

연안어업의 기후변화 피해비용 분석[†]

-SSP 시나리오를 적용하여-

Analysis of Climate Change Damage to Coastal Fisheries of Korea

- Using the SSP Scenarios -

김봉태*
Kim, Bong-Tae

목 차

- I. 서 론
- II. 선행연구 검토
- III. 분석 자료 및 방법
- IV. 분석 결과
- V. 요약 및 결론

Abstract: This paper aims to analyze the economic costs associated with climate change damage to Korean coastal fisheries by employing econometric methods. Using a panel fixed-effects model, the relationship between catch and climate factors (water temperature and salinity) was found to be a quadratic function of sea surface temperature, although surface salinity was not statistically significant. Applying the IPCC's SSP scenarios to project changes in catch and damage costs, the results show that if climate change mitigation efforts are successful (SSP1-2.6), the catch will increase slightly, but if warming is moderate (SSP2-4.5), long-term negative impacts will occur, and if warming continues on its current trajectory (SSP5-8.5), significant long-term damage is expected. In particular, coastal fisheries are more vulnerable than offshore fisheries due to their smaller scale and limited fishing grounds, so it is necessary to prepare policies to increase their adaptability to climate change.

[†] 본 논문은 한국환경연구원이 지원한 『기후변화에 따른 해양수산 부문 사회·경제적 영향 분석』의 결과물을 논문형식으로 재작성한 것임

* 부경대학교 해양수산경영경제학부 조교수, bkim@pknu.ac.kr

Key words: Climate Change, Coastal Fisheries, Damage, SSP Scenarios

I. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)가 2023년 3월 승인한 제6차 평가보고서(The Sixth Assessment Report, AR6)의 종합보고서(Synthesis Report)에 따르면, 인간이 초래한 기후변화의 악영향이 자연과 인간시스템 전반에 걸쳐 심화할 것으로 예측된다.¹⁾ 지속되는 온실가스 배출로 거의 모든 시나리오에서 가까운 미래(2021~2040년)에 1.5℃ 상승에 도달하고, 완화 노력으로 온도 상승을 제한한다고 하더라도 해수면 상승, 생물다양성 손실 등의 변화는 불가피하거나 되돌리기 어렵다(IPCC, 2023). 특히 해양의 생물다양성 손실 리스크는 1.5~2℃ 상승 시 ‘중간’ 내지 ‘매우 높음’ 수준이었다가 3℃ 상승 시에는 ‘높음’ 내지 ‘매우 높음’ 수준으로 증가한다(IPCC, 2022).

이러한 예측은 해양생태계에 의존한 식량 산업인 수산업과도 무관하지 않다. AR6의 종합보고서에는 대표적인 식량으로 옥수수 생산량과 어획량이 온도 상승에 따라 어떻게 바뀌는지 제시하고 있다. 온도가 많이 상승할수록 저·중위도 지방의 옥수수 생산량과 어획량(최대어획잠재량)이 더 많이 감소하는데, 일부 해역의 어획량은 감소폭이 35% 이상으로 매우 영향이 클 것으로 예상된다. 다만, 한반도 주변 해역은 어획량이 소폭 감소하는 것으로 예측되었으나 평가 모델의 결과가 불일치하여 더 많은 연구가 필요한 것으로 나타났다(IPCC, 2023).

수산업의 기후변화 영향은 그 중요성에도 불구하고 지역 또는 국가 단위의 어획량 변화와 그에 따른 경제적 영향을 평가한 연구가 드문 편이다.²⁾ 어로어업 생산량, 즉 어획량은 인간의 통제 영역 밖에 있는 생태계의 기후변화 영향을 고려해야 하기 때문이다.

1) IPCC는 1990년부터 여섯 차례 기후변화에 관한 평가보고서를 발간하고 있는데, 기후변화의 과학적 근거, 영향 및 적응, 완화에 관하여 각 실무그룹에서 작성한 3개의 보고서와 이를 통합적 관점에서 서술한 종합보고서로 구성된다. 이번 종합보고서는 실무그룹 보고서와 함께 제6차 평가주기(2015~2023년) 동안 발간한 3개의 특별보고서에 기초한 종합적인 정보를 담고 있다.

2) 관련 선행연구는 제2장에서 별도로 다룬다.

이에 관한 최근 연구로 국립수산물과학원(2021; 2022)이 우리나라 고등어와 살오징어에 대해 최대엔트로피모델(Maximum entropy model)을 구축하고, CMIP6 전지구모형 자료와 해양순환-하위생태 접합모형으로 역학적 상세화한 모형 자료를 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 분포를 전망하였는데, 그에 따르면 고등어와 살오징어의 분포가 대체로 북상하는 것으로 예측되었다. 이와 유사한 방식으로 Bang et al.(2022)은 멸치에 대해 최대엔트로피모델을 적용한 결과, 겨울과 봄에는 분포 영역이 북쪽으로 확장되는 반면, 여름과 가을에는 축소되는 것으로 전망하였다.

이러한 연구 결과는 이전에 비해 진일보한 것이지만 일부 어종에 국한되어 있고 어획량 변화까지 추정된 것은 아니므로 기후변화의 피해를 산업 차원에서 정량화하여 관련 정책에 반영하기에는 한계가 있다. 자연과학적인 연구가 계속 축적되어 예측의 범위와 정확도를 개선하는 것도 중요하겠지만, 현실점에서 기후변화에 시급히 대응해야 하는 정책 수요가 있고, 최적의 정책 수립을 위해서는 기후변화 피해비용을 근거로 삼아야 하는 필요성이 존재한다. 따라서, 기후변화 영향을 엄밀하게 분석하는 자연과학적인 접근과 동시에 기후변화 피해비용을 추정하는 사회과학적인 접근도 필요하다고 여겨진다.

기후변화 피해비용은 온실가스 배출 저감을 통해 기후변화를 완화했을 때의 편익이며, 배출 저감에 따른 비용과 비교하여 적정한 탄소의 사회적 가격을 결정하는 기준이 된다.³⁾ 만일 수산업의 피해가 화폐가치로 제시되지 않는다면 기후변화 피해비용을 과소평가할 수 있고 최적의 배출 저감 정책도 어려워질 수 있다. 수산업에 관한 적응 정책 수립에도 피해비용을 예상할 수 있어야 정책의 우선순위를 정하고 적정한 예산 투입 규모를 산정할 수 있을 것이다.

