

기후변화 시나리오에 따른 해조류 양식업의 위험 평가

김창신* · 임병준* · 이준수** · 한인성** · 김무진*** · 김도훈****†

*국립수산과학원 기후변화연구과 해양수산연구소, **국립수산과학원 기후변화연구과 해양수산연구소,

한국해양수산개발원 어촌연구부 전문연구원, *부경대학교 해양수산경영학과 교수

Risk assessment in Korean seaweed aquaculture under climate change scenarios

Kim, Changsin* · Lim, Byeong-Jun* · Lee, Joon-Soo** · Han, In-Seong** · Kim, Moo-Jin*** and Kim, Do-Hoon****†

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

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

***Senior Researcher, Korea Maritime Institute, Busan, Korea

****Professor, Department of Marine & Fisheries Business and Economics, Pukyong National University, Busan, Korea

ABSTRACT

Ocean warming driven by climate change is accelerating globally, with Korean waters showing faster sea surface temperature (SST) increases than the global average, posing substantial threats to the fisheries sector. Seaweed, which accounts for approximately 76% of total aquaculture production, is highly sensitive to temperature fluctuations and vulnerable to climate impacts. This study assessed the impacts of climate change on three types of major cultivated seaweed in Korea (kelp, sea mustard, laver) by estimating damage probabilities specific to species and production regions under four SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) across three periods (2030, 2050, 2100). These probabilities were combined with recent five-year average production data (2019 - 2023) to estimate economic losses. The results revealed pronounced differences in damage probabilities and economic losses by species and production region. Specifically, kelp consistently exhibited damage probabilities under all scenarios, and aquaculture in its primary production area, Jeollanam-do, was projected to become increasingly difficult. In contrast, laver and sea mustard were exposed to risks but showed greater potential for continued cultivation. Notably, although laver exhibited lower damage probabilities than kelp, its higher unit value resulted in the largest projected economic losses among the three species. These findings provide a critical basis for national and regional governments to design adaptive strategies that strengthen the resilience and sustainability of seaweed aquaculture under climate change.

Key words : Climate Change, Seaweed Aquaculture, Risk Assessment, Damage Probabilities, Economic Losses

1. 서론

기후변화로 인한 해양 온난화는 전 지구적으로 가속화되고 있으며, 우리나라 해역에서도 그 영향이 뚜렷하게 나타나고 있다. 특히 이상기후 영향으로 수온의 계절별 양극화가 심해지며 이상 수온의 발생은 2010년대 이후 지

속적으로 증가하는 추세이다(Han and Lee, 2020; Lee et al., 2022). 1968년부터 2024년까지 우리나라 연평균 표층 수온은 약 1.58℃ 상승하였으며, 이는 같은 기간 전 지구 평균 상승폭인 약 0.74℃보다 2배 이상 큰 값으로 나타났다(NIFS, 2025).

또한 IPCC 제6차 평가보고서(AR6)에서 제시된 CMIP6 모형 결과에 따르면, 21세기 중후반(2051 ~ 2100년)에는

†Corresponding author : delaware310@pknu.ac.kr (48513, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Busan, Korea. Tel. +82-51-720-2231)

ORCID 김창신 0000-0003-3026-3285 한인성 0000-0002-3652-9251
임병준 0000-0002-6994-8954 김무진 0000-0002-5555-3708
이준수 0000-0003-2216-2601 김도훈 0000-0002-6860-3508

Co-lead author: Kim, Changsin and Kim, Moo-Jin

Received: August 31, 2025 / Revised: September 24, 2025 / Accepted: October 10, 2025

저탄소 시나리오(SSP1-2.6)에 비해 고탄소 시나리오(SSP5-8.5)에서 기후변화의 진행 속도가 현저히 가속화될 것으로 전망되었다(IPCC, 2023). 따라서 기후변화의 영향을 정량적으로 평가하고, 그에 따른 적응·대응 전략 마련이 시급한 실정이다.

기후변화는 수산업 전반에 상당한 피해와 손실을 초래하고 있으며, 그 영향은 기존 연구에서 추정된 수준보다 더 크고 광범위한 것으로 보고되고 있다(IPCC, 2022). 기후변화는 양식업의 성장 및 안정성에 직접적인 영향을 미치며(Ahmed et al., 2019; Pernet and Browman, 2021), 이는 나아가 사회적 및 경제적 파급효과를 초래할 수 있다(Zitti and Guttormsen, 2022).

특히 해면 양식업은 자연환경에 의존도가 높아 자연재해에 특히 취약하다. 실제로 고수온으로 인한 양식생물 대량 폐사는 최근 14년간(2011~2024년) 전체 자연재해 피해액 4,764억의 약 73%인 3,472억을 차지하고 있다(NIFS, 2025). 이에 따라 이상 수온으로 인한 양식수산물 피해를 최소화하고, 미래 어장환경 변화에 대응할 수 있는 정책 수립 등의 방안 마련 필요성이 더욱 커지고 있다.

우리나라 양식업은 2023년 기준 전체 수산물 생산량의 약 62% 그리고 생산금액의 약 34%를 차지하였다(KOSIS, 2025). 이처럼 양식업은 국내 수산업에서 핵심적인 비중을 담당하고 있으며, 양식품목 중 특히 해조류는 최근 5개년(2019~2023년) 평균 전체 양식업 생산량의 약 76%를 기록해 가장 큰 비율을 보였다. 다음으로 패류 18.4%, 어류 3.7%, 그리고 기타 수산동물이 1.2%를 차지하였다. 반면, 생산금액에서는 어류와 패류가 각각 약 33%로 높은 비중을 차지하였고, 해조류는 약 25% 수준에 머물렀다.

