

2023 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서

Annual report for Climate change Trends in fisheries, 2023

ACT Fish 2023

ACT Fish 2023

2023 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서

2023 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서

Annual report for Climate change Trends in fisheries, 2023

ACT Fish 2023



지난 3월 정부간 기후변화협약체(IPCC)는 제6차 평가보고서의 종합보고서를 승인하면서, 최근 온난화의 진행 속도가 매우 빨라지고 있으며, 이로 인한 기후변화의 위험성 증가와 함께 극한 환경 발생 가능성도 커지고 있음을 경고한 바 있습니다. 또한 세계기상기구(WMO)에서는 지난 4월 “2022 전 지구 기후 현황” 보고서를 통하여 전년도에 관측된 해양온난화, 해양산성화 및 해수면 상승이 역대 최고치를 경신하였다고 보고하였습니다.

우리나라 해역은 전 세계에서 가장 빠른 표층수온 상승 경향을 보임과 동시에 높은 어획 강도, 좁고 얇은 내만과 연안에 밀집된 양식 환경 등으로 인하여 수산업의 기후변화 취약성이 높은 해역으로 알려져 있어, 기후위기와 같은 우려를 더욱 가중시키고 있습니다.

“

기후변화와 이에 따른 이상기후의 빈번하고 강력한 발생과 함께 특히 해양과 수산을 둘러싼 환경의 급격한 변화는 수산업과 해양환경에 대한 중요성이 높은 우리나라에 더욱 심각한 영향을 줄 수 있다고 판단됩니다.

”

심화되는 기후변화와 이상기후에 따른 수산업과 해양환경 피해를 최소화하기 위해서는 기후변화 감시, 예측과 같은 과학적인 정보 생산, 그리고 이를 활용한 다양한 기후변화 적응 기술 개발을 통한 기후변화 대응 능력을 향상시키는 점이 중요하다고 말할 수 있습니다. 뿐만 아니라 생산된 기후변화 대응 정보와 기술을 어업인, 정책결정자, 학계 등과 소통하고 공유하여 어업·정책·연구 현장에서 활발하고 소중하게 활용하는 것은 더욱 중요하리라 생각합니다.

국립수산과학원은 기후변화 연구결과 및 인식을 어업인, 정책결정자 및 학계 관계자들과 함께 공유하기 위하여 “2022 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서”를 처음 발간 배포한 바 있고, 올해 두 번째로 보고서를 발간하게 되었습니다. 특히 올해는 “이상기후와 수산재해”분야에 대하여 동향, 원인, 현황 및 향후 계획까지 상세히 살펴보는 기획 특집을 마련하였습니다. 이번 보고서가 기후변화와 이상기후에 대한 이해를 제고하고 수산업과 해양생태계의 피해 최소화 및 효과적인 대응에 활용될 수 있기를 희망합니다.

2023년 08월

국립수산과학원장 우 동 식



기후변화 장기 경향 및 2022년 수산분야 기후변화 주요 이슈	6
------------------------------------	---

정책결정자 및 어업인을 위한 요약	9
--------------------	---

제1장 국내외 해양수산분야 기후변화 과학 및 정책 이슈 19

1-1. 국외 기후변화 과학 및 정책 이슈	20
1-2. 국내 기후변화 과학 및 정책 이슈	22
1-2-1. 국내 각 부처의 기후변화 대응 과학 및 정책 이슈	22
1-2-2. 수산분야 온실가스 배출량 산정	23
1-2-3. 해양기후변화 영향평가 제도 도입에 관한 고찰	25

제2장 기후변화의 해양환경 및 생태계 영향 27

2-1. 해양환경 및 생태계	28
2-1-1. 해양환경 및 생태계 기후변화 영향	28
2-1-2. 해양환경 및 생태계 기후변화 전망	33
2-1-3. 해양환경 및 생태계 기후변화 적응 연구	35
2-2. 수산자원	37
2-2-1. 수산자원 기후변화 영향	37
2-2-2. 수산자원 기후변화 전망	40
2-2-3. 수산자원 기후변화 적응 연구	43
2-3. 양식분야	47
2-3-1. 양식분야 기후변화 영향	47
2-3-2. 양식분야 기후변화 적응 연구	49

제3장 【기획】이상기후와 수산재해 55

3-1. 수산분야 이상기후 영향	56
3-1-1. 전 지구적 해양수산분야의 이상기후 발생 경향 및 전망	56
3-1-2. 우리나라 수산업에 영향을 주는 이상기후 발생 원인 고찰	60
3-2. 이상기후 발생과 양식 피해 현황	65
3-2-1. 이상수온 및 태풍 발생 현황	65
3-2-2. 이상기후에 따른 양식 피해 현황	67
3-3. 수산재해 대응 현황 및 추진 방향	71
3-3-1. 수산재해 과학적 대응 현황	71
3-3-2. 수산재해 정책적 대응 현황	75
3-3-3. 수산재해 대응 향후 추진 방향	76

맺음말	80
-----	----

참고문헌	82
------	----

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



우리나라 해역의 기후변화 장기 경향(모식도)



수온 (Water Temperature)	염분 (Salinity)	용존산소 (Dissolved Oxygen)
어획량 (Catch Amount)	양식폐사 (Mass Mortality)	기초생산력 (Primary Production)
영양염 (Nutrients)		

경향성 : (큰폭의 상승·하강) (중간폭의 상승·하강)

 (소폭의 상승·하강) (변화없음)

인을 위한 요약

ACT Fish 2023



 관측된 온난화 경향(Observed warming trends)

구분	2021년	2022년	비고
표층수온(℃)	18.0 (+0.89)	17.4 (+0.23)	평년 (1991~2020) 대비
표층염분	32.96 (-0.04)	32.92 (-0.08)	평년 (1991~2020) 대비
기초생산력(g C m ⁻² y ⁻¹)	139.8	113.8	
연근해 어획량(만톤)	94.3 (-9.2%)	88.7 (-14.5%)	지난 10년 평균 (2011~2020) 대비
자연재해 피해액(억원)	416	18.8	
고수온특보 발령일수(일)	43 일 (‘21.7.15~8.26)	64 일 (‘22.7.6~9.7)	
저수온특보 발령일수(일)	74 일 (‘21.12.28~’22.3.11)	79 일 (‘22.12.18~’23.3.6)	
패독 기준초과 발생일수(일)	103 일 (‘21.2.15~5.13/6.7~6.21)	100 일 (‘22.2.11~5.16/6.23~6.27)	

 구평년(1981~2010년) 대비 신평년(1991~2020년)의 수온 변화

구분		舊평년	新평년	편차
표층수온(℃)	연평균	16.99	17.14	0.15
	2월	10.49	10.60	0.11
	8월	25.44	25.57	0.13
100m 수층수온(℃)		10.40	10.16	-0.24

 정책결정자·어업인을 위한 요약

 국내외 해양수산분야 기후변화 과학 및 정책 이슈

- 2023년 최종 승인된 제6차 IPCC 평가보고서에서는 지구온난화의 급격한 가속화와 이에 따른 이상기후의 발생 강도와 빈도가 증가할 것으로 전망함. 세계기상기구에 따르면 2022년 전 지구 해양온난화, 해양산성화 및 해수면상승 등 해양관련 기후변화 주요 인자가 모두 과거 기록을 경신했다(1.1.)
- 관계부처 합동으로 기후변화 대응을 위한 국가 기후위기 적응대책 및 탄소중립·녹색성장 기본계획을 수립 하였으며, 해양수산부에서는 수산업의 기후위기 대응체계 공고화 등 기후위기의 선제적 대응을 위한 기후 변화 해양수산부문 종합계획을 수립함(1.2.1)
- 수산 분야의 온실가스 배출량은 국가 온실가스 배출량 대비 약 0.4% 수준이며, 2012년 저점 대비 20% 상승하였음. 온실가스 감축 수단으로 어업 효율화 방안에는 어선 노후 기관 교체, 노후 어선 대체 건조 등이 포함되어 있음(1.2.2)

정책·수산업적 시사점

- 해양온난화의 가속화와 이상기후 증가로 수산업은 큰 변화를 맞고 있음
- 수산업은 해양온난화, 산성화 등 기후변화 요소와 함께 과도어업, 연안오염, 어획구역 축소, 유류비 상승, 양식생물 밀식 등 비기후적 요소가 함께 영향을 주고 있음
- 기후변화에 따른 수산업의 피해 최소화를 위하여 인간의 힘으로 대처할 수 있는 비기후적 요소 저감에 대한 노력을 기울일 예정임
- 온실가스 배출 정책이 성공적으로 수행되더라도 해양온난화 등 해양의 기후변화 영향은 계속적으로 증가될 것으로 전망됨. 따라서 기후변화 취약성이 높은 우리나라 수산업의 지속가능성을 위해서는 탄소중립 정책 수행과 함께 기후변화 적응을 위한 집중적인 정책지원 및 연구개발을 추진할 계획임

 기후변화의 해양환경 및 생태계 영향

- 최근 55년간(1968~2022) 한국 해역의 연평균 표층수온은 약 1.36℃ 상승(전 지구 평균 대비 약 2.5배 이상 높은 수준)하였음. 같은 기간 동해 표층의 수온은 1.82℃ 상승, 100m 수층의 수온은 1.13℃ 저하하였고, 500m 수층의 수온은 0.07℃ 상승하였음. 표층과 아표층(100m) 수층간의 수온차가 점점 증가하는 추세로 성층이 강화되고 있음을 시사함(2.1.1)
- 표층 염분은 감소 경향을 보였고, 동해 500m 층에서의 용존산소는 감소 경향이 뚜렷하게 나타남. 표층의 영양염, 클로로필-a 및 기초생산력도 감소하는 경향을 보였음. 표층 영양염, 기초생산력 등의 감소 원인은 해양온난화에 따른 성층 강화 영향으로 판단됨(2.1.1)
- 2022년 총 7종의 독성해파리가 출현하였으며, 4종의 미기록종의 해파리가 출현하였음. 8~9월에 유해적조가

발생하였지만 수산 피해는 발생하지 않음(2.1.1)》

- ④ 시구아테라 식중독 발생 대응을 위해 시구아톡신 정밀 분석법을 확립하였으며, 2020년에는 시구아톡신 표준독소(CTX-B1)를 활용하여 제주 연안 아열대성 어류 14종에 대한 모니터링 실시 결과, 모든 시료에서 시구아톡신은 검출되지 않았음(2.1.2)》
- ④ 미래 해양수온 전망자료로부터 시구아테라 독 출현 가능 수온일수는 2100년까지 현재 대비 100일 내외 증가할 것으로 전망되었으며, 미래 해수욕 가능 기간은 수온 상승으로 현재 대비 2100년까지 30~60일까지 증가할 것으로 전망됨(2.1.2)》
- ④ 우리나라 표층의 해양산성화 경향은 전 세계 대양 및 일본 연근해와 유사한 수준으로 감소하고 있음. 패류 및 갑각류에 대한 해양산성화 영향에 대한 실험 결과, 모든 대상 수산생물이 낮은 pH에서 생존률이 낮은 경향을 보임(2.1.3)》
- ④ 지난 18년간(2003~2020) 실시한 봄철 고래 목시조사 결과, 밍크고래는 냉수대가 강하게 발생한 해역과 수온이 높았던 시기에는 관찰되지 않았음(2.1.3)》
- ④ 연근해 어업생산량은 지속적인 감소 추세(2020년대 평균 92만톤 수준)를 보이고 있음. 살오징어를 어획하는 주 어장은 1990년대 동해 남부해역, 대화퇴 부근에서 2010년대 이후 서해 및 러시아 해역으로 확장하였고, 방어는 남해에서 주로 어획되었으나 동해의 어획비율이 급격하게 증가하였으며, 이와 같은 원인은 해역별 수온 변화에 의한 영향으로 보임(2.2.1)》
- ④ 미래 해양환경 전망 자료를 기반으로 살오징어의 미래 서식지를 예측한 결과, 2050년대에는 연근해 서식지 면적이 2~4월에 증가, 5~1월에 감소(특히 7~9월 분포 면적 큰 폭 감소)할 것으로 전망되어 현재 어획의 계절변화가 미래에는 크게 달라질 것으로 전망됨(2.2.2)》
- ④ 기후변화에 따른 멸치 어획량 영향 파악 결과, 수온상승과 함께 감척·출어척수 감소 등에 영향을 받는 것으로 보임. 기후변화 대응 연구의 일환으로 지속적인 모니터링 결과, 2022년 참다랑어의 어린물고기가 제주도 주변해역에서 처음 채집되었음(2.2.3)》
- ④ 상어류의 발견 해역이 점차 북상하고 있음을 확인하였으며, 난류가 흐르는 해역을 중심으로 주로 채집되어 난류 세력 세기와 상어류 이동·분포에 연관성이 있을 것으로 판단됨(3.2.1)》
- ④ 원양어업의 최대 어장인 태평양해역에서 다랑어류는 엘니뇨 시기에 어장이 동쪽으로 확장되고 어획량이 증가하였으며, 라니냐 시기에는 태평양 서부어장으로 축소되면서 어획량 감소에 영향을 주고 있음(2.2.3)》
- ④ 한국 연안에서 마비성패류독소의 조기 발생과 허용기준치 초과검출 시기가 확장되는 경향을 보이며, 아열대성 독성 연체동물인 파란선문어는 2012년 이후 총 26회 출현하여 출현 빈도와 범위가 확산되고 있음(2.3.1)》
- ④ 고수온 대응을 위하여 참전복을 대상으로 고수온 내성 육종연구를 시작하였으며, 교잡바리류의 양성기술을 표준화하고 사육환경요인별 최저한계범위를 구명함. 기후변화 취약종으로 알려진 해조류의 기후변화 대응을 위하여 선발육종 및 교잡육종을 통하여 다시마와 미역의 양식 생산기간이 연장되는 품종을 개발하였음(2.3.2)》
- ④ 수온과 관련된 생활사를 가지는 점액포자충에 의한 어류 질병의 발생은 지속적으로 증가되는 추세이며,

여러 점액포자충을 동시에 진단할 수 있는 기술을 개발하여 효율적 모니터링이 가능하게 하였고, 피해예방을 위한 조기검출, 감염 차단, 치료대책 등에 관한 기술개발을 추진할 계획임(2.3.2)》

정책·수산업적 시사점

- 해양온난화와 성층 강화에 따른 표층 영양염 및 기초생산력 감소는 향후 보다 높은 단계의 먹이사슬에 영향을 줄 수 있어 지속적인 기후변화 대응 수산자원 관리 방안을 모색할 예정임
- 아열대성 독성 생물의 출현 증가, 패류독소 조기 발생, 어독 플랑크톤 출현 증가 등이 관측, 전망되고 있어 수산물의 안전성 확보를 위한 집중적인 연구를 추진할 계획임
- 우리 해역의 해양산성화는 전 세계 평균과 비슷한 수준으로 진행중이며, 급격한 해양산성화는 패류 및 갑각류의 생존률과 관련성이 있음
- 먹이사슬 최상위단계의 해양생물도 수온 등 기후변화 요소에 영향을 받고 있으며, 태평양 다랑어류는 엘니뇨/라니냐 주기에 따른 어장 형성 변화가 있음을 확인함
- 기후변화 취약종으로 알려진 해조류를 대상으로 양식 생산기간 연장을 위한 육종 품종을 개발하였고, 수온상승과 관련된 수산 질병 증가 추세에 대응하기 위한 대응연구를 추진함

🔍 [기획] 이상기후와 수산재해

- ④ 1980년대초 대비 2010년대말에는 전 세계적으로 이상 고수온 발생일수가 두배, 최대강도는 약 0.15℃, 공간적 범위는 약 66% 증가함. 21세기 말에는 현재 대비 이상 고수온 발생 빈도가 2~15배까지 증가할 것으로 전망됨. 이상 고수온 현상은 전 세계 해역에서 산호초, 켈프, 해조숲, 어류 및 바닷새의 폐사를 일으키고 있으며, 수산생물의 풍도 및 분포 변화 등에도 영향을 주고 있음(3.1.1)》
- ④ 이상 저수온 현상은 전 세계적으로 기후변화에 따른 수온상승에 의해 감소 경향을 나타내지만, 지역적인 편차가 매우 크게 나타남. 약 40년간 수온 자료 분석 결과 이상 고수온은 10년당 약 8.4일 발생일수가 증가하였지만, 이상 저수온은 10년당 약 9.4일 발생일수가 감소하였음(3.1.1)》
- ④ 최근 수 십 년사이 우리나라, 일본, 동중국해에서 태풍 발생빈도는 증가한 반면, 필리핀, 남중국해에서 감소하는 경향을 보임. 열대성저기압의 발생빈도가 증가하는 해역은 동아시아, 대서양 저위도, 인도양, 아라비아해 등으로 나타남. 열대성저기압의 최대치가 나타나는 위치는 점차 극쪽으로 이동하고 있음(3.1.1)》
- ④ 미래 열대성 저기압의 발생빈도의 증감은 불확실성이 크지만, 평균 강도는 증가할 가능성이 높음. 장기적 해수면 상승 영향으로 향후 폭풍해일 세력이 더욱 강화될 것으로 전망됨. 열대성 저기압의 풍속이 10% 증가할 경우 그에 따른 경제적 손실은 30~40%까지 증가할 것으로 전망됨(3.1.1)》
- ④ 2000년대 후반부터 우리나라 해역의 계절별 수온 상승 경향은 큰 변화가 나타나 여름철 수온 상승이 큰 폭으로 상승하였고, 겨울철 수온 상승은 약화되었음. 여름철 이상 고수온 현상 발생은 ①폭염의 강도와 지속기간 증가, ②대마난류세력 강화, ③태풍통과 감소에 의한 수층간 혼합 약화 등이 원인으로 지적됨(3.1.2)》
- ④ 실제로 최근 우리나라 폭염일수가 급격히 증가하였으며, 여름철 대마난류도 매우 강한 세력을 유지하고

있고, 고수온 현상이 심각하게 발생한 해의 여름은 태풍 통과와 직접적인 영향이 나타나지 않음(3.1.2)

- ④ 최근 겨울철 시베리아고기압 세력은 다시 강화되고 있으며, 동아시아 겨울철 계절풍 급격하게 하강하던 추세가 2000년대 후반부터 약해지고 있음. 또한 겨울철 우리나라의 계절풍도 다시 강화되는 경향을 보이고, 한파 발생일수도 2010년대에 다시 증가하는 경향을 보여 이상 저수온 발생에 호조조건이 형성됨(3.1.2)
- ④ 최근 12년간(2011~2022) 자연재해에 따른 양식 피해는 총 2,381억원이었으며, 고수온·저수온 등 이상 수온에 따른 피해가 전체의 64%를 차지함. 이상수온 외에도 강풍, 팽생이모자반 유입, 영양염 부족, 빈산소 수괴 발생 등에 의한 피해가 빈번히 발생하고 있음(3.2.1)
- ④ 국립수산물과학원은 전국 연안 180개소의 실시간 수온 관측망을 운영하고 있으며, 홈페이지와 모바일 앱 등을 통하여 어업인을 포함한 이용자에게 제공하고 있음. 이상수온 발생의 사전 예측을 위하여 공간해상도 300~500m의 수치모델 기반 고해상도 예측시스템을 운영하며, 매일 1시간 간격의 7일 예측 결과를 생산하고 있음(3.3.1)
- ④ 해양수산부와 국립수산물과학원은 2017년부터 이상수온 특보 기준을 마련하여 운영하고 있으며, 매년 고수온·저수온 종합 대책을 수립하고, 고수온기/저수온기 양식방법별 관리요령을 어업인에게 제공하고 있음(3.3.2)
- ④ 기후변화에 따라 증가가 예상되는 이상수온 발생 피해 예방을 위하여 실시간 수온 관측망을 2025년까지 200개소로 늘리고, 최적화된 이상수온 예측시스템을 개발하여 운영할 예정임. 2023년 재난 위기대응 실무 매뉴얼 수정을 통하여 이상수온 주요 발생해역을 37개 해역으로 구분하였고, 이를 위기경보 발령에 활용할 예정임(3.3.3)
- ④ 고수온 대응을 위하여 새로운 양식 대상 종의 개발과 기후변화 적응 품종 개발 등의 연구를 추진하고 있으며, 급변하는 환경과 질병발생에 적극 대처할 수 있는 예방 양식 관련 연구도 확대할 계획임(3.3.3)

정책·수산업적 시사점

- 2010년대 이후 우리나라 해역의 수온 상승 패턴은 큰 변화가 있어 최근 수온의 양극화 현상이 심화되고 있으며, 이에 따라 고수온 및 저수온 등 이상수온에 따른 수산재해 발생 가능성이 증가함
- 우리 해역의 이상수온 발생은 이상기후에 따른 폭염, 한파에 직접적인 영향을 받음과 동시에 해류, 태풍 통과 등 해양기상 요소의 영향도 크게 받고 있음
- 이상기후에 따른 수산재해 대응을 위하여 실시간 수온 정보 확대, 고해상도 예측 정보 생산 등 피해 최소화를 위한 대응 기반을 마련하고 있으며, 어업현장에서도 국립수산물과학원의 과학적 정보 및 양식장 관리 요령 등을 활용하여 피해 최소화해 협력해야 할 것
- 스마트 양식, 순환여과식 양식 기술의 개발과 보급 등 수산재해의 영향을 최소화할 수 있는 기술 개발을 지속적으로 추진하고 있으며, 관련 어업현장의 많은 관심이 요구됨
- 해양온난화의 가속화 및 이상기후의 심화에 따라 향후 기후변화에 기인한 수산재해 발생 가능성이 더욱 증가되고 있어 수산재해 보험 가입률 제고를 통한 피해 최소화해 동참이 요구됨



Summary for Policy-makers and Fishermen



Scientific and political issues for climate change in ocean and fisheries

- ④ IPCC reported an rapid acceleration of global warming and projected the globally increasing intensity and frequency of abnormal climate in their 6th assessment report. WMO said global ocean warming, ocean acidification and sea-level rise, which are the key climate factors related to oceans, broke a historical record in 2022(1.1.)
- ④ The national climate change adaptaion measures and master plan for net-zero and green growth were established by relevant ministries. The Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) also established the climate change comprehensive plan in oceans and fisheries for the preemptive response to climate change, such as the consolidation of response system in fisheries(1.2.1)
- ④ Fisheries GHG emissions, which were about 0.4% of the total national GHG emissions, and compared to the lowest point in 2012, it have risen by 20%. The efficiency plans in fisheries as the way for the reduction of GHG included the replacement of old fishing vessel and old engine(1.2.2)



Impacts, projections, and research results of climate change in fisheries

- ④ Over the past 55 years (1968-2022), the average Sea Surface Temperature(SST) in Korean waters has risen by about 1.36°C. It was about 2.5 times higher than the global average. During the same period, the water temperature of surface layer in the East Sea increased by 1.82°C, the 100m water layer decreased by 1.13°C, and the 500m water layer increased by 0.07°C. The difference between SST and temperature at the subsurface layer (100m) is gradually increasing. It means that the stratification of water column is strengthened(2.1.1)
- ④ Surface salinity shows a decreasing trend, and dissolved oxygen shows a clear decreasing trend in the 500m layer of the East Sea. The surface concentration of nutrients, chlorophyll-a, and primary productivity also exhibited a decreasing trend due to the strong stratification in the water column ongoing with global warming(2.1.1)
- ④ In 2022, a total of seven species of toxic jellyfish and four species of unrecorded jellyfish appeared. Harmful algal bloom occurred in August and September, but no damage occurred to fisheries(2.1.1)

- ☑ In response to the outbreak of ciguatera fish poisoning(CFP), LC-MS/MS method for ciguatoxin was established. In 2020, ciguatoxin was not detected in all samples as a result of monitoring subtropical fishes (14 species) of the coastal waters of Jeju Island《2.1.2》
- ☑ The number of days for the appearance of Ciguatera poison plankton was projected to increase about 100 days by 2100 compared to present based on the predicted results of future water temperature. The available period of swimming in beach will be also increased about 30~60 days by 2100 compared to present by the ocean warming《2.1.2》
- ☑ The trend of surface ocean acidification in Korea waters is decreasing at a similar level of global ocean and offshore of Japan. According to the mesocosm experiments for the impacts of ocean acidification to shellfish and crustacean, all experimental species have a low rate of survival in low pH environments《2.1.3》
- ☑ As a result of a sighting survey of whales in spring for 18 years (2003~2020), Common minke whale (*Balaenoptera acutorostrata*) was not observed in the sea areas where strong cold water zones, where were occurred the strong coastal upwelling, were strongly generated and during periods of high seawater temperatures《2.1.3》
- ☑ Fishery production was about 920,000 tons in the 2020's, showing a steady decline. The main fishing grounds for Common squid extended from the southern East Sea and the Yamato Basin in the 1990s to the Yellow Sea and Russian waters since the 2010s. The Yellowtail was mainly caught in the Korea Strait and around Jeju Island, but the catch rate in the East Sea rapidly increased. The reasons for these seem to be the effect of the change in seawater temperature《2.2.1》
- ☑ As a result of predicting future habitat changes of Common squid based on future marine environment projection data, habitat area expected to increase in February-April and decrease in May-January (especially in July-September, the habitat area decreases significantly) in 2050. Therefore, seasonal changes in fishing are projected to change significantly in the future《2.2.2》
- ☑ As a result of examining the impact of anchovy catches due to climate change, it seems that the increase in water temperature and the decrease in the number of fishing vessel affect the catches. As a result of continuous monitoring through a climate change response study, young fish of bluefin tuna were first collected around Jeju Island in 2022《2.2.3》
- ☑ It was confirmed that the area where sharks are found is gradually moving north. The sharks were mainly collected in areas where warm currents flow, therefore it seems to be related to the strength of warm currents and the movement/distribution of sharks《2.2.3》

- ☑ In the Pacific Ocean, which accommodates the largest portion of the Korean distant water fisheries, the tuna fishing ground expanded easterly, showing an increase in catch, during the El Niño season, while, in the La Niña season, reduced to the western part of the fishing ground, affecting the decrease in catch《2.2.3》
- ☑ Paralytic shellfish toxins have tended to occur at an earlier time, and the period exceeding the regulatory limit for the toxins has been also extended. Furthermore, the occurrence frequency (a total of 26 appearances) and area of the blue-lined octopus, which is subtropical venomous mollusk, has been extended since 2012《2.3.1》
- ☑ In order to reduce the mass mortality by marine heatwaves in summer, NIFS carries out the development of new species (of abalone) and aquaculture technologies to respond to climate change such as research on aquaculture technology of hybrid groupers to cope with high water temperature, selective breeding, and genetic breeding. The new species of seaweeds, which were well known as one of the highly vulnerable species, were developed for the expansion of productive period by selective and cross breeding《2.3.2》
- ☑ Fish diseases caused by myxosporean parasites, which have life-cycles related to water temperature, are increasing, and we have developed a diagnostic method for simultaneous detection for several species of myxosporean parasites. In addition, to reduce the mortality of farmed fish caused by these parasites, we plan to develop early diagnosis, infection prevention and treatment technologies《2.3.2》

[Special issue] Abnormal climate and fisheries disasters

- ☑ Globally, marine heatwaves increased about 2 times for occurrence days, 0.15℃ for maximum intensity, 66% for spatial ranges in the late 2010's compared to the early 1980's. The projected occurrence frequency of marine heatwaves will be increase about 2~15 times in the late of 21st century compared to present. Marine heatwaves cause the mass mortality of coral reef, kelp, fish and sea birds. It also impacts the changes in the abundance and distribution of fisheries organisms《3.1.1》
- ☑ Marine cold-spells has a globally decreasing trend by the ocean warming related to climate change. However, the regional gaps of marine cold-spells are very large. According to the analysis on global long-term water temperature data, marine heatwaves increased about 8.4 days per decade, but marine cold-spells decreased about 9.4 days per decade in global oceans《3.1.1》

- ☑ In recent years, the damage by typhoon had increased in Korea, Japan and East China Sea, whereas the damage by typhoon in Philippine and South China sea had decreased. The increasing ocean areas for the occurrence frequency of tropical cyclone are East Asia, low-latitude area of Atlantic, Indian Ocean, and Arabian Sea. The maximum intensity location of tropical cyclone is gradually moving to poleward《3.1.1》
- ☑ The mean intensity of tropical cyclone will be strengthened in the future with high confidence, whereas the occurrence frequency will have high uncertainty. It also projected that the intensity of storm surges will be strengthened by long-term sea level rise. If the wind speed of tropical cyclone increases 10%, the economical damage will be projected to increase about 30~40%《3.1.1》
- ☑ In Korean waters, the seasonal patterns of Sea Surface Temperature(SST) were dramatically changed since the late of 2000's. The increasing trend of SST was clearly strengthened in summer and was slightly weakened in winter from the period. The reasons for the occurrence of marine heatwaves in summer are estimated to be the increasing of intensity and duration of heatwaves, the intensified Tsushima Warm Current, and the weakened vertical mixing by the reduction of typhoon pass《3.1.2》
- ☑ Recently, the heatwave days distinctively increased and the intensity of Tsushima Warm Current in summer was continuously maintained at a high level in recent. The direct impacts of typhoon pass was disappeared during the summer of strong marine heatwaves year《3.1.2》
- ☑ The intensity of Siberian High was inversely strengthened in recent winter. The significant decreasing trend of East Asian Winter Monsoon was clearly weakened since the late of 2000's. The mean wind speeds in winter were inversely intensified and the coldwave days were also inversely increased from 2000's. These phenomena should make a favourable condition for the marine cold-spells in Korea《3.1.2》
- ☑ In the past 12 years, the amount of economic damage caused by natural disasters was about 238.1 billion Won with marine heatwaves accounting for 53% of the total damage followed by Harmful Algal Blooms (21%) and low water temperature (11%)《3.2.1》
- ☑ NIFS operates a real-time water temperature observation network at 180 coastal locations nationwide and provides the data to users, including fishermen, through its website and mobile application. In order to predict the occurrence of abnormal water temperatures in advance, a high-resolution prediction system based on a numerical model with a spatial resolution of 300 to 500m is operated, and the system produces prediction results for 7 days at 1-hour intervals every day《3.3.1》

- ☑ The Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) and NIFS have prepared and operated special warning standards for abnormal water temperature since 2017, established comprehensive countermeasures for high water temperature in summer and low water temperature in winter each year, and provide fishermen with management tips for each aquaculture method by season《3.3.2》
- ☑ In order to prevent damage from abnormal water temperature, which is expected to increase due to climate change, the real-time water temperature observation network will be increased to 200 locations by 2025, and an optimized abnormal water temperature prediction system will be developed and operated. Through the revision of disaster management practice manual in 2023, sea areas with major abnormal water temperatures were divided into 37 sections, which will be used for issuing warnings《3.3.3》
- ☑ In order to reduce the mass mortality by marine heatwaves in summer, NIFS carries out the development of new species and aquaculture technologies to respond to climate change. NIFS also plans to expand the research on preventive aquaculture that can actively cope with rapidly changing environments and disease outbreaks《3.3.3》

Annual report for Climate change Trends in Fisheries, 2023
2023 수산분야 기후변화 영향 및 연구보고서



ACT Fish 2023



1장

국내외 해양수산분야 기후변화 과학 및 정책 이슈

Annual report for Climate change Trends in Fisheries, 2023

- 1-1. 국외 기후변화 과학 및 정책 이슈
- 1-2. 국내 기후변화 과학 및 정책 이슈

제 1장

국내외 해양수산분야 기후변화 과학 및 정책 이슈

1-1. 국외 기후변화 과학 및 정책 이슈

- ② ‘기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 2022년 2월과 4월에 각각 기후변화 적응 및 완화에 관한 평가보고서(Assessment Report, AR), 2023년 3월에 종합보고서를 승인, 발간하였음.
- ③ IPCC 종합보고서에서는 온난화 경향이 더욱 빠르게 진행되고 있으며, AR5에서 보고한 전 지구 지표 온도 변화는 산업혁명 이후 0.85℃ 상승에서, 최근 AR6에서는 약 1.1℃ 상승으로 큰 폭으로 증가하였음을 제시하였음. 또한 온난화의 급격한 가속화에 따른 극한 환경 발생 강도 및 빈도의 증가와 함께 지역적 편차도 크게 늘어날 것임을 보고하고 있음(IPCC, 2023).
- ④ 또한 IPCC에서는 해양온난화가 수산 생산량의 전반적인 감소에 영향을 미치고 있으며, 미래 잠재 어획량은 저위도에서 큰 폭으로 감소하는 반면 극지방 등 고위도 해역에서는 증가할 것으로 예측함. 우리나라를 포함한 중위도 해역은 예측 모델의 불확실성 및 지역적 편차 등에 따라 높은 신뢰의 예측이 힘들지만, 10~15% 내외의 감소가 전망되고 있음(그림 1-1)(IPCC, 2023).