이에 본고는 계량경제학적인 방법으로 기후변화에 따른 어획량 변화와 그에 따른 피해비용을 추정하고자 한다. 구체적으로는 해양의 기후 요인과 어획량의 상관관계를 확인하고 미래의 기후변화 시나리오를 적용하되 기후 모형과 통계 분석의 불확실성을 고려한 시뮬레이션을 통해 어획량의 변화를 전망하고자 한다. 분석 대상은 연근해어업 중에서 연안어업에 한정하였다. 연안어업은 시도지사 허가를 받아 광역시도 관할의 연안에서 조업하는 10톤 미만의 어선을 이용하는 어업이다. 조업 위치가 지자체 관할 연안에 한정되므로 지역별 어획량 자료로도 기후 요인과 어획량간의 관계를 정확하게 파악할 수 있

3) 이론적으로 한계저감비용과 한계편익이 일치하는 수준으로 탄소의 가격을 설정하는 것이 사회적으로 최적이다.

다.4) 그리고, 연안어업은 근해어업에 비해 어장의 선택지가 좁고 경영규모가 영세하여 기후변화에 대한 적응력이 떨어진다는 측면에서도 우선적인 분석 대상으로 삼을 필요성이 있다.

본고의 구성은 다음과 같다. II 장에서 기후변화의 어획량 영향에 관한 선행연구를 검토하고, III 장에서 어업피해 예측에 필요한 분석 자료와 방법을 소개한다. IV 장에서 기후 요인과 어획량의 상관관계와 어획량 및 피해비용 분석 결과를 제시하고, V 장에서 연구 결과를 요약하고 결론을 내린다.

II. 선행연구 검토

국내외에서 기후변화가 수산업에 미치는 영향을 다룬 연구는 다수 있지만 경제적 영향 평가가 수행된 사례는 많지 않다. 국내적으로는 현재 기후변화 진행에 따라 해수 물성(物性) 변화에 관한 연구에서는 정량적 분석 결과가 제시되고 있으나 생태계 변화 부문은 정성적 분석 수준에 머물러 있다(환경부, 2020). 예를 들어 앞에서 언급한 국립수산물학원(2021; 2022)과 Bang et al.(2022)은 기후변화 시나리오별로 미래의 고등어, 살오징어, 멸치의 분포 변화를 전망하였으나 경제적 영향 평가에 필요한 어획량 전망까지 나아가지는 못하였다.

이와는 다르게 기후 요인이 작용하는 해수 물성의 변화와 어획량간의 직접적인 관계에 기초하여 어획량을 예측하는 연구도 있다. 이는 어획량 예측에 목적을 두고 해수 물성이 생태계 변화를 거쳐 목표 어종의 분포 변화에 미치는 경로를 고려하지 않는 방법이다. 엄기혁 외(2015)는 해수면 온도와 어획량의 상관관계에 시나리오를 적용하여 어획량 변화를 예측하였는데, 그에 따르면 해수면 온도가 현재의 추세대로 상승할 때(2100년 2.75℃ 상승) 2100년에 연근해어업 생산량이 31% 감소하는 것으로 예측되었다. 이와 유사한 방식으로 김봉태 외(2015)는 연안어업 어획량과 수심별 수온 자료의 관계를 공간패널 모형으로 분석하여 30~50m 수온과 정(正)의 관계에 있음을 보였지만 어획량의 변

4) 근해어업은 조업 범위가 넓어 지역별 어획량 자료가 조업 위치를 반영하지 못한다. 따라서 기후 요인과 어획량 간의 상관관계를 분석하기 위해서는 조업 위치에 관한 자료가 별도로 필요하다.

화를 예측하지는 않았다.

국외 연구는 전 지구적 차원과 국가 단위에서 기후변화의 어획량 영향 또는 경제적 영향을 산정한 사례가 있다. 어획량 전망에는 기후-생물 연계 모형, 패널 모형이, 경제적 영향 평가에는 연산가능일반균형(Computable General Equilibrium, CGE) 모형, 준이상 수요체계(Almost Ideal Demand System, AIDS) 등이 활용되었다.

이 가운데 지구적 차원의 연구로 Lam et al.(2016)은 기후-해양생물(climate-living marine resources simulation) 모형을 적용하여 2050년 전 세계 어획량의 변화를 전망한 결과, 온실가스 배출 감축을 즉시 실현하는 RCP2.6 시나리오에서 4.06%, 현재의 추세대로 온실가스를 배출하는 RCP8.5 시나리오에서 7.71% 감소하고, 이에 따라 어업 생산액은 각각 7.11%, 10.37% 감소하는 것으로 나타났다.⁵⁾ 어획량 감소보다 생산액 감소가 더 큰 것은 어획물의 가치 하락이 반영되었기 때문이다. 국가별로는 어업의 식량 의존도 높은 연안 저소득 국가가 더 많이 감소할 것으로 예상되었다.

Cheung et al.(2018)은 동태 생물기후 포락(Dynamic Bioclimatic Envelope) 모형, 동태 크기 기반 먹이그물(Dynamic Size-based Food-web) 모형을 이용하여 전 세계 어획량과 국가별 어획량의 변화를 전망하였다. 그에 따르면, 2100년 전 세계 어획량은 RCP2.6에서 2.8~4.3% 변동에 그치지만, RCP8.5에서 16.2~25.2% 변동하여 감소폭이 커지는 것으로 나타났다. 2100년 한국의 어획량은 RCP2.6에서 -5.22~2.16%, RCP8.5에서 -15.05~4.57% 변동하여 대체로 감소할 것으로 예상되었다.

국가 단위의 국외 연구로는 멕시코, 필리핀, 미국 등의 사례가 있다. Ibarra et al.(2013)은 동태 패널 모형으로 멕시코의 새우·정어리 어업의 영향을 분석하여 해수면 온도 1% 상승 시 새우 어획량은 1.1% 감소하고 정어리 어획량은 4% 증가할 것으로 전망하였다. Suh and Pomeroy(2020)는 필리핀 해면어업의 기후변화 영향을 RCP2.6과 RCP8.5 시나리오에서 연산가능일반균형(CGE) 모형으로 분석하였다. 그에 따르면, 필리핀의 2060년 어업 GDP가 RCP2.6에서 9.27%, RCP8.5에서 17.65% 감소하는 것으로 예

5) RCP(Representative Concentration Pathways, 대표농도경로) 시나리오는 IPCC 5차 평가보고서(AR5)에 적용된 것으로 인간 활동이 대기에 미치는 복사강제력의 크기로 시나리오를 설정하였다. 'RCP'의 형식으로 표기되는데 'y'는 해당 시나리오에서 2100년 복사강제력(W/m²)의 수준을 의미한다. RCP2.6는 지구가 받는 태양복사량의 1.1%, RCP8.5는 3.6%에 해당한다(기상청 기후정보포털). RCP 시나리오는 IPCC의 6차 평가보고서에서 SSP 시나리오와 연계된다(각주 6) 참조).