이는 해조류가 생산량은 압도적으로 많지만, 상대적으로 단가가 낮아 경제적 가치에서는 어류와 패류보다 낮은 특징을 보여준다. 이와 같이, 양식업 중에서 생산량이 가장 많은 해조류는 먹이 공급을 자연환경에 전적으로 의존하기 때문에 다른 양식품종보다 수온 변화와 같은 기후변화 요인에 더욱 민감하게 반응한다(Kim et al., 2021).

기후변화에 따른 수산 양식업의 피해를 예측한 국외 선행연구로는, 중국 담수 양식업을 대상으로 수온, 강수량, 극한 기후 요인을 고려하여 지역별 이익 변동성을 분석한 연구(Li et al., 2016), 방글라데시 새우 양식장에서 사이클론으로 인한 경제적·비경제적 손실을 평가한 연구(Islam et al., 2022) 등이 있다. 국내에서는 Shared Socioeconomic Pathways (SSP) 시나리오 기반으로 해조류 생산량과 피해액을 추정한 연구(Yun and Kim, 2023), 바지락 생산량 변

동과 경제적 피해를 패널 회귀모형으로 분석한 연구(Jung and Kim, 2024) 등이 있다. 하지만 국내 선행연구들은 공통적으로 통계적 모형에 의존하여 수온, 염분 등 기후요인의 유의성을 검증하고, 이를 토대로 생산량이나 피해액을 단순 예측하는 수준에 머무르고 있다. Bondad-Reantaso et al. (2008)이 강조한 바와 같이, 기후변화 피해를 보다 정밀하게 추정하기 위해서는 발생 확률을 고려한 위험 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구의 한계점을 극복하여, 해조류 양식업의 기후변화 취약성을 확률적 평가 관점에서 접근하고자 한다.

본 연구는 기후변화가 해조류 양식업에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로, 우리나라 주요 해조류인 김(*Porphyra* spp.), 미역(*Undaria pinnatifida*), 다시마(*Saccharina japonica*)를 대상으로 SSP 기후변화 시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)와 시기별(단기: 2030년, 중기: 2050년, 장기: 2100년) 예측 수온 자료를 활용하여 품종별·지역별 피해 확률을 추정하였다. 그리고 최근 5개년(2019~2023년) 생산금액 자료를 활용하여 지역별 피해액을 분석하였다. 이러한 본 연구의 결과는 정부, 연구기관, 그리고 양식업계에서 기후변화 대응 전략을 마련하는 데 필요한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 나아가 향후 해조류 산업의 지속 가능한 발전을 위한 정책적 방향을 모색하는 데에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

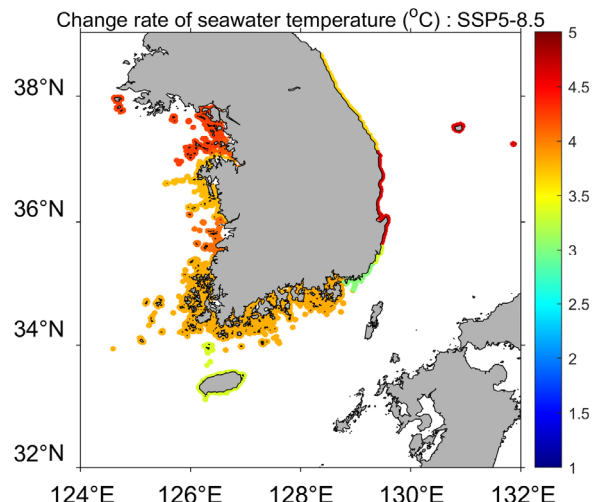


Fig. 1. Annual coastal seawater temperature change rates (November to April) in 11 regions under SSP5-8.5 senario around the Korean Peninsula

2. 분석 자료 및 방법

2.1. 기후변화 영향 파악

CMIP6에서 제시된 SSP (Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오는 전 지구 온실가스 배출 및 사회경제적 발전 경로를 반영한 기후변화 전망 자료이다. SSP1-2.6은 강력한 감축 정책이 시행되는 저배출 시나리오, SSP2-4.5는 중간 수준 배출 경로, SSP3-7.0은 지역 갈등과 낮은 협력으로 인한 고배출 경로, SSP5-8.5는 화석연료 의존이 지속되는 최악의 고배출 경로를 나타낸다. 이는 IPCC 제6차 평가보고서(AR6)에서도 전 지구 및 지역 규모의 기후변화 전망을 위해 주요 시나리오 체계로 활용되고 있으며, 해양 환경의 장기 변동성 평가에 널리 적용되고 있다.

