

2025
정책연구

기후변화에 따른 동해 수산자원(방어, 참다랑어 등) 어장 분포 진단과 미래 예측 및 이용 방안

목 차

제1장 서론	1
제1절 연구 배경 및 목적	3
1. 연구 배경 및 필요성	3
2. 연구 목적	7
제2절 연구 배경 및 목적	8
1. 연구 범위	8
2. 연구 방법	11
제2장 어장 환경의 장기 변화 및 수산자원 분포 진단	12
제1절 표층 수온 장기 변화	14
1. 북서태평양 연대별 표층 수온 장기 변화 및 편차	14
2. 동해 표층 수온 시계열 변화	22
2.1. 표층 수온 평균 변화	22
2.2. 표층 수온 계절 변화	25
3. 강원특별자치도 연안 표층 수온 시계열 변화	27
3.1. 표층 수온 평균 변화	27
3.2. 표층 수온 계절 변화	30
제2절 표층 엽록소 a 시계열 변화	32
1. 북서태평양 연대별 엽록소 a 장기 변화 및 편차	32
2. 동해 평균 표층 엽록소 a 시계열 변화	40
2.1. 표층 엽록소 a 연평균 변화	40
2.2. 동해 표층 엽록소 a 계절 변화	43
3. 강원특별자치도 연안 엽록소 a 시계열 변화	45
3.1. 강원특별자치도 표층 엽록소 a 평균 변화	45
3.2. 강원특별자치도 표층 엽록소 a 계절 변화	49

4. 수산자원(방어, 참다랑어) 분포 변화	51
4. 1. 방어 분포 시계열 변화	51
4. 2. 참다랑어 분포 시계열 변화	54
4. 3. 먹이원 분포 시계열 변화	58
제3장 미래 어장 환경 및 수산자원 분포 예측	70
제1절 미래 표층 수온 전망	72
1. 미래 북서태평양 표층 수온 전망(2024년 대비 2050년)	72
2. 미래 동해 표층 수온 전망	76
2.1. 미래 동해 표층 수온 장기 변화	76
2.2. 미래 동해 표층 수온 계절 변화 예측	79
3. 미래 강원특별자치도 표층 수온 전망	82
3.1. 미래 강원특별자치도 표층 수온 장기 변화	82
3.2. 미래 강원특별자치도 표층 수온 계절 변화 예측	84
제2절 미래 엽록소 a 변화 전망	87
1. 미래 북서태평양 표층 엽록소 a 전망(2024년 대비 2050년)	87
2. 미래 동해 표층 엽록소 a 전망	90
2.1. 미래 동해 표층 엽록소 a 장기 변화	90
2.2. 미래 동해 표층 엽록소 a 계절 변화 예측	93
3. 미래 강원특별자치도 표층 엽록소 a 전망	96
3.1. 미래 강원특별자치도 표층 엽록소 a 장기 변화	96
3.2. 미래 강원특별자치도 표층 엽록소 a 계절 변화 예측	100
제3절 미래 2050년 방어, 참다랑어 분포 예측	103
1. 미래 방어류(갯방어) 분포 예측(2050년)	103
2. 미래 참다랑어 분포 예측(2050년)	109
제4장 국외 사례 분석을 통한 산업화 전략 정책적 제언	115
참고 문헌	125



표 목차

<표 1> 연구 사용 자료 및 주요 방법	11
<표 2> 참다랑어·방어 유통 단계별 국제 온도 기준	118
<표 3> 일본·스페인 참다랑어·방어 양식 산업 비교 및 시사점	120
<표 4> 주요 냉동·가공 시설 유형과 기능	122

그림 목차

<그림 1> 우리나라 주변 57년간 표층 수온 변화(1968년~2024년)	3
<그림 2> 연도별 동해 방어 어획량	4
<그림 3> 한반도 주변 어종 분포 변화	5
<그림 4> 공간적 범위: 동해, 강원특별자치도 연안	9
<그림 5> 북서태평양 표층 수온(SST) 장기 평균 분포(1982-2024년)	15
<그림 6> 장기평균(1982-2024) 대비 1980년대 표층 수온 어노말리	16
<그림 7> 장기평균(1982-2024) 대비 1990년대 표층 수온 어노말리	17
<그림 8> 장기평균(1982-2024) 대비 2000년대 표층 수온 어노말리	18
<그림 9> 장기평균(1982-2024) 대비 2010년대 표층 수온 어노말리	19
<그림 10> 장기평균(1982-2024) 대비 2020년대 표층 수온 어노말리	20
<그림 11> 1982-2024년 동해 표층수온(SST) 연도별 시계열 변화	22
<그림 12> 동해 표층 수온 장기평균(1982-2024) 대비 연도별 편차 변화	23
<그림 13> 동해 표층수온(SST) 계절별·연도별 시계열 변화	25
<그림 14> 1982-2024년 강원특별자치도 표층수온(SST) 연도별 시계열 변화	27
<그림 15> 강원특별자치도 표층수온 장기평균(1982-2024) 대비 연도별 편차 변화	28
<그림 16> 강원특별자치도 연안 표층수온(SST) 계절별·연도별 시계열 변화	30
<그림 17> 북서태평양 표층 엽록소 a 장기 평균 분포(2003-2024년)	32
<그림 18> 장기평균(2003-2024) 대비 2000년대 표층 수온 어노말리	34
<그림 19> 장기평균(2003-2024) 대비 2010년대 표층 수온 어노말리	36
<그림 20> 장기평균(2003-2024) 대비 2020년대 표층 수온 어노말리	38
<그림 21> 2003-2024년 동해 엽록소 a 연도별 시계열 변화	40
<그림 22> 동해 장기 평균(2003-2024) 표층 수온 대비 연도별 편차 변화	41
<그림 23> 동해 엽록소 a 계절별·연도별 시계열 변화	43
<그림 24> 2003-2024년 강원특별자치도 연안 엽록소 a 연도별 시계열 변화	45

<그림 25> 강원특별자치도 연안 장기 평균(2003-2024) 대비 표층수온 연도별 편차 변화	47
<그림 26> 강원특별자치도 연안 염록소 a 계절별·연도별 시계열 변화	49
<그림 27> 연대별(1980년대-2010년대) 방어류(젯방어) 어획 분포도	51
<그림 28> 동해안(강원·경북) 방어 어획량 장기 변화(1980년-2024년)	53
<그림 29> 연대별(1980년대-2010년대) 참다랑어 어획 분포도(단위: 톤)	54
<그림 30> 동해안(강원·경북) 참다랑어 어획량 장기 변화(1980년~2024년)	56
<그림 31> 연대별(1980년대-2010년대) 정어리 어획 분포도	58
<그림 32> 동해안(강원·경북) 정어리 어획량 장기 변화(1980년~2024년)	60
<그림 33> 연대별(1980년대-2010년대) 멸치 어획 분포도	62
<그림 34> 동해안(강원·경북) 멸치 어획량 장기 변화(1980년~2024년)	64
<그림 35> 연대별(1980년대-2010년대) 고등어 어획 분포도	66
<그림 36> 동해안(강원·경북) 고등어 어획량 장기 변화(1980년~2024년)	68
<그림 37> SSP126 시나리오 기반 2050년 북서태평양 표층수온 변화(2024년 대비)	72
<그림 38> SSP370 시나리오 기반 2050년 북서태평양 표층수온 변화(2024년 대비)	74
<그림 39> SSP126 시나리오 기반 동해 연도별 표층수온 장기 변화 예측(2020-2100)	76
<그림 40> SSP370 시나리오 기반 동해 연도별 표층수온 장기 변화 예측(2020-2100)	77
<그림 41> SSP126 시나리오 기반 동해 계절별 표층 수온 미래 예측치(2020-2100)	79
<그림 42> SSP370 시나리오 기반 동해 계절별 표층 수온 미래 예측치(2020-2100)	80
<그림 43> SSP126 시나리오 기반 강원특별자치도 연도별 표층수온 장기 변화 예측(2020-2100)	82
<그림 44> SSP370 시나리오 기반 강원특별자치도 연도별 표층수온 장기 변화 예측(2020-2100)	83
<그림 45> SSP126 시나리오 기반 강원특별자치도 계절별 표층 수온 미래 예측치(2020-2100)	84
<그림 46> SSP370 시나리오 기반 강원특별자치도 계절별 표층 수온 미래 예측치(2020-2100)	85
<그림 47> SSP126 시나리오 기반 2050년 북서태평양 표층 염록소 a 변화(2024년 대비)	87
<그림 48> SSP370 시나리오 기반 2050년 북서태평양 표층 염록소 a 변화(2024년 대비)	88
<그림 49> SSP126 시나리오 기반 동해 연도별 표층 염록소 a 장기 변화 예측(2025년-2100년)	90
<그림 50> SSP370 시나리오 기반 동해 연도별 표층 염록소 a 장기 변화 예측(2025년-2100년)	91
<그림 51> SSP126 시나리오 기반 동해 계절별 염록소 a 미래 예측치(2025년-2100년)	93
<그림 52> SSP370 시나리오 기반 동해 계절별 염록소 a 미래 예측치(2025년-2100년)	94

<그림 53> SSP126 시나리오 기반 연도별 표층 엽록소 a 장기 변화 예측 (2025년-2100년)	96
<그림 54> SSP370 시나리오 기반 강원특별자치도 연도별 표층 엽록소 a 장기 변화 예측(2025년-2100년)	98
<그림 55> SSP126 시나리오 기반 강원특별자치도 계절별 엽록소 a 미래 예측치(2020년-2100년)	100
<그림 56> SSP370 시나리오 기반 강원특별자치도 계절별 엽록소 a 미래 예측치(2020년-2100년)	101
<그림 57> 2050년 SSP126 시나리오 기반 방어류(<i>Seriola quinqueradiata</i>) 서식 적합도 공간 분포 예측도	103
<그림 58> SSP126 시나리오에서 2050년 방어 서식 적합도 변화(현재 대비 편차)	104
<그림 59> 2050년 SSP370 시나리오 기반 방어(<i>Seriola quinqueradiata</i>) 서식 적합도 공간 분포 예측도	106
<그림 60> SSP126 시나리오에서 2050년 방어 서식 적합도 변화(현재 대비 편차)	107
<그림 61> 2050년 SSP126 시나리오 기반 참다랑어 서식 적합도 공간 분포 예측도	109
<그림 62> SSP126 시나리오에서 2050년 참다랑어 서식 적합도 변화(현재 대비 편차)	110
<그림 63> 2050년 SSP370 시나리오 기반 참다랑어 서식 적합도 공간 분포 예측도	112
<그림 64> SSP370 시나리오에서 2050년 참다랑어 서식 적합도 변화(현재 대비 편차)	113

제 1 장

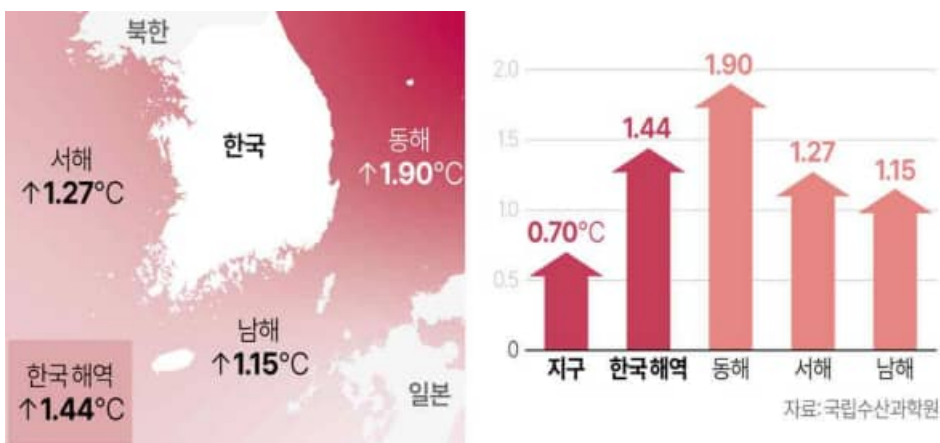
서론

서 론

제1절 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경 및 필요성

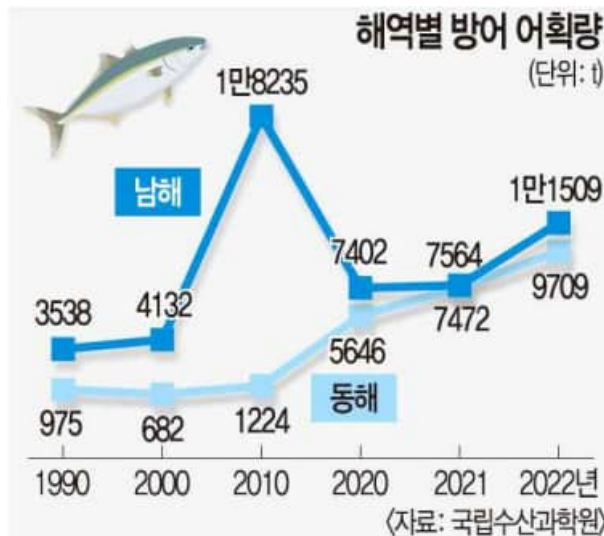
동해는 전지구적 기후변화에 가장 민감하게 반응하는 해역으로, 최근 수십 년 동안 우리나라 연근해 중 가장 빠른 속도로 온난화가 진행되고 있다 (그림 1). 1968년부터 2024년까지 장기 표층수온 자료 분석 결과, 동해의 표층수온은 약 1.9°C 상승하였으며, 이는 같은 기간 전지구 평균 상승폭 (약 0.7°C)을 2배 이상 높은 수준이다. 서해(1.27°C), 남해(1.15°C)에 비해서도 동해의 수온 상승 폭이 가장 크며, 특히 1985년 이후에는 연평균 약 0.04°C/년의 가파른 상승 추세가 지속되고 있다.



<그림 1> 우리나라 주변 57년간 표층 수온 변화(1968년~2024년)

이와 같은 해양 물리환경 변화는 동해 생태계와 어장 구조에 중대한 변화를 유발하고 있다. 수온은 어류의 성장, 이동, 산란 등 생리·생태적 기능을 좌우하는 핵심 요인으로, 장기적인 수온 상승은 어종별 적정 서식 수온대의 복상과 이동을 촉진한다. 실제로 동해에서는 최근 수십 년 사이 한류성 어종의 감소와 난류성 어종의 증가가 동시에 나타나는 어종 교체 현상이 뚜렷하게 확인되고 있다.

한류성 어종인 명태·도루묵·꽂치 등은 어획량 감소가 장기적으로 지속되고 있으며, 이는 동해의 냉수대 축소와 서식 적합도 하락과 밀접하게 관련된 것으로 해석된다. 반면 난류성 어류는 동해에서 출현 빈도와 어획량이 빠르게 증가하고 있다.



<그림 2> 연도별 동해 방어 어획량

대표적으로 방어는 동해 연안에서 2010년 1,224톤 → 2022년 9,709톤으로 급증하며 새로운 주요 어업 대상종으로 자리잡았다(그림 2). 참다랑어 역시 기존 제주권 중심 회유 경로에서 벗어나 동해 정치망 등에서 출현이 확대되는 등 분포 범위가 넓어지는 경향을 보이고 있다. 고등어·전갱이·정어리 등 난류성 어종의 증가도 동해 전역에서 확인되며, 동해 수산자원 구조가 과거와 다른 체제로 전환되고 있음을 보여준다(그림 3).



<그림 3> 한반도 주변 어종 분포 변화

특히 이러한 난류성 어종 증가 가운데 방어와 참다랑어는 어획 증가 폭, 생태적 중요성, 경제적 가치 측면에서 가장 두드러진 대표 어종으로 꼽힌다. 두 어종은 적수온 범위가 명확하고 기후변화에 따른 서식지 이동 민감도가 크며, 분포 변화가 해양환경 변화와 밀접하게 대응하는 것으로 알려져 있다. 또한 국내외 시장에서 고부가가치 수산물로 평가되어 향후 동해 수산업의 중요한 성장축이 될 가능성이 높다. 따라서 방어와 참다랑어는 동해 환경 변화와 어종 변동을 이해하고 미래 어장 변화를 예측하기 위한 핵심 분석 대상으로 적합하다.

이러한 어장 및 생태계 변화는 동해 수산업에 새로운 기회를 제공하는 동시에, 기존 어업 구조·제도·인프라에 상당한 전환을 요구하고 있다. 현재의 어업면허 체계는 특정 어종·어법 중심으로 고정되어 있어 신 출현 어종 변화에 대한 대응이 제한적이며(FAO, 2021; Golden et al., 2024), 고부가가치 어종의 유통·가공을 뒷받침할 수 있는 냉동·위생 처리 등 산업 인프라 역시 충분하지 않다. 또한 한류성 어종 중심의 기존 자원회복 정책은 기후변화로 인한 장기적 어장 변화를 반영하지 못해 효과성에 한계가 있다(Memarzadeh et al., 2019; Kritzer et al., 2019).

동해는 이미 기후변화 기반의 어장 구조 전환기에 들어섰으며, 향후 이 변화는 더욱 심화될 것으로 예상된다. 이러한 상황에서 동해 해양환경 변화의 실태를 과학적으로 진단하고, 새롭게 출현하는 어종의 분포 변화를 분석하며, 기후 시나리오 기반의 미래 변화를 예측해, 어업정책 및 산업전략 수립에 필요한 근거를 마련하는 것은 시급한 과제가 되고 있다.

2. 연구 목적

본 연구는 최근 동해에서 나타나는 해양환경 변화와 난류성 어류 증가 현상 속에서, 방어와 참다랑어를 중심으로 향후 동해 수산업의 전략적 대응 기반을 마련하고자 수행되었다. 두 어종은 기후변화에 따른 분포 이동성이 크고, 경제적 가치 및 산업화 잠재력이 높아 동해 신규 어장의 대표종으로 부상하고 있어, 이들의 서식지 변화 분석은 정책·산업 전략 수립에 핵심적이다. 이러한 배경을 바탕으로 본 연구는 다음과 같은 목적을 갖는다.

- 동해 해양환경의 장기 변화 진단
 - 동해 표층수온(1982년 이후)과 엽록소-a(2003년 이후)의 장기/계절공간 변화를 정밀 분석하여, 기후변화가 동해 해역의 생태 환경에 미친 영향을 파악한다.
- 방어와 참다랑어의 분포 변화 분석
 - 방어와 참다랑어를 중심으로 최근 수십 년간 어획량, 공간 분포 변화를 분석하여 난류성 대표 어종의 동해 진입·확장 양상을 규명한다.
 - 아울러 동해 어업자원 전반의 구조 변화를 이해하기 위해 한류성·난류성 어종군의 장기 변동 특성도 함께 검토한다.
- SSP 시나리오 기반 방어·참다랑어의 미래 서식지 변화 예측(MaxEnt)
 - SSP 시나리오를 기반으로 방어와 참다랑어의 2050년 서식 적합도 변화를 예측하고, 두 어종의 분포·어장 이동이 수산업에 미칠 영향을 평가한다.
- 참다랑어·방어 유통·가공·양식·인프라 운영 사례
 - 국제 콜드체인 온도 기준, 일본·스페인의 양식 기술 및 제도 운영체계, 초저온 유통·가공 인프라의 기술 요건 등을 비교함으로써, 강원특별자치도 적용이 가능한 산업화 방향성과 후속 연구의 필요성을 제시하고자 한다.

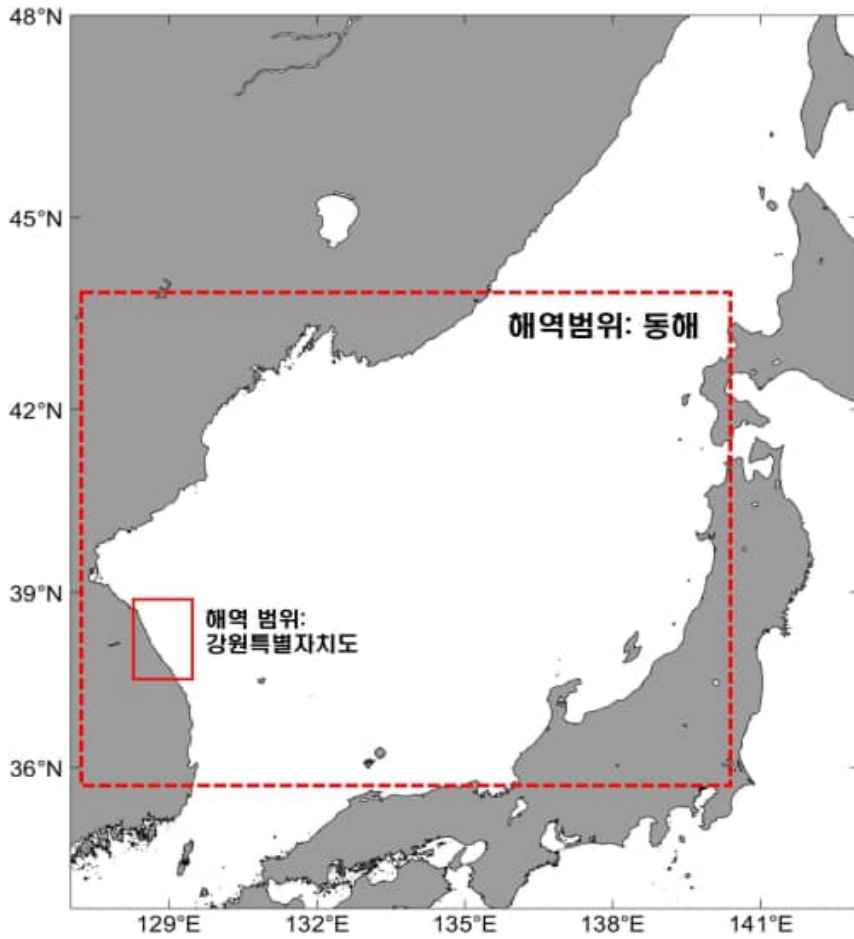
제2절 연구 배경 및 목적

1. 연구 범위

본 연구의 범위는 동해 해양환경 변화와 주요 난류성 어종(방어·참다랑어)의 분포 변화를 종합적으로 분석하기 위해 다음과 같이 설정하였다.

1. 공간적 범위(Spatial Scope)

해양에서 특정 어종의 공간적 분포를 확인하기 위해서는 서식지 전체를 대상으로 분포 변화가 필요하다. 방어와 참다랑어는 회유 반경이 우리나라를 포함한 일본연안을 포함하기 때문에 북서태평양을 기본 분석 범위(FAO 61)로 정했으며, 동해(East Sea)와 강원특별자치도 연안을 세부의 별도 해역으로 설정하였다(그림 4). 이는 동해가 우리나라 연근해 중 수온 상승 속도가 가장 빠르고, 해양환경 변화가 뚜렷하게 나타나는 핵심 해역이며 방어·참다랑어의 출현 증가가 특히 두드러진 해역이므로 별도의 세부 해역으로 설정하였다.



<그림 4> 공간적 범위: 동해, 강원특별자치도 연안

2. 시간적 범위(Temporal Range)

장기 변화 분석은 표층수온의 경우 1980년대부터 2024년까지를, 엽록소 a는 2004년부터 2024년까지를 범위로 하여 연대별·계절별 변화를 평가하였다. 이는 인공위성 자료 수집 기한을 범위 시작점으로 하고 분석하였다. 어획량 및 분포 변화 분석은 Sea Around Us(<https://www.seaaroundus.org>)에서 제공하는 어획공간 자료를 사용하였다. 방어류와 참다랑어의 미래 예측(MaxEnt 모델링)은 2050년을 기준으로 기후 시나리오(SSP126, SSP370)에 따라 서식 적합도 변화를 분석하였다.

3. 연구 대상 어종(Tarket Species)

본 연구는 동해에서 최근 증가세가 두드러지는 두 종(방어류·참다랑어)을 중심으로 수행하였다. 또한 두 종의 먹이원으로 알려진 대표 어종(정어리, 멸치, 고등어)의 장기 변동을 진단 대상으로 포함하였다.

4. 환경 변수(Environmental Variables)

환경변수는 수온(sea surface temperature, SST)과 엽록소 a(chlorophyll a, chl-a)를 선택하였다. 수온은 해양환경 변화의 대표 변수로서 연대별·계절별·공간적 패턴을 분석하고, 엽록소 a는 1차생산력 변화를 반영하는 핵심 생태 변수로 분석하였다.

5. 참다랑어·방어 유통 가공 운영 사례 분석

기후변화로 증가하는 방어·참다랑어 자원의 산업화 가능성을 검토하기 위해, 해외 선진국 사례를 중심으로 유통·가공, 양식기술, 인프라, 규제체계 등 주요 요소를 분석하는 데 범위를 둔다.

2. 연구 방법

본 연구는 동해 해양환경 변화와 방어·참다랑어의 서식지 변화를 분석하고, 기후변화 시나리오 기반 미래 어장 변화를 예측하기 위해 다음과 같은 연구 방법을 활용하였으며(표 1), 분석 결과는 Matlab과 통계 프로그램인 R을 통해 도식화하였다.

<표 1> 연구 사용 자료 및 주요 방법

구분	세부 내용	사용 자료	주요 방법
①해양환경 변화 분석	<ul style="list-style-type: none"> 북서태평양(동해) 계절·공간적 수온 및 생산력 변화 진단 기후변화에 따른 환경 변화의 구조 파악 	<ul style="list-style-type: none"> (SST) OSTIA 표층 수온 재분석 (Chl-a) Aqua MODIS 	<ul style="list-style-type: none"> 시계열 분석 (SST:1980~2024, Chl-a: 2004~2024) 연대별, 계절 평균 분포
②수산자원 변화 분석	<ul style="list-style-type: none"> 방어·참다랑어 중심 어획량 출현 변화 분석 먹이원 어종(정어리, 멸치, 고등어) 분포 변화 	<ul style="list-style-type: none"> Sea Around Us 어획량/분포 자료 	<ul style="list-style-type: none"> 장기 어획 추세 분석 공간 분포 변화 분석
③서식지 적합도 예측 (MaxEnt)	<ul style="list-style-type: none"> 방어·참다랑어의 현재 서식 적합도 산출 2050년(SSP1265-SSP370) 미래 서식지 변화 예측 	<ul style="list-style-type: none"> 출현 좌표 데이터 (2015~2018년 평균) CMIP6 MRI 모델 예측 환경 변수 (SST·Salinity·지형) 	<ul style="list-style-type: none"> MaxEnt 모델 학습·검증(AUC), Response Curve 분석 미래 2050년 예측 적합도 변화 지도화
④정책·산업 분석	<ul style="list-style-type: none"> 일본·스페인 등 선진국 산업화 사례 비교를 통한 시사점 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 일본·스페인 등 해외 산업화 사례 자료 국제 규격 (EU 위생기준·ASEAN 냉동물류 가이드라인 등) 	<ul style="list-style-type: none"> 산업 생태계(유통·가공·인프라) 구조 분석 해외 사례 벤치마킹 및 비교 분석

제2장

어장 환경의 장기 변화 및
수산자원 분포 진단

제 2 장

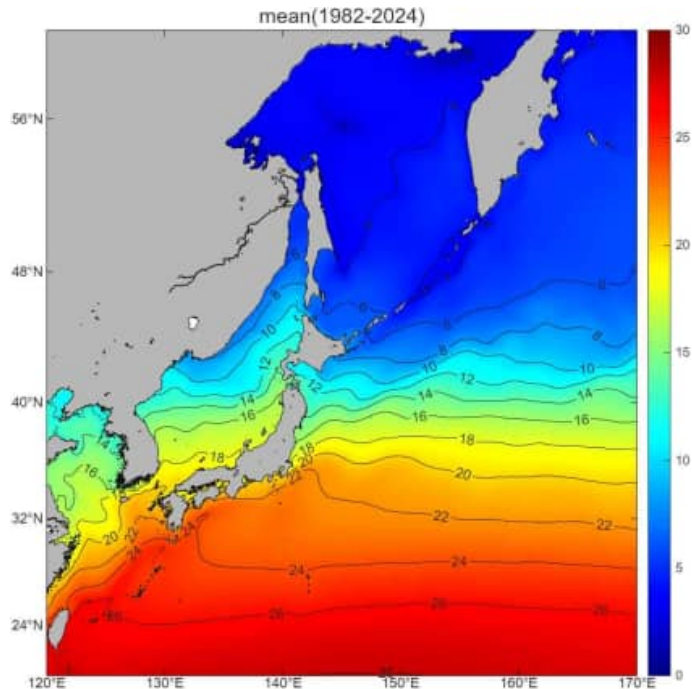
어장 환경의 장기 변화 및 수산자원 분포 진단

제1절 표층 수온 장기 변화

1. 북서태평양 연대별 표층 수온 장기 변화 및 편차

1982년부터 2024년까지의 장기 평균 해수면 수온 분포를 보면, 북서태평양은 위도에 따라 뚜렷한 수온 변화를 보이며 난류와 한류의 상호작용이 공간적으로 나타났다. 일본 남부와 동중국해 인근 저위도 해역(약 24~30° N)은 쿠로시오 난류의 지속적 영향으로 연평균 24~28°C 이상의 고수온대를 형성하고 있다.

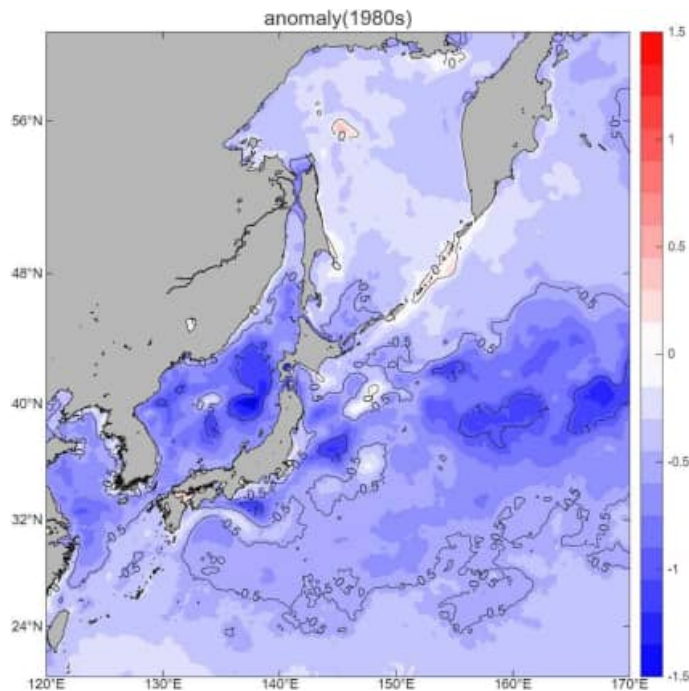
이러한 난류의 북상 경향은 점차 중위도 해역까지 영향을 확장시키며, 일본 혼슈 동부와 대한해협 북부에 이르는 해역에서는 16~22°C가 나타난다. 이 구간은 난류와 오야시오 한류가 만나는 전이대(transition zone)로서, 수온 구배가 크고 계절 변동성이 높은 것이 특징이다.



<그림 5> 북서태평양 표층 수온(SST) 장기 평균 분포
(1982-2024년)

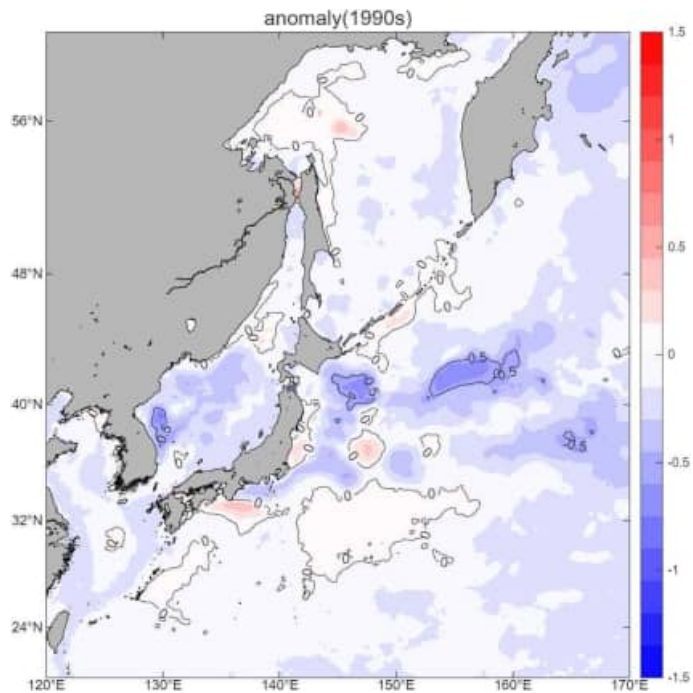
동해에서 남쪽은 난류의 확장에 따라 상대적으로 따뜻한 약 14~18°C 정도의 수온을 유지하는 반면, 북쪽으로 갈수록 오야시오 기원 냉수가 유입되며 6~12°C 수준의 저수온대가 분포 한다(그림 5). 특히 강원특별자치도 연안은 난류와 한류가 교차하는 경계에 위치하여 뚜렷한 수온 구배(gradinet)가 형성되며, 이는 어장 변화와 어종 분포 이동이 활발하게 발생하는 어장 형성 기반이 된다.

1980년대부터 2020년대까지 북서태평양 지역의 평균 표층수온 편차를 분석한 결과, 해당 해역은 지난 40여 년 동안 뚜렷한 온난화 경향을 보이며 시·공간적으로 일관된 수온 증가 패턴을 나타내었다(그림 6~그림 10).