측되었다. Moore et al.(2021)은 미국의 주요 16개 어종에 대한 기후변화의 경제적 영향을 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서 기존 연구의 일반순환모형(General Circulation Model, GCM) 예측 결과로 어획량 변화를 추정하고, 역준이상수요체계(Inverse AIDS)로 경제적 후생의 변화를 계측하였다. 그에 따르면, 미국의 주요 16개 어업의 2021~2100년 동안 기후변화 영향에 따른 소비자잉여 감소분의 현재가치는 RCP8.5에서 42억 달러, RCP4.5에서 21억 달러에 달하는 것으로 나타났다.

본고는 기후 요인과 어획량 간의 관계를 추정하여 미래의 어획량 변화를 예측한다는 점에서 엄기혁 외(2015), Ibarra et al.(2013)과 유사한 방식을 적용하지만, 엄기혁 외(2015)와 달리 연안어업을 대상으로 패널 고정효과(fixed effects) 모형으로 분석하여 지역의 고유한 특성을 통제하고 월 단위의 계절성을 반영하여 한층 엄밀한 분석을 시도하였다. 향후 자연과학적인 연구가 축적된다면 Moore et al.(2021)과 같이 자연과학에 기초한 어획량 예측과 경제적 영향 평가와 연계한 분석이 가능할 것으로 판단된다.

표-1. 주요 선행연구

저자	방법론	지표	주요 결과
국립수산과학원 (2021)	최대엔트로피모델 (Maximum entropy model)	고등어 분포	2050년대에 고등어 분포가 남해·서해에서 감소하고 동해에서 증가
국립수산과학원 (2022)	최대엔트로피모델	살오징어 분포	2050년대에 오징어 분포가 겨울·봄에 북쪽으로 확장, 여름·가을에는 축소
Bang et al. (2022)	최대엔트로피모델	멸치 분포	2050년대에 멸치 분포가 겨울·봄에는 북쪽으로 확장, 여름·가을에는 축소
엄기혁 외 (2015)	회귀분석	연근해어업 어획량	해수면 온도가 현 추세대로 상승 시(2050년 1.17℃, 2100년 2.75℃) 연근해어업 어획량 31% 감소
김봉태 외 (2015)	공간패널모형	연안어업 어획량	연안어업 생산량이 30~50m 수온과 정(正)의 관계에 있음
Lam et al. (2016)	기후-해양생물 (climate-living marine resources simulation) 모형	세계 어획량	전 세계 어획량은 2050년 RCP2.6에서 4.06%, RCP8.5에서 7.71% 감소, 어업 생산액은 각각 7.11%, 10.37% 감소(어획물 가치 하락), 어업의 식량 의존도 높은 연안 저소득 국가가 더 많이 감소
Cheung et al. (2018)	동태생물기후포락 (Dynamic Bio- climatic	세계 어획량, 국가별 어획량	2100년 세계 어획량은 RCP2.6에서 -2.8~-4.3%, RCP8.5에서 -16.2~-25.2% 변동,

저자	방법론	지표	주요 결과
	Envelope) 모형, 동태크기기반먹이그물(Dynamic Size-based Food-web) 모형		2100년 한국의 어획량은 RCP2.6에서 -5.22~2.16%, RCP8.5에서 -15.05~-4.57% 변동
Ibarra et al. (2013)	동태패널모형	새우·정어리 어획량	멕시코의 해수면 온도 1% 상승 시 새우 어획량은 1.1% 감소, 정어리 어획량은 4% 증가
Suh and Pomeroy (2020)	연산가능일반균형 (CGE) 모형	어업 GDP	필리핀의 2060년 어업 GDP가 RCP8.5에서 17.65%, RCP2.6에서 9.27% 감소
Moore et al. (2021)	일반순환모형 (GCM), 역준이상수요체계 (inverse AIDS) 모형	소비자잉여	미국의 주요 16개 어업의 2021~2100년 동안 기후변화 영향에 따른 소비자잉여 감소분의 현재가치는 RCP8.5에서 42억 달러, RCP4.5에서 21억 달러임

III. 분석 자료 및 방법

1. 분석 자료

본고는 연안어업의 기후변화 영향을 정량화하기 위해 기후 요인(수온·염분)과 어획량 간의 통계적인 관계에 기초하여 미래 기후변화에 따른 어획량의 변화와 어획금액의 영향을 피해비용으로 산정하고자 한다. 이때 해역의 특성을 반영하기 위해 전국 평균치를 적용하지 않고 광역시·도 단위로 수온과 염분의 공간 자료와 연안어업 어획량을 매칭하여 사용하였다. 또한, 연안어업의 계절성, 기후변화의 계절적인 차이를 반영하기 위하여 가용 자료에서 가장 세분화된 시간 단위인 월별 자료를 이용하였다.

분석 자료 중 기상자료는 기상청의 ‘전지구 기후전망’ 자료로 해수면 온도와 표층 염분을 사용하였다. 기상청의 기후변화 예측 모델은 국립기상과학원이 자체 개발한 K-ACE와 영국 기상청 모델인 UKESM1 2종으로 이들 모델에서 과거 기후와 미래 공통 사회경제경로(Shared Socio-economic Pathway, SSP) 시나리오별로 각각 3개의 앙상블 자료를 생산하고 총 6개 앙상블을 평균한 값이 제공된다. 과거 재현 기간은 1850~2014년,

미래 전망 기간은 2015~2100년이며, 월 단위로 값을 얻을 수 있다. 공간 해상도는 1도 × 1도 격자로 1도는 약 100km이다. 여기서 SSP 시나리오는 IPCC의 AR6에서 정의된 것으로 사회경제적 추세인 공통사회경제경로와 해당 시나리오에서 온실가스에 의한 온난화 효과(복사강제력)를 나타낸다.⁶⁾ 본고에서 적용한 시나리오의 정의는 다음 <표-2>와 같다.

