



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

경 영 학 박 사 학 위 논 문

기후변화에 따른 우리나라 수산업의  
취약성 및 위험성 평가 연구



2023년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

해양수산경영학과

김 무 진

경 영 학 박 사 학 위 논 문

기후변화에 따른 우리나라 수산업의  
취약성 및 위험성 평가 연구

지도교수 김 도 훈

이 논문을 경영학박사 학위논문으로 제출함.

2023년 8월


부 경 대 학 교 대 학 원

해양수산경영학과

김 무 진

김무진의 경영학박사 학위논문을 인준함.

2023년 8월 18일



위 원 장    경 제 학 박 사    김 봉 태    (인)  
위    원    경 제 학 박 사    장 호 근    (인)  
위    원    경 영 학 박 사    조 헌 주    (인)  
위    원    경 영 학 박 사    박 경 일    (인)  
위    원    경 영 학 박 사    김 도 훈    (인)

## 목 차

I. 서론 .....	1
1. 연구의 배경 및 목적 .....	1
2. 연구의 방법 및 구성 .....	5
II. 선행연구 .....	11
1. 기후변화에 따른 어업 취약성 평가 .....	11
2. 기후변화에 따른 양식업 위험성 평가 .....	17
3. 기후변화에 따른 양식업 피해액 추정 .....	22
III. 기후변화에 따른 어업 취약성 평가 .....	25
1. 분석 자료 및 방법 .....	25
2. 분석 결과 .....	38
3. 논의 .....	55
IV. 기후변화에 따른 양식업 위험성 평가 .....	60
1. 분석 자료 및 방법 .....	60
2. 분석 결과 .....	73
3. 논의 .....	89
V. 기후변화에 따른 양식업 피해액 추정 .....	93
1. 분석 자료 및 방법 .....	93
2. 분석 결과 .....	99
3. 논의 .....	111
VI. 요약 및 결론 .....	114
참고 문헌 .....	121

## 표 차례

<표 II-1> 기후변화 어업 취약성 평가 선행연구 내용 요약 및 본 연구의 차별성	16
<표 II-2> 기후변화 양식업 취약성 평가 선행연구 내용 요약 및 본 연구의 차별성	21
<표 II-3> 기후변화 양식업 피해액 추정 선행연구 내용 요약 및 본 연구의 차별성	24
<표 III-1> 평가 대상 어종	26
<표 III-2> 연근해어업 평가 대상 업종	27
<표 III-3> 민감도 및 노출 속성별 점수 기준	31
<표 III-4> RCP 시나리오 종류 및 의미	35
<표 III-5> 36종의 민감도 속성, 노출 속성 및 취약성 점수	42
<표 III-6> 업종별 어획 대상 어종별 점수 및 취약성 점수	46
<표 IV-1> 해면양식업 5개년 평균(2017~2021년) 생산량 및 생산금액	61
<표 IV-2> 평가 대상 양식품종	64
<표 IV-3> 민감도 및 영향 속성별 점수 기준	67
<표 IV-4> 양식품종별 적정 및 한계 수온 상한	70
<표 IV-5> SSP 시나리오 종류 및 의미	72
<표 IV-6> 양식품종별 민감도 속성별 점수	74
<표 IV-7> SSP 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 하에서의 어류의 행정구역별 영향(I) 및 위험(R) 점수	76
<표 IV-8> SSP 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 하에서의 해조류의 행정구역별 영향(I) 및 위험(R) 점수	78
<표 IV-9> SSP 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 하에서의 패류 및 멍게의 행정구역별 영향(I) 및 위험(R) 점수	79
<표 V-1> 양식품종별 생산량 및 생산지역(행정구역별)	95
<표 V-2> 양식품종별 적정 및 한계 수온 상한	96
<표 V-3> 양식품종별 5개년 평균(2017~2021년) 생산량 및 생산금액과 SSP 시나리오별 피해액(million KRW)	110

## 그림 차례

[그림 I-1] IPCC AR6에서의 취약성 및 위험성 개념 .....	5
[그림 I-2] 생태계 위험성 평가를 위한 계층적 개념적 프레임워크 .....	6
[그림 I-3] 연구체계도 .....	10
[그림 II-1] 연근해어업 취약성 평가 결과(선행연구) .....	12
[그림 II-2] 3가지 특성(분포, 풍족도, 생물계절학)을 고려한 민감도 평가 어종 순위(선행연구) .....	13
[그림 II-3] 기후 취약성 점수(선행연구) .....	14
[그림 II-4] 양식업 취약성 평가 결과(선행연구) .....	18
[그림 II-5] 시나리오별(RCP4.5, RCP8.5) 14개 양식품종의 걱정 및 한계 수온 상한 초과 빈도(선행연구) .....	19
[그림 II-6] 위험 점수 순위(검정색), 민감도 점수(회색), 영향 점수(흰색) .....	20
[그림 III-1] RCP8.5 시나리오 하에서의 표층 수온변동 .....	36
[그림 III-2] 민감도 속성별(풍족도, 분포, 생물계절학) 점수 그래프 .....	39
[그림 III-3] 어종별 민감도, 기후 노출 및 취약성 점수 .....	44
[그림 III-4] 근해어업 취약성 점수 .....	50
[그림 III-5] 연안어업 취약성 점수 .....	52
[그림 III-6] 업종별 취약성 점수 순위((O)=근해어업, (C)=연안어업) .....	53
[그림 III-7] 업종별 5개년 평균 생산량(2017~2021년)과 취약성 점수 비교 .....	54
[그림 IV-1] 11개 행정구역별(회색) 연구대상 양식품종 .....	63
[그림 IV-2] SSP 시나리오별(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 양식품종별 위험 점수 및 순위 .....	81
[그림 IV-3] Traffic Light System (TLS)를 통한 SSP 시나리오별 어류의 행정구역별 위험성 평가 .....	83
[그림 IV-4] Traffic Light System (TLS)를 통한 SSP 시나리오별 해조류의 행정구역별 위험성 평가 .....	86
[그림 IV-5] Traffic Light System (TLS)를 통한 SSP 시나리오별 패류 및 멍게의 행정구역별 위험성 평가 .....	88
[그림 V-1] 분석 대상 15종의 양식생산지역(회색) .....	94
[그림 V-2] SSP 시나리오별 어류의 생산지역별 피해 확률(평균 생산금액: 5개년 평균(2017~2021년)) .....	101

[그림 V-3] SSP 시나리오별 해조류의 생산지역별 피해 확률(평균 생산금액: 5개년 평균(2017~2021년) .....	104
[그림 V-4] SSP 시나리오별 패류 및 멍게의 생산지역별 피해 확률(평균 생산금액: 5개년 평균(2017~2021년) .....	107





**A study on assessment of vulnerability and risk to climate change in  
Korean fisheries and aquaculture**

Moo-Jin Kim

Department of Marine & Fisheries Business and Economics,  
The Graduate School, Pukyong National University

**Abstract**

Fishery resources worldwide have been consistently declining due to various factors such as overfishing, climate change, and marine pollution (FAO, 2020). Among these, climate change poses the most extensive threat to marine ecosystems caused by human activities (Halpern et al., 2008). Climate change affects the survival, growth, reproduction, and distribution of species, as well as populations and entire ecosystems. Therefore, climate change not only directly affects fisheries production by causing changes in marine biota and ecosystems, but also affects the growth and stability of aquaculture production by causing changes in the growth, reproduction and behavior of aquaculture species. To establish policies to respond to climate change, the importance of climate change vulnerability and risk assessments is growing.

In the fisheries sector, the vulnerability to climate change of 36 species was assessed by combining sensitivity and exposure attributes. Based on this result, the vulnerability of 24 fisheries was evaluated. In this study, the relationship between future seawater temperatures and spawning/habitat temperatures of each species was considered as the exposure factor. Species with high scores in both sensitivity and climate exposure were evaluated as highly vulnerable, and industries with high catch rates of these species were considered relatively more

vulnerable. Therefore, it is necessary to prioritize the management of industries with high catch rates of relatively vulnerable fish species when establishing future coastal fisheries policies.

In the aquaculture field, the vulnerability of 17 species to climate change was assessed by combining sensitivity and impact attributes, and the risk potential of the aquaculture area was evaluated through TLS. As for the exposure factor, the relationship between the predicted future seawater temperature and the optimal/tolerable temperature thresholds for each aquaculture species was considered. The results indicated that seaweed and sea squirt were the most vulnerable species to climate change, and all species were predicted to face greater risks in 2100 than in 2050 under the SSP5-8.5 scenario. Therefore, species with a high-risk score should be prioritized in management, and different adaptation measures should be established for each species.

In addition, damage of the aquaculture species to climate change was estimated by multiplying the probability of damage with the production value. The probability of damage was assessed by assigning scores based on whether the predicted future seawater temperature exceeded an optimal and tolerable temperature threshold for each aquaculture species, and it was estimated by converting it into a percentage. The estimated probability of damage was lowest in the SSP1-2.6 scenario and highest in the SSP5-8.5 scenario, with greater damage expected in the 2100 than in the 2050. Abalone, with the highest unit price, was the species with the highest damage in all scenarios, Bay scallop was the species with the lowest damage. When selecting species that require priority management to respond to climate change, the probability of damage, unit price of species, and other relevant factors should be taken into consideration.

The purpose of this study is to identify management priorities by assessing the vulnerability and risk to climate change in Korean fisheries and aquaculture. It additionally aims to estimate the damage of aquaculture that could be incurred from the potential risk of climate change. The results of this study are expected to be utilized as valuable information for establishing measures and policies to respond to climate change.

Keywords : Fisheries, Aquaculture, Climate change, Vulnerability, Risk, Damage, RCP scenarios, SSP scenarios

# I. 서론

## 1. 연구의 배경 및 목적

전 세계 수산자원은 남획, 기후변화, 해양오염 등 다양한 요인에 의해 지속적으로 감소하는 것으로 평가되고 있다(FAO, 2020). 특히 기후변화는 해양생태계가 직면한 가장 광범위한 인간 활동에 의한 위협이다(Halpern et al., 2008). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제6차 평가보고서(AR6)에서는 SSP (Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오 하에서 21세기 동안 해양온난화가 빠르게 진행되며, 해양산성화 및 탈산소화가 증가할 것으로 예측하였다(IPCC, 2021).

기후변화에 따른 수온 상승, 해양산성화 등은 생물 종의 생존, 성장, 번식 및 분포에 영향을 미치며, 더 나아가 개체군 또는 전체 생태계 수준에서도 영향을 미치고 있다(Brierley and Kingsford 2009; Brown et al., 2010; Pörtner and Peck, 2010; Prakash, 2021). 즉, 기후변화는 수산자원의 생물상과 생태계 변동을 야기하여 어로어업 생산에 직접적인 영향을 준다(Brander, 2007; Cheung et al., 2009; Perry et al., 2010; Sumaila et al., 2011). 또한 양식어종의 성장, 번식 및 행동에 변화를 야기하여(Handisyde et al., 2006; Brander et al., 2017) 미래 양식업의 성장 및 안정성에도 영향을 미친다(Ahmed et al., 2019; Galappaththi et al., 2020; Pernet and Browman, 2021).

이처럼 기후변화에 따른 이상기후의 영향으로 수산업에 미치는 부정적 영향과 위험성이 클 것으로 전망됨에 따라 FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)에서는 ‘기후변화 대응 수산업의 적응 관리’ 보고서를 통하여 기후변화 대응 어업관리 시스템 구축 등의 관리방안을 제시하였다(FAO, 2021). 우리나라에서도 기후변화 대응을 위한 법적 근거 마련도 추진 중에 있다(국립수산과학원, 2022a). 구체적으로

제4차 기후변화대응 해양수산부문 종합계획을 수립하여 수산업의 기후위기 대응을 위해 기초 조사를 강화하고, 해양생태계의 영향 분석 및 예측체계 등을 마련하고자 하였다.

우리나라는 서쪽으로는 황해, 남쪽으로는 동중국해, 동쪽으로는 동해에 둘러싸여 있으며, 각 해역의 해양환경 특성 및 생태계 구성이 다르다(Kim et al., 2007). 연근해어업 생산량은 1986년 173만 톤을 기록한 이후 감소하기 시작해 2016년 이후에는 대부분 연간 생산량이 100만 톤을 넘지 못하고 있다(통계청, 2023).

어업생산량에서의 어종별 구성 비율을 살펴보면, 난류성 어종(고등어, 살오징어, 멸치)은 증가, 한류성 어종(명태, 도루묵 등)은 감소하고 있으며, 이러한 변화는 기후변화에 따른 수온 상승, 남획, 어장 축소 등 다양한 원인이 복합적으로 작용한다(국립수산과학원, 2022a). 특히 기후변화로 인한 우리나라 해역의 주요 어종 및 생태계 구조가 변화하고 있으며, 이는 어업생산량의 변동에 직접적인 영향을 미치고 있다는 것이 확인되었다(Zhang et al., 2004; Kim et al., 2007; 정석근 외, 2013; 김종규, 2022). 이에 최근에는 기후변화에 따른 수산자원의 변동성 심화를 인식하고, 기후변화를 고려한 연구 및 관리의 중요성이 커지고 있다(해양수산부, 2019).

우리나라의 주요 양식 지역은 남해안의 전라남도, 경상남도, 제주도이며, 동해안과 서해안에 일부 분포되어 있다. 양식업 생산량은 지속적으로 증가하여 2017년 이후에는 연간 생산량이 200만 톤을 넘었으며, 전체 수산물 생산량의 약 63%에 이르며 점차 비중이 증가하고 있다(통계청, 2023). 양식업 생산량에서 가장 높은 비율을 차지하는 품종은 해조류이며, 뒤이어 패류, 어류이다. 양식업은 대부분 연안에서 이루어져 자연환경에 의존성이 크고, 자연재해에 취약하다.

우리나라는 기후변화에 기인한 이상기후 영향으로 수온의 계절별 양극화가 심해지고 있으며(Han and Lee, 2020), 최근 54년간(1968~2021년) 우리나라 해역의 연평균 표층 수온은 약 1.35℃ 상승하였다(국립수산과학원, 2022a). 고수온으로 인한 양식생물 대량 폐사가 최근 11년간(2011~2021년)

전체 자연재해에 따른 피해액의 53%를 차지하고 있어 이상 수온으로 인한 양식수산물 피해를 줄이고, 미래의 어장환경변화 대응체제 마련의 중요성이 더욱 커지고 있다(국립수산과학원, 2022a).

기후변화는 국내외적으로 수산분야에 상당한 피해와 손실을 초래하고 있으며, 기후변화의 영향은 이전의 평가되어 온 것보다 더 크고 광범위하게 나타나고 있다(IPCC, 2022). 따라서 수산자원의 지속가능한 생산을 위해 기후변화 대응 어업과 양식업의 적응 및 회복력 구축 시스템 수립의 필요성이 증가되고 있다(FAO, 2020). 그리고 이를 위해 무엇보다 기후변화에 따른 취약성 및 위험성 평가의 중요성이 대두되고 있다(IPCC, 2014; FAO, 2015; 2020; Hare et al., 2016; Spencer et al., 2019; Bueno-Pardo et al., 2021).

우리나라에서 지금까지 수산분야의 기후변화에 따른 취약성 및 위험성 평가에 관한 다수의 연구가 진행되었다. 어업에서는 분석 대상을 지역 단위로 선정하여 지역별 취약성을 평가한 연구(이버들 외, 2011), 향후 수온 및 염분의 변화율을 기후 지표로 선정하여 연근해 업종의 취약성을 평가한 연구(김봉태 외, 2018)가 있다. 그러나 이러한 연구들은 기후변화에 직접적인 영향을 받는 어종들의 생태학적 특징들을 고려하지 못한 한계점이 있다. 이에 본 연구에서는 연근해어업의 어획 대상 어종들의 생태학적 특징을 고려하기 위해 어종들의 산란 및 서식 수온과 향후 예측 수온과 비교하는 것을 기후 지표로 선정하여, 기후변화에 상대적으로 취약한 어종을 파악하고자 하였다. 더 나아가 취약한 어종들을 많이 어획하는 업종들을 분석하고자 한다.

양식업에서는 향후 예측 수온으로 RCP 시나리오를 선정하여 해수온 상승에 따른 생태학적 특성을 고려한 양식품종별 영향 평가와 취약성 평가가 진행되었지만(Kim et al., 2019; Kim et al., 2021), 모든 생산지역을 고려하지 못한 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 양식품종별로 모든 생산지역을 대상으로 하였으며, 향후 예측 수온으로 IPCC 제6차 평가보고서에서 채택된 SSP 시나리오의 수온을 선정하여 기후변화에

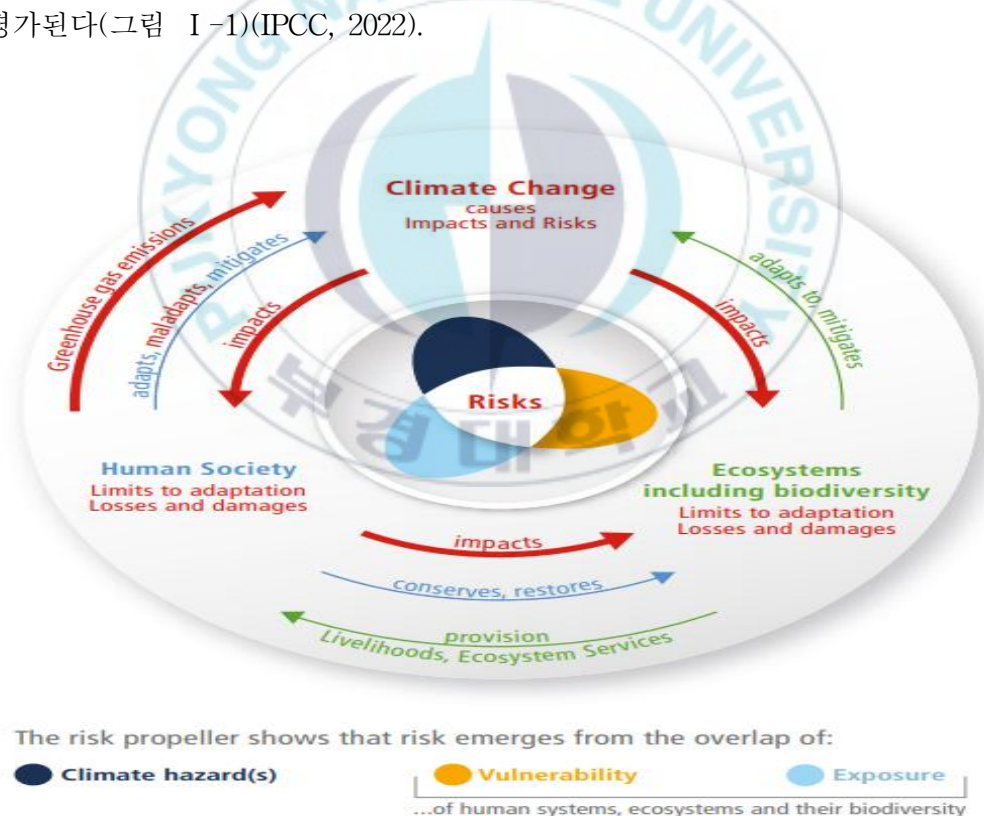
따른 양식품종별 생산지역별 위험성을 평가하고자 한다.

양식업에서는 또한 회귀분석을 통해 기후변화에 따른 양식품종들의 향후 생산량 예측 연구와 이를 바탕으로 사회적 잉여를 추정한 연구가 있다(정민경·남종오, 2023; 윤유진, 2023). 그러나 양식품종들은 각기 다른 생물학적 그리고 생태학적 특징들을 가지고 있으므로 설명변수인 수온 및 염분 등이 통계적으로 유의하더라도 단순한 회귀분석만으로 생산량을 예측하는 것은 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 양식품종들의 생태학적 특징을 고려하여 예측된 피해 확률과 생산금액을 조합하여 기후변화에 따른 향후 양식품종들의 피해액을 추정하고자 한다.

본 연구의 목적은 기후변화에 따른 우리나라 수산업의 취약성과 위험성을 평가하여 어업에서는 기후변화에 상대적으로 취약한 어종과 업종 그리고 양식업에서는 양식품종과 생산지역을 파악하여 우선적 관리가 필요한 순위를 식별하는 것이다. 이와 더불어 양식업의 피해액 추정을 통해 기후변화의 잠재적인 위험으로부터의 양식품종별 피해 규모를 파악하고자 한다. 이러한 결과는 기후변화에 영향을 받는 어업과 양식업의 지속 가능한 생산을 위한 제도 도입과 기후변화 대응 정책 수립에 활용될 것으로 기대된다.

## 2. 연구의 방법 및 구성

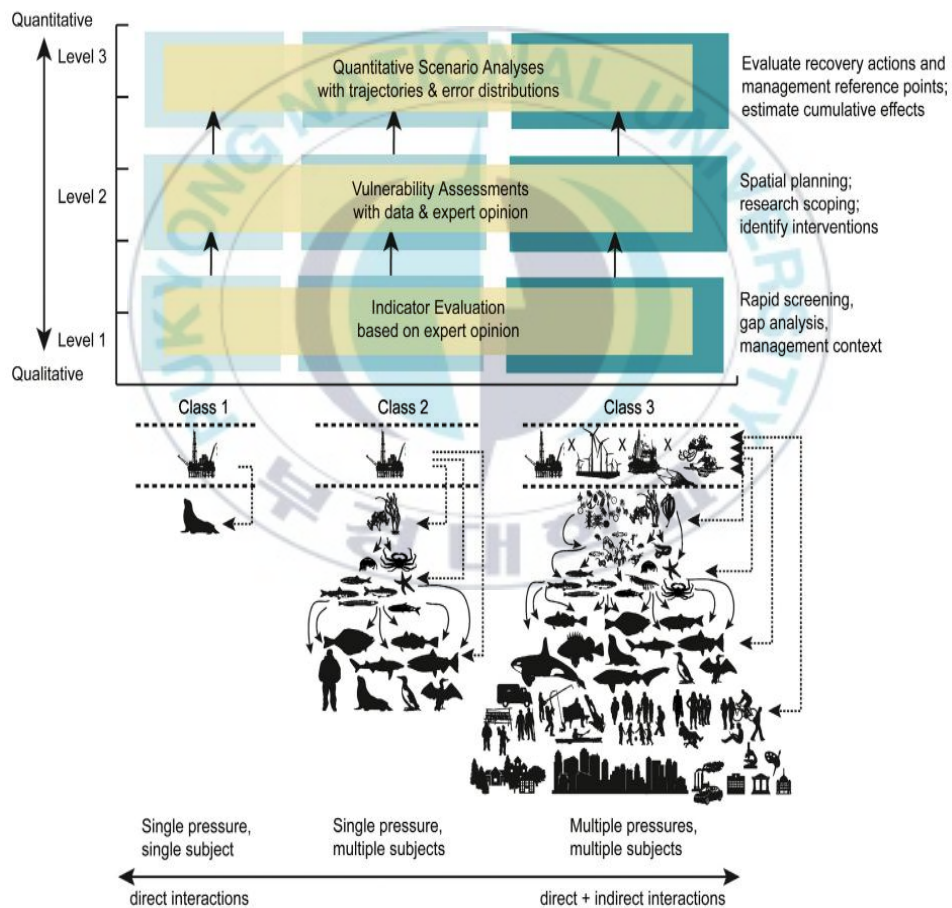
IPCC의 취약성 및 위험성 정의와 개념은 과학적 연구와 데이터의 수집, 분석방법론의 진보에 기반하여 지속적으로 발전되고 개선되어왔다. 최근 발표된 IPCC 제6차 평가보고서(AR6)에 따르면 취약성(vulnerability)은 부정적인 영향을 받을 경향을 의미하며, 피해에 대한 민감성(sensitivity)과 피해를 대처하고 적응하기 위한 능력(adaptive capacity)을 포함하는 다양한 개념과 구성요소를 포괄하여 평가된다. 위험성은 부정적인 결과가 발생할 가능성을 의미하며, 위험 요인(Hazard)과 해당 위험에 영향을 받는 인간 또는 생태계의 노출(exposure) 및 취약성(Vulnerability) 사이의 상호작용으로 평가된다(그림 I-1)(IPCC, 2022).



자료 : IPCC (2022)

[그림 I-1] IPCC AR6에서의 취약성 및 위험성 개념

IPCC의 정의와 개념을 바탕으로 취약성 및 위험성 평가는 수산분야를 포함하여 다양한 분야에서 광범위하게 적용되고 있으며, 평가의 목적에 따라 정의 및 측정하는 방법이 다양하게 활용되고 있다(Allison et al., 2009; Cinner et al., 2013; Conner et al., 2003; Koelmans et al., 2022). 이에 Holsman et al. (2017)은 [그림 1-2]과 같이 수산분야에서 다양하게 적용되고 있는 취약성 및 위험성 평가 선행연구들을 평가 관심 주제와 분석 방식에 따라 단계별로 구분하였다.



자료 : Holsman et al. (2017)

[그림 1-2] 생태계 위험성 평가를 위한 계층적 개념적 프레임워크



Holsman et al. (2017)은 Hobday et al. (2011)의 3단계 계층적인 생태학적 위험성 평가(Ecological risk assessment, ERA: Level 1~3: level 1은 qualitative, level 2는 semi-quantitative, level 3은 quantitative)에 자연적 또는 인위적 압력들을 위험 요인으로 추가하고, 압력과 주제 간의 다양한 상호작용을 나타내기 위하여 3가지 Class로 접근 방식을 확장하였다. 구체적으로, Class 1은 단일 중심 주제에 대한 단일 압력의 직접적 영향을 평가를 나타내고, Class 2 분석은 단일 압력이 여러 생태계 주제에 미치는 영향 또는 단일 주제에 대한 여러 압력의 영향을 고려하며, 그리고 Class 3은 직접적 및 간접적 다중 압력과 다중 주제 간의 상호 및 누적 상호작용을 고려한다.

본 연구는 생태계 위험성 평가에서 자연적 압력에 해당하는 기후변화를 고려하였으며, 전문가 의견 기반의 정량적인 분석이 아닌 준-정량적인(semi-quantitative) Level 2, 다수의 종을 고려하는 Class 2에 해당하는 수산업의 취약성 및 위험성 평가를 하였다. 다양한 기후 요소 중 어종에 큰 영향을 미치는 수온(Pecl et al., 2014; Asch, 2015)을 선정하여 기후 시나리오별로 예측된 수온에 따른 어종의 어종별 및 업종별 취약성 평가, 양식업의 품종별 및 생산지역별 위험성 평가 그리고 피해액을 추정하였다(그림 1-3). 기후변화에 따른 수산업의 취약성 및 위험성 평가의 정의 및 방법론은 선행연구들을 바탕으로 하였다.

먼저, 기후변화 취약성 평가는 Morrison et al. (2015)을 기반으로 하였으며, 민감도와 노출을 주된 구성요소로 평가하였다. 민감도는 기후변화에 대한 취약성을 예측할 수 있는 종의 생물학적 생태학적 변수들이 속성으로 구성되며, 노출은 종의 생산성 또는 분포 등에 영향을 줄 수 있는 기후 요인을 속성으로 구성되었다. 기후변화 위험성 평가는 Doubleday et al. (2013)을 기반으로 하였으며, 민감도와 영향을 주된 구성요소로 평가하였다. 민감도는 기후변화에 대한 위험을 예측할 수 있는 양식품종 및 관련 양식 과정이 속성으로 구성되며, 영향은 분석 대상

종들에게 기후 요인이 미치는 영향 정도를 평가하는 속성으로 구성되었다.

따라서 본연구에서는 취약성 및 위험성 평가를 각각 다른 정의, 관심 주제와 구성요소를 기반으로 수행하였다. 취약성 평가는 기후 노출에 따른 종의 생산성 및 풍족도 감소 정도를 파악하는 것을 의미한다. 그리고 위험성 평가는 기후변화에 따른 종의 영향 정도를 파악하여 피해 규모를 예측할 수 있는 것을 의미한다. 즉, 취약성 평가는 분석 대상 종들의 상대적인 취약 정도만을 평가하므로 피해 정도를 추정하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 영향 정도를 파악할 수 있는 양식업에서는 위험성 평가를, 영향 정도를 정확히 예측하기 어려운 어업에서는 취약성 평가를 수행하였다.

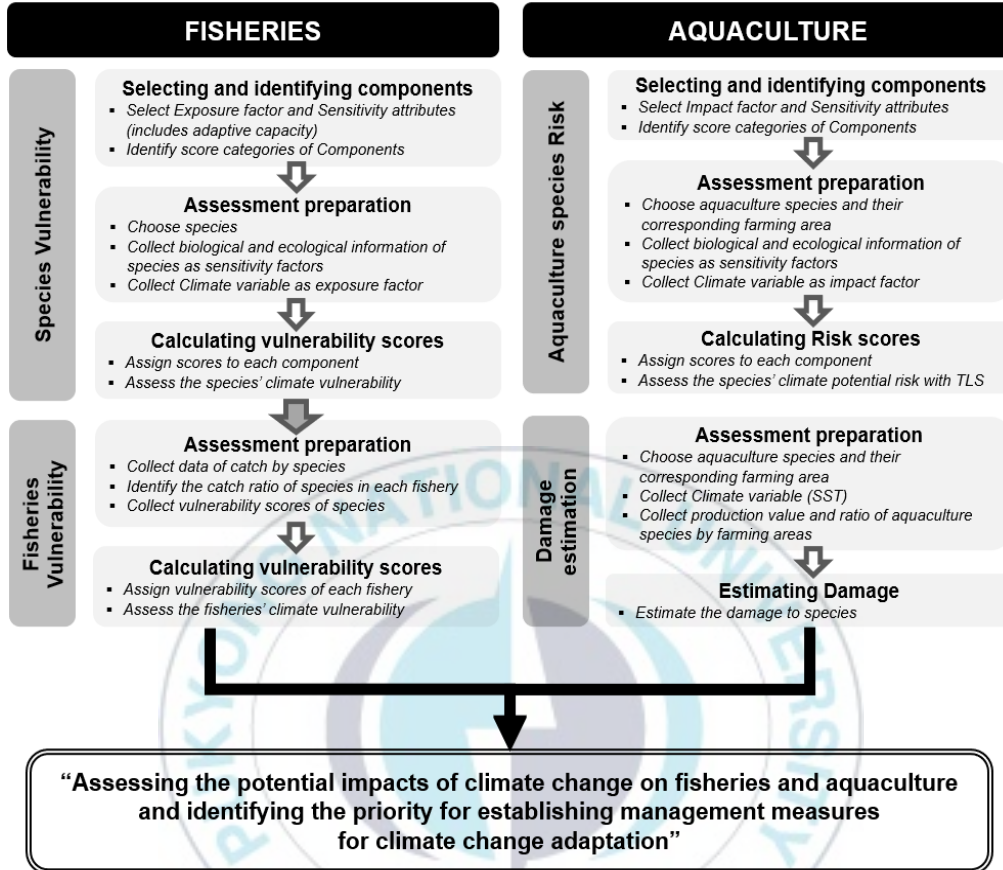
어업의 취약성 평가는 수산생물의 민감도를 고려하여 IPCC 제5차 평가보고서(AR5)에서 채택된 RCP 시나리오 하에서의 기후변화에 따른 어종별 취약성 평가하고, 이를 바탕으로 연근해어업 업종들의 어종별 평균 어획 비율을 고려하여 연근해어업의 업종별 취약성을 최종적으로 평가하였다. 취약성의 방법론은 Morrison et al. (2015)을 기반으로 하여 민감도와 노출을 주된 2개의 구성요소로 조합하여 평가하였다. 본 연구는 기후변화에 상대적으로 취약한 어종 및 업종을 파악하고 우선 관리가 필요한 어종 및 업종을 식별하여 기후변화에 따른 어업의 정책적인 방향을 제시하고자 한다.