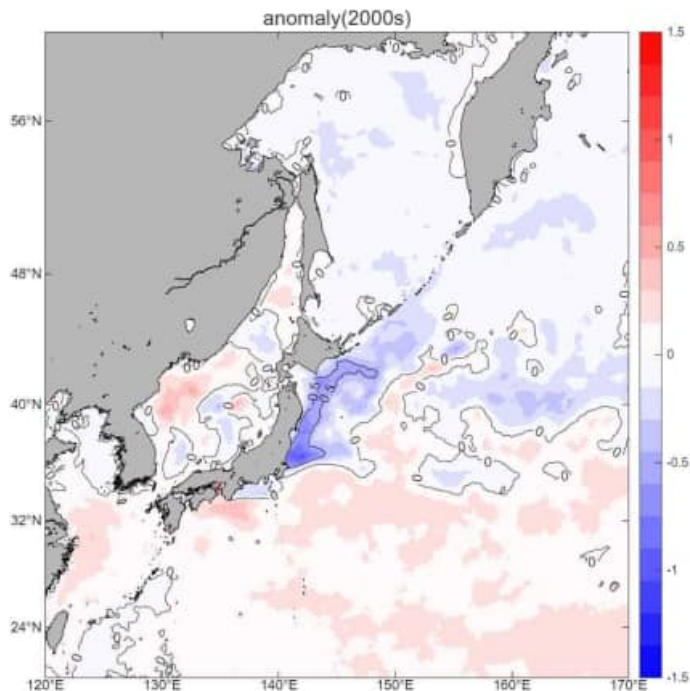
<그림 6> 장기평균(1982-2024) 대비 1980년대 표층 수온 어노말리

1980년대에는 전체적으로 기준값 대비 음의 편차가 우세하였으며, 특히 동해 중부와 일본 동쪽 난류 확장부에서 -0.5°C 이하의 냉온 편차가 넓게 분포하였다(그림 6). 이는 당시 동해 및 주변 해역이 비교적 저수온 상태를 유지하고 있었음을 시사한다.



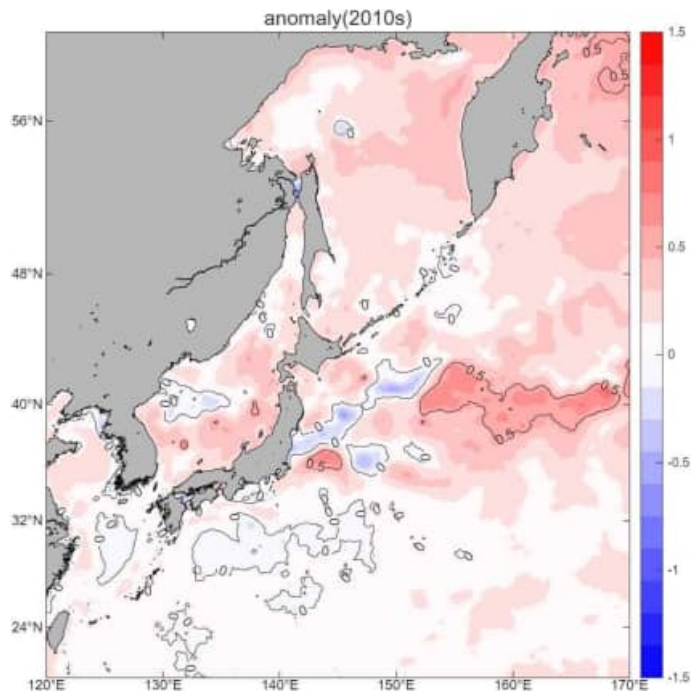
<그림 7> 장기평균(1982-2024) 대비 1990년대 표층 수온 어노말리

1990년대에 들어서면서 음의 편차는 점차 약화되었으며, 저위도 난류해역 및 일본 연안에서 국지적인 양의 편차가 나타났다(그림 7). 그러나 동해를 포함한 중위도 해역은 여전히 약한 음의 편차가 남아 있어 본격적인 온난화 신호가 뚜렷하게 나타나기 전 과도기적 상태로 볼 수 있다.



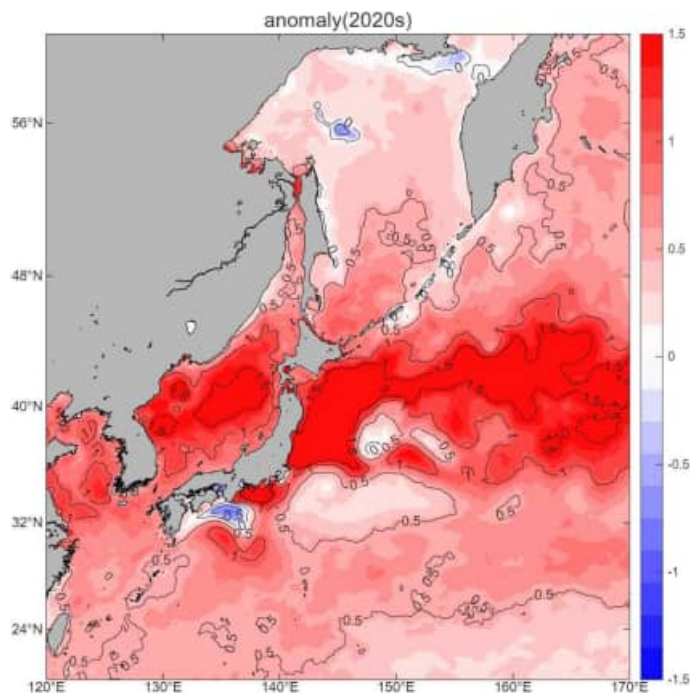
<그림 8> 장기평균(1982-2024) 대비 2000년대 표층 수온 어노말리

2000년대에는 대체로 양의 편차가 확산되기 시작하며 온난화 경향이 본격적으로 나타났다(그림 8). 일본 남부, 동중국해, 쿠로시오 연안 등 난류 영향이 강한 저위도 및 중위도 해역에서 +0.5°C 내외의 양의 편차가 뚜렷하게 증가하였다. 반면 동해 북부와 일본 동쪽 일부 해역에서는 약한 음의 편차가 잔존하여, 난류와 한류의 상호작용에 따른 지역적 냉수역이 유지되는 모습이 확인된다.



<그림 9> 장기평균(1982-2024) 대비 2010년대 표층 수온 어노말리

2010년대에는 전반적인 온난화가 더욱 강화되어 북서태평양 전역에 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 이상의 양의 편차가 넓게 분포하였다(그림 9). 특히 동해와 쿠로시오 확장대, 일본 동쪽 외해에서는 $+1.0^{\circ}\text{C}$ 내외의 뚜렷한 온난화 신호가 관측되었으며, 이는 기후변화 영향에 따른 난류계 강화 및 중위도 해역의 열적 상태 변화가 누적된 결과로 해석된다.



<그림 10> 장기평균(1982-2024) 대비 2020년대 표층 수온 어노말리

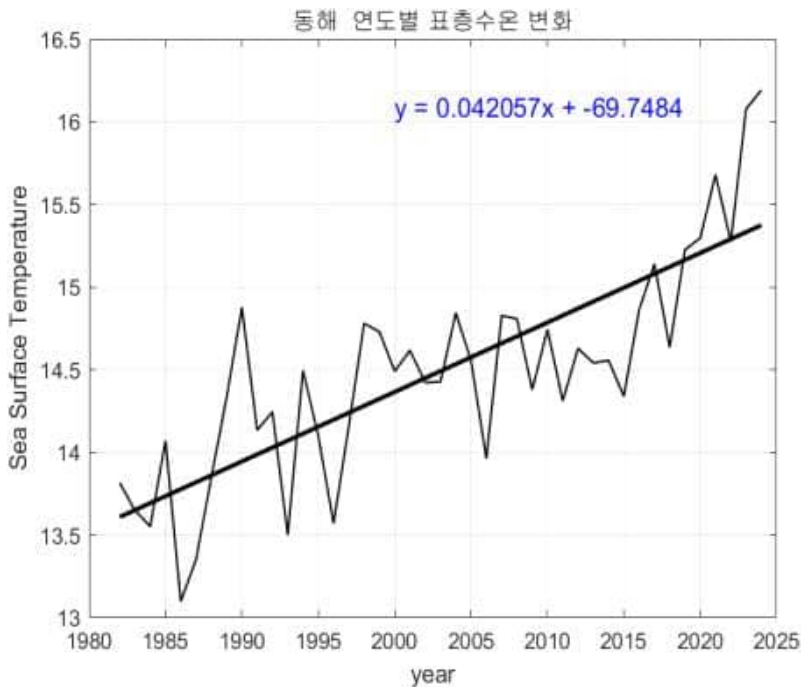
2020년대에는 이러한 온난화 경향이 극대화되어 북서태평양 대부분 해역에서 +1.0~1.5℃ 이상의 강한 양의 편차가 나타났다(그림 10). 동해 전역, 일본 동쪽 외해, 쿠로시오 확장부 등은 40년 평균 대비 가장 높은 해수온 증가를 기록하였으며, 특히 동해 남부와 일본 남부 난류역의 편차는 +1.5℃ 이상으로 상승하여 해역의 아열대화가 더욱 가속화되고 있음을 보여준다. 일부 고위도 해역에서만 제한적인 음의 편차가 나타났을 뿐 전체적인 공간 분포는 뚜렷한 온난화 현상을 확인할 수 있다.

종합하면, 북서태평양은 1980년대의 광범위한 저수온 상태에서 1990년대 점진적 전이를 거쳐 2000년대 이후 본격적인 온난화 단계에 진입하였으며, 2020년대에는 기후변화 영향이 누적되며 빠른 속도로 온난화가 심화되고 있다. 특히 동해와 일본 동쪽 난류 확장부는 온난화가 집중되는 핵심 해역으로 나타나 해당 해역에서의 생태계 구조 변화, 어종 분포 북상, 아열대성 종 증가 등 수산 해양 분야의 영향이 더욱 가속화될 것으로 전망된다.

2. 동해 표층 수온 시계열 변화

2.1. 표층 수온 평균 변화

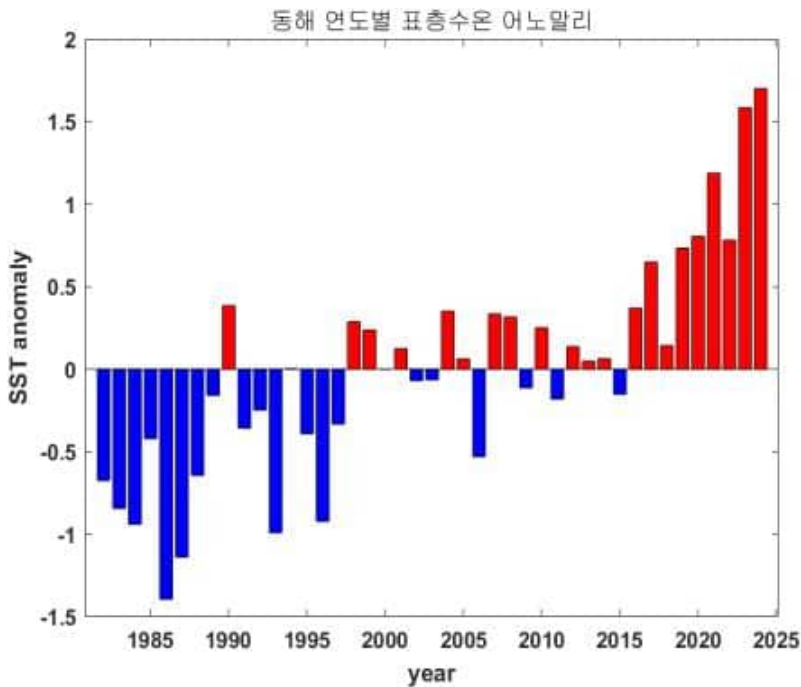
1980년부터 2024년까지 동해의 연평균 표층수온 변화를 보면, 동해는 지난 45년 동안 꾸준하고 뚜렷한 온난화 경향을 보인 것으로 나타났다(그림 11). 연도별 시계열에서 계절적·기후적 요인에 따른 변동성이 존재함에도 불구하고 전체적인 증가 추세는 명확하게 나타난다.



<그림 11> 1982-2024년 동해 표층수온(SST) 연도별 시계열 변화

회귀분석을 통해 확인하면, 동해 표층수온은 연평균 0.042°C/년의 속도로 상승하고 있으며, 이는 10년당 약 0.42°C, 40여 년간 총 약 1.7°C 이상 상승한 수준이다.

이러한 상승폭은 전 지구 평균 해수온 증가율을 크게 웃도는 수준으로, 동해가 기후변화에 특히 민감한 해역임을 시사한다. 특히 최근 10년(2015년 이후) 동안 수온 상승률이 더욱 가파라지는 경향이 나타나며, 2023-2024년 수온이 관측 기간 중 최고 수준에 도달한 점은 동해의 아열대화가 빠르게 진행되고 있음을 보여준다.



<그림 12> 동해 표층 수온 장기평균(1982~2024) 대비 연도별 편차 변화

1980년대 이후 동해의 연도별 표층수온 편차를 분석한 결과, 동해 해역은 장기 평균 대비 뚜렷한 온난화 경향을 보이며 시기별로 명확한 변화 단계를 나타내는 것으로 확인되었다(그림 12). 1980~1990년대 초반까지는 대부분의 연도가 -0.5°C 에서 -1.5 범위의 음의 편차를 기록하며 평균보다 낮은 수온 상태가 지속되었다. 이 시기는 동해가 비교적 안정된 저수온 환경을 유지하던 시기로 해류 혼합과 한류 영향이 강했던 특성을 반영한다.

그러나 1990년대 중반 이후부터는 양의 편차가 간헐적으로 나타나기 시작하였고, 2000년대에 들어서는 양의 편차와 음의 편차가 혼재하는 과도기적 패턴을 보였다.

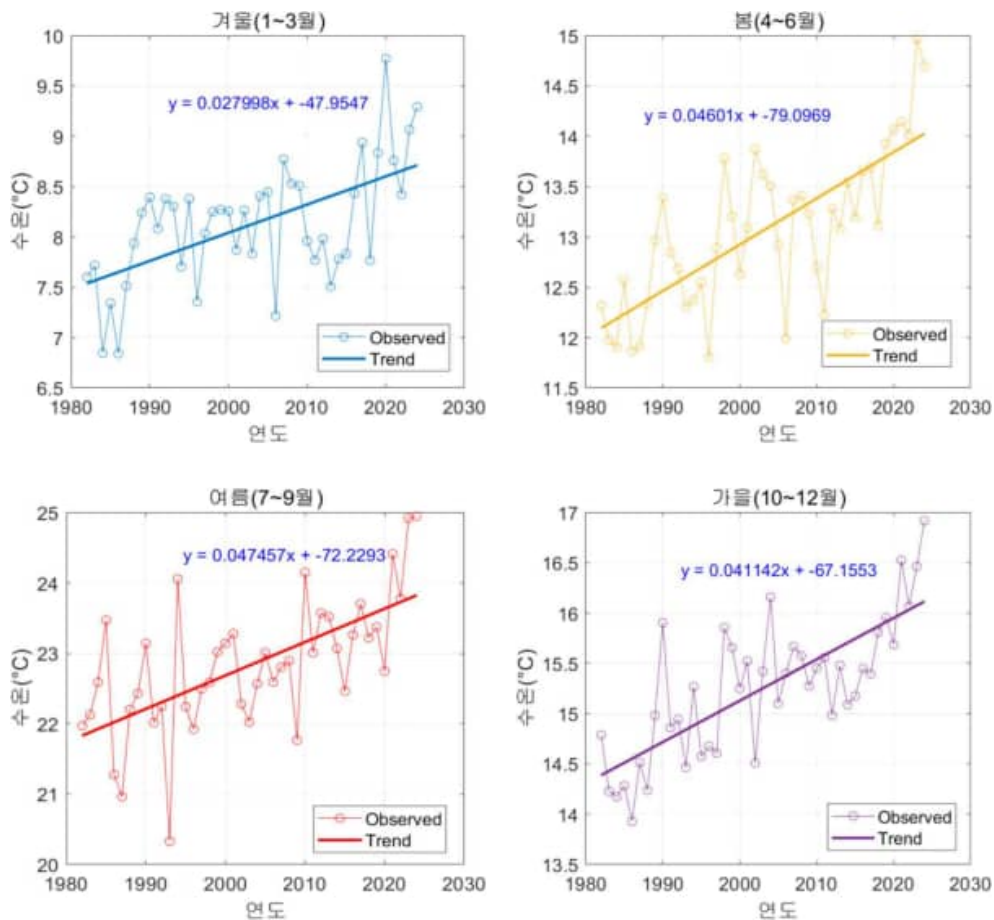
2010년대 이후에는 양의 편차가 뚜렷이 늘어나며, 특히 2018년 이후에는 대부분 연도에서 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 이상의 양의 편차를 기록하였다. 이는 장기 평균을 상회하는 고수온 상태가 빈번해졌음을 의미하며, 동해의 기후 시스템이 이전과는 다른 안정된 고수온 체제로 진입했음을 시사한다.

2020년대 들어 이러한 경향은 더욱 강화되었다. 최근 5년(2020-2024년) 동안은 $+1.0\sim 1.8^{\circ}\text{C}$ 에 달하는 매우 강한 양의 편차를 기록하며 관측 기간 중 가장 높은 고수온 상태를 지속하였다. 특히 2023년과 2024년의 편차는 장기 평균 대비 약 $+1.5^{\circ}\text{C}$ 이상으로, 이는 기후변화로 인한 동해의 급격한 아열대화 진행을 보여주는 대표적인 지표로 해석된다.

전반적으로 동해는 1980~1990년대의 저수온 체제를 벗어나 2000년대의 과도기를 거쳐, 2010년대 이후 뚜렷한 고수온 체제로 전환되었으며, 최근에는 고수온의 강도와 지속 기간이 더욱 강화되는 추세이다. 이러한 변화는 난류성 어종의 급증, 냉수성 어종의 감소, 어장 북상 및 생태계 구조 변화 등 최근 동해 어장환경 변화와 밀접하게 연결된다.

2.2. 표층 수온 계절 변화

동해 표층수온은 1980년대 이후 모든 계절에서 꾸준한 상승 경향을 보이며, 계절에 따라 상승 속도와 변동성의 양상이 다르게 나타난다(그림 13). 전체적으로는 여름과 봄에서 상승 폭이 가장 크고, 겨울과 가을에서도 상승 추세가 안정적으로 지속되는 특징이 확인된다. 이는 동해 수온 상승이 특정 계절에 국한되지 않고 연중 전 계절에 걸쳐 장기적으로 진행되는 변화임을 의미한다.



<그림 13> 동해 표층수온(SST) 계절별·연도별 시계열 변화

겨울철 수온은 1980년대 약 7°C 내외에서 시작하여 최근에는 8.5~9.5°C로 상승하며 안정적인 상승 경향을 보이며, 10년당 약 0.28°C 상승에 해당하는 꾸준한 증가가 이어지고 있다. 겨울철은 혼합이 강하게 일어나는 계절이므로 기후변화의 영향이 완화될 수 있지만, 그래프에서는 여전히 장기적인 온난화가 지속적으로 누적되고 있음을 보여준다. 연도별 변동성은 크지 않으며, 상승 경향이 가장 안정적으로 지속되는 계절로 볼 수 있다.

봄철은 사계절 중 수온 증가 속도가 가장 두 번째로 빠른 계절이다. 10년당 약 0.46°C 상승, 이는 겨울 대비 약 1.6배 빠른 온난화 속도이다. 그래프에서도 1980년대 약 12°C였던 수온이 최근에는 14°C를 넘어가는 수준으로 상승하며, 전체적인 증가 경향이 매우 뚜렷하다. 봄철의 이러한 온난화는 생산성 변화, 봄철 플랑크톤 대번식(spring bloom)시기 변화, 난류성 어종 확장과 직결되는 중요한 신호로 해석된다.

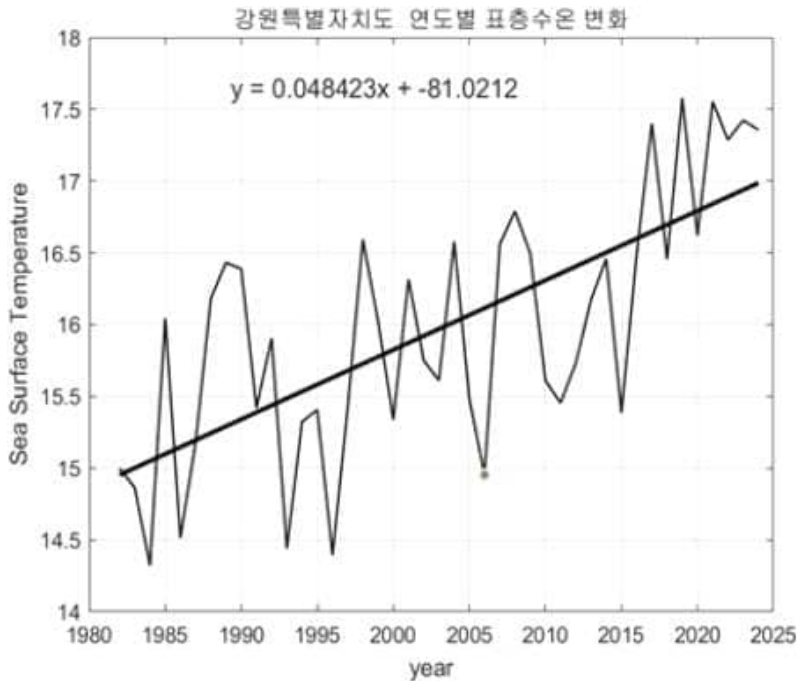
여름철은 사계절 중 가장 높고 동시에 증가 폭도 큰 계절이다. 10년당 약 0.47°C 상승, 이는 동해 연중 최고 수준의 온난화 속도이다. 그래프에서도 1980년대 약 21.5°C였던 수온이 최근에는 23.5~25°C까지 상승하며 거의 2°C 이상의 상승폭이 나타난다. 또한 여름철 수온은 극값(고수온) 발생 빈도가 빠르게 증가하고 있어, 해양 열파(marine heatwave)의 발생 가능성과 강도가 점점 커지고 있음을 시사한다.

가을철 수온 역시 지속적인 온난화 경향을 나타내며, 10년당 약 0.41°C 상승하고 있다. 봄과 여름 보다는 조금 낮지만 겨울보다는 빠른 속도이다. 가을철 수온은 1980년대 약 14°C에서 최근에는 15.5~16.7°C까지 상승하며, 상승 폭이 상대적으로 안정적으로 유지되는 특징을 보인다. 여름 고수온의 잔류가 길어지면서 가을철까지 따뜻한 수괴가 지속되는 경향이 강화되고 있으며, 계절 경계가 점점 흐려지는 현상, 즉 여름의 장기화로 이어지고 있다.

3. 강원특별자치도 연안 표층 수온 시계열 변화

3. 1. 표층 수온 평균 변화

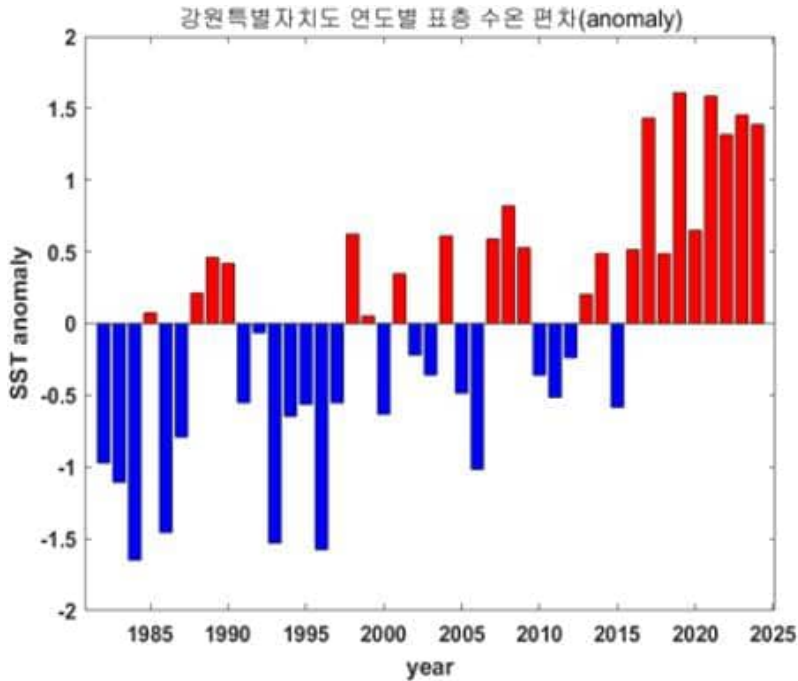
1980년부터 2024년까지 강원특별자치도 연안의 평균 표층수온을 분석한 결과, 지난 45년간 지속적이고 뚜렷한 온난화 경향이 확인되었다(그림 14). 회귀분석 결과, 표층수온은 연평균 약 0.048°C/년의 속도로 상승한 것으로 나타났으며, 이는 10년당 약 0.48°C, 전체 기간 총 약 2°C 내외로 상승하였다.



<그림 14> 1982-2024년 강원특별자치도 표층수온(SST) 연도별 시계열 변화

연도별 변화를 보면 기후 변동성의 영향으로 단기 수온 변동이 존재하나, 2010년대 이후 특히 상승 속도가 가팔라지며 최근 5~7년 동안은 관측기간 중 가장 높은 수온이 기록되었다. 이는 강원특별자치도가 포함된 동해 중부 연안의 아열대화가

빠르게 진행되고 있음을 시사하며, 난류성 수괴의 세력 강화 및 여름철 성층 강화를 포함한 여러 요인이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다.



<그림 15> 강원특별자치도 표층수온 장기평균(1982~2024) 대비 연도별 편차 변화

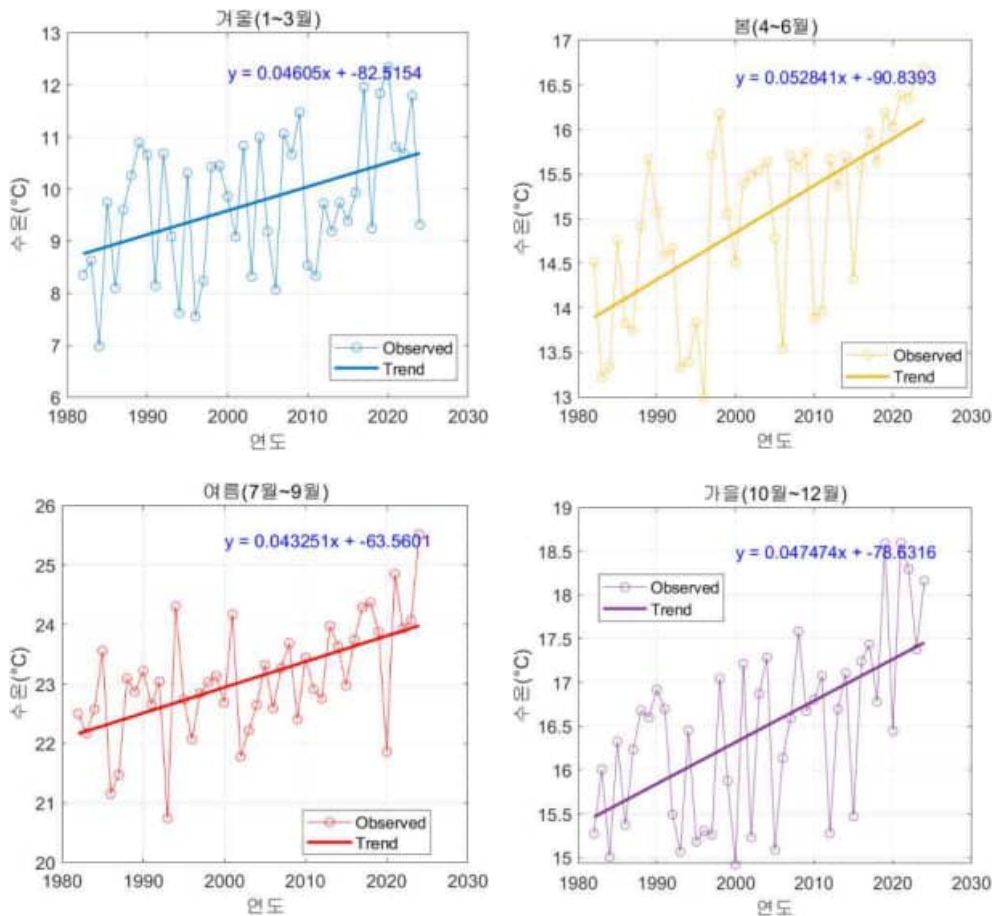
표층수온 편차를 분석한 결과, 1980~2000년대 중반까지는 기준값 대비 음의 편차 (-0.5°C 이하)가 지배적이었다(그림 15). 이 기간에는 강원특별자치도 연안이 상대적으로 냉수역 특성을 유지하고 있었음을 보여준다.

하지만 2000년대 후반 이후 양의 편차가 점차 증가하기 시작하며, 2015년 이후에는 대부분의 연도가 기준값보다 높은 양의 편차를 기록하였다. 특히 2020년대 들어서는 +1.0~1.7°C 수준의 강한 양의 편차가 연속적으로 발생하여, 장기 평균 대비 극히 높은 온난화 상태가 지속되고 있다.

이러한 변화는 단순한 자연 변동 범위를 넘어 장기적인 기후변화 신호가 강하게 드러난 것으로 해석되며, 난류 확장·북상류 강화·동해 연안 아열대화 등과 밀접한 연관성이 있을 것으로 추정할 수 있다.

3. 2. 표층 수온 계절 변화

1980년대부터 2024년까지 강원특별자치도 연안의 표층수온은 모든 계절에서 뚜렷한 온난화 추세를 보였다(그림 16). 이 기간 수온 상승 속도는 계절에 따라 차이가 있으나, 전체적으로 10년 동안 0.43~0.53℃ 수준의 꾸준한 상승이 나타난다. 이는 동해 연안이 기후변화의 영향을 빠르게 반영하는 해역이다.



<그림 16> 강원특별자치도 연안 표층수온(SST) 계절별·연도별 시계열 변화

겨울철은 1980년대 초 약 8~10°C 수준이었으나, 최근에는 10~12°C 가까이 도달하는 등 장기간 꾸준한 상승세를 보였다. 10년당 약 +0.46°C 상승을 보이며 겨울철에도 온난화가 진행되고 있다. 수온의 연도별 변동성은 존재하지만, 전체적으로는 40여 년 동안 약 1.8°C 전후 상승이 누적되었다. 다시 말해, 강원특별자치도 연안의 겨울은 과거보다 확실히 따뜻해진 계절로 바뀌었다.

봄철에는 사계절 중 상승 속도가 가장 빠르다. 10년당 약 +0.53°C 상승 속도로 1980년대 13~14°C 수준에서 최근에는 15.5~16.5°C 로 올라가며, 40년 동안 약 2.1°C 이상 상승하였다. 이는 봄철 수온이 생태계 전반에 결정적 영향을 미치기 때문에, 플랑크톤 대번식 시기, 이동·어종 산란장 변화·연안 수산자원 초기 생활사 변화와 같은 핵심 생태 변동의 기반이 되는 중요한 결과다.

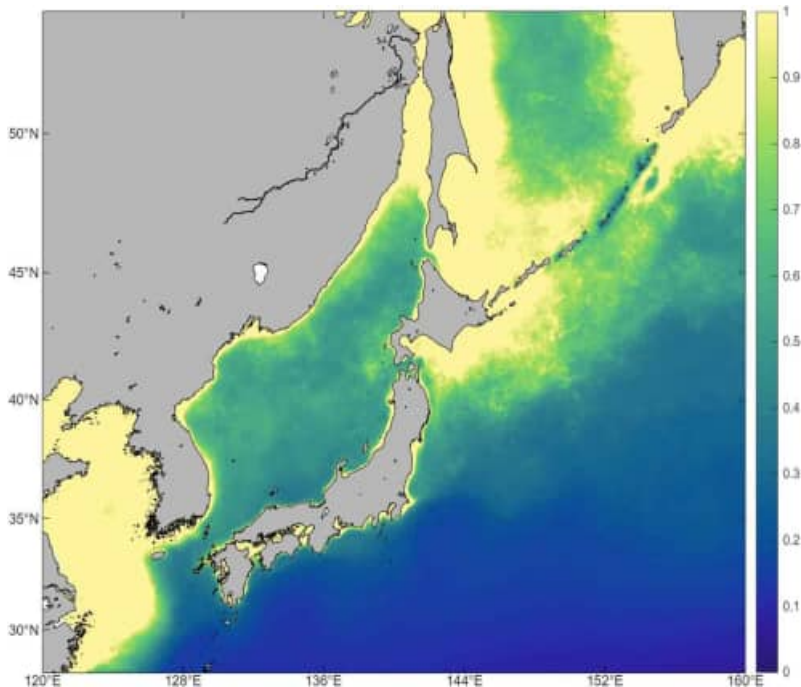
여름철에는 10년당 약 +0.43°C 상승 속도로 1980년대 약 22°C 수준이던 값이 최근에는 24~25°C 이상으로 올라가며 40년 동안 대략 +1.7°C 내외 상승하였다. 또한 최근 여름철은 24~25°C 에 가까운 고수온 해가 반복적으로 나타나 해양 열파(Marine Heatwave) 발생 위험이 커지고 있다.

