

## 마지락 생산량에 미치는 기후변화 영향과 경제적 피해 비용 분석

정필규\* · 김봉태\*\*†

\*국립부경대학교 자원환경경제연구소 연구원, \*\*국립부경대학교 해양수산경영경제학부 부교수

### Analysis of climate change impacts on Manila clam production and associated economic damage costs in South Korea

Jung, Pil-Gyu\* and Kim, Bong-tae\*\*†

\*Researcher, Institute of Resource & Environmental Economics, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Associate Professor, Division of Marine & Fisheries Business and Economics, College of Fisheries Science, Pukyong National University, Busan, Korea

#### ABSTRACT

This study investigates the relationship between climate change and Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) production in South Korea and assesses the resulting economic impacts through a comprehensive analysis. Using fixed effects panel regression models, the study evaluates key climate factors—sea surface temperature, salinity, rainfall, and tidal flat area—to quantify their effects on clam production across four major regions (Chungnam, Jeonnam, Jeonbuk, and Gyeongnam) from 2000 to 2022. Future production changes and associated economic losses are projected under Shared Socio-economic Pathway (SSP) scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5), with adjustments to account for discrepancies between observed and predicted climate data. The findings indicate that Manila clam production will decline consistently across all SSP scenarios, with maximum total production reductions and associated long-term (2041 ~ 2050) economic losses reaching 29.2% and KRW 258.8 billion under SSP1-2.6, 37.9% and KRW 335.6 billion under SSP2-4.5, and 52.0% and KRW 460.7 billion under SSP5-8.5, respectively. Among the four regions, Jeonnam was identified as the most vulnerable, followed by Gyeongnam, Jeonbuk, and Chungnam, reflecting region-specific differences in exposure and adaptive capacity. These results emphasize the extent of economic damage even with mitigation efforts, underscoring the urgent need for adaptive strategies. The study highlights the importance of high-temperature-resistant clam strains, aquaculture techniques, and region-specific management policies to sustain the Manila clam industry. Such measures will be critical to mitigating economic losses and ensuring the long-term sustainability of this valuable fisheries sector in South Korea.

Key words : Manila Clam, Climate Change, SSP Scenarios, Economic Damage Cost, Panel Regression Analysis

### 1. 서론

기후변화로 인해 전 세계적으로 극한 기후와 자연재해의 발생 빈도와 강도가 증가하고 있다. 이러한 현상은 농업생산성과 노동생산성을 저하시킬 뿐만 아니라, 금융 부문의 안정성을 약화하고, 나아가 경제 성장에 부정적인

영향을 미치는 등 전 산업 부문에 걸쳐 광범위한 위기를 초래하고 있다(Arora, 2019; Graff and Neidell, 2014; Kahn et al., 2021). 특히 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel On Climate Change)에서 2023년 발간한 제6차 평가보고서(The Sixth Assessment Report, AR6)에 따르면, 2050년까지 평균 기온이 약 2°C

†Corresponding author : [bkim@pknu.ac.kr](mailto:bkim@pknu.ac.kr) (45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea. Tel. +82-51-629-5311) ORCID 정필규 0009-0001-3955-1876 김봉태 0000-0003-1511-9365

상승할 경우, 폭염의 발생 빈도가 산업화 이전 대비 약 14배 증가할 것으로 전망하는 등 기후변화로 인한 영향은 앞으로 더욱 심화하고 규모 또한 점차 확대될 것으로 예상된다.

특히 수산업은 해양 환경에 전적으로 의존하는 특성상 기후변화의 영향을 직접적으로 받는 분야로, 이러한 예측에서 벗어나기 어렵다. 대표적인 예시로, 기후변화로 인한 고수온 현상은 어장의 복상을 유발하여 기존 어업 활동의 효율성을 감소시키고, 수산자원의 산란패턴 및 회유 경로의 변화 초래, 나아가 집단 폐사를 야기하는 등 어업 자체의 불확실성을 심화시키고 있다(Pörtner and Peck, 2010; Shoji et al., 2011). 또한 Free et al. (2019)에 의하면 기후변화로 인해 전 세계적으로 지속가능한 어획량(Sustainable catches)이 향후 약 4% 감소할 것으로 예상되며, 특히 동아시아 해역에서는 기후변화에 더해 높은 어획 강도가 복합적으로 작용함에 따라, 어획량이 약 35% 감소할 것으로 전망하였다. 이처럼 기후변화로 인해 발생하는 해양 환경 변화는 어업 생산량 감소로 직결되기에 수산업의 지속 가능성과 식량 안보 등 다각적인 측면에서 심각한 위협을 제기하고 있다.

이에 수산 부문에서도 관련 연구가 활발하게 수행되고 있는데, 기후변화가 어류 종 조성 변화에 미치는 영향을 분석하거나(Davis et al., 2020; Jung et al., 2013), 시공간 분포 특성 등을 규명하는 자연과학적 연구가 주를 이루고 있다(Bang et al., 2022).

사회과학적 측면에서는 RCP (Representative Concentration Pathways), SSP (Shared Socio-economic Pathway) 등의 기후변화 시나리오를 기반으로 향후의 어획량 변화와 이에 따른 경제적 피해액을 예측하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 전 지구적 차원의 어획량을 대상으로 한 연구를 살펴보면 Cheung et al. (2021)은 통합된 기후-생물다양성-어업-경제 영향 모델을 사용하여 전 세계 배타적 경제수역(EEZ, Exclusive Economic Zone) 내 어획량 변화를 전망하였다. 그에 따르면 기후변화 완화 노력이 거의 없는 RCP 8.5 시나리오 하에서 2060년 EEZ 내 표층 수온이 약 1.23°C 상승하여 생물량이 약 77% 감소하고, 최대 어획 잠재력이 약 6% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Oyinola et al. (2022)는 전 지구적 양식 생산 잠재력 모델(GOMAP, Global Mariculture Production Potential Model)을 적용하여 분석한 결과 강력한 기후변화 완화 노력이 수반되는 SSP1-2.6 시나리오 하에서는 2100년 약 33%가 증대한 반면 온실가스 배출이 지속해서 증가하는 SSP5-8.5 시나리

오 하에서는 양식 생산 잠재력의 약 40%, 최대 90%까지 감소할 것으로 전망하였다.

국가 단위에 연구로, Suh and Pomeroy (2020)는 연산 가능일반균형(CGE, Computable General Equilibrium) 모델을 사용하여 필리핀 해면어업에 미치는 기후변화의 영향을 분석하여 2060년 어업 GDP는 RCP 2.6과 RCP 8.5 시나리오 하에서 각각 약 9.27%, 17.65% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Kim (2023)은 기후변화에 따른 국내 연안어업의 어획량 변화와 그에 따른 경제적 영향을 산출한 결과, SSP 2-4.5 시나리오 하에서는 어획 금액이 증가하지만, SSP 5-8.5 시나리오에서는 장기적으로 약 2,932억 원의 경제적 피해가 발생한다고 예측하였다.