▮ 표-2. SSP 시나리오의 정의 ▮

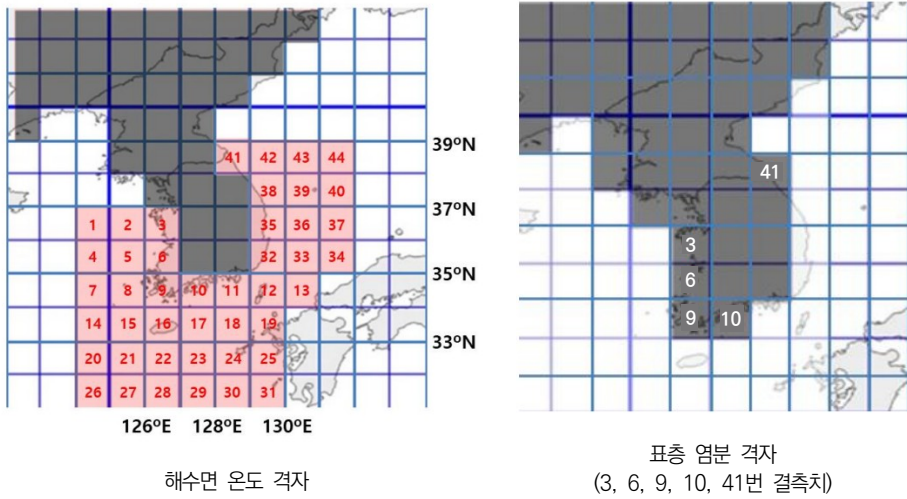
시나리오	정의	2081~2100년 온난화 수준
SSP1-2.6	낮은 수준의 온실가스 배출 시나리오로 2050년 이후에 0의 순 배출, 그 이후 순 음의 배출	1.8℃
SSP2-4.5	중간 수준의 온실가스 배출 시나리오로 21세기 중반까지 현재 수준 배출	2.7℃
SSP5-8.5	매우 높은 온실가스 배출 시나리오로 2050년에 현재의 2배로 배출 증가	4.4℃

주: 온난화 수준은 1850-1900년 대비 지구 표면온도 상승폭임.
자료: IPCC(2021)

기상청의 ‘전지구 기후전망’ 자료에 따르면, 우리나라 주변 평균 해수면 온도는 2014년 기준 약 17℃에서 2100년에는 SSP2-4.5에서 20℃, SSP5-8.5에서 22℃ 이상에 도달할 것으로 전망된다. 표층 염분은 2014년 30.6psu에서 2100년 SSP2-4.5에서 30.3psu, SSP5-8.5에서 29.7psu로 낮아질 것으로 전망된다. 해수면 온도와 표층 염분의 변동폭은 1850년 이후의 추이로 볼 때 상당히 큰 것으로 어획량에도 분명한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

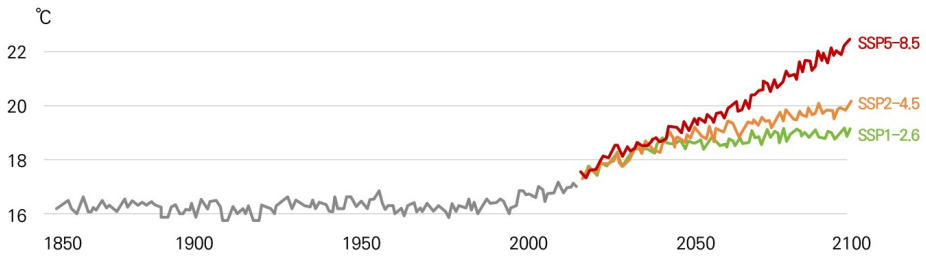
6) SSP 시나리오는 ‘SSPx-y’의 형식으로 표기되는데, ‘x’는 해당 시나리오에서 기본으로 설정된 사회경제적 추세를 의미하고, ‘y’는 해당 시나리오에서 2100년 복사강제력(W/m²)의 수준을 의미한다(각주 5) 참조).

■ 그림-1. 우리나라 주변의 해수면 온도 및 표층 염분 격자 ■



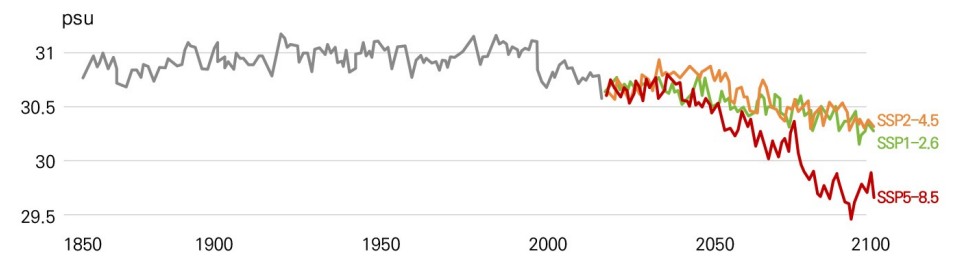
자료: 기상청 기후정보포털

■ 그림-2. 우리나라 주변 해수면 온도의 과거 재현 및 미래 전망 ■



자료: 기상청 기후정보포털

그림-3. 우리나라 주변 표층 염분의 과거 재현 및 미래 전망



자료: 기상청 기후정보포털

분석에 사용된 연안어업 어획량과 어선톤수 자료는 통계청 어업생산동향조사와 등록 어선통계에서 연안어업에 해당하는 자료를 이용하였다. 어선톤수는 어업생산활동에 투입되는 자본을 대리하는 변수로 기후 요인과 함께 어획량 반응함수의 주요 설명변수로 사용된다.

표-3. 분석에 사용된 자료 출처

변수	출처	기간
해수면 온도, 표층 염분	기상청 전지구 기후전망	2001~2100
연안어업 어획량	통계청 어업생산동향조사	2001~2014
연안어업 어선톤수	통계청 등록어선통계	2001~2014

2. 분석 방법

본고는 연안어업 어획량이 해수면 온도와 표층 염분과 같은 기후 요인과의 관계를 어획량 반응함수를 구성하여 과거 자료로 추정하고, 이 관계를 이용하여 미래 기후변화 시나리오에 따른 어획량 변화를 예측한다. 기후 요인과의 관계는 지역 i 의 고유한 특성 ($region_i$)과 어획노력량(요소 투입)을 대표하는 어선톤수 ($Ton_{i,t}$)를 통제한 상태에서 평균적인 효과를 계측하기 위해 패널 고정효과 모형으로 추정하였다. 어획량의 계절성이

