

2022 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서

Annual report for Climate change Trends in fisheries, 2022

2022
수산분야 기후변화 영향
및 연구 보고서

ACT Fish 2022

ACT Fish 2022



2022 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서

Annual report for Climate change Trends in fisheries, 2022

ACT Fish 2022





“

우리나라 해역과 수산업에 대해

기후변화가 미치는 영향과 미래 전망, 기후변화 대응을 위한 연구결과 등을 종합하여

“2022 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서”를 발간하게 되었습니다.

”

최근 지구촌 곳곳에서 기후변화와 이상기후로 인한 피해 소식이 들려오고 있습니다. 가속화되는 기후 위기를 막기 위한 2021년 글래스고 기후 합의에도 불구하고 실질적인 합의 이행 가능성과 얼마 남지 않은 기후위기 골든타임에 대해 전 세계는 불투명한 미래를 우려하고 있습니다.

우리나라도 온실가스 감축 목표 설정, 기후변화 적응 정책 수립 등 다양한 정책적 노력을 기울이고 있으며, 기후변화 적응을 위한 연구개발과 조사·예측 능력 향상 등의 과학적 노력을 추진하고 있습니다. 하지만 우리나라 해역은 전 세계에서 수온상승률이 가장 높은 해역 중 하나이고, 연근해 해역에서 높은 어획강도로 어업이 이루어지며, 수심이 얕은 내만과 연안에 양식 시설이 밀집되어 있는 등 기후변화에 따른 수산업의 취약성이 매우 높은 해역입니다.

뿐만 아니라 어가인구의 감소와 고령화, 수산물 소비 부진, 유통비 상승 등 다양한 기후 외적인 요소가 복합되면서 그러지 않아도 어려움을 겪고 있는 수산업은 심화되는 기후변화에 의해 더욱 큰 위기에 놓여있다고 말할 수 있습니다.

국립수산과학원은 이러한 여건을 감안하여 최근 우리나라 해역과 수산업에 대해 기후변화가 미치는 영향과 미래 전망, 기후변화 대응을 위한 연구결과 등을 종합하여 “2022 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서”를 발간하게 되었습니다. 일부 미진한 부분이 있겠지만 장단기적인 기후변화 대응 정책 수립, 어업현장에서 기후변화에 따른 피해 최소화 및 해양수산부문의 기후변화 영향 이해에 도움이 되기를 기대합니다.

향후 국립수산과학원은 전년도에 수행된 기후변화와 관련된 조사·예측 관련 연구 결과를 정리하여 매년 연보 형태로 보고서를 발간할 예정입니다. 아무쪼록 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서가 정책·어업·연구 현장에서 기후위기 대응의 초석이 되기를 기원합니다.

2022년 09월

국립수산과학원장 우 동 식

CONTENTS

기후변화 장기 경향 및 2021 수산분야 기후변화 주요 이슈	6
정책결정자 및 어업인을 위한 요약	9
제1장 해양수산분야 기후변화 국내외 동향	17
1-1. 국외 기후변화 정책 · 과학적 동향	18
1-2. 국내 기후변화 정책 · 과학적 동향	21
제2장 기후변화의 해양환경 및 생태계 영향	25
2-1. 수온 · 염분 장기변동 경향 및 이상수온 발생	26
2-2. 해양산성화, 빈산소수괴 및 화학적요소 변화	29
2-3. 유해생물 출현 및 기초생산력 변화	33
2-4. 해양자료 복원을 통한 장기 해양변화 데이터베이스 구축	37
2-5. 한국 주변해역 기후변화 미래 전망	38
제3장 한국 주변해역의 수산자원 변화	41
3-1. 연근해 어업생산량 변동 및 어종 변화	42
3-1-1. 어업생산량 변동	42
3-1-2. 주요 어종의 어획량 변화	43
3-1-3. 주요 어종별 어장 변화	45
3-1-4. 자원조사를 통한 어종 변화 파악	46
3-2. 아열대성 수산 · 해양생물 출현	47
3-2-1. 아열대 수산생물의 변화	47
3-2-2. 아열대 해양생물의 변화	51
3-3. 수산자원 분야 기후변화 미래 전망	52
제4장 기후변화 대응 양식업 적응능력 강화	55
4-1. 양식업 생산성 동향 및 이상기후 피해 현황	56
4-1-1. 어패류 및 해조류 양식 생산량 변동	56
4-1-2. 이상수온에 따른 양식생물(어패류 및 해조류) 피해 현황	57
4-1-3. 수온변화에 따른 해조류 양식순기의 변화	58

4-2. 고수온 내성 육종품종 개발	59
4-3. 고수온 대응 양식품종 양성기술 개발	60
4-4. 친환경/고효율 양식기술 개발 현황	61
4-4-1. 해상 및 육상 스마트양식 기술 개발	61
4-4-2. 아쿠아포닉스 및 바이오플락 등 친환경 양식 기술 개발	62
4-4-3. 순환여과식 양식 시스템 개발	64
4-5. 양식분야 기후변화 미래 전망	65

제5장 수산분야 기후변화 대응 기술 개발	67
5-1. 수산물 생산해역 식품안전 위해요소	68
5-1-1. 연안해역 해수의 장염비브리오균 발생 현황	68
5-1-2. 패류독소 발생 시기의 경향	69
5-2. 기후변화와 수산생물 질병 대응	70
5-2-1. 기후변화에 따른 수산생물 질병 발생 현황	70
5-2-2. 기후변화 대응 수산질병 관리 기술 개발	71
5-3. 에너지 절감형 어업기술 개발 및 온실가스 배출 현황	73
5-3-1. 어업별 온실가스 배출 현황	73
5-3-2. 에너지 절감형 어업기술 개발 및 보급	73
5-4. 수산식품안전 분야 기후변화 미래 전망	76

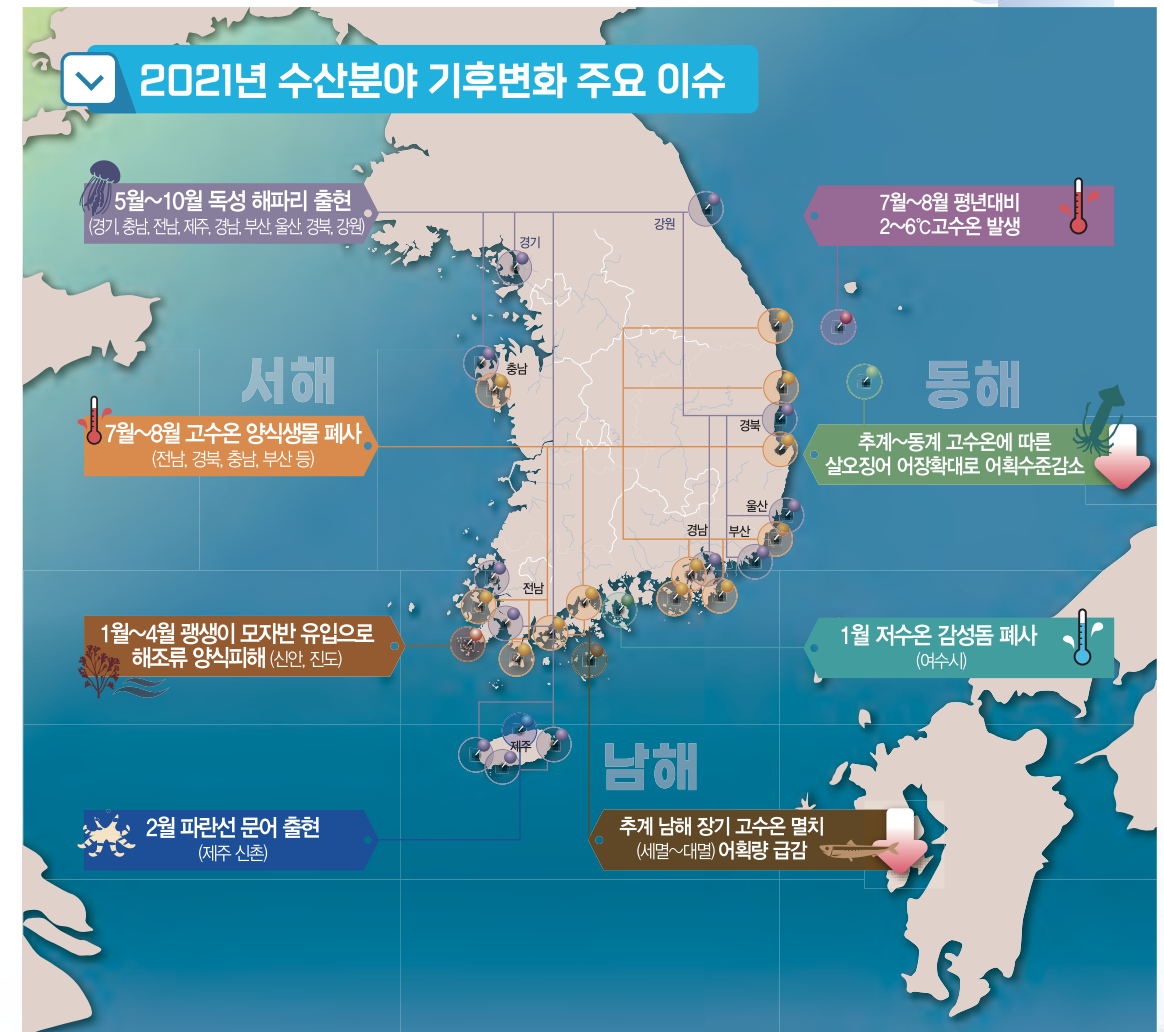
맺음말	78
-----	----

참고문헌	80
------	----

용어정리	85
------	----

보고서 발간을 위해 노력하신 분들	87
--------------------	----

기후변화 장기 경향 및 2021 수산분야 주요 이슈



수온(Water Temperature)



염분(Salinity)



용존산소(Dissolved Oxygen)



어획량(Catch Amount)



양식폐사(Mass Mortality)

경향성 : ↑ ↓ (큰폭의 상승 · 하강)

↑ ↓ (중간폭의 상승 · 하강)

↑ ↓ (소폭의 상승 · 하강)

↔ (변화없음)

✓ 관측된 기후변화와 미래 예측

▶ 관측된 온난화 경향(Observed warming trends)

구분	요소		관측기간	변화(℃)	변화율(℃/yr)
전 지구 평균 (Global)	온도*		1880~2020	1.10 ↑	0.0078 ↑
	표층수온*		1880~2020	1.03 ↑	0.0073 ↑
한국 (Korea)	기온**		1912~2020	2.18 ↑	0.020 ↑
	표층수온	한국 연근해	1968~2021	1.35 ↑	0.025 ↑
		동해	1968~2021	1.75 ↑	0.032 ↑
		남해	1968~2021	1.07 ↑	0.020 ↑
		서해	1968~2021	1.24 ↑	0.023 ↑

* 전 지구 평균 관측 온도는 IPCC(2021)에서 활용한 CMIP6(HadCRUT5) 재해석 모델 결과 활용

** 한국 평균 관측 기온의 온난화 경향은 기상청(2021) “우리나라 109년 기후분석 보고서”에서 인용

▶ 전망된 온난화 경향(Projected warming trends)

구분	요소		시나리오***	2041~2060년 (Mid-term projection)	2081~2100년 (End of 21century)
전 지구 평균 (Global)	기온*		SSP2-4.5	2.0 ↑	3.0 ↑
			SSP5-8.5	2.4 ↑	5.2 ↑
	표층수온**		RCP 4.5	1.4 ↑	1.8 ↑
			RCP 8.5	2.0 ↑	3.7 ↑
한국 (Korea)	기온*		SSP2-4.5	2.5 ↑	3.9 ↑
			SSP5-8.5	3.2 ↑	7.0 ↑
	표층수온	한국 연근해	RCP 4.5	1.6 ↑	2.3 ↑
			RCP 8.5	2.0 ↑	4.0 ↑
		동해	RCP 4.5	1.7 ↑	2.4 ↑
			RCP 8.5	2.1 ↑	4.2 ↑
		남해	RCP 4.5	1.5 ↑	2.2 ↑
			RCP 8.5	1.8 ↑	3.7 ↑
		서해	RCP 4.5	1.6 ↑	2.4 ↑
			RCP 8.5	2.1 ↑	4.2 ↑

* 전 지구 평균 기온 전망은 기상청(2021) “전지구 기후변화 전망보고서” 및 “한반도 기후변화 전망보고서”에서 인용(1995~2014년 대비)

** 전 지구 평균 수온 전망은 IPCC AR5(2014)에서 제시된 전망치를 인용(1986~2005년 대비)

*** 기후변화 시나리오(RCP, SSP)에 대한 설명은 “본문 2장”을 참고

✓ 정책결정자·어업인을 위한 요약

▶ 국내외 기후변화 과학 및 정책 동향

【기후위기 대응을 위한 전 지구적 협력 분위기 고조와 우리 정부의 온실가스 감축 및 기후변화 적응을 위한 정책·과학적 대응 추진 강화】

- ☑ 전 세계적으로 국제적인 기후변화 과학 및 정책 변화가 급격하게 나타나고 있음. 전 지구 기후변화 평가보고서가 승인·발간되고, 온실가스 감축 중심의 기후변화 합의가 이루어짐. 우리 정부는 2030 온실가스 감축목표 상향 조정, 제3차 기후변화 적응대책 수립 등 국내 정책 변화를 통하여 대응하고 있음《1-1, 1-2》
- ☑ 대응 방안으로 해양수산부는 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵을 수립함. 주된 내용은 2050년까지 온실가스 순배출량을 -323.7만톤으로 설정하는 2050 해양수산 탄소 네거티브 달성을 목표로 함. 나아가 수산분야 기후변화 영향평가 및 실태조사를 위한 법적 근거를 마련하고 있음《1-2》
- ☑ 한국에서도 지구 온난화는 가속화되며, 극한 현상 발생이 증가할 것으로 보고되고 있음. 해양에서도 자연재해 발생 가능성이 높아질 것으로 예측되고 이에 대한 다양한 연구개발이 이루어지고 있음《1-2》

정책수산업적 시사점

- 최근 해양온난화의 가속화와 이상기후의 빈번한 발생에 따라 수산업은 부정적인 요소가 더욱 크게 증가하고 있음.
- 어가인구의 감소와 종사자의 고령화, 연근해 어획량의 급감, 코로나 위기에 따른 수산물 소비 부진 등으로 수산업은 총체적인 위기 상황임.
- 식량안보와 안정적인 수산물 공급을 위해 중장기적이면서 또한 단기적인 수산분야의 기후변화 적응 전략 수립이 시급함.
- 어업현장에서 피해 최소화를 위하여 기후변화 적응 기술의 보급을 적극적으로 추진할 계획임.

▶ 기후변화에 따른 해양환경 및 생태계 영향

【해양온난화 심화, 이상수온 발생이 증가되는 추세이고, 장기적인 생태 환경 변화가 나타나고 있으며, 향후 한국 연안 수온의 상승 경향은 더욱 가속화될 전망이다】

- ☑ 한국 해역의 표층수온은 최근 54년간 약 1.35℃ 상승하여, 전 지구 평균 대비 약 2.5배 이상 높았으며, 해역별로는 동해의 수온 상승이 가장 높았음. 2021년 동해의 7월 평균 표층수온은 평년 대비 2~6℃ 높은 경향을 보여 전 세계에서 평년 대비 수온이 가장 높은 해역이었음《2-1》
- ☑ 한국 해역의 표층염분은 감소 추세이며, 용존산소는 동해 저층을 중심으로 감소하는 경향을 보임. 연근해역의 표층 영양염류 농도는 전반적으로 감소하는 추세이며, 식물플랑크톤은 크기가 작은 종의 우점율이 증가

하고 있음《2-2, 2-3》

- ◎ 연근해역의 해양산성화 조사 결과, 여름철을 제외한 계절에는 대기로부터 해양이 이산화탄소를 흡수하고 있음을 확인함. 최근 연안역의 빈산소 수괴 발생이 빈번히 나타나고 있으며, 이는 집중 강우 증가와 고수온 등에 따른 성층 강화의 영향으로 판단됨《2-2》
- ◎ 최근 코클로디니움 적조 대량 발생은 소강상태를 보이고 있으나, 새로운 유해적조 생물종 출현과 종의 천이 현상 등에 대응할 필요가 있음. 기존 대량출현 해파리의 출현율은 증가와 감소를 반복하고 있으나, 독성해파리의 출현은 최근 뚜렷한 증가를 보임《2-3》
- ◎ 국립수산물과학원의 과거 책자형태로 기록된 해양관측자료 및 보고서가 등록문화재 및 국가중요과학기술자료로 등록되었으며, 기증받은 해방 전후 자료 및 원고의 분석과 디지털화로 보다 장기적인 기후변화 영향 파악을 위하여 노력하고 있음《2-4》
- ◎ 전 지구 기후모델 예측자료를 활용하여 동·서·남해 6개 연안 수온 관측 지점의 미래 수온 변화를 예측한 결과, 2100년까지 약 2~5℃ 수온이 상승하는 것으로 나타났음. 한국 주변해역의 상세한 장기 기후변화 전망을 위해 공간 해상도 3km 내외의 고해상도 해양기후모델을 구축 중이며, 미래 예측 실험을 위한 재현실험을 완료하였음《2-5》

정책수산업적 시사점

- 한국 해역은 기후변화의 영향으로 물리적, 생지화학적 변화가 급격하게 나타나고 있음.
- 이상기후에 따른 고수온, 유해생물 대량 출현 등 수산재해도 증가하고 있음.
- 기후변화에 따른 피해를 최소화하기 위해 정책적으로는 미래 전망 자료를 기반으로 한 장기적인 기후변화 대응 전략을 수립하여 추진할 예정임.
- 어업현장에 실시간 해양정보 및 이상해황 발생 정보를 적시에 제공하여 수산재해에 따른 피해 최소화에 적극적으로 대응할 계획임.

▶ 한국 주변해역의 수산자원 변화

【연근해 어업생산량은 감소하고 있으나, 감소 원인은 기후변화와 비기후적인 요소가 복합되어 있고, 최근 아열대성 어종 출현이 증가하고 있음】

- ◎ 연근해 어업생산량은 현재 93만 톤 수준이며, 최근 40년간(1980~2019) 동·서·남해 모두 감소 추세임. 난류성·표층성 어종의 어획량은 증가했지만, 한류성·저서성 어종은 감소함. 이러한 어업생산량 감소경향은 수온상승, 과도어획, 어업협정에 의한 어장축소 등 다양한 원인이 복합적으로 작용함《3-1》
- ◎ 최근 40년간 해역별 어획량 변화를 살펴보면, 남해는 멸치, 고등어, 삼치 등이 증가, 갈치, 강달이 등은 감소함. 동해는 살오징어, 붉은대게, 문어류 등은 증가, 꽂치, 양미리 등은 감소함. 서해는 멸치, 꽃게 등이 증가, 갈치, 강달이 등이 감소함. 연도별 계절 변동성이 심화됨에 따라 주요 상업어종들의 어장가입시기나 월동시

기가 빨라지거나 느려지는 경우가 발생함《3-1》

- ◎ 최근 기후변화에 따른 수온상승으로 제주 연안에서 아열대성 어종 및 맹독성 해양생물이 매년 지속적으로 출현하고 있음. 남해, 동해 및 독도 연안에서 아열대성 어종 출현도 보고되고 있으며, 특히 가을철을 중심으로 높은 출현율을 보임《3-2》
- ◎ 미래 해양환경 변화를 고려한 2050년대 고등어 서식지는 현재에 비해 주어장인 남해에서는 대부분의 계절에서 감소, 서해에서는 여름과 가을에 감소하나 겨울에는 증가, 동해에서는 가을에 증가할 것으로 예상되어 기후변화로 인해 계절적인 어장 위치는 변화될 것으로 전망됨《3-3》

정책수산업적 시사점

- 기후적인 요소와 비기후적인 요소에 의해 한국 연근해 어업생산량은 최근 급격히 감소하고 있는 추세임.
- 상업성 어종의 분포해역 역시 변화하고 있음. 현 시점에서 어업생산량 및 어장 분포역 변화에 '기후변화가 미치는 영향'에 대한 정량적인 분석을 추진할 계획임.
- 또한 아열대성 어종 출현이 '한국 수산업에 미칠 악영향 및 순영향'에 대하여 정책적, 과학적 검토를 추진할 계획임.

▶ 기후변화 대응 양식업 적응능력 강화

【고수온에 의한 양식피해가 가장 크게 나타났으며, 기후변화 대응 신품종 개발 및 양식 기술 개발을 추진중. 양식 해조류의 생산 가능시기는 향후 큰 폭으로 감소할 전망】

- ◎ 2021년 넙치, 조피볼락의 양식 생산량은 고수온 및 코로나19 등의 영향으로 감소하였지만, 꼬막류, 우렁챙이, 다시마류, 미역류, 김류의 양식 생산량은 증가함《4-1》
- ◎ 최근 11년간 자연재해에 따른 피해 규모는 총 2,363억원이었고, 가장 큰 피해의 원인은 고수온으로 전체 피해액의 53%를 차지하였고, 적조(21%) 저수온(11%)의 순이었음. 2021년은 최근 11년 중 두 번째로 자연재해에 의한 양식피해가 크게 일어난 해였음《4-1》
- ◎ 연안 수온의 상승으로 감·미역·다시마 등 양식 해조류의 입식시기가 지연되고 있으며, 해조류 양식의 생산성 향상 및 품질 저하 방지를 위해 지속적 수온 모니터링과 고수온 내성 품종 개발 등 연구를 집중적으로 추진할 계획임《4-1》
- ◎ 여름철 고수온으로 인한 양식생물 폐사를 줄이기 위해 선발육종, 교잡육종, 유전체육종, 유전자가위 등 다양한 기술을 이용하여 기후변화 대응 신품종 개발을 수행 중에 있음《4-2》
- ◎ 고수온에 따른 양식업의 기후변화 적응을 위하여 교잡바리류 등의 양식기술을 개발하고 있으며, 추후 고수온 대응 품종 개발을 더욱 확대할 계획임《4-3》
- ◎ 기후변화에 따른 양식환경 변화에 적응하고, 양식산업의 첨단화와 지속가능성을 위하여 스마트양식, 바이오플라, 아쿠아포닉스 및 순환여과식양식시스템 등 다양한 친환경 양식기술 개발이 진행 중임《4-4》

- ◎ RCP 기후변화 시나리오 기반의 2100년까지의 미래 수온 전망 자료를 기반으로 해조류(양식감)의 생산 가능 시기를 살펴본 결과, 현재 150일 내외인 성육시기가 2100년에는 100일 미만으로 감소하고, 김 채묘시기도 한 달 가량 지연될 것으로 예측되었음(4-5)

정책수산업적 시사점

- 한국 해역의 양식업은 주로 수심이 얕고, 반폐쇄적인 해역에서 이루어짐에 따라 이상 수온 등 자연재해에 취약함.
- 따라서 높은 수온 상승률과 잦은 고수온 현상에 대응하기 위한 양식품종 및 양식기술의 개발에 연구 역량을 집중하고 있음.
- 기후변화 적응과 함께 양식산업의 첨단화와 지속가능성을 위한 친환경 양식기술 개발 및 보급을 확대해 나갈 계획임.

▶ 기후변화 대응 수산분야 적응기술 개발

【패류독소 발생 시기가 최근 앞당겨지고, 기후변화 관련 신종 수산질병 보고가 증가하고 있음. 온난화 영향으로 수산물 안전의 위험성은 향후 증가할 것으로 전망됨】

- ◎ 장염비브리오균 연간 검출률에는 유의할만한 변화가 관찰되지 않으나, 여름이 길어지고 겨울이 짧아지는 기후 변화 현상이 계속된다면 전통적인 장염비브리오균 유행기(5~10월)가 연장될 것으로 예상함(5-1)
- ◎ 마비성패류독소의 최초 발생 시점이 봄철(3□4월)에서 겨울철(1□2월)로 점차 앞당겨지는 경향을 보여 겨울철에도 패류독소에 대한 안전성 조사를 강화함(5-1)
- ◎ 새우류 급성간체장괴사병은 2000년대 후반 한국 인접 저위도 국가에서 발병이 보고되었고, 2016년 한국에도 최초 감염이 확인되는 등 기후변화와 관련된 신종 수산 질병에 대한 보고가 최근 증가하고 있음(5-2)
- ◎ 온실가스 배출 저감 및 친환경 어업기술 개발을 위하여 원양 및 연근해 어선을 대상으로 유류절감형 어업기술 개발을 추진 중에 있음. 친환경 어업기술 개발과 감척 등 수산정책 추진으로 온실가스 배출량은 2005년 대비 2020년에 근해어업에서 약 3.7%, 연안어업에서 약 14% 감소함(5-3)
- ◎ 온난화의 영향으로 비브리오 감염증 발생이 증가 추세에 있으며 향후 더욱 가속화될 것으로 예상됨. 마비성 패류독소의 발생시기 및 독소 함량이 증가할 것으로 예측되며, 수산질병의 신종 발생 및 확산이 나타날 것으로 전망됨(5-4)

정책수산업적 시사점

- 병원성비브리오균 유행기의 연장, 패류독소의 조기 출현 등 기후변화에 따른 수산물 위생·안전관리를 위한 탄력적인 조사 대응 계획을 수립함.
- 향후 한국 해역에 나타날 수 있는 수산 질병에 대한 사전 검토 및 대응 방안 마련을 통하여 선제적인 대응을 추진할 계획임.
- 온실가스 저감을 위하여 어선의 연료 효율 개선 등 다양한 어업기술 개발을 추진하였음.

Summary for Policy-maker & Fishermen

▶ Scientific and politic changes in climate change

- ◎ Science and policy related to climate change such as the publication of 6th IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) Assessment Reports and the Glasgow Climate Pact are rapidly changed globally. The policies of climate change in Korea government are also changed such as the upward adjustment of the 2030 National GHG(Greenhouse Gas) emission target and the establishment of the 3rd National Climate Change Adaptation plans(2021~2025)(1-1, 1-2)
- ◎ The Ministry of Oceans and Fisheries has set a target of -323.7 million tons of GHG emissions by 2050 Carbon Neutrality Roadmap in ocean and fisheries parts and prepares the legal basis for the investigation and effect evaluation in fisheries(1-2)
- ◎ During the 21st century, a report found the acceleration of the warming trend and the increase in the occurrence of extreme conditions in Korea. Natural disasters in the future are also projected to increase due to climate change in Korea. Various research and development are being conducted to respond to the negative impacts of climate change(1-2)

▶ Impacts of marine environments and ecosystems due to climate change

- ◎ During past 54 years, annual mean sea surface temperature in Korea Waters has increased about 1.35℃, which is about 2.5 times higher than global mean. The increasing trends in sea surface temperature were highest in the East Sea. In July 2021, the highest level of marine heatwaves over the whole global waters appeared in the East Sea, which was about 2~6℃ higher than mean sea surface temperature(2-1)
- ◎ Sea surface salinity tends to decrease and dissolved oxygen in the deep layer of East Sea also tends to decrease. The concentrations of surface nutrients are generally decreased around the offshore of Korea Waters. The proportion of small size species in phytoplankton are increased(2-2, 2-3)
- ◎ According to the ocean surveys for ocean acidification, the Korea Waters absorb carbon dioxide from the atmosphere throughout the whole season except summer. In recent, hypoxia water mass frequently appeared around the coastal area by the frequent heavy rain and the strong stratification due to marine heatwaves(2-3)

- ☉ In recent, the outbreak of Harmful Algal Blooms by *Cochlodinium polykrikoides* was distinctly decreased. However, it should be needed to respond to the occurrence of new Harmful Algal Bloom species and the species' successions. The appearance rates of moon jellyfish and giant jellyfish(*Nemopilema nomurai*) have been repeatedly increasing and decreasing, but the appearances of toxic jellyfish species have obviously increased recently 《2-3》
- ☉ The data and reports through the historical ocean surveys in the NIFS(National Institute of Fisheries Science) were designated the Registered Cultural Heritage and the National Scientific Heritage by the Korean government. According to the analysis of historical ocean data and reports and the digitalization of ocean data, NIFS is trying to understand the longer-term impacts due to climate change in Korea Waters《2-4》
- ☉ Statistical downscaling of the global climate models based on the IPCC GHG emission scenarios was applied to predict the future sea water temperature at six coastal observation stations on the Korean Seas. It shows that the temperature will rise by around 2~5℃ by 2100. A high-resolution ocean climate model for the Korean Seas which dynamically downscales the global climate models of the SSP scenarios is being set up, and a historical run for future projections has been completed《2-5》

▶ Variation of fisheries resources in the Korea Waters

- ☉ Fishery production was an average of 930,000 tons recently and showed a decline in all sea areas of the East, Yellow and Northern East China Sea over the past 40 years(1980~2019). The catch amount of warm water pelagic species increased, but the catch amount of cold water benthic species decreased. This trend of decrease in fishery production is due to a combination of various factors such as increase in water temperature, overfishing, and reduction of fishing grounds by fisheries agreements《3-1》
- ☉ Through the changes in catches by sea area over the past 40 years, anchovy, chub mackerel and Spanish mackerel increased in the Northern East China Sea, while hairtail and croaker decreased. In the East Sea, common squid, red snow crab, and octopus increased, while saury and sand eel decreased. In the Yellow Sea, anchovy, blue crab, etc. increased, but hairtail, croaker, etc. decreased. The timing of recruiting to the fishing grounds or the wintering period of major commercial fish species may be earlier or slower due to increasing of inter-annual variation in recent《3-1》
- ☉ Subtropical fishes and virulent marine organisms have appeared continuously on the coast

of Jeju Island due to the recent increase in seawater temperature due to climate change. The appearance of subtropical fishes in the Northern East China Sea, East Sea, and near the Dokdo has been reported and was especially many in autumn《3-2》

- ☉ Taking into account the future marine environment change, compared to the present, the habitat of chub mackerel expected until the 2050s to decrease in all seasons except December in the Northern East China Sea, which is the main fishing ground, decrease in August to November and increase in December in the Yellow Sea, and increase in September to November in the East Sea. Therefore, it is predicted for the habitat of chub mackerel to increase significantly by changes in the marine environment due to climate change《3-3》

▶ Strengthen adaptability of aquaculture respond to climate change

- ☉ In 2021, the aquaculture production of olive flounder and Korean rockfish decreased due to marine heatwaves and the COVID-19 pandemic, but the production of ark shell, sea squirt, sea tangle, sea mustard, and laver increased《4-1》
- ☉ In the past 11 years, the amount of economic damage caused by natural disasters was about 236.3 billion Won with marine heatwaves accounting for 53% of the total damage followed by Harmful Algal Blooms (21%) and low water temperature (11%). Last year, 2021, was the second-highest year of economic damage by natural disasters in aquaculture during the past 11 years《4-1》
- ☉ The timing of seaweed intake is being delayed due to increasing coastal water temperature. It is needed to counterplans like the continuous water temperature monitoring and the development of high-temperature heat-resistant species for the improving seaweed productivity and preventing quality degradation《4-1》
- ☉ In order to reduce the mass mortality due to marine heatwaves in summer, NIFS carries out the developments of new species and aquaculture technologies to respond to climate change such as selective breeding, hybrid breeding, genetic breeding, and genetic scissors 《4-2》
- ☉ To adapt the high water temperature due to climate change in aquaculture, NIFS carries out the aquaculture technology for hybrid grouper and have a plan to extend the development of new species for high water temperature《4-3》

- ☑ NIFS is also carrying out various researches and developing eco-friendly aquaculture technologies such as Smart Aquaculture Technology, Bio Floc Technology(BFT), Aquaponics, and Recirculation Aquaculture Systems(RAS) for the adaptation to environmental changes due to climate change and development of advanced technique and sustainability in aquaculture 《4-4》
- ☑ Analyzing the RCP scenarios in the previous study, the growing season of the laver, which is currently around 150 days, is expected to decrease to less than 100 days by 2100 in the RCP 8.5 scenario, and the seedling period is also expected to be delayed by around a month《4-5》

▶ Developments of adaptation technology to climate change in fisheries

- ☑ No significant change was observed in the annual detection rate of *Vibrio parahaemolyticus*. However, if the climate change of longer summer and shorter winter continues, it is expected that the traditional period of *V. parahaemolyticus* epidemic will be prolonged《5-1》
- ☑ As the initial occurrence of paralytic shellfish toxins tends to be detected from spring(March □April) to winter(January□February), it is necessary to strengthen the safety investigations of shellfish toxins even in winter《5-1》
- ☑ The case report of fish diseases related to climate change has recently been increasing. As an example, the infection of Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease in shrimp, which has been reported in low-latitude countries adjacent to Korea in the late 2000s, was also confirmed around the Korean Coast in 2016《5-2》
- ☑ Fuel-saving fishing technology for distant water fishery and offshore fishery is being developed to reduce GHG emissions and eco-friendly fishing technology. Due to the implementation of fisheries policies such as the development of eco-friendly fishing technology and reduction of fishing vessels, GHG emissions in fisheries were decreased by about 3.7% in offshore fishing and 14% in coastal fishing in 2020 compared to 2005《5-3》
- ☑ *Vibrio* infections has recently increased by ocean warming and is expected to accelerate further in the future. The outbreak periods and toxin contents of paralytic shellfish toxins will be increased and the new species and spatial expansion of fisheries diseases will be projected《5-4》

1장

해양수산분야 기후변화 국내외 동향

Annual report
for Climate change Trends
in Fisheries, 2022

ACT Fish
2022



1-1. 국외 기후변화 정책·과학적 동향

1-2. 국내 기후변화 정책·과학적 동향

제1장

해양수산분야 기후변화 국내외 동향

1-1 국외 기후변화 정책·과학적 동향

- ◎ ‘기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)’는 2021년 8월 제1 실무그룹의 제6차 평가보고서를 발간함. 주된 내용은 1970년대 이후 해양 상층부(0~700 m)의 온난화 강화, 해양 표면 산성화 심화 및 해양 상층부의 산소 농도 감소 등의 원인으로 인간 활동에 의한 온실가스 배출이 지목 되었음(IPCC, 2021).
- ◎ 1980년대 이후 이상 고수온(Marine Heatwaves, MHWs)의 발생 빈도는 약 2배 이상 증가하였으며, 2006년 이후 발생한 대부분의 이상 고수온은 인간 활동에 의해 발생하였을 가능성이 높다고 기술하였음. 또한 지구온난화가 계속 진행되면 이상 고수온의 발생 빈도가 지속적으로 증가할 것으로 보고하고 있음(그림 1-1) (IPCC, 2021).