그런데, 기후변화가 수산자원에 미치는 영향은 상업적으로 큰 비중을 차지하는 어류에 국한되어 논의되는 경향이 있다. 최근 해조류가 블루카본 흡수원으로서 주목받으며 관련 연구가 일부 진행되고 있지만 패류를 대상으로 분석한 연구는 현재까지 찾아보기 어렵다. 이러한 배경하에 본 연구에서는 우리나라에서 상업적 중요성이 높은 패류 중 하나인 바지락을 대상으로 기후변화와 바지락 생산량 간의 상관관계를 규명한 후 SSP 시나리오를 기반으로 미래 생산량 변화와 그에 따른 피해 경제적 피해 비용을 추정하고자 한다. 특히 바지락의 경우 최근 집단 폐사 사례가 빈번히 보고되고 있는 만큼 기후변화와 생산량 간의 관계를 실증적으로 확인하는 것은 시의적절하다고 판단된다. 그리고, 피해 비용을 추정함으로써 지역별 기후변화 대응 관련 정책 수립에 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

본고의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 II장에서는 기후변화 및 바지락 생산 현황을 살펴보고, III장에서는 기후변화가 바지락 생산량에 미치는 영향을 규명하기 위한 분석 자료와 방법론을 소개한다. 이후 IV장에서는 분석 결과 제시와 더불어 미래 생산량을 예측하고, 마지막 V장에서는 연구 결과 요약과 더불어 분석 함의를 제시하고자 한다.

## 2. 바지락 생산량 동향 및 기후변화 영향

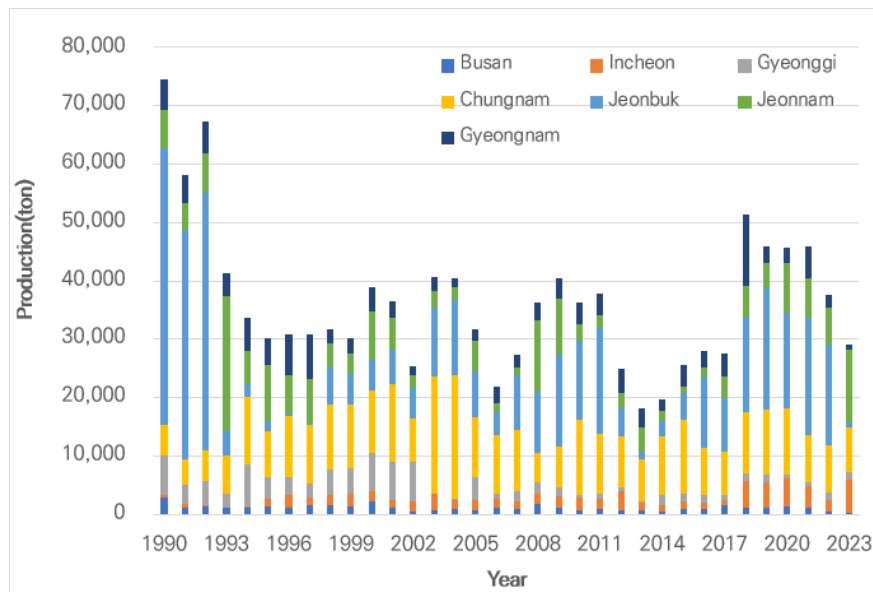
### 2.1. 바지락 생산량 동향

바지락은 국내 조간대 서식 패류 중 가장 많은 생산량을 기록하는 종으로 단순한 수산물의 범주를 넘어 산업적으로 높은 경제적 가치를 지닌 핵심 수산자원 중 하나로 평가받고 있다. 특히 2020~2023년 생산량의 평균 해역

Table 1. Manila clam production by region in South Korea (2020 ~ 2023)

(Unit: ton, %)			
Sea	Region	Production	Ratio
West Sea	Jeonbuk	16,365	38.1
	Chungnam	9,088	21.2
	Incheon	4,118	9.6
	Gyeonggi	933	2.2
Total		30,504	71.1
South Sea	Jeonnam	8,803	20.5
	Gyeongnam	2,817	6.6
	Busan	780	1.8
Total		12,400	28.9
Total	42,904		100.0

Source: KOSIS



Source: KOSIS

Fig. 1. Trends in the regional Manila clam production from 1990 to 2023

별 생산 비율을 살펴보면, 전라북도과 충청남도 등의 서해안 지역이 전체 생산량의 약 71%를 차지하며, 서해안 어촌의 경제 기반을 뒷받침하는 주요 소득원으로 기능하고 있다(Table 1).

그러나 현재 국내 바지락 산업은 연안 지형 변화와 양식 환경 악화 등의 이유로 생산량이 감소하는 등 어려움에 직면해 있다. 국내 총 바지락 생산량을 살펴보면 1990년대 초반 최대 약 7만 5천 톤을 기록한 이후 전반적으로 감소하고 있다(Fig. 1). 이는 주요 천해양식 생산지인 전라

북도와 전라남도 지역에서의 갯벌 매립으로 인한 서식지 면적 감소와 더불어 고수온으로 인한 대량 폐사 등이 복합적으로 작용한 결과로 추정되고 있다(Nam et al., 2018; Song, 2015). 이러한 복합적인 요인으로 인해 2000년대 이후 바지락 생산량은 연평균 약 3만 4천 톤 수준으로 감소하였다. 2018년에는 이례적으로 생산량이 약 5만 톤 수준으로 회복하며 일시적인 반등을 보였으나, 이후 다시 감소세로 전환되면서 바지락 생산 안정성이 크게 저하된 상황이다.

## 2.2. 기후변화 영향

바지락은 이매패류의 특성상, 어류에 비해 이동성이 제한적이기에 급격한 환경 변화에 더욱 취약한 종이다. 대표적으로, 수온과 염분은 해양생물의 생리적 과정에 영향을 미치는 주요 물리적 요인으로, 이들 요인의 급격한 변화는 바지락 개체의 스트레스를 유발하고 생존을 저하할 것으로 알려져 있다(Rato et al., 2022)

국내에서는 이미 환경 변화로 인한 바지락 집단 폐사 사례가 이미 다수 보고되고 있다. 특히 이러한 폐사 사례는 서해안 지역 조간대에 위치한 양식장에서 집중적으로 보고되고 있으며, 국립수산과학원은 급격한 수온 변화, 저질 환경의 변화 등을 폐사의 주원인으로 지목한 바 있다(NFRDI, 2010). 또한 2015년 전라북도 일원에서 발생한 바지락 대량 폐사는 고수온 상온으로 인한 생리적 스트레스와 바지락포자충(*Perkinsus olseni*)의 감염이 상호작용한 결과로 규명되었다(Nam et al., 2018).<sup>1)</sup> 또한 최근 2024년 충남 서산의 가로림만에서는 양식장 면적의 70%가 넘는 약 643ha에서 바지락이 집단 폐사가 발생한 바 있으며, 명확한 원인은 규명되지 않았으나 기후변화로 인한 고수온 현상이 주원인으로 추정되고 있다.