가을철은 10년당 약 +0.47°C 상승하며, 1980년대 15~16°C대에서 최근에는 17~18.5°C까지 상승하여 약 40년 동안 1.8~2.0°C 상승하였다. 이는 여름철 고수온이 가을까지 이어지는 ‘여름 잔열 확장 효과’가 강화되고 있음을 시사한다. 결과적으로 가을은 예전보다 확실히 따뜻해졌으며, 여름의 연장 → 가을이 단축되는 계절 구조의 재편이 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

제2절 표층 엽록소 a 시계열 변화

1. 북서태평양 연대별 엽록소 a 장기 변화 및 편차

2003년부터 2024년까지 인공위성으로 관측된 평균 엽록소 a 농도 분포를 살펴보면, 북서태평양 해역은 전체적으로 연안 고농도-외해 저농도의 뚜렷한 공간적 구배가 나타난다(그림 17). 한반도와 일본, 러시아 연안과 같이 대륙붕과 연안이 발달한 해역에서는 엽록소 a 농도가 상대적으로 높게 나타나며, 이는 지형적 영향, 연안 용승, 하천 및 지형성 영양염 유입 등 다양한 요인이 복합적으로 작용한 결과이다. 이러한 영향으로 동해 연안 및 일본 혼슈·홋카이도 연안에서는 평균 $0.6\text{mg}/\text{m}^3$ 이상을 보이는 고생산성 수역이 넓게 분포한다.



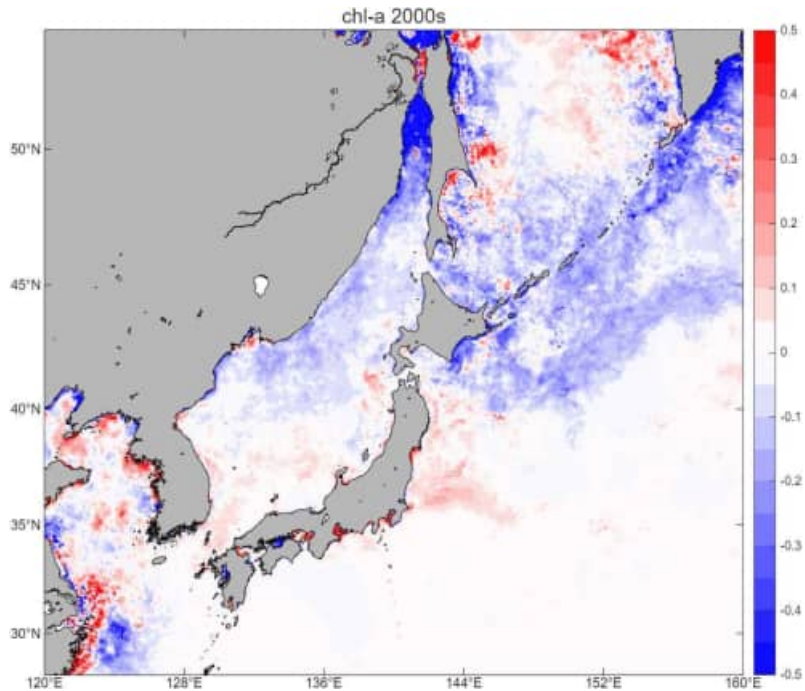
<그림 17> 북서태평양 표층 엽록소 a 장기 평균 분포(2003-2024년)

동해 중앙부는 연안보다 낮지만 여전히 중간 수준의 식물플랑크톤 농도를 유지하고 있으며, 이는 동해 특유의 깊은 혼합층 발달과 한류·난류의 교차가 장기적으로 기초생산력을 뒷받침하기 때문으로 보인다. 특히 일본 동부 해역에서 쿠로시오 난류와 오야시오 한류가 만나는 전선대에서는 영양염 공급과 수괴 혼합이 활발하게 이루어지며, 장기 평균에서도 뚜렷한 중·고농도 분포가 확인된다. 이 해역은 북서태평양에서 가장 생산성이 높은 주요 어장으로 알려져 있으며, 실제로 <그림 17>에서도 녹황색(약 $0.4\text{--}0.7\text{ mg m}^{-3}$)의 연속적인 고생산성 띠가 나타난다.

반면 일본 남쪽 외해와 쿠로시오 중심부는 전형적인 아열대 빈영양(oligotrophic) 해역으로, 강한 성층과 제한된 영양염 공급으로 인해 장기 평균 엽록소 a 농도가 매우 낮게 나타난다(0.1 mg/m^{-3} 이하). 이는 광범위한 청색 영역으로 표현되어 외해의 낮은 기초생산력을 보여준다. 오야시오 해역은 이와 대조적으로 냉수와 영양염 공급이 풍부하여 높은 생산성을 보이며, 쿠릴열도 주변에서는 장기적으로도 고농도의 식물플랑크톤 활동이 유지된다.

한반도 주변에서는 남해와 동해 연안이 모두 평균적으로 높은 생산성을 보인다. 남해 연안은 폐쇄성 해역 특성, 조류 혼합, 하천기원 영양염에 의해 지속적으로 높은 농도를 유지하며, 강원특별자치도 연안 역시 계절적 용승 및 겨울철 강한 혼합의 영향으로 높은 엽록소 a 농도가 관측된다.

종합하면 2003년부터 2024년까지의 장기 평균 엽록소 a 분포는 북서태평양 해역의 기초생산력 구조가 지형·해류·성층·혼합 등 물리적 요인에 의해 안정적으로 형성되어 왔음을 보여준다. 특히 난류-한류 전선대, 동해 연안, 오야시오 영향 해역과 같은 고생산성 지역은 기후변화에 따른 수온 상승, 성층 강화, 해류 경로 변화에 상대적으로 민감하게 반응할 가능성이 크다.

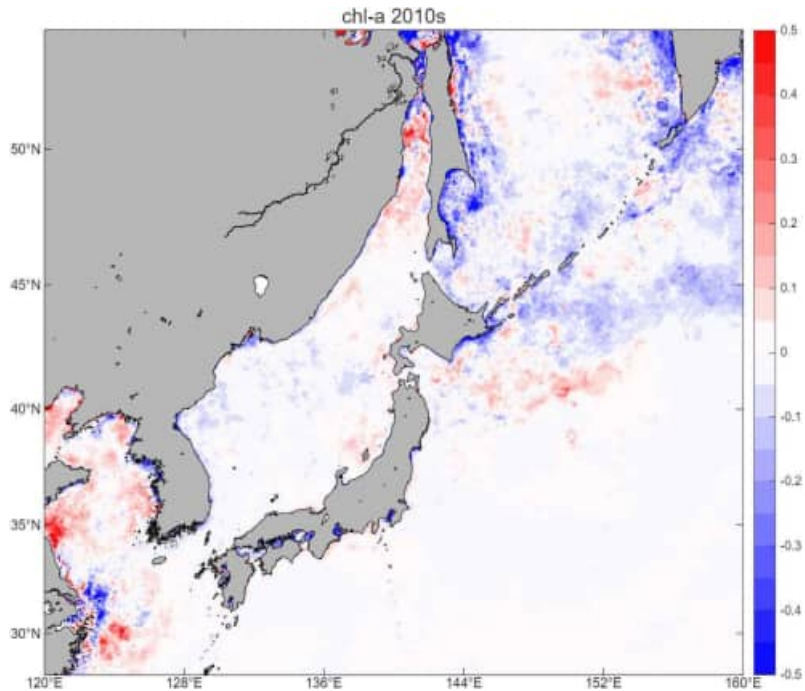


<그림 18> 장기평균(2003-2024) 대비 2000년대 표층 수온 어노말리

2000년대의 엽록소 a 편차 분포는 동해와 주변 해역에서 해역별 차이가 뚜렷한 패턴을 보인다(그림 18). 동해 중심부와 일본 북동쪽으로 이어지는 외해에서는 전반적으로 평균보다 낮은 농도가 넓게 나타나며, 이는 이 시기 해당 해역의 기초 생산성이 장기평균에 비해 다소 약화되었음을 의미한다. 특히 홋카이도 동쪽과 쿠릴열도 남쪽으로 이어지는 해역에서 음의 편차가 상대적으로 크게 나타나며, 동해 북부 외해에서도 평균 이하의 농도가 지속되는 양상을 보인다.

반면, 우리나라 남해와 동중국해 북부 연안에서는 평균보다 높은 엽록소 a 농도가 비교적 높게 분포한다. 이 해역은 하천·플룸 기원 영양염 유입, 연안수와 외해수의 혼합 변화 등 연안 특유의 환경적 요인으로 인해 생산성이 증가한 경향이 나타난 것으로 보여진다.

한반도 동해안과 일본 서해안에 해당하는 연안역에서는 음·양의 편차가 교차하면서 명확한 증가 또는 감소 경향이 아닌, 지역적·국지적 변동성이 강한 패턴을 보인다. 특정 연안역에서는 소규모 양의 편차가, 다른 해역에서는 소규모 음의 편차가 나타나 2000년대 동해 연안의 생산성 변화는 대규모 경향보다는 국소적 요인이 지배했을 가능성을 시사한다. 또한, 오후츠크해 남부에는 강한 양의 편차가 분포하여 이 시기 해당 해역에서 평균 대비 뚜렷한 생산성 증가가 있었음을 보여준다. 2000년대의 엽록소 a 편차는 동해 외해의 생산성 약화, 남해·동중국해의 생산성 증가, 그리고 연안역의 불규칙한 국지 변동이라는 상반된 공간 패턴이 동시에 나타난 시기였다고 볼 수 있다.



<그림 19> 장기평균(2003-2024) 대비 2010년대 표층 수온 어노말리

2010년대의 엽록소 -a 편차 분포를 보면 연안과 고위도 해역을 중심으로 양의 편차가 증가하고, 반대로 동해 중·남부 외해는 여전히 평균 이하 농도가 나타난다 (그림 19). 해역별로 증가·감소 패턴이 더욱 선명해지면서 공간적 대비가 뚜렷해진 것이 특징이다.

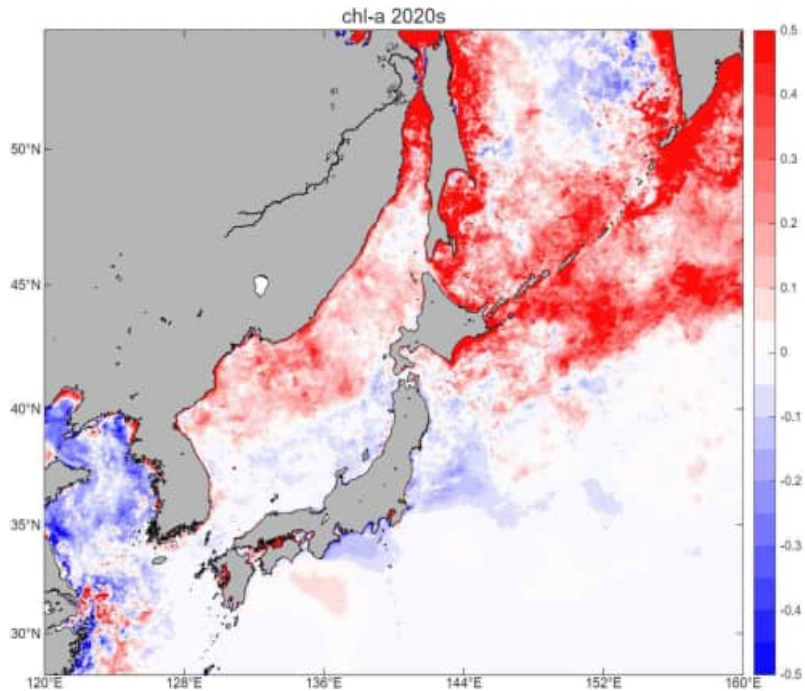
먼저, 오후츠크해 남부·캄차카반도 인근·사할린 동측 해역에서는 짙은 붉은색이 넓게 분포하며 평균 대비 높은 엽록소 a 농도 증가가 나타난다. 이는 고위도 해역에서 혼합층 발달 또는 계절적 빙권 감소와 관련해 생산성이 뚜렷하게 강화된 시기를 반영하는 것으로 해석된다. 이 해역 양의 편차는 2000년대보다 더 강하게 나타났다.

반대로, 동해 중·동부 외해(일본 홋카이도 남동쪽-쿠릴열도 남쪽으로 이어지는 해역)에서는 넓은 범위에 걸쳐 푸른색 음의 편차가 지속적으로 나타난다. 음의 편차의 공간 규모는 2000년대와 비슷하거나 다소 확장된 모습으로, 2010년대에도 동해 외해의 평균 생산성이 장기평균보다 다소 낮은 상태가 지속되었음을 보여준다.

한편, 한국 남해안·동중국해 북부 연안에서는 붉은색 양의 편차가 산발적으로 나타나며 2000년대와 유사하게 연안·플룸 지역의 국지적인 생산성 증가가 유지된 모습이다. 다만 증가 영역의 규모는 2000년대보다 다소 제한적이며, 연안에 국한된 형태가 더 뚜렷해졌다.

한반도 동해안과 일본 서해안에서는 2000년대와 마찬가지로 음·양 편차가 혼합된 패턴을 보이나, 2010년대에는 양의 편차가 다소 증가한 구역이 더 명확하게 나타난다. 특히 동해 북부 연안(러시아 연해주-북동일본 접경)은 곳곳에 붉은색 편차가 분포해 연안 기반 생산성이 상대적으로 높아진 구간을 형성한다.

2010년대의 편차 분포는 고위도 해역의 생산성 증가, 동해 중심부 외해의 지속적 감소, 남해·동중국해 및 한·일 연안의 국지적 증가라는 상반된 변화가 더욱 선명해진 시기로 정리된다. 다시 말해 2000년대보다 ‘대비가 뚜렷한 패치형 구조’가 강화된 것이 2010년대의 특징적 분포라고 할 수 있다.



<그림 20> 장기평균(2003-2024) 대비 2020년대 표층 수온 어노말리

2020년대 엽록소 a 편차는 앞선 두 연대(2000년대, 2010년대)와 비교했을 때 공간적 패턴의 변화 폭이 가장 크고, 증가·감소 신호가 매우 극단적으로 대비되는 특징을 보인다(그림 20).

특히 동해 북부와 북서태평양 고위도 해역 전역에서 강력한 양의 값이 광범위하게 나타나며, 이 시기 해당 해역에서 평균 대비 뚜렷한 생산성 증가가 발생했음을 시사한다.

우선, 일본 홋카이도 동쪽~쿠릴열도~캄차카반도 남부로 이어지는 광범위한 해역은 +0.3~+0.5 mg/m³ 이상의 매우 강한 붉은 신호가 확장되어 나타난다. 이는 2000년대·2010년대에서 이미 관측되던 고위도 증가 경향이 2020년대에 들어 더욱 강화되었다는 것을 보여주며, 고위도 해역의 혼합층 변화, 빙권 축소, 해류 변동 등

물리환경 변화가 생산성 증가로 직접 이어졌음을 시사한다.

또한 동해 북부(러시아 연해주 인근)와 일본 북부 연안 전역에서도 양의 편차 영역이 넓고 강하게 나타나, 2010년대보다 증가 패턴이 한층 더 확대되었다. 이는 동해 북부가 최근 수년간 냉수·난류의 상호작용 변화와 계절적 혼합 증가로 인해 생산성이 다시 높아졌음을 의미하는 것으로 해석된다.

반면, 대한민국 동해 남부~일본 혼슈 남부를 포함한 동해 남부 외해는 푸른색의 음의 편차가 비교적 선명하게 나타난다. 대부분 $-0.1\sim-0.3 \text{ mg/m}^3$ 수준으로 감소 폭이 크지는 않지만, 동해 남부 외해에서는 2000년대와 2010년대에 이어 2020년대에도 평균 대비 낮은 생산성 패턴이 지속되는 모습을 보여준다. 이 지역의 지속적 감소는 난류 성층 심화·해수 안정화·혼합 약화와 같은 기후변화 기반의 물리구조 변동과 연관된 것으로 해석할 수 있다.

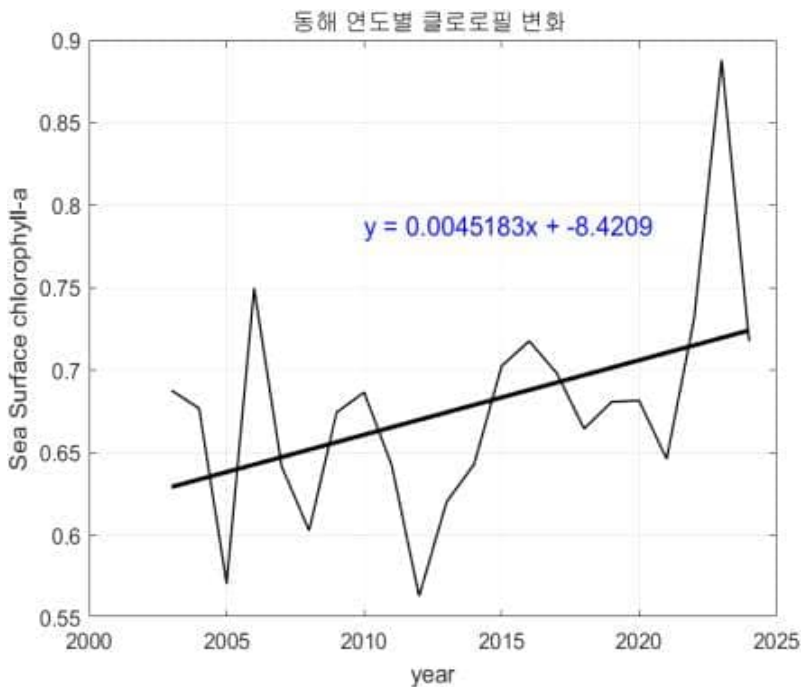
한편, 한국 남해안·동중국해 북부 연안에서는 음·양 신호가 모두 존재하지만, 이전 연대와 달리 음의 편차가 다소 확대된 모습이 관찰된다. 이는 플룸·연안 기원 영양염 공급의 변동곡선이 커졌음을 보여주며 2020년대 초반 여러 해에서 연안 기반 생산성 감소 현상이 증가한 것과 관련된다.

종합적으로, 2020년대의 편차 분포는 고위도·북부 해역에서의 폭발적인 생산성 증가와 동해 남부 외해에서의 일관된 감소 지속이라는 매우 강한 공간적 이분화를 보여주는 시기로 요약된다. 이는 2000년대~2010년대에 나타난 경향이 2020년대에 들어 ‘극단화(Escalation)’ 된 형태로 나타난 것으로, 최근 동해·북서태평양 엽록소 a 가 빠르게 재조정되고 있음을 시사한다.

2. 동해 평균 표층 엽록소 a 시계열 변화

2. 1. 표층 엽록소 a 연평균 변화

2003년부터 2024년까지 동해 전역의 연평균 엽록소 a 농도 변화를 나타낸 시계열 자료는 연도별 변동성이 매우 큰 가운데, 장기적으로는 완만한 증가 경향이 뚜렷하게 나타난다(그림 21).



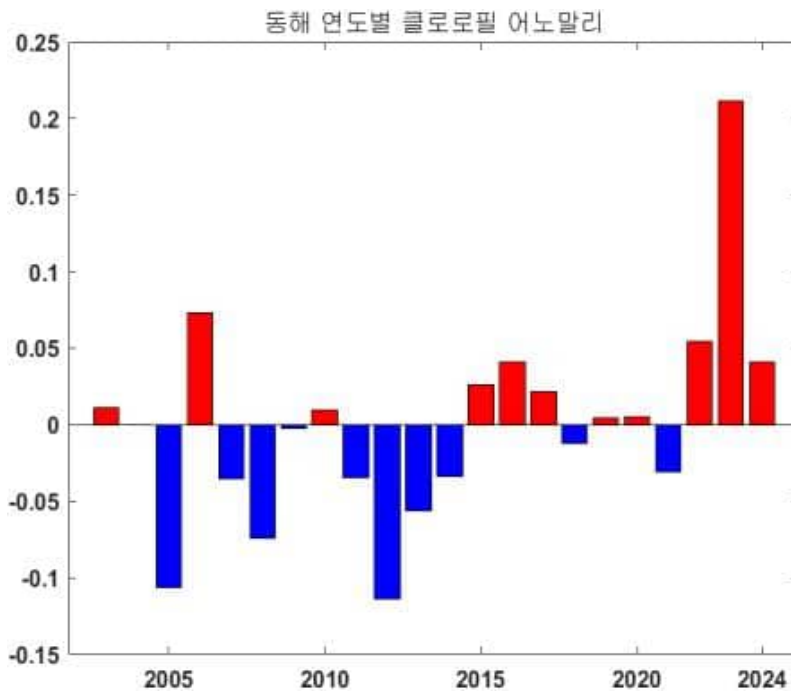
<그림 21> 2003-2024년 동해 엽록소 a 연도별 시계열 변화

연도별 변동성이 매우 큰 가운데, 장기적으로는 완만한 증가 경향이 뚜렷하게 나타나며 10년당 약 0.045 mg/m^3 농도가 증가하고 있다.

시계열 상에서는 특정 해에 급격한 상승 또는 하강이 반복되는데, 특히 2005년, 2010~2012년에는 평년 대비 낮은 농도가 나타나며 일시적인 생산성 약화시기가 관찰된다. 반대로 2015년 전후로는 증가 구간이 형성되며, 2023년에는 전체 기간

중 가장 높은 약 0.88 mg/m^3 가 나타났다. 이는 최근 수년간 동해 북부·고위도 해역에서 나타난 엽록소 a의 급격한 증가 패턴과 일치하는 패턴이다.

전반적으로 동해의 연평균 엽록소 a는 기후·해류·성층의 단기 변동에 따라 해마다 진폭이 큰 변동을 보이지만, 장기적으로는 기초생산성이 서서히 증가하는 방향으로 변화하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 증가 경향은 2020년대 편차 지도에서도 나타났던 고위도 및 동해 북부 지역의 강한 양의 편차 확산과도 일관된 결과를 보여주며, 최근 동해 생태계가 생산성 고도화 방향으로 재편되는 과정에 있음을 시사한다.



<그림 22> 동해 장기 평균(2003~2024) 표층 수온 대비 연도별 편차 변화

동해의 연도별 엽록소 a 편차를 보면, 2003년 이후 생산성이 평균보다 낮았던 시기와 높았던 시기가 반복되는 패턴을 보이며, 특히 2010년 전후와 2020년 이후의 대비가 뚜렷하다(그림 22).

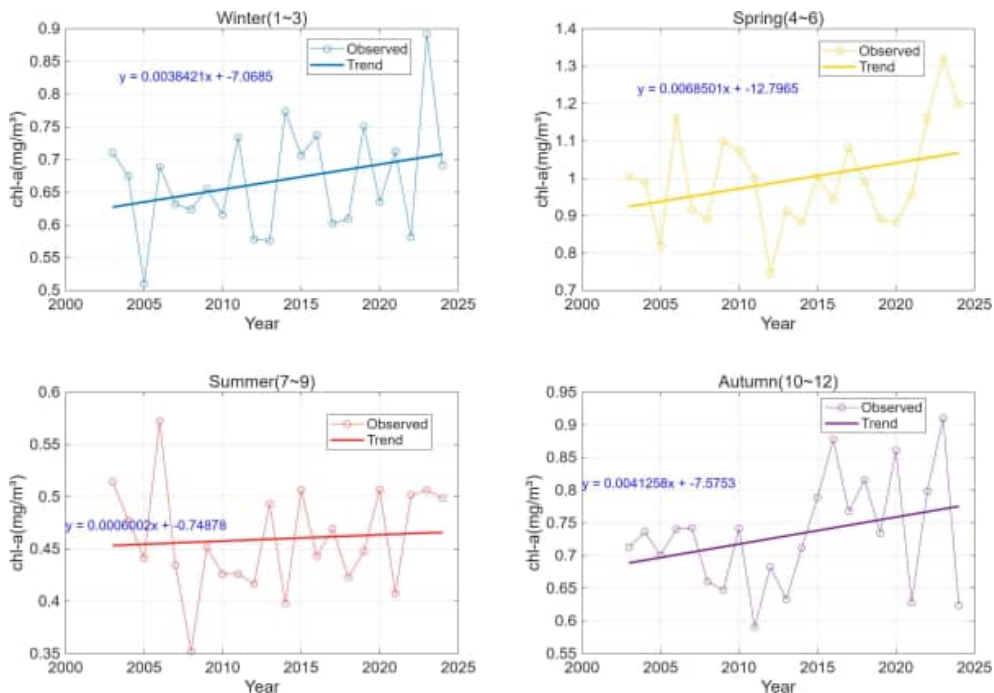
먼저, 2003~2012년 사이에는 전반적으로 음의 편차가 우세하게 나타난다. 2005년과 2008~2012년 구간에서는 $-0.05 \sim -0.12 \text{ mg/m}^3$ 범위의 비교적 큰 폭의 감소가 반복되며, 이 시기는 동해의 평균 생산성이 장기평균에 비해 일시적으로 약화되었던 기간으로 볼 수 있다. 이후 2013년부터 2019년 사이에는 음·양의 편차가 교차하며 $-0.03 \sim +0.03 \text{ mg/m}^3$ 수준의 약한 변동성 중심의 혼합된 패턴이 이어진다. 이 구간은 뚜렷한 감소나 증가의 추세보다는 기후·해류 변동에 따른 단기적 변화가 반복된 시기로 볼 수 있다.

반면 2020년대에 들어서면서 패턴은 명확히 변화한다. 2020~2021년은 미약한 양·음 편차가 혼재하지만, 2022년 이후에는 양의 편차가 빠르게 커지며 특히 2023년에는 약 $+0.22 \text{ mg/m}^3$ 로 전체 기간 중 가장 높은 양의 편차를 보인다. 이는 앞선 편차 지도에서 나타난 2020년대 동해 북부·고위도 해역의 생산성 급증 신호와 정합성이 높다.

종합하면, 동해 엽록소 a 어노말리는 2000년대 후반~2010년대 초반의 생산성 약화, 2010년대 중반의 혼합된 변동성, 그리고 2020년대 이후의 생산성 회복 및 급증이라는 세 단계의 변화 패턴을 보여준다. 특히 2023년 이후의 강한 양의 편차는 동해 생태계가 최근 기초생산력 측면에서 상승 경향으로 전환됐음을 시사한다.

2. 2. 동해 표층 엽록소 a 계절 변화

동해의 계절별 표층 엽록소-a 농도는 지난 20여 년간 계절 특성에 따라 서로 다른 변화 양상을 보이며, 전체적으로는 네 계절 모두 완만한 증가 경향을 나타낸다. 다만 증가 속도와 연도별 변동 폭은 계절마다 큰 차이를 보였으며, 증가 속도는 봄 > 가을 > 겨울 > 여름 순으로 뚜렷하다.



<그림 23> 동해 엽록소 a 계절별·연도별 시계열 변화

겨울철 엽록소 a 농도는 연도별로 등락을 반복하지만, 전반적으로는 서서히 증가하는 흐름을 보인다. 초반에는 0.6 mg/m³ 안팎에서 흔들리는 모습이었으나, 최근으로 갈수록 0.7 mg/m³ 이상을 나타내는 해가 늘어나면서 생산성이 강화되는 방향으로 변화하고 있다.

봄철은 계절 중에서 가장 뚜렷한 증가 추세를 보인다. 2000년대 초반에는 값이 크게 요동하며 낮은 농도가 자주 나타났지만, 이후로는 고농도 해가 반복적으로 등장하며 전체적인 생산성이 장기적으로 상승하는 패턴을 보여준다. 특히 최근으로 갈수록 1.0 mg/m^3 이상의 값이 빈번하게 나타나며, 춘계 플랑크톤 대번식(spring bloom)이 과거보다 강해진 것으로 볼 수 있다.

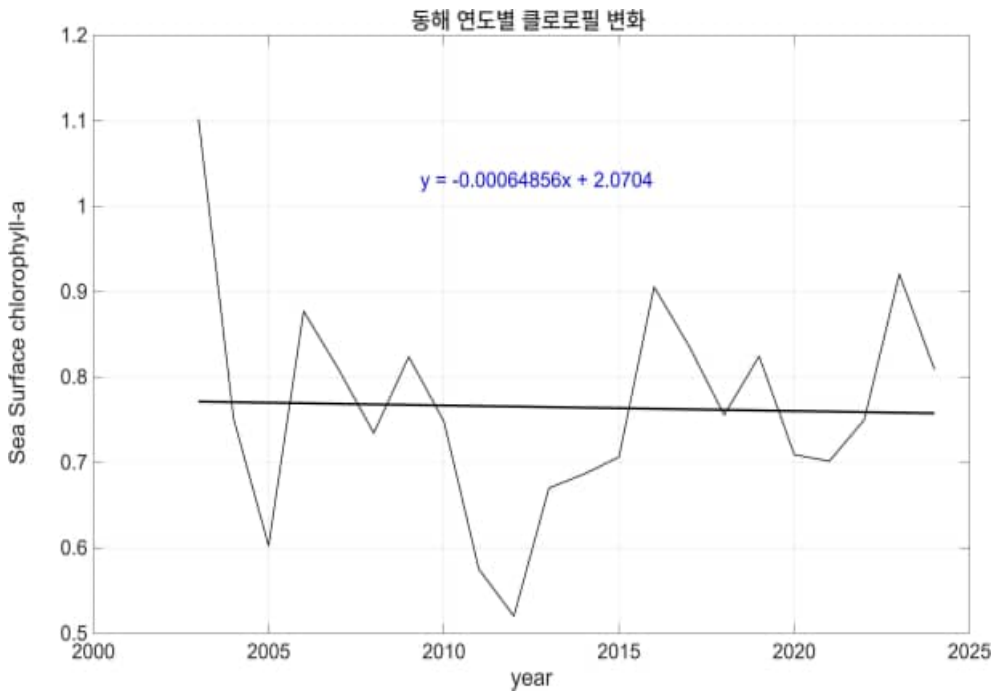
여름철은 강한 성층이 형성되는 시기라 영양염 공급이 제한되며, 사계절 중 가장 낮은 엽록소 농도를 보인다. 연도별 변동은 크지만, 장기적인 변화는 거의 나타나지 않는다. 다만 완전히 정체된 것은 아니고, 낮은 수준에서 소폭 증가하는 경향이 있지만 다른 계절과 비교하면 ‘큰 변화가 없는 계절’로 평가된다. 즉, 여름철 생산성은 기후적 영향이 상대적으로 작고 안정적으로 유지되는 형태에 가깝다.

가을철 엽록소 a는 2000년대 초반에는 $0.6\text{-}0.7 \text{ mg/m}^3$ 사이에서 머물렀지만, 시간이 지날수록 $0.7\text{-}0.8 \text{ mg/m}^3$ 이상을 보이는 해가 증가하면서 완만한 상승 경향을 나타낸다. 여름 성층이 약화되고 혼합이 다시 일어나면서 생산성이 회복되는 계절적 특성이 그대로 드러난다. 특히 최근 몇 년은 평균보다 높은 농도가 반복되며 가을 생산성이 안정적으로 강화되는 추세를 보인다.

3. 강원특별자치도 연안 엽록소 a 시계열 변화

3. 1. 강원특별자치도 표층 엽록소 a 평균 변화

강원특별자치도 연안의 표층 엽록소 a 농도는 2003년부터 2024년까지 연도별로 큰 변동성을 보이지만, 장기적으로는 완만한 감소 경향이 나타난다. 이 기간 엽록소 a 농도가 10년당 약 0.0065 mg/m^3 감소하는 하락 경향을 보여준다. 감소 폭은 크지 않지만, 장기 평균을 기준으로 보면 생산성이 서서히 약화되는 방향으로 변화하고 있음을 시사한다.

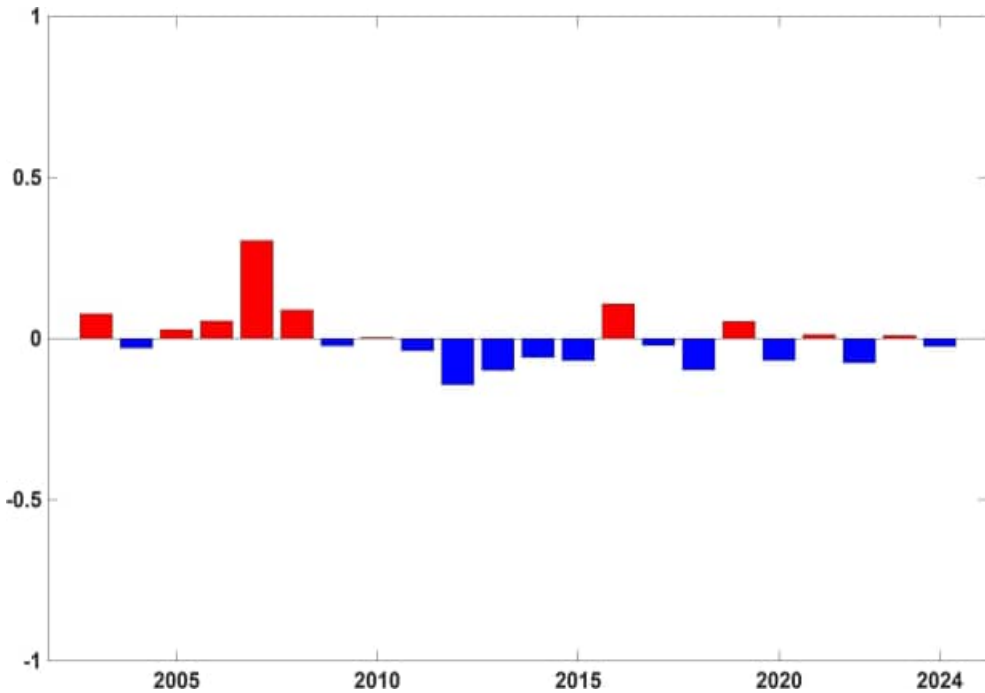


<그림 24> 2003-2024년 강원특별자치도 연안 엽록소 a 연도별 시계열 변화

연도별 변화를 살펴보면, 2003년과 2004년은 상대적으로 높은 농도를 보인 반면, 이후 2006~2012년 사이에는 평균 이하의 값이 반복되며, 동해 연안 생산성이 일시적으로 약해진 시기가 확인된다. 특히 2011~2012년에는 그래프 전체 기간 중 가장 낮은 수준으로 떨어졌다.

