지속적인 지역 간 어획량 변화 모니터링을 통해, 어장의 장기적인 이동 및 확장에 관한 연구를 수행할 필요가 있다.

그림 2-5-7 방어류 지역별 어획량변동



[출처 : 국립수산과학원 연근해자원과]

그림 2-5-8 방어류 해역별 어획량



[출처 : 국립수산과학원 연근해자원과]

나) 대구

대구는 80년대 주로 서해와 남해에서 일시적인 어획량 증가 현상이 나타났으나, 90년대 들어서는 전 해역에서 500톤 미만에 저조한 어획이 지속되었다(그림 2-5-9). 이후 2000년대 초반부터 어획량이 증가하기 시작하였고, 00년대는 4,000톤, 10년대는 8,200톤 수준까지 큰 폭으로 증가했다. 동해에서 대구어획량은 80~90년대 300톤 수준이었으나, 00년대 들어 1,700톤 수준으로 증가했고, 10년대에는 2,600톤까지 크게 증가했다. 남해에서는 80년대 약 1,000톤 수준이었으나, 90년대 들어 급격히 감소하면서 57톤 수준까지 감소하였다. 반면 00년대 들어서는 700톤 수준까지 회복되었고, 10년대 들어서는 1,800톤 수준까지 급격한 증가를 나타내었다. 서해는 80년대 약 1,000톤 수준이었으나 90년대에는 150톤까지 감소하였고, 00~10년대에는 각각 1,700톤, 3,800톤으로 크게 증가했다. 한편 최근 10년대에는 동해와 남해에서 감소추세를 나타내고 있으며, 서해의 경우 2014년(8,896톤)과 2016년(647톤)에 큰 폭의 증감을 나타낸 후 최근 3년간은 증가추세를 보이고 있다.

대구 또한 수온상승에 따른 어장이동의 가능성이 제기되고 있는 상황이나 전반적으로 해역간 어획량 대체현상보다는 장기적인 증감 추세에서 유사한 경향을 보이고 있어 단순히 기후변화의 영향으로 인한 어장의 북상이동 가능성은 다소 낮은 것으로 판단된다. 해역별 주어기는 동해에서 10월~1월, 남해에서 12월~1월, 서해에서 9~1월로 나타났고, 최근 30년간의 주어기 변화는 나타나지 않았다.

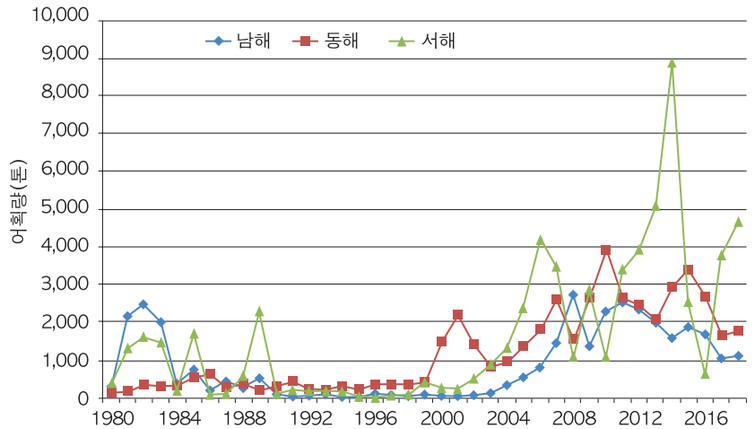


그림 2-5-9 해역별 대구 어획량

[출처 : 국립수산과학원 연근해자원과]

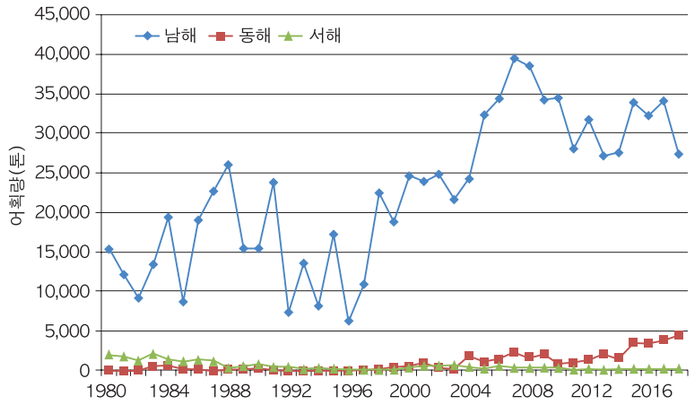
다) 삼치류

삼치류는 1990년대 후반부터 어획량이 크게 증가하여 최근 5년간 약 35,000톤 수준의 어획량을 유지하고 있다(그림 2-5-10). 남해에서 삼치류 어획량은 80~90년대 약 15,000톤 수준이었으나, 00~10년대에는

약 30,000톤 수준으로 급증하였다. 동해는 80~90년대 100~300톤 수준이었으나, 00년대 1,300톤 수준으로 증가했고, 10년대에는 2,500톤 수준까지 증가하였다. 반면 서해에서는 80년대 1,400톤의 어획량을 기록했으나 90~00년대에 걸쳐 300~400톤 수준으로 저조하였고, 10년대에는 200톤 수준까지 감소했다.

해역별 장기 생산량 변화 중 동해어획량은 남해에 비해 상대적으로 적은 비중을 차지하나, 지속적인 어획량 증가 경향을 보이고 있어 해수온 상승으로 인한 어종의 분포변화 및 어장 변화의 관점에서 보다 면밀한 분석이 필요하다. 한편, 주요 대형업종에서는 여름~가을철 주로 서해에서 조업하나, 대부분의 위판이 남해지역에서 이루어지고 있어 실제적인 서해 어획량 파악을 위해서는 세부적인 어획위치데이터의 수집이 반드시 필요하다. 남해에서 주어기는 11~1월, 동해에서는 9~11월로 나타났고, 해역별 주어기의 변화는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

그림 2-5-10 해역별 삼치류 어획량



[출처 : 국립수산과학원 연근해자원과]

라) 시사점

전체적으로 어업생산통계(해역별, 지역별)를 활용하여 살펴본 방어, 대구, 삼치의 지난 30년간의 분포 및 어장변화는 방어와 삼치가 강원, 경북지역에서 어획량이 증가하고 있는 것으로 파악되어, 이들 어종의 분포 이동 및 확장 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 대상어종의 분포 및 어장이동에 대한 정확한 분석을 위해서는, 어장위치 정보에 기반을 둔 장기 어획통계자료의 활용이 선행되어야 할 것으로 판단되며, 00년대 이후의 주변국과의 어업협정으로 인한 어장의 축소를 비롯하여, 해당 어업에서의 대상어종 변경 등과 같은 실제 어획량 및 어획위치에 영향을 줄 수 있는 인위적인 요인들을 충분히 고려해야한다. 향후 보다 장기 어획데이터를 활용한 분석 및 기후변화 취약 대상어종에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

4) 우리나라 주변 아열대성 어종 출현 현황

가) 제주도 주변 아열대성 어종 출현 현황

해수온 상승 등과 같은 기후변화에 따라 우리나라 연근해에서도 아열대 어종의 출현이 빈번하게 보고되고 있다. 특히 제주도에서는 청줄돔, 가시복, 거북복, 아홉동가리, 호박돔 등 65여 종이 출현하고 있는 것으로 보고(표 2-5-1)되고 있으며, 독도 주변해역에서도 아열대성 어종인 자리돔, 파랑돔 등의 서식이 지속적으로 확인되고 있다. 하지만 이들 아열대성 어종의 대부분이 현재 어획대상 어종이 아닌 경우가 대부분이고 이에 따라 상업적 이용도가 낮아 정확한 어획통계가 잡히지 않고 있는 실정이다. 최근 2012년 이후에는 제주연안 5개 정점에서 아열대어종 출현동향 어획시험조사가 실시되고 있으며, 장기적인 시험조사 및 모니터링을 통해 우리나라 주변해역의 아열대성 어종 출현에 대한 정량적인 분석결과를 제공할 예정이다.

표 2-5-1 제주주변해역 아열대성 어종 출현종 리스트(65종)

아열대성 어종 리스트					
ㄱ	가다랑어	ㅁ	무늬깜정이	ㅈ	주걱치
	가시복		무점황놀래기		주홍감펭
	갈전갱이		무지개놀래기		주황촉수
	강담돔	ㅂ	빨간씬벵이		줄갈돔
	거북복	ㅅ	살자리돔		줄도화돔
	구갈돔		세동가리돔		줄동갈돔
	깨알홍어		세줄얼게비늘		줄삼치
	꼬리줄나비고기		실꼬리돔		줄씬벵이
	꼬치고기		쏠배감펭		쥐돔
ㄴ	나비고기		쏠종개	ㅊ	철갑둥어
	남방주걱치		쑥감펭		청복
	낫잿방어	ㅇ	아홉동가리		청줄돔
	노란씬뱅이		어렝놀래기	ㅎ	호박돔
	노랑가오리		옥두놀래기		홍치
	놀래기		용치놀래기		황놀래기
ㄷ	다섯줄얼게비늘		우럭볼락		황돔
	독가시치		은하수놀래기		황매퉁이
	두줄베도라치		인상어		황점베도라치
	두줄촉수	ㅈ	자리돔		흑가오리
ㅁ	목탁가오리		잿방어		히메치
	무늬갈돔		전기가오리	총 65종	

제 6절 주요 양식생물의 기후변화 영향 분석

국내 천해양식업 생산량은 양식기술의 개발과 수산물에 대한 풍부한 시장수요를 바탕으로 1970년대 119,211톤에서 2018년 2,250,567톤으로 급격히 성장하였으며, 수산물 총 생산량에서도 양식생산량이 어업생산량을 추월하여 천해양식업의 비중이 지속적으로 높아지고 있다(그림 2-6-1). 그러나 기후변화로 인한 해양환경의 변화가 양식생물의 생리·생태에 영향을 미치고, 이와 관련한 어업피해 등이 발생하여 생산성이 저하되는 문제점이 발생하고 있다. 따라서 최근 발생한 기후변화에 따른 양식생물의 영향에 대해서 서술하고자 한다.

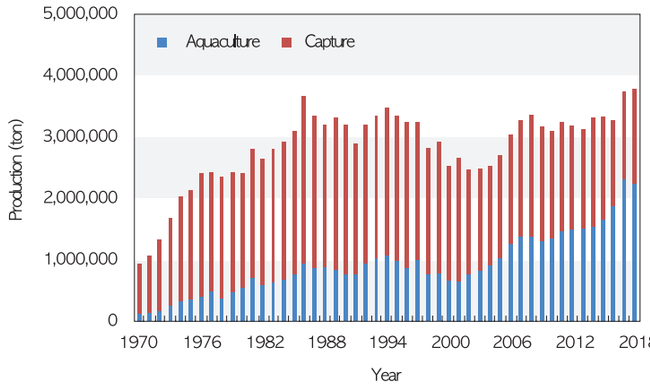


그림 2-6-1 국내 양식 및 어업 생산량 변화

[출처 : 통계청]

1) 양식생물 피해발생 현황(경상남도)

경상남도 지역은 2018년을 기준으로 국내 패류 양식생산량 410,921톤 중 71.7%인 294,108톤을 생산하는 패류양식의 중심지이다. 또한 해상가두리에서 양식되는 어류 중 56.8%인 24,731톤이 경상남도에서 생산되고 있다(육상양식장에서 양식되고 있는 넙치 생산량 제외). 경상남도 지역에서 2003년 이후로 발생한 어업피해는 총 2,573건이 발생하였다. 2013년에는 적조가 경상남도 지역에 큰 피해를 입혀 1,053건으로 발생건수가 가장 높게 나타났으며, 2016년과 2018년에 각각 327건 및 302건으로 나타났다(그림 2-6-2). 2018년의 경우 어업피해 발생원인은 고수온이 251건으로 가장 높게 나타났으며, 저수온 15건, 이상해황 10건, 질병 3건, 기타 23건(원인불명) 순으로 나타났다. 품종별로는 어류 177건, 패류 17건, 무척추동물 108건이 발생하였다. 대부분의 어업피해는 2011년 이후에 집중되는 것으로 나타났으며, 최근에는 고수온·저수온과 같이 평년수온과 비교하여 높거나 낮은 수온이 양식생물의 폐사에 직접적인 요인이 되는 경우가 빈번히 발생하고 있다.

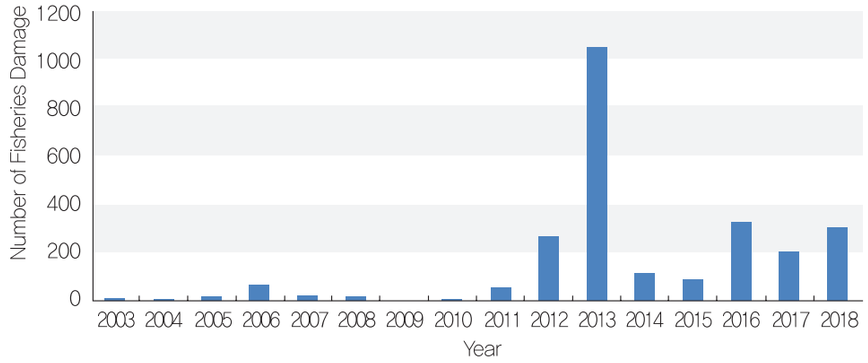


그림 2-6-2 경남권역 양식생물 피해발생 건수

[출처 : 국립수산과학원 남동해수산연구소]

2) 기후변화에 따른 양식생물 취약분야 실태조사

가) 참굴

참굴(*Crassostrea gigas*)은 식물성 플랑크톤 식성으로 기후변화에 따른 해양환경에 민감하게 반응하는 대표적인 양식품종으로, 장기간의 연구자료 확보가 용이하다. 또한 참굴은 1970년 36,981톤(패류양식 생산량의 49.4%)에서 2018년 303,183톤(패류양식 생산량의 73.8%)으로 생산량이 크게 증가하였으며, 특히 경남지역에서 전체 참굴 생산량의 80.6%(244,342톤)이 생산되고 있어 산업적으로 매우 중요한 품종이지만, 기후변화로 인한 영향으로 산란주기 변동, 산란량 변화, 비만도 저하, 패각 특성 변화 등의 현상이 나타나고 있다.

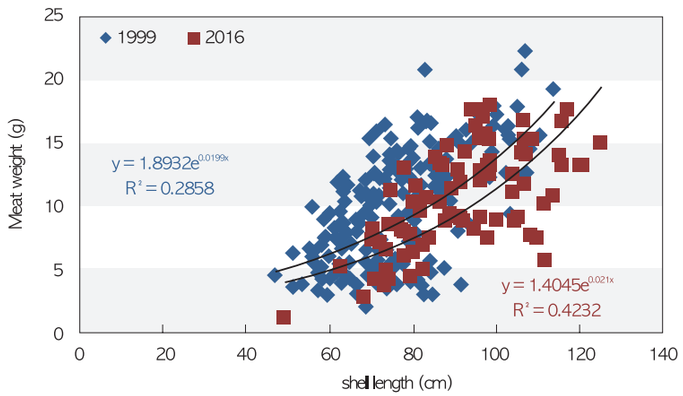


그림 2-6-3 1999년과 2016년 참굴 각고 및 육중량 분포도

[출처 : 국립수산과학원 남동해수산연구소]

1999년과 2016년 참굴의 각고와 육중량 분포도는 그림 2-6-3에 나타내었다. 해당년도의 연체부지수(육중/전중×100)는 각각 23.4, 22.4였으며, 2016년이 1999년보다 약간 낮게 나타났다. 하지만 1999년과 2016년 참굴 각고와 육중량의 비율을 계산한 결과 각각 12.7, 11.6이었으며, 2016년이 1999년의 약 90.7%로 연체부지수 차이보다 더 크게 나타났다. 연체부지수보다 각고·육중량 비율의 감소폭이 더 큰 것은, 1990년대에 비해 패각이 얇아지고 각고의 성장에 비해 육중량의 성장저하가 더 크게 나타났기 때문으로 분석된다. 이 결과는 환경오염, 기후변화, 먹이생물 감소 등 양식 환경의 악화에 기인한 것으로 추측되며, 전체 참굴 생산성의 저하는 육중량 및 패각중량의 감소에 의한 것으로 나타났다.

최근 참굴의 연체부지수 변화를 조사하기 위하여 경상남도 관내 참굴 양식장 2개소를 선정하여 2018년 생산된 치패 수하연 시설이 완료되는 6월부터 매월 생물학적 특성을 조사하였으며, 이 결과를 2016년 및 2017년 조사 자료와 비교·분석하였다. 입식시기(2018년 6월)부터 8월까지 여름철 고수온기에는 패각의 성장이 중점적으로 이루어지기 때문에 연체부지수가 8월에 15.6±0.3까지 낮아졌으나, 9월 이후부터 점차 증가하는 경향을 보였다(그림 2-6-4). 2016~2018년까지 연체부지수 조사결과, 패각이 성장하는 여름철에 연체부지수가 가장 낮아지는 시기가 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 환경적인 영향에 따라 변화하는 패류의 생물학적 특성과 관련된 것이며, 참굴의 생물학적 특성을 파악하기 위해 장기적인 모니터링이 계속되어야 할 것으로 판단된다.

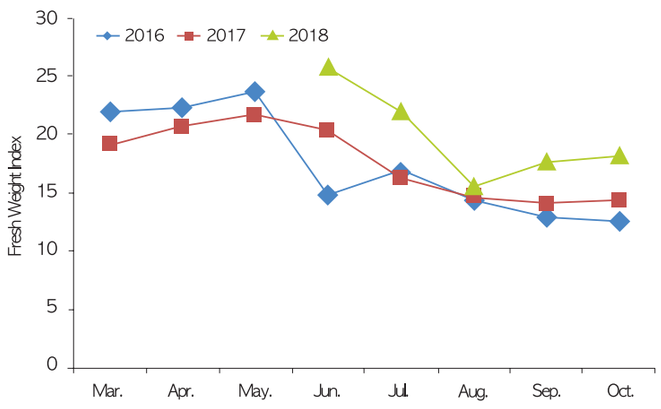


그림 2-6-4 연도별 참굴의 연체부지수 월별 변화

[출처 : 국립수산과학원 남동해수산연구소]

기후변화에 따른 참굴의 재생산기구 변동조사 결과, 1998년 참굴의 생식주기 보고와 비교하여 최근의 생식주기는 5~10월로, 생식소 활성화 및 산란시기가 2개월 정도 앞당겨지고, 2개월 정도 연장된 것으로 나타났다. 이러한 연체부지수와 산란기의 연도별 변화는 환경적인 요인(수온, 먹이생물 등)에 기인한 것으로 판단되며, 장기적은 모니터링을 통해 생활사 및 번식주기 등을 현재의 환경조건에서 구명함으로써 양식방법 개선 등 변화방안을 제시해야 할 것으로 사료된다.

나) 해만가리비

해만가리비(Argopecten irradians)는 1960년대 중반 미국 Virginia Institute of Marine Science (VIMS)에서 양식기술이 개발되었으며, 1982년에 중국으로 이식되어 새로운 양식 대상종으로서 현재까지 양식되고 있다(Zhang et al., 1986; Michael, 1998). 국내의 경우 2010년대에 중국으로부터 종패를 이식하여 경상남도 고성군 자란만 해역을 중심으로 양식이 시작되었다. 짧은 양식기간(1년 내외)으로 인해 패류 양식품종으로 각광 받으면서, 양식생산량은 2013년 194톤에서 2018년에는 5,113톤으로 생산량이 급격히 증가하고 있다. 그러나 최근 기형패 및 대량 폐사가 빈번하게 발생하고 있는 기후변화에 대한 취약도가 매우 높은 품종이다.

수온변화에 따른 2년생 해만가리비의 생존율을 조사하기 위해 시험어장에 2016년 5월에 종묘생산한 해만가리비 20채롱(약 270마리/채롱, 평균각장 74.5±0.4 mm)을 2017년 2월에 입식하여 매월 생물학적 특성 및 생존율을 조사하였다. 입식당시(2월) 해만가리비의 생존율은 95.3%였다. 4월 87.4%에서 5월에 17.5%로 폐사개체가 급격히 증가하였고, 6월에 모든 개체가 폐사하였다. 연체부지수는 2월 45.0±0.3에서 계속해서 감소하는 경향을 보여, 5월에는 40.3±0.9로 나타났다. 해만가리비의 경우 수명이 약 18개월로 알려져 있으나, 본 조사 결과 종묘생산 후 12개월이 지나면서 폐사율이 급격하게 증가함을 확인하였다. 생존율의 급격한 감소는 산란기에 접어든 해만가리비가 수온변화와 같은 환경변화에 대한 적응력이 떨어졌기 때문으로 판단된다(그림 2-6-5).

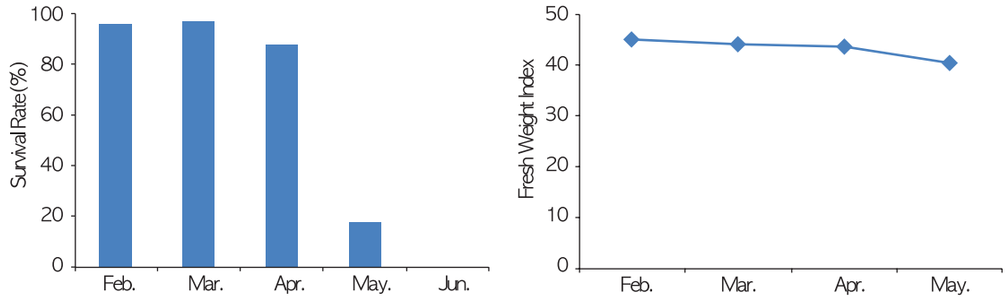


그림 2-6-5 해만가리비 생존율(좌) 및 연체부지수(우) 월별 변화

[출처 : 국립수산과학원 남동해수산연구소]

해만가리비의 생물학적 특성을 조사하기 위해 경남 관내 자란만 및 고성만 해역의 양식장 2개소를 선정하였으며, 2018년 7월초에 1차양성망 단계로 각각의 양식장에 입식하였다. 입식당시의 평균 각장은 5~10 mm였으며, 8월 중순에 채롱식 양성망에 입식하여 본 양성을 시작하였다. 10월까지의 폐사율은 약 5%이며, 평균 각장은 각각의 양식장에서 6.0±0.8 cm, 5.6±0.9 cm로 성장하였다.

해만가리비의 폐사와 기후변화에 따른 먹이생물 변화의 상관관계를 조사하기 위해 자란만 해역의 식물성 플랑크톤 농도의 변화를 조사하였다. 자란만 해역의 식물성 플랑크톤 농도는 2017년 10월 이후 낮게 유지되었으며, 2017년 12월말에서 2018년 3월말까지는 0.5~0.9 cell/mL로 현저하게 낮은 농도를 나타냈다. 이러한 식물성 플랑크톤 농도는 2017년에 입식한 해만가리비에서 2018년 2월 중순 이후 발생한 대량폐사에 영향을 주었을 것으로 판단되며, 2018년 4월 이후 식물성 플랑크톤 농도가 회복되는 경향을 보였다(그림 2-6-6).

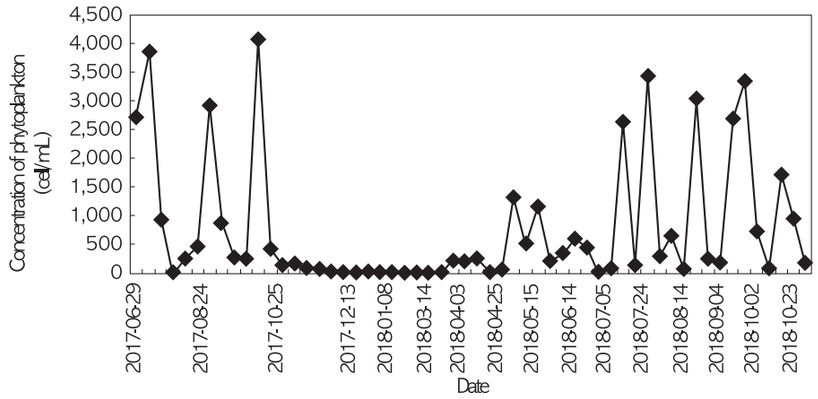


그림 2-6-6 고성군 자란만 해역의 식물성 플랑크톤 농도 변화

[출처 : 국립수산과학원 남동해수산연구소]

해만가리비 양식에 있어서 대량폐사와 기형발생은 꾸준히 문제점으로 제기되어 왔다. 해만가리비 폐사에 영향을 미칠 수 있는 요인으로는 품종의 열성화, 산란기 생리활성 저하, 먹이생물의 부족 등 다양한 요인에 의해서 발생되는 것으로 판단된다. 기후변화로 인한 해만가리비의 생물학적 특성과 해양환경 요인의 변화는 복합적으로 해만가리비의 폐사에 직접적인 요인이 될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 해결하기 위해서 장기적인 생물·환경적인 요인의 모니터링을 통해 변화하고 있는 환경조건에서의 양식방법 개선 등을 제시해야 될 필요성이 있다.

3) 기후변화에 따른 수산질병 취약분야 실태조사

2016년 조피볼락 선충 감염 조사 결과 경상북도 포항의 조피볼락(105마리), 경상남도 통영의 조피볼락(160마리) 및 전라남도 흑산도의 조피볼락(38마리)에서 선충은 검출되지 않았다. 그러나 충청남도 천수만의 조피볼락에서는 32%(58/182마리) 선충 감염이 확인되었다. 2013부터 2016년 까지 조사 해역의 수온은 서해안 천수만 지역이 연중 수온 변화가 21±1.7℃로 가장 높았고, 포항 및 통영지역은 타 지역에 비하여 연중 수온변화 폭이 11±2.8℃로 작은 것으로 나타났다. 조피볼락 선충은 서해안 천수만 지역에 집중적

으로 발생하는 것으로 나타났다. 조피볼락 선충 중간숙주는 해수 중에 존재하는 동물성부유생물의 하나인 요각류(Copepoda)로 확인되었다. Choi and Park(2013)은 1978년부터 2006년도의 서해안의 동물부유생물을 조사한 결과, 1970년대 후반부터 1980년대 중반에는 모악류(Chaetognatha) 및 난바다곤쟁이류(Euphausiacea)가 많이 출현하였으나, 1990년도 초반부터 요각류의 출현빈도가 상대적으로 높게 확인되었던 것을 보고하였다. 서해안 지역의 조피볼락 선충 발생과 1990년 이후에 서해안 지역 요각류 출현빈도 증가는 조피볼락의 선충 감염 발생과 연관성이 있을 가능성이 있어 이와 관련한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 최근 기후변화로 인한 신종 병원체 발생이 증가하고 있으며, 실제 우리나라에서도 양식넙치에서 신종 질병으로 인한 피해가 발생하고 있다. 따라서 우리나라 대표 양식어종인 넙치를 대상으로 신종 점액포자충에 대한 형태학적, 분자생물학적 동정을 위하여 양식넙치의 포자충류를 형태학적으로 분리한 결과, *Davisia diplocrepis, Sinuolinea dimorpha, Parvicapsula sp.*로 분류하였으며, 미동정 종(3종)에 대한 동정을 위해 유전자 분석을 실시하였다(그림 2-6-7).

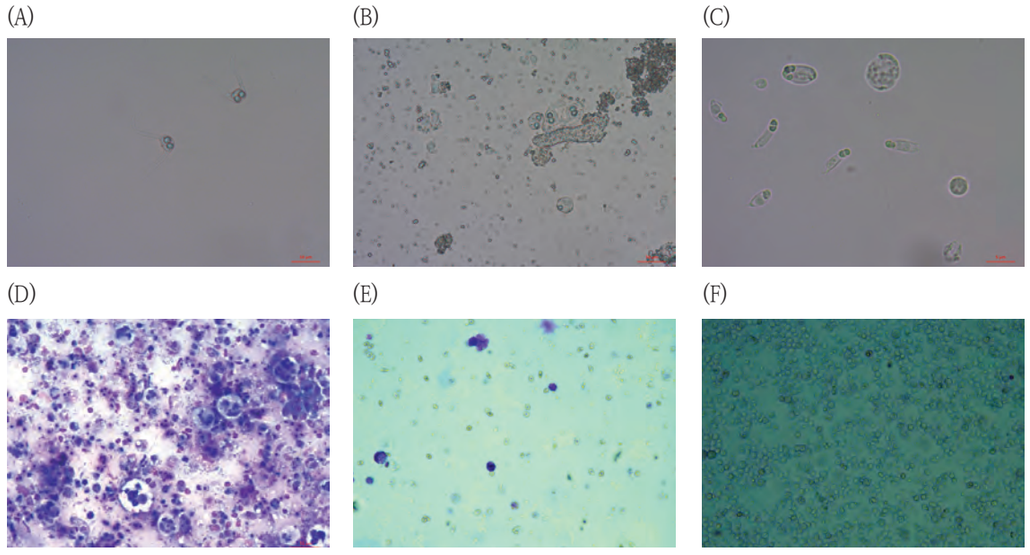


그림 2-6-7 양식넙치에서 관찰되는 포자충류 (A); *Davisia diplocrepis*, (B); *Sinuolinea dimorpha*, (C); *Parvicapsula sp.*, (D), (E), (F); 미동정

신종 점액포자충의 분자생물학적 동정을 위하여 점액포자충내에서 계통발생학적으로 높게 보존된 18S rDNA 유전자에 대한 염기서열분석을 하여, 유전자의 변이가 없는 8개의 보존성이 높은 부위를 확인하였다. 계통발생학적으로 보존이 잘 되어 있는 2개 부위를 선정(그림 2-6-8 (C),(D))하여 이후의 점액포자충 검출용 primer 제작에 활용하였다.

그림 2-6-8에서 선정된 부위를 대상으로 Universal PCR primer를 제작하였고, 미동정 점액포자충을 대상으로 종동정을 실시한 결과, 그림 2-6-7의 미동정(D)의 점액포자충은 *Parvicapsula anisocaudata*로 동정되었다(그림 2-6-9).

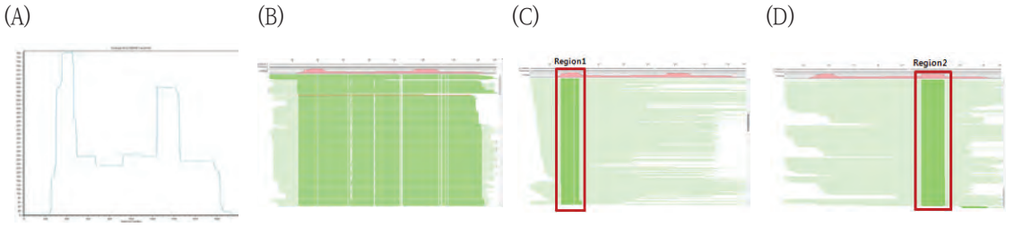


그림 2-6-8 점액포자충 rDNA 유전자의 보존서열 탐색

(A); 보존서열의 분포도, (B); 보존서열 탐색 상세부위, (C)(D); 유전자의 보존성이 높은 부위

[출처 : 국립수산과학원 남동해수산연구소]

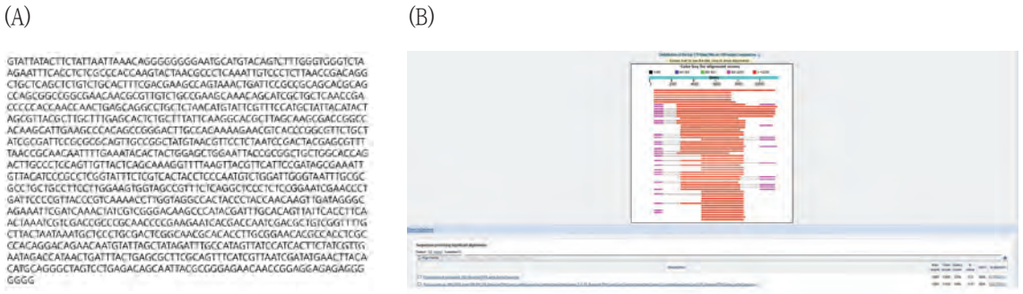


그림 2-6-9 유전자 분석을 이용한 미동정 점액포자충의 동정

(A); 미동정 종의 염기서열, (B); 유전자 유사도 분석을 이용한 동정 결과

[출처 : 국립수산과학원 남동해수산연구소]

4) 양식분야 기후변화 대응 방안

기후변화로 인해 최근 발생하고 있는 어업피해의 경우, 고수온·저수온에 의한 양식생물의 폐사가 주된 원인으로 나타나고 있다. 수온은 어류의 성장과 생존에 영향을 미치는 가장 중요한 환경인자로 알려져 있다(Peck et al., 2005). 또한 어류 양식에서 대상종의 적정수온 조사는 양식 시스템을 개선시키는데 매우 중요 하며(Ahn et al., 2012), 집약적 양식에서 서식환경의 수온 변화는 어류의 건강도에도 영향을 준다(Wedemeyer, 1996). 그리고 수온이 급격하게 변하게 되면 스트레스로 작용하며, 어류의 면역 기능을 포함한 생리학적 조절 능력에 영향을 주게 된다(Kim et al., 2001). 따라서 이와 같은 양식생물의 폐사는 생존

상한·하한수온 범위를 벗어나는 양식장 주변 환경요인이 지속된 결과라고 할 수 있다.

2018년 기준으로 국내 어류양식 총 생산량은 80,501톤으로 넙치(37,269톤, 46.3%), 조피볼락(22,686톤, 28.2%), 숭어(6,382톤, 7.9%) 및 참돔(5,103톤, 6.3%)이 주로 양식되고 있다. 그러나 기후변화로 인한 해양환경 변화는 현재 양식되고 있는 양식생물 중 환경내성이 약한 품종이 생존할 수 없는 환경이 되어 가고 있기 때문에, 현재 양식 대상품종이 아닌 고수온 등 환경변화에 강한 품종의 양식기술 개발이 필요한 실정이다. 따라서 해역별 양식 취약품종을 파악하고 이들 품종의 번식주기 재규명을 통하여 종묘생산시기 및 인공종묘생산기술 안정화 등 실용적인 연구 추진이 필요하다. 또한 기후변화 대응 양식산업 발전을 위하여 지역 고유종 확보·보존, 해역별 양식 적합품종 개발 및 양식지도 작성이 필요할 것으로 사료된다.

양식 어류의 측면에서 해상가두리에서 여름철 및 겨울철의 취약한 시기를 해결하기 위한 방안 마련 역시 필요하다. 현재 양식되고 있는 품종이거나 새로운 양식대상종의 성장 및 생존율을 높이기 위한 방안으로 산란기를 인위적으로 조절하여(수온, 광주기 등 환경요인 조절) 당년에 종자생산, 양성, 판매하여 겨울철 취약시기를 해결할 수 있는 방안이 요구된다. 특히, 1인 가족 시대에 따라 양식순기 조절을 통한 당년생 판매가 가능한 양식기술 개발도 요구된다.

제 3장 ▶ 최근 이상기후에 따른 수산업 피해 발생 원인 분석

제 1절 전 지구 해양의 이상기후 발생 경향

제 2절 이상기후에 따른 이상 수온 발생 경향 분석

제 3절 이상기후에 따른 양식생물 대량 폐사/특보 발령

제 3장 _ 최근 이상기후에 따른 수산업 피해 발생 원인 분석

제 1절 전 지구 해양의 이상기후 발생 경향

최근 급격한 북극 온난화에 따른 겨울철 혹한과 전 지구촌에서 광범위하게 발생하는 폭염의 영향으로 다양한 해양의 급격한 변동 경향이 발생하고 있다. 인위적인 기후변화는 관측을 통하여 열대 및 아열대 해역의 폭풍과 관련한 강수량, 바람 및 극심한 해수면 변동 이벤트를 유발시키고 있다. 예를 들어, 연구에 따르면 열대성 저기압에 의한 태풍의 강도는 기후변화로 인하여 8% 이상 세력이 증가한 것으로 나타나고 있으며, 북반구 중위도 지역에서는 최근 수십 년간 북극 온난화, 블록킹(Blocking) 현상 및 다양한 형태의 기상 이변이 나타나고 있다. 본 절에서는 최근 급증하는 이상기후 현상 중 우리나라와 밀접한 관련이 있는 이상 고수온(Marine Heatwaves)에 대하여 IPCC SROCC(2019)에 기술된 내용을 바탕으로 경향을 살펴보고자 한다.

장기적인 해양 온난화 추세에 겹쳐지면서 해양의 온도가 단기간에 급격하게 상승하는 이벤트를 일반적으로 이상 고수온이라고 한다. IPCC AR5에서는 점진적으로 상승하는 수온에 따른 해양 생물과 생태계의 반응에 대한 부분은 평가되었지만(Hoegh-Guldberg et al., 2014; Pörtner et al., 2014), 이상 고수온과 관련된 자연, 물리 및 사회-경제적 시스템의 반응에 대한 연구는 AR5 이후에 새롭게 등장하였다. 단, AR5에서는 이상 고수온과 관련한 열대 산호초 생태계 시스템과 조간대 시스템의 영향에 대한 연구는 일부 수행되었었다(Gattuso et al., 2014).

이상 고수온은 시간적으로는 수일에서 수개월동안, 공간적으로는 수천 킬로미터 이상까지, 연직적으로는 수백 미터 수심에 이르는 심해까지 나타나는 급격하게 높은 수온이 나타나는 현상이다 (Hobday et al., 2016, Scannell et al., 2016, Benthuysen et al., 2018). 이상 고수온은 특정한 해역과 특정한 시점에 주로 나타나게 된다. 정의에 따라서 이상 고수온이라 불리는 특성은 절대적인 의미로 해역마다 차이를 보일 수 있다. 이상 고수온을 정량화 하는데 빈도, 기간, 강도 공간적 확장 정도 및 미치는 심각한 영향 등에 의해 서로 다른 방법이 사용될 수 있다.

1) 관측된 이상 고수온의 주요 프로세스와 속성

IPCC SROCC에서는 지난 20여 년 동안 전 세계 해양 곳곳에서 관측되고 기록된 이상 고수온이 나타나고 있다고 보고하고 있다. 대표적인 사례로는 북동태평양에서 2013~2015년 사이에 나타난 일명 “the Blob”

이라는 현상(Bond et al., 2015), 2016~2018년 사이에 나타난 대한민국 주변 해역(관계부처합동, 2017; 관계부처합동, 2018; 관계부처합동, 2019), 2011년 오스트레일리아 서쪽 해역(Pearce and Feng, 2013; Kataoka et al., 2014) 및 2012년 북서대서양 해역(Mills et al., 2013)등 이다.

이상 고수온의 발생, 지속 및 쇠퇴로 이어지는 주요 해양 및 대기와의 상호 과정은 각 개별의 이상 고수온 현상의 발생 위치와 시간에 따라 달라진다. 가장 대표적인 이상 고수온의 동인(Driver)으로는 엘니뇨 현상을 들 수 있다(Olever et al., 2018). 엘니뇨 기간 동안, 해수면 온도, 특히 중앙 및 동쪽 열대 태평양 해역과 인도양 해역은 비정상적으로 높아진다. 또한 이상 고수온 현상은 또 다른 대규모 기후변동 인자, 즉 태평양 십년 주기 변동(Pacific Decadal Oscillation), 대서양 수십 년 주기 변동(Atlantic Multidecadal Oscillation), 인도양 다이폴 현상(Indian Ocean Dipole), 북태평양 진동(North Pacific Oscillation), 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation) 등에 의해 영향을 받는데 각각의 현상은 각 해역마다 해양 수온의 변화에 큰 영향을 주고 있다. 이와 같은 현상들은 해역 내의 수온을 급격하게 상승할 수 있는 해류의 강도와 방향, 위치를 조정할 수 있으며, 해양-대기 열 교환을 변화시켜 해양 표층의 수온을 상승 시킬 수 있다. 예를 들어 2010~2011년의 강한 라니냐 현상은 오스트레일리아 서쪽 연안을 따라 남쪽으로 흐르는 류윈해류(Leeuwin Current)를 강화하고 변화시켜 오스트레일리아 서쪽 해역의 2011년 이상 고수온 현상을 일으키게 된다. 또 다른 예로, 북태평양과 약한 엘니뇨간의 원격 반응(Teleconnection)에 의한 반응으로 2013년 나타난 Blob 현상은 북태평양을 가로지르는 강한 양의 해수면 압력 이상이 해양으로부터의 열 손실을 감소시키는 역할을 하였다.