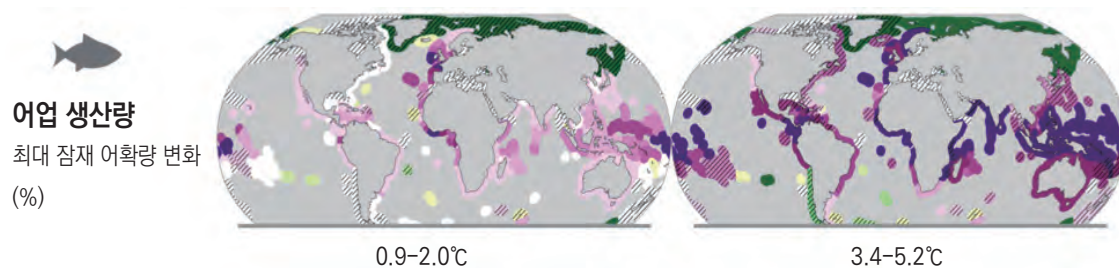


그림 1-1. 1.5℃(좌) 및 3~4℃(우) 미래 온난화 정도에 따른 전 지구 최대 잠재 어획량 변화 예측 경향. [출처 : IPCC(2023)]

- ⑤ 2022년 11월 개최된 제27차 기후변화 당사국 총회(Conference of the Parties, COP)에서는 개발도상국에 대한 기후변화 취약성을 지원하고 손실 및 피해를 최소화하기 위한 기금 마련의 필요성에 모든 회원국이 동의하였으며, 향후 개발도상국에 대한 기후변화 적응 기술의 제공이 중요한 역할을 할 것으로 판단됨(UNFCCC, 2023).

- ⑥ 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서는 전 지구 기후변화 7대 핵심지표(지표온도, 대기 중 이산화탄소 농도, 빙하, 극지방 얼음면적, 해양온난화, 해양산성화, 해수면상승)에 대한 매년 업데이트된 경향을 제공하고 있음. 2022년 5월에 발표된 7대 핵심지표의 경향 중, 해양온난화, 해양산성화, 해수면상승 및 대기 중 이산화탄소 농도는 최고 기록을 경신하였음. 이는 기후변화 핵심지표 중, 해양과 관련된 지표들이 빠른 속도로 증가하고 있음을 시사하고 있음(WMO, 2022).
- ⑦ 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서는 전 세계 해양의 온난화 경향을 파악하기 위한 해양열용량의 연평균 평년편차 분포를 제시하고 있음. 전 세계 해양의 해양 온난화가 급속히 진행되고 있음과 함께 우리나라 해역 해양열용량도 2022년 비교적 높은 수준을 보이고 있음을 확인할 수 있음(그림 1-2)(NOAA, 2023).

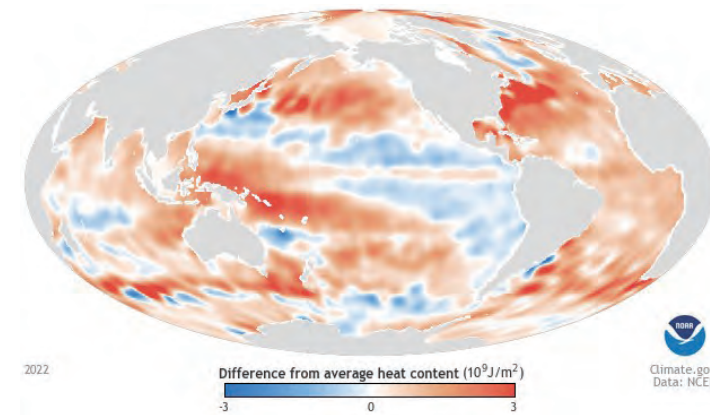


그림 1-2. 2022년 전 지구 해양 열용량 편차(1981~2010년 대비) 분포도. [출처 : NOAA(2023)]

- ⑧ 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency, EPA)은 2021년 미국의 기후변화 취약성 평가와 적응능력 강화, 기후변화 영향에 대한 회복력 향상을 위하여 “기후 적응 행동 계획(Climate Adaptation Action Plan)”이 구축되었음. 2023~2026 전략 계획에는 기후변화에 대응하여, 인간과 생태계회복력 향상을 위해 시급히 취해야 할 우선순위를 제공하고 있음.
- ⑨ 미국의 기후변화 적응 행동 계획에서 가장 우려되는 점으로 제시되는 것은 기후변화 영향이 계층 및 집단에 따라 불균형하게 미친다는 점임. 특히 저소득층, 어린이 및 노년층, 유색인종 등의 커뮤니티에서 높은 기후변화 취약성이 나타나고 있으며, 공평하고 공정한 미래 기후변화 적응을 위하여 가장 취약성 계층 및 집단을 우선적으로 보호하는 목표를 제시하고 있음. 이와 같은 미국의 기후변화 적응 목표는 종사인구의 고령화 및 자연의존적인 산업으로 기후변화 취약성이 높은 우리나라 수산업의 우선 순위 고려에 참고해야 할 것으로 판단됨.

1-2. 국내 기후변화 과학 및 정책 이슈

1-2-1. 국내 각 부처의 기후변화 대응 과학 및 정책 이슈

- ☑ 해양수산부에서는 2022년 9월 “제4차 기후변화 대응 해양수산부문 종합계획(2022~2026)”을 발표하였음. 4차 계획의 비전은 해양수산 탄소중립 대전환과 기후위기 대비태세 완비로 온실가스 저감 및 재난·재해 대응에 중점이 맞추어져 있음(그림 1-3). 추진전략은 크게 ①온실가스 배출 저감, ②온실가스 흡수 및 전환, ③기후위기 선제적 대응, ④기후위기 대응 이행력 확보로 4가지 전략으로 구성되어 있음(해양수산부, 2022).
- ☑ 기후위기 선제적 대응 전략의 세부 전략으로 “수산업의 기후위기 대응체계 공고화”가 수립되어 기후위기 영향 분석 및 대응체계 연계, 수산업 기후위기 적응 기술 개발, 기후위기 사회 적응을 위한 수산업 지원 등의 추진 목표가 설정됨.
- ☑ 또한 기후위기 대응 이행력 확보의 세부 전략으로 “데이터 기반의 해양 기후변화 관측·예측”이 포함되어 해양 기후변화 연근해 관측체계 강화, 한반도 연근해 해양기후변화 증장기 시나리오 생산 등의 추진 목표가 설정됨.
- ☑ 환경부에서는 제3차 국가 기후변화 적응대책(2021~2025)에서 가증되는 이상기후에 대응하는 재난·재해 대응 태세 강화 및 변화하는 기후환경 적응을 목표로 “제3차 국가 기후위기 강화대책(2023~2025)”을 수립하기 위하여 2022년 하반기부터 전략을 수립하여, 2023년 6월 발표하였음.
- ☑ 제3차 국가 기후위기 강화대책에서는 이상기후의 빈도와 강도 증가에 따른 수산업의 생산환경 기반 및 생산성 영향과 글로벌한 기후 위기를 포괄한 새로운 기후위기 리스크가 추가되며, 이를 기반으로 한 새로운 세부 추진계획이 수립될 계획임.
- ☑ 탄소중립녹색성장위원회에서는 2023년 4월 “제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획”을 수립하고 발표함. 본 계획은 탄소중립·녹색성장 관련 최상위 법적 계획으로 2050 탄소중립 사회로의 이행이라는 국가 비전 실현을 위한 국가전략과 2030 온실가스 감축목표 설정, 이를 실행하기 위한 감축정책 및 이행기반 강화 정책을 제시하고 있음(그림 1-3)(탄녹위, 2023). 본 계획에서는 2050 탄소중립과 2030 온실가스 감축 목표 달성을 위한 10대 부문, 37개 정책과제가 제시되었고, 수산 부문에서는 LPG·하이브리드 어선¹⁾ 개발, 양식·수산가공업 저탄소·스마트화를 통한 전환 추진이 주요 사업 지표로 제시됨.
- ☑ 환경부 국립환경연구원 주관으로 탄소중립기본법 제37조에 의거 기후변화 각 부문별 대표 조사·연구 기관을 대상으로 2022년 9월 “기후위기 적응연구 협의체”가 구성되었으며, 협의체는 국립수산물과학원을 비롯한 국립환경·기상·농업·산림과학원, 수자원·농어촌공사, 국립생태원, 보건사회연구원, 해양조사원 등 총 10개 기관이 참여하였음(환경부, 2022).
- ☑ 기후위기 적응연구 협의체는 기후변화 적응연구 과학기반 강화, 분류체계 및 통합지표 개발, 영향·취약성 평가도구 개선, 분야 간 상호작용·영향평가 연구 및 공동연구·적응대책 지원 협력을 위하여 정례적 협의를 추진할 계획이며, “국가 기후위기 적응정보 종합 플랫폼”의 구축을 통한 유관기관 간 교류 및 정보공유 확대를 목표로 하고 있음.

1) 하이브리드 어선 : 온실가스 배출 저감 등에 대응한 저탄소·무탄소 어선 도입을 목적으로 한 전기복합에너지 동력의 어선

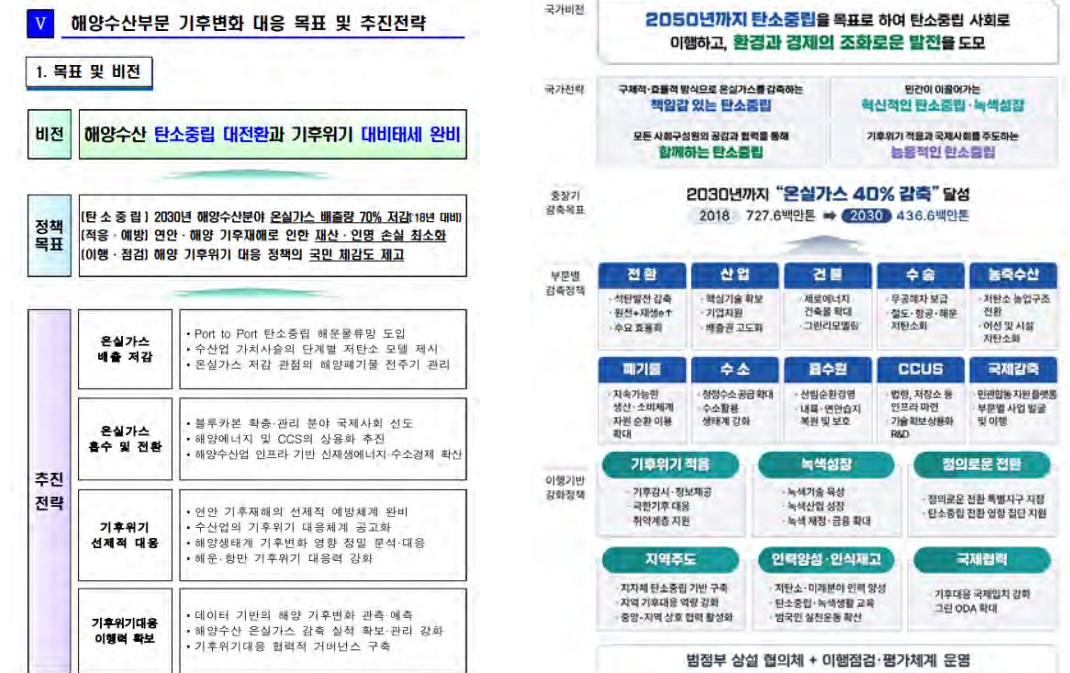


그림 1-3. 해양수산부 제4차 해양수산부문 기후변화 대응 종합계획(2022~2026)(좌) 및 탄녹위 제1차 탄소중립·녹색성장 기본계획(2023~2042)의 목표 및 비전. [출처 : 해양수산부(2022), 탄녹위(2023)]

- ☑ 해양수산부에서는 2023년 4월 해양생태계 기후변화 지표종 23종을 지정하여 고시하였음. 해양생태계 기후변화 지표종은 수온 상승으로 인한 서식 및 분포 범위, 번식활동 시기 변화, 개체군 변화가 뚜렷하며, 지속적 관찰이 가능한 종으로 선정되었으며, 해양어류는 연어 등 5종, 무척추동물은 검은큰따개비 등 13종, 해조류는 옥덩굴 등 5종이 지정되었음.
- ☑ 해양수산부에서는 2023년 1월과 3월 국회에서 해양기후변화 대응을 위한 정책 토론회를 개최하였으며, 향후 해양수산부 관련 기관 및 대학 등이 참여하는 “해양기후 포럼”으로 확대·발전해 나갈 계획임.

1-2-2. 수산분야 온실가스 배출량 산정

- ☑ 국립수산물과학원에서 수행한 우리나라 수산 분야의 2022년 기준 온실가스 직접배출²⁾ 추정량은 279만 tonCO₂eq(2020년 기준 국가 온실가스 배출량 : 6억5622만tonCO₂eq)로 국가 온실가스 배출량 대비 약 0.4% 수준임. 어선어업의 온실가스 배출원은 IPCC 분류에 따르면 직접 영역 중 이동 연소 배출로 가정하고 선박 종류, 연료 종류 및 엔진 종류에 따라 산정하고 있음.
- ☑ 2005년부터 2020년까지 우리나라 연근해어업의 온실가스 배출량은 231만tonCO₂eq에서 300만 tonCO₂eq 수준을 보이고 있으며, 2012년 저점 대비 20% 상승하였음.

2) 국가 온실가스 인벤토리 : 2019년 284.8만톤, 2020년 300만톤(공식통계)

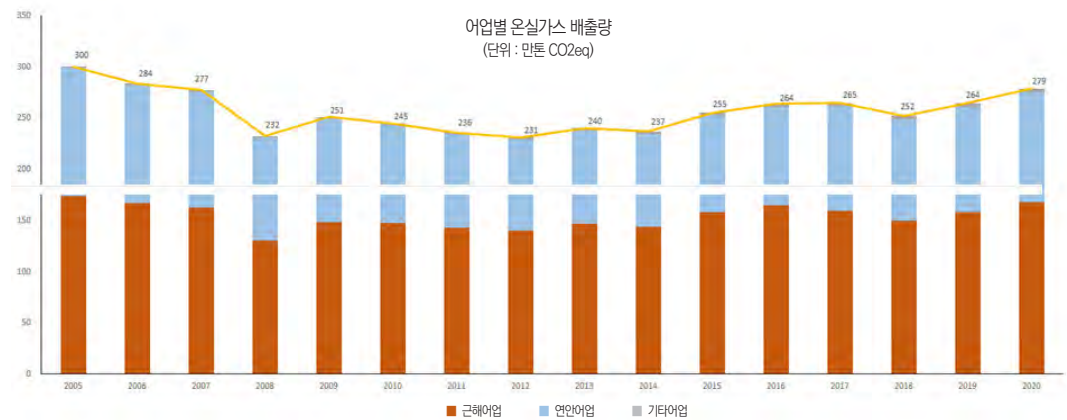


그림 1-4. 지난 16년간(2005~2020) 우리나라 연근해어업 온실가스 배출량 변동 추이.

- ④ 어선의 업종별 연료유 사용에 따른 온실가스 배출량 모니터링 시스템 구축을 위한 우선순위의 선정은 적당 온실가스 배출량, 적당 마력수 및 적당 톤수 변화의 3가지 요인으로 결정됨.
- ④ 전체 연근해어업에 있어서 온실가스 배출량 모니터링 우선순위는, 근해어업이 연안 및 구획어업과 비교해 그 필요성이 높은 것으로 나타났으며, 근해어업은 대형트롤, 대형선망, 근해통발 순으로 나타남. 유류 소모량 기준으로 2018년과 비교한 적당 온실가스 배출량 증가량은 근해업종에서는 근해통발(38%), 소형선망(37%), 대형트롤(31%)의 순으로 나타났고, 연안업종에서는 연안복합(10%), 연안자망(8%), 연안통발(2%) 순으로 온실가스 배출량 증가가 큰 것으로 나타남. 연료유 사용량 증가의 이유는 기후변화로 어장 변동이 심화함에 따라 항해 거리도 증가한 것이 하나의 원인으로 유추됨.
- ④ 수산업 분야의 온실가스 저감 방안에서 어선의 주기관과 발전기가 소모하는 연료량을 줄이기 위하여 친환경 엔진으로의 전환이 필요함. 수산업에서 온실가스 감축 수단은 어업 효율화, 고효율 장비 보급 및 온실가스 흡수원으로 구분할 수 있음.
- ④ 어업 효율화 부문에서는 어선 노후 기관 교체, 노후 어선 대체 건조 및 LNG, 전기, 수소연료 전지 및 하이브리드 어선으로의 전환 등이 포함됨. 또한 어선어업 분야의 온실가스 저감을 위한 장기적인 방안으로는 재생에너지 기술의 개발과 태양광 활용 및 연료 전지 보급 등이 있음.
- ④ 고효율 장비 보급 부문은 양식어업에 중점을 두고 현재 지자체별로 진행하고 있는 양식장에서 필요한 에너지의 효율화를 추구하는 친환경 전환 지원사업(히트펌프, 인버터 보급)을 시행하고 있음. 히트펌프 보급사업은 유류 보일러를 대체하여 해수나 양식장 배출수에서 열을 흡수하여 온수를 생산하는 것임. 수산 가공품 생산에 드는 에너지를 줄이기 위해 김 건조기 등에 대한 친환경 전환 지원사업도 이루어지고 있음.
- ④ 온실가스 흡수원은 바다숲으로 불리는 해중림과 갯벌이나 해조류 등 연안에 서식하는 식물 등 해양생태계가 흡수하는 탄소를 의미하는 블루카본(blue carbon)이 있으며, 이 분야에도 지속적인 투자를 하고 있으며, 기후변화 정보 서비스 분야로 어장의 어업기상과 재해 조기경보 체계 구축, 어업생산 정보 제공도 함께 수행하고 있음.

1-2-3. 해양기후변화 영향평가 제도 도입에 관한 고찰

- ④ 최근 다양하고 대규모화된 개발사업은 지구 환경의 지속가능성을 훼손하여 미래 세대가 우리와 같거나 더 나은 지구의 생태 서비스를 못 받을 가능성이 높으므로 해역이용영향평가 또는 환경영향평가와 같은 정책 수단을 통해 잠재적·실제적인 환경에 대한 악영향을 억제·완화하여 지속가능한 이용·개발을 실현해야 함.
- ④ 해양 이용·개발 사업에 대한 평가는 환경부의 환경영향평가제도와 별도로, 사업으로 인한 해양 환경과 생태계의 피해를 최소화하기 위하여 해양환경관리법에 근거하여 평가 제도를 운영하고 있음.
- ④ 특히 해상풍력 발전사업은 기존의 해양수산업과 항행 목적의 일시적·간헐적 해역이용과는 달리 반영구적인 신재생에너지 개발사업으로 풍력터빈과 구조물, 송전선으로 구성된 전력 생산·송전 시스템으로 공유수면 점사용 기간 종료 이후에도 사업 갱신을 통해 계속하여 발전단지의 운영이 가능함.
- ④ 그러나 최근 우리보다 먼저 해상풍력 발전사업을 시작한 영국 주변 해역에서 해상풍력 발전단지가 늘어 나면 바람이 약해지고 대기의 다른 조건이 변하여 해양 표층기후와 생태계에 영향을 미칠 수 있다는 연구 결과(Akhtar et al., 2022)와 대륙붕의 계절적 성층 해역에서 해상풍력 발전단지의 구조물이 인공적인 수직 혼합을 유발하여 1차 생산력과 생지화학적 순환 등에 부정적인 영향을 미칠 수 있다고 보고한 연구 결과(Dorrell et al., 2022)가 있음.
- ④ 또한 IPCC(2019)에 따르면 2017년에 황해와 동해에서 표면 수온이 평균보다 2~7℃ 높은 극한 수온 현상이 있었다고 보고함. 향후 우리나라 주변 해역에서 계획하고 있는 해상풍력 발전단지 건설 사업이 해양 환경과 생태계에 장기적으로 미치는 영향에 대한 예측·진단하는 해양기후변화 영향평가 제도가 필요하다고 판단되며, 시행 방안으로 크게 두 가지 방법을 생각해 볼 수 있음.
- ④ 첫 번째로 해양기후변화 대응을 위해 법령을 제정하고 하위 법령에 대상 사업과 절차 등을 담는 것이고, 두 번째는 현재 시행하고 있는 영향평가 제도를 확장하는 것으로 평가 내용은 해양기후변화 현황조사, 해양기후변화 영향의 예측·분석 및 평가, 적응방안 수립 등을 포함하여야 함.
- ④ 우선 해상풍력 발전단지 건설 사업과 같이 해양기후에 영향을 줄 수 있는 분야의 계획과 사업을 해양기후 변화 영향평가 제도 대상 사업으로 할 수 있으나 온실가스를 다량 배출하는 사업 등 대상 사업을 더 발굴함과 동시에 해양기후변화 영향을 평가하는 방법론에 대한 충분한 연구를 수행이 필요함.
- ④ 환경부는 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 제23조(기후변화영향평가)에 근거하여 이미 기후위기 대응을 위한 제도적 수단 중 하나로 기후변화영향평가를 2022년 9월 22일에 시행하여 주요 계획과 대규모 개발사업에 대해 기후변화에 따른 영향을 사전에 평가하고 있음.
- ④ 바다와 같은 공유지의 유한한 공유 자원은 공동의 강제적 규칙이 없다면 많은 이들의 무임승차 때문에 결국 파괴된다는 ‘공유지의 비극(Tragedy of the Commons) 이론’에 따르면 단기적이고 단편적인 해역이용 평가 제도 외에도 장기적이고 누적적인 측면에서 해양기후변화 영향평가 제도의 필요성이 요구됨.



ACT Fish 2023



2장

기후변화의 해양환경 및 생태계 영향

Annual report for Climate change Trends in Fisheries, 2023

2-1. 해양환경 및 생태계

2-2. 수산자원

2-3. 양식분야

제 2장

기후변화의 해양환경 및 생태계 영향

2-1. 해양환경 및 생태계

2-1-1. 해양환경 및 생태계 기후변화 영향

- ☉ 국립수산물과학원 정선해양조사 관측결과를 기반으로 살펴본 최근 55년간(1968~2022) 한국 해역의 연평균 표층수온 상승률은 $0.025^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ 로 약 1.36°C 상승한 반면, 같은 기간 전 지구 평균 표층수온 상승률은 $0.0094^{\circ}\text{C}/\text{yr}$ 로 0.52°C 상승하여, 한국 연근해의 연평균 표층수온 상승률이 전 지구 평균에 비해 약 2.5배 이상 높았음(그림 2-1).
- ☉ 해역별 표층수온은 동해 1.82°C , 서해 1.19°C , 남해 1.07°C 상승하여, 표층수온 상승률은 동해가 가장 높았고, 남해가 가장 낮았음. 동해에서 상대적으로 높은 표층수온 상승률이 나타난 원인은 동해 중부해역과 동해 남부해역 사이에 존재하는 수온 극전선이 점점 북상한 영향과 동해역에 열을 수송하고 있는 대마난류의 세기가 1980년대 이후 강해진 점 등이 반영된 것으로 판단됨.

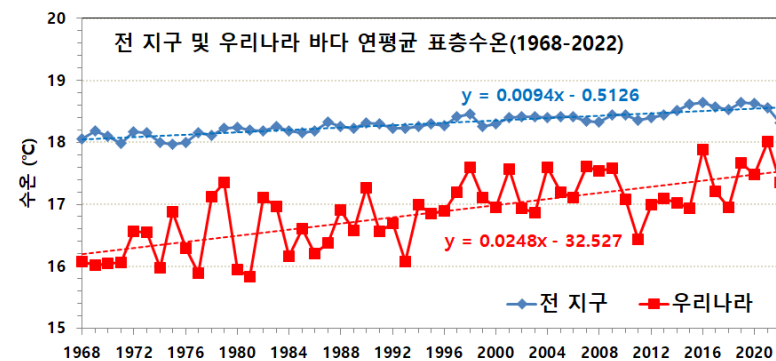


그림 2-1. 최근 55년간(1968~2022) 전 지구 및 한국 해역의 연평균 표층수온 장기 변동 경향.

- ☉ 동해 중층(100m) 수온은 55년간 1.13°C 감소하였고 저층(500m) 수온은 55년간 0.07°C 증가하였음(그림 2-2). 중층 수온의 감소는 동아시아 몬순³⁾의 장기적 약화 경향에 따른 연직혼합 약화와 대마난류 세력 강화에 따른 표층의 해류에 의해 공급되는 열의 증가 등이 원인으로 판단됨.

3) 몬순 : 여름과 겨울에 대륙과 해양의 온도차로 인해서 풍향이 바뀌는 현상으로 계절풍이라고도 함.

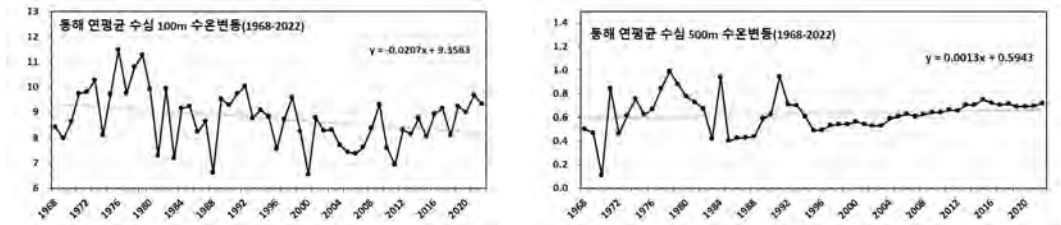


그림 2-2. 최근 55년간(1968~2022) 동해 연평균 중·저층 수온(100m, 500m) 장기변동 경향.

- ☉ 동해에서의 성층 강화 경향을 살펴보기 위하여 표층과 중층(100m 수층)의 수온차를 최근 55년간 장기 변동 경향을 살펴본 결과, 두 층 사이의 수온차는 매년 0.05°C 증가하는 경향을 보여 동해역의 표층 주변의 성층은 점점 강화되고 있음을 시사하고 있음(그림 2-3).



그림 2-3. 최근 55년간(1968~2022) 동해의 표층과 100m 수층의 온도차 장기변동 경향.

- ☉ 최근 55년간(1968~2022) 한국 해역의 연평균 표층염분은 $-0.0055/\text{yr}$ 로 약 0.30 감소한 반면, 태평양 전체해역 연평균 표층염분 변화율은 $-0.0009/\text{yr}$ (Durack & Wijffels, 2010)로 같은 기간으로 환산하면 0.05 감소를 나타내어, 한국 연근해의 연평균 표층염분 감소율이 태평양 전체 평균에 비해 약 6.5배 높음(그림 2-4).
- ☉ 같은 기간 동안 동해 0.17 ($-0.0031/\text{yr}$), 서해 0.42 ($-0.0077/\text{yr}$), 남해 0.34 ($-0.0061/\text{yr}$) 감소하여, 표층염분 감소율은 서해가 가장 높고 동해가 가장 낮았음. 이는 양자강 유출수 등 중국대륙 하천수의 영향을 많이 받는 서해, 남해에서 높은 감소율을 보이는 것으로 판단됨.

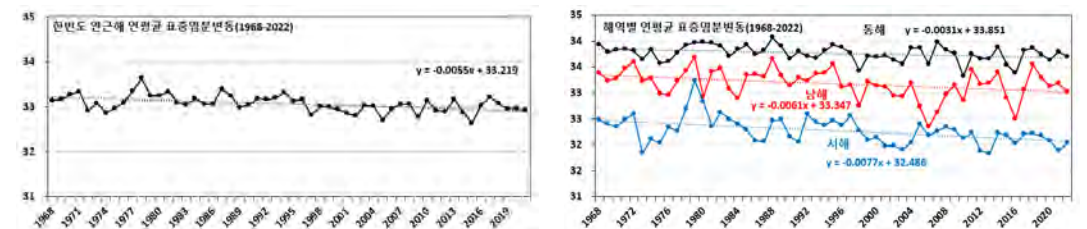


그림 2-4. 최근 55년간(1968~2022) 한국 전 해역(좌) 및 해역별(우) 연평균 표층염분 장기 변동 경향.

- ☉ 최근 32년간(1991~2022) 우리나라 해역의 연평균 표층 용존산소 농도는 5.66mL/L였고, 동해, 서해, 남해는 각각 5.48mL/L, 6.13mL/L, 5.50mL/L로 서해가 가장 높았음. 서해는 장기적으로 다른 해역에 비해 표층 용존산소가 다소 상승하는 경향을 보였으나, 동해와 남해는 뚜렷한 경향을 보이지 않았음(그림 2-5).
- ☉ 해역별로 동해 500 m, 서해 50 m, 남해 75 m 수심을 기준으로 저층 용존산소 농도를 비교한 결과, 동해는 감소 경향이 뚜렷하였으며($R^2=0.46$), 서해와 남해는 경향성을 보이지 않았음(그림 2-6). 저층 용존산소는 표층보다 동해는 0.21mL/L, 서해는 0.31mL/L, 남해는 0.72mL/L 각각 낮았음.