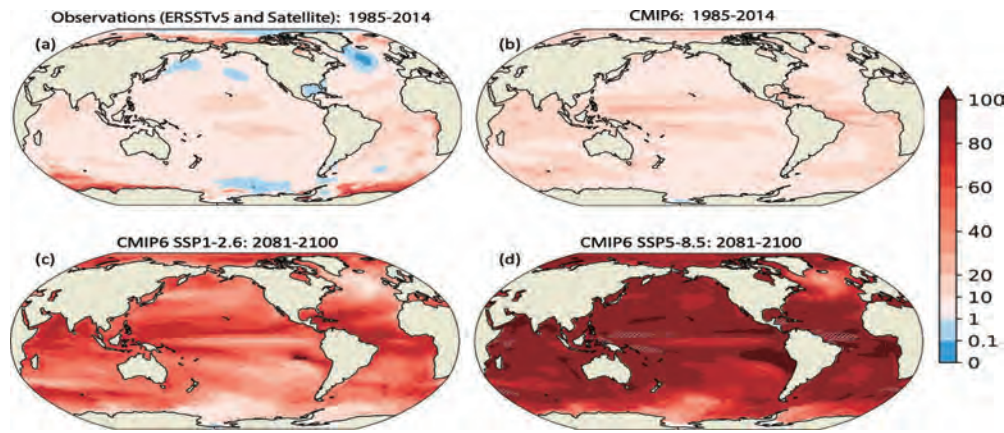


그림 1-1. 1985~2014년 이상고수온의 발생 빈도(연간 발생일) 관측치(a), 재해석치(b) 및 1985~2014년 대비 21세기 후반 2개의 온실가스 배출시나리오(SSP 1-2.6, SSP5-8.5)를 통한 발생빈도 전망(c, d) [출처 : IPCC(2021)]

- ◎ IPCC는 공통사회 경제경로(Shared Socioeconomic Pathway, SSP) 시나리오를 통해 21세기 동안 해양온난화가 현재(1971~2018년 평균) 대비 2~4배(SSP1-2.6)에서 4~8배(SSP5-8.5) 빠르게 진행될 것이며,

해양 상층부의 성층화, 해양산성화 및 해양 탈산소화(Deoxygenation)가 21세기 내내 증가할 것으로 보고하고 있음(그림 1-2)(IPCC, 2021).

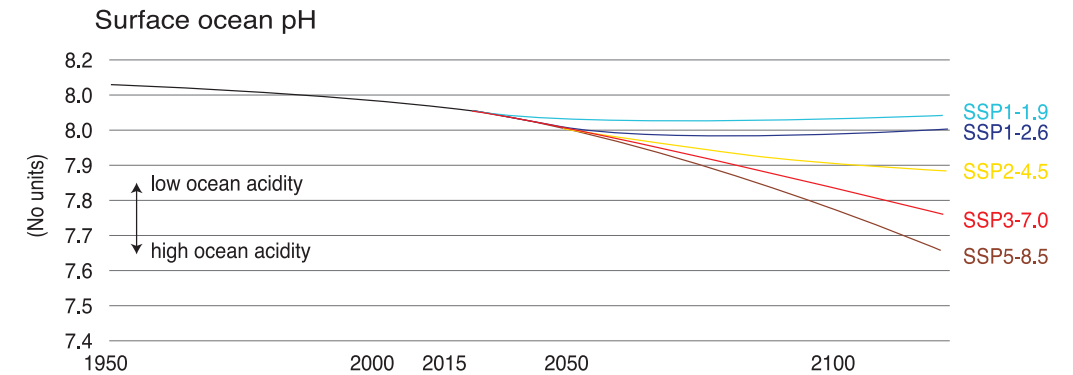


그림 1-2. IPCC 모델의 모의 결과를 통한 지구 해양표면 pH 변화에 대한 각 시나리오별 변화 전망 [출처 : IPCC(2021)]

- ◎ 기후변화가 어업 및 해양생태계에 미치는 장기적인 영향을 이해하고 예측하여, 정책 수립에 도움을 주기 위해 서로 다른 40개 이상의 해양생태계 모델을 비교하는 프로젝트(Fisheries and Marine Ecosystems impacts Model intercomparison Project, FishMIP)가 추진 중임. ‘북태평양 해양과학기구(North Pacific Marine Science Organization, PICES)’에서도 기후변화가 해양생태계에 미치는 영향 작업반(Section on Climate Change effects on Marine Ecosystems, S-CCME) 활동을 통하여, 모델 성능 개선 및 어업활동에 대한 재해석 등의 연구를 추진하고 있음(PICES, 2021).
- ◎ PICES는 2021년 “북태평양 해양생태계에 관한 종합보고서(2009~2016년)”를 발간하여, 2014년부터 2016년까지 이상 고수온의 빈번한 발생이 저차 생태계에서 고차 생태계까지 생태계 전반에 많은 영향을 미쳤음을 보고하였음. 이상 고수온 현상은 클로로필-a 농도, 소형 식물플랑크톤 및 독성 유해조류 대량번식 등과 관련이 있음을 보고하였음. 또한 해양산성화 및 탈산소화가 북태평양 외양 및 연해에서 심화되고 있음을 보고하였음(PICES, 2021).
- ◎ ‘유엔 식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)’에서는 “기후변화 대응 수산업의 적응 관리” 보고서를 통하여, 기후변화에 대응하기 위한 4가지 관리 방안으로 1) 효과적인 어업관리 시스템 구축, 2) 참여형 어업관리 시스템 설정, 3) 불확실성 및 예방을 다루는 예방 시스템, 4) 적응형 어업관리 시스템을 제시하였음(FAO, 2021).
- ◎ 2021년과 2022년은 IPCC 제6차 평가보고서가 승인, 발간되는 시기로 기후변화에 대한 영향과 과학적 전망에 대한 사회적 관심이 고조되는 시점임. 특히 해양수산 분야의 경우, 해양온난화 및 산성화에 따른 수산물 생산 감소 및 식량 안보에 대한 우려가 높아지고, 기후변화에 따른 이상기후의 영향으로 수산업 기반의 경제 공동체에 미치는 부정적 영향과 리스크가 증가할 것으로 전망함.
- ◎ 제26차 ‘유엔기후변화 당사국총회(Conference of the Parties, COP26)’가 2021년 10월 31일부터 11

월 13일까지 영국 글래스고에서 개최됨. 2015년 COP(파리) 이후 6년 만에 개최된 특별정상회의에서 한국을 비롯한 120개국 정상들은 지구 온난화를 1.5℃ 이내로 제한하기 위한 범세계적 기후행동 강화를 약속함.

- ◎ COP26에서는 ‘글래스고 기후합의(Glasgow Climate Pact)’를 대표 결정문으로 선언하였음. 글래스고 기후합의에서 기후변화 적응 분야의 경우, COP27(2022.11월 예정) 이전에 IPCC 제6차 보고서 제출을 요청하였으며, 선진국들의 기후변화 적응재원·역량배양·기술이전 등의 대폭적인 확충을 촉구하였음. 또한 선진국의 기후변화 적응재원을 2025년까지 2019년 대비 최소 2배로 확대해 줄 것을 요청하였고, 전 지구적 기후변화 적응에 대한 진전 등을 평가하기 위한 글로벌 적응 목표(Global Goal of Adaptation, GGA)에 대한 방법론, 지표 등의 개발 작업을 향후 2년간 기후변화협약 부속기구 주관 하에 진행하기로 결정함.
- ◎ COP26 기간 중, ‘유네스코 정부간 해양학위원회(Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC)’에서는 “바다 10년: 기후 행동의 잠금을 해제하기 위한 글로벌 과학 운동”이라는 이벤트를 개최하였음. 이 이벤트를 통하여 기후변화에 대한 지식 격차를 해소하고, 전 지구적 문제를 해결하는데 필요한 지식을 공유하며, 제공하는 체계를 마련하였음.
- ◎ ‘UN 글로벌 컴팩트(UN Global Compact, UNGC)’는 2021년 9월, 생물다양성과 기후변화라는 두 가지 위기를 해결하기 위한 “해양 스튜어십십 연합(Ocean Stewardship Coalition)”을 발족하였으며, COP에 1) 국가적응계획에 해양기반 완화 및 적응 조치의 주류화, 2) 생물다양성과 기후변화 해결을 위한 해양·자연기반 해결책에 대한 정치적 인식 제고, 3) 최적 해양보호구역 활용 해양공간계획의 완화 및 적응 주류화, 4) 해양관리에 대한 민간 부문 참여 장려 등에 대한 조치를 촉구하였음.
- ◎ 일본 수산청은 2020년 전면 개정된 어업법 시행을 통하여 해양 및 수산자원은 국민의 공유재산임을 명시하였고, 2018년 자원평가 결과를 기초로 자원관리 목표 수준의 최대지속 어획량을 설정하는 등 총허용어획량을 기본으로 하는 새로운 자원관리 시스템을 구축함.
- ◎ EU(European Union)은 “Horizon 2020 프로그램”의 사회적 과제 중 “식량안보, 지속가능한 농업, 어업 및 해양연구와 바이오 경제”에 대하여 약 40억 유로 규모의 지원으로 미래 식량자원 확보 차원에서의 농수산업 연구와 해양 및 바이오 산업 연구를 수행하였음. 또한 Horizon 2020의 후속으로 Horizon Europe을 약 955억 유로 규모로 추진할 예정임.
- ◎ COP26에서 선언한 ‘글래스고 기후합의’는 온실가스 저감 및 완화뿐만 아니라 기후변화 적응을 위한 다양한 노력 필요성을 언급하였으며, 특히 개발도상국의 기후변화 적응을 적극적으로 돕기 위한 선진국의 재원, 역량, 기술이전 등에 대한 확대를 요구하였음. 각 국에서는 기후변화에 따른 지속가능한 수산자원 관리 및 식량안보 확보를 위한 다양한 과학적, 정책적 역량을 집중하고 있음.

1-2

국내 기후변화 정책·과학적 동향

- ◎ 2021년 “우리나라 109년(1912~2020) 기후변화 분석 보고서”에서 과거 30년(1912~1940)에 비해 최근 30년(1991~2020) 사이 한국은 여름철에 비하여 봄과 겨울의 기온 상승이 뚜렷하였고, 강수량 증가는 뚜렷하나 강수일수는 감소하고, 강수강도는 증가하는 경향이 있음을 보고하였음. 또한 봄과 여름 시작일이 빨라져 여름은 길어지고, 겨울은 짧아졌으며, 모든 절기에서 기온이 상승함을 보고함(기상청, 2021).
- ◎ 또한 국립기상과학원에서는 “한반도 기후변화 전망보고서 2020”에서 동아시아 및 한국 육상의 미래 기온 상승폭은 전 지구 육상의 평균과 비슷하나 미래 강수량은 전 지구 평균에 비하여 증가폭이 클 것으로 예측함. 특히 고탄소 시나리오의 경우, 현재 대비 21세기 후반의 한국 연평균 기온은 최고 7.0℃ 내외까지 상승할 것으로 전망하였음. 극한기후의 경우, 미래 극한 고온현상과 극한 강수현상은 증가하고, 극한 저온현상은 감소할 것으로 예상함. 현재 대비 21세기 후반의 한국 온난일¹⁾은 고탄소 시나리오에서 약 4배 급증할 것이며, 저탄소 시나리오에서도 약 2배 증가할 것으로 보고하였음(국립기상과학원, 2021).
- ◎ 해양수산부에서는 「해양수산과학기술 육성 시행계획」에서 “글로벌 해양수산 이슈 협력 강화”의 일환으로 기후변화 대응 및 해양생태계 보호와 관련한 R&D 사업을 중점적으로 추진함. 특히 1) 해양수산 기후변화 대응 R&D 역량 강화 전략 수립, 2) 한국 극한 해양현상에 대한 원인 분석 및 예측을 위한 모니터링 체계 강화, 3) 극지방의 빙하 감소 기작 규명 및 전 지구적 해수면 상승에 미치는 영향 평가, 4) 이상수온 예측 역량 강화를 위한 이상수온 정밀 예측시스템 개발 등의 연구를 해양수산과학기술진흥원을 통하여 진행하였음(해양수산과학기술진흥원, 2021).
- ◎ (사)한국해양학회 등 6개 해양관련 학회가 공동으로 개최하는 “2021년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회”에서는 “해양의 자연재해”를 주제로 공동워크숍이 개최되어 해양 자연재해의 개요, 고수온의 특성과 전망, 한국 접근 태풍의 특성 변화 및 재난관리 체계 등을 주제로 강연이 이루어짐(한국해양과학기술협의회, 2021).
- ◎ 장기적인 관측 및 전망 자료를 통하여 한국의 기후는 온난화가 더욱 심화되고 폭염의 발생 빈도가 현저하게 증가할 것으로 전망되고 있음. 해양과학 분야도 극한 해양현상에 대응하기 위한 다양한 연구개발을 시도하고 있으며, 특히 자연재해에 따른 영향 연구와 대응을 위한 노력을 경주하고 있음. 수산분야도 지속가능한 수산자원 확보 및 식량안보 차원에서 다양한 연구개발이 이루어지고 있음.
- ◎ 2021년 5월 서울에서 개최된 “2021 P4G 서울 녹색미래 정상회의”에서 한국은 국제사회에 4가지 약속을 제시함. 첫째는 2030 국가 온실가스 감축목표의 추가 상향을 COP26에서 제시하는 것이고, 둘째는 개발도상국의 저탄소 경제 전환을 위한 지원을 확대하는 것, 셋째는 생물다양성 보호지역 확대 연합과 세계 해양 연합 등의 이니셔티브 동참을 통한 생물종 보호에 대한 노력, 넷째는 2050 탄소중립과 지속가능한 발전이 양립할 수 있도록 적극적이고 선제적인 정책을 추진하겠다고 밝힘.
- ◎ 대한민국 정부는 2020년 탄소중립 선언 이후 관계부처 합동으로 「2030 국가 온실가스 감축목표

1) 온난일 : 일 최고기온이 기준기간의 90퍼센타일(상위 10%)을 초과한 날의 연중 일수

(Nationally Determined Contribution, NDC)」상향에 대한 검토를 진행함. 이후 2021년 탄소중립위원회 전체회의, 10월 27일 국무회의 심의를 거쳐 “2018년(727.6백만톤) 대비 2030년(436.6백만톤)까지 40% 감축”을 최종 확정함. 상향된 NDC는 2021년 12월 유엔기후변화협약 사무국에 제출되었음. NDC 제출에서 기후변화 적응 노력에 대한 방안도 같이 제출되었는데, 「제3차 기후변화적응대책(2021~2025)」 수립과 시행을 통한 기후 리스크 적응력 제고, 감시·예측 및 평가 강화, 적응 주류화 등의 과제가 포함되었음.

- ◎ 탄소중립을 위한 법률적인 변화도 지속적으로 이루어져, 2021년 8월 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」이 국회를 통과하였음. 기존의 「저탄소 녹색성장 기본법」을 대체하는 법령이며, 온실가스 감축, 기후위기 적응, 정의로운 전환, 녹색성장의 4대 시책이 이루어 질 수 있도록 「탄소중립 녹색성장 기본계획」 수립을 법제화하였고, 2050 탄소중립 및 중장기 온실가스 감축목표 및 기본계획 수립 등을 총괄할 수 있는 법적 근거가 마련되었음.



그림 1-3. 해양수산분야 2050 해양수산 탄소 네거티브 추진(안) [출처 : 해양수산부(2021)]

- ◎ 해양수산부에서도 2021년 12월 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」을 수립, 발표하였는데, “2050 해양수산 탄소 네거티브(Negative)”를 비전으로 2050년 해양수산분야 탄소배출량을 2018년 406.1만톤에서 2050년에는 729.8만톤을 감축/제거한 순배출량 -323.7만톤으로 목표를 설정하였음. 해운분야는 2018년 102만톤에서 2050년까지 31만톤으로, 수산·어촌분야는 2018년 304만톤에서 2050년까지 12만톤으로 감축 목표를 설정하였으며, 해양에너지를 통하여 230만톤, 블루카본을 통하여 136만톤을 추가적으로 감축할 예정임을 밝힘. 수산·어촌분야는 저탄소·전력공급 기반의 수산업 장비·시설 전환 및 어선 교체·감척을 통하여

온실가스 감축 목표를 달성할 예정임(그림 1-3).

- ◎ 해양수산부는 해양수산분야 탄소중립 목표 달성의 일환으로 COP26에서 인도네시아 해양투자조정부와 공동으로 “탄소중립을 위한 블루카본 정책 대화” 이벤트를 추진하여 블루카본의 중요성에 대한 전 세계적인 공감대 확산을 위한 노력을 경주하였음.
- ◎ 과학기술정보통신부에서는 온실가스 감축과 기후변화 적응에 관한 기술의 연구기반 조성·육성·발전을 통하여 탄소중립 실현 및 경제 발전을 목적으로 하는 「기후변화대응 기술개발 촉진법」과 동법 시행령·시행규칙이 2021년 10월 의결되었음. 이 법에서 “기후변화 적응”은 현재 나타나거나 미래에 나타날 것으로 예상되는 기후변화의 부정적 영향을 최소화하거나 기후변화를 유익한 기회로 촉진하는 활동으로 정의하였으며, 기후변화 대응은 온실가스 감축과 기후변화 적응으로 구분하였음(국가법령정보센터, 2022).
- ◎ 기후변화 적응과 관련한 해양수산부의 법적 근거는 「해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률」에서 해양생태계 보전·관리 기본계획 수립 시 기후변화에 의한 해양생태계 변화·교란 실태 및 취약생태계 현황조사에 관한 부분, 「연안관리법」에서 연안재해에 효과적으로 대응하기 위해 연안재해 위험평가를 매년 실시해야 한다는 부분만 적시되어 있으며, 수산분야에 대한 기후변화 실태 파악을 위한 법적근거는 마련되어 있지 않음.
- ◎ 농림축산식품분야의 경우, 「농업·농촌 및 식품산업 기본법」에 의거 기후변화가 농업·농촌에 미치는 영향과 취약성을 5년마다 조사·평가하여 결과를 공표, 정책수립 기초자료로 활용해야 한다는 것을 명시하고 있음.
- ◎ 국립수산물품질관리원은 현재 누락되어 있는 수산분야의 법적근거 마련을 위하여 국회 기후변화포럼을 통하여 그 필요성을 피력하였고, 2021년 12월 「수산업·어촌 발전 기본법」 일부개정 법률안이 발의되었음. 이 법에서는 기후변화가 수산업 및 어촌에 미치는 영향과 이에 따른 취약성을 5년마다 평가하여 그 결과를 공표하고 정책수립의 기초자료로 활용 할 수 있는 근거가 포함되어 있음.
- ◎ 2050 탄소중립 및 2030 국가온실가스 감축목표 상향 설정과 관련하여 해양수산부를 비롯한 각 부처에서 온실가스 감축에 대한 정책적 노력을 강화하고 있음. 또한 온실가스 감축 및 기후변화 적응을 위한 기후변화 관련 법령 정비가 다각도로 이루어지고 있으며, 수산분야의 기후변화 대응을 위한 법적 근거 마련도 추진 중임.

2장

기후변화의 해양환경 및 생태계 영향

Annual report for Climate change Trends in Fisheries, 2022

2022 수산분야 기후변화 영향 및 연구보고서

Annual report
for Climate change Trends
in Fisheries, 2022

ACT Fish
2022

- 2-1. 수온·염분 장기변동 경향 및 이상수온 발생
- 2-2. 해양산성화, 빈산소수괴 및 화학적요소 변화
- 2-3. 유해생물 출현 및 기초생산력 변화
- 2-4. 해양자료 복원을 통한 장기 해양변화 데이터베이스 구축
- 2-5. 한국 주변해역 기후변화 미래 전망

제2장

기후변화의 해양환경 및 생태계 영향

2-1 수온·염분 장기변동 경향 및 이상수온 발생

- 국립수산과학원은 한국 연근해의 해양환경 변화 파악과 수산자원의 변동 특성 파악을 위하여 1960년부터 현재까지 동일한 관측 정점에서 정선해양관측(연 6회)을 실시하고 있으며, 1995년부터 동중국해 해양조사(연 4회)가 추가되어 총 25개 정선, 207개 정점에 대한 수온, 염분, 용존산소, 동식물플랑크톤, 영양염 등의 수층별 관측을 수행하고 있음.
- 최근 54년간(1968~2021) 한국 해역의 연평균 표층수온 상승률은 $0.025^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ 로 약 1.35°C 상승한 반면, 같은 기간 전 지구 평균 표층수온 상승률은 $0.0097^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ 로 0.52°C 상승하여, 한국 연근해의 연평균 표층수온 상승률이 전 지구 평균에 비해 약 2.5배 이상 높았음(그림 2-1).

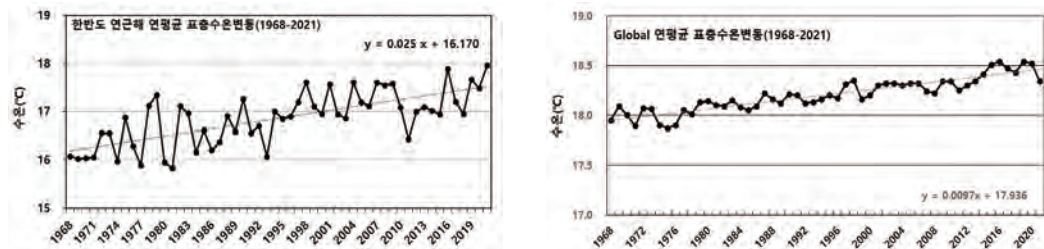


그림 2-1. 최근 54년간(1968~2021) 한국 해역(좌) 및 전 지구 평균(우)의 연평균 표층수온 장기 변동 경향

- 해역별 표층수온은 동해 1.75°C , 서해 1.24°C , 남해 1.07°C 상승하여, 표층수온 상승률은 동해가 가장 높았고, 남해가 가장 낮았음(그림 2-2). 동해에서 상대적으로 높은 표층수온 상승률이 나타난 원인은 동해중부해역의 상대적인 찬물과 동해남부해역의 상대적인 따뜻한 물 사이에 존재하는 극전선이 점점 북쪽으로 이동한 점과 동해역에 열을 수송하고 있는 대마난류의 세기가 1980년대 후반 이후 강해진 점 등이 반영된 것으로 판단됨.
- 2010년대 이후, 한국 해역은 기후변화에 기인한 이상기후의 영향으로 여름철 고수온 및 겨울철 저수온 등 수온의 계절별 양극화가 심화되고 있으며(Han and Lee, 2020), 이로 인한 양식생물의 대량폐사가 발생하여 IPCC 해양 및 빙권에 관한 특별보고서에 이상고수온 빈번 발생 해역으로 기술하고 있음(IPCC, 2019). 잦은 이상수온 발생

에 선제적으로 양식생물 피해 대응을 위하여, 2017년부터 이상수온 특보 발령 제도가 운영되고 있음(해양수산부, 2017).

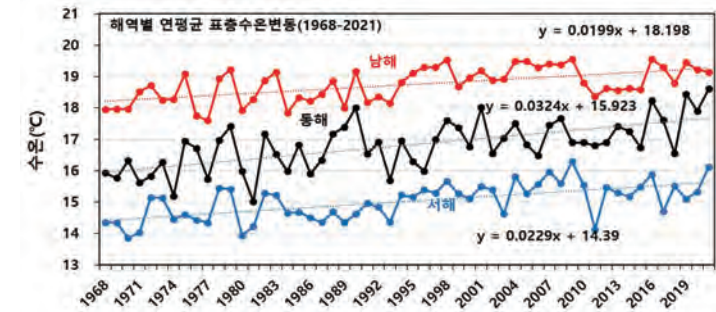


그림 2-2. 최근 54년간(1968~2021) 한국 해역별(동, 서, 남해) 연평균 표층수온 장기 변동 경향

- 2021년의 경우, 한국 연안의 고수온 특보²⁾는 7월 15일부터 8월 26일까지 43일간 지속되었으며, 특히 고수온 특보 제도가 시행된 이래 가장 빠른 시기에 고수온 특보가 발령되었음. 이는 여름철 장마의 이른 종료와 북태평양 고기압과 티베트 고기압의 확장 등에 따른 강한 폭염의 영향임(해양수산부, 2021).
- 2021~2022년 한국 연안의 저수온 특보³⁾는 12월 28일부터 3월 11일까지 지속되어 74일간 지속되었음. 2021~2022년 겨울철 찬 대륙 고기압과 상대적으로 따뜻한 이동성 고기압이 교차하며 기온 변동 폭이 컸으며, 2월 평균 수온은 평년에 비하여 0.5°C 정도 낮아 특보 발령기간이 전년 대비 9일 길어졌음(그림 2-3).

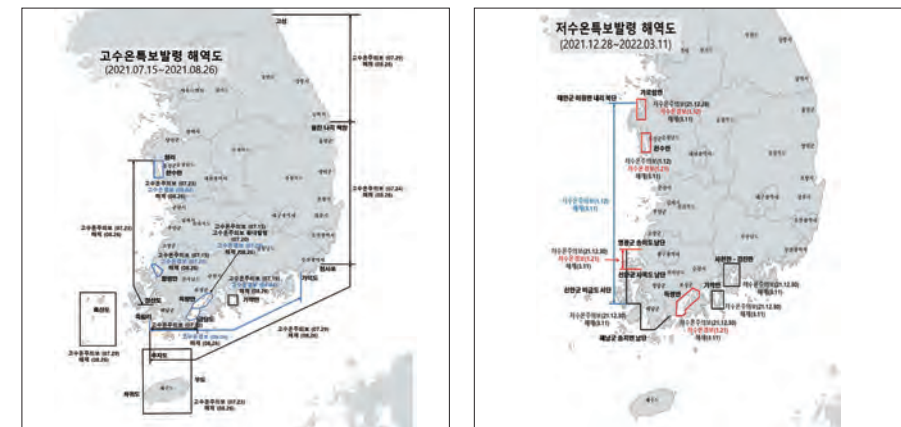


그림 2-3. 2021년 고수온 특보(좌) 및 2021~2022년 저수온 특보(우) 발령 해역도

- 특히, 2021년 7월 한국 해역의 월평균 표층수온은 동해를 중심으로 평년 대비 $2\sim 6^{\circ}\text{C}$ 높아 인공위성으로 수온을 관측한(1989년) 이래 가장 높았음. 이는 전 지구상에서도 가장 높은 수준의 이상 고수온으로, 한국 여름철 이상 고수온의 심각성을 시사하고 있음(그림 2-4).
- 최근 54년간(1968~2021) 한국 해역의 연평균 표층염분 변화율은 $-0.0057/\text{yr}$ 로 약 0.31 감소한 반면, 태평양 전체해역 연평균 표층염분 변화율은 $-0.00088/\text{yr}$ (Durack and Wijffels, 2010)로 같은 기간으로 환산하면 0.05

2) 고수온 특보 : 수온이 28°C 에 도달할 것으로 예측될 때 주의보 발령, 28°C 이상이 3일 이상 지속될 경우 경보 발령3) 저수온 특보 : 수온이 4°C 에 도달할 것으로 예측될 때 주의보 발령, 4°C 이하가 3일 이상 지속될 경우 경보 발령

감소를 나타내어, 한국 연근해의 연평균 표층염분 감소율이 태평양 전체 평균에 비해 약 6.5배 높음(그림 2-5).