2013년 이후에는 전반적으로 회복 흐름이 나타나 일부 해에서 평균 이상의 농도가 기록되지만, 증가와 감소가 교차하며 뚜렷한 상승 추세를 형성하지는 못하였다. 특히 2018년 전후, 2021년, 2023년에 상대적으로 높은 값이 나타나나 전체적인 변동 폭은 $0.65\sim 0.85 \text{ mg/m}^3$ 범위에 머무는 등 강원 연안의 장기적 생산성이 크게 증감하지 않고 요동치는 형태가 유지됐다.

강원특별자치도 연안의 표층 엽록소 a는 연도별 변동성은 크지만 장기적으로는 약한 감소, 특히 2006~2012년 구간의 뚜렷한 생산성 저하와 최근 몇 년간의 부분적 회복하는 변화 흐름을 보인다. 이는 동해 전역에서 관측되는 장기적 생산성 증가 경향과 비교할 때, 강원 연안은 상대적으로 기후·해류 변화에 민감하며 국지적 요인에 의해 크게 흔들리는 해역임을 시사한다.



<그림 25> 강원특별자치도 연안 장기 평균(2003~2024) 대비 표층수온 연도별 편차 변화

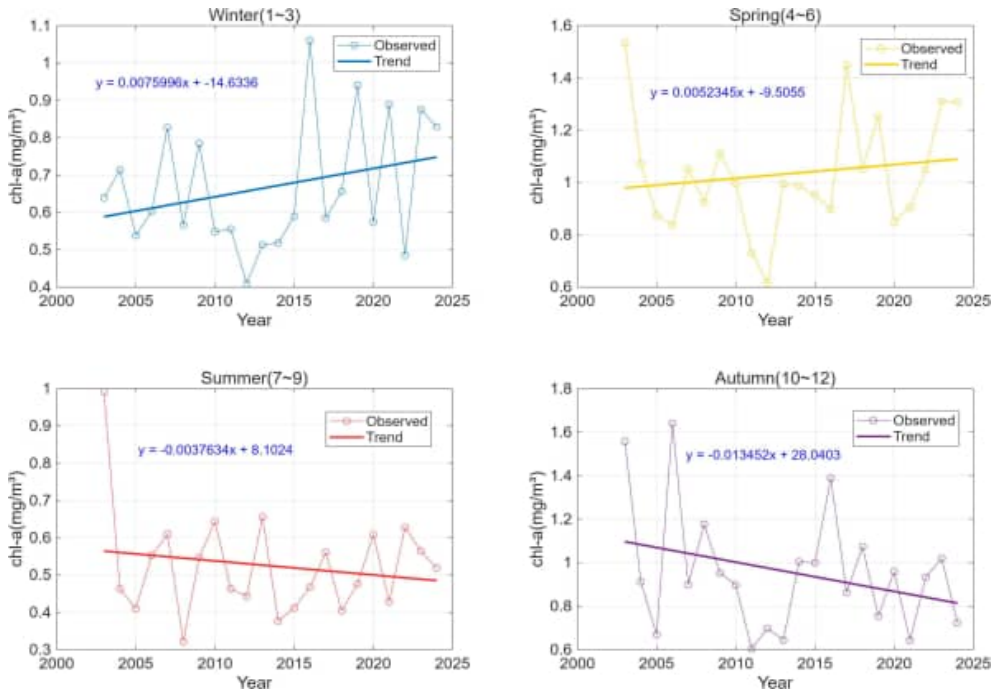
강원특별자치도 연안 표층 엽록소 a 편차는 2003년부터 2024년까지 연평균 대비 뚜렷한 장기 증가 또는 감소 경향은 나타나지 않았다(그림 25). 먼저, 2003-2007년 초반 구간에서는 대체로 양의 편차가 우세하게 나타났다. 특히 2006년 전후에는 비교적 큰 폭의 양의 편차가 발생하며 해당 시기 강원특별자치도 연안의 생물 생산성이 평년보다 높았음을 의미한다. 이 구간의 양의 편차는 동해 남부 난류 확장, 하계 강우 증가 등 연안 혼합 및 영양염 유입 증가 요인 등이 연관됐을 수 있다. 반면, 2008~2014년 구간에서는 음의 편차가 지속적으로 나타나며 이 기간은 강원 연안 생산성이 상대적으로 약화된 시기였다. 특히 2011~2012년에는 -0.2 mg/m^3 에 가까운 강한 음의 편차가 기록되며, 그래프 전체에서 가장 낮은 기간이었다.

이후 2015년을 전후로 다소 회복되는 경향이 나타나 일부 해에서는 양의 편차가 다시 나타나지만, 2016~2020년 사이에는 다시 소규모 음의 편차가 반복되며 명확한 증가 추세는 형성되지 않는다. 즉, 생산성은 회복과 약화를 주기적으로 반복하는 형태를 보인다. 최근 2021~2024년에는 음·양 편차가 교대로 나타나며 연안 생산성이 평년 수준을 중심으로 안정적으로 진동하는 모습을 보인다. 이 구간에서 편차의 절대 크기는 과거보다 작아, 최근 몇 년간 강원 연안의 생산성이 평균값을 중심으로 비교적 안정적으로 유지되고 있음을 시사한다.

종합하면, 강원특별자치도 연안의 엽록소 a 편차는 초기(2000년대 초)의 생산성 증가 → 2010년대 초반의 명확한 감소 → 2015년 이후의 산발적 회복이라는 세 단계 패턴을 보이며, 장기적인 지속 증가 또는 감소보다는 연안 환경의 단기 교란에 따라 크게 변동하는 구조가 지배적이라고 할 수 있다.

3. 2. 강원특별자치도 표충 엽록소 a 계절 변화

강원특별자치도 표충 엽록소 a는 계절에 따라 변화 방향이 뚜렷하게 갈리며, 봄과 겨울은 완만한 증가, 반면 여름과 가을은 완만한 감소 경향을 보인다(그림 26). 봄은 변동폭이 크지만 장기적으로 가장 뚜렷한 증가를 나타내며, 겨울 또한 연도별 진폭을 동반하나 점진적 상승 흐름이 확인된다. 반대로 여름은 강한 성층으로 인해 장기적 감소가 지속되는 유일한 계절이며, 가을 역시 최근으로 갈수록 값이 낮아지며 완만한 감소 추세가 나타난다. 결과적으로 강원 연안의 계절 생산성은 봄·겨울 증가, 여름·가을 감소라는 두 가지 방향으로 변화하고 있다.



<그림 26> 강원특별자치도 연안 엽록소 a 계절별·연도별 시계열 변화

계절별로 살펴보면 겨울철(1-3월)의 엽록소 a 농도는 연도별 변동성이 크지만, 장기적으로는 뚜렷한 완만한 증가 경향을 보인다. 초기에는 0.6 mg/m³ 이하까지 감소하는 해가 반복적으로 나타났으나, 최근에는 0.8 mg/m³ 내외의 비교적 높은

농도가 안정적으로 관측되고 있다. 회귀선이 우상향하는 점은 겨울철 혼합층 발달에 따른 영양염 공급이 꾸준히 유지되며, 동계 기초생산력이 점진적으로 강화되고 있음을 시사한다.

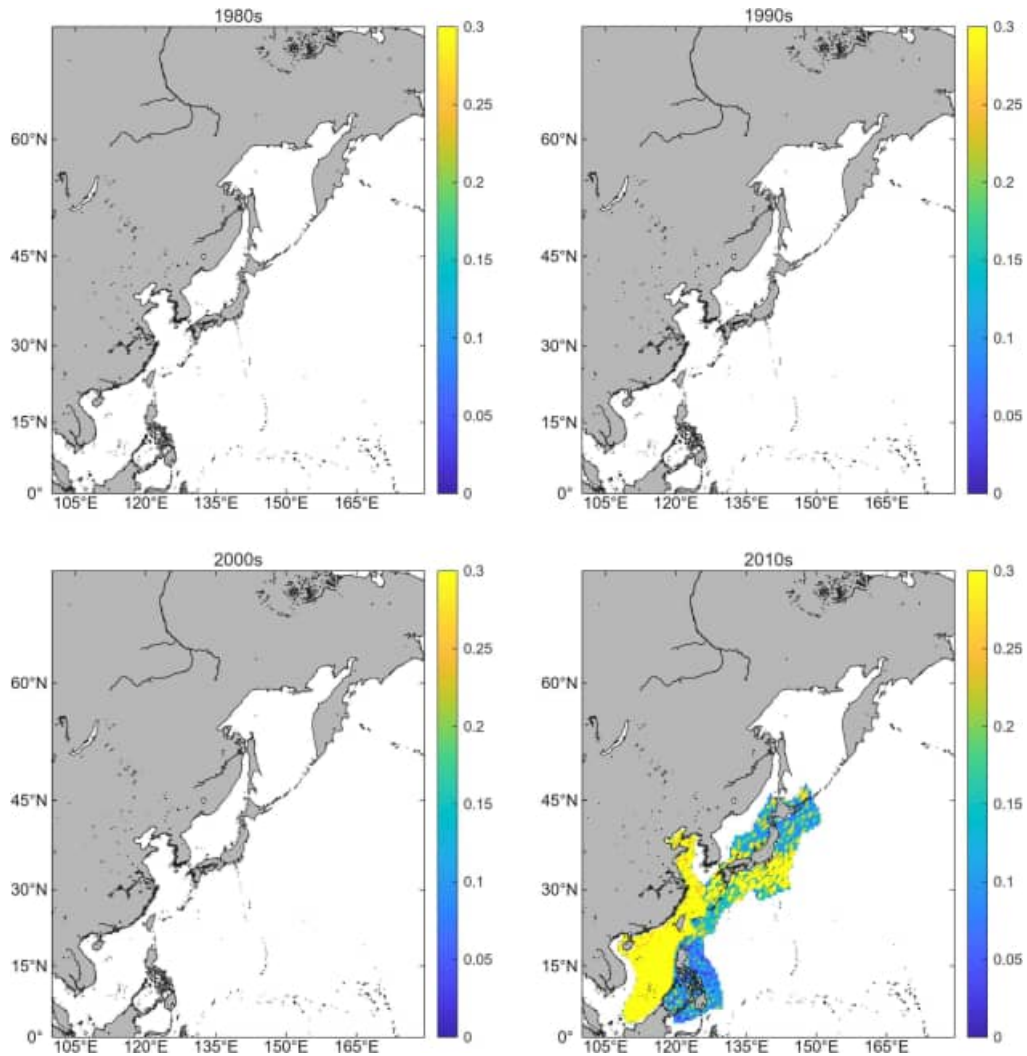
봄철(4-6월)은 계절 중 변동성이 가장 크며, 일부 연도에서는 1.5 mg/m^3 이상으로 급증하는 반면, 특정 해에는 급격히 감소하는 등 연도 간 편차가 매우 크게 나타난다. 이러한 높은 변동성에도 불구하고 장기 추세는 완만한 증가로 나타나며, 이는 봄철 필수 영양염 공급이나 물리적 환경(혼합·성층 전환기)의 변화가 결과적으로 생산성 강화를 유도하고 있음을 추정할 수 있다.

여름철(7-9월) 엽록소 a 농도는 사계절 중 가장 낮으며, 변동폭 또한 제한적이다. 그러나 장기 경향은 일관된 감소 추세를 보인다. 여름철에는 고수온 및 강한 성층으로 인해 영양염 수직 공급이 구조적으로 제한되는데, 이러한 조건이 시간이 지날수록 더 강화되면서 하계 기초생산성이 지속적으로 약화되는 것으로 해석된다.

가을철(10-12월)은 여름 성층이 붕괴되고 혼합이 재개되는 일반적 환경 조건에도 불구하고, 본 분석에서는 완만한 감소 경향이 나타났다. 초기에는 1.0 mg/m^3 에 근접한 상대적으로 높은 값이 자주 관측되었으나, 최근에는 0.8 mg/m^3 이하로 낮은 값이 반복되며 생산력 저하가 나타났다. 이는 가을철의 생산 환경이 과거 대비 덜 영양염 부유적이고 덜 생산적인 방향으로 변화했음을 시사한다.

4. 수산자원(방어, 참다랑어) 분포 변화

4. 1. 방어 분포 시계열 변화



<그림 27> 연대별(1980년대-2010년대) 방어류(갯방어) 어획 분포도

연대별 어획 기반 재분석 자료를 살펴보면, 방어류(갯방어)의 서식·어획 분포는 시기별로 뚜렷하게 달라지며, 특히 2010년대 이후 동해 해역에서 변화가 가장 두드러지게 나타난다는 점이 확인된다(그림 27).

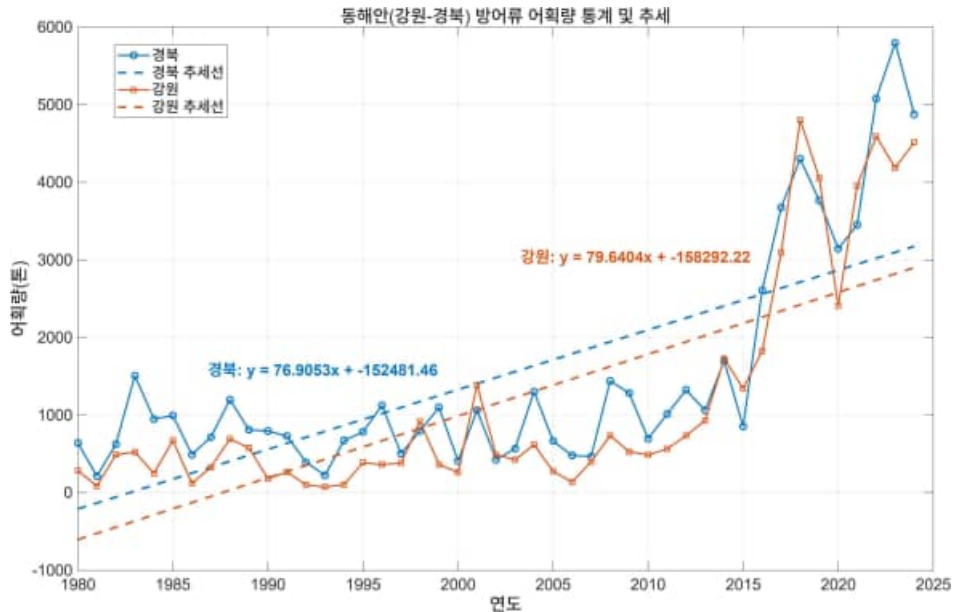
먼저 1980년대, 1990년대 그리고 2000년대 분포도에서는 동해 전역에서 방어류의 어획 기반 분포가 매우 제한적으로 나타난다. 해당 시기에는 동해 북부·중부·남부 어디에서도 뚜렷한 어획 집중도가 확인되지 않았다. 이는 당시 동해 해역에서 방어류가 주요 어업 대상종으로 부각되지 않았거나 통계 과정에서 누락됐을 가능성을 보여준다.

그러나 2010년대에 이르면 변화가 명확해진다. 분포도에서는 대한민국 동해 전역을 중심으로 분포 어획량이 증가한 모습이 드러난다. 특히 강원 동해 중·북부와 경북 연안에 이르는 광범위한 구간에서 어획량이 나타나며, 이는 해당 시기 이후 동해 해역에서 방어류 어획 활동이 실제로 크게 증가했을 가능성을 나타낸다.

또한 분포는 연안에 국한되지 않고, 동해 중부 외해까지 확장된 형태로 나타난다. 이는 2010년대 이후 방어류의 실제 어획 위치가 연안을 넘어 외해로 확대되었음을 시사하며, 동해 중부 수역이 새로운 어획 중심지로 부상했을 가능성을 보여준다.

종합적으로 볼 때, 2010년대를 기점으로 방어류가 동해 해역에서 어획되는 중요한 어업대상종으로 변화했음을 명확히 나타낸다. 1980-2000년대 동안 동해에서 어획 기반 분포 신호가 거의 없었던 것과 대조적으로, 2010년대에는 동해와 동중국해를 포함한 외해를 중심으로 하는 강한 분포 신호가 새롭게 등장하며, 이는 최근 실제 어업 통계와도 유사한 양상을 나타낸다.

연대별 분포 분석에서 확인된 것처럼 방어류가 2010년대를 기점으로 동해 해역에 뚜렷하게 출현하기 시작한 현상은 실제 어획량 통계에서도 명확하게 나타난다(그림 28).



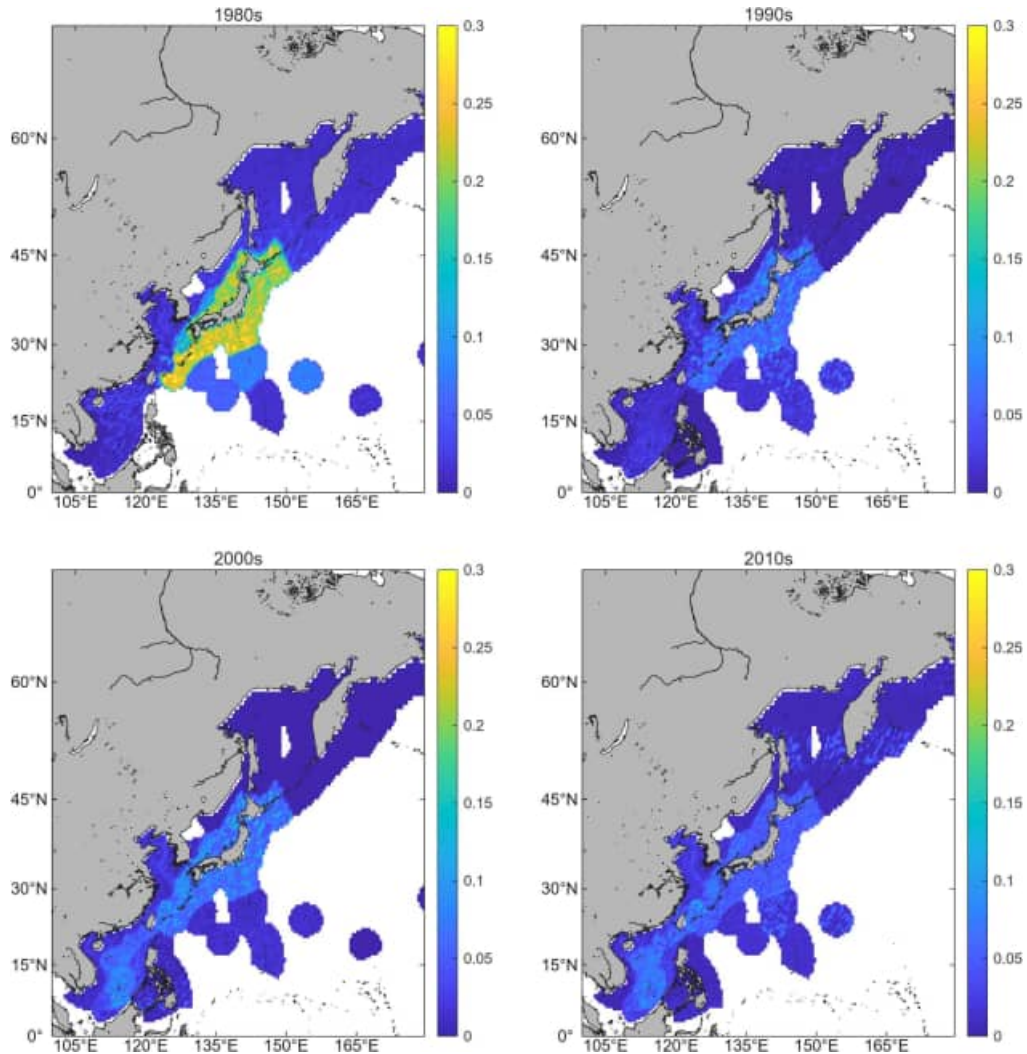
<그림 28> 동해안(강원·경북) 방어 어획량 장기 변화(1980년~2024년) [자료: 통계청]

강원도와 경북의 어획량 자료를 살펴보면, 1980~1990년대에는 두 해역 모두 소규모 변동을 반복하며 연간 어획량이 1,000톤 이하에 머물렀다. 그러나 2000년대 중반 이후 증가세가 본격화되었고, 2010년대 후반부터는 두 지역 모두 과거와 비교할 수 없을 정도로 큰 폭의 증가가 확인된다.

추세선을 통해 보면, 강원도와 경북 모두 장기적으로 우상향하며 각각 연평균 약 79톤, 76톤의 증가 경향을 보인다. 특히 강원도는 2020년대 들어 5,000톤 이상을 기록하는 등 증가 폭이 더욱 두드러진다. 이러한 패턴은 앞서 분석한 것처럼 2010년대 동해 해역에서 방어류 어획량이 급격히 높아진 시기와 일치하며, 동해 중부 해역을 중심으로 자원이 빠르게 확장됐음을 시사한다.

요약하면, 동해안 방어류 어획량은 2000년대 이후 지속 증가, 2010년대 이후 급증이라는 특징을 보이며, 이는 최근 동해 해역에서 관측되는 방어류의 분포 확대와 일관된 변화로 해석된다.

4. 2. 참다랑어 분포 시계열 변화



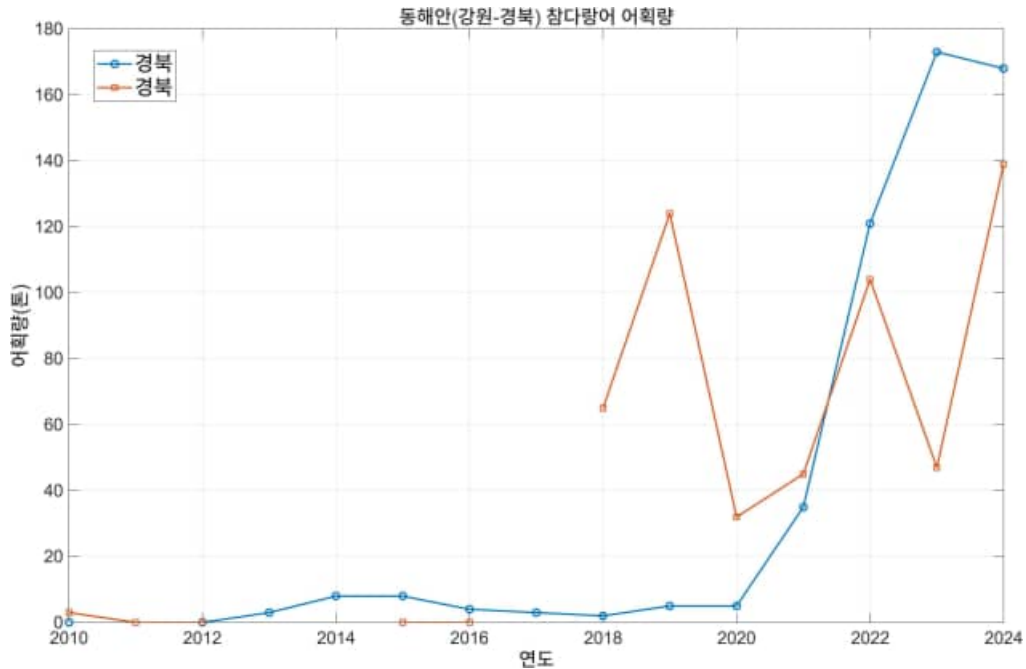
<그림 29> 연대별(1980년대-2010년대) 참다랑어 어획 분포도(단위: 톤)

연대별 참다랑어 어획 재분석 자료를 살펴보면, 과거 수십 년 동안 북서태평양에서 참다랑어가 어획된 공간 분포는 시기별로 뚜렷한 변화 양상을 보인다(그림 29).

먼저 1980년대 자료에서는 참다랑어 어획이 주로 일본 남부 해역과 동중국해 북부를 중심으로 나타나며, 높은 분포 밀도(노란색)도 대만-규슈 인근 해역에 한정된다. 이 시기 동안 우리나라 동해 연안 해역에서는 어획 기반 분포가 거의 관측되지 않는다. 즉, 동해는 참다랑어의 주요 어획·회유 경로로 확인되지 않는 구간이었다.

1990년대에 들어서도 이러한 공간적 특징은 크게 달라지지 않는다. 일본 남부와 동중국해 일대는 여전히 주요 어획 구역으로 나타나지만, 동해 연안 및 외해에서는 분포 신호가 미약하거나 존재하지 않는다. 이는 1990년대까지도 참다랑어가 동해 해역을 활용하는 패턴이 뚜렷하지 않았음을 보여준다.

2000년대와 2010년대 역시 동해에서의 변화는 제한적이다. 참다랑어 어획 분포는 여전히 남서방 해역, 즉 규슈-동중국해 인근이 중심축을 이루며, 동해 전역에서는 어획 기반 분포가 거의 확인되지 않는다. 이 시기까지 동해는 참다랑어 어획 통계상 사실상 비중이 작은 해역이었다는 점이 자료에서 확인된다.



<그림 30> 동해안(강원·경북) 참다랑어 어획량 장기 변화(1980년~2024년) [자료: 통계청]

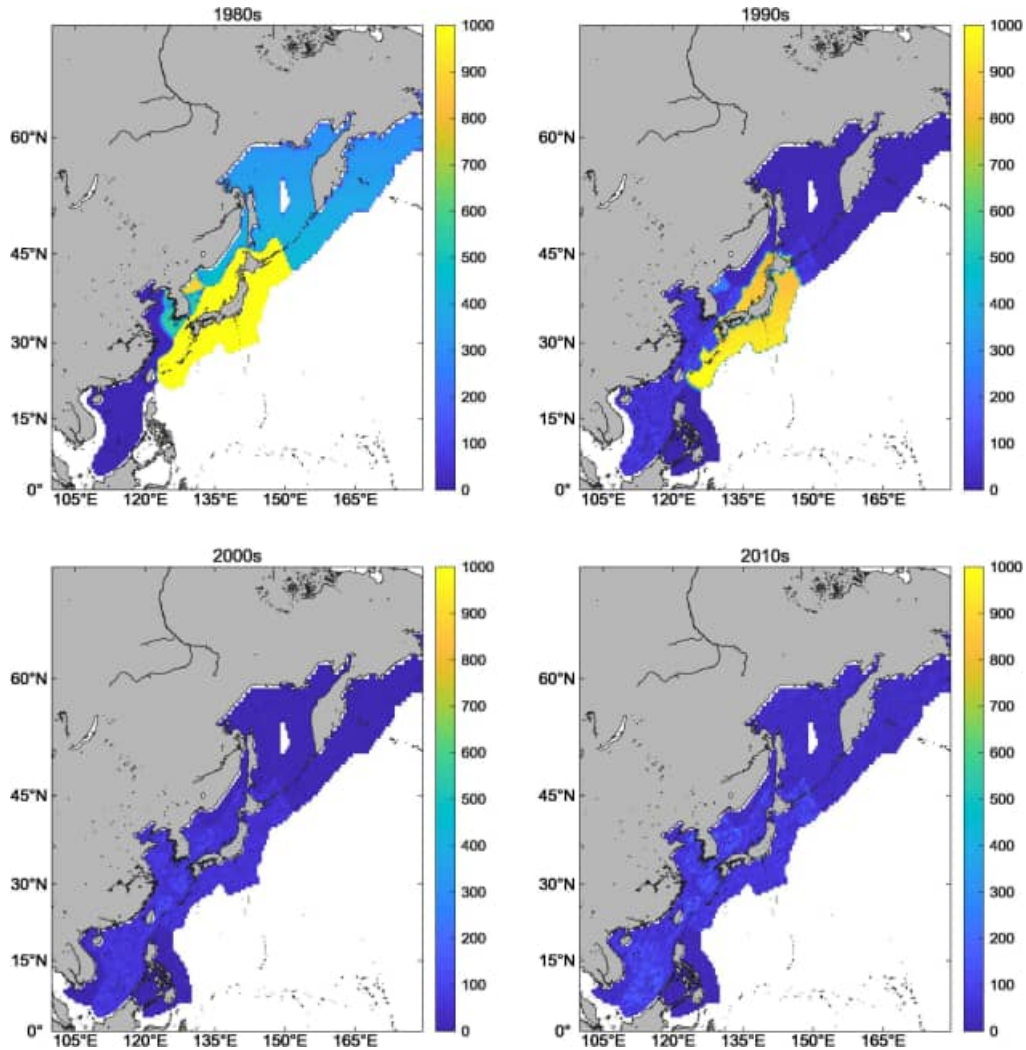
참다랑어의 분포가 2010년대 후반에 들어 동해로 점차 확장되기 시작한 현상은 실제 어획 통계에서도 분명하게 나타난다(그림 30). 2010년대 중반까지 강원과 경북에서의 참다랑어 어획량은 거의 ‘0~5톤’ 수준에 머물며, 당시 동해에서의 참다랑어 출현은 극히 제한적이었음을 확인할 수 있다. 이는 앞선 분포 자료에서 1980~2010년대 초반에 동해가 참다랑어의 주요 서식 해역이 아니었다는 분석과 일관된다.

그러나 2020년을 전후로 어획량이 급격히 증가하는 변화가 나타난다. 경북 해역에서는 2019~2021년에 주기적인 어획 급증이 관측되며, 최대 100톤을 넘는 연도도 나타났다. 특히 강원지역에서는 2021년 이후 어획량이 폭발적으로 증가하여, 2023~2024년에는 150~180톤 수준, 그래프 상 최댓값을 기록한다. 이는 과거 수십 년간 관측되지 않았던 규모로, 동해 북상 개체군의 급격한 증가를 보여준다.

또한 강원과 경북의 어획량 증가 시점이 거의 동시에 나타난다는 점은, 특정 지역에 국한된 현상이 아니라 동해 전역에서 참다랑어의 출현 빈도와 체류 기간이 동시에 확대되고 있음을 의미한다. 분포 지도에서 확인된 2010년대의 저강도 적합도 출현이 실제 어업현장에서는 2020년 이후 명확한 어획 증가로 연결된 것으로 해석된다.

종합하면, 동해에서 참다랑어의 출현은 2010년대에 처음으로 관측되기 시작하여, 2020년대 들어 어획 데이터로 확인 가능한 수준의 회유·체류 증가로 전환된 단계로 평가된다. 이는 분포모델이 제시하는 참다랑어 북상 경향과 실제 어업 변화가 서로 일치하며, 향후 동해 연안 어업구조 변화와 관리 전략에서 중요한 고려사항임을 시사한다.

4. 3. 먹이원 분포 시계열 변화



<그림 31> 연대별(1980년대-2010년대) 정어리 어획 분포도

연대별 정어리 어획 분포도를 살펴보면, 북서태평양에서 정어리의 분포 중심과 어장 규모는 시기별로 뚜렷한 변화를 보이며, 특히 동해 해역이 과거에는 정어리 어업의 핵심 공간이었으나 이후 급격히 축소되었다가 최근 다시 미약하게 회복되

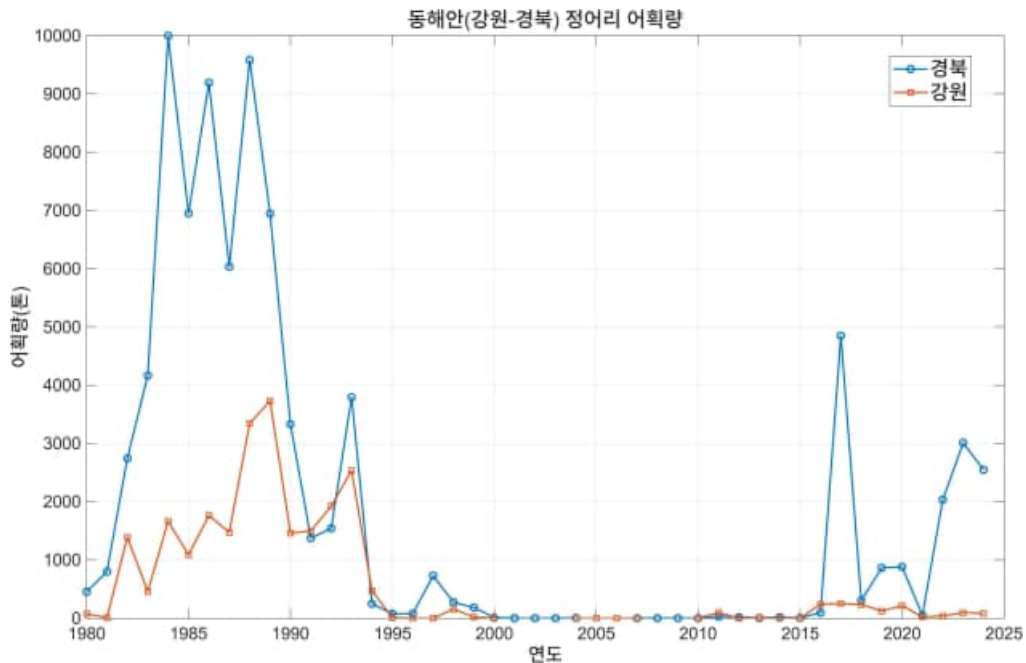
는 흐름이 확인된다(그림 31).