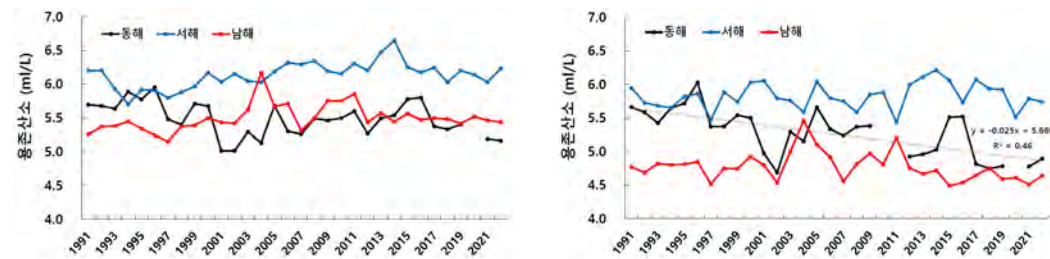


그림 2-5. 최근 32년간(1991~2022) 우리나라 해역별(동, 서, 남해) 연평균 용존산소 농도 장기 변동 경향
(좌 : 표층, 우 : 동해 500 m, 서해 50 m, 남해 75 m).

- ☉ 최근 32년간(1991~2022) 우리나라 연근해 표층에서 해역별 영양염류의 장기 변동을 살펴보았으며, 전 해역의 32년 평균은 인산염 $0.29 \pm 0.06 \mu\text{M}$, 질산염 $4.01 \pm 1.58 \mu\text{M}$, 규산염 $6.33 \pm 1.02 \mu\text{M}$ 의 범위를 보였음(그림 2-6).
- ☉ 표층 인산염의 장기변동 경향은 동해와 남해가 약하게 감소하는 경향을 보였으며, 2022년은 평년(1991~2020) 평균보다 전 해역에서 약 $0.06 \mu\text{M}$ 낮았음.

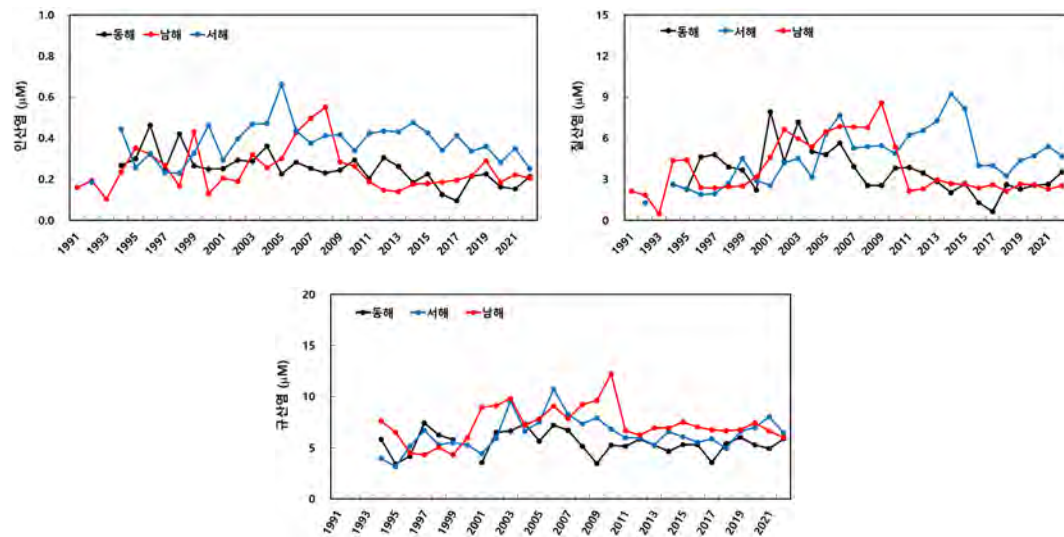


그림 2-6. 최근 32년간(1991~2022) 우리나라 연근해의 해역별 표층 인산염, 질산염 및 규산염의 연평균 변동 경향.

- ☉ 표층 질산염의 장기변동 경향은 동해와 남해는 약하게 감소하는 경향을 보이고 서해는 다소 증가하는 경향을 보였으며, 2022년은 평년(1991~2020)보다 전 해역에서 약 $0.4 \mu\text{M}$ 낮았음.
- ☉ 표층 규산염의 장기변동 경향은 전 해역에서 뚜렷한 변동 경향을 보이지 않았으며, 2022년은 평년(1991~2020)보다 전 해역에서 약 $0.3 \mu\text{M}$ 낮았음.
- ☉ 2012년 이후 우리나라 연근해 Chlorophyll-a 농도는 지속적으로 감소하는 경향을 보임. 특히 2017년 이후 대부분의 해역에서 감소 추세를 나타내고 있으며 2022년에 최소를 보임. 공간적으로는 우리나라 남해 연안 해역 일부를 제외한 대부분 해역에서 감소하였으며, 특히 남해 동부, 동해 북부 해역에서 뚜렷한 감소 경향을 보임(그림 2-7).

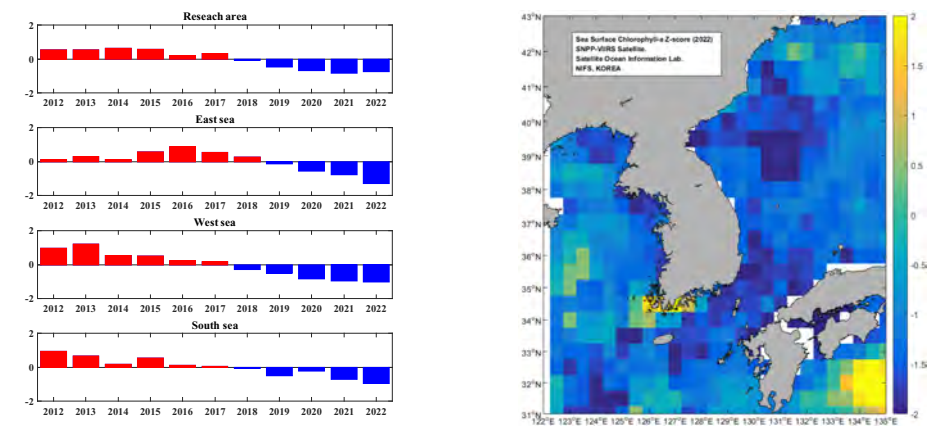


그림 2-7. 위성 관측자료를 활용한 최근 우리나라 주변 해역의 Chlorophyll-a (2012~2022) 시·공간 변동.

- ☉ 2018년부터 2022년까지 우리나라 연근해의 기초생산력은 $120 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 이며, 해역별 평균 연 기초생산력은 서해 $139 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, 남해 $124 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, 동해 $150 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, 동중국해 $70 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 로 동해에서 가장 높음(그림 2-8).

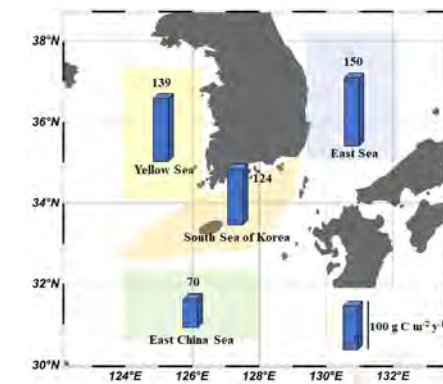


그림 2-8. 최근 5년간(2018~2022) 국립수산물자원원에서 관측한 해역별 평균 연 기초생산력.

- ☉ 과거 관측(1980~2010년대) 결과, 서해 $192 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, 남해 $311 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, 동해 $241 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, 동중국해 $174 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 로 현재의 최근 5년간 결과보다 약 50~190 $\text{g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$
- ☉ 장기적인 기초생산력 감소의 주요 원인은 표층 수온의 상승에 따른 해양 내 성층 강화로 표층-심층 간의 순환이 약화됨에 따라 심층으로부터 유광층으로의 영양염류 유입 감소가 주요 원인으로 생각되며, 이와 함께 주요 우점종의 크기도 감소된 것으로 판단됨.
- ☉ 노무라입깃해파리는 출현율의 증가와 감소를 반복하는 경향이 있으나 2019년 이후 대량출현하여 남해·동해안에 특보가 발령되고 있음. 보름달물해파리는 2016년 이후 감소하고 있으나, 일부 해역(전남, 경남)에서 국지적으로 대량 출현하는 경향이 나타남(그림 2-9).

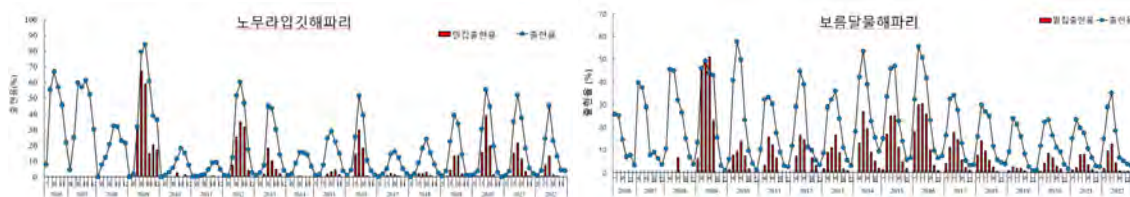


그림 2-9. 최근 17년간(2006~2022) 노무라입깃해파리(좌), 보름달물해파리(우) 출현율 경향.

- ☉ 한국 연근해에 출현하는 주요 독성해파리는 11종으로, 2022년은 총 7종의 독성해파리 출현이(2021년 10종) 있었음. 출현종 감소의 원인은 해파리가 주로 출현하는 시기인 7월(남해연안), 8월(동해남부)에 냉수대 형성으로 인해 연안으로 유입되기 어려운 물리적 환경적 요인으로 추정함. 2022년 기후변화 등에 따른 외래종 유입과 확산에 따른 현황 파악을 위한 조사에서 4종의 히드로충강에 속하는 미기록종의 해파리가 확인되었음. 새로운 종의 지속적인 증가와 미래 생태계 위협요인 및 기후변화와 관련 여부 파악을 위한 지속적 모니터링이 필요할 것으로 보임(그림 2-10).

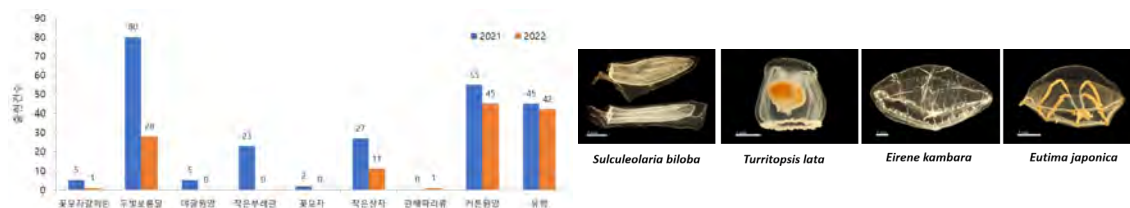


그림 2-10. 독성해파리 출현건수(좌) 및 국내 미기록 해파리4종(우).

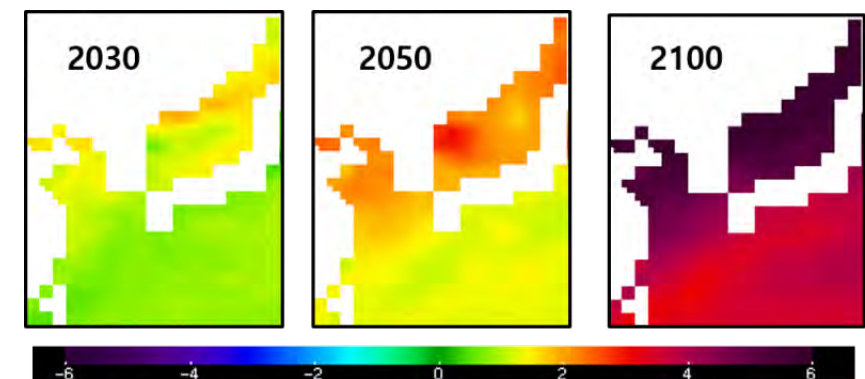
- ☉ 최근 해파리 출현율 증가는 다양한 기후변화 지표와 관련이 있음(Purcell, 2005). 일부 종은 비정상적으로 따뜻하고 염분이 높은 엘니뇨 조건에서 멸종하기도 하는데, 이는 기후변화는 복잡한 생태계에 영향을 미치기 때문. 해양온난화는 해파리 분포를 확장시키고 계절적 발생을 확대해 온대 아한대 종을 증가시킬 수 있음

(Purcell, 2005). IPCC(2019)에서는 해양온난화의 영향으로 해파리와 같은 외래 침입종의 증가가 해양 관광 및 수산업에 악영향을 미칠 것으로 전망하고 있음.

- ☉ 2022년 우리나라에서 적조는 주로 남해안에서 관찰됨. 수산물에 직접 영향을 주지 않는 무해성 적조발생은 8건 보고되었고, 시기별 원인종으로는 5월에 섬모충류 *Mesodinium rubrum*과 야광충 *Noctiluca scintillans*, 6월에 침편모조류 *Heterosigma akashiwo*, 와편모조류 *Akashiwo sanguinea* 이었음. 5월 야광충에 의한 적조발생 이외에는 남해안 해역에서만 적조가 관찰되었음.
- ☉ 유해생물인 코클로디니움 *Cochlodinium polykrikoides*의 적조발생은 전남 완도군~경남 통영시(8.26.~9.30.)에서 나타났으나, 수산 피해는 발생하지 않았음. 2022년도 적조발생은 태풍의 직접영향을 받은 시기에도 큰 변화가 없이 지속되어, 과거 태풍 발생 이후 적조발생이 약화되거나 소멸되는 특성과는 다른 특징을 보였음. 특히 11호 태풍 “힌남노”는 9월 5~6일에 걸쳐 남해안에 영향을 주었으나, 강한 동풍 계열의 바람이 지속된 특징으로 인해 고흥, 여수에서 발생한 적조가 완도해역으로 확산되는 영향을 주었음.

2-1-2. 해양환경 및 생태계 기후변화 전망

- ☉ IPCC AR6에 사용된 공통사회경제경로(Shared Socio-economic Pathway, SSP) 시나리오 기반 6차 결합모델 상호비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP6)의 18개 기후모델에 대한 재분석 자료를 통한 평균 자료를 분석함. 과거 30년간(1981~2010) 기후모델들의 기후값과 비교하여 10년 평균한 SSP 5-8.5 시나리오의 표층수온은 2021~2030년에 1°C 내외, 2041~2050년에 2°C 내외, 2091~2100년에 5°C 내외 수온이 상승하는 것으로 나타나 기존 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP) 8.5 시나리오와 유사한 결과로 분석됨(그림 2-11).

그림 2-11. SSP 5-8.5 시나리오 기반의 우리나라 주변 2030년(좌), 2050년(중) 및 2100년(우)의 연평균 표층수온 편차 예측 분포(단위 : $^{\circ}\text{C}$).

- ◎ 기존 개발된 RCP 8.5 시나리오 기반의 미래 해양수온 전망 자료를 기반으로 미래 수산물 안전에 대한 영향 전망 실험을 수행함. 시구아테라 독⁴⁾은 대표적인 수산물 섭취와 관련된 식중독으로 주로 열대와 아열대 해역의 산호초 해역에서 발견되나, 최근 기후변화의 영향으로 우리나라 제주 해역에서도 시구아테라 원인 플랑크톤이 발견되고 있으며, 향후 수온상승에 따라 출현이 늘어날 것으로 예상되고 있음.
- ◎ RCP 8.5 미래 수온자료 중 연안역 저층에 해당하는 10m 수층의 수온자료를 이용하여 우리나라 주변해역에서 주로 발견되고 있는 유독성 *Gambierdiscus australes*의 서식 수온 범위로 알려진 19.1~32.4℃ 범위에 들어오는 연중 일수를 계산하여 시공간 분포를 살펴봄(그림 2-12).
- ◎ 시구아테라 원인 플랑크톤의 서식 수온 범위에 들어오는 일수는 제주 해역이 가장 높았고, 2100년까지 제주 해역의 일수가 지속적으로 늘어날 뿐만 아니라 우리나라 전 연안이 현재 제주 해역 수준을 초과하는 수준까지 늘어날 수 있음을 확인함. 또한, 2100년까지 동해, 남해, 제주 연안에서 해당 수온 범위에 들어오는 일수가 현재 보다 100일 내외 증가하는 것으로 나타남. 이에 따라 미래 수온 상승으로 우리나라 바다 수산물도 시구아테라로 인한 식중독으로부터 자유로울 수 없게 됨을 확인함.
- ◎ 시구아테라 식중독 발생 대응을 위해 2016년 일본 중앙수산연구소와의 공동연구를 통해 시구아톡신 정밀 분석법을 확립하였으며, 2020년에는 시구아톡신 표준독소(CTX-B1)를 활용하여 제주 연안 아열대성 어류 14종에 대한 모니터링을 실시한 결과 모든 시료에서 시구아톡신은 검출되지 않았음. 근년, 우리나라 연안에서도 시구아테라 원인 플랑크톤(*Gambierdiscus australes*)의 발생 가능성이 높아짐에 따라, 다양한 시구아톡신 표준독소 구득 및 연안산 어류에 대한 지속적인 모니터링을 통한 선제적 대응이 필요함.
- ◎ 미래 우리나라 해변에서의 해수욕 가능 기간 변화를 예측하기 위하여 RCP 8.5 시나리오 기반의 미래 수온 예측 자료를 적용하여, 일 년 중 수온이 20℃ 이상 기간을 해수욕 가능 시기로 설정하여 시·공간적으로 계산한 결과, 2050년까지 5~30일 이내, 2100년까지 30~60일 이상 해수욕 가능 시기가 늘어날 것으로 전망됨.

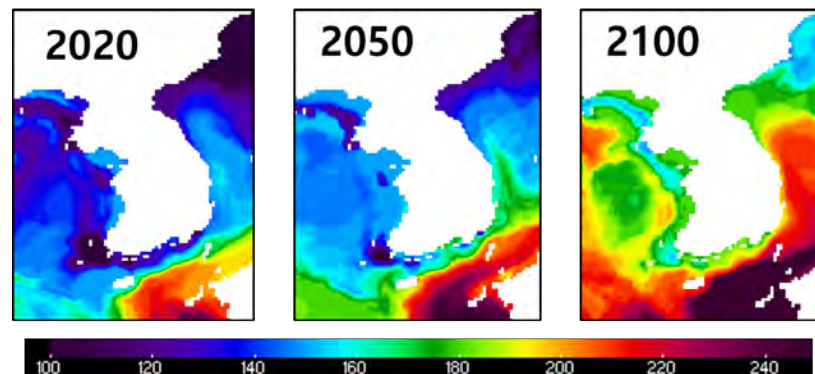


그림 2-12. RCP 8.5 시나리오 기반의 우리나라 주변 2020년(좌), 2050년(중) 및 2100년(우)의 수심 10m 수온을 기준으로 시구아테라 독 플랑크톤(*Gambierdiscus australes*)의 서식 가능 수온범위 일수 (단위 : 일수).

4) 시구아테라 독 : 열대 혹은 아열대지방의 어류에 포함된 독을 사람이 섭취했을 때 생기는 식중독으로 주로 독성 와편모조류에 의해 발생함.

- ◎ 해역별(동, 서, 남해 및 제주) 해수욕장 이용객이 가장 많은 4곳의 해수욕장을 대상으로 해수욕 가능 일수 증가를 살펴보면, 2050년까지 강릉 경포는 12일, 보령 대천은 6일, 부산 해운대는 21일, 제주 함덕은 9일 각각 증가하였음. 2100년까지 강릉 경포는 45일, 보령 대천 33일, 부산 해운대 51일, 제주 함덕 48일이 각각 증가하는 것으로 산출되어 향후 해양 레저 등의 기회 요소는 확대될 것으로 전망됨(그림 2-13).

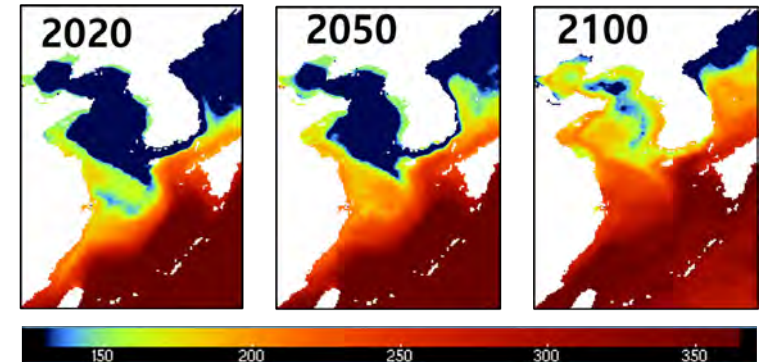


그림 2-13. RCP 8.5 시나리오 기반의 우리나라 주변 2020년(좌), 2050년(중) 및 2100년(우)의 해수욕 가능 시기 (수온 20℃ 이상 기준)에 대한 예측 일수 (단위 : 일수).

2-1-3. 해양환경 및 생태계 기후변화 적응 연구

- ◎ 우리나라 해역의 해양산성화 정도 파악을 위하여 국립수산물과학원에서는 국내에서 처음으로 장기 해양산성화 모니터링을 추진하고 있음. 2015년부터 포항공대와 함께 매년 3~4회 우리나라 전 해역의 표층에서 심층까지 수소이온농도, 이산화탄소분압 등 해양산성화 5개 요소에 대하여 연간 83개 정점에 대한 시료 채취와 분석을 수행 중에 있음.
- ◎ 최근 8년간(2015~2022) 우리나라 해역 표층의 pH는 매 10년 단위로 0.019 정도 감소하는 경향을 보여 전 지구 대양 표층의 해양산성화 경향(매 10년 단위 0.017~0.027 감소) 및 일본 연근해의 해양산성화 경향(매 10년 단위 0.016~0.023 감소)과 유사한 수준을 보임(IPCC, 2019; JMA 2022) (그림 2-14).
- ◎ 우리나라 해역의 해양산성화 변동 특성은 전 세계 대양 및 일본 연근해에 비하여 계절 변동성이 크게 나타나고 있는데, 이는 최근 여름철 고수온 및 겨울철 저수온의 잦은 발생과 같은 이상기후에 따른 우리나라 해역의 물리적 변동성이 큰 영향으로 분석됨.
- ◎ 국립수산물과학원은 해양산성화에 따른 수산생물의 영향을 파악하기 위하여 2022년부터 5년 계획으로 연구를 수행 중에 있음. 패류의 성장발달 및 양식생산에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실내 배양시설을 구축하여 온도 및 pH 조건에 따른 참가리비, 비단가리비 치패를 대상으로 대한 온난화 및 산성화 영향을 실험한 결과 참가리비는 pH가 낮고 수온이 높을수록 생존율이 낮았고, 비단가리비는 pH가 낮을수록 생존율이 낮았으나, 온도 조건에는 뚜렷한 차이가 없었음.

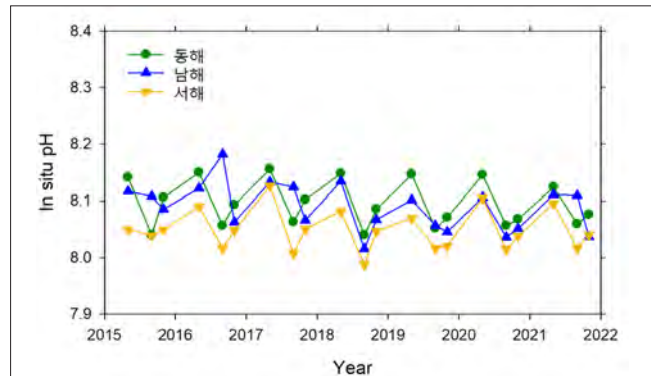


그림 2-14. 2015~2022년까지 우리나라 각 해역별 표층 pH 변동 경향. [출처 : 국립수산물연구원]

- ◎ 갑각류의 성장발달과 생체특성에 미치는 해양산성화 영향을 평가하기 위하여 경북도 후포 해역에서 채집한 대게 치계를 대상으로 해양산성화 환경에 노출한 결과, 성장률, 생존률, 산소소모율은 pH가 낮을수록 대체적으로 낮게 나타남.
- ◎ IPCC(2019)에서는 해양에서의 극한 현상으로 미래 열대성 저기압(태풍)의 빈도와 강도가 강해질 것으로 전망하고 있음. 우리나라 해역의 태풍 유입에 따른 연근해 생태계 변동 파악을 위하여 2022년 9월 제11호 태풍 힌남노가 한반도를 통과함 따른 동해남부 해역(근해역)과 여수 연안(연안역)의 생태계 변화 경향을 살펴봄.
- ◎ 동해남부 해역에서는 영양염 공급 확대로 식물플랑크톤의 종이 남조류에서 규조류로 변화하였으며, 현존량도 약 21.6% 증가하였고, 일차생산력이 일시적으로 증가($15.0 \rightarrow 33.6 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)함을 확인함. 여수 연안역에서는 태풍 통과 후 10일 후까지 영양염이 증가하고, $20\mu\text{m}$ 이상의 큰 식물플랑크톤의 비중이 높아졌으며 담수 유입량 증가로 인하여 연안역에서 용존유기탄소 등의 급격히 증가가 발생하는 것을 확인함.
- ◎ 국립수산물연구원 고래연구센터는 한반도 주변 고래류의 분포와 풍도를 파악하기 위해 바다에서 정해진 라인을 따라 항해하면서 고래를 관찰하는 목시조사를 수행하고 있으며, 지난 18년간(2003~2020) 동해안에서 봄철(5월)에 국립수산물연구원의 시험조사선 탐구3호를 이용한 목시조사를 총 10회 수행하였음. 조사해역의 표층수온을 파악하기 위해 NASA Aqua위성의 Moderate Resolution Imaging Spectrometer(MODIS)의 표층수온 데이터를 수집 이용하였음.
- ◎ 동해안에서 대부분의 밍크고래는 연안용승⁵⁾에 의해 기초생산력이 높은 $36\sim38.5^\circ\text{N}$ 해역에서 관찰됨. 하지만, 수온 11°C 의 연안용승이 크게 발달했던 2006년에는 연안용승 해역에서 밍크고래는 관찰되지 않음. 또한, 17°C 이상의 고온수가 동해 남서부 해역을 넓게 차지했던 2016년과 2020년에 밍크고래는 동해 연안역에서 관찰되지 않았고 수심 1,000 m를 넘는 근해에서 발견됨(그림 2-15).
- ◎ 기후변화에 따른 여름철 동아시아 몬순의 약화로 인한 냉수대 발생 경향 변화 및 춘계 우리나라 주변 해역의 수온 상승과 관련된 기초생산력 감소로 인한 먹이생물의 감소 등과 동해안 고래 출현 빈도의 상관성에 대한 연구를 지속적으로 추진할 계획임.

5) 연안용승 : 연안에서 바람에 의해 수심이 깊은 곳에 있던 물이 표층으로 올라오는 현상, 표층에 영양염을 공급하고 수온을 낮추는 효과

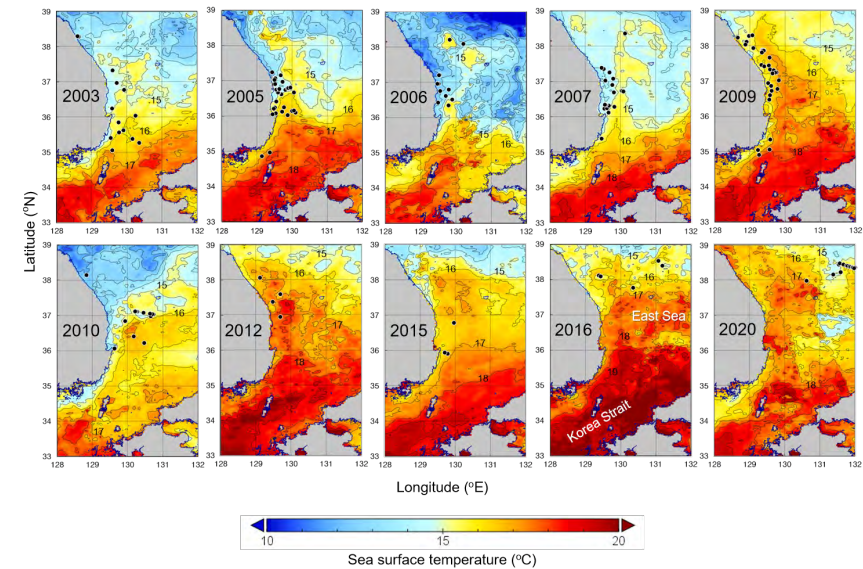


그림 2-15. 2003년부터 2020년까지 봄철 동해 목시조사를 통해 발견된 밍크고래의 위치와 인공위성 자료에 따른 해수면 온도.

[출처 : Yamada & 유(2022)]

2-2. 수산자원

2-2-1. 수산자원 기후변화 영향

- ◎ 연근해 어업생산량은 1980년대(1980~1989) 151만톤에서 지속적인 감소추세를 보이고 있으며, 최근 2020년대(2020~2022)는 평균 92만톤 수준임(그림 2-16).

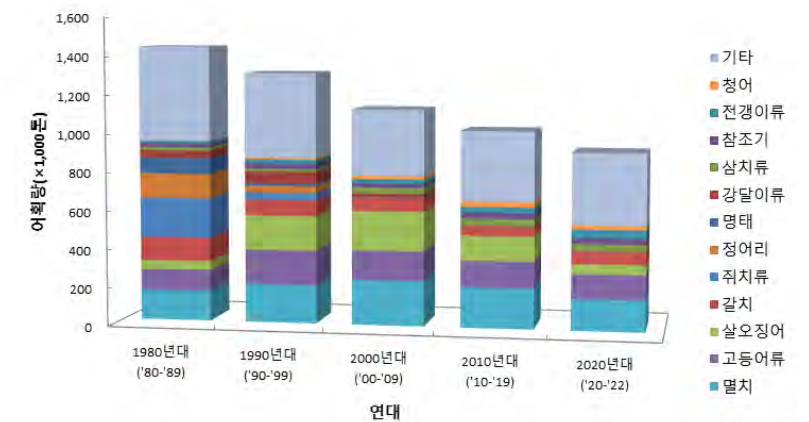


그림 2-16. 연근해 주요 어종의 연대별 어획량 변화. [출처 : KOSIS(2023)]

- ㉞ 현재 연근해 주요 수산자원인 멸치, 고등어, 살오징어는 1980년대부터 2000년대는 증가 경향, 2000년대 이후 현재는 감소 경향을 보임(1980년대 31.5만톤, 1990년대 56.3만톤, 2000년대 59.6만톤, 2010년대 47.8만톤, 2020년대 34.4만톤). 1980년대 주요 수산자원이었던 쥐치류, 정어리, 명태는 41.9만톤이 어획되었으나, 현재는 5천톤 수준임. 1980년대 대표 어종(쥐치류, 정어리, 명태)의 감소와 현재 대표어종(멸치, 고등어류, 살오징어)의 증감이 최근 43년간(1980~2022) 장기 어획량 변동 및 감소 경향을 대표하고 있음. 또한, 일부 난류성 어종(삼치류, 전갱이류)의 어획량은 꾸준히 증가하는 추세임.
- ㉞ 최근 뚜렷한 변화를 보인 어종으로는 살오징어(*Todarodes pacificus*)와 방어(*Seriola quinqueradiata*)가 있음. 살오징어는 1990년대 어획수준이 높았던 시기에 동해 남부해역 및 대화퇴 해역에서 어획이 집중되었음. 그러나 최근 2010년대 이후 어획 수준이 낮은 시기에는 서해와 러시아 수역 등으로 어장 확대되었으며, 장기적인 수온상승의 영향으로 주어장인 연근해 동해 남부해역의 50m 평균 수온이 1990년대 대비 2010년대에는 2~4℃ 상승함. 주요 서식분포가 외양으로 이동하는 등 어군이 분산되어, 주 조업위치인 동해 남부 해역에서 살오징어 어장형성 조건 등이 악화됨. 한편, 서해의 경우 2015년부터 어획량이 증가하여 현재까지 높은 어획수준을 유지하고 있음(그림 2-17).
- ㉞ 통계청 어업생산통계의 경우 행정구역별 구분으로 서해와 남해의 구분이 어려운 점이 있어, 실제 조업위치 기준으로 국립수산물품질관리원에서 수행한 표본조사 결과, 서해 오징어 어획비율은 총어획량 대비 2015년 15%로 증가, 최근 50% 수준까지 증가하였음(그림 2-13). 서해 여름철 표층수온은 2015년 이후 평년 대비 1~2℃ 높은 수온이 지속되는 특징을 보이며, 어군 분포의 전체적으로 북상과 반폐쇄적인 황해의 지형적인 요인에 의해, 서해 중부해역의 어장 형성에 영향을 주는 것으로 판단됨.