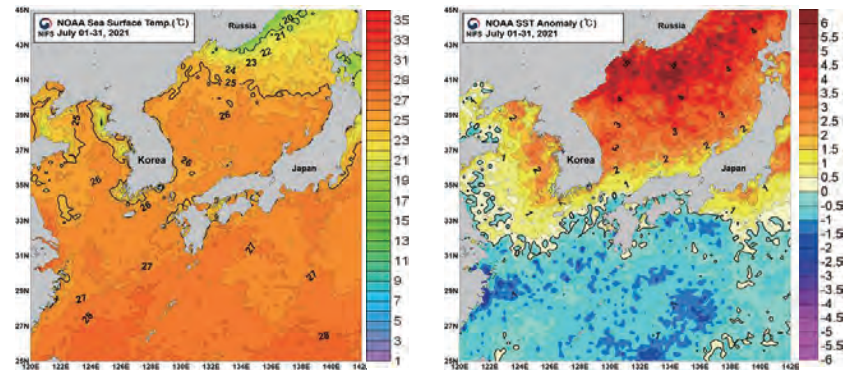


그림 2-4. 인공위성 관측을 통한 2021년 7월 한국 주변해역 월평균 표면수온(좌) 및 표면수온의 평년편차(우) 분포

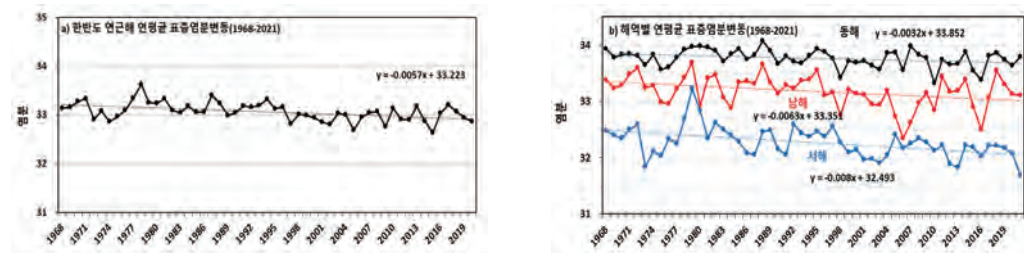


그림 2-5. 최근 54년간(1968~2021) 한국 전 해역(좌) 및 해역별(우) 연평균 표층염분 장기 변동 경향

- ☑ 해역별 표층염분은 같은 기간, 동해 0.17 (-0.0032/yr), 서해 0.43 (-0.008/yr), 남해 0.34 (-0.0063/yr) 감소하여, 표층염분 감소율은 서해가 가장 높고, 동해가 가장 낮았음. 이는 각 해역 주변의 강과 하천으로 유입되는 담수의 영향이 큰 것으로 판단됨(그림 2-5).
- ☑ 대양에서의 염분 변화는 일반적으로 극지방의 온난화에 따른 해수의 담수화 영향 및 지역적인 강수량의 변동 경향에 따라 영향을 많이 받으며, 저위도에서 고위도로 갈수록 염분의 장기 변동 경향은 감소 추세를 나타내는 것이 일반적임(IPCC, 2019). 한국의 경우, 극지방의 영향보다는 대형 하천을 통하여 유입되는 하천수의 유입 변동이 큰 영향을 주고 있음(Chang *et al.*, 2014). 특히 중국대륙에서 유입되는 양자강 유출수의 영향을 주로 받고 있어 여름철 양자강 유출수의 변동과 한국 해역의 염분 변동 경향을 비교해 볼 필요가 있음.
- ☑ 2021년 한국 해역의 표층염분은 2월 31.24~34.75 범위로 서해 연안에서 가장 낮고, 남해와 동해에서 높았음. 평년과의 편차는 -1.08~0.86이었으며, 서해는 평년보다 낮은 반면 남해와 동해는 평년보다 높았음. 8월은 27.90~34.11 범위로 서해 남부해역에서 가장 낮고, 동해에서 가장 높았음. 평년과의 편차는 -3.06~1.75이었으며, 서해 남부해역과 연안이 평년보다 낮은 반면 제주도 남부해역과 동해 외해에서 평년보다 높았음(그림 2-5).

2-2 해양산성화, 빈산소수괴 및 화학적요소 변화

- ☑ 한국 연근해역의 해양산성화 영향을 파악하기 위하여 정선해양관측을 이용하여, 2015년부터 연 3회(2, 4, 8월), 조사별 290개 내외의 수층별 샘플을 수집하여 pH, 이산화탄소 분압⁴⁾(pCO₂), 아라고나이트 포화도⁵⁾(Ω_{ar}) 등을 분석하고 있음.
- ☑ pH는 2021년 4월 표층은 7.73~8.02, 8월 표층은 7.93~8.30의 범위였음. 4월은 서해가 상대적으로 낮았고, 8월은 제주도 북서해역이 높게 나타남. 이런 현상은 여름철 많은 일사량과 높은 수온으로 인해 광합성이 활발해진 결과로 판단됨(그림 2-6).

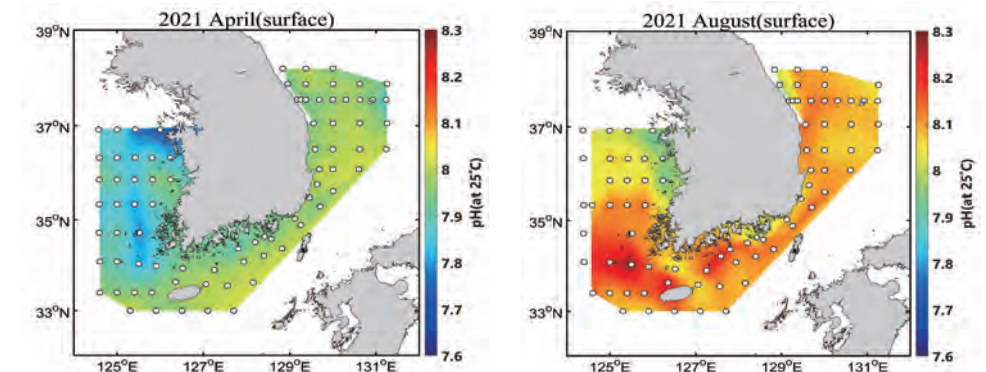


그림 2-6. 2021년 4월(좌) 및 8월(우)의 표층 pH의 분포 경향

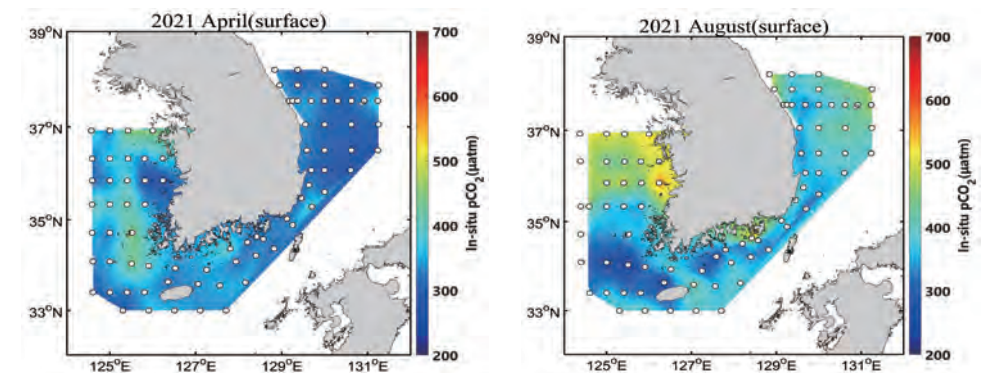


그림 2-7. 2021년 4월(좌) 및 8월(우)의 표층 이산화탄소 분압의 분포 경향

- ☑ pCO₂는 2021년 4월 표층은 277~450 μatm, 8월은 231~564 μatm의 범위였음. 봄철의 경우, pCO₂가 대부분 해역에서 대기보다 낮은 반면 여름철에는 전반적으로 증가하였으며 특히 서해와 외해역에서 높았음. 이는 한국 해역은 대부분의 시기에 대기로부터 해양이 이산화탄소를 흡수하고 있으며, 여름철 일부 해역을

4) 이산화탄소 분압 : 해양의 이산화탄소 농도를 나타냄

5) 아라고나이트 포화도 : 해수가 탄산칼슘 입자를 녹일 수 있는지 여부를 판가름 하는 가능자. 해수의 포화도가 1 이하이면 해수에 탄산칼슘 입자를 녹출시켰을 때 녹는다는 의미이며, 1 이하이면 해수가 탄산칼슘에 관하여 과포화 상태라 녹지않음.

중심으로 해양에서 대기로 이산화탄소 유출이 나타나고 있음을 시사하고 있음. 이와 같은 $p\text{CO}_2$ 의 변화는 수온과 식물플랑크톤의 광합성에 많은 영향을 받는 것으로 판단됨(그림 2-7).

- ◎ 한국 연안의 연속적인 해양산성화 영향 파악을 위하여 동해 포항시 인근에 고정관측점을 설치하여 2019년부터 $p\text{CO}_2$ 를 자동 측정하고 있음. 연속관측 결과 겨울철~봄철에는 많은 양의 이산화탄소가 해양으로 흡수되고 있으며, 여름이 시작되면 서수온이 높아지면 대기로부터 이산화탄소 방출이 이루어지고 있음을 확인할 수 있음(그림 2-8)

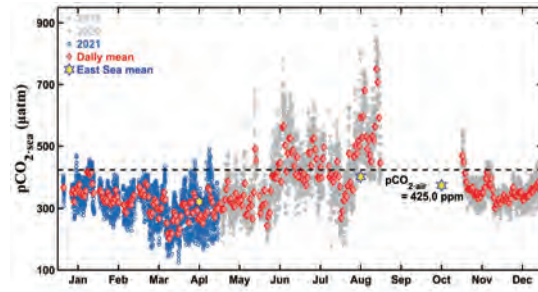


그림 2-8. 동해 연안 이산화탄소 분압 모니터링 시스템에서 측정된 해수 이산화탄소 분압 변동

- ◎ 최근 31년간(1991~2021) 한국 해역의 연평균 표층 용존산소 농도는 5.67mL/L이며, 동해와 남해는 5.49mL/L로 평균과 유사하였고, 서해는 6.13mL/L로 비교적 높았음. 31년간 장기 변동 경향은 서해는 다소 상승하였으나 동해와 남해는 뚜렷한 경향을 보이지 않았음.
- ◎ 저층 용존산소 농도는 해역별로 동해 500 m, 서해 50 m, 남해 75 m 수심을 기준으로 비교한 결과, 표층보다 각각 0.21mL/L, 0.30mL/L, 0.72mL/L 낮았으며, 동해는 전반적으로 감소하는 추세이나 서해와 남해는 뚜렷한 경향이 없었음(그림 2-9).
- ◎ 2021년 한국 해역의 표층 용존산소 2월 평균은 6.10mL/L로 평년에 비해 0.09mL/L 낮았으며, 서해가 6.77mL/L로 가장 높고 남해와 동해는 약 5.90 mL/L로 유사하였음. 8월 평균은 높은 수온으로 용해도가 낮아 2월보다 낮은 4.76 mL/L로 평년보다 0.25 mL/L 낮았으며, 서해와 남해는 $5.00 \pm 0.05\text{mL/L}$ 범위로 유사하였으며 동해는 4.55mL/L로 가장 낮았음(그림 2-10). 2월보다 8월에 평년보다 더 낮은 농도를 보인 원인은 7월 동해를 중심으로 평년 대비 2~6℃ 높았던 수온 영향인 것으로 추정됨.

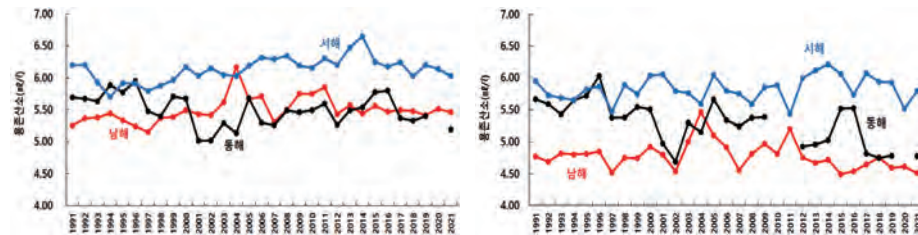


그림 2-9. 최근 31년간(1991~2021) 한국 해역별(동, 서, 남해) 연평균 용존산소 농도(mL/L) 장기 변동 경향(좌: 표층, 우: 동해 500 m, 서해 50 m, 남해 75 m)

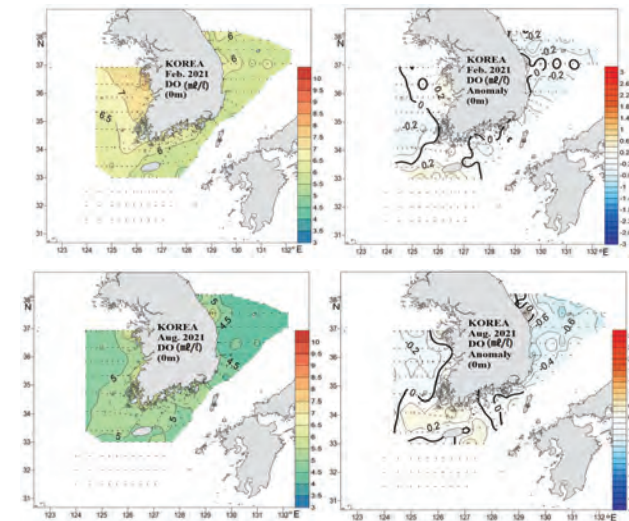


그림 2-10. 한국 주변해역의 2021년 2월(상)과 8월(하) 표층 용존산소 농도(mL/L)(좌)와 평년편차(우)

- ◎ 빈산소수괴(Hypoxia water masses)는 온난화에 따른 성층 강화, 집중호우에 따른 담수 유입량 증가 등과 같은 기후적인 요소와 해양오염 등과 같은 비기후적인 요소에 의하여 수괴 내의 산소 농도가 2~3 mg/L 내외까지 감소하는 현상으로 향후 온난화의 심화에 따른 연안역의 성층 강화로 인한 연직 혼합 감소로 미래에 더욱 심각한 빈산소수괴의 리스크에 노출될 우려가 있음을 보고하고 있음(IPCC, 2019).
- ◎ 빈산소수괴 발생시기와 강도는 기후변화에 따른 기온과 강우변화에 직·간접적 영향을 받음. 최근 10년간(2011~2020) 빈산소수괴 평년편차를 분석한 결과 빈산소수괴 세력이 가장 강했던 해는 2020년으로 평년대비 산소농도가 무려 2 mg/L 이상 낮았고, 표층까지 빈산소수괴가 상승하여 대규모 양식피해가 발생함(그림 2-11).

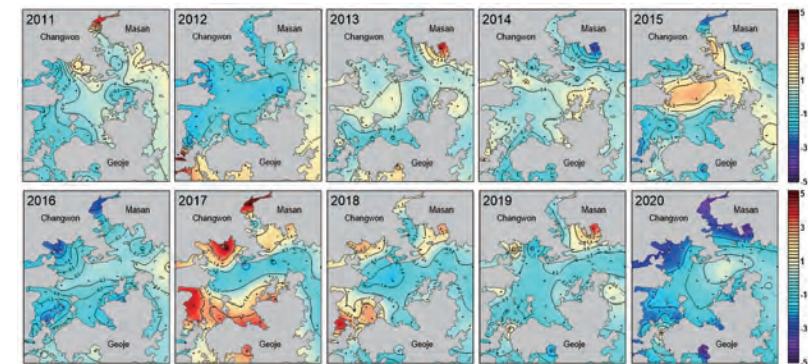


그림 2-11. 진해만 저층 빈산소수괴 평년편차의 10년간(2011~2020) 경년변화

- ◎ 2020년의 빈산소수괴 이상발생은 유례없는 여름철 장기간의 집중강우로 인해 다량의 유기물이 유입→침강→퇴적된 것이 주된 원인으로 이상기후로 인한 강우패턴 변화가 미래의 연안양식어장 운영체계 변화로

이어질 수 있음을 시사하고 있음. 2021년의 경우 수하식 양식시설에서 전층 폐사는 발생하지 않았는데, 이는 양식생물 서식 수심까지 빈산소수괴가 상승한 시기가 드물었고, 이로 인하여 상부층과 하부층에 동시에 저염분 및 빈산소가 발생한 기간이 매우 짧았던 것이 주된 요인으로 판단됨.

- ◎ 집중강우는 빈산소수괴 발생기간의 장기화, 발생범위의 수직방향 확장과 관련성이 높음. 2020년 7월 강우량(595.0 mm)은 24년 평균값(336.9 mm) 대비 258.1 mm 많았고, 2019년 10월 강우량(240.0 mm)도 24년 평균값(76.9 mm) 대비 163.8 mm 많았으며 두 시기 모두 빈산소수괴가 중층과 표층까지 상승하여 수직방향으로 확장되는 현상이 관측됨(그림 2-12). 빈산소수괴 발생범위의 수직방향 확장은 수하식 양식 생물에 치명적인 영향을 줄 수 있으므로 추후 지속적인 연구를 추진할 계획임.

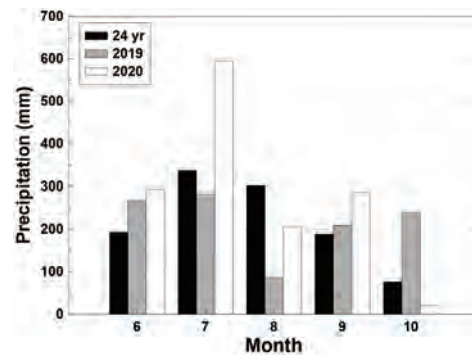


그림 2-12. 월평균 강우량(진북 AWS : 24년 평균, 2019년, 2020년)

- ◎ 최근 21년간(2001~2021) 한국 연근해역에 대하여 영양염류의 장기 변동을 해역별로 살펴봄(그림 2-13).

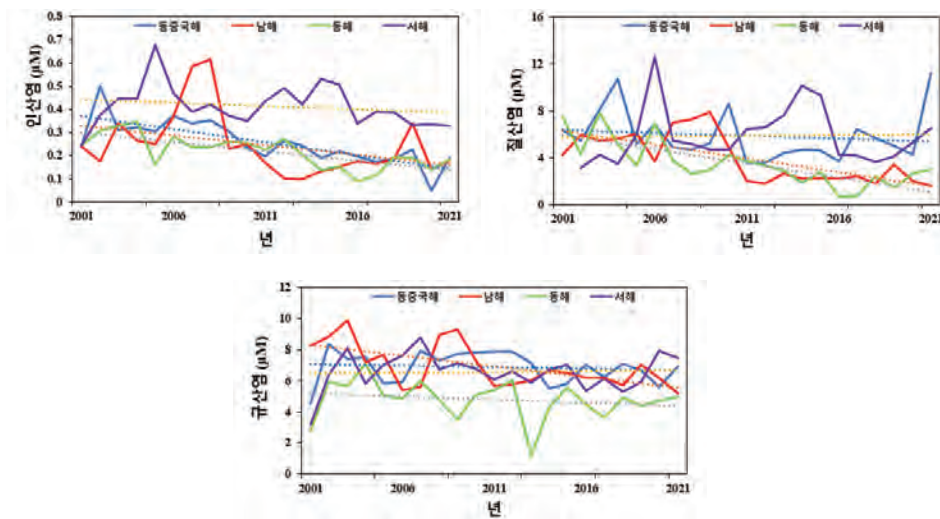


그림 2-13. 최근 21년간(2001~2021) 한국 연근해의 해역별 연평균 표층 인산염, 질산염 및 규산염의 변동 경향

- ◎ 표층 인산염 농도는 전 해역에서 감소하는 추세임. 특히 서해, 남해 및 동중국해에서 감소폭이 컸으며, 동중국해에서 연간 0.012 μM 이 감소하며 감소폭이 가장 컸음.
- ◎ 표층 질산염과 규산염 농도는 서해를 제외한 전 해역에서 감소하였음. 질산염 농도는 동해에서 연간 0.240 μM , 규산염 농도는 남해에서 0.135 μM 이 감소하며 다른 해역에 비해 감소폭이 컸음.
- ◎ 한국 연근해역에서 영양염류는 감소하는 추세이며, 특히 인산염의 경우 식물플랑크톤 성장을 저해할 정도로 낮은 농도임.
- ◎ 이는 전 지구적으로 해양온난화와 표층 성층 강화로 인한 저층으로부터의 영양염의 표층 공급 감소 경향과 일치함(IPCC, 2021).

2-3 유해생물 출현 및 기초생산력 변화

- ◎ 한국의 적조는 1970년대에는 규조류에 의해 짧은 기간 간헐적으로 발생하였으나, 1980년대부터 규조류 보다 와편모조류에 의한 발생 빈도가 높아져 적조 원인종의 천이가 일어났음. 1990년대부터 양식어류 폐사를 유발하는 코클로디니움(*Cochlodinium polykrikoides*)(그림 2-14) 적조가 발생하기 시작하여, 1995년 764억원의 최대피해를 일으킨 이후 매년 유해적조로 인한 피해가 발생함(그림 2-15).



그림 2-14. 적조 유발 와편모조류 코클로디니움 모습

- ◎ 2021년 코클로디니움은 5~6월 대마난류를 따라 외해에서 최대 0.005개체/mL 밀도로 분포하여 적조발생의 우려가 있었으나, 북동풍의 영향으로 외해역의 코클로디니움이 연안쪽에서 집적되는 양상은 나타나지 않음. 또한, 늦여름을 중심으로 태풍의 영향과 잦은 강우로 인한 담수 유출량의 증가는 *Chaetoceros* spp., *Skeletonema* spp. 등 규조류의 대량 번식으로 이어져 중간 경쟁에 따라 코클로디니움 성장에 불리한 환경이 조성되어 유해적조의 대량 발생은 없었던 것으로 여겨짐.
- ◎ 최근 기후변화로 인한 여름철 수온 상승은 증발량을 증가시켜, 구름이 형성되는 일수가 늘어났으며, 한국에 형성된 정체전선으로 잦은 강우가 발생하였음. 특히 2021년의 경우, 강우로 인해 육상에서 유입된 영양염이 규조류의 성장을 촉진시켜 코클로디니움 보다 지속적인 경쟁우위를 갖게 되었음.

- ㉟ 유해적조는 전 지구적으로 1980년대 이후 연안역을 중심으로 넓은 영역, 잦은 주기로 발생하고 있음. 유해적조의 발생원인은 해양온난화, 이상고수온, 산소부족, 부영양화 및 해양오염 등의 기후적 요소 및 비 기후적 요소가 모두 영향을 주고 있음(IPCC, 2019)

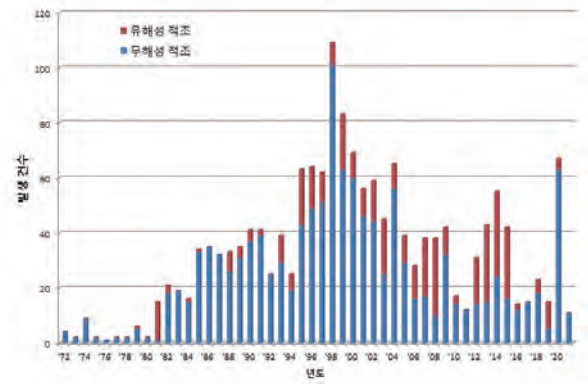


그림 2-15. 최근 50년간(1972~2021) 한국 연안 연간 적조발생 건수

- ㉟ IPCC(2019)는 해양온난화의 영향으로 최근 지역적인 난류성 독성 플랑크톤의 대량 출현 양상이 빈번히 나타나고 있고, 향후 온난화의 가속화로 인하여 난류성 유해적조 생물들의 출현 빈도가 증가할 것으로 예측하고 있음. 따라서 코클로디니움 뿐만 아니라 한국 연안에서의 새로운 유해적조 생물종의 출현 및 종의 천이 현상, 이들 유해적조 생물종이 양식생물에 미치는 영향 등에 대하여 선제적인 연구를 진행할 예정임.
- ㉟ 국립수산학원은 2006년부터 한국 연근해에 출현하는 해파리의 종 및 출현량 파악을 위한 모니터링을 수행하고 있음. 모니터링은 사회·경제적으로 문제를 일으키는 대량출현 해파리(노무라입깃해파리, 보름달물해파리)와 독성해파리를 대상으로 하고 있음. 해파리 대책반에서는 전국 어업인을 대상으로 한 청취조사, 국민 참여 웹 신고를 바탕으로 피해에 대응하고 있음.
- ㉟ 노무라입깃해파리는 2006년부터 출현율의 증가와 감소를 반복하는 경향이 있었으나 2017년부터는 증가하는 경향을 보임. 최근 2년 동안에는 특보발령 이후(2010년) 한 달 이른 시기에 특보가 발령되었고, 특보 기간도 140일 이상 유지됨. 보름달물해파리는 2016년 이후 감소하고 있으나, 일부 해역(전남, 경남)에서는 국지적으로 대량 출현하는 경향이 나타남(그림 2-16).

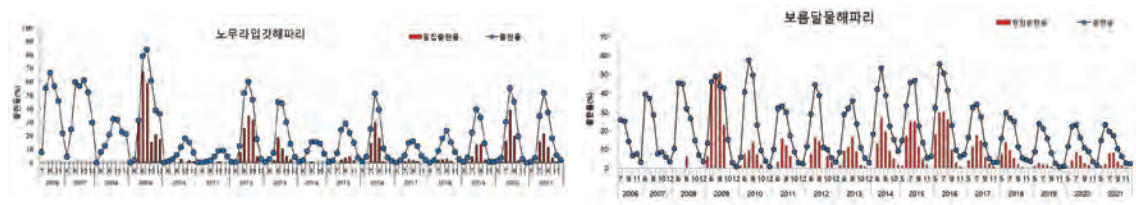


그림 2-16. 최근 16년간(2006~2021) 노무라입깃해파리(좌), 보름달물해파리(우) 출현율 경향

- ㉟ 한국 연근해에 출현하는 독성해파리(그림 2-17)는 11종이며, 2021년의 경우 총 10종의 다양한 독성해파리 출현이 있었음. 독성해파리 출현 경향은 어업인 청취조사, 현장조사 및 주요 해수욕장 모니터링을 통하여 확인되거나 신고된 건수로 결정함. 최근 5년간 독성해파리 예찰 결과를 보면, 출현건수는 커튼원양해파리는 약간 감소하는 경향을 보였지만, 유령해파리, 야광원양해파리, 작은상자해파리는 2021년에 최근 5년 중 가장 높은 경향을 보였으며, 지속적으로 출현건수가 증가하는 경향을 나타냄(그림 2-18).

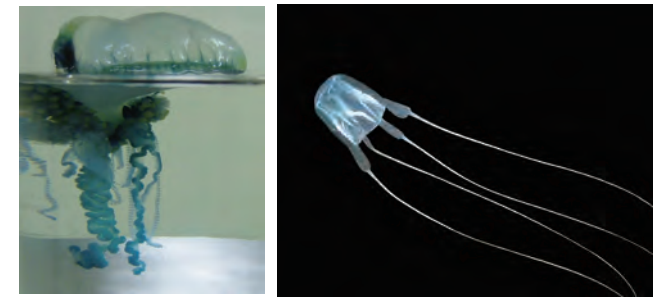


그림 2-17. 한국에 출현하는 대표적 독성해파리인 작은부레관해파리(좌)와 작은상자해파리(우)



그림 2-18. 최근 5년간(2017~2021) 한국 연근해의 독성해파리 출현건수

- ㉟ 최근 해파리 출현 증가는 여름철 고수온 및 겨울철 저수온 등 수온의 계절별 양극화 심화(Han and Lee, 2020)에 따라 해파리 폴립 증가로 이어져 해파리의 개체수를 증가시키는 것(Feng *et al.*, 2015a)으로 추정하고 있음. 또한 IPCC(2019)에서는 해양온난화의 영향으로 해파리와 같은 외래 침입종의 증가가 해양 관광 및 수산업에 악영향을 미칠 것으로 전망하고 있음.
- ㉟ 한국 연근해 기초생산력⁶⁾을 파악하는 연구는 1980년대에서부터 시작되었으나 연근해 전 해역의 동 시간 계절 조사는 이루어지지 않음. 2018년부터 시작된 국립수산과학원 정선해양관측에서의 안정동위원소 ¹³C를 이용한 기초생산력 조사가 연근해 기초생산력의 첫 계절 조사 시도가 할 수 있음.
- ㉟ 2018년부터 2021년까지 해역별 평균 연 기초생산력은 서해 140 gCm⁻²yr⁻¹, 남해 131 gCm⁻²yr⁻¹, 동해 156 gCm⁻²yr⁻¹, 동중국해 74.75 gCm⁻²yr⁻¹였음(그림 2-19).
- ㉟ 과거 관측(1980~2010년대) 결과, 서해 192 gCm⁻²yr⁻¹, 남해 311 gCm⁻²yr⁻¹, 동해 241 gCm⁻²yr⁻¹, 동중국해 174 gCm⁻²yr⁻¹로 현재의 관측결과에 비해 50~200 gCm⁻²yr⁻¹ 높았음.
- ㉟ 국립수산과학원 관측결과, 연근해 연평균 표층 수온 상승률이 전 지구 평균보다 약 2.5배 높았으며 이는 식물플랑

6) 기초생산력(Primary Production) : 식물들이 단위 시간당 무기물로부터 유기물을 생산하는 능력으로 해양의 기초생산은 식물플랑크톤에 의존함.

크톤의 생리·생태에 영향을 주어 기초생산력 변화를 일으킨 것으로 판단됨.

- ㉞ 주요 변동 원인은 '표층수온의 상승으로 해양 내 성층 강화로 표층-심층 간 순환의 악화'로 인한 '유광층 영양염류의 감소 또는 환경변화로 인한 식물플랑크톤 군집의 변화' 등이 추정되지만 주기적인 관측이 이루어진 시기가 짧아 장기적인 변화 양상을 파악하기는 어려움.

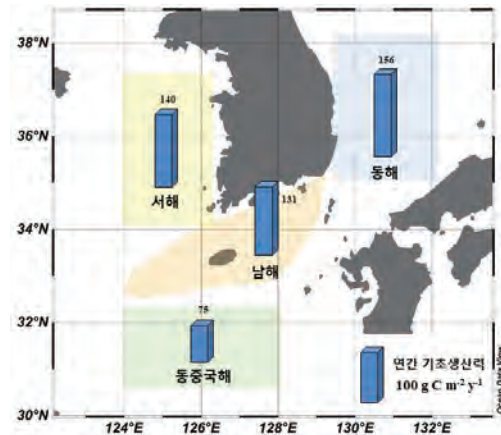


그림 2-19. 최근 4년간(2018-2021) 국립수산물학원에서 관측한 해역별 평균 연 기초생산력

- ㉞ 최근 4년간(2018~2021) 한국 연근해역 식물플랑크톤의 크기 구조 변화를 해역별로 보면(그림 2-20), 과거 규조류와 와편모조류처럼 상대적으로 크기가 큰 식물플랑크톤이 우점하였으나, 최근에는 전 해역에서 크기가 작은 미소편모조류의 우점율이 증가하고 있음. 특히 식물플랑크톤 대번식이 발생하는 봄철에도 서해를 제외한 전 해역에서 3 μm 이하 크기의 식물플랑크톤의 기여율이 높음.