본 연구에서는 Kim et al. (2024a)이 구축한 북서태평양 고해상도 해양순환모형 결과를 활용하여 한반도 주변해역의 기후변화 영향을 파악하였다. 연구 영역은 한반도 주변해역(18.5-48.5°N, 117.5-155.5°E)으로 해양수치모델(ROMS)을 이용, 해저지형은 성균관대학교 1분격자 수심자료와 ETOPO5를 결합하여 구성하였다. 대기강제력은 ECMWF 재분석 자료, 개방경계조건은 HYCOM 해양자료와 TPX07 조석자료를 적용하였다. 모형은 CMIP6 전 지구 기후모형 중 CNRM-ESM2-1 결과를 경계조건으로 입력하여 10년간의 spin-up을 수행하였다. 기후변화 전망을 위해 1993년부터 2014년까지 hindcast 자료를 생산하였으며, 이후 2100년까지 네 가지 SSP 시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)를 활용하여 2100년까지의 수온 변화를 기후변화 영향 파악을 위해 사용되었다.

분석 기간은 단기(2030: 2021~2030년), 중기(2050: 2041~2050년), 장기(2100: 2091~2100년)로 구분하였다. 각 예측 수온자료 중 표층수온(5 m)을 양식장이 밀집해있는 연안으로부터 5 km까지 추출하여 시·군 단위행정구역별 월별 수온자료로 구분하였다. 이런 장기 수온의 변동성은 양식생물의 생리적 내성 및 생산성 변화를 평가하기 위한 기초자료로 활용하였다.

해조류는 주로 11월부터 이듬해 4월까지 양식 되므로, 동기간 연간 연안 수온의 상승률을 산정하여, 해역별로 수온 상승에 따른 기후 취약성을 파악하였다. 수온 상승이 가장 높은 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5에서는 2100년까지 부산이 3.03℃로 가장 낮은 상승률을 보였으며, 경상북도는 4.64℃로 가장 높은 상승률을 보였다(Fig. 1).

2.2. 분석 자료

본 연구에서는 기후변화에 따른 피해액 추정이 가능한 해조류 양식품종 3종을 선정하고, 이들을 양식하는 11개 행정구역을 분석 대상으로 하였다(Fig. 2). 해조류는 먹이공급을 자연에 의존하기 때문에 기후변화 등 환경 요인에 대한 민감도가 높은 양식품종이다. 피해 확률 추정을 위한 3개 품종의 생태학적 정보는 Kim et al. (2024b)을 인용하였으며, 해당 연구는 국립수산물과학원에서 발간한 품종별 양식기술 매뉴얼과 보고서를 근거로 하고 있다

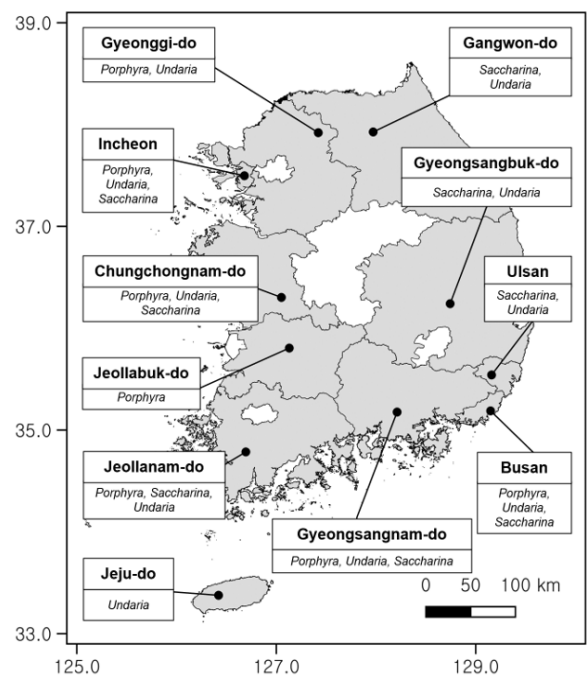


Fig. 2. Map of farming areas for the major seaweed species around the Korean Peninsula (gray color)

Table 1. Optimal and tolerable upper limit seawater temperatures (°C) for three farmed seaweeds. Data are based on Kim et al. (2024b)

Scientific name	Optimal temperature (°C)	Tolerable temperature (°C)	Sources
<i>Porphyra</i>	15	20	NIFS (2018)
<i>Undaria</i>	18	20	NIFS (2016, 2022)
<i>Saccharina</i>	14	18	NIFS (2016, 2022)

Table 2. Average quantity (MT), production value (million KRW), and unit price (KRW/kg) of three farmed seaweeds by administrative area from 2019 to 2023.

Species	Farming area	Quantity (MT)	Production value (million KRW)	Unit price (KRW/kg)
<i>Porphyra</i>	Busan	17,926	18,109	1,010
	Incheon	6,226	4,701	755
	Gyeonggi-do	25,157	19,230	764
	Chungcheongnam-do	38,498	28,052	729
	Jeollabuk-do	36,196	29,394	812
	Jeollanam-do	425,568	424,708	998
	Gyeongsangnam-do	5,213	4,931	946
<i>Undaria</i>	Busan	10,853	6,303	581
	Incheon	6	7	1,293
	Ulsan	2,477	1,297	523
	Gyeonggi-do	1	1.1	1,867
	Gangwon-do	31	54	1,749
	Chungcheongnam-do	2,652	1,268	478
	Jeollanam-do	529,808	116,455	220
	Gyeongsangbuk-do	379	410	1,081
	Gyeongsangnam-do	2,731	1,840	674
<i>Saccharina</i>	Jeju-do	0.4	0.6	1,500
	Busan	9,011	4,302	477
	Incheon	2	4	2,000
	Ulsan	467	230	491
	Gangwon-do	1	1.1	1,092
	Chungcheongnam-do	2,495	828	332
	Jeollanam-do	622,049	95,426	153
	Gyeongsangbuk-do	42	36	853
Gyeongsangnam-do	1,969	927	471	

(Table 1). 해조류별 생산량 및 생산금액은 국가통계포털에서 최근 5개년(2019~2023년) 자료를 활용하였다(KOSIS, 2025; Table 2).