있으므로 월 가변수($month_j, j = 1, \dots, 12$)를 포함하고, 어획량에 영향을 미치는 특정 연도의 제 변수(엘니뇨, 라니냐, 수산자원 변동 등)를 통제하기 위해 연도 가변수($year_k, k = 2001, \dots, 2014$)를 포함하였다. 즉, 이는 시간 고정효과로 볼 수 있다. 해수면 온도 변수($Temp_{i,t}$)와 염분 변수($Salin_{i,t}$)는 비선형적인 관계를 가정하기 위해 제곱항을 포함하고, 해수면 온도에 대해서는 월별 차이를 반영하기 위해 교차항($Temp_{i,t} \times month_j$)을 포함하였다.⁷⁾

$$\begin{aligned} Catch_{i,t} = & \alpha + \beta_1 Temp_{i,t} + \beta_2 Temp_{i,t}^2 + \beta_{3,j} Temp_{i,t} \times month_j \\ & + \gamma_1 Salin_{i,t} + \gamma_2 Salin_{i,t}^2 + \delta Ton_{i,t} + region_i \\ & + month_j + year_k + \epsilon_{i,t} \end{aligned} \quad (1)$$

분석 기간은 2001~2014년이다. 해수면 온도와 염분 변수는 1850년부터, 어획량 자료는 1970년부터 사용할 수 있으나, 1999년 한-일 어업협정, 2000년 한-중 어업협정 체결로 우리나라 주변 수역의 조업 여건이 크게 달라진 점을 반영하여 2001년 이후 어획량 자료를 이용하였다. 해수면 온도, 염분에 의한 장기적인 어획량 변동을 설명하려면 다른 요인의 영향을 통제할 수 있어야 하는데, 그러한 변수가 충분하지 않다는 점도 고려하였다. 또한 해수면 온도, 염분의 변화가 2000년대 이후 뚜렷하게 나타났으므로 어획량과의 관계를 파악하기에는 무리가 없을 것으로 여겨진다. 그리고, 어획량과 어선톤수 자료는 2021년 값까지 있으나 해수면 온도와 염분 변수의 재현 값이 2014년까지 제공되어 분석 기간을 2014년까지로 한정하였다.

지역별로는 부산, 울산, 강원, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남, 제주가 포함되며, 해수면 온도, 염분 자료를 얻을 수 없는 인천·경기는 제외하였다. 그리고, 해수면 온도, 염분 자료의 해상도를 고려하여 지역 구분의 의미가 적은 울산과 경북을 ‘울산·경북’으로 묶어 하나의 지역 단위로 처리하였다.

어획량 반응함수에서 추정된 계수값을 이용하여 해수면 온도와 염분의 변화에 따른 어획량의 변화분은 다음 식으로 계산할 수 있다. 여기서 $\Delta Catch_{i,t}$ 는 미래 t 시점의 어획량과 기준 시점인 2001~2014년 평균 어획량의 차이로 어획량의 변동 값이다. 마찬가지로

7) 염분 또한 교차항을 고려할 수 있으나 분석 결과가 유의하지 않아서 제외하였다.

지로 $\Delta Temp_{i,t}$ 는 기준 시점에 대비한 시나리오별로 예측된 미래 t 시점의 해수면 온도의 변동 값, $\Delta Salin_{i,t}$ 는 염분 변동 값, $\Delta Temp_{i,t}^2$ 은 해수면 온도 제곱항의 변동 값, $\Delta Salin_{i,t}^2$ 은 염분 제곱항의 변동 값이다. $\beta_{3,j}$ 는 해수면 온도와 월 가변수의 교차항 계수로 해당 월별로 다른 값이다. 각 추정된 계수가 통계적으로 유의하면 해당 변수의 차이를 다음 식에 넣어서 계산하고 유의하지 않으면 제외하였다.⁸⁾

$$\Delta Catch_{i,t} = (\beta_1 + \beta_{3,j}) \Delta Temp_{i,t} + \beta_2 \Delta Temp_{i,t}^2 + \gamma_1 \Delta Salin_{i,t} + \gamma_2 \Delta Salin_{i,t}^2 \quad (2)$$

기후변화로 인한 연안어업의 피해비용은 연안어업 어획량 감소에 따른 어획금액 감소분으로 산정하였다. 어획량 감소는 시장 균형가격과 균형수량에 영향을 미치므로 균형 대체모형(Equilibrium Displacement Model)과 같은 부분균형분석으로 소비자잉여와 생산자잉여의 감소분으로 피해비용을 산정하는 것이 경제이론에 부합하지만, 먼 미래의 시장 상황에 대한 장기 예측의 불확실성이 크고, 어종을 구분하지 않음에 따라 필요한 연안어업의 지역성과 계절성을 고려하기 어렵다는 단점이 있다. 어획금액 감소분은 엄밀한 의미에서 편익의 감소분은 아니지만 매출액(수입) 감소분으로 경제적인 해석이 가능하고 2001~2014년의 지역별·월별 평균가격을 적용하면 생산물의 지역성과 계절성을 고려할 수 있다. 본고는 이러한 이유로 어획금액 감소분을 피해비용으로 간주하였다.

한편, 어획량의 변화분을 구성하는 계수값은 일정한 분포를 따르고 있으며 기후변화에 내재한 불확실성을 반영하고 있다. 본고는 이러한 불확실성을 나타내기 위해 각 계수의 분포와 분석 대상 기간의 기후 요인 변수에서 1만 회를 무작위 추출하여 어획량 변화분과 피해비용을 구하고, 이를 평균한 값과 피해비용의 분포를 제시하였다.

8) 실제 추정 결과에서는 염분과 염분 제곱항의 계수가 유의하지 않아서 염분 변화는 고려하지 않았다.

IV. 분석 결과

1. 기후 요인과 어획량의 상관관계

연안어업 어획량 반응함수를 추정한 결과(<표-4>), 염분 변수는 통계적으로 유의하지 않았으나 해수면 온도 변수가 뚜렷한 2차식의 관계에 있으며 해수면 온도와 월 가변수의 교차항도 대부분 유의하여 계절적으로 영향의 정도가 다르게 나타남을 확인하였다. 2차식으로 근사할 때 해수면 온도의 임계값(극대값)은 3월이 가장 낮은 11.8°C 이고 8월이 가장 높은 25.0°C 였다(<표-5>). 임계 온도보다 작으면 수온이 상승할 때 어획량이 증가하고 임계 온도보다 높으면 해수면 온도가 상승할 때 어획량이 감소하는 관계에 있다.

