

## 해양기후변화 영향 파악 및 수산분야 위험도 평가 기반 구축

김창신\*<sup>†</sup> · 한인성\*\* · 이준수\*\* · 양준용\*\*

\*국립수산과학원 기후변화연구과 해양수산연구소, \*\*국립수산과학원 기후변화연구과 해양수산연구관

### Establishment of a foundation for risk assessment in fisheries issues and identification of the impact of marine climate change

Kim, Changsin\*<sup>†</sup> · Han, In-Seong\*\* · Lee, Joon-Soo\*\* and Yang, Joon-Yong\*\*

\*Senior Researcher, Division of Ocean Climate and Ecology, National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea

\*\*Principal Researcher, Division of Ocean Climate and Ecology, National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea

#### ABSTRACT

Global climate change is accelerating warming, and our oceans are particularly affected by climate change compared to other regions. By the end of the 21st century, the pace of climate change is expected to accelerate. Therefore, by creating and analyzing basic data for risk assessment in the fisheries sector according to climate change, we intend to lay the foundation for promotion of risk assessment. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) proposes to shift from vulnerability assessment to climate risk management for climate adaptation, and climate risk consists of risk, exposure, and vulnerability. In the fisheries sector, it is difficult to clearly distinguish between sensitivity and adaptability due to the interrelationships among biological attributes, so various definitions and measurement methods are used. In the case of coastal fishing, a precise analysis of water temperature variability and fisheries resource fluctuations due to climate change is required. In the case of aquaculture, it is necessary to develop technology to respond to high water temperatures according to climate risk. To advance the climate risk assessment in the fisheries issues, it is necessary to prepare detailed evaluation indicators according to the definition of IPCC and switch to the AR6 SSP scenario. Therefore, the current climate risk methodology in the fisheries issues will be summarized, and the latest data (fishing production, fisherman survey analysis, model results under climate change scenarios, etc.) will be used to lay the foundation for risk assessment in the fisheries issues according to climate change.

*Key words: Climate Change, Climate Risk, Vulnerability, Fisheries Issues*

### 1. 서론

전 지구적인 기후변화의 영향으로 온난화는 가속화되고 있으며, 특히 우리 바다는 다른 지역에 비해 기후변화로부터 많은 영향을 받고 있다. 연평균 표층수온 상승 경향은 최근 56년간(1968~2023년) 약 1.44°C 상승하여, 같은 기간 전 지구 평균 표층 수온이 약 0.70°C 상승한 것에 비해 약 2.0배 이상 높다(NIFS, 2024).

우리 바다 연평균 표층수온은 상승하는 경향을 보이고 있으나, 동해 100 m 수온은 하강하는 경향을 보인다. 이는 표층과 아표층의 수온 차이는 증가 경향으로, 해양 상부에서 성층이 강화되고 있음을 시사하고 있다. 이러한 물리적인 해양 변화는 생지화학적 변화를 일으키는 것으로 보이며, 우리 바다 표층 영양염 농도와 기초생산력의 감소로 이어지고 있다(Han et al., 2024; NIFS, 2023).

<sup>†</sup>Corresponding author : [changsin@korea.kr](mailto:changsin@korea.kr) (46083, NIFS, Gijanghaean-ro 216, Busan, Korea. Tel. +82-51-720-2231)

ORCID 김창신 0000-0003-3026-3285  
한인성 0000-0002-3652-9251

이준수 0000-0003-2216-2601  
양준용 0000-0001-9194-8478

IPCC<sup>1)</sup> 제5차 보고서(AR5)의 CMIP5 모델로 평가한 것보다 IPCC 제6차 보고서(AR6)의 CMIP6에서 예상되는 세기말 온난화가 더 클 것으로 전망되었다. 21세기 후반(2051~2100년)에는 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에서 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)로 갈수록 기후변화 속도는 가속화될 것으로 전망되었다.

기후변화에 따른 해양환경의 변화(해양온난화, 해양산성화, 이상수온 등)는 제어할 수 없는 자연 요소이기에, 기후변화 영향을 정량적 파악하고 기후변화 적응 및 대응하는 것이 정책적으로 중요한 부분을 차지한다. 우리나라 수산업은 기후변화에 대한 취약성이 높은 분야로 알려져 있으며, 그 요인으로는 1) 전 세계 대비 높은 표층 수온 상승, 2) 이상기후에 따른 빈번한 극한 현상, 3) 높은 어획 강도, 4) 내만과 연안해역에 집중된 양식 시설, 5) 동물성 단백질 섭취량 중 높은 수산물 비중 등이 있다(Han et al., 2023).

IPCC 제3차 보고서(AR3)와 제4차 보고서(AR4)에 따르면 기후변화 취약성은 기후변화에 대한 노출, 민감도와 적응 능력의 함수로 정의하고 있다. IPCC AR5에서는 기후변화 위험을 결정하는 요소로 민감도와 적응 능력의 중요성을 더욱 강조하게 되는데, 취약성이 아닌 위험도(Risk) 개념이 등장하여 위험 요소와 노출을 분리하고 취약성의 사회, 경제적 관계를 강조하고 있다(Han et al., 2023).

IPCC AR6에서 위험도의 개념은 취약성(Vulnerability), 노출(Exposure), 기후 위해(Climate hazard)로 구분하며, 기후변화 상황에서 3가지 구성요소의 역동적인 상호작용으로 발생한다. 따라서, 위험도는 기후변화(Climate change), 인간 사회(Human society), 다양성을 포함한 생태계(Ecosystems including biodiversity)간 상호작용의 고려가 필요하다(IPCC, 2022).