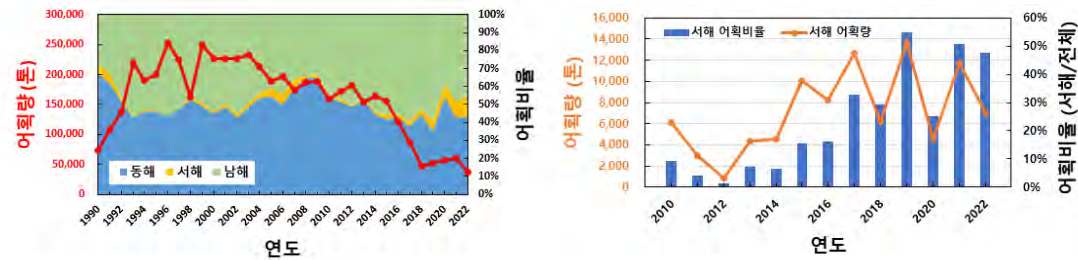


그림 2-17. 연도별 오징어 어획량과 동·서·남해 어획비율(좌) [출처 : KOSIS(2023)],
및 국립수산물품질관리원 연도별 서해 오징어 어획량과 어획비율 표본조사 결과(우).

- ㉞ 방어 어획량은 1990년대 평균 약 5천톤의 어획수준을 보였으나, 2008년 1.2만톤으로 급격한 어획 증가를 보임(그림 2-18). 그러나 2015년까지 전체 어획량의 약 75%를 차지하던 남해(제주 포함)의 어획비율이 크게 감소하여, 최근 5년간(2018~2022) 평균 약 49.5% 수준으로 감소함. 반면에 동해의 어획비율은 총어획량 대비 1990년대와 2000년대 20% 수준에서, 2010년대 중반 이후 40% 이상을 차지하고 있음. 동해 방어는 주로 춘계(5~6월) 북상시기 및 추계(10~12월) 남하시기를 중심으로 어획이 이루어지고 있으며, 최근 계절별(북상 또는 남하시기) 표층수온의 증가가 뚜렷한 경우, 방어 유입량이 증가하는 경향을 보임.

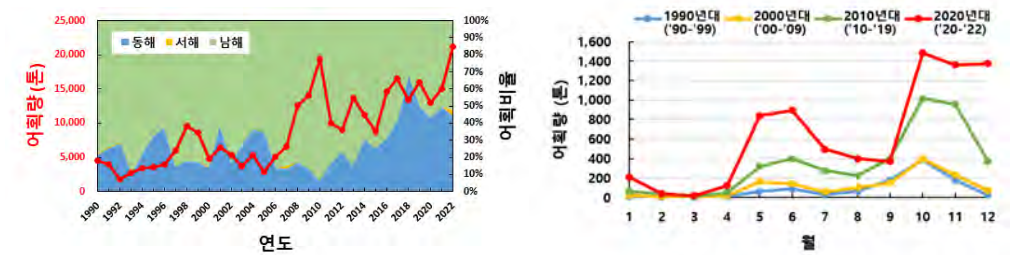


그림 2-18. 연도별 방어 어획량과 동·서·남해 어획비율(좌) 및 연대별 동해 방어 월별 어획량(우). [출처 : KOSIS(2023)]

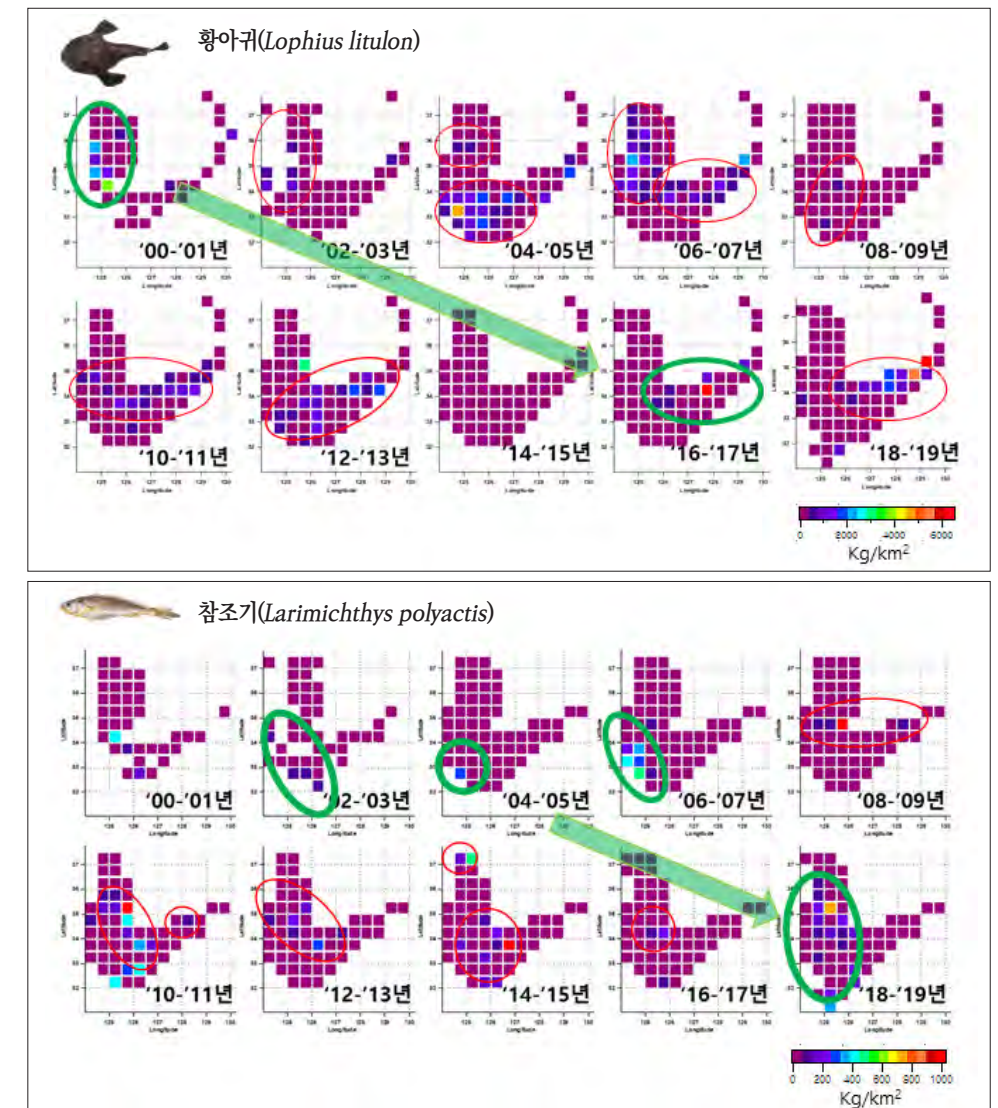


그림 2-19. 황아귀(상)와 참조기(하)의 출현 해역 장기 변동 조사 결과

- 국립수산과학원은 1997년부터 현재까지 수산과학조사선을 활용하여 우리나라 주변 해역에서 저층트롤 조사를 통해 수산자원의 현재 상태나 생물학적 특성을 파악하여 어업자원 관리를 위한 기초자료를 제공하고 있음. 지난 20년간(2000~2019) 우리나라 주요 어종인 황아귀와 참조기의 서식지 장기 변동 분석을 수행하였음. 황아귀의 경우, 2000년 서해 해역에서 출현빈도가 높았으나, 2004년 서해와 남해 해역에서, 2016년에는 남해 해역에서 출현 비율이 높아지는 경향을 보여 주요 서식처가 점차 남해 동쪽으로 이동하는 경향을 보임. 참조기의 경우, 2000년 서남해 외해역 먼바다에서 출현빈도가 높았으나, 최근에는 남서해역으로 주요 서식처가 이동하는 결과를 확인함. 두 종 모두 출현 해역 변화에 따른 서식 수심 변화는 나타나지 않았음(그림 2-19). 해양환경변화에 따른 주요 어종의 출현 해역 장기변동 특성 연구를 추진할 계획임.
- 아열대 어종은 난류성 소용돌이의 영향을 받는 독도 연안까지 출현한다고 알려져, 보다 자세한 아열대어종 출현상황을 파악하기 위해 최근 10년간(2013~2022) 잠수조사를 실시하고, 현장기록과 영상촬영자료를 분석하였음(그림 2-20). 주요 출현 아열대어종은 자리돔, 줄도화돔, 파랑돔, 세줄얼게비늘, 가시망둑, 황놀래기, 그물코귀치 등이었음. 대표 아열대성 어종인 자리돔의 경우 조사 전 기간 내에 출현하였으며, 출현빈도가 높아진 2017년 이후 현재까지 전체 어종 중 가장 높은 출현 비율을 유지하고 있음.

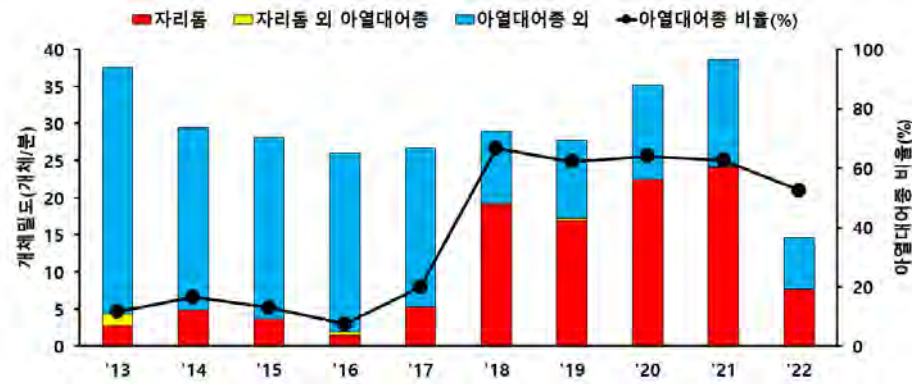


그림 2-20. 연도별 개체밀도와 아열대어종 비율.

2-2-2. 수산자원 기후변화 전망

- IPCC SSP 시나리오 기반의 미래 해양환경 자료를 활용한 주요 부어류의 서식지 변화 전망 결과, 2050년대 고등어의 서식지는 현재 주어장인 남해를 포함, 북쪽으로 확대되며, 멸치는 겨울~봄에는 현재보다 서식지 면적이 증가하고, 여름~가을에는 서식지 면적이 감소될 것으로 전망됨.
- 세 가지 CMIP6(ACCESS-ESM1-5, CanESM5, MPI-ESM1-2-HR) 모형을 선정하여 지역해 기후모형을 개선하였으며, 주요 수산자원 미래 서식지 전망에 필요한 연근해 미래 해양환경 변화 및 주요 생태변수인 엽록소와 동물플랑크톤의 변화를 추정하였음.

- 과거재현실험 기간인 2010~2020년을 현재 기후값으로 사용하여, 현재 대비 미래 표층 수온, 엽록소농도, 동물플랑크톤 변화를 전망함. 전 지구 기후모델결과 대비, 지역해 기후모델결과는 모든 시나리오와 기간에서 해면수온이 현재에 비해 높게 상승할 것으로 전망되었음. 또한, SSP 5-8.5 시나리오는 SSP1-2.6 시나리오에 비해 해면수온 상승폭이 컸으며, 시간이 지날수록 해면수온 상승 폭이 크게 전망됨(그림 2-21).

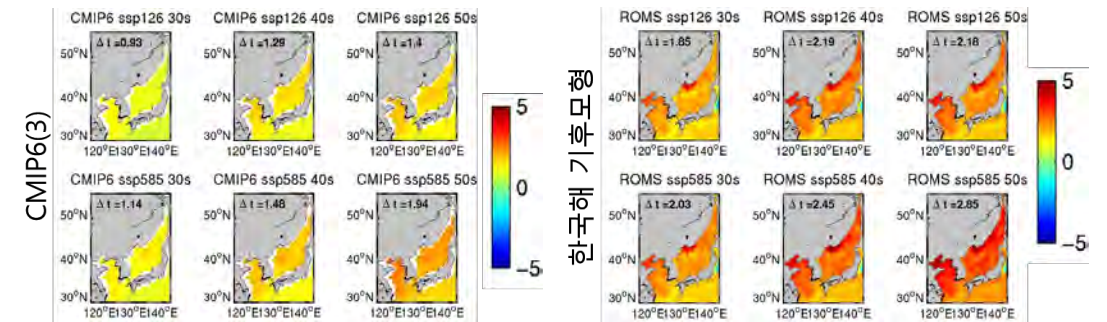


그림 2-21. 미래 표층수온 변화 CMIP6 전구(좌) 및 지역해(우) 모델결과.

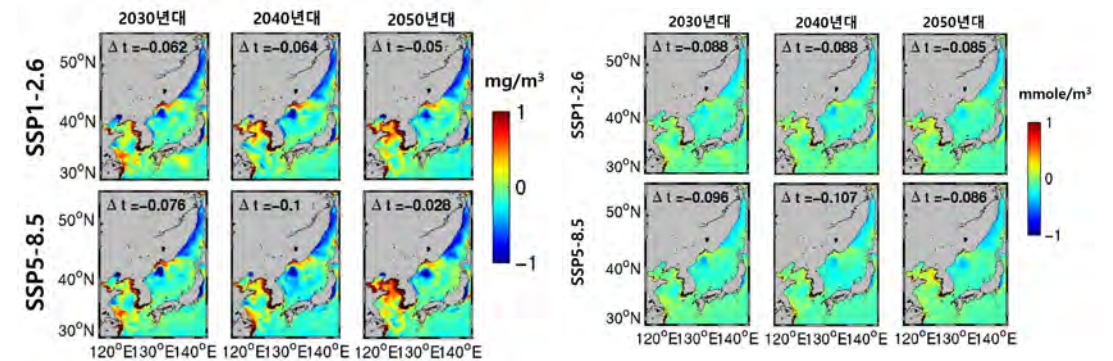


그림 2-22. 지역해 기후모델로 전망한 미래 표층 엽록소(좌) 및 동물 플랑크톤(우) 결과.

- 엽록소농도는 전체적으로 감소 경향을 보였으며, 기후변화 시나리오에 따른 분포 양상의 차이는 크지 않았으나 농도 차이를 보이며, 양자강 입구, 동중국해, 서해연안에서 그 농도가 증가하는 것으로 전망되었음. 동물플랑크톤의 분포는 엽록소농도와 유사하게 전체적으로는 감소하나 서해와 양자강 하구역에서는 증가할 것으로 전망됨(그림 2-22).
- 국립수산과학원은 현재까지 수행된 표층·난류성 어종(고등어, 멸치) 외에 주요 상업어종인 살오징어의 미래 서식지 변화 예측연구를 수행하였음.
- 2050년대는 연근해에서 살오징어 출현확률은 남해에서 연중 감소할 것으로 전망하였으며, 특히 여름과

가을(6~10월)에 동해 연안과 근해에서 큰 폭으로 감소할 것으로 전망됨. 전 해역에서는 살오징어 분포면적이 2~4월에는 증가하다 5월부터 이듬해 1월까지의 감소할 것으로 전망되어 현재 계절변화와 달라지는 양상을 보였음(그림 2-23). 특히 7~9월에는 분포면적이 매우 큰 폭으로 감소할 것으로 전망됨(SSP1-2.6: 10.4~16.2%로 감소, SSP5-8.5: 9.5~16.6%로 감소) (그림 2-24).

- ☑ 동해에서는 살오징어 분포면적이 대체로 겨울과 봄에는 증가하고, 여름과 가을에 감소할 것으로 전망함. 특히, 분포면적이 여름에 대폭 감소하였는데 연근해가 포함된 동해 남부 전체 면적대비 약 36.0~65.7%로 감소할 것으로 전망함(그림 2-24).
- ☑ 서해에서는 현재 살오징어가 7~10월에 넓게 분포(31.4~87.8% 수준)하는 것으로 재현하였으나, 미래 SSP1-2.6 시나리오에서는 25.2~53.1%로 감소하고, SSP5-8.5 시나리오에서는 19.1~68.8%로 감소함 (그림 2-24). 더불어 살오징어가 서해에 분포하는 기간이 더 연장되어 SSP1-2.6 시나리오에서는 11월 까지, SSP5-8.5 시나리오에서는 12월까지 분포할 것으로 전망됨.

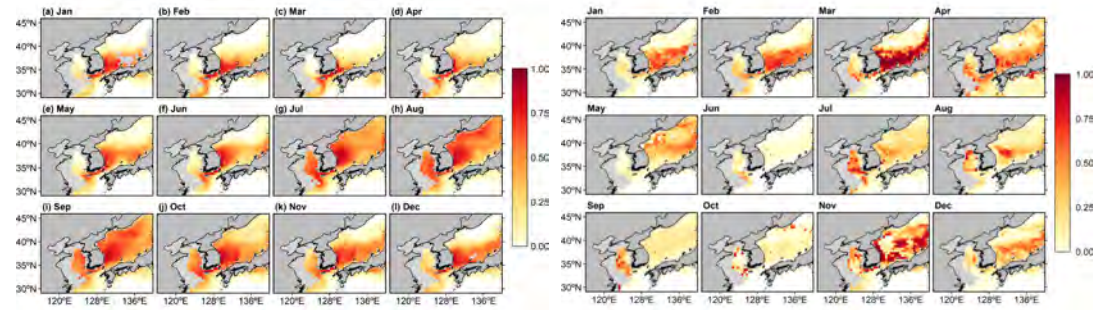


그림 2-23. 현재 살오징어 월별 서식지(좌) 및 지역해 기후모형(SSP5-8.5)으로 전망한 살오징어 미래 월별 서식지(우).

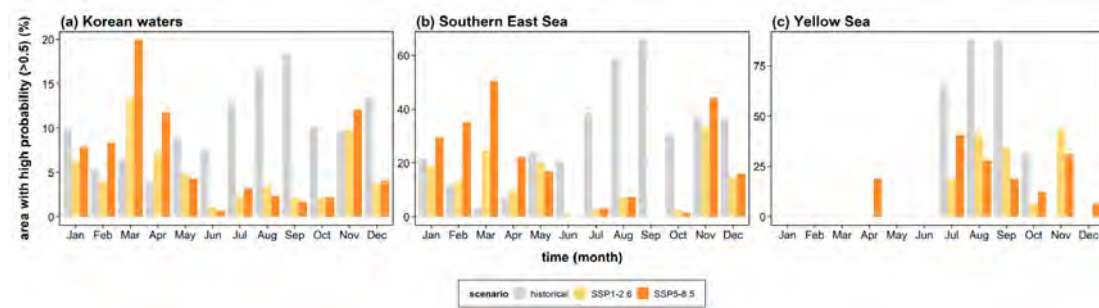


그림 2-24. 기후변화 시나리오에 따른 한반도 주변(A), 동해 남부(B), 서해(C)의 평균 살오징어 서식지 면적 변화 비교.

- ☑ 살오징어의 경우 최근 어획량 감소와 함께 대상어업이 다양해짐에 따라, 어업별 특성을 고려한 미래 전망이 요구되며, 표층·난류성 수산자원 외 한류성 어종을 대상으로 미래 서식지 변화 예측연구를 수행하여 서식지 특성이 뚜렷한 어종 간 해양환경변화에 따른 서식지 변화 특성 연구를 추진할 계획임.

2-2-3. 수산자원 기후변화 적응 연구

- ☑ 기후변화가 멸치 어획량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 멸치 권현망어업을 대상으로 남해 수온변화, 먹이생물변화(동물플랑크톤), 허가척수 및 조업척수 변화 등을 분석하였음. 2015년 이후 멸치 어획변동성 증가 및 어획 부진은 최근 20년간의 수온 상승과 밀접한 관련이 있었으며, 어획 부진에 따른 감척과 출어 척수 감소와도 관련이 있음을 확인하였음.
- ☑ 기후변화에 따른 수산자원 회유경로, 현존량 등의 변화를 파악하기 위해 바이오로깅기법⁶⁾, 환경DNA⁷⁾ 기법, 과학어군탐지기 등을 이용하여 수산자원의 변동을 감시하고, 기후변화에 따른 지속가능한 수산자원 관리에 활용하고 있음.
- ☑ 우리나라 제주도와 독도 주변해역에서도 태평양참다랑어(이하 참다랑어)를 포함한 여러 종류의 어린 다랑어류가 출현하고 있으며, 2022년 참다랑어의 어린물고기가 제주도 주변해역에서 처음 채집 및 보고 되었음. 우리나라 해역에서 출현한 참다랑어의 알과 어린물고기 조사를 바탕으로 산란장 및 성육장 연구를 확대하여 참다랑어의 지속가능한 자원관리를 위해 활용할 수 있도록 연속어란 채집기(CUFES)⁸⁾, 다중개폐식 네트(MOCNESS) 등 다양한 조사 장비들을 이용하여 수산자원 연구를 수행하고 있음(그림 2-25).

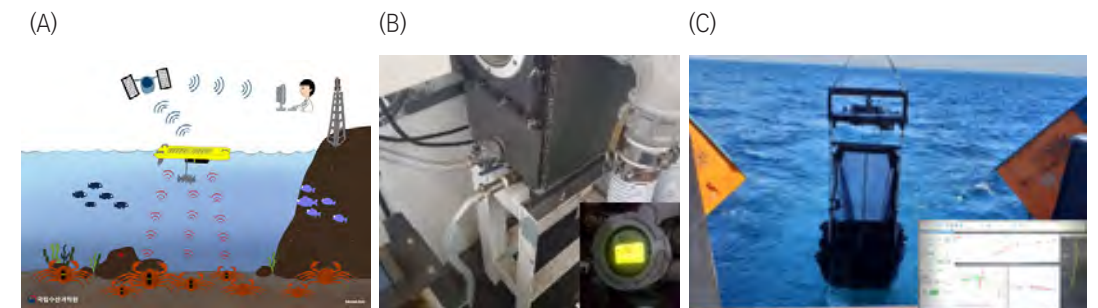


그림 2-25. 수산자원의 기후변화 적응 연구를 위한 조사방법. (A) 바이오로깅, (B) 연속어란 채집기, (C) 다중개폐식네트.

- ☑ 기후변화에 따른 자원량 변동과 수산자원의 생태특성(서식지, 산란시기 등) 변화에 따라 주요 수산자원 포획금지기간 조정 등 어업인들의 현실적인 요구를 반영하는 효과적인 수산자원 관리를 위한 수산자원 관리정책 지원 연구를 수행하고 있음.
- ☑ 최근 우리나라 주변 연근해에서 상어류의 출현 양상에 특별한 경향이 발견된다는 뚜렷한 징후는 없지만, 2019년 6월, 2022년 4월 강원도 고성에서 청상아리, 강릉에서 돌묵상어, 2009년 9월에 고성에서 백상아리가 출현하였음. 심지어 고래상어가 2007년, 2017년 경북 울진과 영덕에서 각각 출현하는 등, 상어류가 발견되는 해역이 일반적인 견해와는 달리 점점 북상하고 있음이 확인되고 있음.
- ☑ 상어의 이동속도는 종마다 차이는 있지만, 대형종의 경우, 하루에 200km 이상을 이동하는 경우도 있으므로 출현해역의 북상은 단기간 이동에 의한 현상으로 나타날 수도 있는 것도 고려해야 함. 또한, 현재까지 상어류의 분포나 개체수 변화에 대한 모니터링은 본격적으로 수행된 바는 없음. 단지, 국립수산과학원

6) 바이오로깅 : 생물체에 전자식 기록계를 부착하여 다량의 연속생태자료를 확보, 관측기간 내 생물 전 주기 서식환경을 파악하는 방법

7) 환경DNA : 생물로부터 주변 환경에 배출된 DNA(생물의 혈액, 체액, 분비물, 배설물 등), 즉 서식환경에 남아 있는 DNA배열을 해석하여 그 환경에 존재했던(하는) 생물의 종과 양 추정하는 방법

8) CUFES : 배가 항해하면서 연속으로 해수를 빨아 들어 어란을 채집하는 장비

조사선에 의해 채집된 상어류의 정보만 정기적으로 확보하여 축적하고 있는 수준으로, 출현해역만으로 상어류의 서식분포가 해양환경변화에 따라 바뀌고 있다고 단언하기는 어려움.

- ㉞ 국립수산물과학원 수산자원조사선의 트롤을 이용한 어획시험조사에 의해 최근 25년간(1997~2022) 채집된 상어류는 총 4,743개체였으며, 그중 대부분은 소형상어인 난생의 두툽상어(*Scyliorhinus torazame*)가 총 4,373개체로 전체의 92.2%를 차지하여 가장 우점하였으며, 다음으로 곱상어(*Cephaloscyllium umbratile*)가 208개체로 4.4%를 차지함. 트롤조사는 2 knot의 낮은 속도로 생물을 채집하기 때문에 채집된 상어류는 이동속도가 느린 소형상어류가 대부분이었으며, 이 중 대형상어류에 속하는 흰배환도상어, 전자리상어, 귀상어도 1m 이내로 성체로 성장하기 전의 개체였음. 현재까지 채집된 상어류 대부분은 사람에게 대한 공격성이 낮은 개체들이었음(그림 2-26).

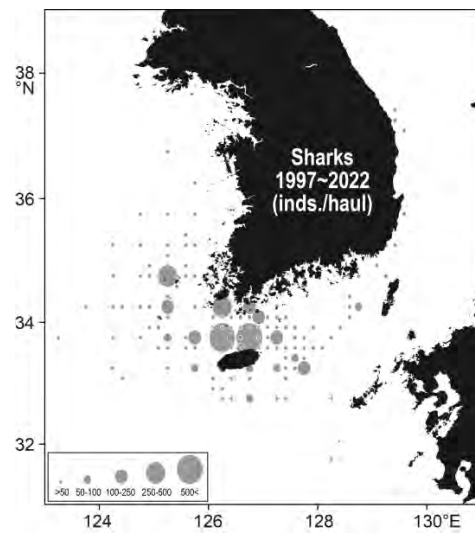


그림 2-26. 최근 25년간(1997~2022) 우리나라 주변해역에서 출현한 상어류 채집위치와 개체수.

- ㉞ 상어류가 채집된 해역은 제주해협과 서해 남부를 지나는 황해난류해역에 집중적으로 분포하고 있으며, 그 외로는 제주 동부를 지나는 대마난류해역을 따라 나타나며, 이러한 해역은 우리나라 주변에 난류가 흐르고 있는 경로와 대개 일치하고 있어 난류의 이동과 상어류의 분포가 연관이 있을 것으로 판단됨.
- ㉞ 결국, 난류세력의 계절·경년변화가 우리나라 연근해에 유입되는 상어류의 이동·분포 및 개체수를 변화시킬 가능성이 크다고 판단됨.
- ㉞ 최근 국립수산물과학원은 1977년 발간된 한국어도보(韓國魚圖譜)에 수록된 37종을 비롯한 우리나라 바다에 출현했던 49종의 상어류와 수입되거나 수족관에서 관리하는 상어류 10종의 형태적 특징, 생태, 분포, 출현해역 등을 종합적으로 정리한 「한국 연근해 상어류 분류 도감」을 2023년 2월에 발간하였음.
- ㉞ 이번 도감은 비전문가라 하더라도 우리나라 바다에 출현하는 상어를 쉽게 구별할 수 있도록 상어의 종별 형태적 주요 특징과 분류 포인트를 삽화와 사진을 넣어 설명함. 이러한 상어류에 대한 기본적인 정보의

정리와 제공은 향후 우리나라 주변해역에서 상어의 이동·분포 및 해양환경에 따른 변화양상을 조사·연구하는 연구자에게 중요한 방향을 제공해줄 것으로 기대함(그림 2-27).



그림 2-27. 국립수산물과학원에서 발간한 “한국 연근해 상어 분류 도감”.

- ㉞ 우리나라 원양어업은 1957년 인도양 다랑어연승 시험조업을 시작으로 1960~70년대 북태평양 트롤 어업과 대서양 다랑어연승어업의 진출로 1990년까지 지속적으로 성장하면서 1992년 100만톤 이상의 최고 어획량을 기록하였으나, 1995년 UN해양법⁹⁾ 발효 이후 원양어장이 축소되고, 베링해 공해 잠정 조업금지가 선언되면서 감소 추세로, 2021년 어획량은 약 44만톤임(그림 2-28).
- ㉞ 2022년 원양어업 어획량은 전 대양에서 6개 어업(200척)으로 약 40만톤을 기록하였고 다랑어선망어업이 24.5만톤(61.2%)으로 가장 많았으며, 트롤어업 8.1만톤(20.4%), 다랑어연승어업 3.7만톤(9.2%)순이었고, 최대 어장은 태평양해역의 다랑어어장임(그림 2-29).

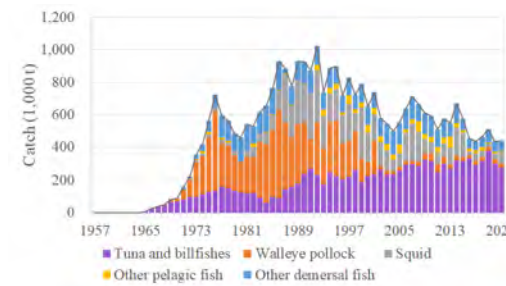


그림 2-28. 우리나라 원양어업 연도별 어획량.