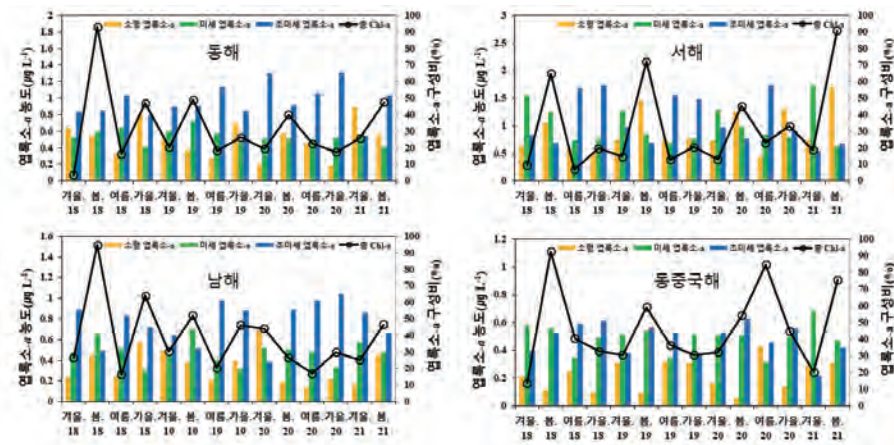


그림 2-20. 최근 4년간(2018-2021) 해역별 식물플랑크톤의 클로로필-a 및 크기 구조 변화

- ㉞ 이는 지구온난화의 영향으로 플랑크톤의 크기가 감소할 것으로 전망한 연구 결과와 일치함(IPCC, 2021).

2-4 해양자료 복원을 통한 장기 해양변화 데이터베이스 구축

- ㉞ 한국근해해양조사는 1917년부터 시작되었으며, 책자형태로 해양관측자료 및 정보를 지속적으로 기록하였음. 현재와 같은 조사 정선과 정점에서 관측이 이루어진 1961년 이전의 관측자료를 디지털화하는 복원 작업을 지속적으로 추진하고 있음.
- ㉞ 90년 이상 연속해서 조사한 해양의 수온, 염분 등 해양환경 관측기록을 편찬한 해양조사 요보(제1호~제9호) 및 해양조사연보(제1호~제15호)가 학술적 가치를 인정받아 해양수산 과학 분야 최초로 “등록문화재 제554호”로 등록(문화재청 고시 제2013-81호)되었음.
- ㉞ 등록문화재로 등록된 해양조사요보 및 해양조사연보와 조선근해해양도 등은 과학기술정보통신부 국립중앙과학관의 엄격한 심사를 통하여 “2021년도 기초과학분야의 국가중요과학기술자료”로 등록되었음(그림 2-21)(국립중앙과학관, 2022).



그림 2-21. 등록문화재 및 국가중요과학기술자료로 등록된 해양조사요보(좌), 조선근해해양도(중) 및 해양조사연보(우)

- ㉞ 또한 1946년부터 1948년 사이에 쓰인 해양관측 조사보고 11권 및 수기 원고 9권을 과거 국립수산물학원에서 근무한 한상복 박사로부터 2022년 4월 기증받음. 이는 상대적으로 한국 연근해의 해양관측 조사 자료가 부족하였던 광복 직후의 한국 해양환경 상태를 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 판단됨(그림 2-22).
- ㉞ 이들 수기로 기재된 조사 자료 및 해양환경 상태에 대한 결과를 최근 해양관측 자료와 함께 비교 분석하고 디지털화함으로써 보다 장기적인 한국 해역의 변동 경향 이해와 더불어 기후변화의 영향 파악에 활용하고자 함.



그림 2-22. 2022년 4월 한상복 박사로부터 기증받은 해양관측조사보고 및 수기 원고

2-5 한국 주변해역 기후변화 미래 전망

- 국립수산과학원은 기후변화로 인한 한국 주변해역의 장기적인 해양환경 변화와 수산업 영향을 예측하기 위하여, IPCC 평가보고서에 사용된 전 지구 기후모델의 대표농도경로(RCP, Representative Concentration Pathways) 시나리오⁷⁾ 및 SSP 시나리오⁸⁾의 예측 자료를 활용하고 있음.
- 상대적으로 낮은 해상도(수십 km~수백 km)의 전 지구 기후모델 예측자료를 한국 해역에 적용하기 위해서는 상세화(Downscaling) 기법이 필요함. 상세화 기법은 큰 스케일의 수치모델에서 지역적 스케일의 정보를 도출하는 방법으로, 역학적 상세화(Dynamical downscaling) 기법과 통계적 상세화(Statistical downscaling) 기법 2가지로 나눌 수 있음. 역학적 상세화 기법은 전 지구 기후모델 자료를 경계값으로 사용하여 고해상도의 지역 기후모델을 구동시켜 역학적·물리적 과정을 모두 반영하여 예측자료를 생산하는 기법임. 통계적 상세화 기법은 전 지구 기후모델 자료와 특정 지역 관측 자료의 통계적 상관성을 도출하여 전 지구 기후모델 예측자료로부터 지역적 예측 자료를 생산하는 기법임.

표 2-1. 본 보고서에 사용된 RCP 및 SSP 시나리오

시나리오 적용 IPCC 평가보고서	종류	의미
AR5	RCP 4.5	온실가스 저감 정책이 상당히 실행되는 경우
	RCP 8.5	현재 추세로 저감없이 온실가스가 배출되는 경우
AR6	SSP2-4.5	중도성장의 사회경제 시나리오로 기후변화 완화 및 중간 단계의 사회경제 발전 정도를 가정하는 경우
	SSP5-8.5	산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우

7) RCP 시나리오 : 온실가스 배출의 시간에 따른 변화 정도를 복사강제력으로 부여한 기후변화 시나리오. IPCC 제5차 기후변화 평가보고서에 사용됨

8) SSP 시나리오 : 온실가스 감축 수준 및 기후변화 적응대책 수행 여부 등에 따라 미래 사회 경제 구조가 어떻게 달라질 것인가를 고려한 기후변화 시나리오. IPCC 제6차 기후변화 평가보고서에 사용됨.

- IPCC AR6에 사용된 새로운 기후변화 시나리오인 SSP 시나리오 기반의 전 지구 기후모델 예측자료를 활용하여 통계적 상세화 기법으로 이상수는 다발 해역에 대한 2100년까지의 시나리오별 수온 변화를 분석하였음(표 2-1).
- 통계적 상세화 기법 중 지역 정보 산출이 용이하고 계산 효율성이 높은 Delta 기법⁹⁾을 적용하였음. Delta 기법은 장기적 평균치의 변화가 모든 자료에 균일하게 적용되며, 관측된 과거자료와 재현된 모델자료의 차이를 미래 기후변화 시나리오 예측 자료에 적용하여 변동성을 향상시킬 수 있음.
- 통계적 상세화 기법을 적용하여 제6차 결합 모델 상호비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)¹⁰⁾ 모델 중 공간해상도가 높고 재현성이 높은 것으로 알려진 5개 전 지구 기후모델(독일 MPI-ESM1.2-HR, 미국 CESM2, 프랑스 IPSL-CM6A-LR, 캐나다 CanESM2, 노르웨이 NorESM2-MM)의 과거 재현값(historical run)¹¹⁾과 SSP 시나리오별 예측자료를 이용하여 연안역 6개 지점(서산 지곡, 완도 금일, 여수 신월, 통영 풍화, 부산 기장, 영덕 영해)의 실시간 수온 관측값(2010~2014년)과 비교하여 편의 보정¹²⁾을 통해 SSP 시나리오별 통계적 상세화된 예측값을 각각 구하였음. 5개 모델의 앙상블¹³⁾ 예측을 구한 결과, SSP2-4.5 시나리오는 2100년까지 약 2℃ 수온이 상승하고, SSP5-8.5 시나리오는 2100년까지 4~5℃ 내외 수온이 상승하는 것으로 나타났음(그림 2-23).

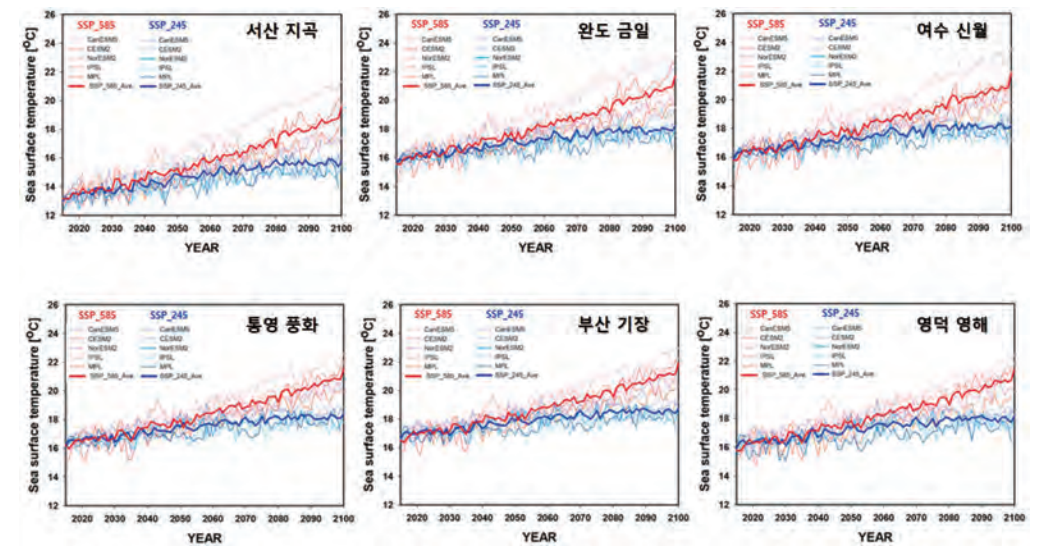


그림 2-23. 전국 연안 6개 실시간 관측소에 대해 통계적 상세화 기법을 적용한 CMIP6 5개 전 지구 기후모델 기반 시나리오별(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 앙상블 예측 자료(2015~2100년)

- 통계적 상세화 기법과 더불어 역학적 상세화 기법을 이용하여 한국 주변 고해상도 해양기후모델 구축을 추진하였음.

9) Delta 기법 : 미래 기후를 시뮬레이션하기 위해 특정 기간의 과거 관측 자료와 수치모델 재현 자료의 평균적인 차이를 미래 예측 자료에 반영시켜주는 통계적 상세화 기법의 하나
10) CMIP6 : 전 지구 기후모델 상호 비교를 통해 기후변화에 대한 이해를 높이기 위한 프로젝트의 제6차 비교 실험. IPCC 제6차 기후변화 평가보고서에서 기후변화 예측결과가 수록됨
11) 과거 재현값 : 수치모델을 이용하여 과거 해양의 물리적 변화를 모사한 수치적인 실험 결과값
12) 편의 보정(Bias correction) : 예측값과 실제값의 전반적인 차이를 제거하는 방법
13) 앙상블 예측 : 여러 개의 기후모델의 결과를 종합해 예측 결과를 도출하는 예측 기법

- ◎ 해양모델은 ROMS(Regional Ocean Modeling System)를 사용하였고, 북서태평양 해역(20.05~51.95° N /114.25~157.45° E)에 대해 수평해상도 1/30(약 3 km)와 30개 연직층으로 구성된 공간격자를 구성하였으며, 황해 및 동해 북부, 오후츠크해 등 겨울철 해빙¹⁴⁾생성 해역의 해양변동 재현성을 높이기 위해 해빙동역학과 해빙열역학을 고려한 해빙모델을 결합하였음.
- ◎ 과거 재현 실험 및 SSP 시나리오 실험을 위해 해양모델의 최적화 작업을 수행하였고, 과거 재현 실험 결과 비교를 위한 대조군 모델 재현값을 생산하기 위해 1993년부터 2021년까지 ERA5¹⁵⁾ 대기모델 및 HYCOM¹⁶⁾ 해양모델 재분석 자료¹⁷⁾를 경계값으로 사용하여 재현실험을 수행하였음. 그 결과 겨울철 저수온 시기 및 여름철 고수온 시기의 주요 해류 및 해양 변동 특성 등이 관측 값과 비교하여 잘 재현됨을 확인하였음 (그림 2-24).

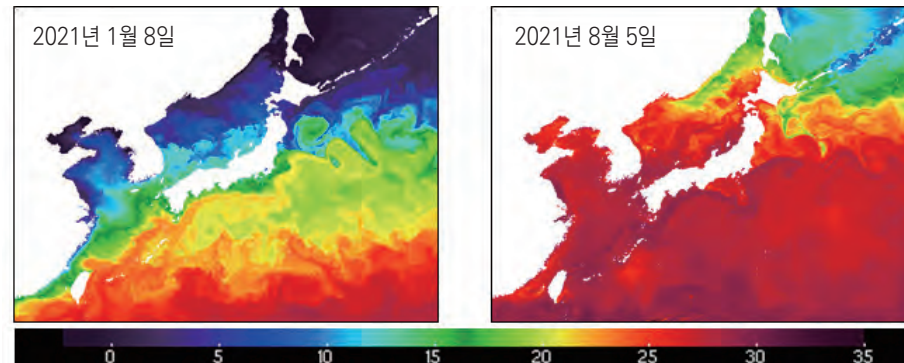


그림 2-24. 2021년 저수온 시기(1.8) 및 고수온 시기(8.5) 표층수온 재현 분포

3장

한국 주변해역의 수산자원 변화

Annual report
for Climate change Trends
in Fisheries, 2022

ACT Fish
2022



3-1. 연근해 어업생산량 변동 및 어종 변화

3-2. 아열대성 수산·해양생물 출현

3-3. 수산자원 분야 기후변화 미래 전망

14) 해빙(Sea ice) : 바닷물이 얼어서 생긴 얼음

15) ERA5 : 유럽중기예보센터(ECMWF)의 5세대 과거 재현 자료로서, 관측자료를 이용하여 최적화된 수치모델 기반의 기상 재현 자료

16) HYCOM : 전 세계적으로 많이 사용되는 해양 수치모델의 하나로써, 세 가지 종류의 연직 좌표계(등밀도, 등수심, 시그마 좌표)를 혼합하여 여러 해역의 해양학적 특성을 잘 재현할 수 있도록 개발된 해양모델

17) 재분석 자료(Reanalysis data) : 다양한 관측 자료를 이용하여 수치모델의 오차를 최소화시켜 얻은 격자화된 과거 재현 자료

제3장

한국 주변해역의 수산자원 변화

3-1 연근해 어업생산량 변동 및 어종 변화

3-1-1. 어업생산량 변동

- ㉞ 연근해 어업생산량은 1980년대(1980~1989)에 151만톤 내외였으나, 1990년대 들어 140만톤 수준으로 감소하였음. 이후 감소추세가 가속화되면서 2000년대에는 116만톤까지 감소하였고, 2010년대는 104만톤 수준을 기록함. 최근에는 평균 93만톤 수준을 나타냄(그림 3-1). 2000년대 이후의 어획량 감소는 최근 54년간 약 1.35℃ 상승한 한국 해역의 표층수온 영향이 크게 나타날 수도 있으나, 2000년대 이전은 과도어획, 어업협정에 의한 어장축소 등 다양한 원인이 복합적으로 작용하고 있다고 판단됨. 이러한 영향으로 2000년대 들어 어획노력량이 크게 변동하지 않고 일정 수준을 유지하고 있는 반면에 어획량은 감소하고 있으므로 자원수준은 감소경향을 보이고 있다고 생각할 수 있음.

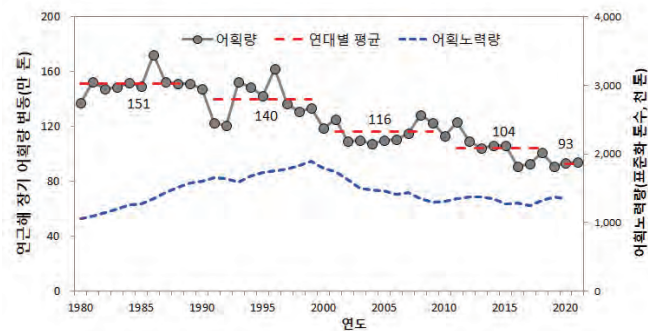


그림 3-1. 연근해 어업생산량과 어획노력량(표준화 톤수)의 장기변동 [출처 : 통계청 어업생산통계]

- ㉞ 남해는 한국 전체어획량에서 가장 높은 비중을 차지하는 해역으로 한국 어업생산량을 대변한다고 볼 수 있음. 어획수준은 1980년대 106만톤 수준을 기록했으나, 1990년대 100만톤, 2000년대 81만톤, 2010년대 73만톤 수준까지 지속적으로 감소함. 동해는 1980년대부터 2000년대까지 21만톤 수준을 유지하였으나, 2010년대에 들어 18만톤 수준까지 감소함. 서해는 1980년대 21만톤 수준에서 1990년대 19만톤, 2000년대 14만톤까지 감소하였고, 2010년대에는 13만톤 수준을 유지함(그림 3-2).

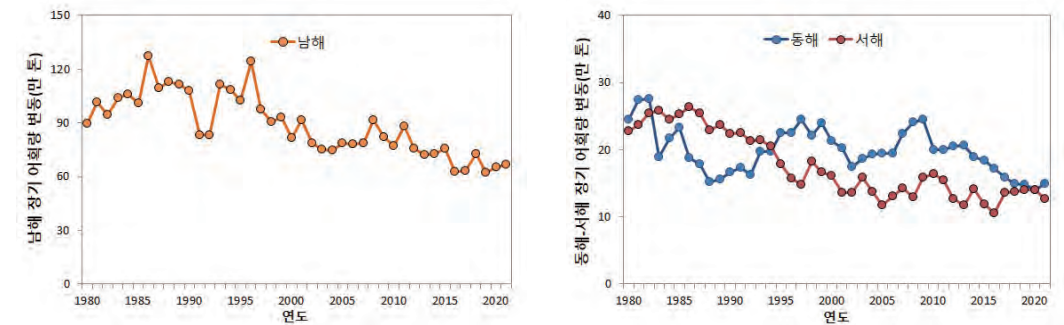


그림 3-2. 해역별 어업생산량 장기변동 남해(좌), 동해, 서해(우) [출처 : 통계청 어업생산통계]

3-1-2. 주요 어종의 어획량 변화

- ㉞ 지난 40년간(1980~2019) 연대별·어종별 어획량의 변동을 살펴보면, 특정 어종의 어획 비율이 높아지면서 연근해에서 어획되는 어종이 점차 단순화(어획 상위 3개 어종 비율 변화: 1980년대 32.7%→2010년대 45.9%)되는 특징을 나타냄(그림 3-3).
- ㉞ 또한 표층·난류성 어종(고등어, 살오징어, 멸치)의 어획량은 증가했지만, 한류성 어종(명태, 도루묵, 임연수어 등)과 저서성 어종(갈치, 강달이류, 병어류)의 어획량은 장기적으로 감소하였음.

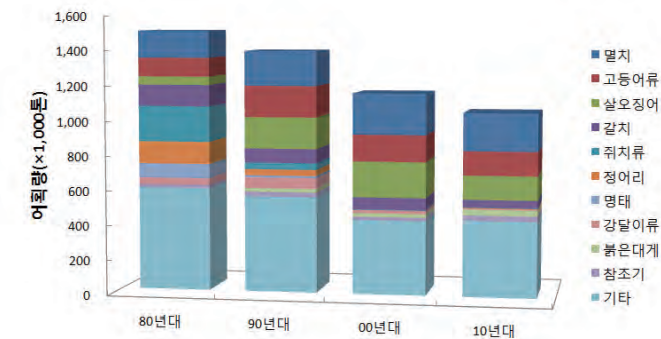


그림 3-3. 연근해 주요 어종의 연대별 어획량 변화 [출처 : 통계청 어업생산통계]

- ㉞ 남해는 1980년대 이후 멸치, 고등어, 살오징어, 삼치 등의 어획량이 증가했고, 갈치, 강달이 등의 어획량은 감소하였음. 쥐치류와 정어리는 1980~1990년대 높은 어획량을 기록했으나, 현재는 자원이 상당히 낮은 수준을 보임(그림 3-4).
- ㉞ 동해는 살오징어, 붉은대게, 문어류, 청어, 가자미류 등의 어획량이 증가했고, 멸치, 쥐치류, 꽂치, 양미리 등은 감소하였음. 명태는 1980년대 높은 어획량을 기록했으나, 1990년대 크게 감소하였고 이후 매우 낮은 수준을 보임(그림 3-5).

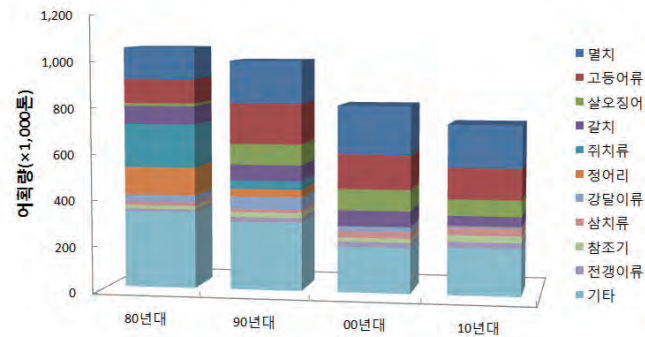


그림 3-4. 남해 주요 어종의 연대별 어획량 변화 [출처 : 통계청 어업생산통계]

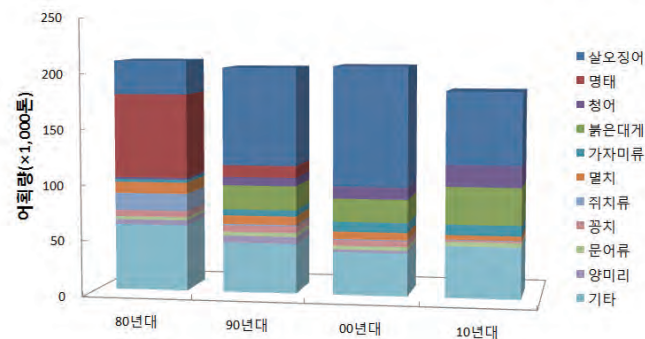


그림 3-5. 동해 주요 어종의 연대별 어획량 변화 [출처 : 통계청 어업생산통계]

☉ 서해는 멸치, 꽃게 등의 어획량이 증가했고, 갈치, 강달이, 갑오징어, 뱀어류는 감소하였음(그림 3-6).

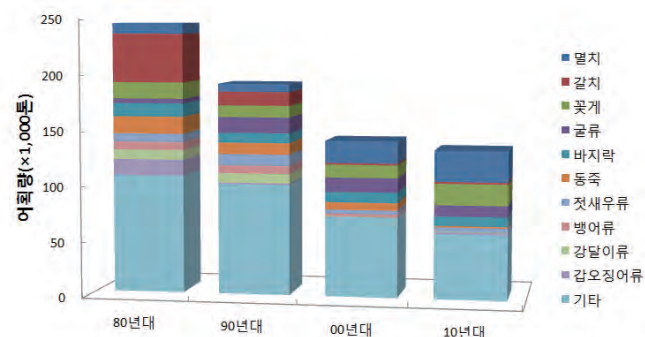
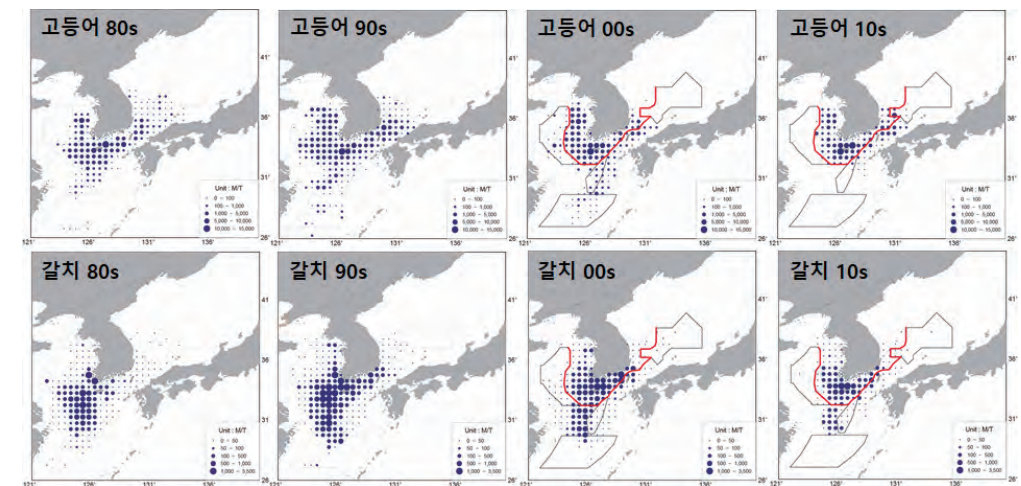


그림 3-6. 서해 주요 어종의 연대별 어획량 변화 [출처 : 통계청 어업생산통계]

☉ 동·서·남해 해역별 주요 상업어종의 어획수준 또는 자원수준의 변화는 기후변화를 포함한 해양환경변화에 의한 징후는 뚜렷하게 나타나고 있지는 않음. 하지만 계절적 특성의 변화가 발생함에 따라 한국 주변 해역의 어장가입시기나 월동시기가 빨라지거나 느려지는 경우가 나타나기도 함.

3-1-3. 주요 어종별 어장 변화

- ☉ 주요 어종을 대상으로 어장 이용의 장기변동을 살펴보면, 고등어 어장분포(대형선망)는 동중국해 중부해역과 서해 잠정조치수역에서 매우 큰 폭으로 감소하는 특징을 나타내고 있음. 갈치의 경우에도 어장분포(근해안강망, 대형기선저인망)는 1980년대 이후 서해 어장이 복잡하였고, 한·중 잠정조치수역 어장이 큰 폭으로 감소함. 전반적으로 어장분포는 2000년대 이후 배타적경제수역(EEZ) 내측으로 축소되는 경향을 나타냄(그림 3-7).
- ☉ 어장변동의 원인은 기후변화 영향뿐만 아니라, 1980~1990년대 어로 기술 및 어선 성능의 발달, EEZ 설정 및 어업협정 체결로 인한 조업 구역 축소(2000년대 초 이후), 과도어획 및 불법어획에 의한 자원상태 변화(1980~2010년대) 등 그 요인이 다양함.
- ☉ 특히, 한중·한일 어업협정으로 인해 이용 가능한 어장이 축소된 현재의 경우, 동중국해 남부에서 복잡하는 여러 상업어종 회유경로의 일부분이 우리나라의 EEZ 경계 밖에 있는 경우가 발생할 수도 있음.

그림 3-7. 고등어(*Scomber japonicus*)와 갈치(*Trichiurus japonicus*)의 어장분포 변화('80~'10년대)

※ 붉은선은 배타적경제수역의 경계, 해역별 다각형은 협정수역(중간수역 및 잠정조치수역)을 나타냄

- ☉ 해역별 어종별 장기 어업생산통계를 활용하여 연근해 주요 60개 상업어종을 대상으로 해역 간 중·장기 어획량 대체현상(Alternation) 여부를 분석한 결과(표 3-1), 장기적(20년 이상)으로 해역 간 대체현상이 뚜렷한 어종은 가자미류, 꽃게, 넙치류, 멸치, 복어류, 젓새우류이며, 이중 꽃게, 넙치류, 멸치는 남해에서는 어획량이 감소 경향을 보이고 있으나, 서해에서는 증가함.
- ☉ 또한 복어류와 가자미류의 어획량은 남해에서 감소, 동해에서 증가 경향을 나타내고 있으며, 젓새우류는 서해에서 감소, 남해에서 증가하는 경향을 나타냄.
- ☉ 2000년대 이후 해역 간 대체현상이 뚜렷한 어종을 해역별로 구분하면 꼼치류, 방어류, 성대류, 아귀류, 홍어류이며,

이중 꼼치류는 남해에서 어획량이 감소하고 서해에서 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 방어류, 성대류, 아귀류는 남해에서는 감소하고 동해에서는 증가함. 또한, 홍어류는 서해에서 감소하고 남해에서 증가하는 경향을 나타냄.

표 3-1. 주요 어종의 해역간 어획량 대체현상 발생시기 및 증감 경향

어종명	어획량 대체 현상 발생 시기	해역별 증감(▲, ▼)경향		
		동해	서해	남해
가자미류	1980년 이후 (장기)	▲		▼
꼼치류	2004년 이후 (중기)		▲	▼
꽃게	1995년 이후 (장기)		▲	▼
넙치류	1985년 이후 (장기)		▲	▼
멸치	1995년 이후 (장기)		▲	▼
방어류	2008년 이후 (중기)	▲		▼
복어류	1990년 이후 (장기)	▲		▼
성대류	2010년 이후 (중기)	▲		▼
아귀류	2006년 이후 (중기)	▲		▼
홍어류	2010년 이후 (중기)		▼	▲
젓새우류	1990년 이후 (장기)		▼	▲

※ 해역별 어획량 대체 현상 발생에서 '장기'는 20년 이상, '중기'는 10~20년을 가리킴

3-1-4. 자원조사를 통한 어종 변화 파악

- ☉ 지난 5년간(2017~2021) 배타적경제수역(EEZ)에서 저층트롤에 의해 조사된 연도별 평균 자원밀도의 경우, 봄철에는 2018년에 1,614 kg/km²로 가장 적었으며, 2019년에 3,035 kg/km²로 가장 많았음(그림 3-8). 가을철에는 2017~2019년에는 3,000 kg/km² 내외의 변동을 보였으나 2020년에는 4,127 kg/km²로 가장 높았으며, 2021년에는 2,335 kg/km²로 가장 낮았음.
- ☉ 어획중량 기준으로 봄철 우점종은 2017년에는 까치상어, 2018~2020년에는 청어였으며 2021년에는 셋멸과 청어였음. 가을철 우점종은 2017년과 2019년에는 고등어와 갈치로 남해동부와 서부에서 우점하였으며, 2018년과 2021년에는 소형 상어류인 두툽상어와 곱상어가 우점하는 특징을 보였음.
- ☉ 지난 5년간 실시한 배타적경제수역(EEZ) 저층트롤 자원조사에서 주요 종의 분포 및 자원량의 뚜렷한 변화는 확인되지 않았으나(그림 3-9), 셋멸 등 먹이생물 종이 일시적으로 대량분포하는 특징을 보였음.