양식업의 위험성 평가는 양식품종의 민감도를 고려하여 IPCC 제6차 평가보고서(AR6)에서 채택된 SSP 시나리오 하에서의 기후변화에 따른 양식품종들의 모든 생산지역별 위험 정도를 평가하였다. 위험성의 방법론은 Doubleday et al. (2013)을 기반으로 하여 민감도와 영향을 주된 2개의 구성요소로 조합하여 평가하였다. 그리고 평가된 위험성 점수는 Traffic light system (TLS)의 3가지 기준으로 재평가되어 양식품종별로 기후변화에 따른 지역별 양식 가능성을 평가하였다. 본 연구는 향후 양식 적지의 선별, 대체 품종이 필요한 양식품종 파악, 그리고 양식품종별 지역적 재배치 등 기후변화에 따른 양식업 적응대책

수립을 위한 정책적인 방안을 제시하고자 한다.

양식의 피해액은 양식품종의 적정 및 한계 수온을 고려하여, SSP 시나리오 하에서의 수온 상승에 따른 추정된 양식품종별 생산지역별 피해 확률과 생산금액의 곱으로 추정되었다. 본 연구는 기후변화에 따라 어떤 품종 및 생산지역이 가장 높은 피해액이 추정되는지 식별하고 우선적 관리가 필요한 양식품종 생산지역을 파악한다. 이를 통해, 양식품종별 각기 다른 대응 방안을 제시하고자 한다.

본 연구의 내용은 제1장 서론, 제2장 선행연구, 제3장 기후변화에 따른 어업 취약성 평가, 제4장 기후변화에 따른 양식업 위험성 평가, 제5장 기후변화에 따른 양식업 피해액 추정, 제6장 결론 및 요약으로 구성된다. 제1장에서는 연구의 배경 및 목적 그리고 연구의 방법 및 구성에 관해 서술, 제2장에서는 본 연구와 관련된 선행연구를 검토하였다. 제3장에서는 기후변화에 따른 어종별 및 연근해어업의 업종별 취약성을 평가하였고, 제4장에서는 기후변화에 따른 양식품종별 모든 생산지역별 위험을 평가하였고, 제5장에서는 기후변화에 따른 양식품종별 생산지역별 피해 확률과 피해액을 추정하였다. 제6장에서는 각 장의 연구 결과를 요약, 기대효과, 한계점을 서술하였다.



[그림 1-3] 연구체계도

## II. 선행연구

본 연구에서는 기후변화에 따른 우리나라 수산업(어업 및 양식업)의 취약성 및 위험성을 평가하였다. 본 장에서는 수산분야에서의 기후변화를 고려한 취약성 및 위험성 평가 선행연구를 검토와 본 연구의 차별성을 제시하였다.

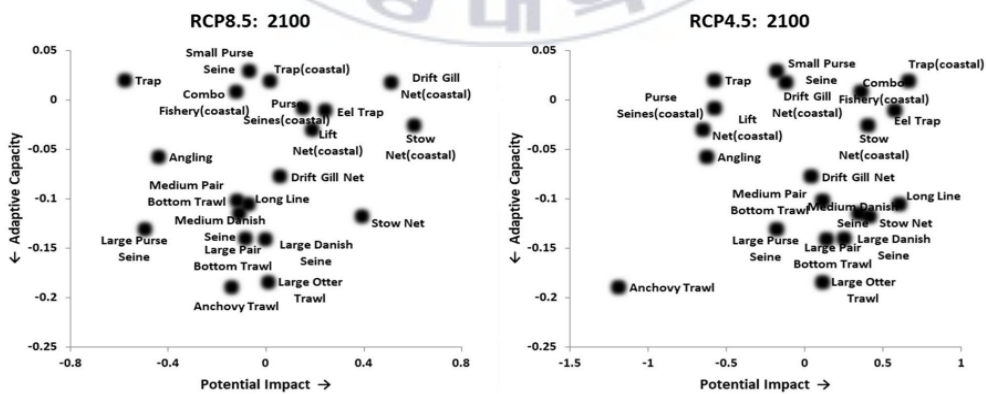
### 1. 기후변화에 따른 어업 취약성 평가

기후변화에 따른 어업 취약성 평가와 관련된 국내·외 선행연구를 검토하였다. 국내 연구로는 이버들 외(2011)와 김봉태 외(2018), 국외 연구로는 Pecl et al. (2014)과 Hare et al. (2016)이 있다.

먼저, 이버들 외(2011)는 어업만을 대상으로 한 것이 아닌 우리나라 수산업의 산업적 특성과 기후변화의 물리적 영향을 동시에 고려하여 지역 단위의 기후변화 취약성 평가를 진행하였다. 취약성 평가를 위한 정의 및 지표는 IPCC (2001)를 기반으로 하였으며, 가용한 자료 내에서의 기후 노출, 민감도, 적응능력 구성요소들의 지표(대리변수)를 선정 및 개발하였다. 구성요소별 지표들을 살펴보면, 기후 노출은 국립수산과학원의 정선해양관측자료인 과거의 표층수온, 염분, 용존산소 등을, 민감도는 기후변화 자극에 의해 현재 사회 시스템이 영향을 받는 정도를 측정하기 위해 수산업 생산특성, 지역 수산업 특성 등을, 적응능력은 기후 노출의 부정적인 측면을 줄일 수 있는 물적 인프라, 사회적 자본 등을 지표로 선정하였다. 또한, 대리변수의 가중치를 임의로 부여하지 않고 전문가 설문에 기초한(AHP 기법) 지표별 가중치를 적용하고, 상대적 평가를 위해 기후변화에 따른 11개 지역을 5분위로 구분하여 취약성을 평가하였다. 평가 결과, 전남, 경남, 제주는 기후변화에 대한 민감도가 높고 상대적으로 적응능력이 낮아 기후변화에 가장 취약한 지역으로 확인되었다. 울산과

경기의 경우 재정자립도, 물적 인프라, 사회자본을 보유하고 있어 비교적 취약성이 낮게 평가되었다. 이에 취약성이 높게 평가된 지역을 중심으로 기후변화 적응능력 향상을 위한 대책이 필요하다고 제시하였다.

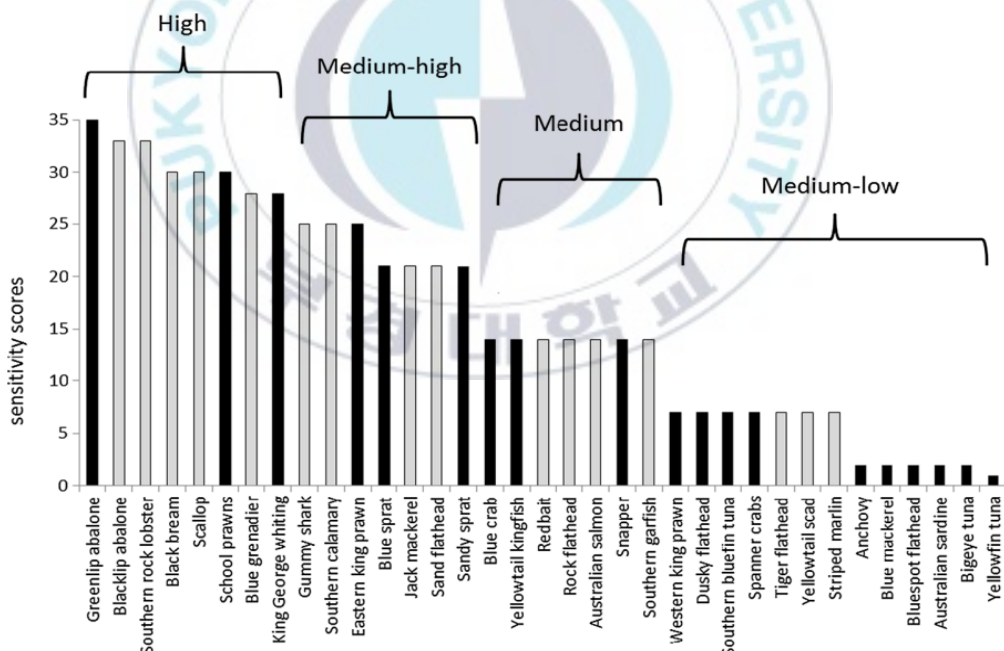
김봉태 외(2018)는 Representative Concentration Pathway (RCP) 시나리오를 적용하여 연근해어업의 기후변화 취약성을 평가하였다(그림 II-1). 취약성 평가는 이버들 외(2011)와 같이 IPCC (2001) 정의를 활용하였지만, 지역 단위의 평가가 아닌 연근해어업(남해안 지역 대상)을 대상으로 한 평가이므로 구성요소별 지표들에서 차이가 있다. 구성요소별 지표들을 살펴보면, 기후 노출에서는 IPCC 5차 평가보고서에서 채택된 RCP 시나리오를 예측된 수온과 염분(국립수산과학원, 2016a)을, 민감도는 각 업종이 어획하는 수산생물의 민감도를, 그리고 적응능력은 어업인의 능력을 나타낼 수 있는 어업인의 연령, 경험 및 교육 정도 등을 지표로 선정하였다. 세부 지표들의 단위가 다르므로 단위에 중립적인 결과가 나오도록 표준화하고, 가중치는 김봉태 외(2016)의 연구에서 산정된 값을 이용하였다. 남해안 지역의 연근해어업 기후변화 취약성을 평가 결과, RCP 시나리오별 취약한 업종 순위가 약간의 차이는 있지만 대체적으로 근해어업보다 연안어업이 순위가 높았으며, 이에 기후변화에 대한 대책 마련이 연안어업이 우선시되어야 함을 시사하였다.



자료: 김봉태 외(2018)

[그림 II-1] 연근해어업 취약성 평가 결과(선행연구)

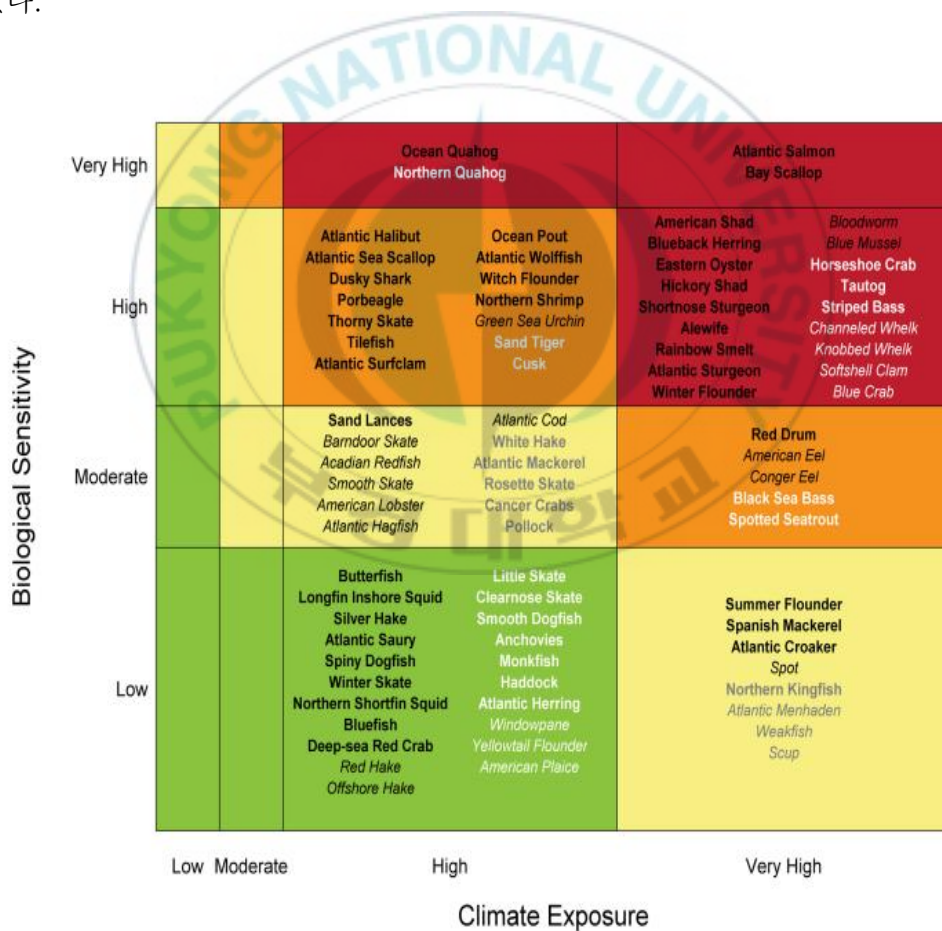
Pecl et al. (2014)은 호주 남동부지역에 서식하는 주요 35종의 기후변화에 따른 어종별 민감도를 평가하였다(그림 II-2). 평가를 위한 구성요소들은 풍족도, 분포 그리고 생물계절학이다. 구성요소별 지표들을 살펴보면, 풍족도는 어종의 회복력을 판단할 수 있는 포란수, 성숙연령 등을, 분포는 변화의 수용력을 보기 위한 유생의 분포, 성어/미성어의 이동 등을, 생물계절학에는 기후변화가 종의 생활사 시기에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 판단하기 위한 환경변수와 산란과 번식의 관계, 회유 특성 등을 지표로 선정하였다. 구성요소별 평가 결과에서는 생물계절학이 전반적으로 높게 나타났으며, 어종별 평가 결과에서는 전복류, 바닷가재, 감성돔, 가리비, 새우, 킹크랩 등이 기후변화에 민감한 종으로, 멸치, 참다랑어류 등이 기후변화에 덜 민감한 종으로 평가되었다.



자료: Pecl et al. (2014)

[그림 II-2] 3가지 특성(분포, 풍족도, 생물계절학)을 고려한 민감도 평가 어종 순위(선행연구)

Hare et al. (2016)은 미국 북동부의 어류와 무척추동물을 대상으로 기후변화에 따른 취약성을 평가하였다(그림 II-3). 취약성 평가를 위해 민감도와 노출을 주된 2개의 구성요소로 조합하여 평가하였으며, 민감도는 자원상태, 성장률, 산란주기 등을, 기후 노출은 수온, 염분, 해양산성화 등을 지표들로 선정하였다. 기후변화에 따른 어종별 취약성 평가 결과, 평가 대상 종의 절반이 기후변화 취약성이 높거나 매우 높음으로 평가되었으며, 저서성 무척추동물 종은 가장 취약한 종으로 평가되었다. 또한, 대부분 종은 기후변화에 대한 예상변화에서 분포 변화 가능성이 컸다.



자료: Hare et al. (2016)

[그림 II-3] 기후 취약성 점수(선행연구)



어업의 취약성 평가 선행연구를 검토한 결과, 분석 방법과 분석 자료에서 본 연구와의 차별성을 확보하였다(표 II-1). 분석 방법에 있어서 국내 선행연구는 기후변화에 따른 취약성 평가를 위해 민감도 세부 속성을 사회경제적 요소를 중점적으로 다루거나, 수산생물의 생태학적 특징을 일부만 고려하였다. 하지만 본 연구에서는 기후변화에 직접적인 영향을 받는 어종의 생물학적 및 생태학적 특징을 중점적으로 다루고 종의 적응능력을 포함하는 국외 선행연구의 민감도 속성들을 추가하여 평가하였다. 기후 노출 속성의 경우 국외 선행연구에서는 전문가들의 의견을 기반으로 한 정성적 평가가 이루어졌지만 본 연구에서는 향후 예측된 수온과 어종별 산란 및 서식 수온 자료를 활용하여 준-정량적인 방법으로 평가하였다. 또한, 구성요소별 세부 지표들은 3가지 기준에 따라 점수를 부여하였으며, 어종별 평가 결과를 바탕으로 업종들의 어종별 평균 어획 비율을 고려하여 최종적으로 업종별 취약성을 평가하였다.

선행연구 검토 결과, 분석 자료에 있어서 국내 선행연구는 분석 대상을 지역 단위로 선택하여 지역별 취약성을 평가하거나, 남해안 지역에 한정하여 업종별 취약성을 평가하였다. 또한, 향후 수온 자료의 경우 자료 확보의 한계로 과거의 수온 자료를 사용하거나 향후 예측된 수온이나 염분 자료의 변화율을 이용한 평가가 이루어졌다. 이에 비해 본 연구는 우리나라 전체 해역에서 자료 활용이 가능한 36종의 산란 및 서식 수온과 향후 수온을 직접 비교하고, 3가지 점수 기준에 따라 평가하였으며, 이 결과를 바탕으로 이를 어획하는 24개 업종의 취약성을 평가하였다.

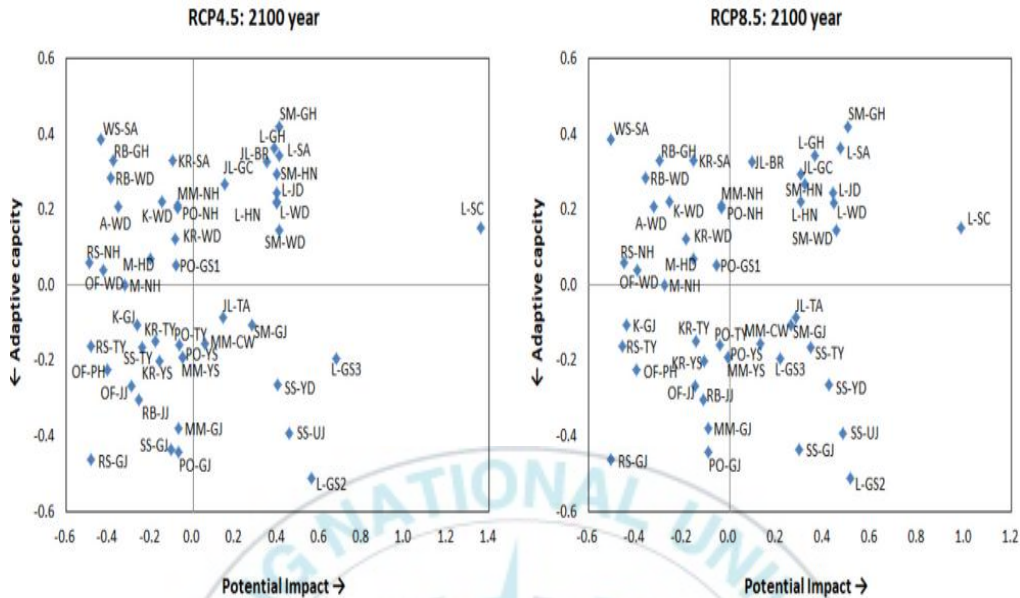
<표 II-1> 기후변화 어업 취약성 평가 선행연구 내용 요약 및 본 연구의 차별성

구분	주요 내용	본 연구의 차별성
이버들 외(2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후변화에 따른 수산부문의 지역별(11개) 취약성 평가</li> <li>- IPCC (2001)의 취약성 평가 정의 및 지표 활용: 기후 노출, 민감도, 적응능력</li> <li>- 기후 노출은 과거 자료 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후변화에 따른 어종별 및 업종별 취약성 평가</li> <li>- 평가 대상 어종은 우리나라 전체 해역에서 자료 활용이 가능한 36종, 평가 대상 어업은 24개(근해어업 17개 그리고 연안어업 7개)</li> </ul>
김봉태 외(2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 남해안 지역을 대상으로 연근해어업의 취약성 평가</li> <li>- 기후 노출은 RCP 시나리오를 통해 예측된 수온 및 염분 변화율 고려</li> <li>- 수산생물의 민감도를 일부 고려하여 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 최근 5개년(2017~2021년) 평균 어획량 자료 활용</li> <li>- 어종의 생물학적 및 생태학적 특징을 중점적으로 고려</li> </ul>
Pecl et al. (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후변화에 따른 어종별 생태학적 민감도 평가</li> <li>- 평가를 위한 구성요소는 풍족도, 분포, 생물계절학</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 속성별 점수 기준에 따라 평가 (1점, 2점, 3점)</li> <li>- 기후 노출은 어종별 산란 및 서식 수온과 향후 예측 수온(RCP 8.5)을 직접적으로 비교하여 평가</li> </ul>
Hare et al. (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후변화에 따른 어종별 취약성을 평가</li> <li>- 기후 노출은 RCP 8.5 시나리오로 예측된 요인들 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 어종별 평가 결과를 기반으로, 업종들의 어종별 평균 어획 비율을 고려하여 업종별 취약성 평가</li> </ul>

## 2. 기후변화에 따른 양식업 위험성 평가

기후변화에 따른 양식업 위험성 평가와 관련된 국내·외 선행연구를 검토하였다. 국내 연구로는 Kim et al. (2019)과 Kim et al. (2021), 국외 연구로는 Doubleday et al. (2013)이 있다.

먼저, Kim et al. (2019)은 RCP 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 양식업의 취약성을 평가하였다(그림 II-4). 취약성 평가는 IPCC의 취약성 정의에 따라 기후 노출, 민감도, 적응능력으로 선정하였다. 주요 해면 양식품종 14종을 선정하고, 각 품종의 주요 양식 지역별로 구분하였다. 구성요소별 지표들을 살펴보면, 기후 노출은 향후 예측된 수온 및 염분을, 민감도는 종의 민감도와 재난 위험을, 적응능력은 기후변화에 대응하는 개별 어업인의 능력과 지역의 능력을 지표로 선정하였다. 세부 지표들의 단위가 다르므로 단위에 중립적인 결과가 나오도록 표준화하고, 가중치는 김봉태 외(2016)의 연구에서 산정된 값을 이용하였다. 품종별 지역별 취약성 평가 결과, 시나리오별로 취약성 결과가 큰 차이를 보이지 않았으며, 품종별로 생산지역간 차이는 크지 않았으나 품종간 차이가 크게 나타났다. 가장 취약한 품종은 기후 노출이 크게 나타나는 해조류인 김과 미역이었으며, 지역 중에서는 이들 품종을 양식하면서 재난피해 영향이 크게 평가된 서해안 지역이 특히 높았다. 어류, 새우, 전복, 다시마 등은 적응능력이 낮게 평가된 생산지역이 있지만, 기후 노출 점수와 일부 적응능력이 낮게 평가되어 취약성이 낮은 것으로 나타났다.



자료: Kim et al. (2019)

[그림 II-4] 양식업 취약성 평가 결과(선행연구)

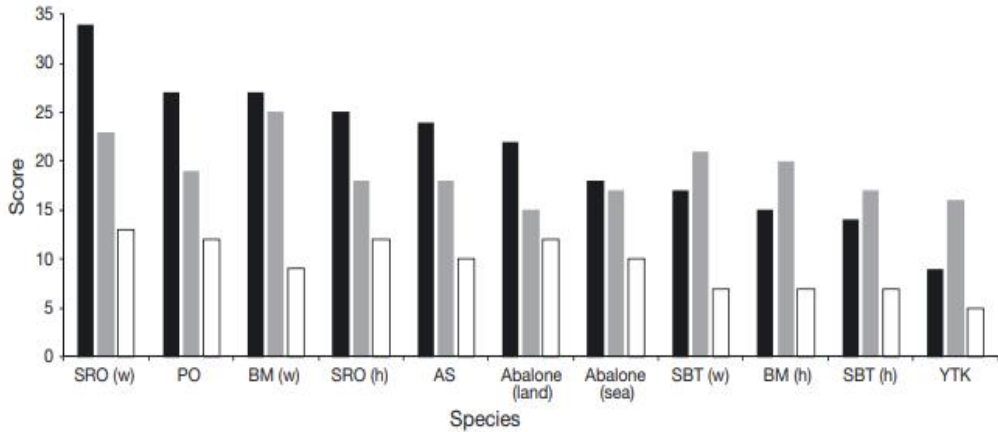
Kim et al. (2021)은 RCP 시나리오에 따른 수온 상승이 우리나라 양식에 미치는 영향을 분석하기 위해 주요 해면 양식품종별 지역별 위험 정도를 평가하였다(그림 II-5). 경제적으로 중요하게 양식되는 14종을 대상으로 하였으며, 생산량이 많은 주요 생산지역과 일부 생산지역을 포함하여 기후변화 영향을 평가하였다. 구체적으로 향후 예측 수온과 품종별 적정 및 한계 수온의 상한 초과 빈도를 계산하여 수온 상승이 양식품종 및 생산지역에 미치는 영향을 평가하였다. 양식품종별 평가 결과, 기후변화가 더욱 심화되는 RCP8.5 시나리오가 RCP4.5 시나리오일 때 시기적으로는 2030년보다 2100년에 리스크가 높았으며, 품종간의 차이는 크게 나타났지만, 품종내 지역별 차이는 크게 나타나지 않았다. 해조류는 초과 빈도가 높아 기후변화의 영향이 가장 클 것으로 예상되며, 어류, 패류, 새우는 초과 빈도가 상대적으로 낮았다. 양식업의 기후변화 대응을 위해서는 시기별 양식품종별로 적응대책 마련이 필요함을 시사하였다.

Class	Species	RCP4.5				RCP8.5			
		2030		2100		2030		2100	
		Non-optimal	Intolerable	Non-optimal	Intolerable	Non-optimal	Intolerable	Non-optimal	Intolerable
Finfish	Olive flounder	0.3	0.0	1.3	0.0	1.3	0.0	3.7	0.0
	Rock bream	0.3	0.0	2.0	0.0	1.7	0.0	3.7	0.0
	Mullet	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	4.0	0.0
	Korean rockfish	0.8	0.0	4.8	0.0	4.0	0.0	6.5	0.0
	Red seabream	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0
Shrimp	White-leg shrimp	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Shellfish	Pacific oyster	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0
	Japanese littleneck	0.7	0.0	3.0	0.0	2.3	0.0	5.0	0.0
	Abalone	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
	Mediterranean mussel	0.3	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	2.3	0.0
Etc.	Sea squirt	0.0	0.0	0.8	0.5	0.3	0.0	4.5	3.5
Seaweed	Laver	12.0	0.3	12.0	1.4	12.0	0.3	12.0	2.6
	Kelp	0.0	0.0	2.3	0.0	1.5	0.0	3.8	2.3
	Sea Mustard	12.0	0.0	12.0	0.6	12.0	0.0	12.0	1.8

자료: Kim et al. (2021)

[그림 II-5] 시나리오별(RCP4.5, RCP8.5) 14개 양식품종의 적정 및 한계 수온 상한 초과 빈도(선행연구)

Doubleday et al. (2013)은 호주 남동부 지역의 주요 양식품종 기후변화 리스크를 평가하였다(그림 II-6). 기후변화에 따른 양식품종의 상대적인 리스크 평가를 위해 민감도 점수와 영향 점수를 곱하여 품종별 위험성을 평가하였다. 구성요소별 지표들을 살펴보면, 민감도는 양식품종 및 관련 양식 과정의 위험을 평가하기 위해 산란, 자어 및 미성어 성장 등을, 영향 점수는 양식품종별 영향을 주는 기후 요인들을 지표로 선정하였다. 기후변화가 미치는 영향의 정도를 정성적으로 평가하였다. 속성별 평가 결과는 성장(환경 제어의 정도)이 가장 높은 점수를 받았으며, 품종별 평가 결과는 Sydney rock oyster가 위험 정도 점수에서 가장 높은 점수를 받아 위험한 종으로, Yellow kingfish가 가장 낮은 점수를 받아 덜 위험한 종으로 평가되었다.



자료: Doubleday et al. (2013)

[그림 11-6] 위험 점수 순위(검정색), 민감도 점수(회색), 영향 점수(흰색)

양식업 분야의 취약성 평가 선행연구를 검토한 결과, 본 연구와 분석 방법 및 분석 자료에서 차별성을 확보하였다(표 II-2). 분석 방법에 있어서 국외 선행연구는 양식품종별 영향을 주는 기후 요인과 종과의 관계를 전문가 의견을 기반으로 정성적으로 평가하였다. 그러나 본 연구는 향후 예측된 수온과 양식품종별 적정 및 한계 수온 자료를 활용하여 준-정량적인 방법으로 평가하였다.

분석 자료의 경우 국내 선행연구는 분석 대상으로 선정된 양식품종들의 모든 생산지역을 고려하지 못하였고, IPCC AR5에서 채택된 RCP 시나리오에 따른 향후 수온으로 위험 요인을 평가하였다. 그러나 본 연구는 양식품종 16종들이 생산되는 모든 지역을 고려하였고, IPCC AR6에서 채택된 SSP 시나리오를 향후 수온으로 선정하였다. 또한, 최근 연구 결과를 기반으로 양식품종별 적정 및 한계 수온이 업데이트된 양식기술 매뉴얼 자료를 바탕으로 기후변화에 따른 양식품종별 위험성을 평가되었다. 이와 더불어 평가된 위험성 점수는 Traffic light system (TLS) 기법을 적용하여 3가지 기준으로 재평가되어 양식품종별로 기후변화에 따른 지역별 양식 가능성을 평가하였다.

<표 II-2> 기후변화 양식업 취약성 평가 선행연구 내용 요약 및 본 연구의 차별성

구분	주요 내용	본 연구의 차별성
Kim et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후변화에 따른 양식업의 취약성 평가</li> <li>- IPCC (2001)의 취약성 평가 정의 및 지표 활용: 기후 노출, 민감도, 적응능력</li> <li>- 기후 노출은 RCP 시나리오를 통해 예측된 수온 및 염분 이용</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후변화에 따른 품종별 모든 생산지역별 위험성을 평가</li> <li>- 평가 대상 품종은 자료 활용이 가능한 17종</li> <li>- 일부 생산지역에 국한하지 않고 양식품종별 모든 생산지역 고려</li> </ul>
Kim et al. (2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기후변화에 의한 수온 상승에 따른 양식품종 14종의 영향 분석</li> <li>- RCP 시나리오로 예측된 해수온과 품종별 적정 및 한계 수온의 상한 초과 빈도로 영향 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 최근 5개년(2017~2021년) 평균 생산량 자료 활용</li> <li>- 영향 속성은 IPCC AR6에 채택된 SSP 시나리오의 예측 수온과 품종별 적정 및 한계 수온을 3가지 점수 기준에 따라 평가</li> </ul>
Doubleday et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 호주 남동부 지역의 기후변화에 따른 양식품종별 위험성 평가</li> <li>- 9개의 민감도 점수와 영향 점수의 곱을 위험성 점수로 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 양식품종별 위험성 평가 결과 바탕으로 TLS 기준으로 생산지역별 위험 정도를 시각적으로 식별</li> </ul>

### 3. 기후변화에 따른 양식업 피해액 추정

기후변화가 양식생산량에 미치는 영향에 관한 연구, 생산량 예측에 관한 선행연구는 다수 있으나 양식품종의 생물학적 특징을 고려한 피해액 추정 연구는 없는 실정이다. 이에 SSP 시나리오에 따른 양식품종별 생산량 예측과 관련된 논문 정민경·남종오(2023)과 윤유진(2023)을 검토하였다.

먼저, 정민경·남종오(2023)은 SSP 시나리오(SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5)를 이용하여 굴의 생산량을 예측하였다. 다중선형회귀모형을 이용하여 기후변화에 따른 굴의 생산량을 예측하였으며, 설명변수로 수온, 염분, 강수량, 생산지역, 양식면적을 선정하였다. 회귀분석 결과, 수온, 수온<sup>2</sup>, 염분, 염분<sup>2</sup>, 월\*수온 교차항 변수가 유의적으로 나타났다. 굴 생산량 예측 결과, 2030년 굴 생산량은 SSP1-2.6은 340,851톤, SSP2-4.5는 319,341톤, SSP3-7.0은 315,899톤, SSP5-8.5는 372,332톤으로 나타나 모든 시나리오에서 굴 양식생산량이 증가할 것으로 예측되었다.