2.3. 분석 방법

해조류 품종별 피해액을 추정하기 위해 각 품종의 기후 변화에 따른 피해 확률과 생산금액을 종합적으로 고려하였다. 선행연구에 따르면, 기후변화 시나리오에 따른 수온 상승은 우리나라 주요 양식품종(어류, 패류, 해조류 등) 중 해조류가 가장 취약할 것으로 평가되었다(Kim et al., 2021, 2024b). 특히 수온은 양식생물의 생리 및 생태에 결정적인 영향을 미치는 요인으로 알려져 있어 본 연구에서도 수온 변화를 중심으로 피해액을 추정하였다. 다른 기

후변화 요인(염분, pH, 강수량 등) 역시 양식생물의 성장과 번식에 영향을 미치지만(Brander et al., 2017; Collins et al., 2020; Findlay et al., 2025), 자료의 한계로 본 연구에서 제외하였다.

피해 확률은 SSP 기후변화 시나리오별로 예측된 생산 지역의 월별 수온과 해조류 품종별 적정 수온 상한 및 한계 수온 상한(Table 1)을 비교하여 추정하였다. 여기서, 적정 수온은 성장과 생산성이 우수한 수온 그리고 한계 수온은 생존이 가능한 최대 수온을 의미한다. 따라서 예측 수온이 적정 수온 상한 내에 있으면 안정적인 생산이 가능하나, 한계 수온 상한을 초과할 경우 폐사가 발생하여 생산이 불가능하게 된다.

피해 확률의 추정은 점수화 방식을 적용하였으며, 해조류는 주로 겨울철부터 이듬해 봄까지 양식되므로 6개월

Scientific name	Farming area	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
		2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
Porphyra	Busan	17%	17%	17%	17%	17%	33%	17%	17%	33%	17%	17%	100%
	Incheon	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%
	Gyeonggi-do	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	33%	17%	17%	33%
	Chungcheongnam-do	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	100%
	Jeollabuk-do	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	100%
	Jeollanam-do	17%	17%	33%	33%	33%	33%	17%	17%	33%	17%	33%	33%
	Gyeongsangnam-do	17%	17%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	33%	100%
Undaria	Busan	0%	0%	0%	0%	17%	17%	0%	0%	17%	0%	0%	100%
	Incheon	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	17%	0%	0%	17%
	Ulsan	0%	17%	0%	0%	17%	100%	0%	17%	100%	0%	0%	100%
	Gyeonggi-do	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	17%
	Gangwon-do	0%	0%	0%	0%	17%	17%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
	Chungcheongnam-do	0%	0%	17%	0%	17%	17%	0%	0%	17%	17%	17%	100%
	Jeollanam-do	0%	0%	0%	0%	0%	17%	0%	0%	17%	0%	0%	33%
	Gyeongsangbuk-do	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Gyeongsangnam-do	0%	0%	0%	0%	0%	17%	0%	0%	33%	0%	0%	100%
	Jeju-do	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Saccharina	Busan	17%	17%	33%	33%	100%	100%	17%	33%	100%	17%	50%	100%
	Incheon	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	100%	17%	17%	100%
	Ulsan	33%	100%	50%	33%	100%	100%	33%	100%	100%	33%	50%	100%
	Gangwon-do	33%	33%	33%	50%	100%	100%	33%	33%	100%	50%	100%	100%
	Chungcheongnam-do	17%	17%	100%	17%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Jeollanam-do	33%	33%	33%	33%	33%	100%	33%	33%	100%	33%	33%	100%
	Gyeongsangbuk-do	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Gyeongsangnam-do	33%	33%	33%	33%	33%	100%	33%	33%	100%	33%	33%	100%

Fig. 3. Damage probability of seaweed aquaculture by administrative area under SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)

(11월 ~ 이듬해 4월)을 기준으로 평가하였다. 만약 적정 수온 상한을 초과하면서 한계 수온 미만인 경우에는 해당 월에 1점을 부여하였다. 반면, 한계 수온 상한을 초과하는 월이 하나라도 있을 경우 폐사가 발생한다고 판단하여 최대치인 6점을 부여하였다. 이렇게 평가된 해조류별 생산 지역별 점수는 백분율로 환산하여 피해 확률을 도출하였다(Fig. 3).

피해액 산정은 일반적으로 위험 평가의 기본 개념인 발생 확률과 결과 규모의 곱에 기반하며(Australian Government, 2006; DEFRA, 2012), 본 연구에서도 동일한 틀을 적용하였다. 결과 규모는 경제적 손실을 나타내는 지표로서 각 품종의 최근 5개년 평균 생산금액(2019 ~ 2023년)에 피해 확률을 곱하여 생산지역별 피해액을 추정하였다. 구체적인 피해액 산정식은 다음의 식과 같다.

$$L_{sa} = PV_{sa} \times PR_{sa} \quad (1)$$

여기서, s 는 해조류 품종, a 는 생산지역, PV_{sa} 는 a 지역에서의 s 품종의 생산금액, PR_{sa} 는 피해 확률, 그리고 L_{sa} 는 피해액을 의미한다.