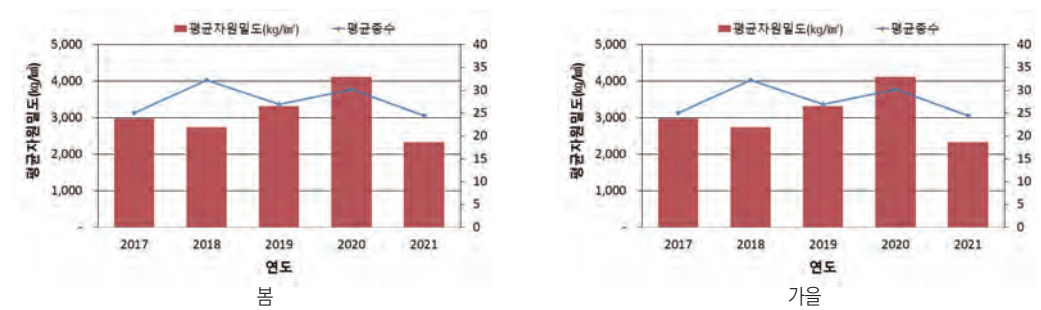


그림 3-8. 2017~2021년도 한국 배타적경제수역(EEZ)의 평균 자원밀도 및 중수

* 2021년 봄철 92해구에서 셋멸 생체량 제외(포함시 11,435 kg/km²)

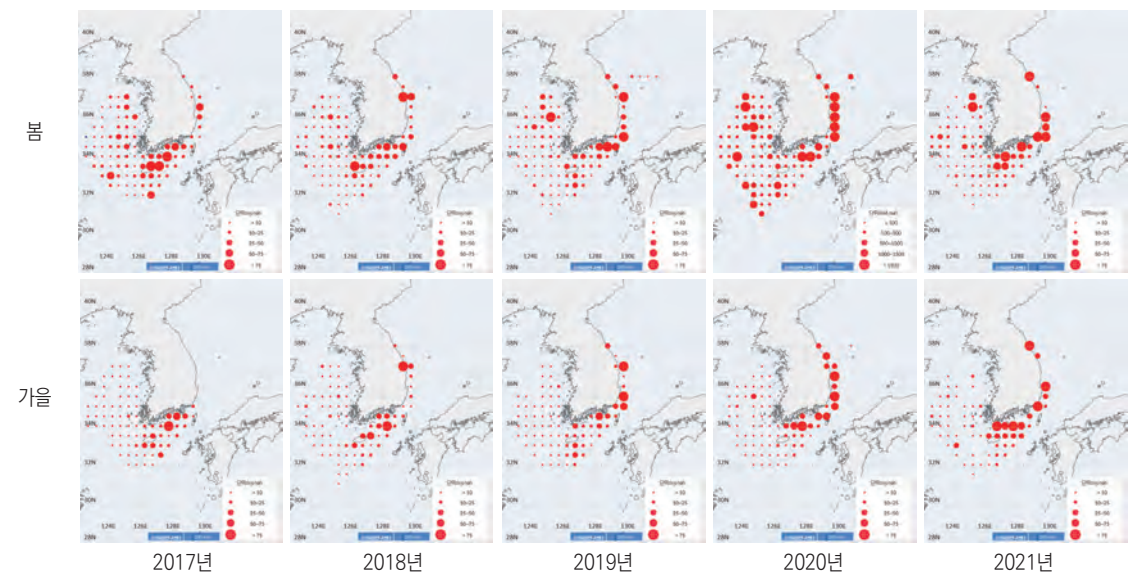


그림 3-9. 2017~2021년도 한국 배타적경제수역(EEZ)의 자원밀도 분포

3-2 아열대성 수산·해양생물 출현

3-2-1. 아열대 수산생물의 변화

- ☉ 아열대 어종은 FishBase(<http://www.fishbase.org>) 및 국내·외 또는 FAO 어류도감에 등재된 어종 중, 남중국해, 대만 및 오키나와 주변 해역의 열대 및 아열대 해역에서 서식·분포하는 어종(지리적 위치: 30° N, 100° W~15° S, 140° E)으로 정의하였음(표 3-2).

표 3-2. 아열대 어종 목록 [근거: FishBase(고도 회유성 제외)]

국명	학명	국명	학명	국명	학명
가시복	<i>Diodon holocanthus</i>	무늬갈돔	<i>Kyphosus cinerascens</i>	은하수놀래기	<i>Kyphosus cinerascens</i>
갈돔	<i>Lethrinus nebulosus</i>	무늬감정어	<i>Kyphosus bigibbus</i>	자리돔	<i>Kyphosus bigibbus</i>
강담돔	<i>Oplegnathus punctatus</i>	무늬홍어	<i>Okamejei acutispina</i>	자바리	<i>Okamejei acutispina</i>
거북복	<i>Ostracion immaculatum</i>	무점황놀래기	<i>Pseudolabrus eoethinus</i>	주걱치	<i>Pseudolabrus eoethinus</i>
고생놀래기	<i>Thalassoma cupido</i>	무지개놀래기	<i>Stethojulis terina</i>	주홍감펍	<i>Stethojulis terina</i>
구갈돔	<i>Lethrinus haematopterus</i>	범돔	<i>Microcanthus strigatus</i>	주황촉수	<i>Microcanthus strigatus</i>
그물코쥐치	<i>Rudarius ercodes</i>	벤자리	<i>Parapristipoma trilineatum</i>	줄갈돔	<i>Parapristipoma trilineatum</i>
금줄촉수	<i>Parupeneus ciliatus</i>	비늘돔	<i>Calotomus japonicus</i>	줄도화돔	<i>Calotomus japonicus</i>
긴꼬리벵에돔	<i>Girella leonina</i>	빨간싹벵이	<i>Antennarius striatus</i>	줄동갈돔	<i>Antennarius striatus</i>
깨알홍어	<i>Okamejei boesemani</i>	불복	<i>Lactoria cornuta</i>	줄벤자리	<i>Lactoria cornuta</i>
고리줄나비고기	<i>Chaetodon wiebeli</i>	살살치	<i>Scorpaena neglecta</i>	줄싹벵이	<i>Scorpaena neglecta</i>
꼬치고기	<i>Sphyaena pinguis</i>	살자리돔	<i>Stegastes altus</i>	쥐돔	<i>Stegastes altus</i>
나비고기	<i>Chaetodon auripes</i>	세동가리돔	<i>Roa modesta</i>	철갑동어	<i>Roa modesta</i>
날뚝양태	<i>Repomucenus beniteguri</i>	세줄얼게비늘	<i>Ostorhinchus doederleini</i>	청복	<i>Ostorhinchus doederleini</i>
남방주걱치	<i>Pempheris schwenkii</i>	실꼬리돔	<i>Nemipterus virgatus</i>	청줄돔	<i>Nemipterus virgatus</i>
노랑가오리	<i>Hemitygon akajei</i>	실놀래기	<i>Suezichthys gracilis</i>	파랑돔	<i>Suezichthys gracilis</i>
노랑벤자리	<i>Callanthias japonicus</i>	솔배감펍	<i>Pterois lunulata</i>	호박돔	<i>Pterois lunulata</i>
노랑싹벵이	<i>Histrio histrio</i>	솔종개	<i>Plotosus lineatus</i>	홍대치	<i>Plotosus lineatus</i>
능성어	<i>Epinephelus septemfasciatus</i>	썩감펍	<i>Scorpaenopsis cirrosa</i>	홍바리	<i>Scorpaenopsis cirrosa</i>
다금바리	<i>Niphonspinosus</i>	아홉동가리	<i>Goniistius zonatus</i>	홍치	<i>Goniistius zonatus</i>
다섯줄얼게비늘	<i>Ostorhinchus cookii</i>	연무자리돔	<i>Chromis fumea</i>	황놀래기	<i>Chromis fumea</i>
독가시치	<i>Siganus fuscescens</i>	옥돔	<i>Branchiostequs japonicus</i>	황점베도라치	<i>Branchiostequs japonicus</i>
두줄베도라치	<i>Petroscirtes breviceps</i>	옥두놀래기	<i>Iniistius dea</i>	흰점꺼끌복	<i>Iniistius dea</i>
두줄촉수	<i>Parupeneus spilurus</i>	용치놀래기	<i>Halichoeres poecilopterus</i>	흰점통돔	<i>Halichoeres poecilopterus</i>
목탁가오리	<i>Platyrrhina sinensis</i>	육동가리돔	<i>Evistias acutirostris</i>	히메치	<i>Evistias acutirostris</i>
				총 75종	

- Ⓢ 제주연안의 아열대 어종 출현상황을 파악하기 위해 2012~2021년까지 어획시험(자망, 통발)을 수행하여 어획물을 분석하였음. 총 177종, 25,446개체, 4,687 kg이 어획되었으며, 아열대 어류는 74종, 10,266 개체, 1,893 kg으로 총 어획종 중에서 42%를 차지하였음.
- Ⓢ 전체 출현종수는 2013년 84종으로 가장 높았으며, 그 외는 67~80종이 출현하였음. 아열대 어종 출현종수는 2013년, 2019년, 2020년에 35종으로 가장 높았고, 그 외는 28~34종이 출현하였음. 아열대 어종 출현율은 2012년에 45%로 높은 출현율을 보인 후, 36~44% 범위를 유지하다 2020년 47%로 가장 높은 출현율을 나타냄(그림 3-10).

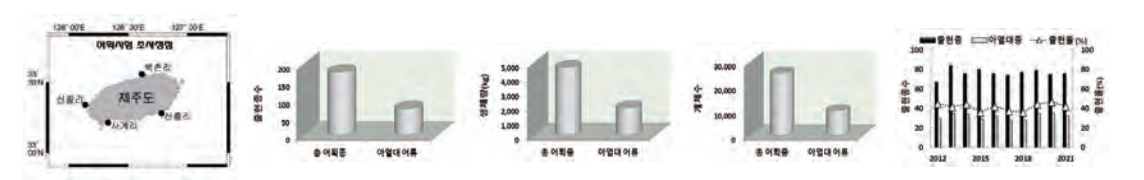


그림 3-10. 어획시험 조사 점점 및 아열대 어종 출현 양상

- Ⓢ 아열대 어종 중 이용 가능 종 탐색은 제주연안 어획시험조사 결과(2012~2021년)를 바탕으로 어획량(생체량)이 유지되면서, 식용 가능하여 이용되는 종을 조사하였음. 이용 가능 종의 어획량은 호박돔, 독가시치, 황놀래기, 긴꼬리벵에돔, 강담돔, 썩감펍, 청줄돔, 벤자리, 무점황놀래기, 금줄촉수, 두줄촉수, 범돔 순으로 많았음(그림 3-11).

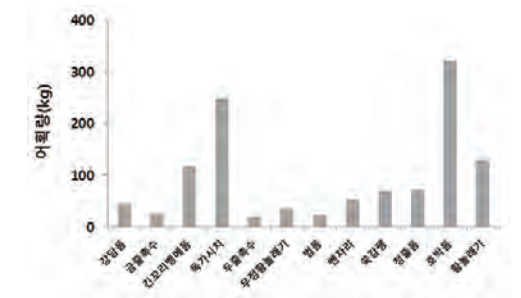


그림 3-11. 최근 10년간(2012~2021) 제주 연안의 아열대 어종 중 이용 가능 종의 어획량

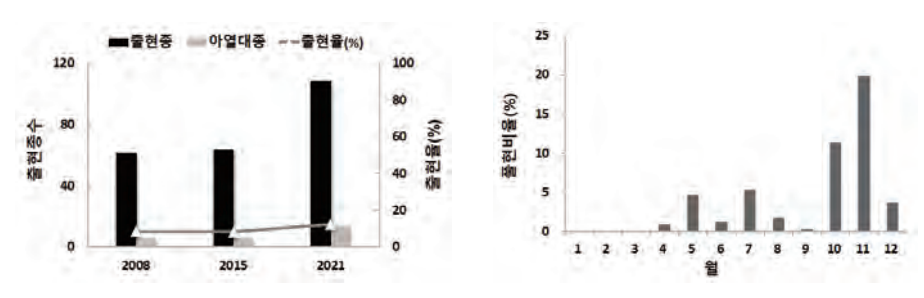


그림 3-12. 남해안의 총 출현종수, 아열대 어종수 및 출현율(좌), 월별 아열대 어종 출현율(우)

- Ⓢ 남해안의 아열대 어종 출현상황을 파악하기 위해 2008, 2015, 2021년에 전라남도 여수시 금오도에 설치된 정치망 어획물을 분석하였음.
- Ⓢ 2008년에 출현종 61종 중 아열대 어종이 5종으로 출현율 8%, 2015년 출현종 63종 중 아열대 어종이 5종으로 출현율 8%, 2021년 출현종 108종 중 아열대 어종이 13종으로 출현율 12%로 출현종 및 아열대 어종 출현율이 증가하는 것으로 나타났음(그림 3-12). 월별 출현상황은 10~11월에 11~20%로 높은 출현율을 나타냈음. 남해안에서 출현한 아열대 어종 우점종은 줄도화돔, 범돔, 독가시치 등이었음.

- ㉔ 동해안의 아열대 어종 출현상황을 파악하기 위해 2008, 2014, 2015, 2021년에 동해안 남부 및 북부 연안의 정치망(7개소) 어획물을 분석하였음.
- ㉕ 2008년에 출현종 92종 중 아열대 어종이 5종으로 출현율 5%, 2014년 출현종 78종 중 아열대 어종이 6종으로 출현율 8%, 2015년 출현종 91종 중 아열대 어종이 2종으로 출현율 2%, 2021년 출현종 134종 중 아열대 어종이 11종으로 출현율 8%로 최근에 아열대 어종의 출현율이 증가하는 것으로 나타났음(그림 3-13). 월별 출현상황은 10월과 11월에 상대적으로 높은 출현율을 보였으며, 동해안에서 출현한 아열대 어종 우점종은 강담돔, 독가시치, 범돔, 줄벤자리 등이었음.

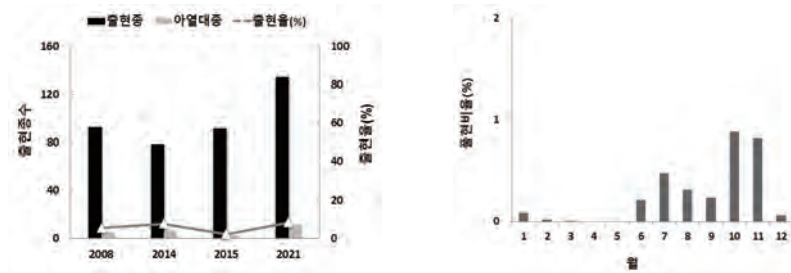


그림 3-13. 동해안의 총 출현종수, 아열대 어종수 및 출현율(좌), 월별 아열대 어종 출현율(우)

- ㉖ 독도 연안의 아열대 어종 출현상황을 파악하기 위해 2013~2021년까지 잠수조사를 실시하고, 현장 야장 기록과 영상촬영 자료를 분석하였음.
- ㉗ 연도별로는 2013년에 출현종 21종 중 아열대 어종이 4종, 출현율 19%, 2016년 출현종 23종 중 아열대 어종이 7종, 출현율 30%, 2018년 출현종 20종 중 아열대 어종이 4종, 출현율 20%, 2020년 출현종 16종, 아열대 어종 5종, 출현율 30%로 나타났음(그림 3-14). 월별 출현상황의 경우 자리돔은 연중 출현하였고, 이를 제외한 나머지 어종들은 11월과 12월에 높은 출현율을 나타냈으며, 주요 출현 아열대 어종은 자리돔, 범돔, 세줄얼게비늘, 줄도화돔, 그물코쥐치, 황놀래기, 파랑돔 등이었음.

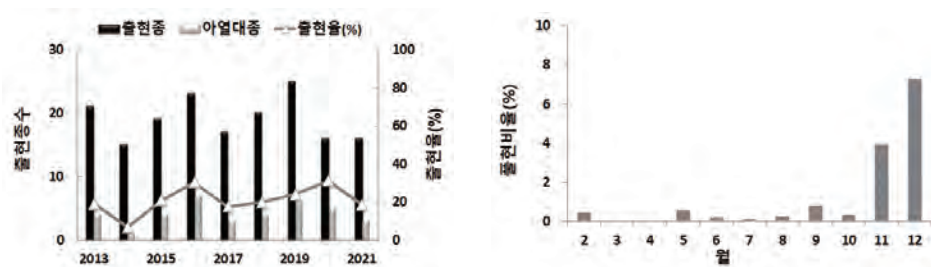


그림 3-14. 독도 연안 총 출현종수, 아열대 어종수 및 출현율(좌), 월별 아열대 어종 출현율(우)

- ㉘ 남해, 동해 및 독도 연안에서 아열대성 어종의 출현율은 점점 증가하는 추세이며, 아열대 어종이 출현하는 계절은 주로 가을철에 높게 나타나고 있음. 이는 한국 해역의 지속적인 수온 상승과 함께 위 해역의 특성을 대표하는 대마난류가 주로 여름철보다 가을철에 강화되는 영향으로 판단됨.

3-2-2. 아열대 해양생물의 변화

- ㉙ 2000년도 이후부터 열대 및 아열대 해역(대만 및 오키나와)에서 서식하는 맹독성 해양생물(파란선문어, 바다뱀류)들이 대마난류수 이동경로에 따라 제주연안에 유입되어 출현 빈도가 점차 높아지고 있음.
- ㉚ 열대 및 아열대 해역에 서식하는 맹독성 문어인 파란선문어(*Hapalochlaena fasciata*)는 2012년에 제주연안에서 처음 발견된 후 출현지역이 확대되면서 2021년까지 총 18마리(제주 9마리, 부산 4마리, 울산 2마리, 경남 남해/거제 2마리, 전남 여수 1마리)가 발견되고 있음. 제주에서는 계절과 관계없이 전 연안에서 나타나고 있음(표 3-3, 그림 3-15).
- ㉛ 열대 및 아열대 해역 서식종이며 맹독성인 넓은띠큰바다뱀(*Laticauda semifasciata*)은 2017년 서귀포 연안에서 처음 포획되었음(그림 3-15). 맹독성 바다뱀류는 한국에서 3종(얼룩바다뱀, 먹대가리바다뱀, 바다뱀)이 보고된 바 있음. 출현 빈도가 증가해 제주(9마리)를 비롯해 전남 여수(1마리) 및 부산(1마리)에서도 출현한 것으로 나타났음.

표 3-3. 파란선문어 출현 현황

출현 시기	출현 장소	비고	출현 시기	출현 장소	비고
2012. 11.	제주 김녕	수과원 조사	2018. 08.	제주 함덕	민원인 제보
2013. 05.	제주 북촌	민원인 제보	2019. 05.	부산 기장군	민원인 제보
2014. 05.	제주 애월	민원인 제보	2019. 07.	부산 기장군	민원인 제보
2015. 05.	제주 삼양	민원인 제보	2019. 10.	경남 남해군	낚시객 제보
2015. 06.	제주 협재	관광객 제보(물림)	2019. 11.	부산 기장군	낚시객 제보
2015. 11.	제주 표선	수과원 조사	2019. 11.	전남 여수시	낚시객 제보
2016. 10.	제주 법환	어업인 제보	2020. 10.	울산 울주군	낚시객 제보
2017. 06.	경남 거제시	낚시객 제보	2020. 12.	부산 기장군	낚시객 제보
2017. 07.	울산	낚시객 제보	2021. 02.	제주 신촌포구	낚시객 제보



그림 3-15. 파란선문어 출현 현황, 파란 선문어 및 자망어선에 어획된 맹독성 바다뱀류

3-3 수산자원 분야 기후변화 미래 전망

- 2장에서 언급된 바와 같이 한국 주변해역에서 기후변화에 따른 해양환경변화가 예상되며, 이로 인해 해양생태계에 미치는 영향을 전망하기 위해 해양순환모델(ROMS)과 생태모델(하위영양단계, NPZD)이 접합된 물리-생물 결합모델(Fennel *et al.*, 2006)을 구축하였고, 주요 생태변수인 질산염, 엽록소, 동물플랑크톤의 변화를 추정하였음(그림 3-16).
- 질산염 농도는 미래에 점차 감소할 것으로 전망되었으며, 특히 온난화 추세가 강한 시나리오인 SSP5-8.5에 북쪽 해역에서 크게 감소할 것으로 전망되었음. 엽록소 농도는 전체적으로 감소하나, 기후변화 시나리오에 따른 차이가 크지 않았으며, 양자강 입구와 동중국해에서는 그 농도가 증가하는 것으로 전망되었음. 동물플랑크톤의 분포는 엽록소 농도와 유사하게 전체적으로는 감소하나 양자강 하구역에서는 증가할 것으로 전망되었음.
- 또한 SSP2-4.5의 시나리오 전망 결과, 동물플랑크톤은 동해에서는 다소 감소, 서해, 동중국해에서는 점차 증가할 것으로 나타났음. 중위 탄소 저장 시나리오를 적용하여 다른 시나리오들과 큰 차이가 나타나지는 않았으나, 미래의 양자강 하구역을 중심으로 동중국해와 서해에서 농도가 크게 증가할 것으로 전망됨.

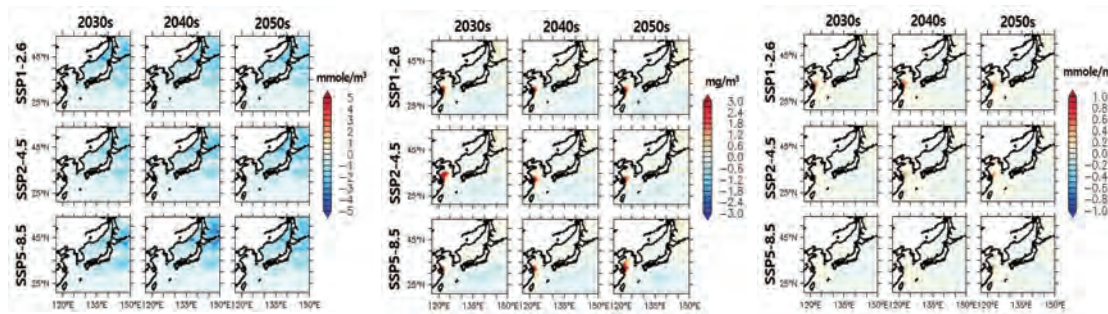


그림 3-16. 기후모형으로 전망한 영양염(좌), 엽록소(중), 동물플랑크톤(우)의 미래변화

- 미래 해양환경 예측자료(CMIP6 기후모형)와 서식지 모델을 활용하여 한국 연근해 주요 수산자원 중 하나인 고등어의 미래 서식지 변화를 전망하였음. 서식지 모델은 Maximum Entropy Model(MaxEnt)¹⁸⁾을 통해 서식지적합지수(Habitat Suitability Index, HSI)를 산정하였으며(Phillips *et al.*, 2006), 2000~2015년 자료를 사용하여 현재 상황을 구축하였고, 미래전망은 2050년대(2050~2059)를 제시함.
- 고등어 HSI 분포는 12~7월에는 남해에 높게 집중되어 있으며, 8월부터 서해로 확장되어 11월까지 지속되었음. 현재 주어장인 남해의 고등어 HSI 미래분포는 12월을 제외하고 지속적으로 감소할 것으로 전망됨. 서해에서는 8~11월에 감소하고 12월에는 증가, 동해에서는 9~11월에 증가하며, 특히 10월에 한국과 러시아 연안을 따라 HSI 분포가 크게 증가할 것으로 전망됨. 현재 활용하는 어장들 중에서 주서식지인 남해의 HSI 분포

는 상대적으로 크게 감소하며, 반대로 서해와 동해남부는 수온이 하강하는 12월에 증가, 동해 북부는 10월에 가장 증가, 울릉도 주변 해역은 10~12월에 증가하는 것으로 전망됨.

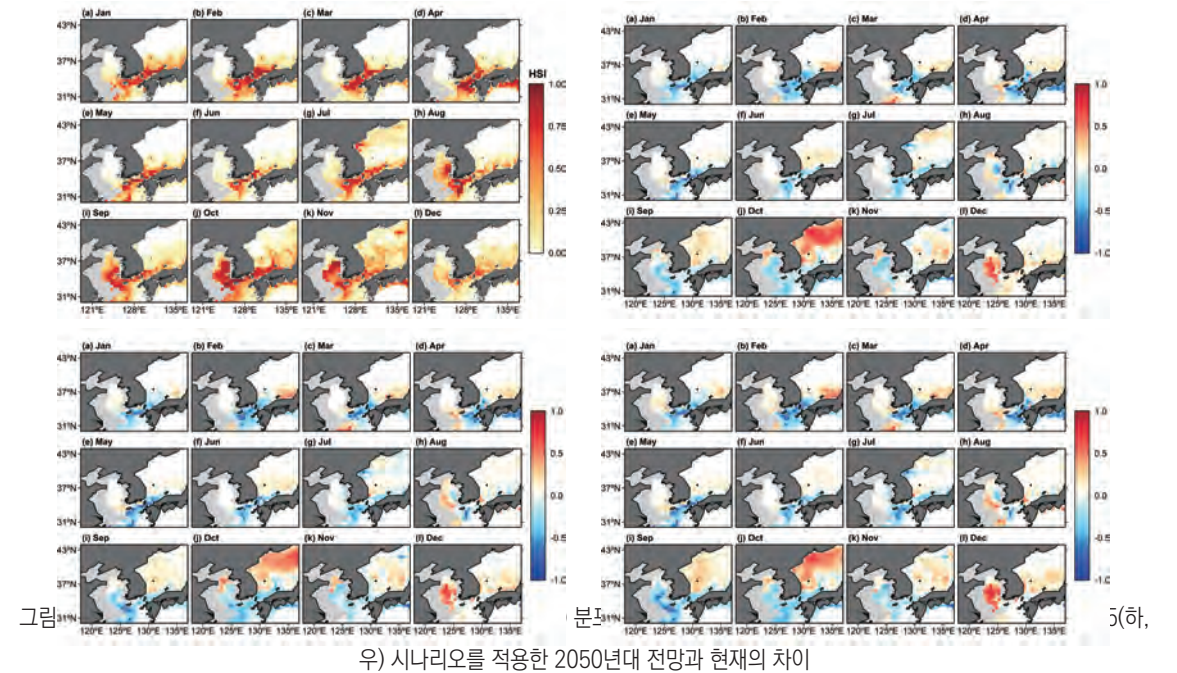


그림 3-17. 기후모형으로 전망한 고등어 HSI 분포의 미래변화
우) 시나리오를 적용한 2050년대 전망과 현재의 차이

- IPCC AR6에 사용된 SSP 시나리오에 따른 수온상승(2장)은 미래 고등어 서식지를 북상시키는 것으로 보임. 고등어 HSI는 탄소배출 시나리오에 따라서는 큰 차이를 보이지 않았으나, SSP1-2.6에서 가장 큰 폭으로 증가하고, SSP2-4.5에서 가장 작게 증가할 것으로 전망되었음(그림 3-17).
- 기후변화 시나리오에 따른 해양환경 변화뿐만 아니라 먹이생물과의 관계를 고려하여 미래 수산자원의 변화를 전망하고 있으며, 고등어 이외에도 살오징어, 멸치, 갈치 등 대중성 어종의 잠재서식지 변화를 추정할 예정임.

18) Maximum Entropy Model(MaxEnt): 머신러닝 기법 중 하나로, 종의 출현 정보를 이용하여 서식지 분포를 파악하는 종분포모형으로 잠재서식지 변화와 예측에 활용함

4장

기후변화 대응 양식업 적응능력 강화

Annual report for Climate change Trends in Fisheries, 2022

2022 수산분야 기후변화 영향 및 연구보고서

Annual report
for Climate change Trends
in Fisheries, 2022

ACT Fish
2022

- 4-1. 양식업 생산 동향 및 이상기후 피해 현황
- 4-2. 고수온 내성 육종품종 개발
- 4-3. 고수온 대응 양식품종 양성기술 개발
- 4-4. 친환경/고효율 양식기술 개발 현황
- 4-5. 양식분야 기후변화 미래 전망

제4장

기후변화 대응 양식업 적응력 강화

4-1 양식업 생산 동향 및 이상기후 피해 현황

4-1-1. 어패류 및 해조류 양식 생산량 변동

- ☑ 천해양식은 양식기술의 발달, 신규어장의 개발, 노후어장의 정비, 양식품종의 다양화, 국민 1인당 연간 수산물 소비량 증가 등으로 생산량이 1980년 541천톤에서 2020년 2,308천톤으로 4.3배 증가함(그림 4-1).

* 천해양식 생산량(천톤) : (1980)541 → (1990)773 → (2000)653 → (2010)1,355 → (2020)2,308

- ☑ 1990년대 중반까지는 비교적 가격이 낮은 김, 미역, 홍합, 굴, 바지락 등이 주요 양식대상종이었으나, 1990년대 중반 이후에는 경제성이 높은 어류(넙치, 조피볼락, 참돔, 농어 등)양식 활성화와 2000년대 전 복양식 본격화로 생산금액은 1980년 대비 26.7배 증가함(그림 4-2).

* 천해양식 생산액(억원) : (1980)1,083 → (1990)4,199 → (2000)6,839 → (2010)18,156 → (2020)28,952

- ☑ 2021년 천해양식 생산량은 입식량 증가, 작황 호조 등으로 송어류, 흰다리새우, 가자미류, 전복류 등의 생산량이 늘어 전년도(2,308천톤)보다 3.9% 증가한 2,397천톤으로 나타났으며, 생산금액은 32,905억원으로 전년도(28,952억원)보다 13.7% 증가함.
- ☑ 2021년 넙치 생산량은 코로나19 등의 영향과 산지 출하가능 물량의 부족으로 전년도(43,813톤)보다 4.6% 감소한 41,791톤으로 나타났으나, 생산금액은 6,622억원으로 전년도(5,392억원)보다 22.8% 증가함.
- ☑ 2021년 조피볼락 생산량은 고수온으로 인한 폐사와 출하가능 물량의 감소로 전년도(21,568톤)대비 23.4% 감소한 17,473톤으로 나타났으나, 생산금액은 전년도(1,711억원) 대비 28.2% 증가한 2,193억원으로 나타남.
- ☑ 2021년 꼬막류(2020년 6,765톤/213억원 → 2021년 4,650톤/190억원)와 우렁쟁이(2020년 30,613톤/632억원 → 2021년 17,400톤/441억원)의 생산량은 고수온으로 인한 폐사로 각각 31.3%, 43.2% 감소하였고, 생산금액도 각각 10.9%, 30.2% 감소함.
- ☑ 다시마류(2020년 675,074톤/870억원 → 2021년 677,537톤/1,188억원), 미역류(2020년 501,501톤/1,310억원 → 2021년 574,585톤/1,368억원)의 생산량과 생산금액은 증가함.
- ☑ 김류(2020년 536,127톤/5,083억원 → 2021년 547,687톤/4,750억원)의 생산량은 증가한 반면, 생산

금액은 감소하였고, 톳(2020년 27,575톤/139억원 → 2021년 20,180톤/96억원)은 생산량과 생산금액 모두 감소함.