전술한 사례들은 기후변화로 인한 환경 변화가 바지락 양식산업에 영향을 미치고 있음을 명확히 보여주고 있다. 미래 전망 또한 그다지 밝지 않은 실정이다. 기후변화가 현재의 추세대로 진행된다는 RCP 8.5 시나리오에서 국내 연근해 수온은 최대 4.0℃ 상승할 것으로 전망되었다(NFRDI, 2022). 특히 바지락 생산량이 높은 서해안 지역은 전 세계 평균 상승 폭보다 약 0.1~0.5℃ 더 높을 것으로 예상되는 만큼, 고수온으로 인한 피해사례는 더욱 빈번해질 것으로 예상된다.

## 3. 분석방법 및 자료

### 3.1. 분석 자료

#### 3.1.1. 예측 모형 설정을 위한 자료

본고는 기후변화가 국내 바지락 생산에 미치는 영향을 정량화하기 위해, 2022년 기준 전체 생산량의 약 90%를 차지하는 주요 생산지인 전북(46%), 충남(22%), 전남

(16%), 경남(6%) 등, 네 지역의 2000년부터 2022년까지 연간 바지락 생산량 자료를 종속변수로 사용하였다.<sup>2)</sup> 기후요인 변수로는 지역별 표층 수온, 표층 염분, 강수량 및 갯벌 면적 등을 사용하여 패널자료를 구성하였다. 표층 수온과 염분은 바지락을 포함한 해양생물에 성장과 생존에 핵심적인 영향을 미치는 변수로, 그 중요성은 다양한 선행 연구를 통해 널리 입증되어 왔다(Munari et al., 2011). 강수량의 경우 직접적인 해양 변수는 아니나, 담수 유입량의 증가는 조간대의 염분 농도와 수질 특성의 변화를 유발할 수 있으며, 이는 바지락의 생리 활동에 간접적인 영향을 줄 수 있다(Bac et al., 2021). 갯벌 면적은 바지락의 주요 서식 공간을 나타내는 변수로 생산량에 미치는 영향이 명확하기에 분석에 포함하였다. 마지막으로, 바지락 생산에 큰 영향을 미쳤을 것으로 사료되는 2007년 허베이 스피릿호 원유 유출 사고를 가변수(Dummy Variable)로 분석에 반영함으로써 현실성을 높이고자 하였다.

보다 구체적으로 지역별 바지락 생산량은 통계청의 어업생산동향조사 자료를 사용하였으며, 지역별 수온과 염분의 경우 바지락 생산량 자료와 동일한 기간의 국립해양조사원 실시간 해양관측정보시스템(KOOPS, Korea Ocean Observing and Forecasting System)의 자료를 활용하였다. 다음으로 강수량은 기상청(KMA, Korea Meteorological Administration), 갯벌 면적은 해양환경정보 포털(MEIS, Marine Environmental Information System)의 자료를 분석에 사용하였다(Table 2).

#### 3.1.2. 분석 자료의 기초 통계량

분석 자료의 기초 통계량은 Table 3과 같다. 상기 기간의 지역별 연간 평균 바지락 생산량은 약 7,244톤이고, 전

Table 2. Sources of data

Variables	Unit	Source
Production	ton	KOSIS
Surface temperature	℃	KOOPS
Surface salinity	psu	KOOPS
Rainfall	mm	KMA
Tidal flat area	km <sup>2</sup>	MEIS

1) 바지락포자충은 연체동물의 기생하는 원생동물로, 개체 내 아가미와 내장 조직 등에 침투하여 호흡 활동을 저해함. 또한, 고수온 환경에서 감염률 또는 감염도가 높게 나타나는 것으로 알려짐

2) 2023년 생산량 자료의 경우 특정 지역에서 비정상적으로 낮은 값이 관측되어 분석에서 제외하였음

Table 3. Descriptive statistics of the data

Variables	Category	Mean	Std. Dev.	Min	Max	Observations
Production (ton)	Overall	7,243.98	5,138.63	1,206.00	21,137.00	92
	Between	-	3,854.82	3,439.17	10,671.26	4
	Within	-	3,890.79	-2,221.28	17,924.59	23
Surface temperature (°C)	Overall	16.08	1.50	12.25	17.41	92
	Between	-	1.47	13.89	16.09	4
	Within	-	0.78	14.15	16.69	23
Surface salinity (psu)	Overall	31.26	1.34	28.03	33.38	92
	Between	-	1.29	29.47	32.43	4
	Within	-	0.73	28.94	32.84	23
Rainfall (mm)	Overall	1,361.10	337.02	785.40	2,137.70	92
	Between	-	170.99	1,175.41	1,543.20	4
	Within	-	302.34	736.55	2,172.50	23
Tidal flat area (km <sup>2</sup> )	Overall	395.30	389.06	59.0	1,054.10	92
	Between	-	446.51	73.37	1,040.19	4
	Within	-	13.91	350.69	413.79	23

북 및 충남 지역에서의 생산량이 전남 및 경남 지역에 비해 월등히 많기에 개체(지역)간 표준편차가 크게 나타난 것으로 풀이된다. 그렇지만 개체(지역)내 표준편차도 비슷한 수준이어서 같은 지역에서도 시점별로 생산량 격차가 큰 것으로 볼 수 있다. 상기 지역들의 평균 표층 수온과 염분은 비교적 표준편차가 작았고, 강수량과 갯벌 면적은 지역별 특성상 표준편차가 큰 것으로 나타났다. 한편, 주요 기후요인 중 바지락 생장에 핵심적인 영향을 미치는 표층 수온과 염분의 연도별 변화를 지역별로 살펴보면 Fig. 2와 같다. 충남은 다른 지역에 비해 수온과 염분 수준이 전반적으로 낮았으나, 모든 지역에서 두 변수는 공통으로 완만한 증가 추세를 보이는 것으로 나타났다.

3.1.3. 미래 생산량 예측을 위한 기후변화 시나리오

본고에서는 미래 생산량 예측을 위해 기상청 기후정보 포털에서 제공하는 ‘전지구 기후전망’ 자료 중 표층 수온과 염분의 자료를 사용하였다. 해당 자료는 IPCC 제6차 평가보고서에 대응하고 국내 기후변화 정책 등을 위해 기존 대표농도 경로(RCP)를 공통 사회경제 경로(СПS)와 결합한 자료로, 1850~2014년의 과거 재현 값과 시나리오별로 2015~2100년의 미래 전망 값을 월 단위로 추출할 수 있다.