먼저 1980년대에는 정어리 어획량이 매우 높게 나타나며, 공간적으로도 동해 전역—특히 동해 중·북부(러시아 연해주·사할린 인근)까지 넓게 분포하고 있다. 이 시기 정어리는 동해뿐만 아니라 일본 동해안·동중국해 북부까지 매우 광범위한 영역에 걸쳐 높은 밀도의 어획 신호(노란색-연두색)를 보여, 동해가 당시 북서태평양 정어리 어업의 주요 권역이었다는 점이 분명하게 나타난다.

1990년대에 들어서도 정어리 분포는 여전히 동해를 포함한 광역에서 확인되지만, 어획 밀도는 이전보다 낮아졌다. 그래도 여전히 동해 북부·중부 해역에서 일정 수준의 어획 기반 분포가 지속되고 있어, 동해가 정어리의 중요한 회유·서식 공간으로 기능했음을 알 수 있다.

반면 2000년대에 접어들면서 변화는 급격해진다. 정어리 어획 신호는 전반적으로 크게 감소하며, 특히 동해에서의 어획 기반 분포가 거의 소멸하는 흐름이 나타난다. 지도에서 동해는 대부분 청색 계열로 나타나며, 이는 어획량이 매우 낮거나 사실상 잡히지 않았던 시기였음을 의미한다. 즉, 정어리가 동해에서 거의 사라진 ‘어장 붕괴’ 단계가 확인되는 구간이다.

이후 2010년대에는 2000년대와 유사하게 낮은 수준이지만, 동해 남부(경북-동해 중부 일부)에서 소규모 어획 신호가 다시 출현한다. 이는 분포 회복이라고 보기에는 약하지만, 2000년대의 완전 소멸 상태에서 벗어나 동해에서 정어리가 간헐적으로 나타나기 시작한 변화로 해석된다.



<그림 32> 동해안(강원-경북) 정어리 어획량 장기 변화(1980년~2024년) [자료: 통계청]

정어리의 연대별 공간 분포 재분석 결과에서 확인된 1980~1990년대 동해 정어리 어장의 대규모 존재와 2000년대 이후 붕괴, 그리고 2010년대 소규모 재출현이라는 흐름은 실제 동해안(강원·경북) 지자체의 어획 통계에서도 동일하게 나타난다 (그림 32).

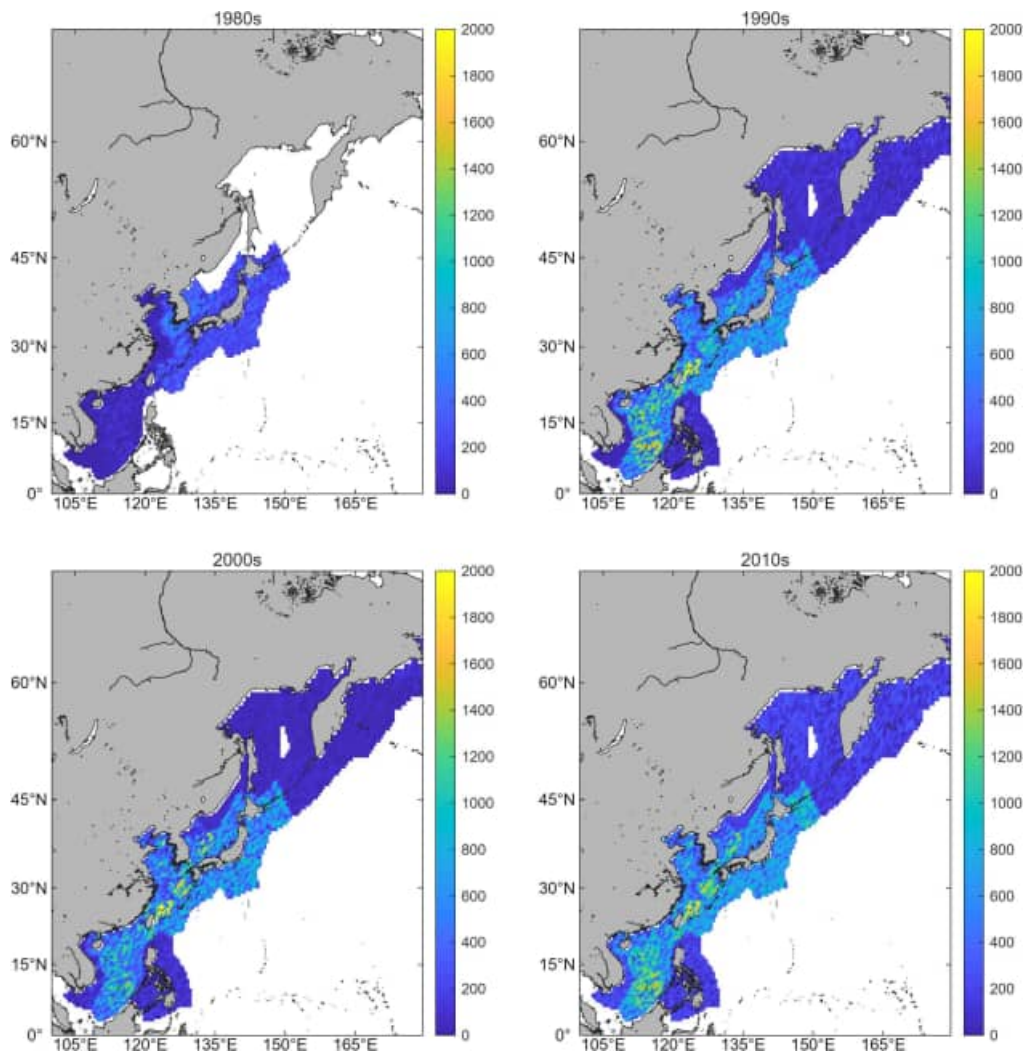
1980년대 초중반, 경북 지역에서는 연간 7,000~10,000톤에 달하는 정어리 어획이 기록되며 동해 남부가 정어리 주 생산지로 기능했다. 같은 시기 강원특별자치도에서도 최대 3,000톤 수준의 어획이 발생하여, 동해 전 해역이 정어리 풍년기였음이 분명하게 드러난다. 이는 앞서 공간분포도에서 1980년대 동해 전역에 넓게 퍼져 있던 고밀도 분포와 일관된 결과다.

그러나 1990년대 후반에 들어서면서 두 지역의 어획량은 동시에 급감하였다. 경북은 1990년대 후반부터 2000년대 초 거의 “0톤” 수준으로 떨어졌고,

강원특별자치도 역시 비슷한 시기에 정어리 어획이 사실상 사라졌다. 이는 2000년대 공간분포도에서 동해 해역이 청색(저어획·저밀도)으로 나타나며 정어리 분포가 전면 소멸한 시기와 정확히 일치한다.

2010년대 이후에는 약한 수준이지만 어획이 다시 관측되기 시작했다. 경북은 2018년 약 5,000톤, 강원도는 2020년대 들어 수백 톤 수준의 어획이 다시 나타나 분포도에서 확인된 동해 남부 중심의 소규모 재등장 패턴과 연결된다. 다만 1980-90년대와 같은 대규모 어장은 아직 회복되지 않았으며, 재출현은 국지적·단발적 형태에 가깝다.

종합하면, 어획 기반 분포 재분석과 실제 동해안 지자체 어획 통계는 모두 ① 1980-90년대 정어리 자원의 동해 집중, ② 2000년대 급격한 붕괴, ③ 2010년대 이후 제한적 재출현이라는 세 단계 변화를 뚜렷하게 공유하고 있다. 이는 동해 정어리 자원의 역사적 변동과 최근의 미약한 회복 징후를 함께 보여주는 중요한 근거로 활용될 수 있다.



<그림 33> 연대별(1980년대-2010년대) 멸치 어획 분포도

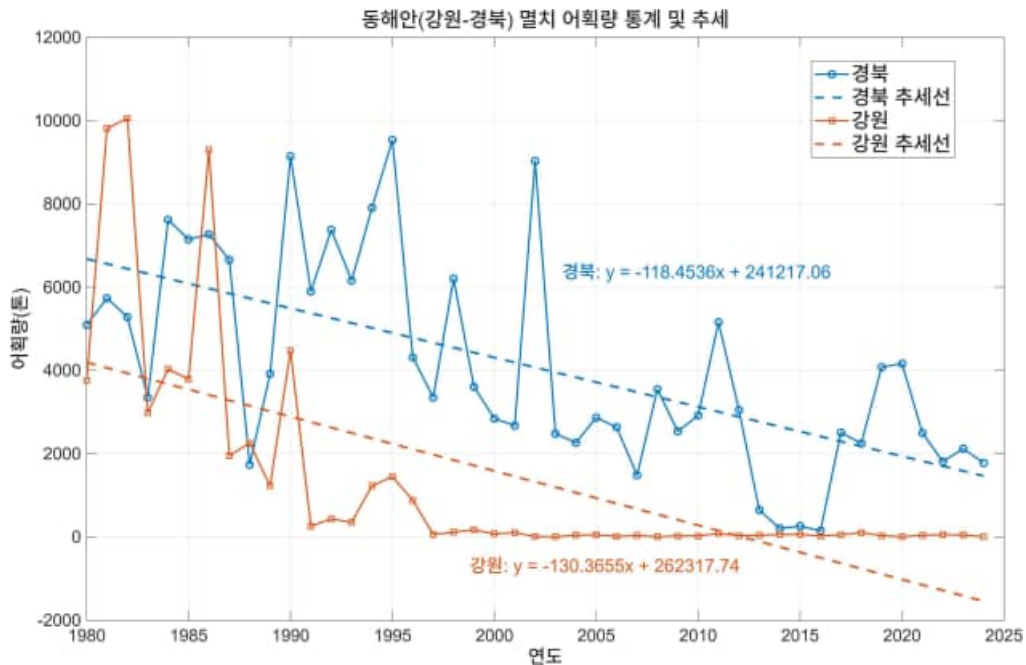
연대별 멸치 어획 분포 재분석 결과를 살펴보면, 북서태평양 전역에서 멸치는 꾸준히 광범위하게 분포해 왔으며, 특히 일본 연안·동중국해·동해 남부를 중심으로 높은 어획밀도가 유지되어 온 것으로 나타난다(그림 33). 모든 시기 멸치의 주요 분포 축은 쿠로시오 연안과 동중국해 대륙붕을 따라 형성되며, 전반적으로 온난 해역을 따라 안정적으로 형성된 남방 회유성 패턴을 유지하고 있다.

동해 해역을 중심으로 보면, 1980년대부터 2010년대까지 연대 모두 동해 남부—즉 부산 동쪽~울산~포항~울진 인근 해역에서 멸치 어획이 지속적으로 나타난다. 색 농도는 다른 해역에 비해 상대적으로 낮은 편이지만, 꾸준히 분포가 유지된다는 점에서 동해 남부는 멸치의 안정적 회유 경로 및 산란·먹이활동 지대로 기능해 온 것으로 해석된다.

반면, 강원 연안(동해 중·북부)에서는 멸치 어획이 연대 모두 제한적으로 나타난다. 분포도 색상은 낮고 공간적 범위 또한 좁아, 멸치가 이 해역을 주요 어장으로 선택해 온 흔적은 뚜렷하지 않다. 이는 멸치가 상대적으로 따뜻한 수온과 풍부한 먹이가 확보되는 남부 연안에 집중되는 생태적 특성과 일치하는 결과다. 특히 2010년대 분포도에서도 동해 중·북부의 멸치 분포는 소규모에 그치며, 장기간 동안 동해 북부에 뚜렷한 멸치 어장 형성이 이루어지지 않았음을 보여준다.

연대별 비교에서는 멸치의 동아시아 넓은 회유 패턴은 일관적으로 유지되는 반면, 특정 연대에 눈에 띄는 북상 또는 남하와 같은 큰 변동은 보이지 않는다. 이는 멸치가 기후 변동성을 강하게 받는 다른 회유성 어종과 달리, 대규모 분포 이동보다는 연안의 생산성과 수온 환경에 따라 어획력이 변동하는 형태를 보이기 때문으로 해석된다. 즉, 멸치는 지난 40년 동안 동중국해—일본 남부—동해 남부를 잇는 기존 회유 축을 안정적으로 유지해 왔다.

종합하면, 멸치의 연대별 어획 분포는 동중국해·일본 남부가 주요 어장, 동해 남부는 지속적인 회유 경로 및 소규모 어장 유지, 강원 북부 해역은 분포가 제한적이며 어장이 크게 형성되지 않는 특징을 보여준다. 이러한 결과는 멸치가 동해 중·북부보다는 동해 남부 및 더 남쪽 해역에 생태적 적합성이 높다는 점을 명확히 시사하며, 동해 멸치 자원 관리 역시 이 같은 분포 구조를 고려한 지역 중심의 접근이 필요함을 의미한다



<그림 34> 동해안(강원-경북) 멸치 어획량 장기 변화(1980년~2024년) [자료: 통계청]

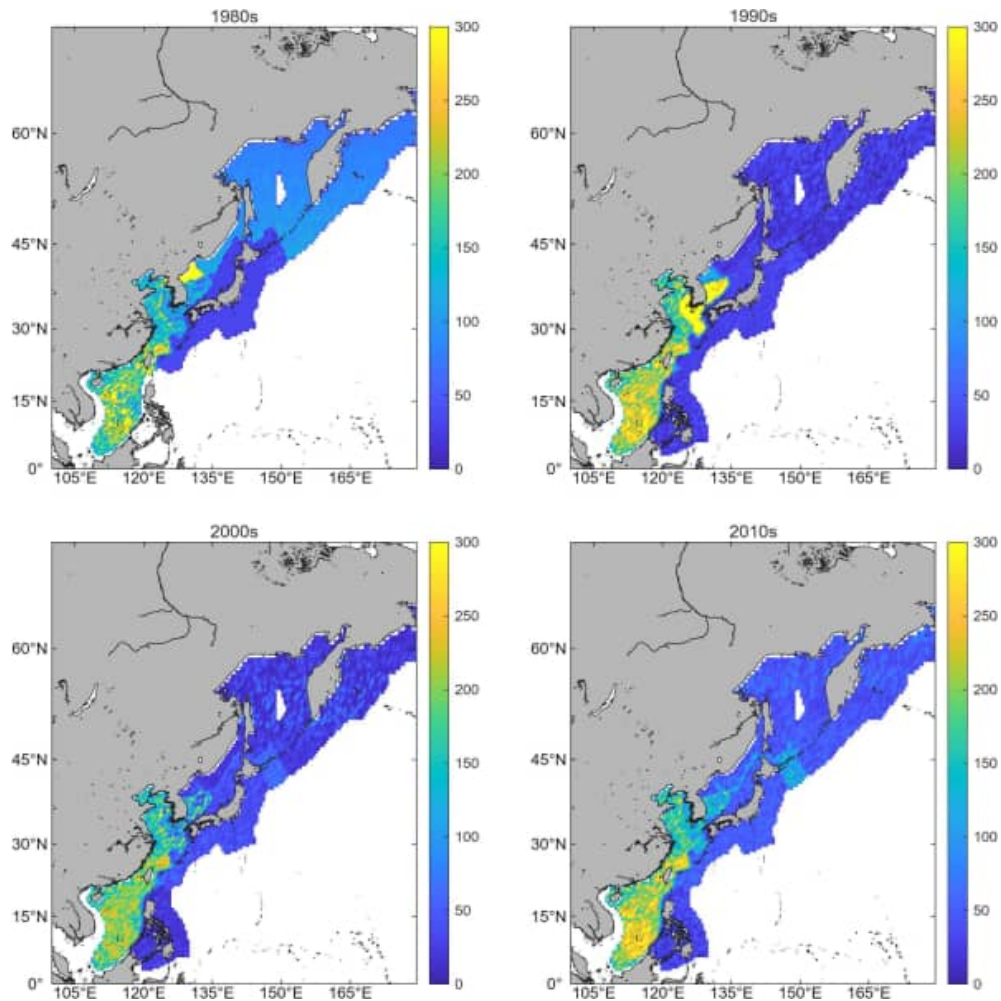
동해안에서 실제로 확보된 강원도와 경상북도의 멸치 어획량 자료를 살펴보면, 1980년대 이후 멸치 어획은 두 지역 모두 뚜렷한 감소세를 보이며, 특히 강원특별자치도의 어획 감소가 경북보다 더 두드러지게 나타난다(그림 34). 경북의 경우 1980~1990년대 초반까지는 연간 수천 톤 규모의 어획이 반복적으로 발생하며 멸치가 동해 남부 연안에서 비교적 안정적으로 이용되었음을 보여준다. 그러나 1990년대 후반 이후 어획량은 지속적으로 감소하여 최근에는 연간 1천 톤 이하 수준으로 수렴하는 추세를 보인다.

강원특별자치도의 어획량 감소는 더욱 급격하게 나타난다. 1980년대에는 연간 1천~3천 톤 수준의 어획이 이루어졌으나, 1990년대 중반 이후 어획량은 빠르게 붕괴하여 이후에는 거의 0에 가까운 수준에서 머물러 있다. 이러한 변화는 강원 연안이 멸치의 주요 분포 해역이 아니라는 점을 보여준 분포 재분석과 정확히 부합한다. 즉, 멸치는 기본적으로 상대적으로 따뜻한 수온과 높은 1차 생산력이

유지되는 동해 남부(울산~포항~울진)와 더 남쪽 해역에 생태적 적합성이 집중되어 있으며, 강원 북부 해역은 멸치가 안정적으로 분포하거나 재현성 있는 어장을 형성하기 어려운 환경임을 시사한다.

특히 두 지자체 모두에서 어획량이 장기적으로 감소하는 경향은, 동해 남부에서 조차 멸치의 어획 기반이 점차 취약해지고 있음을 의미한다. 이는 기후변화에 따른 겨울철 수온 상승, 먹이생태계 변화, 산란장 변동성 등 복합적 요인들이 멸치의 북방 회유 가능성을 제한시키면서 어획 집중도를 낮추는 방향으로 작용했을 것으로 해석된다. 그러나 중요한 점은, 이러한 감소 패턴에서도 강원특별자치도보다 경북 남부 해역에서 어획이 더 오래 유지되었다는 점으로, 이는 앞선 분포에서 나타난 멸치의 장기적 분포 핵심지가 동해 남부라는 해석을 뒷받침한다.

결과적으로, 멸치의 분포 재분석과 실제 어획량 변화는 다소 다른 흐름을 나타내는 부분이 있지만, 동해 중·북부(강원)는 멸치에 대해 생태적·어획적 한계가 분명한 해역인 반면, 동해 남부(경북)는 과거부터 멸치의 상대적 중심 어장 역할을 수행해 왔다. 그러나 최근에는 동해 남부에서도 어획량 감소가 지속되고 있어, 멸치 자원의 동해 연안 기반 활용 가능성이 장기적으로 약화되는 조짐이 확인된다.



<그림 35> 연대별(1980년대-2010년대) 고등어 어획 분포도

연대별 고등어 어획 분포를 살펴보면, 북서태평양 전역에서 고등어의 주요 분포 및 어획 중심지는 시기별로 비교적 뚜렷한 공간적 변화를 보인다(그림 35). 1980년대에는 일본 혼슈 동쪽 해역과 동중국해 북부, 그리고 한반도 남부 연안을 중심으로 고등어 어획이 가장 집중되었다. 이 시기 동해 연안, 특히 강원·경북 해역에서는 부분적으로 고등어 어획이 발생하긴 했으나, 전반적으로 남해와 동중국해에 비해 낮은 수준의 분포가 유지되었다.

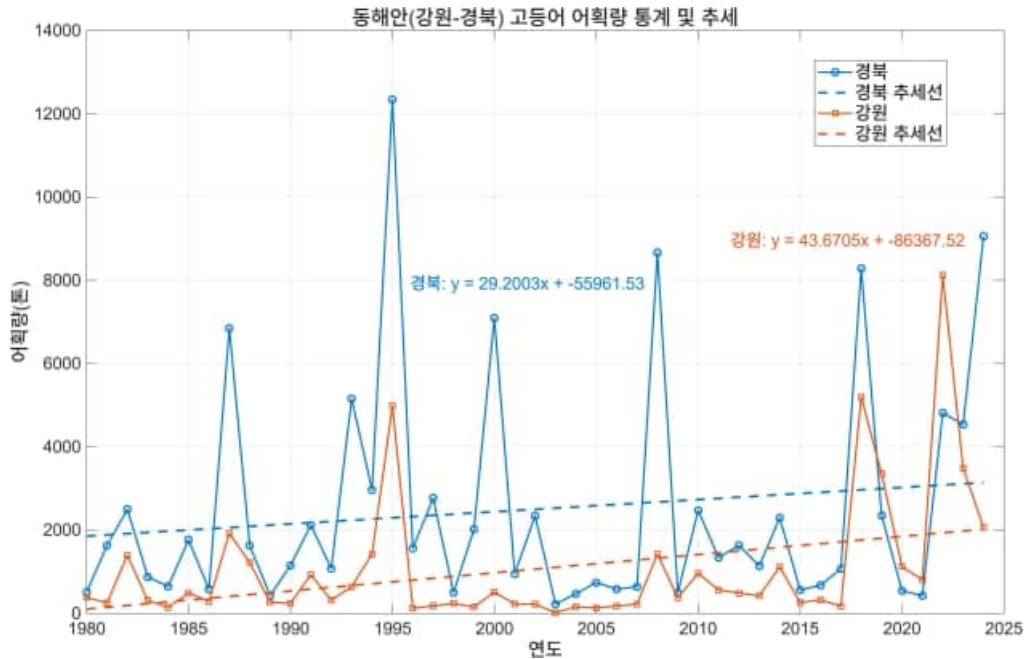
1990년대에도 고등어 분포의 중심축은 크게 변하지 않았다. 일본 혼슈 동쪽과 남쪽 해역에 고등어가 밀집되며 높은 어획량이 유지되었고, 동중국해 북부 역시 여전히 주요 어장으로 기능했다. 반면 동해는 남부(경북) 일부 해역에서만 제한적인 고등어 어획이 확인되었으며, 강원 북부로 갈수록 분포는 희박해지는 양상이 유지되었다. 이는 동해 수온 및 먹이생태계 구조가 고등어의 주 서식지 조건과 상이하다는 점을 반영하는 것으로 볼 수 있다.

2000년대로 넘어가면 고등어 분포는 다소 남하하거나 중위도에서 축소되는 경향을 보인다. 일본 동쪽 해역의 고등어 밀집도가 감소하고, 동중국해와 일본 남부 해역이 다시 주요 어장으로 강화되며 공간적 집중도가 커지는 양상이 나타난다. 동해는 이 시기에도 고등어의 상대적으로 낮은 분포가 유지되었고, 경북 해역 일부에 한정된 저밀도 분포가 관찰될 뿐, 강원 북부에서는 유의한 어획 기반 분포가 거의 확인되지 않았다.

2010년대는 이전 시기와 비교하여 동중국해 및 한반도 남부 연안에서의 분포가 여전히 강하게 나타나는 반면, 일본 동쪽 해역에서는 일부 구역에서 분포가 약화되는 경향이 보인다. 그러나 이러한 변화 속에서도 동해는 여전히 고등어의 지속적인 주요 분포 해역으로 자리 잡지 못하며, 특히 강원 연안은 전 기간 동안 낮은 분포 밀도를 유지한다. 경북 해역은 시기별로 소규모 어획이 반복되기는 하나, 남해·동중국해에 비해 고등어 자원의 안정적 분포·회유 경로가 형성된 것으로 보기는 어려웠다.

종합적으로, 고등어는 지난 40년간 북서태평양에서 큰 틀의 분포 변화는 보였으나, 동해 특히 강원 해역은 전 시기 동안 고등어의 핵심 회유·어획지로 자리잡지 못했다는 점이 재확인된다. 경북 연안은 상대적으로 고등어 출현 가능성이 높지만, 그 규모는 남해나 동중국해에 비해 현저히 낮은 수준에 머물렀다. 이는 고등어 자원이 기후 변동과 해류 구조에 민감하게 반응하면서도, 동해 고위도 해역(강원 방향)까지 안정적으로 복상하기 위한 환경적 조건이 충분히 형성되지 않았음을 시사한다.

따라서 동해안의 고등어 자원이 장기적으로 제한된 범위에서만 어획 기반을 형성해 왔음을 보여주며, 앞으로의 자원관리나 지역 어업 정책에서도 이러한 해석적 차이를 고려한 접근이 필요함을 시사한다.



<그림 36> 동해안(강원-경북) 고등어 어획량 장기 변화(1980년~2024년) [자료: 통계청]

연대별 고등어 어획 분포 재분석 결과에서 확인된 것처럼, 고등어의 주요 분포 중심지는 장기간 동안 남해-동중국해-일본 남부 해역에 집중되어 왔으며, 동해는 상대적으로 주변적 분포 영역에 머물러왔다(그림 36). 이러한 공간적 패턴은 실제 동해안 지자체의 어획 통계에서도 동일하게 나타난다.

경북과 강원도의 고등어 어획량 시계열을 살펴보면, 전체 기간 어획량의 변동 폭은 매우 크지만 대체로 불규칙한 피크가 반복적으로 나타나는 형태를 보인다. 경북은 1980~1990년대에 여러 차례 5,000~13,000톤 수준의 급격한 어획 증가가 관찰되었으나, 이러한 증가는 일시적이며 장기적인 안정적 증가 추세로 이어지지 않았다. 추세를 기준으로 보면, 경북의 고등어 어획량은 연평균 약간의 증가 경향을 보이지만(+29톤/년), 변화의 폭이 큰 ‘변동성 높은 자원’의 특성이 더 두드러진다.

강원특별자치도의 고등어 어획량은 경북보다 더 적고 변동성은 더욱 크다. 2000년대 이전까지는 대부분 연간 수백 톤 이하 수준이었으며, 2010년대 이후에 들어서야 간헐적으로 피크가 발생하기 시작했다. 특히 2020년대 이후 강원 해역에서도 고등어 어획량이 증가하는 모습을 보이지만, 전체 추세를 나타내는 회귀선을 기준으로 하더라도 경북과 마찬가지로 안정적 증가라고 보기보다는 기후·해황 요인에 따라 간헐적으로 반응하는 형태가 잘 드러난다.

이러한 동해안의 시계열 변화는 앞서 제시된 분포도 분석과 밀접하게 연결된다. 고등어는 기본적으로 남해와 동중국해를 중심으로 분포하는 회유성 어종이며, 동해는 이들의 주 서식·어장 범위에서 벗어난 비핵심 주변 해역이다. 따라서 동해안에서 나타나는 어획량 증감은 고등어 자원이 동해로 일시적으로 북상했을 때에만 발생하며, 분포 중심이 동해로 안정적으로 이동한 것은 아니라는 점을 시계열 자료와 분포도의 일관된 결과가 보여주고 있다.

결국, 동해안 고등어 어획량의 증감은 지역 어장 여건의 구조적인 변화보다는 수온 변동, 난류 세력 강화, 먹이 생태계 변화 등 외부 해황 요인에 따른 단기적 변동성의 영향이 크다고 해석할 수 있다. 이는 동해에서 고등어가 지속적인 주요 자원으로 자리 잡기보다는, 향후에도 비정기적·간헐적 출현 패턴이 반복될 가능성이 크다는 점을 시사한다.

제 3 장

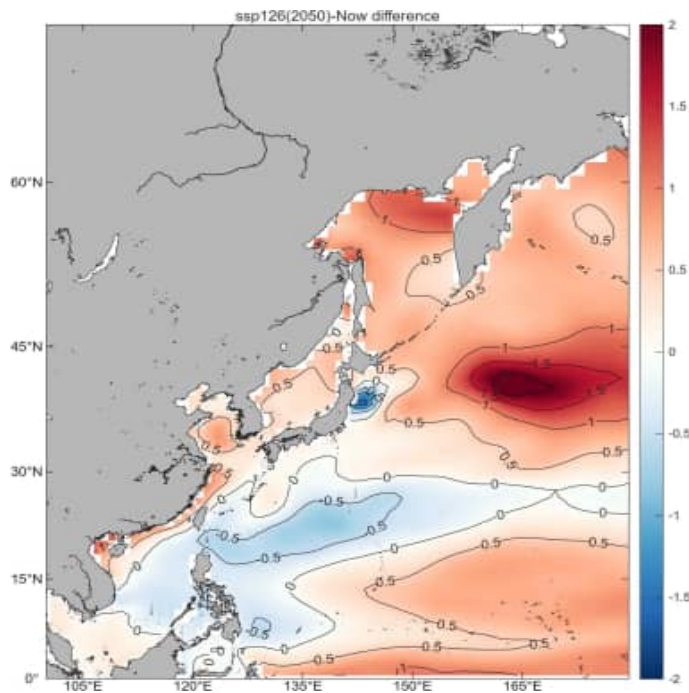
미래 어장 환경 및 수산자원
분포 예측

제 3 장

미래 어장 환경 및 수산자원 분포 예측

제1절 미래 표층 수온 전망

1. 미래 북서태평양 표층 수온 전망(2024년 대비 2050년)



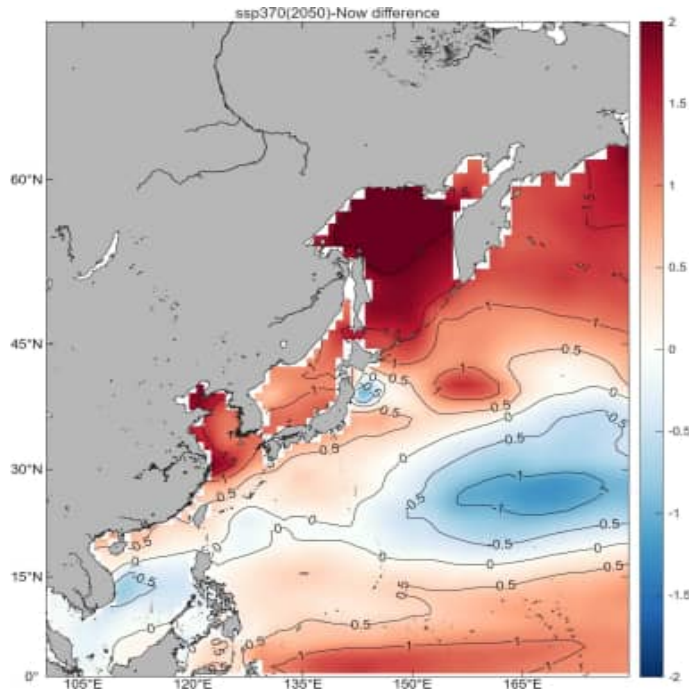
<그림 37> SSP126 시나리오 기반 2050년 북서태평양 표층수온 변화(2024년 대비)

SSP126 시나리오에서 2050년의 북서태평양 표층수온 변화는 전반적으로 양의 편차(수온 상승)가 우세하게 나타난다(그림 37). 특히 북서태평양 중위도 해역(약 155-170° E, 35-45° N)에서 1.5°C 이상 상승하는 넓은 고수온대가 형성되어 있다.

우리나라 주변 해역을 살펴보면, 동해·동중국해·일본 동쪽 해역 전반에서 0.5~1.0°C 정도의 완만한 수온 상승이 나타나며, 그림 전반의 붉은 계열이 이를 보여준다. 대한민국 동해 연안에서도 소폭의 양(+)의 어노말리가 분포해 있어, 현재 대비 다소 높은 수온이 전망된다. 반면, 한반도 남쪽과 대만 동쪽 일부 해역에서는 0°C 내외 또는 약한 음(-)의 편차가 산재해 있어, 국지적으로는 뚜렷한 변화가 나타나지 않거나 미약한 냉각 경향이 관측된다.

한편, 일본 동해 연안 일부 좁은 지역에서는 작은 규모의 음(-)의 편차 패턴(푸른색)이 나타나 있어 주변 해역과 달리 수온 상승 폭이 크지 않음을 확인할 수 있다. 하지만 이러한 해역적 예외를 제외하면, 전체적인 변화는 북서태평양 전역에서의 일관된 온난화 패턴이 시각적으로 분명하다.

요컨대, SSP126과 같은 저배출 시나리오에서도 북서태평양은 2050년까지 전반적인 수온 상승을 겪을 것으로 나타나며, 특히 중위도 해역에서 상승 폭이 가장 크게 나타난다. 한국 동해는 이보다 다소 완만한 상승을 보이지만, 여전히 현재보다 높은 수온 환경으로 변화하는 경향이 뚜렷하게 나타난다.



<그림 38> SSP370 시나리오 기반 2050년 북서태평양 표층수온 변화(2024년 대비)

SSP370 시나리오에서 2050년 동해 표층수온의 변화 양상을 세부적으로 살펴보면, 동해 전역이 현재(2024년)보다 뚜렷하게 높은 수온 상태로 전환되는 것으로 나타난다 (그림 38). 특히 동해의 남부에서 북부로 갈수록 온난화의 강도가 점진적으로 증가하는 패턴이 분명하게 드러난다.

동해 남부 해역(대한해협 및 동해 중남부)은 주로 약 +0.5°C 내외의 온난화가 나타나 비교적 완만한 상승을 보이는 반면, 강원 연안을 포함한 동해 중부 해역에서는 +0.5~+1.0°C 정도로 상승 폭이 더 크게 확대된다. 이는 연안 및 근해를 중심으로 표층수온의 증가가 보다 일관되게 진행된다는 점을 시사한다.