윤유진(2023)은 SSP 시나리오에 따른 향후 해조류 생산량을 예측하고 사회적 편익을 산정하였다. 패널모형을 통하여 김과 미역의 생산량을 예측하였으며, 설명변수로 김과 미역을 주로 생산하는 지역들의 수온, 염분, 강수량, 기온과 양식면적을 선정하였다. 이후 AH 분석 방법을 이용하여 사회적 편익을 산정하였다. 회귀분석 결과, 김은 표층 수온 제곱과 강수량 변수를 제외하고 변수들이 통계적으로 유의하게 분석되었으며, 미역은 기온을 제외한 변수들은 유의한 변수로 나타났다. 유의미하게 나온 변수들을 고려하여 김과 미역의 생산량을 예측한 결과, 김은 표층수온, 염분, 기온을 고려하였고 2050년 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서 각 24.1%, 27.2% 감소, 2100년 SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오에서 각 43.1%, 61.6% 감소하는 것으로 예측되었다. 미역은 수온, 염분, 강수량, 기온을 고려하였고 2050년에 최소 24.8~37.6% 감소하며, 2100년에는 23.7~34.3% 감소하는 것으로 분석되었다. AH 법을 이용하여 사회적 편익을 추정한 결과, 김은 2050년에 337억~376억 원 2100년에는



292억~777억 원, 미역은 2050년에는 138억~159억 원 2100년에는 97억~137억 원 감소할 것으로 추정되었다.

양식업 분야에서의 생산량 예측 선행연구를 검토한 결과, 본 연구와 분석 방법 및 분석 자료에서 차별성을 확보하였다(표 II-3). 분석 방법에 있어서 선행연구들은 다수의 설명변수(수온, 염분, 등)를 고려한 회귀분석을 통해 양식품종들의 생산량을 예측하고, 윤유진(2023)은 예측한 생산량을 바탕으로 기후변화에 따른 해조류(김, 미역)의 사회적 잉여를 추정하였다. 그러나 양식품종들은 각기 다른 생물학적, 생태학적 특징들을 가지고 있으므로 설명변수들이 통계적으로 유의하더라도 단순한 회귀분석만으로 생산량을 예측하는 것은 한계가 있다. 이에 본 연구는 양식품종들의 성장, 번식 변화를 야기하는 기후 요인 중 많은 연구가 진행된 수온을 고려하여 생태학적 특징을 반영하였다. 피해액은 수온 상승에 따른 피해 확률과 생산금액의 곱으로 추정되었으며, 피해 확률은 양식품종들 성장에 적합한 적정 수온 및 폐사를 초래하는 한계 수온 범위와 향후 예측 수온과의 관계를 고려하여 추정되었다.

선행연구 검토 결과, 분석 자료에 있어서 선행연구는 생산량 예측을 위해 양식품종들의 주요 생산지만을 고려하거나, 이외의 생산지 포함하더라도 모든 생산지역을 고려하지 않았다. 이에 본 연구는 양식품종들의 모든 생산지를 고려하였고, 생산지역별 수온 차이를 고려하기 위해 생산지역별로 구분하여 양식품종들의 피해액을 추정하였다.

<표 II-3> 기후변화 양식업 피해액 추정 선행연구 내용 요약 및 본 연구의 차별성

구분	주요 내용	본 연구의 차별성
정민경· 남종오 (2023)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SSP 시나리오를 이용하여 굴의 생산량 예측</li> <li>- 주요 생산지인 전라남도, 경상남도만 고려</li> <li>- 회귀모형 설명변수로 수온, 염분, 강수량, 생산지역, 양식면적을 선정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SSP 시나리오를 이용하여 기후변화에 따른 양식품종별 모든 생산지역별 피해액 추정</li> <li>- 최근 5개년(2017~2021년) 평균 생산량 및 생산금액 자료 활용</li> <li>- 피해액은 양식품종들의 생산지역별 위험 확률과 생산금액의 곱으로 추정</li> </ul>
윤유진 (2023)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SSP 시나리오에 따른 해조류(김, 미역) 생산량을 예측 및 사회적 편익 산정</li> <li>- 주요 생산지 및 일부 생산지 포함(김 5개, 미역 6개)</li> <li>- 회귀모형 설명변수로 수온, 염분, 강수량, 기온과 양식면적을 선정하여 생산량 예측</li> <li>- AH 분석 방법을 이용하여 사회적 편익을 산정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 위험 확률은 IPCC AR6에 채택된 SSP 시나리오의 예측 수온과 양식품종의 생태학적 특징을 반영하는 품종별 적정 및 한계 수온의 초과 빈도에 따라 추정 (기준 설정)</li> <li>- 품종별 생산지역별로 구분하여 피해액을 추정하고 이를 합산하여 최종적으로 양식품종별 피해액 추정</li> </ul>

### Ⅲ. 기후변화에 따른 어업 취약성 평가

#### 1. 분석 자료 및 방법

##### 1.1. 분석 자료

본 연구에서는 연근해어업의 주요 어획 대상 종 중 취약성 평가에 필요한 자료가 활용 가능한 36종을 대상으로 하였다(표 III-1). 그리고 분석을 위한 각종의 생태학적 정보 및 향후 수온 변화 예측(RCP 8.5) 자료 등은 국립수산물과학원의 보고서와 논문 등에서 수집하였다(국립수산물과학원, 2016a; 국립수산물과학원, 2017a).

연근해어업의 업종별 취약성 평가를 위해 허가어업 중 최근 어획량이 없는 업종을 제외하고 근해어업 17개 그리고 연안어업 7개, 총 24개의 연근해어업을 대상으로 하였다(표 III-2). 분석 대상 기간은 최근 5개년인 2017년 1월부터 2021년 12월까지로 설정하였으며, 24개 연근해어업의 어종별 어획량 자료는 국가통계포털에서 수집하였다(통계청, 2023). 본 연구에서는 참가자미, 물가자미, 문치가자미의 경우 별도의 통계 구분이 없으므로 가자미류 어획량 자료를 활용하였으며, 가자미류 이외에도 명확한 통계 구분이 없는 어종은 해당 어종류(홍어류, 병어류, 넙치류, 방어류, 전갱이류, 농어류, 삼치류, 아귀류, 쥐치류)의 어획량 통계를 활용하였다.

<표 III-1> 평가 대상 어종

국명	영명	학명
참가자미	Flounder	<i>Pleuronectes herzensteini</i>
기름가자미	Korean flounder	<i>Glyptocephalus stelleri</i>
홍어	Ocellate spot skate	<i>Okamejei kenojei</i>
도루묵	Sandfish	<i>Arctoscopus japonicus</i>
명태	Walleye pollock	<i>Gadus chalcogrammus</i>
대구	Pacific cod	<i>Gadus macrocephalus</i>
대게	Snow crab	<i>Chionoecetes opilio</i>
붉은대게	Red snow crab	<i>Chionoecetes japonicus</i>
물가자미	Shotted halibut	<i>Eopsetta grigorjewi</i>
병어	Silver pomfret	<i>Pampus argenteus</i>
청어	Pacific herring	<i>Clupea pallasii</i>
옥돔	Red tilefish	<i>Branchiostegus japonicus</i>
넙치	Left-eye flounder	<i>Paralichthys olivaceus</i>
민어	Brown croaker	<i>Miichthys miiuy</i>
꽁치	Pacific saury	<i>Cololabis saira</i>
참돔	Red seabream	<i>Pagrus major</i>
눈볼대	Blackthroat seaperch	<i>Doederleinia berycoides</i>
살오징어	Common squid	<i>Todarodes pacificus</i>
갯장어	Conger pike	<i>Muraenesox cinereus</i>
방어	Yellow tail	<i>Seriola quinqueradiata</i>
붕장어	White-spotted conger	<i>Conger myriaster</i>
보구치	White croaker	<i>Pennahia argentata</i>
전갱이	Jack mackerel	<i>Trachurus japonicus</i>
고등어	Chub mackerel	<i>Scomber japonicus</i>
농어	Common seabass	<i>Lateolabrax japonicus</i>
참조기	Small yellow croaker	<i>Larimichthys polyactis</i>
멸치	Anchovy	<i>Engraulis japonicus</i>
삼치	Spanish mackerel	<i>Scomberomorus niphonius</i>
황아귀	Yellow goosfish	<i>Lophius litulon</i>
갈치	Large head hairtail	<i>Trichiurus japonicus</i>
꽃게	Swimming crab	<i>Portunus trituberculatus</i>
정어리	Sardine	<i>Sardinops melanostictus</i>
말쥐치	Filefish	<i>Thamnaconus modestus</i>
문치가자미	Marbled flounder	<i>Pleuronectes yokohamae</i>
돌돔	Rock bream	<i>Oplegnathus fasciatus</i>
전어	Spotted sardine	<i>Konosirus punctatus</i>

<표 III-2> 연근해어업 평가 대상 업종

구분	업종
근해어업(17)	근해통발, 동해구외끝이중형저인망, 소형선망, 기선권현망, 동해구중형트롤, 근해자망, 근해연승, 근해채낚기, 대형트롤, 서남해구쌍끝이중형저인망, 서남해구외끝이중형저인망, 대형선망, 쌍끝이대형저인망, 근해안강망, 근해장어통발, 외끝이대형저인망, 근해형망
연안어업(7)	연안들망, 연안선망, 연안자망, 연안복합, 연안개량안강망, 연안통발, 연안조망



## 1.2. 어종별 취약성 평가

기후변화 취약성은 평가 목적 등에 따라 여러 가지로 개념을 분류할 수 있고(FAO, 2015), 평가방법도 다양하다(Glick et al., 2011; Pacifici et al., 2015). 본 연구에서는 Morrison et al. (2015)의 정의 및 개념을 바탕으로 하였는데, 이는 IPCC 기본 취약성 모델을 수정하여 노출과 민감도의 조합으로 취약성을 평가하는 방법이다. 구체적으로 민감도는 종의 적응능력을 포함하여 평가되는데, 이는 종의 생물학적 속성들은 민감도와 적응능력 모두 관련되어 있어 이 두 구성요소를 명확하게 분리하는 것이 어렵기 때문이다. 민감도 속성은 기후변화에 대한 취약성을 예측하는 종의 생물학적 또는 생태학적 변수들을 포함한다. 그리고 노출은 종의 생산성 또는 분포 등에 영향을 줄 수 있는 기후 요인(수온, 염분 등)이 포함된다.

본 연구에서는 취약성의 정의 및 개념은 Morrison et al. (2015)을 바탕으로 하지만, 자료 활용 가능성 여부에 따라 민감도의 세부 속성과 점수 기준은 Pecl et al. (2011)을 참고하였다. 그리고 노출에 있어서는 다양한 기후 요인 중 종의 분포와 풍족도에 연관성에 관해 많은 연구가 진행된 수온을 고려하였다. 구체적으로, 향후 수온 변화에 따른 종의 직접적인 영향을 평가하기 위해 국립수산물과학원에서 조사된 대상 종별 산란 및 서식 수온 범위와 RCP8.5로 예측된 수온 범위의 관계를 노출 인자로 정하였다. 연근해어업으로 어획되는 어종별 취약성 점수는 어종별 민감도 속성과 노출 속성 점수의 곱으로 계산할 수 있다(Morrison et al., 2015; Hare et al., 2016). 이를 통해 어종별 취약성 순위가 매겨지고, 기후변화에 상대적으로 취약한 어종들을 식별할 수 있게 된다.

### 1.2.1. 민감도 속성

민감도 속성은 환경변화에 대해 종이 반응할 수 있는 생물학적 속성으로 구성된다. Morrison et al. (2015)의 민감도 속성들은 전문가들의 의견과 선행연구들을 통해 4가지 기준으로 평가된 후 최종적으로 속성들의 평균으로 어종별 민감도 점수를 산정한다. 이러한 평가를 위해서는 많은

자료와 시간이 필요하고, 우리나라의 경우 전문가 기반의 평가 기준 및 방법이 현재까지 개발되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 평가를 위해 수집된 자료의 활용 가능성과 더불어 상대적으로 신속한 평가방법인 Pecl et al. (2014)의 민감도 방법론이 현 상황에 더 적합하다고 판단되어 Pecl et al. (2014)의 기준에 따라 민감도를 평가하였다.

이는 Hobday et al. (2011)의 Ecological risk assessment for the effects of Fishing (ERAEF)을 수정하여 개발되었으며(Pecl et al., 2011; 2014), 환경 변화에 대응하는 종의 민감도에 적응능력이 포함되어 있다. 평가를 위한 구성요소는 종의 풍족도, 분포, 그리고 생물계절학이며, 각 구성요소는 4개의 속성으로 세분화되어 3가지 점수 기준에 따라 민감도 평가가 이루어진다(Pecl et al., 2011).

구체적으로 첫 번째, 풍족도(A)의 4가지 속성에는 기후변화에 대한 어종의 회복력을 판단하기 위해 생물학적 특성들인 포란수, 가입 주기, 성숙 연령, 그리고 먹이와 서식지가 있다. 두 번째, 분포(D)의 4가지 속성에는 분포 변화의 수용력을 보기 위해 유생 기간, 미성어/성어의 이동, 생리학적 내성, 그리고 서식공간 이동능력이 있다(Pecl et al., 2011). 세 번째, 생물계절학(P)의 4가지 속성에는 기후변화가 종의 생활사 시기에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 확인하기 위해 산란과 번식을 위한 현상학적 단서로서의 환경변수(염분, 수온, 해류, 담수 유입), 정착 또는 변태를 위한 현상학적인 단서로서의 환경변수, 생활사 시기에 나타나는 현상들의 불일치, 그리고 회유 특성이 있다(Pecl et al., 2011).

본 연구에서는 Pecl et al. (2011)의 풍족도(A)와 분포(D)의 경우 모든 속성을 그대로 사용하였다. 하지만 생물계절학(P)의 경우 4가지 속성 중 종의 산란 및 서식지와 환경요인과의 상관관계를 보는 속성은 제거하여 사용하였다. 이 속성의 점수는 상관관계의 정도에 따라 부여되므로 전문가의 주관적인 의견에 치중되어 평가의 불확실성이 커질 수 있는 위험이 있다. 따라서, 본 연구에서는 향후 예측된 환경요인과 어종별 속성을 객관적으로 평가하는 것이 보다 타당한 것으로 판단하여 노출

인자에서 RCP 시나리오로 예측된 수온과 어종별 특성과의 관계를 세부적인 점수 기준에 따라 평가하였다.

속성별 점수는 3개의 기준(High, Moderate, Low)으로 평가된다. 여기서, High(3점)는 낮은 대응능력과 높은 민감도, Moderate(2점)는 중간 민감도, 그리고 Low(1점)는 대응능력이 좋고 낮은 민감도를 의미한다(표 III-3). 어종별 민감도 점수는 10가지 속성 점수의 합이며, 그 결과에 따라 어종별 민감도 순위가 결정된다.





<표 III-3> 민감도 및 노출 속성별 점수 기준

속성		점수		
		High (3점)	Moderate (2점)	Low (1점)
민감도(S)	연간 포란수(A1)	< 100개	100개-20,000개	> 20,000개
	가입빈도(A2)	매우 불규칙적인 가입	가끔씩 그리고 가변적인 가입	매 1-2년마다 정기적 가입
	성숙 연령(A3)	> 10세	2세-10세	≤ 2세
	먹이/서식지 의존도(A4)	먹이와 서식지 2가지 모두 의존	먹이 혹은 서식지 중 한가지 의존	의존하지 않음
분포(D)	유생 이동능력 또는 유생 기간(D1)	< 2주 혹은 유생 단계 없음	2주-8주	> 2개월
	미성어/성어의 이동 능력(D2)	< 10km	10km-1,000km	> 1,000km
	생리학적 내성; 성어의 고도적 분포(D3)	< 10° 위도	10°-20° 위도	> 20° 위도
	서식공간 이동능력(위도/경도)(D4)	0°-2° (위도 혹은 경도)	2°-6° (위도 혹은 경도)	> 6° (위도 혹은 경도)

민감도(S) 생물계절학(P)	생활사 시기의 불일치: 산란, 번태 시기(P1)  회유; 계절적 그리고 산란(P2)	<2개월  전체 개체군에서의 회유	2개월-4개월  일부 개체군에서의 회유	>4개월  회유 없음
기후 노출(C)	RCP 시나리오로 예측된 수온과 어종별 산란 수온과의 관계 (C1)  RCP 시나리오로 예측된 수온과 어종별 서식 수온과의 관계 (C2)	예측 수온 범위를 벗어남 혹은 데이터 없음  예측 수온 범위를 벗어남 혹은 데이터 없음	예측 수온 범위에 일부 포함  예측 수온 범위에 일부 포함	예측 수온 범위에 포함  예측 수온 범위에 포함

### 1.2.2. 노출 속성

노출 속성은 종에 영향을 줄 수 있는 기후 요인을 의미한다. 본 연구에서는 다양한 기후 요인 중 상대적으로 큰 영향을 미치고 있는 수온의 변화에 따른 어종별 영향을 평가하였다. 이를 위해 IPCC AR5의 표준 시나리오인 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 적용하여 2100년까지 우리나라 주변 수역의 수온 변화를 예측한 국립수산과학원의 결과를 사용하였다(국립수산과학원, 2016a).

국립수산과학원에서는 우리나라 주변 해역의 장기 해황변동 재현 및 예측 모델 구축을 위해 지역해 연구 및 시스템 구축에 많이 사용되고 있는 3차원 해수유동모델 ROMS(Regional Ocean Modeling System) 해양모델을 이용하여 장기 기후변화 실험을 수행하였다(국립수산과학원, 2016a). 모델 분석은 국립수산과학원의 동·서·남해와 동중국해에 걸쳐 있는 정선해양관측조사 정점을 기반으로 하였다. 수치모델의 장기입력장을 생산하기 위해 IPCC 5차 평가보고서에 사용된 기후모델 중 하나이면서 북서태평양 해역의 예측 성능이 우수하고 해상도가 뛰어난 미국 국립대기과학연구소(NCAR)의 CESM(Community Earth System Model) V.1 CAM5 모델 분석 결과를 이용하였다.

기후변화 시나리오는 IPCC AR5에서 채택된 RCP 시나리오를 이용하였으며(표 III-4), 특히 온실가스가 저감 없이 현재 추세대로 배출되는 상황을 가정한 RCP8.5 시나리오를 적용하였다. 모델 분석 결과, RCP8.5 시나리오에서의 우리나라 주변 해역의 표층 수온(10년 이동평균 기준)은 2030년, 2050년, 2100년에 걸쳐 약 4-5°C 내외로 상승하는 것으로 나타났다(그림 III-1).

속성별 평가 점수 기준은 민감도 속성의 점수 기준과 동일하게 3개의 기준(Low, Moderate, High)으로 평가하였다(표 III-3). 구체적으로, 산란 수온의 예를 들면, 어종별 산란 수온 범위가 RCP 8.5 시나리오 수온 범위를 모두 벗어나거나 데이터가 없으면 3점, 산란 수온 범위가 RCP 8.5 시나리오 수온 범위에 일부 포함될 경우 2점, 그리고 산란 수온 범위가

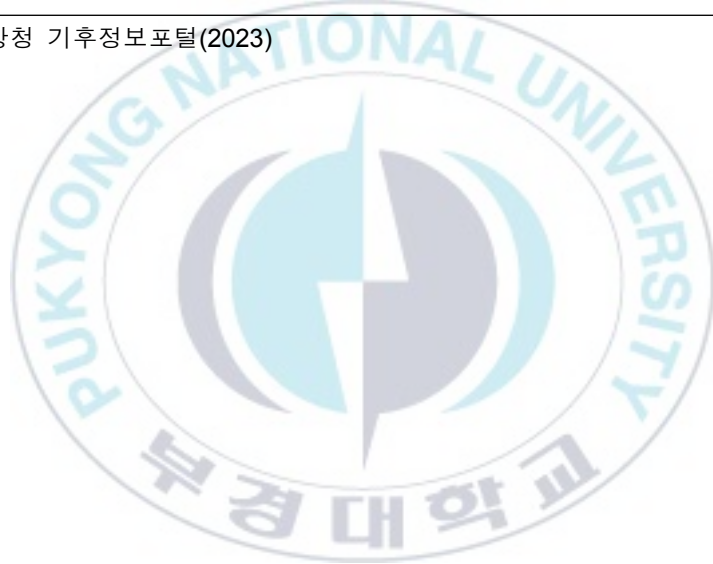
RCP 8.5 시나리오의 수온 범위에 포함될 경우 1점을 부여하였다(표 III-3). 즉, 3점은 예측된 향후 수온이 어종에 가장 큰 영향을 준다는 것을 의미한다. 어종별 노출 속성 점수는 2가지 속성 점수의 합이며, 그 결과에 따라 어종별 노출 속성 순위가 결정된다.

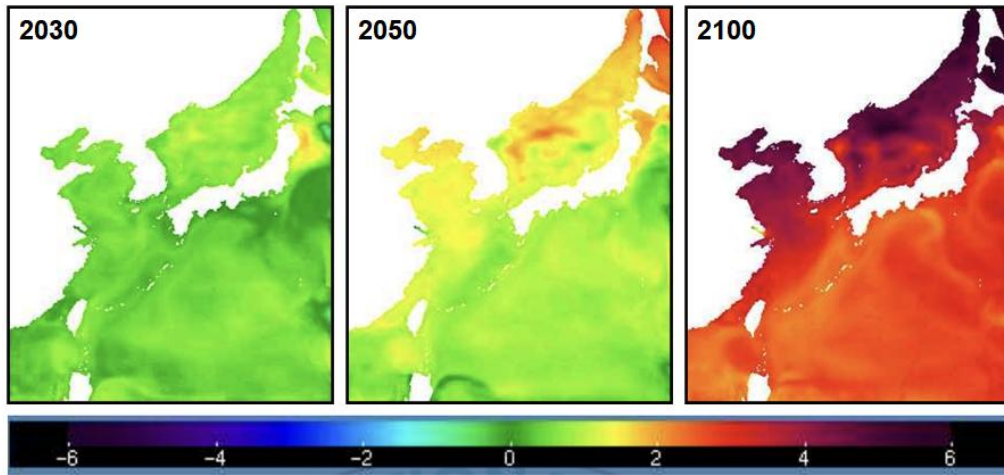


<표 III-4> RCP 시나리오 종류 및 의미

종류	의미	CO <sub>2</sub> 농도 (2100년)
RCP2.6	지금부터 즉시 온실가스 감축 수행	420ppm
RCP4.5	온실가스 저감 정책 상당히 실현되는 경우	540ppm
RCP6.0	온실가스 저감 정책 어느 정도 실현되는 경우	670ppm
RCP8.5	현재 추세대로 온실가스 배출되는 경우	940ppm

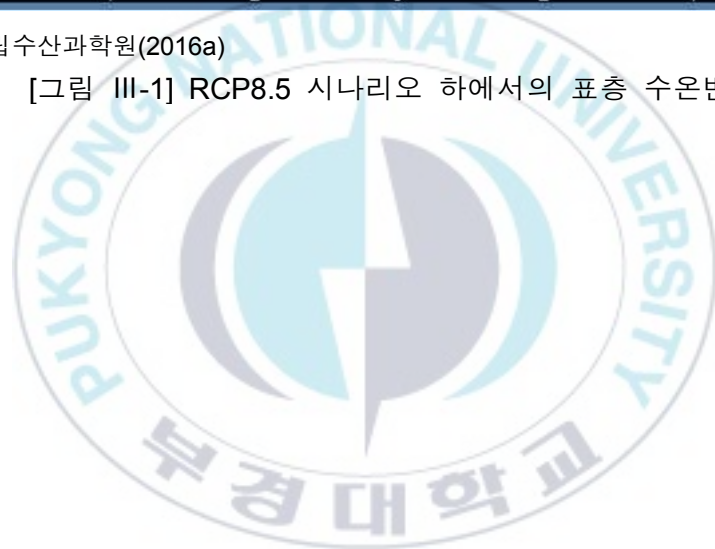
자료: 기상청 기후정보포털(2023)





자료: 국립수산과학원(2016a)

[그림 III-1] RCP8.5 시나리오 하에서의 표층 수온변동

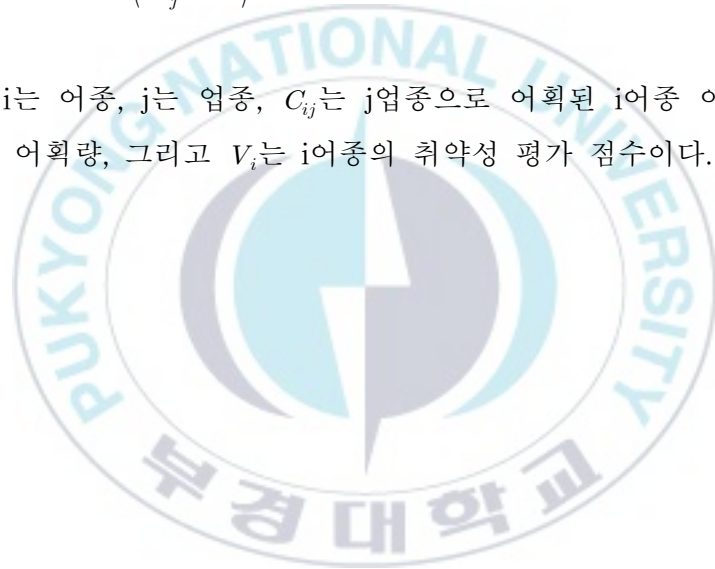


### 1.3. 업종별 취약성 평가

어종별 취약성 점수를 바탕으로 연근해어업 업종들의 취약성을 평가하였다. 기후변화에 따른 취약성이 높은 어종을 많이 어획하는 업종일수록 업종별 취약성 평가에서 높은 점수를 받는다. 따라서, 업종별 취약성 점수는 어종별의 취약성 점수와 각 업종의 어종별 평균 생산량 비율을 고려하여 식 (1)과 같이 계산되었다.

$$Vulnerability_j = \sum \left( \frac{C_{ij}}{C_j} \times V_i \right) \quad (1)$$

여기서,  $i$ 는 어종,  $j$ 는 업종,  $C_{ij}$ 는  $j$ 업종으로 어획된  $i$ 어종 어획량,  $C_j$ 는  $j$ 업종의 총 어획량, 그리고  $V_i$ 는  $i$ 어종의 취약성 평가 점수이다.



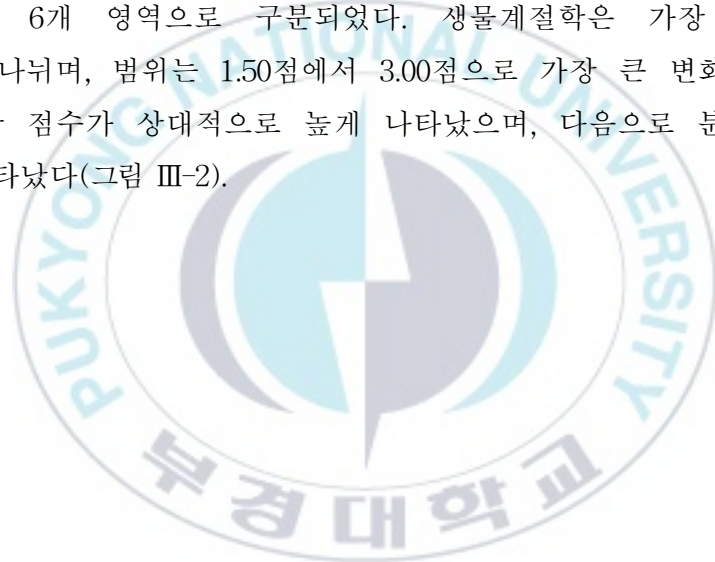
## 2. 분석 결과

### 2.1. 어종별 취약성 점수

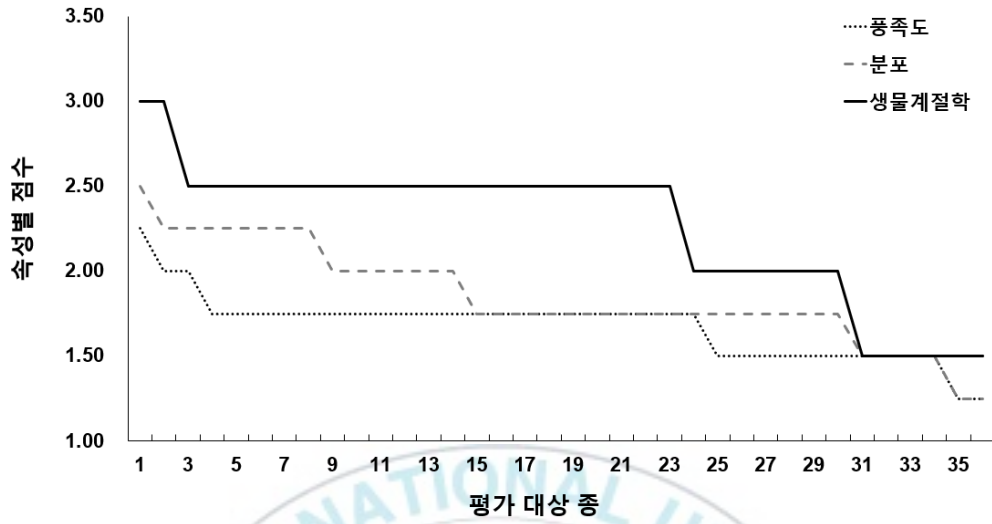
#### 2.1.1. 민감도 속성 및 노출 속성 점수

##### 2.1.1.1. 민감도 속성

구성요소별 평균 민감도 점수는 풍족도 1.68점, 분포 1.85점, 그리고 생물계절학 2.26점으로 평가되었다(그림 III-2). 점수분포의 범위는 풍족도의 경우 1.25점에서 2.25점으로 5개 영역으로 구분되고, 분포는 1.25점에서 2.50점으로 6개 영역으로 구분되었다. 생물계절학은 가장 많은 7개 영역으로 나뉘며, 범위는 1.50점에서 3.00점으로 가장 큰 변화를 보였다. 생물계절학 점수가 상대적으로 높게 나타났으며, 다음으로 분포, 풍족도 순으로 나타났다(그림 III-2).







[그림 III-2] 민감도 속성별(풍족도, 분포, 생물계절학) 점수 그래프



어종별 구성요소들의 평균 점수는 풍족도 6.72점, 분포 7.42점, 그리고 생물계절학 4.53점으로 분석되었다(표 III-5). 풍족도에서 오징어와 꽃게가 최소점수(5점) 그리고 홍어가 최대점수(9점)로 평가되었다. 분포에서 최소점수(5점)는 살오징어와 청어 그리고 최대점수(10점)는 돌돔으로 평가되었다. 생물계절학에서는 기름가자미, 붉은대게, 황아귀, 말쥐치, 돌돔, 전어가 최소점수(3점) 그리고 청어와 전갱이가 최대점수(6점)로 평가되었다.

어종별 평균 민감도 점수는 18.67점으로, 가장 민감한 어종은 도루묵(22점)으로 나타났다(표 III-5, 그림 III-3). 도루묵은 풍족도(A)에서는 8점, 분포(D)에서는 9점, 그리고 생물계절학(P)에서는 5점으로 평가되었다. 가장 낮은 민감도 점수로 평가된 살오징어(15점)는 모든 구성요소에서 5점을 받았다. 살오징어는 생물계절학 점수가 평균 점수보다 높았음에도 불구하고 높은 생산성으로 풍족도(A)에서 최소점수 그리고 분포(D)에서도 최소점수를 받아 상대적으로 덜 민감한 종으로 평가되었다.