3. 결과

3.1. 해조류 품종별 생산지역별 피해 확률

해조류 품종 중 다시마는 적정 및 한계 수온이 가장 낮

아 수온 상승에 따른 피해가 가장 크게 나타날 것으로 추정되었다. 생산지역별 향후 예측 수온은 지역별로 차이를 나타내므로, 동일한 양식품종이라도 피해 확률은 지역별로 차이가 다소 큰 것으로 나타났다(Fig. 2). 전반적으로 SSP1-2.6 시나리오와 같은 완화적 경로에서는 피해 확률이 낮게 나타난 반면, SSP5-8.5 시나리오와 같은 고배출 경로에서는 피해 확률이 급격히 증가하였다. 또한 시기적으로 단기(2030)에서 중기(2050), 장기(2100)로 갈수록 피해 확률이 높아지는 것으로 분석되었다.

김은 최대 생산지인 전라남도에서 모든 시나리오에서 일정 수준의 피해 확률이 나타났으나, 향후에도 양식은 가능할 것으로 예측되었다. 다음으로 생산량이 많은 충청남도도 전라북도에서는 SSP5-8.5 시나리오의 장기를 제외하면 생산이 가능할 것으로 추정되었다. 미역은 최대 생산지인 전라남도에서 모든 시나리오 하에 향후 생산이 가능할 것으로 전망되었다. 두 번째로 생산량이 많은 부산은 SSP5-8.5 시나리오의 장기를 제외한 모든 시나리오에서 양식이 가능할 것으로 나타났다. 다시마는 주요 생산지인 전라남도에서 SSP1-2.6 시나리오를 제외하고 장기에는 생산이 불가능할 것으로 예측되었다. 두 번째 주요 생산지인 부산은 단기와 중기에는 대부분 시나리오에서 일정 수준의 피해 확률은 나타났으나 양식이 가능할 것으로 전망되었다. 그러나 장기에는 SSP1-2.6을 제외한 모든 시나리오에서 양식이 불가능할 것으로 평가되었다.

3.2. 해조류 품종별 생산지역별 피해액

해조류 양식의 기후변화 피해액은 품종과 생산지역에 따라 큰 차이를 보였다(Table 3). 전반적으로 SSP1-2.6 시나리오와 같은 완화적 경로에서는 피해액이 상대적으로 낮게 추정된 반면, SSP5-8.5와 같은 고배출 시나리오에서는 피해액이 크게 증가하는 것으로 추정되었다. 또한 시기적으로 단기(2030)보다 중기(2050), 장기(2100)로 갈수록 피해액이 확대되는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

구체적으로, 김의 경우 최대 생산지인 전라남도에서 피해액이 가장 크게 산정되었다. SSP1-2.6 시나리오에서는 단기적으로 약 708억 원 수준의 피해가 예상된 반면, 모든 SSP 시나리오 장기에서는 약 1,416억 원에 달하는 피해액이 추정되었다. 반면, 충청남도과 전라북도는 생산규모가

작고 향후에도 비교적 안정적인 생산이 가능하여 피해액이 제한적인 것으로 추정되었다.

미역은 전라남도에서 SSP2-4.5와 SSP3-7.0 시나리오의 장기에서는 약 194억 원 규모의 피해가 예상되었으며, SSP5-8.5 장기 시나리오에서는 약 388억 원에 달하는 피해가 발생할 것으로 추정되었다. 부산은 SSP2-4.5와 SSP3-7.0 장기 시나리오에서 약 10억 원 규모의 피해액이 산정되었으나, SSP5-8.5 장기 시나리오에서는 63억 원을 상회하는 피해액이 추정되었다.

다시마는 전라남도에서 피해액이 가장 크게 산정되었으며, 모든 시나리오의 단기와 중기에서는 약 318억 원 수준의 피해액이 추정되었다. 그러나 SSP1-2.6 시나리오를 제외한 장기에서는 약 954억 원의 피해액이 산정되었다. 이외의 생산지들에서는 SSP3-7.0과 SSP5-8.5 시나리오

Table 3. Projected economic losses of seaweed aquaculture by administrative area under SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) (unit: million KRW)

Species	Farming area	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
		2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
Porphyra	Busan	3,018	3,018	3,018	3,018	3,018	6,036	3,018	3,018	6,036	3,018	3,018	18,109
	Incheon	783	783	783	783	783	783	783	783	783	783	783	783
	Gyeonggi-do	3,205	3,205	3,205	3,205	3,205	3,205	3,205	3,205	6,410	3,205	3,205	6,410
	Chungcheongnam-do	4,675	4,675	4,675	4,675	4,675	4,675	4,675	4,675	9,351	4,675	4,675	28,052
	Jeollabuk-do	4,899	4,899	4,899	4,899	4,899	4,899	4,899	4,899	4,899	4,899	4,899	29,394
	Jeollanam-do	70,785	70,785	141,569	141,569	141,569	141,569	70,785	70,785	141,569	70,785	141,569	141,569
	Gyeongsangnam-do	822	822	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	1,644	4,931
Undaria	Busan	-	-	-	-	1,050	1,050	-	-	1,050	-	-	6,303
	Incheon	-	-	-	-	-	-	-	-	1.2	-	-	1.2
	Ulsan	-	216	-	-	216	1,297	-	216	1,297	-	-	1,297
	Gyeonggi-do	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	Gangwon-do	-	-	-	-	9	9	-	-	9	-	9	54
	Chungcheongnam-do	-	-	211	-	211	211	211	-	211	211	211	1,268
	Jeollanam-do	-	-	-	-	0	19,409	-	-	19,409	-	-	38,818
	Gyeongsangbuk-do	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410	410
	Gyeongsangnam-do	-	-	-	-	-	307	-	-	613	-	-	1,840
	Jeju-do	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Saccharina	Busan	717	717	1,434	1,434	4,302	4,302	717	1,434	4,302	717	2,151	4,302
	Incheon	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	4.4	0.7	0.7	4.4
	Ulsan	77	230	115	77	230	230	77	230	230	77	115	230
	Gangwon-do	0.4	0.4	0.4	0.5	1.1	1.1	0.4	0.4	1.1	0.5	1.1	1.1
	Chungcheongnam-do	138	138	828	138	828	828	828	138	828	828	828	828
	Jeollanam-do	31,809	31,809	31,809	31,809	31,809	95,426	31,809	31,809	95,426	31,809	31,809	95,426
	Gyeongsangbuk-do	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
	Gyeongsangnam-do	309	309	309	309	309	927	309	309	927	309	309	927