2023년 3월 개최된 IPCC 제58차 총회에서 IPCC AR6 주기의 마지막 보고서인 종합보고서(Synthesis Report, SYR)가 승인되었다. AR6 SYR는 AR6 주기 동안 발간된 3개의 실무그룹(Working Group, WG) 보고서<sup>2)</sup>와 3개의 특별보고서<sup>3)</sup>의 결과를 종합적으로 반영하고 통합하여 발간한 보고서로서, 기후변화에 대해 통합적 관점으로 현황과 추세, 장기 전망과 영향 및 위험도, 단기적 적응 및 완

화에 관하여 서술하였다(IPCC, 2023).

따라서 본 연구에서는 기후변화에 따른 수산분야 위험도 평가 기반 마련을 위한 기초자료 생성 및 분석하여, 위험도 평가를 추진하기 위한 기반을 마련하고자 한다.

## 2. 연구 현황

Pecl et al. (2014)는 호주 남부지역에 서식하는 주요 35개 어종의 기후변화에 따른 어종별 민감도를 평가하였다(Fig. 1). 민감도(Sensitivity)를 보기 위한 대분류 속성을 풍도(Abundance), 분포(Distribution), 생물계절학(Phenology)으로 나누어 고려하였으며, 속성별 평가 결과는 생물계절학, 분포, 풍도의 순으로 나타났다. 기후변화에 민감한 종으로는 전복류, 바닷가재, 감성돔, 가리비, 새우, 킹크랩 등으로 나타났으며, 덜 민감한 어종으로는 멸치, 참다랑어류 등으로 나타났다.

Hare et al. (2016)는 미국 북동부의 어류와 무척추동물의 취약성을 평가하였으며, 자원상태, 성장률, 산란주기 등 12가지 민감도 속성과 기후 노출을 고려하여 취약성 평가를 수행하였다.

호주에서는 양식품종의 상대적인 리스크 평가를 위해 Pecl et al. (2011)을 기반으로 주요 양식품종을 기후변화에 따른 민감도를 평가하기 위해 9개의 속성별 기준으로 점수(Low, Medium, High)를 부여하고 품종별 순위를 선정하였다. Doubleday et al. (2013)는 기후변화에 따른 양식품종의 위험도 평가를 위해 Pecl et al. (2011)을 기반으로 9개의 속성별 기준으로 부여된 민감도 점수, 기후변화 영향 점수, 위험도 점수를 계산하여 품종별, 속성별 순위를 선정하여 호주 남동부지역의 주요 양식품종 기후변화 위험도를 평가하였다.

[위험도 점수=민감도 점수×영향 점수]

속성별 평가에서는 성장(Grow out: connectivity)이 민감도와 위험도 점수에서 가장 높은 점수를 받았으며, 품종별 평가에서는 Sydney rock oyster가 위험도 점수에서

1) 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)

2) 기후변화 2021: 과학적 근거, 기후변화 2022: 영향, 적응 및 취약성, 기후변화 2022: 기후변화의 완화

3) 1.5°C 지구온난화(2018): 기후변화의 위험, 지속 가능한 발전 및 빈곤 퇴치를 위한 노력에 대한 전 지구적 대응을 강화하는 맥락에서 산업화 이전 수준보다 1.5°C 높은 지구온난화의 영향 및 관련 지구 온실가스 배출 경로에 관한 IPCC 특별보고서(SR1.5); 기후변화 및 토지(2019): 기후변화, 사막화, 토지 황폐화, 지속 가능한 토지 관리, 식량 안보, 육상 생태계의 온실가스 흐름에 관한 IPCC 특별보고서(SRCLL); 변화하는 기후의 해양 및 빙권(2019)(SROCC)

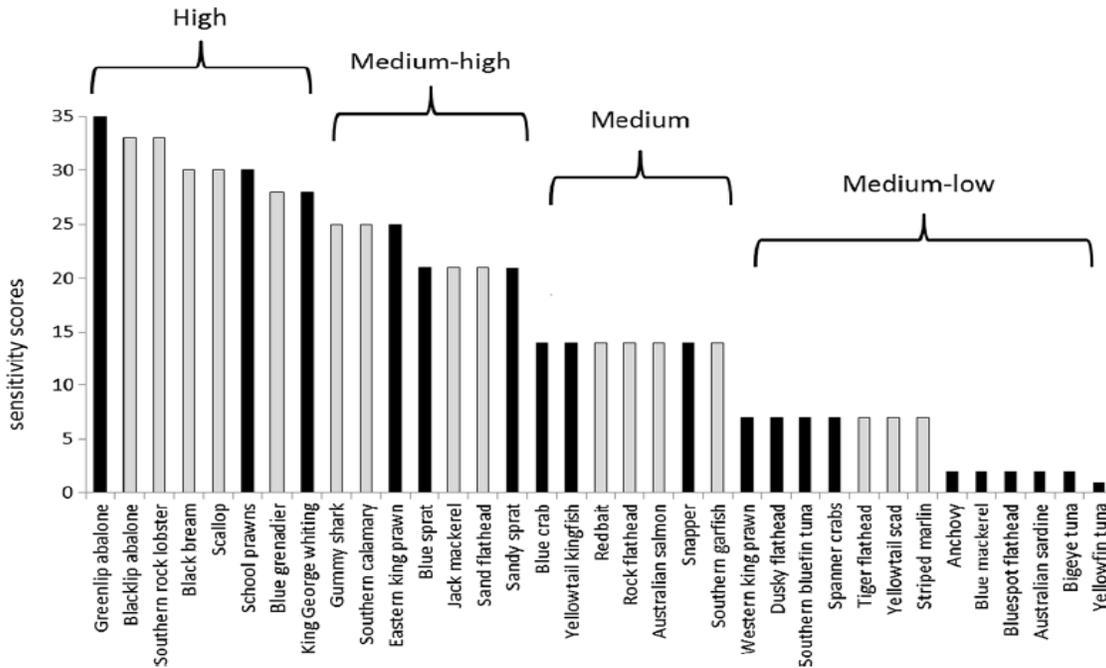


Fig. 1. Results of sensitivity analysis of fish species to climate change (Pecl et al., 2014).