우리나라 연근해어업 평균 생산량(2017~2021년)의 약 50% 이상을 차지하는 5종(멸치, 고등어, 살오징어, 갈치, 전갱이)중 전갱이를 제외하고 민감도 점수의 평균보다 낮은 점수를 받았다(표 III-5). 이는 이들 4종이 전반적으로 생산성이 높고, 이동범위와 서식지 이용능력이 상대적으로 우수하였기 때문이다.

그리고 현재 TAC 대상 어종인 9종(도루묵, 대게, 붉은대게, 살오징어, 전갱이, 고등어, 삼치, 갈치, 꽃게)을 살펴보면, 앞서 설명한 바와 같이, 도루묵이 가장 높은 점수 그리고 살오징어가 가장 낮은 점수로 평가되었다. 대게와 붉은대게는 모든 구성요소에서, 꽃게는 생물계절학을 제외하고 낮은 점수를 받아 민감도 점수의 평균보다 낮은 점수로 평가되었다. 전갱이의 경우 분포에서 평균보다 낮은 점수로 평가된 반면, 풍족도와 생물계절학(P)에서 평균보다 높아 민감도에서 평균보다 높은 점수로 평가되었다. TAC 시범대상 어종인 멸치도 평균보다 낮은 점수로 분석되었다(표 III-5).

#### 2.1.1.2. 노출 속성

어종별 구성요소들의 총 평균 점수는 3.22점으로, 산란 수온과 예측 수온과의 관계(C1)는 1.56점 그리고 서식지 수온과 예측 수온과의 관계(C2)는 1.67점으로 분석되었다(표 III-5). 가장 높은 점수로 평가된 어종은 참가자기, 홍어, 대게, 그리고 붉은대게였으며, 14종이 가장 낮은 점수로 평가되었다(표 III-5).

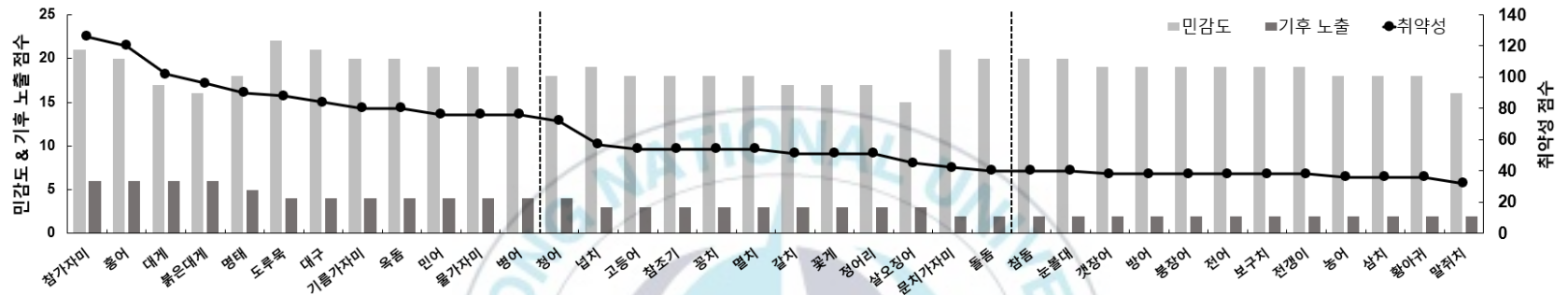
우리나라 연근해어업 평균 생산량(2017~2021년)의 약 50% 이상을 차지하는 5종(멸치, 고등어, 살오징어, 갈치, 전갱이) 모두 노출 속성의 평균 점수보다 낮았다. 그리고 TAC 대상 어종인 9종(도루묵, 대게, 붉은대게, 살오징어, 전갱이, 고등어, 삼치, 갈치, 꽃게)을 살펴보면, 3종(도루묵, 대게, 붉은대게)이 평균보다 높은 점수로 평가되었다. TAC 시범대상 어종인 멸치는 평균보다 낮은 점수로 분석되었다.

<표 III-5> 36종의 민감도 속성, 노출 속성 및 취약성 점수

어종	민감도(S)																기후 노출(C)				취약성 점수 (V=S*C)		
	풍족도(A)						분포(D)				생물계절학(P)				민감도 합계	민감도 순위	기후 노출(C)						
	A1	A2	A3	A4	합계	평균	D1	D2	D3	D4	합계	평균	P1	P2			합계	평균	C1	C2		합계	기후 노출 순위
참가자미	1	1	2	3	7	1.75	2	2	3	2	9	2.25	2	3	5	2.50	21	2	3	3	6	1	126
홍어	3	1	2	3	9	2.25	2	1	3	1	7	1.75	1	3	4	2.00	20	5	3	3	6	1	120
대게	1	1	2	2	6	1.50	1	2	3	1	7	1.75	3	1	4	2.00	17	30	3	3	6	1	102
붉은대게	1	1	2	2	6	1.50	1	2	3	1	7	1.75	2	1	3	1.50	16	34	3	3	6	1	96
명태	1	1	2	3	7	1.75	2	1	2	1	6	1.50	2	3	5	2.50	18	21	3	2	5	5	90
도루묵	2	1	2	3	8	2.00	2	2	3	2	9	2.25	2	3	5	2.50	22	1	2	2	4	6	88
대구	1	1	2	3	7	1.75	2	2	3	2	9	2.25	2	3	5	2.50	21	2	2	2	4	6	84
기름가자미	2	1	2	3	8	2.00	2	2	3	2	9	2.25	2	1	3	1.50	20	5	1	3	4	6	80
옥돔	1	1	2	3	7	1.75	2	2	3	2	9	2.25	1	3	4	2.00	20	5	1	3	4	6	80
민어	1	1	2	3	7	1.75	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	19	11	3	1	4	6	76
물가자미	1	1	2	3	7	1.75	2	1	2	2	7	1.75	2	3	5	2.50	19	11	3	1	4	6	76
병어	1	1	2	3	7	1.75	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	19	11	3	1	4	6	76
청어	1	1	2	3	7	1.75	2	1	1	1	5	1.25	3	3	6	3.00	18	21	3	1	4	6	72
넙치	1	1	2	3	7	1.75	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	19	11	1	2	3	14	57
고등어	1	1	1	3	6	1.50	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	18	21	1	2	3	14	54
참조기	1	1	1	3	6	1.50	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	18	21	1	2	3	14	54

꽁치	1	1	1	3	6	1.50	2	1	2	2	7	1.75	2	3	5	2.50	18	21	1	2	3	14	54				
멸치	1	1	1	3	6	1.50	2	1	3	2	8	2.00	1	3	4	2.00	18	21	1	2	3	14	54				
갈치	1	1	2	3	7	1.75	2	1	2	1	6	1.50	1	3	4	2.00	17	30	1	2	3	14	51				
꽃게	1	1	1	2	5	1.25	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	17	30	1	2	3	14	51				
정어리	1	1	1	3	6	1.50	2	1	2	1	6	1.50	2	3	5	2.50	17	30	1	2	3	14	51				
살오징어	1	1	1	2	5	1.25	1	1	2	1	5	1.25	2	3	5	2.50	15	36	1	2	3	14	45				
문치가자미	1	1	2	3	7	1.75	2	2	3	2	9	2.25	2	3	5	2.50	21	2	1	1	2	23	42				
돌돔	1	1	2	3	7	1.75	2	3	3	2	10	2.50	2	1	3	1.50	20	5	1	1	2	23	40				
참돔	1	1	2	3	7	1.75	2	1	3	2	8	2.00	2	3	5	2.50	20	5	1	1	2	23	40				
눈볼대	1	1	2	3	7	1.75	2	2	3	1	8	2.00	2	3	5	2.50	20	5	1	1	2	23	40				
갯장어	1	1	2	3	7	1.75	2	2	3	1	8	2.00	1	3	4	2.00	19	11	1	1	2	23	38				
방어	1	1	2	3	7	1.75	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	19	11	1	1	2	23	38				
붕장어	1	1	2	3	7	1.75	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	19	11	1	1	2	23	38				
전어	2	1	1	3	7	1.75	2	2	3	2	9	2.25	2	1	3	1.50	19	11	1	1	2	23	38				
보구치	1	1	2	3	7	1.75	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	19	11	1	1	2	23	38				
전갱이	1	1	2	3	7	1.75	2	1	2	1	6	1.50	3	3	6	3.00	19	11	1	1	2	23	38				
농어	1	1	1	3	6	1.50	2	2	3	1	8	2.00	1	3	4	2.00	18	21	1	1	2	23	36				
삼치	1	1	1	3	6	1.50	2	1	3	1	7	1.75	2	3	5	2.50	18	21	1	1	2	23	36				
황아귀	1	1	2	3	7	1.75	2	2	3	1	8	2.00	2	1	3	1.50	18	21	1	1	2	23	36				
말쥐치	1	1	1	3	6	1.50	2	1	3	1	7	1.75	2	1	3	1.50	16	34	1	1	2	23	32				
평균					6.72	1.68					7.42	1.85					4.53	2.26	18.67					1.56	1.67	3.22	60.19

A1: 연간 포란수, A2: 가입빈도, A3: 성숙연령, A4: 먹이/서식지 의존도, D1: 유생 이동능력 또는 유생기간, D2: 미성어/성어의 이동능력, D4: 서식공간 이동능력(위도/경도), P1: 생활사 시기의 불일치, P2: 회유, C1: 예측 수온과 어종별 산란 수온과의 관계, C2: 예측 수온과 어종별 서식 수온과의 관계



[그림 III-3] 어종별 민감도, 기후 노출 및 취약성 점수

### 2.1.2. 취약성 점수 및 순위

어종별 민감도 속성과 노출 속성의 점수를 곱한 취약성 점수는 평균 60.19점이었다. 이중 참가자미가 가장 높은 점수로 평가된 반면, 말쥐치가 가장 낮은 점수로 평가되었다(표 III-5, 그림 III-3). 연근해어업 평균 생산량(2017~2021년)의 약 50% 이상을 차지하는 5종(멸치, 고등어, 살오징어, 갈치, 전갱이) 모두 평균 점수보다 낮게 분석되었다. 그리고 TAC 대상 어종인 9종(도루묵, 대게, 붉은대게, 살오징어, 전갱이, 고등어, 삼치, 갈치, 꽃게) 중 도루묵, 대게, 붉은대게가 평균보다 높았으며, TAC 시범대상 어종인 멸치는 평균보다 낮은 점수로 평가되었다.

### 2.2. 업종별 취약성 점수

17개 근해어업으로 어획되는 어종수는 평균 약 23종으로, 하나의 어종을 어획하는 근해장어통발부터 33종 이상을 어획하는 근해자망까지 다양하다(표 III-6). 근해어업의 평균 취약성 점수는 44.91점으로, 근해통발이 가장 높은 반면, 근해형망이 가장 낮은 점수로 평가되었다(그림 III-4).

<표 III-6> 업종별 어획 대상 어종별 점수 및 취약성 점수

어업	어획 대상 어종별 취약성 점수																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
근해통발	0.00		0.01		0.00	0.00			0.00		0.00	0.00						0.00	0.00
동해구외끝이중형저인망	18.54		0.00		0.00		0.00	19.18	2.40					0.00		0.00	0.00		0.00
소형선망		0.90	6.29	0.01	0.01	0.00	0.00		0.00	0.00	0.03	0.01	18.81		0.00	0.49	0.03	0.01	0.63
기선권현망		0.00	0.00		0.00		0.00			0.00	0.00		53.99		0.00		0.00	0.00	0.00
동해구중형트롤	1.03	0.00	0.03			0.00		0.65	0.37				0.02			0.00	0.07		0.12
근해자망	0.23	2.22	1.45	0.23	0.10	0.03	0.30	0.01	3.36	0.44	0.11	0.01	4.04		0.72	0.02	1.17	0.22	0.10
근해연승	0.00	35.84	0.42		0.09	0.01	0.03		2.47	0.72	0.04	0.00			0.42	0.01	0.01	0.25	0.43
근해채낚기	0.04	8.68	0.58	0.26	0.01	0.00	0.03		0.28	0.14	0.01	0.00	0.00		0.05	0.00	0.02	0.05	0.13
대형트롤	0.00	8.41	1.43		0.17	0.05	0.01	0.00	0.00	0.07	0.29	0.00	0.01		2.53	0.05	1.78	0.36	0.88
서남해구쌍끝이중형저인망		14.19	4.79	0.00	0.00	0.02	0.01		0.00	0.00	0.01	0.00	0.05		0.00	0.12	3.45	0.36	6.75
서남해구외끝이중형저인망	1.43	0.75	0.13		0.45	0.06	7.58	0.12	4.18	0.37	0.77	0.00			1.35	0.00	0.18	1.39	0.06
대형선망		1.55	30.50		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.01		0.23		0.00	1.14	0.02	0.00	1.07
쌍끝이대형저인망		4.33	1.85	0.00	0.01	0.21	0.00		0.08	0.00	0.07	0.00	0.14		0.21	0.37	2.45	0.05	15.21
근해안강망	0.00	7.42	0.08	0.00	0.40	0.13	0.08	0.00	1.20	0.00	0.27	0.00	18.47		0.12	0.00	2.45	0.09	0.04
근해장어통발																			
외끝이대형저인망	0.00	1.70	0.32		0.62	0.10	1.81	0.00	0.01	0.80	0.86	0.00			3.03	0.01	0.61	1.40	0.16
근해형망					0.02														
근해어업 평균																			



연안어업	연안들망	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	48.27	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00					
	연안선망	0.00	0.03	0.49	0.08	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	31.17	0.00	0.04	0.01	0.01	0.06		
	연안자망	0.83	0.43	0.23	0.15	0.93	0.11	0.05	1.37	1.84	0.06	0.16	0.03	5.08	0.00	0.75	0.11	1.40	0.16	0.35
	연안복합	0.08	12.28	0.84	0.04	0.62	0.63	0.11	0.02	0.67	1.15	0.44	0.06	0.62	0.00	0.99	1.82	0.31	0.48	1.65
	연안개량안강망	3.89	0.04	0.00	1.55	0.14	0.00	0.03	0.00	0.31	0.00	10.71	0.28	0.00	1.82	0.07	0.10			
	연안통발	0.04	0.00	0.00	0.00	0.09	0.01	0.01	0.01	0.07	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00		
	연안조망	0.00			0.88	0.00					0.00	0.08	0.00		0.00	0.00	0.00	0.11		
연안어업 평균																				
평균(근해어업 & 연안어업)																				

1: 기름가자미, 2: 갈치, 3: 고등어, 4: 꽁치, 5: 넙치, 6: 농어, 7: 눈볼대 8: 도루묵, 9: 대구, 10: 옥돔, 11: 참돔, 12: 돌돔, 13: 멸치, 14: 명태, 15: 민어, 16: 방어, 17: 병어, 18: 보구치, 19: 삼치, 20: 황아귀, 21: 갯장어, 22: 봉장어, 23: 전갱이, 24: 전어, 25: 정어리, 26: 참조기, 27: 말쥐치, 28: 청어, 29: 홍어, 30: 꽃게, 31: 대게, 32: 붉은대게, 33: 살오징어, 34: 참가자미, 물가자미, 문치가자미 평균

<표 III-6> continued

어업	어획 대상 어종별 취약성 점수														합계	어종수	순위	
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				34
근해통발	0.00	0.00	0.07					0.00		0.00	0.62	0.90	84.65		0.08	86.33	18	1
동해구외끝이중형저인망	0.00		0.00	0.01				0.00	28.55			0.02	0.00	0.20	2.00	70.91	19	2
소형선망	0.00	0.00	0.00	4.42	2.43	0.92	0.00	0.00	19.08	0.00	0.00			0.19	0.00	54.27	29	3
기선권현망	0.00	0.00	0.00	0.00				0.00						0.00	0.00	54.00	18	4
동해구중형트롤	0.01			0.05		0.02		0.01	9.47			0.01		36.65	0.26	48.77	18	5
근해자망	0.43	0.02	0.01	0.11	0.01	0.07	18.67	0.01	0.01	0.33	1.81	1.31	0.18	2.39	5.24	45.34	33	6
근해연승	0.09	0.03	1.15	0.01			0.06	0.00	0.00	0.79				0.16	2.18	45.20	25	7
근해채낚기	0.14	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.04			0.00	32.52	1.25	44.64	30	8
대형트롤	0.15	0.04	0.37	0.92	0.00	0.02	0.60	0.13	0.17	0.05	0.04		0.00	23.53	0.10	42.18	31	9
서남해구쌍끝이중형저인망	0.06	0.01	0.00	3.21	3.08	0.01	0.06	0.01	0.24	0.00	0.00			5.40	0.07	41.91	29	10
서남해구외끝이중형저인망	3.99	0.08	0.73	0.17	0.00	0.03	1.53	0.21	0.01	0.99	0.01			1.13	13.21	40.93	29	11
대형선망	0.00	0.00	0.00	3.85	0.09	0.65	0.00	0.01	0.70	0.00				0.16	0.00	39.99	26	12
쌍끝이대형저인망	0.08	0.00	0.02	0.53	1.04	0.00	0.43	0.23	0.43	0.12	0.00			11.33	0.09	39.31	29	13
근해안강망	1.48	0.03	0.08	0.01	0.00	0.00	4.39	0.04	0.00	0.55	0.71			0.14	0.68	38.85	31	14
근해장어통발			38.00													38.00	1	15
외끝이대형저인망	2.84	0.15	0.74	0.17	0.02	0.03	6.95	0.48		1.03	0.07			3.35	5.47	32.71	28	16
근해형망	0.01									0.08	0.02				0.00	0.13	5	17
근해어업 평균																44.91	23	

연안어업	연안들망	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	2.90	0.00				0.00	0.02	51.35	25	1	
	연안선망	0.01	0.00	0.00	1.93	8.70	0.40	0.00	0.00	5.71	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	48.74	31	2	
	연안자망	2.93	0.01	0.06	0.63	0.90	0.04	1.46	0.10	4.02	1.11	4.78	0.98	1.60	0.68	4.48	37.82	34	3
	연안복합	0.34	0.98	1.19	0.26	0.08	0.00	0.11	0.07	0.10	1.19	0.01	0.01	1.52	2.16	30.86	33	4	
	연안개량안강망	1.93	0.01	0.08	0.16	0.18	0.00	2.05	0.02		0.95	3.53		0.08	1.30	29.25	28	5	
	연안통발	0.39	0.05	2.78	0.00	0.00		0.00	0.29	0.00	0.24	4.08	1.13	3.10	0.01	0.97	13.34	31	6
	연안조망	0.14		0.02		0.31	0.00				0.33	0.03		0.00	2.16	4.06	17	7	
연안어업 평균																30.77	28		
평균(근해어업 & 연안어업)																40.79	25		

1: 기름가자미, 2: 갈치, 3: 고등어, 4: 꽁치, 5: 넙치, 6: 농어, 7: 눈볼대 8: 도루묵, 9: 대구, 10: 옥돔, 11: 참돔, 12: 돌돔, 13: 멸치, 14: 명태, 15: 민어, 16: 방어, 17: 병어, 18: 보구치, 19: 삼치, 20: 황아귀, 21: 갯장어, 22: 봉장어, 23: 전갱이, 24: 전어, 25: 정어리, 26: 참조기, 27: 말쥐치, 28: 청어, 29: 홍어, 30: 꽃게, 31: 대게, 32: 붉은대게, 33: 살오징어, 34: 참가자미, 물가자미, 문치가자미 평균



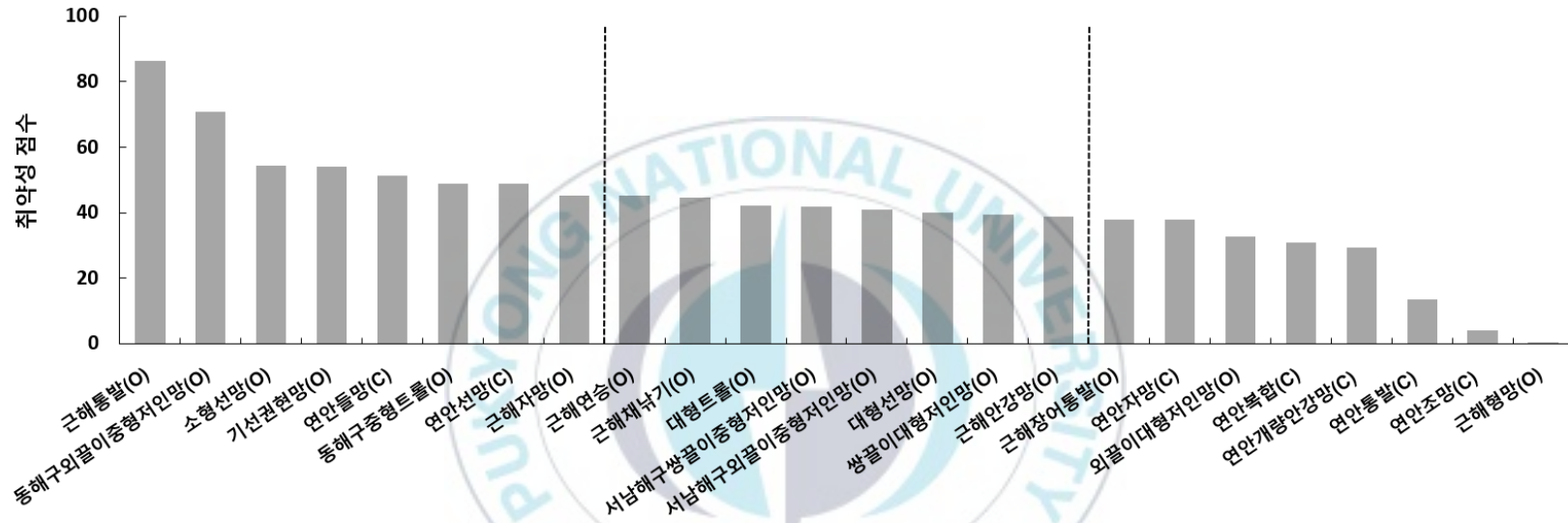
[그림 III-4] 근해어업 취약성 점수

7개의 연안어업으로 어획되는 어종수는 평균 약 28종으로, 17종을 잡는 연안조망부터 34종을 어획하는 연안자망까지 다양하다(표 III-6). 연안어업의 평균 취약성 점수는 30.77점으로, 연안들망이 가장 높은 반면, 연안조망이 가장 낮은 점수로 평가되었다(그림 III-5). 근해 및 연안어업의 취약성 평가 결과, 근해어업이 연안어업보다 취약성 평가 점수가 상대적으로 높게 평가되었다(그림 III-6).

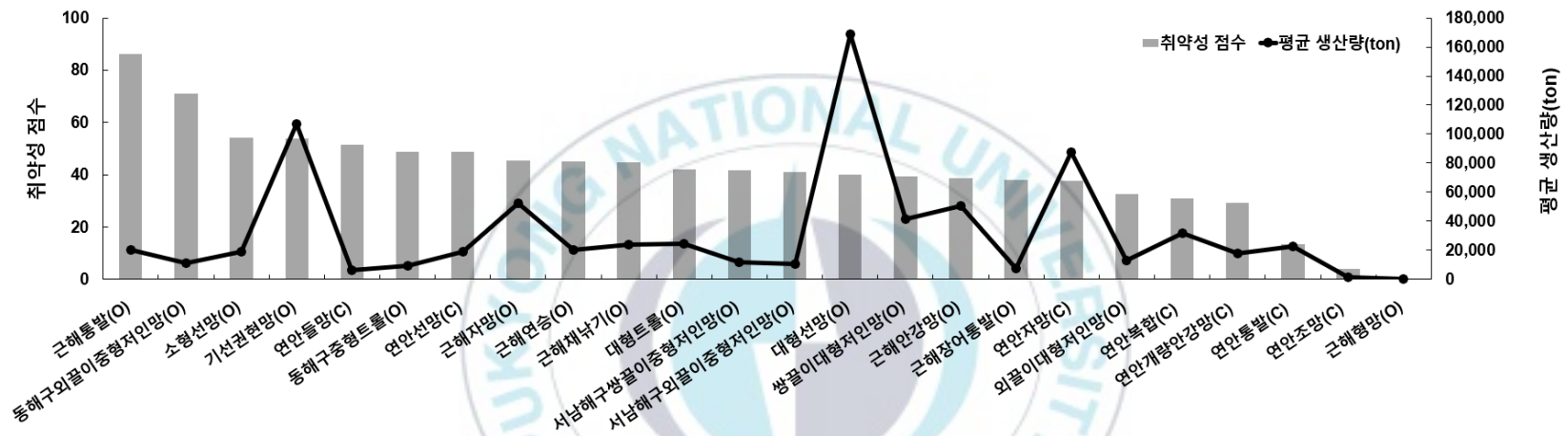
연근해어업 5개년 평균 생산량(2017~2021년)과 업종별 취약성 평가 점수를 비교해 본 결과, 대형선망은 어획량에서는 1위를 차지하였지만, 취약성 점수에서는 업종별 평균보다 낮은 것으로 평가되었다(그림 III-7, 표 III-6). 이는 상대적으로 취약성이 낮게 평가된 고등어(54점)를 대부분 어획하였기 때문이다. 반대로 5개년 평균 어획량에서 동해구외끝이중형저인망은 낮은 순위를 차지하였지만, 업종별 취약성 점수에서 가장 높은 것으로 평가되었다. 이는 어종별 취약성 평가에서 높은 점수를 받은 도루묵(110점), 청어(90점), 그리고 기름가자미(120점)의 어획량 비중이 높았기 때문이다. 근해통발은 5개년 평균 어획량에서는 10위를 차지하였지만, 어종별 취약성 평가에서는 붉은대게(96점)를 대부분 어획하여 업종별 취약성이 높은 것으로 평가되었다. 또한, 어종별 민감도와 취약성 점수 비교에서 상당한 순위 차이를 보인 살오징어(60점)의 어획 비중이 높은 동해구중형트롤, 근해채낚기, 그리고 대형트롤의 경우 취약성이 높은 것으로 평가되었다.



[그림 III-5] 연안어업 취약성 점수



[그림 III-6] 업종별 취약성 점수((O)=근해어업, (C)=연안어업)



[그림 III-7] 업종별 5개년 평균 생산량(2017~2021년)과 취약성 점수 비교



### 3. 논의

민감도에서 높은 점수를 받은 어종은 생산력이 상대적으로 낮고, 이동범위가 좁으며, 기후변화에 비교적 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다. 기후와 관련된 변화들은 종의 풍족도와 분포의 변화와 관련이 있다(Perry et al., 2005; Pörtner and Peck, 2010; Morrison et al., 2015). 먼저, 풍족도는 생산 잠재력을 보여주는 속성으로, 일반적으로 생산성이 좋은 어종은 사망률 증가를 보상할 수 있어 멸종에 덜 취약하며(Dulvy et al., 2003; García et al., 2008), 기후변화 스트레스 요인에도 덜 민감하다(Kaustuv et al., 2001). 연근해어업 5개년 평균 어획량(2015-2019년)에서 50%를 차지하는 멸치, 고등어, 살오징어, 갈치, 삼치류는 다른 어종들보다 생산성이 높아 풍족도 속성에서 낮은 점수를 받아 기후변화에 상대적으로 덜 민감한 종으로 평가되었다.

풍족도와 더불어 종의 분포 변화도 기후변화에 대응하여 발생하는 가장 잘 알려진 종의 반응이다(Poloczanska et al., 2013, Fogarty et al., 2017). 해양 어류와 무척추동물은 기후변화에 따라 분포가 위도나 깊이 범위를 이동하는 경향이 있다(Perry et al., 2005, Cheung et al., 2009). 국립수산물과학원은 기후변화 시나리오에 따른 해양환경 변화와 종의 먹이생물과의 관계를 고려하여 한국의 주요 수산자원 중 하나인 고등어의 2050년대(2050~2059년)의 서식지 분포 변화를 전망하였다. 그 결과, 현재 고등어가 활용하는 어장들 중 주 어장인 남해에서의 분포는 상대적으로 크게 감소하고 있지만, 이외의 지역에서는 일부 월(10-12월)에서 증가하는 것으로 전망된다. 이는 수온 상승에 따라 미래 고등어 서식지가 북상하는 것으로 보인다.

또한, 기후변화로 이용 가능한 서식지가 감소할 것으로 예상되어(Petitgas et al., 2013), 이동 가능성이 낮고 좁은 서식지 분포를 가진 어종은 기후변화에 민감할 것으로 평가된다. 어종별 민감도 평가에서 상위 순위를 차지한 도루묵, 대구, 문치가자미, 참가지미, 기름가자미는 다른 어종들보다 이동능력이 상대적으로 낮아 기후변화에 상대적으로 더 민감한 종으로

평가되었다. 특히 이러한 어종들의 경우 기후변화와 더불어 서식지 환경 악화 등 환경변화에도 영향을 받아 개체군 풍족도의 변화폭이 더 클 수 있다. 일부 이동능력이 좋은 어종이라 하더라도 지역에서의 어업, 오염 등의 다양한 요인들로 인해 부정적인 영향(Pecl et al., 2014, Chung et al., 2015)을 받을 수 있으므로 본 연구에서 사용된 분포의 4가지 속성과 더불어 어업 및 오염 등의 요인들을 추가하여 평가한다면 보다 다양한 민감도 평가 결과를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

생물계절학은 종에 대한 기후변화의 영향을 가장 잘 나타낸다(Parmesan and Yohe, 2003). 본 연구에서 생물계절학(P) 구성요소는 점수 범위가 다른 구성요소들보다 크고, 어종별로 더 큰 영향을 주는 것으로 평가되었다. 특히, 산란 및 번식 생활사 기간이 짧은 어종들은 기후변화가 발생하였을 때 상대적으로 더 민감한 것으로 평가되었다. 그 이유는 생활사 시기의 타이밍의 변화는 먹이-포식자 불일치와 같은 심각한 결과를 초래할 수 있으며(Edwards and Richardson, 2004; Durant et al., 2007), 이는 생태계의 기능, 지속성 및 탄력성을 방해하고 개체군의 멸종 위험을 증가시킬 수도 있기 때문이다(Pecl et al., 2014; Asch, 2015). 예를 들어, 본 연구에서 생물계절학에서 가장 높은 점수를 받은 청어의 경우 유사사례를 살펴보면, Eastern Bering sea (EBS)의 청어자원은 지구온난화로 인한 수온 상승과 해양환경 변화로 인해 생활사 시기의 청어의 이동 타이밍과 경로가 변화되었고, 이는 청어자원에도 영향을 준 것으로 분석되었다(Tojo et al., 2007).

수온은 해양 종에 영향을 미치는 가장 보편적인 비생물적 요인 중 하나이다(Little et al., 2020; Stewart et al., 2021). 특히 수온의 변화는 종의 성장률, 자치어 발달, 회유 시기, 산란 시점 등에 영향을 준다(Pecl et al., 2011). 어종별로 적정 서식 및 산란 수온 범위가 다르며, 좁은 적정 범위를 가진 어종은 초기 생활사에 직접적 또는 간접적으로 영향을 받을 수 있어 온난화 기후 하에서는 위험할 수 있다(Dahlke et al., 2020). 본 연구에서는 4종(참가자미, 홍어, 대게, 붉은대게)의 종별 적정 서식 및 산란

수온의 범위가 RCP8.5 시나리오로 예측된 향후 수온의 최소 및 최대 범위를 벗어나 기후 노출 속성에서 최고점을 받았다. 이러한 결과는 업종별 취약성 평가 결과에도 큰 영향을 주었다. 그러나 참가자미와 홍어의 경우 노출 속성에서 정보가 없어 가장 높은 점수를 받은 어종이다.