동해 북부로 이동할수록 온난화 강도는 더욱 증가하여, 연해주·사할린 인근으로 이어지는 동해 북측 경계에서는 +1.0°C 이상, 일부 구간에서는 +1.5°C에 가까운

상승이 나타난다. 이러한 패턴은 북서태평양 고위도 해역에서의 강한 온난화 영향이 동해로 전달되며 점점 강화되는 모습으로 이해할 수 있다.

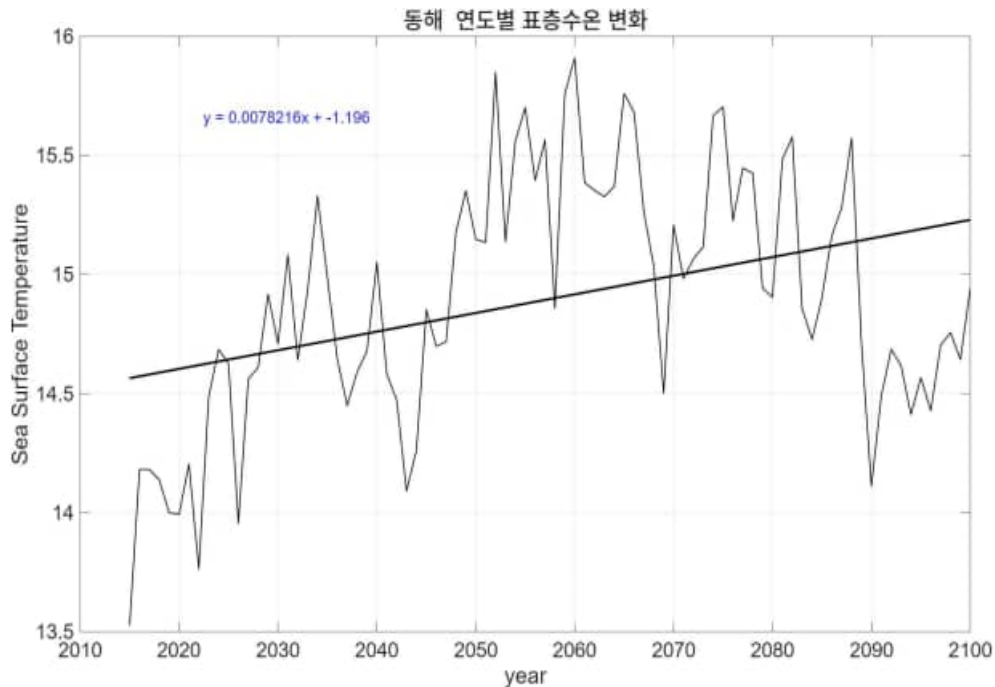
눈에 띄는 점은, 동해 내부에는 냉각(음의 변화)을 보이는 영역이 거의 존재하지 않는다는 사실이다. 즉, SSP370 시나리오 하에서 동해는 전 구역에 걸쳐 2024년 대비 수온이 상승하는 형태를 보이며, 이는 동해의 기초환경이 전반적으로 더 따뜻한 방향으로 이동함을 의미한다. 이러한 변화는 수온 변동에 민감한 어종의 서식적 조건, 난류·한류의 경계 구조, 계절적 혼합 및 성층 강도 등 해양의 여러 요소에 영향을 미칠 수 있다는 점에서 중요한 정책적, 관리적 시사점을 제공한다.

결과적으로, SSP370 시나리오에서 동해는 전반적 온난화, 북부로 갈수록 더 큰 상승폭, 음의 변화가 거의 없는 일관된 상승 구조라는 특징을 보이며, 이는 동해 생태계 및 연안 수산자원 관리에 있어 중장기 대응 필요성을 뚜렷하게 보여 주는 결과이다.

2. 미래 동해 표층 수온 전망

2.1. 미래 동해 표층 수온 장기 변화

SSP126 시나리오에서 2010년 이후 동해의 연평균 표층수온은 연도별 변동성이 있음에도 전반적으로 꾸준히 상승하는 경향을 보인다(그림 39). 회귀선 분석 결과 수온은 연간 약 0.008°C, 즉 10년당 약 0.08°C씩 증가하는 완만한 온난화를 나타낸다. 저탄소 시나리오임에도 불구하고 동해는 장기적으로 안정된 수온을 유지하기보다는 서서히 따뜻해지는 방향으로 변화하고 있다.



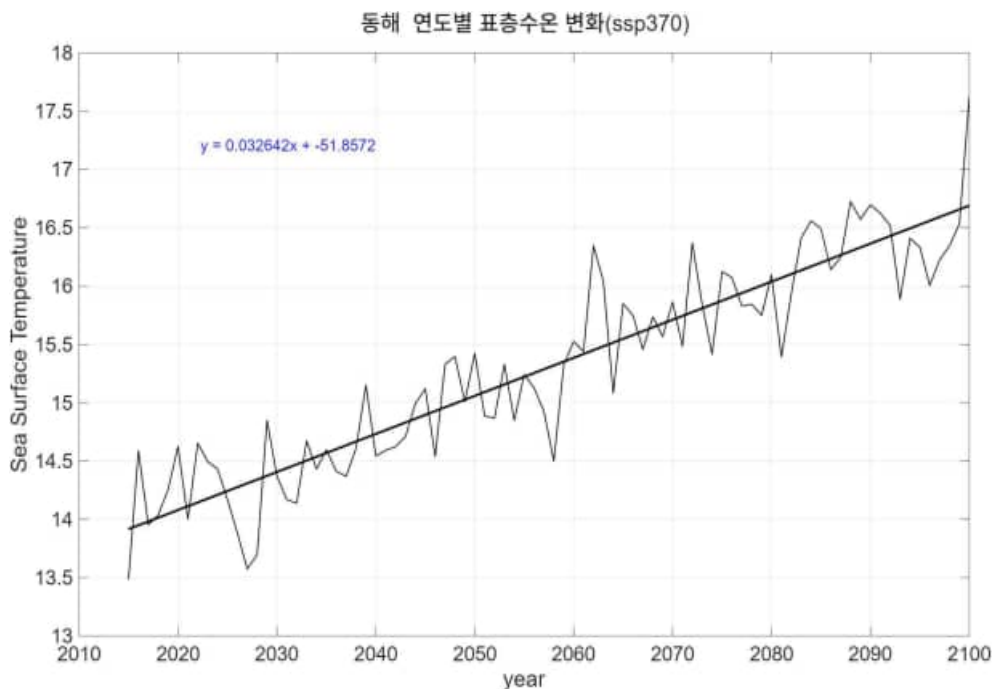
<그림 39> SSP126 시나리오 기반 동해 연도별 표층수온 장기 변화 예측(2020~2100)

2040년대 이후에는 대부분의 해가 15°C를 초과하는 고수온 단계로 진입하였다. 특히 2050~2060년대에는 15.3~15.8°C에 도달하는 해도 나타나며, 난류성 해수의

영향이 장기적으로 강화되고 있음을 보여준다. 2070년 이후에는 상승 추세가 유지되면서도, 연도별 편차는 오히려 커져 14.7~15.8℃ 사이에서 크게 요동하는 특징을 보인다.

요컨대, SSP126 시나리오에서도 동해는 2100년까지 약 0.7℃ 내외의 온난화가 누적될 것으로 예상되며, 난류세력의 북상과 해양 열파 발생 가능성 증가 등 어장 환경의 변동성이 함께 확대될 것으로 추정할 수 있다. 즉, 강한 감축 시나리오에서도 동해 온난화 흐름은 피하기 어려운 해양 기후변화로 볼 수 있다.

SSP370 시나리오는 중·고배출 시나리오로, 탄소중립이 제대로 달성되지 못하고 온실가스 배출이 지속되는 미래를 가정한다. 이러한 조건 아래 동해의 연평균 표층 수온은 2010년 이후 매우 뚜렷한 장기적 상승 추세를 보인다(그림 40).



<그림 40> SSP370 시나리오 기반 동해 연도별 표층수온 장기 변화 예측(2020-2100)

수온은 연간 약 0.0326°C 씩, 즉 10년당 약 0.326°C (약 0.33°C) 증가하는 강한 온난화가 예상된다(그림 40). 이는 저탄소 시나리오(SSP126)의 약 4배 이상 빠른 상승 속도로, 동해가 미래에 고온화되는 정도가 훨씬 심각해질 가능성을 의미한다.

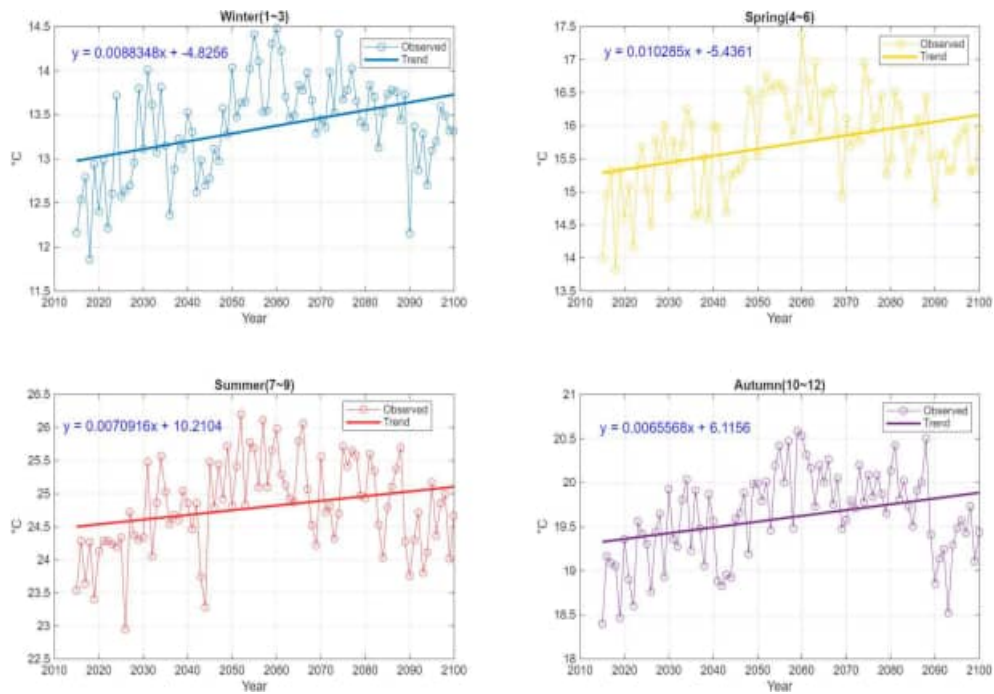
초기(2010~2030년)에는 수온이 $13.5\sim 14.5^{\circ}\text{C}$ 범위에서 변동하며 완만한 상승을 보이지만, 2040년대에 들어서면 대부분의 해가 $15.0\sim 15.5^{\circ}\text{C}$ 수준으로 상승한다. 특히 2060년 이후에는 상승 속도가 더욱 가팔라져 16°C 를 넘는 해가 빈번히 등장하며, 후반부(2080~2100년)에는 17°C 에 도달하거나 그 이상을 기록하는 극한 고수온 해도 나타난다.

또한 SSP126과 달리 SSP370에서는 수온 변동성도 함께 확대되어 기본적인 평균 상승 + 고수온 해의 급증이라는 이중 변화가 발생한다. 이는 해양열파(Marine Heatwave) 발생 가능성이 급격히 증가하며, 동해 생태계가 미래에 훨씬 큰 스트레스를 받을 수 있음을 시사한다.

요컨대, SSP370 시나리오에서 동해 표층수온은 21세기 동안 약 3°C 이상 상승할 것으로 보이며, 이는 생태계 구조, 어장 분포, 난류·한류 체계, 어장환경 변동성에 중대한 변화를 가져올 것으로 해석된다. 즉, 고배출 미래에서는 동해가 난류화되고 열에너지 축적이 급격히 가속되는 해역으로 변화할 가능성이 매우 크다.

2.2. 미래 동해 표층 수온 계절 변화 예측

SSP126 시나리오 하에서 21세기 동해의 계절별 표층수온은 연도별 변동성이 크지만, 사계절 모두 공통적으로 장기적 온난화 경향을 나타낸다(그림 41). 다만 그 강도는 계절마다 차이를 보이며, 봄(4~6월) > 겨울(1~3월) > 여름(7~9월) > 가을(10~12월) 순으로 상승폭이 크게 나타났다.

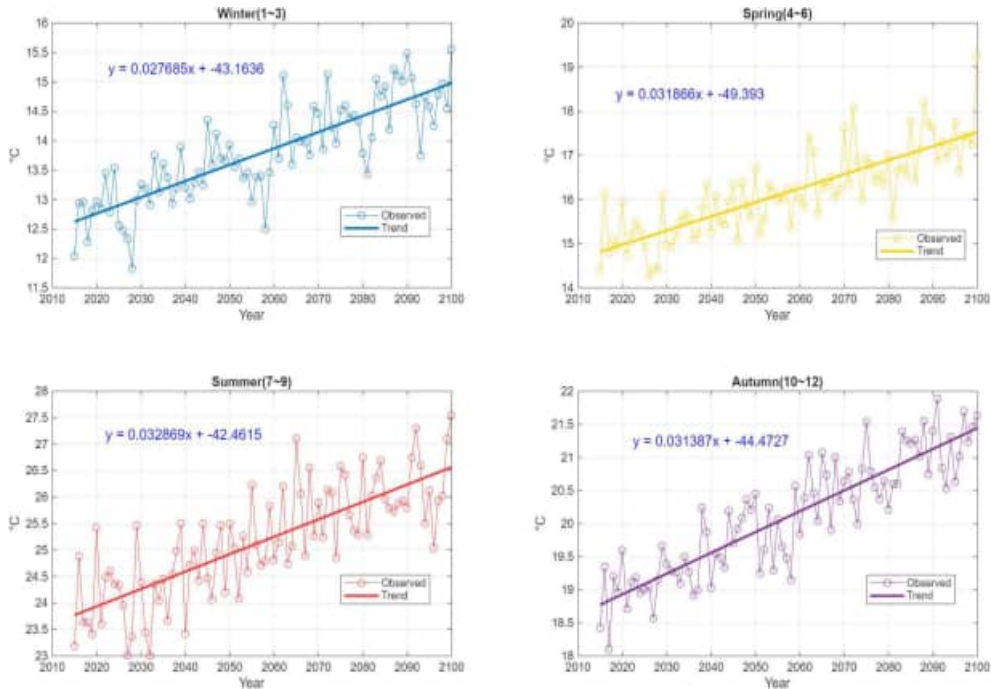


<그림 41> SSP126 시나리오 기반 동해 계절별 표층 수온 미래 예측치(2020~2100)

겨울철(1~3월)은 약한 변동을 반복하면서도 점진적으로 따뜻해져, 2100년 가까이에는 초기보다 약 0.8℃ 정도 높은 수준에 도달하는 것으로 나타났다. 봄철(4~6월)은 사계절 중 가장 빠르게 수온이 오르며, 2100년에는 현재보다 1℃ 이상 높은 값이 나타난다. 이는 봄철 난류 확장과 성층 형성 시기의 변화를 반영하는 결과로 해석된다.

여름철(7~9월)은 강한 성층 구조의 영향으로 변화 속도가 다른 계절보다 완만하지만, 장기적으로는 일정한 상승 추세가 유지된다. 후반기에는 24~25℃ 이상의 고수온 해가 자주 나타나면서 열파 발생 가능성이 점차 커질 수 있다. 가을철(10~12월)은 네 계절 중 가장 완만한 온난화를 보이지만, 장기적으로는 뚜렷한 상승 흐름 속에서 평균 수온 자체가 천천히 높아지는 경향을 보였다.

요컨대, SSP126 시나리오에서도 동해는 계절 구조 자체가 전반적으로 고수온화되는 방향으로 변화하며, 특히 봄철과 겨울철을 중심으로 온난화 영향이 뚜렷하게 강화되는 것으로 나타난다.



<그림 42> SSP370 시나리오 기반 동해 계절별 표층 수온 미래 예측치(2020 - 2100)

SSP370 시나리오에서 미래 동해의 표층수온은 사계절 모두에서 매우 빠른 속도로 상승한다(그림 42). 겨울, 봄, 여름, 가을 모두 10년당 0.28~0.33℃의 일관된 고속

온난화가 진행되며, 이는 저탄소 시나리오(SSP1-2.6)의 약 3~5배에 해당하는 상승 속도다.

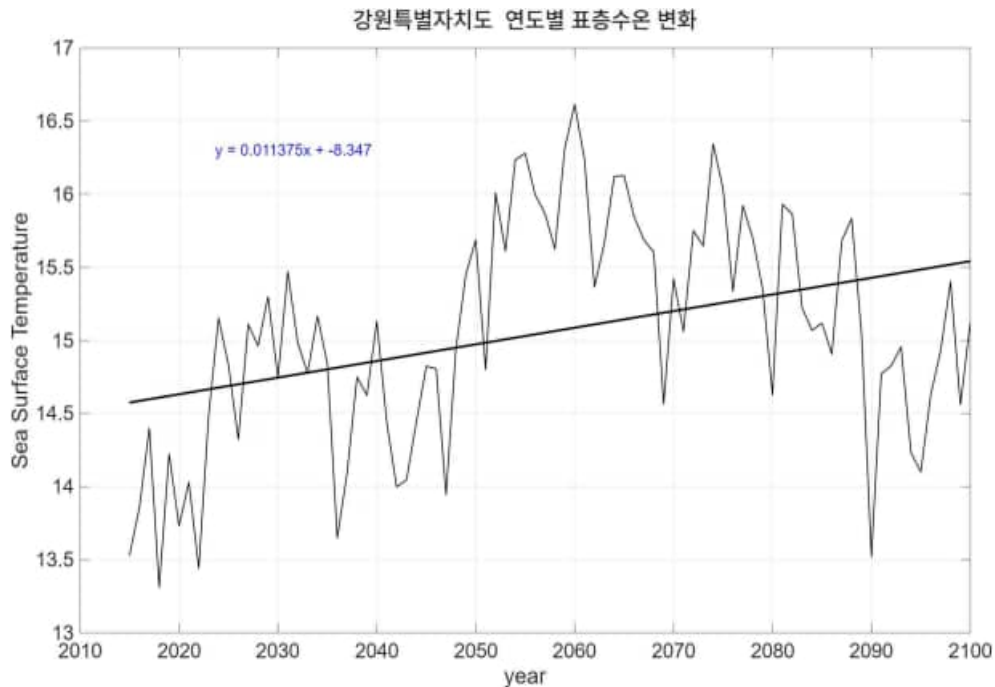
겨울철에는 과거 13~14℃ 수준이던 수온이 세기 말에는 16℃ 이상으로 높아져, 기존의 냉수 기반 겨울 해양환경이 크게 약화된다. 봄철은 네 계절 중 가장 빠르게 온난화되며, 2100년에는 19℃에 도달해 전통적인 봄철 냉수역이 거의 소멸하는 양상을 보인다. 여름철 역시 26~27℃ 수준까지 고수온화되어 동해가 아열대성 해역에 가까운 형태로 변화하며, 해양열과 발생 위험이 급격히 커질 수 있다. 가을철은 냉각이 매우 늦어지는 패턴을 보이며, 후반기에는 21℃에 근접하는 고수온 상태가 장기간 유지된다.

정리하면 SSP370에서는 동해의 계절 구조 전체가 고수온 상태로 재편되며, 이는 저탄소 시나리오 대비 온난화 속도, 강도, 지속 기간이 모두 크게 강화된 형태로 나타난다.

3. 미래 강원특별자치도 표층 수온 전망

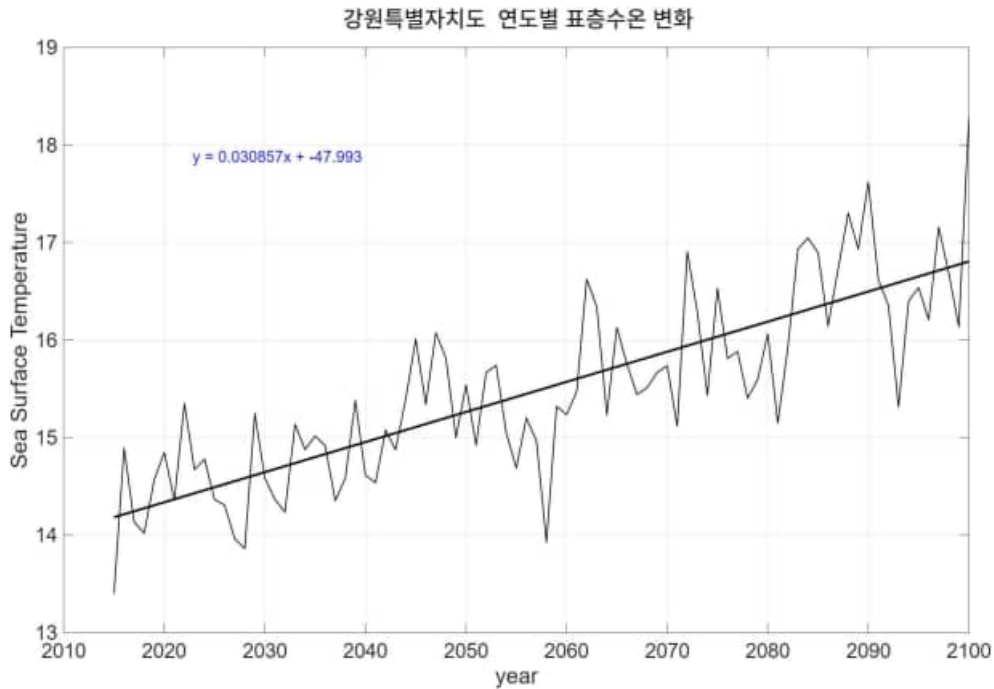
3.1. 미래 강원특별자치도 표층 수온 장기 변화

SSP126 저탄소 시나리오 아래에서 강원특별자치도 연안의 연평균 표층수온은 연도별로 크고 작은 변동을 보이지만, 전체적으로는 뚜렷한 온난화 추세를 나타낸다(그림 43).



<그림 43> SSP126 시나리오 기반 강원특별자치도 연도별 표층수온 장기 변화 예측 (2020-2100)

먼저 SSP126 시나리오에서는 연도별 변동성이 존재함에도 불구하고 상승 속도는 비교적 완만하며, 세기 동안 약 1°C 내외의 온난화가 누적되는 형태를 보인다. 초기에는 13.5~14.5°C 수준에서 시작해 세기 말에는 15.5°C 부근에 도달하며, 완만한 난수화가 진행되는 정도다



<그림 44> SSP370 시나리오 기반 강원특별자치도 연도별 표층수온 장기 변화 예측 (2020-2100)

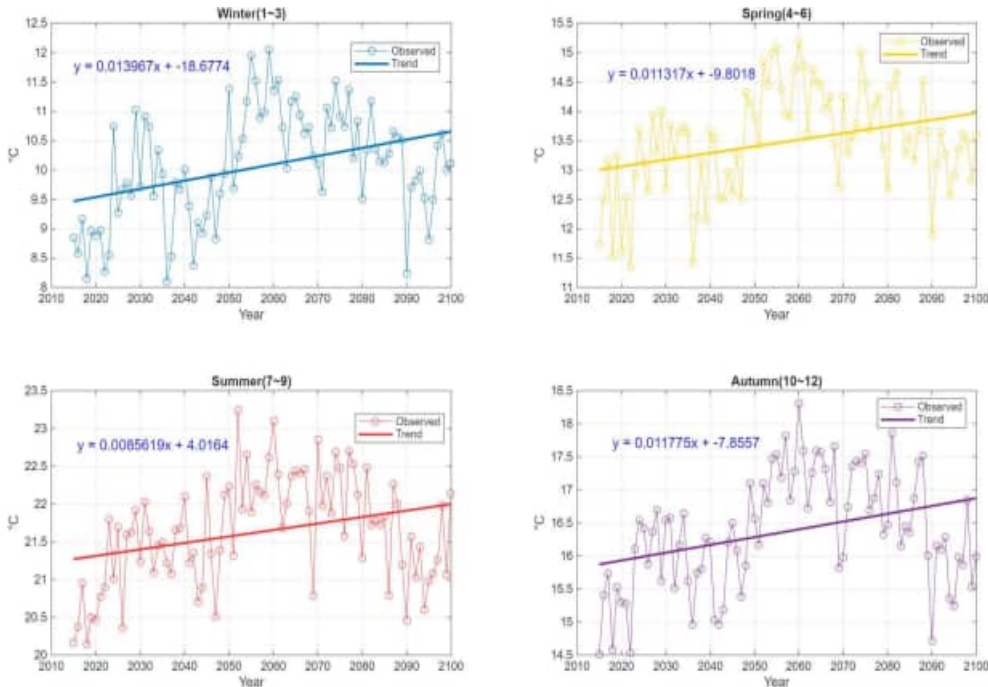
반면 SSP370 시나리오에서는 표층수온의 상승 속도가 훨씬 가파르게 나타난다 (그림 44). 추세선을 기준으로 할 때 약 10년마다 0.3℃에 가까운 상승이 누적되어, 2100년에 가까울수록 17℃를 넘는 고수온 상태가 반복적으로 나타난다.

2050년 이후부터는 두 시나리오 간 격차가 점차 커지며, 2100년에는 2℃ 이상의 차이가 확연히 드러난다. 특히 고수온 해의 출현 빈도와 극값이 크게 증가하여, 여름뿐 아니라 봄·가을에도 비정상적으로 높은 수온이 나타나는 등 연안의 계절 구조가 전반적으로 난류화되는 경향이 강해진다.

요약하면, 저탄소 미래(SSP126)에서는 동해 연안이 완만히 따뜻해지는 정도에 그치지만, 고배출 미래(SSP370)에서는 지역 어장환경이 극적으로 변화하여 냉수성 수괴가 크게 약화되고, 난류성 특성을 띠는 따뜻한 해역으로 빠르게 재편되는 방향으로 변화한다. 이러한 차이는 강원 연안 생태계와 어장 구조에도 중대한 영향을 미칠 수 있다.

3.2. 미래 강원특별자치도 표층 수온 계절 변화 예측

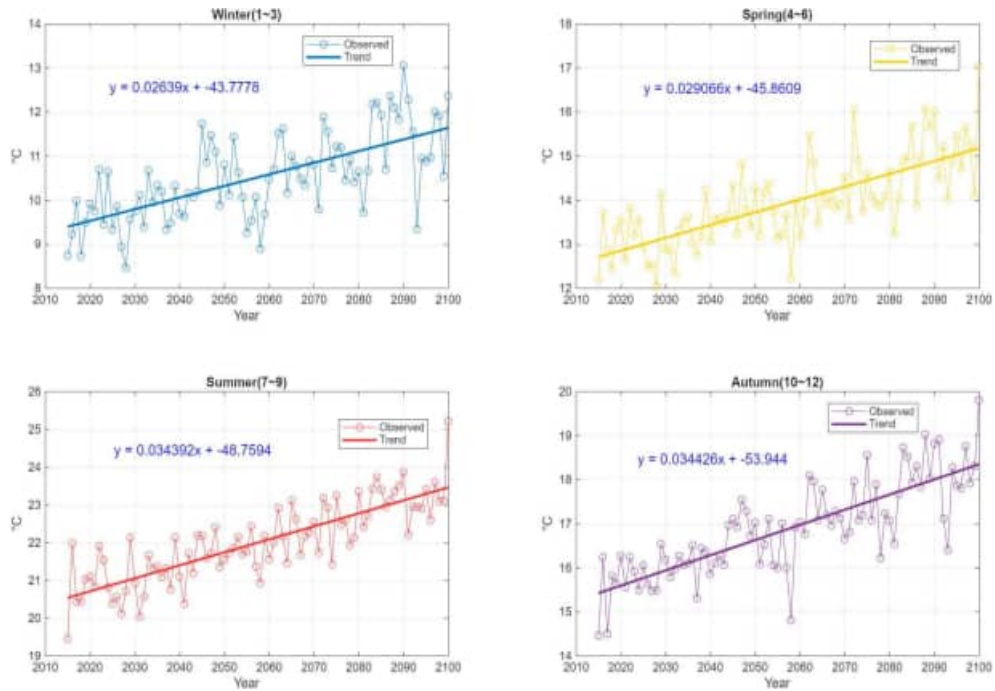
SSP126 시나리오에서 강원특별자치도 연안의 미래 수온은 상대적으로 사계절 모두 완만한 상승 경향을 보인다(그림 45).



<그림 45> SSP126 시나리오 기반 강원특별자치도 계절별 표층 수온 미래 예측치 (2020-2100)

겨울철 수온은 약 9~11°C 범위에서 진동하며 연도별 변동성이 존재하지만, 장기적으로는 점차적인 증가 추세가 나타난다. 봄철 수온 역시 약 13~15°C 사이에서 오르내리며 꾸준히 상승하는 형태를 보인다. 여름철은 22~23°C 수준에서 시작해 시간이 흐르면서 소폭 상승하는 모습이 나타나며, 네 계절 중 증가 속도가 가장 작은 편이다. 가을철은 15~17°C 범위에서 변화하며 전체적으로 완만한 우상향 경향을 보인다. 종합하면, SSP126에서는 모든 계절에서 수온이 완만하게 상승하지만 증가 속도는 비교적 느린 형태로 나타난다.

SSP370 시나리오에서는 상대적으로 사계절 모두에서 뚜렷한 수온 상승이 나타난다(그림 46).



<그림 46> SSP370 시나리오 기반 강원특별자치도 계절별 표층 수온 미래 예측치 (2020-2100)

겨울철은 약 9~11℃ 범위에서 변동하면서 꾸준한 상승 경향을 보이며, 증가 폭이 SSP126보다 더 크다. 봄철은 약 13~16℃ 범위에서 진동하며 강한 증가세가 나타난다. 여름철은 22~24℃ 수준에서 시간이 지날수록 뚜렷하게 높아지며, 네 계절 중 가장 빠른 상승 속도를 보인다. 가을철도 16~18℃ 범위에서 변동하면서 지속적인 상승 추세가 유지되고, 봄과 유사한 증가율을 보인다. 요약하면, SSP370에서는 사계절 모두에서 수온 증가가 뚜렷하고 그 기울기도 크게 나타난다.

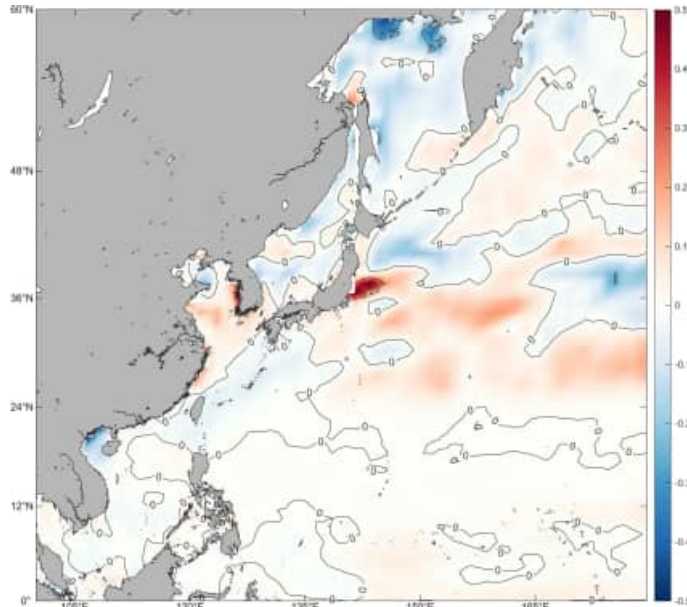
두 시나리오를 비교하면, SSP126보다 SSP370에서 모든 계절의 수온 상승 폭이 더 크다. SSP126에서는 상승 속도가 완만한 반면, SSP370에서는 상승 경향이 뚜렷하고 기울기가 두 배 이상 큰 계절이 대부분이다. 특히 여름철은 두 시나리오의

차이가 가장 크며, SSP370에서 가장 빠른 상승을 보인다. 봄·가을 역시 SSP126보다 SSP370에서 더 가파르게 증가하고, 겨울철 역시 두 시나리오 간 차이가 존재한다. 즉, 두 시나리오 모두 수온 증가 경향을 갖지만, SSP370에서 훨씬 빠르고 뚜렷한 상승이 나타난다.

제2절 미래 엽록소 a 변화 전망

1. 미래 북서태평양 표층 엽록소 a 전망(2024년 대비 2050년)

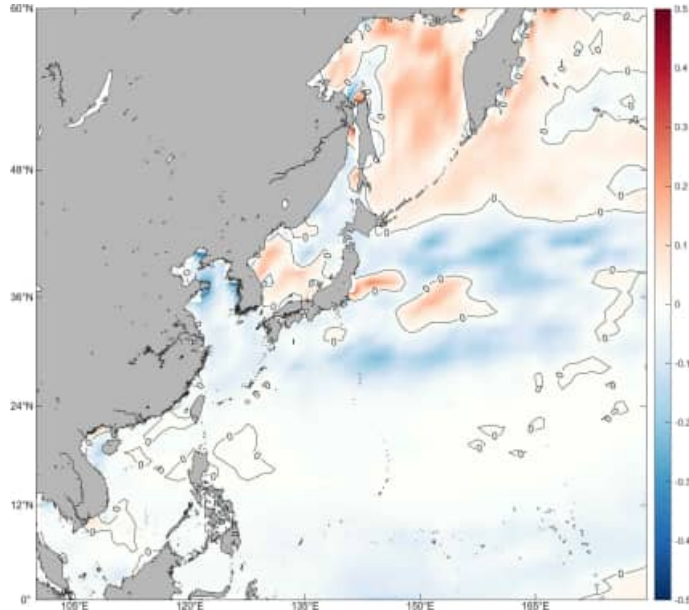
2024년을 기준으로 2050년에 예상되는 엽록소 a 공간 분포 변화를 비교한 결과, SSP126 시나리오에서는 엽록소 a 증감이 지역별로 혼재된 채 비교적 제한된 범위에서 나타나는 경향이 확인된다(그림 47).