SSP 시나리오의 경우 기후변화에 대한 완화 및 적응 노력에 따라 5개의 그룹으로 분류된다(O'Neill et al., 2017). 본고에서는 통상적으로 사용되는 SSP1-2.6, SSP2-4.5,

SSP5-8.5 총 3개의 시나리오만을 대상으로 분석을 시행하였으며 각 시나리오의 정의는 Table 4와 같다.

한편, SSP 시나리오별 전 해역 평균 표층 수온 및 염분 값의 예측값은 각각 Fig. 3과 같다. 표층 수온의 경우 모든 시나리오에서 상승하는 것으로 전망되며, 2050년을 기점으로 점차 격차가 심화하여 향후 최대 3°C 이상 차이가 날 것으로 예상된다. 반면 표층 염분의 경우 모든 시나리오에서 낮아질 것으로 전망된다. 특히 바지락은 외부 환경 조건 중 표층 수온과 염분의 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있기에 이러한 변화는 생산량에 영향을 미칠 것으로 예상된다(Kim and Ko, 2004).

3.2. 분석 방법

3.2.1. 패널 회귀분석

본고에서는 기후요인과 바지락 생산량 간의 상관관계를 패널 회귀모형으로 분석한다. 패널자료를 이용한 실증 분석은 다음과 같은 장점이 있다(Baum, 2006). 첫째, 횡단면과 시계열 자료를 결합함으로써 관측치의 수를 충분히 확보하여 한층 신뢰성 있는 추정치를 산출할 수 있다. 둘째, 누락변수(Omitted variable) 문제를 감소시킬 수 있으며, 다중공선성 문제를 최소화할 수 있다. 셋째, 패널 회귀 모형은 지역 간 이질성과 시간에 따른 변화를 통제할 수 있어, 기후요인이 바지락 생산량에 미치는 영향을 더욱 엄밀하게 추정할 수 있다. 패널 회귀분석의 경우 오차항

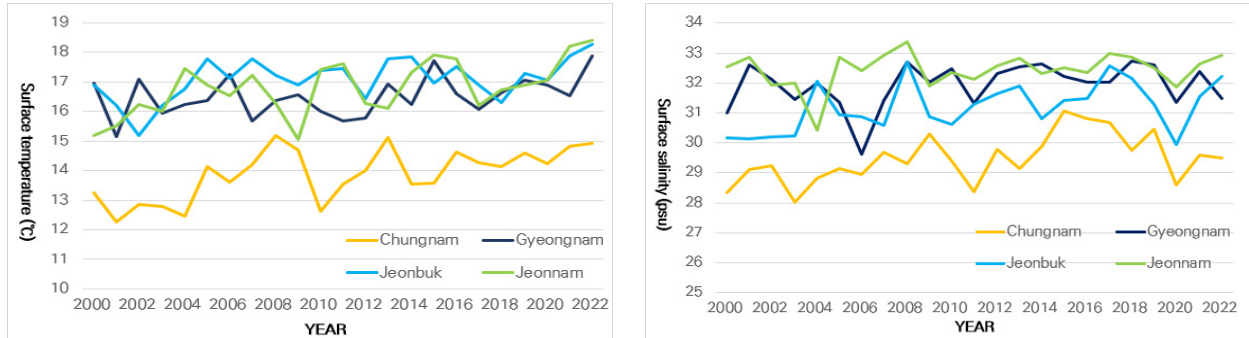


Fig. 2. Annual regional trends in surface temperature (left) and salinity (right) from 2000 to 2022

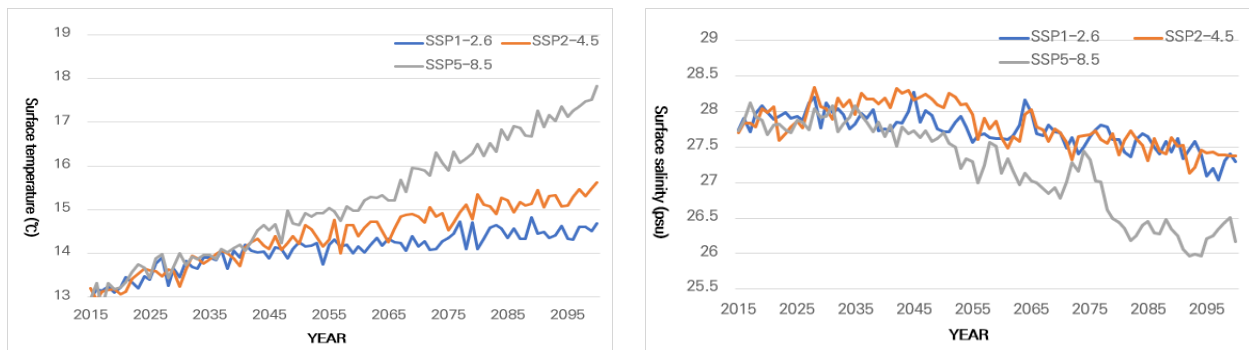


Fig. 3. Future projections of surface temperature (left) and salinity (right) under SSP scenarios

Table 4. Definition of SSP scenarios

Scenario	Definition
SSP1-2.6	A sustainable green growth pathway with net-zero emissions after 2050, followed by net-negative emissions
SSP2-4.5	A moderate growth pathway with emissions remaining at current levels until the mid-21st century
SSP5-8.5	A fossil fuel-based growth pathway with emissions doubling compared to current levels after 2050

의 통계적 특성을 어떻게 가정하느냐에 따라 고정효과모형(Fixed Effect Model) 또는 확률효과모형(Random Effect Model)으로 나뉘는데, 지역에 따른 특성을 효과적으로 통제하기 위해 식 (1)과 같은 패널 모형을 구성하여 고정효과 모형으로 분석을 시행하였다.

$$\begin{aligned}
 Production_{i,t} = & \alpha + \beta_1 ST_{i,t} + \beta_2 ST_{i,t}^2 + \\
 & \beta_{3,j} ST_{i,t} \times Region_j + \beta_4 SA_{i,t} + \beta_5 SA_{i,t}^2 + \\
 & \beta_6 Tidal\ flat_{i,j} + \beta_7 RN_{i,j} + \beta_8 Oilspill_{i,t} \\
 & + \mu_i + \epsilon_{i,t}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ST (Surface temperature): 표층수온  
 SA (Surface salinity): 표층염분  
 Tidalflat: 갯벌 면적, Rn (Rainfall): 강수량,  
 Oilspill: 2007년 태안 기름 유출 사고 가변수

식 (1)에서  $Production_{i,t}$ 는 마지막 생산량을 나타내는 종속변수이며,  $i$ 는 생산 지역을  $t$ 는 시간을 의미한다. 이때,  $\mu_i$ 는 지역  $i$ 의 고유한 불변 특성을 나타내는 요소로, 지역적 특성을 통제하는 고정효과 모형을 적용하기 위해 포함되었다.  $\epsilon_{i,t}$ 는 시간  $t$ 에 따라 변화하는 오차항으로, 측

정되지 않은 외부 요인이나 누락된 변수의 영향을 포함하며, 독립변수와 통계적으로 독립적이라고 가정된다. 이와 더불어 표층 수온과 염분 변수는 비선형적인 관계를 가정하기 위해 제곱 항을 포함하였으며, 표층 염분에 비해 기후변화로 인한 변화 속도가 상대적으로 빠른 것으로 알려진 표층 수온에 대해서는 지역별 차이를 살펴보기 위해 교차항( $ST_{i,t} \times Region_j$ )을 분석에 반영하였다.