생물학적 및 생태학적 특징이 속성으로 사용하여 평가된 민감도 점수와 기후 노출 속성을 추가하여 평가된 취약성 점수를 비교한 결과, 대부분 어종의 순위는 동일하였지만, 일부 어종에서는 순위가 변화하는 것으로 나타났다. 먼저, 민감도 평균 점수 기준보다 높은 어종 중 문치가자미, 돌돔, 그리고 참돔은 상대적으로 민감한 어종으로 판단되었지만, 취약성 점수에서는 하위 점수로 상대적으로 기후변화에 덜 취약한 것으로 평가되었다. 반대로 민감도 평균 점수보다 낮아 상대적으로 덜 민감하다고 판단되었던 명태, 대게, 그리고 붉은대게는 취약성 점수에서는 평균보다 높은 점수로 기후변화가 발생하였을 때 상대적으로 취약한 것으로 평가되었다. 또한, 살오징어의 경우 민감도에서 가장 덜 민감한 어종으로 분석되었지만, 취약성 점수에서는 중간 순위를 차지하였다. 따라서 민감도만 고려하여 종의 취약성을 평가하면 잘못된 결론을 도출할 수 있으므로, 노출 속성도 함께 고려하는 기후변화 취약성 평가가 중요하다.

본 연구에서 기후변화 취약성에서 높은 순위를 차지한 3종(도루묵, 기름가자미, 대구)은 선행된 자원평가 연구에서도 자원량 수준이 낮은 것으로 나타나 우선적인 관리가 필요할 것으로 평가된다. 도루묵은 자원평가에서 남획상태로 판단되어 TAC 대상 어종으로 관리되고 있지만, 어획량은 감소 현상을 보여 자원의 지속적인 이용을 위해서는 효과적인 관리방안 마련이 필요한 상태이다(김도훈, 2015). 기름가자미의 자원량 추정 결과에서도, 자원량은 감소하는 것으로 추정되었다(최지훈 외, 2020). 대구의 경우에도 Bohai해와 황해의 자원평가 결과, grossly overfished 상태로 평가되었다(Wang et al., 2020).

명태는 민감도 속성은 높았지만, 노출 속성 점수가 높아 다른 어종들보다 상대적으로 수온 변화에 민감한 것으로 평가되었다. 명태는 우리나라 중요

상업 종이였지만 1980년대 중반부터 어획량은 급감하기 시작하여 최근에는 어획량이 거의 전무한 상황이다. 그 원인으로는 수온 변화에 따른 동해 생태계의 구조와 기능 변화와 더불어 남획 등으로 평가되고 있다(강수경 외, 2013). 이와 같이, 기후변화 이외에도 어업에 의한 남획도 다양한 해양생물종과 생태계에 영향을 미치므로(Agardy, 2000; Brander, 2007) 향후에는 기후변화 영향과 더불어 어업의 영향을 함께 고려한 어종별 취약성 평가 연구가 필요할 것이다.

연근해어업의 업종별 취약성 점수는 근해어업이 연안어업보다 더 높은 점수를 받았으며, 근해어업이 우선적으로 관리될 필요가 있다. 또한, 어종별 민감도 속성과 기후 노출 속성 점수에서 모두 높은 점수를 받은 어종은 높은 취약성 종으로 평가되며, 이러한 어종의 어획 비율이 높은 업종들은 취약성이 상대적으로 높은 것으로 평가된다. 따라서 연근해어업 관리를 위한 정책을 수립할 때 상대적으로 취약성이 높은 어종들의 어획 비율이 높은 업종을 우선적으로 관리할 필요가 있다.

본 연구의 한계점으로는 우선 활용 가능한 자료의 한계로 일부 어종들은 노출 평가에서 가장 높은 점수를 받았다. 노출 속성 C1(산란 수온과 향후 예측 수온)에서는 5종(민어, 참가자미, 물가자미, 병어, 홍어) 그리고 C2(서식지 수온과 향후 예측 수온)에서는 3종(옥돔, 참가자미, 홍어)이 최고점인 3점으로 평가되었다. 그 중, 참가자미와 홍어의 경우 민감도 평가에서도 높은 점수를 받아 최종적으로 기후변화에 취약한 어종으로 평가되었다. 또한, 본 연구에서 업종들은 연구 대상인 36종 이외에도 어획하는 종이 있다. 따라서 추후에 어종들이 추가되고, 속성 관련 자료들이 추가 수집된다면 보다 정확한 어종별 및 업종별 취약성 점수를 부여할 수 있을 것이다.

그리고 본 연구에서는 기후변화를 감지하는 여러 가지 요인 중에서 수온 자료만을 이용하여 어종별 취약성을 평가하였다. 하지만, 수온 이외에도 염분, 해양산성화 등도 종의 생활사에 영향을 준다(Hare et al., 2016; Koenigstein et al., 2016). 따라서 취약성 평가 개선을 위해서는 수온 이외의 다른 환경요인들을 함께 고려가 필요하다.

또한, 본 연구에서 다룬 속성들 이외에도 기후변화에 따른 먹이들의 이동, 성장단계별 측면 등을 고려하는 속성들의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 Pecl et al. (2011)의 민감도 평가처럼 속성별로 동일한 가중치를 적용하였지만, 향후에는 한국 해역의 수산자원 특성을 반영한 민감도 속성의 개발, 점수 단계의 구체화, 속성별 가중치를 고려해야 할 것이다. 기후변화 영향 이외에도 어업은 수산자원상태에 영향을 미치며(Kim et al., 2022), 수온 상승과 같은 기후 영향은 어업과 밀접한 상호작용이 있다(Brander, 2007). 따라서, 향후에는 기후변화 영향과 더불어 어업에 의한 영향을 고려한 취약성 평가가 필요하다.

현재 연근해 수산자원의 관리를 위해 TAC 기반의 자원관리형 어업 구조를 구축해 나가고 있다(해양수산부, 2019). TAC 제도의 대상 어종과 업종을 선정할 때 자원평가 결과와 더불어 기후변화 영향 등이 고려되어야 하지만 이와 관련된 자료는 상당히 부족한 실정이다. 이에 기후변화에 따른 어종별 및 업종별 취약성 평가 결과는 향후 수산자원 및 어업관리에 있어 활용성과 유용성이 클 것으로 기대된다.

## IV. 기후변화에 따른 양식업 위험성 평가

### 1. 분석 자료 및 방법

#### 1.1. 양식업 현황

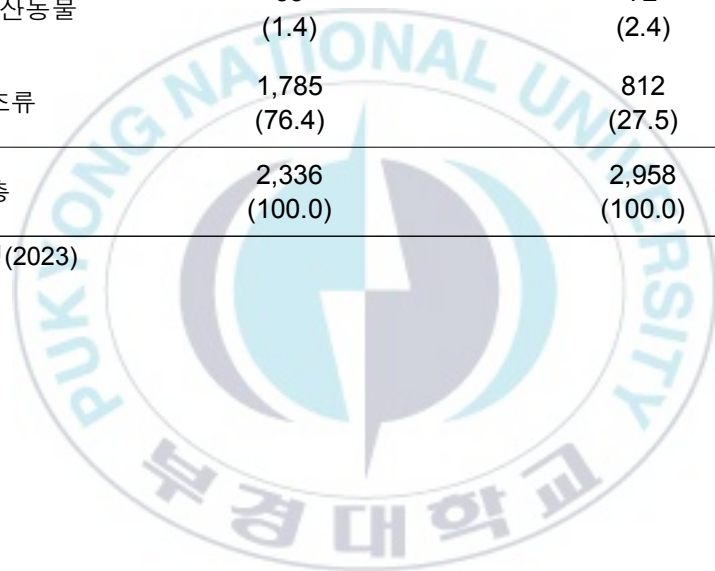
2021년의 양식업 생산 비중이 전체 수산물 생산량의 약 63%에 이르며, 생산금액은 전체의 약 35%로 점차 비중이 증가하고 있다(통계청, 2023). 양식업 생산량에서 가장 높은 비율을 차지하는 품종은 해조류로 5개년 평균 생산량(2017~2021년)의 약 76.4%를 차지하였으며, 뒤이어 패류 18.2%, 어류 3.7%, 기타수산물 1.4%이다(표 IV-1). 생산금액은 어류와 패류가 약 33%로 큰 비중을 차지하였으며, 뒤이어 해조류가 27%를 차지하였다.

주요 양식 지역은 남해안의 전라남도, 경상남도, 제주도이며, 동해안과 서해안에 일부 분포되어 있다. 전라남도는 전체 양식생산량의 약 74%를 차지하며, 해조류와 전복 양식이 집중되어 있다. 경상남도의 경우 어류, 멍게, 그리고 전복과 바지락을 제외한 패류 양식이 많다. 제주도의 경우 육상수조식 넙치 생산이 주를 이루고 있다. 양식되는 대부분의 품종은 자연환경에 많이 노출되고, 특히, 전복을 제외한 패류, 해조류, 멍게는 자연급이에 의존하고 있어 자연환경에 대한 의존성이 크다.

<표 IV-1> 해면양식업 5개년 평균(2017~2021년) 생산량 및 생산금액

구분	평균 생산량 (thousand ton)	평균 생산금액 (billion KRW)
어류	86 (3.7)	977 (33.0)
갑각류	7 (0.3)	119 (4.0)
패류	425 (18.2)	978 (33.1)
기타수산동물	33 (1.4)	72 (2.4)
해조류	1,785 (76.4)	812 (27.5)
총	2,336 (100.0)	2,958 (100.0)

자료: 통계청(2023)

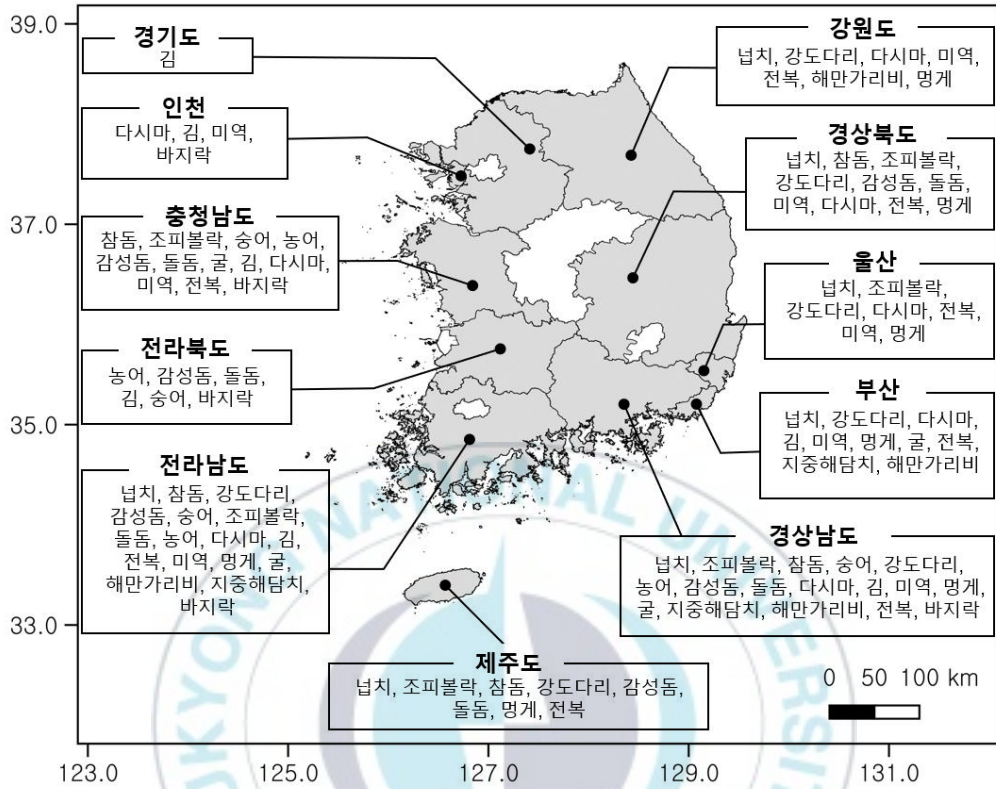


## 1.2. 분석 자료

본 연구에서는 주요 양식품종 중 위험성 평가에 필요한 자료가 활용 가능한 17종을 선정하였고, 그리고 이들을 양식하는 11개의 행정구역을 대상으로 하였다(그림 IV-1, 표 IV-2). 분석 대상 품종들은 해면양식업 전체 생산량에서 약 97% 그리고 생산금액에서 약 92%를 차지하고 있어 주요 양식품종 대부분을 대상으로 하고 있다. 전체 수산물 생산량과 생산액에서 차지하는 비중도 각각 약 60%와 31%로 산업적인 중요성이 아주 큰 품종들이다(통계청, 2023).

위험성 평가를 위해 분석에 필요한 생물학적 정보와 양식환경 정보는 국립수산과학원에서 발간한 품종별 양식기술 매뉴얼, 보고서 등에서 수집하였으며, 이외에도 부족한 자료들은 학술서적과 논문 등에서 수집하였다. 향후 수온 변화 예측 자료인 SSP 시나리오별 수온 자료는 기상청 기후정보포털에서 수집하였다. 그리고 품종별 생산량은 국가통계포털에서 최근 5개년(2017~2021년) 자료를 활용하였다(통계청, 2023). 본 연구에서는 명확한 통계 구분이 없는 품종은 해당 품종류(해조류: 다시마류, 김류, 미역류; 패류: 굴류, 전복류, 가리비류; 어류: 넙치류, 송어류, 가자미류, 농어류)의 생산량 통계를 활용하였다.





[그림 IV-1] 11개 행정구역별(회색) 연구대상 양식품종

<표 IV-2> 평가 대상 양식품종

국명	영명	학명	생산량 (thousand ton)
넙치	Olive flounder	<i>Paralichthys olivaceus</i>	41
조피볼락	Korean rockfish	<i>Sebastes schlegelii</i>	21
숭어	Mullet	<i>Chelon haematocheila/</i>	8
참돔	Red seabream	<i>Pagrus major</i>	6
강도다리	Starry flounder	<i>Platichthys stellatus</i>	4
농어	Sea bass	<i>Lateolabrax japonicus</i>	1
감성돔	Black seabream	<i>Acanthopagrus schlegelii</i>	1
돌돔	Rock bream	<i>Oplegnathus fasciatus</i>	1
다시마	Kelp	<i>Saccharina japonica</i>	628
김	Laver	<i>Porphyra sp.</i>	556
미역	Sea mustard	<i>Undaria pinnatifida</i>	547
굴	Pacific oyster	<i>Crassostrea gigas</i>	310
지중해담치	Mediterranean mussel	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	62
전복	Abalone	<i>Haliotis discus hannai</i>	20
바지락	Japanese littleneck clam	<i>Ruditapes philippinarum</i>	19
해만가리비	Bay scallop	<i>Argopecten irradians irradians</i>	5
멍게	Sea squirt	<i>Halocynthia roretzi</i>	28

자료: 통계청(2023)

### 1.3. 양식품종별 기후변화 위험성 평가

기후변화 위험성 평가는 양식품종별로 기후변화에 취약한 정도를 분석하는 것으로, 이는 향후 대응 조치 및 계획을 위해 품종별 우선순위를 식별하는데 중요하다(Battaglene et al., 2008; Pecl et al., 2011). Pecl et al. (2011)을 기반으로 한 Doubleday et al. (2013)은 기후변화에 따른 주요 양식업의 상대적인 위험을 평가하기 위해 2단계 프로세스로 진행하였다. 즉, 먼저 분석 대상 품종 선정과 품종별 profile을 작성한 후 이를 바탕으로 민감도 및 영향 점수를 매겨 양식품종별 위험성을 평가하였다. 여기서 민감도는 기후변화가 양식품종 및 관련 양식 과정에 미치는 위험 그리고 영향은 알려진 또는 예측된 기후 요인이 미치는 영향 정도를 각각 의미한다.

본 연구에서는 Doubleday et al. (2013)의 위험 평가 정의를 바탕으로 하였으며, 민감도의 속성 및 점수 기준은 그대로 사용하였다(표 IV-3). 하지만 영향 요인 속성 및 점수 기준은 수정하여 사용하였다. 이는 기존 연구에서는 전문가 의견으로 기후변화 영향에 긍정 혹은 부정의 정도에 따라 점수가 정성적으로 평가된 한계가 있었기 때문이다. 이에 본 연구에서는 보다 객관적인 정량적 평가를 위해 SSP 시나리오로 예측된 향후 표층 수온과 품종별 적정 및 한계 수온과의 관계를 점수 기준으로 산정하였다(표 IV-3). 그리고 양식품종별 위험성 점수는 민감도 점수와 영향 점수의 곱으로 평가하였다(Pecl et al., 2011; Doubleday et al., 2013).

다음으로 양식품종별 기후변화 위험성 평가 결과를 바탕으로 생산 지역별 위험을 평가하였다. 지역별 위험 정도를 시각적으로 식별하기 위해 TLS를 기준(Ceriola et al., 2008)으로 색깔을 부여하였다. 분석 대상 지표의 백분위수 값의 범위에 따라 지표 값을 평가하였으며, 백분위수의 값을 구해서 33% 미만은 Green, 33~66% 미만은 Yellow, 66% 이상은 Red를 부여하였다(김우수·김도훈, 2011). 여기서 Green이 부여된 지역은 상대적으로 기후변화 위험이 크지 않아 향후 지속적인

양식이 가능한 지역임을 의미하고, Yellow는 기후변화의 부정적인 영향 가능성이 있지만 양식은 가능한 지역, 그리고 Red는 가장 위험한 지역으로 향후 양식 생산이 적합하지 않음을 의미한다.

### 1.3.1. 민감도 속성

민감도 속성은 기후변화에 대한 양식품종 및 관련 양식 과정의 위험을 평가하기 위해 9가지 속성을 기반으로 한다. 구체적으로, 자연환경 조건에 대한 노출 수준을 포함하는 속성들과 산란, 자치어 기르기 등의 모든 기본 양식 및 생활사 단계를 포함한 속성들로 구성된다(표 IV-3)(Doubleday et al., 2013).

속성별 점수는 3개의 기준으로 평가되며, 기후변화에 대한 민감도 정도에 따라 Low(1점), Moderate(2점), High(3점)로 평가된다(표 IV-3). 즉, 1점은 상대적으로 기후변화에 덜 민감하며, 3점은 가장 민감함을 의미한다. 민감도 점수는 9가지 속성 점수의 합이며, 그 결과에 따라 어종별 민감도 순위가 결정된다.

<표 IV-3> 민감도 및 영향 속성별 점수 기준

민감도 속성	점수		
	Low (1점)	Moderate (2점)	High (3점)
1. Broodstock 이용 가능성 및 상태 - 환경에 대한 제어(통제) 정도	Broodstock은 완전한 양식: 바다 혹은 실내에서 육성	Broodstock은 야생에서 채집되고, 부화장에서 부화	야생에서 번식
2. 산란 & 수정 - 난이도 및 환경 제어의 정도	완전히 제어되는 환경에서 양식이 이루어짐; 산란 유발에 대해서 잘 알려져 있음; 많은 수의 broodstock을 보유하기 쉬우며 성별 구별이 쉬움	완전히 제어되는 환경에서 양식이 이루어짐; 산란 유발에 대해서 잘 알려져 있지 않음; 많은 수의 broodstock을 보유하기 어렵고, 성별의 구별이 어려움	야생에서 자연적으로 발생
3. 자어 양식 - 복잡성 및 환경 제어의 정도	완전히 제어되는 환경에서 양식이 이루어짐; 자어 기간이 짧음; 살아있는 먹이 요구되지 않음	완전히 제어되는 환경에서 양식이 이루어짐; 자어 기간이 길거나, 복잡한 일련의 단계가 있음; 살아있는 먹이가 요구됨	야생에서 자연적으로 발생
3. 미성어 양식 - 복잡성 및 환경 제어의 정도	완전히 제어되는 환경에서 양식이 이루어짐; 제조된 사료 요구됨	부분적으로 제어되는 환경에서 양식이 이루어짐; 일부 자연 상태의 먹이가 요구됨	야생에서 자연적으로 발생
5. 양식: 자연환경과의 연결 - 환경 제어의 정도	환경과 완전히 구분되며, 높은 수준으로 환경에 대한 제어가 이루어짐 (예: 집중 재순환 시스템)	부분적으로 환경과 구분되고, 환경에 대한 제어가 이루어짐 (예: 연못, 수조, raceways)	자연환경에 개방되어 있음 (예: 해상 가두리, 연승 수하식)

6. 양성: 대체할 수 있는 양식장 및 양식 방법의 이용 가능성 - 양식장 이전 및 양식 시스템 대체에 대한 가능성	대체 양식장 지역이 쉽게 식별 가능하며, 일부 대체할 수 있는 양식장은 다른 형태의 양식업이 이미 이루어지고 있음	대체 양식장 지역으로 이전은 가능하지만, 새로운 양식 지역을 할당하거나 대체 양식 시스템을 사용해야 함	대체 양식장 혹은 대체 양식 시스템을 활용할 수 있는 가능성 없음
7. 양성: 사료 급이 - 사료 급이 시 활용되는 사료의 종류	제조된 사료 활용	야생에서 얻은 생물 사료를 활용하고, 일부의 경우 사료로 활용하는 종을 다양화하거나 제조된 사료 활용	자연에서 생산된 사료 활용
8. 양성: 양식장 운영 - 자연환경에 대한 노출 수준 및 환경 영향의 정도	양식장과 인프라가 육지에 위치하여 접근하기 쉽고, 환경의 영향을 받지 않음	양식 기간 중 부분적으로 홍수, 강한 조수의 차, 폭풍 피해가 있지만, 일반적으로 양호한 환경에서 양식이 이루어짐	전체 양식 주기가 해면에서 이루어져 환경 변화(바다의 상태 등)에 따라 빈번한 현장 방문이 요구됨
9. 양성: 질병과 해충 - 질병과 해충에 대한 관리 및 취약점	질병/해충에 관한 논문들은 자연적인 저항성을 시사하며, 질병/해충에 관한 문제는 없음	질병/해충에 관한 논문들은 자연적인 저항성을 시사하며, 현재 일부 존재하는 질병/해충 문제가 관리되고 있음	광범위하게 기록된 질병/해충 문제가 있으며, 현재 주된 질병/해충 문제가 잘 관리되고 있지 않으며, 기후변화로 악화 될 가능성이 높음

영향 속성	점수		
	Low (0점)	Moderate (1점)	High (2점)
향후 예측 수온(SSP scenario)과 양식품종별 수온(적정&한계)과의 관계	적정 수온 > SSP scenario	적정 수온 ≤ SSP scenario ≤ 한계 수온	한계 수온 < SSP scenario

### 1.3.2. 영향 속성

영향 속성은 알려진 또는 예측된 기후변화가 종에 미치는 영향의 정도를 평가한다. 구체적으로, 미약한 부정적 및 긍정적 영향 또는 영향이 예상되지 않는 경우 0점, 중간 정도의 부정적 영향 또는 영향 자체가 알려져 있지 않는 경우 1점, 강한 부정적 영향은 2점으로 평가하였다(Doubleday et al., 2013). 본 연구에서는 다양한 기후 요인 중 많은 연구가 진행된 수온을 고려하였으며, 정량적 평가를 위해 영향 속성 평가 기준은 SSP 시나리오로 예측된 수온과 양식품종별 적정 및 한계 수온 상한과의 관계를 비교하였다(표 IV-3).

여기서, 적정 수온은 성장하기 좋아 경제성이 우수한 수온 그리고 한계 수온은 생존이 허용 가능한 수온을 의미한다. 기후변화로 인한 수온 상승이 예측되며, 종은 생리적 허용 범위 내에서의 온도가 상승하면 성장이 증가할 수 있지만, 허용 범위를 초과하면 성장과 섭식이 감소하고 폐사율이 증가한다(Collins et al., 2020). 따라서 본 연구에서는 적정 및 한계 수온 범위에서 상한 수온을 영향 속성에서의 평가 기준으로 선정하였다. 또한, 종묘 생산, 자어 및 미성어 양식은 육상에서 비교적 인공적으로 통제 가능한 환경에서 대부분 이루어지기 때문에 본양성 기간을 기준으로 하였다(Kim et al., 2021). 양식품종별 수온은 선행연구(Kim et al., 2021)를 바탕으로 최근 발간된 국립수산물과학원의 양식기술 매뉴얼, 보고서, 논문 등에서 조사하여 업데이트하였다(표 IV-4).

구체적으로 영향 속성 점수는 3개의 기준으로 평가되며, 향후 예측 수온과 양식품종별 수온과의 관계에 따라 Low(0점), Moderate(1점), High(2점)로 평가된다(표 IV-3). SSP 시나리오 수온이 적정 수온보다 낮으면 0점, 적정 수온보다 높고 한계 수온보다 낮으면 1점, 한계 수온보다 높으면 2점으로 평가하였다. 즉, 성장하기 좋은 수온 환경은 0점, 양식품종들이 적정 수온을 벗어나더라도 한계 수온 범위 내에 있으면 영향은 있지만 양식업을 지속할 수 있어 1점, 한계 수온을 벗어나면 폐사가 진행되어 양식이 불가능하게 되어 가장 높은 2점을 부여하게 된다.

양식품종들의 생산지역별 향후 수온 예측값은 서로 다르므로, 같은 양식품종일지라도 생산지역별 영향 점수는 차이가 있다. 따라서 양식품종별 생산지역에 대한 영향 점수를 평가하여 수온 상승에 상대적으로 취약한 생산지역을 식별할 수 있다.

<표 IV-4> 양식품종별 적정 및 한계 수온 상한

구분	양식품종	적정수온 (℃)	한계수온 (℃)	참고자료
어류	넙치	24	32	국립수산과학원 (2016b)
	조피볼락	18	30	국립수산과학원 (2017b)
	송어	27	33	국립수산과학원 (2019a)
	참돔	25	28	국립수산과학원 (2020)
	강도다리	18	27	국립수산과학원 (2019b)
	농어	27	30	강덕영 외(2004)
	감성돔	25	27	국립수산과학원 (2020)
	돌돔	26	29	국립수산과학원 (2020)
해조류	다시마	14	18	국립수산과학원 (2016c; 2022b)
	김	15	20	국립수산과학원 (2018)
	미역	18	20	국립수산과학원 (2016c; 2022b)
패류	굴	25	30	국립수산과학원 (2016d)
	지중해담치	26	34	국립수산과학원 (1964)
	전복	20	28	국립수산과학원 (2019c)
	바지락	23	30	국립수산과학원 (2022c)
	해만가리비	28	31	국립수산과학원 (2019d)
기타수산동물	멍게	16	24	국립수산과학원 (2021)



### 1.3.2.1. SSP 시나리오로 예측된 수온

IPCC AR6에 채택된 SSP 시나리오는 기존의 복사강제력 강도(RCP 기준)와 함께 미래 사회경제 변화를 기준으로 기후변화에 대한 미래의 완화와 적응 노력에 따라 시나리오가 구분되며, 인구통계, 경제발달, 사회적 인자, 정책을 고려하였다.

본 연구에서는 향후 예측 수온 자료로 기상청에서 제공된 SSP 전지구 시나리오를 이용하였다(표 IV-5). 시나리오 산출에 사용된 모델은 국립기상과학원에서 개발한 모델인 K-ACE와 한국-영국 기상청 간 과학협력의 일환으로 공동 활용 중인 영국기상청 예측 모델인 UKESM1이다(기상청 기후정보포털, 2023).

SSP 시나리오 중에서도 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오를 활용하였으며, 시점은 단기인 2030년(2021~2030년 평균)과 장기인 2100년(2091~2100년 평균)으로 설정하고, 양식 생산이 이루어지는 11개의 행정구역별로 수온 자료를 시나리오별로 추출하였다. 양식품종별로 자연환경에 노출되는 기간이 다르므로 영향 속성 평가를 위한 향후 예측 수온 자료는 연중양식이 가능한 어류와 패류는 모든 계절의 평균을, 계절 양식인 해조류는 주요 양식 시기인 겨울철과 봄철의 평균으로 선정하였다.

<표 IV-5> SSP 시나리오 종류 및 의미

종류	의미
SSP1-2.6	재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정하는 경우
SSP2-4.5	기후변화 완화 및 중간 단계의 사회경제 발달 정도를 가정하는 경우
SSP3-7.0	기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 경우
SSP5-8.5	산업기술의 빠른 발전에 중심을 두어 화석연료 사용이 높고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우

자료: 기상청 기후정보포털(2023)



## 2. 분석 결과

### 2.1. 양식품종별 기후변화 위험성 평가

#### 2.1.1. 민감도 속성 및 영향 속성 점수

##### 2.1.1.1. 민감도 점수

전체 민감도 평균 점수는 18점으로, 어류는 14.5점, 해조류는 20점, 패류는 22점, 기타수산동물은 20점으로 평가되었다(표 IV-6). 품종별 평균 점수는 인공종묘(산란 및 수정), 자어 및 미성어 시기의 환경 제어의 정도에 따라 좌우되었다. 가장 민감한 것으로 평가되는 품종은 패류의 굴, 지중해담치, 그리고 바지락으로 평가된 반면, 가장 덜 민감한 품종은 어류의 넙치로 평가되었다.

어류는 인공종묘 생산이 일반적이고, 비교적 통제된 환경에서 양식이 이루어져 가장 낮은 평균 점수를 받았으며, 또한 어류는 다른 품종과 대비하여 양식장 대체가 가능하고, 제조된 사료로 먹이 공급이 가능하여 민감성이 낮게 평가되었다. 패류는 야생환경에서 전반적인 양식이 이루어져 가장 높은 평균 점수로 평가되었다. 해조류와 기타수산생물(멍게)은 초기생활사 시기에 일부 통제된 환경에서 양식 가능하여 패류 보다는 민감성이 상대적으로 낮은 것으로 평가되었다.

<표 IV-6> 양식품종별 민감도 속성별 점수

구분	양식품종	민감도 속성									All
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
어류	넙치	1	1	1	1	2	1	2	2	2	13
	조피볼락	2	1	1	1	3	1	2	2	2	15
	송어	2	1	1	1	3	1	2	2	2	15
	참돔	2	1	1	1	3	1	2	2	2	15
	강도다리	2	1	1	1	2	1	2	2	2	14
	농어	1	1	1	1	3	1	2	2	2	14
	감성돔	2	1	1	1	3	1	2	2	2	15
	돌돔	2	1	1	1	3	1	2	2	2	15
	어류 평균										14.5
해조류	다시마	2	1	2	3	3	2	3	2	2	20
	김	2	1	2	3	3	2	3	2	2	20
	미역	2	1	2	3	3	2	3	2	2	20
	해조류 평균										20.0
패류	굴	3	3	3	3	3	3	3	2	2	25
	지중해담치	3	3	3	3	3	3	3	2	2	25
	전복	1	1	1	1	3	1	2	2	2	14
	바지락	3	3	3	3	3	3	3	2	2	25
	해만가리비	1	1	3	3	3	3	3	2	2	21
	패류 평균										22.0
기타수산 동물	멍게	2	1	1	2	3	3	3	2	3	20
양식품종 평균											18.0

#### 2.1.1.2. 영향 점수

양식품종의 생산지역별 영향 점수는 기후변화가 더 심화되는 SSP5-8.5 시나리오 하에서 SSP2-4.5 시나리오보다 상대적으로 높은 점수로 평가되었으며, 시기적으로는 단기(2030년)보다 장기(2100년)에 높은 것으로 분석되었다(표 IV-7, 8 and 9).

어류는 시나리오별 시기별 수온 차이가 크지 않아 점수 변화가 거의 없으며, 2점을 받은 SSP5-8.5의 장기의 일부 지역을 제외하고 생산지역별 수온이 어종별 한계 수온 범위를 넘지 않아 대부분 0점 또는 1점으로 평가되었다(표 IV-7).