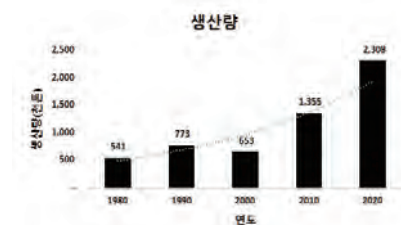


그림 4-1. 천해양식 생산량(1980~2020)

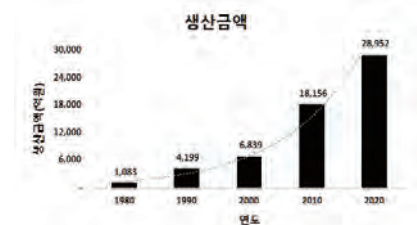


그림 4-2. 천해양식 생산금액(1980~2020)

4-1-2. 이상수온에 따른 양식생물(어패류 및 해조류) 피해 현황

- ☑ 최근 11년간(2011~2021) 자연재해에 따른 피해 규모는 총 2,363억원이었고, 자연재해¹⁹⁾의 종류는 고수온, 적조, 저수온, 태풍, 이상조류, 팽생이모자반 유입 등으로 다양해지고 있음.
- ☑ 2011~2021년 가장 큰 피해를 준 자연재해는 고수온이며, 그 피해액은 1,241억원으로 전체 피해액의 53%였고 다음으로 적조는 피해액이 492억원(21%) 저수온은 268억원(11%)의 피해가 발생하였음. 빈산소수괴와 이상조류는 재해의 5%로 피해금액은 120억원과 118억원으로 각각 나타났음(그림 4-3, 4-4).
- ☑ 양식생물 피해가 가장 많았던 2018년도에는 고수온, 저수온, 한파로 713억원의 피해가 발생하였으며, 그중 고수온의 피해는 605억원으로 피해 지역은 경남, 전남, 충남, 제주도 850어가, 피해물량은 넙치, 전복, 조피볼락, 돔류 등 63,963천 마리가 폐사하였음.
- ☑ 2021년 1~4월, 팽생이모자반의 유입(신안, 진도)으로 김 403어가 99,237책, 다시마 109어가 9,829줄, 톳 108어가 7,742줄, 미역 3어가 205줄의 피해가 발생하였으며, 피해금액은 20억원이었음.
- ☑ 2021년 고수온 특보기간 피해는 통영, 거제, 고성, 남해, 하동, 여수, 완도, 신안, 고흥의 598어가 어류 17,970천 마리, 굴·홍합 697줄의 피해가 발생하였으며, 피해금액은 217억 원이었음. 추가 피해신고로 조사한 전남지역(여수, 순천, 고흥, 보성, 장흥, 강진, 해남, 무안, 완도, 진도, 신안) 3,437어가에서 고수온으로 김, 미역, 새꼬막 피해가 발생하였으며, 피해금액은 95억원이었음. 경남지역(창원, 통영, 거제, 고성) 굴양식에서 영양염류 부족, 빈산소수괴의 영향으로 374어가에서 96억원의 피해가 발생하였음.

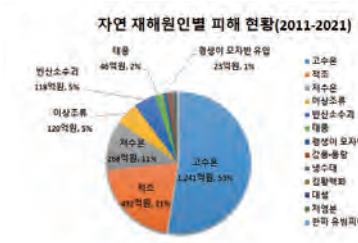


그림 4-3. 최근 10년간 자연재해 원인별 피해 현황

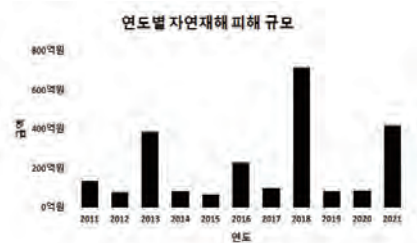


그림 4-4. 연도별 자연재해 피해 규모

19) 자연재해: 농업재해대책법에는 '어업재해'라고 정의하고 있으며, 이상조류, 적조현상, 해파리의 대량발생, 태풍, 해일, 이상수온 등 자연현상으로 인하여 발생하는 수산양식물 및 어업용 시설의 피해를 말함

- ☉ 이와같이, 2021년도에는 갯벌이모자반 유입, 고수온, 이상조류 등의 자연재해로 416억원의 피해가 발생하였음.
- ☉ 2021년도 피해복구 비용은 전체 3,815여가에 복구소요액 360억원으로 국고지원액은 122억원이 소요되었음(불법시설물에서 발생한 피해·입식신고 미이행여가의 피해는 피해조사 및 피해액 산정 대상에서 제외, 재해보험금을 지급받는 보험 가입여가는 복구비 지원 대상에서 제외).

4-1-3. 수온변화에 따른 해조류 양식순기의 변화

- ☉ 기후변화의 지속으로 인해 지난 세기 동안 지구의 평균 표층수온은 $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 상승했으며 (Parry *et al.*, 2007), 특히 극지방, 한대지역 및 천해의 연안수역과 하천에서 크게 증가한 것으로 보고되었음 (Andersen *et al.*, 2013).
- ☉ 해조류의 전 지구적 분포는 주로 수온에 의해 결정되며 (Lüning, 1984; van den Hoek and Lüning, 1988), 해양 온난화는 해조류의 분포와 풍부도에 영향을 끼침.
- ☉ 대부분의 해조류는 최적의 수온에 도달할 때까지는 해수 표면 수온(SST)의 상승에 따라서 대사율도 증가하므로 광범위한 수온에 견딜 수 있음. 그러나 이 대사율은 최적의 SST 범위 이상에서는 감소하게 됨. 최적의 수온보다 약간 높은 수온에서 해조류는 총광합성보다 호흡이 더 크게 증가하게 되는 등 (Andersen *et al.*, 2013) 돌이킬 수 없는 생리학적 반응을 유발하게 됨 (Hwang *et al.*, 2018).
- ☉ 이렇게 수온은 그 자체가 해조류에 치명적이지는 않지만 엽체의 순광합성, 성장 및 항상성을 저하시키고 엽체를 광도, 염분 및 영양소 농도와 같은 다른 스트레스 요인들에 대하여 더욱 취약하게 만들 수 있음 (Wernberg *et al.*, 2010; Qian *et al.*, 2016).
- ☉ 최근, 한국에서 해조류 양식이 시작되는 시기인 9~11월 사이의 표층수온 변동은 변화의 폭이 매우 크고, 해조류 종별 채묘 또는 가이식을 실시할 수 있는 안정적인 수온 범위에 도달하는 시기도 점차 늦어지고 있음.
- ☉ 김은 적정 채묘 수온(일평균수온)인 22°C 이하가 되는 시기가 과거 9월초에서 9월말 이후로, 미역은 적정 가이식 수온 20°C 이하가 되는 시기가 과거 9월 중순에서 10월 초순 이후로, 다시마는 적정 가이식 수온 18°C 가 되는 시기가 과거 10월 초순에서 11월 초순 이후로 늦어지고 있음(그림 4-5).
- ☉ 이처럼 해조류의 채묘시기 지연은 해조류 양식 기간의 단축으로 생산성 및 품질 저하로 이어질 수 있으므로 지속적인 수온 모니터링과 고수온 내성 품종개발 등 적극적인 대응책 마련이 필요함.

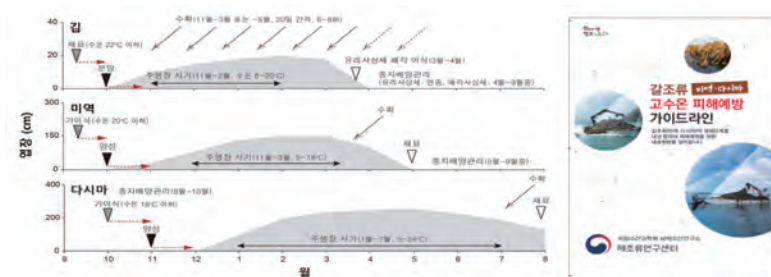


그림 4-5. 해조류의 입식시기 변화(좌) 및 갈조류 고수온 피해예방 안내서(우)

4-2 고수온 내성 육종품종 개발

- ☉ 여름철 고수온으로 인한 양식생물의 폐사와 지속적인 수온상승으로 인하여 양식산업의 피해가 증가하고 있어 이에 대한 대책 마련이 시급함.
- ☉ 고수온에 의한 양식피해는 2012년에 처음으로 보고되었고, 그 중 2018년에 가장 큰 피해가 발생하였으며, 특히, 양식전복의 피해액이 약 20%(약 136억 원, 4,700만 마리 폐사)를 차지함(해수부, 2021).
- ☉ 이에 고수온 환경에서도 잘 견딜 수 있는 고수온 내성 품종을 개발하기 위한 육종연구의 필요성이 대두되었고, 주요 양식생물 중 한국 패류양식 생산액의 65%를 차지하는 참전복을 대상으로 고수온 내성 육종연구를 시작함.
- ☉ 육종은 우수한 형질의 부모로부터 우수한 자손이 나온다는 개념을 바탕으로, 형질이 우수한 부모를 구별해서 뽑는 것을 선발이라고 하며, 선발의 기준은 표현형을 전달하는 유전능력을 평가하고 육종가를 계산하여 다음 세대 생산을 위한 부모를 선발하는 것임.
- ☉ 고수온 내성을 가지는 개체의 선발과 유전능력 평가를 위하여 2015년도 참전복 육종가계를 대상으로 31°C 고수온에 노출한 결과, 가계별로 3.3%~80.5%로 다양한 생존율 차이가 확인되었으며, 고수온내성 형질에 대한 유전력(Heritability)은 0.288로 추정됨.
- ☉ 고수온내성 상위 12가계의 유전능력 평가 결과와 가계 간 유전적 거리를 고려하여 작성한 교배지침에 따라 2017년에 후대를 생산하였으며, 이를 이용한 고수온(31°C) 노출 실험에 의한 재현성 검증을 통해 고수온 내성 가계 선발 성공을 확인함(그림 4-6).
- ☉ 염기서열 분석 기술의 발달로 많은 생물의 유전체 정보가 생산되면서 우수한 형질과 연관된 DNA 정보를 활용하여 목적 형질의 유전능력을 추정하는 유전체 선발(Genomic Selection, GS) 기술 적용이 대서양연어 육종연구에서 보고됨(Odegard *et al.*, 2014).

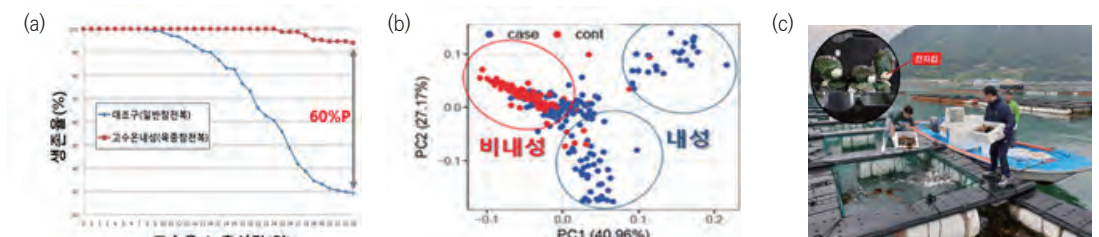


그림 4-6. 고수온 내성 전복 품종 개발 연구. (a) 세대 참전복을 이용한 고수온노출 시험, (b) 유전자 마커를 이용한 고수온 내성 형질 분석, (c) 해사가두리 현장작용 시험

- ☉ 국립수산물과학원에서는 완성된 전복 표준유전체 정보로 고수온 노출 시험에서 생존한 전복과 폐사한 전복의 유전체 서열 정보를 비교한 후 차이가 나는 DNA 서열을 모두 찾아내어 고수온 내성 전복 개체 선발을 위한 유전자 마커로

개발함. 총 326마리 전복의 유전체 정보에서 16,119개의 구별되는 DNA정보를 확보하였고, 그 중 고수온 내성 형질과 연관성이 높은 96개의 DNA정보를 선별하여 유전자 마커로 활용함.

- ◎ 고수온 내성 유전자 마커로 선발한 모패간의 교배를 통해 생산한 고수온 내성 전복의 형질 검정을 위해 완도 해상가두리 양식장에서 현장적용 실험을 실시하고 있음
- ◎ 또한 고수온 내성 유전자 마커의 정확도와 후대 생산 효율성 향상을 위하여 “유전체 정보 기반 우량품종(전복) 개발 및 산업화 연구(2021~2024)”도 추진하고 있음.

4-3 고수온 대응 양식품종 양성기술 개발

- ◎ 지구온난화로 한국 남해안의 고수온 현상이 반복적으로 발생함에 따라 남해안 주요 양식어류(조피볼락, 돔류 등)의 폐사 피해를 줄이기 위한 대체품종 개발이 요구되고 있음(해수부, 2021).
- ◎ 바리류(Groupers)의 경우, 대부분 경제적 가치가 높고, 종 수도 많아 다양한 교잡종이 개발되어 상업적으로 생산되고 있음(Rimmer and Glamuzina, 2019).
- ◎ 새로운 양식품종의 개발방법 중 하나인 교잡품종 개발은 부모가 가진 유용한 형질을 잡종강세 특성을 이용하여 자손에서 발현시키는 육종방법으로 메기류, 배스류, 잉어류에 상업적으로 이용되고 있음(Bartley *et al.*, 2001).
- ◎ 한국에서도 고수온에 강한 고부가 어종을 개발하고자 성장은 느리지만 연안에 서식하는 자바리와 붉바리를 성장이 빠른 아열대성 바리류와 교배하여 성장이 빠른 교잡종을 개발하는 연구가 진행 중임(Noh, 2020).
- ◎ 높은 수온에도 잘 견디는 교잡바리류 개발을 위하여 수컷 대왕바리와 암컷 붉바리 또는 암컷 자바리를 각각 교배하여 대왕붉바리와 대왕자바리를 생산하였으며, 양성기술 확립을 위하여 최적 성장수온, 사료, 사육 밀도 등의 조건에 따른 성장특성 연구를 수행함(그림 4-7).



그림 4-7. 아열대성 양식품종(교잡바리류) 개발

(a) 교잡바리류 가계도, (b) 월동 중인 대왕붉바리, (c) 대왕붉바리 해상가두리 양식장

- ◎ 대왕붉바리의 최적 성장수온은 28℃ 였으며, 사료는 어유첨가분, 곤충분, 배합사료 중 어유첨가분 공급 그룹에서 116.2%의 가장 높은 사료효율을 보였으며, 체내동화효율은 90.4%로 확인됨. 적정 사육밀도, 최적 성장 생존 임계조건(수온, 염분, 암모니아), 적정 사료 구성 등을 구명함. 400 g 내외의 대왕붉바리의 경우, 70% 밀도구를 제

외한 100%, 130%, 160% 밀도구에서 평균 체중이 2개월간 600 g 이상 증가하였고, 800 g 내외 대왕붉바리는 모든 밀도에서 평균 체중이 1,000 g 이상 증가함. 월동가능 수온은 12~14℃, 최적 사육 염분은 20 이상, 용존산소농도는 28℃에서 6~11 mg/L 유지가 적합함.

- ◎ 대왕자바리의 최적 성장수온은 28℃, 생존 하한 수온은 14℃였음. 적정양성에 필요한 환경조건은 하한 염분 5, 최적 염분은 25, 암모니아 1 ppm 이하였음. 적정양성에 필요한 사료조성은 조단백질과 지질 함량 비율이 50:10일 때 성장률이 가장 높았으며, 사료 효율은 112.2%로 확인됨.
- ◎ 대왕붉바리를 대상으로 남해안 2개소(전남 거문도, 경남 통영시 풍화리)에서 겨울철 4개월간 월동가능성을 검증한 결과, 거문도 해역은 평균수온 13.2℃(12.0-14.0℃), 생존율 95%, 풍화리 해역은 평균수온 10.6℃(7.9-14.4℃), 생존율 73%로 나타나 거문도 해역이 월동이 가능한 해역으로 확인되었음.
- ◎ 한편, 전갱이는 난류성 어종으로 한국에서는 자원량 조사 위주의 연구가 진행되었으며, 양식기술 개발에 대한 연구결과가 없는 실정임.
- ◎ 일본에서는 정치망, 선망에서 어획한 자연산 전갱이 종자를 활용하여 가두리에서 양식 후 활어와 선어 형태로 출하하는 시장이 형성되어 있음.
- ◎ 고수온 대응 품종 개발을 위한 전갱이 양식기술 개발 연구에서 수온 30℃까지 생존율 100%였으며, 육지도 가두리 입식 후 배합사료 순치를 거쳐 사육한 결과, 겨울철 월동 가능성도 확인되었음.

4-4 친환경/고효율 양식기술 개발 현황

4-4-1. 해상 및 육상 스마트양식 기술 개발

- ◎ 전 세계적으로 최대어획생산량(Maximum catch amount)은 20세기와 21세기 초반 동안 지구온난화와 남획 등 인위적인 요소로 인해 지속적으로 감소(IPCC, 2019)하고 있음. 때문에 양식업의 중요성이 더욱 높아지고 있음. 2014년 FAO의 미래전망보고서에서는 2030년 양식수산물 소비량이 전체 수산물 소비량의 62%를 차지할 것으로 전망함에 따라 수산양식의 중요성이 더욱 부각되고 있음(이 등, 2021).
- ◎ 한국의 어촌은 어가인구 감소와 고령화 등에 따라 기반이 약화되고 있음. 매년 반복되는 고수온, 적조, 태풍 등 자연재해로 경영에 많은 어려움을 겪고 있으나, 양식방법은 여전히 노동집약형의 전통적인 양식방법에 머무르고 있음. 이를 극복하기 위해서는 4차산업혁명 기술을 양식업에 접목한 스마트양식으로의 전환이 시급한 실정임.
- ◎ 스마트양식이란 양식생물의 생산 전(全) 과정에서 수집된 데이터를 기반으로 양식과정 중 발생하는 문제를 사전에 예측하여 능동적으로 대처하는 지능형 양식기술로, 국가별로 보유 기술력의 차이가 있지만, 주요 기술 분야로 ① 수질 환경측정 및 제어 기술, ②사료 공급 기술, ③순환 여과양식 기술, ④각종 장치와 센서를 제어하고 데이터 수집 환경을 조성하는 데이터 기반의 통합 제어 플랫폼 개발로 구분할 수 있음.
- ◎ 해외에서는 노르웨이를 중심으로 유럽연합(EU), 미국, 일본 등 선진 수산국들은 일찍부터 양식산업의 첨

단화 및 규모화에 투자와 지원을 확대하고 있음. 특히 노르웨이의 마린하베스트社は 연어 단일 품종 양식으로만 연간 3조 722억 원의 매출액을 올리고 있으며, 양식 기자재 업체인 아크바社は 종사원 670명이 연간 1,900억원의 매출을 올리고 있음(이 등, 2016; 유, 2019).

- ◎ 한국에서는 해양수산부에서 2019년부터 부산광역시, 경남 고성군, 전남 신안군, 강원도 강릉시와 양양군, 경북 포항시를 스마트양식 클러스터 사업지로 선정하였고, 국립수산물과학원을 중심으로 스마트양식 연구 인프라 조성 및 기술 개발이 활발히 추진되고 있음.
- ◎ 국립수산물과학원에서는 2018년부터 해상과 육상 담수 스마트양식 테스트베드를 구축하여 최적화를 위한 연구가 추진되고 있음. 경남 하동에 구축된 해상 스마트양식 테스트베드는 육상에 '스마트양식 통합제어시스템'을 구축하여 사물인터넷(IoT)과 정보통신기술(ICT)을 접목해 원격지에서 사료를 공급하고, 양식생물의 건강상태와 사육환경을 실시간으로 모니터링할 수 있음. 또한 어류의 양식 과정에서 생산되는 수질(수온, 용존산소 등)과 사육정보(사료 공급량, 공급 시간)의 수집이 가능한 환경을 구축하였으며, 수집 데이터는 앞으로 스마트양식 지능화 기술 개발을 위한 학습용 데이터로 활용할 예정임(그림 4-8).
- ◎ 2022년부터는 담수 스마트양식 테스트베드에 순환여과양식 시스템 도입과 양식어업인이 손쉽게 사용할 수 있고, 범용성을 갖춘 스마트양식 운영 소프트웨어를 개발, 보급하기 위해 한 단계 고도화된 연구를 수행 중에 있음. 특히, 양식어류의 유영 행동 관찰을 포함한 건강 상태와 생산 전(全) 과정을 모니터링하고, 데이터를 수집하고 분석할 수 있는 시스템이 구축되어 있음.
- ◎ 또한, 국립수산물과학원 사료연구센터(경북 포항)에 육상 해수 스마트양식 테스트베드를 구축하여 한국 대표 양식어종인 넙치를 대상으로 한 연구가 진행될 계획이며, 2024년까지 해상, 육상 해수, 육상 담수 스마트양식 테스트베드 고도화 연구를 통해 스마트양식 기반을 조성할 예정임.

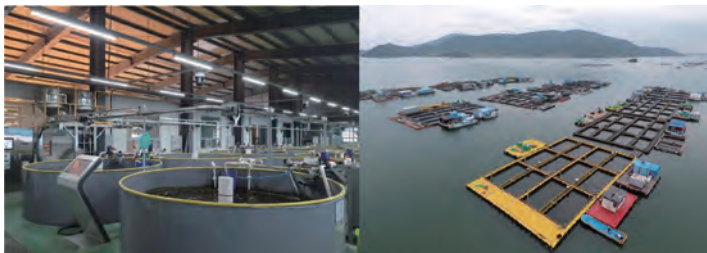


그림 4-8. 육상 담수 스마트양식 테스트베드(좌)와 해상 스마트양식 테스트베드(우)

4-4-2. 아쿠아포닉스 및 바이오플락 등 친환경 양식 기술 개발

- ◎ 바이오플락기술(BioFloc Technology, BFT)은 미생물을 이용하여 사육수를 정화하여 재사용하는 기술로, 1990년 미국 Waddell Mariculture Center에서 새우를 대상으로 연구가 진행된 이후로 다양한 어류에 적용되고 있음(그림 4-9). 한국에서는 2003년 국립수산물과학원에서 BFT를 흰다리새우 양식에 적용하여 양식산업화에 성공하였고, 어류의 경우에는 7종의 어류(항어, 메기, 뱀장어, 틸라피아, 붕어, 미꾸라지, 동자개)가 적용 가능한 것으로 조사되었으며, 항어를 적용하였을 때 일반 육상 양식장보다 생산성이 3.6배 높았음.

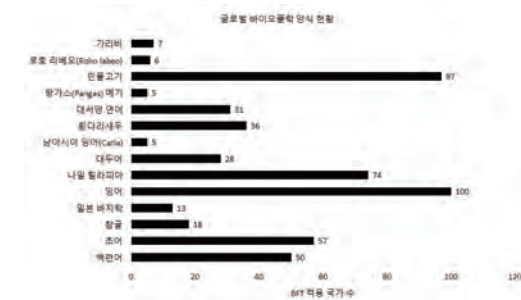


그림 4-9. 글로벌 바이오플락 양식 현황

[출처 : New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering(2020)]

- ◎ 새우는 전 세계 교역량 1위 수산물이며, 한국 양식생산액은 1,300억으로 6위에 해당하는 품종임. 그러나 새우양식 과정에서 발생하는 탄소량(그림 4-10)은 소, 돼지, 양을 생산하는 과정에서 발생하는 양보다 높은 것으로 보고되었으며(Chang *et al.*, 2017), 주요 발생 원인은 사육수 교환(46%), 배합사료 생산 및 사용(41%)인 것으로 조사됨(FAO, 2019).

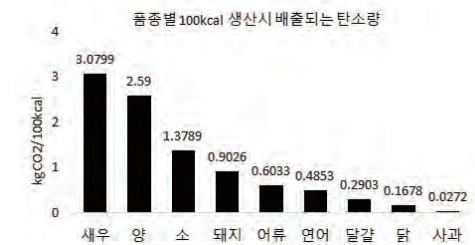


그림 4-10. 품종별 100kcal 생산하는데 배출되는 탄소량 [출처 : Chang *et al.*, 2017]

- ◎ BFT는 미생물을 이용하여 사육수 내 암모니아, 아질산을 제어함으로써 물 사용량을 획기적으로 줄일 수 있음. Erick *et al.*(2020)은 흰다리새우 1 kg을 생산하는데 전통적 양식 방법으로 21톤의 물을 소비하는 반면 BFT는 12.5배 낮은 1.67톤을 사용하는 것으로 보고함. BFT는 사육수 환수율을 낮춤으로써 적정 수온조건을 충족하기 위한 에너지를 절감할 수 있음. 또한 기존 양식방법보다 사료효율이 높아 생산비용을 20% 절감할 뿐 아니라, 사료 생산과 소비에 따른 온실가스 배출 저감에도 효과가 있음. 2021년 기준 한국 흰다리새우 BFT 양식장은 87개소가 운영되고 있음.
- ◎ 향후 BFT 사육수 내 축적되는 질산염 제어를 통한 사육수의 재사용으로 배출수로 인한 연안 오염을 줄이고 지리적 제약에서 벗어나 소비지 인근에서 생산, 소비가 일어날 수 있는 기후변화 대응 탄소 저감형 연구로 발전시키고자 함.
- ◎ 아쿠아포닉스는 수산양식과 수경재배를 융합한 친환경적 생산방법으로 양식산업의 발전과 함께 시장이 확대되고 있음. 세계 아쿠아포닉스 시장은 미국, 유럽, 러시아, 중국, 일본이 큰 비중을 차지하고 있으며, 2026년까지 20억 달러에 도달할 것으로 예상됨(그림 4-11). 1978년부터 2018년까지 529건의 연구 결과가 발표되었고, 경제성 있는 어종 및 작물로 틸라피아와 바질에 제안되고 있음(Brandon and Zheng, 2019).

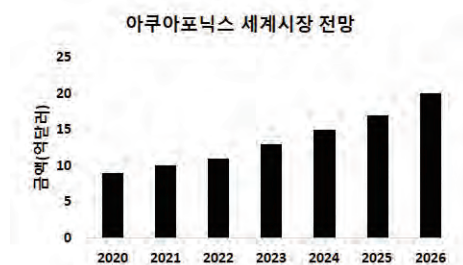


그림 4-11. 아쿠아포닉스 세계시장 선방 [출처 : Statistics MRS(Market Research Consulting), (2019)]

- ◎ 한국 기업체로는 만나 CEA, 서유채, 아쿠아포닉스 코리아 등이 있으며, 대부분 아쿠아포닉스가 순환여과식으로 운영되고 있고, 만나 CEA의 경우에는 미생물로 발효시켜 식물에 영양분을 공급하는 방법을 함께 이용하고 있음. 국립수산물과학원의 연구 결과(2019~2021년), BFT 기반의 아쿠아포닉스 기술을 적용하여 뱀장어를 비롯한 내수면 주요 어종(6종)과 상추류, 새싹인삼, 방울토마토가 적용 가능한 품종으로 파악됨.

4-4-3. 순환여과식 양식 시스템 개발

- ◎ 한류와 난류의 영향을 받는 한국 연안에서 온수성 양식어류의 성장 적수온기는 평균 4~5개월 정도이며, 그나마 고수온기와 저수온기 및 냉수대의 출현에 따라 양식어류가 받게 되는 스트레스와 회복기간 및 먹이 공급 중단 기간 등을 제외하면 안정적인 성장기간이 짧은 편임. 연안의 해수를 끌어들여 양식하는 육상수조식 양식장의 경우, 수온 이외에도 질병감염 및 전파를 제어가 어려움.
- ◎ 기후변화에 따른 환경적 한계를 극복하기 위해 순환여과식, 바이오플락 등의 폐쇄형 양식방식(Closed Aquaculture)의 도입을 통한 지속가능한 양식업으로의 전환이 요구되고 있음.
- ◎ 순환여과양식시스템(Recirculation Aquaculture System, RAS)은 폐쇄형 육상수조식 양식시스템의 하나로, 양식생물 사육 시 사용한 물을 바로 버리지 않고 사육수에 포함된 각종 고형오물이나 용존성 유기물, 대사성 배설물을 여과 및 처리하고 재순환시켜 이용하는 방식으로 수온 등 양식환경 제어를 통하여 환경적 한계를 극복할 수 있는 양식시스템임.
- ◎ RAS를 생물 사육에 적용하고자 한 초기 연구는 1960년대 일본의 순환여과식 잉어양식과 미국 Memphis 주립대학의 송어양식 등이 알려져 있으며, 이후 1968년에 시작한 미국 Delaware대학교의 순환여과식 패류양식 연구와 1970년대 미국의 연어 부화장에서의 여과장치 사용 예들이 언급되고 있음. 1980년대 접어들어 양식관련 기업에서 이 분야에 진출하면서 빠른 속도로 산업적, 경제적 규모를 갖추어 갔을 것으로 보임.
- ◎ 현재 노르웨이, 덴마크 등을 비롯한 북유럽 국가에서는 RAS의 수출은 물론, 전 세계 연어 소비지 근처에 RAS 양식장을 시설해 생산까지 함으로써 소비지 중심의 연어 공급 방식을 확장시키고 있으며, 일본과 미국에서도 RAS의 연구와 판매 등 산업화에 뛰어들고 있음. 이는 양식생산 시스템도 양식수산물의 유통과 함께 점차 기업화·국제화되어 가고 있음을 시사함.
- ◎ RAS는 양식생물 사육에 알맞은 수질을 지속적으로 관리하기 위하여 일반적으로 다뤄지고 있는 수처리 공정인 고형

오물 제거, 용존성 유기물(Dissolved Organic Matter, DOM) 처리, 이온수지 조절, 수중 용존가스 조절, 생물여과, 살균 등을 거치게 되며, 이들 공정은 필요에 따라 재배치 및 중복 공정이 가능함(그림 4-12).

- ◎ 효율적인 RAS 구축으로 수온 등의 양식환경을 제어함으로써 병원균 유출입 차단, 에너지 절감 및 생산성 향상 효과를 기대할 수 있음.

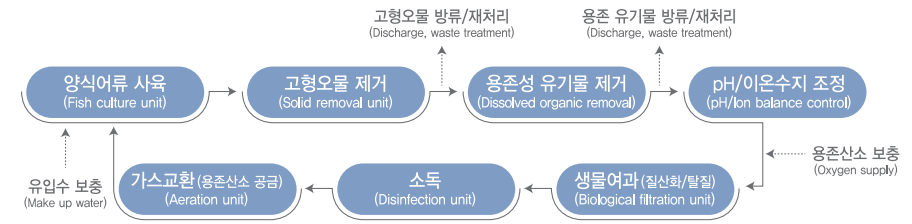


그림 4-12. 순환여과식 양식시스템의 구조 모식도

- ◎ 국립수산물과학원에서는 유수식 양식시스템의 문제점을 해결하기 위해 해수 순환여과 양식시스템을 개발하고 있음. 2017년 8월 이 시스템을 넙치양식장에 설치하여 시험한 결과, 어린 넙치(44 g)를 7개월 동안 사육하였을 경우 적정 수온 유지가 가능한 순환여과식 수조가 유수식 수조에 비하여 성장이 2배 가량 빠른 것으로 확인되었음.
- ◎ 한국 내수면의 대표적인 양식품종인 무지개송어는 일반적으로 수질이 양호한 용천수를 이용하여 유수식 형태로 운영되어 오고 있음.
- ◎ 최근 사육수인 용천수의 부족 및 배출수 처리 등에 대한 어려움으로 순환여과 양식으로의 전환이 시급함.
- ◎ RAS를 이용한 무지개송어 양식산업 활성화를 위해 무지개송어 양식에 특화된 RAS 도면도 제작한 바 있음.
- ◎ 기존 유수식에서 순환여과식으로 전환하여 생산성을 향상시키기 위해 무지개송어 양식에 특화된 RAS 설계도면은 신규 양식장 건설에 활용 계획임.

4-5

양식분야 기후변화 미래 전망

- ◎ RCP 시나리오별 전 지구 기후모델 자료를 이용하여 역학적 상세화 기법으로 고해상도(약 10 km 해상도)의 한국 주변해역 해양기후모델을 구동하여 RCP 4.5와 8.5 시나리오 기반의 2100년까지 미래 예측 자료(수온, 염분, 해류)를 매월 단위로 생산하였고, 양식업의 기후변화 취약성 평가(Kim *et al.*, 2019), 양식업에서의 수온의 영향 전망(Kim *et al.*, 2021), 남해안 어업 및 어종의 기후변화 노출 분석(김 등, 2016) 등의 수산분야 시나리오를 적용한 바 있음.