가장 높은 점수를 받았다.

Handisyde et al. (2017)는 기후변화에 따른 전 세계 국가의 양식어업(내수, 기수, 해수)에 미치는 영향을 분석하였다. 기후변화에 대한 노출(E), 민감도(S), 적응 능력(AC)의 함수로 취약성(V)을 고려하였다.

$$[V = f(E, S, AC)]$$

취약성 분석을 위해 국가별 양식 생산량, 인구밀도 및 기후 변수(강수량 등)를 표준화(0~1)하고, 국가별 가중치를 적용하여 취약성을 평가하였다. 내수면의 경우, 베트남, 라오스, 중국에서 가장 취약한 것으로 나타났으며, 기수역의 경우, 베트남, 태국, 이집트, 에콰도르가 가장 취약성이 높게 나타났고, 해면 양식어업의 경우, 노르웨이, 칠레가 가장 취약성이 높게 나타났다.

노르웨이에서는 연어양식장이 설치된 13개 지역을 대상으로 기후변화에 따른 수온 변화를 예측하여, 미래 연어양식장에 적합한 지역 분석에 활용하였다(Falconer et al., 2020).

기후변화는 이미 수산자원의 풍도, 분포, 생산성 및 계절 변화를 변화시키고 있다(Payne et al., 2021). 위험도는

기후변화와 같은 사건이 일어날 가능성과 사건이 일어났을 경우 초래되는 결과를 의미한다. IPCC AR5에서 강조한 이후 기후변화에 따른 위험도 평가 연구가 활발히 진행되고 있으며, 수산분야에도 적용되고 있다. 위험도는 어떤 사건의 발생확률과 부정적인 결과의 곱으로 정의할 수 있으므로, 기후변화의 관점에서 이상기후로 인한 피해의 발생 가능성과 그 규모로 볼 수 있다. 따라서, 기후변화 취약성이 높은 우리나라 수산업의 지속 가능한 발전을 위해 탄소중립 정책 수행과 함께 기후변화 적응을 위한 정책지원 및 연구개발을 추진하고 있다(NIFS, 2023).

이에 국립수산과학원은 RCP 시나리오를 적용(RCP 8.5, RCP 4.5)하여 수산분야 기후변화 취약성 및 위험도 평가를 추진하였다. 2015년부터는 ‘수산분야 기후변화 영향 및 취약성 평가 연구’를 추진하였으며, 2023년부터는 ‘수산분야 기후변화 영향 평가 및 예측기술 개발’ 연구로 수행하고 있다. 또한, 기후변화에 따른 수산자원에 영향을 주는 해양환경 및 생태계 구성 인자들에 대한 관측과 예측에 관한 연구를 수행하고 있다. 위 연구들은 바탕으로 IPCC AR5와 AR6를 기반으로 해양기후변화 영향 파악 및 수산분야 위험도 평가 기반 구축하고자 한다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1. 기후변화 영향 파악

기후변화 위험도 평가 기반 마련에 앞서 우리 바다의 기후변화 정도를 파악하였다. 국립수산물과학원 정선해양조사 관측 결과를 기반으로 살펴본 최근 56년간(1968 ~ 2023년) 한국 해역의 연평균 표층 수온 상승률은 0.026°C/yr로 동기간 약 1.44°C 상승했지만, 같은 기간 전 지구 평균 표층 수온 상승률은 0.0125°C/yr로 동기간 0.70°C 상승하였다. 한국 연근해의 연평균 표층 수온 상승률이 전 지구 평균과 비교하여 약 2배 이상 높게 나타났다(NIFS, 2024). SSP 시나리오별 고해상도 해양기후모델 예측 결과, 2100년까지 우리나라 바다의 표층수온은 시나리오별로 1~4°C 내외까지 상승할 전망이다(Kim et al., 2024).

국립수산물과학원 정선해양조사 정점을 비교 정점으로 선정하여, 최근 56년간 관측 수온과 2100년까지 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에 따른 미래 표층수온 변화를 Fig. 2와 같이 도식화하여, 기후변화에 따른 과거와 미래의 해양온난화 정도를 알아보기 표현하였다.

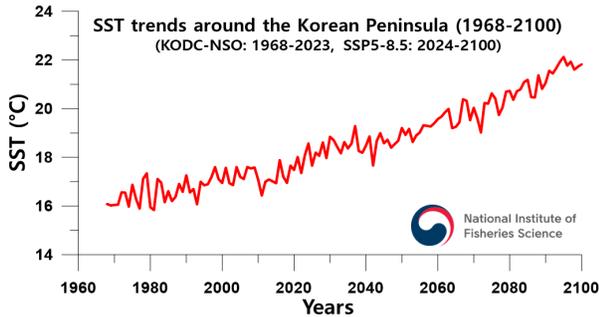


Fig. 2. Time series of sea surface temperature observation (1968 ~ 2023) by the National Institute of Fisheries Science (NIFS) serial oceanographic observations and regional climate model result (2024 ~ 2100) under SSP5-8.5 scenario

#### 3.2. 기후변화 민감 어종 모니터링

연근해어업과 관련하여 대부분의 어종은 수온 변화에 민감하며 계절회유의 특징을 보인다. 최근 기후변화에 따라 뚜렷한 어장 변화를 보인 어종으로는 살오징어 (*Todarodes pacificus*)와 방어(*Seriola quinqueradiata*)가 있

다. 살오징어를 어획하는 주 어장은 1990년대 동해 남부 해역과 대화퇴 부근에서 2010년대 이후 서해 및 러시아 해역으로 확장하였고, 방어는 남해에서 주로 어획되었으나 동해의 어획 비율이 급격하게 증가하였다. 이와 같은 주 어장 변화의 요인으로는 해역별 수온 변화에 의한 영향으로 보인다(NIFS, 2023).