장기에서는 수온 상승으로 인해 피해액이 해당 지역에서 나타날 수 있는 최대치에 도달하는 것으로 추정되었다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 우리나라 주요 해조류 품종(김, 미역, 다시마)을 대상으로 생산지별로 적정 및 한계 수온 정보를 반영하고, 향후 수온 상승에 따른 피해 확률을 산정한 뒤 연간 평균 생산금액을 곱하여 기후변화에 따른 피해액을 추정하였다. 분석 결과, 무분별한 개발이 지속될 것으로 가정된 SSP5-8.5 시나리오에서 장기(2100년)로 갈수록 피해 규모가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 기후변화가 심화될수록 예측 수온이 해조류의 적정 및 한계 수온 상한을 초과하는 빈도가 높아져 양식이 불가능한 지역이 확대됨을 의미한다. 이러한 결과는 고배출 시나리오일수록 장기적으로 해조류 양식이 기후변화에 더 큰 영향을 받는다는 선행연구의 결과와도 일치한다(Kim et al., 2024b).

기후변화에 따른 피해액은 피해 확률과 생산금액의 상이성에 따라 품종별로 뚜렷한 차이를 보였다. 해조류 생산량이 가장 많은 전라남도의 경우, 다시마는 적정 및 한계 수온 상한이 낮아 모든 시나리오에서 가장 높은 피해 확률을 보였으며, 향후에는 양식이 불가능해질 것으로 예측되었다. 이에 따라 전체 다시마 피해액의 약 93% 이상이 이 지역에서 발생할 것으로 추정되었다.

반면, 김은 모든 시나리오에서 다시마보다 피해 확률이 낮았으나, 주생산지인 전라남도에서의 피해액이 전체 김 피해액의 약 82%를 차지하였다. 특히 김은 다시마보다 기후변화에 따른 피해 확률은 낮았지만, 생산금액이 6배 이상 높아 해조류 중 가장 큰 피해액 규모로 추정되었다. 실제 분석에서도 다시마의 100% 피해 확률에 따른 피해액은 김의 22%의 피해 확률에서 발생하는 피해액과 유사한 수준을 보였다. 서로 다른 경제적 가치 밀도를 비교하기 위한 동일한 생산량을 가정한 비교에서도, 다시마의 100% 피해액은 김의 약 15% 피해 확률에서 발생하는 피해액과 비슷한 규모로 추정되었다. 이러한 결과는 기후변화 피해 규모가 단순한 피해 확률뿐만 아니라 품종별 경제적 특성과 가격 구조, 즉 단위 생산금액(단가)의 차이에 의해 크게 달라질 수 있음을 시사한다. 이는 단위 경제적 가치가 월등히 높은 김은 낮은 확률의 재해에도 불구하고 총 피해액이 매우 클 수 있어 위험도 관리의 우선순위를 재검토해야 함을 강조한다.

생산지역별 기후변화에 따른 피해 확률을 살펴본 결과,

경기도, 인천 등 일부 지역은 피해 확률이 낮아 대체 해조류 양식으로 활용될 가능성이 제시되었다. 그러나 실제로 대안 지역을 판단할 때는 수온뿐만 아니라 조도, 해류 등 다양한 해양환경 조건과 더불어 인프라, 지원 시설, 시장 접근성 등 다양한 조건이 복합적으로 작용하므로 단순히 수온만을 기준으로 판단하는 데는 한계가 있다. 따라서 기후변화에 대응한 대체 양식지 선정 과정에서는 이러한 요인을 종합적으로 고려한 다차원적 접근이 필요하다. 아울러 최근에는 고수온에 강한 해조류 품종 개발이 진행되고 있어(NIFS, 2022), 이러한 기술적 노력과 지역 특성을 반영한 맞춤형 관리 전략을 병행한다면 해조류 양식업의 회복력과 지속가능성을 효과적으로 높일 수 있을 것이다.