겨울(1월)과 여름(8월)을 대비하여 살펴보면, 1월의 해수면 온도 임계값은 13.1°C 이고 2021~2100년의 1월 해수면 온도 분포는 임계값보다 낮은 부분과 높은 부분으로 양분되어 있다(<그림-4>). 이는 지역의 특성에 따른 결과로 임계값보다 낮은 지역에서는 해수면 온도 상승으로 어획량이 증가하고, 반대로 임계값보다 높은 지역에서는 어획량이 감소하게 된다. 이와 달리 여름은 임계값이 25.0°C 보다 높은 예측치의 분포가 많아서 대체로 해수면 온도 상승으로 어획량이 감소하는 결과가 예상된다.

■ 표-4. 연안어업 어획량 반응함수 추정 결과 ■

변수	계수	표준오차
표층 염분	291	1484
표층 염분 제곱	-3.2	26.2
해수면 온도	1993 ***	496
해수면 온도 제곱	-76.1 ***	22.5
해수면 온도×2월	-188 *	103
해수면 온도×3월	-203 *	109
해수면 온도×4월	-120	95
해수면 온도×5월	271	169
해수면 온도×6월	871 ***	335
해수면 온도×7월	1295 ***	492
해수면 온도×8월	1805 ***	578

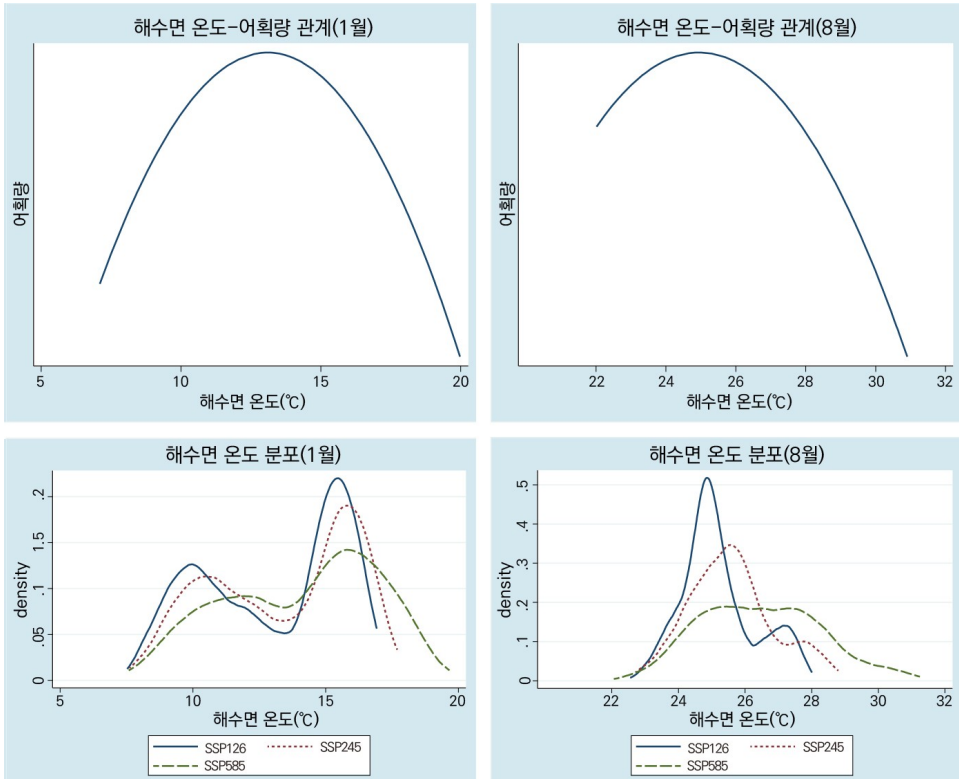
변수	계수	표준오차
해수면 온도×9월	1583 ***	516
해수면 온도×10월	1180 ***	390
해수면 온도×11월	775 ***	261
해수면 온도×12월	343 **	138
2월	1851 *	1097
3월	2189 *	1118
4월	1223	1110
5월	-3293	2296
6월	-13290 ***	5125
7월	-22123 ***	8261
8월	-33816 ***	10147
9월	-27801 ***	8771
10월	-18027 ***	6088
11월	-10855 ***	3636
12월	-4145 **	1734
어선톤수	-0.0665 **	0.0275
R ² (within)	0.290	
관측치수	1344	

주: *** p<0.01 ** p<0.05 * p<0.1, 연도 가변수, 상수항의 결과는 생략함

▮ 표-5. 월별 임계 해수면 온도 ▮

구분	해수면 온도(℃)
1월	13.1
2월	11.9
3월	11.8
4월	12.3
5월	14.9
6월	18.8
7월	21.6
8월	25.0
9월	23.5
10월	20.8
11월	18.2
12월	15.3

■ 그림-4. 겨울(1월) 및 여름(8월)의 해수면 온도-어획량 관계와 2021~2100년의
해수면 온도 분포 ■



2. 기후변화의 피해비용 예측

연안어업 어획량 반응함수에서 추정된 기후 요인과 어획량 사이의 관계를 이용하여 미래 기후변화 시나리오에서 어획량의 변화를 예측하였다. 이때 염분 변수의 계수는 통계적으로 유의하지 않아 해수면 온도 변수와 어획량 간의 관계를 적용하였다. 계수값의 분포에서 무작위 추출한 값과, 단기(2021-2040년), 중기(2041-2060년), 장기(2081-2100년)의 기간에서 각 시나리오의 해수면 온도 예측값을 무작위 추출하여 1만 개의 조합을 만들고, 각 조합의 어획량 변화분과 피해비용 결과에 대해 평균값과 분포를 구하였다.

분석 결과(<표-6>), 연안어업의 어획량 변화분은 2001~2014년 평균 어획량에 대비하여 SSP1-2.6에서는 단기부터 장기까지 모든 시점에서, SSP2-4.5와 SSP5-8.5에서는 단기·중기에 어획량이 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 장기에 SSP2-4.5에서는 어획량이 소폭 감소하지만(-2.3%), SSP5-8.5에서는 큰 폭의 감소가 예상되었다(-23.0%).

▮ 표-6. 연안어업 어획량 예측 결과 ▮

(단위: 천 톤, %)

구분	기준 어획량	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		단기	중기	장기	단기	중기	장기	단기	중기	장기
전체	288 (100.0)	299 (3.9)	298 (3.4)	295 (2.5)	299 (3.8)	295 (2.7)	281 (-2.3)	298 (3.6)	289 (0.6)	221 (-23.0)
강원	22	25	26	26	25	26	25	25	26	18
경남	51	50	49	48	50	48	45	49	47	34
경북·울산	37	36	34	33	35	33	29	35	31	15
부산	27	26	26	25	26	25	22	26	24	12
전남	74	77	77	78	77	78	77	77	78	70
전북	20	26	27	28	26	28	29	27	29	26
제주	19	14	12	10	14	10	4	13	7	0
충남	38	45	47	48	45	48	49	46	49	47

주: 기준 어획량은 2001~2014년 평균값임. 단기는 2021~2040년 평균, 중기는 2041~2060년 평균, 장기는 2081~2100년 평균값임. 괄호안 값은 기준 어획량에 대비한 변화율임.