기후변화 등 장기 수온 상승의 영향으로 살오징어의 주 어장인 동해 남부 해역의 50 m 평균 수온이 1990년대에 비해 2010년대에는 2~4°C 상승하였다. 이는 주 조업 위치인 동해 남부 해역에서 수온 상승 및 전선 구조 등의 변화로 살오징어 어장형성 조건 악화는 주요 서식지가 외해로 이동하는 등 어군이 분산되었다. 반면 서해에서는 여름철 표층수온은 2015년 이후 평년대비 1~2°C 높은 수온이 지속되는 특징을 보이며, 살오징어 어군 분포의 북상과 반폐쇄적인 황해의 지형적인 요인에 의해, 서해 중부해역에서 어장형성에 영향을 주는 것으로 판단된다(Fig. 3).

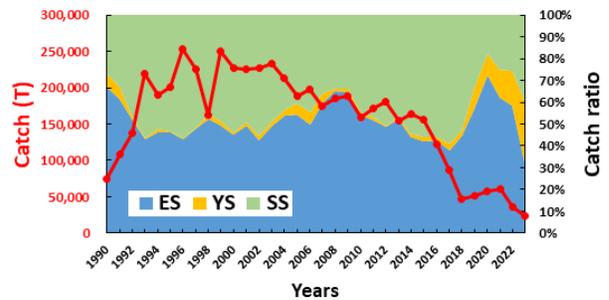


Fig. 3. Annual catch of common squid and its catch ratio in the East Sea, Yellow Sea and South Sea (KOSIS, 2024)

통계청 국가정보포털(KOSIS) 어업생산통계의 경우 행정 구역별 구분으로 서해와 남해의 명확한 구분이 어려운 점이 있어, 실제 조업 위치를 기준으로 정리한 국립수산물과학원 표본조사 결과에 따르면, 최근 서해 오징어 어획 비율은 총 어획량 대비 50% 수준까지 증가한 것으로 보고되었다.

기후변화에 따른 수산자원 변동에 따라 주요 어법의 어획 비율변화를 살펴보았다. 살오징어 어획량은 2023년 현재 3만 톤 수준으로 급감하였으며, 근해채낚기는 전체 어획량의 30% 수준 유지, 대형트롤과 동해구중형트롤의 어획 비율은 과거 대비 감소, 근해자망의 어업 비율은 30%로 매우 증가하였다(KOSIS, 2024). 이는 어획량 감소에 따른 가격 상승으로, 다양한 업종에서 살오징어를 어획하는 것으로 보인다.

방어 어획량은 1990년대 평균은 약 5천 톤의 어획 수준을 보였으나, 2008년 1.2만 톤으로 급격한 어획 증가세를 보인다(Fig. 4). 그러나 2015년까지 전체 어획량의 약 75%를 차지하던 남해(제주 포함)의 어획 비율은 점차 감소하여, 최근 5년간(2019~2023) 평균은 약 55% 수준으로 감소하였다. 반면에 동해의 어획 비율은 총어획량 대비 1990년대와 2000년대 20% 수준에서, 2010년대 중반 이후 40% 이상을 차지하고 있다. 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 보인다.

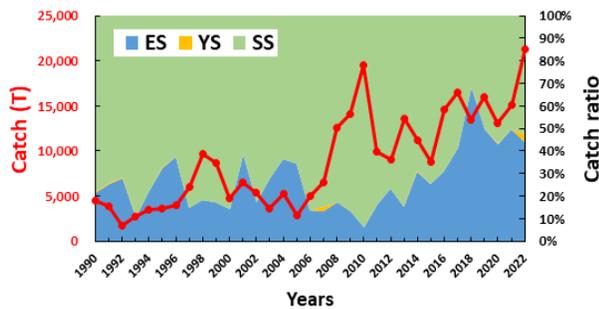


Fig. 4. Annual catch of Yellowtail and its catch ratio in the East Sea, Yellow Sea and South Sea (KOSIS, 2024)

연근해어업의 경우에는 살오징어와 방어 이외에도, 해역 간 어업생산량의 대체현상을 고찰을 위해서는 기후변화를 포함한 장기 어업환경 및 서식지분포 변동을 자세히 살펴보아야 하며, 어종별 증감원인 파악을 위해서는 수온 등 해양환경의 변동성에 따른 수산자원 변동 요인에 대한 정밀한 분석이 필요하다.

최근 심화하는 기후변화의 영향으로 여름철 고수온, 겨울철 저수온이 빈번하게 발생하여 내만과 연안해역에 있는 양식장을 중심으로 양식생물 피해가 매년 발생하고 있다. 최근 13년간(2011~2023년) 자연재해에 따른 양식어업 피해는 총 3,260억 원이었으며, 고수온에 의한 피해가 1,947억 원으로 전체의 60%를 차지하고 있다. 2023년은 수산재해로 인한 총 피해액은 501억 원으로 최근 10년 기준으로 2018년(713억 원), 2016년(645억 원), 2013년(536억 원)의 뒤를 이어 4번째로 큰 피해가 발생하였다. 이때 고수온으로 인하여 어류(넙치, 강도다리, 조피볼락, 송어

등)가 317백만 마리, 멧게, 굴 등 2,531줄이 폐사하였고, 피해액은 438억 원으로 가장 많았으며, 저수온으로 인해서 어류 폐사가 1.9백만 마리, 피해액은 48억 원이었으며, 산소 부족으로 인하여 굴, 홍합 등 1,902줄 폐사하였고, 피해액은 15억 원이 발생하였다(NIFS, 2024).