- 또한, 시범연구로 RCP 시나리오 기반의 미래 수온 전망 자료를 활용하여 살오징어 및 고등어의 미래 산란장 분포 변화, 넙치참돔우렁쉥이참전복의 미래 양식적지 변화에 대하여 고찰한바 있음(국립수산과학원, 2019).
- 2021년에는 동일한 RCP 시나리오의 미래 수온 전망 자료를 활용하여 해조류의 미래 양식 생산 가능시기 변화를 예측하였음. 해조류 양식의 경우, 주 성육시기인 겨울철의 수온 상승 경향이 여름철보다 높아 한국 양식 품종 중, 가장 취약성이 높은 품종으로 보고되고 있음(Kim *et al.*, 2021). 한국 연안의 대표적인 해조류인 김류는 성육시기 최고 수온이 15℃, 다시마류는 14℃, 미역류는 18℃이며, 최저 수온은 5℃가 기준이 됨.
- 미래 해조류 양식 생산 가능시기 변화를 예측하기 위하여 한국 주변해역 고해상도 기후모델 중 RCP 8.5 시나리오 예측자료를 사용하고, 김을 연구대상으로 선정하여 1년 중 수온이 5~15℃ 범위에 해당되는 일수를 2011~2020년(현재), 2041~2050년 및 2091~2100년 등 3개 기간을 대상으로 10년 평균으로 각각 계산하였음.
- 이를 통해 현재는 남해와 동해를 중심으로 5~15℃의 범위에 들어가는 일수가 연간 150일 내외였지만, 미래로 갈수록 점점 감소하여 2100년에는 거의 대부분 해역에서 100일 미만으로 바뀌게 됨을 확인할 수 있음. 즉, 한국 연안의 해조류 양식 가능 환경은 해양 온난화에 따라 점차 악화될 것으로 전망되었음(그림 4-13).

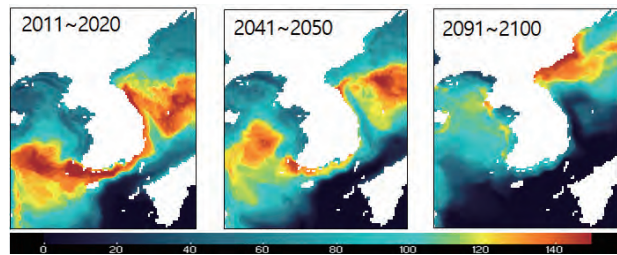


그림 4-13. RCP 8.5 시나리오 기반 시기별 5~15℃ 수온범위(김 생산가능시기) 해당 일수 분포

- 채묘 시기의 미래 변화를 살펴보기 위하여 해조류 양식이 가장 활발하게 이루어지고 있는 전남 완도 해역의 RCP 8.5 시나리오의 미래 수온 변화 값을 추출하고, 김의 채묘 적정 수온에 해당하는 22℃에 도달하는 시기를 계산하였음.
- 분석 결과, 완도 해역은 향후 2100년까지 0.33일/년 정도로 채묘시기가 늦어져, 현재 9월 하순경에 이루어지는 김 채묘가 2100년에는 약 1달가량 늦추어진 10월말에서 11월초에 가능할 것으로 전망되었음(그림 4-14).

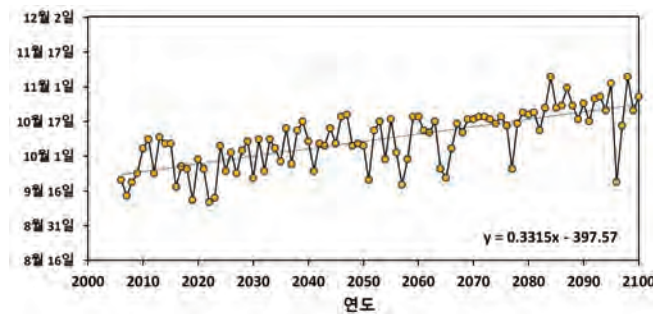


그림 4-14. RCP 8.5 시나리오를 적용한 연도별 전남 완도 해역의 김 채묘시기(수온 22℃ 도달시기)의 장기 변화 경향

5장

수산분야 기후변화 대응 기술 개발

Annual report
for Climate change Trends
in Fisheries, 2022

ACT Fish
2022



- 5-1. 수산물 생산해역 식품안전 위해요소
- 5-2. 기후변화와 수산생물 질병 대응
- 5-3. 에너지 절감형 어업기술 개발 및 온실가스 배출 현황
- 5-4. 수산식품안전 분야 기후변화 미래 전망

제5장

수산분야 기후변화 대응 기술 개발

5-1 수산물 생산해역 식품안전 위해요소

5-1-1. 연안해역 해수의 장염비브리오균 발생 현황

- 장염비브리오균(*Vibrio parahaemolyticus*)은 기수나 연안의 해수와 수산물에서 널리 분포하는 호염성(好鹽性) 해양 세균으로 여름철에 오염된 수산물의 생식이나 불충분한 가열 후 섭취 시 위장염을 유발함.
- 지난 수십 년간 세계적으로 비브리오균 감염증 발생지역이 확대되고 있는데, 비브리오균 증식을 촉진하는 주요인이 온도 상승이기 때문에 지구 온난화를 그 원인으로 보는 견해가 주류를 이루고 있음(Froelich et al., 2020).

표 5-1. 연안 해수에서 장염비브리오균 검출률

연도	1975	1995	2017	2019	2021
검출률(%)	24.0 ¹⁾	18.0 ²⁾	22.9	26.8	18.5

[출처 : ¹⁾ 이원재 등, 1976; ²⁾ 장동석 등, 1996]

- 한국 표층 수온은 최근 54년(1968~2021년)간 동해·서해를 중심으로 각각 1.75℃, 1.24℃ 상승하였으며(제2장 참조), 최근 30년간 기온은 20세기 초(1912~1941)보다 1.4℃ 상승하였으며 여름은 19일 길어졌고, 겨울은 18일 짧아졌다고 보고하고 있음(국립기상과학원, 2018).
- 한국 연안 해수에서 최근 40여 년간 장염비브리오균 연간 검출률에는 유의할만한 변화가 관찰되지 않으나(표 5-1), 여름이 길어지고 겨울이 짧아지는 기후변화 현상이 계속된다면 전통적인 장염비브리오균 유행기(5월~10월)가 연장될 것으로 예상됨.
- 한국패류위생계획의 「생굴 섭취에 따른 장염비브리오균 감염증 위험평가」에 따르면 굴 생식 십만 건 당 감염증 발생을 1건 이하로 유지하기 위해 요구되는 여름철(8월) 수확 후 냉각(7.2도 이하)까지 최대 허용시간은 2009년 9.4시간에서 2020년 6.7시간으로 줄어들어(그림 5-1), 여름철 유통 생식용 수산물에 대한 보다 강화된 시간/온도 관리(Time-Temperature Control)가 요구됨.

month	water temperature (F)	air temperature (F)	maximum time unrefrigerated (hr)	expected cases per 100,000 (servings)	lower confidence limit on expected cases per 100,000	V.P.C.P. needed?	maximum time (hr) for lower confidence of 1 per 100,000
Jan	47.3	37.7	12	0.0048	0.00038	N	
Feb	45.3	39.7	12	0.0034	0.00027	N	
Mar	46.4	46.8	12	0.0051	0.00041	N	
Apr	55.3	55.9	12	0.024	0.0019	N	
May	63.2	63.3	12	0.18	0.014	N	
Jun	69.3	69.5	12	1.2	0.095	N	
July	73.8	76.0	12	8.1	0.64	N	
Avg	76.0	75.4	12	26	2.1	N	0.4
Sep	70.0	72.3	12	4.7	0.37	N	
Oct	71.8	63.9	12	0.55	0.044	N	
Nov	64.2	52.5	12	0.054	0.0043	N	
Dec	54.2	42.9	12	0.01	0.00079	N	

month	water temperature (F)	air temperature (F)	maximum time unrefrigerated (hr)	expected cases per 100,000 (servings)	lower confidence limit on expected cases per 100,000	V.P.C.P. needed?	maximum time (hr) for lower confidence of 1 per 100,000
Jan	47.7	38.6	12	0.0049	0.00039	N	
Feb	47.8	41.4	12	0.0048	0.00037	N	
Mar	51.1	48.8	12	0.0079	0.00063	N	
Apr	57.4	56.5	12	0.033	0.0026	N	
May	66.2	64.8	12	0.33	0.026	N	
Jun	70.0	70.1	12	1.4	0.11	N	
July	73.9	76.3	12	8.0	0.71	N	
Avg	61.5	60.6	12	62	4.9	N	0.7
Sep	76.1	72.2	12	4.7	0.37	N	
Oct	68.5	63.6	12	0.42	0.035	N	
Nov	64.8	53.5	12	0.063	0.005	N	
Dec	54.0	42.3	12	0.0098	0.00078	N	

그림 5-1. 생굴 섭취로 인한 장염비브리오 감염증 발생 위험평가 [출처: 해양수산부 2020]

5-1-2. 패류독소 발생 시기의 경향

- 2021년 IOC에서 발간한 기후변화가 유해미세조류 대량 발생에 미치는 영향 조사 가이드라인에서는 기후변화로 인한 해양환경(수온 상승, 부영양화 및 해양산성화 등)의 변화가 유해미세조류의 분포, 구성에 큰 영향을 미친다고 하였음.
- 기후변화로 식물성 플랑크톤의 대량 발생 시기는 10년에 7일씩 앞당겨지고 있으며(GlobalHAB, 2021), 식물성 플랑크톤의 일종인 패류독소 원인 플랑크톤(*Alexandrium* spp., *Pseudo-nitzschia* spp., *Dinophysis* spp. 등)도 발생 범위가 확대되고 있는 추세임(그림 5-2)(WHOI, 2019).

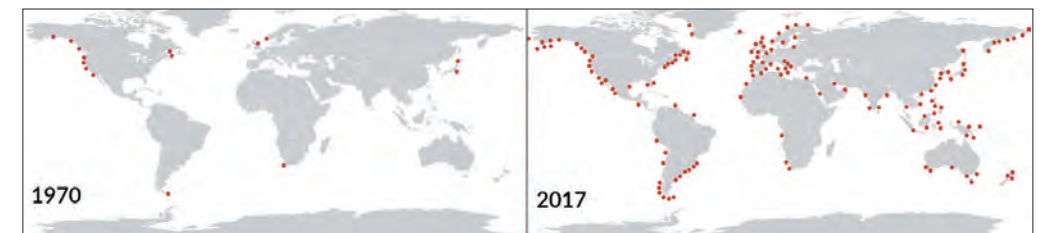


그림 5-2. 마비성패류독소의 지리적 분포 [출처 : WHOI(Woods Hole Oceanographic Institute)(2019)]

- 국립수산과학원에서는 패류독소 발생 경향 변화와 새로운 해양생물독소의 출현에 선제적으로 대응하기 위하여 해양생물독소 모니터링과 연구를 수행하고 있음.
- 한국 연안에서 발생하는 마비성패류독소의 경우, 보통 봄철(3월~4월)에 발생이 시작되었으나, 최근 들어 최초 발생 시기가 겨울철(1월~2월)로 점차 앞당겨지는 경향을 보이고 있음(표 5-2).

표 5-2. 마비성패류독소 최초 검출일

연도	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
검출일	3.5	3.6	4.8	4.8	3.28	2.26	2.25	3.2	1.12	2.7

- ㉞ 그간 설사성패류독소는 허용기준(0.16 mg/kg 이하)에 못 미치는 수준으로 간헐적으로 검출되어 왔으나, 2021년 7월 전북 부안에서 채취된 담치류에서 허용기준의 4배(0.65 mg/kg)에 달하는 독소가 검출된 사례가 발생하였음.
- ㉞ 한국 연안에서 마비성패류독소의 최초 출현 시기가 앞당겨지고, 설사성패류독소의 독화 수준이 높아지는 사례의 원인을 기후변화의 직접적인 영향이라고 단언하기는 곤란함. 하지만 연안의 환경이 패류독소 원인 플랑크톤을 포함한 유해미세조류가 생육하기에 적절한 환경으로 변화되고 있다고 볼 수 있어 한국에서 아직까지는 출현하지 않았던 새로운 해양생물독소가 출현할 가능성도 점점 높아지고 있음.
- ㉞ 패류독소 안전관리 강화를 위하여 2021년에 기억상실성패류독소를 모니터링 항목으로 추가하였고, 2022년에는 마비성패류독소 및 설사성패류독소 조사정점을 확대하여, 지자체, 수협 등 유관기관과 유기적 협력을 통해 패류독소 발생상황에 능동적으로 대응하고 있음.

5-2 기후변화와 수산생물 질병 대응

5-2-1. 기후변화에 따른 수산생물 질병 발생 현황

- ㉞ 수산생물은 서식환경, 건강상태, 병원체 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으며, 이들 요인이 적절한 균형을 유지하지 못할 때 양식생물은 질병에 걸리기 쉬운 상태가 됨. 기후변화로 인한 수온의 변화는 양식생물의 대사와 면역에 영향을 미쳐 양식생물이 질병에 감염되기 쉬운 상태가 될 뿐 아니라, 병원체의 분포, 유행성 및 독성에도 변화를 일으켜 신종 질병이 발생하는 원인 중 하나로도 지목되고 있음(Harvell *et al.*, 1999; Snieszko, 1974).
- ㉞ 특히, 기생충 발생 패턴 시뮬레이션 연구에서는 기후변화가 기생충의 생활사, 감염과 병원성에 영향을 주어 양식생물이 기생충에 의한 잠재적 위협 상태에 있음을 시사함(Diederich *et al.*, 2005). 또한, 기후변화로 인해 생물이 분포하는 범위가 확산·변동함에 따라, 숙주가 보균하는 병원체도 이와 함께 인근 지역 또는 숙주의 이동에 의해 확산되는 것으로 보고됨.
- ㉞ 기후변화에 의해 겨울철 수온이 상승함에 따라, 낮은 온도에서는 증식이 억제되어 있던 병원체의 증식이 가능하게 되어 양식 생물의 병원체 보균, 질병의 발현에 영향을 줄 수 있음. 대표적 사례로 참굴(*Crassostrea gigas*)에 기생하는 원생동물 기생충인 *Perkinsus marinus*와 *Haplosporidium nelsoni*가 미국의 북쪽 해안으로 확산하여 북쪽에 서식하는 버지니아 굴(*Crassostrea virginica*)의 대량폐사를 초래하였는데, 이는 3℃ 미

만의 환경에서는 보균되어 있더라도 활성이 억제되어 있던 기생충이 기후변화로 인해 겨울철 수온이 높아지면서 발병한 것으로 보고된 바 있음(Hofmann *et al.*, 2001).

- ㉞ 한국에서 양식산업은 1990년대 이후 생산량이 지속적으로 증대되어 왔으나, 최근 심화되고 있는 이상기후(폭염, 태풍 등)에 따른 양식생물의 서식환경 변화는 생물의 대사 및 생리를 변화시키고, 병원체 및 신종질병의 출현을 가져왔음.
- ㉞ 대표적 신종 세균성 질병인 새우류 급성간헐장괴사병(AHPND)은 독소 플라스미드를 보유한 *Vibrio parahaemolyticus*에 의해 발생하여 새우류의 대량폐사를 일으키는 질병으로 2009년 중국을 시작으로 베트남, 태국, 말레이시아 등 열대성 기후 국가들에서 보고되었으나, 2016년 서해안 흰다리새우 양식장에서도 한국 최초로 감염이 확인되어(Hwang *et al.*, 2018), 질병 확산 방지를 위해 2021년 수산생물전염병으로 지정되었음.
- ㉞ 최근 한국 양식업에서 다양한 점액포자충 감염 사례가 보고되고 있으며, 근육에 기생하는 쿠도아충 *Kudoa septempunctata* (Myxosporea: Multivalvulida)의 감염 보고(Song *et al.*, 2014) 및 넙치 여윌증의 원인체로 *Enteromyxium leei*, *Parvicapsular* sp. 등의 감염이 보고됨(Kim *et al.*, 2011, Kim *et al.*, 2015).
- ㉞ 또한, 돌돔, 참돔, 농어 등 가두리 양식어류에서 여름철에 지속적으로 이리도바이러스의 감염이 발생하고 있음. 어류바이러스에 의한 한국 신종 질병으로 어류노다바이러스의 신종유전형의 발생(Kim *et al.*, 2018), 뱀장어 바이러스성 내피세포괴사증(Kim *et al.*, 2018), 뱀장어 허피스바이러스 감염증(Park *et al.*, 2012) 등이 보고됨.

5-2-2. 기후변화 대응 수산질병 관리 기술 개발

- ㉞ 양식분야에서도 기후변화 적응 대책이 절실히 필요하며, 기후변화 대응 수산질병 관리기술을 개발하기 위해서는 ①전염병 조기 감지기술 개발 및 대응 시스템이 구축되어야 하고, ②신·변종 질병에 대비하는 백신과 진단기술 및 의약품 개발이 필요한.
- ㉞ 현재 수산생물의 질병을 예방 및 치료하기 위해서 사용되는 수산용 의약품은 항생·항균제가 485개, 백신 30개, 구충제 61개, 소화기계 67개, 대사성약 342개 등의 제품이 있음(그림 5-3).
- ㉞ 국립수산물과학원에서는 자연재해와 관련한 질병 감염 조사, 신종질병 발생에 대비한 진단기술 확립, 고수온에 대비한 양식어류 면역활성 연구 등 기후변화로 인한 새로운 질병 발생에 대비한 연구 및 약품의 연구 개발을 수행 중에 있음.
- ㉞ 신종질병 발생에 대비하여 전염병의 조기 진단 기술 개발을 위해 수산생물전염병 10종²⁰⁾을 진단할 수 있는 첨단 유전자 진단키트의 특허기술을 확보함.
- ㉞ 또한, 병원체 신종 및 변이를 빠르게 진단할 수 있는 다중진단키트 개발 연구를 진행하고 있으며, 최근에는 정확도를 더 높이는 기술로 PNA(Peptide Nucleic Acid) 프로브를 이용한 양식 넙치의 SPF(Specific Pathogen Free) 진단을 위해 세균 4종(*Flexibacter maritimus*, *Streptococcus parauberis*, *Lactococcus garvieae*, *Edwardsiella tarda*), 바이러스 4종(Viral Hemorrhagic Septicemia

20) 수산생물전염병 : 바이러스성출혈성패혈증, 참돔이리도바이러스병, 잉어허피스바이러스병, 잉어볼바이러스병, 흰반점병, 흰꼬리병, 노랑머리병, 전염성 피하 및 조혈기괴사증, 전염성 근괴사증, 타우라증후군

Virus, Marine Birnavirus, HIRAME Rhabdovirus, Viral Nervous Necrosis Virus), 기생충 4종 (*Kudoa septempunctata*, *Parvicapsula anisocaudata*, *Enteromyxum leei*, *Enteromyxum scopthalmi*)을 동시에 진단하는 기술 및 뱀장어 바이러스 2종(Anguillid herpesvirus-1, Japanese eel endothelial cell-infecting virus) 동시 진단기술을 각각 개발하여 특허 기술을 확보함. 또한, 에드워드균종 4종 및 어류노다바이러스 혈청형 4종을 동시 진단하는 기술을 개발하는 등 신종 질병의 출현에 대비한 진단 기술의 고도화를 위한 개발에 노력하고 있음.

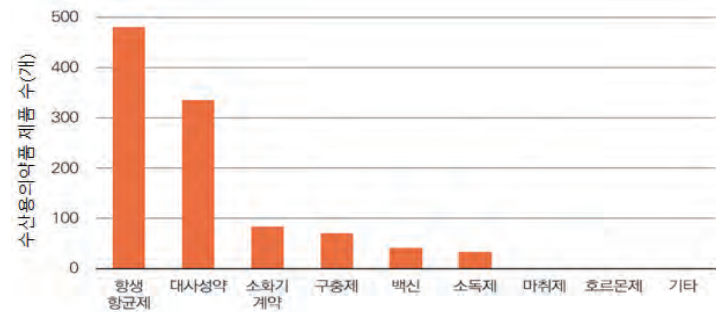


그림 5-3. 수산용 의약품 제품현황 [출처 : 수산용 의약품 제품요약 해설집(2020)]

- 기후변화로 인해 수산생물은 생리 및 대사작용에 영향을 받으므로, 신종 질병 발생에 대한 대응 기술로는 백신, 치료제와 함께 양식생물의 면역력을 높여 다양한 질병의 예방을 기대할 수 있는 대사성약 또는 소화기계 작용약의 개발도 필요함.
- 국립수산물과학원에서는 2000년대부터 천연물을 활용한 다양한 연구를 수행해 왔으며, 오배자(2006), 손바닥선인장(2008), 황금(2010), 고삼(2012) 등 복합 생약제, 인진·당귀(2017, 2018)에 등을 활용한 질병 예방기술을 개발하였고 이 외에도 천연물을 이용한 어류질병 치료제 개발 연구를 수행 중에 있음.
- 또한, 고수온 폐사 대응 연구로 해조류 추출 다당류인 후코이단(Fucoidan)을 사료에 혼합하여 투여한 결과, 양식 넙치와 조피볼락에 면역 유전자 발현 증가 및 고수온기 세균성 질병 저항 효과를 확인하여 고수온 폐사 예방을 위한 면역증강제로 후코이단의 적용 가능성을 검증함(2018~2021).
- 기후변화와 양식 환경 변화로 발생하는 어류 질병 피해 저감을 위해 다양한 수산용 백신을 1999년부터 개발하고 있으며, 19종의 백신을 개발하여 15종은 수산용 백신 제조업체에 기술이전 하였음. 특히 한국 양식 어류 생산량의 50%를 차지하는 넙치에 많은 폐사를 일으키는 세균성 질병인 에드워드병(*Edwardsiella tarda*, 1999), 연쇄구균병(*Streptococcus iniae*, 2005; *Streptococcus parauberis*, 2012), 비브리오패혈증(*Vibrio harveyi*, 2012)에 대한 단가백신 및 세균 혼합백신을 개발하였음. 바이러스성 질병인 바이러스성 출혈성 패혈증(Viral haemorrhagic septicemia virus, 2013) 및 기생충성 질병인 스키타카병(*Miamiensis avidus*, 2016)을 예방할 수 있는 주사백신을 개발하여 제약업체에 기술이전을 하였음. 최근에는 유행하는 새로운 혈청형의 연쇄구균을 예방할 수 있는 연쇄구균 다가백신(2019) 및 점종의 편이성을 높인 연쇄구균 경구 백신도 개발하여 산업화를 추진하고 있음(2021).

5-3 에너지 절감형 어업기술 개발 및 온실가스 배출 현황

5-3-1. 어업별 온실가스 배출 현황

- 유류사용량을 기반으로 온실가스 배출량을 분석한 결과 2020년 어업분야의 총 온실가스 배출량은 279만 tCO₂eq.으로, 근해어업 168만 tCO₂eq., 연안어업 107만 tCO₂eq., 기타어업 4만 tCO₂eq.를 각각 배출하고 있음(그림 5-4).

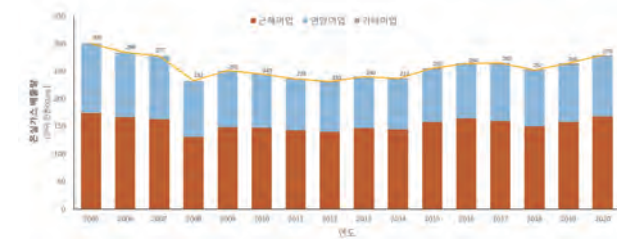


그림 5-4. 어선어업의 연도별 온실가스 배출 현황 (단위: 만톤 CO₂eq.)

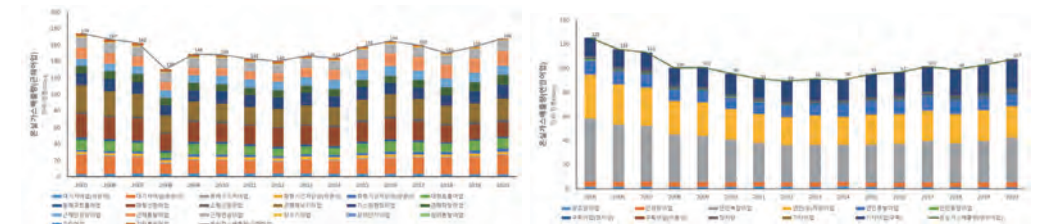


그림 5-5. 주요 업종별 온실가스 배출 현황(단위: 만톤 CO₂eq.)

- 근해 주요 업종 18개와 기타 어업 등을 포함한 20개 이상 업종에서의 온실가스 배출량은 2005년 1,737,066 tCO₂eq.에서 2020년 1,675,276 tCO₂eq.으로 약 3.7%가 감소함. 연안 주요 업종 9개와 기타 어업 등을 포함한 온실가스 배출량은 2005년 1,250,758 tCO₂eq.에서 2020년 1,074,581 tCO₂eq.로 14%가 감소하였음(그림 5-5).

5-3-2. 에너지 절감형 어업기술 개발 및 보급

- 국립수산물과학원에서는 온실가스 배출 저감 및 친환경 어업기술 개발을 위하여 원양 및 연근해 어선을 대상으로 유류 절감형 어업기술 개발을 지속적으로 추진 중에 있음.
- 2007년 원양 트롤어선의 예망성능 향상을 위하여 코르트노즐(kort nozzle) 프로펠러의 성능에 주목하고 선미트롤선에 장착된 기존 프로펠러의 시운전 자료를 토대로 새로운 노즐프로펠러를 설계·제작했음. 시운전을 통해 예망 및 항해시의 선속과 유류 절감형을 비교 분석한 결과, 조업 중 주기권이 소모한 유류를 프로펠러를 교체

하기 전과 비교했을 때 7.8%의 유류절감 효과가 뛰어난 것으로 확인함(그림 5-6).



그림 5-6. 노즐프로펠러를 설치한 원양 트롤어선

- ◎ 2008년 원양 선망어선에 구상선수(Bulbous bow)를 설치하여 조파 저항을 줄이는 연구를 수행함. 선체 개조 후 실시된 시운전을 통해 항해속도 12.5 kt일 때 엔진 회전수는 700 RPM으로 개조, 전보다 평균 50 RPM이 감소 되어 항해선속 증대와 유류 절감 효과가 있음을 확인함(그림 5-7).



그림 5-7. 구상선수 설치 전후의 원양 선망어선

- ◎ 2012년 연근해어선의 추진효율 향상을 위해 프로펠러 성능 개선 연구를 수행하였음. 이를 24톤급 근해 오징어 채낚기어선에 적용하여 유류비 절감효과를 산출해 보면, 시간당 6.3리터의 항해용 유류를 절감하는 것으로 나타남. 일일 절감량은 151리터, 연간 37,926리터(약 190드럼)가 절약되어 이를 당시 금액으로 환산하면 약 2,541만원(면세유 1리터당 670원 기준)의 유류비 절감 효과를 산정함(그림 5-8).



그림 5-8. 기존 프로펠러 추진기(좌) 및 신규설계 추진기(우)

- ◎ 어선의 성능개량 및 표준형 연안어선 개발을 위해 2016~2018년까지 4.99톤 어선에 에너지 절감장치를 적용하고 개선된 선형 및 추진기를 설계한 후 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 활용한 시뮬레이션과 수조시험을 통해 에너지 절감장치 및 선형 개선에 따른 효과와 성능을 분석하고 표준어선 도면을 제작함(그림 5-9).

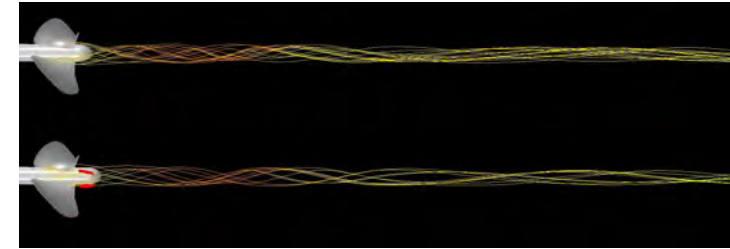


그림 5-9. 기존 프로펠러와 핀(fin) 설치 후 후류 vortex 변화

- ◎ 에너지 절감 및 온실가스 배출 저감을 위한 LED(Light Emitting Diode) 집어등의 개발도 수행해 왔음. 2008년 LED 집어등(공랭식 2종, 수랭식 1종)을 개발하여 어획성능시험(08.9~12.)을 수행하였음. 갈치 채낚기의 경우, 시험선이 기타 어선의 평균보다 어획량은 24.46%, 위판금액은 4.54% 더 높았고 86.7%의 에너지를 절감하여 집어등 유류비를 월 340만원 절감할 수 있음을 확인. 오징어 채낚기의 경우, 시험선이 동일 조건의 비교 어선 1척보다 어획량은 41.55%, 위판금액은 45.84% 더 높았고 40.1%의 에너지를 절감하여 집어등 유류비를 월 210만원 절감할 수 있음을 확인함(그림 5-10).
- ◎ 2012년부터 3년간 채낚기 어업의 조업 특성에 맞춘 광 확산형 LED 집어등과 자급전원 발광모듈 실용화 기술 개발 연구를 수행하였음. 2015~2017년 LED 집어등과 메탈할라이드 등을 겸용 설치한 오징어 채낚기 어선의 집어 시스템의 최적운용기술을 개발하고 시험조업을 통해 300 W LED등과 1.5 kW MH(Metal Halide) 등을 혼용하여 전력사용량을 25%까지 줄여도 비교어선과의 일평균어획량에 유의차가 없음을 확인함.



- ◎ 본 연구 사업을 통해 얻어진 결과물은 기술보급과 산업 활성화 지원을 통해 한국 원양꽂치붕수망 어선 대부분에 LED 집어등이 보급되었고, 대만 꽂치붕수망 어선(9척)과 일본 소형선망어선 등에 한국 업체가 진출하는데 기여함.