지역별로는 어획량 변화의 양상이 달랐는데, 경남, 경북·울산, 부산, 제주가 대체로 감소하였고, 강원, 전남, 전북, 충남은 대체로 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 제주의 감소폭과 전북의 증가폭이 크게 나타나 두 지역이 뚜렷한 대조를 보였다.⁹⁾ 제주의 경우에는 해수면 온도 상승폭이 다른 지역보다 크다는 점이 작용하였고, 냉수어 어획이 많은 경북·울산, 경남이 감소하였다는 점에서 지역별로 어획 어종의 차이가 있기 때문으로 풀이된다.¹⁰⁾ 어획량 감소폭이 큰 제주, 경남, 부산, 경북·울산의 연안은 쿠로시오 해류에서 분리돼 대한해협을 거쳐 동해를 따라 북상하는 대마난류가 지나가는 경로상에 있으므로 이와 관련한 영향으로 볼 개연성이 있다. 이에 관해서는 과학적인 근거로써 해석이 필요

9) 제주 지역은 SSP5-8.5에서 2100년에 음의 값으로 예측되어 0으로 간주하였다.

10) 강원 지역도 냉수어가 많이 어획되나 오징어 등 연체동물 어획이 많아 그 영향이 상쇄된 것으로 해석된다.

하다.

연안어업 어획량 변화에 따른 어획금액 변화분으로 산정한 기후변화의 피해비용은 시나리오별로 다른 양상을 보였다(<그림-5>). SSP1-2.6에서는 전체 어획금액이 단기·중기·장기의 모든 시점에서 177억~393억 원 증가하여, 즉 피해비용이 음의 값으로 기후변화가 연안어업 생산에 긍정적인 요인으로 작용할 것으로 예측되었다. SSP2-4.5에서는 단기와 중기에는 어획금액이 201~381억 원이 증가하여 긍정적인 영향이지만, 장기에는 475억 원이 감소하여 피해로 반전되는 것으로 나타났다. SSP5-8.5에서는 단기에 346억 원 증가하여 긍정적이지만, 중기에는 88억 원의 피해로 전환되고 장기에는 2,923억 원이 감소하여 그 피해가 상당히 커지는 것으로 예측되었다.

요컨대, 온실가스 배출 저감을 통해 21세기 중반에 탄소중립을 달성하면 연안어업 생산에 오히려 긍정적이지만, 현재 수준 또는 그 이상 온실가스를 배출하면 연안어업에 상당한 규모의 피해가 나타날 것으로 예상된다. 이 같은 결과는 연근해어업 전체를 대상으로 예측한 엄기혁 외(2015)의 결과와 Cheung et al.(2018)에서 예측된 한국의 어획량 변화 전망과 대체로 유사하다. 한편, 단기의 피해비용의 분포는 시나리오별로 거의 차이가 없었지만, 장기에는 온실가스 고배출 시나리오일수록 피해비용의 분포 범위가 넓어져 불확실성이 커진다는 점을 알 수 있다(<그림-6>).

■ 그림-5. 시나리오별 연안어업 피해비용 ■

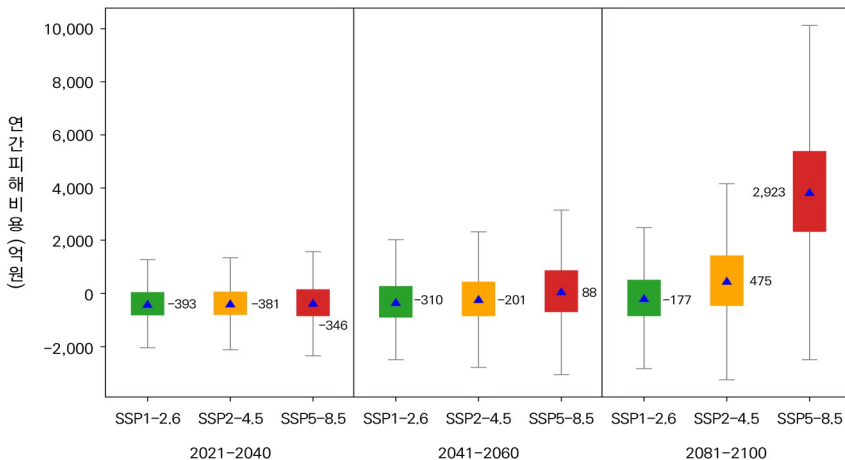
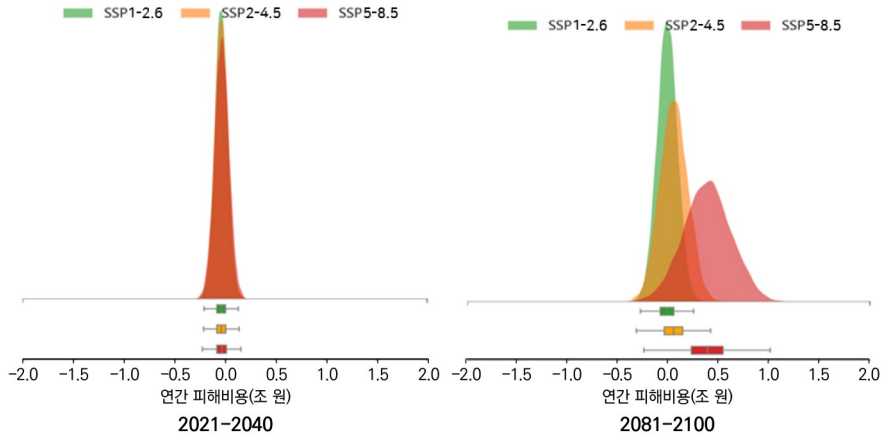


그림-6. 시나리오별 연안어업 피해비용 분포(단기·장기)



V. 요약 및 결론

기후변화의 수산자원 영향에 관해 국내에서도 여러 연구가 축적되고 있으나 주요 어종의 분포 변화 예측 이상의 어획량 변화와 그로 인한 경제적인 영향을 예측한 연구는 드물다. 이러한 상황에서 본고는 연안어업을 대상으로 계량경제학적인 방법으로 피해비용 분석을 시도하였다. 패널 고정효과 모형으로 추정한 어획량과 기후 요인(수온·염분)의 관계에서 표층 염분은 통계적으로 유의하지 않았으나 해수면 온도는 뚜렷한 2차 함수의 관계가 확인되었다.