기후변화로 인한 양식장 주변 환경변화와 이상수온 등의 자연재해는 양식생물의 피해가 반복적으로 발생하는 수산재해로 이어져 양식 생산성은 악화시키고 있다. 따라서 국립수산과학원의 실시간 해양수산환경 관측시스템의 수온 자료는 이상수온 발생을 관찰하여 가장 기초적인 과학적 대응으로 활용하고 있으며, 고수온 및 저수온 특보 기준 마련 및 양식 방법별 관리요령을 제공하고 있다.

### 3.3. 연근해어업 기후변화 민감도 및 취약성 평가

연근해어업 기후변화 취약성 분석을 위해 대상 어종은 자료 활용이 가능한 36종, 대상 업종은 24개 어업(근해어업 17개, 연안어업 7개)으로 선택하였으며, 연근해어업의 5년간(2017~2021년) 평균 어획량으로 업종별 취약성을 분석하였다.

본 연구에서는 RCP 8.5 시나리오(2100년)에 따른 어종별 및 연근해어업의 업종별 취약성 평가를 위해 취약성 정의 및 개념은 Morrison et al. (2015)의 민감도의 세부 속성과 점수 기준은 Pecl et al. (2011)의 연구를 참고하여, 10개의 민감도 속성과 2개의 기후 노출 요인을 선정하였다. 민감도 속성은 풍도, 분포, 생물계절학 3가지 구성요소로 구분되며, 풍도와 분포는 각각 4개, 생물계절학은 2개의 세부속성으로 구성하였다(Table 1). 요소별 세부속성 중 풍도는 연간포란수, 가입빈도, 성숙 연령, 먹이/서식지의존성으로, 분포는 유생기간, 자어/성어 이동 범위, 성어의 수직분포 범위, 서식공간 이용능력이며, 생물계절학은 생활사 기간, 회유로 구분하였다. 민감도 구성요소별 점수는 속성별 점수의 합계이다.

기후 노출 요인 속성인 향후 수온 변화 범위는 RCP 시나리오 중 저감 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우를 가정한 RCP8.5 시나리오 기준(2030~2100년)으로 하였으며, 국립수산과학원의 정선해양관측에서 구분된 한국 연근해 전체(동해, 남해, 서해) 영역에서 표층 수온 자료를 추출하여 사용하였다.

향후 수온 변화에 따른 종의 직접적인 영향을 평가하기 위해 생물계절학적 민감도 중 일부 속성(환경요인과의 상관관계)을 제거하고, 기후 노출 요인에서 대상 종별 산란

및 서식 수온 범위와 RCP8.5 시나리오로 2100년까지 예측된 수온 범위와의 관계를 세부 속성으로 설정하였다 (Kim et al., 2022, 2023). 취약성 점수는 민감도 점수와 기후 노출 점수의 곱으로 계산하였다. 속성별 점수 기준에 따라 High(3점), Moderate(2점), Low(1점)로 평가하고, 속성 평가를 위한 정보가 없는 경우 High를 부여하였다.

어종별 취약성 평가 결과, 기름가자미, 도루묵, 명태 등이 높은 점수로, 전어, 돌돔 등이 낮은 점수로 평가되었다 (Fig. 5).

기후변화에 따른 어종별 취약성 평가 점수를 바탕으로 연근해어업의 업종별 취약성 평가하였다. 업종별 취약성 평가는 어종별 취약성 평가 점수와 해당 어종의 어획량 비율을 고려하여 평가하였으며, 아래 식과 같이 계산하였다.

$$[Vulnerability_j = \sum \left( \frac{C_{ij}}{C_j} \times V_i \right)]$$

$i$ 는 어종,  $j$ 는 업종,  $C_{ij}$ 는  $j$ 업종으로 어획된  $i$ 어종의 어획량,  $C_j$ 는  $j$ 어업의 총 어획량,  $V_i$ 는  $i$ 어종의 취약성 평가 점수를 나타낸다.

업종별 취약성 평가 점수와 연근해어업 5년간(2017~2021년) 평균 생산량을 비교한 결과, 대형선망은 어획량에서 1순위이지만 기후변화 취약성이 낮은 고등어를 대부분 어획하여 상대적으로 취약성이 낮은 업종으로, 동해구 외끌이저인망은 어획량 순위가 비교적 낮지만, 기후변화 취약성이 높은 도루묵, 청어 등을 어획하여 취약성이 높은 업종으로 평가되었다.

### 3.4. 양식어업 기후변화 민감도 및 위험도 평가

기후변화에 따른 양식어업 어종별 민감도를 분석하고, 추가로 기후변화 RCP 시나리오(RCP 4.5, RCP 8.5)에 따른 해면 양식품종별 위험도를 평가하였다. 양식어업 기후변화 민감도 분석을 위한 해면과 내수면 대상 어종은 5년

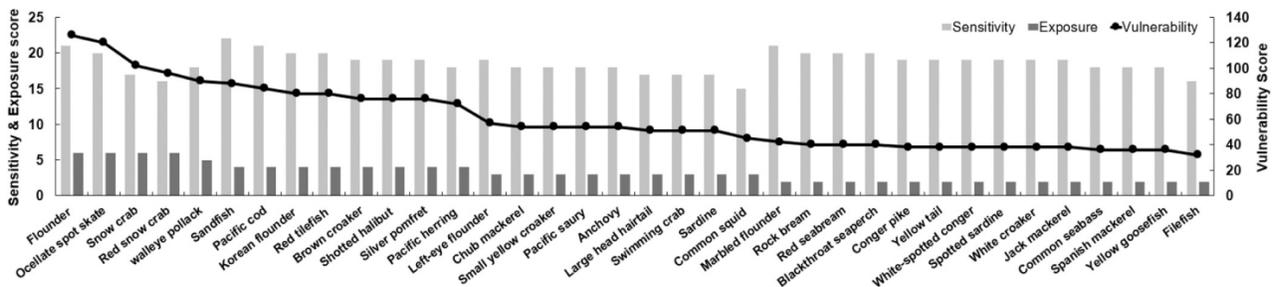


Fig. 5. The score of sensitivity, exposure, and vulnerability for each species (Kim et al., 2023)