해조류는 SSP5-8.5 시나리오 하에서 충청남도를 제외한 모든 지역의 수온이 품종별 한계 수온을 넘는 것으로 예측되어 가장 높은 점수인 2점을 받았다(표 IV-8). 특히, 다시마는 SSP2-4.5에서도 2점을 받은 지역이 있어 다른 품종에 비해 상대적으로 수온 상승에 취약한 것으로 평가되었다.

패류는 시나리오별 그리고 시기별 차이가 크지 않으며, 일부 전북 생산 지역(제주도, 경상북도)를 제외하고 생산지역별 수온이 어종별 한계 수온 범위를 넘지 않아 대부분 0점 또는 1점으로 평가되었다(표 IV-9). 기타 수산동물인 멧게는 향후 양식생산이 어려울 것으로 예측되었다.

<표 IV-7> SSP 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 하에서의 어류의 행정구역별 영향(I) 및 위험(R) 점수

구분	행정구역	SSP2-4.5				SSP5-8.5			
		2030		2100		2030		2100	
		I	R	I	R	I	R	I	R
넙치	강원도	0	0	1	13	0	0	1	13
	경상남도	0	0	0	0	0	0	1	13
	경상북도	1	13	1	13	1	13	1	13
	부산	0	0	1	13	1	13	1	13
	울산	0	0	1	13	1	13	1	13
	전라남도	0	0	1	13	0	0	1	13
	제주도	1	13	1	13	1	13	1	13
조피볼락	경상남도	1	15	1	15	1	15	1	15
	경상북도	1	15	1	15	1	15	1	15
	울산	1	15	1	15	1	15	1	15
	전라남도	1	15	1	15	1	15	1	15
	제주도	1	15	1	15	1	15	2	30
	충청남도	1	15	1	15	1	15	1	15
송어	경상남도	0	0	0	0	0	0	0	0
	전라남도	0	0	0	0	0	0	1	15
	전라북도	0	0	0	0	0	0	0	0
	충청남도	0	0	0	0	0	0	0	0
참돔	경상남도	0	0	0	0	0	0	1	15
	경상북도	0	0	1	15	0	0	2	30
	전라남도	0	0	1	15	0	0	1	15
	제주도	1	15	2	30	1	15	2	30
	충청남도	0	0	0	0	0	0	0	0

강도다리	강원도	1	14	1	14	1	14	1	14
	경상남도	1	14	1	14	1	14	1	14
	경상북도	1	14	1	14	1	14	2	28
	부산	1	14	1	14	1	14	2	28
	울산	1	14	1	14	1	14	2	28
	전라남도	1	14	1	14	1	14	2	28
	제주도	1	14	2	28	2	28	2	28
농어	경상남도	0	0	0	0	0	0	0	0
	전라남도	0	0	0	0	0	0	1	14
	전라북도	0	0	0	0	0	0	0	0
	충청남도	0	0	0	0	0	0	0	0
감성돔	경상남도	0	0	0	0	0	0	1	15
	경상북도	0	0	1	15	0	0	2	30
	전라남도	0	0	1	15	0	0	2	30
	전라북도	0	0	0	0	0	0	0	0
	제주도	1	15	2	30	2	30	2	30
	충청남도	0	0	0	0	0	0	0	0
돌돔	경상남도	0	0	0	0	0	0	0	0
	경상북도	0	0	0	0	0	0	1	15
	전라남도	0	0	0	0	0	0	1	15
	전라북도	0	0	0	0	0	0	0	0
	제주도	1	15	2	30	1	15	2	30
	충청남도	0	0	0	0	0	0	0	0

<표 IV-8> SSP 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 하에서의 해조류의 행정구역별 영향(I) 및 위험(R) 점수

구분	행정구역	SSP2-4.5				SSP5-8.5			
		2030		2100		2030		2100	
		I	R	I	R	I	R	I	R
다시마	강원도	1	20	1	20	2	40	2	40
	경상남도	1	20	2	40	2	40	2	40
	경상북도	2	40	2	40	2	40	2	40
	부산	2	40	2	40	2	40	2	40
	울산	2	40	2	40	2	40	2	40
	인천	0	0	1	20	2	40	2	40
	전라남도	1	20	1	20	2	40	2	40
	충청남도	0	0	0	0	0	0	0	0
	김	경기도	0	0	0	0	2	40	2
경상남도		1	20	1	20	2	40	2	40
부산		1	20	2	40	2	40	2	40
인천		0	0	0	0	2	40	2	40
전라남도		1	20	1	20	2	40	2	40
전라북도		0	0	0	0	2	40	2	40
충청남도		0	0	0	0	0	0	0	0
미역	강원도	0	0	0	0	2	40	2	40
	경상남도	0	0	1	20	2	40	2	40
	경상북도	1	20	2	40	2	40	2	40
	부산	1	20	2	40	2	40	2	40
	울산	1	20	2	40	2	40	2	40
	인천	0	0	0	0	2	40	2	40
	전라남도	0	0	0	0	2	40	2	40
	충청남도	0	0	0	0	0	0	0	0



<표 IV-9> SSP 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 하에서의 패류 및 멧게의 행정구역별 영향(I) 및 위험(R) 점수

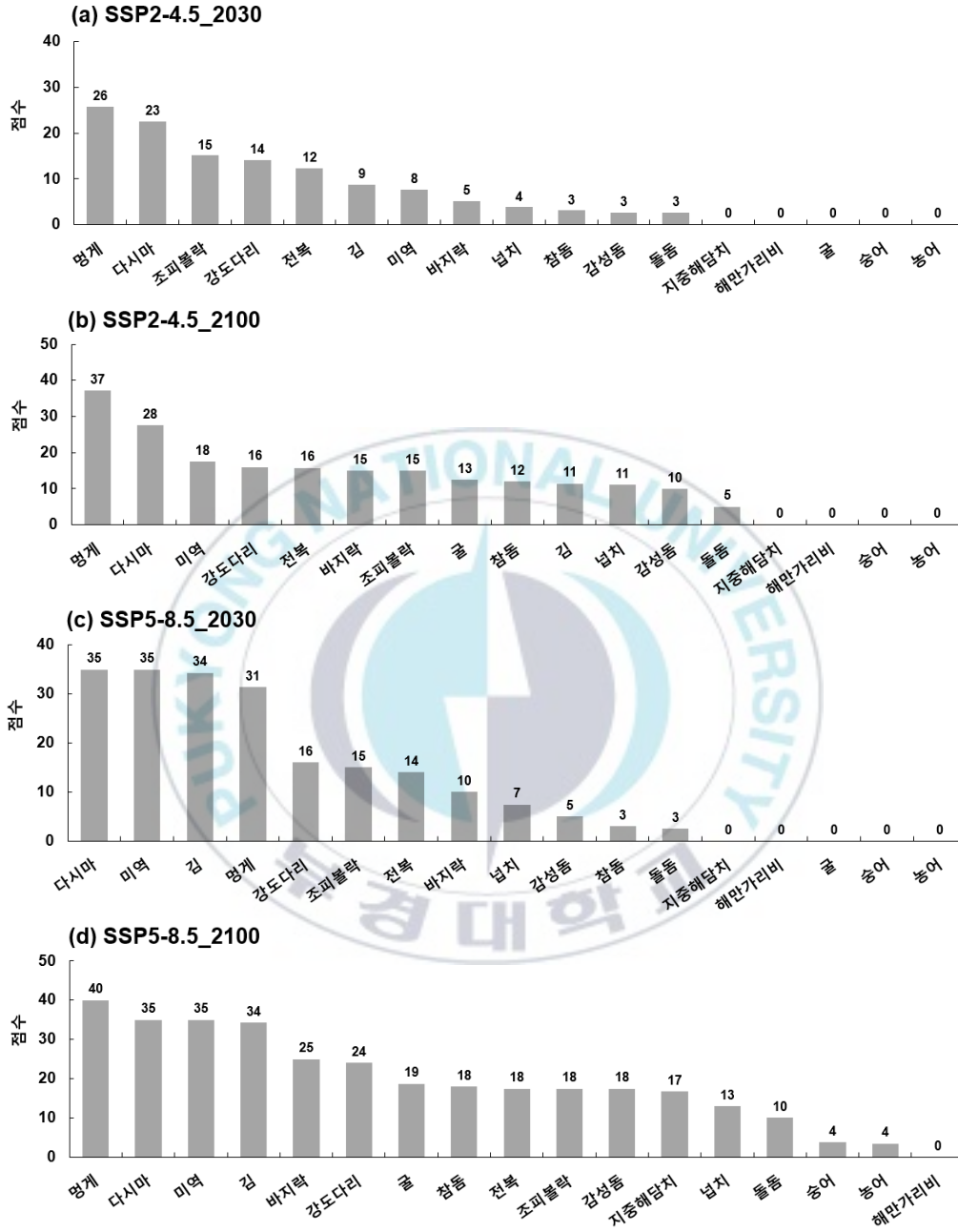
구분	행정구역	SSP2-4.5				SSP5-8.5			
		2030		2100		2030		2100	
		I	R	I	R	I	R	I	R
굴	경상남도	0	0	0	0	0	0	1	25
	부산	0	0	1	25	0	0	1	25
	전라남도	0	0	1	25	0	0	1	25
	충청남도	0	0	0	0	0	0	0	0
지중해담치	경상남도	0	0	0	0	0	0	0	0
	부산	0	0	0	0	0	0	1	25
	전라남도	0	0	0	0	0	0	1	25
전복	강원도	1	14	1	14	1	14	1	14
	경상남도	1	14	1	14	1	14	1	14
	경상북도	1	14	1	14	1	14	2	28
	부산	1	14	1	14	1	14	1	14
	울산	1	14	1	14	1	14	1	14
	전라남도	1	14	1	14	1	14	1	14
	제주도	1	14	2	28	1	14	2	28
	충청남도	0	0	1	14	1	14	1	14
바지락	경상남도	0	0	1	25	0	0	1	25
	인천	0	0	1	25	1	25	1	25
	전라남도	1	25	1	25	1	25	1	25
	전라북도	0	0	0	0	0	0	1	25
	충청남도	0	0	0	0	0	0	1	25
해만가리비	강원도	0	0	0	0	0	0	0	0
	경상남도	0	0	0	0	0	0	0	0
	부산	0	0	0	0	0	0	0	0
	전라남도	0	0	0	0	0	0	0	0
멧게	강원도	1	20	2	40	1	20	2	40
	경상남도	1	20	1	20	1	20	2	40
	경상북도	2	40	2	40	2	40	2	40
	부산	1	20	2	40	2	40	2	40
	울산	1	20	2	40	2	40	2	40
	전라남도	1	20	2	40	1	20	2	40
	제주도	2	40	2	40	2	40	2	40

## 2.1.2. 양식품종별 생산지역별 위험성 평가

### 2.1.2.1. 위험성 점수

민감도 점수와 영향 점수를 곱한 양식품종별 위험성 점수의 범위는 어류의 경우 0점~30점, 해조류 0점~40점, 패류 0점~25점, 그리고 멧게 20점~40점으로 평가되었다(표 IV-7, 8 and 9). 생산지역별로 예측되는 향후 수온이 다르므로 같은 품종을 양식하더라도 양식품종의 위험성 점수는 지역별로 비교적 큰 차이를 보였다.

양식품종별 평균 위험성 점수는 SSP5-8.5 시나리오가 SSP2-4.5 시나리오보다 상대적으로 더 높은 점수를 받았으며, 시기적으로는 단기(2030년)보다 장기(2100년)가 높거나 혹은 시기 구분 없이 동일한 점수로 평가되었다(그림 IV-2). 기후변화에 가장 위험할 것으로 평가된 양식품종은 시기적 구분 없이 SSP2-4.5에서는 시기 구분 없이 멧게, SSP5-8.5에서는 단기에는 다시마, 장기에는 멧게로 평가되었다. 반면, 위험성이 가장 낮게 평가된 품종은 SSP2-4.5와 SSP5-8.5에서 단기적으로 5종(지중해담치, 해만가리비, 참굴, 숭어, 농어), SSP2-4.5에서 장기적으로 4종(지중해담치, 해만가리비, 숭어, 농어), 그리고 SSP5-8.5에서 장기적으로 1종(해만가리비)으로 평가되었다.



[그림 IV-2] SSP 시나리오별(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 양식품종별 위험 점수 및 순위

### 2.1.2.2. TLS 기반으로 한 위험성 평가

위험성 점수에 TLS 기법을 적용하여 양식품종별 적합한 생산지역을 평가한 결과, 모든 품종이 SSP2-4.5 시나리오보다 SSP5-8.5 시나리오 하에서 그리고 단기(2030년)보다 장기(2100년)에서 기후변화에 따른 양식업의 위험성이 큰 지역이 많은 것으로 예측되었다(그림 IV-3, 4 and 5).

#### 어류

생산량이 가장 많은 넙치의 주요 생산지역인 제주도는 향후 양식은 가능하지만 장기적으로 기후변화 영향이 있을 것으로 예측되며, 두 번째로 생산량이 많은 전라남도도 모든 단기 시나리오 하에서 양식생산이 양호할 것으로 예측된다(그림 IV-3). 넙치는 다른 어종과 달리 육상수조에서 양식되므로 수온 상승에 따른 양식생산 적응 대책 마련이 상대적으로 용이할 것으로 전망된다. 조피볼락은 주요 생산지인 경상남도과 더불어 모든 생산지역이 향후 기후변화의 영향이 다소 클 것으로 예측되었다. 송어와 농어는 생산이 많은 경상남도를 비롯한 모든 지역에서 양식생산이 양호할 것으로 평가되었다. 참돔과 감성돔은 다른 어종에 비해 생산지역별 결과가 상이하게 나타났으며, 생산량이 가장 많은 경상남도에서는 SSP5-8.5의 장기를 제외하고 양식이 가능할 것으로 분석되었다. 넙치와 같이 육상수조에서 양식되는 강도다리는 최대 생산지인 경상북도과 더불어 모든 생산지역에서 기후변화에 따른 부정적인 영향은 있지만, 양식은 가능할 것으로 전망되었다. 돌돔은 제주도를 제외하고 기후변화에 큰 영향 없이 양식이 가능할 것으로 평가되었다.

구분	행정구역	SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		2030	2100	2030	2100
넙치	강원도	Green	Yellow	Green	Yellow
	경상남도	Green	Green	Green	Yellow
	경상북도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	부산	Green	Yellow	Yellow	Yellow
	울산	Green	Yellow	Yellow	Yellow
	전라남도	Green	Yellow	Green	Yellow
	제주도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
조피불락	경상남도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	경상북도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	울산	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	전라남도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	제주도	Yellow	Yellow	Yellow	Red
송어	충청남도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	경상남도	Green	Green	Green	Green
	전라남도	Green	Green	Green	Yellow
	전라북도	Green	Green	Green	Green
	충청남도	Green	Green	Green	Green
참돔	경상남도	Green	Green	Green	Yellow
	경상북도	Green	Yellow	Green	Red
	전라남도	Green	Green	Green	Yellow
	제주도	Yellow	Red	Yellow	Red
	충청남도	Green	Green	Green	Green
강도다리	강원도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	경상남도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	경상북도	Yellow	Yellow	Yellow	Red
	부산	Yellow	Yellow	Yellow	Red
	울산	Yellow	Yellow	Yellow	Red
	전라남도	Yellow	Yellow	Yellow	Red
	제주도	Yellow	Red	Red	Red

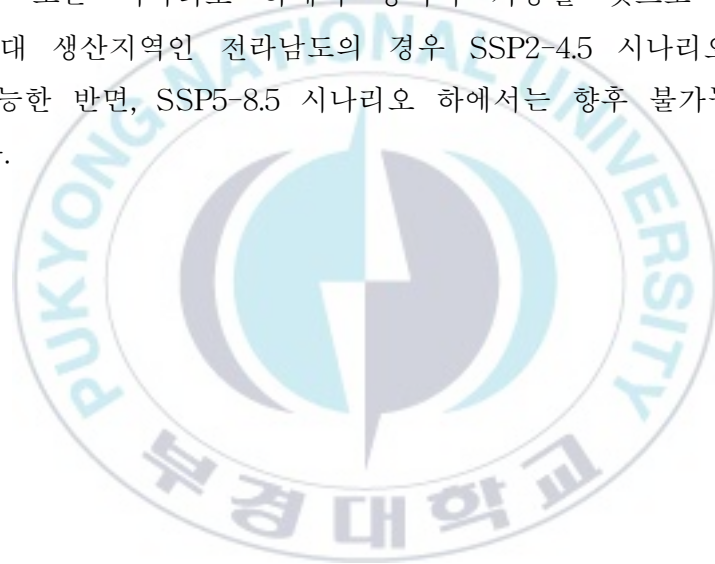
[그림 IV-3] Traffic Light System (TLS)를 통한 SSP 시나리오별 어류의 행정구역별 위험성 평가

영어	경상남도				
	전라남도				
	전라북도				
	충청남도				
감성돔	경상남도				
	경상북도				
	전라남도				
	전라북도				
	제주도				
	충청남도				
돌돔	경상남도				
	경상북도				
	전라남도				
	전라북도				
	제주도				
	충청남도				

[그림 IV-3] continued

### 해조류

다시마, 김, 미역 모두 충청남도를 제외하고 SSP5-8.5 시나리오 하에서 단기와 장기 모두 양식이 어려울 것으로 평가되었다(그림 IV-4). 충청남도는 모든 시나리오 하에서 해조류를 양식하기에 적합할 것으로 예측되어 향후 대안적인 지역으로 평가된다. 다시마는 주요 생산지인 전라남도를 포함한 모든 생산지역(충청남도 제외)에서 양식 생산이 적합하지 않은 것으로 평가되었다. 김은 생산량이 많은 전라남도에서 향후 양식하기 어려울 것으로 예측되며, 전라북도는 SSP2-4.5 시나리오 하에서 그리고 충청남도는 모든 시나리오 하에서 양식이 가능할 것으로 평가되었다. 미역은 최대 생산지역인 전라남도의 경우 SSP2-4.5 시나리오 하에서는 양식이 가능한 반면, SSP5-8.5 시나리오 하에서는 향후 불가능할 것으로 예측되었다.



구분	행정구역	SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		2030	2100	2030	2100
다시마	강원도	Red	Red	Red	Red
	경상남도	Red	Red	Red	Red
	경상북도	Red	Red	Red	Red
	부산	Red	Red	Red	Red
	울산	Red	Red	Red	Red
	인천	Green	Red	Red	Red
	전라남도	Red	Red	Red	Red
	충청남도	Green	Green	Green	Green
김	경기도	Green	Green	Red	Red
	경상남도	Red	Red	Red	Red
	부산	Red	Red	Red	Red
	인천	Green	Green	Red	Red
	전라남도	Red	Red	Red	Red
	전라북도	Green	Green	Red	Red
	충청남도	Green	Green	Green	Green
미역	강원도	Green	Green	Red	Red
	경상남도	Red	Red	Red	Red
	경상북도	Red	Red	Red	Red
	부산	Red	Red	Red	Red
	울산	Red	Red	Red	Red
	인천	Green	Green	Red	Red
	전라남도	Green	Green	Red	Red
충청남도	Green	Green	Green	Green	

[그림 IV-4] Traffic Light System (TLS)를 통한 SSP 시나리오별 해조류의 행정구역별 위험성 평가



### 패류 및 기타

패류 중 가장 생산이 많은 굴은 주요 생산지인 경상남도에서 모든 시나리오 하에서 장기를 제외하고 양식이 가능할 것으로 전망되며, 이외의 지역들도 장기를 제외하고는 양식에 어려움이 없을 것으로 평가되었다(그림 IV-5). 지중해담치의 경우 생산이 가장 많은 경상남도는 모든 시나리오 하에서 양식이 가능하고, 이외의 지역도 SSP5-8.5의 장기를 제외하고는 양식이 가능할 것으로 평가되었다. 전복은 모든 시나리오 하에서 단기적으로도 영향이 클 것으로 예상되고, 장기적으로는 지역별로 양식이 불가능 할 것으로 추정되었다. 바지락은 주요 생산지인 전라북도과 두 번째로 생산량이 많은 충청남도의 경우 SSP5-8.5의 장기를 제외하고는 양식하기 적합할 것으로 평가된 반면, 이외의 생산지역에서는 양식 생산에 어려움을 겪을 것으로 예측되었다. 해만가리비의 경우 생산량이 많은 경상남도를 포함하여 모든 생산지역에서 양식하기에 적합할 것으로 평가되었다. 하지만 멍게는 모든 시나리오 하에서 향후 양식이 불가능할 것으로 예측되었다.

구분	행정구역	SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		2030	2100	2030	2100
울	경상남도	Green	Green	Green	Red
	부산	Green	Red	Green	Red
	전라남도	Green	Red	Green	Red
	충청남도	Green	Green	Green	Green
지중해 담치	경상남도	Green	Green	Green	Green
	부산	Green	Green	Green	Red
	전라남도	Green	Green	Green	Red
전북	강원도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	경상남도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	경상북도	Yellow	Yellow	Yellow	Red
	부산	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	울산	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	전라남도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
	제주도	Yellow	Red	Yellow	Red
	충청남도	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
바지락	경상남도	Green	Red	Green	Red
	인천	Green	Red	Red	Red
	전라남도	Red	Red	Red	Red
	전라북도	Green	Green	Green	Red
	충청남도	Green	Green	Green	Red
해만가리비	강원도	Green	Green	Green	Green
	경상남도	Green	Green	Green	Green
	부산	Green	Green	Green	Green
멍게	전라남도	Green	Green	Green	Green
	강원도	Red	Red	Red	Red
	경상남도	Red	Red	Red	Red
	경상북도	Red	Red	Red	Red
	부산	Red	Red	Red	Red
	울산	Red	Red	Red	Red
	전라남도	Red	Red	Red	Red
	제주도	Red	Red	Red	Red

[그림 IV-5] Traffic Light System (TLS)를 통한 SSP 시나리오별 패류 및 멍게의 행정구역별 위험성 평가

### 3. 논의

본 연구에서는 SSP 시나리오로 예측된 우리나라 해역의 월별 표층 수온을 기반으로, 주요 17개 양식품종과 이들 품종들의 생산지역별 위험 정도를 평가하였다. 분석 결과, 기후변화가 심화되는 SSP5-8.5 시나리오 하에서, 특히 장기(2100년)에서 향후 양식생산이 어려울 것으로 예측되는 지역들이 다수인 것으로 평가되었다. 특히 양식품종 중 해조류(다시마, 김, 미역)와 멍게는 대부분 생산지역에서 향후 양식이 불가능할 것으로 분석되어 다른 양식품종보다 우선적인 적응대책 마련이 필요한 것으로 나타났다. 같은 지역이더라도 양식품종별로 생산 가능 여부가 다르게 평가되어 기후변화 대응을 위해서는 품종별, 시기별, 그리고 지역별로 적응대책을 수립할 필요성이 있다.

어류 중 넙치, 조피볼락, 강도다리는 기후변화의 위험이 큰 지역이 많으며, 특히 육상수조에서 양식되는 넙치, 강도다리와 달리 조피볼락은 기후변화 적응대책이 보다 시급하게 요구된다. 조피볼락은 생산지역별 위험 정도가 시나리오별로 차이가 나지 않아 양식지역의 대체보다는 기후변화의 영향을 절감할 수 있는 양식방법의 전환이 필요할 것이다. 해상가두리 양식이 주를 이루는 돔류의 경우 주요 생산지인 경상남도, 전라남도에서 향후 생산이 어려울 것으로 전망되어 해상가두리양식에서 육상의 실내양식으로의 전환이 필요할 것이다. 이외에도 대부분 지역에서 양식 가능한 품종으로의 전환(예, 농어, 송어 등)이나 새로운 양식품종의 양성기술 개발이 필요할 것이다. 하나의 예로, 경제적 가치가 높아 다양한 교잡종이 개발되고 있는 바리류는 이미 상업적으로 생산되고 있다(Rimmer and Glamuzina, 2019). 우리나라에서도 고수온에 잘 견디는 교잡바리류 양성기술이 이미 개발되어 교잡바리 양식 확대 및 보급을 위한 추가적인 연구들이 현재 진행 중이다(노충환, 2020; 국립수산과학원, 2022a).

해조류의 전 지구적 분포는 주로 수온에 의해 결정되며(Eggert, 2012), 수온 상승은 해조류의 경계 재배치와 북쪽으로의 이동 등 직접적인 영향을

미칠 수 있다(Stévant et al., 2017). 본 연구에서 해조류는 다른 양식품종들보다 적정 및 한계 수온 상한이 낮아 모든 시나리오 하에서 시기와 관계없이 대부분 생산지역에서 양식이 어려울 것으로 추정되었다. 특히 다시마는 향후 양식생산이 어려울 지역이 가장 많으며, 전복 양식의 먹이로도 사용되므로 대책 마련이 시급하다. 한국농수산식품유통공사에 따르면 김은 최근 수출이 급속도로 성장하여 2021년 약 7억 달러를 달성하였다. 이처럼 해조류는 양식생산에서 가장 많은 생산량을 보이며 산업적인 중요성이 크다. 이에 기후변화 대응을 위해 고수온을 통제할 수 있는 양식어장의 재배치, 고수온 내성 신품종 개발 등이 필요하다. 특히 충청남도가 해조류 양식 생산이 향후 지속 가능할 것으로 평가되어 해조류 양식어장을 이전 및 대규모 해조류 양식어장 조성 등도 장기적인 적응대책으로 고려될 수 있을 것이다.

패류 중 바지락이 상대적으로 많은 지역에서 향후 양식이 어려워질 것으로 평가되었지만, 주요 생산지인 전라북도와 충청남도에서는 SSP5-8.5의 장기를 제외하고는 양식이 가능할 것으로 추정되었다. 전복은 다른 패류 품종보다 초기생활사 시기에 야생환경에서 보내는 시간이 짧아 매우 낮은 민감도 점수를 받았지만, 수온 상한이 패류 품종 중 가장 낮아 생산지역이 기후변화 영향을 크게 받을 것으로 평가되었다. 해만가리비는 수온 상한이 높고 민감도 점수도 다른 패류에 비해 상대적으로 낮아 모든 지역에서 양식이 가능할 것으로 예측되었다. 멍게는 모든 생산지역에서 향후 양식이 어려울 것으로 평가되어 양식품종 전환이나 고수온 내성이 강한 품종 개발이 시급하다. 남해안의 경우 멍게 양식장 수심은 대체 20m 내외로 멍게가 폐사하는 일이 자주 발생하지만, 동해안은 수심이 깊은 해안의 특성을 살려 일반적으로 40-50m 이상의 깊은 수심에서 양식하여 수온변화에 대응하여 양성한다(국립수산과학원, 2021). 지역별 차이 이외에도 멍게의 경우 대체어장 개발이 있는데, 국립수산과학원에서 2016년부터 2017년까지 경상남도 해역의 외해에 양성 시험장을 지정하여 멍게의 양성 시험을 수행한 결과 기존의 내만 양식장보다 2배 높은 생존율을

확인하였다(국립수산물과학원, 2021). 즉, 생산량 안정을 유지하기 위해서는 대체어장과 외해 양식장 개발도 고려할 필요가 있다.

노르웨이, EU, 미국 등에서는 양식업의 첨단화 및 규모화가 진행되고 있다(이동길 외, 2021; 국립수산물과학원, 2022a). 최근 4차 산업의 핵심기술인 사물인터넷, 정보통신기술, 인공지능, 빅데이터 기술을 활용하여 양식장을 관리하는 스마트 양식으로의 전환이 각광받고 있다. 스마트 양식은 기존의 노동집약적인 양식업을 자동화, 지능화하여 효율적이고 친환경생산이 가능하게 한다(유제범, 2019). 현재, 국립수산물과학원에서 2018년부터 해상과 육상 스마트양식 테스트베드를 구축하는 등 연구가 진행되고 있어(국립수산물과학원, 2022a) 기후변화에 대응한 양식업의 발전 가능성이 기대되고 있다.

수온은 양식품종들의 성장에 영향을 미치는 중요한 요인이며(Elliott and Elliott, 2010), 신진대사, 에너지 소비, 산소 요구량 등에도 영향을 미친다(Brett, 1971). 또한, 박테리아와 온도 사이에는 강한 상관관계가 있어 질병 발생과도 연관된다(White et al., 1991). 수온 이외에도 염분, pH, 강수량 등과 같은 다른 abiotic factor들도 양식품종들에 영향을 미친다(Collins et al., 2020). 하지만, 본 연구에서는 양식품종의 생물 특성을 고려하기 위한 자료가 부족하여 가장 보편적인 abiotic factor인 수온만을 고려하여 분석하였다(Little et al., 2020; Stewart et al., 2021).

또한, 양식품종들의 세부지역별 생산량 및 수온 자료 확보가 어려워 행정구역별로 구분하였다. 향후 보다 다양한 자료가 축적되어 세부지역별 다양한 환경요인들을 함께 고려한다면 보다 정확한 양식업의 위험성 평가가 가능할 수 있을 것이다. 이 외에도 민감도 속성의 정의 및 점수 기준을 이전 연구를 기반으로 설정하였으며(Doubleday et al., 2013), 속성별 동일한 가중치를 적용하여 민감도 점수를 평가하였다. 향후에는 우리나라 양식업의 특성을 반영한 민감도 및 영향 속성의 점수 기준과 가중치를 고려해야 할 것이다. 현재 지속가능한 양식업 발전을 위한 양식업 분야

기후변화 대응 정책 수립의 필요성이 크게 증가하고 있다. 본 연구의 결과는 정부의 양식업 분야 기후변화 대책 마련뿐만 아니라 양식어가별 대응 정책 수립에 중요한 기초자료가 될 것으로 기대된다.