해조류의 생산단가는 지역별로 상당한 차이를 보였다. 예를 들어, 미역과 다시마는 전라남도과 같은 대규모 생산지는 단가가 낮았지만, 인천 등 소규모 생산지는 단가가 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 차이는 양식 규모, 제품 등급, 가공 형태, 지역 브랜드 및 지리적 표시(Geographical Indication; GI), 그리고 수요 및 유통 구조 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석될 수 있다. Suh et al. (2021)에 따르면, GI가 미역과 다시마 단가에 약 30~40% 프리미엄을 형성할 수 있음을 주장하였다. 이는 기후변화로 인한 경제적 피해를 추정할 때 단순히 피해 확률과 생산량만 고려하는 것이 아니라 지역별 가격 구조와 시장 요인까지 함께 고려해야 함을 시사한다. 더 나아가 다시마와 미역은 전복의 먹이로 활용되는 등 다른 양식품종에도 영향을 미치므로 향후 연구에서는 품종 간 연계성까지 함께 고려하는 통합적 접근이 필요하다.

3개 품종, 4개 SSP 시나리오, 11개 지역 분석을 통해 해조류 양식업의 기후변화 피해 위험이 생물학적 취약성과 경제적 가치라는 두 축에 따라 극단적으로 다르다는 점이 강조되고 있다. 다시마는 낮은 적정 수온으로 인해 모든 시나리오에서 가장 높은 피해 확률을 보이며 생물학적 취약성이 지배적이지만, 김은 상대적으로 낮은 피해 확률에도 불구하고 단위 생산금액이 월등히 높아 최종 피해액 규모는 가장 크게 추정되어 경제적 가치의 위험도를 부각되었다. 지리적으로는 피해가 남해안(전남 등)에 집중되어 이 지역이 기후변화의 영향을 받는 양식업 주요 쟁점지역으로 보인다.

SSP5-8.5 시나리오의 장기 피해액 954억 원은 정부의 기후변화 적응 예산 편성 기준점으로 활용될 수 있으며, 이 피해액을 바탕으로 양식어업 재해 안정화 기금을 조성하여 대규모 재해 복구 자원으로 활용할 수 있습니다. 또한, 이 기금은 기후 탄력성 높은 품종으로의 전환을 위한

고수온 내성 종자 개발 및 스마트 양식 기술 R&D에 집중 투자하여 장기적인 미래 산업 경쟁력을 확보하는 데 쓰일 수 있다. SSP1-2.6 시나리오에서도 잔여 피해가 예상되므로, 정책적으로는 기후변화 완화 노력과 함께 품종 별로 시기별로 맞춤형 적응 대책을 필수적으로 병행이 요구된다. 예를 들면 기후변화 대응을 위해서는 단기(2030)적으로는 고수온 특보 발령 기준 강화, 고수온 특보 시 양식장 관리 강화, 이식 시기 조절(조기 채묘/수확 유도) 등 행정적 지원을 마련하여야 한다. 중기(2050)에는 내성 품종 개발 및 보급, 양식 기술 혁신(예: 수심 조절 양식), 양식 보험제도 강화 등이 있으며, 그 이후 장기(2100)에는 양식 적지 재배치 및 새로운 양식 품종 도입 등 어촌 구조 개편 등 차별화된 적응 대책 마련이 요구된다.

본 연구의 한계점으로는 무엇보다 피해 확률 산정 과정에서 수온 변화만을 고려했다는 점이다. 그러나 실제 양식생물의 생존과 생산성은 수온뿐만 아니라 염분, pH, 강수량 등 다양한 해양환경 요인과 복합적 상호작용에 의해 결정된다(Brander et al., 2017; Collins et al., 2020). 따라서 향후 연구에서는 품종별 생물학적 특성을 반영하고, 이러한 요인들이 품종별로 미치는 차별적 영향을 함께 고려한 보다 정교한 분석이 필요하다. 또한 최근 5개년 평균 연간 생산금액을 기준으로 피해액을 산정하였으나, 생산금액의 연도별 변동성, 양식장 면적 변화, 시장가격 변동과 같은 경제적·산업적 요인까지 포함한다면 기후변화로 인한 피해액을 보다 정밀하게 추정할 수 있을 것이다. 통계청 자료의 경우 양식생산량과 생산금액을 시도 단위로 집계하여 제공하고 있기 때문에, 지역적 위험 평가를 11개로 나누어 산정하였다. 시·군·구 단위로 양식생산량과 생산금액 자료획득이 가능한 품종의 경우 보다 상세한 위험 평가가 가능할 것으로 보인다.

기후변화는 전 세계적으로 양식업의 지속가능성을 위협하는 가장 큰 요인 중 하나로, 우리나라도 역시 예외가 아니다. 국내 양식업은 최근 14년간(2011~2024년) 고수온, 저수온, 적조, 이상조류, 빈산소수괴 등 다양한 자연재해의 영향을 받아왔다. 이 가운데 가장 큰 피해를 초래한 요인은 고수온으로, 같은 기간 전체 피해액 4,763억 원 중 약 3,472억 원(73%)을 차지한 것으로 집계되었다(NIFS, 2025). 이는 기후변화로 인한 피해가 이미 현실화하였음을 보여주며, 향후 해조류 양식업의 지속 가능한 발전을 위해 국가 및 지자체 그리고 양식업계 차원의 적극적인 대응과 적응 전략 마련이 시급함을 의미한다. 향후에는 수온뿐만 아니라 염분, pH, 영양염 등 다양한 해양환경 요

인과 품종별 최적 성장 온도 범위가 단순한 문헌상의 수치가 아닌, 양식 시기나 서식 계절에 따라 변동하는 생물학적 정보를 포함하여 기후변화 예측모델과 위험 평가에 통합적으로 고려할 수 있도록 하고, 품종 간 생태적 연계성과 지역별 시장 구조까지 반영한 정교한 분석으로 확장될 필요가 있다. 이러한 다차원적 접근은 기후변화 피해 예측의 정밀도를 향상시킴과 동시에 해조류 양식업의 회복력을 강화하고, 적응 및 대응 정책의 실효성을 높이는 데 크게 기여할 수 있을 것이다.