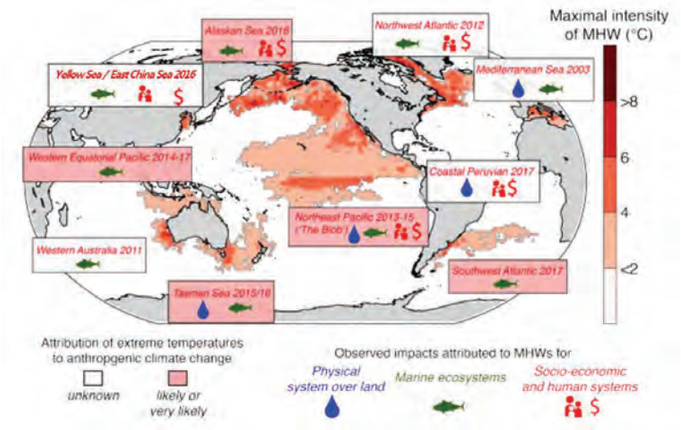


그림 3-1-1 최근 20년 고수온 현상이 나타난 해역과 이상 고수온에 따른 영향에 대한 모식도

(이상 고수온 강도는 NOAA 최적 내삽 수온 자료)

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

급격하게 높아진 해수면 온도의 지속 및 쇠퇴는 해양 중규모 소용돌이 혹은 지역적 대기 기상 패턴과 같은 소규모 대기 및 해양 과정에 의해 나타난다. 2015~2016년 타스마니아해(Tasaman Sea)의 이상 고수온 현상은 남태평양 중위도 해역의 바람 응력에 의해 발생하였으며, 지역적인 침강 친화적인 바람패턴에 의하여 이상 고수온의 아표층 해역으로의 강화가 나타났다. 2016년 그레이트 배리어 리프(Great Barrier Reef) 남부에서 발생한 이상 고수온 현상은 슈퍼 사이클론 윈스톤에 의하여 쇠퇴되기도 하였다. 태풍 혹은 사이클론 등은 강한 바람과 태양 복사열 감소, 강우 등을 유발하여 해수면 온도를 낮추는 작용을 해준다.

이상 고수온 현상이 더욱 빈번하고, 강력하게 확대되어 나타나게 되는 관측 경향은 장기적으로 인위적 영향에 의한 수온 상승과 밀접한 관련성이 있으며, 자연 기후 변동성으로는 설명하기 힘들다(Frölicher et al., 2018; Oliver 2019). 기후모델에서 21세기 동안 해양 수온의 장기적인 증가를 예상함에 따라(Collins et al., 2013), 지구온난화가 지속되는 한 이상 고수온 현상의 발생 확률은 더욱 증가할 것이다. 인공위성 모니터링 이전인 1982년 현장 관측 자료의 월 단위 자료 정비를 통하여 전 세계 해양의 이상 고수온의 발생 빈도와 기간은 1925년 이후 꾸준히 증가한 것으로 보인다. 지역적인 스케일에서, 이상 고수온 현상은 지난 수십 년간 전 세계 연안의 약 38%에서 나타난 것으로 보인다(Lima and Wethey, 2012). 하지만 해수면 아래의 시공간적으로 고해상도 수온 관측 자료의 부족으로 인하여 이상 고수온 현상이 지난 수십 년간 어느 깊이까지 영향을 미쳤는가는 아직 확인되지 않고 있다.

다양한 해역에서 발생한 이상 고수온 현상을 분석한 결과 산업혁명 이후 이상 고수온의 빈도, 기간 및 강도가 증가했을 가능성이 매우 높으며, 이는 온도 상승에 기인한 것으로 결론 지워진다.

2) 이상 고수온의 전망 및 영향

이상 고수온 현상은 미래 지구 온난화에 따라 빈도, 지속시간, 공간적인 범위와 강도가 증가할 것으로 예측된다(Ramirez and Briones, 2017; Alexander et al., 2018). 12개의 CMIP5 지구 시스템 모델을 기반으로 한 예측 결과에 따르면, RCP 8.5 시나리오 상에서 전 세계적으로 이상 고수온 현상의 발생률은 산업화 이전(1850~1900년)에 비하여 2031~2050년에 약 20~27배 증가할 가능성이 높으며, 2081~2100년에는 약 46~55배 증가할 것이라 하였다(Frölicher et al., 2018). 다시 말해 산업화 이전 수준의 100일에 한 번 발생할 가능성이 있던 이상 고수온 현상은 2031~2050년 기간에는 4일에 한 번 발생할 것이며, 2081~2100년에는 매일 발생할 가능성이 있는 현상으로 바뀐다는 것이다. 이상 고수온의 기간은 RCP 8.5 시나리오 상에서 1850~1900년에 8~10일 정도 이었던 것이 2081~2100년에는 126~152로 증가할 것으로 예측하고 있다(Frölicher et al., 2018).

이상 고수온의 최대 강도(1850~1900년 관측치의 99%를 넘는 관측치)는 1850~1900년의 0.3~0.4℃에서 2081~2100년에는 3.1~3.8℃로 증가할 가능성이 높다. RCP 2.6 시나리오에서 각 개별 이상 고수온 현상의 확률비의 크기는 실질적으로 감소할 것이다. 예를 들어, RCP 2.6 시나리오에서는 RCP 8.5 시나리오에서 예측치의 절반 이하인 2081~2100년의 이상 고수온 발생 비율은 16~24배에 머물 것이다.

고정된 평균 온도와 낮은 해상도의 CMIP5 기후 모델을 사용하여 정의된 이상 고수온 현상의 확률에서 전 지구 변화의 대부분은 평균 해수 온도의 전 지구적 스케일의 변화에 의해 유발된다. 그러나 북극과 같이 이전에 얼음으로 덮여있던 지역은 미래의 지구 온난화에 따라 더 큰 표층 수온 변동성을 보일 것이다. 이는 해빙의 후퇴에 따라 여름철 표층 수온이 증가했기 때문이지만, 겨울철에는 표층 수온이 어는 점 근처에 있기 때문이다. 또한 이상 고수온과 육상의 폭염 발생의 확률 변화를 비교하여 볼 때, 이상 고수온이 더 자주 발생될 것으로 예상된다(Frölicher et al., 2018; Fischer and Knutti, 2015). 이는 온도의 변화가 대기에 비하여 해양 표층에서 더욱 작기 때문에 생기는 것이다(Frölicher and Laufkötter, 2018).

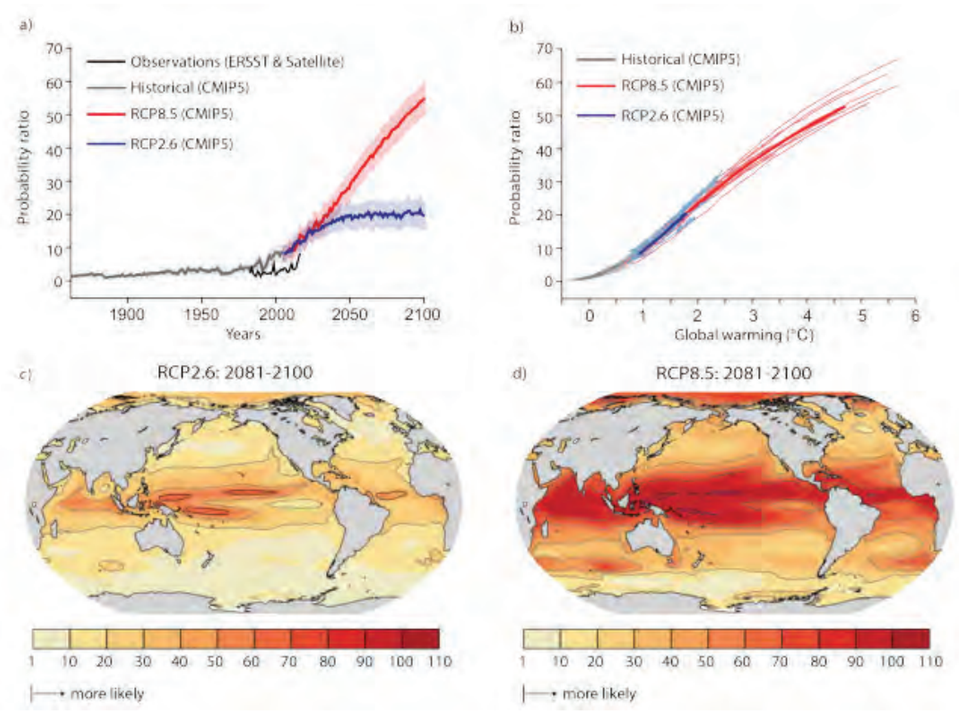


그림 3-1-2 전 세계 및 지역별 이상 고수온 발생 확률 변화 (a) 이상 고수온의 연평균 발생 비율의 변화, (b) 지구 온난화에 따른 이상 고수온 발생 비율 변화, (c)와(d)는 RCP 2.6과 RCP 8.5 시나리오 상에서 2081~2100년에 이상 고수온이 발생 비율의 공간적 분포

[출처 : IPCC SROCC(2019)]

급격한 고수온 현상은 해양 생태계에 큰 영향을 줄 수 있다. 최근 연구에서는 이상 고수온이 지난 20여 년간 모든 해양에서 해양 생물과 생태계 서비스에 강한 영향을 미친다는 것을 보여준다(Smale et al., 2019). 주로 보고되고 있는 이상 고수온에 따른 해양생물의 영향은 산호초의 백화현상과 대량 폐사, 해조장과 켈프 숲의 유실, 종의 공간적 이동, 산호 종의 멸종 등이 있다(Hueghes et al., 2017; Smale et al., 2019; Smale and Wernberg, 2013; Wernberg et al., 2016; Brainard et al., 2011). 특히 이상 고수온의 부정적인 영향으로 산호 및 산호초에 나타나는 백화현상, 질병과 대량 폐사가 최근 급격하게 보고되고 있다. 위에 기술된 부정적인 영향 이외에도 북서대서양 2012년 이상 고수온 현상에서는 난수성 어종의 북쪽 이동 및 몇몇 종들의 지역적 회귀(migration)가 이상 고수온에 따라 영향을 받아 연안 생태계에 부정적 영향을 준 것으로 나타났으며(Mills et al., 2013), 지중해의 2013년 이상 고수온 현상은 소형 무척추 생물의 대량 폐사가 나타나기도 하였다. 발틱해에서는 이상 고수온에 의해 비브리오의 대량 발생이 나타나기도 하였으며(Baker-Austin et al., 2013), 2016년 알라스카해에서는 이상 고수온에 따른 식물플랑크톤의 대량 발생이 나타나 유해조류에 의하여 패류가 독화되면서 바닷새의 대량 폐사가 보고되기도 하였다(Walsh et al., 2018). 또한 알라스카해에서는 이상 고수온에 의하여 저서성 어종들의 체장이 평균 이하로 나타나기도 하였으며, 2016년 황해와 동중국해의 고수온 현상은 대한민국의 연안과 내만의 다양한 해양생물들을 폐사시키기도 한 것으로 보고하고 있다(김과 한, 2017). 페루 연안의 2017년 이상 고수온 현상은 어체 내의 지방 함량을 감소시키고, 조기 산란을 유도하였다는 연구가 있었다(IMPARPE, 2017). 이와 같이 이상 고수온 현상은 산호초, 해조장 등에 영향을 끼치는 것 외에도 수산질병, 양식생물 대량 폐사, 어종의 산란시기 및 회유시기 변화 등 다양한 형태로 생태계와 수산업에 부정적인 영향을 주는 것으로 파악 된다.

이상 고수온 현상은 단순히 해양생물 및 수산업에만 영향을 주는 것이 아니라 해양과 대기의 원격 반응에 의하여 가뭄, 강우 혹은 폭염 현상 등 이상적인 기상 현상을 일으키는 원인으로도 작용한다. 하지만, 이상 고수온 현상이 과거와 미래의 기상 패턴에 영향을 주는 것은 기후 시스템에서 다양한 부가적인 과정상에서 나타나는 것으로 아직까지 확실한 연구는 매우 부족한 현실이다.

제 2절 이상기후에 따른 이상 수온 발생 경향 분석

1) 최근 10년간 우리나라 해역의 수온 양극화 현상

우리나라 주변해역은 장기적으로 수온 상승률이 매우 높아 기후변화 취약성이 높은 해역으로 알려져 있으며, 우리나라 주변해역의 표층 수온상승 경향은 겨울철 수온 상승이 여름철에 비하여 지배적으로 높게 나타나고 있음을 확인하였다. 하지만 이와 같은 장기적인 변화와 더불어 2010년대에 접어들면서 계절별 수온 변동성 경향이 매우 높게 나타나고 있다. 국립수산과학원 정선해양관측 자료를 기반으로 1968년부터 2018년까지 최근 51년간의 평균 수온 대비 2월과 8월의 표층수온 편차 변동을 살펴보았다(그림 3-2-1).

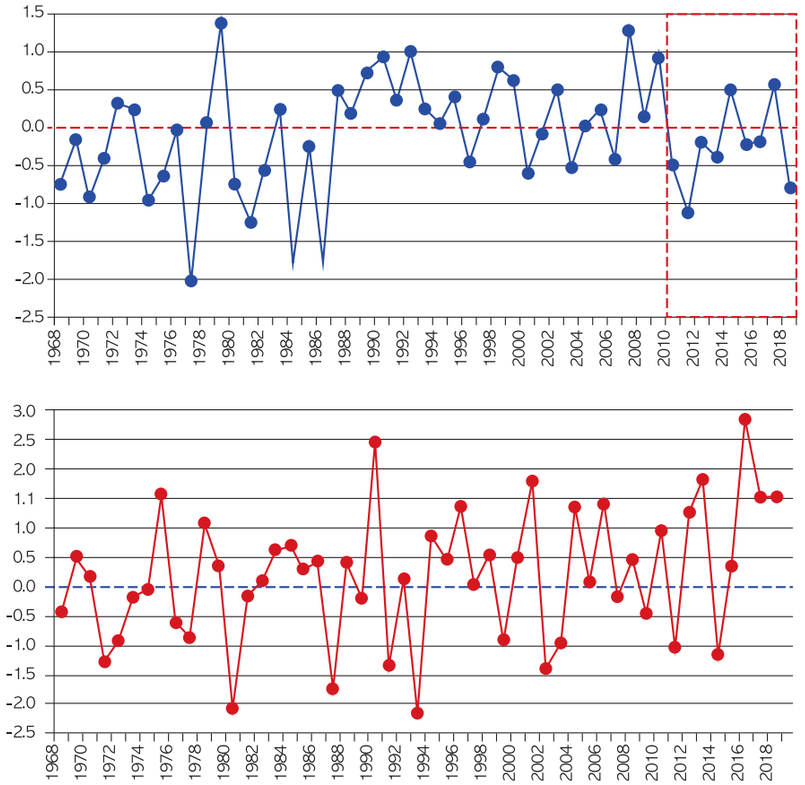


그림 3-2-1 1968~2018년까지 최근 51년간 국립수산과학원 정선해양관측에서 얻어진 2월(상)과 8월(하)의 표층수온 평년편차의 변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

1968년부터 2018년까지 국립수산과학원의 정선해양관측의 표층수온 자료를 분석한 결과, 2월 표층수온의 경우 2010년 이후 평년대비 저수온이 나타난 경우가 9년 중 7년으로 2000년대 10년 중 3년, 1990년대 10년 중 1년에 비하여 겨울철 수온이 낮은 경우가 빈번하였다. 8월 표층수온의 경우에도 2010년 이후 평년대비 고수온이 나타난 경우가 9년 중 7년으로 2000년대 10년 중 5년, 1990년대 10년 중 5년에 비하여 높은 비율로 나타난다고 보고되었다. 특히 8월 표층수온이 정선해양관측이 시작된 1968년 이후 최근 51년간 가장 높았던 7년(2016년, 1990년, 2013년, 2001년, 1975년, 2018년, 2017년)중 4년이 2010년 이후로 이상 고수온 현상은 2010년 이후 빈번히 나타나고 있다. 따라서 최근 10년의 변동 경향성을 보았을 때, 우리나라 해역의 표층수온은 과거와는 달리 여름철과 겨울철의 수온차가 증가하는, 즉 연 진폭이 늘어나고 있다고 말할 수 있다.

실제로 정선해양조사에서 얻어진 우리나라 해역의 2월과 8월 표층수온의 평년편차 자료의 수온 차는 2010년부터 2018년까지 연 진폭이 0.23℃/yr의 속도로 증가하고 있음을 보여준다. 특히, 2016년 이후에는 여름철 고수온 현상이 집중적으로 발생하고 있다(그림 3-2-2).

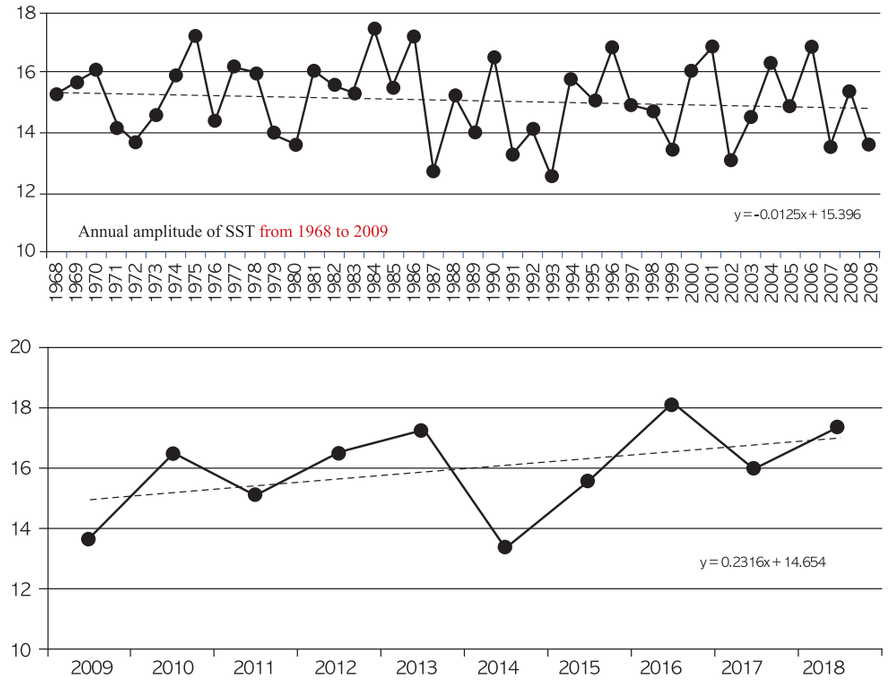


그림 3-2-2 국립수산과학원 정선해양관측에서 얻어진 8월과 2월 표층수온의 차이값(연진폭)의 1968~2009년(상)과 2009~2018년(하)의 변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

보다 넓은 해역의 보다 긴 시간에 따른 여름철과 겨울철의 수온 차에 대한 변화를 살펴보기 위하여 JMA의 COBE-SST 자료를 활용하여 1950년대부터 2010년대까지의 두 계절의 수온 차 변화 양상을 10년 단위 평균 값을 통하여 살펴보았다. 1950년대 이전에는 2차 세계대전 등의 원인으로 관측수가 매우 적어 본 분석에서는 제외하였다.

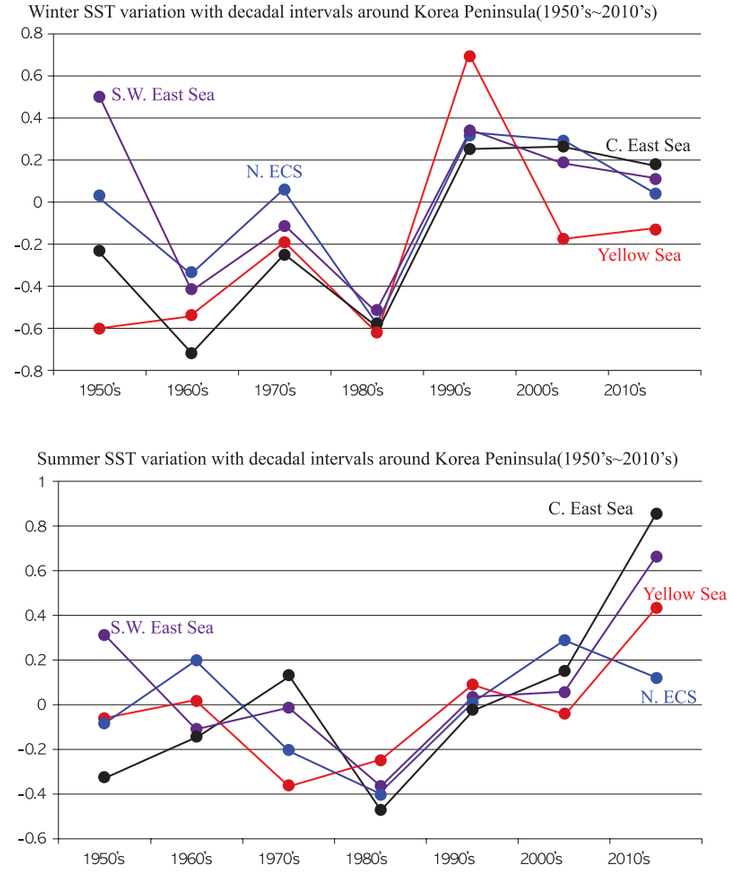


그림 3-2-3 JMA COBE-SST 자료를 이용한 10년 평균 해역별 겨울철(상) 및 여름철(하)의 해면수온 변동 경향

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

겨울철 해면수온 상승 경향을 살펴보면, 1950년대 상대적으로 높은 수온을 보이던 양상이 1960~1980년대까지 낮은 경향을 보여주고 있는 반면, 1990년대 급격하게 대부분의 해역의 수온 상승이 높게 나타났으며, 그 이후 2000년대와 2010년대에는 수온 상승 경향이 뚜렷하게 나타나지 않고 있다.

반면, 여름철 해면수온 상승 경향의 경우, 1950년대부터 1980년대까지 소폭으로 대부분 해역의 수온이 하강하는 경향을 보이고 있는 반면, 1980년대부터 뚜렷하게 상승하는 경향을 나타내고 있으며, 동중국해 북부해역을 제외하고는 2010년에 접어들면서 급격한 수온상승이 보이고 있다. 즉, 장기적으로 살펴본 경우에서도 우리나라 주변해역의 수온 상승은 2010년대에 접어들면서 연진폭이 뚜렷하게 증가하고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 1980~1990년대까지 보여준 수온 상승 경향과 2000년대 이후의 수온 상승, 특히 2010년대 이후에 접어들면서 수온상승 경향이 뚜렷한 차이를 나타내고 있음을 말해주고 있다(그림 3-2-3).

2) 2010년 이후 이상수온 발생 경향

2010년 이후에 접어들면서 우리나라 주변해역의 수온이 여름철에는 고수온, 겨울철에는 저수온 경향이 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인하였다. 이와 같은 최근 저수온과 고수온이 나타나는 원인은 지구규모의 이상기후와 깊은 연관이 있는 것으로 판단된다. 미국 NASA에서 제공하고 있는 전 세계 기온 평년편차 분포를 살펴보면 2018년 2월은 근대기상관측이후 전 지구 2월 평균기온으로 6번째로 높은 해였지만, Polar Vortex에 의한 이상한파가 나타난 북아메리카, 유럽 그리고 동아시아는 평년대비 매우 낮은 기온을 보였다. 반면, 7월 역시 일반적으로 전 지구가 매우 높은 기온을 보였지만, 특히 높은 기온을 보인 것은 북아메리카, 유럽 그리고 동아시아 지역으로 나타났다(그림 3-2-4).

이는 기후변화에 기인한 이상기후 발생이 중위도 지역, 특히 북아메리카, 유럽과 함께 우리나라가 포함된 동아시아 해역에 집중적으로 나타나고 있음을 설명하고 있으며, 향후에도 북극 온난화 및 제트기류의 강약 등과 같은 이상 현상에 따라 이상기후 발생 가능성이 높음을 증명하고 있다.

여름철 고수온 현상이 뚜렷하게 나타난 2013년 및 2016~2018년의 인공위성자료로부터 얻어진 우리나라 주변해역의 8월 평균 표면수온 평년편차 분포를 살펴보았다(그림 3-2-5). 2013년 8월의 경우, 우리나라 주변해역의 표면수온이 평년에 비하여 2℃ 내외 높은 수온을 나타내고 있음을 확인할 수 있었으며, 2016년 8월은 평년에 비하여 우리나라 주변해역의 표면수온이 2~3℃ 높은 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 2017년과 2018년에도 여름철 우리나라 주변해역의 표면수온이 평년 대비 1~2℃ 높은 경향을 나타내어 2016년 이후 지속적으로 하계 고수온 경향이 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

최근 우리나라 하계의 고수온 발생의 원인은 몇 가지로 요약할 수 있다. 가장 큰 영향으로는 강한 북태평양 고기압의 위치 및 세력에 따른 폭염이 지속되었으며 특히 2018년에는 대기 상층부에 티벳 고기압의 강화가 더해져 폭염이 지속되었다. 이와 같은 기압배치에 따라 2016년 이후 7~8월에 우리나라에 직접적으로 영향을 주는 태풍이 부재하였으며, 태풍의 부재는 우리나라 해역의 표층부근의 연직 혼합을 약화시켜 표면과 표층 이심과의 성층을 강화시킴으로써 표면 가열을 촉진시켰다. 또 하나의 원인으로는 고수온이 나타나는 시기의 하계에 강한 대마난류 세력이 유지됨에 따라 저위도로부터 열수송 증가가 이유가 된다.

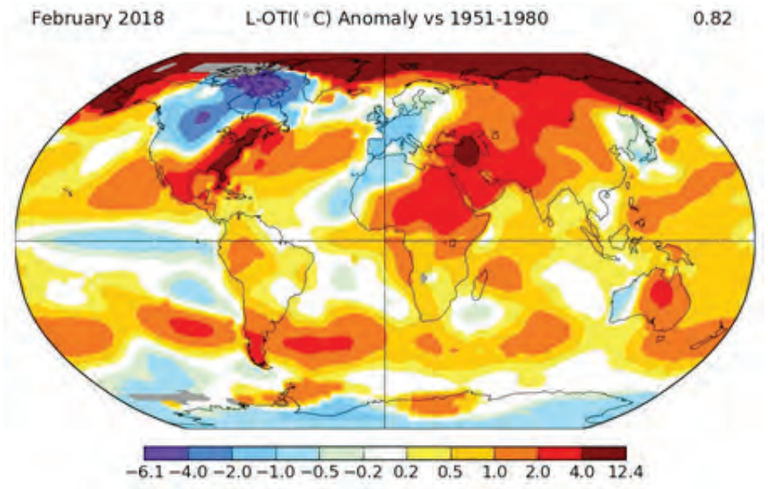


그림 3-2-4 미국 NASA에서 제공한 2018년 2월(상) 및 7월(하)의 전 지구 평년편차 기온분포

[출처 : 미국 우주항공국(NASA)]

실제로 기상청 태풍백서를 통하여 살펴본 2016년부터 2018년까지 고수온기(7~8월) 우리나라에 영향을 주거나 상륙한 태풍을 비교한 결과 2016년에는 영향을 주거나 상륙한 태풍이 전무하였으며, 2017년에는 고수온 발생 전인 7월초에 2개의 태풍이 영향을 주었을 뿐, 고수온 발생기에는 영향을 주거나 상륙한 태풍이 없었다(그림 3-2-6). 또한 2018년에도 7월에는 영향을 주거나 상륙한 태풍이 없었으며, 8월 하순에 하나

의 태풍이 우리나라에 상륙하면서 우리나라의 고수온 현상이 소강상태로 접어든 것을 확인하였다. 이는 1981~2010년 평균으로 우리나라에 영향을 주는 태풍의 수가 7월에는 1개, 8월에는 3개인 것을 감안한다면 매우 이례적으로 태풍의 영향이 적었다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 태풍의 상륙 및 영향의 감소는 북태평양 고기압 세력의 확장이 중요한 원인으로 판단된다.

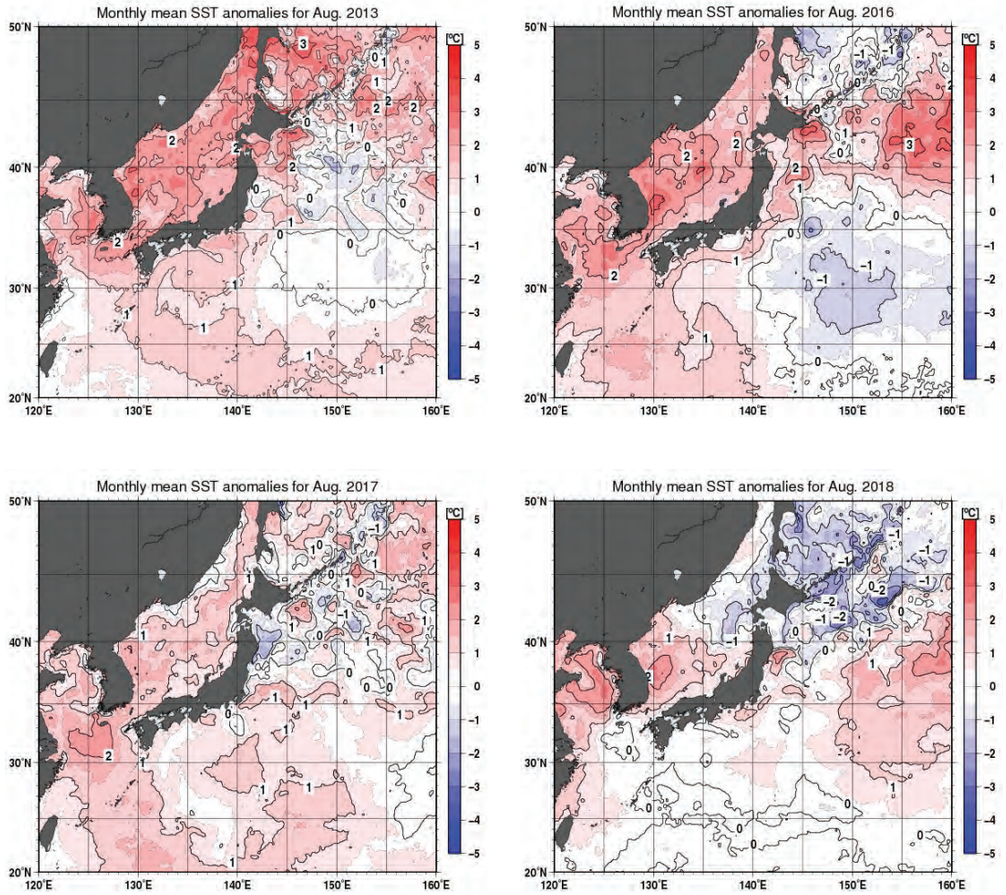


그림 3-2-5 2013년(좌상), 2016년(우상), 2017년(좌하) 및 2018년(우하)의 8월 평균 해면수온의 평년편차 분포

[출처 : JMA]

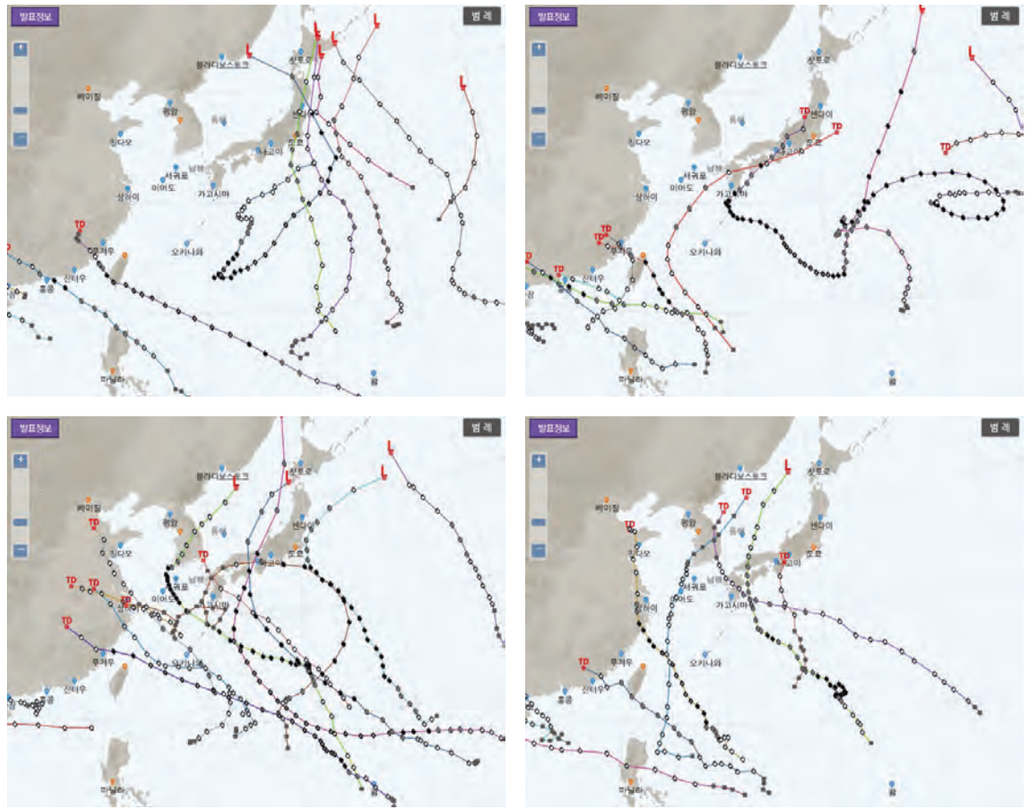
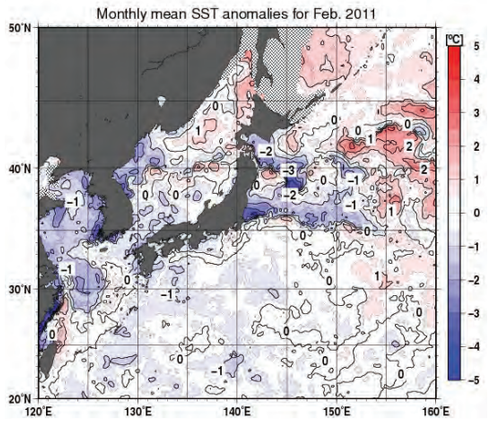
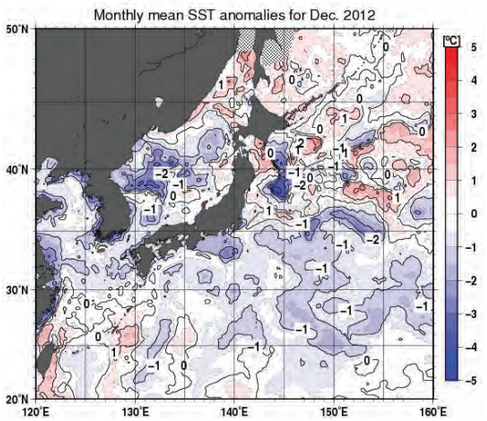


그림 3-2-6 2016년(좌상), 2017년(우상), 2018년(좌하) 및 2019년(우하)의 7~8월 발생 태풍의 진로

[출처 : 기상청]

고수온과 마찬가지로 2010년 이후 겨울철 저수온 발생도 빈번히 나타나고 있다. 특히 2010~2012년 겨울철 및 2017/2018년 겨울철에는 평년에 비하여 뚜렷하게 낮은 수온이 우리나라 주변 해역에 나타났다. 그림 3-2-7은 대표적으로 우리나라 주변 해역에 겨울철 저수온이 나타난 2011년 2월, 2012년 12월 및 2018년 2월의 인공위성에 의한 월평균 해면 수온의 평년 편차 분포를 나타낸 것이다. 이들 시기에 우리나라 주변해역의 해면 수온은 대기 1~3℃ 평년에 비하여 낮게 나타나는 특징을 보여 저수온이 탁월한 시기로 판단된다. 최근 우리나라 해역의 겨울철 저수온이 빈번하게 나타나는 원인은 극심한 북극 온난화에 기인한 제트 기류의 약화로 인한 극지방의 한기류의 잦은 남하가 가장 큰 원인으로 판단되며, 또한 북극 온난화와 밀접한 관련이 있는 시베리아 고기압 중심 부근의 세기 강화와 라니냐 현상의 빈번한 발생도 원인으로 고찰되고 있다.





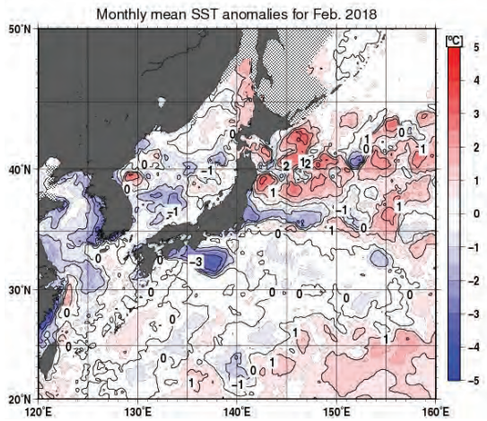
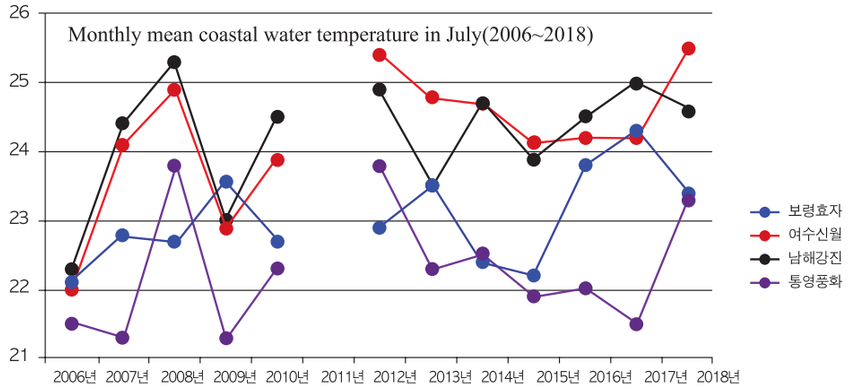


그림 3-2-7 2011년 2월(상), 2012년 12월(좌하) 및 2018년 2월(우하)의 월평균 해면수온의 평년편차 분포

[출처 : JMA]

국립수산과학원에서 운영하고 있는 실시간 해양환경 어장정보시스템은 전국 연안 100여개소의 관측소에서 30분 간격으로 수온을 실시간으로 관측하여 정보를 제공하고 있다. 관측소 중 10여년 이상 관측소가 운영되고 있는 남해 및 서해 연안역 4개소의 7월과 8월의 월평균 수온의 변동 경향을 살펴보았다. 7월에 고수온이 나타난 경우는 남해안을 중심으로 2013년과 2018년이 두드러지게 보였으며, 2008년에도 상대적으로 높은 수온이 남해와 서해 내만에서 나타났다. 8월에 고수온이 나타난 것은 2013년 서해안에서 높게 나타났으며, 2016~2018년에는 서해와 남해안 모두 8월에 높은 고수온이 보였다(그림 3-2-8).



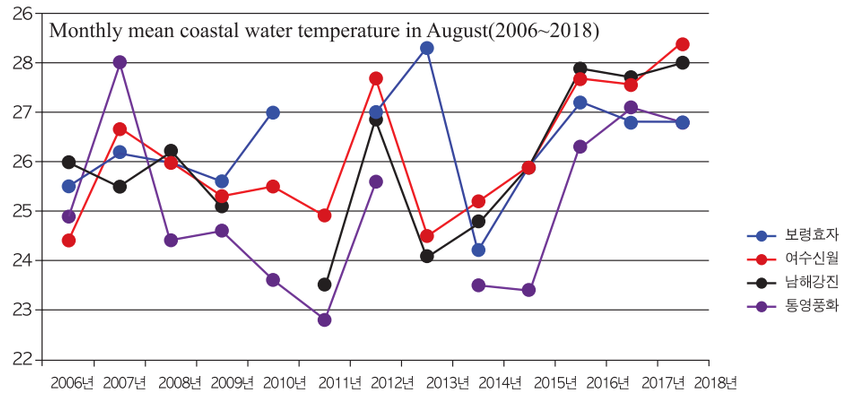


그림 3-2-8 국립수산과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템에서 관측된

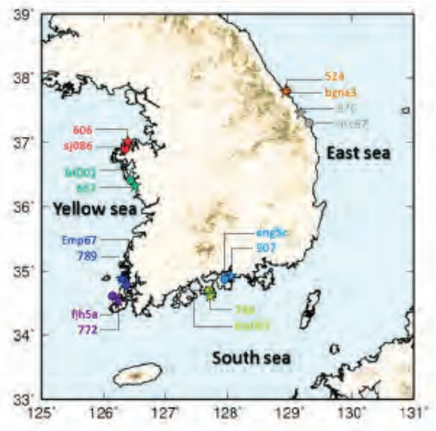
보령 효자, 여수 신월, 남해 강진, 통영 풍화의 7월(상) 및 8월(하)의 월평균 표층수온의 격년 변동 경향

[국립수산과학원 기후변화연구과]

3) 고수온기와 저수온기의 우리나라 연안 수온 변화 특성

가) 고수온기에 폭염에 따른 표층수온의 지연시간 분석

2016년 8월 우리나라 해역에는 폭염 발생에 따른 고수온 현상이 심각하게 나타났다. 이 시기에 서해, 남해, 동해 연안의 해역별 폭염에 의한 기온 상승이 수온의 반응에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보기 위하여 국립수산과학원의 8개 실시간 수온 관측시스템 자료와 인근 기상청의 자동기상 관측시스템(AWS, Automatic Weather System)을 이용하여 8월 한 달간의 수온과 기온의 변동성을 살펴보았다(김과 한, 2017).