Table 1. Vulnerability assessment for sensitivity attributes and climate exposure

Sensitivity attributes (S)	
Abundance (A)	Fecundity; egg production (A1)
	Recruitment period; successful recruitment event that sustains the abundance of the fishery (A2)
	Average age at maturity (A3)
	Reliance on food and habitat; Generalist vs. Specialist (A4)
Distribution (D)	Capacity for larval dispersal or larval duration; (D1)
	Capacity for adult/juvenile movement; lifetime range post-larval stage (D2)
	Physiological tolerance; latitudinal coverage of adult species (D3)
	Spatial availability of unoccupied habitat for most critical life stage: ability to shift distributional range (D4)
Phenology (P)	Temporal mismatches of life-cycle events: duration of spawning, breeding or moulting season (P1)
	Migration; seasonal and spawning (P2)
Climate exposure attributes	
Climate exposure (C)	Relationship between predicted sea surface temperature (RCP8.5) and spawning temperature (C1)
	Relationship between predicted sea surface temperature (RCP8.5) and habitat temperature (C2)

간(2016~2020년) 평균 양식 생산량을 기준으로 상위 10종으로 선정하였다.

해면 양식어종으로는 넙치류, 조피볼락, 송어류, 참돔, 가자미류, 농어류, 감성돔, 돌돔, 쥐치류, 방어류이며, 내수면 양식어종으로는 뱀장어, 메기, 송어류, 향어, 미꾸라지류, 가물치, 동자개류, 산천어, 붕어, 틸라피아이다.

우리나라 양식어종별 기후변화 민감도 분석을 위해 Doubleday et al. (2013)의 평가 방법론을 참고하여 분석하였다. 민감도 분석을 위해 고려한 속성은 9가지로, 친어(Broodstock)의 이용 가능성 및 상태, 산란과 수정, 자어 양식, 미성어 양식, 성장(자연 환경과의 연결), 성장(대체 양식장 및 양식방법 이용 가능성), 성장(사료), 성장(양식장 운영), 성장(질병과 해충)으로 구분하였다(Table 2). 속성별 평가 기준에 따라 하(1점), 중(2점), 상(3점)으로 평가하였다. 영향요인에서 RCP 시나리오로 예측된 표층 수온(SST)과 양식품종별(해면 및 내수면) 적정 및 서식 수온의 상한과의 관계를 속성으로 정하였다.

해면과 내수면 양식어종별 민감도 점수는 속성별 점수

(1~3점)의 합계로 산출하였다. 양식품종별 위험도 평가 결과, 해면 양식어업의 경우 해조류의 기후변화 위험도가 가장 클 것으로 예측되었으며, 어류 중에서는 참돔, 감성돔, 돌돔, 쥐치류의 민감도가 가장 높게 나타났으며, 내수면의 경우 뱀장어 민감도가 가장 높게 나타났다(Fig. 6).

### 3.5. 어업 현장 기후변화 영향 실태조사

어업 현장 기후변화 영향 실태 파악을 위해 동해, 황해, 남해, 제주권역으로 구분하고, 권역별/지역별/어종별 설문 및 탐문 조사 대상을 선정하여 ‘어업 현장 기후변화 영향 실태조사’를 수행하고 있다. 남해동부와 제주권역은 조사 완료하였으며, 2024년 현재 남해서부권역을 수행 중이며, 2026년경 전체 권역에서 완료될 예정이다. 어업 현장 내 주생산 품종의 기후변화 영향을 살펴보기 위해, 생산량 변화, 조업시기 변화, 유류비, 사료비 등 어업소모비용의 증가, 어선어업 기후변화의 영향에 따른 환경요인 변동, 기후변화 대응 필요성 및 대응 방안 등을 설문조사 기반 실태조사를 하였다. 해당 권역 설정과 사용된 설문조사지

Table 2. Risk assessment for sensitivity attributes and score categories

Sensitivity attributes	Score categories
① Broodstock availability & conditioning	Degree of environmental control
② Spawning & fertilisation	Degree of difficulty and environmental control
③ Larval rearing	Degree of complexity and environmental control
④ Juvenile rearing (to stage stocked into growout system)	Degree of complexity and environmental control
⑤ Growout: connectivity to natural environment	Degree of environmental control
⑥ Growout: availability of alternative farm sites & systems	Capacity to relocate farm site or use of alternative farming system
⑦ Growout: feed	Wild verses manufactured sources; frequency of manual feeding
⑧ Growout: farm operations	Level of exposure to the natural environment and environmental extremes
⑨ Growout: diseases & pests	Management and susceptibility
Impact factor	Score categories
Relationship between predicted sea surface temperature (RCP scenario)	Upper limit of sea temperature (culture & inhabitation)