IPCC의 최신 시나리오인 AR6의 SSP 시나리오를 적용하여 어획량의 변화와 피해비용을 예측한 결과, 온실가스 배출을 상당히 저감하는 SSP1-2.6에서는 모든 기간에서 어획량이 소폭 증가하고(어획금액 177억~393억 원), 배출 저감을 중간 수준으로 달성하는 SSP2-4.5에서는 어획량이 단기·중기에 소폭 증가(201억~381억 원), 장기에 소폭 감소(-475억 원)하는 것으로 예측되었다. 온실가스 배출이 증가하는 SSP5-8.5에서는 단기에는 소폭 증가하지만(346억 원), 장기에는 23% 감소하여 그에 따른 피해비용이 2,923억 원에 달할 것으로 전망되었다. 이는 엄기혁 외(2015)와 Cheung et al.(2018)와 유사한 경

향이고 직관적인 예상과도 부합하였다.

요컨대, 기후변화 완화 노력이 성공한다면 연안어업에는 긍정적이지만, 온난화가 중간 수준으로만 진행되더라도 장기에는 부정적인 영향이 나타나고, 현재의 추세대로 온난화가 진행된다면 상당한 피해가 예상된다. 기후변화를 완화하는 전 지구적인 노력이 우선 중요하겠지만, 이미 진행되고 있는 기후변화에 잘 적응하는 일도 그에 못지않게 중요하다. 더욱이 연안어업은 근해어업보다 경영규모가 영세하고 어장이 한정적이어서 취약성이 높다. 따라서, 연안어업의 기후변화 적응력을 높일 수 있는 정책 마련이 필요하다고 할 수 있다. 예를 들어 해양생태계 변화에 따른 수산자원의 분포 변화 예측, 새로운 어종 출현 등 어종 변화에 대응한 어구·어법 개발, 기후변화에 유연한 어업허가제도 운용, 기후위험에 대비한 경영안정 지원 등이 요청된다.

그리고, 지역별로는 경남, 경북·울산, 부산, 제주가 어획량이 감소하였고, 강원, 전남, 전북, 충남은 피해가 적거나 어획량이 증가하는 것으로 예측되었다. 해수면 온도 상승폭의 차이, 지역별 어획 어종의 차이가 작용한 것으로 풀이된다. 이에 관해서는 추가적인 연구로 인과성을 확인해야 하겠지만, 피해가 크게 예상되는 지역에는 기후변화 적응을 위해 더 많은 정책적 지원이 필요하다.

본고는 연안어업의 피해비용을 산정하여 기후변화 정책의 필요성과 정책 수립에 필요한 편익의 근거를 제시하였다는 점에서 의미가 있다. 그러나, 기후변화가 1차 생산력이나 생태계에 미치는 영향을 고려하지 않고 어획량과 기후 요인 간의 상관관계에 주로 의존하였다는 점에서 뚜렷한 한계가 있다. 앞으로 자연과학적인 연구 성과가 축적된다면, 미국 어업의 경제적 영향을 평가한 Moore et al.(2021)과 같이 해수 물성이 생태계 변화를 거쳐 목표 어종의 분포 변화에 이르는 메커니즘에 근거를 두고 수산자원 분포의 변화를 어획량 변화로 정량화할 수 있을 것이다. 그리고, 주요 어종별로 어획량 변화가 예측된다면 경제모형을 통하여 도출된 사회적 잉여의 변화로써 피해비용을 산정할 수 있을 것이다. 이는 후속 과제로 남긴다.

투고일	2023. 04. 30
1차 심사일	2023. 05. 23
게재확정일	2023. 05. 31

■ ■ 참고문헌

1. 국립수산물과학원. 2021. 『한반도 주변 미래 해양환경변동 전망 분석 및 물리-생태 접합모형을 활용한 어획예측 연구』.
2. _____, 2022. 『IPCC AR6 기반 우리나라 주변 해역 미래 수산자원 변동 예측(Ⅱ)』.
3. 김봉태·엄기혁·이준수·박해진·육근형. 2015. 「공간패널모형을 이용한 연안어업 생산량과 기후변화 요소의 관계에 대한 연구」. 『수산경영론집』, 제46권 제3호.
4. 엄기혁·김홍식·한인성·김도훈. 2015. 「기후변화에 따른 한국 연근해 어업생산량 변화 분석」. 『수산경영론집』, 제46권 제2호.
5. 환경부. 2020. 『한국 기후변화 평가보고서 2020: 기후변화 영향 및 적응』.
6. Bang, M., D. Sohn, J. Kim et al. 2022. “Future changes in the seasonal habitat suitability for anchovy (*Engraulis japonicus*) in Korean waters projected by a maximum entropy model.” *Frontiers in Marine Science*, Vol. 9, 922020.
7. Cheung, W.W.L., J. Bruggeman and M. Butenschon. 2018. “Chapter 4: Projected Changes in Global and National Potential Marine Fisheries Catch under Climate Change Scenarios in the Twenty-first Century.” in: *Impacts of Climate Change on Fisheries and Aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options*, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, No. 627, pp. 63-86.
8. Ibarra, A.A., S.A. Vargas and M.B. Lopez. 2013. “Economic impacts of climate change on two Mexican coastal fisheries: Implications to food security.” *Economics - The Open-Access, Open-Assessment E-Journal* (2007-2020), Kiel Institute for the World Economy (IfW Kiel), Vol. 7, pp. 1-38.
9. IPCC. 2021. “Summary for Policymakers.” in: *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.
10. _____, 2022. “Summary for Policymakers.” in: *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.

11. _____, 2023. “Summary for Policymakers.”in: Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report.
12. Lam, V., W. Cheung, G. Reygondeau et al. 2016. “Projected change in global fisheries revenues under climate change.”Scientific Reports, Vol. 6, 32607.
13. Moore C., J.W. Morley, B. Morrison, M. Kolian et al. 2021. “Estimating The Economic Impacts of Climate Change on 16 Major US Fisheries.”Climate Change Economics, Vol. 12, No. 1.
14. Suh, D. and R. Pomeroy. 2020. “Projected Economic Impact of Climate Change on Marine Capture Fisheries in the Philippines.” Frontier in Marine Science, Vol. 7, 232.
15. 기상청 기후정보포털. <http://www.climate.go.kr> (2022년 8월 5일)