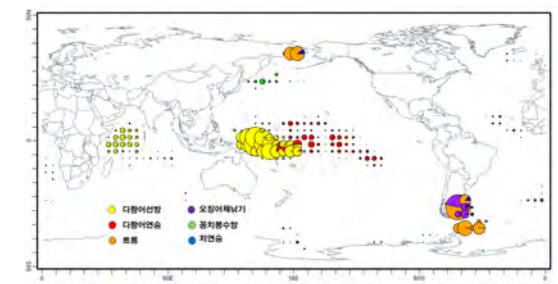


그림 2-29. 2022년 우리나라 원양어업 업종별 어획량.

- ㉞ 기후변화에 의한 전 세계 어획량은 지속적으로 감소하고 있으며, 자원관리를 위한 국제규범은 더욱 강화될 것으로 예상되고, 우리나라 원양어업은 최대 어장인 태평양해역의 해양환경 요인을 고려한 어장정보와 어획률 분석 연구가 필요함.

9) 해양법에 대한 UN 협약(UN Convention on the Law of the Sea, UNCLOS)으로 해양과 부수적 자원을 개발·이용·조사하려는 국가의 권리와 책임, 생태계 보전, 관련 기술 개발 등 해양과 관련된 규정을 포함하고 있으며, 세계 각국 해양법의 기준이 되는 협약

- ☉ 다랑어류는 엘니뇨 시기에는 중서부태평양의 수온약층이 얇아지면서 조업의 효율도 높아져 어획량이 많아지고, 라니냐 시기에는 수온약층이 깊어지면서 조업효율이 낮아져 어획량이 감소하는 경향을 보임.
- ☉ 또한 이런 대규모 기상현상은 어장이동의 극명한 변화를 보여 엘니뇨(2019년) 시기에는 태평양 동부 어장까지 이동하여 조업하는 경향을 보였으며, 라니냐(2021년) 시기에는 어장이 태평양 서부어장에서 밀집되는 현상을 보였음(그림 2-30).
- ☉ 우리나라 다랑어 선망어업 역시 2019년에 비해 2021년에 어장이 태평양 서부어장으로 이동하면서 축소되었고 어획량도 감소하는 경향을 보였음(그림 2-31).
- ☉ 원양어업 조업효율성을 높이기 위해 어장 범위와 이동패턴 등 어장정보 연구와 해양환경지표(수온, 해수면 높이 등)와 어획통계자료를 연계한 자료분석을 토대로(그림 2-32) 대상종별 어획률 분석을 시도하고 있음.

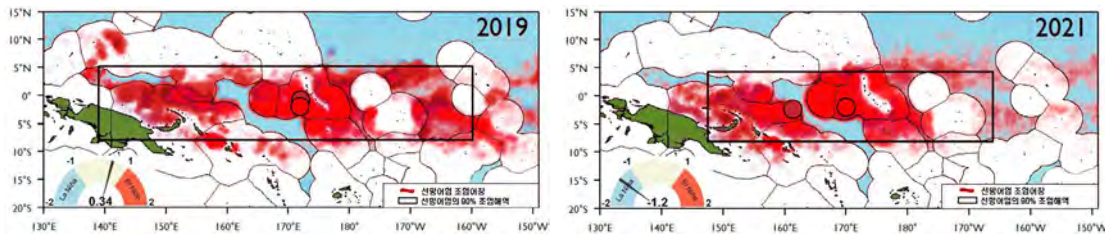


그림 2-30. 중서부태평양수산위원회 관할수역 선망조업의 엘니뇨(좌), 라니냐(우) 영향으로 인한 어장분포 변화.

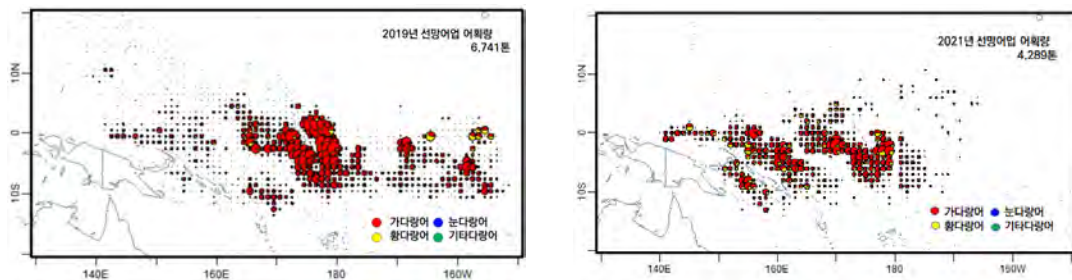


그림 2-31. 중서부태평양수산위원회 관할수역 내 우리나라 선망조업의 연도별 종별 어획량 변화.

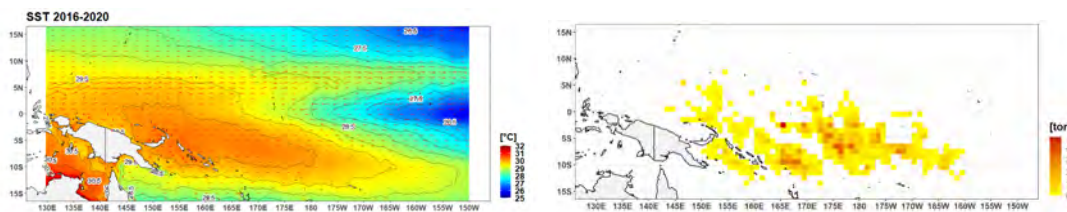


그림 2-32. 태평양해역 최근 5년 평균 표층수온과 우리나라 가다랑어 월 어획량(12월 기준).

2-3. 양식분야

2-3-1. 양식분야 기후변화 영향

- ☉ 천해양식은 양식기술의 발달, 신규어장의 개발, 노후어장의 정비, 양식품종의 다양화 등으로 생산량이 1980년 541천톤에서 2020년 2,308천톤으로 4.3배 증가함(그림 2-33).
* 천해양식 생산량(천톤) : (1980) 541 → (1990) 773 → (2000) 653 → (2010) 1,355 → (2020) 2,308
- ☉ 우리나라 천해양식 생산량은 2010년 이후 미역, 다시마, 김 등 해조류를 중심으로 지속적으로 증가하였으며, 2022년 기준 전체 어업생산량 중 천해양식은 62.9% 차지함.
* 천해양식 생산량(천톤) : (2010) 1,355 → (2014) 1,547 → (2018) 2,250 → (2022) 2,268
- ☉ 천해양식 생산금액도 소비성향 변화에 따라 2022년 3조 3,843억원(2010년 대비 186% 증가)으로 역대 최대 생산금액을 달성하였음(그림 2-33).
* 품목별로 2010년 대비 2022년 패류 6,121억원(220%), 어류 4,209억원(149%), 해조류 3,476억원(192%) 증가
- ☉ 2022년 품목별 양식생산량은 해조류 1,730천톤(76.3%), 패류 415천톤(18.3%), 어류 91천톤(4.0%), 기타수산물 22천톤(1.0%), 갑각류 10천톤(0.4%)이었음. 반면 양식생산금액은 어류 1조2,886억원(38.1%), 패류 1조1,215억원(33.1%), 해조류 7,266억원(21.5%), 갑각류 1,683억원(5.0%), 기타수산물 793억원(2.3%)이었음.

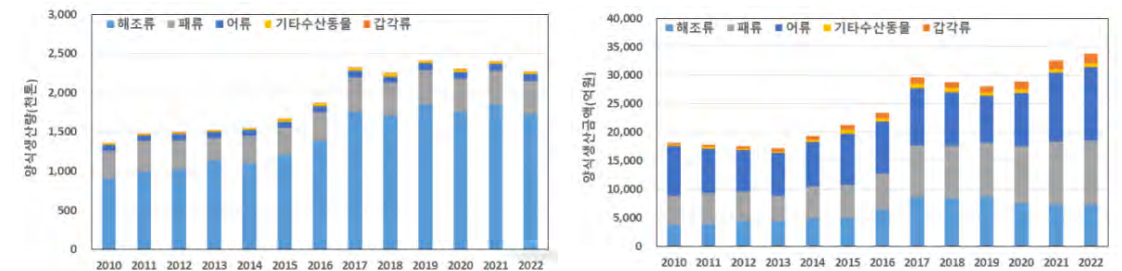


그림 2-33. 최근 13년간(2010~2022) 천해양식 생산량(좌), 생산금액(우).

- ☉ 1990년 농어업재해대책법 제정 당시에는 이상조류, 적조현상 두 가지의 재해를 어업재해로 정의하였으나, 2012년까지 태풍, 해일, 해파리의 대량발생, 이상수온 등 다양한 자연재해가 농어업재해대책법에 추가 포함되어, 재해가 다양해지고 있는 것을 알 수 있음.
* 농어업재해대책법 : 농업 및 어업 생산에 대한 재해(災害)를 예방하고 그 사후(事後) 대책을 마련함으로써 농업 및 어업의 생산력 향상과 경영 안정을 도모함을 목적으로 함.
- ☉ 자연재해의 종류는 고수온, 적조, 저수온, 태풍, 이상조류, 팽생이모자반 유입 등으로 더욱 다양해지고 있고, 가장 큰 피해를 일으키는 재해는 고수온으로 지난 12년간 전체 피해액의 53%를 차지하였고, 피해액은

1,250억원으로 나타났음.

- ☉ 2022년 9~10월에는 창원시 진해만 내에 정어리가 대량 유입되어 집단폐사를 일으켰으며, 폐사지역이 확대되면서 피해원인 정밀분석을 수행한 결과 산소 부족이 원인이었음.

* 진해만 내 마산만, 진동만 등 10개 해역 폐사발생 / 폐사체 수거량 222.4톤

* 진해만 정어리 유입 증가는 남해 동부 연안 및 제주 동부해역에서 산란된 개체가 증가하였기 때문으로 판단되었음.

- ☉ IPCC(2019)는 기후변화로 인한 해양환경 변화(수온 상승, 부영양화 및 해양산성화 등)는 패류독소의 원인종을 포함한 식물성 플랑크톤의 발생범위와 해양생물의 서식지 등에 영향을 준다고 보고함.
- ☉ 또한 캐나다 컬럼비아주에서 수행한 마비성패류독소 발생(1941~2020년) 연구에서는 표층 수온 상승(0.7°C , $p=0.006$)에 의해 마비성패류독소 중독사고($p<0.0001$) 또한 유의적으로 증가되었다고 보고됨.
- ☉ 한국 연안에서도 마비성패류독소의 조기 발생과 허용기준치 초과검출 시기가 확대되는 경향(그림 2-34)을 보이며, 이로 인한 식중독 발생 가능성이 높아지고 있음.

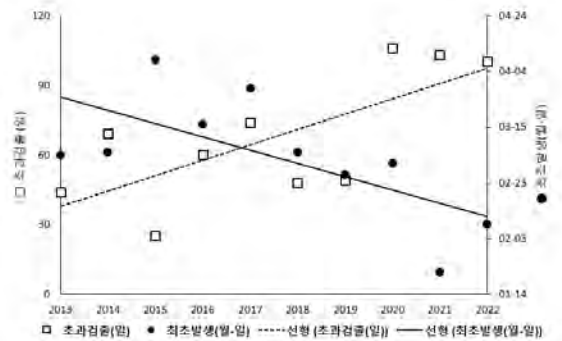


그림 2-34. 한국 연안 마비성패류독소 발생 경향(2013~2022년).

- ☉ 이에 따라 국립수산물과학원은 패류독소 발생 변동에 따른 조사강화를 통해 2000년 이후 공식적인 패류독소 식중독 사고는 보고되지 않음. 그러나 패류독소의 허용기준치 초과검출 시기가 확대됨에 따라, 해당 해역의 패류 및 피낭류의 채취금지 기간이 확대됨으로써 어업인들의 피해 발생이 우려됨.

* 우리나라 패류독소 식중독사고 : 총 6건(1984~2000년, 46명 중독, 5명 사망)

- ☉ 파란선문어는 파란고리문어류의 아열대성 연체동물로 침샘, 내장 등에 복어독으로 알려진 테트로도톡신(Tetrodotoxin, TTX)을 가지며, 최근 수온 상승에 따라 분포지역이 확대되면서 우리나라 연안에서도 드물게 발견되고 있음(그림 2-35).
- ☉ 우리나라에서는 2003년 제주도 서귀포 연안에서의 파란선문어 출현이 최초 기록이며, 2010년도 이전에는 주로 일본 연안에서 이들 개체의 출현이 보고됨(Kim et al., 2012). 파란선문어는 2012년 2월 제주도 연안에서 재출현 후 2021년까지 제주도를 포함하여 울산에서 전남 여수에 이르는 연안의 17개 지점에서 총 26회의 출현이 보고되었으며(Kim et al., 2023), 이러한 파란선문어의 출현 범위의 확산은 한국 연안 뿐만 아니라 일본 연안에서도 보고되고 있음(Yamate et al., 2022).

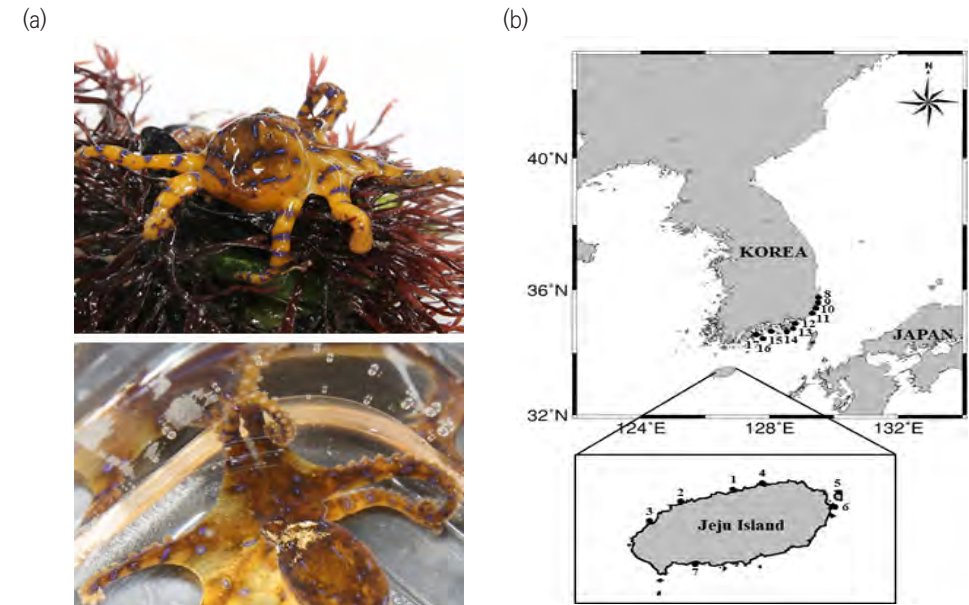


그림 2-35. 지난 10년간(2012~2021) 한국 연안에서 채포된 파란선문어(A), 출현지역(B).

- ☉ 국내에서 출현한 파란선문어의 독성은 개체당 약 $85.8 \mu\text{g}(n=3)$ 의 TTX를 가지며, 이는 TTX의 경구 치사량(약 2 mg)의 약 23배 낮은 수준임.
- ☉ 국내에서 알려진 파란선문어로 인한 인명사고는 2015년 제주도에서 발생한 손가락 물림사고 1건이지만, 해외에서는 파란고리문어류 섭취와(베트남 2명), 물림에(호주 2명)의한 사망사고가 보고되어 있기에 지속적인 모니터링 및 홍보를 통한 피해 예방이 필요함.

2-3-2. 양식분야 기후변화 적응 연구

- ☉ 여름철 고수온으로 인한 양식생물의 폐사와 지속적인 수온상승에 따른 양식산업의 피해가 증가하고 있어 이에 대한 대책 마련이 시급함.
- ☉ 고수온 대응 양식품종 및 양성기술 개발을 위하여 육종기술을 활용한 고수온 내성 품종 개발과 아열대성 양식품종 양성기술 개발을 진행하고 있음.
- ☉ 고수온 내성 품종을 개발하기 위하여 주요 양식생물 중 우리나라 패류 양식 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 선발함.

- ◎ 유전체 분석을 통하여 고수온내성 형질 관련 고효율 유전자 마커¹⁰⁾(SNPs, 단일염기변이)를 개발(96개)하고, 고수온내성 유전능력 및 유전체 정보 기반의 후대생산 프로그램을 확립(2019~2020)하였으며, 양식현장에서의 고수온기 생존율 향상을 목표(20% 이상)로 해사가두리 적용시험을 추진하고 있음.
- ◎ 새로운 양식품종의 개발 방법 중 하나인 교잡품종 개발은 부모가 가진 유용한 형질을 잡종강세 특성을 이용하여 자손에서 발현시키는 유용한 육종방법으로 메기류, 배스류, 잉어류에 상업적으로 이용되고 있음.
- ◎ 우리나라에서도 고부가 어종이지만, 성장이 느린 단점을 가진 자바리와 붉바리를 아열대성 바리류와 교배하여 성장이 빠른 교잡종을 개발하는 연구가 진행 중임(그림 2-36).
- ◎ 아열대성 양식품종 양성기술 개발은 교잡바리류의 최적양성조건(수온, 사육밀도, 사료조성, 먹이공급 방법)을 구명하여 교잡바리류의 양성기술을 표준화하고, 사육환경요인별(수온, 염분, 암모니아 농도 등) 최저한계범위를 구명하였음.



그림 2-36. 대성 양식품종(교잡바리류) 개발. 교잡바리류 가계도(a), 월동 중인 대왕붉바리(b), 대왕붉바리 해사가두리 양식장(c).

- ◎ 순환여과식, 육상유수식 및 해사가두리 양식현장에 표준화된 양성기술을 적용하여 교잡바리류의 생존율과 성장을 조사하였고, 해사가두리 양식장 대상으로 입식 및 출하 적정시기, 사육밀도, 시기별 양성관리 등을 조사하여 교잡바리류 양성매뉴얼을 제작·배포함.
- ◎ 교잡바리의 생존가능한 최저 수온 및 해역 조사 결과 대왕붉바리는 경남 통영시 풍화리 해역(평균 수온 10.6℃)에서 73% 생존하였고, 전남 거문도해역(평균 수온 13.2℃)에서 95% 생존하여, 거문도해역, 수온 13℃ 이상에서 안정적 생존이 가능한 것으로 확인됨.
- ◎ 어가인구의 감소와 어촌 고령화 등 인구구조의 변화에 따라 수산물 소비시장 트렌드가 변화하고 있어 양식업계에서도 대내외적인 환경 변화에 발맞춰 양식업의 재도약을 위해 많은 노력을 기울이고 있음.
- ◎ 이를 위한 방법 중 하나로 4차 산업혁명 기술을 접목한 스마트양식이 그 대안으로 주목받고 있음. 스마트양식 기술은 양식생물의 생산 전(全) 과정에서 수집된 데이터를 기반으로 양성 중에 발생하는 문제를 사전에 예측하여 능동적으로 대처하는 지능형 양식기술을 말함.
- ◎ 국립수산물품질관리원은 2018년 경남 하동에 사물인터넷과 정보통신기술을 접목하여 원거리에서 사료공급 및 제어가 가능한 현장양식실증시스템을 구축하였음. 2019년 경남 진해 첨단양식실증센터(舊, 내수면양식 연구센터)에 수질환경 측정과 제어가 가능하며 실시간 사료공급 및 양식생물의 양성데이터 모니터링이 가능한 시스템을 구축하였음. 2022년 순환여과양식 시스템 구축을 통해 스마트양식 테스트베드 운영을

10) 유전자 마커 : DNA 서열로 사람 또는 동물에게서 염색체의 알려진 위치를 확인할 수 있는 것으로 돌연변이나 변형에 의해 일어난 다양성을 확인할 수 있음.

소프트웨어와 연계한 스마트양식 인프라를 구축하였음(그림 2-37).



그림 2-37. 스마트양식 테스트베드. 하동-해상(A), 진해-육상 담수(B), 포항-육상 해수(C).

- ◎ 2022년 국립수산물품질관리원 사료연구센터에서는 이제까지 개발된 요소 기술들을 적용하여 육상 해수 스마트 양식 테스트베드를 구축하고, 우리나라 대표 양식어종인 넙치를 대상으로 순환여과양식의 안정적 운영과 생존율 향상을 위한 연구를 수행하고 있음. 이를 통해 2024년까지 해상, 육상 담수, 육상 해수 스마트양식 테스트베드 안정화 및 고도화 연구를 통해 스마트양식산업 발전을 위한 연구 인프라를 구축하고 지속적으로 요소기술을 개발해 나갈 예정임.
- ◎ 기후변화로 지난 세기 동안 지구의 평균수온은 지속적으로 증가했으며(Parry et al., 2007), 해조류 양식이 시작되는 가을철에 수온 변동 폭이 커지고 있어 이러한 변화에 적응할 수 있는 해조류 품종 개발이 필요한 실정임.
- ◎ 특히 갈조류는 전체 생산량의 약 60%가 전복 먹이로 이용되고 있어(Kim et al., 2017; Hwang et al., 2019), 안정적인 전복 산업 지속을 위해 가을철(9~11월)에 생산 가능한 갈조류의 양식기간 연장이 필요하였음(그림 2-38).
- ◎ 갈조류의 양식기간 연장을 위해서 가능한 양식 품종 개발 시나리오는 ①선발육종을 통한 다시마의 양식기간 연장, ②교잡육종을 통한 고수온내성 품종 개발, ③기존 갈조류(미역, 다시마) 이외에 가을철에 수확이 가능한 새로운 양식 품종을 개발하는 것이었음.
- ◎ 선발육종 방법을 이용한 다시마의 양식기간 연장은 다시마 양식장에서 가장 마지막 여기까지 녹지 않고 남아있는 엽체를 선발하고 종자의 순계를 순수분리하는 방법을 3세대에 걸쳐 반복하였음(Hwang et al., 2017). 이렇게 선발된 F3세대¹¹⁾는 부모세대에 비하여 양식 기간이 3개월 연장되어 기존 다시마의 양식이 종료되는 시기인 8월 이후부터 11월까지 양식이 가능하였음.
- ◎ 교잡육종을 통한 고수온내성 품종 개발은 양식미역(암)과 제주도 서식하는 넓미역(수)간의 교잡을 통해 F1 교잡체¹²⁾를 제작하였음. 이 교잡체는 뚜렷한 잡종강세를 보여 엽장이 5~8m까지 자랐으며 생산량이 150% 증가되었고, 양식기간도 기존의 미역이 4월에 종료되던 것에서 6월까지 2개월 더 연장되었음(Hwang et al., 2012; Hwang et al., 2014).

11) 수과원301호 품종보호권 출원

12) 수과원203호 품종보호권 출원

- ㉞ 기존의 미역과 다시마 이외에 전복 먹이용 해조류 품종 개발을 위해 다년생 갈조류인 곰피와 감태의 양식 방법이 개발되었음(Hwang et al., 2009; Hwang et al., 2013; Hwang & Park 2020). 특히 곰피는 식용과 전복 먹이용 이외에도 폴리페놀 추출원과 바다술 조성용으로도 각광을 받고 있음.
- ㉞ 따라서 기후변화에 적응하기 위한 해조류 양식 품종 개발을 통해서, 전복양식 어업인들은 먹이 해조류를 확보하는데 다양한 선택권을 가질 수 있게 되었으며, 계절에 따라 확보할 수 있는 해조류 먹이의 연속 공급체계(그림 2-39)가 마련되었음.

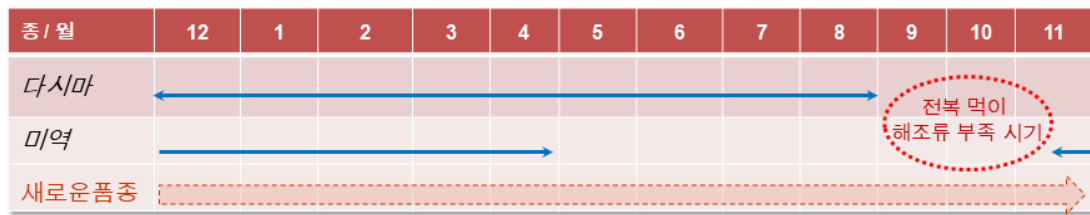


그림 2-38. 기존 해조류(다시마, 미역)의 양식 시기와 전복 먹이용 해조류 부족 시기.

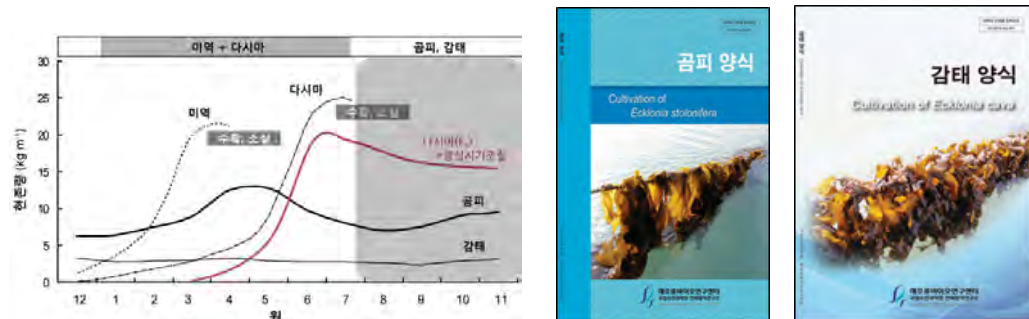
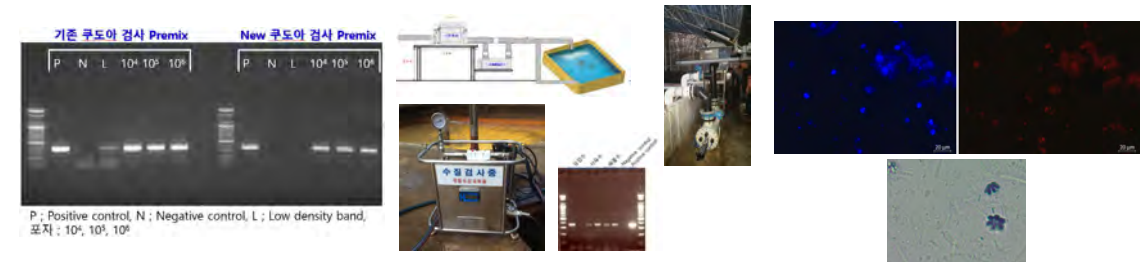


그림 2-39. 전복 먹이용 해조류의 연중 연속 공급 시스템 마련(좌) 및 곰피와 감태 양식매뉴얼(우).

- ㉞ 점액포자충은 연어, 송어 등 담수어 뿐 아니라 수많은 해산어류에 감염하는 주요 기생충의 하나로, 복잡한 생활사를 가지지만 어류 이외에 해양 서식 환형동물도 중간숙주로 가지는 것으로 알려져 있음 (Mackenzie & Kalavati, 2014). 점액포자충의 종류에 따라 발생 및 번식을 위한 최적의 온도 범위가 다르지만, 일부 점액포자충은 따뜻한 수온에서 포자 발달이 빠르게 진행되기도 함. 기후변화로 인한 수온의 변화는 점액포자충의 분포와 밀도, 생활사에 영향을 미칠 수 있으며, 이에 따라 어류의 점액포자충 감염 시기와 강도에 영향을 미침.
- ㉞ 우리나라 주요 양식품종인 넙치의 주요 생산지는 제주(약 50%)와 완도(약 30%)이며 총 생산량은 4만톤 이상으로 집계됨. 그러나, 국내 최대 넙치 생산지인 제주에서 질병에 의한 피해액은 2015년 700억 원에서 2019년 1,300억 원에 이를 정도로 해마다 급증하고 있음. 그중에서도 특히, 점액포자충 감염에 의한 폐사는 2016년 8.8%였으나 2017년에는 7.4%가 증가한 16.2%로 나타남(Shim et al., 2019).

- ㉞ 양식 넙치에 발생하는 점액포자충병으로는 여윌증과 쿠도아충이 대표적임. 2007년 제주 양식 넙치에서 여윌증 발생이 보고된 이후 여윌증에 의한 폐사는 매년 증가하고 있으며, 그 원인체로 *Enteromyxum leei*, *Parvicapsula anisocaudata*, *P. curvatura* 등의 점액포자충이 보고됨. 국립수산물과학원에서는 2010년부터 2021년까지 넙치 점액포자충 원인 구명, 인위 감염을 통한 병원성 연구, 감염 현황 파악, 진단법 개발 등 다양한 연구를 수행하였음(그림 2-40). 특히, 여윌증의 원인체로 보고되고 있는 여러 점액포자충을 동시에 진단할 수 있는 기술을 개발(2020년)하여 효율적 모니터링이 가능하게 하였음.



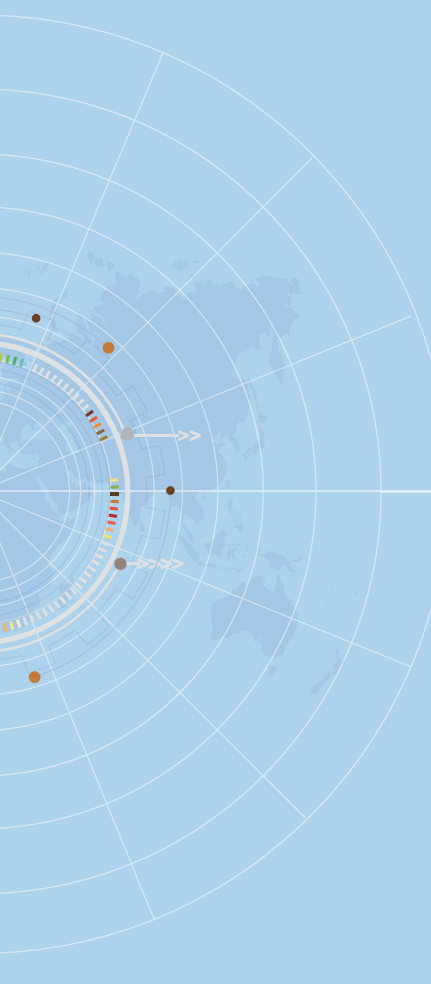
[보급형 유전자진단키트 개발]

[넙치양식장 유입수 살균시스템 개발]

[포자 생사 판별 염색법 개발]

그림 2-40. 넙치 쿠도아충 대응을 위한 기술 개발 결과.

- ㉞ 넙치 근육에 기생하는 *Kudoa septempunctata*는 숙주인 넙치의 생리, 생존 등에 영향을 미치지 않지만, 2010년 일본에 수출한 한국의 양식 넙치에 기생하는 쿠도아충이 식중독의 원인으로 지목되면서 대일 수출 넙치 양식산업에 큰 영향을 미치게 됨. 국립수산물과학원에서는 2012년부터 넙치 쿠도아충 감염 모니터링, 진단기술 개발, 포자 생사 판별 염색법 개발, 양식시설 개선을 위한 살균시스템 개발, 구제제 개발 등 다양한 연구를 수행하였음(그림 2-41). 특히, 본 연구를 통해 개발한 수처리시스템은 양식현장에서 효율적으로 쿠도아 감염 예방이 가능한 것으로 검증되어, 수산정책 친환경 양식 지원사업에 포함됨.
- ㉞ 쿠도아충을 포함한 점액포자충의 생활사는 온도와 깊은 관계가 있어(Yanagida et al., 2006; Song et al., 2014), 경남이나 전남 지역보다 상대적으로 수온이 높은 제주 지역에서 점액포자충에 의한 감염 피해가 많이 발생하고 있는 것으로 사료됨. 이와 관련하여 기후변화로 연안 수온이 상승할 경우 점액포자충의 발생 범위가 확대될 것으로 예상되어 피해 예방을 위해 지속적으로 조기 검출, 감염 차단 및 치료 대책에 관한 기술 개발을 추진할 계획임.