<그림 47> SSP126 시나리오 기반 2050년 북서태평양
표층 엽록소 a 변화(2024년 대비)

일본 혼슈 동측과 쿠로시오 북상 경로 주변 일부 해역에서는 엽록소 a 농도가 증가하는 영역이 분포하지만, 그 증가 폭은 대체로 $+0.1\sim 0.3 \text{ mg/m}^3$ 내외로 국지적인 수준에 머무른다. 반면 동중국해와 일본 남부 외해, 그리고 오호츠크해 주변에서는 엽록소 a가 감소하는 패턴이 관찰되며 감소폭도 $-0.1\sim -0.3 \text{ mg/m}^3$ 정도로 비교적

완만하다. 전체적으로 SSP126 시나리오의 변화 양상은 증가와 감소가 섞여 있으나 변화의 공간적 규모와 강도는 크지 않으며, 주로 국지적 분포 변화가 중심을 이룬다.



<그림 48> SSP370 시나리오 기반 2050년 북서태평양 표층 엽록소 a 변화(2024년 대비)

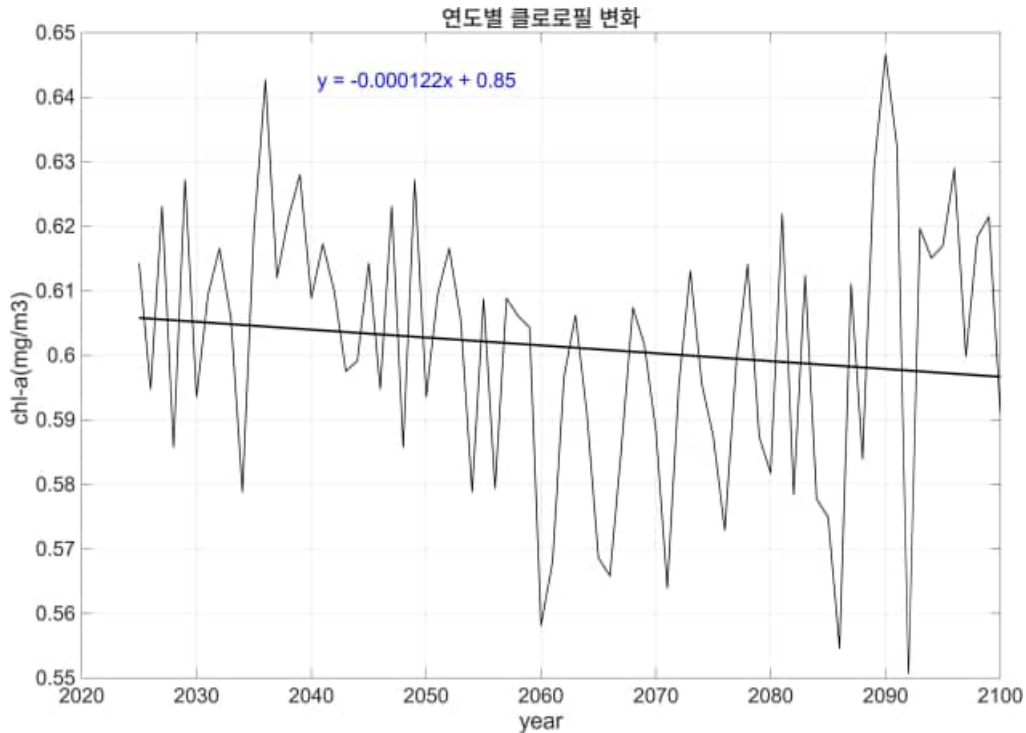
고배출 시나리오인 SSP370에서는 2050년 엽록소 a 변화가 SSP126보다 훨씬 뚜렷한 공간적 대비를 보인다(그림 48). 특히 일본 북부에서 러시아 연해 북태평양에 이르는 고위도 해역에서는 엽록소-a가 $+0.3 \text{ mg/m}^3$ 이상의 폭으로 광범위하게 증가하는 양상이 나타나며, 증가 해역의 범위와 강도 모두 SSP126보다 확대되어 있다. 반대로 저위도 서태평양, 필리핀 동부, 남중국해 일대에서는 넓은 영역에서 -0.3 mg/m^3 이상의 감소가 확인되며, SSP126에서는 국지적으로 제한되었던 감소 영역이 SSP370에서는 훨씬 넓게 확장된다. 이러한 변화는 고위도와 저위도 사이의 대비가 매우 뚜렷하게 나타난다는 점에서 SSP126과 구별된다.

두 시나리오를 비교하면, SSP126은 증가와 감소가 동시 발생하지만 전체적으로 변화가 완만하게 나타나는 반면, SSP370에서는 변화의 절대량과 공간적 범위 모두 크게 확대되어 있다. 고위도 해역의 증가와 저위도 해역의 감소라는 양상은 두 시나리오 모두에서 관찰되지만, SSP370의 변화는 훨씬 더 강하게 나타나며 공간적으로도 연속적인 패턴을 형성한다. 한반도 동해 연안의 경우 두 시나리오 모두에서 극단적인 증가나 감소 없이 상대적으로 변화폭이 작은 지역으로 나타나지만, SSP370에서는 주변 해역의 영향으로 국지적인 감소·증가의 분포 대비가 조금 더 분명하게 나타난다.

정리하면 SSP126은 국지적 변화가 중심인 완만한 변동 패턴을 보이는 반면, SSP370은 증가·감소 모두에서 보다 넓고 명확한 변화 영역이 형성되며, 북서태평양 전반에 걸친 공간적 대조가 크게 확대되는 양상이 특징적이다.

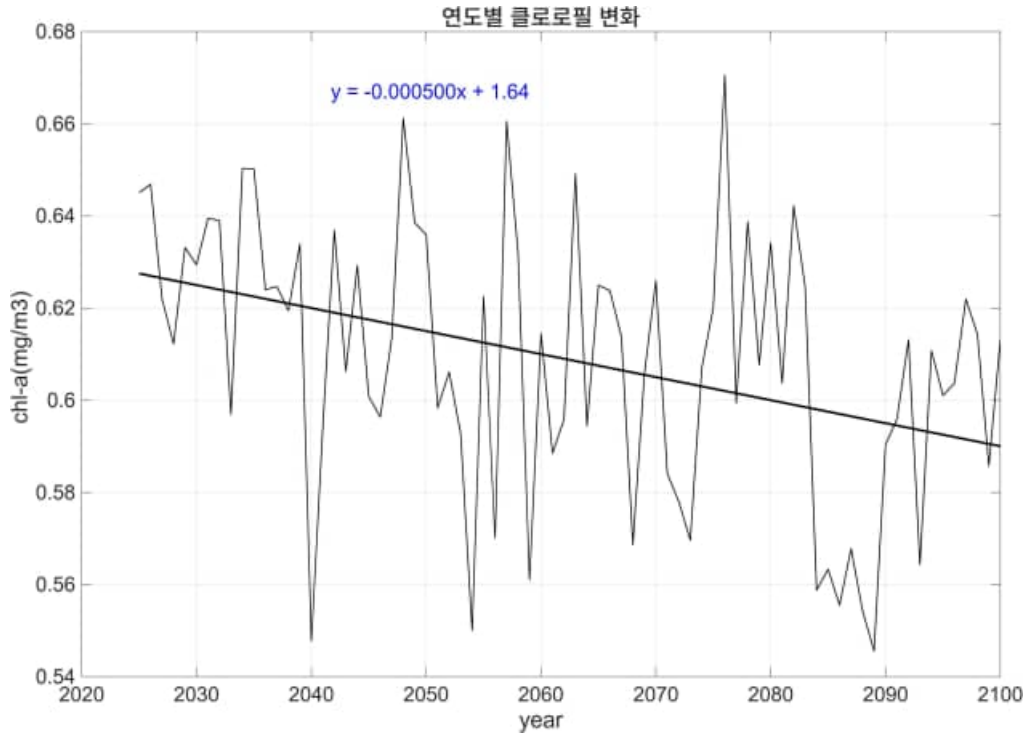
2. 미래 동해 표층 엽록소 a 전망

2.1. 미래 동해 표층 엽록소 a 장기 변화



<그림 49> SSP126 시나리오 기반 동해 연도별 표층 엽록소 a 장기 변화 예측
(2025년~2100년)

SSP126 시나리오에서는 동해 표층 엽록소 a 농도가 전체 기간에 비교적 일정한 폭에서 변동하며, 대체로 0.58~0.63 mg/m³ 범위에서 오르내린다(그림 49). 연도별 요동은 지속적으로 나타나며 특정 연도에는 일시적 급증 또는 감소가 확인된다. 추세선을 보면 완만한 감소 경향이 나타나며, 변화값이 매우 작다는 점을 보여준다. 변동 값 자체의 변동성이 크지만 장기적으로는 아주 약한 하향 흐름이 유지될 것으로 예측된다.



<그림 50> SSP370 시나리오 기반 동해 연도별 표층 엽록소 a 장기 변화 예측
(2025년-2100년)

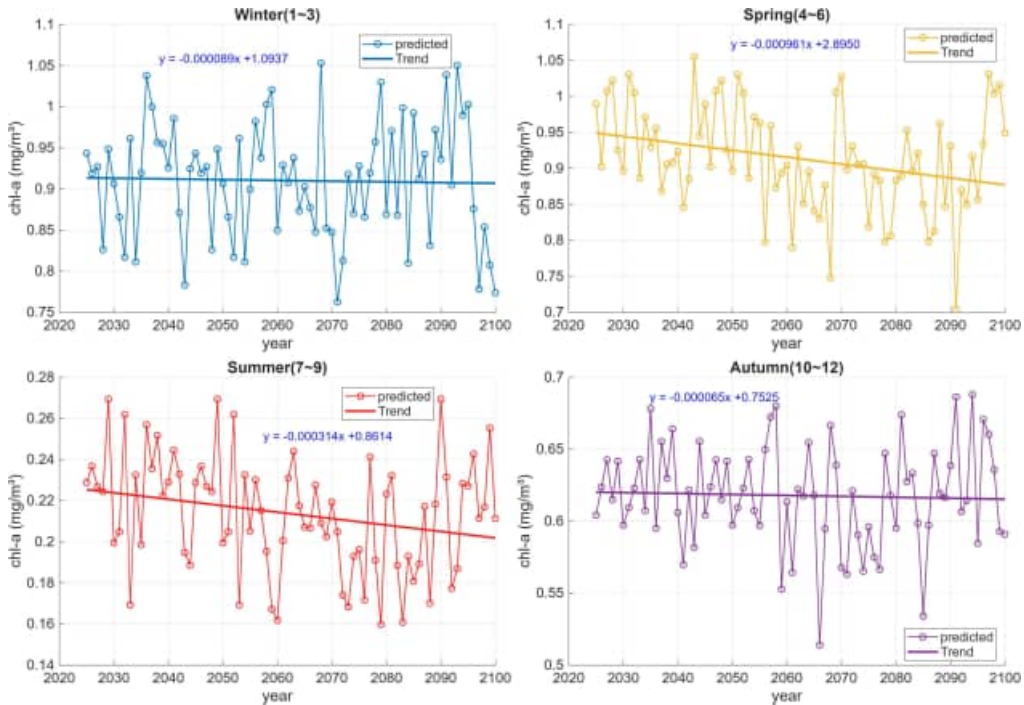
SSP370 시나리오에서도 연도별 엽록소 a 농도는 계속해서 큰 폭으로 진동하며, 값은 약 0.56~0.66 mg/m³ 범위에서 변화한다(그림 50). 전반적인 진폭은 SSP126과 유사하지만, 일부 해에서는 상대적으로 더 큰 증가 또는 하락 폭이 나타난다. 추세선은 하향 경사를 보이며, 기울기는 SSP126보다 더 크다. 즉, 변동성은 유지되지만, 장기적인 감소 속도는 SSP126보다 더 뚜렷한 감소가 나타날 것으로 예측된다.

두 시나리오 모두 엽록소 a 농도는 시간에 따라 급격한 요동을 보이며, 연도별 변동 폭은 유사하게 크게 나타난다. 그러나 추세선의 기울기는 명확한 차이를 보인다. SSP126는 -0.00012 °C/년으로 매우 약한 감소, SSP370는 -0.00050°C/년으로

SSP126보다 큰 폭의 감소 경향을 나타낸다. 즉, 예측치에서 두 시나리오 모두 감소 방향을 보이지만, SSP370에서 감소 경향이 더 선명하고 감소 속도도 크다. 또한 SSP370에서는 일부 연도에서 최고 농도가 0.66 mg/m^3 가까이 도달하는 등, 변동 폭이 SSP126보다 조금 더 넓게 나타나는 경향도 예측된다. 즉 시나리오 모두 변동성은 크지만 장기적 흐름에서는 감소 방향이 공통적으로 나타난다.

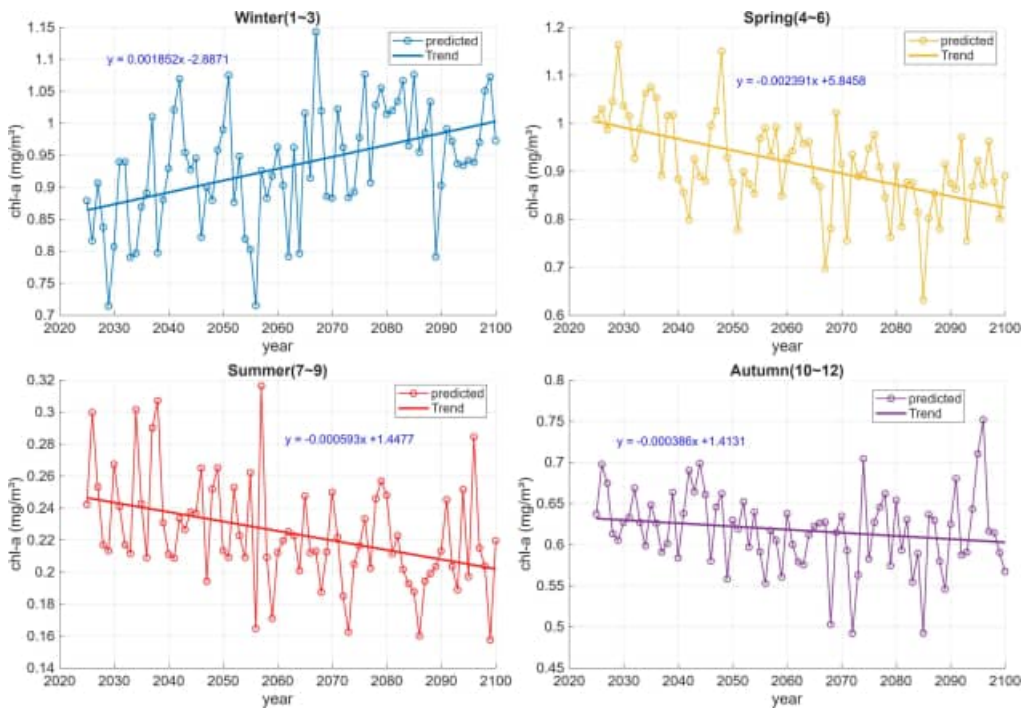
2.2. 미래 동해 표층 엽록소 a 계절 변화 예측

SSP126 시나리오에서는 모든 계절에서 연도별 변동 폭이 크게 나타나며, 값이 해마다 오르내리는 불규칙한 패턴이 공통적으로 관찰된다(그림 51).



<그림 51> SSP126 시나리오 기반 동해 계절별 엽록소 a 미래 예측치(2025년-2100년)

겨울철(1~3월)은 약 0.8~1.1 mg/m³ 범위에서 반복적으로 변동하며, 추세선은 거의 기울기가 없는 매우 완만한 감소 형태를 보인다. 봄철(4~6월)은 0.8~1.1 mg/m³ 범위에서 값이 분포하며, 추세선은 감소 방향으로 나타나 장기적으로 낮아지는 경향이 예측된다. 여름철(7~9월)은 0.16~0.28 mg/m³ 사이에서 변동하며, 사계절 중 가장 낮은 수준을 유지한다. 가을철(10~12월)은 0.55~0.75 mg/m³ 범위에서 변동하며, 추세선은 아주 완만한 감소를 나타낸다. 즉, SSP126에서는 사계절 모두 값 자체의 연 변동성이 매우 크고, 추세선만 놓고 보면 모든 계절에서 완만한 감소 경향이 나타난다.



<그림 52> SSP370 시나리오 기반 동해 계절별 엽록소 a 미래 예측치(2025년-2100년)

SSP370 시나리오 역시 계절별 변동 폭이 크게 나타나며, 연도별 진폭이 SSP126과 유사하게 불규칙하게 반복된다(그림 52). 겨울철은 0.8~1.2 mg/m³ 범위에서 변동하고, 추세선은 약하게 증가하는 방향을 보인다. 봄철은 0.8~1.1 mg/m³ 범위에서 오르내리며, 추세선은 감소 방향으로 기울어 있다. 여름철은 0.18~0.32 mg/m³ 사이에서 변동하며, 추세선은 감소 방향을 보인다. 가을철은 0.55~0.8 mg/m³ 범위에서 진동하며, 추세선은 감소 경향을 뚜렷하게 나타낸다. 즉, SSP370은 겨울철을 제외한 봄·여름·가을에서 모두 감소 추세가 나타나며, 특히 여름과 가을에서 감소 기울기가 비교적 선명하게 표현된다.

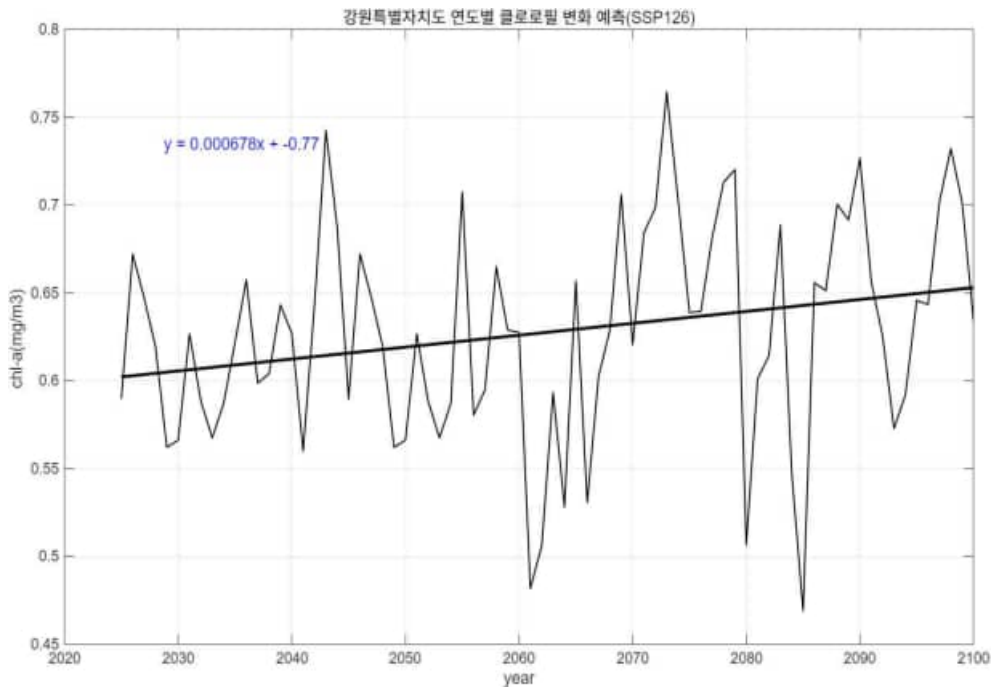
두 시나리오 모두 계절별 변동 폭이 크고 해마다 불규칙한 요동이 나타나는 것은 공통점이다. 그러나 추세선의 방향에서는 차이가 뚜렷하게 드러난다. SSP126은 네 계절 모두에서 아주 완만한 감소 경향이 나타나는 반면, SSP370에서는 겨울철만 증가, 나머지 봄·여름·가을은 감소 경향을 보이며 감소 기울기도 SSP126보다 크다. 특히 여름철의 경우 두 시나리오 모두 감소 방향이지만, SSP370에서 감소 기울기가 더 두드러져 보인다. 또한 가을철에서도 SSP370이 SSP126보다 더 뚜렷한 감소 경향을 나타낸다는 점이 확인된다.

요컨대, SSP126은 “전체적으로 완만한 감소”, SSP370은 “겨울만 증가하고 나머지 계절은 감소폭이 더 뚜렷” 한 패턴을 보이는 등 시나리오 간의 장기 변화 흐름이 선명하게 구분된다.

3. 미래 강원특별자치도 표층 엽록소 a 전망

3.1. 미래 강원특별자치도 표층 엽록소 a 장기 변화

2020년 이후부터 2100년까지 강원특별자치도 주변 해역에서 예측된 표층 엽록소 a 농도의 장기 변동을 나타낸다(그림 53). SSP126은 온실가스 감축이 가장 잘 이루어진 저배출 시나리오로, 기후변화의 영향이 다른 시나리오에 비해 상대적으로 완화된 미래를 가정한다. 단기 변동성이 매우 크지만, 장기적으로는 완만한 증가 경향이 나타난다는 점이 중요한 특징이다.



<그림 53> SSP126 시나리오 기반 연도별 표층 엽록소 a 장기 변화 예측
(2025년~2100년)

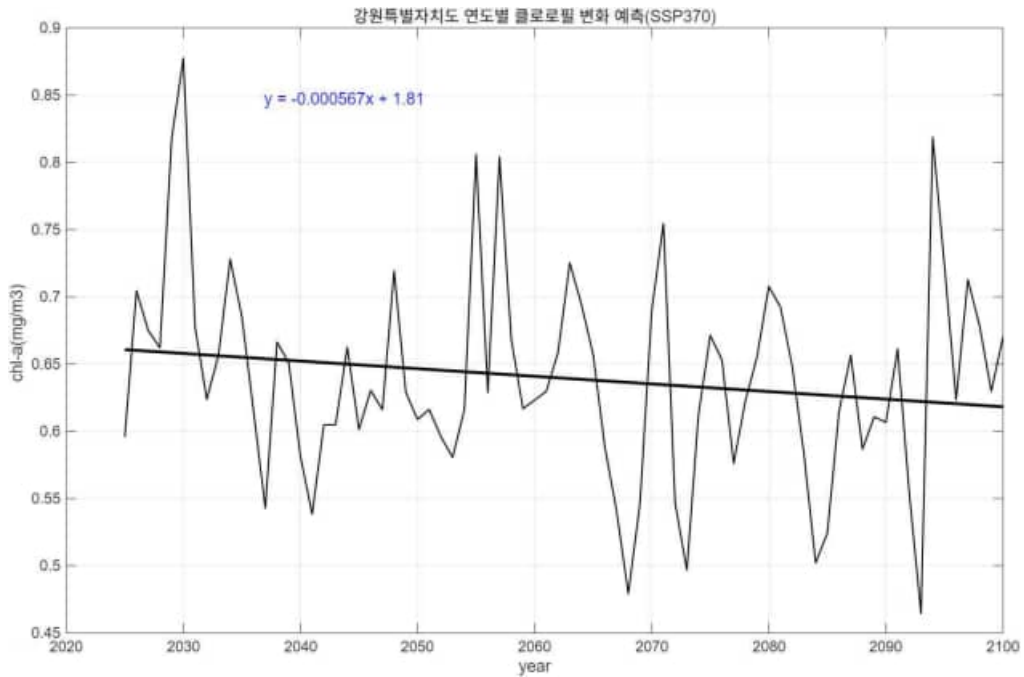
2100년까지 강원특별자치도 해역의 엽록소 a 농도가 매년 평균 0.0007 mg/m³

정도 증가하는 장기적 경향을 보여준다. 변화의 기울기는 크지 않지만, 80년 동안 누적될 경우 약 0.05 mg/m^3 이상 상승하는 구조적 증가가 예상된다. 이는 강원특별자치도 해역의 기초생산성이 기후변화 속에서도 일정 수준 강화될 가능성을 시사한다.

연도별로 보면, 예측값이 변동 폭이 매우 큰 특성을 지닌다. 특히 2060년 전후와 2080년대 초반에는 일시적으로 0.5 mg/m^3 이하로 급감하는 해가 나타나는 반면, 일부 해에는 0.7 mg/m^3 이상으로 급증하는 경우도 있어, 미래 동해 생산성이 기후·해류·성층 상태의 연간 변동성(Interannual variability)에 매우 민감하게 반응할 것임을 보여준다.

전체적인 값의 범위는 대체로 $0.55\sim 0.70 \text{ mg/m}^3$ 사이에서 변동하며, 현재(2020년대) 대비 생산성의 평균적 상승이 예상된다. 이는 기후변화로 인한 동해 북부 냉수역의 잔존, 겨울철 혼합층 깊이 유지, 영양염 순환 구조 변화 등이 작용한 결과로 해석될 수 있다. 특히 SSP126 시나리오는 동해가 온난화되더라도 성층 강화가 상대적으로 완만하게 나타나기 때문에, 과도한 생산성 저하로 이어지지 않는다는 점을 반영한다.

예컨대 SSP126 조건에서 강원특별자치도 주변 해역의 엽록소 a 농도는 단기적 변동성은 크고 예측의 불확실성도 존재하지만, 장기적으로는 기초생산력이 점진적으로 증가하는 방향으로 재편될 가능성을 보여준다.



<그림 54> SSP370 시나리오 기반 강원특별자치도 연도별 표층 엽록소 a 장기 변화 예측 (2025년~2100년)

SSP370 시나리오 하에서 2020년대부터 2100년까지 강원특별자치도 주변 해역의 표층 엽록소 a 농도가 어떻게 변화할 것인지 예측해보면, 전체 기간 연도별 변동성이 매우 크지만, 장기적으로는 완만한 감소 경향이 나타난다(그림 54).

감소 폭은 크지 않지만, 지속적 온난화와 성층 강화가 누적되면서 강원특별자치도 해역의 기초생산력이 장기적으로 약화될 가능성이 있다. SSP370은 온실가스 감축이 충분히 이루어지지 않을 때 전망되는 중·고배출 시나리오이므로, 이러한 감소 경향은 기후변화가 기초생산성에 미치는 영향이 점차 직접적으로 반응된다는 것을 이야기 한다.

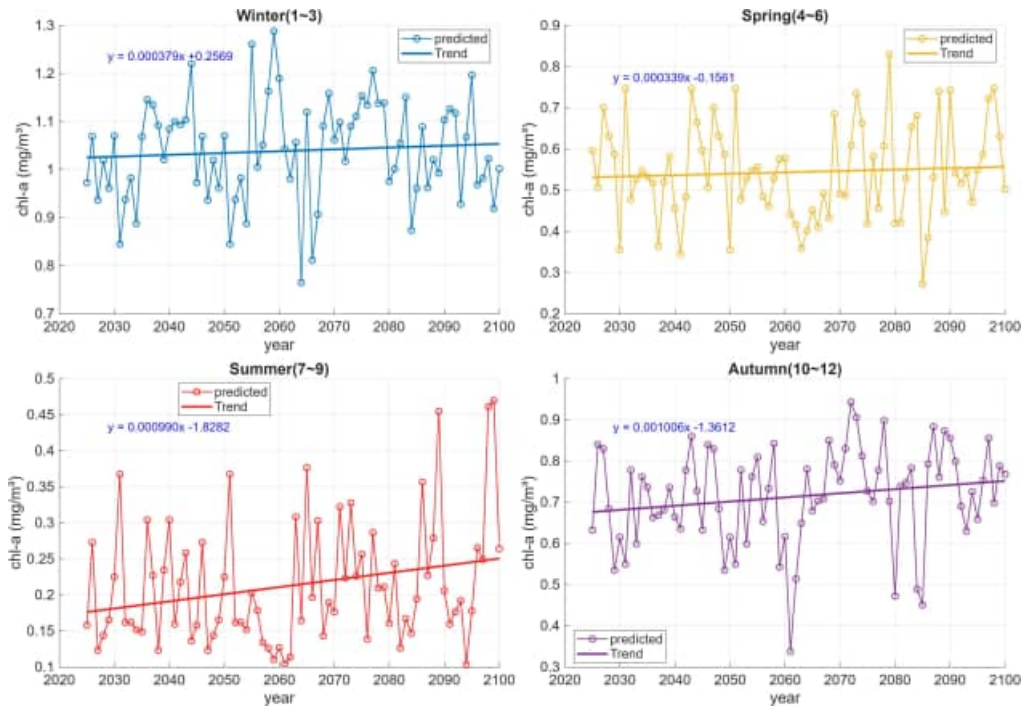
시계열 변동을 보면, 엽록소 a 농도는 해마다 큰 폭으로 오르내리며 매우 불안정한 양상을 보인다. 일부 해에는 0.8 mg/m³ 에 근접할 정도로 농도가 높게 나타나는

반면, 다른 해에는 0.55 mg/m^3 이하로 급격히 감소하는 등 극단적 고생산·저생산 해가 교차하며 나타나는 패턴이 반복된다. 특히 2030년대 이후부터 2060년대 중반까지는 상대적으로 낮은 값이 반복적으로 나타나며, 기초생산력 저하가 뚜렷하게 나타나는 구간이 형성된다. 반면 2070년대 이후에는 다시 생산성이 회복되는 양상도 보이지만, 이러한 상승이 장기적인 추세 전환으로 이어지지는 않으며 여전히 강한 변동성을 유지한다.

종합적으로 볼 때 SSP370 시나리오에서 강원특별자치도 해역의 미래 엽록소 a 농도는 저탄소 시나리오(SSP126)에서 예측된 증가 경향과는 뚜렷하게 대비되는 결과로, 기후변화가 충분히 완화되지 않을 경우 동해의 기초생산력이 장기적인 저하 압력을 받게 될 가능성을 시사한다.

3.2. 미래 강원특별자치도 표층 엽록소 a 계절 변화 예측

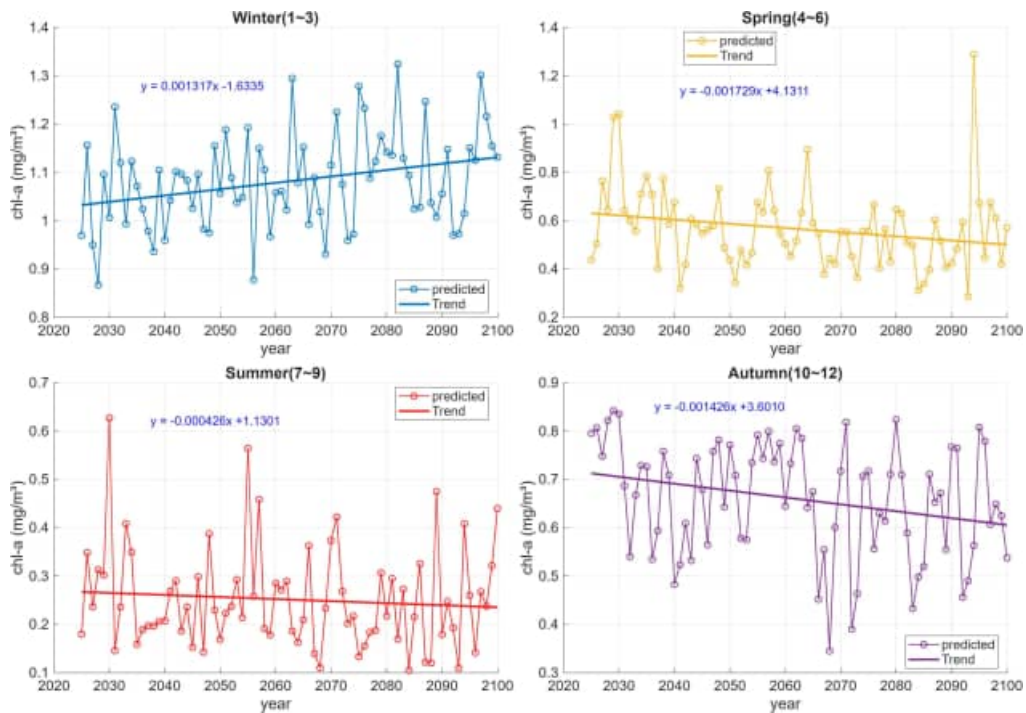
강원특별자치도 연안의 표층 엽록소 a 농도는 두 시나리오 모두에서 계절별 변동성이 크게 나타나며, 해마다 뚜렷한 오르내림이 반복되는 양상이 공통적으로 확인된다. 그러나 장기적인 변화 방향은 시나리오별로 뚜렷하게 달라져, SSP126에서는 전반적으로 안정적이거나 소폭 증가하는 패턴이 나타난 반면(그림 55), SSP370에서는 일부 계절에서 감소 추세가 명확하게 드러나는게 가장 큰 차이점이다(그림 56).



<그림 55> SSP126 시나리오 기반 강원특별자치도 계절별 엽록소 a 미래 예측치 (2020년-2100년)

SSP126 시나리오에서는 겨울철 엽록소 a 농도가 0.8~1.2 mg/m³ 범위에서 변동하면서도 미세하게 증가하는 추세가 나타난다. 봄철은 0.6~0.9 mg/m³ 범위에서

오르내리지만 추세선이 거의 수평에 가깝게 그려져 장기적인 변화가 크지 않은 것으로 나타난다. 여름철은 0.25~0.55 mg/m³ 사이에서 변동하며 완만한 증가 경향이 확인되며, 가을철은 0.7~1.1 mg/m³ 범위에서 계절 특성을 유지하되 장기적으로는 조금씩 감소하는 방향을 보인다. 전체적으로 SSP126에서는 계절별 변화가 크지 않고, 증가와 감소가 혼재해 있으나 대체로 완만하고 안정적인 흐름이 유지된다.