## V. 기후변화에 따른 양식업 피해액 추정

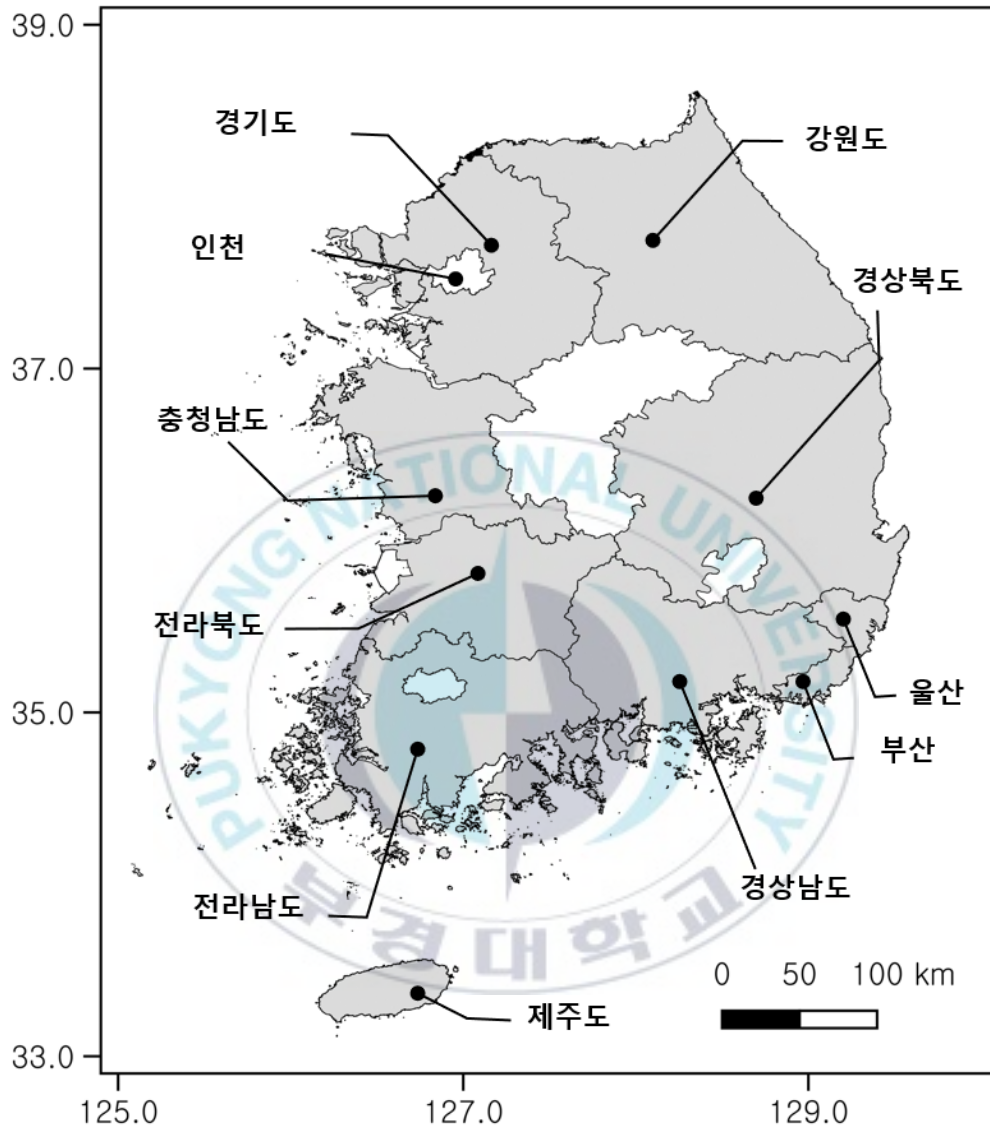
### 1. 분석 자료 및 방법

#### 1.1. 분석 자료

본 연구에서는 우리나라의 주요 양식품종 중 피해액 추정에 필요한 자료가 활용 가능한 15종을 선정하였고, 이들을 양식하는 11개의 행정구역을 대상으로 하였다(그림 V-1, 표 V-1). 이들 분석 대상 15종은 “IV. 기후변화에 따른 양식업 위험성 평가”의 분석 대상 중 육상수조식 양식이 이루어지는 넙치와 가자미를 제외한 것이며, 해면양식업 생산량과 생산금액에서 각 약 84%와 72%를 차지한다(통계청, 2023). 본 연구의 양식품종들은 대부분 해상에서 양식되고 있고, 어류와 전복을 제외하고는 먹이 공급도 자연에 의존하고 있어 기후변화 등 자연환경에 대한 의존성이 큰 품종들이다.

피해액 추정을 위해 분석에 필요한 15종의 적정 및 한계 수온 범위(표 V-2)는 “IV. 기후변화에 따른 양식업 위험성 평가”에서 제시되는 자료와 동일하다. 향후 수온 예측 자료는 기상청 기후정보포털에서 제공되는 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 기후변화 시나리오를 활용하였으며, 시점은 중기인 2050년(2041~2050년 평균)과 장기인 2100년(2091~2100년 평균)으로 설정하고, 양식 생산이 이루어지는 11개의 행정구역별 월별 수온 자료를 활용하였다.

품종별 생산량 및 생산금액은 국가통계포털에서 최근 5개년(2017년~2021년) 자료를 대상으로 하였다(통계청, 2023). 본 연구에서는 명확한 통계 구분이 없는 품종은 해당 품종류(해조류: 다시마류, 김류, 미역류; 패류: 굴류, 전복류, 가리비류; 어류: 송어류, 농어류)의 생산량 및 생산금액 통계를 활용하였다.



[그림 V-1] 분석 대상 15종의 양식생산지역(회색)



<표 V-1> 양식품종별 생산량 및 생산지역(행정구역별)

구분	양식품종	생산량 (thousand ton)	양식생산지역(행정구역별)
어류	조피볼락	21	경상남도, 경상북도, 울산, 전라남도, 제주도, 충청남도
	송어	8	경상남도, 전라남도, 전라북도, 충청남도
	참돔	6	경상남도, 경상북도, 전라남도, 제주도, 충청남도
	농어	1	경상남도, 전라남도, 전라북도, 충청남도
	감성돔	1	경상남도, 경상북도, 전라남도, 전라북도, 제주도, 충청남도
	돌돔	1	경상남도, 경상북도, 전라남도, 전라북도, 제주도, 충청남도
해조류	다시마	628	강원도, 경상남도, 경상북도, 부산, 울산, 인천, 전라남도, 충청남도
	김	556	경기도, 경상남도, 부산, 인천, 전라남도, 전라북도, 충청남도
	미역	547	강원도, 경상남도, 경상북도, 부산, 울산, 인천, 전라남도, 충청남도
패류	굴	310	경상남도, 부산, 전라남도, 충청남도
	지중해담치	62	경상남도, 부산, 전라남도
	전복	20	강원도, 경상남도, 경상북도, 부산, 울산, 전라남도, 제주도, 충청남도
	바지락	19	경상남도, 인천, 전라남도, 전라북도, 충청남도
	해만가리비	5	강원도, 경상남도, 부산, 전라남도
기타수산동물	멍게	28	강원도, 경상남도, 경상북도, 부산, 울산, 전라남도, 제주도

자료: 통계청(2023)

<표 V-2> 양식품종별 적정 및 한계 수온 상한

구분	양식품종	적정수온 (°C)	한계수온 (°C)	참고자료
어류	조피볼락	18	30	국립수산과학원 (2017b)
	송어	27	33	국립수산과학원 (2019a)
	참돔	25	28	국립수산과학원 (2020)
	농어	27	30	강덕영 외(2004)
	감성돔	25	27	국립수산과학원 (2020)
	돌돔	26	29	국립수산과학원 (2020)
	다시마	14	18	국립수산과학원 (2016c; 2022b)
해조류	김	15	20	국립수산과학원 (2018)
	미역	18	20	국립수산과학원 (2016c; 2022b)
	굴	25	30	국립수산과학원 (2016d)
패류	지중해담치	26	34	국립수산과학원 (1964)
	전복	20	28	국립수산과학원 (2019c)
	바지락	23	30	국립수산과학원 (2022c)
	해만가리비	28	31	국립수산과학원 (2019d)
기타수산동물	멍게	16	24	국립수산과학원 (2021)

## 1.2. 양식품종별 기후변화 피해액 추정

양식품종별 기후변화 피해액을 추정하기 위해 기후변화에 따른 피해 확률과 양식품종별 생산금액을 고려하였다. 기후변화에 따라 수온 상승이 예상되므로 피해 확률은 SSP 시나리오별로 예측된 생산지역별 월별 향후 수온과 양식품종별 적정 및 한계 수온 상한(표 V-2)을 비교하여 초과 여부를 통해 추정하였다.

계절적인 수온 변화를 반영하기 위해 월 단위의 예측 수온 값과 양식품종별 적정 및 한계 수온 상한을 비교하였으며, 여기서 적정 수온은 양식품종이 성장하기 좋아 경제성이 우수한 수온을 의미하며, 한계 수온은 생존이 허용 가능한 수온을 의미한다. 따라서, 향후 수온이 적정 수온 상한 내에 있으면 경제성이 영향을 받겠지만, 양식 생산은 지속할 수 있으며, 한계 수온 상한을 벗어나면 폐사가 진행되어 양식 생산이 불가능하다.

본 연구에서는 피해 확률 추정을 위해 점수 기준을 설정하였다. 양식품종의 생산지역별 월별 예측 수온이 양식품종의 적정 수온 상한을 초과하면서 한계 수온 상한 미만일 경우 해당 월에 1점을 부여하였다. 그러나, 한계 수온 상한을 초과하는 월이 하나라도 있는 경우에는 해당 양식품종의 생산 지역에 최고점인 12점을 부여하였다. 이때, 연중 양식하는 어류와 패류는 초과 개월 수가 12개월로 일치하지만, 해조류의 경우 겨울철과 봄에 양식되므로 12개월 기준으로 환산하였다.

이렇게 평가된 양식품종별 생산지역별 점수는 백분율로 전환되어 피해 확률을 나타내며, 추정된 피해 확률에 양식품종들의 5개년 평균 생산금액을 곱하여 생산지역별 피해액을 추정하였다. 최종적으로 모든 생산 지역의 피해액을 합산하여 양식품종별 피해액을 추정하였으며, 식은 아래와 같다(식 1).

$$Damage_s = \sum_a (V_{sa} \times R_{sa}) \quad (1)$$

여기서,  $s$ 는 양식품종,  $a$ 는 생산지역,  $V_{sa}$ 는  $a$  지역에서의  $s$  품종의 5개년 평균 생산금액,  $R_{sa}$ 는  $a$  지역에서의  $s$  품종의 피해 확률, 그리고  $Damage_s$ 는  $s$  품종이 생산되는 모든 지역의 피해액 합이다.



## 2. 분석 결과

### 2.1. 양식품종별 생산지역별 피해 확률

양식품종별로 생산지역별 향후 예측 수온이 다르므로, 같은 양식품종이 생산되더라도 피해 확률에는 차이가 있다. 전반적으로 기후변화를 가장 완화시킨 SSP1-2.6 시나리오에서 기후변화가 가장 심화 되는 SSP5-8.5 시나리오로 갈수록, 시기적으로는 단기(2030년)에서 장기(2100년)로 갈수록 피해 확률은 높아지는 것으로 추정되었다(그림 V-2, 3, 4).

#### 2.1.1. 어류

조피볼락은 적정 수온 상한이 다른 어종보다 낮아 생산량이 가장 많은 경상남도과 더불어 모든 생산지역에서 피해 확률이 나타났으며, 어종 중 피해가 가장 클 것으로 예측되었다(그림 V-2). 특히 전라남도과 제주에서 SSP3-7.0과 SSP5-8.5 시나리오 하에서 장기에는 예측 수온이 한계 수온을 초과하여 양식 생산이 불가능할 것으로 예측된다. 송어는 어류 중 적정 및 한계 수온의 상한이 가장 높아 주요 생산지인 충청남도과 대부분 생산지역에서 시나리오별 그리고 시기별 구분 없이 피해가 거의 없을 것으로 추정되었다. 참돔은 생산지역별로 차이가 있지만, 최대 생산지인 경상남도는 모든 시나리오 하에서 낮은 피해 확률로 예측되지만, 두 번째로 많은 생산지역인 전라남도에서는 SSP2-4.5와 SSP3-7.0 시나리오 하에서 단기를 제외하고 예측 수온이 한계 수온을 초과할 것으로 추정되었다.

농어는 최대 생산지인 경상남도에서의 양식피해 확률이 없으며, 두 번째 생산지인 전라남도에서 SSP3-7.0과 SSP5-8.5 시나리오 하에서 장기적으로 양식 피해 확률이 높을 것으로 전망되었다. 감성돔의 경우 생산량이 가장 많은 경상남도에서는 양식피해 확률이 아주 낮게 추정된 반면, 전라남도과 제주도에서는 수온 상승에 따른 피해 확률이 클 것으로 추정되어 양식생산이

불가능할 것으로 예측되었다. 돌돔의 경우 생산이 가장 많은 전라남도에서 SSP1-2.6 시나리오를 제외한 모든 시나리오 하에서 2100년에는 양식이 불가능할 것으로 예측되었다. 하지만 두 번째 생산지인 경상남도의 피해 확률은 SSP5-8.5의 장기를 제외하고, 양식 생산에 어려움이 없을 것으로 추정된다.



구분	생산지	평균 생산금액 (thousand KRW)	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
			2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
조피볼락	경상남도	85,350,318	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	67%
	경상북도	3,650,242	50%	50%	50%	58%	50%	67%	50%	67%
	울산	13,200	50%	50%	50%	58%	50%	67%	50%	67%
	전라남도	62,797,942	50%	50%	50%	50%	50%	100%	50%	100%
	제주도	499,146	50%	50%	50%	67%	58%	100%	67%	100%
	충청남도	29,621,562	25%	25%	25%	25%	25%	33%	25%	42%
송어	경상남도	49,632,639	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	전라남도	4,705,330	8%	8%	8%	17%	8%	25%	8%	25%
	전라북도	4,629,375	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	충청남도	2,455,543	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
참돔	경상남도	58,442,220	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	17%
	경상북도	899,786	8%	8%	8%	8%	8%	25%	8%	100%
	전라남도	8,396,070	100%	100%	25%	100%	25%	100%	100%	100%
	제주도	228,383	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	충청남도	24,274	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

[그림 V-2] SSP 시나리오별 어류의 생산지역별 피해 확률(평균 생산금액: 5개년 평균(2017~2021년))

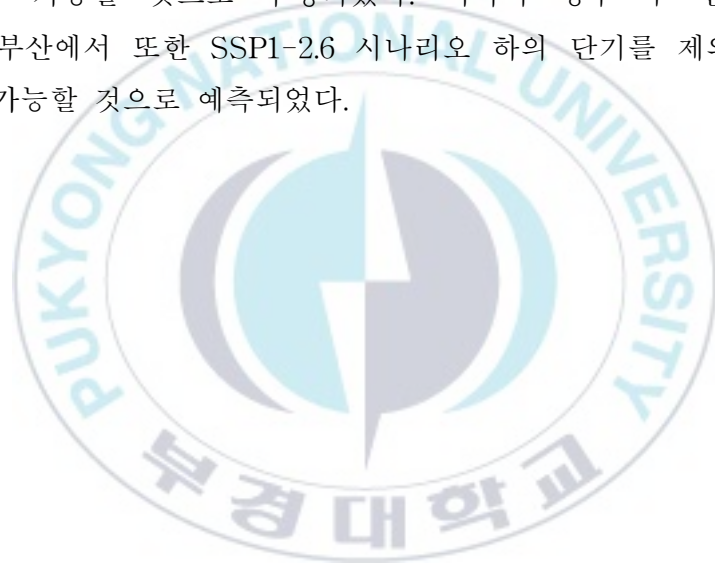
영 어	경상남도	8,647,175	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	전라남도	5,118,802	8%	8%	8%	17%	8%	100%	8%	100%	
	전라북도	14,160	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	충청남도	49,912	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
감성동	경상남도	10,508,413	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	17%	
	경상북도	12,000	8%	8%	8%	8%	8%	100%	8%	100%	
	전라남도	4,800,306	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	전라북도	10,600	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	제주도	3,085	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	충청남도	353,015	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
남 동	경상남도	6,635,651	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%	
	경상북도	98,846	0%	0%	0%	8%	0%	17%	0%	25%	
	전라남도	6,783,281	17%	17%	17%	100%	17%	100%	17%	100%	
	전라북도	706,320	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	제주도	2,894,460	17%	17%	17%	100%	17%	100%	25%	100%	
	충청남도	481,340	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	

[그림 V-2] continued



### 2.1.2. 해조류

해조류는 분석 대상 양식품종 중 적정 및 한계 수온이 가장 낮아 수온 상승에 따른 피해가 가장 클 것으로 추정되었다(그림 V-3). 구체적으로, 다시마는 인천, 충청남도를 제외한 모든 생산지역에서 양식이 불가능할 것으로 예측되었다. 김과 미역의 경우 생산지역별로 차이가 있지만, 최대 생산지인 전라남도에서는 SSP1-2.6 시나리오를 제외한 모든 시나리오 하에서 장기적으로 생산이 불가능할 것으로 예측되었다. 하지만 김의 경우 전라남도 다음으로 생산량이 많은 충청남도와 전라북도에서는 향후에도 양식생산이 가능할 것으로 추정되었다. 미역의 경우 두 번째로 높은 생산지인 부산에서 또한 SSP1-2.6 시나리오 하의 단기를 제외하고 모두 양식이 불가능할 것으로 예측되었다.



구분	생산지	평균 생산금액 (thousand KRW)	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
			2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
다시마	강원도	15,370	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	경상남도	1,021,617	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	경상북도	45,321	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	부산	4,617,744	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	울산	285,704	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	인천	10,808	0%	0%	0%	17%	0%	17%	0%	17%
	전라남도	87,897,095	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	충청남도	913,594	0%	0%	0%	0%	0%	17%	0%	17%
김	경기도	17,979,394	0%	0%	0%	17%	0%	17%	0%	17%
	경상남도	6,809,910	33%	33%	33%	33%	33%	100%	33%	100%
	부산	17,865,066	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	인천	3,274,577	0%	0%	0%	17%	0%	17%	0%	17%
	전라남도	434,637,943	17%	33%	33%	100%	33%	100%	33%	100%
	전라북도	32,950,368	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	17%
	충청남도	33,208,977	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

[그림 V-3] SSP 시나리오별 해조류의 생산지역별 피해 확률(평균 생산금액: 5개년 평균(2017~2021년))

미역	강원도	129,909	17%	17%	17%	100%	17%	100%	17%	100%
	경상남도	2,059,069	17%	17%	17%	17%	17%	100%	17%	100%
	경상북도	521,086	17%	17%	17%	100%	17%	100%	100%	100%
	부산	5,254,054	17%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	울산	1,482,611	17%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	인천	2,244	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	전라남도	122,545,047	17%	17%	17%	100%	17%	100%	17%	100%
	충청남도	1,324,324	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

[그림 V-3] continued

### 2.1.3. 패류 및 기타

패류 중 가장 생산량이 많은 굴의 주요 생산지 경상남도는 모든 시나리오 하에서 수온 상승에 따른 피해 확률이 상대적으로 낮은 것으로 추정되었다(그림 V-4). 구체적으로, 지중해담치의 경우 최대 생산지인 경상남도에서는 모든 시나리오 하에서 양식생산이 가능할 것으로 전망되었다. 전북은 패류 중 적정 및 한계 수온의 상한이 가장 낮아 피해 확률이 가장 높은 것으로 추정되었다. 특히 최대 생산지인 전라남도는 모든 시나리오 하에서 장기적으로 양식이 불가능한 반면, 이외의 생산지역(제주도 제외)에서는 SSP5-8.5 시나리오 하의 장기를 제외하고 양식은 가능할 것으로 추정되었다. 바지락의 경우 주요 생산지인 전라북도는 다른 생산지역과 달리 피해가 상대적으로 적을 것으로 예측되어 양식하기 적합할 것으로 평가되었다. 멍게의 경우 주요 생산지인 경상남도를 포함하여 모든 생산지에서 시나리오 구분 없이 수온 상승에 따른 향후 양식이 불가능할 것으로 전망되었다.

구분	생산지	평균 생산금액 (thousand KRW)	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
			2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
남	경상남도	195,689,390	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	17%
	부산	2,102,625	0%	0%	8%	8%	8%	25%	8%	25%
	전라남도	34,530,983	25%	25%	25%	25%	25%	100%	25%	100%
	충청남도	6,750,651	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
지중해담치	경상남도	18,829,208	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%
	부산	255,840	0%	0%	0%	0%	0%	17%	0%	25%
	전라남도	8,355,252	17%	17%	17%	25%	17%	25%	17%	33%
전북	강원도	33,349	33%	33%	33%	50%	33%	50%	42%	100%
	경상남도	2,263,501	33%	33%	33%	33%	33%	50%	33%	50%
	경상북도	258,814	33%	42%	33%	50%	42%	50%	50%	100%
	부산	47,744	42%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	100%
	울산	1,294,449	42%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	100%
	전라남도	608,925,570	100%	100%	42%	100%	42%	100%	100%	100%
	제주도	2,187,433	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	충청남도	1,177,796	8%	17%	8%	25%	8%	25%	8%	25%

[그림 V-4] SSP 시나리오별 패류 및 멍게의 생산지역별 피해 확률(평균 생산금액: 5개년 평균(2017~2021년))

바지락	경상남도	618,406	8%	8%	8%	17%	8%	25%	8%	33%
	인천	185,639	8%	8%	8%	25%	8%	25%	8%	25%
	전라남도	5,147	25%	25%	25%	33%	33%	100%	33%	100%
	전라북도	38,446,713	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	17%
	충청남도	10,818,905	0%	0%	0%	0%	0%	8%	0%	8%
해만가리비	강원도	1,853,299	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%
	경상남도	17,095,591	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	부산	851	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	8%
	전라남도	722,054	8%	8%	0%	8%	0%	17%	8%	100%
멍게	강원도	8,167,116	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	경상남도	51,099,930	58%	67%	58%	100%	67%	100%	67%	100%
	경상북도	4,148,272	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	부산	7,980	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	울산	28,000	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	전라남도	225,499	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	제주도	16,000	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

[그림 V-4] continued

## 2.2. 양식품종별 피해액

양식품종별 피해액은 SSP1-2.6 시나리오 하에서 가장 적고, SSP5-8.5 시나리오 하에서 가장 크며, 단기보다는 장기로 갈수록 커지는 것으로 추정되었다(표 V-3). 모든 시나리오 하에서 가장 높은 피해액을 보인 품종은 전복인 반면, 이며, 가장 낮은 피해액을 보인 품종은 해만가리비였다. 전복은 서식 및 한계 수온 상한이 패류 중 가장 낮아 수온 상승에 따른 피해가 가장 큰 것으로 추정되었으며, 이와 더불어 생산량은 적지만 양식품종 중 단가가 가장 높아 양식품종별 피해액이 가장 컸다. 피해액 비율을 살펴보면, 42%의 비율을 보인 SSP2-4.5와 SSP3-7.0 시나리오 하에서 단기를 제외하고는 모든 시나리오 하에서의 피해액 비율이 99.4% 이상이었다. 이와 달리 해만가리비는 수온 상승에 따른 피해 확률이 낮고, 생산량과 단가가 낮아 피해액이 가장 적은 것으로 추정되었다. 어류 중 조피볼락은 주요 생산지인 경상남도과 전라남도에서 피해 확률이 높아 피해액이 가장 컸으며, 피해액 비율 범위는 약 46~74% 수준이었다. 해조류 중 김은 다시마보다 피해 확률은 낮았지만, 생산단가가 높아 피해액이 가장 컸으며, 피해액 비율 범위는 약 15~86% 수준으로 추정되었다. 명계의 경우 거의 모든 시나리오 하에서 장기적인 피해 확률이 높았지만, 생산량 및 생산단가가 다른 품종에 비해 낮아 피해액이 적었으며, 피해액 비율 범위는 약 67~100% 수준으로 예측되었다.

<표 V-3> 양식품종별 5개년 평균(2017~2021년) 생산량 및 생산금액과 SSP 시나리오별 피해액(million KRW)

양식품종	생산량 (thousand ton)	생산금액 (million KRW)	Unit price (KRW/kg)	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5	
				2050	2100	2050	2100	2050	2100	2050	2100
조피볼락	21	181,932	8,663	83,560	83,560	83,560	83,949	83,602	118,288	83,644	134,981
송어	8	61,422	7,678	392	392	392	784	392	1,176	392	1,176
참돔	6	67,990	11,332	8,699	8,699	2,402	8,699	2,402	13,719	8,699	19,264
농어	1	13,830	13,830	426	426	426	853	426	5,118	426	5,118
감성돔	1	15,687	15,687	4,804	4,804	4,804	4,804	4,804	5,691	4,804	6,566
돌돔	1	17,599	17,599	1,612	1,612	1,612	9,685	1,612	9,694	1,854	10,255
다시마	628	94,807	151	93,882	93,882	93,882	93,884	93,882	94,036	93,882	94,036
김	556	546,726	983	83,642	165,014	165,014	458,315	165,014	462,855	165,014	468,346
미역	547	133,318	244	21,998	27,612	27,612	130,275	27,612	131,991	28,046	131,991
굴	310	239,073	771	8,632	8,632	8,807	8,807	8,807	51,364	8,807	67,671
지중해담치	62	27,440	443	1,392	1,392	1,392	2,088	1,392	2,131	1,392	4,418
전복	20	616,188	30,809	612,622	612,853	257,527	612,979	257,549	613,356	612,780	614,173
바지락	19	50,074	2,635	68	68	68	151	68	4,311	68	7,567
해만가리비	5	19,671	3,934	60	60	0	60	0	120	60	876
명계	28	63,692	2,275	42,401	46,659	42,401	63,692	46,659	63,692	46,659	63,692



### 3. 논의

본 연구에서는 양식품종들의 생산지역별 향후 수온 상승에 따른 피해 확률과 생산금액을 이용하여 기후변화에 따른 양식어업의 피해액을 추정하였다. 특히, 4개의 시나리오 중 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정된 SSP5-8.5 시나리오에서, 시점으로는 중기(2050년)보다 장기(2100년)에서 양식품종들의 피해액이 높았다. 이는 기후변화가 심화 되고 장기적으로 갈수록 향후 예측 수온이 양식품종들이 성장하기 좋은 적정 수온을 넘는 빈도가 증가하거나, 한계 수온 상한을 초과함으로써 피해 확률이 최대가 되어 양식이 불가능한 지역이 많아짐을 의미한다. 따라서 양식어업의 기후변화 대응을 위해서는 시기별로 적절한 적응대책 수립이 필요하다.

양식품종들은 다양한 생산지에서 양식되고 있으며, 생산지역에 따라 기후변화에 따른 피해 확률이 다르게 추정되었다. 대부분 어류와 패류는 주요 생산지에서 수온 상승에 따른 피해가 일부 있을 것으로 추정되었으나, 양식 생산은 가능할 것으로 예측되었다. 그러나 이와 반대로, 적정 및 한계 수온 상한이 다른 품종들보다 상대적으로 낮아 피해 확률이 높게 추정된 해조류와 멍게는 대부분 생산지역에서 폐사가 진행되어 향후에는 양식 생산에 상당한 어려움을 겪을 것으로 평가되므로 관리를 위한 정책을 수립할 때 다른 양식품종보다 우선적으로 관리할 필요가 있다.

본 연구에서는 해조류의 경우 피해 확률이 낮은 충청남도가 대안적인 양식생산지로 고려될 수 있지만, 수온 이외의 다른 해양환경 조건(염분, 조도 등), 인프라, 지원 시설 등도 중요한 결정 요인이므로 수온만으로 대안 생산지로 결정하는 것은 한계가 있다. 현재 해조류는 고수온 내성이 강한 품종 개발이 진행되고 있으며(국립수산과학원, 2022a), 멍게는 동해안의 경우 동해안은 수심이 깊은 해안의 특성을 살려 일반적으로 40~50m 이상의 깊은 수심에서 양식하여 수온 변화에 대응하여 양성하고 있으며(국립수산과학원, 2021), 외해양식으로의 대체어장 개발이 진행되고 있다(국립수산과학원, 2021).

양식품종 중 송어, 농어, 지중해담치, 바지락, 해만가리비는 적정 및 한계 수온의 상한이 상대적으로 높아 향후 수온이 상승하더라도 큰 영향을 받지 않아 대부분의 생산지에서 지속적인 양식이 가능한 품종이다. 따라서 향후 양식품종별 생산이 불가능한 지역에서 품종 전환을 고려한다면 수온에 상대적으로 내성이 강한 이 품종들이 향후 양식 생산이 불가능할 것으로 판단되는 지역들의 대체 양식품종으로 기대할 수 있다.

전복은 모든 시나리오에서의 기후변화에 따른 피해액에서 가장 높은 순위를 차지하여 우선적 관리가 필요한 품종이다. 전복은 주요 생산지를 포함하여 대부분 생산지에서의 피해 확률이 높고, 단가가 다른 품종들에 비해 월등하게 높았다(해조류에서 단가가 가장 높은 김의 약 30배). 따라서, 양식품종들의 기후변화 대응을 위한 우선순위를 선정할 때는 대응을 위한 품종별 우선순위를 선정할 때, 수온 변화에 따른 수온 변화에 따른 피해 확률과 더불어 품종별 단가도 함께 고려되어야 한다. 또한, 다시마와 미역은 전복의 먹이로 사용되어 그 영향이 다른 품종에도 파급되므로, 이러한 영향을 종합적으로 고려한 기후변화 대응 대책이 필요하다.

본 연구에서는 수온만을 고려하여 양식품종들의 피해 확률을 분석하였지만, 수온 이외에도 다양한 기후변화 요인(염분, pH, 강수량 등)들은 양식어류의 성장, 번식, 및 행동에 영향을 미친다(Elliott and Elliott, 2010; Brander et al., 2017; Collins et al., 2020). 따라서, 추후에는 다양한 기후변화 요인 자료가 확보된다면 보다 정확한 피해액 추정이 가능할 것이다. 이와 더불어 생산금액의 변동성, 특정 연도의 생산금액 변화, 양식면적의 변화 등을 고려한다면 보다 정확한 양식업의 피해액 추정이 가능할 것이다.

기후변화는 미래 양식업에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상되며 지속적인 양식 생산을 위해 기후변화 대응 방안과 정책 수립의 필요성이 증가하고 있다(FAO, 2021). 우리나라에서도 기후변화로 인한 양식 어·패류의 피해가 발생하고 피해 규모도 확대되고 있어 고수온 발생에

대한 적극적 대응을 위해 2017년부터 고수온 특보 발령 제도를 마련하였고, “폭염(고수온) 위기대응 실무매뉴얼” 등을 수립하였다(이준수 외, 2022). 또한, 지속가능한 양식생산을 위한 제도 도입 기반 구축을 위해 적극적으로 노력하고 있다(해양수산부, 2022). 따라서 본 연구의 결과는 양식 어장의 지속 가능한 이용을 위한 국가 및 지자체별 기후변화 대응 대책 마련에 도움이 될 것으로 기대된다.



## VI. 요약 및 결론

### 1) 연구요약

본 연구는 기후변화에 따른 우리나라 수산분야의 취약성 및 위험성을 평가하였다. 어업에서는 IPCC AR5에서 채택된 RCP 8.5 시나리오 하에서의 수온 상승에 따른 어종별 취약성을 평가하고, 이 결과를 바탕으로 업종별 어종별 평균 어획 비율 기반 연근해어업의 업종별 취약성이 평가되었다. 분석 대상 어종은 36종, 업종은 24개(근해: 17개, 연안: 7개)이었으며, 최근 5개년 평균 생산량(2017~2021년)이 고려되었다. 어종별 취약성 평가는 적응능력이 포함된 민감도와 노출을 주된 2개의 구성요소로 조합하여 평가되었다.

민감도는 종의 생물학적 및 생태학적 속성으로 구성되며, 노출은 종에 영향을 줄 수 있는 기후 요인인 향후 수온과 어종별 산란 및 서식 수온과의 관계가 속성으로 선정되었다. 이 속성들은 속성별 기준에 따라 3단계 점수로 평가되었다. 어종별 취약성 점수 결과를 바탕으로 최종적으로 업종별 취약성이 평가되었다. 어종별 취약성 평가 결과, 참가자미가 가장 높은 점수, 말쥐치가 가장 낮은 점수를 나타냈으며, 우리나라 연근해어업 평균 생산량(2017~2021년)의 약 50% 이상을 차지하는 5종(멸치, 고등어, 살오징어, 갈치, 전갱이) 모두 평균 점수보다 낮게 분석되었다.

업종별 평가 결과, 근해어업이 연안어업보다 취약성 평가 점수가 상대적으로 높게 평가되었다. 민감도와 노출 속성에서 높은 점수를 받은 어종은 최종적으로 높은 취약성 종으로 평가되었으며, 이러한 어종의 어획 비율이 높은 업종들이 높은 취약성 업종으로 평가되었다. 따라서 상대적으로 취약성이 높은 어종들의 어획 비율이 높은 업종을 연근해 어업 관리 정책 수립 시 우선적으로 관리할 필요가 있다.