3.2.2. 생산량 예측 및 피해 비용 산정

기후요인과 바지락 생산량 간의 상관관계가 추정된 이후, SSP 시나리오별로 단기(2024 ~ 2030년), 중기(2031 ~ 2040년), 장기(2041 ~ 2050년)의 기후요인의 예측값을 적용하여 생산량 변화분을 산정하였다.

생산량 변화분 예측에 앞서 기상청에서 제공하는 2000 ~ 2014년 SSP 시나리오 실측값과 본고에서 사용한 국립해양조사원 자료 간의 기준점 차이를 보정할 필요가 있었다.<sup>3)</sup> 이에 따라 실측 기간(2000 ~ 2014년) 동안 두 자료 간 연도별 차이의 절댓값을 산출하고, 그 평균값 보정값으로 적용하였다.

이러한 편차는 지역마다 다르게 나타났기에, 동일한 방식으로 지역별 보정값을 각각 산출하여 적용하였다. 예측값 보정 이후 추정된 계수값을 기반으로 표층 수온과 염분의 변화에 따른 생산량 변화분은 아래 식 (2)로 계산할 수 있다. 식 (2)에서  $\Delta Production_{i,t}$ 는 기준 시점인 2013 ~ 2022년 평균 생산량과 미래 t 시점의 생산량 간의 차이인 생산량의 변동 값을 의미한다. 이와 마찬가지로  $\Delta ST_{i,t}$ ,  $\Delta ST_{i,t}^2$ ,  $\Delta SA_{i,t}$ ,  $\Delta SA_{i,t}^2$ 는 각각 표층 수온과 염분, 각 제곱 항의 변동 값이다.

$$\Delta Production_{i,t} = \beta_1 \Delta ST_{i,t} + \beta_2 \Delta ST_{i,t}^2 + \beta_3 \Delta SA_{i,t} + \beta_4 \Delta SA_{i,t}^2 \quad (2)$$

기후변화에 따른 피해 비용은 상기 생산량 변동 값에 기초한 생산 금액의 감소분으로 산정하였다. 그런데 미래 수요와 공급의 상황을 현시점에 가정하여 가격 변화를 예측하기에는 어려움이 있기에, 본 연구에서는 기준 시점(2013 ~ 2022년)의 가격이 유지된다는 가정하에 생산 금액 감소분을 피해 비용으로 산정하였다.

4. 분석 결과

4.1. 기후요인과 바지락 생산량 상관관계

바지락 생산량에 대한 회귀모형 추정 결과는 Table 5와 같다. 분석 결과, 갯벌 면적, 표층 수온, 표층 염분과 생산량 간의 체증 또는 체감의 관계를 파악하기 위해 추가한 제곱 변수는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

우선 갯벌 면적의 증대는 바지락 생산량에 양(+)의 방향으로 유의하여 면적이 1 ha 넓어지면 생산량이 약 19.83톤 증가하는 것으로 나타났다. 바지락의 주 서식지가 갯벌임을 고려할 때, 갯벌 면적 증가가 생산량 증가로 직결되는 점은 직관과 일치한다.

표층 수온 및 염분과 바지락 생산량은 일차항에서는 음(-)의 관계이나 제곱항에서는 양(+)의 관계로 나타났다. 두 항의 부호가 상반된다는 점은 두 기후요인과 바지락 생산량 간의 관계가 단순히 선형이 아닌 곡선 형태의 비선형 구조를 지니고 있음을 시사한다. 이에 따라 임계값(Critical Value)을 기준으로 표층 수온, 염분과 바지락 생산량 간의 상관관계를 평가할 수 있다. 분석 결과 표층 수온과 염분의 임계값은 각각 17.51°C, 30.87 psu로 추정되었으며, 바지락 생산량은 두 변수에 대해 U자형 관계가 성립하였다(Fig. 4). 이는 즉 표층 수온과 염분이 임계값에 도달하기 전까지는 생산량이 체감하지만, 임계값을 초과하면 생산량이 체증하는 관계를 의미한다.

도출된 임계 수온 17.51°C는 연평균 표층 수온을 기준으로 산출된 값으로, 기존 연구에서 제시된 바지락의 최적 성장 수온 범위(약 18 ~ 20°C)보다는 다소 낮다(Bae et al., 2021; Han et al., 2008). 이는 분석 기준의 차이에 기인한 결과로, 기존 연구들은 일정 수온 조건에서 개체 생장률 또는 생리 반응을 측정된 반면, 본고는 연중 평균 수온이라는 장기적 수온 노출 조건을 기반으로 지역 단위 생산량 변화의 방향성을 파악하였다. 따라서 임계값은 개체 수준의 생리 반응 한계치를 의미하기보다는, 바지락 생산량이 수온 변화에 구조적으로 반응하는 전환점으로 해석할 수 있다.

현재 충남, 전북, 전남, 경남 지역의 연평균 표층 수온은 임계값인 17.51°C를 초과하지 않기에, 바지락 생산량은 표층 수온에 대해 2차식의 체감하는 관계라고 해석된

3) 기상청에서 제공하는 SSP 시나리오 기반 기후자료와 국립해양조사원 자료는 측정 지점 등 공간 단위 차이로 인해 기준값에 편차가 존재함. 일례로, 기상청에서 제공하는 충남 지역의 2000 ~ 2014년 평균 수온은 10.21°C, 국립해양조사원 자료는 13.62°C로 약 3.41°C의 차이가 있으며, 염분 역시 약 0.96 psu 편차가 존재함

Table 5. Estimation results of the fixed effects model for Manila clam production

Variable	Coefficient	Std. Error	t-value
Surface temperature	-11,948.79***	3,490.16	-3.42
Surface temperature squared	341.24***	109.03	3.13
Surface salinity	-28,771.97***	10,064.91	-2.86
Surface salinity squared	465.99***	162.28	2.87
Rainfall	-0.45	0.82	-0.55
Tidalflat	19.83**	9.35	2.12
Oil-spill Event	-865.05	2,433.67	-0.36
Surface Temp×region 1	-12.93	14.41	-0.90
Surface Temp×region 2	-68.61**	32.61	-2.10
Surface Temp×region 3	-21.26***	5.27	-4.03
Constant	567,123.1	163,173.9	3.48
R <sup>2</sup> (Within)		0.71	

\*Region 1, 2 and Region 3 refer to Chungnam, Jeonnam and Jeonbuk respectively, and with Gyeongnam as the reference region.