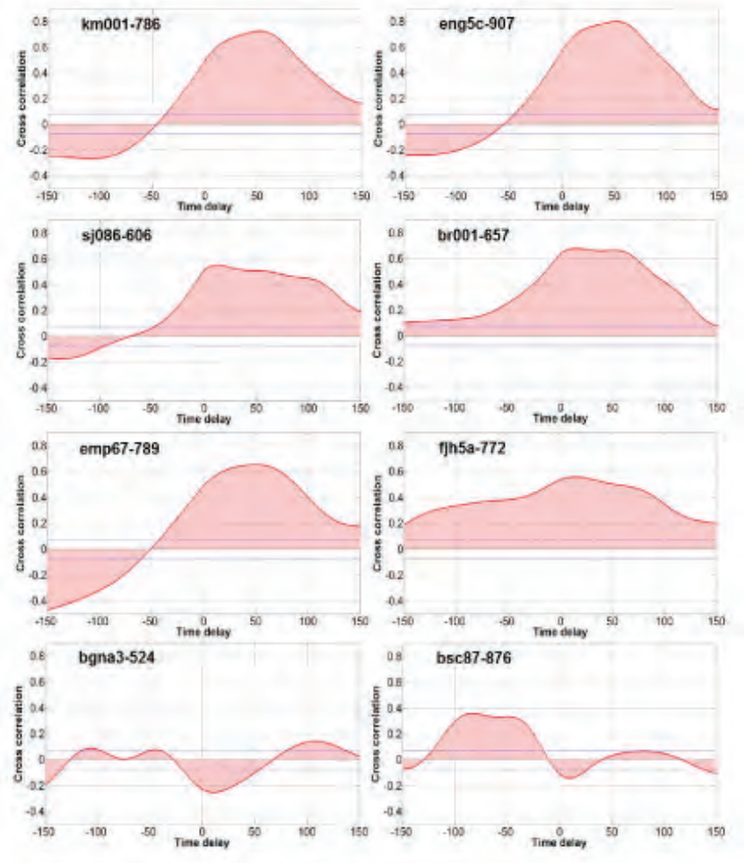
	code (RISA-AWS)	correlation coefficient	time delay
South sea	km001-786	0.72	53
	eng5c-907	0.80	52
Yellow sea	br001-657	0.68	16
	sj086-606	0.55	13
	emp67-789	0.66	50
	fjh5a772	0.56	14
East sea	bsc87-876	-0.25	11
	bgna3-524	-0.14	10

그림 3-2-9 2016년 8월 폭염시 기온과 수온의 상관성 분석을 위한 관측지점(좌)과
해역별 수온-기온의 상호상관계수 및 지연시간 분석(우)

[출처 : 김과 한(2017)]

한반도 주변 해역의 지형적인 특성과 해양환경적인 영향에 따라 급격한 기온 상승에 따른 수온의 반응이 해역마다 차이를 보였다(그림 3-2-9). 남해 2개 지점에서의 기온과 수온의 상관성은 0.72~0.80으로 가장 높은 상관성을 보였으며, 지연 시간은 약 50 시간으로 나타났다. 서해 4개 지점에서의 상관 계수는 0.55~0.68 사이의 상관성을 보였으며, 지연시간은 대부분 지점에서 약 12시간으로 계산되어졌다. 반면, 동해 2개 지점에서는 동해 연안의 깊은 수심과 냉수대의 영향으로 기온과 수온의 상관성이 현저하게 낮게 나타났으며, 기온에 의한 반응보다는 바람 패턴에 의한 냉수대의 출현에 따른 표층 수온 변동성이 훨씬 크게 보여 졌다(그림 3-2-10).

결론적으로 남해 연안은 폭염이 발생한 후 약 2일 후에 수온이 급격하게 상승하는 것으로 분석된 반면, 서해 연안은 12시간 내외의 빠른 시간에 수온이 반응하는 경향을 나타내어 폭염 발생에 따라 신속한 수온 정보 제공이 매우 중요한 것으로 판단된다. 이는 서해 연안의 수심이 얕고, 폐쇄성 내만에 주요 관측 시스템이 설치되어 있어 남해 연안보다 기온의 변화에 따른 수온 반응이 더 빠르게 나타나는 것으로 분석되어졌다.



w

그림 3-2-10 2016년 8월 그림 3-2-9의 각 관측지점에서 기온과 수온의 상호상관함수 분석 결과

[출처 : 김과 한(2017)]

나) 북극진동의 단주기 변동과 우리나라 연안 수온과의 상관성 분석

2010년 이후부터 겨울철 저수온 현상은 우리나라 주변에 빈번히 나타나고 있으며, 특히 2017년과 2018년 겨울은 대표적으로 혹한에 의한 저수온 발생 시기로서 서해와 남해 연안에 대하여 표층수온과 북극진동(Arctic Oscillation)의 단주기 상관관계를 살펴보았다(Han et al., 2019).

국립수산과학원 실시간 수온자료를 통하여 살펴보면 2017년 12월부터 2018년 2월까지 10~20일 주기의 표층수온 변동 경향이 나타나고 있으며, 북극진동 지수(Arctic Oscillation Index)에서도 유사한 10~20일

내외의 단주기의 변동성이 보이고 있다. 상호상관 함수(Cross-correlation function)을 활용하여 서해 및 남해 연안의 표층수온과 북극진동 지수의 상관관계를 구한 결과, 이 두 시계열 사이에는 대개 0.3~0.4의 상관계수가 나타났다. 또한 두 시계열 사이의 지연 시간은 6~7일 정도로 보였다. 이는 북극진동 지수가 음의 피크치가 나타난 이후 우리나라 서해와 남해의 표층수온이 6~7일 후에 최소 수온을 보인다는 것을 의미하고 있다. 또한 우리나라 연안의 표층수온 변화가 북극 온난화에 기인한 Polar vortex의 약화와 깊은 관련성이 있음을 시사하고 있다(그림 3-2-11).

이와 같은 경향은 향후 양식장에서 저수온에 의한 대량폐사 발생과 같은 수산업의 기후변화 재해 대응에 매우 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

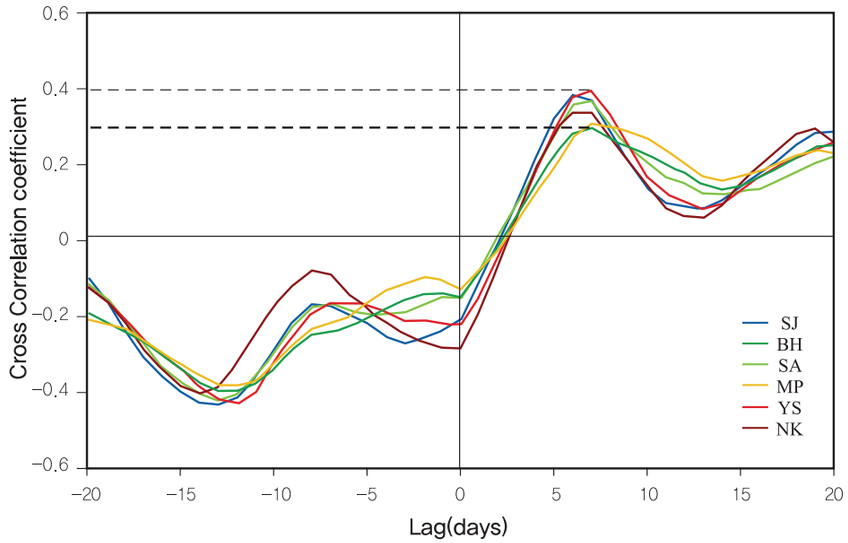


그림 3-2-11 2017년 12월부터 2018년 2월까지 국립수산과학원 남해 및 서해 연안 6개 지점의 표층수온과 북극진동지수와의 상호상관계수 및 지연시간 분석 결과

[출처 : Han et al.(2019)]

제 3절 이상기후에 따른 양식생물 대량 폐사/특보 발령

1) 이상 수온 대응 특보 발령 기준 마련

2016년 여름철 우리나라는 유례없는 고수온 현상으로 전국 연안의 곳곳에서 양식생물의 대량 폐사 현상이 발생하였다. 2016년 전까지는 간헐적, 국지적으로 발생하던 이상 수온에 따른 양식생물 대량폐사 현상이 비교적 장기간, 전국 연안에서 발생한 것이다. 따라서 자연현상으로 고수온과 저수온 현상을 방치하기 보다는 특보 발령 제도를 통하여 효과적으로 양식업을 관리할 필요성이 대두되게 되었다.

기상 특보로서 오래전부터 폭염과 한파 특보가 기상청에서 발령되고 있다. 폭염의 경우, 일 최고기온이 33℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 주의보가 발령되고, 일 최고기온이 35℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때, 경보가 발령되게 된다. 한파의 경우는 좀 더 복잡하여 10~4월 사이에 아침 최저기온이 전날보다 10℃ 이상 하강하여 3℃ 이하이고 평년값보다 3℃ 낮을 것으로 예상될 때, 아침 최저기온이 −12℃ 이하가 2일 이상 지속될 때, 급격한 저온 현상으로 중대한 피해가 예상될 때에서 이 중 하나에 해당하게 되면 주의보가 발령된다. 한파 경보는 10~4월 사이에 아침 최저기온이 전날보다 15℃ 이상 하강하여 3℃ 이하이고 평년값보다 3℃가 낮을 것으로 예상될 때, 아침 최저기온이 −15℃ 이하가 2일 이상 지속될 것이 예상될 때, 급격한 저온현상으로 광범위한 지역에서 중대한 피해가 예상될 때에서 이 중 하나에 해당하게 되면 경보가 발령된다. 그만큼 발생 가능성이 낮으면서도, 발생 시에 인간 활동에 심각한 영향을 줄 것으로 판단되는 경우에 폭염 혹은 한파 특보가 발령되게 되는 것이다.

국립수산과학원에서는 다양한 양식생물들과 해역에 따른 수온 변동 경향을 모두 고려하여 적절한 특보 발령에 적당한 것이 무엇인지 고찰하였다. 우선 여름철과 겨울철의 최고수온기 및 최저수온기의 우리나라 연안의 수온이 어느 정도인가를 국립수산과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템 관측 자료로부터 살펴보았다(그림 3-3-1). 극심한 고수온이 발생한 2016년 하계를 제외한 2011~2015년까지의 26개 관측소의 최고수온기인 8월 중순 평균 수온자료를 살펴보면 21.0~26.6℃ 내외의 범위를 보이고 있으며, 대표적인 내만해역인 충남 천수만, 여수 가막만, 남해 강진만 등에서 수온이 상대적으로 높게 나왔지만 대략 25.0~26.5℃ 범위였다.

반면, 2011~2015년의 5년간 26개 관측소에 대한 최저수온기인 2월 중순 평균 수온자료의 경우, 여름철에 비하여 수온의 공간적 범위가 훨씬 크게 나타나 3.0~14.4℃ 범위가 나타났다. 수온이 상대적으로 낮게 나타난 해역은 충남 가로림만(3.0℃)과 천수만 해역(4.0℃)에서 4℃ 이하로 나타났으며, 남해 강진만(6.1℃), 여수 가막만(5.4℃), 목포(5.4℃), 진도 회동(6.9℃) 등 남해 및 서해 내만에서 7℃ 이하의 평균 수온을 보였다. 반면, 서제주는 14℃ 이상의 평균 수온을 보였고, 동해 연안의 경우는 7~12℃의 평균 수온을 보여 상대적으로 서해와 남해 연안에 비하여 높은 수온을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

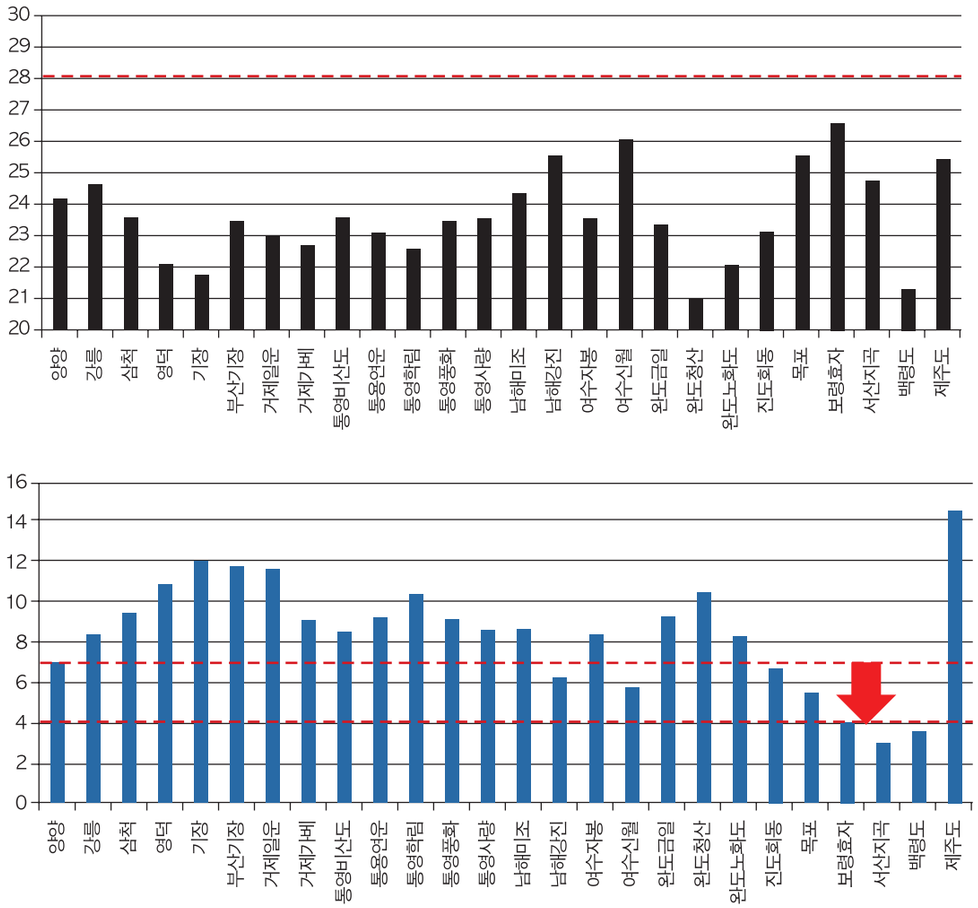


그림 3-3-1 2011~2015년까지 5년간 국립수산과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템 26개소에서 관측한 8월 중순(상) 및 2월 중순(하)의 관측소별 평균 수온

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

이들 최근의 최고수온기와 최저수온기의 수온 관측 자료를 살펴보면, 여름철 고수온에 대한 특보 발령 기준은 28℃ 내외가 타당할 것으로 판단되며, 겨울철에는 4℃ 이하가 되는 것이 발생 확률의 측면에서 타당할 것으로 판단되었다. 하지만, 기후변화에 따른 이상 수온 발생 빈도의 증가 등을 고려하였을 경우 발생 확률뿐만 아니라 양식생물의 서식 가능 여부에 대한 검토도 같이 이루어져함으로 국립수산과학원의 주요 양식품종별 서식 가능 수온과 한계 수온에 대한 정보도 활용하였다(표 3-3-1).

표 3-3-1 우리나라 주요 양식 품종별 서식수온 및 한계수온

[출처 : 국립수산과학원 양식관리과]

품 종	서식수온(적정 수온) (℃)	한계수온(℃)	
		저온	고온
넙 치	8~26(20~25)	4	29
강도다리	3~23(14~17)	0	27
조피볼락	7~26(12~21)	3	29
참 돔	10~30(20~28)	6.5	31
돌 돔	7~30(23~26)	7	36
감성돔	10~30(20~28)	6	31
숭 어	3~30(18~28)	0	31
방 어	18~29(24~28)	7	31
자주복	10~28(16~23)	4	28
멍 게	5~24(10~20)	2	26
참전복	10~20(15~18)	4	30

고수온의 경우, 주요 가두리 양식어종이라고 판단되는 조피볼락은 서식최고수온 26℃, 한계수온은 29℃이며, 넙치 역시 조피볼락과 마찬가지로 26℃, 29℃를 나타내고 있다. 강도다리의 경우 23℃, 27℃로서 조피볼락 및 넙치에 비하여 서식 및 한계수온이 낮게 나타나고 있는 반면 상대적으로 고수온에 강한 참돔은 30℃, 31℃, 숭어는 30℃, 31℃를 나타낸다. 주요 양식품종(어류)들의 한계 수온은 27℃(강도다리)~36℃(돌돔)의 분포를 보이고 있다. 따라서 고수온의 경우 발생 확률과 주요 양식품종들의 한계 수온을 고려하였을 경우, 28℃를 기준으로 하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 상대적으로 한계 수온이 낮은 어류 양식생물들에게는 주요 양식 밀집해역에 대하여 집중적인 양식관리가 이루어지도록 유도할 필요가 있다.

저수온의 경우, 주요 양식어종 중 상대적으로 취약한 어종들은 돔류로 보인다. 참돔의 경우 서식최저수온 10℃, 한계수온은 6.5℃로 보고되고 있으며, 돌돔은 서식최저수온 및 한계수온이 모두 7℃로 보고되고 있다. 감성돔의 경우, 각각 10℃, 6℃이며, 방어도 저수온에 약해 18℃, 7℃의 서식최저수온과 한계수온을 보인다. 이와 같이 돔류 등과 같은 저수온에 취약한 어종들을 고려한다면 7℃ 내외로 저수온 기준을 설정하는 것이 타당하지만, 발생 확률적인 측면에서 살펴보면 서해와 남해 서부 연안의 대부분 해역이 장기간 평균적인 수온을 보인다 하더라도 특보 발령상태가 된다. 따라서 저수온 특보는 발생 확률이 비교적 낮은 4℃로 기준을 잡으면서 돔류 등 저수온에 취약한 어종에 대해서는 집중적인 양식관리가 이루어지도록 조치하는 것이 타당하다고 판단된다.

이를 기반으로 해양수산부에서는 “적조 또는 이상 수온 발생해역 양식어류 긴급방류 지침”을 수립하고(해양수산부, 2017), 이상 수온 특보 기준 및 조치 요령을 마련하였다. 이상 수온 주의보의 경우, 고수온 주의보는 수온 28℃가 도달될 것으로 예측되는 해역, 저수온 주의보는 수온 4℃가 도달될 것으로 예측되는 해역으로 정의되며, 전일 수온 대비 3℃ 이상 상승 또는 하강 현상을 보이는 해역과 평년대비 ±2℃ 이상의 급격한 수온변동으로 양식생물 관리에 주의가 필요할 때도 주의보를 발령할 수 있게 하였다. 이상 수온 경보의 경우, 고수온 경보는 수온 28℃ 이상이 3일 이상 지속되거나, 계속 고수온의 지속이 예상되는 해역, 저수온 경보는 수온 4℃ 이하가 3일 이상 지속되거나, 계속 저수온의지속이 예상되는 해역으로 정의되며, 전일 수온 대비 5℃ 이상 상승 또는 하강 현상을 보이는 해역과 평년 대비 ±3℃ 이상의 급격한 수온변동으로 양식생물 관리가 필요할 때에도 경보를 발령할 수 있게 하였다. 이에 더하여 국립수산과학원장은 28℃ 혹은 4℃ 수온에 도달하지 않았지만, 해역과 양식생물의 특성상 피해 발생이 우려될 경우에도 특보를 발령할 수 있도록 조치하여 일부 고수온 및 저수온에 취약한 어종이 집중적으로 양식되어 있는 해역에도 기준 수온과 관련 없이 특보 발령이 가능토록 하였다.

2018년부터는 이상 수온의 관심단계를 새롭게 신설하여, 고수온 주의보 혹은 저수온 주의보 발령이 예상되는 일주일 내외에 관심단계를 발령하여 선제적으로 양식생물의 관리와 이상 수온에 따른 대응을 할 수 있도록 하였다.

2) 실시간 해양환경 어장정보시스템 운영

국립수산과학원에서는 2003년부터 전국 연안에 실시간 해양환경 어장정보시스템을 구축하고 운영하고 있다. 양식 활동 등 수산업 지원을 위하여 신뢰성 있는 해양환경 자료의 안정적인 공급과 급격한 해양환경 변동에 따른 양식장의 피해 최소화를 위하여 실시간 기반의 해양환경 자료, 특히 수온자료의 신속한 서비스는 매우 중요한 정보이다. 국립수산과학원은 2003년부터 지속적으로 시스템의 수를 확대해 오고 있으며, 현재 국립수산과학원 소유의 시스템은 총 32개소이다. 국립수산과학원의 관측 시스템만으로는 전국 연안과 내만의 수온변화를 충분히 파악하기 어렵기 때문에 지자체 및 민간 기업에서 운영하거나 구축하는 실시간 관측 시스템을 연계하는 작업을 실시하여 완도군청, 전라남도, 한국수력원자력 및 한국가스공사 등의 총 29개소의 관측소 자료가 연계되어 실시간으로 수온 정보가 제공되고 있다. 또한 2018년부터는 기상청의 파고부이를 연계하는 작업을 실시하여 국립수산과학원 실시간 관측소가 없는 해역을 중심으로 총 44개소의 파고부이 실시간 수온 정보도 제공을 하고 있다. 따라서 2019년 11월 현재 국립수산과학원의 실시간 해양환경 어장정보시스템을 통하여 어업인에게 제공되는 관측소의 개수는 총 105개소에 이르고 있다(그림 3-3-2).

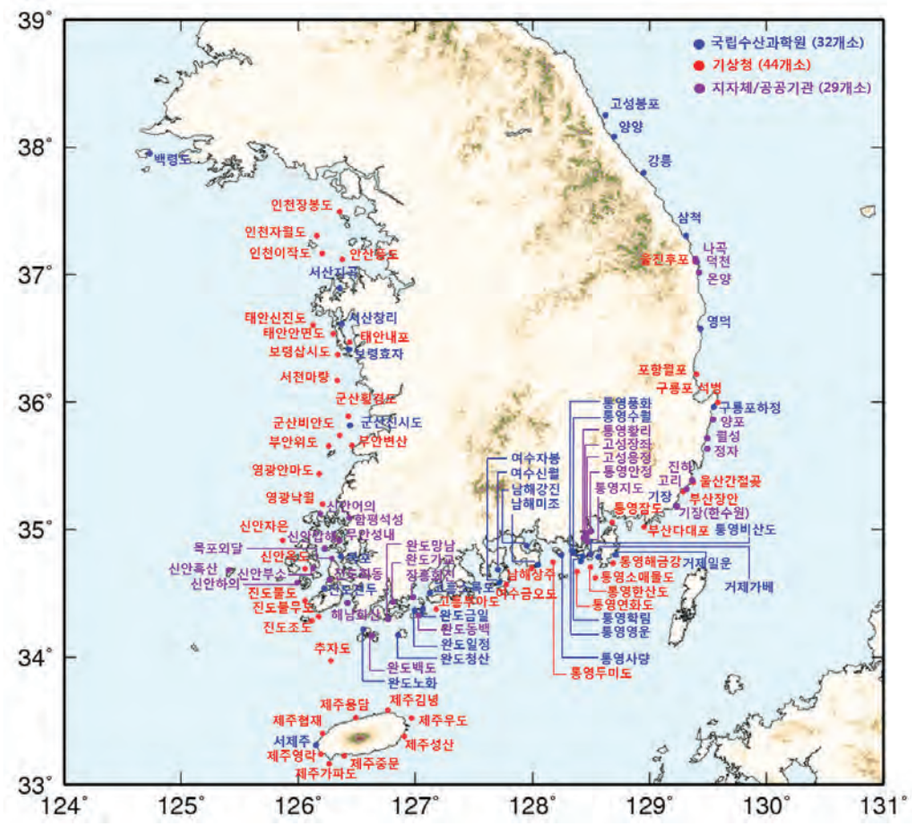


그림 3-3-2 2019년 9월 현재 국립수산과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템 관측소 위치

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

현재 이들 관측소에서 측정되고 있는 관측정보는 실시간으로 스마트폰 어플리케이션, SMS(Short Message Service), 인터넷 및 모바일 홈페이지, 전광판 등을 통하여 어업인 및 일반국민들에게 정보가 제공되고 있다. 이들 정보는 국립수산과학원과 지자체/공공기관의 경우는 30분 단위로, 기상청 관측 자료는 1시간 단위로 정보가 제공되고 있으며, 관측소에 따라서 표층 뿐 만 아니라 중층, 저층의 수온자료와 염분, 용존산소 등이 요구되는 관측소의 정보도 함께 서비스되고 있다. 국립수산과학원 홈페이지에서는 과거의 자료도 검색 및 다운로드 될 수 있도록 제공하고 있어 연구 자료로도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

3) 이상 수온 특보 발령 현황(2017년 하계~)

해양수산부의 이상 수온 특보 발령 기준 마련에 따라 2017년 하계부터 고수온 및 저수온 특보가 발령되어 운영되고 있다. 2017년 하계 고수온 특보는 7월 31일 최초 발령하여 8월 31일까지 총 32일간 지속되었다. 특히 충남 천수만 해역, 제주 연안 및 경북~경남 연안은 고수온 경보가 특보 기간 중에 발령되기도 하였다(그림 3-3-3).

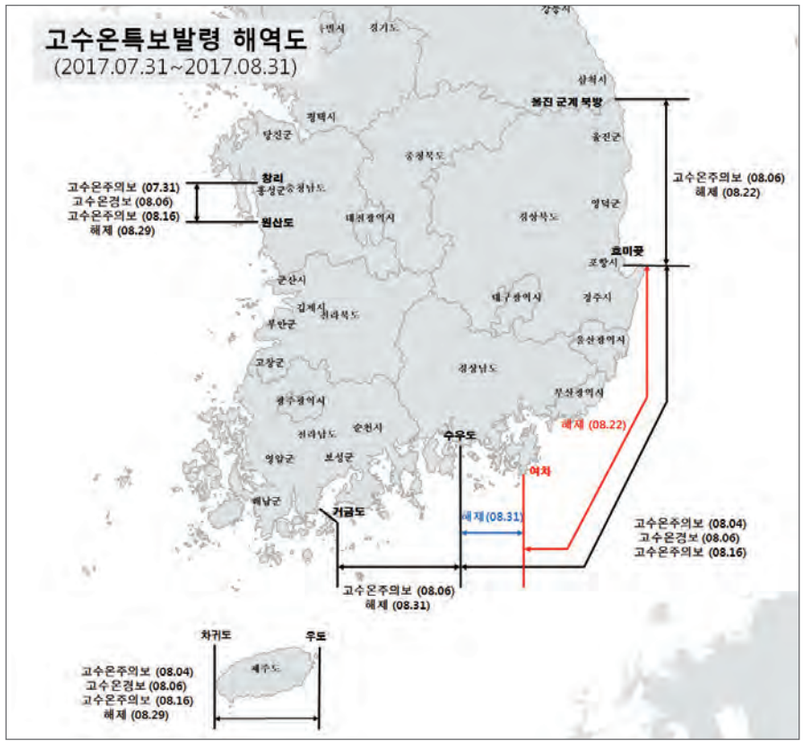


그림 3-3-3 2017년 하계 고수온 특보발령 현황

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

2018년 하계는 고수온이 7월 24일부터 고수온 주의보가 발령되었다. 2018년은 7월 중순에 장마전선의 조기 소멸과 급격한 폭염 시작으로 인하여 7월 중순을 중심으로 표층수온의 상승이 급격하게 나타나면서 조기에 고수온 특보가 발령되었다. 고수온 특보는 9월 4일까지 지속되면서 총 44일간 지속되었다. 2018년부터 신설된 고수온 관심단계는 7월 17일부터 발령되었으며, 고수온 주의보 발령해역도 2017년보다 광범위하여 강원 연안과 서해 남부 연안 및 내만, 완도 주변 내만도 고수온 특보 발령해역에 포함되었다. 또한 경북 영덕~전남 장흥 연안은 고수온 경보가 발령되었으며, 충남 이남 서해 연안 전 해역도 고수온 경보가 발령되

었다(그림 3-3-4).

2019년 하계 고수온은 7월 29일 관심단계가 발령된 이후, 8월 8일 고수온 주의보가 천수만과 함평만에 발령된 이후, 8월 13일 경북 포항~경남 거제까지 주의보가 확대되었다. 이후 단계적으로 8월 29일 전 해역의 주의보가 해제되어 총 22일간 특보가 유지되었다. 이는 2017년과 2018년에 비하여 지속기간이 짧았고, 발생해역도 크게 줄었다(그림 3-3-5).

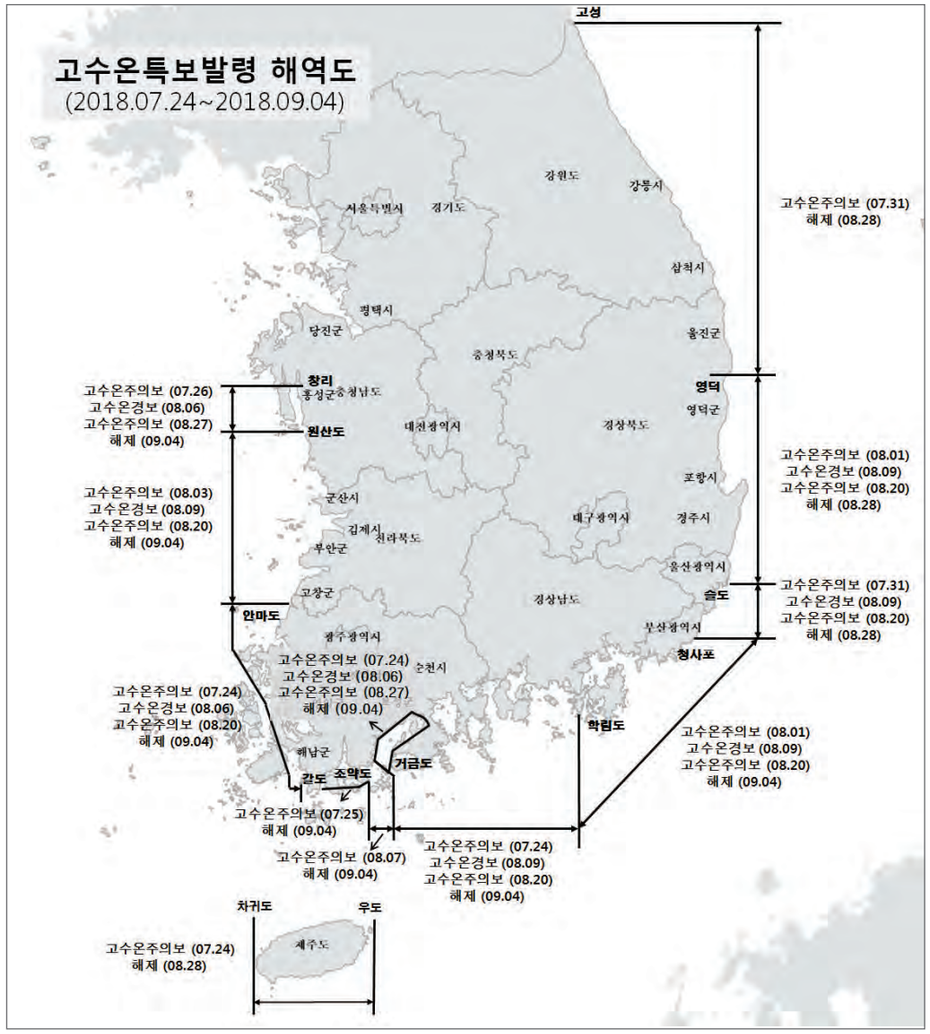


그림 3-3-4 2018년 하계 고수온 특보발령 현황

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

그림 3-3-5 2019년 하계 고수온 특보발령 현황

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

그림 3-3-6 2017/18년 동계 저수온 특보발령 현황

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

그림 3-3-7 2018/19년 동계 저수온 특보발령 현황

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

2017/18년 동계 저수온은 2017년 12월 14일 충남 가로림만을 대상으로 첫 주의보가 발령되었다. 이후 충남 천수만, 경남 강진만·사천만, 전남 가막만, 서해남부 내만 등으로 2018년 1월 12일 주의보가 확대 발령되었고, 2월 7일부터 2월 14일까지는 주의보 발령 해역이 모두 경보 발령해역으로 대체된 이후, 3월 7일에 전 해역의 저수온 특보가 해제되었다. 이 시기 저수온 특보는 총 84일간이나 지속되었다(그림 3-3-6).

2018/19년 동계 저수온은 관심 단계가 2018년 12월 13일에 발령된 이후, 12월 28일에 역시 가로림만에서 주의보가 첫 발령되었다. 이후 천수만과 서해 내만으로 주의보가 확대 발령되었으며, 2월 11일에는 가로림만과 천수만이 경보로 대체 발령되었다. 그 이후 2월 27일 전 해역의 저수온 특보는 모두 해제되어 총 61일간 지속되었다. 전년에 비하여 저수온 특보 발령기간이 대폭 줄었으며, 또한 남해역에서는 저수온 특보가 발령되지 않는 등 공간적으로도 특보 발령해역이 줄어들었다(그림 3-3-7).

제 4장 ▶ 수산분야 기후변화 영향 및 취약성 평가 결과

제 1절 수산업의 기후변화 영향 및 취약성 평가 기법 개발
제 2절 연근해어업(남해안)의 기후변화 영향 및취약성 평가 결과
제 3절 양식업 취약성 평가
제 4절 어업인의 기후변화 취약성 인식조사 결과

제 4장 _ 수산분야 기후변화 영향 및 취약성 평가 결과

제 1절 수산업의 기후변화 영향 및 취약성 평가 기법 개발

1) 취약성의 개념 및 접근 방식

"취약성(vulnerability)"은 일반적으로 어떤 시스템이 무언가에 의해 해를 입기 쉬운 정도를 뜻한다. 처음에는 지리학, 자연재해 연구 등의 분야에서 사용되었다가 재난관리, 생태학, 공중보건, 빈곤, 개발 등에서 핵심 개념으로 활용되고 있다. 그러나 같은 "취약성"이라고 하더라도 학문 또는 지식 분야에 따라 다소 상이한 개념을 적용한다. 예를 들어 취약성이 뜻하는 것은 상황에 따라 회복력(resilience), 한계성(marginality), 감수성(susceptibility), 적응성(adaptability), 허약성(fragility), 노출(exposure), 민감성(sensitivity), 대응능력(coping capacity) 등이 될 수 있다. 이런 다양한 취약성 개념은 관련되는 정책적인 맥락, 취약성 평가의 목적에 의존하며, 취약성에 대한 접근 방식과 밀접하게 연관된다.

취약성에 대한 접근 방식은 취약성의 개념을 비교한 연구를 참조하여 여러 가지 방식으로 분류할 수 있다. 대표적으로 Eakin and Luers(2006)에 따르면, 취약성은 위험-위험요소(risk-hazard) 접근, 정치경제/정치생태(political economy/political ecology) 접근, 회복력(resilience) 접근으로 구분된다. 이 가운데 위험-위험요소 접근에서 취약성은 외부 위험요소와 민감성의 선형적인 상호작용의 결과로 정의된다. 핵심 질문은 "위험요소는 무엇이고, 영향은 무엇인가?", "어디서, 언제 영향이 나타나는가?"이며 노출과 민감도가 핵심 요소이다. 취약성 평가 대상은 지역, 분야, 활동이며 광역적인 지역이나 지구적 단위에서 평가된다. 두 번째로 정치경제/정치생태 접근에서 취약성은 외부 스트레스에 적응하는 사람(개인·집단·공동체)의 능력 또는 생태계의 능력을 뜻한다. 핵심 질문은 "사람과 장소는 어떻게 다르게 영향을 받는가?", "무엇이 적응능력을 결정하는가?", "민감도 차이의 결과는 무엇인가?"이며 적응능력, 민감도, 노출이 핵심 요소이다. 취약성 평가 대상은 개인, 가구, 사회집단, 공동체 등이며 지역, 광역적 지역, 지구단위로 평가된다. 세 번째로 회복력 접근에서 취약성은 회복력 또는 적응능력을 뜻한다. 핵심 질문은 "시스템은 왜, 어떻게 변하는가?", "변화에 대응하는 능력은 무엇인가?", "적응능력을 통제하는 핵심 과정은 무엇인가?"이며 변화의 임계점, 적응능력이 핵심 요소이다. 취약성 평가 대상은 생태계 또는 인간-환경계(human-environmental system)이며 경관, 생태지역 또는 복수의 단위로 평가된다(표 4-1-1).

표 4-1-1 취약성 접근 방법

[출처 : Eakin and Luers, 2006]

구분	위험-위험요소 (Risk-Hazard)	정치경제/정치생태 (Political economy/ Political ecology)	회복력 (resilience)
핵심 질문	위험요소는 무엇인가? 충격은 무엇인가? 어디서? 언제?	사람과 장소는 어떻게 다르게 영향을 받는가? 무엇이 적응능력의 차이를 결정하는가? 민감도 차이의 결과는 무엇인가?	시스템은 어떤 이유로 어떻게 변하는가? 변화에 대응하는 능력은 무엇인가? 적응능력을 통제하는 핵심 과정은 무엇인가?
핵심 요소	노출, 민감성	능력, 민감성, 노출	변화의 임계점, 적응능력
시스템 (노출 단위)	장소, 부문, 활동, 경관, 지역	개인, 가계, 사회집단, 지역사회, 생계	생태계, 인간-환경계
범위	지역(광역), 범지구	지역, 지역(광역), 범지구	경관, 생태지역, 복수 단위

취약성에 대한 접근 방식을 이와는 다른 차원에서 분류한 것으로 O'Brien et al.(2007)을 들 수 있다. O'Brien et al.(2007)에 따르면 취약성 접근 방식은 결과 취약성(outcome vulnerability)과 맥락 취약성(contextual vulnerability)로 구분된다. 전자가 시스템의 취약성 인자로 미래의 기후변화 효과에 초점이 있다면 후자는 현재와 미래의 기후변화에 대한 취약성에 영향을 미치는 현재의 맥락적인 상황에 초점이 있다. 이에 따라 두 접근 방식은 취약성 상이한 취약성 요소와 평가 방법론을 적용한다. 예를 들어 결과 취약성은 수온 상승에 따른 어종의 분포와 같은 상대적으로 좁은 범위의 기후변화 영향을 모델링에 기초하여 사전적으로 평가한다. 이에 반해 맥락 취약성은 기후변화 취약성의 복합적인 인자를 총체적으로 이해하기 위해 이해관계자 등에 대한 심층적인 조사에 기초한다. 이에 따라 "누가 기후변화에 취약한가?"에 대한 질문에 대한 답을 구하기 위해 결과 취약성은 기후변화로 예상되는 경제적 또는 생물학적 순 영향(net impact)에 주목하지만, 맥락 취약성은 누가 더 취약하고 누가 덜 취약한지를 규명하기 위해 민족, 사회계층, 성별 등의 차이에 관심을 둔다. 다시 말해 결과 취약성이 '무엇이' 또는 '누가' 취약한가에 대한 답을 구하는 것이라면, 맥락 취약성은 '왜' 더 취약한가에 대해 탐색하는 것이다. 이러한 구분에 의하면 결과 취약성은 Eakin and Luers(2006)의 취약성 접근 방식 분류에서 위험-위험요소(risk-hazard) 접근과 밀접하고, 맥락 취약성은 정치경제/정치생태(political economy/political ecology) 접근, 회복력(resilience) 접근과 밀접하다고 볼 수 있다. O'Brien et al.(2007)에 따르면 이러한 두 가지 접근 방법은 학문적인 배경이 각각 자연과학, 사회과학으로 다르고 취약성의 특성과 원인을 개념화하는 데 근본적인 차이가 있어서 하나의 공통된 틀로 통합하기 어렵다(표 4-1-2).

표 4-1-2 취약성 접근 방법

[출처 : O'Brien et al., 2007]

구분	결과 취약성 (Outcome vulnerability)	맥락 취약성 (Contextual vulnerability)
문제의 근원	기후 변화	사회적 취약성
정책 방향	기후변화 저감, 보상, 기술적 적응	사회적 적응, 지속가능한 개발
취약성-적응능력의 관계	적응능력이 취약성을 결정	취약성이 적응능력을 결정
분석의 출발점	미래 기후위험의 시나리오	기후 조건에 대한 현재의 취약성
주로 관련되는 분야	자연과학	사회과학
취약성의 의미	주어진 기후변화 수준에 대한 기대 순피해(net damage)	사회경제적 요인들에 따라 결정되는 기후변화·변동에 대한 민감성

IPCC는 2001년 3차 평가 보고서(AR3)와 2007년 4차 평가 보고서(AR4)에서 기후변화 취약성을 기후변화에 대한 노출, 민감도, 적응능력의 함수로 정의하였다. 취약성에 대한 이러한 정의는 상이한 취약성 접근 방식으로 치우치지 않으면서 취약성을 평가하는 유연한 틀로 볼 수 있다. 즉 기후 노출은 O'Brien et al.(2007)의 결과 취약성에 대응하고, 민감도와 적응능력은 맥락 취약성에 대응하여 두 가지 접근 방식을 혼용하고 있다(그림 4-1-1).