양식업에서는 IPCC AR6에서 채택된 SSP 시나리오 하에서의 수온 상승에 따른 양식품종별 생산지역별 위험성을 평가하고 이와 더불어 양식품종별 피해액을 추정하였다.

위험성 평가는 민감도와 영향을 주된 2개의 구성요소로 조합하여 평가되었으며, 분석 대상 품종은 17종, 이들을 양식하는 11개 행정구역을 대상으로 하였다. 민감도는 모든 기본 양식 및 생활사 단계를 포함한 속성들로, 영향은 기후변화가 미치는 영향의 정도를 평가하기 위해 SSP 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5) 하에서의 단기(2030년)와 장기(2100년)로 구분된 예측 수온과 양식품종별 적정 및 한계 수온 상한과의 관계를 속성으로 구성되었다. 속성들은 속성별 기준에 따라 3개의 점수로 평가되었으며, 위험성 점수는 TLS의 3가지 기준으로 재평가되어 양식품종별 기후변화에 따른 지역별 양식 가능성이 평가되었다.

양식품종별 위험성 평가 결과, 해조류와 멍게가 기후변화에 가장 위험할 것으로 평가되었다. TLS 기법을 적용하여 양식품종별 적합한 생산지역을 평가한 결과, 모든 품종이 SSP2-4.5 시나리오보다 SSP5-8.5 시나리오 하에서 그리고 단기보다 장기에서 위험이 큰 지역이 많은 것으로 예측되었다. 특히 해조류와 멍게는 대부분 생산지역에서 향후 양식이 불가능할 것으로 분석되었다. 따라서 기후변화 위험이 상대적으로 클 것으로 평가된 양식품종과 향후 양식이 불가능할 것으로 판단되는 생산지역들을 다양한 대안들(양식어장 재배치, 고수온 내성 신품종 개발, 양식품종 전환 등)로 우선적으로 관리할 필요가 있다.

양식업의 피해액은 수온 상승에 따른 양식품종별 생산지역별 피해 확률과 생산금액의 곱으로 추정하였다. 분석 대상 품종은 15종, 이들을 양식하는 11개 행정구역을 대상으로 하였다. 피해 확률은 SSP 시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)하에서의 중기(2050년)와 장기(2100년)로 구분된 예측 수온과 양식품종별 적정 및 한계 수온을 비교하여 초과 여부에 따라 점수를 부여한 후, 이를 백분율로 재환산하여 추정하였다. 추정된 피해 확률에 양식품종들의 5개년 평균 생산금액을

곱하여 양식품종들의 피해액이 최종적으로 산정되었다.

피해 확률 결과, 시나리오별로는 기후변화를 가장 완화 시킨 SSP1-2.6 시나리오에서 기후변화가 더 심화 되는 SSP5-8.5 시나리오로 갈수록, 시기별로는 중기에서 장기로 갈수록 피해 확률이 높아졌다. 다시마와 멩게는 대부분 생산지역에서 시나리오별 구분 없이 피해 확률이 매우 높아 수온 상승에 따른 피해가 가장 클 것으로 추정되었다. 피해 확률에 5개년 평균 생산금액을 조합하여 피해액을 추정한 결과, 모든 시나리오에서 가장 높은 피해액을 보인 품종은 전복이며, 가장 낮은 피해액은 해만가리비였다. 전복은 주요 생산지에서의 수온 상승에 따른 피해 확률이 높았으며, 해조류와 비교하여 생산량은 적지만 양식품종 중 단가(1톤당 생산가격, Unit price)가 가장 높아 피해액이 가장 큰 것으로 추정되었다. 이처럼 기후변화는 양식품종별 생산량에 지속적으로 영향을 미쳐 경제적 피해는 증가할 것으로 전망되므로, 양식품종별 시기별 적응대책이 필요하다. 또한, 우선적 관리가 필요한 품종 및 지역을 선정할 때 기후변화에 따른 피해 확률뿐만 아니라 양식품종의 단가 등도 고려되어야 한다.

## 2) 연구의 기대효과

온실가스 감축과 기후변화 적응 기술의 연구기반을 조성해 체계적으로 발전시키기 위해 2021년 10월에 [기후변화대응 기술개발 촉진법]이 의결되었다(법제처, 2023). 해양수산부에서는 [제4차 기후변화대응 해양수산부문 종합계획]을 수립하여 수산업의 기후위기 대응을 위해 기초조사를 강화, 해양생태계의 영향 분석 및 예측체계 마련, 제도 신설 및 개선 등이 필요함을 시사하고 있다(해양수산부, 2022). 그러나, 구체적인 세부 계획은 현재 미비한 실정이다. 따라서, 본 연구의 결과는 기후변화에 대응하여 효과적인 어업 및 양식업 관리를 위한 정책과 전략 수립에 활용될 수 있는 중요한 기초자료로 기대된다.

현재 우리나라는 연근해 수산자원의 관리를 위해 TAC 기반의 자원관리형 어업 구조를 구축해 나가고 있다(해양수산부, 2019). 이외에도 대부분 어종은 포획금지체장 및 포획금지기간 등으로, 어업은 허가정수제, 허가제도 라이선스 등으로 관리되고 있다. 이러한 제도는 어업인들의 수용도, 경제적인 손해, 과학적인 자원평가 결과 등을 바탕으로 진행되고 있으나, 기후변화에 따라 취약한 어종 및 업종에 관한 관리제도는 없는 실정이다. 따라서 본 연구의 기후변화에 따른 어종별 및 업종별 취약성 평가 결과는 향후 수산자원 및 어업관리 제도 설립에 활용성과 유용성이 클 것으로 보인다.

양식업은 기후위기 대응을 위해 고수온에 내성이 강한 양식품종 육종과 스마트양식으로의 전환 등을 포함한 기술개발이 제시되어있다(해양수산부, 2022). 이러한 기후위기 대응을 위해서는 우선적으로 관리가 필요한 양식품종 및 양식생산지역이 식별하고, 이를 바탕으로 기술개발이 이루어져야 한다. 하지만, 이와 관련된 연구는 현재 부족한 실정이다. 따라서 본 연구의 결과는 정부의 양식업 분야 기후변화 대책 마련뿐만 아니라 양식어가별, 지자체별 기후변화대응 정책 수립 및 대책 마련에 중요한 기초자료가 될 것으로 기대된다.

### 3) 본 연구의 한계점

본 연구는 방법론과 자료 부분에서 한계점을 가진다. 먼저, 방법론에서의 한계점은 취약성 및 위험성 평가를 위한 속성들이 선행연구에서 사용된 정의 및 점수 기준을 기반으로 하여 우리나라 어업 및 양식업의 특성을 충분히 반영하지 못했다는 점이다. 특히, 어업의 민감도 속성의 경우에는 선행연구에서의 어종들의 생물학적 및 생태학적 특징을 반영한 점수 기준을 수정하지 않고 사용하였다. 나라별 생물 다양성은 차이가 있으므로 선행연구의 속성별 점수 기준을 수정이나 보완없이 사용할 경우 평가 결과의 정확성 및 신뢰성에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 추후 연구에서는 우리나라 수산자원의 특성을 반영한 점수 기준을 수립하여 평가가 수행되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서 제시하였듯이 양식업의 피해액 추정을 위해 생산금액이 고정적이라는 가정하에 양식품종별 최근 5개년 평균 생산금액을 사용하였다. 이로 인해 생산금액의 변동성과 특정 연도의 생산금액 변화를 고려하지 못하였다. 따라서 향후에는 양식품종별 생산지역별 생산금액 변화를 고려하여 예측 모델을 구축하여 더 정확한 피해액 추정을 수행이 필요할 것으로 판단된다. 이러한 보완을 통해 양식업의 피해액 추정에 대한 평가의 정확성과 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

최근, 기후변화에 대한 효과적인 관리와 정책 개발을 위해 사회적 요소와 생태적인 요소 간의 연관된 취약성 평가의 중요성이 증가하고 있다(FAO, 2021). 이에 많은 선행연구에서는 생태학적인 취약성(ecological vulnerability)과 사회적인 취약성(social vulnerability)을 동시에 평가하기 위한 통합적인 프레임워크를 시도하고 있다(Hobday et al., 2016; Ruiz-Díaz et al., 2020; Koehn et al., 2022). 따라서, 추후에는 본 연구에서 수행한 생태학적인 취약성 평가에 사회경제적인 요소를 추가한 social-ecological vulnerability 연구가 필요하며, 이는 보다 종합적인 기후변화 관리정책 수립에 큰 가치와 유용성을 가질 것으로 예상된다.



분석 자료에서 가지는 한계점으로는 평가에 활용 가능한 데이터의 부족으로 인해 제한된 환경요인과 수온과 관련된 종의 속성만을 고려한 점이다. 기후변화는 수온 이외에도 염분, 해양산성화, 강수량 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으며, 해양 생물 종은 이러한 요인들에 대한 영향이 종마다 다르게 반응할 수 있다는 것이 알려져 있다(Hare et al., 2016; Koenigstein et al., 2016). 그러나 본 연구에서는 종의 생태학적 특성과 직접적 비교가 가능한 향후 예측 수온만을 고려하여 취약성 평가를 수행하였다. 그러므로 향후에는 다양한 기후변화 속성들의 정밀한 자료가 구축되고, 어종별 주요 영향 요인을 고려한다면 더 정확한 취약성 및 위험성 평가 결과를 확보할 수 있을 것이다.

어장환경이 제한된 양식pond과 달리 어업 대상 종들은 각각 다른 산란/서식 깊이 및 장소 등을 가지므로 어종의 기후변화에 대한 적응력은 생애주기에 따라 달라질 수 있다. 그러나 본 연구에서는 종의 생태학적 정보와 관련된 자료의 한계로 향후 수온을 종별 생애주기를 고려하지 않고 우리나라 전체 해역에 해당하는 표층 수온으로 일관되게 사용하였다. 따라서 추후에는 어종별 산란/서식 깊이 및 장소 등을 고려한 향후 수온을 선정하여 어종별 취약성 평가 수행한다면 더 정확한 평가 결과를 확보할 수 있을 것이다.

우리나라 어업은 '복수어종-복수어업(multi-species and multi-fisheries)'의 특징이 강하게 나타나므로 한 업종은 다수의 어종을 어획한다. 그러나 평가에 활용 가능한 어종들의 정보 제한으로 인해 업종별 취약성 평가에서 우리나라의 모든 어종을 고려하지 못하였다. 본 연구의 업종별 평균 어획 대상 어종은 25종으로 분석되지만, 평가 대상인 36종 이외에도 업종별로 다수의 어종을 어획하므로 업종별로 본 연구대상 어종들의 어획 비율의 평균은 약 41%에 불과했다. 즉, 본 연구의 대상 어종들은 업종별로 어획되는 다양한 어종 중 일부에 해당한다. 따라서 추후에는 보다 포괄적인 어종을 고려한 업종별 취약성 평가를 위해 더 많은 어종의 생태학적 정보를 수집하여 활용이 필요하다. 이를 통해 우리나라 어업의

특성을 보다 정확하게 반영하여 업종별 취약성 평가 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 양식업에서 기후변화에 따른 위험성 평가 및 피해액 추정을 위해 기상청에서 제공되는 향후 수온 자료(SSP 시나리오)를 활용하였다. 제공된 예측 수온 자료는 4개의 대해구에 해당하는 연도별 월별 평균 표층 수온 자료였으므로 양식품종들의 세부지역별 피해 확률 추정이 불가능하였다. 따라서 행정구역별 피해 확률을 추정하였다. 향후 세부지역별 일별 향후 수온 자료가 확보된다면 보다 정밀한 양적 피해 확률 추정이 가능할 것이며, 이를 바탕으로 더 정확한 기후변화에 따른 양식품종들의 피해액을 추정할 수 있을 것이다.



## 참고 문헌

### [국외 문헌]

- Agardy, T. (2000). Effects of fisheries on marine ecosystems: a conservationist's perspective. *ICES Journal of Marine Science*, 57(3), 761-765. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0721>.
- Ahmed, N., Thompson, S., & Glaser, M. (2019). Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environmental management*, 63, 159-172.
- Allison, E. H., Perry, A. L., Badjeck, M. C., Neil Adger, W., Brown, K., Conway, D., ... & Dulvy, N. K. (2009). Vulnerability of national economies to the impacts of climate change on fisheries. *Fish and fisheries*, 10(2), 173-196.
- Asch, R. G. (2015). Climate change and decadal shifts in the phenology of larval fishes in the California Current ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(30), E4065-E4074. <https://doi.org/10.1073/pnas.1421946112>.
- Battaglione, S. C., Hobday, A., Carter, C., Lyne, V., & Nowak, B. F. (2008). Scoping study into adaptation of the Tasmanian salmonid aquaculture industry to potential impacts of climate change.
- Brett, J. R. (1971). Energetic responses of salmon to temperature. A study of some thermal relations in the physiology and freshwater ecology of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*). *American zoologist*, 11(1), 99-113.
- Brierley, A. S., & Kingsford, M. J. (2009). Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Current biology*, 19(14),

- R602-R614. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.05.046>.
- Brander, K. M. (2007). Global fish production and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19709-19714. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702059104>.
- Brander, K., Cochrane, K., Barange, M., & Soto, D. (2017). Climate change implications for fisheries and aquaculture. *Climate change impacts on fisheries and aquaculture: A global analysis*, 1, 45-62.
- Brown, C. J., Fulton, E. A., Hobday, A. J., Matear, R. J., Possingham, H. P., Bulman, C., ... & Richardson, A. J. (2010). Effects of climate-driven primary production change on marine food webs: implications for fisheries and conservation. *Global Change Biology*, 16(4), 1194-1212. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02046.x>.
- Bueno-Pardo, J., Nobre, D., Monteiro, J. N., Sousa, P. M., Costa, E. F., Baptista, V., ... & Leitao, F. (2021). Climate change vulnerability assessment of the main marine commercial fish and invertebrates of Portugal. *Scientific reports*, 11(1), 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82595-5>.
- Ceriola, L., Accadia, P., Mannini, P., Massa, F., Milone, N., & Ungaro, N. (2008). A bio-economic indicators suite for the appraisal of the demersal trawl fishery in the Southern Adriatic Sea (Central Mediterranean). *Fisheries Research*, 92(2-3), 255-267.
- Chung, S., Suzaki, H., Kasai, A., & Nakata, H. (2015). The response of fish communities to climate and human-induced changes inferred from fishery landings in an enclosed bay. *Estuaries and coasts*, 38(4), 1365-1375. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9884-4>.
- Cheung, W. W., Lam, V. W., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R., & Pauly, D. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under

- climate change scenarios. *Fish and fisheries*, 10(3), 235-251.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2008.00315.x>.
- Cinner, J. E., Huchery, C., Darling, E. S., Humphries, A. T., Graham, N. A., Hicks, C. C., ... & McClanahan, T. R. (2013). Evaluating social and ecological vulnerability of coral reef fisheries to climate change. *PloS one*, 8(9), e74321.
- Collins, C., Bresnan, E., Brown, L., Falconer, L., Guilder, J., Jones, L., ... & Stanley, M. (2020). Impacts of climate change on aquaculture.
- Conner, A. J., Glare, T. R., & Nap, J. P. (2003). The release of genetically modified crops into the environment: Part II. Overview of ecological risk assessment. *The Plant Journal*, 33(1), 19-46. <https://doi.org/10.1046/j.0960-7412.2002.001607.x>.
- Dahlke, F. T., Wohlrab, S., Butzin, M., & Portner, H. O. (2020). Thermal bottlenecks in the life cycle define climate vulnerability of fish. *Science*, 369(6499), 65-70. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaz3658>.
- Doubleday, Z. A., Clarke, S. M., Li, X., Pecl, G. T., Ward, T. M., Battaglene, S., ... & Stoklosa, R. (2013). Assessing the risk of climate change to aquaculture: a case study from south-east Australia. *Aquaculture Environment Interactions*, 3(2), 163-175.
- Dulvy, N. K., Sadovy, Y., & Reynolds, J. D. (2003). Extinction vulnerability in marine populations. *Fish and fisheries*, 4(1), 25-64.  
<https://doi.org/10.1046/j.1467-2979.2003.00105.x>.
- Durant, J. M., Hjermann, D. Ø., Ottersen, G., & Stenseth, N. C. (2007). Climate and the match or mismatch between predator requirements and resource availability. *Climate research*, 33(3), 271-283.  
<http://doi.org/10.3354/cr033271>.
- Edwards, M., & Richardson, A. J. (2004). Impact of climate change on

- marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 430(7002), 881-884. <https://doi.org/10.1038/nature02808>.
- Eggert, A. (2012). Seaweed responses to temperature. *Seaweed biology: Novel insights into ecophysiology, ecology and utilization*, 47-66.
- Elliott, J., & Elliott, J. A. (2010). Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change. *Journal of fish biology*, 77(8), 1793-1817.
- FAO (2015) Assessing climate change vulnerability in fisheries and aquaculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 86 p
- FAO. (2020). The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action. Rome.
- FAO. (2021). Adaptive management of fisheries in response to climate change. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No.667, FAO, 285pp
- Fogarty, H. E., Burrows, M. T., Pecl, G. T., Robinson, L. M., & Poloczanska, E. S. (2017). Are fish outside their usual ranges early indicators of climate-driven range shifts?. *Global Change Biology*, 23(5), 2047-2057. <https://doi.org/10.1111/gcb.13635>.
- Galappaththi, E. K., Ichien, S. T., Hyman, A. A., Aubrac, C. J., & Ford, J. D. (2020). Climate change adaptation in aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 12(4), 2160-2176.
- García, V. B., Lucifora, L. O., & Myers, R. A. (2008). The importance of habitat and life history to extinction risk in sharks, skates, rays and chimaeras. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*,

275(1630), 83–89. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1295>

- Glick, P., Stein, B. A., & Edelson, N. A. (2011). Scanning the conservation horizon: a guide to climate change vulnerability assessment. Washington, DC: National Wildlife Federation. 168 p.
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., ... & Watson, R. (2008). A global map of human impact on marine ecosystems. *science*, 319(5865), 948–952. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1149345>.
- Han, I. S., & Lee, J. S. (2020). Change the annual amplitude of sea surface temperature due to climate change in a recent decade around the Korean Peninsula. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 26(3), 233–241.
- Handisyde, N. T., Ross, L. G., Badjeck, M. C., & Allison, E. H. (2006). The effects of climate change on world aquaculture: a global perspective. Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture. Final Technical Report, DFID, Stirling. 151pp.
- Hare, J. A., Morrison, W. E., Nelson, M. W., Stachura, M. M., Teeters, E. J., Griffis, R. B., ... & Griswold, C. A. (2016). A vulnerability assessment of fish and invertebrates to climate change on the Northeast US Continental Shelf. *PloS one*, 11(2), e0146756. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146756>.
- Hobday, A. J., Smith, A., Stobutzki, I. C., Bulman, C., Daley, R., Dambacher, J. M., ... Zhou, S. (2011). Ecological risk assessment for the effects of fishing. *Fisheries Research*, 108, 372–384. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2011.01.013>.

- Hobday, A. J., Cochrane, K., Downey-Breedt, N., Howard, J., Aswani, S., Byfield, V., ... & van Putten, E. I. (2016). Planning adaptation to climate change in fast-warming marine regions with seafood-dependent coastal communities. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 26, 249-264.
- Holsman, K., Samhouri, J., Cook, G., Hazen, E., Olsen, E., Dillard, M., ... & Andrews, K. (2017). An ecosystem-based approach to marine risk assessment. *Ecosystem Health and Sustainability*, 3(1), e01256.
- IPCC (2001) Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 1032 p
- IPCC. (2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Summary for Policymakers, 1-44.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844
- Kaustuv, R., Jablonski, D., & Valentine, J. W. (2001). Climate change, species range limits and body size in marine bivalves. *Ecology letters*, 4(4), 366-370. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2001.00236.x>.
- Kim, B. T., Brown, C. L., & Kim, D. H. (2019). Assessment on the vulnerability of Korean aquaculture to climate change. *Marine*



Policy, 99, 111-122.

- Kim, B. T., Han, I. S., Lee, J. S., & Kim, D. H. (2021). Impact of seawater temperature on Korean aquaculture under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Aquaculture*, 542, 736893.
- Kim, M. J., Han, I. S., Lee, J. S., & Kim, D. H. (2022). Determination of the vulnerability of Korean fish stocks using productivity and susceptibility indices. *Ocean & Coastal Management*, 227, 106287.
- Kim, S., Zhang, C. I., Kim, J. Y., Oh, J. H., Kang, S., & Lee, J. B. (2007). Climate variability and its effects on major fisheries in Korea. *Ocean Science Journal*, 42, 179-192.
- Koehn, L. E., Nelson, L. K., Samhouri, J. F., Norman, K. C., Jacox, M. G., Cullen, A. C., ... & Levin, P. S. (2022). Social-ecological vulnerability of fishing communities to climate change: A US West Coast case study. *Plos one*, 17(8), e0272120.
- Koenigstein, S., Mark, F. C., Gößling-Reisemann, S., Reuter, H., & Poertner, H. O. (2016). Modelling climate change impacts on marine fish populations: process-based integration of ocean warming, acidification and other environmental drivers. *Fish and Fisheries*, 17(4), 972-1004. <https://doi.org/10.1111/faf.12155>.
- Koelmans, A. A., Redondo-Hasselerharm, P. E., Nor, N. H. M., de Ruijter, V. N., Mintenig, S. M., & Kooi, M. (2022). Risk assessment of microplastic particles. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 138-152. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00411-y>
- Little, A. G., Loughland, I., & Seebacher, F. (2020). What do warming waters mean for fish physiology and fisheries?. *Journal of Fish Biology*, 97(2), 328-340. <https://doi.org/10.1111/jfb.14402>.

- Morrison, W. E., Nelson, M. W., Howard, J. F., Teeters, E. J., Hare, J. A., Griffis, R. B., ... & Alexander, M. A. (2015). Methodology for assessing the vulnerability of marine fish and shellfish species to a changing climate.
- Pacifici, M., Foden, W. B., Visconti, P., Watson, J. E., Butchart, S. H., Kovacs, K. M., ... & Rondinini, C. (2015). Assessing species vulnerability to climate change. *Nature climate change*, 5(3), 215-224. <https://doi.org/10.1038/nclimate2448>.
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37-42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>.
- Pecl, G., Ward, T., Doubleday, Z., Clarke, S., Day, J., Dixon, C., ... & Stoklosa, R. (2011). Risk assessment of impacts of climate change for key marine species in South Eastern Australia. Part 1: Fisheries and aquaculture risk assessment.
- Pecl, G. T., Ward, T. M., Doubleday, Z. A., Clarke, S., Day, J., Dixon, C., ... & Stoklosa, R. (2014). Rapid assessment of fisheries species sensitivity to climate change. *Climatic Change*, 127(3), 505-520. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1284-z>.
- Pernet, F., & Browman, H. I. (2021). The future is now: marine aquaculture in the anthropocene. *ICES Journal of Marine Science*, 78(1), 315-322.
- Perry, A. L., Low, P. J., Ellis, J. R., & Reynolds, J. D. (2005). Climate change and distribution shifts in marine fishes. *science*, 308(5730), 1912-1915. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1111322>.
- Perry, R. I., Cury, P., Brander, K., Jennings, S., Mollmann, C., & Planque,

- B. (2010). Sensitivity of marine systems to climate and fishing: concepts, issues and management responses. *Journal of Marine Systems*, 79(3-4), 427-435. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.12.017>.
- Petitgas, P., Rijnsdorp, A. D., Dickey-Collas, M., Engelhard, G. H., Peck, M. A., Pinnegar, J. K., ... & Nash, R. D. (2013). Impacts of climate change on the complex life cycles of fish. *Fisheries Oceanography*, 22(2), 121-139. <https://doi.org/10.1111/fog.12010>.
- Poloczanska, E. S., Brown, C. J., Sydeman, W. J., Kiessling, W., Schoeman, D. S., Moore, P. J., ... & Richardson, A. J. (2013). Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, 3(10), 919-925. <https://doi.org/10.1038/nclimate1958>.
- Pörtner, H. O., & Peck, M. A. (2010). Climate change effects on fishes and fisheries: towards a cause-and-effect understanding. *Journal of fish biology*, 77(8), 1745-1779. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02783.x>.
- Prakash, S. (2021). Impact of Climate change on Aquatic Ecosystem and its Biodiversity: An overview. *International Journal of Biological Innovations*, 3(2).
- Rimmer, M. A., & Glamuzina, B. (2019). A review of grouper (Family Serranidae: Subfamily Epinephelinae) aquaculture from a sustainability science perspective. *Reviews in Aquaculture*, 11(1), 58-87.
- Ruiz-Díaz, R., Liu, X., Aguión, A., Macho, G., deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., & Ojea, E. (2020). Social-ecological vulnerability to climate change in small-scale fisheries managed under spatial property rights systems. *Marine Policy*, 121, 104192.
- Spencer, P. D., Hollowed, A. B., Sigler, M. F., Hermann, A. J., & Nelson,

- M. W. (2019). Trait-based climate vulnerability assessments in data-rich systems: An application to eastern Bering Sea fish and invertebrate stocks. *Global Change Biology*, 25(11), 3954-3971. <https://doi.org/10.1111/gcb.14763>.
- Stévant, P., Rebours, C., & Chapman, A. (2017). Seaweed aquaculture in Norway: recent industrial developments and future perspectives. *Aquaculture International*, 25(4), 1373-1390.
- Stewart, T. R., Makinen, M., Goulon, C., Guillard, J., Marjomaki, T. J., Lasne, E., ... & Stockwell, J. D. (2021). Influence of warming temperatures on coregonine embryogenesis within and among species. *Hydrobiologia*, 848(18), 4363-4385. <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04648-0>.
- Sumaila, U. R., Cheung, W. W., Lam, V. W., Pauly, D., & Herrick, S. (2011). Climate change impacts on the biophysics and economics of world fisheries. *Nature climate change*, 1(9), 449-456. <https://doi.org/10.1038/nclimate1301>.
- Tojo, N., Kruse, G. H., & Funk, F. C. (2007). Migration dynamics of Pacific herring (*Clupea pallasii*) and response to spring environmental variability in the southeastern Bering Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(23-26), 2832-2848. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.07.032>.
- Wang, Y., Wang, Y., Liu, S., Liang, C., Zhang, H., & Xian, W. (2020). Stock assessment using LBB method for eight fish species from the Bohai and Yellow Seas. *Frontiers in Marine Science*, 7, 164. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00164>.
- White, P. A., Kalff, J., Rasmussen, J. B., & Gasol, J. M. (1991). The effect of temperature and algal biomass on bacterial production and specific growth rate in freshwater and marine habitats. *Microbial*

ecology, 99-118.

Zhang, C. I., Lee, J. B., Seo, Y. I., Yoon, S. C., & Kim, S. (2004). Variations in the abundance of fisheries resources and ecosystem structure in the Japan/East Sea. *Progress in Oceanography*, 61(2-4), 245-265.



## [국내 문헌]

- 강덕영, 한형균 · 전창영. (2004). 농어, *Lateolabrax japonicus* 유어의 성장에 있어 사육 수온의 영향. 한국양식학회지, 17(4), 240-245.
- 국립수산과학원. (1964). 지중해담치.
- 국립수산과학원. (2016a). 기후변화가 수중생태계 구조에 미치는 영향 및 예측기술 개발. 보고서.
- 국립수산과학원. (2016b). 넙치 양식 표준 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2016c). 갈조류 고수온 피해 예방을 위한 가이드라인. 보도자료.
- 국립수산과학원. (2016d). 참굴 양식 표준 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2017a). 생태와 어장. 부산: 도서출판 예문사.
- 국립수산과학원. (2017b). 조피볼락 양식 표준 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2018). 김 양식 표준 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2019a). 승어 양식기술 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2019b). 강도다리 양식기술 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2019c). 전복 사육관리 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2019d). 가리비 양식기술 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2020). 돔류 양식기술 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2021). 멍게 양식기술 매뉴얼.
- 국립수산과학원. (2022a). 수산분야 기후변화 영향 및 연구 보고서.
- 국립수산과학원. (2022b). 갈조류 미역·다시마 고수온 피해예방 가이드 라인. 리플릿.
- 국립수산과학원. (2022c). 바지락 어떤 환경범위까지 생존할 수 있을까?. 리플릿.
- 기상청 기후정보포털. (2023). SSP 시나리오. <http://www.climate.go.kr/home/>. Accessed January 2023.
- 김도훈. (2015). 도루묵 수산자원회복계획에서의 TAC 정책 평가. 水産經營論集, 46(1), 29-39.

- 김봉태, 이준수·서영상. (2016). RCP 시나리오에 따른 남해안 어업 및 어종의 기후변화 노출 분석: 수온 변동을 대상으로. 수산경영론집, 47(4), 31-44.
- 김봉태, 이준수·서영상. (2018). RCP 시나리오를 적용한 한국 연근해어업의 기후변화 취약성 평가: 남해안 지역을 대상으로. Ocean & Polar Research, 40(1).
- 강수경, 박정호·김수암. (2013). 1970-1990 년대 동해에서 어획된 명태 (*Theragra chalcogramma*) 의 체장에 따른 체급별 어획 마릿수 추정. 한국수산과학회지, 46(4), 445-453.
- 김우수·김도훈. (2011). 생태계 기반 어업관리 방안을 위한 사회경제적 평가지표의 개발 및 적용: TLS 기법 적용을 중심으로. 수산경영론집, 42(1), 71-83.
- 김종규. (2022). 우리나라에서 기후 변화에 따른 어업 생산량의 변동. Journal of the Society of Disaster Information, 18(1), 194-201.
- 노충환. (2020). 우리나라에서 생산한 바리류 (Subfamily Epinephelinae) 교잡 수정란의 부화력: 상업적으로 유용한 교배조합 선택을 위한 총설. 한국수산과학회지, 53(4), 479-485.
- 법제처. (2023). 기후변화대응 기술개발 촉진법. <https://www.law.go.kr/>, Accessed 20 May 2023.
- 유제범. (2019). 스마트 양식산업의 현황과 향후과제. 국회입법조사처 현안 분석, (89), 1-28.
- 윤유진. (2023). 기후변화가 양식 해조류 생산에 미치는 경제적 영향 분석. 부경대학교 석사학위논문.
- 이동길, 배봉성, 이정호, 김석태·김형수. (2021). 스마트양식 기술 개발과 산업화 방안. 수산해양교육연구, 33(2), 412-420.
- 이버들, 김봉태·조용성. (2011). 국내 수산 부문의 지역별 기후변화 취약성

- 평가 연구. 水産經營論集, 42(1), 57-70.
- 이준수, 권미옥, 안지숙, 박명희, 송지영, 한인성 · 정래홍. (2022). 2018 년~ 2021년 여름철 우리나라 연안 고수온 현상. 해양환경안전학회지, 28(5), 753-763.
- 정민경 · 남종오. (2023). SSP 시나리오별 굴 양식 생산량 예측력 비교. 水産經營論集, 54(1), 37-49.
- 정석근, 하승목 · 나한나. (2013). 기후변화에 따른 제주도 주변 해역 수산 어종 변화 (1981-2010). Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 46(2), 186-194.
- 최지훈, 강희중, 임정현 · 김도훈. (2020). 기름가자미 어업관리방안 평가를 위한 생물경제학적 분석-동해구외끌이중형저인망어업을 대상으로. 수산해양기술연구 (구 한국어업기술학회지), 56(4), 347-360.
- 통계청. (2023). 어업생산동향조사. <https://kosis.kr/>, Accessed 6 June 2022; 6 April 2023; 20 April 2023.
- 해양수산부. (2019). 수산혁신 2030 계획.
- 해양수산부. (2022). 제4차 기후변화대응 종합계획.