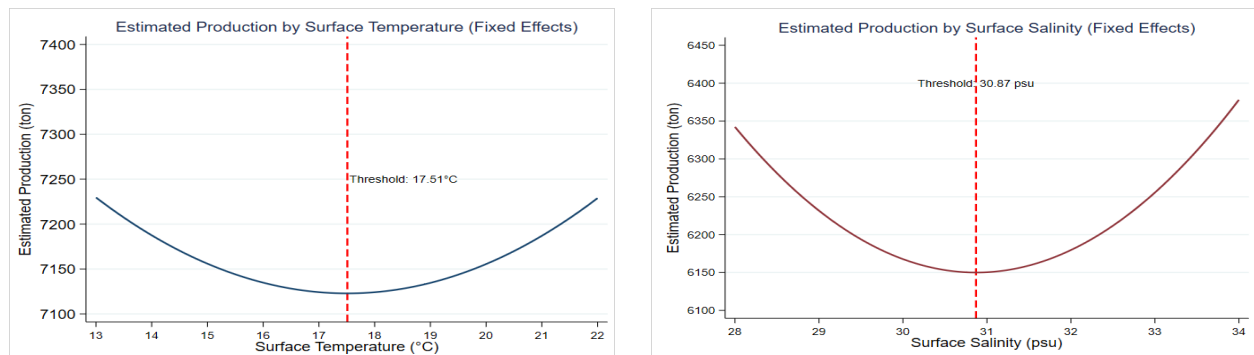


Fig. 4. Nonlinear relationship between surface temperature (left) and salinity (right) on estimated production

다. 그리고, 충남 지역을 제외한 지역의 표층 염분은 임계값인 30.87 psu보다 높은 수준에 분포해 있기에, 기후변화로 염분이 하락하여 임계값에 가까워질수록 바지락 생산량이 감소하는 경향을 보였다.

지역별 수온 교차항의 계수를 살펴보면 충남 지역은 통계적으로 유의하지 않기에 기준 지역인 경남(Region 4) 지역에 비해 효과가 명확하지 않았다. 그러나 전남과 전북 지역의 경우, 표층 수온의 상승은 경남 지역에 비해 생산량에 더욱 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 지역별 서식지 특성에 따른 바지락의 환경 적응 능력의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 일례로 전북 곰소만에 서식하는 바지락을 대상으로 한 Shin et al. (2000)의 연구에 따르면, 서식 환경의 온도가 높을수록 바지락의 최대 임계온도(Upper Critical Temperature)가 높아지는 경향을 확인하였다. 이는 고수온 환경에 서식하는 바지락

은 수온 변화의 비교적 큰 내성을 가지는 반면 저수온 지역에 서식하는 바지락은 수온 상승에 더 민감하게 반응할 수 있음을 의미한다. 일반적으로 전남 및 전북 지역의 평균 표층 수온은 경남 지역에 비해 낮은 점을 고려할 때, 동 지역의 서식하는 바지락이 수온 상승에 더욱 민감하게 반응했을 가능성이 크다. 또한 경남 지역의 갯벌은 주로 조간대로 구성되어 다양한 환경변화에 상시 노출되어 있지만 전남 및 전북 지역의 갯벌은 평탄한 해안선과 더 얇은 수심을 가진 경우가 많기에 환경변화에 따른 스트레스가 다를 수 있다(Choi, 2014). 이는 전남 및 전북 지역에 서식하는 바지락이 고수온에 상대적으로 더 취약한 점을 시사하지만, 이에 관해서는 자연과학적인 근거를 통한 해석이 보완되어야 할 것으로 사료된다.

4.2. SSP 시나리오별 생산량 변화분 예측

패널 회귀분석 결과와 SSP 시나리오별 기후요인의 미래 예측값 결과를 기반으로 바지락 생산량의 변화분을 단기(2024~2030년), 중기(2031~2040년), 장기(2041~2050년) 기간으로 세분화하여 예측하였다(Table 6). 분석 결과, 바지락 생산량 변화분은 시나리오와 무관하게 2013~2022년 평균 생산량 대비 생산량이 향후 지속적인 감소가 예측되었다. 이러한 결과는 기후변화로 인한 갯벌 환경의 변동 및 어장 노후화 등으로 인해 바지락 생산량이 감소하는 현 추세와 일치하며, 이러한 추세는 앞으로도 점차 심화될 가능성이 큼을 시사한다.

시나리오별에 따른 생산량 변화분은 상이하였는데 친 환경 발전을 추구하고 강력한 온실가스 배출 노력이 수반

되는 SSP1-2.6에서는 장기에서 최대 약 29.2%가 감소한 반면, SSP 2-4.5, SSP5-8.5 시나리오 하에서는 각각 최대 37.9%, 52.0%까지 감소할 것으로 전망되었다.

지역별 바지락 생산량 변화 양상을 살펴보면, SSP 1-2.6 시나리오 하에서 충남 지역의 단기 시점을 제외하고는 모든 지역, 시점에서의 생산량이 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 다만, 지역별 감소 폭에는 차이가 있는 것으로 분석되었다. 우선, 전남 지역의 장기 시점 기준의 감소 폭은 시나리오별로 각각 75.7%, 82.8%, 95.6%로 기후변화에 가장 취약한 지역으로 나타났다. 반면, 충남 지역은 감소폭이 각각 15.1%, 27.9%, 32.6%로 가장 적어, 상대적으로 영향을 덜 받는 것으로 예상되었다(Table 6). 이는 전술한 바와 같이 지역별 특성에 기인한 것으로 판단되며, 전남, 경남, 전북, 충남 순으로 기후변화에 취약하

Table 6. Prediction of changes and rates of change in Manila clam production according to scenarios

(Unit: Thousand tons, %)

	Basis production	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		Short	Mid	Long	Short	Mid	Long	Short	Mid	Long
Total	29.4	-3.4 (-11.7)	-6.0 (-20.5)	-8.6 (-29.2)	-4.4 (-15.1)	-7.9 (-26.7)	-11.1 (-37.9)	-6.9 (-23.6)	-9.8 (-33.8)	-15.3 (-52.0)
Chungnam	9.0	0.2 (2.3)	-0.4 (-4.1)	-1.4 (-15.1)	-0.8 (-9.0)	-1.7 (-18.8)	-2.5 (-27.9)	-1.4 (-15.2)	-2.0 (-21.9)	-2.9 (-32.6)
Jeonnam	4.2	-2.0 (-48.3)	-2.8 (-66.8)	-3.2 (-75.7)	-1.4 (-32.7)	-2.8 (-68.0)	-3.4 (-82.2)	-2.2 (-53.1)	-3.0 (-71.2)	-4.0 (-95.6)
Jeonbuk	12.1	-1.3 (-10.6)	-2.0 (-16.5)	-2.7 (-22.6)	-1.7 (-14.1)	-2.4 (-19.5)	-3.7 (-30.9)	-2.6 (-21.2)	-3.1 (-25.5)	-5.8 (-47.7)
Gyeongnam	4.1	-0.4 (-8.7)	-0.9 (-21.3)	-1.3 (-32.5)	-0.6 (-13.8)	-1.0 (-23.7)	-1.5 (-35.4)	-0.8 (-18.9)	-1.8 (-43.3)	-2.6 (-63.0)

<sup>†</sup>Short, Mid and Long refer to 2024~2030, 2031~2040 and 2041~2050, respectively.