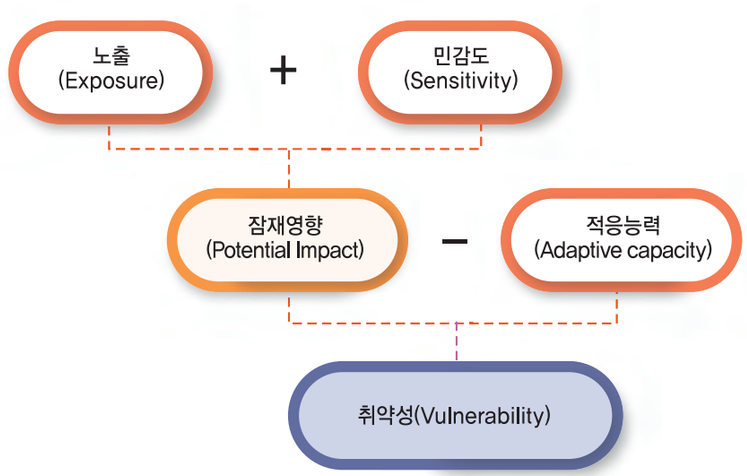


그림 4-1-1 IPCC의 취약성 개념(AR3)

[출처: McCarthy et al.(2001)]

IPCC는 2014년의 5차 평가보고서(AR5)에서 기후변화 위험을 결정하는 요소로 맥락 취약성의 중요성을 더욱 강조하였다. AR5에서는 취약성이 아닌 위험(risk)의 개념이 전면에 등장하였는데, 위험은 기후변화와 같은 사건이 일어날 가능성과 사건이 일어났을 경우 초래되는 결과로 평가된다. 사건이 일어날 가능성을 기후 노출에, 초래되는 결과를 민감도와 적응능력에 대응시키면 위험 평가(risk assessment)는 곧 기존의 취약성 평가와 같다. 그렇지만 위험요소(hazard)와 노출을 분리하고 취약성의 사회·경제적 맥락을 강조하고 있다는 점은 이전의 정의와 다른 부분이다. 예를 들어 위험요소는 수온 상승, 해수면 상승, 해양산성화 등이라면 노출은 그러한 위험요소에 노출된 연안 마을 수, 상업적으로 중요한 어종 수 등이며, 취약성 맥락은 동일한 기후변화 요소에 노출되었음에도 불구하고 취약성의 차이를 일으키는 인구, 거버넌스 등의 사회·경제적 요인이다. 다시 말해 취약성의 맥락은 해당 시스템이 얼마나 그러한 변화에 민감한지, 시스템이 그러한 변화에 적응하거나 활용할 수 있는지를 뜻한다(그림 4-1-2).

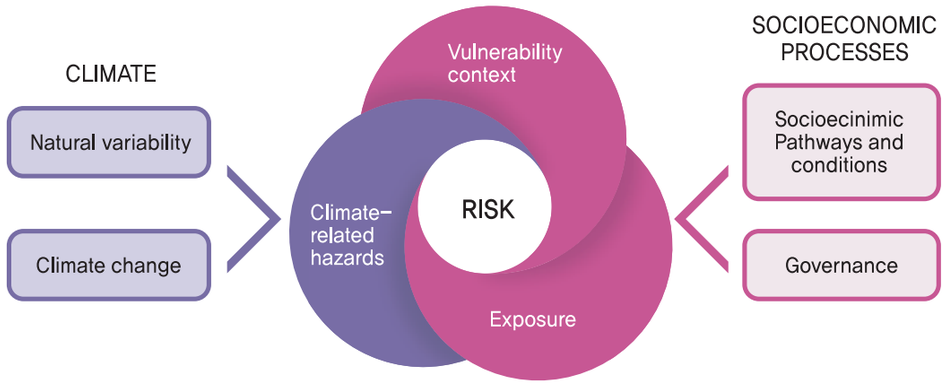


그림 4-1-2 IPCC의 위험(risk) 개념(AR5)

[출처: Oppenheimer et al.(2014)]

2) 취약성 평가의 목적

취약성 평가(vulnerability assessment)는 다양한 목적으로 수행된다. 예를 들면, 취약성에 대응한 적응 계획 수립, 취약성이 유발하는 위험과 기회에 대한 인식 제고, 취약성 관련 과학적 연구의 촉진 등이다. 이 가운데 본 연구와 관련한 목적이라면 '취약성에 대응한 적응 계획 수립'이라 할 수 있다. 제1장에서 언급한 바와 같이 수산업·어촌의 취약성 평가는 「농어업·농어촌 및 식품산업 기본법」에 따라 정책 수립의 기초자료로 활용하기 위한 것으로 그 목적이 분명하다. 이는 UNFCCC(2011)가 취약성 평가를 적응 대책 수립 및 이행의 첫 번째 단계로 설정한 것과 같은 맥락이다. 수산업의 경우 다른 분야에 비해 가용 자료가 부족하고 관찰이 쉽지 않기 때문에 기후변화의 영향에 대한 불확실성이 크지만, 현재의 여건에서 최선의 취약성 평가를

통해 수산업과 어촌이 기후변화에 얼마나 취약한지에 대한 이해를 촉진하고 이에 대응한 대응 전략을 실행하는 데 도움을 줄 수 있다(그림 4-1-3).

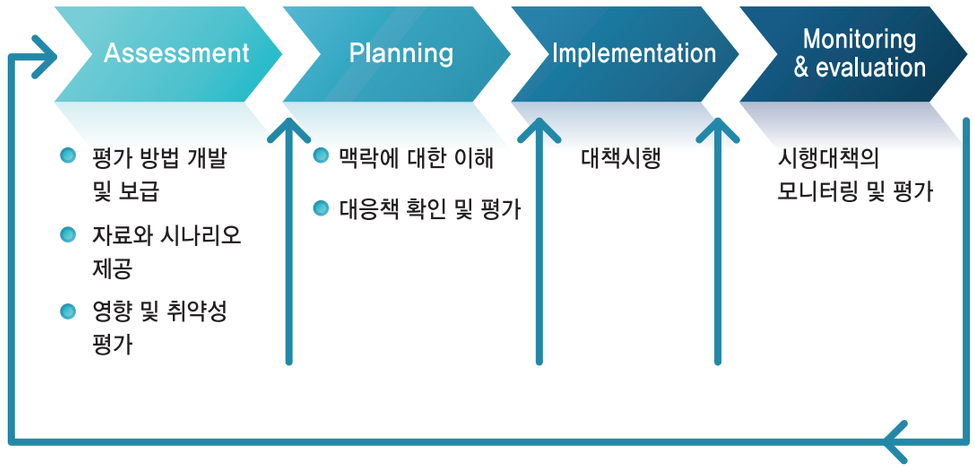


그림 4-1-3 적응 대책의 수립·이행의 과정

[출처: UNFCCC(2011)]

취약성 평가를 한마디로 표현하다면 "누가(또는 무엇이) 무엇에 대해 취약한가?"에 대한 질문에 답을 찾는 과정이다. 여기서 '누가(또는 무엇이)'는 취약성 논의의 맥락에 따라 취약성 평가는 개인, 사회집단, 가구, 공동체, 지역, 국가 등 다양한 단위로 분류될 수 있는 사람에 대한 것일 수도 있고, 수산업, 농업, 관광, 교통, 주거 등 인간의 특정 활동 분야이거나 호주, 강, 해안 등의 특정 지역일 수 있다. 그리고 뒤의 '무엇'은 자연재해, 기후변화 등 특정 스트레스 요소나 위험요소(hazard)가 된다. 기후변화에 대한 취약성 평가로 범위를 좁힌다면 이는 다음과 같은 질문과 연결된다.

- 취약한 사람/생물종/생산시스템이 누구(또는 무엇이)며, 취약성은 어떻게 저감될 수 있는가?
- 취약한 생태계는 어디에 있으며, 그들의 적응능력은 자원관리로 지원될 수 있는가?
- 수산분야 취약성의 사회·경제적인 결과가 가장 큰 영역 또는 지역은 어디이며, 어떻게 이러한 결과를 최소화할 수 있는가?
- 기후변화에 따른 새로운 기회와 편익은 어디서 얻으며, 이러한 기회가 인류의 후생을 증진할 수 있는지 어떻게 확인할 수 있는가?

3) 영향 및 취약성 평가 방법

가) 방법의 종류

기후변화 영향 및 취약성 평가 방법은 정량적(quantitative)인지, 정성적(qualitative)인지에 따라 구분된다. 정량적인 방법이 기후 모델에 사회·경제적인 통계 자료를 연계하는 것이라면 정성적인 방법은 사례연구, 비교 분석 등 정성적인 정보에 기초한다. 또 다른 평가 방법의 분류는 평가의 기초 자료를 수집하는 경로를 기준으로 하향식(top-down)인지, 상향식(bottom-up)인지를 나누는 것이다. 하향식 방법은 통계와 같은 간접 자료에 기초하여 모델링이나 통계 분석을 통해 평가하는 것이고, 상향식 방법은 취약성의 이해관계자를 직접 조사하거나 자료를 얻어 평가하는 것이다. 앞의 구분과 연관하면 보통 하향식 방법은 정량적인 방법과 밀접하고, 상향식 방법은 정성적인 방법과 밀접하다. 또 취약성 접근 방식과 연관시키면 하향식 방법은 위험-위험요인 접근 또는 결과 취약성이, 상향식 방법은 정치경제/정치생태 접근 또는 맥락 취약성이 해당된다. 그러나 인간-환경 간의 상호작용을 다루는 회복력 접근 등에서는 두 방식을 혼용하기도 한다(표 4-1-3).

하향식/정량적 방법에서 취약성은 위험 발생의 정량화된 가능성으로 측정되는데, 지표 기반(indicator-based) 방법과 모델링 기반(modelling-based) 방법으로 나눌 수 있다. 지표 기반 방법에서 지표는 시스템의 생물물리적이고 경제적인 특성과 연계되는데, 보통은 IPCC의 취약성 모형의 구성 요소인 노출, 민감도, 적응능력의 대리지표로서 선정되고 이를 종합하여 상대적인 취약성의 개념으로 측정된다. 모델링 기반 방법은 생물물리 시스템에 초점이 있으며 용량-반응(dose-response) 논리에 기초하여 기후 변수의 충격을 전망하거나 모의 실험하는 것이 일반적이다. 그러나 최근 농수산 분야에서는 생물물리적 모델링의 결과에 경제적 모의실험을 통합하여 기후변화 적응에 따른 비용, 적응능력에 영향을 미치는 농가의 사회경제적 특성, 기후변화로 인한 수산업의 경제적인 손실 등을 평가하는 방법이 시도되고 있다. 한편 하향식/정량적 방법은, 특히 모델링 기반 방법의 경우 그 특성 상 시간 지평이 장기적이며 공간적으로 거시적 단위를 다루게 된다.

표 4-1-3 평가 방법 종류와 특징

접근 방법		실행 목적	입력 자료	입력 자료 및 방법
하향식	모델링 기반	기후변화 모델링	기상학, 생물물리	기후/생물물리 모델링
	지표 기반	대리변수 활용	사회경제, 생물물리, 기상학	문헌 검토, 통계 분석
상향식		광범위한 맥락 탐색	날씨, 위험, 충격 등에 대한 자료	참여적, 정성적

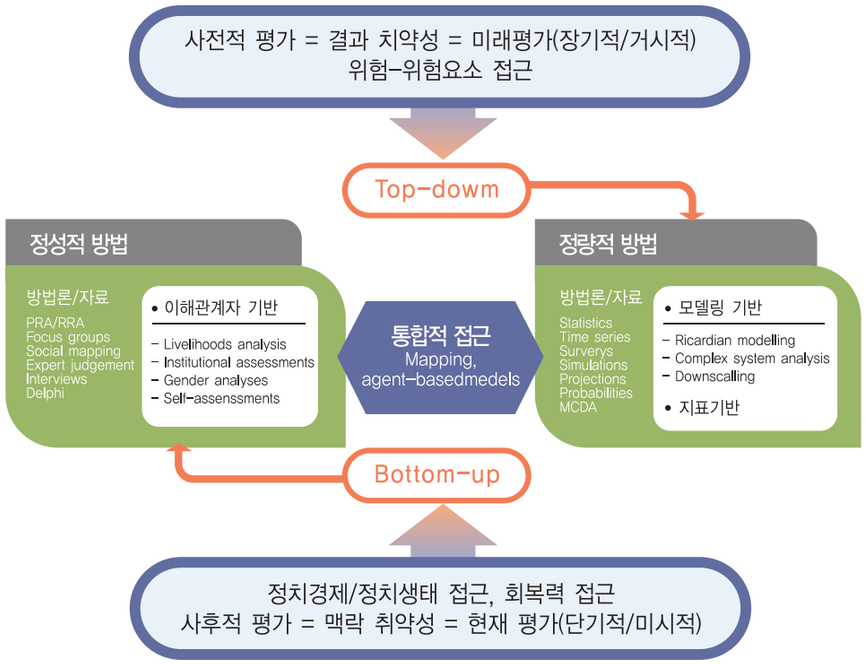


그림 4-1-4 기후변화 영향 및 취약성 평가 방법

[출처: Brugere and Young(2015)]

상향식/정성적 방법은 참여적인 이해관계자 기반(participatory stakeholder-based) 방법이 주로 사용된다. 기후변화에 영향을 받는 당사자로부터 직접 조사한 복합적인 차원의 취약성 관련 자료에 기초하므로 특정 집단에 대한 이상적인 취약성 평가 방법이 될 수 있다. 따라서 하향식/정량적 방법과 달리 시간 지평이 짧고 공간적으로 미시적 단위를 다루게 된다.

나) 우리나라 수산업에 대한 평가 방법

우리나라 수산업에 대한 기후변화 영향 및 취약성 평가는 McCarthy et al.(2001)의 취약성 함수식에 기초하여 가용 자료 여건에서 가장 실행가능성이 높은 지표 기반 방법을 기본적인 틀로 삼는다. IPCC의 기후변화 취약성(V)은 기후노출(E), 민감도(S), 적응능력(AC)의 함수로서 노출과 민감도의 합($E+S$)이 기후변화의 잠재적 영향(potential impact)이고 여기에서 기후변화에 대한 적응능력을 차감하면 취약성이 된다. 지표 기반 방법은 기후노출, 민감도, 적응능력 각각을 대리하는 지표 또는 하위지표들을 설정하여 구한 다음 이들을 취약성 함수식에 적용하여 구하는 방법이다.

$$V = f(E, S, AC) = (E+S) - AC$$

지표 기반 방법에서는 연근해어업, 양식어업 각각에 대해 분석 대상의 특성을 고려하여 기후변화 영향 및 취약성을 가장 잘 나타낼 수 있는 지표를 개발·선정하는 것이 핵심적인 과제이다. 특히 기존 연구에서 가용 자료의 제약과 분석 방법의 부재로 산정에 한계가 많았던 기후노출 지표에 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오를 반영하고, 민감도 지표에 수산물의 생물학적인 특성과 산업적인 특성을 고려한다.

RCP 시나리오는 연근해어업, 양식어업, 지역 어업에 공통적으로 적용되는 것으로 국립수산과학원(2016)의 결과를 적용하였다. RCP 시나리오는 미래 온실가스 농도값을 설정하고 온실가스 감축 노력 정도에 따라 네 가지 유형인 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5로 구분되는데 뒤의 수치는 산업혁명(1750년) 이후 증가한 복사강제력의 크기를 뜻한다(IPCC, 2014). 이 가운데 국립수산과학원(2016)은 온실가스 저감 없이 현재 추세대로 배출되는 상황인 RCP8.5와 온실가스 저감이 상당히 실현되는 상황인 RCP4.5에 대해 예측하였다. 국립수산과학원(2016)의 예측 모형으로는 3차원 해수유동 모델인 ROMS(Regional Ocean Modeling System)가 이용되었고, 수치모델의 장기 입력장을 생산하기 위하여 북서태평양 해역의 예측 성능이 우수하고 해상도가 뛰어난 미국 국립대기과학연구소(NCAR)의 CESM(Community Earth System Model) V.1 CAM5 모델 분석 결과를 이용하여 초기장 및 경계장을 생산하였다. 모델 분석 결과, RCP8.5 시나리오에서 우리나라 주변 해역의 10년 이동평균 기준 표층수온은 2100년에 약 4~5℃ 내외로 상승하는 것으로 나타났다. RCP4.5 시나리오에서는 이보다 낮은 약 2~3℃ 내외의 상승이 예상되었다(국립수산과학원, 2016).

기후노출 지표로 RCP 시나리오에 따른 수온과 염분의 변동을 설정할 수 있는데, 연근해어업에서는 연근해 조업정보 전수 자료에 기초하여 각 업종의 조업 범위에서 평균적인 노출된 정도를 측정하고, 양식어업에서는 양식 기간 중 양식 생물의 적정 수온과 서식 수온의 상한을 초과하는 기간으로써 각 지역의 노출 정도를 측정한다.

민감도 지표로 어로어업에서는 생물학적인 특성으로 기후변화에 대한 수산생물의 위험도를 평가한 김도훈 외(2016)의 결과를 적용하고, 양식어업에서는 Doubleday et al.(2013)의 방법을 원용하여 9개 세부 항목에 대해 양식생물 관련 자연과학분야의 문헌과 전문가 자문을 통해 민감도를 평가한다. 민감도 지표 중 재해 위험도 지표와 적응능력 지표는 김봉태 외(2016a)와 동일한 지표를 사용하되 2015년 농림어업 총조사의 자료로 갱신한다.

종합지표 산정을 위한 가중치 산정 및 표준화는 김봉태 외(2016a)의 방법을 적용한다. 가중치는 수산업과 기후변화 관련 자연과학·사회과학 전문가 20명을 대상으로 3회의 반복적인 조사를 통해 의견을 수렴하는 델파이(Delphi) 방법으로 산정한 값이다. 그에 따르면 가중치는 기후노출 35.1%, 민감도 31.6%, 적응능력 33.4%이고 그 아래 세부지표에 대한 가중치가 설정되어 있다. 개별 지표의 표준화 방법은 표준정규분포로 표

준화하는 z-score 방법을 적용한다. 이는 다음 식에서 도출되며, X_i는 지표 i의 평균이고, SD_i는 지표 i의 표준편차를 뜻한다.

$$z-score: Z_i = \frac{X_i - \overline{X_i}}{SD_i}$$

한편, 시점별로 시나리오가 적용되는 기후노출 지표의 표준화는 여러 시점에 걸쳐 한 번에 적용할 수도 있고 각 시점에 대해 개별적으로 적용할 수도 있다. 그런데 장기로 갈수록 기후변화 취약성이 높아지는 것은 충분히 예상되기 때문에 시점간 비교보다는 시나리오간 업종 또는 지역의 취약성 양상을 비교하고자 각 시점별로 표준화를 실행한다.

제 2절 연근해어업(남해안)의 기후변화 영향 및 취약성 평가 결과

1) 평가 방법 및 대상

가) 평가 방법

연근해어업의 기후변화 취약성(V)은 IPCC의 정의에 따라 기후 노출(E) 민감도(S), 적응능력(AC)의 함수로 설정하고 지표 기반 방법으로 평가하였다.

표 4-2-1 연근해어업 평가 지표

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

구분	세부 지표	분석단위	자료 출처 / 방법	기준시점	가중치
기후 노출	해양물리 요소 변동 - 수온 - 염분	업종	국립수산과학원(2016) / 조업 정보에 기초한 시공간 가중치로 산정	2030년 2050년 2100년	0.351 0.267 0.084
민감도	수산생물 위험도	업종	김도훈 외(2016) / 업종별 어획 비중을 가중치로 산정	2011~2015년	0.316
적응 능력	어업인의 능력 -인구사회 특성(연령) -경험 및 교육(경력, 학력) -경영행태(생산자조직화, 정보활용) -소득안정성(매출규모, 겸업정도)	업종	농림어업총조사 / 업종별 평균 산정	2015년	0.334 0.062 0.094 0.097 0.083

노출 지표는 수온과 염분으로 구성되며 IPCC의 표준 시나리오인 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 적용하여 2016년부터 2100년까지의 우리나라 주변 해역을 전망한 국립수산과학원(2016)의 결과를 적용하였다. 해양산성화, 용존산소 등도 중요한 기후 노출 변수이지만 예측값이 없어 제외하였다.

이들 노출 지표를 연근해어업의 각 업종에 대해 도출하기 위해 김봉태 외(2016b)와 같이 수협 어업정보통신본부가 보유한 남해안 연근해어선의 조업정보를 이용하여 시공간의 가중치를 설정하고 여기에 시공간의 예측치를 적용하여 시나리오별로 평균값을 산정하는 방식을 적용하였다. 즉 2011~2015년 동안 각 업종이 월(j)·해구(i)별로 조업한 실적이 전체 실적 중에서 차지하는 비중(y)을 가중치로 삼아 월·해구별로 수온 및 염분의 각 전망 시점(w_{ij})의 예측치를 적용하여 평균값($Temp^{y}_{ij}$, $Salt^{y}_{ij}$)을 구하였다. 이 값은 수심별로도 다

른데 자료가 제공되는 수심 범위(0m, 30m, 50m, 100m) 중 각 업종이 주로 조업하는 대표 수심을 기준으로 하였다. 최종적인 노출 지표는 이러한 방식을 적용하여 수온, 염분 각각에 대해 2016년 대비 취약성 평가 시점인 2030년, 2050년, 2100년의 수온 상승분(E^{y}_{temp}) 및 염분 변화분의 절댓값(E^{y}_{salt})으로 도출하였다.

$$E^{y}_{temp} = \sum_{ij} Temp^{y}_{ij} - \sum Temp^{2016}_{ij}$$

$$E^{y}_{salt} = |\sum_{ij} salt^{y}_{ij} - \sum salt^{2016}_{ij}$$

y=2030, 2050, 2100

민감도 지표는 연근해어업의 각 업종이 어획하는 수산생물의 민감도로 설정하였다. 수산생물 민감도는 수산생물이 생물학적인 측면에서 기후변화에 민감한 정도를 나타내는 지표로 각 업종의 어획 비중을 적용하여 업종별 값을 산정할 수 있다. 이는 생물학적인 지표이기도 하지만 어획량이 곧 업종의 경영과 직결되므로 경제적인 민감성도 반영한다고 볼 수 있다. 이밖에 다른 지표로 기후변화에 의한 수산재난 위험도를 상정할 수 있으나, 미래 예측 자료가 부족하고 과거 피해 자료를 활용하더라도 연근해 업종별로는 세분화되지 않아 제외하였다. 수산생물의 민감도는 김도훈 외(2016)의 결과를 이용하였다. 김도훈 외(2016)는 Pecl et al.(2014)의 Applied Ecological Risk Assessment 방법을 원용하여 32개 주요 연근해 어종의 생물 민감도를 평가하였다. 자원량(포란수, 성숙기간), 분포(공간 범위), 생물특성(서식수온 범위, 환경변수와의 관계성)에 대해 각각 평가한 다음 이를 종합하였는데, 홍어, 대게, 아귀, 명태가 높았고, 살오징어, 꽃게, 멸치는 낮은 것으로 평가되었다.

이러한 결과를 활용하여 연근해어업 k업종의 수산생물의 민감도(S_k)는 각 어종의 민감도(S_l)를 업종의 어종별 생산량 비중(W_{kl})을 가중치로 평균한 값으로 산정하였다. 업종의 생산량 비중은 노출 지표와 같이 2011~2015년 연근해어선의 조업정보를 기준으로 하였다.

$$S_k = \sum_{l} w_{kl} s_l$$

적응능력 지표는 연근해어업 각 업종에 종사하는 어업인의 능력을 나타낼 수 있는 지표로서 어업인의 인구사회적인 특성(연령), 경험 및 교육 정도, 경영행태를 나타내는 생산자조직화 및 정보화, 소득의 안정성을 나타내는 매출규모 및 겸업정도를 종합하여 지표화하였다. 이들 자료는 통계청이 5년마다 조사하는 전수조

사인 어업 총조사에서 얻을 수 있다. 기준 연도는 가장 최근 조사 시점인 2015년이며 각 세부 지표는 각 업종별로 평균한 값이다. 연령을 제외한 모든 지표는 그 값이 클수록 적응능력이 높은 것으로 산정되고 연령은 그 반대이다. 이상의 세부 지표에 대해 가중치를 적용하여 합산하면 각 업종에 대해 종합적인 취약성 평가 결과가 도출된다.

표 4-2-2 연근해 어종의 기후변화 민감도 평가 기준

[출처 : 출처: 김도훈 외(2016)]

구분		민감도 수준			비고
		3 (High)	2 (Medium)	1 (Low)	
자원량 (Abundance)	포란수	연 100개 미만	연 100-20,000개	연 20,000개 이상	문헌자료 (논문, 보고서 등)
	성숙기간	10년 초과	2-10년	2년 미만	
분포 (Distribution)	분포범위	위도 10 ° 미만	위도 10-20 °	위도 20 ° 이상	
생물특성 (Phenology)	서식수온(격차)	10℃ 미만	10-20℃	20℃ 이상	
	환경변수와의 관계성 (수온, 생산량)	0.5 이상	0.5 미만	유의성 없음	표층, 30m, 50m, 100m 수온과 생산량 간의 상관관계 분석

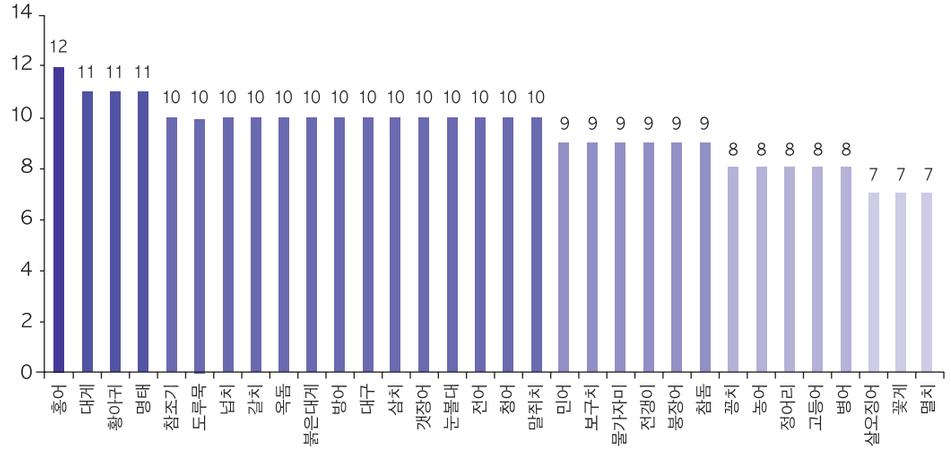


그림 4-2-1 연근해 주요 어종의 기후변화 민감도 분석 결과

[출처: 김도훈 외(2016)]

나) 평가 대상

연근해어업 평가 대상 업종은 남해안의 주요 근해 업종 14개와 연안 업종 6개로 모두 20개 업종이다. 2011~2015년 기준 이들 업종의 조업횟수는 연간 56만 건에 달한다. 수산생물 민감도가 산정되는 32개 어종의 어획량 비중은 66.5%이다. 나머지 어종은 민감도 관련 정보가 없기 때문에 민감도에 영향을 주지 않는다고 가정한다.

2) 평가 결과

가) 기후 노출

연근해어업 20개 업종에 대한 기후 노출 변수로 수온과 염분에 대해 평가하였다. 수온은 2100년까지 장기에 걸쳐 RCP4.5보다 RCP8.5에서 평균적으로 더 많이 상승하는 것으로 나타났다. 시점별로는 RCP4.5에서는 2050년까지 많이 상승했다가 2100년과는 큰 차이가 없는 반면, RCP8.5에서는 2050년까지는 완만했다가 2100년까지 급격하게 상승하는 패턴을 보인다. 물론 이는 특정 시점의 횡단면을 살펴본 결과이므로 수온의 변동성을 고려할 때 더 많은 시점에 대한 자료를 모아 시계열로 확인할 필요가 있다. 업종별로도 시나리오에 따라 차이를 보이는데, 근해연승, 서남해구쌍끌이중형저인망, 연안복합, 대형선망 등은 RCP8.5에서보다 RCP4.5에서의 상승폭이 더 크게 나타나 기후변화 시나리오에 선형적이지는 않았다. 이에 따라 시나리오별로 수온 상승에 많이 노출된 업종이 다르게 나타났는데, RCP4.5에서는 근해연승, 근해장어통발, 서남해구외끌이중형저인망, 연안복합, 연안통발인 반면, RCP8.5에서는 기선권현망, 연간개량안강망, 연안들망, 연안선망, 연안자망으로 다른 양상을 보였다(표 4-2-3).

염분의 경우에도 기후변화 시나리오에 따라 다르게 나타났는데, RCP4.5에서는 2050년까지 변동폭이 크지 않다가 2100년에 변동폭이 컸고, RCP8.5에서는 2050년까지 크게 변동했다가 2100년에는 변동폭이 다소 줄어드는 양상을 보였다. 업종별로 염분 변화에 노출되어 있는 정도는 시나리오에 관계없이 연안개량안강망, 연안들망, 연안선망, 연안자망 등 근해어업보다는 연안어업이 크게 나타났고 근해어업 중에서는 기선권현망이 높았는데, 다른 어업에 비해 연안이나 표층에서 조업하는 어업이 염분 변화에 많이 노출되어 있음을 알 수 있다(표 4-2-4).

이상의 결과를 종합한 기후 노출은 수온에 대한 가중치가 높아서 수온에 대한 결과와 유사하게 도출된다. 즉, RCP4.5에서는 근해연승, 근해장어통발, 연안복합, 연안통발이, RCP8.5에서는 기선권현망, 연안들망, 연안선망, 연안자망이 높다. 연안개량안강망은 두 시나리오 모두에서 비교적 높게 나타났다(표 4-2-5).

표 4-2-3 연근해 업종별 수온 지표(원값)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

업종	RCP8.5			RCP4.5		
	2030년	2050년	2100년	2030년	2050년	2100년
근해안강망	0.64	0.97	2.82	0.42	2.21	2.16
근해연승	-0.03	0.42	1.47	1.47	2.74	2.52
근해자망	0.36	0.86	2.75	0.49	2.05	2.12
근해장어통발	0.49	0.71	2.27	0.86	2.33	2.39
근해채낚기	0.46	0.90	3.08	0.39	1.75	1.97
근해통발	0.56	0.60	2.74	0.72	1.80	2.04
기선권현망	1.45	1.88	4.50	-0.87	1.56	1.34
대형선망	0.00	0.33	1.79	1.01	2.35	2.24
대형트롤	0.53	0.99	2.46	0.74	2.05	2.20
서남해구외끌이중형저인망	0.07	0.44	1.62	1.19	2.35	2.43
서남해구쌍끌이중형저인망	0.12	0.55	1.74	0.89	2.02	2.17
소형선망	0.39	0.35	2.34	0.49	1.88	1.82
쌍끌이대형저인망	0.40	0.74	2.00	0.80	2.06	2.10
외끌이대형저인망	0.21	0.64	1.52	1.09	2.30	2.25
연안개량안강망	1.00	1.32	3.88	-0.02	2.11	2.14
연안들망	1.79	2.35	5.18	-0.91	1.48	1.85
연안복합	-0.05	0.68	1.85	1.03	2.77	2.44
연안선망	1.47	1.81	4.62	-0.59	1.66	1.80
연안자망	1.14	1.56	4.65	-0.19	1.49	1.92
연안통발	0.31	0.50	2.35	1.13	2.80	2.77

표 4-2-4 연근해 업종별 염분 지표(원값)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

업종	RCP 8.5			RCP 4.5		
	2030년	2050년	2100년	2030년	2050년	2100년
근해안강망	0.08	0.14	0.05	0.02	0.05	0.24
근해연승	0.06	0.08	0.02	0.09	0.15	0.10
근해자망	0.08	0.10	0.07	0.06	0.03	0.20
근해장어통발	0.05	0.07	0.00	0.01	0.02	0.17
근해채낚기	0.03	0.02	0.07	0.02	0.06	0.12
근해통발	0.01	0.06	0.01	0.01	0.08	0.20
기선권현망	0.11	0.16	0.10	0.02	0.08	0.20
대형선망	0.01	0.01	0.05	0.05	0.09	0.08
대형트롤	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.09
서남해구외끌이중형저인망	0.00	0.01	0.06	0.02	0.01	0.05
서남해구쌍끌이중형저인망	0.01	0.02	0.05	0.02	0.04	0.08
소형선망	0.02	0.01	0.09	0.05	0.09	0.12
쌍끌이대형저인망	0.03	0.05	0.02	0.01	0.05	0.13
외끌이대형저인망	0.02	0.03	0.05	0.03	0.01	0.08
연안개량안강망	0.11	0.20	0.11	0.00	0.07	0.31
연안들망	0.08	0.37	0.27	0.18	0.09	0.28
연안복합	0.02	0.03	0.07	0.05	0.00	0.09
연안선망	0.05	0.28	0.15	0.14	0.03	0.22
연안자망	0.10	0.27	0.19	0.22	0.06	0.28
연안통발	0.02	0.03	0.05	0.04	0.01	0.09

표 4-2-5 연근해 업종별 기후노출 지표(표준화 값)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

업종	RCP 8.5			RCP 4.5		
	2030년	2050년	2100년	2030년	2050년	2100년
근해안강망	0.211	-0.030	0.240	-0.236	0.192	0.309
근해연승	-0.883	-0.867	-1.136	1.197	1.868	0.796
근해자망	-0.283	-0.127	0.154	0.010	-0.214	0.102
근해장어통발	-0.172	-0.570	-0.287	0.210	0.233	0.658
근해채낚기	-0.323	-0.079	0.017	-0.255	-0.598	-0.505
근해통발	-0.101	-0.673	-0.089	0.075	-0.336	-0.082
기선권현망	1.396	1.367	1.168	-1.668	-0.835	-1.817
대형선망	-0.994	-0.898	-0.878	0.534	0.711	0.026
대형트롤	-0.223	-0.106	-0.309	0.124	-0.244	-0.015
서남해구외끌이중형저인망	-0.811	-0.610	-0.835	0.277	-0.206	-0.162
서남해구쌍끌이중형저인망	-0.903	-0.697	-0.915	0.639	0.259	0.392
소형선망	-0.452	-0.732	-0.579	-0.023	-0.117	-0.889
쌍끌이대형저인망	-0.346	-0.476	-0.559	0.150	-0.080	-0.147
외끌이대형저인망	-0.669	-0.493	-0.917	0.568	0.107	0.041
연안개량안강망	0.851	0.657	1.054	-0.782	0.163	0.469
연안들망	2.363	2.633	2.065	-1.046	-0.927	-0.318
연안복합	-1.037	-0.344	-0.818	0.581	0.978	0.543
연안선망	1.693	1.445	1.471	-0.880	-0.942	-0.610
연안자망	1.200	1.256	1.627	-0.099	-1.076	-0.158
연안통발	-0.516	-0.655	-0.474	0.623	1.064	1.365

나) 민감도

연근해어업에 대한 민감도 변수로 수산생물 민감도를 측정하였다. 수산생물의 기후변화에 대한 민감도를 업종의 어획비중으로 가중 합산하였기 때문에 민감도가 큰 어종을 많이 어획하는 업종일수록 수산생물 민감도가 높아진다. 산정 결과, 아귀, 갈치, 참조기, 붕장어, 민어 등 기후변화에 대한 민감도가 높은 어종을 많이 어획하는 근해장어통발, 근해연승, 근해안강망, 외끌이대형저인망, 연안개량안강망 등이 높았다. 이에 반해 기후변화 민감도가 낮은 어종인 멸치, 꽃게, 오징어, 고등어 등을 주로 어획하는 기선권현망, 근해통발, 연안들망, 근해채낚기, 연안선망, 대형선망 등은 작은 값이 도출되었다.

다) 적응능력

연근해어업의 적응능력은 해당 업종에 종사하는 어업 경영자의 능력으로 측정하였다. 인구사회적인 특성을 대표하는 연령은 서남해구쌍끌이중형저인망, 대형트롤, 근해통발 등이 평균 60세 이상으로 높은 반면, 대형선망, 근해연승, 근해안강망 등이 55세 전후 수준으로 낮았다. 경험 및 교육 정도는 대형트롤, 기선권현망, 외끌이대형저인망 등이 높은 반면, 소형선망, 근해장어통발, 서남해구외끌이중형저인망 등이 낮았다. 생산자조직화 및 정보화는 대형선망, 기선권현망, 쌍끌이대형저인망 등 대형 업종이 높았고, 근해통발, 근해장어통발 등이 낮았다. 소득의 안정성 또한 대형트롤, 서남해구외끌이중형저인망, 기선권현망 등 대형 업종이 높았고 근해장어통발, 근해자망 등이 낮았다. 연안어업은 중간 수준이었는데 매출 규모는 작지만 겸업 정도가 높기 때문으로 풀이된다. 최종적으로 이상의 세부 지표를 종합한 각 업종의 적응능력은 소형선망, 근해통발 등 소형 근해어업과 연안어업이 낮은 편이었고 기선권현망, 대형트롤, 쌍끌이대형저인망, 외끌이대형저인망 등 대형 업종이 높게 나타났다(표 4-2-6).

라) 기후변화 취약성

이상에서 산정된 기후 노출, 민감도, 적응능력의 각 지표를 가중 합산한 기후변화 취약성은 다음과 같이 도출된다. 기후변화 시나리오에 따라 기후 노출의 정도가 다소 상이하게 나타나서 최종적인 취약성도 그러한 경향을 따르고 있다. RCP8.5에서는 연안개량안강망, 연안들망, 연안선망, 연안자망 등의 연안어업과 근해안강망, 근해장어통발 등 일부 근해어업의 취약성이 높았다. RCP4.5에서 연안개량안강망과 근해장어통발은 여전히 높았지만 RCP8.5와 달리 근해연승, 연안통발, 연안복합, 서남해구외끌이중형저인망 등이 높게 나타났다. 그렇지만 두 시나리오 모두 근해어업보다는 연안어업이 대체로 높다는 공통점이 있다. 따라서 연안어업에 대한 기후변화 적응 대책이 더욱 필요한 것으로 사료된다. 또한 시나리오에 따라 업종별로 노출되는 정도가 상이하고 선형적인 관계에 있지 않아서 효과적인 대응을 위해서는 기후변화 영향을 정확하게 예측하려는 노력이 강화되어야할 것으로 판단된다(표 4-2-7).