Annual report for Climate change Trends in Fisheries, 2023

2023 수산분야 기후변화 영향 및 연구보고서



ACT Fish 2023

3장

Annual report for Climate change Trends in Fisheries, 2023



제 3장

【기획】이상기후와 수산재해

3-1. 수산분야 이상기후 영향

3-1-1. 전 지구적 해양수산분야의 이상기후 발생 경향 및 전망

- ◎ IPCC에서는 2019년 “해양 및 빙권에 관한 특별 보고서”에서 해양에서의 이상기후 발생과 대응에 관하여 자세한 내용을 기술하고 있음. 이 보고서에서 언급하고 있는 해양에서의 이상기후는 열대성 저기압(Tropical Cyclones, TC)의 경로·강도·빈도 변화, 이상 고수온 현상(Marine Heatwaves, MHWs), 급격한 엘니뇨-라니냐 현상, 해양순환의 급격한 변화 등을 예로 들고 있음(IPCC, 2019).
- ◎ 본 보고서에서는 우리나라 해역의 수산재해와 밀접한 관련이 있는 MHWs 및 TC의 변화와 관련한 내용을 살펴봄.
- ◎ MHWs는 장기적인 해양온난화에 더해 상대적으로 짧은 기간에 급격한 수온 상승이 나타나는 현상을 일컫고 있음. MHWs는 시간적으로 수일에서 수개월, 공간적으로는 수백에서 수천 km, 깊이로는 최대 수백 m까지 급격하게 해양의 수온이 상승하는 시기를 일컫음(Hobday et al., 2016).
- ◎ 과거 관측된 수온에서 발생할 확률이 90~99% 이상 벗어나는 고수온이 나타나는 시기를 일반적으로 MHWs로 판단하지만, 장소 및 시기에 따라 기준은 달라짐. IPCC(2022)에서는 과거 수온 기록의 90%를 초과하는 고수온이 5일 이상 지속되는 것을 MHWs로 정의하고 있음.

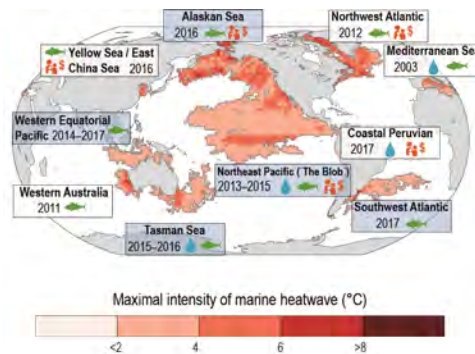


그림 3-1. 최근 20년사이에 전 세계 해양에서 발생한 주요 MHWs 이벤트와 이에 따른 영향
(물리적 변화, 해양생태계, 사회경제적 및 인간에 대한 영향). [출처 : IPCC(2019)]

- ◎ MHWs는 지난 20여년 동안 전 세계 해양 곳곳에서 발생하고 있으며, 특히 2013~2015년까지 약칭 “the Blob”이라고 불리는 북동태평양 MHWs, 2016~2018년까지 지속된 황해 및 동중국해의 MHWs, 2011년 오스트레일리아 서쪽 해역에서의 MHWs가 대표적인 현상임(그림 3-1).
- ◎ MHWs를 일으키는 원인은 다양한 해양 및 대기 과정이 거론되지만, 가장 중요한 원인은 엘니뇨 이벤트와의 상관임(Oliver et al., 2018). 엘니뇨 기간 중에는 중앙 및 동부 적도 태평양, 인도양에서 특히 비정상적으로 높은 수온이 나타남. 하지만 엘니뇨 뿐만 아니라 다양한 스케일의 기후변동성, 특히 태평양 10년 주기 진동¹³⁾(Pacific Decadal Oscillation, PDO), 인도양 쌍극자¹⁴⁾(Indian Ocean Dipole) 등이 관련 있을 것으로 판단하고 있음. 이들 기후변동성은 해류의 강도와 방향에 영향을 주고, 대기-해양의 열교환 변화에 영향을 주어 대기로부터 열의 흡수에 큰 영향을 미치는 것으로 판단하고 있음.
- ◎ 해양에서의 장기적인 온난화 경향은 MHWs의 강도, 빈도, 범위를 더욱 증가시키는 원인으로 작용함(Frölicher & Laufkötter, 2018). 인공위성 자료로부터 분석한 1982년 대비 2016년의 MHWs 발생일수는 2.5일/년에서 약 5일/년으로 두 배 가량 증가하였음. 같은 기간 MHWs의 최대 강도는 약 0.15℃ 증가하였으며, 공간적 범위는 약 66% 증가하였음(그림 3-2).

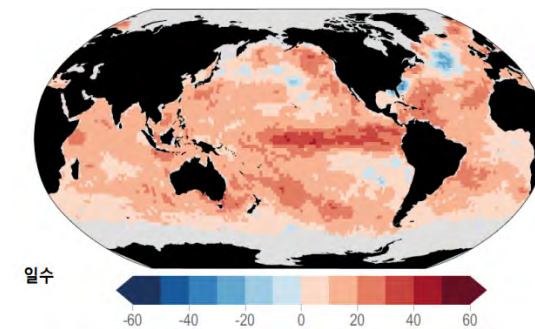


그림 3-2. 1925~1954년 대비 1987~2016년의 전체 표층 MHWs 일수 변화. [출처 : IPCC(2022)]

- ◎ 특히 지난 수십 년간 MHW는 지역적인 스케일에서 발생이 빈번하게 나타났으며, 전체 연안 해역의 약 38%에서 MHWs가 발생함. 열대해역에서는 MHWs에 따른 산호초의 손실이 심각하게 나타남. 급격한 수온 상승에 따른 산호초 손실 현상은 1980년대 초반에는 약 25~30년에 한번 발생한 것이 2016년에는 매 6년에 한번 발생할 정도로 빈도가 잦게 나타나고 있음(Hughes et al., 2018).
- ◎ 2006년 이후 MHWs 발생중에서 인간 활동에 의한 영향은 최소한 84~90% 정도일 가능성이 있으며(IPCC, 2022), 지난 30년 동안 가장 크고 영향이 강한 MHWs의 발생 확률은 인위적 기후변화로 인하여 20배 이상 증가하였음.
- ◎ CMIP6 모델로 예측된 1995~2014년 대비 2081~2100년의 MHWs 발생은 전 지구적으로 SSP1-2.6 시나리오 하에서 2~9배 증가하고, SSP5-8.5 시나리오 하에서 3~15배 증가하며 계속해서 빈도가 증가할 가능성이 높고, 해역적으로는 열대 해역과 북극해를 중심으로 가장 크게 증가할 것으로 전망됨(IPCC, 2022) (그림 3-3).

13) 태평양 10년주기 진동 : 중위도 태평양 분지를 중심으로 하는 해양-대기 기후 변동성의 강력하고 반복적인 패턴으로 북위 20°N의 태평양에서 표층수의 수온차를 통하여 파악.
14) 인도양 쌍극자 : 열대 인도양에서 나타나는 대표적인 해양-대기 상호작용 현상으로, 열대 서인도양과 남동인도양 사이의 표층 수온 편차의 차이가 준주기적으로 진동하는 현상.

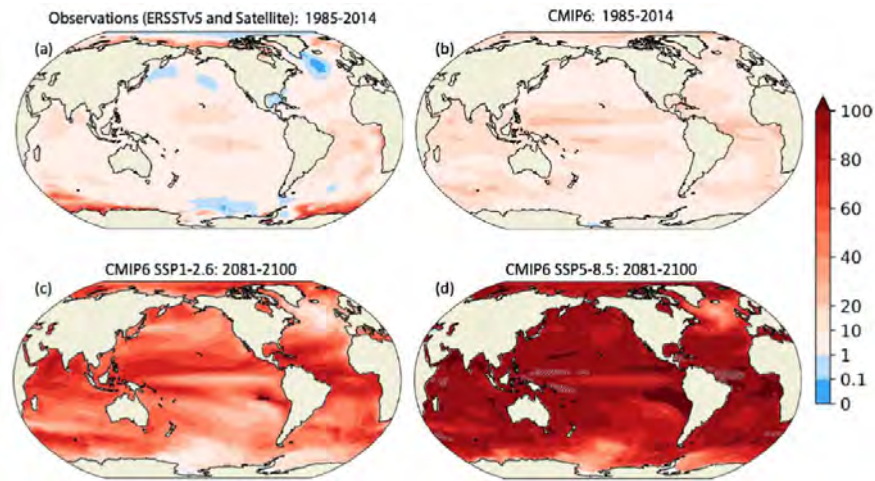


그림 3-3. 관측되거나 전망된 MHWs 지역별 발생 빈도(일수/년) 비교

(a) 관측된(1985~2014년) MHWs 발생 빈도, (b) CMIP6에 의해 재분석(1985~2014)된 MHWs 발생빈도, (c), (d) SSP1-2.6 및 SSP5-8.5 시나리오에 따른 미래(2081~2100) MHWs 발생 빈도. [출처 : IPCC(2022)]

- ☉ MHWs는 전 세계 해역의 해양생태계 및 인간생활에 많은 영향을 미치고 있음. IPCC(2022)에서는 MHWs에 의하여 산호초, 켈프, 해조숲, 어류, 바닷새에 이르기까지 다양한 해양생물종의 폐사를 일으켜 결과적으로 해양생태계와 해면 양식업 및 어업에 필연적인 영향을 주고 있다고 밝히고 있으며, 특히 온대 산호초, 하구의 해조숲, 냉온성 켈프는 MHWs에 의해 가장 큰 위협을 받는 생태계로 알려져 있음.
- ☉ 2010년대 북태평양의 가장 강력하고 가장 긴 기간의 MHWs의 발생기간에는 무척추동물 및 어류의 풍도 및 분포 변화, 독성 조류 대번식, 전복 어장의 붕괴 등과 함께 켈프 숲의 감소, 바닷새의 폐죽음 등과 같은 해양생태계 및 수산자원에 미치는 영향이 나타남.
- ☉ 많은 산호초, 켈프 숲, 해조숲을 비롯한 일부 해양생물의 서식지가 형성된 연안 생태계는 지구온난화 수준이 1.5℃를 넘어선 상태에서 MHWs가 일어날 경우 돌이킬 수 없는 국면을 맞이할 것이며, 1.5℃ 미만의 시나리오에서도 높은 위험에 노출될 것임을 우려함. 또한, SSP1-2.6 시나리오 하에서도 산호초는 MHWs의 강도 및 빈도 증가로 인하여 21세기 중반까지 산호가 광범위하게 감소되고, 다양한 연안재해 발생이 증가하며, 켈프 숲의 손실은 저위도 부근에서 높게 나타날 것으로 전망됨(IPCC, 2022).
- ☉ MHWs와의 반대 개념으로 해양의 표층수온이 급격히 하강하는 현상을 이상 저수온(Marine Cold-Spells, MCSs) 현상으로 불리고 있음. MCSs는 MHWs와 마찬가지로 산호초의 대량폐사 및 해양생태계 구조의 변동 등 영향을 주고 있으며, 때때로 심각한 MHWs에 따른 영향을 복원하는 이점을 주기도 함(Wang et al., 2022).
- ☉ MHWs가 기후변화와의 뚜렷한 관련성이 설명되는 것과는 달리 MCSs는 기후변화와의 상관성을 설명하기 곤란함. 전 지구적 기후변화에 따라 MCSs는 감소 경향을 보이고 있지만, 지역적인 편차가 매우 크게 나타나고 있음. 실제로 1982년부터 2020년까지 위성 수온 관측자료를 기반으로 살펴본 결과, MHWs는 10

년당 약 8.4일 내의 발생일수가 증가하는 것으로 나타나고 있지만, MCSs는 10년당 약 9.4일 내외로 발생일수가 감소하고 있음(Wang et al., 2022) (그림 3-4).

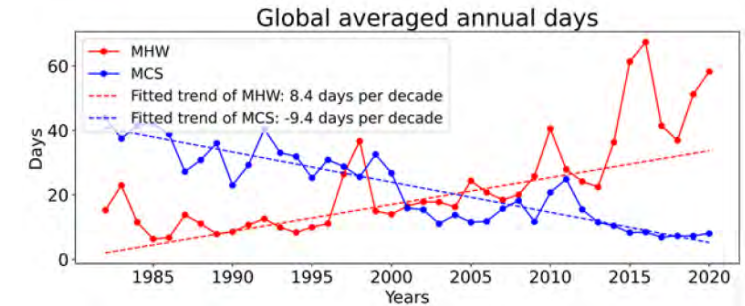


그림 3-4. 1982~2020년에 관측된 위성 수온정보에 의한 MHWs 및 MCSs의 발생일수 변화 추이. [출처 : Wang et al., 2022]

- ☉ MCSs의 발생 빈도와 강도는 지구온난화가 더욱 심화되는 미래에 전반적으로 더욱 감소할 것으로 전망되지만, 지역적인 편차는 증가할 가능성이 높음. 또한 지역적으로 MCSs 발생에 따른 피해가 우려되는 해역에서는 더욱 주의가 필요함(Wang, 2020).
- ☉ 과거 TC와 관련된 연구결과를 종합한 경향을 살펴보면, 1800년대 후반 이후 오스트레일리아 동측으로의 심각한 TCs의 발생 빈도는 감소하였으나, 1923년 이후 미국의 폭풍해일¹⁵⁾ 이벤트의 발생빈도는 증가하는 양상을 보였고, 아라비아해의 심각한 폭풍해일의 증가가 최근 나타나고 있으며, 최근 수십 년 동안 동아시아와 동남아시아에서의 상륙하는 TC 강도가 증가하였음(IPCC, 2019).
- ☉ 최근 수십년 사이 동중국해, 일본열도 및 한반도에서의 TC에 따른 피해는 증가한 반면, 필리핀, 남중국해에서는 감소하는 경향을 보임(Colbert et al., 2015).
- ☉ 실제로 지난 40여년간 전 세계 해양에서 출현한 TC의 발생빈도의 경향을 살펴보면, 동태평양 저위도, 북태평양 서쪽 해역, 오스트레일리아 인근 해역 등을 중심으로 발생빈도가 줄고 있는 반면, 대서양 저위도 및 우리나라를 포함한 동아시아, 인도양과 아라비아해 등을 중심으로 출현빈도가 증가하고 있음을 확인할 수 있음(Murakami et al., 2020) (그림 3-5).
- ☉ 지난 30년동안 북반구와 남반구 각각에서 TC의 최대치가 나타나는 위치가 10년당 약 50~60 km 속도로 극쪽으로 이동하고 있으며(Kossin et al., 2014), 온난한 시기에 북태평양 서쪽 해역에서의 TC의 극속 이동은 더욱 강화될 것으로 전망하고 있음(Kossin et al., 2016).
- ☉ 전 지구적으로 TC 발생 빈도는 21세기 동안 거의 변화가 없거나, 감소될 것으로 예상되고 있으나, TC의 최대 풍속 및 강수량은 지역별, 특정된 전망 자료에 따르면 증가할 것으로 전망됨(IPCC, 2019).
- ☉ 21세기말까지의 TC에 대한 전망은 1) 해양온난화의 영향에 따라 TC의 평균 강도는 증가할 것이며 대형 혹은 초대형 TC의 분포가 증가할 것, 2) 일부 모델에서는 TC의 발생 빈도가 감소할 것으로 전망하고 있지만, TC 발생빈도 전망의 불확실성은 존재, 3) 장기적인 해수면 상승의 영향으로 TC에 따른 폭풍해일의 세력이 더욱 강화될 것으로 보고하고 있음(IPCC, 2019).

15) 폭풍해일: 태풍이나 저기압의 기압강하에 따르는 해면의 상승작용이나 강풍에 의한 해수의 퇴적작용에 의해 해면이 평상시의 조석보다 상승하는 현상.

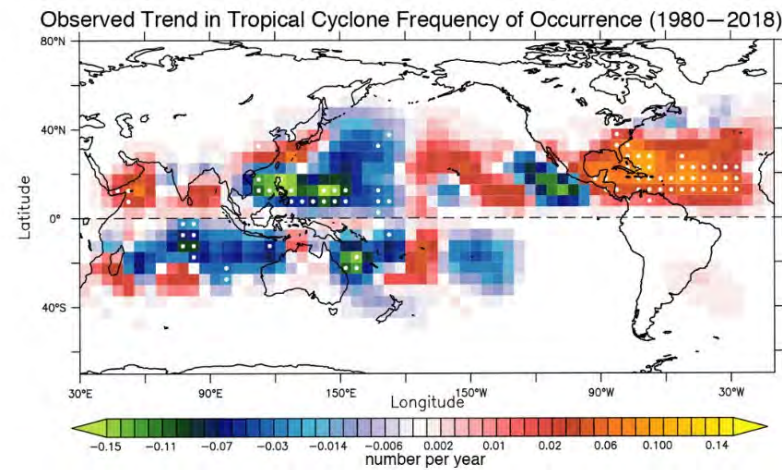


그림 3-5. 1980~2018년에 전 세계 해양에서 TC의 발생빈도 경향. [출처 : Murakami et al., 2020]

- TC의 강수량 및 해일 세력 증가에 따른 리스크는 더욱 증가할 것으로 전망됨. 폭풍해일의 세력증가로 인하여 향후 산호초와 맹그로브 숲의 손실은 매우 증가할 것이며 해양생물 서식지와 수산업에도 영향을 줄 것으로 예상됨. 폭풍성 해일 및 그와 관련된 기상현상에 따라 수산생물은 서식지를 이동하거나 재분포 될 것으로 전망되고 있음(IPCC, 2019).
- TC의 발생빈도와 피해는 비교적 선형적 관계를 가지고 있지만, TC의 세기와 피해는 비선형적인 관계임. 즉, TC의 풍속이 약 10% 증가하였을 경우 그에 따른 손실은 30~40% 증가할 것으로 전망하고 있음 (Strobl, 2012).

3-1-2. 우리나라 수산업에 영향을 주는 이상기후 발생 원인 고찰

- 우리나라 해역의 표층수온은 장기적으로 겨울철 수온 상승이 지배적인 경향을 나타내었고 여름철 수온 상승에 비하여 두배 이상 높은 상승 경향을 나타내었음(Kang, 2000; Lee & Kim, 2013; Min & Kim, 2006; Kim et al., 2011).
- 하지만 2010년에 접어들면서 우리나라 주변 해역의 계절별 수온 상승 경향에 큰 변화가 나타남. 과거 수온 상승을 주도하였던 겨울철의 수온 상승은 감소하거나 매우 약화되었으며, 여름철의 수온상승은 큰 폭으로 상승하였음(Han & Lee, 2000) (그림 3-6).
- 이와 같이 계절별 수온 상승 경향의 큰 변화는 2010년 이후 우리나라 주변해역에서 나타난 이상 고수온 현상 및 이상 저수온 현상과 밀접한 관련이 있음.
- 여름철 이상 고수온 발생과 관련된 원인은 크게 세가지로 요약할 수 있음. 1) 폭염의 강도와 지속기간 증가, 2) 저위도로부터 열을 수송하는 대마난류의 세기 증가, 3) 여름철 연직혼합에 영향을 주는 태풍의 통과 감소 등이 원인으로 지적됨.

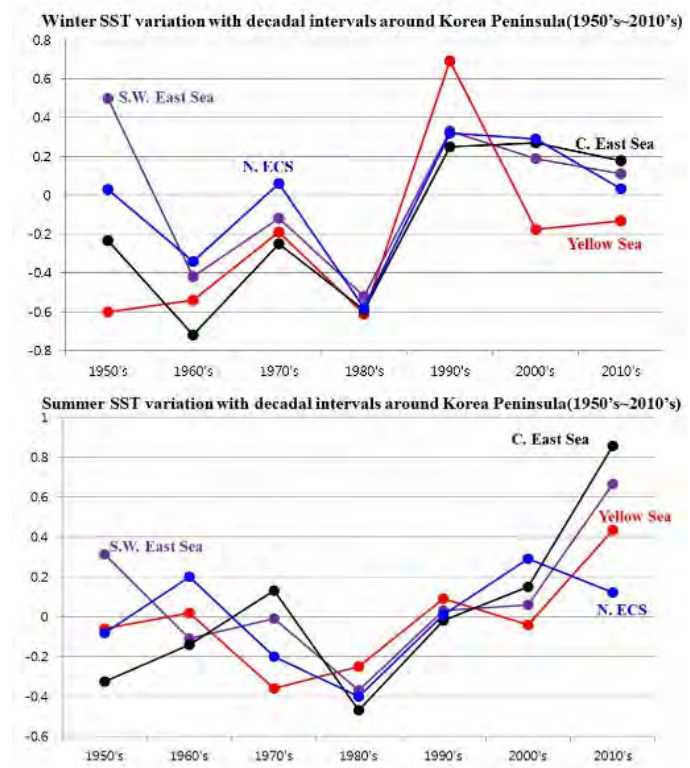


그림 3-6. 1950년대부터 2010년대까지 동해중부해역(C. East Sea), 동해남부해역(S.W. East Sea), 황해(Yellow Sea) 및 동중국해(N. ECS)에서 겨울철과 여름철의 10년 단위 평균 표층수온 변동 추이. [출처 : Han & Lee, 2020]

- 전국적으로 발생하는 폭염의 경우 티벳 고기압¹⁶⁾과 북태평양 고기압이 한반도 상층에서 중첩되어 위치 하면서 지상부터 상층까지 키 큰 고기압이 형성될 때, 한반도에 고기압 돔이 발생하면서 고기압 역내의 하강기류에 의해 한반도 전체의 온도가 올라가는 일명 열돔(heat-dome) 현상¹⁷⁾의 중요한 원인으로 알려져 있음(민과 장, 2021). 하지만, 우리나라 폭염은 열돔 현상 뿐만 아닌 다양한 기상요소의 복합적인 영향에 따라 다양한 형태로 나타나고 있으며, 이와 같은 폭염과 관련된 기상 현상이 2010년 이후 더욱 뚜렷하게 우리나라에 나타나고 있음(김 등, 2016).
- 특히 여름철 동아시아 몬순에 의해 영향을 받는 우리나라는 최근 기후변화에 따라 장마의 시작과 종료 시기의 변화가 크게 나타나고 있어 폭염 발생에 대한 예측과 대비가 힘들어지고 있음. 또한 우리나라의 폭염은 동아시아 대륙 규모의 넓고 강한 형태로 발생하는 경향이 있지만 생성, 지속, 소멸 과정에 대한 학술적 연구는 매우 부족함(이명인, 2017).
- 기상청에서 제공하는 최근 50년간(1973~2022) 우리나라의 폭염 발생 일수를 살펴보면 지속적으로 상승하는 경향을 보이고 있으며, 특히 1994년을 제외하면 대부분 폭염 발생 일수가 높은 시기가 2010년대와 2020년대에 집중하고 있음을 확인할 수 있음(그림 3-7).
- 또한 우리나라에 지속적으로 저위도로부터의 열을 공급하는 역할을 하고 있는 대마난류는 일반적으로

16) 티벳 고기압 : 티벳에서 만들어지는 뜨거운 고기압으로, 이 고기압이 여름철 동쪽으로 이동해 북태평양 고기압과 합쳐지면 동아시아의 여름에 폭염의 주 원인이 됨.
17) 열돔 현상 : 지상 10km 이내 상공에서 발달한 고기압이 정체됨으로써 반구 모양의 열막이 형성되어 뜨거운 공기를 그 자리에 가둬 놓는 기상 현상.

여름~가을에 강한 세력을 보이고 겨울~봄에 약한 세력을 나타내는 계절변동성을 가지고 있음. 대한해협 양극단의 조위관측 결과로부터 추정된 대한해협에서의 여름철(6~8월) 평균 대마난류의 수송량을 살펴보면 1980년대 중후반부터 지속적으로 강한 세력을 유지하고 있으며, 특히 2010년대에는 대부분의 해에서 매우 강한 세력을 나타내고 있음을 확인할 수 있음(그림 3-8).

- ☉ 여름철 태풍 통과는 양식장 시설 피해 등 중요한 수산재해 요소이지만, 일시적으로 표층과 저층의 수온을 혼합시켜 수온을 하강시키는 등 고수온 피해 저감에는 중요한 역할을 하고 있음.

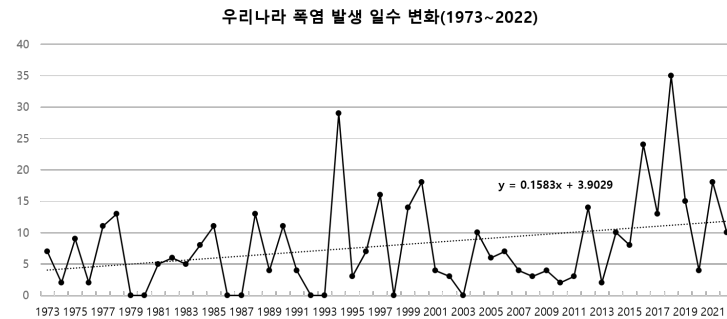


그림 3-7. 최근 50년간(1973~2022) 우리나라 폭염 발생 일수 변화 경향. [출처 : 기상청]

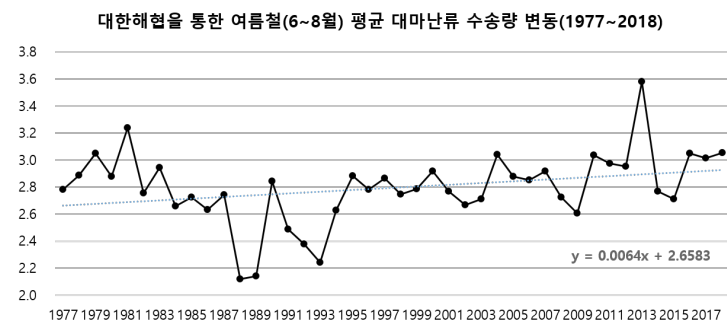


그림 3-8. 최근 42년간(1977~2018) 대한해협을 통과한 대마난류의 세기 변화. [출처 : Shin et al., 2022]

- ☉ 태풍의 경우, 평년에는 약 25개 정도 발생하여 우리나라에 직간접적인 영향을 주는 것은 1년에 3~4개 정도임(기상청, 2023). 이례적인 폭염에 의해 이상수온 특보 발령 기준이 마련되는 계기가 된 2016년 여름철 폭염 이후를 살펴보면, 극심한 폭염에 따른 이상 고수온이 발생한 2016년은 여름철 우리나라에 직간접적인 영향을 준 태풍이 없었으며, 2018년에는 7월에 영향을 준 태풍은 없었음.
- ☉ 7월에 태풍이 우리나라에 직접 영향을 준 해는 최근 7년(2016~2022) 중 3년으로 2017년, 2019년 및 2022년이었음. 8월은 2018년 이후 직간접적으로 영향을 주었지만, 일부 태풍은 일본 열도를 직접 통과하면서 반시계방향의 대기 순환을 만들어 동해 외해역의 상대적인 고수온을 우리나라 쪽으로 수송하여 고수온 현상을 오히려 증가시키는 계기가 되기도 하였음.

- ☉ 최근 겨울철 이상 저수온 현상은 간헐적으로 강하게 발생하는 우리나라의 겨울철 한파와 깊은 관련성이 있으며, 이른 겨울철 한파는 급격한 북극 온난화에 따른 영향으로 판단됨.
- ☉ 최근 서해와 남해에서 나타난 이상 저수온 현상(2017~2018년 겨울)과 북극진동의 단기 변동성을 살펴본 결과, 6~7일의 시간차를 가지고 유의미한 상관관계가 나타남을 확인하여 북극온난화에 따른 기상 변화가 우리나라 이상 저수온에 영향을 주고 있음을 확인한 바 있음(Han et al., 2019).
- ☉ 급격한 북극온난화에 따른 북극해의 수온 상승은 대기로의 수증기 증가를 유발하고 유라시아 대륙으로의 수증기를 이동시키는 역할을 하고 있음. 상대적으로 많은 수증기는 시베리아 고기압 세력의 중심부에 많은 적설을 유발하게 되고, 이로 인한 알베도 효과¹⁸⁾(Albedo effect)로 인하여 시베리아 고기압의 세력이 증가함. 실제로 급격한 북극 온난화가 심화된 2000년대 중후반부터 시베리아 고기압의 세력은 하강 경향에서 상승 경향으로 다시 변동하고 있음을 확인할 수 있음(Han et al., 2023) (그림 3-9).

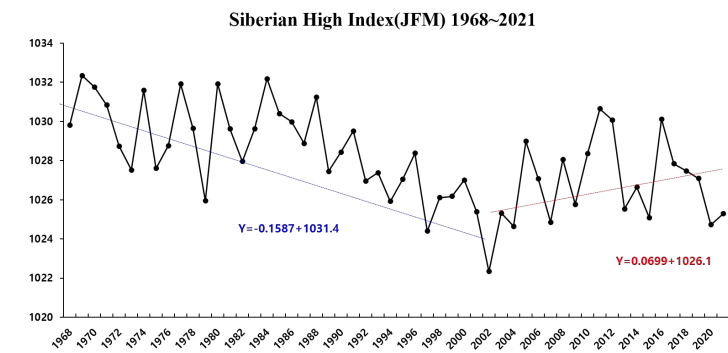


그림 3-9. 최근 55년간(1968~2022) 시베리아 고기압 세력 지수 변동. [출처 : Han et al., 2023]

- ☉ 이와 같은 시베리아 고기압 세력 강화는 우리나라 겨울철의 기온 하강 및 풍속 감소에 직접적인 영향을 줄 것으로 판단되며, 동아시아 겨울철 몬순 지수 변화에도 영향을 줄 것으로 판단됨. 실제로 동아시아 겨울철 몬순 지수의 변동 경향을 살펴보면 급격하게 하강하는 경향을 보였던 동아시아 겨울철 몬순 지수가 2000년대 후반부터 감소 경향이 뚜렷하게 약해지고 있음을 확인할 수 있음(Han et al., 2023) (그림 3-10).
- ☉ 실제로 시베리아 고기압 세력의 강화에 따른 영향이 우리나라에 나타나고 있는가를 확인하기 위하여 도시화에 따른 바람 세기의 영향이 없는 울릉도 및 제주도 지역의 겨울철 풍속 변화를 살펴봄. 2000년대 중반을 경계로 울릉도의 겨울철 풍속은 지속적으로 하강하는 경향에서 다시 강해지는 경향으로 변화하고 있음을 확인할 수 있고, 제주도의 겨울철 풍속도 급속하게 하강하는 경향에서 하강 경향이 매우 둔해지고 있음을 확인할 수 있음(Han et al., 2023) (그림 3-11).
- ☉ 기상청에서 제공하는 1973년부터 2022년까지 과거 50년간 우리나라의 한파 발생 일수를 살펴보면 1970~1980년대에 높은 한파 발생이 1980년대 후반부터 급격하게 줄어들었지만, 2000년대 중후반부터 다시 한파 발생 일수가 증가하고 있으며, 2010년대에는 2014년, 2015년, 2019년 등 3년을 제외

18) 알베도 효과 : 어느 물체의 표면에 도달한 태양빛과 지구로부터 반사한 태양빛의 비율로 인하여 지구에서 발생하는 기온 변화.