<sup>\*\*</sup>Values outside parentheses represent changes in production volume, while values in parentheses indicate the rate of change (%).

Table 7. Estimation of climate change damage cost for Manila clams

(Unit: one hundred million Won)

	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
	Short	Mid	Long	Short	Mid	Long	Short	Mid	Long
Total	-103.7	-181.8	-258.8	-133.9	-237.0	-335.6	-209.0	-295.7	-460.7
Chungnam	6.3	-11.2	-41.0	-24.4	-51.0	-75.7	-41.3	-59.4	-88.3
Jeonnam	-60.6	-83.8	-95.0	-41.0	-85.3	-103.1	-66.6	-89.2	-120.0
Jeonbuk	-38.6	-60.3	-82.3	-51.3	-71.2	-112.8	-77.5	-93.2	-174.0
Gyeongnam	-10.9	-26.5	-40.5	-17.2	-29.6	-44.0	-23.5	-54.0	-78.4

<sup>†</sup>Short, Mid and Long refer to 2024~2030, 2031~2040 and 2041~2050, respectively.

다는 결과를 제시한 Lee et al. (2011)의 연구 결과와 전반적으로 합치하는 결과이다. 특히 전남 지역 중 바지락 주요 산지인 고흥, 신안 등이 모두 기후 노출 수준은 높고 적응 역량은 낮은 고위험 지역으로 분류된 바 있으며, 이러한 구조적 취약성이 생산량 감소 폭을 심화시킨 요인 중 하나로 작용한 것으로 판단된다(Kim and Kim, 2012).

#### 4.3. 기후변화 피해 비용 산정

SSP 시나리오별 바지락 생산량 감소분에 대해 2013~2022년의 월별 kg당 평균 가격인 3,015원을 대입하여 합산한 결과, 기후변화로 인한 피해 비용은 Table 7과 같다. 피해 비용 산정 결과, 시나리오별 순으로 각각 약 104~259억 원, 약 134~336억 원, 약 209~461억 원의 경제적 손실이 발생할 것으로 예상되었다. 지역별 피해 비용을 살펴보면, 생산량 감소분의 결과와 비례하는 양상을 보여 충남의 피해 비용이 가장 적었으며, 전남의 피해 비용이 가장 클 것으로 예상되었다.

### 5. 요약 및 결론

최근 고수온 현상이 점진적으로 심화함에 따라 바지락 집단 폐사 사례가 빈번히 보고되고 있다. 이러한 현상은 바지락 생산량 감소로 직결되기에 바지락 소비량의 상당 부분을 수입에 의존하고 있는 국내 상황을 더욱 악화시킬 가능성이 크다. 국내 바지락 산업을 안정적으로 영위하고 자급률을 높이기 위해서는 기후변화에 대응할 수 있는 실질적인 방안 마련이 시급한 실정이다. 이를 위해서는, 기후변화가 바지락 생산량에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고, 경제적 피해 비용을 산출하여 정책적 대응의 우선순위를 명확히 할 필요가 있다.

이에 본고에서는 표층 수온, 표층 염분, 강수량, 갯벌 면적 등의 주요 기후요인과 바지락 생산량 간의 상관관계를 패널 회귀모형으로 추정하였으며, SSP 시나리오를 기반으로 미래 기후요인의 변화에 따른 생산량 변동과 그로 인한 경제적 손실을 예측하였다. 본 연구의 분석 결과를 요약하면, SSP 시나리오와 기간에 관계없이 바지락 생산량은 지속적으로 감소할 것으로 예측되었다. 바지락 총생산량의 경우, 기준 시점 대비 SSP1-2.6 시나리오에서는 최대 11.7~29.2%가 감소하여 약 104~259억 원의 피해 비용이 발생할 것으로 전망되었다. SSP2-4.5 시나리오에서는 생산량이 15.1~37.9% 감소하여 134~336억 원,

SSP5-8.5 시나리오에서는 23.6~52.0% 감소로 209~461억 원의 피해 비용이 발생할 것으로 예측되었다. 한편, 지역별 결과는 상이하게 나타났다. 전남 지역이 기후변화에 가장 큰 영향을 받고 경남, 전북, 충남 순으로 취약할 것으로 예측되었다.

이와 같은 결과는 온실가스 배출 저감으로 기후변화를 완화하더라도 일정 수준의 바지락 생산 피해가 불가피하다는 점을 보여준다. 이는 바지락 생산량을 유지하기 위해서는 지속적인 기후변화 완화 노력과 더불어 기후변화 적응 정책이 반드시 병행되어야 함을 시사한다. 이를 위해 고수온 내성이 높은 품종 개발, 치패 채묘기술 개선과 더불어 지역별 맞춤형 대응 방안과 같은 다각적인 접근이 필요할 것으로 판단된다. 실제로 충남 지역에서는 고수온 내성이 높은 바지락 품종 개발을 시도하고 있다(Jin, 2024). 이러한 기술적 대응과 함께 지역 특성에 맞춘 정책적 지원이 병행된다면 바지락 생산량 증대와 지역 어업 경제 활성화에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

본고는 바지락 생산량과 기후변화 간의 상관관계를 규명하고, 이에 따른 피해 비용을 산정함으로써 기후변화 정책의 필요성과 정책 수립을 위한 실질적 근거를 제시한 점에서 의의가 있다. 특히 기존 연구들이 단기 고수온 노출에 따른 생리적 반응에 초점을 두었다면, 본 연구는 연간 평균 수온을 기준으로 임계값을 도출함으로써 바지락의 장기적인 서식 안정성과 생산량에 미치는 영향을 분석하였다는 점에서 차별성이 있다. 그러나, 기후변화가 1차 생산력에 미치는 영향과 더불어 최근 바지락 생산량과 밀접한 관계가 있는 것으로 규명된 갯벌 노출 시간 등을 가용 자료의 제한 등으로 인해 분석에 고려하지 못한 점에서 뚜렷한 한계가 있다. 또한, 과거 10년(2013~2022년)간의 월별 평균 가격을 기준으로 피해를 산정하였으나, 향후 가격 변수는 시장 외부 요인에 의해 단기적으로 크게 변동될 수 있으며, 공신력 있는 장기 가격 예측 자료가 부재하다는 점에서 포함하지 못하였다. 향후 이러한 관련 자료가 축적되어 자료 기반이 확대된다면 이를 바탕으로 기후변화와 바지락 생산량 간의 관계를 더욱 심층적으로 규명하고 실효성 있는 정책 대안을 제시할 수 있을 것이다.