표 4-2-6 연근해 업종별 수산생물 위험도 및 어업인의 능력 세부 지표(원값)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

업종	수산생물 위험도	인구사회특성	경험 및 교육		경영행태		소득안정성	
		연령	경력	학력	생산자 조직화	정보 활용	매출 규모	겸업 정도
근해안강망	9.89	56.7	25.7	3.69	0.80	0.45	31	1.52
근해연승	9.95	56.0	23.5	3.57	0.87	0.42	27	1.61
근해자망	8.87	56.6	24.3	3.51	0.77	0.35	25	1.66
근해장어통발	10.00	58.4	24.3	3.11	0.75	0.35	15	1.69
근해채낚기	7.35	56.9	22.9	3.67	0.79	0.43	15	1.76
근해통발	7.01	61.0	27.6	3.07	0.73	0.25	9	1.90
기선권현망	7.00	59.7	25.5	4.12	0.87	0.59	40	1.83
대형선망	8.22	54.8	15.9	3.83	0.94	0.67	25	1.67
대형트롤	9.25	62.1	23.5	4.63	0.90	0.50	47	1.40
서남해구쌍끌이중형저인망	9.44	65.2	26.4	3.36	1.00	0.21	47	1.36
서남해구외끌이중형저인망	9.56	59.4	22.2	3.29	0.95	0.42	41	1.37
소형선망	9.31	57.0	21.0	3.36	0.55	0.25	7	1.95
쌍끌이대형저인망	9.50	59.7	15.4	4.27	0.98	0.43	44	1.25
외끌이대형저인망	9.65	57.5	21.3	4.05	0.96	0.41	38	1.28
연안개량안강망	9.64	58.1	26.1	3.22	0.82	0.38	14	1.59
연안들망	7.05	58.5	27.3	3.30	0.83	0.36	9	1.90
연안복합	9.41	59.5	26.2	3.19	0.82	0.31	5	1.90
연안선망	7.63	58.7	26.9	3.18	0.74	0.37	10	1.78
연안자망	8.65	60.1	28.4	3.01	0.84	0.27	5	1.78
연안통발	9.47	60.5	28.5	2.97	0.86	0.30	4	1.78

표 4-2-7 연근해 업종별 기후변화 영향 및 취약성 평가 결과

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

업종	RCP8.5			RCP4.5		
	2030년	2050년	2100년	2030년	2050년	2100년
근해안강망	0.267	0.182	0.277	0.110	0.260	0.301
근해연승	-0.087	-0.082	-0.176	0.642	0.878	0.502
근해자망	-0.169	-0.114	-0.015	-0.066	-0.145	-0.034
근해장어통발	0.272	0.132	0.232	0.406	0.414	0.563
근해채낚기	-0.615	-0.529	-0.495	-0.591	-0.711	-0.679
근해통발	-0.560	-0.761	-0.556	-0.498	-0.643	-0.553
기선권현망	-0.247	-0.257	-0.327	-1.322	-1.030	-1.375
대형선망	-0.666	-0.632	-0.625	-0.129	-0.067	-0.307
대형트롤	-0.141	-0.100	-0.171	-0.020	-0.149	-0.068
서남해구쌍끌이중형저인망	-0.209	-0.139	-0.218	0.173	0.003	0.018
서남해구외끌이중형저인망	-0.218	-0.146	-0.222	0.323	0.190	0.237
소형선망	0.008	-0.090	-0.036	0.159	0.126	-0.145
쌍끌이대형저인망	-0.067	-0.113	-0.142	0.107	0.026	0.002
외끌이대형저인망	-0.134	-0.073	-0.222	0.300	0.138	0.115
연안개량안강망	0.510	0.442	0.581	-0.063	0.268	0.376
연안들망	0.268	0.363	0.163	-0.929	-0.887	-0.673
연안복합	-0.187	0.056	-0.110	0.381	0.521	0.368
연안선망	0.225	0.138	0.148	-0.678	-0.699	-0.583
연안자망	0.380	0.400	0.530	-0.076	-0.419	-0.096
연안통발	0.025	-0.024	0.039	0.424	0.579	0.685

제 3절 양식업 취약성 평가

1) 평가 방법 분석 방법

양식어업의 기후변화 취약성(V)은 IPCC의 정의에 따라 기후 노출(E), 민감도(S), 적응능력(AC)의 함수로 설정하였다. 노출 지표는 양식어업에 영향을 미치는 중요한 요인인 수온과 염분으로 구성되며(Handisyde et al., 2017; Doubleday et al., 2013; Lee et al., 2011), IPCC의 표준 시나리오인 대표 농도 경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 적용하여 2016년부터 2100년까지의 우리나라 주변 해역을 전망한 국립수산과학원(2016)의 결과를 적용하였다. 시나리오의 시점은 각각 단기, 중기, 장기를 대표하여 2030년, 2050년, 2100년으로 설정하였다. 해양산성화, 해수면 상승 등도 중요한 기후 노출 변수이지만 예측 값이 없어 제외하였다(표 4-3-1).

표 4-3-1 양식업 취약성 평가 지표

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

주요지표	구체적인 지표	출처	값
노출	수온 변화	NIFS(2016)	0.267
	염도 변화		0.084
민감도	종 민감도	Doubleday et al.(2016)	0.170
	재난 위험 (양식어가 당 재난 피해 규모)	행정안전부 (2011~2015)	0.145
적응능력	개별 어업인의 능력		0.154
	- 인구 통계학적 특성(나이)	2015년 수산업 실태조사	(0.029)
	- 경험 및 교육		(0.043)
	- 조직 활동 및 정보 활동		(0.045)
	- 소득안정성(판매, 직종의 다양성)		(0.038)
	지역의 능력		0.180
	- 1인당 GRDP	통계청 (2010~2013)	(0.054)
	- 재무안정성 (금융의 독자성, 재무의 자율성)	통계청 (2011~2014)	(0.052)
	- 어업에 대한 투자 (양식가구 당 어업예산, 어업 예산 비율, 양식가구당 기후변화 관련 예산)	수산업협동조합 (2011~2015)	(0.073)

취약성 평가를 위해 이들 노출 지표는 평가 수준에 따라 양식품종-지역별로 도출되도록 하고, 노출의 정도는 물리적인 측면뿐만 아니라 생물적인 특성을 반영하도록 설정하였다. 이는 동일한 수온이더라도 품종에 따라 양식에 적합한 수온일 수도 있고 아닐 수도 있기 때문이다. 수온은 경제적으로 양식할 수 있는 적정 수온과 생물학적으로 생존이 가능한 서식 수온으로 구분하였고, 양식 주기 동안 각 수온의 상한(upper limit)을 초과하는 기간을 기준으로 지표화 하였다. 적정 수온을 넘더라도 서식 수온 이내에 있으면 양식은 가능하지만 서식 수온을 초과하면 기존의 방식으로는 양식 자체가 불가능해지므로 양식 기간 중 서식 수온을 초과하는 기간의 비중에 따라 5~8점을, 서식 수온 이내에 있으나 적정 수온을 초과하는 기간의 비중에 따라 1~4점을 부여하였다(표 4-3-2).

표 4-3-2 수온 지표의 측정 규모

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

적정 기간의 비율(p)	$ULT_{culture} < T_{forecast} \leq ULT_{inhabit}$ 일 때,	$ULT_{inhabit} < T_{forecast}$ 일 때,
p = 0%	0	-
0% 〈 p ≤ 25%	1	5
25% 〈 p ≤ 50%	2	6
50% 〈 p ≤ 75%	3	7
75% 〈 p ≤ 100%	4	8

참고 $ULT_{culture}$ - 적정 수온의 상한; $ULT_{inhabit}$ - 서식 수온의 상한 $T_{forecast}$ - 예상 수온

수온의 경우에는 품종별로 적정 수온, 서식 수온에 대한 선행 연구를 활용하였다(표 4-3-3). 염분에 대해서는 선행 연구가 거의 없기 때문에 품종의 특성을 고려하지 않고, 각 지역에서 시나리오 설정 시점의 염분과 2016년 시점의 염분 차이의 절댓값을 지표로 사용하였다.

민감도 지표는 두 가지로 설정하였다. 하나는 양식 품종 및 양식 방법의 특성에 따라 노출에 얼마나 민감하게 반응하는지를 나타내는 지표이다. 이는 Doubleday et al.(2013)의 민감도 평가 방법을 적용하여 각 품종의 양식에 대해 수집된 질적 자료(species profile)와 양식 전문가의 자문을 통해 9개 항목 각각에 대해 3점 척도로 평가한 다음 이를 합산하여 도출하였다. 노출 지표가 외부 환경 변화의 정도에 대한 것이라면 이 지표는 외부 환경 변화에 양식어업이 얼마나 민감하게 반응하는지에 대한 것을 나타낸다. 따라서 만일 노출 정도가 높아서 양식 품종이 생존할 수 없는 환경이더라도 양식 방법이 그러한 환경을 통제할 수 있다면 민감도는 낮게 평가된다. 이는 Handisyde et al.(2017)과 같이 개별 양식의 특성을 고려하지 못하는 국가 단위의 취약성 평가에서는 다룰 수 없는 지표이다.

민감도 지표의 다른 하나로는 우리나라의 양식어업에 큰 영향을 미쳤고, 기후변화로 더욱 빈번할 것으로 예상되는

재난위험을 설정하였다. 앞의 지표에서도 재난에 각 품종의 양식 방법이 얼마나 노출되는지가 평가되지만, 재난의 지역별 특성이 반영되지는 않는다. 이를 개선하기 위해 양식 지역의 재난피해 가능성을 지표로 반영할 필요가 있는데, 현재의 자료로는 재난피해의 가능성은 예측하기 힘들기 때문에 지역별로 과거 양식어업에 대한 경영체당 재난피해액을 지표화 하였다. 경영체당 피해액은 기존 연구에서 홍수, 가뭄, 태풍, 사이클론 등의 빈도 데이터를 활용한 것(Handisyde et al, 2017; Bell et al., 2011)보다 민감도를 구체적으로 반영하는 지표로 볼 수 있다. 자료는 우리 정부가 발행하는 재해연보를 이용하여 2011~2015년 연평균 양식어업 피해액을 구하고, 경영체당으로 환산한 값을 적용하였다.

표 4-3-3 품종별 적정 수온과 서식 수온의 상한

적응능력 지표는 기후변화에 대응하는 개별 어업인의 능력과 지역의 능력으로 구분하였다. 국가 단위의 평가에

품종	적정 수온의 상한(℃)	서식 수온의 상한(℃)	출처
넙치	24	32	NIFS(2006)
돌돔	24	36	NIFS(2000)
숭어	24	32	NIFS(2000)
조피볼락	20	30	NIFS(2007)
참돔	25	30	MOMAF(1999)
흰다리새우	30	33	NIFS(2011)
참굴	25	30	NIFS(2012)
멍게	24	25	NIFS(2017)
바지락	24	33	NIFS(2009)
전복	25	28	NIFS(2008)
홍합	26	34	NIFS(1964)
김	8	20	NIFS(1984)
다시마	20	22	NIFS(2011)
미역	10	18	NIFS(1997)

서는 건강, 교육, 인간개발지수(Human Development Index), 1인당 GDP, 거버넌스 지표 등을 사용하고 있는데(Allison et al, 2009; Qi et al, 2017; Handisyde et al., 2017, Bell et al., 2011), 이는 기후변화에 적응하는 개인 능력과 국가의 능력으로 볼 수 있다. 어촌공동체 단위에서 평가한 Cinner et al.(2012; 2013)에서는 한층 구체화되어 물질적 생활수준(material style of life), 신용에 대한 접근성(access to credit), 직업의 이동성(occupational mobility), 사회적 자본(social capital), 공동체의 사회간접자본(infrastructure) 등을 지표로 사용하였는데, 이 또한 개인의 능

력과 지역의 능력으로 구분할 수 있다.

우리나라의 양식어업에 대해서도 양식을 경영하는 어업인의 능력과 양식 지역의 능력으로 구분하여 이를 반영하는 지표를 구체화할 수 있다. 전자는 어업인의 인구사회적인 특성인 연령, 경험 및 교육 정도와 경영행태를 나타내는 생산자 조직화 및 정보화, 소득의 안정성을 나타내는 매출 규모 및 겸업 정도를 종합하여 지표화하며 필요한 자료는 한국 통계청(Statistics Korea)의 어업총조사에서 얻을 수 있다. 이때 연령을 제외한 모든 지표는 그 값이 클수록 적응능력이 높은 것으로 산정된다. 어업총조사는 5년마다 시행되는 전수조사로 어업 가구와 가구원에 대한 인구사회, 정주여건, 어업경영 관련 사항을 50개 이상의 항목으로 조사하고 있다. 본 분석에서는 가장 최근 자료인 2015년 통계를 이용하였고, 각 세부 지표는 각 품종-지역별로 평균한 값을 사용하였다. 그리고 후자인 지역의 능력에는 지역의 경제적 능력을 반영하는 1인당 GRDP, 지방 정부의 재정안정성을 나타내는 재정 자립도 및 재정 자주도, 수산업 및 기후변화에 대한 투자 정도를 나타내는 경영체당 수산 예산, 수산 예산의 비중, 경영체당 기후변화 관련 예산을 종합하여 지표화 하였고, 우리나라의 통계청과 수협(National Federation of Fisheries Cooperatives)의 자료를 이용하였다.[1)]

평가 대상은 우리나라의 주요 해면 양식 품종 14종이며, 각 품종을 주요 양식 지역별로 구분하였다. 이들 양식 품종의 생산액은 해면 양식 전체에서 93%를 차지하며, 우리나라의 어업생산액에서 차지하는 비중도 27%로 산업적인 중요성이 크다(KOSIS, 2017). 넙치, 조피볼락 등 어류의 생산액이 가장 많고, 전복, 굴 등의 패류, 김 등의 해조류, 그리고 새우 양식이 일부 있다(표 4-3-4). 육상수조에서 양식하는 넙치, 제방을 쌓아 못에서 양식하는 새우를 제외하고 모든 품종은 해상에서 가두리나 연승수하를 이용하고 있어 자연 환경에 많이 노출되어 있으며, 전복을 제외한 패류, 해조류는 자연급이에 의존하여 자연 환경에 대한 의존성이 더욱 크다. 양식 지역은 우리나라의 남해안에 대부분 집중되어 있고 동해안, 서해안에 일부가 있다.

1) 자료의 시점은 가용 여건을 고려하여 1인당 GRDP는 2010~2013년, 재정자립도 및 재정자주도는 2011~2014년, 수산업 및 기후변화 예산은 2011~2015년이다.

표 4-3-4 취약성 평가 대상종

품종명	학명	생산량 (천 톤)	생산액 (십억원)	어업방식	어업지역
넙치 (Olive flounder)	Paralichthys olivaceus	44	484	육상수조식	완도군, 제주시, 포항시
돌돔 (Rock bream)	Oplegnathus fasciatus	1	17	가두리식	고흥군, 완도군, 제주시
숭어 (Mullet)	Chelon haematocheilus	6	44	가두리식	남해시, 하동군
조피볼락 (Korean rockfish)	Sebastes schlegeli	20	184	가두리식	신안군, 여수시, 완도군, 통영시
참돔 (Red seabream)	Pagrus major	5	49	가두리식	거제시, 남해시, 통영시
흰다리새우 (Whiteleg shrimp)	Litopenaeus vannamei	5	83	못 양식	신안군
참굴 (Pacific oyster)	Crassostrea gigas	274	187	연승수하식	거제시, 고성군, 남해시, 여수시, 통영시
멍게 (Sea squirt)	Halocynthia roretzi	20	46	연승수하식	거제시, 영덕군, 울진군, 통영시
바지락 (Japanese littleneck)	Ruditapes philippinarum	8	21	살포식	고창군, 보령시, 태안군
전복 (Abalone)	Nordotis discus	10	323	가두리식	완도군
홍합 (Mediterranean mussel)	Mytilus galloprovincialis	53	22	연승수하식	거제시, 남해시, 여수시, 창원시
김 (Laver)	Porphyra sp.	399	358	부류식	강서구, 고흥군, 군산시, 서천군, 신안군, 완도군, 진도군, 해남군
다시마 (Kelp)	Saccharina japonica	410	78	연승수하식	기장군, 완도군
미역 (Sea Mustard)	Undaria pinnatifida	371	77	연승수하식	고흥군, 기장군, 완도군, 해남군

2) 평가 결과

기후 노출, 민감도, 적응능력의 각 지표를 가중 합산한 기후변화 취약성 분석 결과, 기후 노출의 정도가 시나리오별로 크게 다르지 않아 최종적인 취약성도 시나리오간 비교에서 큰 차이를 보이지 않았다(표 4-3-5; 그림 4-3-1). 즉, 절대적인 취약성은 노출 정도가 심해지는 RCP 8.5의 장기 시점에서 높지만 품종-지역의 상대적인 취약성은 비슷한 양상을 보이고 있다. 한 품종 내에서 생산 지역 간의 차이는 크지 않았으나 품종 간의 차이가 크게 나타났는데, 이는 가중치가 높은 수온 노출, 양식 품종의 민감도에서 품종간 차이가 컸기 때문이다.

기후 노출이 크게 나타난 김, 미역과 같은 해조류가 가장 취약하였고, 이들 품종을 양식하는 지역 중 재난피해 영향이 큰 서해안 지역(Seocheon)이 특히 높았다. 바지락과 멍게가 그 다음으로 취약성이 높았는데, 전자는 품종의 민감도와 어업인의 능력이 크게 열위였고, 후자는 수온 상승에 노출된 정도가 컸기 때문이다. 굴, 홍합은 중간 수준이었는데, 기후 노출은 높지 않았으나 바지락과 같이 양식 품종의 민감도가 높고, 어업인의 능력이 낮은 것에서 이유를 찾을 수 있다. 어류, 새우, 전복, 다시마 등은 기후 노출이 낮은 데다 민감도가 양호하여 일부 적응능력이 낮은 생산 지역이 있지만 전반적으로 취약성이 낮은 것으로 나타났다.

기후 노출과 민감도의 합인 잠재적 영향과 적응능력을 2100년 시점에 대해 2차원의 평면에 나타내면 시나리오별로 약간의 차이는 있으나 대체로 유사한 분포를 보인다(그림 4-3-2). 잠재적 영향이 크면서 적응능력이 낮은 품종은 우상향 지점에 있는 김, 미역, 바지락의 생산 지역이 많았고, 반대로 잠재적 영향이 작으면서 적응능력이 높은 품종은 좌하향 지점에 있는 넙치, 돌돔, 참돔, 조피볼락 등의 어류 생산 지역이 많았다. 그리고 같은 품종이라고 하더라도 지역별로 민감도와 적응능력의 차이로 중간 수준의 취약성을 나타내는 품종-지역은 그림에서 좌상향 또는 우하향의 지점에서 찾을 수 있다.

표 4-3-5 취약성 평가 결과

품종명	지역명	RCP4.5			RCP8.5		
		2030	2050	2100	2030	2050	2100
넙치	완도군	-0.41	-0.49	-0.41	-0.27	-0.49	-0.38
	제주시	-0.20	-0.40	-0.38	-0.14	-0.21	-0.24
	포항시	-0.49	-0.37	-0.48	-0.46	-0.46	-0.47
돌돔	고흥군	-0.27	-0.15	-0.27	-0.18	-0.17	-0.19
	완도군	-0.30	-0.37	-0.29	-0.16	-0.38	-0.26
	제주시	-0.18	-0.38	-0.36	-0.12	-0.18	-0.21
숭어	남해시	-0.41	-0.31	-0.32	-0.37	-0.31	-0.28
	하동군	-0.27	-0.17	-0.18	-0.23	-0.16	-0.13
조피볼락	신안군	-0.24	-0.05	0.01	0.08	0.02	-0.04
	여수시	-0.30	-0.19	-0.23	-0.10	-0.20	-0.18
	완도군	-0.16	-0.07	-0.04	-0.02	-0.25	-0.14
	통영시	-0.28	-0.18	-0.23	-0.13	-0.20	-0.19
참돔	거제시	-0.60	-0.63	-0.64	-0.62	-0.67	-0.66
	남해군	-0.42	-0.49	-0.47	-0.39	-0.47	-0.43
	통영시	-0.47	-0.55	-0.54	-0.48	-0.53	-0.51
흰다리새우	신안군	-0.29	-0.42	-0.31	-0.28	-0.32	-0.37
참굴	거제시	-0.17	-0.21	-0.21	-0.20	-0.25	-0.24
	고성군	0.00	-0.07	-0.06	0.00	-0.06	-0.04
	남해시	0.04	-0.02	-0.01	0.08	0.00	0.03
	여수시	-0.07	-0.13	-0.11	-0.03	-0.11	-0.07
	통영시	-0.05	-0.13	-0.12	-0.06	-0.11	-0.09
멍게	거제시	-0.35	-0.22	-0.25	-0.37	-0.27	0.15
	영덕군	-0.24	-0.12	0.31	-0.21	0.37	0.34
	울진군	-0.24	-0.10	0.32	-0.35	0.39	0.35
	통영시	-0.23	-0.30	-0.30	-0.24	-0.29	0.29
바지락	고창군	0.53	0.20	0.24	0.31	0.41	0.41
	보령시	0.13	0.45	0.46	0.27	0.30	0.20
	태안군	0.39	0.07	0.11	0.22	0.28	0.25
전복	완도군	-0.29	-0.36	-0.28	-0.15	-0.37	-0.25
홍합	거제시	-0.15	-0.19	-0.19	-0.18	-0.23	-0.22
	남해시	0.04	-0.02	0.00	0.08	0.00	0.04
	여수시	-0.07	-0.13	-0.11	-0.03	-0.11	-0.07
	창원시	0.13	0.22	0.00	0.03	0.13	0.08
김	강서구	0.45	0.58	0.39	0.36	0.42	0.34
	고흥군	0.59	0.58	0.52	0.54	0.52	0.48
	군산시	0.41	0.49	0.61	0.29	0.45	0.15
	서천군	1.16	1.34	1.41	1.15	1.15	1.03
	신안군	0.59	0.50	0.51	0.62	0.53	0.59
	완도군	0.54	0.49	0.47	0.69	0.43	0.52
	진도군	0.49	0.45	0.45	0.67	0.38	0.50
	해남군	0.51	0.47	0.48	0.69	0.40	0.52
다시마	기장군	-0.24	-0.25	-0.30	-0.33	-0.33	-0.47
	완도군	-0.07	-0.15	-0.07	0.07	-0.16	-0.18
미역	고흥군	0.62	0.61	0.55	0.57	0.54	0.64
	기장군	0.37	0.40	0.24	0.30	0.25	0.22
	완도군	0.54	0.50	0.47	0.69	0.43	0.38
	해남군	0.53	0.49	0.49	0.71	0.42	0.40

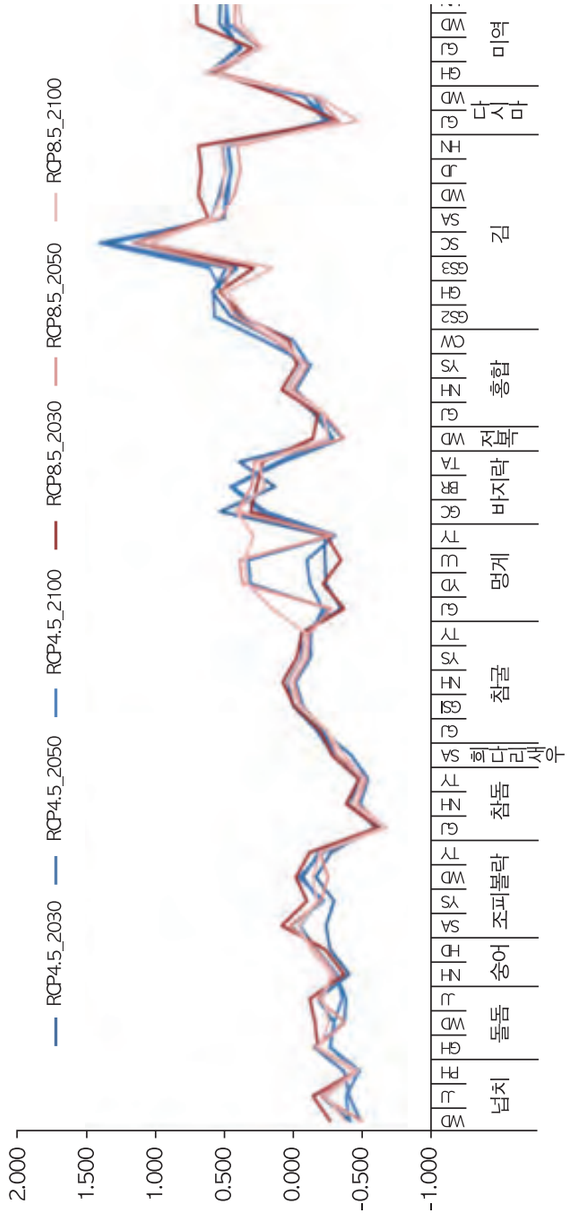
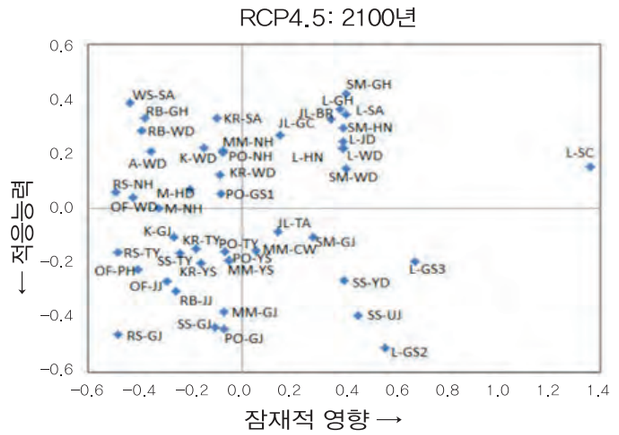


그림 4-3-1 양식업 취약성 평가 결과

(지역별) WD: 완도군; JJ: 제주시; PH: 포항시; GH: 고흥군; NH: 남해시; HD: 하동군; SA: 신안군; YS: 여수시; TY: 통영시; GJ: 거제시; GS1: 고성군; YD: 영덕군; UJ: 울진군; GC: 고창군; BR: 보령시; TA: 태안군; CW: 창원시; GS2: 강서구; GS3: 군산시; SC: 서천군; JD: 진도군; HN: 해남군; GJ: 기장군



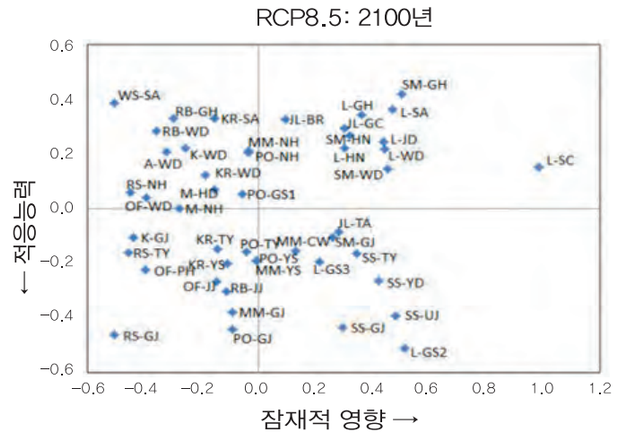


그림 4-3-2 양식업 취약성 평가 결과(2차원 평면)

(품종별) OF: 넙치; RB: 돌돔; M: 숭어; KR: 조피볼락; RS: 참돔; WS: 흰다리새우; PO: 참굴; SS: 멍게; JL: 바지락; A: 전복; MM: 홍합; L: 김; K: 다시마; SM: 미역

(지역별) WD: 완도군; JJ: 제주시; PH: 포항시; GH: 고흥군; NH: 남해시; HD: 하동군; SA: 신안군; YS: 여수시; TY: 통영시; GJ: 거제시; GS1: 고성군; YD: 영덕군; UJ: 울진군; GC: 고창군; BR: 보령시; TA: 태안군; CW: 창원시; GS2: 강서구; GS3: 군산시; SC: 서천군; JD: 진도군; HN: 해남군; GJ: 기장군

3) 요약 및 결론

기후변화 취약성이 높은 품종-지역은 기후 노출이 크거나 민감도가 높은 반면 적응능력이 낮은 데서 연유한다. 고수온에 취약한 김, 미역 등이 모든 시나리오에서 취약하였고, 바지락은 생산 지역의 염분 변화가 큰 점이 취약성에 반영되었다. 품종의 생물 민감도는 종묘 생산부터 성어·성패 양성의 전 과정에서 통제 가능성이 낮은 굴, 멍게, 바지락, 홍합 등이 높았고, 해조류가 그 다음이었다. 이에 반해 어류, 새우, 전복 등은 양식 방법에서 통제 범위가 넓어 민감도가 낮았다. 적응능력은 품종-지역간에 어업인의 능력과 지역의 능력이 상쇄되는 부분이 있어서 기후 노출이나 민감도에 비해 격차가 크지 않았지만, 해조류와 새우, 일부 어류 생산 지역의 적응능력이 낮게 나타났다.

기후변화 속에서도 양식어업이 안정적인 수산물을 공급하고 어업인의 생계를 유지하며 경제 발전을 촉진하기 위해서는 기후변화의 잠재적인 영향을 결정짓는 노출과 민감성을 줄이고 적응능력을 향상시키는 대책이 필요하다(Bell et al., 2011). 따라서 어디에서 어떤 방식으로 양식하느냐가 중요하며, 기후변화에 적응할 수 있는 새로운 품종 개발도 요청된다(FAO 2016, Brander et al., 2017, Ruckelshaus et al.. 2013). 예를 들어 기후변화 가장 취약한 것으로 나타난 김과 미역은 고수온을 통제할 수 있는 양식어장 재배치, 고수온에 강한 신품종 개발 등이 필요하다. 그러나 김과 미역은 광합성을 하고 부피가 커서 넓은 수면적이 필요하여 어류와 같이 인위적으로 환경을 통제하기에는 한계가 많다. 따라서 내온성 품종의 개발이 쉽지 않은 경우 장기적으로는 해외에 양식어장을 이전하는 방안도 적응 대책으로 고려할 수 있다. 이들 품목은 지역의 적응능력 또한 높지 않은데, 특히 김은 생산가치가 큰 우리나라의 주요 수출 품목이어서 기후변화로 인한 경제적인 충격이 크다는 점에서 적응능력의 보완이 필요하다. 김, 미역 다음으로 취약한 것으로 평가된 바지락은 염분 변화에 노출 정도가 컸고, 멍게는 수온 상승에 많이 노출되어 이러한 취약점을 극복할 수 있는 어장 재배치가 필요하다.

어류, 전복, 새우는 고수온에 덜 민감하고 양식 환경을 통제할 수 있는 정도가 높아서 취약성이 낮게 평가되었다. 그러나 넙치를 제외하면 해상 가두리 또는 축제식이어서 기후변화의 영향에 많이 노출되어 있다. 조피볼락은 넙치 다음으로 생산이 많은 어종이지만 다른 어종에 비해 고수온에 약하고, 다른 어종들도 서식 수온 한계를 벗어나지는 않지만 양식 적정 수온을 초과할 것으로 예상되므로 최근 부상하고 있는 스마트 양식 기술을 접목하여 기후변화 영향을 통제할 수 있는 환경에서 생산성을 높일 수 있는 방법으로 개선할 필요가 있다(FAO, 2013). 한편 새우는 적응능력이 낮았지만 기후 노출이나 민감도에서는 양호하여 기후변화가 진행될수록 양식에 유리한 환경을 활용할 수 있는 적응 전략이 요청된다. 새우는 세계적으로 수요가 많고 국제 무역에서 가장 많이 거래되는 수산물로 열대 또는 아열대에서 양식 적지가 북상하게 되면 우리나라에서 최근 시도되고 있는 바이오플락 기술을 활용하여 친환경적인 대체 양식 품목으로 기대할 수 있을 것이다(Bossier & Ekasari, 2017; Hargreaves 2013).

제 4절 어업인의 기후변화 취약성 인식조사 결과

1) 추진 배경

기후변화에 따른 해양환경 변화는 국내에서도 뚜렷하게 나타나고 있다. 한반도 주변해역의 수온 및 해수면의 수위 상승은 이미 많은 연구를 통해 입증되었다. 특히 수온 상승은 세계적인 추세보다 높은 수준으로 나타나고 있으며, 해양의 탄산염 화학조성의 변화에 따라 해양산성화 현상, 바다사막화 현상이 보고되고 있다.

우리나라는 1992년 6월 브라질 리우데자네루에서 개최된 유엔환경개발회의에서 기후 변화협약이 채택이후, 1993년 12월 47번째로 기후 변화협약에 가입하였다. 기후변화에 대한 정책은 1998년 4월 기후 변화협약에 대응한 범정부대책기구를 출범하여 종합대책을 수립, 추진하고 있으나 대부분의 연구는 자연과학적 연구에 초점이 맞춰져 있어 수산식량자원 등 사회·경제적 영향에 대한 고려가 매우 부족한 실정이다.

해양수산부는 해양부분과 관련하여 중장기 기후 변화에 따른 동중국해 해양생태계 변동 예측 연구 사업을 기후 변화 적응기반 구축 사업의 하나로 진행하고 있으며. 수산과학원에서 기후 변화가 해양생태계 및 수산자원에 미치는 영향과 대응 연구라는 제목으로 연구가 진행되고 있다. 그러나 기후 변화에 따른 수산자원 감소로 어업이 받게 될 영향에 대해서는 연구가 이뤄지지 않고 있어 그 대응 방안도 미비한 실정이다.

본 연구는 기후변화에 따른 동해해역의 어촌어업 환경의 변화 및 어촌 경제와 양식환경의 변화를 알아보고 이에 따른 어업인의 인식변화를 살펴보았다.

2) 재료 및 방법

가) 해역별/지역별/어종별 순차적 설문 및 탐문조사 실시

기후변화 실태 파악을 위한 설문과 탐문에 적합한 설문문항과 설문지의 작성을 하며 (그림 4-4-1), 각 조사대상해역의 지역별, 어업별 어업실태 설문조사를 위하여 직접설문조사를 통하여 어업실태에 대한 조사와 수산생물 변동조사를 실시하였다.

조사해역은 동해권역, 남해동부권역, 남해서부권역, 제주권역, 서해남부권역, 서해중부권역이었으며, 조사시기는 2015년부터 2019년까지 권역별로 조사를 실시하였다(표 4-4-1).

설문조사지는 어선어업과 양식어업으로 구분하였고, 그 중 어선어업은 어선의 규모에 따라 중형어선어업과 소형어선어업으로 구분하여 총 3가지의 설문 조사지를 완성하였다. 설문조사 문항을 살펴보면, 주 생산품종 및 생산비율, 주 조업시기 및 주 조업구역, 생산량의 변화에 대한 의견, 어업소모비용, 기후변화에 대한 영향, 기후변화의 영향에 따른 환경요인 변동 및 기후변화의 대응책에 대한 의견 등을 포함시켰다. 어선어업은 지역별 구분하여 조사를 진행하였으며, 어업별 어종별로 조사대상 어업인의 기후변화의 영향에 따른 의견을 설문조사하였으며(그림 4-4-2), 양식어업 설문조사지는 어선어업의 주조업시기와 달리 양식품종의 입

식시기와 출하시기를 적용하였다.

표 4-4-1 조사연도별 조사해역

조사연도	조사권역	비고
2015년	동해권역	
2016년	남해동부권역, 제주권역	
2017년	남해서부권역	
2018년	서해남부권역	
2019년	서해중부권역	

그림 4-4-1 권역별 조사 대상

그림 4-4-2 설문조사 방법 사진(단체설문조사, 어업인 회의 참석조사)

3) 결과

가) 해역별 설문 및 탐문조사 실시

2015년 4월부터 2019년 9월까지 해역별로 설문 및 탐문조사를 수행하였다(표 4-4-1).

2015년 조사에서는 동해지역의 어촌계에서 설문조사를 실시하였으며, 2016년에는 남해동부해역과 제주해역, 2017년에는 남해서부해역, 2018년에는 서해남부해역의 조사를 실시하였다.

(1) 조사대상의 기본사항

조사 설문대상자의 남성과 여성의 구성비를 살펴본 결과(표 4-4-2), 어선어업의 경우는 총 497명 중 남성이 469명, 여성이 28명이었으며, 양식어업의 경우는 남성이 112명, 여성이 14명으로 어선어업과 양식어업 모두 남성의 비율이 높은 것으로 나타났다.

표 4-4-2 조사 대상자의 어업종류별 성비(%)

어업종류	성별	조사인원(명)	비율(%)
어선어업	남	469	75.3
	여	28	4.5
	소계	497	79.8
양식어업	남	112	18
	여	14	2.2
	소계	126	20.2
총합계		623	100

조사대상자의 연령을 살펴본 결과(표 4-4-3), 전체 조사대상자 중 60대가 255명으로 전체의 40.9%를 차지하여 가장 많았으며, 50대가 187명으로 30.0%였으며, 그 다음이 40대로 74명으로 11.9%, 70대 이상이 73명으로 11.7%, 30대 이하는 17명으로 2.7%를 차지하였다. 어선어업의 경우는 60대가 205명으로 전체의 41.2%를 차지하여 가장 많았으며, 50대가 152명으로 30.6%였으며, 그 다음이 70대 이상으로 62명으로 12.5%, 40대가 56명으로 11.3%, 30대 이하는 6명으로 1.2%를 차지하였다. 양식어업의 경우는 60대가 50명으로 전체의 39.7%를 차지하여 가장 많았으며, 50대가 35명으로 27.8%였으며, 그 다음이 40대가 18명으로 14.3%, 30대와 70대 이상이 11명으로 8.7%를 차지하였다. 어선어업과 양식어업 모두 60대가 가장 높은 비율을 차지하였으며, 30대 이하에서는 양식어업이 어선어업에 비하여 높은 비율을 차지하였다.

조사대상자의 연평균조업일수를 살펴본 결과(표 4-4-4), 전체 조사대상자 중 100일 이상 200일 미만이 278명으로 44.6%를 차지하여 가장 많았으며, 200일 이상 300일 미만이 263명으로 42.2%로 그 다음이었고, 300일 이상이 34명으로 5.5%, 50일 이상 100일 미만이 29명으로 4.7%, 50일 미만이 4명으로 0.6%를 차지하였다. 어선어업과 양식어업의 조업일수는 비슷한 비율을 보이는 것으로 나타났다.

표 4-4-3 어업종류별 연령구성과 비율(%)

연령대	어선어업		양식어업		전체	
	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)
30대 이하	6	1.2	11	8.7	17	2.7
40대	56	11.3	18	14.3	74	11.9
50대	152	30.6	35	27.8	187	30
60대	205	41.2	50	39.7	255	40.9
70대 이상	62	12.5	11	8.7	73	11.7
미응답	16	3.2	1	0.8	17	2.7
합계	497	100	126	100	623	100

표 4-4-4 어업종류별 연간조업일수 응답수와 비율(%)

조업일수	어선어업		양식어업		전체	
	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)
50일 미만	4	0.8	0	0	4	0.6
50일 이상 100일 미만	22	4.4	7	5.6	29	4.7
100일 이상 200일 미만	225	45.3	53	42.1	278	44.6
200일 이상 300일 미만	210	42.3	53	42.1	263	42.2
300일 이상	22	4.4	12	9.5	34	5.5
미응답	14	2.8	1	0.8	15	2.4
총합계	497	100	126	100	623	100

조사대상자의 어업종사기간을 살펴본 결과(표 4-4-5), 전체 조사대상자 중 30년 이상이 343명으로 55.1%를 차지하여 가장 높은 비율을 차지하였으며, 20년 이상 30년 미만이 121명으로 19.4%로 그 다음이었으며, 10년 이상 20년 미만이 86명으로 13.8%, 5년 이상 10년 미만이 34명으로 5.5%, 5년 미만이 23명으로 3.7%를 차지하였다. 어선어업과 양식어업 모두 30년 이상 이 가장 높은 비율을 차지하였으며, 양식어업이 어선어업에 비하여 5년 미만과 5년 이상 10년 미만의 응답수가 많아서 양식어업이 어선어업에 비해서 어업종사기간이 조금 짧은 사람의 비율이 높은 것으로 나타났다.

표 4-4-5 어업종류별 어업종사기간 응답수와 비율(%)

어업종사기간	어선어업		양식어업		전체	
	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)
5년 미만	15	3	8	6.3	23	3.7
5년 이상 10년 미만	23	4.6	11	8.7	34	5.5
10년 이상 20년 미만	74	14.9	12	9.5	86	13.8
20년 이상 30년 미만	95	19.1	26	20.6	121	19.4
30년 이상	276	55.5	67	53.2	343	55.1
미응답	14	2.8	2	1.6	16	2.6
총합계	497	100	126	100	623	100

(2) 해역별 어업 환경 조사

조사대상자의 연평균어업소모비용을 살펴본 결과(표 4-4-6), 전체 조사대상자 중 4,000만원 이상이 351명으로 전체의 57.6%를 차지하여 가장 많았으며, 2,000만원 이상 4,000만원 미만이 131명으로 21.5%, 1,000만원 이상 2,000만원 미만이 87명으로 14.3%, 500만원 이상 1,000만원 미만이 26명으로 4.3%, 500만원 이하는 7명으로 1.1%를 차지하였다. 어선어업과 양식어업 모두 4,000만원 이상이 가장 많았으나, 양식어업의 경우는 4,000만원 이상의 비율이 75.4%로 높은 비율을 차지하여 어선어업에 비해서 더 많은 비용을 소모하는 것으로 나타났다.

어업비용의 순위를 알아본 결과 (표 4-4-7), 어선어업의 경우는 유류비가 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 나타났으며, 그 다음이 어구비용과 인건비의 순으로 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 양식어업의 경우는 인건비가 가장 많은 비용이 드는 것으로 나타났으며, 그 다음이 치패, 종패구입비가 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 어선어업의 경우는 조업을 위한 이동거리로 인하여 유류비의 순위가 높았으며, 양식어업의 경우는 양식시설의 특성상 여러 명의 어업인이 동원되어서 인건비의 순위가 높게 나타나는 것으로 조사되었다.