5-4 수산식품안전 분야 기후변화 미래 전망

- ◎ 한국 주변 연안 수온은 SSP2-4.5 시나리오에서는 2100년까지 약 2℃ 수온이 상승하고, SSP5-8.5 시나리오에서는 2100년까지 4~5℃ 내외 수온이 상승하는 것으로 예측되었음.
- ◎ 중-고위도 지역에서 수산물 섭취로 인한 비브리오균 감염증의 발생 증가 추세는 최근 5년 동안 1980년대에 비하여 50.6% 증가하였으며, 연안 인구의 증가와 잦은 기상이변(폭서, 폭우) 등의 요인이 가세하여 가속화될 것으로 전망됨(IPCC, 2022).
- ◎ 이에 따라 비브리오균의 감염 매개체 역할을 할 수 있는 수산물의 초기 오염 비브리오균 수의 증가 및 장염비브리오균 유행기의 연장이 예상됨에 따라 지속적인 모니터링과 더불어 위험평가를 수행할 계획임.
- ◎ 유해미세조류는 적합한 서식환경이 형성되면 기하급수적인 증식을 보이는데, 특히 수온은 패류독소 원인 플랑크톤(*Alexandrium* spp. 등)의 대량 증식을 결정하는 환경인자로 한국 주변 해역의 수온이 계속 상승하면, 남해 연안(부산~전남)에서 주로 발생하는 마비성패류독소의 원인 플랑크톤 발생해역이 동해와 서해 연안으로 확대될 것으로 전망됨.
- ◎ 패류 중의 독소 함량도 예년보다 증가하거나 새로운 종의 유입으로 여름철에도 마비성패류독소가 발생할 수 있을 것으로 전망됨(Laabir *et al.*, 2013).
- ◎ 시구아테라 어류 독을 생성하는 저서와편모조류(*Gambierdiscus* spp.)는 열대 및 아열대 지역에서 주로 출현하는 것으로 알려져 있는데 최근에는 제주도 연안에서 확인되고 있으며, 앞으로 한국 대부분의 연안 수역에 출현할 가능성이 큼.
- ◎ 이에 따라 시구아톡신(ciguatoxins), 팔리톡신(palytoxin) 등 과거에 안전관리 대상이 아니었던 새로운 해양생물 독소를 가진 어류가 출현할 것으로 전망됨.
- ◎ 세계자연기금(World Wide Fund For Nature, WWF)의 지구생명보고서(2020)에 따르면 기후변화에 의해 따뜻한 대마난류가 지나가는 해역에 출현하는 어류 중 난류성 어종의 수가 최근 6년간 약 18% 증가했다고 보고함('15년 52% → '20년 70%).
- ◎ 이러한 현상은 기후변화가 어느 해역의 서식 생물상의 변화를 초래할 수 있으며, 이로 인해 새로운 병원체의 유입 가능성도 생각할 수 있음.
- ◎ 기후변화로 인한 수서 생태계의 변화 및 변형된 병원체 감염에 의한 신종질병의 발생으로 수산분야의 피해가 예상되며, 앞서 기술한 참굴의 퍼킨수스 기생충이 수온 상승으로 인해 미국의 북쪽 해안으로 확산하면서 그 지역에 서식하는 버지니아 굴의 대량폐사를 일으킨 사례에서 알 수 있듯이 기후변화에 의한 수온의 상승은 병원체의 증식능력에 영향을 미쳐 질병의 유입과 확산을 가져올 수 있을 것으로 전망됨.
- ◎ IPCC 5차 평가보고서 기후변화 시나리오를 이용한 분석 결과 21세기 후반으로 갈수록 해수면 상승이 가속화될 것으로 전망됨. 2100년 해역별 평균 해수면 상승은 동해에서 가장 현저하게 나타날 것으로 분석됨에 따라, 차후 동해 해역에 난류성 어종의 출현과 신종 병원체의 유입 가능성이 클 것으로 예측됨.

맺음말

참고문헌

용어정리

보고서 발간을 위해 노력하신 분들

Annual report
for Climate change Trends
in Fisheries, 2022

ACT Fish
2022



▼ **맺음말**

- ◎ 2021년과 2022년은 IPCC 3개의 실무그룹 별로 제6차 평가보고서와 종합보고서가 승인 및 발간되는 해로써 기후변화 과학, 적응 및 완화 기술 등에 대한 새로운 개념과 과학적 결과가 보고되고 있음.
- ◎ IPCC 보고서에서는 해양 온난화의 심화에 따른 수산물 생산 및 식량 안보의 저해를 우려하고 있으며, 생물 종 다양성의 피해 영역이 확대될 것으로 전망하고 있음. 또한 기후변화와 이상기후에 따라 수산업 기반의 경제적 피해가 가증될 것으로 전망함.
- ◎ 파리 기후변화 협약 이후 소강상태로 있었던 국제적 기후변화 합의가 6년만에 이루어짐에 따라 2023년 예정되어 있는 전 지구 온실가스 배출에 대한 이행점검의 준비가 시급해졌고, 이를 위한 국가적인 대응책 마련이 시급히 이루어지고 있음.
- ◎ 해양수산분야의 온실가스 배출량은 국가 온실가스 배출량의 0.6% 이하이며, 어가인구의 감소와 고령화 증가에 따른 수산업 종사자의 취약성이 높고, 수산업 대부분이 환경변화에 민감하게 반응함으로 기후변화와 관련된 환경변화에 따라 어업생산량의 변동폭이 크게 나타남. 따라서 해양수산분야는 온실가스 저감 외에도 기후변화 적응 기술 개발과 관측·예측 기술의 개발이 강조되는 분야임.
- ◎ 한국의 1인당 연간 수산물 소비량은 세계에서 가장 높은 수준에 있으며, 동물성 단백질 중 수산물이 차지하는 비중은 35% 이상으로 비슷한 경제 규모의 국가 중에서도 매우 높은 수준을 나타냄.
- ◎ 한국 해역의 표층수온 상승률은 전 세계에서 가장 높은 해역 중 하나이며, 좁은 어업면적에 높은 어획 강도를 나타내는 해역임. 또한 이상 고수온 발생 빈도와 강도가 증가되고 있지만, 한국 양식시설은 대부분 수심이 얇고, 해수 유동이 적은 내만에 밀집되어 있어 이상기후에 따른 피해 발생 우려가 높음.
- ◎ 따라서 해양수산분야도 기후탄력적 발전을 위한 노력이 필요함. 기후탄력적 발전은 기후변화 적응과 온실가스 감축을 추진함과 동시에 지속가능한 발전도 도모하자는 개념으로 기후변화에 대한 악영향에 대처하고, 소득증대 등 새로운 발전 방향 모색도 필요함을 의미하고 있음.
- ◎ 한국 해역의 기후변화 영향을 정확하게 파악하기 위해서는 고해상도 해양기후모델 및 인공지능을 이용한 예측 기법 활용을 통하여 해양수산분야의 기후변화 리스크를 평가하고, 어업·어종·해역별로 기후변화에 대한 과학적 미래 전망이 이루어져야 함.

- ◎ 또한 물리적 환경 변화에 따른 한국 해역의 생지화학적 변화 및 해역내의 먹이사슬 체계 변화, 외래유입종 및 신규가입종 등에 따른 생물 종다양성 및 서식지 환경 변화와 같은 아직까지 밝혀지지 않은 과학적 변화 경향을 해명하고 이에 따른 수산 및 해양환경 정책 마련이 필요할 것임.
- ◎ 장기적인 기후변화 및 급변하는 이상기후의 영향에 대응하기 위하여, 양식환경 변화에 따른 양식적지 재탐색 및 친환경·고효율 양식 기법의 개발, 생명공학적 기법을 적용한 새로운 양식 품종의 개발 및 보급 등은 기후변화에 따른 피해 최소화 뿐만 아니라 새로운 소득원 창출과도 밀접한 관련성이 있을 것으로 판단됨.
- ◎ 안전한 수산물의 한국 공급과 수출상대국의 위생관리기준에 관련성이 있는 병원성비브리오균 및 패류 독소의 출현 시기 변화 모니터링, 한국에 출현 가능성이 높은 저위도 국가의 아열대성 수산질병에 대한 선제적 대응 역량 구축, 온실가스 저감을 위한 어업기술의 개발 등 수산업 전 분야에 걸친 기후변화 적응 기술 개발은 속도를 더욱 높여 빠르게 진행되어야 할 사항임.
- ◎ 수산분야의 기후위기 대응을 위하여 장기 기후변화 영향 및 이상기후에 따른 단기적인 자연재해 대응 등 이원적인 적응 전략 수립 및 대응 체계 마련이 필요함. 실제로 해양수산부에서는 기후위기에 따른 수산업의 피해 최소화 및 대응 역량 강화를 위하여 다양한 정책을 수립하고 있음.
- ◎ 단기적으로는 최근 빈번히 발생하는 이상기후에 따른 수산재해 피해 최소화를 위하여 매년 ‘고수온·적조 종합 대책’을 수립하고, 지자체 및 유관기관과의 협력을 통하여 피해 사전 예방 및 선제적 대응 체계를 마련 하고 있음.
- ◎ 장기적으로는 매 5년 단위의 ‘기후변화대응 해양수산부문 종합계획’을 수립하고 있으며, 제4차 계획(‘22~26)에서는 수산업·어촌 기후위기 영향평가 제도 도입, 어업관리제도의 개선, 수산자원 변동 예측 기술 고도화, 기후위기 대응 양식보험 상품 다양화 등의 정책을 집중적으로 추진할 계획임.
- ◎ 국립수산물품질관리원은 해양수산부, 지방자치단체와 함께 어업인의 기후변화적응과 수산업의 지속가능한 발전을 위하여 연구 및 기술 개발에 더욱 박차를 가할 계획임.

참고문헌

- 관계부처 합동(2021) : 제26차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26) 폐막 보도자료. 외교부/환경부/산업통상자원부/기획재정부/과학기술정보통신부, 11 pp.
- 국가법령정보센터(2022) : 기후변화대응 기술개발 촉진법(약칭 : 기후기술법). 법제처, 6 pp.
- 국립기상과학원(2018) : 한반도 100년의 기후변화. 기상청, 31 pp.
- 국립기상과학원(2021) : 한반도 기후변화 전망보고서 2020. 기상청, 38 pp.
- 국립수산과학원(2019) : 수산분야 기후변화 평가 백서. 국립수산과학원, 168-178.
- 국립수산과학원(2021) : 카레니아 등 잠재적 유해적조 생리·생태 연구. 국립수산과학원, 80pp
- 국립수산과학원(2022) : 과학기술의과거와미래를잇는국가과학유산12건등록.국립중앙과학관보도자료, 14pp.
- 기상청(2021) : 우리나라 109년 기후변화 분석 보고서. 기상청/국립기상과학원, 68 pp.
- 김봉태, 이준수, 서영상(2016) : RCP 시나리오에 따른 남해안 어업 및 어종의 기후변화 노출 분석 : 수온변동을 대상으로. 수산경영론집, 47(4), 31-44.
- 유제범(2019) : 스마트 양식산업의 현황과 향후과제. 국회입법조사처, 1-28.
- 이동길, 배봉성, 이정호, 김석태, 김형수(2021) : 스마트양식 기술 개발과 산업화 방안. 수산해양교육연구, 33, 412-420.
- 이상철, 마창모(2016) : 첨단 스마트 양식 기술 발전 동향 분석. 제어로봇시스템학회지, 22, 26-33.
- 이원재, 안철우(1976) : 충무해역의 *Vibrio parahaemolyticus*와 *V. alginolyticus*의 분포. 한수지. 9(4), 233-237.
- 장동석, 김창훈, 유홍식, 김신희, 정은탁, 신일식(1996) : 병원성 비브리오균과 동물성 플랑크톤과의 관계에 관한 연구. 한수지. 29(5), 557-566.
- 조창우, 송용식, 김창신, 윤석현(2021) : 한반도 연근해를 대상으로 해양 먹이망 기반 3차원 생태모델 구축 연구. 한국수산과학회지, 54(2), 194-207.
- 통계청(2021) : 2021 고령자 통계. 통계청, 2 pp.
- 해양수산과학기술진흥원(2020) : 2021년도 해양수산과학기술 육성 시행계획. 해양수산부, 310 pp.
- 한국수산과학회(2021) : 근현대 수산과학연구 100주년 기념식 및 한국수산과학회 학술대회 개최 안내. 한국수산과학회 사무국, 10 pp.
- 한국해양과학기술협의회(2021) : 2021년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 초록집. 한국해양과학기술협의회, 145 pp.
- 해양수산부(2020) : 한국패류위생계획.. 해양수산부, 107 pp.
- 해양수산부(2021) : 2021년 고수온·적조 종합 대책. 해양수산부, 1 pp.
- 해양수산부(2021) : 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵. 해양수산부, 19 pp.

- Andersen G. S., M. F. Pedersen and S. L. Nielsen(2013) : Temperature acclimation and heat tolerance of photosynthesis in Norwegian *Saccharina latissima* (Laminariales, Phaeophyceae). Journal of Phycology, 49, 689-700.
- Baek S. H.(2012) : Occurrence of the Toxic Benthic Dinoflagellate *Gambierdiscus* spp. in the Uninhabited Baekdo Islands off Southern Coast and Seopsom Island in the Vicinity of Seogwipo, Jeju Province, Korea. Ocean and Polar Research, 34, 65-71.
- Bartely D. M., K. Rana and A. J. Immink(2001) : The use of inter-specific hybrids in aquaculture and fisheries. Rev. Fish. Biol. Fisher., 10, 325-337.
- Brandon Y. and Y. Zheng(2019) : Aquaponic trends and challenges-a review, J. Cleaner Production, 228, 1586-1599.
- Chang, C. C., K. K. Chang, W. C. Lin and M. H. Wu(2017) : Carbon footprint analysis in the aquaculture industry: Assessment of an ecological shrimp farm. J. Cleaner Production, 168, 1101-1107.
- Chang, P. H., A. Isobe, K. R. Kang, S. B. Ryoo, H. S. Kang and Y. H. Kim(2014) : Summer behavior of the Changjiang diluted water to East/Japan Sea: A modeling study in 2003. Con. Shelf Res., 81, 7-18.
- Davison I. F.(1991) : Environmental effects on algal photosynthesis: temperature. J. Phycology 27, 2-8.
- Diederich, S., G. Nehls, J. E. E. van Beusekom and K. Reise(2005) : Introduced Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) in the northern Wadden Sea: invasion accelerated by warm summers?. Helgol. Mar. Res., 59, 97-106.
- Durack, P. J. and S. E. Wijffes(2010) : Fifty-Year Trends in Global Ocean Salinities and Their Relationship to Broad-Scale Warming. J. Climate, 23, 4342-4362.
- Erick A. B. T, Á. P-Á. MarÁa, C. S. H. Luis, M. N. Antonio, R. M. Isidro and H. G. M. Raymundo(2020) : Factors That Limit the Adoption of Biofloc Technology in Aquaculture Production in Mexico. WATER, 12, 2775 p.
- FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations)(2019) : Quantifying and mitigating greenhouse gas emissions from global aquaculture. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No.626, FAO, 36 pp.
- FAO(2021) : Adaptive management of fisheries in response to climate change. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No.667, FAO, 285 pp.
- Feng S., S. Zhang, S. Sun, S. Wang and C. Li(2015) : Effect of duration at low temperature on asexual reproduction in polyp of the scyphozoan *Nemopilema nomurai*(Scyphozoa Rhizostomeae). Hydrobiologia, 754, 91-111.
- Fennel, K., J. Wilkin, J. Levin, J. Moisan, J. O'Reilly and D. Haidvogel(2006) : Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget. Global Biogeochem. Cycles, 20(3), GB3007.

- Froelich, B.A. and D.A. Daines(2020) : In hot water: effects fo climate change on Vibrio-human interactions. Environ. Microbiol. 22(10), 4101-4111.
- Fulton, E. A., J. S. Link, I. C. Kaplan, M. Savina-Rolland, P. Johnson, C. Ainsworth and D. C. Smith(2011) : Lessons in modelling and management of marine ecosystems: the ATLANTIS experience. Fish and Fisheries, 12(2), 171-188.
- GlobalHAB(Global Harmful ALgal Blooms)(2021) : Guidelines for the Study of Climate Change Effects on HABs. Paris, UNESCO-IOC/SCOR. M. Wells *et al.* (eds.) (IOC Manuals and Guides no 88), 120 pp.
- Han, I. S. and J. S. Lee(2020) : Change the annual amplitude of sea surface temperature due to climate change in a recent decade around the Korean Peninsula. J. Mar. Env. & Saf., 26(3), 233-241
- Harvell, C. D., K. Kim, J. M. Burkholder, R. R. Colwell, P. R. Epstein, D. J. Grimes, E. E. Hofmann, E. K. Lippa, A. D. M. E. Osterhaus, R. M. Overstreet, J. W. Porter, G. W. Smith and G. R. Vasta(1999) : Emerging marine diseases-climate links and anthropogenic factors. Science, 285, 1505-1510.
- Hofmann, E., S. Ford, E. Powell and J. Klinck(2001) : Modelling studies of the effect of climate variability on MSX disease in eastern oyster (*Crassostrea virginica*) populations. Hydrobiologia, 460, 195-212.
- Hwang E. K, D. S. Ha and C. S. Park(2018) : The influences of temperature and irradiance on thallus length of *Saccharina japonica* (Phaeophyta) during the early stages of cultivation. J. App. Phycology, 30, 2875-2882.
- Hwang, S. D., J. Y. Hwang, B. C. Kang, H. R. Jeon, W. J. Chun, D. W. Lee, S. B. Sohn, S. M. Kim, S. R. Kim, K. Y. Lee, M. H. Jung, J. S. Seo, M. Kwon and B. Y. Jee(2018) : Whole genome sequence of acute hepatopancreatic necrosis (AHPND) isolated from Korea. In : Proceedings of the Korean Federation of Fisheries Science and Technology Societies (KOFFST) International Conference 2018, Busan, Korea, 492 p.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)(2019) : The ocean and cryosphere in a changing climate: A special report of the IPCC. Cambridge University Press, 460-462.
- IPCC(2021) : Climate Change 2021:The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 3948 pp.
- IPCC(2022) : Climate Change 2022:Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 3676 pp.
- Kim, B. T., C. L. Brown and D. H. Kim(2019) : Assessment on the vulnerability of Korean aquaculture to climate change, Marine Policy, 99, 111-122.
- Kim, B. T., I. S. Han, J. S. Lee and D. H. Kim(2021) : Impact of seawater temperature

- on Korean aquaculture under representative concentration pathways(RCPs) scenarios. Aquaculture, 542, <http://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736893/>
- Kim, S. M., L. J. Jun, M. A. Park, H. D. Jeong and J. B. Jeong(2015) : Characterization of the myxosporean parasite isolated from emaciated olive flounder *Paralichthys olivaceus* on Jeju Island. Kor. J. Fish. Aquatic. Sci., 48, 337-345.
- Kim, S. M., S. M. Ko, J. H. Jin, J. S. Seo, N. S. Lee, Y. S. Kim and Y. R. Bae(2018) : Characteristics of Viral Endothelial Cell Necrosis of Eel (VECNE) from Culturing Eel (*Anguilla japonica*, *Anguilla bicolor*) in Korea. Kor. J. Ichth., 30(4), 185-193.
- Kim, Y. C., W. J. Kwon, J. G. Min and H. D. Jeong(2018) : Isolation and initial characterization of new betanodaviruses in shellfish. Transbound. Emerg. Dis., 65(6), 1557-1567.
- Kim, Y. K., J. B. Jeong, M. K. Lee, S. I. Park, M. A. Park, M. K. Choe and I. K. Yeo(2011) : Pathophysiology of olive flounder *Paralichthys olivaceus* suffering from emaciation. J. Fish. Pathol., 24, 11-18.
- Laabir M., Collos Y, Masseret E, Grzebyk D, Abadie E, Savar V(2013) : Influence of environmental factors on the paralytic shellfish toxin content and profile of *Alexandrium catenella* (Dinophyceae) isolated from the Mediterranean Sea. Marine drugs, 11, 1583-1601.
- Lüning K.(1984) : Temperature tolerance and biogeography of seaweeds: the marine algal flora of Helgoland (North Sea) as an example. Helgoländer Meeresunters, 38, 305-317.
- New and Future developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering(2020) : Chapter 3 – Biofloc systems in aquaculture: Global status and trends, 31-42.
- Noh, C. H.(2020) : Hatchability of fertilized eggs from grouper (Subfamily Epinephelinae) hybrids in Korea: A mini review for selection of commercially promising cross combinations. Kor. J. Fish. Aquat. Sci., 53, 479-485.
- Odegard J., T. Moen, N. Santi, S. A. Korsvoll, S. Kjoglum and T. H. E. Meusissen(2014) : Genomic prediction in admixed population of Atlantic salmon (*Salmo salar*). Frontiers in Genetics, 5(402), 1-8.
- Oh S. J.(2019) : Aging speed of getting faster. In: Weekly KDB Report. KDB Future Strategy Research Institute, Naju, 1-3.
- Park, S. W., E. B. Jung, and D. W. Kim(2012) : Outbreak of Anguillid herpesvirus-1 (AngHV-1) infection in cultured shortfin eel (*Anguilla bicolor*) in Korea. Kor. J. Fish. Pathol., 25(3), 151-158.
- Parry M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson(2007) : Climate change 2007: impacts adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC Fourth Assessment Report (AR4), Vol 2, IPCC, Cambridge, 976 pp.

Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire(2006) : Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological modelling, 190(3-4), 231-259.

PICES(North Pacific Marine Science Organization)(2021) : 2021 Annual Report of the Section on Climate Change effects on Marine Ecosystems, PICES, 10 pp.

PICES(2021) : Marine ecosystems of the North Pacific Ocean 2009-2016;Synthesis Report, PICES Special Publication 7, PICES, 82 pp.

Qian R., Z, Zhang, X. J. Li, J. H. Pan, B. L. Sheng and Y. X. Jiang(2016) : Guidelines on disease prevention and treatment during seedling period of kelp. China Fisheries, 6, 96-99.

Rimmer M. A. and B. Glamuzina(2019) : A review of grouper (Family Serranidae: Subfamily Epinephelinae) aquaculture from a sustainability science perspective. Rev. Aquac., 11, 58-87.

Snieszko, S. F.(1974) : The effects of environmental stress on outbreaks of infectious diseases of fishes. J. Fish Biol., 6(2), 197-208.

Song J. Y., M. J. Kim, H. S. Choi and S. H. Jung(2014) : Monitoring Kudoa septempunctata in cultured Olive Flounder Paralichthys olivaceus in different Regions of Korea in 2013. Kor. J. Fish. Aquatic Sci., 47, 611-621.

Stratistics MRD(Market Research Consulting)(2019) : Aquaponics - Global market outlook (2017-2016). Market Research Report, 198 pp.

van den Hoek C. and K. Lüning(1988) : Biogeography of marine benthic algae preface. Helgoländer Meeresunters, 42, 131-132.

Wahid A., S. Gelani, M. Ashraf and M. R. Foolad(2007) : Heat tolerance in plants: an overview. Environ. and Exp. Botany, 61:199-223.

Wernberg T., M. S) Thomsen, F. Tuya, G. A. Kendrick, P. A. Staehrand B. D. Toohey(2010) : Decreasing resilience of kelp beds along a latitudinal temperature gradient: potential implications for a warmer future. Ecol. Lett., 13, 685-694.

WHOI(Woods hole Oceanographic Institution)(2019) : Distribution of HABs throughout the World, http://hab.shoi.edu/maps/regions_world_distribution/. (on-line)

WWF(World Wide Fund For Nature)(2020) : Living Planet Report 2020. WWF. <http://livingplanet.panda.org>.

 용어정리

용어	정식명칭 및 영어	내용
COP	Conference of the Parties/ 유엔기후변화협약 당사국 총회	1992년 유엔 환경개발회의에서 체결한 기후변화협약의 구체적인 이행방안을 논의하기 위해 매년 개최하는 당사국들의 회의
CPUE	Catch Per Unit Effort/ 단위노력당어획량	총어획량을 총어획 노력으로 나눈 것으로 자원량 지수로 사용됨
EEZ	Exclusive Economic Zone/ 배타적 경제수역	자국 연안으로부터 200해리까지의 모든 자원에 대해 독점적 권리를 인정하는 국제 해양법
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	국제연합의 경제사회이사회 전문기관으로 세계의 식량 및 농림, 수산에 관한 문제를 취급하며 세계 각 국민의 영양 및 생활수준의 향상 등을 위하여 활동
HSI	Habitat Suitability Index/ 서식지적합지수	종 출현 정보와 환경 변수를 이용하여 서식 기준을 도출, 대상종의 대체 서식지의 적합 여부를 0~1 사이의 수치로 파악함
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission/ 정부간 해양학 위원회	전 지구적인 해양관측과 연구, 해양자료 조사, 해양재난 대응 등 다양한 해양과학 프로그램을 운영하는 유네스코 산하의 해양과학 전담기구
IPCC	Intergovernmental Panels on Climate Change/기후변화에 관한 정부간 협의체	UN산하 세계기상기구와 유엔환경계획에 의해 1988년 세워진 기구. 기후변화의 과학적근거와 이를 기반으로 한 평가보고서 발간이 주된 임무
NDC	Nationally Determined Contribution/ 국가 온실가스 감축목표	각 회원국이 온실가스 배출에 대한 책임과 역량을 고려하여 자발적으로 얼마만큼의 온실가스 배출을 줄일 것인지를 유엔기후변화협약에 공식적으로 제출하는 계획
NPZD 모델	Nutrient-Phytoplankton- Zooplankton-Detritus/ 하위 생태계 모델	해양 하위생태계 구성인자인 영양염, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 유기배설물 상호 관계의 역할을 상미분 방정식으로 표현한 생물-물리 결합모델임
P4G 정상회의	Partnering for Green Growth and the Global Goals 2030	녹색성장과 2030 글로벌 목표를 위한 연대로 기후변화에 대응하고 지속가능하고 탄력적인 경제를 구축하기 위한 세계적인 협의체
PICES	North Pacific Marine Science Organization/북태평양 해양과학기구	북태평양 해역 및 인접해역의 해양연구 협력 및 수행을 위하여 구성된 정부간 과학기구
SPF	Specific Pathogen Free	특정 병원체에 감염되지 않은 상태
공간격자	Spatial grid	컴퓨터를 사용하여 해양과 대기의 물리적인 변화를 설명하는 편미분 방정식의 해를 구하기 위해, 3차원 공간을 육면체와 같은 셀의 집합으로 격자화한 것
구상선수	Bulbous bow	선수(벋머리)의 종류 중 하나로, 선박의 조파저항을 감소시키기 위해 수면 아래에 공 모양으로 설계됨
국가중요과학 기술자료	National Scientific Heritage	국립중앙과학관 주관으로 과학기술에 관한 역사적, 교육적 가치가 높고 후대에 계승할 필요가 있는 자료를 등록하여 보존·관리를 지원하고, 이를 통해 활용가치를 높이는 제도

용어	정식명칭 및 영어	내용
등록문화재	Registered Cultural Heritage	문화재청장이 문화재위원회의 심의를 거쳐 지정문화재가 아닌 문화재 중에서 보존과 활용을 위한 조치가 특별히 필요하여 등록한 문화재
배전	Roasting	커피, 밀 등을 고온에서 가열처리하여 수분을 제거하는 방법
병원성 비브리오균	Pathogenic <i>Vibrio</i> spp.	수인성·식품매개질환의 원인 병원체로 해수나 수산물에서 검출
비가역적 손상	Irreversible injury	외부의 자극으로 신체가 손상된 경우에 치료해도 이전 상태로 회복될 수 없는 손상
사료효율	Feed utilization	체중으로 전환된 사료의 비율 사료효율(%)=(체중증가량/사료섭취량)×100
아라고나이트 포화도	Aragonite Saturation	해양산성화를 나타내는 지표. 산호초와 연체동물의 껍질을 만드는데 필수적인 요소로 산성화가 강해지면 아라고나이트 농도가 낮아짐.
양자강 유출수	Changjiang Diluted Water	중국대륙 양자강에서 배출되는 담수로 여름철 한국 해역에 저염분에 의한 피해를 끼치고 있음
연급군	Age-structed group	모델 내에서 척추동물과 일부 무척추동물에 해당하며 단계별 연령 (Cohort)으로 나뉠 수 있음
영양염류	Nutrients	바닷물 속의 규산염, 인산염, 질산염 등 식물성 플랑크톤이 영양분을 섭취할 수 있는 이온 또는 분자상태의 영양염의 종류를 총칭함
유전력	Heritability	생물집단이 갖는 유전적 변이 중에서 다음세대에 전달되는 비율
유전체	Genome	유전자(gene)와 염색체(chromosome)를 합성한 단어로서 생명체를 구성하는 모든 생명현상을 조절하는 유전물질 (혹은 유전정보)을 통합해서 부르는 명칭
유전체 선발	Genome selection	유전체 전반에 분포하는 유전변이마커로 육종가를 예측하여 우량개체 선발
육종	Breeding	생물이 가진 유전적 성질을 이용하여 새로운 품종을 만들어 내거나 기존 품종을 개량 하는 것
이상고수온	Marine Heatwaves	수일에서 수개월 바다의 수온이 비정상적으로 상승하는 현상으로 범위는 수천㎢에 달할 수 있음. 해양열파라고도 함
잠정조치수역	Provisional Zone	EEZ 확정할 때까지 일정기간 EEZ 제도의 적용을 유보하는 수역
전산 유체역학	Computational Fluid Dynamics	유체 역학의 한 분야로서, 유체의 동적인 움직임을 컴퓨터를 이용해서 수치 해석적 방법으로 계산해 내는 학문
정치망	Set net	자루 모양의 그물에 테와 갈매기 장치를 한 어루를 어도에 부설하여 대상 생물이 들어가기는 쉬우나 되돌아나가기 어렵도록 장치한 어구
코르트노즐	Kort nozzle	나선형 프로펠러를 둘러싼 원환 모양의 장치
패류독소	Shellfish-poison	패류 및 피낭류에 축적되어 먹으면 식중독을 일으키는 독의 총칭으로 패류독소 원인 플랑크톤을 먹이로 하는 패류 및 피낭류의 체내에 독소가 축적
플라스미드	Plamid	세균이 자신의 염색체 DNA 외에 가지고 있는 작은 고리형 DNA
테스트베드	Test bed	어떤 것을 세상에 내놓기 전에 그것이 성공할 수 있을 것인지를 미리 알아보기 위해 시험적으로 적용해 보는 소규모 시험

 **보고서 발간을 위해 노력하신 분들**

보고서 작성 및 지원

김지희 연구기획조정부상(발간 총괄), 정래홍 기후변화연구과장, 임양재 연근해자원과장,
황형규 양식연구과장, 손광태 식품위생가공과장, 배봉성 수산공학과장, 조미영 연구관
(이상 각 장별 총괄 및 지원), 한인성 연구관(제 1장), 한인성 연구관, 김정연, 손문호,
심정희, 박성은, 이준수, 주희태, 최양호, 황재동 연구사(이상 제 2장), 김희용, 이승종 연구관,
고준철, 김중진, 김창신, 정재묵 연구사(이상 제 3장), 김현철, 남보혜, 황은경 연구관,
최진 연구사(이상 제 4장), 김석태, 박큰박위, 송준영, 오재영 연구사(이상 제 5장)

발간자문 및 검토위원회

우동식 국립수산물품질관리원장, 차형기 자원환경식품부장, 전제천 양식산업연구부장,
이정용 연구기획과장(이상 원내), 박원규 부경대학교 교수, 김대영 해양수산개발원 본부장,
김영호 부경대학교 교수(이상 원외)

원내 감수위원회

오태기 사무관, 성차연 사무관, 강수경 수산자원연구센터장

주 의 사 항

1. 본보고서는 해양수산부 국립수산물과학원에서 수행한 보고서입니다.
2. 보고서의 내용을 대외적으로 게재, 인용할 때에는 반드시 국립수산물과학원의 사전 허락을 받기 바라며, 무단 복제를 금합니다.

2022

수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서

Annual report for Climate change Trends in fisheries, 2022

발 행 일 : 2022년 9월

발 간 : 해양수산부 국립수산물과학원

편 집 인 : 국립수산물과학원장 우동식

저 자 : 우동식, 김지희, 정래홍, 임양재, 황형규, 손광태, 배봉성, 고준철, 김경연,
김석태, 김종진, 김창신, 김현철, 김희용, 남보혜, 박성은, 박근박위,
손문호, 송준영, 심정희, 이준수, 정재묵, 주희태, 최양호, 오재영, 이승중,
최진, 한인성, 황은경, 황재동

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

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