하고는 대부분 한파 발생이 잦게 일어났음을 확인할 수 있음(그림 3-12).

- ㉞ 앞서 살펴본 폭염, 태풍, 한파 등의 최근 발생 경향에 따라 2010년대 이후 우리나라 해역에서 다양한 이상 기후에 따른 영향들이 나타나고 있으며, 이로 인하여 양식생물의 대량폐사 등 수산재해가 동시에 발생하고 있음.



그림 3-10. 최근 55년간(1968~2022) 동아시아 겨울철 몬순 지수 변동. [출처 : Han et al., 2023]

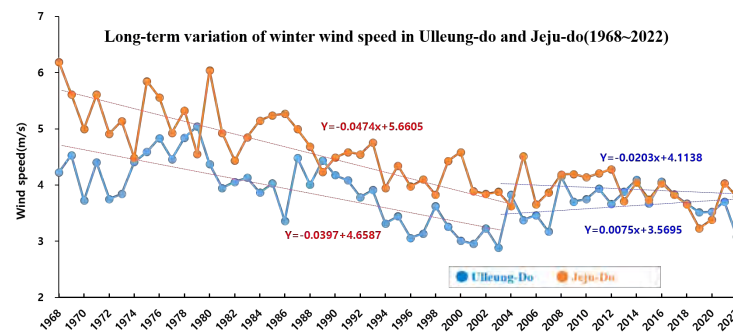


그림 3-11. 최근 55년간(1968~2022) 울릉도 및 제주도의 겨울철 평균 풍속의 장기 변동 경향. [출처 : Han et al., 2023]



그림 3-12. 최근 50년간(1973~2022) 우리나라 한파 발생 일수 변화 경향. [출처 : 기상청]

3-2. 이상기후 발생과 양식 피해 현황

3-2-1. 이상수온 및 태풍 발생 현황

- ㉞ 최근 심화되고 있는 기후변화의 영향으로 여름철에는 고수온, 겨울철에는 저수온이 빈번하게 발생하여 연안과 내만에 위치한 양식장을 중심으로 양식생물 피해가 매년 끊이지 않고 있음.
- ㉞ 여름철에 고수온이 발생하면 양식생물의 한계 수온을 상회하게 되어 생체 내 대사와 면역력 등 생리 기능의 약화로 질병에 노출되기 쉬운 상태가 되어 폐사하게 됨.

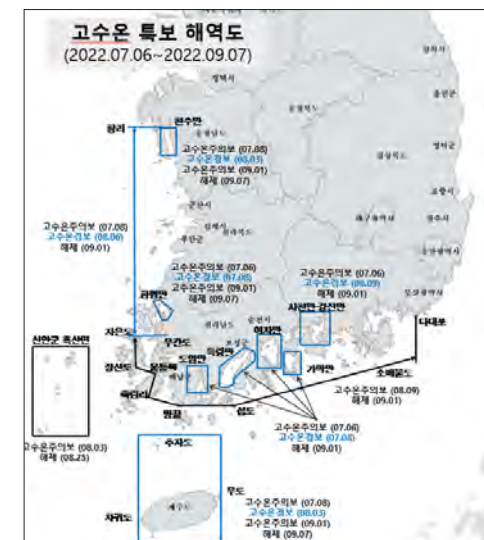


그림 3-13. '22년 고수온 특보 해역도.



그림 3-14. '22/23년 저수온 특보 해역도.

- ㉞ 국립수산물과학원은 2017년에 고수온과 저수온 특보 기준을 마련하여 매년 대응하고 있음.
- ㉞ 2022년 여름철 고수온 특보 기간은 '22.7.6~'22.9.7로 64일간 지속되었으며 전년('21.7.15~'21.8.26)에 비해 21일 증가하였음(그림 3-13).
- ㉞ 2022/2023년 겨울철 저수온 특보 기간은 '22.12.18~'22.3.6로 79일간 지속되어 전년('21.12.28~'22.3.11)에 비해 5일 증가하였음(그림 3-14).
- ㉞ 태풍은 고수온기 해양의 성층 구조를 수 일 이내의 짧은 시간동안 교란시켜 강풍에 의한 큰 파랑 발생, 수괴의 상·하층 혼합, 표층수온 하강, 영양염의 표·저층 순환 등의 해양 물리적 변동에 큰 영향을 미치는 자연 현상임.
- ㉞ 지구온난화에 따라 태풍 발생 빈도는 감소하지만 태풍의 강도는 반대로 증가하는 경향이 나타나고 있음. 특히 북서태평양에서 지난 37년간(1977~2013) 육지에 상륙한 태풍의 강도가 12~15% 증가하였고, 그 원인은 지구온난화에 따른 해표면 수온의 장기적인 상승 때문으로 보고됨(Mei & Xie, 2016).

- ☉ 태풍 발생은 고수온, 저염분수, 냉수대, 빈산소, 적조와 같은 수산재해 뿐만 아니라 수산자원 변동에도 직접적인 영향을 미침.
- ☉ 국립수산물품질관리원은 태풍 유입에 따른 연근해 생태계 변동 요인 및 영향을 파악하기 위한 연구를 수행 중이고, 태풍 통과 중 수산재해 발생을 실시간으로 관측할 수 있도록 웨이브 글라이더, 수중 글라이더 등을 활용하고 있음.

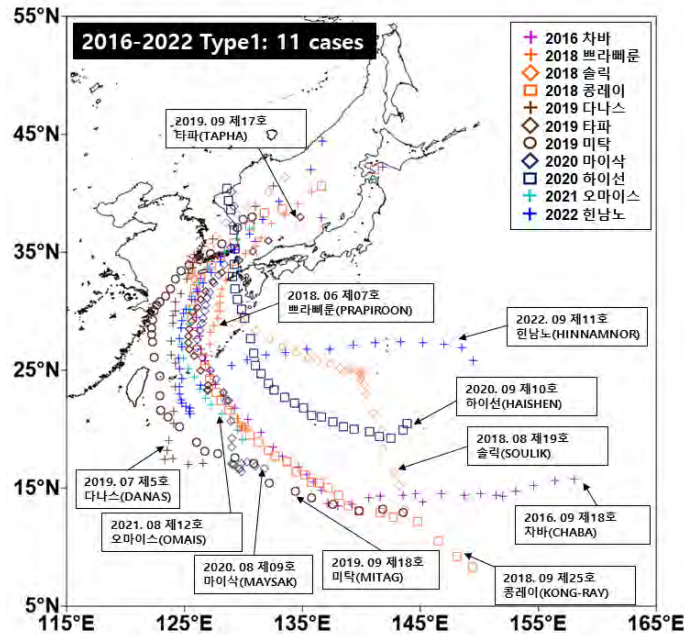


그림 3-15. 2016~2022년 우리나라 태풍 유입 경로.

- ☉ 2016년 이후 우리나라에 직접 영향을 준 태풍은 총 13개였고, 이중 11개가 우편향하여 동해로 진출하는 태풍(Type I)이었으며(그림 3-15), 해역별 탁월 풍향과 재해 영향을 분석한 결과, 태풍 유형에 따라 냉수대 발생과 연안 수온 변화, 적조 영향이 다르게 나타남(표 1).

표 1. 태풍 유형별 수산재해 단기 영향

태풍 유형	Type I (우편향 동해 진출 태풍)			Type II (서해 북상 태풍)		
	동해	서해	남해	동해	서해	남해
탁월 풍향	남풍	북서, 북풍	서풍	동, 남동풍	남풍	남풍
재해 영향	냉수대 발달	연안수온 하강(일시적)	적조 약화	동해남부 냉수대 발달	수온 상승	수온 상승, 외해 적조 유입 가능성 증가

3-2-2. 이상기후에 따른 양식 피해 현황

- ☉ 최근 12년간(2011~2022) 자연재해에 따른 피해 규모는 총 2,382억원이었고, 자연재해¹⁹⁾의 종류는 고수온, 적조, 저수온, 태풍, 이상조류, 팽생이모자반 유입 등으로 다양해짐.
- ☉ 2011~2022년 가장 큰 피해를 준 자연재해는 고수온이며, 그 피해액은 1,250억원으로 전체 피해액의 53%였고 다음으로 적조는 피해액이 492억원(21%) 저수온은 268억원(11%)의 피해가 발생하였음. 빈산소 수괴와 이상조류는 재해의 5%로 피해금액은 120억원과 118억원으로 각각 나타났음.
- ☉ 양식생물 피해가 가장 많았던 2018년도에는 고수온, 저수온, 한파로 713억원의 피해가 발생하였으며, 그중 고수온의 피해는 605억원, 피해 지역은 경남, 전남, 충남, 제주도 850어가, 피해물량은 넙치, 전복, 조피볼락, 돔류 등 63,963천 마리가 폐사하였음.
- ☉ 2021년 1~4월 팽생이모자반 유입(신안, 진도)에 의해 김 403어가 99,237척, 다시마 109어가 9,829줄, 톳 108어가 7,742줄, 미역 3어가 205줄 피해 발생으로 피해액은 20억원이었음.
- ☉ 2021년 고수온 피해는 통영, 거제, 고성, 남해, 하동, 여수, 완도, 신안, 고흥의 598어가 어류 17,970천 마리, 굴·홍합 697줄의 피해가 발생하였으며, 피해금액은 217억원이 발생하였음. 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) 굴 양식에서 이상조류(영양염류 부족, 빈산소수괴)의 영향으로 374어가에서 96억원의 피해가 발생하였음.
- ☉ 이와 같이, 2021년도에는 팽생이모자반 유입, 고수온, 이상조류 등의 자연재해로 416억원의 피해가 발생하였음.
- ☉ 2021년도 피해복구 비용은 전체 3,815어가에 복구소요액 360억원으로 국고지원액은 122억원이 소요 되었음(불법시설물에서 발생한 피해·입식신고 미이행어가의 피해는 피해 산정 대상에서 제외, 재해보험금을 지급받는 보험 가입어가는 복구비 지원 대상에서 제외).
- ☉ 2022년은 이상조류에 인한 해조류 피해가 전남 해남군에서 발생하였으며, 피해원인으로 김 양식장은 어장 내 구조류인 실린드로테카(*Cylindrorthecla closterium*)의 대량발생에 따른 낮은 영양염 농도가 지속되면서 김 황백화²⁰⁾ 피해 발생이 추정되었고, 다시마 양식장은 영양염 부족으로 짝늑음, 섹택이상 및 생장부진 발생이 추정되었음.
- ☉ 피해규모는 653어가에서 김, 다시마 양식장에서 피해가 발생하여, 김 527어가, 2,393.5ha, 47,871척, 피해 금액은 4.8억이었고, 다시마 139어가, 21.4ha, 8,420줄, 피해 금액은 1.7억원의 피해가 발생하였으며(표 2), 피해복구 국고 지원액은 250백만원이었음(표 3).
- ☉ 2022년 3월 강풍 발생으로 전남도 완도지역 김, 미역, 다시마 등 해조류 양식장 시설 파손 및 업체탈락 등 생물 폐사가 발생하여 413어가, 4.4억원의 피해 발생함. 보다 구체적으로 시설물에 대한 피해는 김 70어가, 665척, 미역 2어가 25줄, 다시마 3어가, 120줄, 톳 3어가, 22줄, 파래 1어가 74줄이었으며, 양식생물은 김 69어가, 641줄, 미역 14어가 474줄, 다시마 325어가 10996줄, 톳 3어가 32줄이었음(표 4).

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

20) 김 황백화 : 김의 빛깔이 누렇게 변화하며 김 생산성 저하가 나타나는 현상으로 질소 영양염 농도가 김 성장에 필요한 양보다 부족해서 일어나는 현상

◎ 피해 중, 국고지원 대상은 225어가로 복구 소요액은 427백만원(국비 146, 지방비 63, 융자 164, 자부담 55)였으며, 국고 지원액은 146백만원이었음(표 5).

표 2. 2022년 이상조류로 인한 해조류 피해현황

시·군	품종	양 식 현 황			피 해 현 황				비 고
		어가수	면적(ha)	시설량 (책·줄)	어가수	면적(ha)	피해량 (책·줄)	금 액 (천원)	
전남도 (해남군)	합계	877	10,626	232,074	653	2,603.9	56,291	647,110	13어가 중복 피해
	김	637	9,607	192,140	527	2,393.5	47,871	478,710	
	다시마	240	1,019	39,934	139	210.4	8,420	168,400	

표 3. 2022년 이상조류로 인한 해조류 피해 국고 지원액

지역	품종	물 량 (책·줄)	어가수	복구소요액(천원) * 보조 50%(국고 35, 지방비 15), 융자 30%, 자담 20%					비 고
				계	국 고	지방비	융 자*	자 담	
전남도 (해남군)	합계	47,212	382	631,440	250,250	107,250	164,364	109,576	13어가 중복피해
	김	39,636	291	457,180	181,300	77,700	118,908	79,272	
	다시마	7,576	104	174,260	68,950	29,550	45,456	30,304	

표 4. 2022년 강풍 피해현황

품종	양 식 현 황			피 해 현 황				비 고
	어가수	면적	시설(사육)량	어가수	면적	피해량	금 액	
합 계	6,778	26,090.45	785,918	413*	5,672.2*	13,049	446,259	* 77어가, 2,962.2ha 시설, 생물 중복피해
시 설	6,778	26,090.45	785,918	79	3,302.2	906	203,931	
김	389	11,960	153,427	70	2,154.2	665	175,442	
미 역	3,288	12,147	406,999	2	498.0	25	3,632	
다시마	2,986	1,347	213,632	3	255.0	120	19,800	
툃	103	117	9,700	3	55.0	22	2,596	
파 래	12	519.45	2,160	1	340.0	74	2,461	
생 물	6,766	25,571	783,758	411	5,332.2	12,143	242,328	
김	389	11,960	153,427	69	2,154.2	641	6,410	
미 역	3,288	12,147	406,999	14	517.0	474	12,798	
다시마	2,986	1,347	213,632	325	2,606.0	10,996	219,920	
툃	103	117	9,700	3	55.0	32	3,200	

표 5. 2022년 강풍 피해 복구비 지원

품종	어가수 (어가)	물 량 (책·줄)	복구소요액(천원)				
			계	국 고	지방비	융 자	자 담
합계	225*	9,630	427,064	145,950	62,550	163,625	54,939
시 설	77	901	217,760	60,200	25,800	111,541	20,219
김	69	662	188,904	52,850	22,650	96,007	17,397
미 역	2	25	3,359	700	300	1,997	362
다시마	3	120	20,369	5,250	2,250	10,889	1,980
툃	2	20	2,531	700	300	1,296	235
파 래	1	74	2,597	700	300	1,352	245
생 물	223	8,729	209,304	85,750	36,750	52,084	34,720
김	68	638	6,190	2,100	900	1,914	1,276
미 역	13	454	15,624	6,650	2,850	3,676	2,448
다시마	140	7,609	184,590	75,950	32,550	45,654	30,436
툃	2	28	2,900	1,050	450	840	560

◎ 2022년 고수온 발생으로 전남도 신안 흑산지역에 조피볼락 폐사가 발생하여 64어가, 851천미, 956백만원 피해가 발생하여(표 6, 그림 3-16), 복구비 317백만원의 국고가 소요되었음(표 7).
* 고수온 특보발령 : (주의보) 7.6, (경보) 7.8, (해제) 9.7 / ** 흑산면 : (주의보) 8.3, (해제) 8.25

표 6. 2022년 고수온 피해현황

품종	양 식 현 황			피 해 현 황			
	어가수(어가)	면적(ha)	사육량(천마리)	어가수(어가)	면적(ha)	피해량(천마리)	금액(백만원)
조피볼락	144	135.9	20,719	64	9.4	851	956



그림 3-16. 조피볼락 폐사 피해 사진

- ㉟ 2023년 저수온 발생*으로 전남도 여수, 경남도 남해 지역에 어류(돔류, 조기류) 폐사가 발생하여 61어가, 1,926천미, 4,808백만원 피해가 발생하였음(표 8, 그림 3-17).
- * 전국 저수온 특보현황 : (주의보) '22.12.18., (경보) 12.21., (해제) '23.3.6.
- ** 여수(가막만)·남해(강진만) 특보현황(주의보/경보/해제) : '23.1.4., 1.26., 3.6. / '23.1.24., 1.31., 3.6.

표 7. 2022년 고수온 피해 복구 소요액

시·군	구분	어가수 (어가)	물량 (천마리)	복구소요액(백만원)				
				계	국고	지방비	융자*	자담
전남도(신안군)	조피볼락	60	792	891	317	136	263	175

표 8. 2023년 저수온 피해현황

지역	품종	양식현황			피해현황			
		어가수(어가)	면적(ha)	사육량(천마리)	어가수(어가)	면적(ha)	피해량(천마리)	금액(백만원)
전남 여수	돔류·조기류	261	186	74,323	59	19.24	1,925	4,803
경남 남해	돔류	92	45.9	37,067	2	0.63	1	5



그림 3-17. 어류 폐사 피해 사진.

표 9. 2023년 저수온 피해 복구 소요액

시·군	구분	어가수 (어가)	물량 (천마리)	복구소요액(백만원)				
				계	국고	지방비	융자*	자부담
전남도(여수시)	어류(돔류·조기류)	55	1,825	4,044	1,238	531	1,365	910

* 재해복구자금(5년까지 10년 상환, 연리 1.5%) 지원

- ㉟ 피해를 입은 61어가 중 4어가(여수2, 남해2)는 양식수산물재해보험 가입, 2어가(여수)는 어업이 주생계 수단이 아닌 어가로 복구에서 제외됨(표 9).

- ㉟ 복구 소요액은 4,044백만원(국비 1,238, 지방비 531, 융자 1,365, 자부담 910)으로 이중 국고 지원액은 1,238백만원이었음.
- ㉟ 이와 같이, 자연재해에 의하여 피해가 발생하면, 국고지원으로 양식어업인들의 복구비를 지원하고 있음.
- ㉟ 복구비 국고지원 기준은 어업재해*로 인해 시·군별 수산 양식물 및 어업용 시설 피해액 3억원 이상** 발생시 국가지원 대상(「농어업재해대책법 시행규칙」 제3조)
- * 이상수온(異常水溫), 이상조류, 적조현상, 태풍, 어업재해대책 심의위원회가 인정하는 자연현상 등으로 인하여 발생하는 수산양식물 및 어업용 시설의 피해
- ** 「농어업재해대책법 시행규칙」 제3조제1항제1호(이상조류(異常潮流)·이상수온(異常水溫)으로 인하여 수산양식물의 피해가 있는 경우로서 그 피해액이 3억원 이상인 경우)
- ㉟ 재해복구비(융자금 포함)는 재난복구비용 산정 기준단가* 및 「어업재해 피해조사·보고 및 복구지원 요령(해수부 예규)」에 따라 산출
- * 「해수부 자연재난 복구비용 산정기준(단가)」(해수부 고시 제2022-137호, '22.8.11)
- ㉟ 기타 재해복구비 재원 부담률 등은 「자연재난 구호 및 복구비용 부담기준 등에 관한 규정(대통령령 제32223호, '21.12.16)」에 따라 산출
- ㉟ 불법시설물에 발생한 피해, 입식신고 미이행어가, 재해보험금을 지급받는 보험 가입어가 등 제외* 함
- * 「자연재난 구호 및 복구비용 기준규정」 제6조, 「어업재해 복구지원요령」 제7조, 「농어업재해대책법」 제4조
- ㉟ 복구비 지원항목은 수산생물 등의 입식비로 보조 50%(국비 70, 지방비 30), 융자 30%, 자담 20%로 구성되어 있음.

3-3. 수산재해 대응 현황 및 추진 방향

3-3-1. 수산재해 과학적 대응 현황

- ㉟ 국립수산물과학원은 2003년부터 전국 연안에 실시간 해양환경 어장정보시스템 설치 및 운용으로 양식 피해 우려해역에 대한 실시간 모니터링과 자료 및 정보를 제공해오고 있음.
- ㉟ 2014년부터 유관기관, 지자체 및 민간에서 고유 목적에 따라 구축한 실시간 수온관측 자료를 연계하여, 2023년 5월 현재 전국 연안의 180개 실시간 수온 관측망을 운영하고 있음(그림 3-18).
- ㉟ 실시간 수온관측 장비는 관측센서, 전원공급 모듈, 통신 모듈 등으로 구성된 본체와 계류 또는 양식장 거치를 위한 정점 고정 설비로 구성되어 있고, 관측 자료는 LTE와 같은 무선통신망을 통해 국립수산물과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템 자료관리 서버로 전송되어 데이터베이스화되고, 자료 검·보정 과정을 거쳐 홈페이지와 수온정보서비스 앱을 통해 제공됨.

- ㉟ 관측 수심은 기관별, 정점별로 관측 목적에 따라 다르게 설정이 되어 있음. 양식장 환경 모니터링을 주된 목적으로 하는 국립수산물과학원 실시간 시스템은 동해의 경우 표층 3~5 m, 중층 15~20 m, 저층 25~30 m에 관측 센서가 위치하고, 남해는 표층 2.5~5 m, 중층 8~10 m, 저층 15 m, 서해는 표층 2~5 m, 중층 10 m에 위치함. 해표면의 실시간 파고 측정이 주 목적인 기상청 파고부이는 수온 관측 센서가 표층 0.5~1 m에 위치하며, 어장 환경을 모니터링하기 위해 전라남도에서 설치한 전남도 실시간 어장관측 장비는 표층 1~3 m 수심을 관측함. 한국수력원자력 해양부이는 수심 2.5 m의 수온을 관측함.



그림 3-18. 국립수산물과학원 실시간 해양환경 어장정보시스템 정점도(2023.5. 현재, 180개소).

- ㉟ 실시간 해양환경 어장정보시스템 홈페이지를 통해 제공되는 관측자료는 국립수산물과학원, 기상청, 한수원 등은 30분 간격, 전남도는 1시간 간격으로 실시간 수온 정보가 제공됨.
- ㉟ 실시간 수온 자료는 이상수온 발생을 모니터링하는 가장 기초적인 자료이고, 인공위성 수온 관측자료 및 선박 관측자료와 함께 사용되어 우리나라 연안과 근해의 장·단기 수온 변화를 시·공간적으로 정밀하게 분석하고 정확도 높은 예측자료 생산을 위한 중요한 자료로 활용됨.
- ㉟ 전국 연안의 실시간 수온 관측소 중 10년 이상 관측 자료가 축적된 관측소는 국립수산물과학원이 운영하고 있는 32개소 중 동해 5개소, 서해 5개소, 남해 15개소로 약 78%인 20개소가 10년 이상 관측자료를 안정적으로 축적하고 있음(표 10). 2010년 이후에 파고부이를 구축하기 시작한 기상청은 15개소가 10년 이상 관측 자료가 축적되어 있고, 그 외에 지자체와 민간의 실시간 관측소는 운영 기간이 10년 이내임.
- ㉟ 국립수산물과학원은 연안역 이상수온의 발생을 사전에 예측하여 대응시간을 확보하고자 수치모델 기반의 고해상도 예측시스템을 구축해오고 있음.

표 10. 전국 연안 10년 이상 관측 실시간 수온 관측소

해역	관측기관	관측소	관측 시작일
서해 (9개소)	수과원 (5개소)	백령도	2006-09-12
		서산 지곡	2008-06-21
		보령 효자도	2005-10-05
		목포	2006-07-03
		해남 임하	2005-10-07
	기상청 (4개소)	인천 이작도	2012-11-28
		태안 신진도	2010-12-18
		보령 삽시도	2010-12-28
		진도 불도	2010-01-01
남해 (24개소)	수과원 (15개소)	거제 가배	2004-12-24
		거제 일운	2008-06-20
		통영 비산도	2008-07-23
		통영 사랑	2005-11-21
		통영 영운	2005-10-26
		통영 풍화	2004-12-24
		통영 학림	2005-09-23
		남해 강진	2005-12-24
		남해 미조	2005-11-23
		여수 신월	2005-11-02
		여수 화태	2008-07-03
		완도 금일	2009-04-16
		완도 노화도	2008-07-24
		완도 청산	2005-10-25
		서제주	2004-07-30
	기상청 (9개소)	부산 다대포	2011-12-05
		거제 해금강	2011-11-25
		통영 두미도	2010-12-30
		통영 한산도	2012-11-28
		여수 금오도	2012-11-28
		제주 용담	2011-11-26
		제주 중문	2011-11-25
		제주 우도	2012-11-28
		추자도	2012-11-28
동해 (7개소)	수과원 (5개소)	양양	2008-07-13
		강릉	2008-07-08
		삼척	2008-07-22
		영덕	2008-11-04
		기창	2008-11-04
	기상청 (2개소)	울진 후포	2012-11-28
		부산 장안	2011-12-05

- ㉟ 2017년부터 운영하고 있는 동해 연안 냉수대 예측시스템은 주로 봄철과 여름철에 동해 연안에서 주변의 수온보다 5℃ 이상 낮은 찬물이 간헐적으로 출현하는 현상을 7일 전에 예측할 수 있도록, 공간해상도 약 3 km의 해양과 대기 수치모델을 결합하여 자동화된 예측시스템을 구축하였고 예측 결과를 홈페이지(www.nifs.go.kr/kodc/rocps/index2.jsp)를 통해 제공하고(그림 3-19), 냉수대 발생 주의보·경보 발령시에도 적극 활용함(그림 3-20).

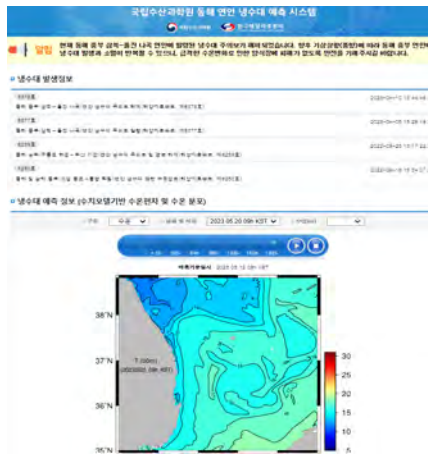


그림 3-19. 동해 냉수대 예측시스템 홈페이지.

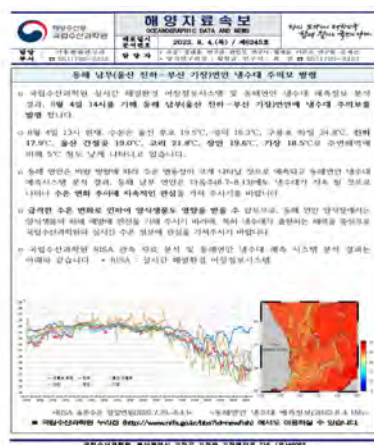


그림 3-20. 동해 남부 연안 냉수대 주의보 발령 속보.

- ㉟ 2020년부터 운영하고 있는 동·서·남 해 고해상도 예측시스템은 해양 수치모델을 기반으로 해역별로 시스템을 각각 구축하여 운영하고 있고, 공간해상도는 동해·서해 500 m, 남해 300 m로 연안과 내만의 수온 변화를 정확도 높게 예측할 수 있도록 구성하였으며, 매일 한차례 1시간 간격의 7일 예측 결과를 생산함(그림 3-21, 3-22).

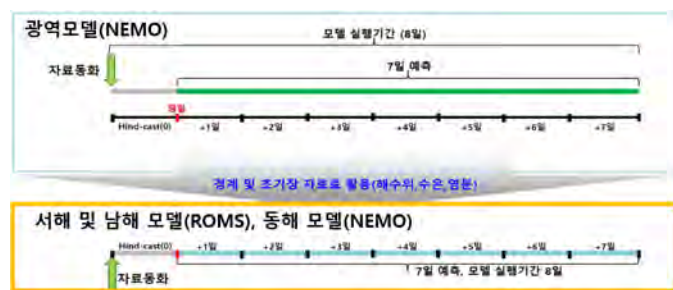


그림 3-21. 동·서·남해 고해상도 예측시스템 운영 모식도.

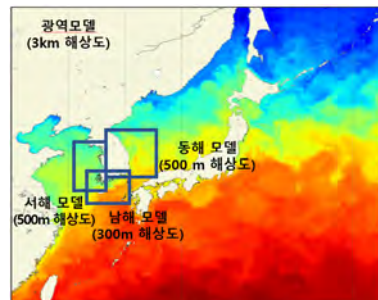


그림 3-22. 동·서·남해 예측시스템 영역.

- ㉟ 고해상도 수치모델 예측 자료는 수온 분포도(그림 3-21) 및 정점별 수온 그래프(그림 3-22) 등으로 가공되어 이상수온 발생 전망과 특보 발표 시 활용됨.

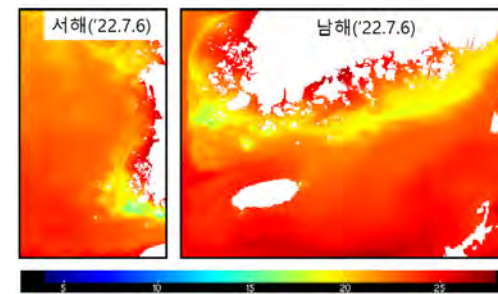


그림 3-23. 2022년 7월 고수온 발생 예측(수온 분포).

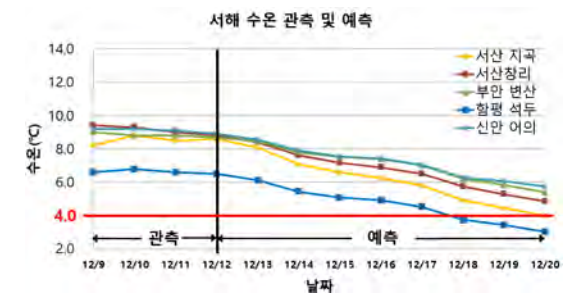


그림 3-24. 2022년 12월 저수온 발생 예측(정점별).