표 4-4-6 어업종류별 어업소모비용 응답수와 비율(%)

어업소모비용	어선어업		양식어업		전체	
	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)
500만원 이하	6	1.2	1	0.8	7	1.1
500만원 이상 1,000만원 미만	24	5	2	1.6	26	4.3
1,000만원 이상 2,000만원 미만	77	15.9	10	7.9	87	14.3
2,000만원 이상 4,000만원 미만	118	24.4	13	10.3	131	21.5
4,000만원 이상	256	53	95	75.4	351	57.6
무응답	2	0.4	5	4	7	1.1
총합계	483	100	126	100	609	100

표 4-4-7 어업종류별 어업소모비용 내용과 비율(%)

어업비용 항목	어선어업(순위, %)					양식어업(순위, %)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
유류비	40.8	39.5	15.3	3.6	1	6.5	22	57.6	13.1	3.3
인건비	21.3	16.9	20.8	25.8	18.3	44.4	26.8	13.6	16.2	3.3
소모품비	9.7	8.6	30.5	48.6	3.1	13.7	10.6	7.6	54.5	46.7
어구비용 (치패구입비)	27.5	32.8	28.6	11	0.5	31.5	37.4	18.6	8.1	0
기타	0.6	2.3	4.8	11	77.1	4	3.3	2.5	8.1	46.7
총합계	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

나) 해역별 어업환경 변화에 대한 현장 의견 청취 조사

(1) 기후변화가 어업생산에 끼치는 영향 및 그 요인에 대한 의견

어업인이 기후변화로 인한 어업생산에 끼치는 영향을 살펴보면(표 4-4-8), 전체의 의견을 살펴보았을 때, 부정적인 영향을 끼친다고 느끼는 어업인이 522명으로 전체의 85.7%를 차지하였으며, 영향이 없다고 느끼는 어업인은 68명으로 11.2%, 긍정적인 영향을 끼친다고 느끼는 어업인은 19명으로 3.1%를 차지하였다. 어선

어업과 양식어업 모두 기후변화가 어업생산에 부정적인 영향을 끼친다는 의견이 가장 많았으며, 차이를 보인 것은 어선어업의 경우는 긍정적인 영향을 끼친다는 의견이 19명으로 3.9%를 차지하여 양식어업과는 다른 것으로 나타났다.

표 4-4-8 어업종류별 기후변화가 어업생산에 미치는 영향에 대한 의견

기후변화가 어업생산에 미치는 영향	어선어업		양식어업		전체	
	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)	응답수	비율(%)
긍정	19	3.9	0	0	19	3.1
부정	408	84.5	114	90.5	522	85.7
영향 없음	56	11.6	12	9.5	68	11.2
총합계	483	100	126	100	609	100

기후변화로 인하여 어업생산에 부정적인 영향을 끼치고 있다고 응답한 어업인들이 체감하였던 부정적인 요인을 알아본 결과(표 4-4-9), 어선어업의 경우는 전체 조사대상해역에서 생산량 감소가 가장 높은 비율을 차지하였으며, 남해동부와 서해남부의 경우는 상품성 하락이었으나, 동해의 경우는 기존어종의 어획불가에 대한 의견이 높은 것으로 나타난다. 양식어업의 경우는 남해서부와 동해의 경우는 생산량 감소가 가장 높은 비율을 차지하였으나, 남해동부의 경우는 상품성 하락이 가장 높은 비율을 차지하였고, 서해남부의 경우는 생산량 감소와 상품성 하락이 같은 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

조사대상 어업인들의 기후변화에 따른 환경 요인 변동에 대하여 조사한 결과(표 4-4-10), 기후변화가 수온의 변화에 미친 영향에 대한 의견은 대부분의 지역에서 증가하였다는 의견이 가장 많았으며, 어선어업에서 보았을 때, 남해동부의 경우는 약간 증가하였다는 의견이 65.1%로 가장 높았으며, 남해서부는 크게 증가하였다는 의견이 54.3%, 동해의 경우는 크게 증가하였다는 의견이 53.5%, 서해남부의 경우는 크게 증가하였다는 의견이 55.1%였다. 양식어업의 경우는 남해동부의 경우는 약간 증가하였다는 의견이 53.8%로 가장 많았으며, 남해서부의 경우 역시 약간 증가하였다는 의견이 76.7%로 가장 높았다. 동해의 경우는 크게 증가하였다는 의견이 100%였으며, 서해남부의 경우는 크게 증가하였다는 의견과 약간 증가하였다는 의견이 각각 40%를 차지하였다.

표 4-4-9 어업종류별 기후변화가 어업생산에 미치는 부정적 영향에 대한 의견

조사대상		기후변화가 어업생산에 끼치는 부정적 영향의 요인에 대한 의견(%)				
		생산량 감소	상품성(크기 중량 등) 하락	기존어종의 어획불가 (기존생물 양식불가)	질병 발생	기타
어선어업	남해동부	85.2	14.8	-	-	-
	남해서부	91.1	3.6	3.6	-	1.8
	동해	85.1	3.1	9.7	-	2.1
	서해남부	87.4	11.7	1	-	-
양식어업	남해동부	28.6	50	-	21.4	-
	남해서부	71.7	7.6	-	20.7	-
	동해	44.4	22.2	-	33.3	-
	서해남부	44.4	44.4	-	11.1	-

기후변화가 조업가능일수의 변화에 미친 영향에 대한 의견을 알아본 결과, 영향이 없다는 의견이 가장 많은 것으로 나타났으나, 지역에 따라서 조금씩 차이를 보이는 것으로 나타났다. 어선어업의 경우는 남해동부의 경우는 약간 감소하였다는 의견이 46.5%로 가장 많았으며, 남해서부의 경우는 영향이 없다는 의견이 73.5%, 동해의 경우는 약간 증가하였다는 의견이 63.6%, 서해남부의 경우는 영향이 없다는 의견이 60.2%로 가장 많았다. 양식어업의 경우는 남해동부와 남해서부, 서해남부의 경우는 영향이 없다는 의견이 각각 84.6%, 85.6%, 73.3%로 가장 많았으며, 동해의 경우는 약간 증가하였다는 의견과 영향이 없다는 의견이 각각 37.5%를 차지하였다.

기후변화로 인한 기상이변의 발생에 대한 의견을 알아본 결과, 지역별로 차이를 보이는 것으로 나타났다. 어선어업을 살펴보았을 때, 남해동부의 경우는 약간 증가하였다는 의견이 30.2%로 가장 높았으며, 남해서부의 경우는 영향이 없다는 의견이 32.5%로 가장 많았고, 동해의 경우는 약간 증가하였다는 의견이 46.1%로 가장 많았고, 서해남부의 경우는 약간 감소하였다는 의견이 39.8%로 가장 많았다. 양식어업을 살펴보았을 때, 남해동부의 경우는 영향이 없다는 의견이 38.5%로 가장 많았고, 남해서부의 경우는 영향이 없다는 의견이 74.7%로 매우 많았으며, 동해의 경우는 약간 증가하였다는 의견이 50.0%로 가장 많았고, 서해남부의 경우는 영향이 없다는 의견이 46.7로 가장 많았다.

표 4-4-10 조사대상 어업인의 기후변화의 영향에 따른 환경요인 변동에 대한 의견

구분	조사대상		기후변화의 영향에 따른 환경요인 변동에 대한 의견(%)				
			크게 증가	약간 증가	영향 없음	약간 감소	크게 감소
수온	어선어업	남해동부	25.6	65.1	7	2.3	0
		남해서부	54.3	37	7.4	1.2	0
		동해	53.5	27.2	19.4	0	0
		서해남부	55.1	34.7	6.1	4.1	0
	양식어업	남해동부	46.2	53.8	0	0	0
		남해서부	14.4	76.7	6.7	2.2	0
		동해	100	0	0	0	0
		서해남부	40	40	20	0	0
조업가능 일수	어선어업	남해동부	0	8.1	41.9	46.5	3.5
		남해서부	0	2.4	73.5	21.7	2.4
		동해	6	63.6	30.4	0	0
		서해남부	0	0	60.2	34.7	5.1
	양식어업	남해동부	7.7	0	84.6	7.7	0
		남해서부	1.1	6.7	85.6	5.6	1.1
		동해	25	37.5	37.5	0	0
		서해남부	0	0	73.3	20	6.7
기상이변	어선어업	남해동부	8.1	30.2	29.1	17.4	15.1
		남해서부	0	6	32.5	16.9	44.6
		동해	20.7	46.1	33.2	0	0
		서해남부	6.1	20.4	31.6	39.8	2
	양식어업	남해동부	7.7	7.7	38.5	23.1	23.1
		남해서부	0	7.8	74.4	12.2	5.6
		동해	12.5	50	37.5	0	0
		서해남부	6.7	20	46.7	26.7	0

표 4-4-10 계속

구분	조사대상		기후변화의 영향에 따른 환경요인 변동에 대한 의견(%)				
			크게 증가	약간 증가	영향 없음	약간 감소	크게 감소
해적생물 출현빈도	어선어업	남해동부	15.1	34.9	44.2	3.5	2.3
		남해서부	50.6	18.1	28.9	2.4	0
		동해	50.7	7.8	41.5	0	0
		서해남부	21.4	31.6	28.6	16.3	2
	양식어업	남해동부	15.4	15.4	69.2	0	0
		남해서부	12.2	36.7	47.8	3.3	0
		동해	37.5	12.5	50	0	0
		서해남부	13.3	33.3	46.7	6.7	0
해적생물 피해범위	어선어업	남해동부	15.1	34.9	44.2	3.5	2.3
		남해서부	52.4	15.9	30.5	1.2	0
		동해	48.8	9.2	41.9	0	0
		서해남부	21.4	29.6	30.6	16.3	2
	양식어업	남해동부	15.4	7.7	76.9	0	0
		남해서부	12.2	36.7	47.8	2.2	1.1
		동해	37.5	0	62.5	0	0
		서해남부	0	20	73.3	6.7	0

기후변화에 따른 해적생물의 출현빈도의 변화에 대한 의견을 알아본 결과, 어선어업과 양식어업의 의견이 차이를 보이는 것으로 나타났다. 어선어업의 경우는 남해동부의 경우는 영향이 없다는 의견이 44.2%로 가장 높았으나, 남해서부와 동해의 경우는 크게 증가하였다는 의견이 각각 50.6%와 50.7%를 차지하여 가장 많았으며, 서해남부의 경우도 약간 증가하였다는 의견이 미세하게 높게 나타났다. 양식어업의 경우는 모든 지역에서 영향이 없다는 의견이 가장 많은 것으로 나타났다.

기후변화에 따른 해적생물의 피해범위의 변화에 대한 의견을 알아본 결과, 해적생물 출현빈도의 변화와 비슷한 의견을 보이는 것으로 나타났다. 남해동물의 경우는 영향이 없다는 의견이 가장 많았으며, 남해서부와 동해의 경우는 각각 52.4%와 48.8%로 가장 많았으며, 서해남부의 경우는 영향이 없다는 의견이 미세하게 높게 나타났다. 양식어업의 경우는 모든 지역에서 영향이 없다는 의견이 가장 많은 것으로 나타났다.

(2) 기후변화대응책에 대한 의견

기후변화에 따른 대응책에 대한 의견을 알아본 결과(표 4-4-11), 어선어업의 어업인들의 의견을 살펴보았을 때, 남해동부의 경우는 기타의견을 제외하고 해양환경 개선 및 관리가 필요하다는 의견이 가장 많았으며, 남해서부의 경우도 남해동부와 같았고, 동해의 경우는 변화된 기후에 적합한 목표 어종 또는 양식품종 전환이 필요하다는 의견과 조업시기 및 조업 구역 변경이 필요하다는 의견이 가장 많았고, 서해남부의 경우는 해양환경 개선 및 관리가 가장 필요하다는 의견이 가장 많았다. 양식어업의 어업인들의 의견을 살펴보았을 때, 남해동부의 경우는 재해 대비 어선 및 양식시설 개선이 필요하다는 의견이 가장 많았으며, 남해서부의 경우는 기타의견 중 종자 개발과 종패 지원사업 등이 필요하다는 의견이 가장 많았으며, 동해와 서해남부의 경우는 어구 및 어법 또는 양식방법의 개선이 필요하다는 의견이 가장 많았다.

표 4-4-11 조사대상 어업인의 기후변화 대응책에 대한 의견

기후변화 대응책	어선어업				양식어업			
	남해 동부	남해 서부	동해	서해 남부	남해 동부	남해 서부	동해	서해 남부
변화된 기후에 적합한 목표 어종 또는 양식 품종 전환	1.4	1.7	30.8	2.7	0	12.4	25	5.6
어구 및 어법 또는 양식방법 개선	15.7	18.3	13.9	5.5	9.1	10.3	37.5	33.3
재해 대비 어선 및 양식시설 개선	1.4	1.7	3	0	36.4	5.2	0	0
재해보험 가입	1.4	0	21.4	1.4	0	2.1	12.5	16.7
조업(양식)시기 및 조업(양식) 구역변경	5.7	13.3	30.8	9.6	9.1	2.1	25	16.7
업종 전환 및 폐업	0	6.7	0	6.8	0	4.1	0	0
해양환경개선 및 관리 (바다숲, 바다목장, 종묘방류 등)	21.4	21.7	0	58.9	0	14.4	0	11.1
기상 및 어황 정보 활용	14.3	0	0	5.5	18.2	8.2	0	5.6
기타	38.6	36.7	0	9.6	27.3	41.2	0	11.1

제 5장 ▶ 미래 우리나라 주변해역 기후변화 예측

제 1절 2100년까지 우리나라 주변해역 변화 특성

제 2절 해양변화에 따른 주요 어종 산란장 및 양식적지 변화 예측

제 5장 _ 미래 우리나라 주변해역 기후변화 예측

제 1절 2100년까지 우리나라 주변해역 변화 특성

1) 전지구 기후모델 및 다운스케일링을 통한 상세화

가) CMIP (결합모델 상호비교 프로젝트)

세계기상기구(WMO), 국제학술연합(ICSU), 유네스코 정부간해양학위원회(UNESCO/IOC)의 국제공동프로그램인 세계기후연구프로그램(WCRP)의 “결합모델링에 대한 워킹그룹(WGCM)”은 1995년에 결합 대기-해양 순환모델(AOGCM)의 결과물을 연구하기 위한 표준 실험 프로토콜로서 결합 모델 상호 비교 프로젝트(CMIP)를 수립하였다. 이를 통해 다양한 과학자 커뮤니티에서 전 지구 기후모델(GCM)을 체계적인 방식으로 분석하고, 이에 대한 피드백으로 모델 개선을 용이하게 하였으며, 1995년에 시작된 이후 전 세계의 기후모델링 커뮤니티가 이 프로젝트에 참여하고 있다(esgf-node.llnl.gov). IPCC 1~4차 평가보고서에 사용된 기후모델들의 공간해상도와 결합모델들의 고려요소에 대한 모식도(그림 5-1-1)와 5차 평가보고서에 사용되는 기후모델들의 공간해상도에 따른 지형 및 수심 표현 모식도(그림 5-1-2)를 아래에 제시하였다.

그림 5-1-1 IPCC 1~4차 평가보고서에 사용된 기후모델의 공간해상도 및 구성 요소 모식도

[출처 : IPCC AR4 WG1 보고서(2007)]

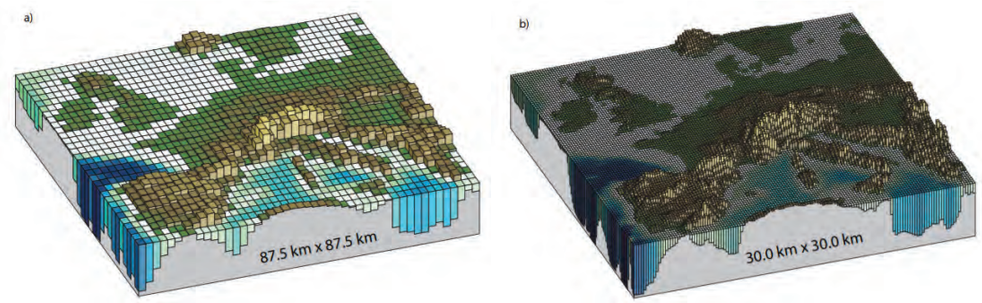


그림 5-1-2 공간 해상도에 따른 지형 및 수심 표현 모식도 (좌) 87.5km (우) 30km

[출처 : IPCC AR5 WG1 보고서(2013)]

IPCC 평가보고서는 최신 버전이 발간될 때마다 결합기후모델 또한 공간해상도도 높아지고 모델의 고려요소 또한 점차 많아지고 있다(그림 5-1-3). IPCC 1차 평가보고서는 대기, 육상, 해양 및 해빙만이 고려되었고, 2차 평가보고서는 에어로졸, 3차 평가보고서는 탄소순환과 식생역학이 추가되었으며, 4차 평가보고서 이후로는 대기화학 및 육빙도 고려되고 있다. IPCC 5차 평가보고서는 20개가 넘는 모델링 그룹으로부터 40여개의 전지구 기후모델이 참여한 CMIP5(결합모델 상호비교 프로젝트 5단계)의 결과가 사용되었다.

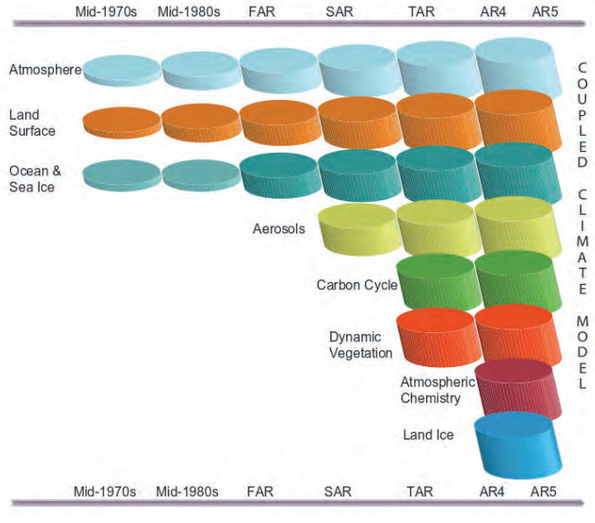


그림 5-1-3 지난 35년간의 기후모델의 발전

[출처 : IPCC AR5 WG1 보고서(2013)]

CMIP5의 기후모델들은 RCP(Representative Concentration Pathways, 대표농도경로) 시나리오에 따라 온실가스 및 에어로졸의 변화로 인한 기후변화 예측을 시뮬레이션 하도록 설계되었으며, CMIP3 모델들과 비교해 가장 두드러진 개선점은 결합된 모델들의 공간해상도가 크게 향상되었다는 점이다. CMIP5 결합 모델의 공간해상도는 대기 모델의 경우 0.5°~4°, 해양 모델의 경우 0.2°~2° 범위이며, 대기 모델의 약 절반이 평균 위도 해상도인 1.3°보다 해상도가 높은 반면, CMIP3 모델은 한 개 모델만이 1.3°보다 해상도가 높았다. 마찬가지로 CMIP3 해양 모델의 약 절반이 평균 위도 해상도인 1°보다 해상도가 낮았지만, CMIP5의 경우 30개가 넘는 모델 중 2개만이 이보다 낮은 해상도를 갖고 있다(Taylor et al., 2012). 더불어 CMIP5 모델들은 CMIP3에 비해 더 많은 변수에 대한 자료를 제공하고 있으며, 특히 해양모델의 출력 변수는 더 상세히 제공되고 있다. 또한 CMIP3 모델들은 모델에 대한 문서와 실험 조건에 대한 세부 사항 정보의 획득이 어려워 자료 활용이 곤란한 경우가 발생하였으나, CMIP5 모델 결과들은 기후모델 외력자료 목록과 초기장을 제공한 기초 시뮬레이션 및 같은 실험조건들에 대한 상세한 설명을 기록하여 제공함으로써 사용자들이 원하는 자료를 선별할 수 있도록 하였다.

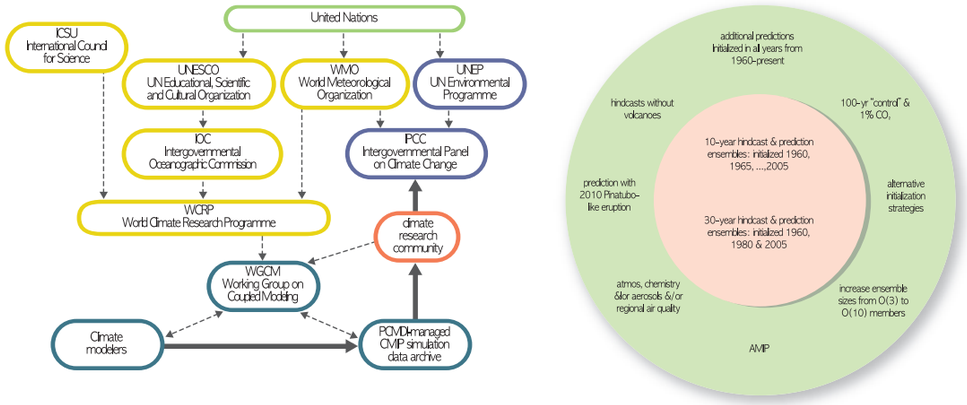


그림 5-1-4 (좌) CMIP5와 기후연구 활동을 조정하기 위한 기구 및 IPCC 등과의 관계도, (우) CMIP5 예측 요약

[출처 : Taylor et al.(2012)]

나) 다운스케일링(Downscaling)

지역 규모에서 장기 기후 변화를 연구하는 방법으로 전지구 기후모델을 "다운스케일링"하는 기법이 주로 사용된다. 다운스케일링 기법은 크게 나누어 두 가지 방법이 있고, 첫 번째는 지구시스템에 대한 역학과정을 기반으로 하여 명시적으로 해결하는 역학적 다운스케일링(Dynamic Downscaling) 방법(Giorgi and Mearns, 1991)이고, 두 번째는 관측 자료와 전 지구 기후모델 재현 결과와의 상관성을 도출하여 예측 결과를 생산하는 통계적 다운스케일링(Statistical Downscaling) 방법(Stoner et al, 2012)이 있다(그림 5-1-5).

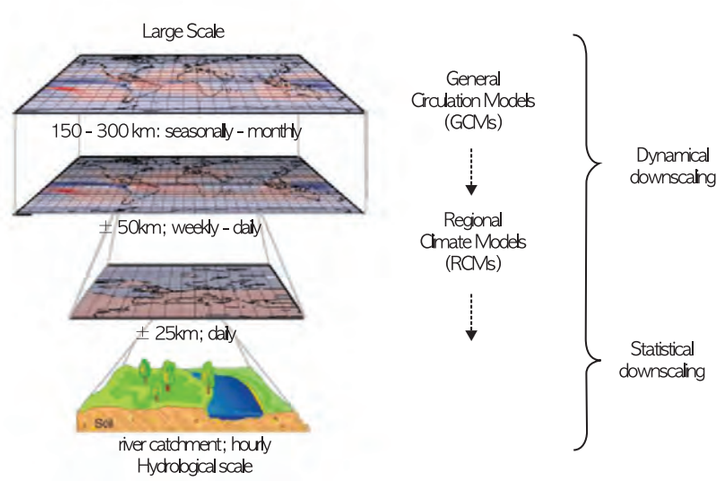


그림 5-1-5 역학적 다운스케일링 및 통계적 다운스케일링 모식도

[출처 : Siwila et al.(2013)]

통계적 방법은 계산이 간단하지만 축소할 수 있는 변수의 수가 제한되어 있으며, 그 성능은 장기 관측 시계열 자료의 품질에 크게 의존한다. 반면 역학적 방법을 사용하면 더 많은 변수를 시뮬레이션 할 수 있는데 관측 자료가 있는 위치에만 국한되지 않는다. 또한 복잡한 수심과 지형을 적용하여 미세한 해양 및 대기역학 시뮬레이션을 가능하게 하여, 현재 운용되는 전 지구 모델에 비해 2~10배의 공간 해상도를 향상시킬 수 있다.

다) CORDEX 프로그램

역학적 다운스케일링 접근 방식을 사용하여 미래 기후변화를 예측하는 많은 연구가 이루어졌고, WCRP의 지역기후 워킹그룹(WGRC)은 2009년에 CORDEX(Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, 공동지역기후상세화실험) 프로그램을 수립하여 다운스케일링 기후 모델에 대한 성능의 평가 및 비교를 위한 프레임워크를 제공하였다. 또한 기후변화 영향 및 적응 연구에 사용하기 위한 기후 예측자료들을 생산하기 위한 일련의 실험을 정의하고자 하였다.

CORDEX는 과학자문팀(Science Advisory Team)에 의해 운영되며, 지역 기후 예측을 위해 지역기후모델(Regional Climate Models, RCMs) 및 실험적 통계적 다운스케일링(Empirical Statistical Downscaling, ESD) 기법을 사용하고 있다. 현재까지 CORDEX는 주로 다중 전 지구 기후모델/다중 지역기후모델(MultiGCM/MultiRCM) 페어링을 통한 역학적 다운스케일링에 기반을 두고 있다. 반면에 통계적 다운스케일링 방법은 역학적 방법과 비교하여 기후변화 적응 문제와 같은 특정 분야에 장점을 갖고 있으나, 아직 그 잠재력이 역학적 방법만큼이나 체계적으로는 분석되지 않았다(http://cordex.org).

CORDEX는 CMIP5 모델 시뮬레이션을 기반으로 한 지역별 상세 기후예측 프레임워크를 구축하였으며, 현재 14개의 CORDEX 도메인이 정의되어 있다. 그 중에서 우리나라가 속한 CORDEX-East Asia 도메인은 우리나라 기상청이 주도적으로 관리하고, 5개의 모델이 참여(HadGEM3-RA, SNU-RCM, RegCM4, WRF, CCMM) 하고 있다(http://cordex -ea.climate.go.kr/cordex/). CORDEX-East Asia 예측자료는 ESGF(Earth System Grid Federation, 지구시스템격자연합)의 자료배포 웹사이트(https://esg-dn1.nsc.liu.se/search /cordex/)에서 다운로드 할 수 있다. 그러나 CORDEX-East Asia의 모델들에는 해양모델이 포함되어있지 않고, 대기모델 위주로만 다운스케일링 자료가 제공되고 있어, 해양의 기후변화에 대한 예측을 위해서는 별도의 지역 해양기후모델의 구축이 필요하다.

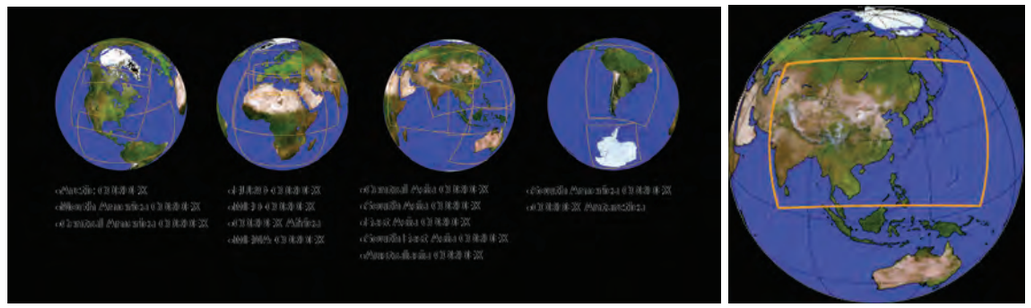


그림 5-1-6 (좌) 14개 CORDEX 영역, (우) CORDEX-동아시아 영역

[출처 : WCRP 홈페이지]

라) 치우침 보정(Bias Correction)

지역기후모델(RCM)을 이용한 미래 기후예측(climate projection) 실험이 과거 재현(historical simulation) 실험과 가장 큰 차이점은 관측 자료를 고려한 경계 조건을 사용할 수 없다는 점이다. 따라서 RCM을 이용한 미래 기후 예측은 경계값과 초기값을 얻기 위해 역학적 다운스케일링을 하기 전의 저해상도 기후예측자료인 GCM에 의존할 수 밖에 없어 RCM의 불확실성은 증가한다. GCM의 재현값과 실제 관측값의 차이는 전지구 규모로 볼 때 납득할만한 수준이지만, 지역규모의 현상을 제대로 모의하는 데는 공간 해상도 문제 등 여러 제약이 여전히 존재한다.

이를 극복하기 위한 방법으로 GCM 관측에 대한 치우침을 RCM 측면 및 표층 경계에 적용하는 것과 같은 치우침 보정 기법이 다양하게 개발되었다. Ehret et al.(2012)은 최신 치우침 보정 방법에 대해 포괄적인 개요를 제시하고, 관련된 가정, 단점 및 시사점을 다루었다. 또한 치우침 보정을 위한 최선의 방법으로 앙상블 섭동에 대한 정교한 접근법을 기반으로 한 앙상블 예측을 수행하는 것과 대기의 대류를 허용하는 정도까지 모델 해상도를 향상시킬 것을 제안하였다.

White and Toumi(2013)는 GCM으로부터 RCM 구동을 위한 입력 값을 추출하여 치우침 보정을 적용할 때 최근에 주로 사용하는 선형 보정기법과 통계적 방법을 사용한 Quantile-Quantile 기법의 차이를 비교하였다. 선형 보정기법은 모든 GCM 값을 장기간 평균을 한 기후치와 그에 대한 편차로 분리하고, 과거 관측 값(예, 재해석장) 역시 기후치와 편차로 분리하여, 과거 관측 값 기후치에 GCM 편차 값을 더해 치우침 보정된 자료를 생산하는 간단한 보정이다. Quantile-Quantile(QQ) 기법은 원하는 변수(예, 수온, 염분)에 대해 과거 관측 값과 GCM 과거 재현실험의 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 각각 구하여 상호간의 변환함수를 구하고, 이 함수를 GCM 미래예측 자료에 적용시켜 치우침 보정된 예측자료를 생산하게 된다. White and Toumi(2013)는 평균값(또는 기후치)만을 보정하는 선형 보정기법은 극한 기후 현상을 보정하지는 못한다는 단점이 있지만 GCM과 관측 자료의 공간적 연관성과 변수 간 의존성을 유지할 수 있다는 장점이 있고, 반면 QQ 기법은 GCM 변수들의 분포에 있어 치우침을 보정할 수 있지만 변수 간 의존성을 유지할 수 없고 스무딩 된 공간 구배에 거짓된 변동성을 더할 수 있다는 단점을 밝혔으며, 선형 보정기법을 더 신뢰할 수 있는 방법이라고 결론 내렸다.

2) 우리나라 주변해역 장기 해양변동 분석

CMIP5의 결합 기후모델은 대기, 해양, 해빙, 육상, 지면, 육빙, 에어로졸, 탄소순환, 식생 역학 등 다양한 모델이 결합된 지구시스템 모델로서, 한정된 슈퍼컴퓨팅 자원을 이용하여 지구 규모의 수백 년간의 기후변화를 재현하고 예측하기 때문에, 기후모델의 가장 좋은 공간해상도라 할지라도 대기는 약 100km, 해양은 약 30km 수준으로 우리나라와 같은 국지적 영역에서 활용하기에는 적합하지 않다. 따라서 우리나라에 적용 가능한 기후변화 예측자료를 생산하기 위해, 역학적 다운스케일링을 이용하여 저해상도 수치모델로부터 시·공간적으로 상세화 된 고해상도 수치모델 재현 및 예측 결과를 얻을 수 있도록 하였다.

가) 지역 해양기후모델 구축

IPCC 5차 평가보고서에 사용된 기후예측모델 중 북서태평양쪽 재현 및 예측 성능이 우수한 것으로 알려진 6개의 모델(IPSL-CM5A-LR & MR, CCSM4, CESM1-CAM5, CanESM2, GFDL-ESM2G) 중 해상도가 가장 높고 다운스케일링에 필요한 모든 자료가 갖춰진 미국 NCAR(National Center for Atmospheric Research)의 CESM(Community Earth System Model) V.1-CAM5 자료를 우리나라 주변해역 고해상도 해양기후모델 구축을 위한 경계 값으로 활용하였다.

다운스케일링을 위한 해양수치모델은 최근 지역해 연구 및 시스템 구축에 많이 사용되고 있는 3차원 해수유동 모델인 ROMS(Regional Ocean Modeling System)로 선택하였다. 해양모델 ROMS는 수평 좌표계로 Arakawa-C 격자로 유한차분 된 직교 곡선 좌표계(Orthogonal-curvilineal Coordinate)와 연직 좌표계로 S-좌표계(Stretched terrain-following Coordinate)를 사용하고 있다. 모델 영역은 114.5~145°E/16~52°N 으로 설정하여, 동·서·남해 및 동중국해 전 영역과 북서태평양 일부 해역이 포함되도록 하였고, 수평 공간해상도는 위경도 방향으로 각각 0.1°(약 10 km), 30개 연직층을 갖도록 공간적 상세화를

하였다.

또한 기후모델에서 고려되지 않은 조석을 고려하여, 조석의 영향을 크게 받는 우리나라 해역의 재현성 및 예측성을 크게 높였다. 더불어 모델 해역에 12개 주요 하천의 유량을 수치모델의 입력 자료로 포함시켜, 주요 하천을 통한 담수유입 효과를 고려하였다.

지역 해양기후모델의 과거 재현실험을 위해 대기강제력은 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 유럽중기예보센터)의 ERA-Interim 재해석장 자료(https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim)를 사용하고(Berrisford 등, 2011), 개방경계 입력자료는 미국 NOAA/NCAR(해양대기청 국립대기과학연구소)의 SODA(Simple Ocean Data Assimilation) 재해석장 자료(http://apdrc.soest.hawaii. edu/datadoc/soda_2.1.6.php)를 사용하였다(Carton 등, 2008).

1988년부터 2005년까지의 ERA-Interim 6시간 간격 자료와 SODA 월평균 재해석장 자료를 각각 시기별로 평균하여 기후치를 구하고 이를 바탕으로 20년간 스핀업을 수행한 후, 1988년부터 2005년까지 재해석장 자료를 이용하여 재현실험을 실시하였다.

치우침 보정을 위해 앞서 설명한 선형 보정기법을 적용하여 지역 해양기후모델의 예측을 위한 측면 및 표층 경계 자료를 생산하였다. ERA-Interim 및 SODA 재해석장 자료를 과거 관측 값으로 가정하여 기후치(1988~2005년 월별 평균)와 편차를 구하고, 같은 기간에 대한 CESM-CAM5 재현 자료를 기후치와 편차로 분리하여 시나리오별 예측자료에 대해서도 재현 자료 기후치와의 편차를 구함으로써, 과거 관측값 기후치에 예측자료 편차를 더해 치우침 보정된 고해상도 지역 해양기후모델의 측면 및 표층 입력 자료를 생산하여 기후변화 예측 실험을 수행하였다.

나) 시나리오별 예측

한반도 주변해역 장기 기후변화를 살펴보기 위하여, IPCC 5차 평가보고서에서 사용된 RCP (대표농도경로) 시나리오를 이용하여 실험을 수행하였다. RCP 시나리오는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였고, 하나의 대표적인 복사강제력에 대해 사회-경제 시나리오가 여러 가지가 될 수 있다. 대표적인 시나리오 중 저감 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 가정한 RCP 8.5와 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우를 가정한 RCP 4.5 두 가지 시나리오를 선정하여 실험을 수행하였다.

RCP 8.5 시나리오의 경우(그림 5-1-7), 10년 평균한 표층 수온으로 2030년(2021~2030년 평균), 2050년(2041~2050년 평균), 2100년(2091~2100년 평균) 수온 변동을 살펴본 결과, 우리나라 주변수온이 약 4~5도 내외로 상승하는 것을 확인하였다.

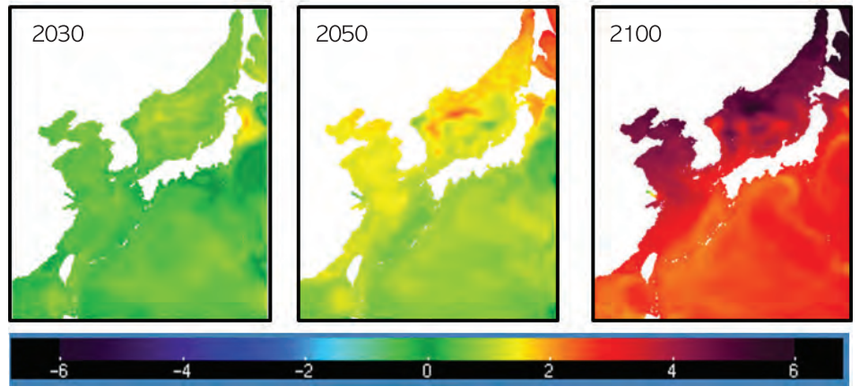


그림 5-1-7 RCP 8.5 시나리오 예측 표층 수온 (좌) 2030년, (중) 2050년, (우) 2100년

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

해역별로 살펴보면, RCP 8.5 시나리오의 경우, 서해와 동해의 온난화 경향이 크게 나타나고, 특히 우리나라 동해 해역은 현재의 남해보다 수온이 상승하게 되어 아열대화 가능성이 있는 것으로 확인되었다. 연평균한 수온값의 해역별 시계열 변동 그래프를 그려서 확인한 결과(그림 5-1-8), 해역별로 수온 상승 경향을 비슷하였으나, 서해가 약 5도 내외로 수온이 상승하여 상승 정도가 가장 컸고, 남해가 약 4도 내외로 수온이 상승하여 상승 정도가 가장 낮은 것으로 확인되었다.

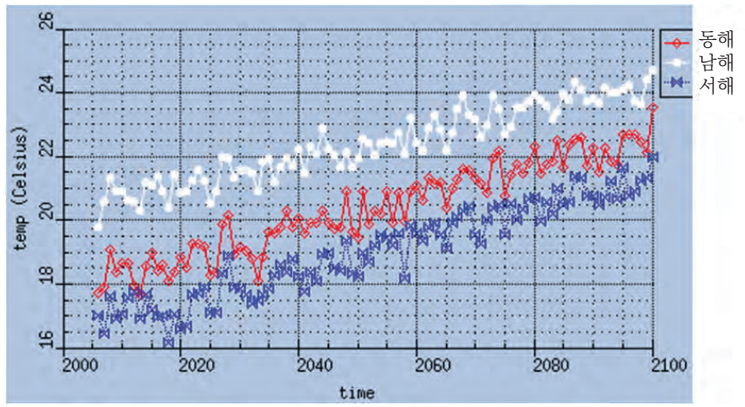


그림 5-1-8 RCP 8.5 시나리오 연평균 해역별 수온 변동 그래프

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

계절별 수온 변동 차이를 확인하기 위하여, 겨울철(2월)과 여름철(8월) 수온 변동을 살펴본 결과(그림 5-1-9), 겨울철과 여름철의 수온 상승 정도가 유사하게 나타났고, 여름철 해역별 수온차가 크게 나타나지 않는 점은 현재 상태와 유사하나, 해역별 수온변동 폭이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

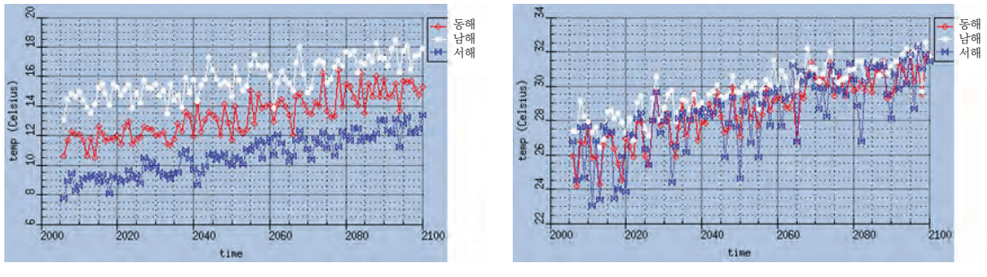


그림 5-1-9 RCP 8.5 시나리오 (좌) 2월과 (우) 8월의 해역별 수온 변동 그래프

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

RCP 4.5 시나리오의 경우, 마찬가지로 10년 평균한 표층 수온으로 2030년, 2050년, 2100년 수온 변동을 살펴본 결과, 우리나라 주변수온이 약 2℃ 내외로 상승하는 것(그림 5-1-10)을 확인하였다. 즉, 온실가스를 감축하는 경우, 수온 상승정도를 상당부분 억제할 수 있는 것으로 나타났다.