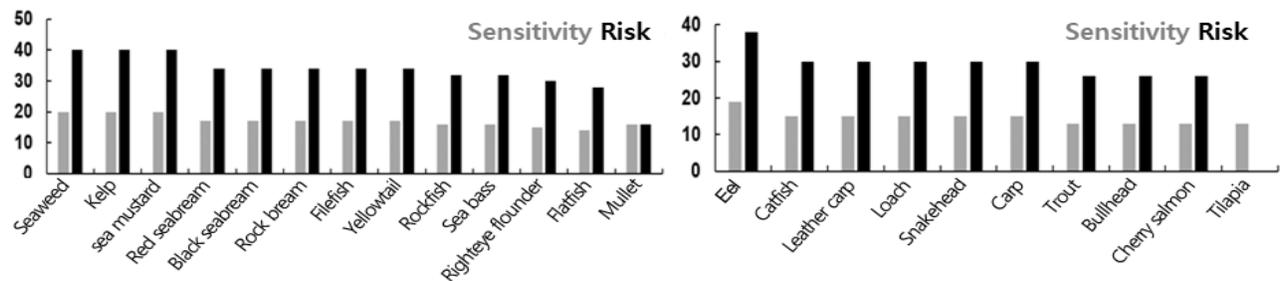


Fig. 6. Risk assessment of sea (left) and inland (right) aquaculture under climate change

는 Fig. 7과 같다. 권역별 어업 현황 분석자료는 국가통계 포털(KOSIS)과 수협위판 자료와 통합 분석 후, 기후위협도 평가에 활용 예정이다.

### 4. 토의 및 결론

IPCC는 AR5와 AR6를 통해 영향 및 취약성 평가 기반의 적응에서 기후위협도 관리 중심으로 전환을 제시하고 있다. 취약성은 기후변화에 대한 노출, 민감도와 적응 능력의 세 가지 속성으로 평가를 하였으며, 기후위협도는 취약성, 노출, 기후 위해의 세 가지로 구성되어 있으며, 기후변화에 따른 다양한 부정적인 결과에 대한 잠재성을 나타내며 그 정도가 클수록 기후 적응 능력이 낮은 것으로 해석할 수 있다(IPCC, 2022).

수산분야의 생물학적 속성들은 민감도와 적응 능력 모두 상호 관련되어 있어 이 두 구성요소를 명확하게 분리하는 것이 어려우므로, 대부분의 선행연구는 IPCC의 정의와 개념을 바탕으로 하되 평가의 목적에 따라 정의 및 측정하는 방법은 다양하게 활용되고 있다. 연근해어업과 양식어업 평가를 위해 민감도 점수와 영향 점수로 표현하고 있으며, 각각 다른 선행연구 내용을 바탕으로 수산분야 취약성과 위험도 정의를 사용하였다.

따라서, 수산분야 기후위협도 평가 기반 및 고도화 방안 마련을 위해 추후 연구에서는 기후변화로 야기 되는

위해성과 노출도에 따른 수산생물의 영향 정도를 파악하여 피해 민감도를 예측할 수 있어야 하기에, IPCC의 정의와 개념에 따른 보다 자세한 세부 평가 지표가 선연되어야 한다. 아울러 기존 AR5 RCP 시나리오를 기반한 수산분야 기후변화 취약성 및 위험도 평가에서, 이미 구축된 AR6 SSP 시나리오에 따른 기후 위험도 평가 체계로 전환이 필요할 것으로 판단된다.

기후변화에 따른 해양환경 변화는 수산분야에 큰 영향을 끼치고 있으며, 연근해어업과 양식어업을 통한 지속적인 생산과 공급을 위하여 기후변화에 따른 어업별·어종별 위험도 평가와 관리방안 모색이 필요하다.

연근해어업과 양식어업은 기후변화에 따른 수온 상승에 노출될 가능성이 크며, 특히 양식어업은 주로 수심이 얕은 연안이나, 반폐쇄적인 내만 해역에서 이루어짐에 따라 이상 수온 등 자연재해에 취약한 상황이다. 따라서, 본 연구에서 기반 구축한 기후변화에 따른 수산분야 위험도 평가 연구를 바탕으로, 위험도가 높은 어종을 우선으로 관리하는 방안을 모색하는 것이 추후 연구에 필요하다.

취약성 및 기후위협도 평가 결과를 이용하여, 필요에 따라 어업구조를 조정하거나, 목표 어종의 변경에 활용할 수 있다. 또한, 기후변화에 취약한 것으로 나타난 양식품종은 고수온의 피해를 최소화할 수 있는 양식 어장의 재배치 또는 고수온에 강한 아열대성 어종 도입이나 품종 개발 등이 필요하다. 반대로, 기후변화 등 외부 영향을 통

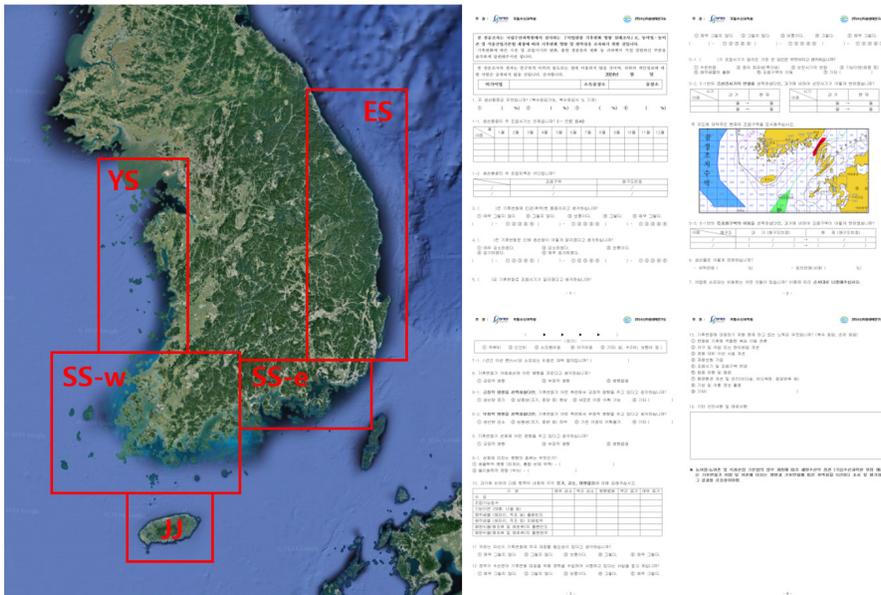


Fig. 7. Climate change impact survey area (left) and its questionnaire (right)

제할 수 있는 환경에서 스마트 양식 기술과 결합하여 생산성을 높이는 방법으로 개선이 필요하다.