### Reference

- Arora NK. 2019. Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *J Environ sustain* 2(2): 95-96. doi: 10.1007/s42398-019-00078-w

- Bae H, Im JB, Joo SB, Cho BH, Kim TW. 2021. The effects of temperature and salinity stressors on the survival, condition and valve closure of the Manila clam, *Venerupis philippinarum* in a holding facility. *J Mar Sci Eng* 9(7): 754. doi: 10.3390/jmse9070754
- Bang MK, Sohn DW, Kim JJ, Choi WK, Jang CJ, Kim CS. 2022. Future changes in the seasonal habitat suitability for Anchovy (*Engraulis japonicus*) in Korean waters projected by a maximum entropy model. *Front Mar Sci* 9: 922020. doi: 10.3389/fmars.2022.922020
- Baum CF. 2006. An introduction to modern econometrics using stata. STATA Press.
- Cheung WW, Frölicher TL, Lam VW, Oyinloa MA, Reygondeau G, Sumaila UR, Wabnitz CC. 2021. Marine high temperature extremes amplify the impacts of climate change on fish and fisheries. *Sci Adv* 7(40): eabh0895. doi: 10.1126/sciadv.abh0895
- Choi KS. 2014. Morphology, sedimentology and stratigraphy of Korean tidal flats - Implications for future coastal managements. *Ocean Coastal Manage* 102: 437-448. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2014.07.009
- Davis TR, Cadiou G, Champion C, Coleman MA. 2020. Environmental drivers and indicators of change in habitat and fish assemblages within a climate change hotspot. *Reg Stud Mar Sci* 36: 101295. doi: 10.1016/j.rsma.2020.101295
- Free CM, Thorson JT, Pinsky ML, Oken KL, Wiedenmann J, Jensen OP. 2019. Impacts of historical warming on marine fisheries production. *Science* 363(6430): 979-983. doi: 10.1126/science.aau1758
- Graff Z, Neidell M. 2014. Temperature and the allocation of time: Implications for climate change. *J labor econ* 32(1): 1-26. doi: 10.1086/671766
- Han KN, Lee SW, Wang SY. 2008. The effect of temperature on the energy budget of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*. *Aquacult Int* 16: 143-152. doi: 10.1007/s10499-007-9133-y
- Jin HK. 2024. Changing climate alters aquaculture species: Local governments accelerate research on regional specialized species, where is control tower? *Mon Hyundai Ocean*: 39-41
- Jung SG, Ha SM, Na HN. 2013. Multi-decadal changes in fish communities Jeju Island in relation to climate change. *Korean J Fish Aquat Sci* 46(2): 186-194. doi: 10.5657/KFAS.2013.0186
- Khan ME, Mohaddes K, Ng RN, Pesaran MH, Raissi M, Yang JC. 2021. Long-term macroeconomic effects of climate change: A cross-country analysis. *Energy Econ* 104: 105624. doi: 10.1016/j.eneco.2021.105624
- Kim BT. 2023. Analysis of climate change damage to coastal fisheries of Korea - using the SSP scenario s-. *Ocean Policy Res* 38(1): 131-151.
- Kim CW, Ko KH. 2004. Effects of water temperature and salinity on dietary feeding of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*). *Korean J Environ Health Sci* 22(1): 28-34
- Kim SM, Kim NU. 2012. A study on vulnerability assessment to climate change - Focused on 22 municipalities of JeollaNamdo. *Korean Assoc Governance* 19(2): 99-124.
- Lee BD, Kim BT, Cho YS. 2011. A study on vulnerability assessment to climate change in regional fisheries of Korea. *J Fish Bus Adm* 42(1): 57-70.
- Munari M, Matozzo V, Marin MG. 2011. Combined effects of temperature and salinity on functional responses of haemocytes and survival in air of the clam *Ruditapes philippinarum*. *Fish Shellfish Immunol* 30(4-5): 1024-1030. doi: 10.1016/j.fsi.2011.01.025
- Nam KW, Jeung HD, Song JH, Park KH, Choi KS, Park KI. 2018. High parasite burden increase the surfacing and mortality of the Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) in internal sandy mudflats on the west coast of Korea during hot summer. *Parasites Vectors* 11: 1-7. doi: 10.1186/s13071-018-2620-3
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2010. Increase in clam (*Ruditapes philippinarum*) mortality along the west coast due to abnormal weather events. NIFS Press Release, May 19, 2010. <https://www.nifs.go.kr>

- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2022. Effects of climate change on the fisheries sector and related research: 2023 Annual report. National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea.
- O'Neill BC, Kriegler E, Ebi KL, Kemp-Benedict E, Riahi K, Rothman DS, Solecki W. 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environ Change* 42: 169-180. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004
- Oyinola MA, Reygondeau G, Wabnitz CC, Frölicher TL, Lam VW, Cheung WW. 2022. Projecting global mariculture production and adaptation pathways under climate change. *Glob Change Biol* 28(4): 1315-1331. doi: 10.1111/gcb.15991
- Pörtner HO, Peck MA. 2010. Climate change effects on fishes and fisheries: Towards a cause-and-effect understanding. *J Fish Biol* 77(8): 1745-1779. doi: 10.1111/j.1095-8649.2010.02783.x
- Rato A, Joaquim S, Matias AM, Roque C, Marques A, Matias D. 2022. The impact of climate change on bivalve farming: Combined effect of temperature and salinity on survival and feeding behavior of clams *Ruditapes decussatus*. *Front Mar Sci* 9: 932310. doi: 10.3389/fmars.2022.932310
- Shin YK, Kim Y, Chung EY, Hur SB. 2000. Temperature and salinity tolerance of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*. *Korean J Fish Aquat Sci* 33(3): 213-218.
- Shoji J, Toshito SI, Mizuno KI, Kamimura Y, Hori M, Hirakawa K. 2011. Possible effects of global warming on fish recruitment: Shifts in spawning season and latitudinal distribution can alter growth of fish early life stages through changes in daylength. *ICES J Marine Science* 68(6): 1165-1169. doi: 10.1093/icesjms/fsr059
- Song JH. 2015. Strategy for the sustainable development of Manila clam farming industry. *Aquacult* 9: 70-74.
- Suh D, Pomeroy R. 2020. Projected economic impact of climate change on marine capture fisheries in the Philippines. *Front Mar Sci* 7: 232. doi: 10.3389/fmars.2020.00232