Reference

- Ahmed N, Thompson S, Glaser M. 2019. Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environ Manage* 63: 159-172. doi: 10.1007/s00267-018-01139-3
- Australian Government. 2006. Climate change impacts & risk management: A guide for business and government. Canberra, Australia: Australian Government. p. 73.
- Bondad-Reantaso MG, Arthur JR, Subasinghe RP. 2008. Understanding and applying risk analysis in aquaculture. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Brander K, Cochrane K, Barange M, Soto D. 2017. Climate change implications for fisheries and aquaculture. In: Barange M, Bahri T, Beveridge MCM, Cochrane KL, Funge-Smith S, Poulain F (eds). Climate change impacts on fisheries and aquaculture: A global analysis. Wiley. p. 45-62. doi: 10.1002/9781119154051.ch3.
- Collins C, Bresnan E, Brown L, Falconer L, Guilder J, Jones L, Kennerley A, Malham S, Murray A, Stanley M. 2020. Impacts of climate change on aquaculture. *MCCIP Sci Rev* 2020: 482-520. doi: 10.14465/2020.arc21.aqu.
- Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA). 2012. UK climate change risk assessment: Government report. London, UK: The Stationery Office.
- Findlay HS, Feely RA, Jiang LQ, Pelletier G, Bednaršek

- N. 2025. Ocean acidification: Another planetary boundary crossed. *Glob Change Biol* 31: e70238. doi: 10.1111/gcb.70238.
- Han IS, Lee JS. 2020. Change of annual amplitude of sea surface temperature due to climate change in a recent decade around the Korean Peninsula. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 26: 233-241. doi: 10.7837/kosomes.2020.26.3.233
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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, UK and New York, NY: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023. Summary for policymakers. In: Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC. p. 1-34. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Islam MJ, Kunzmann A, Slater MJ. 2022. Responses of aquaculture fish to climate change-induced extreme temperatures: A review. *J World Aquac Soc* 53: 314-366. doi: 10.1111/jwas.12853
- Jung PG, Kim BT. 2024. Analysis of climate change impacts on Manila clam production and associated economic damage costs in South Korea (in Korean with English abstract). *J Clim Change Res* 16: 377-388. doi: 10.15531/KSCCR.2025.16.3.377
- Kim BT, Han IS, Lee JS, Kim DH. 2021. Impact of seawater temperature on Korean aquaculture under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Aquaculture* 542: 736893. doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.736893
- Kim C, Lee JS, Yang JY, Han IS. 2024a. Dynamic downscaling for regional ocean climate modeling around the Korean Peninsula and its application in fisheries. *Korean J Fish Aquat Sci* 57(2): 177-185. doi: 10.5657/KFAS.2024.0177
- Kim MJ, Han IS, Lee JS, Kim DH. 2024b. A climate change risk assessment in aquaculture in Korea. *Clim Change* 177: 93. doi: 10.1007/s10584-024-03758-7
- Korean Statistical Information Service (KOSIS). 2025. Fishery production survey; [accessed 2025 Jul 20]. <https://kosis.kr/>
- Lee JS, Kwon MO, Ahn JS, Park MH, Song JY, Han IS, Jung RH. 2022. Characteristics of high water temperature occurrence in coastal and inland bays of Korea during the summers of 2018-2021 (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Mar Environ Saf* 28: 753-763. doi: 10.7837/kosomes.2022.28.5.753
- Li S, Yang Z, Nadolnyak D, Zhang Y, Luo Y. 2016. Economic impacts of climate change: Profitability of freshwater aquaculture in China. *Aquac Res* 47: 1537-1548. doi: 10.1111/are.12614
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2016. Guidelines for preventing brown algae (kelp and sea mustard) damage due to marine heatwaves. Leaflet. Busan, Korea.
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2018. Standard manual of *Porphyra tenera* aquaculture. Busan, Korea.
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2022. Annual report for climate change trends in fisheries 2022. Busan, Korea.
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2025. Briefing book on climate change impacts in the fisheries and ocean sector 2025. Busan, Korea
- Pernet F, Browman HI. 2021. The future is now: Marine aquaculture in the anthropocene. *ICES J Mar Sci* 78: 315-322. doi: 10.1093/icesjms/fsaa248
- Suh D, Hwang J, Pomeroy R. 2021. Value for regional branding of seafood: Focus on seaweed in Korea. *Stud Reg Sci* 51: 37-52. doi: 10.2457/srs.51.37
- Yun YJ, Kim BT. 2023. Analysis of the costs of climate change damage to Laver and Sea Mustard aquaculture in Korea. *J Fish Bus Adm* 54: 45-58. doi: 10.12939/FBA.2023.54.2.045

Zitti M, Guttormsen AG. 2023. Climate risk and financial disclosure in salmon aquaculture. *Aquac Econ Manag* 27: 441-467. doi: 10.1080/13657305.2022.2143934