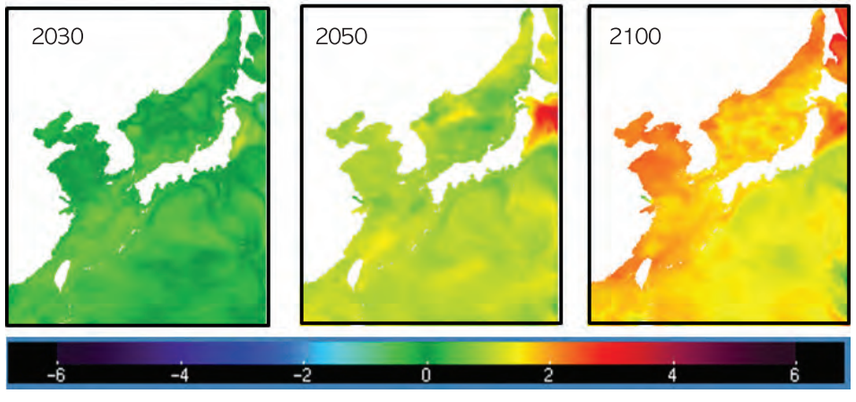
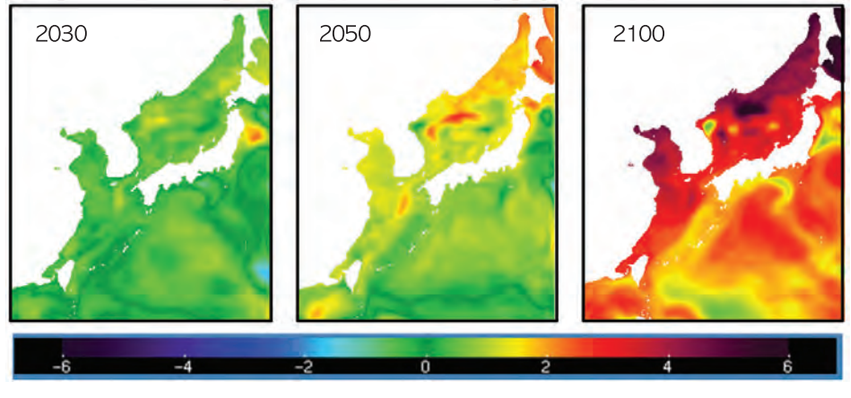


그림 5-1-10 RCP 4.5 시나리오 예측 표층 수온 (좌) 2030년, (중) 2050년, (우) 2100년

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

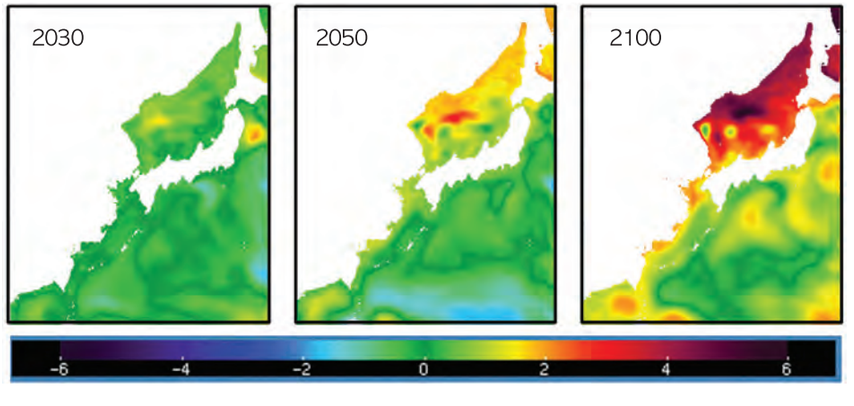
국립수산과학원의 정선해양관측에서 얻어진 수층별 수온변화 분석결과에 따르면, 최근 약 50년간 기후변화에 의해 혼합층 두께가 얇아지고 수온약층의 성층이 강화되어 표층은 수온이 지속적으로 상승하고 수온약층 아래에서는 수온이 하강하는 경향이 있다고 보고되었다. RCP 8.5 시나리오로 분석한 결과 2050년 이후로는 수온약층보다 깊은 수심에서도 기후변화 영향이 나타나 2100년에는 수심 100미터에서도 동해를 포함한 지역해를 중심으로 수온이 2~5℃까지 상승할 수 있는 것으로 분석되었다(그림 5-1-11, 그림 5-1-12).

그림 5-1-11 RCP 8.5 시나리오 예측 수심 30m 수온 (좌) 2030년, (중) 2050년, (우) 2100년



[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

그림 5-1-12 RCP 8.5 시나리오 예측 수심 100m 수온 (좌) 2030년, (중) 2050년, (우) 2100년



[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

염분값의 시나리오에 따른 변동 차이를 살펴보기 위해 2091년~2100년을 10년 평균한 표층 염분값을 2월과 8월로 구분하여 비교하고, 각각의 편차를 살펴보았다(그림 5-1-13).

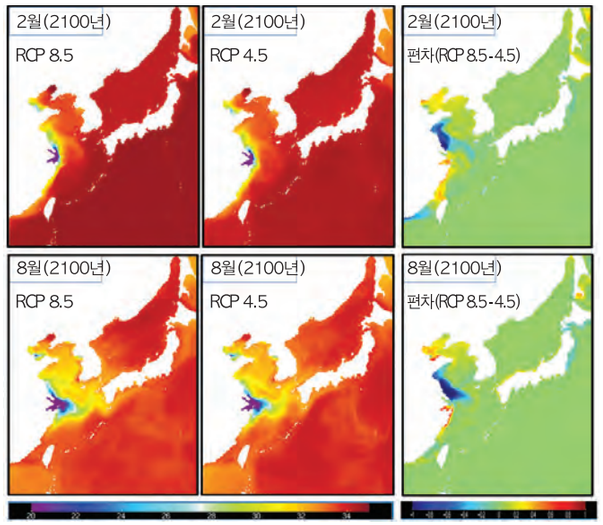


그림 5-1-13 RCP 시나리오별 2100년 겨울·여름 표층염분 분포 및 차이 (상) 2월, (하) 8월,
(좌) RCP 8.5, (중) 4.5, (우) 시나리오별 염분 차이

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

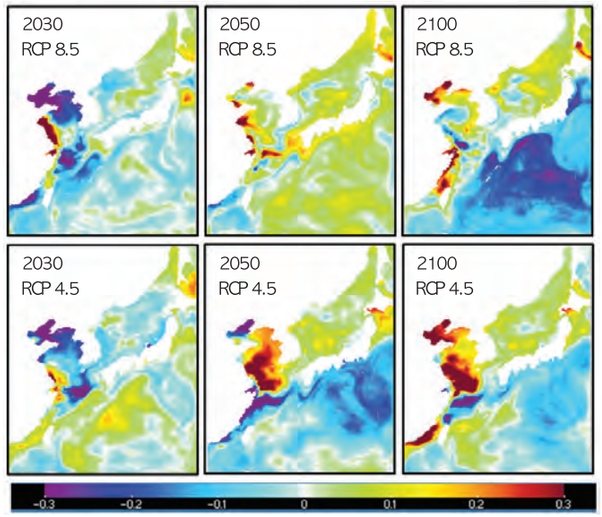


그림 5-1-14 RCP8.5(상)와 RCP4.5(하) 시나리오별 2030년(좌), 2050년(중), 2100년(우)의 표층염분 편차 분포

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

시나리오에 따라 국지적으로 1 psu 내외의 차이를 보였고, 양자강 북부는 RCP 8.5가 4.5에 비해 저염화 경향이 나타나고, 양자강 남부 연안과 발해는 고염화 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 이는 증발량과 강수 패턴이 시나리오별로 다르게 나타난 결과로 판단된다.

2010년대(2011~2020년 10년 평균)를 기준으로 2030, 2050, 2100년대의 표층염분편차를 시나리오별로 각각 살펴본 결과, 시간적으로는 0.3 psu 내외의 차이를 보였고, 공간적으로는 대양과 지역해가 다른 패턴을 보이는 경우도 있었다(그림 5-1-14).

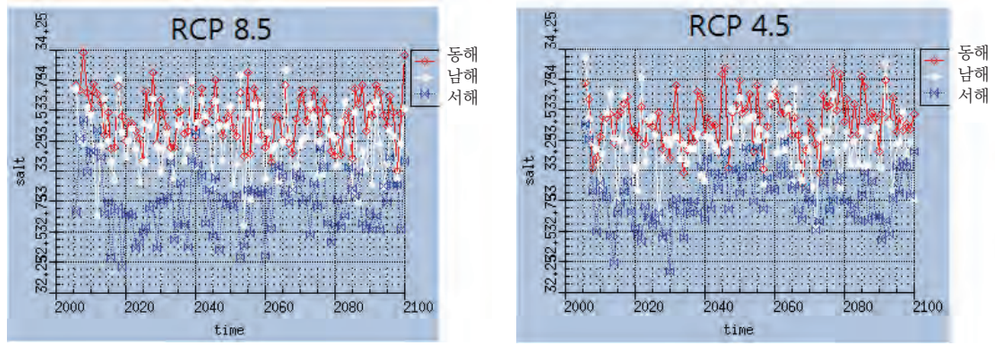


그림 5-1-15 연평균 해역별 표층염분 변동 그래프(RCP 8.5(좌), RCP 4.5(우) 시나리오)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

2100년까지의 염분값 변동을 해역별 시계열 그래프로 확인한 결과, 수년 및 수십년 주기의 변동성은 나타났지만, 지속적인 상승 및 하강 경향은 뚜렷하게 나타나지는 않았다(그림 5-1-15).

우리나라 해역의 염분 분포를 결정짓는 주요 인자는 표층을 통한 강수 및 증발량, 하천을 통한 담수 유입, 해류에 의한 연안수와 외해수의 교환을 들 수 있다. 사용된 지역 해양기후모델은 모델 영역내의 주요하천 12개를 고려하였으나 월별 기후치로 담수 유입을 고려하였기 때문에, 실제 기후변화에 따른 하천을 통한 담수 유입의 변동성이 고려되지 않아 발해와 서해, 동중국해 북부와 같이 하천수의 영향을 받는 해역의 염분 변화 예측성은 정확도가 낮아질 수밖에 없다. 향후 정확도 높은 수문모형 결합 등을 통해 지역 해양기후모델의 예측 성능 향상을 지속적으로 추진할 필요가 있다.

제 2절 해양변화에 따른 주요 어종 산란장 및 양식적지 변화 예측

1) 기후변화에 따른 주요 어종 산란장 변화 예측

전 절에서는 IPCC AR5 기후모델을 다운스케일링하여 고해상도 지역 해양기후모델을 구축하고 이를 바탕으로 우리나라 주변해역에 대한 시나리오별 수온 및 염분 변화 특성에 대해 살펴보았다. 본 절에서는 지역 해양기후모델의 시나리오별(RCP 4.5, RCP 8.5) 해양변동 예측 결과에 기반하여 2100년까지의 수산업과 관련된 변화를 예측해보고자 하였다. 미래 수온변화에 따른 우리나라 주요 어종의 서식환경 변화를 살펴보기 위해 살오징어와 고등어를 선정하여 시나리오별 산란장의 변화를 살펴보았다.

살오징어는 수심 100~500m 해역, 알과 부화 유생의 생존을 동시에 만족시킬 수 있는 18~23℃ 범위에 대해 살오징어 자원의 대부분을 구성하고 있는 가을 산란군(산란시기 9~11월)과 겨울 산란군(산란시기 1~3월)에 시나리오별 수온변화를 적용하였다. 고등어는 서식수심 0~200m, 주산란기 4~5월, 산란수온 15~23℃로 설정하였다. 수치모델 기후예측결과에서 수심 0, 10, 30, 50, 100, 200m 6개 층의 수온 값을 추출하여 각 수심별로 산란환경에 맞는 격자점에 대해 인덱스값 1을 부여하고, 이 값들을 6개 층에 대해 합산하여 수평분포를 표현하였다. 수평분포에서 값이 클수록 대상어종의 최적 산란환경의 연직적 범위가 넓은 것을 의미한다.

가) 살오징어

살오징어는 기후변화에 의한 수온상승으로 인해 가을산란군의 경우 남해 및 동중국해에서 산란장이 감소하였고, 2100년까지 2~3℃ 수온상승이 예상되는 RCP 4.5의 경우보다 4~6℃ 수온상승이 예상되는 RCP 8.5 시나리오의 경우 산란장 영역이 더 많이 축소되는 것으로 전망된다(그림 5-2-1).

반대로 겨울산란군은 산란장이 확대되고, RCP 8.5의 경우 RCP 4.5에 비해서 산란장 영역이 크게 확장되는 것으로 전망되었다(그림 5-2-2).

종합하자면 살오징어의 경우, 기후변화에 따른 온난화 경향에 의해 가을 산란군은 산란장 영역이 감소하더라도 겨울 산란군은 산란장 영역이 증가할 것으로 전망된다. 하지만 본 연구에서는 살오징어의 산란밀도를 고려하지 않았기 때문에 산란장 면적의 증가를 산란 자원량 증가로 직결하기는 힘들다. 향후 이에 대한 연구를 지속적으로 추진할 계획이다.

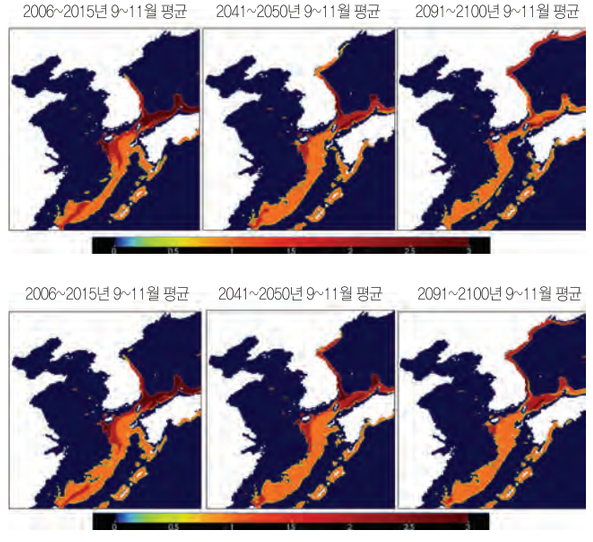


그림 5-2-1 RCP 8.5(상) 및 4.5(하) 시나리오의 살오징어 가을산란군 산란장 분포 변화

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

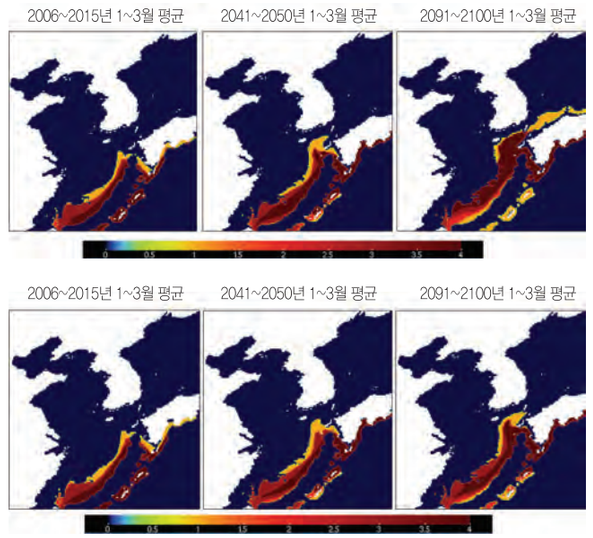


그림 5-2-2 RCP 8.5(상) 및 4.5(하) 시나리오의 살오징어 겨울산란군 산란장 분포 변화

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

나) 고등어

살고등어는 기후변화에 의한 수온상승으로 인해 서해, 남해 및 동중국해에서 산란장이 확대되고, RCP 4.5의 경우보다 RCP 8.5 시나리오의 경우 산란장 영역이 더 많이 확대되는 것으로 전망된다. RCP 8.5 시나리오에서는 2100년에 서해로 산란장 영역이 크게 확장되는 것으로 예상되었다 (그림 5-2-3).

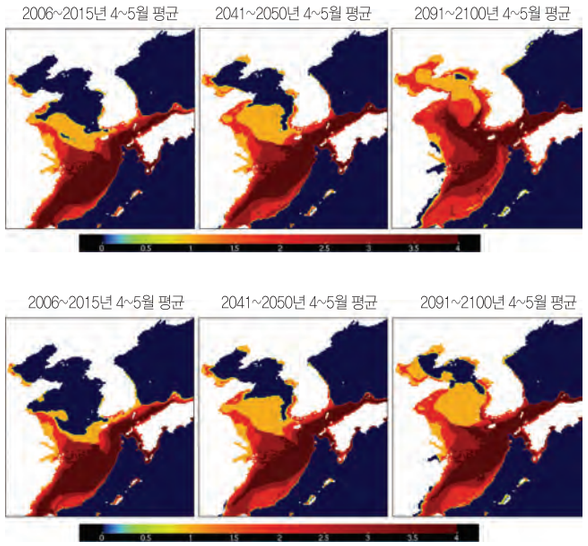


그림 5-2-3 RCP 8.5(상) 및 4.5(하) 시나리오의 고등어 산란장 분포 변화

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

살오징어의 겨울 산란군과 마찬가지로 고등어의 산란장 역시 현재보다 확장될 것으로 판단되지만, 이와 같은 산란장 확장이 자원량 증가로 연결될지에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2) 기후변화에 따른 양식생물의 양식 적지 변화 예측

양식생물에 대한 양식 적지 변화는 해양환경 변화, 양식방법 및 양식기술 변화 등 다양한 요소의 영향을 받는다. 이 절에서는 지역 해양기후모델의 시나리오별 수온 예측자료를 이용하여 수온 변화의 관점에서 미래 양식 적지 변화를 분석하였다.

가) 넙치

통계청 제공 어업생산동향조사 결과를 바탕으로 천해양식어업 중 가장 생산량이 많은 품종인 넙치를 시나리오 구축

대상으로 선정하여 최근 12년간의 지역별 연간 생산량을 조사하였고(표 5-2-1), 이로부터 넙치가 남해, 동해, 제주도에서 양식되고 있음을 확인하였다. 넙치의 서식수온 8~26℃와 서식적수온 20~25℃를 고려하여, 전 절의 시나리오별 수온 예측자료로 기후변화에 따른 넙치 양식 적합 해역의 변화를 살펴보았다.

표 5-2-1 지역별 넙치 연간 생산량(2006년~2017년 평균)

[출처 : 통계청 국가통계포털]

지역	부산	인천	울산	경기도	강원도	충청남도	전라북도	전라남도	경상북도	경상남도	제주도	계
생산량(톤)	322	0	423	0	145	0	0	14,544	1,614	1,382	24,585	43,014

RCP 시나리오 예측자료 중 2006~2017년, 2041~2050년, 2091~2100년에 대해 수온이 최저가 되는 겨울철(12, 1, 2월)과 여름철(6, 7, 8월) 예측자료를 선별하여, 일반적인 취수 수심 6m 수온을 구하였고, 넙치 서식수온인 8~26℃ 범위를 벗어나지 않는 경우와 벗어나는 경우로 구분하여, 시기별 양식 적합해역을 백분율로 환산한 양식 적합도를 나타내었다. 적색은 높은 적합도를 의미하고, 청색은 낮은 적합도를 의미한다.

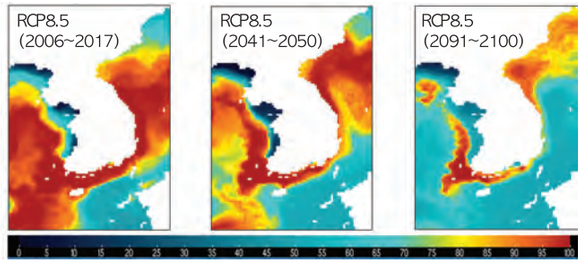


그림 5-2-4 시기별 넙치 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

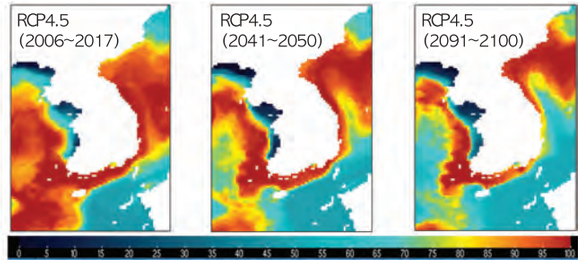


그림 5-2-5 시기별 넙치 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

RCP 8.5 시나리오의 경우(그림 5-2-4), 2006~2017년의 양식적합해역은 전라남도 남해 연안, 경상남·북도, 강원도, 제주도 해역으로 나타나 넙치 생산해역과 일치하였고, 2100년까지 제주도, 경상남·북도, 강원도 남부 해역이 양식 적합도가 빠르게 감소하는 해역으로 바뀌는 것으로 나타났다. 특히 제주도 해역은 우리나라 해역 중에서 가장 빠르게 양식 적합도가 감소하는 해역으로 바뀌는 것으로 확인되었다. 제주도의 넙치 양식은 자연 해수와 혼합 해수를 사용하는 양식방법을 사용하고 있어 자연 해수를 사용하여 양식을 수행할 경우, 제주 해역의 넙치 양식 생산과 관련한 기후변화 대한 대응 노력이 필요할 것으로 판단된다.

온실가스 저감정책이 상당히 실현되는 경우를 가정한 RCP 4.5 시나리오의 경우(그림 5-2-5)도 RCP 8.5 시나리오에 비해 정도는 덜하지만, 제주도 해역이 양식 적합도가 감소함을 확인하였고, 2100년에는 동해남부 연안역도 점차 양식 적합도가 감소하는 해역으로 변모하는 것을 확인할 수 있었다 (그림 5-2-5).

나) 참돔

통계청 제공 어업생산동향조사 결과를 바탕으로 천해양식어업 중 넙치에 비해 생산량이 많지는 않지만 고급어종으로 분류되고 선호도가 높은 참돔에 대해서도 최근 12년간의 지역별 연간 생산량을 구하였고(표 5-2-2), 이로부터 참돔이 주로 남해와 동해 일부, 제주도에서 양식되고 있음을 확인하였다. 참돔의 서식수온이 10~30℃임을 고려하여, 예측자료를 기반으로 기후변화 시나리오별 참돔 양식 적합 해역의 변화를 살펴보았다.

표 5-2-2 지역별 참돔 연간 생산량(2006년~2017년 평균)

[출처 : 통계청 국가통계포털]

지역	충청남도	전라남도	경상북도	경상남도	제주도	계
생산량(톤)	9	490	24	4,953	42	5,503

RCP 시나리오 예측자료 중 2006~2017년, 2041~2050년, 2091~2100년에 대해 수온이 최저가 되는 겨울철(12, 1, 2월)과 여름철(6, 7, 8월) 예측자료를 선별하여, 가두리 양식장 수심 5m 수온 값을 구하였고, 참돔 서식수온인 10~30℃ 범위를 벗어나지 않는 경우와 벗어나는 경우로 구분하여, 시기별 양식 적합해역을 백분율로 환산한 양식 적합도를 나타내었다. RCP 8.5 시나리오의 경우(그림 5-2-6), 2006~ 2017년의 양식 적합 해역은 전라남도 남해 연안, 경상남·북도, 강원도, 제주도 해역으로 나타나 참돔 생산해역과 대체적으로 일치하였고, 2100년에는 서해 외해까지 양식 적합 해역이 점차 확장되는 것으로 나타났다. 다만 RCP 8.5 시나리오에서는 강한 온난화 경향으로 인해 2100년에 제주도의 양식 적합도가 감소하는 것으로 나타났다.

RCP 4.5 시나리오의 경우(그림 5-2-7)도 RCP 8.5와 유사한 패턴이 나타났으나, RCP 8.5 시나리오와 다르게 2100년까지도 제주도의 양식적합도가 높게 나타났다.

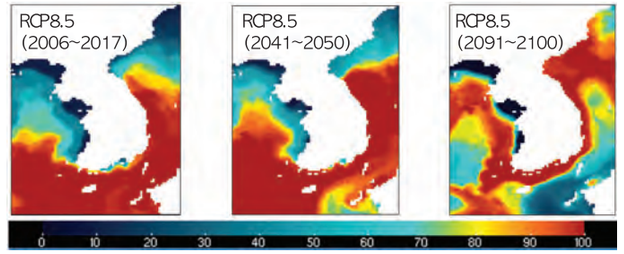


그림 5-2-6 시기별 참돔 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

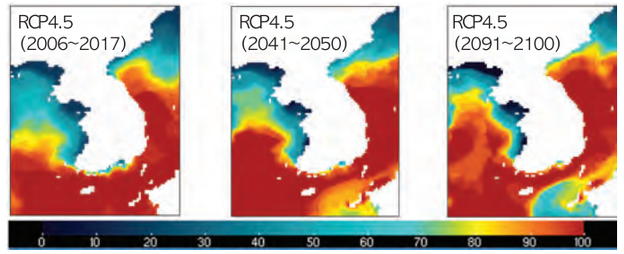


그림 5-2-7 시기별 참돔 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

종합하자면 고수온의 연안 해역에 서식하는 것을 선호하는 참돔은 기후변화에 따른 온난화에 의해 양식 적합 지역이 확대될 것으로 전망되었다.

다) 우렁쉥이(멍게)

통계청 제공 어업생산동향조사 결과를 바탕으로 천해양식어업 중 양식어민들의 주 소득원 중 하나인 우렁쉥이에 대해 최근 12년간의 지역별 연간 생산량을 구하였고(표 5-2-3), 이로부터 우렁쉥이가 남해, 동해, 제주도에서 양식되고 있음을 확인하였다. 우렁쉥이의 서식수온이 5~24℃인 것을 고려하여, 예측자료를 기반으로 기후변화 시나리오별 우렁쉥이 양식 적합 해역의 변화를 살펴보았다.

표 5-2-3 지역별 우렁쉥이 연간 생산량(2006년~2017년 평균)

[출처 : 통계청 국가통계포털]

지역	부산	울산	강원도	전라남도	경상북도	경상남도	제주도	계
생산량(톤)	5	13	1,668	87	1,748	9,394	9	12,902

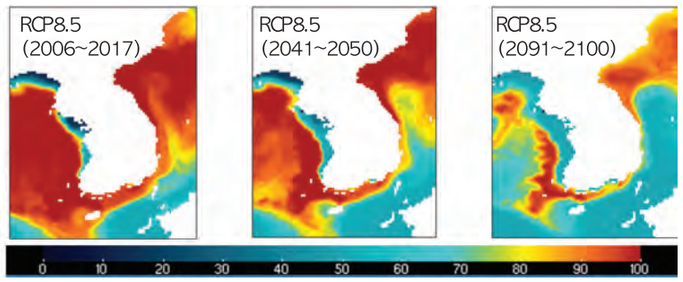


그림 5-2-8 시기별 우렁쉥이 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오/수심 10m)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

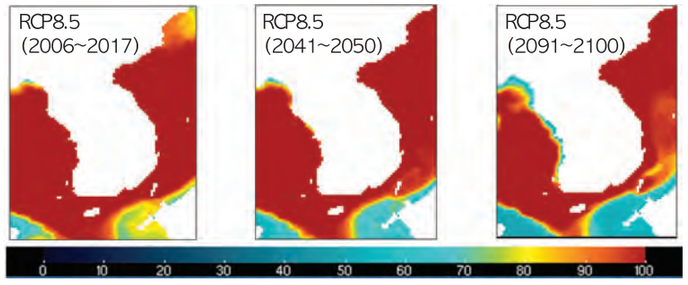


그림 5-2-9 시기별 우렁쉥이 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오/수심 30m)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

양식장의 수심이 일반적으로 10m 전후인 것을 고려하여 시나리오별 예측자료로부터 10m 수온 값을 추출하였고, 우렁쉥이 서식수온인 5~24℃ 범위를 벗어나지 않는 경우와 벗어나는 경우로 구분하여, 시기별 양식 적합해역을 백분율로 환산한 양식 적합도를 나타내었다. RCP 8.5 시나리오의 경우(그림 5-2-8), 2006~2017년의 양식적합해역은 전라남도, 경상남·북도, 강원도, 제주도 해역으로 나타나 우렁쉥이 생산해

역과 대체적으로 일치하였고, 2100년까지 양식 적합 해역이 점차 감소되어 남해 및 강원도 일부 해역을 제외하고는 양식 적합도가 낮게 나타났다.

최근 외해어장에서의 우렁쉥이 양식에 대한 시도가 이루어지고 있다는 점을 고려하여 시나리오별 예측자료로부터 30m 수온 값을 추출하여 마찬가지로 시기별 양식 적합해역을 백분율로 환산한 양식 적합도를 나타내었다. RCP 8.5 시나리오의 경우(그림 5-2-9), 수심 30m로 양식 적합 해역을 확인한 결과 서해를 제외한 전 해역에서 2100년까지 양식 적합도가 높게 나타났다.

RCP 4.5 시나리오의 경우(그림 5-2-10)는, RCP 8.5 시나리오보다는 양식 적합 해역의 감소되는 정도가 상대적으로 낮지만, 온난화 경향에 따라 양식 적합 해역이 감소하는 것으로 나타났다.

RCP 4.5 시나리오(그림 5-2-11)의 수심 30m로 양식 적합 해역을 확인한 결과 RCP 8.5와 유사하게 서해를 제외한 전 해역에서 2100년까지 양식적합도가 높게 나타났다.

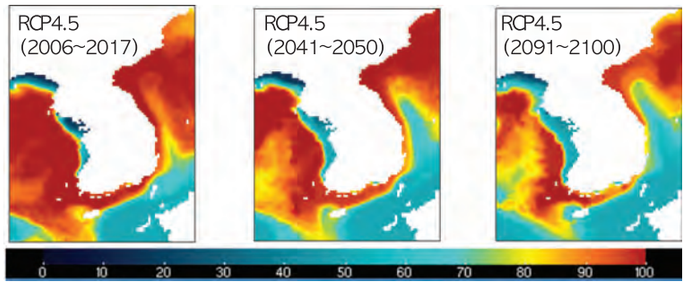


그림 5-2-10 시기별 우렁쉥이 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오/수심 10m)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

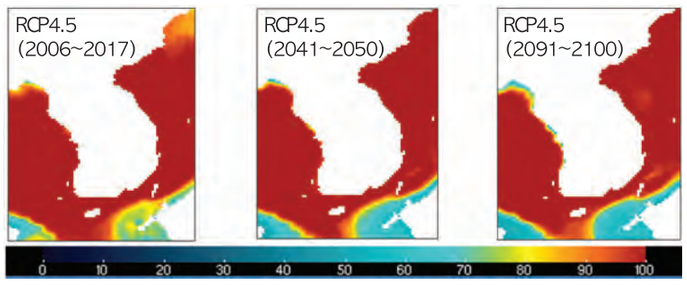


그림 5-2-11 시기별 우렁쉥이 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오/수심 30m)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

RCP 시나리오별 수심 10m와 30m의 양식 적합도 분석으로부터 우렁쉥이는 현재의 연안역 양식의 환경은 악화되겠지만, 연안보다 깊은 곳에서 양식을 하는 외해 양식을 통해 양식 생산량을 유지할 수 있을 것으로 전망된다.

라) 참전복

통계청 제공 어업생산동향조사 결과를 바탕으로 천해양식의 대표적 패류인 전복류(참전복 포함)의 최근 12년간의 지역별 연간 생산량을 구하였고(표 5-2-4), 이로부터 전라남도에서 대부분 양식이 이루어지고 있음을 확인하였다. 참전복의 서식수온이 10~20℃임을 고려하여, 예측자료를 기반으로 기후변화 시나리오별 참전복 양식 적합 해역의 변화를 살펴보았다.

표 5-2-4 지역별 전복류 연간 생산량(2006년~2017년 평균)

[출처 : 통계청 국가통계포털]

지역	부산	인천	울산	강원도	충청 남도	전라 남도	경상 북도	경상 남도	제주도	계
생산량(톤)	1	0	35	0	21	7,680	13	12	29	7,700

RCP 시나리오 예측자료 중 2006~2017년, 2041~2050년, 2091~2100년에 대해 수온이 최저가 되는 겨울철(12, 1, 2월)과 여름철(6, 7, 8월) 예측자료를 선별하여, 일반적인 참전복 양식장의 수심인 5m 수온 값을 추출하였고, 참전복 서식수온인 10~20℃ 범위를 벗어나지 않는 경우와 벗어나는 경우로 구분하여, 시기별 양식 적합해역을 백분율로 환산한 양식 적합도를 나타내었다.

RCP 8.5 시나리오의 경우(그림 5-2-12) 및 RCP 4.5 시나리오 모두(그림 5-2-13), 2006~2017년의 양식 적합 해역은 전라남도 남해 연안 해역으로 나타나 근래의 전복류 생산해역과 일치하였다. 이는 진도냉수대에 의해 여름철에도 주변 해역에 비해 20도 내외로 낮은 수온이 유지되고, 제주해협을 통과하는 제주난류와의 혼합으로 겨울철에도 서해처럼 수온이 크게 떨어지지 않는 해양학적 특성으로 인해, 완도를 포함한 전라남도 남해 연안해역이 참전복의 양식생산에 최적 해역이 될 수 있었다는 것을 유추해 볼 수 있다.

그러나 RCP 8.5 시나리오 예측 결과를 적용하면, 2100년까지 현재의 양식 적합해역에서의 적합도가 급격하게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

RCP 4.5 시나리오 예측 결과를 적용한 경우(그림 5-2-13)에도, RCP 8.5 시나리오에 비해 정도는 약하지만 2100년까지 현재의 양식 적합 해역이 뚜렷이 감소하는 것으로 나타났다.

시나리오별 예측 결과를 통해 온난화에 따른 기후변화로 참전복의 양식 환경은 지속적으로 나빠질 것으로 전망되며, 이에 대한 장기적인 대책이 필요할 것으로 생각된다.

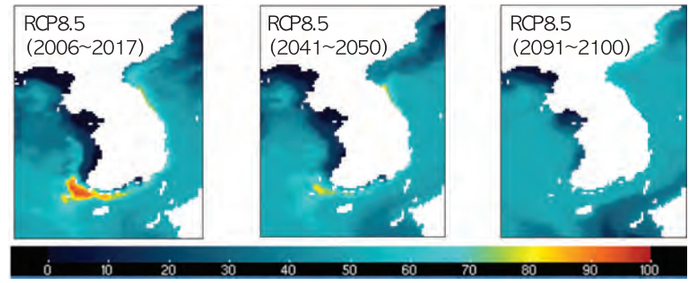


그림 5-2-12 시기별 참전복 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 8.5 시나리오/수심 5m)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

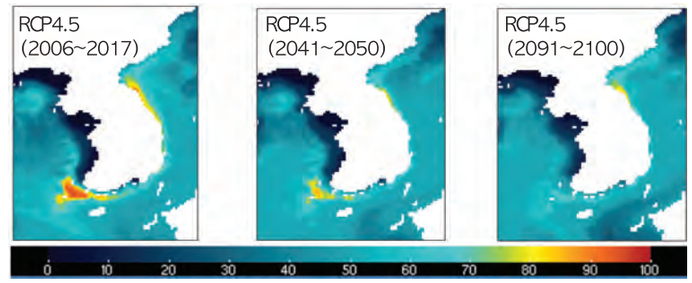
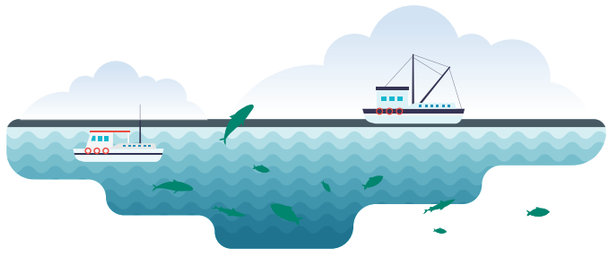


그림 5-2-13 시기별 참전복 양식 적합도(%) 분포 평균 (RCP 4.5 시나리오/수심 5m)

[출처 : 국립수산과학원 기후변화연구과]

제 6장 ▶ 요약

제 6장 _ 요약



전 세계 해양은 어떻게 변했고, 변해 갈 것인가?

- 1993년경부터 해양온난화 경향은 2배 이상 증가하였고, 이상고수온 현상은 1982년부터 발생 빈도가 2배 증가하였으며 강도도 강해졌다.
- 이산화탄소 흡수에 의해 해양은 표층 산성화 심화되고 있으며, 표층부터 1,000m 수심까지 산소감소가 나타나고 있다.
- 해수면은 지난 수십 년간 그린랜드와 남극의 빙상 얼음 질량 감소와 빙하 질량 감소 및 열팽창 등으로 인하여 가속되고 있다.
- 1950년경부터 해양의 많은 생물종들은 해양온난화, 해빙 변화, 산소 감소와 같은 생지화학적 변화 등으로 인하여 서식 범위와 계절적 활동의 범위가 변화하고 있다.
- 이와 같은 원인으로 생태계 내의 종조성, 풍도, 생산량 등에 영향을 받는다.
- 해양 생태계내의 일부 종들은 기후변화뿐만 아니라 남획과 같은 인간 활동의 영향을 동시에 받는다.
- 연안생태계는 해양온난화, 이상고수온, 산성화, 산소감소, 염수침투 및 해수면 상승 등과 함께 인간 활동에 의한 영향도 동시에 받고 있다.
- 21세기 동안 해수온도의 상승, 표층부의 강한 성층 현상, 산성화 및 산소 감소는 유례없는 수준으로 진행될 전망이다.
- 이상고수온 현상과 엘니뇨/라니냐 등의 발생 주기는 더욱 빈번할 것이며, 해수면 상승은 2050년경에는 과거 100년에 한번 일어나는 극한 현상이 1년에 한번 꼴로 일어나게 될 것이다.
- 해양 표층에서 심층까지 해양 생태계에서 21세기 동안 해양생물 군집의 생체량, 그들의 생산력, 잠재어업생산력, 종조성 등이 뚜렷하게 감소할 것이다.
- 해수온도 상승에 의하여 생물 종다양성, 해양 생태계의 구조와 기능에 대한 심각한 영향에 따른 리스크가 심화될 것이다.
- 기후변화에 따른 수산생물의 분포역과 풍도 변화, 어업 잠재생산력 변화는 수산생물에 의존하는 공동체 내의 수입, 생계, 식량 안보 등에 심각한 영향을 줄 것이다.

우리나라 해양과 수산은 어떻게 변화하였나?

- 국립수산과학원은 1921년부터 우리나라 연근해 해양조사를 시작하였으며, 1961년부터는 현재 정선해양관측 정점에서 지속적인 조사를 수행중에 있다.
- 최근 51년간(1968~2018년) 우리나라 해역의 표층수온은 약 1.23℃ 상승하였으며, 이는 같은 기간 전 세계 표층수온 상승(약 0.49℃)에 비하여 약 2.5배 높은 수준이다.
- 해역별로는 동해가 가장 높고, 서해, 남해 순으로 표층수온 상승률이 높게 나타나고 있다.
- 공간적으로는 근외해역의 수온 상승율이 높게 나타나고 있는 반면, 연안역의 수온 상승률은 상대적으로 낮게 나타난다.
- 100여년 이상 장기 수온 자료 분석 결과, 우리나라 해역은 겨울철 수온 상승이 여름철 수온 상승에 비하여 2~3배 높은 수준을 보이고 있으며, 저위도에서 고위도로 갈수록 높은 수온 상승률을 나타낸다.
- 우리나라 해역의 해양열용량은 전 해역에서 최근 19년간(2000~2018년) 상승하는 경향을 보이고 있으며, 특히 동해의 해양열용량 상승이 두드러지게 나타나고 있다. 이는 동해의 전 수층에 걸친 수온 상승이 영향을 준 것으로 판단된다.
- 최근 51년간(1968~2018년) 우리나라 해역의 표층염분은 약 0.27psu 감소하였으며, 서해와 남해의 염분 감소 경향이 동해에 비하여 높게 나타났다.
- 과거 연구결과를 기반으로 우리나라 주변해역의 용존산소는 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 계절적으로 겨울철의 표층 용존산소 농도가 여름철보다는 높게 나타나고 있다.
- 최근 20년간(1995~2014년) 분석결과, 동해의 경우, 모든 항목의 표층 영양염 농도가 하강하는 추세를 나타내었으며, 동중국해의 경우에는 질산염을 제외한 다른 영양염 농도가 하강하는 추세를 나타내었다.
- 우리나라 해역의 해양산성화 정도를 파악하기 위하여 국립수산과학원에서는 2015년부터 정선해양조사를 활용하여 연 3회에 걸쳐 해양산성화 요소를 조사, 분석하고 있다.
- 우리나라 해역의 pH는 여름철에 높게 나타나는데 이는 생물학적 생산성에 의한 결과로 판단되며, 탄산염 아라고나이트 포화도는 우리나라 전 해역이 일반적으로 과포화되어 있으나 계절에 따른 차이가 크게 나타난다.
- 우리나라 해역의 해양산성화 요소는 수온, 염분과 같은 물리적인 요인의 변화에 따라 크게 영향을 받고 있으며, 좀 더 장기적인 관측을 통하여 경향성 파악이 가능할 것으로 판단된다.
- 우리나라 연근해 어업생산량은 1980년대 152만톤을 정점으로 최근에는 100만톤 미만까지 생산량이 감소하고 있다.