3-3-2. 수산재해 정책적 대응 현황

- ㉟ 국립수산물품질관리원은 2017년에 양식생물의 서식수온과 한계수온, 해역별 수온 변동 경향을 고려하여 여름철 고수온과 겨울철 저수온 특보 기준을 마련하였고, 해양수산부는 이 기준을 “적조 또는 이상 수온 발생 해역 양식어류 긴급방류 지침” 수립 시 반영하였음. 또한 2018년에는 고수온과 저수온 특보 단계에 관심단계를 새롭게 신설하여, 주의보 첫 발표가 예상되는 7일 전·후에 관심단계를 발표하여 이상수온 발생 대응 시간을 확보할 수 있도록 하였음.
- ㉟ 해양수산부는 “고수온·적조 종합대책”과 “저수온 종합대책”을 매년 수립하여 시행하고 있으며, 「재난 및 안전관리 기본법」(법률 제15764호) 제34조의5, 「국가위기관리기본지침」(대통령훈령 제388호)에 따라 “폭염(고수온) 재난 위기대응 실무 매뉴얼” 및 “한파(저수온) 재난 위기대응 실무 매뉴얼”을 2019년에 제정하고 이후 매년 개정본을 배포하고 있음.
- ㉟ 국립수산물품질관리원은 고수온기/저수온기 시작 2~3달 전에 이상수온 발생 전망자료를 작성하여 매년 해양수산부의 “고수온/저수온 종합 대책” 수립과 “폭염(고수온)/한파(저수온) 재난 위기대응 실무 매뉴얼” 개정 시 기초자료로 제공하고 있으며, 아울러 업데이트된 “실시간 수온 관측시스템 현황” 자료와 “고수온기/저수온기 양식방법별 관리 요령” 자료도 함께 제공함.
- ㉟ 국가 위기관리 계획에 따라 고수온/저수온으로 인한 수산 피해가 발생하는 “재산 피해” 위기에 대응하기 위해, 해양수산부는 “폭염(고수온)/한파(저수온) 재난 위기대응 실무 매뉴얼”에 정의된 위기경보 수준(관심, 주의, 경계, 심각)별로 조치를 취하게 됨.
- ㉟ “폭염(고수온)/한파(저수온) 재난 위기대응 실무 매뉴얼”에 의거, 수온을 기준으로 단계가 정의된 “고수온/저수온 특보”는 표 11과 표 12의 특보 기준에 따라 국립수산물품질관리원 기후변화연구과가 주관하여 발표하고, 피해 정도를 고려한 “위기경보”는 해양수산부 어촌양식정책과가 주관하여 발령함.

표 11. 고수온 특보 기준

특보 구분	특보 발표 기준
관심단계	◦ 수온 28℃ 도달이 예상되는 7일 전·후
주의보	◦ 수온 28℃가 도달될 것으로 예측되는 해역 ◦ 전일 수온 대비 3℃ 이상 상승 현상을 보이는 해역 ◦ 평년 대비 2℃ 이상의 급격한 수온 변동을 보이는 해역
경보	◦ 수온 28℃ 이상이 3일 이상 지속되거나, 지속이 예상되는 해역 ◦ 전일 수온 대비 5℃ 이상 상승 현상을 보이는 해역 ◦ 평년 대비 3℃ 이상의 급격한 수온 변동을 보이는 해역

표 12. 저수온 특보 기준

특보 구분	특보 발표 기준
관심단계	◦ 수온 4℃ 도달이 예상되는 7일 전·후
주의보	◦ 수온 4℃가 도달될 것으로 예측되는 해역 ◦ 전일 수온 대비 3℃ 이상 하강 현상을 보이는 해역 ◦ 평년 대비 2℃ 이상의 급격한 수온 변동을 보이는 해역
경보	◦ 수온 4℃ 이하가 3일 이상 지속되거나, 지속이 예상되는 해역 ◦ 전일 수온 대비 5℃ 이상 하강 현상을 보이는 해역 ◦ 평년 대비 3℃ 이상의 급격한 수온 변동을 보이는 해역

3-3-3. 수산재해 대응 향후 추진 방향

- ☉ 이상기후에 따른 이상수온 발생을 정밀하게 모니터링하기 위해 실시간 수온관측망을 지속적으로 확대 하여 2024년 190개소, 2025년은 200개소까지 늘려나가고, 기존의 노후화된 자료 관리 및 정보 제공 서비스를 개편하여 실시간 자료·정보 활용 편의성과 효용성을 대폭 향상시켜 활용도를 높일 계획임.
- ☉ 국립수산물학원은 2021년부터 “한반도 주변 이상수온 정밀 예측기술 개발” 연구를 수행하여 최신 비정형 격자²¹⁾ 수치모델인 SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) 해양모델을 기반으로 공간해상도 100~4,000 m의 비정형 삼각격자로 구성된 이상수온 예측 모델을 구성하였고, 재현과 예측 성능 향상 연구를 수행하고 있음(그림 3-25, 3-26).
- ☉ 2022년까지 격자 및 혼합층 모형 최적화 연구와 대기모델 연계 연구를 수행하였고, 2023년은 관측자료의 활용을 통한 수치모델 오차의 최소화로 최적화된 예측 초기값이 생산가능한 자료동화시스템을 개발하는 연구를 수행할 예정임.

21) 비정형격자 : 복잡한 우리나라 해역 지형 특성을 반영하기 위하여 기존의 정형(사각형) 격자가 아닌 삼각형과 같은 비정형의 격자를 이용함으로써 보다 정확하고 정교한 예측자료를 생산

- ☉ 또한 2022년까지 정점 및 공간 기반 이상수온 발생 예측에 적합한 최신 인공지능 딥러닝²²⁾ 기법을 각각 선별하고 예측 실험을 수행하였으며, 2025년까지 수치모델과 인공지능 각각 기법의 장점을 최대한 살려 “인공지능-수치모델 하이브리드 이상수온 발생 예측시스템”을 개발하여 이상수온 발생 대응에 활용할 예정임.

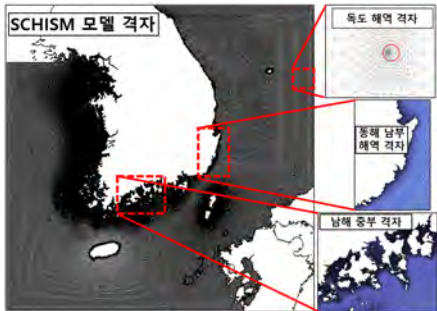


그림 3-25. SCHISM 해양 수치모델 격자.

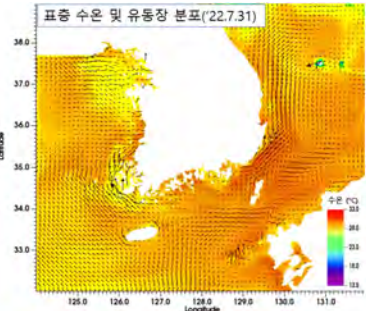


그림 3-26. SCHISM 모델 재현 예시(2022.7.31).

- ☉ 기존의 “폭염(고수온)/한파(저수온) 재난 위기대응 실무 매뉴얼”은 2017년에 수립한 3단계의 고수온/저수온 특보 단계(관심단계/주의보/경보)를 2019년 수립한 4단계의 위기경보 수준(관심/주의/경계/심각)에 끼워맞추다 보니, “관심”, “경보”와 같이 다른 내용의 동일한 용어가 혼란을 야기하고, 이상수온 특보와 위기경보가 같은 기준으로 중복되어 발령됨에 따라 혼선이 발생하였음.

표 13. 위기경보 수준 개편(안)

종류	판단기준	주요활동	비상단계
관심 (Blue)	• 폭염(고수온) 대책기간(5.20.~9.30.)	징후 감시활동	초기대응 단계
주의 (Yellow)	• 고수온 예비주의보가 발표되었을 때	공동 대응 체계 가동	비상대책반 * 주의보 발표 시부터 운영
경계 (Orange)	• 고수온 주의보 해역이 4개 이상 발표되었을 때 • 고수온으로 수산생물 피해 발생이 예상될 때	즉각 대응 태세 돌입	
심각 (Red)	1 단계 • 고수온 주의보가 15개 해역 이상 발표되었을 때 • 고수온 경보가 8개 해역 이상 발표되었을 때 • 고수온 특보가 발표되고 수산생물 피해가 발생되었을 때	총력 대응 체계 강화	비상대책본부
	2 단계 • 고수온 경보가 30개 해역 이상 발표되었을 때 • 고수온 특보 발표 이후 대규모 수산생물 피해가 발생 되었을 때	중대본 운영 요청	중대본 (행안부)

22) 딥러닝 : 컴퓨터가 스스로 외부 데이터를 조합, 분석하여 학습하는 기술

- ㉞ 이에 “폭염(고수온)/한파(저수온) 재난 위기대응 실무 매뉴얼” 수정을 추진하여, 기존 특보 단계 중 관심 단계를 예비주의보로 명칭을 변경하고, 이상수온 주요 발생 해역을 37개 해역으로 구분(그림 3-27)하여, 고수온/저수온 특보 해역이 발표된 정도에 따라 위기경보 수준을 구분(표 13)하고자 의견수렴 과정을 거치고 있음.

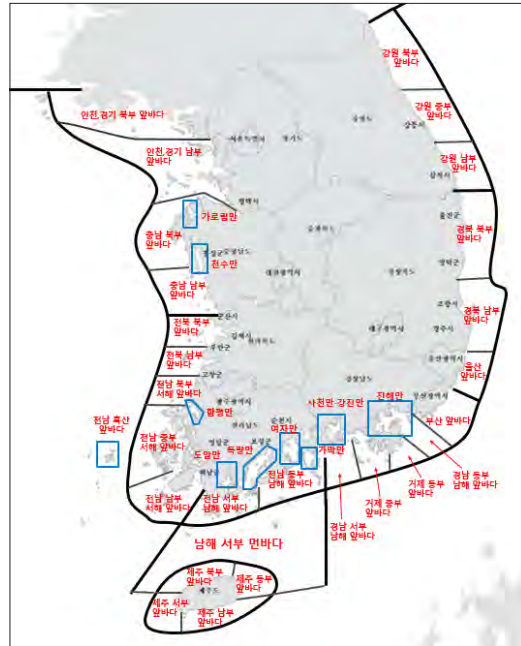


그림 3-27. 위기경보 발령 기준 활용 37개 해역 구분(남해 18개, 서해 13개, 동해 6개).

- ㉞ 고수온특보 기간이 2017년 32일에서 2022년 64일로 점차 길어지는 양상을 나타내는 등 장기적인 해양 온난화와 이상 고수온 등 수산재해에 대응하기 위하여 기후변화 대응 양식 관련 연구는 새로운 양식 대상 종의 개발과 기후 변화 적응 품종 개발의 두 가지 방향으로 추진되고 있음.
- ㉞ 새로운 양식 대상 종 개발은 교잡바리류 양식 기술 개발의 예처럼 고수온 내성 종과 국내 서식 종의 교잡 신품종을 개발하고 개발된 종의 양식 방법을 연구하여 현장에 기술을 이전할 수 있도록 사육기술을 표준화 하는 과정으로 진행됨.
- ㉞ 또한 환경 내성 육종품종 개발 등을 지속해서 추진하고 있으며, 맞춤형 디지털 육종²³⁾으로의 발전 기반을 구축 중임. 이밖에 재해 피해를 줄이기 위해 주요 양식 종의 기후 변화에 따른 생리 특성을 파악하는 연구도 진행 중.
- ㉞ 급변하는 환경과 질병 발생에 적극적으로 대처할 수 있는 예방양식 관련 연구 및 기술 개발도 확대할 계획이며, 특히, 육상양식장 확대 시 해양환경 보존에 필수적인 배출수 처리에 관한 연구와 이를 기반으로 한 정책 마련은 필수적으로 이루어져야 할 현안임. 또한 잦은 자연재해에 영향을 덜 받을 수 있는 스마트 양식 기술의 개발과 보급에도 더욱 연구의 박차를 가할 계획임.

23) 디지털 육종 : 빅데이터와 딥러닝을 중심으로 한 인공지능 기술을 적극 활용하여 품종을 효율적으로 개발하는 차세대 육종 기술



맺음말



참고문헌



보고서 발간을 위해노력하신 분들

ACT Fish 2023



Annual report for Climate change Trends in Fisheries, 2023

맺음말

- ㉟ 기후변화와 이상기후로 인하여 식량부족, 물가상승, 생산성 저하, 감염병 증가 등 다양한 사회와 산업 각 분야의 피해가 증가하고 있어 **우리 정부도 기후변화 대응과 적응을 위한 다양한 국가 단위의 계획 및 정책을 수립하고 있음.**
- ㉟ **우리나라 수산업은 높은 해양온난화 경향, 잦은 이상기후 발생, 높은 어획강도, 독특한 양식 환경 및 높은 국민들의 수산물 선호도 등으로 인하여 기후변화에 따른 취약성이 높은 것으로 알려져 있음.**
- ㉟ 수산분야의 온실가스 배출량은 전체 국가 온실가스 배출의 약 0.4% 내외로 높지 않은 수준이지만, 탄소중립 실현을 위하여 저감 방안 마련이 필요함. 동시에 기후변화와 이상기후에 대응하기 위한 감시, 관측, 예측 기술의 개발과 적응 기술의 개발 및 보급 등 기후변화 적응력 강화에 초점이 맞추어져야 할 것임.
- ㉟ 국립수산물과학원은 과거부터 수행된 해양관측 자료를 기반으로 우리나라 해역의 해양온난화, 성층강화 등 물리적인 변화가 저층으로부터의 표층 영양염 공급 감소, 기초생산력 감소 및 식물플랑크톤 소형화 등 생화학적 변화에 영향을 주고 있음을 입증하였음.
- ㉟ 이와 같은 해양 환경 및 생태계의 변화는 향후 해양 먹이망의 상위 단계에 있는 동물플랑크톤에서 중·대형 수산생물까지의 생산성에도 영향을 줄 것이기 때문에 지속적인 연구를 추진할 계획임.
- ㉟ 단, 수산업은 기후변화 요소 뿐만아니라 비기후적 요소에 의해서도 큰 영향을 받고 있음. 즉, 어선어업의 경우 조업구역 축소, 과도어획, 연안개발, 연안오염, 어린물고기 포획, 유류비 상승, 조업어선 감소 등 다양한 비기후적 요소가 어업생산성에 영향을 주고 있음. 또한 양식업에서도 밀식 여부, 치어·치패의 건강, 양식장 관리 등이 기후변화 영향과 함께 어업 생산성에 영향을 미침.
- ㉟ 지속가능한 수산업 실현을 위해서는 기후변화 대응을 위한 다양한 정책, 연구, 어업현장의 노력이 필요할 것으로 위와 같은 비기후적 요소에 따른 어업생산성의 부정적 요소를 최소화할 수 있는 협력이 이루어져야 할 것임.

- ㉟ 실제로 연근해 수산자원의 경우 저위도에서는 향후 뚜렷한 감소, 극지방을 포함한 고위도에서는 증가 경향이 나타날 것으로 전망되고 있으며, 우리나라 해역과 같은 중위도 해역은 높은 불확실성과 해역별로 생산성의 큰 차이가 나타날 것으로 예측되고 있음.
- ㉟ 즉, 우리나라 수산업이 생산성 향상을 위하여 다양한 연구, 정책, 현장과의 소통 등이 이루어진다면 기후변화가 우리 수산업의 새로운 기회요소로 작용할 수 있음을 시사하고 있음.
- ㉟ 2010년대 이후 우리나라 해역의 수온 패턴이 바뀌고 있음을 확인할 수 있으며, 이와 같은 조건에서는 향후 더욱 강한 강도와 빈도로 고수온, 저수온, 태풍 등의 발생 가능성이 높을 것으로 사료됨.
- ㉟ 패류독소, 냉수대, 저염분, 산소부족물덩어리(빈산소수괴), 부유성 해조류, 유해적조, 해파리 대량 출현 등 기후변화와 직간접적 영향 관계를 가지고 있는 다양한 수산재해가 연중 우리나라 연안에 영향을 주고 있으며, 향후 해역의 아열대화에 따라 더욱 많은 수산재해 요소의 발생 가능성이 있어 학·연간의 협력으로 선제적인 연구를 추진할 계획임.
- ㉟ 이상수온에 대한 피해저감을 위한 다양한 감시, 예측 정보의 생산과 제공, 양식장별 관리 요령의 전파, 중앙정부 차원의 지원 사업 추진이 활발히 진행 중에 있음. 어업현장에서도 수산재해 관련 보험 가입 등을 통하여 피해가 최소화할 수 있는 노력에 동참하는 분위기 조성이 필요함.
- ㉟ 국립수산물과학원은 기후변화와 이상기후에 따른 수산업의 피해 최소화를 위하여 해양수산부가 추진하는 정책에 적극 지원하고, 어업현장에서 필요한 기술과 정보를 생산, 제공하며, 학계와의 활발한 협력을 통하여 정책과 어업현장에 필요한 해양수산 연구에 더욱 노력하겠음.

 참고 문헌

- Akhtar N, Geyer B and Schrum C, 2022 : Impact of accelerating deployment of offshore windfarms on near-surface climate. *Sci. Rep.* 12(1):18307.
- Colbert AJ, Soden BJ and Kirtman BP, 2015 : The Impact of Natural and Anthropogenic Climate Change on Western North Pacific Tropical Cyclone Tracks. *J. Climate*, 28(5), 1806-1823.
- Dorrell RM, Lloyd CJ, Lincoln BJ, Rippeth TP, Taylor JR., Caulfield CP, Sharples J, Polton JA, Scannell BD, Greaves DM, Hall RA and Simpson JH, 2022 : Anthropogenic mixing seasonally stratified shelf seas by offshore wind farm infrastructure. *Front. Mar. Sci.* 9:830927.
- Durack PJ and Wijffels SE, 2010 : Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming. *J. Climate*, 23(16), 4342-4362.
- Frölicher TL and Laufkötter C, 2018: Emerging risks from marine heat waves. *Nat. Commun.*, 9(1), 650, doi:10.1038/s41467-018-03163-6.
- Feng S, Zhang S, Sun S, Wang and Li C, 2015. Effect of duration at low temperature on asexual reproduction in polyp of the scyphozoan *Nemopilema nomurai*(Scyphozoa Rhizostomeae). *Hydrobiologia* 754, 91-111.
- Han IS., Lee JS, Kim JY and Hong JY, 2019 : High frequency variation of low water temperature due to Arctic oscillation around the western and southern coast of Korea during winter 2017/2018, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. & Safety*, 25(3), pp. 328-333.
- Han IS and Lee JS, 2020 : Change the annual amplitude of sea surface temperature due to climate change in a recent decade around the Korean Peninsula. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. & Safety*, 26(3), 233-241.
- Han IS, Lee JS and Jung HK, 2023 : Long-term change of sea surface temperature during winter season related to climate change in the East Sea. 2023년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 한국해양학회 논문집, PP33.
- Hughes TP, Anderson KD, Connolly SR, Heron SF, Kerry JT, Lough JM, Baird AH, Baum JK, Berumen ML, Bridge TC, Claar DC, Eakin CM, Gilmour JP, Graham NAJ, Harrison H, Hobbs JA, Hoey AS, Hoogenboom M, Lowe RJ, McCulloch MT, Pandolfi JM, Pratchett M, Schoepf V, Torda G and Wilson SK, 2018 : Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 359 (6371), 80-83, doi:10.1126/science.aan8048.

- Hobday AJ, Alexander LV, Perkins SE, Smale DA, Straub SC, Oliver ECJ, Benthuyssen JA, Burrows MT, Donat MG, Feng M, Holbrook NJ, Moore PJ, Scannell HA, Gupta AS and Wernberg T, 2016 : A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog. in Oceanogr.*, 141, 227-238.
- Hwang EK, Baek JM and Park CS, 2009 : The mass cultivation of *Ecklonia stolonifera* Okamura as a summer feed for the abalone industry in Korea. *J. Appl. Phycol.*, 21:585-590.
- Hwang EK, Gong YG, Hwang IK, Park EJ and Park CS, 2013 : Cultivation of the two perennial brown algae *Ecklonia cava* and *E. stolonifera* for abalone feeds in Korea. *J. Appl. Phycol.*, 25:825-829.
- Hwang EK, Gong YG and Park CS, 2012 : Cultivation of a hybrid of free-living gametophytes between *Undariopsis peterseniana* and *Undaria pinnatifida*: morphological aspects and cultivation period. *J. Appl. Phycol.*, 24:401-408.
- Hwang EK, Ha DS and Park CS, 2017 : Strain selection and initiation timing influence the cultivation period of *Saccharina japonica* and their impact on the abalone feed industry in Korea. *J. Appl. Phycol.*, 29:2297-2305.
- Hwang EK, Hwang IK, Park EJ, Gong YG and Park CS, 2014 : Development and cultivation of F2 hybrid between *Undariopsis peterseniana* and *Undaria pinnatifida* for abalone feed and commercial mariculture in Korea. *J. Appl. Phycol.*, 26:747-752.
- Hwang EK, Yotsukura N, Pang SJ, Su L and Shan TF, 2019 : Seaweed breeding programs and progress in eastern Asian countries. *Phycologia* 58:484-495.
- Hwang EK and Park CS, 2020 : Seaweed cultivation and utilization of Korea. *Algae* 35:107-121.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), 2019 : The ocean and cryosphere in a changing climate: A special report of the IPCC. Cambridge University Press, 738 pp.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), 2022 : Climate Change 2022: Impact, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, 3674 pp.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), 2023 : Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, 81 pp.
- JMA(Japan Meteorological Agency), 2022 : https://data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/a_3/pHtrend_jpn/pHtrend_jpn.html.

- Kang YQ, 2000 : Warming trend of coastal waters of Korea during recent 60 years (1936~1995), J. Fish. Sci. Tech., 3(3), pp. 173-179.
- KOSIS, 2023 : Korean statistical information service.
- Kim JK, Yarish C, Hwang EK, Park M and Kim Y, 2017 : Seaweed aquaculture: cultivation technologies, challenge and its ecosystem services. Algae 32:1-13.
- Kim JH, Kim DW, Cho SR, Lee KJ and Mok JS, 2023 : Tetrodotoxin and the geographic distribution of the blue-lined octopus *Hapalochlaena fasciata* on the Korean Coast. Toxins, 15, 279
- Kim JH, Suzuki T, Shim KB, Oh EG, 2012 : The widespread distribution of the venomous and poisonous blue-lined octopus *Hapalochlaena spp.*, in the East/Japan Sea: Possible effects of sea warming. Fish. Aquat. Sci., 15, 1-8.
- Kim SJ, Woo SH, Kim BM and Hur SD, 2011 : Trends in sea surface temperature (SST) change near the Korean Peninsula for the past 130 years, Ocean & Polar Res., 33(3), 281-290.
- Kossin JP, Emanuel KA and Vecchi GA, 2014 : The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. Nature, 509(7500), 349-352, doi:10.1038/nature13278.
- Kossin JP, Emanuel KA and Camargo SJ, 2016 : Past and projected changes in western North Pacific tropical cyclone exposure. J. Clim., 29(16), 5725-5739, doi:10.1175/Jcli-D-16-0076.1.
- Lee JH and Kim CH, 2013 : Long-term variability of sea surface temperature in the East China Sea: A review. Ocean & Polar Res., 35(2), 171-179.
- Mackenzie K and Kalavati C, 2014 : Myxosporean parasites of marine fishes: Their distribution in the world's oceans. Parasitol, 141(13): 1-9.
- Mei W and Xie SP, 2016 : Intensification of landfalling typhoon over thenorthwest Pacific since the late 1970s. Nat. Goesci., 9, 753-759.
- Min HS and Kim CH, 2006 : Interannual variability and long-term trend of coastal sea surface temperature in Korea. Ocean & Polar Res., 28(4), 415-423.
- Murakami H, Delworth TL, Cooke WF, Zhao M, Xian B, and Hsu PC, 2020 : Detected climatic change in global distribution of tropical cyclones. PNAS, 117(20), 10706-10714. DOI: 10.1073/pnas.1922500117
- NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration), 2023 : <https://www.climate.gov/maps-data/data-snapshots/data-source/ocean-heat-content-yearly-difference-average>.

- Oliver ECJ, Donat MG, Burrows MT, Moore PJ, Smale DA, Alexander LV, Benthuyssen JA, Feng M, Gupta AS, Hobday AJ, Holbrook NJ, Perkins-Kirkpatrick SE, Scannell HA, Straub SC and Wernberg T, 2018 : Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. Nat. Commun., 9(1), 1324, doi:10.1038/s41467-018-03732-9.
- Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ and Hanson CE, 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.
- Paul H and Claudio CJ, 2022 : Skipjack(*Katsuwonus pelamis*) stock and fishery background previous assessment. WCPFC SPC Pre-assessment workshop.
- Purcell JE, 2005 : Climate effects on formation of jellyfish and cetenophore blooms : a review. JMBA. Vol(85), 461-476
- Shim JD, Hwang SD, Jand SY, Kim TW and Jeong JI, 2019 : Monitoring of the mortalities in oliver flounder (*Paralichthys olivaceus*) farms of Korea. J Fish Pathol, 32(1): 29-35.
- Shin HR, Lee JH, Kim CH, Yoon JH, Hirose N, Takikawa T and Cho KW, 2022 : Long-term variation in volume transport of the Tsushima warm current estimated from ADCP current measurement and sea level differences in the Korea/Tsushima Strait. J. Mar. Syst., 232, doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103750.
- Song JY, Kim MJ, Choi HS and Jung SH, 2014 : Monitoring of *Kudua septempunctata* in cultured olive flounder *Paralichthys olivaceus* in different regions of Korea in 2013. Korean J. Fish. Aquat. Sci., 47(5), 611-612.
- Strobl E, 2012 : The economic growth impact of natural disasters in developing countries: Evidence from hurricane strikes in the Central American and Caribbean regions. J. Dev. Econ., 97(1), 130-141, doi:10.1016/j.jdevco.2010.12.002.
- UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Chnage), 2023 : Report of the Conference of the Parties on its twenty-seventh session, UN, Sharm el-Sheikh, Egypt, 49 pp.
- U.S. EPA(Environmental Protection Agency, 2021 : Climate Adaptation Action Plan. U.S. EPA, 1~27.
- Wang Y, Kajtar JB, Alexander LV, Pilo GS and Holbrook NJ, 2022 : Understanding the changing nature of marine cold-spells. Geophys. Res. Lett., 49, e2021GL097002.
- Wang Y, 2020 : Understanding the changing nature of marine cold spells. A thesis for Bachelor of Marine and Antarctic Science, University of Tasmania, 53pp.

WMO(World Meteorological Organization), 2022 : State of the Global Climate 2021. WMO-No.1290. Geneva, Switzerland, 54pp.

Yamada K, 유준택, 2022 : 2003-2020년 5월 한국 동해안 밍크고래(*Balaenoptera acutorostrata*) 분포와 위성 표층수온과의 공간적 관계. 수산해양기술연구, 58(3), 281-287.

Yamate Y, Toyomasu N, Takegaki T, 2022 : Distribution, body size and maturation pattern of the blue-lined octopus *Hapalochlaena fasciata* in Japan. Nippon Suisan Gakkaishi, 88, 171-173.

Yanagida T, Sameshima M, Nasu H, Yokoyama H and Ogawa K, 2006 : Temperature effects on the development of *Enteromyxum* spp. (Myxozoa) in experimentally infected tiger puffer, *Takifugu rubripes* (Temminck & Schlegel). J Fish Dis 29, 561-567.

김진아, 김규량, Lee CC, Sheridan SC, Kalkstein LS, 김백조, 2016 : 한반도 미래 폭염의 발생 분포 및 종관 패턴 분석. 기후연구, 11(1), 15~27.

민기홍, 장아현, 2021 : 우리나라에서 발생하는 폭염의 유형 분류 및 분석. 한국기상학회 학술대회 논문집. 2021-10 2021(10):171-171.

이명인, 2017 : 기후변화에 따른 폭염 발생과 재난관리 방안. 재난안전, 19(2), 36-43.

일본 각의결정, 2021 : 기후변동적응계획. 일본 환경성, 134 pp.

탄소중립녹색성장위원회, 2023 : 보도자료 '2050 탄소중립 달성과 녹색성장 실현'을 위한 윤석열 정부 탄소중립·녹색성장 청사진 공개. 탄소중립녹색성장위원회, 20pp.

해양수산부, 2022 : 제4차 기후변화대응 해양수산부문 종합계획. 해양수산부, 87pp.

환경부, 2022 : 기후위기 적응연구 협의체 구축을 위한 업무협약 체결 계획. 환경부 국립환경과학원 국가기후위기적응센터, 15pp.



보고서 발간을 위해 노력하신 분들

보고서 집필진

- 총괄 : 기후환경연구부 김지희 부장(TF 단장), 남해수산연구소 기후환경자원과 정래홍 과장(TF 부단장), 기후변화연구과 한인성 과장(TF 간사)
- 제1장 : 기후변화연구과 한인성 과장, 기후변화연구과 양준용 연구관, 수산공학과 배봉성 과장, 정성재 연구관
- 제2장 : 기후변화연구과 한인성 과장, 이준수 연구관, 심정희, 김창신, 김정연, 주희태 연구사, 남해수산연구소 기후환경자원과 정래홍 과장, 손문호 연구사, 연구기획과 김희용 연구관, 연근해자원과 강수경 과장, 원양자원과 이해원 연구관, 수산공학과 배봉성 과장, 정성재 연구관, 식품안전가공과 김동욱 연구사, 수산자원연구센터 이정훈 연구관, 김현지 연구사, 고래연구소 박겸준 연구관, 독도수산연구센터 윤석진 연구사, 양식연구과 임현정 과장, 최진 연구사, 병리연구과 송준영 연구사, 해조류연구소 황은경 연구관
- 제3장 : 기후변화연구과 한인성 과장, 이준수 연구관, 양식연구과 임현정 과장, 최진 연구사

원내외 보고서 자문위원회

- 원내 : 우동식 국립수산물품질관리원장, 김종현 양식산업연구부장, 이정용 아열대수산연구소장
- 원외 : 남정호 한국해양수산개발원 선임연구위원, 마창모 해양수산개발원 본부장, 남성현 서울대학교 교수, 이경훈 부경대학교 교수, 남재철 서울대학교 연구교수, 이상호 영남대학교 교수, 박고은 국립산림과학원 연구사, 홍제우 한국환경연구원 부연구위원, 강정은 부산대학교 교수, 정태성 국립재난안전연구원 팀장

어업인 보고서 검토 위원회

- 이우재 (주)블루젠 대표, 김형백 (사)부산어류양식협회장, 백명호 (사)강원도바다양식협회장

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.

2023

수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서

Annual report for Climate change Trends in fisheries, 2023

발 행 일 : 2023년 8월

발 간 : 해양수산부 국립수산물과학원

편 집 인 : 국립수산물과학원장 우 동 식

저 자 : 우동식, 김지희

강수경, 김경연, 김동욱, 김창신, 김현지, 김희용, 박겸준, 배봉성,
손문호, 송준영, 심정희, 양준용, 윤석진, 이정훈, 이준수, 이해원,
임현정, 정래홍, 정성재, 주희태, 최 진, 한인성, 황은경

발 행 처 : 국립수산물과학원 기후변화연구과

부산광역시 기장군 기장읍 기장해안로 216

TEL: 051-720-2210

디자인·인쇄 : 메이플디자인/도서출판 메이플

TEL: 051-257-0302, <http://mapledesign.blog.me>