연근해어업의 경우 기후변화의 영향으로 어종에 따라 증가와 감소하는 경향성이 다르게 나타나고 있다. 따라서 추후 연구에서는 기후변화 어종별 취약성 평가를 위해 어종별 서식지 등 생태학적 특성을 고려한 취약성 평가 필요하다. 또한 현재 기후 노출 인자로 수온만을 고려하였으나, 외국에서는 염분, 강수량, 해양산성화, 해류, 해수면 상승, 태풍, 홍수, 용존산소 등 고려한 연구를 수행한 바 있다(Foley and Carbines, 2019; Hare et al., 2016; Reid et al., 2019). 따라서 다양한 기후 인자를 선정하여 기후변화에 따른 어종별 위험도 평가를 진행하여야 할 것이다.

## 사사

본 논문은 해양수산부 국립수산과학원(R2024045)의 지원을 받았습니다.

## References

- Doubleday ZA, Clarke SM, Li X, Pecl GT, Ward TM, Battaglene S, Frusher S, Gibbs PJ, Hobday AJ, Hutchinson N, et al. 2013. Assessing the risk of climate change to aquaculture: A case study from South-East Australia. *Aquac Environ Interact* 3(2): 163-175. doi: 10.3354/aei00058
- Falconer L, Hjøllø SS, Telfer TC, McAdam BJ, Hermansen Ø, Ytteborg E. 2020. The importance of calibrating climate change projections to local conditions at aquaculture sites. *Aquaculture* 514: 734487. doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734487
- Foley MM, Carbines M. 2019. Climate Change Risk Assessment for Auckland's Marine and Freshwater Ecosystems. Auckland Council, Te Kaunihera o Tāmaki Makaurau.
- Han IS, Lee JS, Kim C, Yang JY. 2023. Impacts, projections and assessments related to climate change in ocean and fisheries (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 14(6-2): 965-972. doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.6.965
- Handisyde N, Telfer TC, Ross LG. 2017. Vulnerability of aquaculture-related livelihoods to changing climate at the global scale. *Fish Fish* 18(3): 466-488. doi: 10.1111/faf.12186
- Hare JA, Morrison WE, Nelson MW, Stachura MM, Teeters EJ, Griffis RB, Alexander MA, Scott JD, Alade L, Bell RJ, et al. 2016. A vulnerability assessment of fish and invertebrates to climate change on the Northeast U.S. continental shelf. *PLoS ONE* 11(2): e0146756. doi: 10.1371/journal.pone.0146756
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. AR6 climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Geneva, Switzerland: Author.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. AR6: The sixth assessment report. Geneva, Switzerland: Author.
- Kim C, Lee JS, Yang JY, Han IS. 2024. Dynamic downscaling for regional ocean climate modeling around the Korean peninsula and its application in fisheries (in Korean with English abstract). *Korean J Fish Aquat Sci* 57(2): 177-185. doi: 10.5657/KFAS.2024.0177
- Kim MJ, Han IS, Lee JS, Kim DH. 2022. Determination of the vulnerability of Korean fish stocks using productivity and susceptibility indices. *Ocean Coast Manag* 227: 106287. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2022.106287
- Kim MJ, Hong JB, Han IS, Lee JS, Kim DH. 2023. Vulnerability assessment of Korean fisheries to climate change. *Mar Policy* 155: 105735. doi: 10.1016/j.marpol.2023.105735
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2024. Fishery production survey.
- Morrison WE, Nelson MW, Howard JF, Teeters EJ, Hare JA, Griffis RB, Scott JD, Alexander MA. 2015. Methodology for assessing the vulnerability of marine fish and shellfish species to a changing climate. Silver Spring, MD: Office of Sustainable Fisheries, National Marine Fisheries Service. NOAA Technical Memorandum NMFS-OSF-3. doi: 10.7289/V54X55TC
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2023.

- Annual report for climate change trends in fisheries, 2023.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2024. Annual report for climate change trends in fisheries, 2024.
- Payne MR, Kudahl M, Engelhard GH, Peck MA, Pinnegar JK. 2021. Climate risk to European fisheries and coastal communities. *Proc Natl Acad Sci* 118(40): e2018086118. doi: 10.1073/pnas.2018086118
- Pecl GT, Doubleday Z, Ward T, Clarke S, et al. 2011. Risk assessment of impacts of climate change for key marine species in South Eastern Australia. Fisheries Research and Development Corporation, Project No.2009/070. Available at [www.imas.utas.edu.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0017/222092/Risk-assessment-report\\_Part2-Species-profiles-02.pdf](http://www.imas.utas.edu.au/_data/assets/pdf_file/0017/222092/Risk-assessment-report_Part2-Species-profiles-02.pdf)
- Pecl GT, Ward TM, Doubleday ZA, Clarke S, Day J, Dixon C, Frusher S, Gibbs P, Hobday AJ, Hutchinson N, et al. 2014. Rapid assessment of fisheries species sensitivity to climate change. *Clim Change* 127(3): 505-520. doi: 10.1007/s10584-014-1284-z
- Reid GK, Gurney-Smith HJ, Marcogliese DJ, Knowler D, et al. 2019. Climate change and aquaculture: considering biological response and resources. *Aquaculture Environment Interactions* 11: 569-602. doi: 10.3354/aei00332