- 1980년 이후 어획 어종의 비율은 단순화되고 있으며, **한류성 어종 어획량은 감소하고, 난류성 어종 어획량은 증가**하는 특징을 보인다. 또한 **표층성 부어류는 증가하는 반면, 저어류는 감소 경향**을 보인다.
- 기후변화 모니터링 대상 어종(방어, 대구, 삼치)의 어획현황을 살펴본 결과, 방어류는 연변동성이 크게 나타나고 있으며, 대구는 기후변화 영향에 의한 어장 이동 가능성은 낮게 나타났고, 삼치의 지속적인 어획량 증가와 수온 상승과의 상관성은 좀 더 면밀한 분석이 요구된다.
- **제주도를 중심으로 아열대성 어종 출현 양상이 두드러지게** 나타나고 있지만, 상업적 이용도가 낮아 정확한 어획 통계가 이루어지고 있지 않다.
- 경상남도를 중심으로 **양식생물의 피해 현황 중 가장 높은 원인은 고수온**이었으며, 그 외 저수온, 이상해황, 질병 순으로 나타났다.
- 기후변화에 따른 **참굴의 재생산기구 변동**을 살펴본 결과, **20년 전에 비하여 생식소 활성화 및 산란시기가 2개월 정도 앞당겨지고, 2개월 정도 연장**된 것으로 나타났다.
- **기후변화로 인하여 신종 수산생물 병원체 발생이 증가**하고 있으며, 우리나라 양식넙치에서 신종 질병에 의한 피해가 증가하고 있다.

이상고수온 발생 경향과 대응 방안은?

- 2000년대에 접어들면서 **전 세계 해역 곳곳에서 이상고수온(Marine Heatwaves) 현상이 빈번**하게 나타나고 있으며, 이상 고수온은 수일에서 수개월 동안, 수천 킬로미터 이상의 영역에서, 연직적으로 수백 미터 수심에 이르는 깊이 까지 급격하게 높은 수온이 나타나는 현상을 말한다.
- **우리나라 해역도 2016~2018년 여름철 고수온 현상**에 의하여 IPCC 해양 및 특별보고서에 이상고수온 발생해역(황해 및 동중국해)으로 지정되어 있다.
- **2010년 이후** 우리나라 여름철 표층수온은 증가 경향, 겨울철 **표층수온은 하강 경향을 보이면서 표층수온의 계절별 양극화 현상이 심화**되고 있다.
- 특히 **2016~2018년에는 우리나라 해역에서 뚜렷한 여름철 고수온 경향**이 나타나 평년에 비하여 월평균 수온이 2℃ 내외 높은 경향을 보였다.
- 최근 이상고수온 현상이 빈번히 발생하는 원인은 ①**북태평양 고기압 세력과 티벳고기압 세력 확장**에 따른 열돔(Heatdome) 현상으로 태양복사열의 급격한 증가, ②기단의 확장에 따른 우리나라 해역의 **태풍 영향 및 상륙의 급감**, ③저위도로부터 우리나라 해역으로 열을 수송하는 **대마난류 세력의 강화** 등으로 판단된다.

- **2011~2012년, 2018년 등에는 뚜렷한 겨울철 저수온 경향**이 나타나 평년 대비 월평균 수온이 1~2℃ 낮은 경향을 보였다.
- 최근 겨울철 이상저수온 현상의 원인은 ①급격한 북극 온난화에 의하여 **음의 북극진동이 강화**되면서 차가운 극지방의 한기류가 빈번히 남하, ②북극 온난화로 인한 증발열 증가로 **시베리아 고기압 중심부 세력의 강화**, ③**라니냐 현상 발생**에 의한 극한 겨울 기상 현상 발생 등으로 판단된다.
- 우리나라 연안 수온자료와 기온자료 분석을 통하여 **급격한 폭염이 발생하였을 경우, 남해 연안은 약 50시간 이후, 서해 연안은 약 12시간 이후에 표층수온이 급격히 상승**하는 경향을 확인하였다.
- **겨울철 저수온 현상의 10~20일의 짧은 주기 변동 경향**은 북극진동의 짧은 주기 변동과 밀접한 관련성이 있어 우리나라 해역의 저수온 변화가 북극에 의한 영향이 있음을 확인할 수 있었다.
- **이상수온에 의한 양식어장 피해 저감**을 위하여 국립수산과학원에서는 2003년부터 **전국 연안에 실시간 해양환경 어장정보시스템을 설치, 운영**하고 있으며, 최근 지자체, 공공기관 및 기상청 등과의 연계를 통하여 **총 105개소(2019년 현재)의 실시간 수온 정보를 제공**하고 있다.
- 이상수온에 따른 양식생물 피해 대응을 위하여 **해양수산부에서는 2017년 이상수온 특보 발령 기준을 설정하여 운영**하고 있으며, 고수온 주의보는 수온 28℃ 이상이 예상되는 해역, 저수온 주의보는 수온 4℃ 이하가 예상되는 해역을 중심으로 발령된다.
- 이상수온에 대한 선제적 대응을 위하여 **2018년부터는 이상수온 관심단계**를 설정하여 고수온 및 저수온 주의보 발령 예상 일주일 내외에 발령하고 있다.
- **2017년 여름부터 국립수산과학원에서는 고수온 및 저수온 특보를 발령**하고 있으며, 고수온 주의보는 동, 서, 남해 및 제주 연안까지 폭넓은 해역에서 발령되는 것과 달리 저수온 주의보는 주로 서해 및 남해 서부 내만을 중심으로만 발령되고 있다.

수산분야 기후변화 취약성과 어업인의 기후변화 인식은?

- 국립수산과학원에서는 RCP 시나리오 기반 기후노출 지표와 수산생물의 위험도로부터 민감도 지표, 사회 경제적 특성을 반영한 적응 능력 지표를 기반으로 전문가 대상 가중치 산정과 표준화를 통하여 **수산분야 기후변화 취약성 평가 기법을 개발**하였다.
- 20개 업종의 연근해 어업을 대상으로 취약성 분석을 수행한 결과, **RCP 8.5에서는 연안개량안강망, 연안선망, 연안들망 등의 연안어업과 근해안강망, 근해장어통발 등 일부 근해어업의 취약성이 높게** 나타났다.
- 두 시나리오(RCP 8.5와 4.5)에서 모두 **근해어업보다는 연안어업에서 취약성이 높게** 나타나 연안어업에 대한 기후변화 적응 대책이 더욱 필요할 것으로 판단된다.
- 우리나라 주요 해면 양식품종 14종에 대하여 양식업 취약성 평가를 수행하였다. RCP 8.5와 4.5 사이에 큰 차이는 나타나지 않았지만, **취약성이 가장 높은 종은 김, 미역과 같은 해조류**였다. 그 다음은 바지락과 멍게의 취약성이 높게 나타났다.
- 국립수산과학원은 **2015년부터 2019년까지 해역별로 설문 및 탐문을 통하여 기후변화에 대한 어업인 인식을 조사**하였다.
- 전체 어업인 조사자 중 **약 85.7%가 기후변화가 어업에 부정적인 영향을 준다고 답하였으며, 부정적인 요인으로는 생산량 감소**를 가장 많이 답변하였으며, 그 외 상품성 하락이 기후변화의 부정적 영향으로 답하였다.
- **기후변화 요소 중 어업에 가장 큰 영향을 주는 것으로는 수온 변화**를 가장 큰 요인으로 들었으며, 그 외 해적생물 출현 빈도와 피해 범위도 높은 요인으로 답변하였다.
- **어선어업 종사 어업인이 원하는 기후변화 대응책은** 해역별로 큰 차이를 보였는데 **남해와 서해는 해양환경 개선 및 관리를, 동해는 목표 어종 전환 및 조업시기 및 구역 변경**으로 나타났다.
- **양식어업 종사 어업인이 원하는 기후변화 대응책은** 남해의 경우 재해 대비 양식시설 개선을, 동해와 서해는 양식방법 개선으로 나타났다.

미래 우리나라 바다는 어떻게 변할까?

- **국립수산과학원에서는 ROMS 모델을 기반으로** 우리나라 주변해역의 10km 공간 해상도, 30개 연직층에 대한 **해양 기후모델을 구축**하였다.
- RCP 8.5 시나리오를 기반으로 2100년까지 수온 변동을 살펴본 결과, **우리나라 주변 수온이 약 4~5℃ 상승**하는 것을 확인하였다. **해역별로는 서해와 동해의 온난화 경향이 크게** 나타났으며, 남해가 상대적으로 낮은 상승 정도를 보였다.
- RCP 4.5 시나리오에서는 우리나라 주변 수온이 **2100년까지 현재 대비 약 2℃ 내외 상승**하는 것을 확인하여 온실가스 감축 결과에 따라 우리나라 해역의 수온 상승정도를 상당부분 억제할 수 있음을 확인하였다.
- RCP 8.5 시나리오 상에서 2050년 이후로는 수온약층보다 깊은 수심에서도 기후변화 영향이 나타나며, **2100년에는 수심 100m에서도 수온 상승이 높게 나타남**을 확인하였다.
- **2100년까지 표층 염분의 경우, RCP 8.5가 RCP4.5 보다 저염화 되는 경향**이 있으며, 양자강 남부 연안 및 발해만 해역은 고염화 경향이 나타남을 확인하였다.
- 구축된 해양기후모델을 기반으로 주요 어종의 산란장 변화를 고찰한 결과, **살오징어**의 경우 2100년에는 RCP 8.5 시나리오 상에서 **가을 산란군의 산란장 영역이 축소**될 것으로 전망된 반면, **겨울 산란군에서는 산란장 영역이 확장되는 것으로 전망**되었다.
- **고등어**의 경우, 2100년에 RCP 8.5 시나리오 상에서 **산란장 영역이 더 넓게 확대**될 것으로 전망되었다. 하지만 살오징어 및 고등어의 **산란장 변화가 자원량 변화로 연결될 지는 향후 연구가 필요**한 부분이다.
- 해양기후모델을 기반으로 주요 양식생물의 양식 적지 변화를 고찰한 결과, **넙치의 경우 2100년까지 제주도 및 동해 연안의 양식적합도가 뚜렷이 감소**하는 것으로 나타났으며, **참돔의 경우 2100년까지 서해 쪽으로 양식적합 해역이 확장**되는 것으로 나타났다.
- **우렁쉥이의 경우 2100년까지 양식적합 해역이 점차 감소**하여 남해 및 강원 일부 해역을 제외하고는 양식적합도가 낮게 나타났고, **참전복의 경우 2100년까지 현재의 양식 적합해역에서의 양식 적합도가 급격하게 감소**하는 것으로 나타났다.

제 7장 ▶ 결언

제 7장 _ 결언

전 세계는 기후변화에 의한 영향과 향후 다가올 리스크에 대비하기 위하여 다양한 대응책을 마련하고 있다. IPCC, 기후변화 당사국 총회(COP; Conference of the Parties), UN 기후변화협약(UNFCCC; UN Framework Convention on Climate Change) 등은 다양한 기후변화 관련 협약과 보고서, 계획 등을 만들어 국제 사회의 동참을 유도하고 있다. 또한 UN에서는 지속가능한 발전 목표(SDGs; Sustainable Development Goals)를 설정하고 이를 확산하고 달성하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 17가지의 주요 목표에는 “기후변화와 그 영향을 방지하기 위한 긴급한 행동 실시”와 “지속가능 개발을 위한 대양, 바다 및 해양자원의 보존 및 지속가능한 사용”은 본 백서와 밀접한 관련이 있다.

이미 산업혁명 이후 전 세계 해양은 인위적인 기후변화로 인하여 다양한 부정적 영향을 받고 있다. 해양의 온난화 속도는 더욱 빨라지고 있으며, 해수면 상승은 최근 남극 빙상의 손실로 인하여 급상승할 수 있는 위기에 놓여 있다. 표층 부근의 해양산성화와 산소 손실, 영양염 공급 감소 등은 해양생태계를 심각한 위기에 놓이게 하고 있다. 이와 같은 원인에 따른 해양생물과 수산생물의 서식지 이동, 생체량 감소, 잠재 어획량 감소 등은 향후 많은 나라, 특히 수산생물로부터 단백질 공급을 의존하는 공동체를 중심으로 심각한 식량 안보 위기에 처하게 할 것이다.

파리협약을 통하여 온실가스 감축 국제 합의를 도출하는 등 많은 국제적 노력을 기울이고 있지만, 해양온난화, 해양산성화, 해수면 상승, 표층부의 성층 강화, 급격한 해양 현상 발생 등은 앞으로 더욱 심화될 전망이다. 따라서 우리나라에서도 기후변화 적응 대책 등 관계 부처의 노력을 통하여 기후변화 리스크를 줄이기 위한 다양한 대책 및 사업을 구상하고 있다.

본 백서는 최근 5년간 국립수산과학원을 중심으로 수행된 “수산분야 기후변화 연구”의 결과를 집대성한 자료로서 우리나라 해역의 기후변화에 따른 변화 이해와 급격한 해양 현상 발생 경향, 수산분야의 취약성 확인, 미래 우리나라 해역의 변화상을 이해하는데 매우 중요하며, 정책적으로 활용이 클 것으로 판단된다.

우리나라 수산업은 1980년대를 정점으로 어선어업의 어획량이 급감하고 있으며, 2000년대에 접어들면서

이상수온 및 유해생물에 의한 양식업의 피해도 급격하게 증가하고 있다. 어획가능 면적에 비하여 월등히 높은 어획강도와 밀집된 해역에서의 양식업 집중 현상은 기후변화에 대한 수산업의 취약성을 높이고 있다. 또한 우리나라 해역은 전 세계에서 가장 수온 상승률이 높은 해역중 하나이며, 최근에는 이상고수온 주요 발생해역으로도 알려져 있다.

하지만, 관련된 연구는 매우 제한적이며 우리나라의 해양생태계와 수산업이 기후변화에 대하여 어떤 영향을 받고, 어떤 리스크에 놓여있는가를 확인하기 어려운 부분이 있다. 국립수산과학원에서는 향후 5년 주기마다 “수산분야 기후변화 평가 백서”를 발간할 예정이며, 이는 우리나라 바다의 변화상을 이해하는데 매우 중요하리라 생각된다.

2021년부터 해양수산부의 제 4차 기후변화 대응 해양수산부문 종합계획이 새롭게 시작되게 된다. 5년 전에 수립하였던 계획과 달리 이번 계획에는 온실가스 배출 저감과 관련된 전 지구 이행점검, 급격한 해양변화 현상 급증 대응, 상세 기후변화 리스크 도출 등이 중요하게 논의될 시점이다. 수산업은 특히 기후변화 적응이라는 분야에서 매우 중요하며, 국민들의 생계, 물가와 직접적인 관련이 높아 사회적인 관심 또한 높은 산업이다.

종사 인구의 고령화와 수산업 주변 환경 악화 등 다양한 인위적인 영향과 함께 기후변화가 수산업에 부정적인 요인으로 작용하고 있는 것은 수산업의 장기적인 부흥을 위한 대책 마련에 어려움으로 다가오고 있다.

본 백서를 통하여 정책 결정자에게는 장기적인 수산자원 및 수산업의 관리, 보전, 보존을 위한 설계 마련에, 어업인과 관련 종사자들에게는 기후변화에 대한 인식 제고를, 학계에는 기후변화 관련 연구를 위한 기초자료로 활용되기를 희망한다.

참고문헌

관계부처 합동, 2015: 제2차 국가기후변화 적응대책 2016-2020, 243p.(Korean)

관계부처합동, 2017: 2016년 이상기후 보고서, *기상청*, 190p.

관계부처합동, 2018: 2017년 이상기후 보고서, *기상청*, 217p.

관계부처합동, 2019: 2018년 이상기후 보고서, *기상청*, 198p.

국립수산과학원, 2016: 기후변화가 수중생태계 구조에 미치는 영향 및 예측기술 개발.

김대혁, 2016: 동해와 태평양의 열용량 장기변동, 공주대학교, 석사학위논문, 1p.

김도훈, 최예은, 김홍식, 박현지, 2016: 기후변화에 따른 수산분야 경제학적 분석. *국립수산과학원*.

김봉태, 육근형, 기해경, 박혜진, 배기환, 권오민, 2016a: 수산업의 기후변화 영향 및 취약성 평가 기법 개발, *국립수산과학원*.

김봉태, 이준수, 서영상, 2016b: RCP 시나리오에 따른 남해안 어업 및 어종의 기후변화 노출 분석 : 수온 변동을 대상으로, *수산경영론집*, 47(4), 31-44.

김주연, 한인성, 2017: 2016년 8월 폭염에 따른 표층수온의 지연시간 고찰, *해양환경안전학회지*, 23(6), 677-683.

농림수산식품부, 2014: 기후변화 영향·취약성평가 법적 근거 최초 마련, *농식품부*, 보도자료, 2014. 11. 20.(Korean)

윤상철, 2015: 동중국해 북부해역 및 동해의 해양환경 장기변동 특성, 박사학위 논문, 189p.

이희일, 신임철, 2010: 기후변화가 해양에 미친 영향; 고기후학의 관점에서, *한국기상학회지*, 20(3), 479-386.

조양기, 2004: 해양과 대기사이에 어떤 일이?, 물리학과 첨단기술, 12p.

한국수산자원관리공단, 2014: 기후변화 대응 수산자원관리 방안, 80p.

해양수산부, 2017: 적조 또는 이상 수온 발생해역 양식어류 긴급방류 지침, *해양수산부*, 13p.

Abraham, J. P., M. Baringer, N. L. Bindoff, T. Boyer, L. J. Cheng, J. A. Church, J. L. Conroy, C. M. Domingues, J. T. Fasullo, J. Cilson, G. Goni, S. A. Good, J. M. Gorman, J. M. Gorman, V. Gouretski, M. Ishii, G. C. Johnson, S. Kizu, J. M. Lyman, A. M. Macdonald, W. J. Minkowycz, S. E. Moffitt, M. D. Palmer, A. R. Piola, F. Reseghetti, K. Schuckmann, K. E. Trengerth, I. Velicogna and J. K. willis, 2013: A review of global ocean temperature observation : implications for ocean heat content estimates and climate change, *American Geophysical Union*, 8755-1209/13/10.1002/rog/20022.

Ahn H. J., Y. Yoshiaki, O. Akihiro, H. Noriyuki, M. Naomi, T. Satoru and T. Katsumi, 2012: Effect of water temperature on embryonic development and hatching time of the japanese eel *Anguilla japonica*, *Aquaculture*, 330-333, 100-105.

Alexander, M. A., J. D. Scott, K. D. Friedland, K. E. Mills, J. A. Nye, A. J. Pershing and A. C. Thomas, 2018: Projected sea surface temperatures over the 21 st century: Changes in the mean, variability and extremes for large marine ecosystem regions of Northern Oceans, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6(1), 9, doi:10.1525/elementa.191.

Allison E. H., A. L. Perry, M. C. Badjeck, W. N. Adger, K. Brown, D. Conway, A. S. Halls, G. M. Pilling, J. D. Reynolds, N. L. Andrew and N. K. Dulvy, 2009: Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries, *Fish and Fisheries*, 10, 73.196.

Baker-Austin, C., J. A. Trinanes, N. J. H. Taylor, R. Hartnell, A. Siitonen and J. Martinez-Urtaza, 2013: Emerging Vibrio risk at high latitudes in response to ocean warming, *Nature Climate Change*, 3(1), 73-77, doi:10.1038/nclimate1628.

Beardsley, R., R. Limeburner, H. Yu and G. Cannon, 1985: Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea, *Continental Shelf Research*, 4, 57-76.

Bell, J. D., J. E. Johnson, A. S. Ganachaud, P. C. Gehrke, A. J. Hobday, O. Hoegh-Guldberg, L. R. Borgne, P. Lehodey, J. M. Lough, T. Pickering, M. S. Pratchett, and M. Waycott, 2011: Vulnerability of tropical Pacific fisheries and aquaculture to climate change: summary for Pacific island countries and territories, Noumea, *Secretariat of the Pacific Community*.

Benthuysen, J. A., E. C. J. Oliver, M. Feng and A. G. Marshall, 2018: Extreme Marine Warming Across Tropical Australia During Austral Summer 2015–2016, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123 (2), 1301-1326, doi:10.1002/2017JC013326.

Berrisford, P., P. Kållberg, S. Kobayashi, D. Dee, S. Uppala, A. J. Simmons, P. Poli and H. Sato, 2011: Atmospheric conservation properties in ERA-Interim, *Quarterly Journal of the Rpyal Meteorolgical Society*, 137: 1381–1399, doi: 10.1002/qj.864.

Bindoff, N. L., J. Willebrand, V. Artale, A, Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C. K. Shum, L. D. Talley and A. Unnikrishnan, 2007: Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. ontribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Blasiak R., J. Spijkers, K. Tokunaga, J. Pittman and H. Yagi Osterblom, 2017: Climate change and marine fisheries: Least developed countries top global index of vulnerability,PLoS ONE 12(6): e0179632. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179632.

Bond, N. A., M. F. Cronin, H. Freeland and N. Mantua, 2015: Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific, *Geophysical Research Letters*, 42(9), 3414-3420, doi:10.1002/2015gl063306.

Brainard, R. E., C. Birkeland, C. M. Eakin, P. McElhany, M. W. Miller, M. Patterson and G. A. Piniak, 2011: Status Review Report of 82 Candidate Coral Species Petitioned Under the U.S. Endangered Species Act, NOAA Technical Memorandum, *Pacific Islands Fisheries Science Center*, 530p.

Brander, K., K. Cochrane, M. Barange and D. Soto, 2017: Climate Change Implication for Fisheries and Aquaculture, In B. F. Phillips, M. Perez-Ramirez, Climate Change Impacts on Fisheries and Aquaculture, *Wiley Balckwell*, 1.

Broecker, W. S., T. Takahashi, H. J. Simpson and T. H. Peng, 1979: Fate of fossil fuel carbon dioxide and the global carbon budget, *Science*, 206, 409-418.

Brugere, C. and C. D. Young, 2015: Assessing climate change vulnerability in fisheries and aquaculture, *FAO Fisheries and aquaculture technical paper* 597p.

Carton, J. A. and B. S. Giese, 2008: A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA), *Monthly Weather Review*, 136, 2999-3017.

Chen, C. T. A., H. K. Lui, C. H. Hsieh, T. Yanagi, N. Kosugi, M. Ishii and G. C. Gong, 2017: Deep oceans may acidify faster than anticipated due to global warming, *Nature Climate Change*, 7, 890-894.

Chen, H. and J. Sun, 2013: Projected change in East Asian summer monsoon precipitation under RCP scenario, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 121, 55-77.

Cheng, L., J. Abraham, Z. Hausfather and K. E. Trenberth, 2019: How fast are the oceans warming? Science, 363, 128–29, https://doi.org/10.1126/science.aav7619.

Christian, J. R. and T. Ono, 2018: Ocean Acidification and Deoxygenation in the North Pacific Ocean, *PICES Special Publication* 6, 101p.

Choi J. H. and W. G. Park, 2013: Variations of marine environments and zooplankton biomass in the Yellow Sea during the past four decades, *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 25(5), 1046-1054.

Cinner J. E., T. R. McClanahan, N. A. J. Graham, T. M. Daw, J. Maina, S. M. Stead, A. Wamukota, K. Brown and Ö. Bodin, 2012: Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries, *Global Environmental Change*, 22(1), 12-20.

Cinner, J., T. McClanahan, A. Wamukota, E. Darling, A. Humphries, C. Hicks, C. Huchery, N. Marshall, T. Hempson, N. Graham, O. Bodin, T. Daw and E. Allison, 2013: Social.ecological vulnerability of coral reef fisheries to climatic shocks, *FAO Fisheries and Aquaculture Circular*, 1082, (also available at www.fao.org/docrep/018/ap972e/ap972e00.htm).

Cochrane, K., C. De Young, D. Soto and T. Bahri, 2009: Climate change implications for fisheries and aquaculture: overview of current scientific knowledge, *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, 530, 212p. (also available at www.fao.org/docrep/012/i0994e/i0994e00.htm).

Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J. L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W. J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, X. Shongwe, C. Tebaldi, A. J. Weaver, M. F. Wehner, M. R. Allen, T. Andrews, U. Beyerle, C. M. Bitz, S. Bony and B. B. B. Booth, 2013: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1029–1136.

Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald and J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Doubleday, Z. A., S. M. Clarke, X. Li, G. T. Pecl, T. M. Ward, S. C. Battaglene, S. Frusher, P. Gibbs, A. J. Hobday, N. Hutchinson, S. M. Jennings and R. Stoklosa, 2013: Assessing the risk of climate change to aquaculture: a case study from south-east Australia, *Aquaculture Environment Interactions*, 3, 163-175.

Eakin, H. and A. L. Luers, 2006: Assessing the vulnerability of social-environmental systems, *Annual Review of Environment and Resources*, 31, 365-394.

Ehret, U., E. Zehe, V. Wulfmeyer, K. Warrach-Sagi and J. Liebert, 2012: "Should we apply bias correction to global and regional climate model data?", *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3391-3404, doi:10.5194/hessd-16-3391-2012.

FAO, 2013: Module 10: Climate-smart fisheries and aquaculture.

FAO, 2015: Assessing climate change vulnerability in fisheries and aquaculture: Available methodologies and their relevance for the sector, by Cecile Brugere and Cassandra De Young, *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*, 597p.

FAO, 2014: The State of World Fisheries and Aquaculture, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, 2016, 190p.

Fischer, E. M. and R. Knutti, 2015: Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes, *Nature Climate Change*, 5(6), 560-564, doi:10.1038/nclimate2617.

Frölicher, T. L., E. M. Fischer and N. Gruber, 2018: Marine heat waves under global warming, *Nature*, 560(7718), 360-364, doi:10.1038/s41586-018-0383-9.

Frölicher, T. L. and C. Laufkötter, 2018: Emerging risks from marine heat waves, *Nature Communications*, 9(1), 650, doi:10.1038/s41467-018-03163-6.

Garcia, H. E., K. Weathers, C. R. Paver, I. Smolyar, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, M. M. Zweng, A. V. Mishonov, O. K. Baranova, D. Seidov and J. R. Reagan, 2018: World Ocean Atlas 2018, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation, A. Mishonov Technical Ed.; *NOAA Atlas NESDIS* 83, 38p.

Gattuso, J. P., O. Hoegh-Guldberg and H. O. Pörtner, 2014: Cross-chapter box on coral reefs. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 97-100.

Giorgi, F. and L. O. Mearns, 1991: Approaches to the simulation of regional climate change: A review, Reviews of Geophysics, 29(2), 191–216, doi:10.1029/90RG02636.

Han, I. S., J. S. Lee, J. Y. Kim and J. Y. Hong, 2019: High frequency variation of low water temperature due to Arctic Oscillation around the Wester and Southern coast of Korea during winter 2017/2018, *Journal of Korean Society of Marine Environment and Safety*, 25(3), 328-333.

Handisyde, N., L. Ross and T. Telfer, 2017: Vulnerability of aquaculture related livelihoods to changing climate at the global scale, *Fish and Fisheries*, 18(3), 466-488.

Handisyde, N. T., L. G. Ross, M. C. Badjeck and E. H. Allison, 2006: The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective. Final Technical Report, Stirling, UK, *Stirling Institute of Aquaculture*, 151p. (also available at www.aquaculture.stir.ac.uk/public/GISAP/pdfs/Climate_full.pdf).

Hobday, A. J., L. V. Alexander, S. E. Perkins, D. A. Smale, S. C. Straub, E. C. J. Oliver, J. Benthuysen, M. T. Burrows, M. G. Donat, M. Feng, N. J. Holbrook, P. J. Moore, H. A. Scannell, A. S. Gupta and T. Wernberg, 2016: A hierarchical approach to defining marine heatwaves, *Progress in Oceanography*, 141, 227-238, doi:10.1016/j.pocean.2015.12.014.

Hoegh-Guldberg, O., R. Cai, E. S. Poloczanska, P. G. Brewer, S. Sundby, K. Hilmi, V. J. Fabry and S. Jung, 2014: The Ocean. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 655-1731.

IPCC, 2001: Climate Change 2001: impacts, adaptation & vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, 2001.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Working Group II: Impacts, Adaptation, Vulnerability, Appendix 1: Glossary, (also available at www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/annexessannex.i.html).

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 151p.

IPCC, 2018: Special report Global warming of 1.5°C, IPCC WG-I&II&III, 625p.

IPCC, 2019: Special report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, IPCC WG-I&II, 1168p.

John A. Hargreaves1, 2013: Biofloc Production Systems for Aquaculture, *SRAC Publication*, 4503, USDA, April.

John M. L., S. A. Good, V. V. Gouretski, M. Ishii, G. C. Johnson, M. D. Palmer, D. M. Smith and J. K. Willis, 2010: Robust warming of the global upper ocean, *Nature*, 465, doi:10.1038/nature09043.

Johnson, D. R. and T. P. Boyer, 2015: East Asian Seas Regional Climatology (Version 2), *National Centers for Environmental Information*, NOAA, USA, dataset doi: 10.7289/V5MP5171.

Kataoka, T., T. Tozuka, S. Behera and T. Yamagata, 2014: On the Ningaloo Niño/Niña. *Climate Dynamics*, 43(5), 1463-1482, doi:10.1007/s00382-013-1961-z.

Kim K. H., Y. J. Hwang and S. R. Kwon, 2001: Influence of daily water temperature changes on the chemiluminescent response and mortality of cultured rockfish *Sebastes schlegeli*. Aquaculture, 192, 93-99.

Kim, K, K. R. Kim, Y. G. Kim, Y. K. Cho, D. J. Kang, M. Takematsu and Y. Volkov, 2004: Water masses and decadal variability in the East Sea (Sea of Japan), *Progress in Oceanography - PROG OCEANOGR*. 61. 10.1016/j.pocean.2004.06.003.

Kim, T. W., K. Lee, R. A. Feely, C. L. Sabine, C. T. Chen, H. J. Jeong, and K. Y. Kim, 2010: Prediction of East/Japan Sea acidification over the past 40 years using a multiple-parameter regression model, *Global Biogeochemical Cycles*, 24, doi:10.1029/2009GB003637.

Korea Maritime Institute, Development of climate change impact and vulnerability assessment method in fisheries, *National Institute of Fisheries Science*, 2016, 108p.(Korean).

Korea Rural Economic Institute, 2017: Food supply and demand table 2015, 313p.(Korean).

KOSIS, 2019: Korean statistical information service, http://kosis.kr.

Le Treut, H., R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather, 2007: Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Lee, B. D., B. T. Kim, Y. S. Cho, 2011: A Study on Vulnerability Assessment to Climate Change in Regional Fisheries of Korea, *The Korean Society of Fisheries Business Administration*, 42(1), 57-70.(Korean).

Lee, T. and K. H. Kim, 1998: A study on the origin of anomalous low saline Tsushima Current water using 228Ra, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 3, 175-182.

Levitus, S., J. L. Antonov, T. P. Boyer, O. K. Baranova, H. E. Garcia, R. A. Locarnini, A. V. Mishonov, J. R. Reagain, D. Seidov, E. S. Yarosh and M. M. Zweng, 2012: World ocean heat content and thermosteric sea level change(0-2000 m), 1955-2010, *Geophysical Research letter*, 39:L10603.

Li, A., F. Yu, G. Si and C. Wei, 2017: Long-term variation in the salinity of the Southern Yellow Sea Cold Water Mass, 1976–2006, *Journal of Oceanography*, (3): 321. https://doi.org/10.1007/s10872-016-0405-x.

Lie, H., C. Cho, J. Lee and S. Lee, 2003: Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea, *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.1029/2001JC001194.

Lima, F. P. and D. S. Wethey, 2012: Three decades of high-resolution coastal sea surface temperatures reveal more than warming, *Nature Communications*, 3, 704, doi:10.1038/ncomms1713.

Lin, C, X Ning, J Su, Y Lin and B Xu, 2005: Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976-2000, *Journal of Marine Systems*, 55, 223-234.

Mao, H. L., T. C. Kan and S. F. Lan, 1963: A preliminary study of the Yangtze diluted water and its mixing processes, *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 5, 183-206.

Michael J. O., 1998: Bay scallop culture, *Archives VIMS*, 57.

Mills, K., A. Pershing, C. J. Brown, Y. Chen and F. S. Chiang, 2013: Fisheries Management in a Changing Climate: Lessons From the 2012 Ocean Heat Wave in the Northwest Atlantic, *Journal of Oceanography*, 26(2), 191-195, doi:10.5670/oceanog.2013.27.

Ning, X., C. Lin, J. Su, C. Liu, Q. Hao and F. Le, 2011: Long-term changes of dissolved oxygen, hypoxia, and the responses of the ecosystems in the East China Sea from 1975 to 1995, *Journal of Oceanography*, 67(1), 59-75.

Oliver, E. C. J., M. G. Donat, M. T. Burrows, P. J. Moore, D. A. Smale, L. V. Alexander, J. A. Benthuysen, M. Feng, A. Sen Gupta, A. J. Hobday, N. J. Holbrook, S. E. Perkins-Kirkpatrick, H. A. Scannell, S. C. Straub and T. Wernberg, 2018: Longer and more frequent marine heatwaves over the past century, *Nature Communications*, 9(1), 1324, doi:10.1038/s41467-018-03732-9.

Oliver, E. C., 2019: Mean warming not variability drives marine heatwave trends, *Climate Dynamics*, 1-7, doi:10.1007/s00382-019-04707-2.

Pearce, A. F. and M. Feng, 2013: The rise and fall of the “marine heat wave” off Western Australia during the summer of 2010/2011, *Journal of Marine Systems*, 111-112, 139-156, doi:10.1016/j.jmarsys.2012.10.009.

Peck M. A., L. J. Bickley and D. A. Bengtson, 2005: Effects of temperature, body size and feeding on rates of metabolism in young-of-the-year haddock, *Journal of Fish Biology*, 66, 911-923.

Pörtner, H.-O., D. M. Karl, P. W. Boyd, W. W. L. Cheung, S. E. Lluch-Cota, Y. Nojiri, D. N. Schmidt and P. O. Zavialov, 2014: Ocean systems. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 411-484.

Ramírez, I. J. and F. Briones, 2017: Understanding the El Niño Costero of 2017: The Definition Problem and Challenges of Climate Forecasting and Disaster Responses, *International Journal of Disaster Risk Science*, 8(4), 489-492, doi:10.1007/s13753-017-0151-8.

Revelle, R. and H. E. Suess, 1957: Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO_2 during the past decades, *Tellus*, 9, 18-27.

Rhein, M., S. R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R. A. Feely, S. Gulev, G. C. Johnson, S. A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L. D. Talley and F. Wang, 2013: Observations: Ocean. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Rho, T., T. Lee and S. An, 2016: Dissolved oxygen and nutrients. In: Chang K I, Zhang C I, Park C, Kang D J, Ju S J, Lee S H, Wimbush M eds. Oceanography of the East Sea (Japan Sea), *Springer*, Cham. 149–168.

Richardson, A. J. and E. S. Poloczanska, 2008: Underresourced, under threat, *Science*, 320, 1294-1295.

Ruckelshaus, M., S. C. Doney, H. M. Galindo, J. P. Barry, F. Chan, J. E. Duffy, C. A. English, S. D. Gaines, J. M. Grebmeier, A. B. Hollowed, N. Knowlton, J. Polovina, N. N. Rabalais, W. J. Sydeman and L. D. Talley, 2013: Securing ocean benefits for society in the face of climate change, *Marine Policy*, 40, 154-159, https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.01.009.

Sabine, C. L., R. A. Feely, N. Gruber, R. M. Key, K. Lee, J. L. Bullister, R. Wanninkhof, C. S. Wong, D. W. R. Wallace, B. Tilbrook, F. J. Millero, T. H. Peng, A. Kozyr, T. Ono and A. F. Rios, 2004: The oceanic sink for anthropogenic CO_2, *Science*, 305, 367-371.

Scannell, H. A., A. J. Pershing, M. A. Alexander and A. C. Thomas, 2016: Frequency of marine heatwaves in the North Atlantic and North Pacific since 1950, *Geophysical Research Letters*, 43(5), 2069-2076, doi:10.1002/2015GL067308.

Shimizu, Y., T. Iwao, I. Yasuda, S. Ito, T. Watanabe, K. Uehara, N. Shikama and T. Nakano, 2004: Formation process of North Pacific intermediate water revealed by profiling floats set to drift on 26.7 σθ isopycnal surface, *Journal of Oceanography*, 60(2), 453–462.

Siwila, S., M. Teferi Taye, P. Quevauviller and P. Willems, 2013: 'Climate change impact investigation on hydro-meteorological extremes on Zambia's Kabompo catchment', *AQUA mundi,* Am07057, 29-40.

Smale, D. A. and T. Wernberg, 2013: Extreme climatic event drives range contraction of a habitat-forming species, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 280(1754), 20122829, doi:10.1098/rspb.2012.2829.

Smale, D. A., T. Wernberg, E. C. J. Oliver, M. Thomsen, B. P. Harvey, S. C. Straub, M. T. Burrows, L. V. Alexander, J. A. Benthuysen, M. G. Donat, M. Feng, A. J. Hobday, N. J. Holbrook, S. E. Perkins-Kirkpatrick, H. A. Scannell, A. S. Gupta, B. L. Payne and P. J. Moore, 2019: Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services, *Nature Climate Change*, 9, 306–312, doi:10.1038/s41558-019-0412-1.

Stoner, A. M. K., K. Hayhoe, X. Yang and D. J. Wuebbles, 2013: An asynchronous regional regression model for statistical downscaling of daily climate variables, *International Journal of Climatology*, 33(11), 2473–2494, doi:10.1002/joc.3603.

Talley, L., Y. Nagata, M. Fujimura, T. Kono, D. Inagake, M. Hirai and K. Okuda, 1995: North Pacific intermediate water in the Kuroshio/Oyashio mixed water region, *Journal of Physical Oceanography*, 25, 475–501.

Taylor, K. E., R. J. Stouffer and G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design, *American Meteorological Society*, 93, 485–498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Trenberth, K. E., J. T. Fasullo and M. A. Balmaseda, 2014: Earth's energy imbalance, *Journal of Climate*, 27, 3129–144, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00294.1.

Von Schuckmann, M. D. Palmer, K. E. Trenberth, A. Cazenave, D. Chambers, N. Champollion, J. Hansen, S. A. Josey, N. Loeb, P.-P. Mathieu, B. Meyssignac and M. Wild, 2016: An imperative to monitor Earth's energy imbalance, *Nature Climate Change*, 6, 138–144, https://doi.org/10.1038/nclimate2876.

Walsh, J. E., R. L. Thoman, U. S. Bhatt, P. A. Bieniek, B. Brettschneider, M. Brubaker, S. Danielson, R. Lader, F. Fetterer, K. Holderied, K. Iken, A. Mahoney, M. McCammon and J. Partain, 2018: The high latitude marine heat wave of 2016 and its impacts on Alaska, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(1), S39-S43, doi:10.1175/bams-d-17-0105.1.

Wang, J. and V. R. Kotamarthi, 2015: High-resolution dynamically downscaled projections of precipitation in the mid and late 21st century over North America, *Earth's Future*, 3, 268–88, doi:10.1002/2015EF000304.

Wedemeyer G. A., 1996: Physiology of fish in intensive culture system, *Chapman & Hall*, New York, 232p.

Wernberg, T., S. Bennett, R. C. Babcock, T. D. Bettignies, K. Cure, M, M. Depczynski, F. Dufois, J. Fromont, C. J. Fulton, R. K. Hovey, E. S. Harvey, T. H. Holmes, G. A. Kendrick, B. Radford, J. Santana-Garcon, B. J. Saunders, D. A. Smale, M. S. Thomsen, C. A. Tuckett, F. Tuya, M. A. Vanderklift and S. Wilson, 2016: Climate-driven regime shift of a temperate marine ecosystem, *Science*, 353(6295), 169-172, doi:10.1126/*science*.aad8745.

White, R. H. and R. Toumi, 2013: The limitations of bias correcting regional climate model inputs, *Geophysical Ressearch Letters*, 40(12), 2907–2912, doi:10.1002/GRL.50612.

Zhang F. S., Y. C. He, X. S. Liu, J. H. Ma, S. Y. Li and L. X. Qi, 1986: A report on the introduction spat-rearing and experimental culture of bay scallop, Argopecten irradians Lamarck, *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 17, 367-374.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 해양수산부 국립수산과학원에서 수행한 보고서 입니다.
2. 보고서의 내용을 대외적으로 게제, 인용할 때에는 반드시 국립수산과학원의 사전 허락을 받기 바라며, 무단 복제를 금합니다.

수산분야 기후변화 평가 백서

Assessment Report on Fisheries Impacts in a Changing Climate

발 행 일 : 2019년 12월

발 간 : 해양수산부 국립수산과학원

편 집 인 : 국립수산과학원장 최 완 현

저 자 : 한인성, 이준수, 김중진, 도용현, 박명희, 고우진 (이상 국립수산과학원),
이기택(포항공대), 김도훈, 김봉태(이상 부경대), 박경동(수산자원생태연)

발 행 처 : 국립수산과학원 기후변화연구과
부산광역시 기장군 기장읍 기장해안로 216
TEL: 051-720-2230

디자인·인쇄 : 메이플디자인/도서출판 메이플
TEL: 051-257-0302, http://mapledesign.blog.me