<그림 56> SSP370 시나리오 기반 강원특별자치도 계절별 엽록소 a 미래 예측치 (2020년~2100년)

반면 SSP370 시나리오에서는 계절별 추세가 보다 명확하게 드러난다. 겨울철은 0.8~1.4 mg/m³ 범위에서 변동하며 증가 추세가 확인되지만, 봄철은 0.6~1.0 mg/m³ 범위에서 감소하는 경향이 뚜렷하다. 여름철 역시 0.25~0.7 mg/m³ 사이에서 변동하며 감소 방향을 보이며, 가을철 또한 0.6~1.1 mg/m³ 범위에서

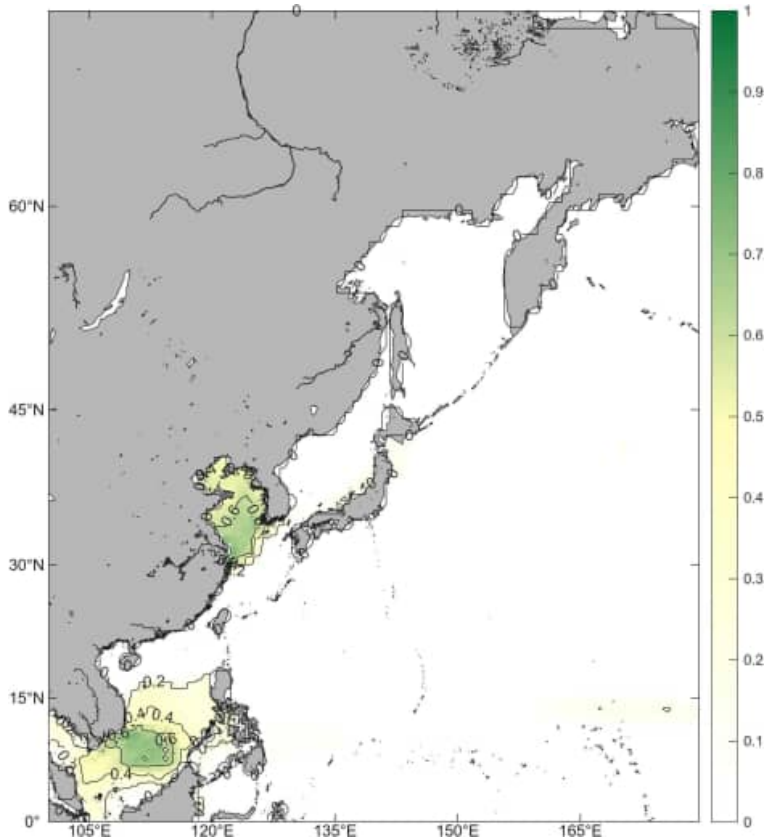
안정적으로 변동하지만 추세선은 꾸준한 감소를 나타낸다. 즉, SSP370에서는 겨울을 제외한 모든 계절에서 감소 추세가 확인되며, 특히 봄철과 가을철에서 감소 기울기가 상대적으로 크게 나타난다.

두 시나리오를 비교해보면, SSP126은 전반적으로 안정적이며 계절별로 증가와 감소가 혼재하는 ‘완만한 변화’의 특징을 보이는 반면, SSP370은 겨울철만 증가하고 나머지 계절은 모두 감소하는 ‘일관된 저하 방향’이 나타나는 점에서 차이가 두드러진다. 또한 SSP370에서는 각 계절별 최대·최소값의 폭이 넓게 나타나는 경향이 있으며, 연도별 진폭도 SSP126보다 큰 경우가 많아 변동성이 상대적으로 크게 예측됐다.

제3절 미래 2050년 방어, 참다랑어 분포 예측

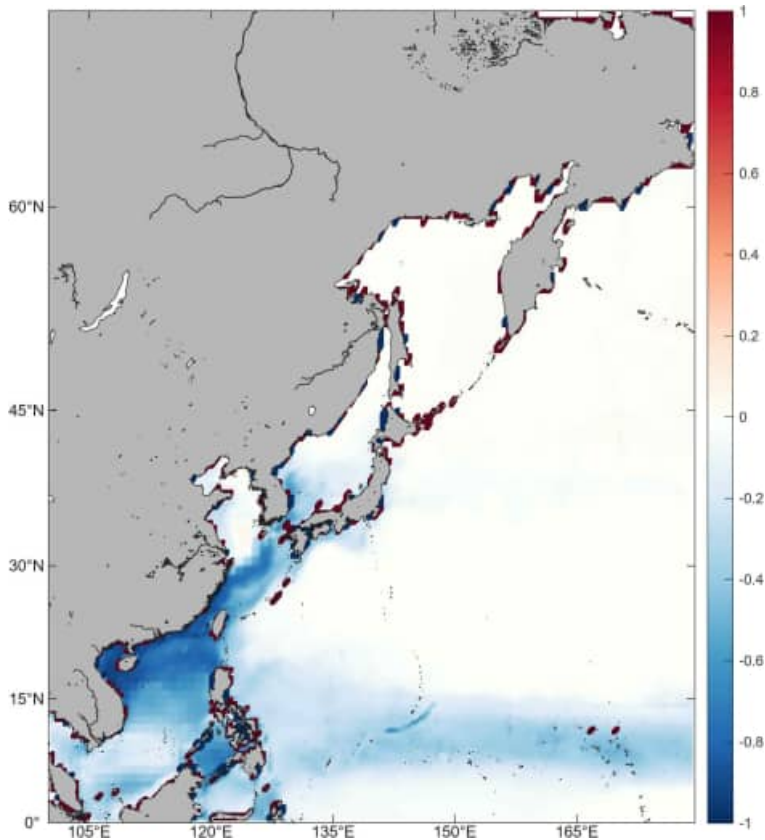
1. 미래 방어류(젯방어) 분포 예측(2050년)

SSP126 시나리오에서 예측된 2050년 방어류의 서식 적합도는 전반적으로 서해와 동중국해 북부 연안에서 비교적 높은 수준(0.3-0.6)의 적합도가 나타나며, 중국 동부 연안과 황해 남부 해역이 주요 적합 해역으로 예측됐다(그림 57).



<그림 57> 2050년 SSP126 시나리오 기반 방어류(*Seriola quinqueradiata*) 서식 적합도 공간 분포 예측도

반면, 동해는 전체적으로 매우 낮은 적합도(대부분 0.1 이하)를 보이며, 고적합도 해역은 확인되지 않는다. 대한해협 주변에서 일부 약한 적합도 신호가 나타나지만 뚜렷한 핵심 서식지로 식별되지는 않는다. 즉, 2050년 저배출 시나리오에서도 방어류의 서식 중심축은 난류의 영향을 받는 서해·동중국해·대만-푸젠 연안으로 국한되어 있고, 동해는 상대적으로 주변적인 분포 영역에 머무르는 것으로 나타난다.



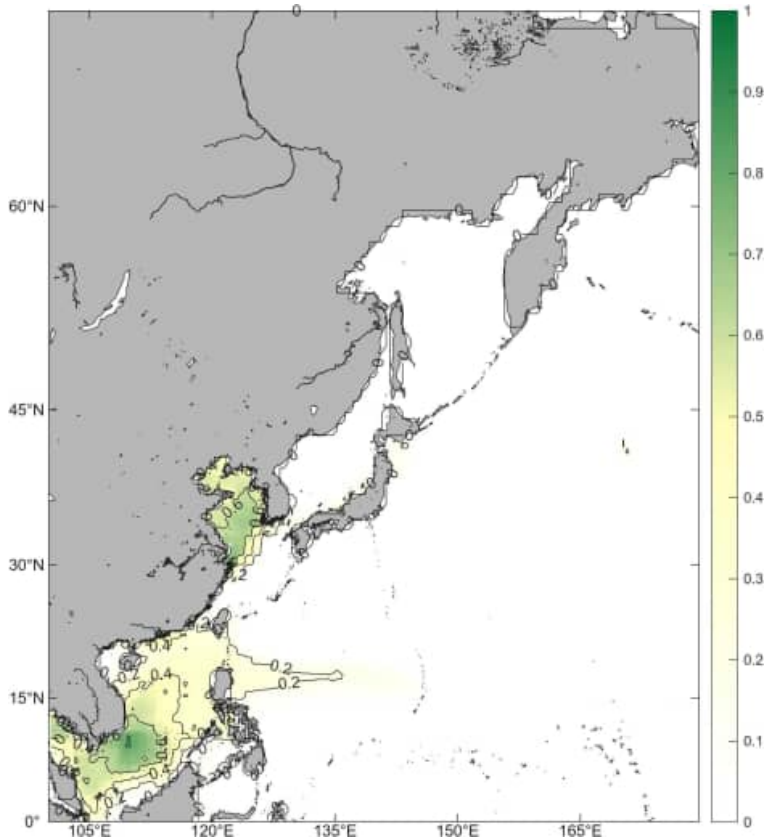
<그림 58> SSP126 시나리오에서 2050년 방어 서식 적합도 변화
(현재 대비 편차)

현재 대비 변화(편차)를 살펴보면, 동해 전역에서 방어류의 서식적합도가 감소하는 음의 편차가 광범위하게 분포하고 있다(그림 58). 동해 남부와 동해 중부에서도

일관된 감소 신호가 나타나며, 동해에서 증가 신호(양의 편차)는 거의 확인되지 않는다. 반대로, 동중국해 남부와 대만해협, 그리고 중국 남동 연안 지역에서는 일부 국지적 증가 신호가 나타나 방어류의 적합 해역이 이들 저위도 연안으로 더 집중되는 모습을 보여준다.

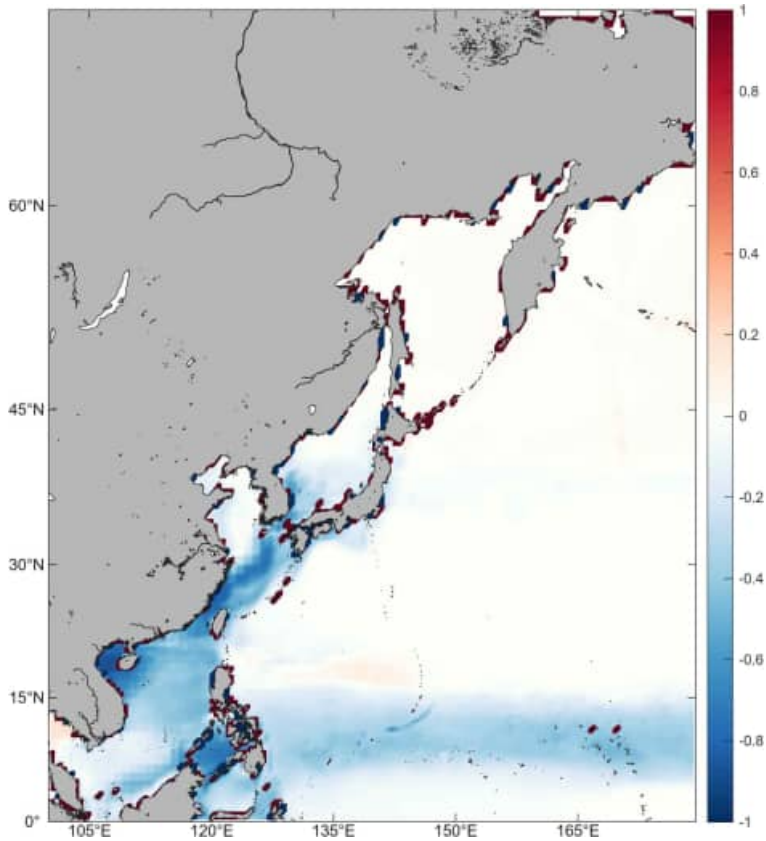
동해를 중심으로 보면, 2050년 SSP126에서도 방어류가 동해에서 점차 서식 가능성을 잃어가는 경향이 명확히 드러난다. 동해 내부에서는 고적합도 해역은 나타나지 않으며, 현재 대비 감소 폭까지 더해져 동해는 방어류 분포에 있어 점차 주변화되는 공간적 특성을 보인다. 특히 동해 남부에서 감소 신호가 강하게 나타난다는 점은, 방어류의 서식 환경이 향후 동해보다는 서해·동중국해 연안 중심으로 재편되고 있음을 시사하는 공간 패턴으로 볼 수 있다.

종합하면, SSP126 시나리오에서 방어류는 동해에서는 적합도가 낮고 감소 경향이 뚜렷하며, 서해·동중국해 연안을 중심으로 주된 서식축이 유지·강화되는 형태를 나타낸다.



<그림 59> 2050년 SSP370 시나리오 기반 방어(*Seriola quinqueradiata*) 서식 적합도 공간 분포 예측도

2050년 SSP370 시나리오에서 방어류의 잠재 서식적합도는 현재 대비 전반적으로 낮은 수준을 보이며, 특히 서식 적합도가 높게 나타나는 주요 해역은 중국 연안, 동중국해, 베트남 북부 해역을 포함한 열대-아열대 해역에 나타난다(그림 59). 2050년 예측 분포도를 보면, 서해와 동중국해 연안 해역 일부에서만 0.2 내외의 낮은 적합도 신호가 나타나고, 그 외 대부분 해역(동해)에서는 서식적합도가 0에 가까운 매우 낮은 값으로 유지되고 있다. 즉, 고배출 시나리오에서는 방어류의 적합 서식지가 동아시아 연안에서도 제한적으로 나타나며, 현재보다 훨씬 축소된 분포가 예상됨을 확인할 수 있다.



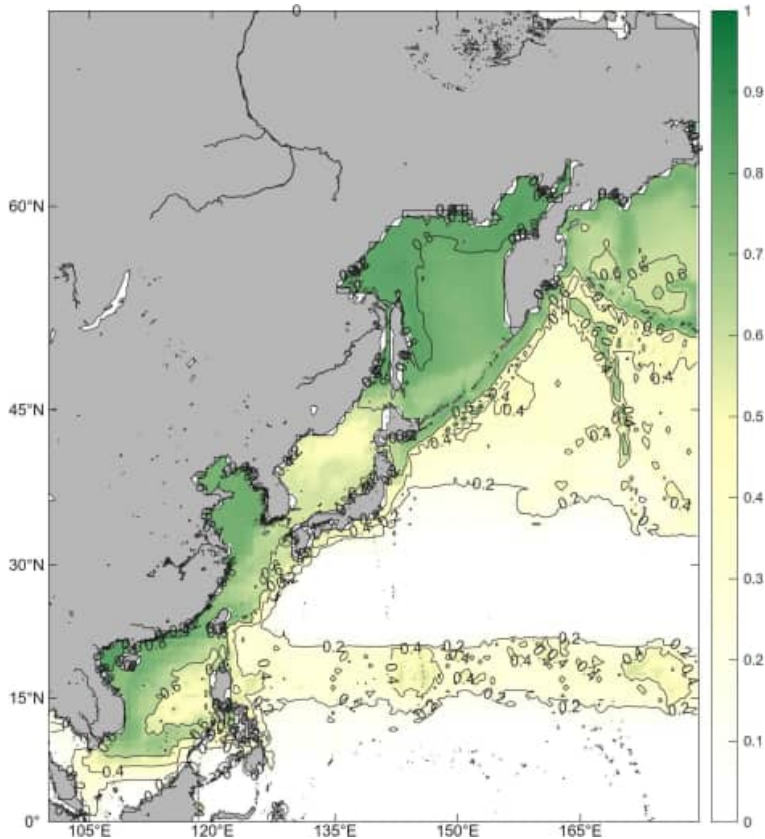
<그림 60> SSP126 시나리오에서 2050년 방어 서식 적합도 변화
(현재 대비 편차)

현재와의 차이를 보여주는 편차를 보면, 동해 전역에서 파란색 계열(음의 편차)이 넓게 분포해 있으며, 이는 2050년에 방어류의 서식적합도가 현재보다 더 낮아지는 방향으로 변화했음을 의미한다(그림 60). 특히 대한민국 동해 연안과 일본 서안을 따라 음의 편차가 진하게 나타나고 있어, 동해가 방어류 서식에 상대적으로 덜 적합한 해역으로 변화하고 있음을 지도에서 확인할 수 있다. 반면, 일부 오후츠크해 연안과 일본 북동부 일부 지역에서는 미약한 양의 편차(붉은색)가 나타나지만, 그 범위가 매우 제한적이며 강도 또한 크지 않다.

종합적으로 볼 때, SSP370 시나리오에서는 동해에서 방어류의 서식 적합도가 전반적으로 감소하는 변화가 두드러지며, 특히 한국 동해 연안에서는 현재에 비해 방어가 서식할 가능성이 확연히 낮아지는 양상을 시각적으로 확인할 수 있다. 이 결과는 MaxEnt 모델의 출력에 따른 지리적 변화 패턴만을 기반으로 해석한 것으로, 동해가 방어류에 대해 ‘현재 대비 감소한 적합성’을 보인다는 사실이 지도상에서 명확히 나타난다. 따라서 지속적인 환경 관측과 분포 조사를 통해 다양한 환경 변수와 자원량을 고려한 지속적인 모니터링이 필요하다.

2. 미래 참다랑어 분포 예측(2050년)

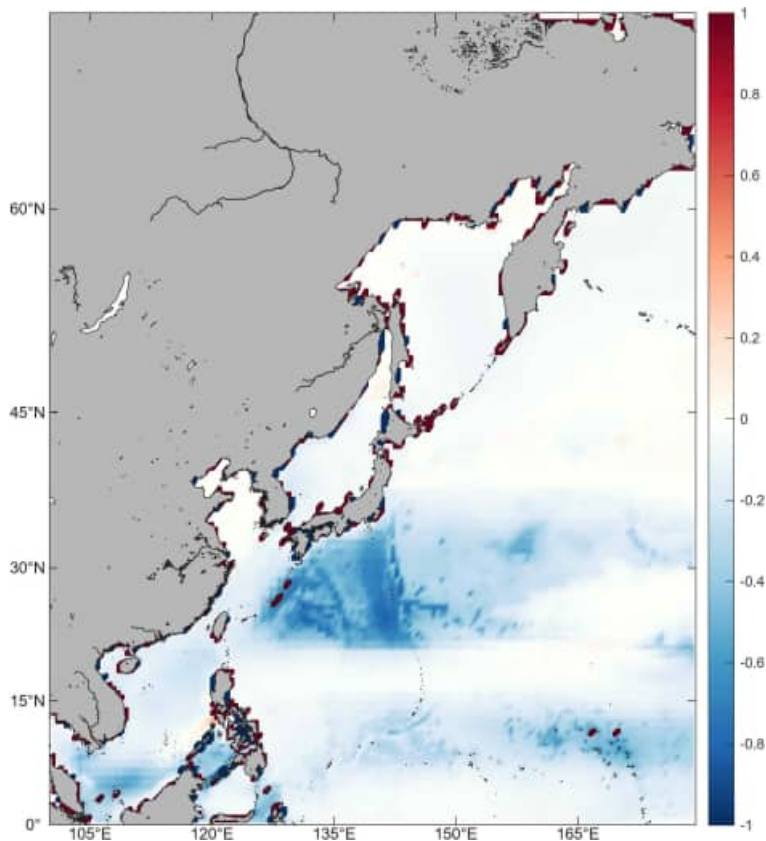
2050년을 대상으로 한 SSP126 시나리오 분석 결과, 동해 해역은 전반적으로 매우 낮은 수준의 참다랑어 서식적합도를 보이는 것으로 나타났다(그림 61).



<그림 61> 2050년 SSP126 시나리오 기반 참다랑어 서식 적합도 공간 분포 예측도

예측 지도에서 확인되는 높은 적합도 구역은 대부분 동중국해와 일본 남부 연안을 중심으로 형성되며, 동해는 0.1 이하의 낮은 값이 넓게 분포한 해역으로 표현된다. 동해 남부의 일부 구간에서만 0.2 전후의 약한 적합도가 나타날 뿐, 중부와 북부

동해에서는 거의 전체 구간이 0.05 이하의 낮은 값을 기록하였다. 이러한 특징은 예측 모델이 제시하는 2050년 어장 환경 조건에서 동해가 참다랑어의 주요 이용·회유 해역으로 구조적으로 부합하지 않을 수 있다고 볼 수 있다. 단, 모델 환경 입력 변수의 한계로 나타나는 제한적인 결과라는 사실은 해석의 고려해야 할 사항이다.



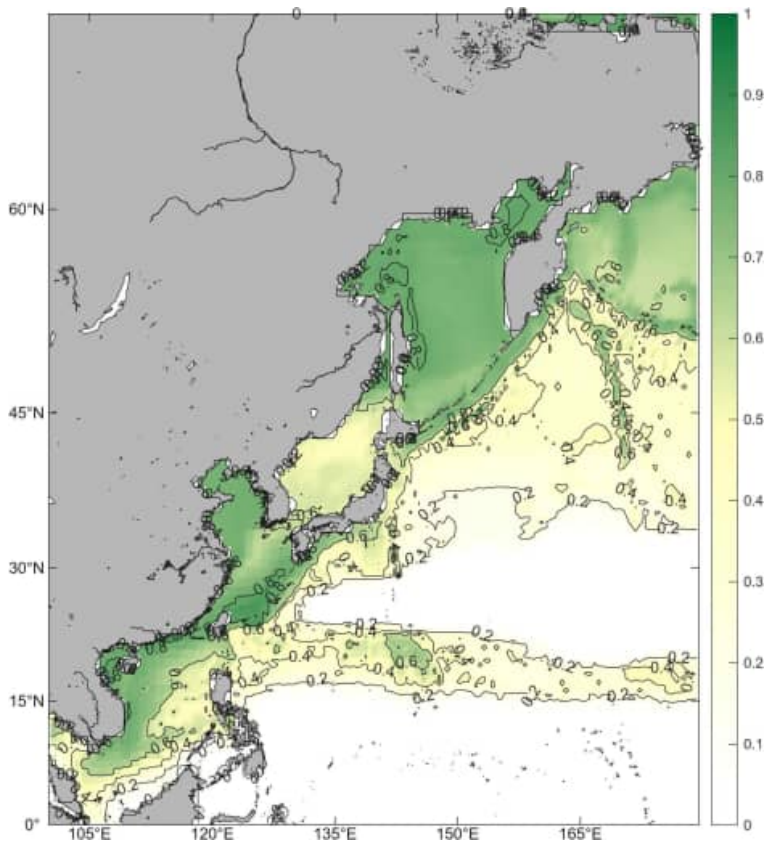
<그림 62> SSP126 시나리오에서 2050년 참다랑어 서식 적합도 변화(현재 대비 편차)

현재와 2050년 사이의 차이를 확인하기 위해 산정된 분포 편차 역시 동해의 변화 방향을 분명하게 드러난다(그림 62). 편차 지도에서는 동해 전역에서 음의 값이 넓게 형성되며, 특히 동해 중부와 북부 해역에서는 -0.4 이하의 감소 구간이 연속적으로

나타난다. 동해 남부에서도 -0.2에서 -0.6에 이르는 감소가 광범위하게 확인된다. 이는 모델의 계산 결과에서, 동해의 참다랑어 서식적합도가 과거보다 더 낮은 쪽으로 변화하는 것으로 표현되었음을 의미한다. 반대로 동해 해역에서 증가(+편차) 구간은 사실상 확인되지 않아, 서식적합도가 높아지는 지역은 모델상 나타나지 않았다.

종합하면, SSP126 시나리오 하에서도 동해는 2050년에 참다랑어의 주요 분포역으로 변화하는 조짐이 보이지 않으며, 현재 대비 적합도가 더 낮아진 해역이 대부분을 차지한다. 난류역을 따라 형성되는 서식역의 중심은 계속해서 동중국해와 일본 남쪽·동쪽 외해에 집중된 채 유지되며, 동해는 다소 제한적인 적합도만 보일 뿐 핵심 서식지로 확장되는 방향은 관측되지 않는다. 이와 같은 결과는 예측 모델 결과에서 나타난 공간적 변화 양상으로, 동해 해역의 미래 참다랑어 분포 잠재성이 현재보다 더 낮은 값으로 평가 될 수 있음을 시사한다. 단, 모델 환경 입력 변수의 한계로 나타나는 제한적인 결과라는 사실은 모델 해석의 고려해야 할 점이다.

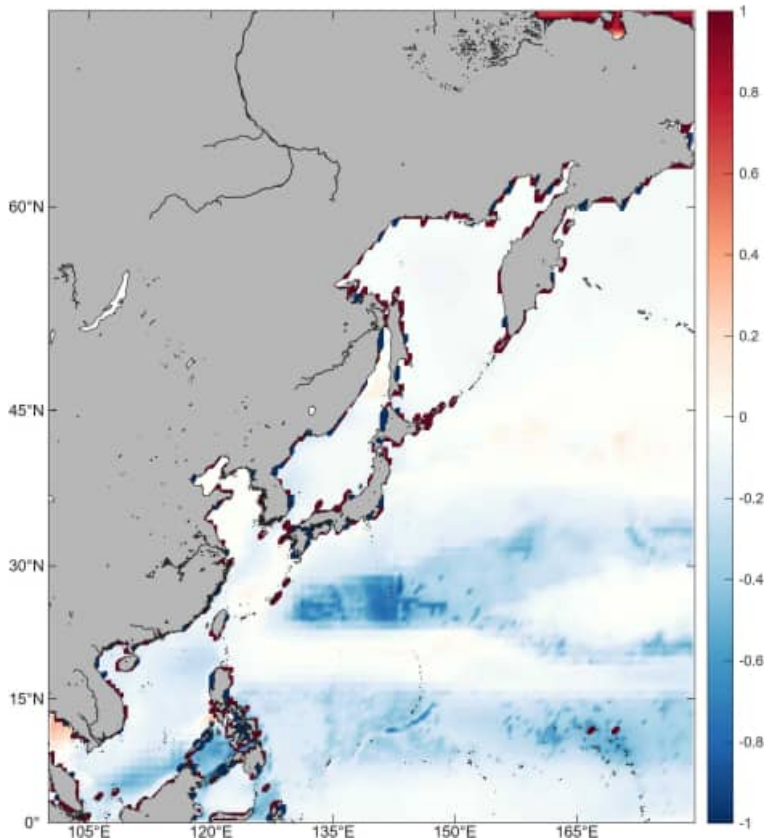
SSP370 시나리오에서 2050년 참다랑어의 서식적합도는 북서태평양 전역에서 전반적으로 ‘광범위한 고적합 해역’을 형성하고 있으며, 특히 동중국해-규슈 남동측-일본 동해안으로 이어지는 난류대 중심으로 높은 적합도(0.6 이상)가 나타난다 (그림 63).



<그림 63> 2050년 SSP370 시나리오 기반 참다랑어 서식 적합도 공간 분포 예측도

참다랑어가 선호하는 어황 조건은 북서태평양 미래 기후에서도 유지됨에 따라 난류 경계역을 따라 서식 적합한 해역이 연속적으로 분포하는 형태가 관찰된다 (그림 63). 동해의 경우, 동해 남부와 대한해협을 통한 유입 경로에서 일부 중간

수준의 서식 적합도(0.3-0.5)가 확인되나, 동해 전역에서 고적합도 지역(0.6 이상)은 뚜렷하게 나타나지 않는다는 특징이 있다. 즉, SSP370에서도 참다랑어의 핵심 분포축은 동해 내부보다는 난류의 직접적 영향이 강한 외해·서일본 해역에 집중될 것으로 보인다.



<그림 64> SSP370 시나리오에서 2050년 참다랑어 서식 적합도 변화(현재 대비 편차)

편차 분석(현재 대비 2050년 변화)을 살펴보면, 동해 전 해역에서 참다랑어 서식 적합도가 전반적으로 감소하는 경향(음의 편차)이 뚜렷하게 나타난다(그림 64). 양의 편차는 동해에서는 거의 나타나지 않으며, 일본 홋카이도 북측·쿠릴 해역 등

보다 고위도 지역에서 일부 국지적 증가가 확인될 뿐이다.

이러한 SSP370 기반 변화 특성은, 동해가 참다랑어의 미래 서식지로서 상대적 적합도가 현재보다 낮아지는 방향으로 변하고 있음을 보여준다. 현 시점에서 동해 내 일부 해역은 중간 수준의 서식 가능성이 유지되지만, 편차 분석에서 나타난 일관된 감소 신호는 참다랑어의 주된 서식 공간이 2050년에 들어 더 남쪽 혹은 북동쪽 난류역 중심으로 재편될 가능성을 시사한다.

결론적으로, SSP370 시나리오에서 2050년 참다랑어 분포는 동해를 중심으로 볼 때 현재 대비 전반적인 서식 적합도가 낮아질 것으로 예측되며, 이러한 변화는 동해가 참다랑어 주 분포축에서 점차 주변화되는 방향으로 해석될 수 있다. 이는 현재 제시된 환경적, 어획 자료의 공간적 패턴을 기반한 변화 예측이며, 동해 어업·자원관리 측면에서도 중요한 고려 요인을 제공할 수 있으며 지속적인 예측이 필요하다.

제4장

국외 사례 분석을 통한 산업화 전략 정책적 제언

국외 사례 분석을 통한 산업화 전략 정책적 제언

기후변화 시나리오(SSP)에 기반한 2050년 북서태평양 표층수는 전망은 동해의 아열대화와 난류성 어종 확장을 가속할 것으로 예측된다. 실제로 본 연구의 장기 환경 분석에서는 현재 기준에서의 어획 자료의 한계로 방어·참다랑어 등 난류성 어종의 출현이 다소 낮게 평가되었으나 어장환경 분석 결과는 장기적인 관점에서 향후 강원특별자치도 수산업이 기존 한류성 어종 중심 구조에서 점차 난류성 어종 기반 산업으로 전환될 가능성을 시사한다. 이러한 변화에 대응하기 위해서는 선진국의 유통·가공 기술, 양식체계, 인프라 운영, 제도관리 사례를 분석하여 강원특별자치도에 적용 가능한 산업화 방향을 도출하는 기초 작업이 필요하다. 본 장에서는 국제 사례를 중심으로 방어·참다랑어 산업화 기반을 검토하고, 이를 통해 향후 수행되어야 할 산업화 연구의 필요성을 강조하고자 한다.

제1절 참다랑어·방어 유통·가공 기술의 국제 표준화 동향

참다랑어와 방어는 육질 변성에 민감한 고부가가치 어종으로, 국제적으로 -50°C 수준의 초저온 콜드체인 구축이 품질 유지의 핵심 조건으로 인정된다(표 2). 특히 참다랑어는 색상 변질(갈변) 방지를 위해 초저온 냉동이 필수적이며 (Jiang et al., 2022), 어획 직후부터 소비 단계까지의 온도 관리가 제품 가치에 직접 영향을 미친다(Nakazawa et al., 2020; Wang et al., 2022).

<표 2> 참다랑어·방어 유통 단계별 국제 온도 기준

단 계	적용 온도	주요 기준	설명
어획 직후 초기 냉각	4℃ 이하 (2 시간 내)	중국 DB31 /T388-2007	선상 즉시 냉각, 품질 저하 차단
급속 냉동 (Blast Freezing)	-40℃~-50℃	ASEAN-Japan Guideline	24~48 시간 내 초저온 도달
장기 저장 (Cold Storage)	-50℃ 이하	초저온 저장 표준	변동폭±1℃ 유지
운송(수출 포함)	-45℃ 이하	EU·일본 수산물 기준	장거리 운송 시 필수
판매·진열	-15℃ 이하	상업·유통 표준	단기 온도 복구는-12℃ 이내

먼저 어획 직후 초기 냉각 단계에서는 어체 온도를 2시간 이내 4℃ 이하로 낮추는 것이 핵심이다. 이는 중국 DB31/T388-2007 기준에서도 강조되며, 선상에서 즉시 냉각을 실시함으로써 세균 증식을 억제하고 선도 저하를 방지할 수 있다. 초기 온도 관리 실패는 이후 단계에서 회복이 불가능하기 때문에 가장 중요한 공정으로 평가된다.

다음으로 급속 냉동(Blast Freezing) 단계에서는 -40℃에서 -50℃의 초저온 환경에서 24-48시간 동안 빠르게 냉동시키는 것이 국제 표준이다. 이는 ASEAN-Japan 가이드라인 등에서 제시하는 기준으로, 세포 내 수분이 미세한 얼음 결정 형태로 얼도록 해 조직 파괴를 최소화하고, 참다랑어의 붉은 육색을 유지하는 데 필수적인 절차이다.

장기 저장 단계는 -50℃ 이하에서 보관하며, 온도 변동폭을 ±1℃ 이내로 유지하는 것이 초저온 저장의 핵심 기준이다. 이는 장기간 저장 시 품질 저하와 탈수(Drip Loss)를 최소화하기 위한 조건으로, 일본과 EU에서 수출용 참다랑어 관리 시설에 요구하는 수준이다.

운송 단계, 특히 수출을 포함한 장거리 물류에서는 -45°C 이하의 안정적인 온도 유지가 필요하다. 이는 EU와 일본의 냉동수산물 기준에 해당하는 조건으로, 물류 과정에서 온도 이탈이 발생할 경우 고급 횡감 수준의 품질을 보장할 수 없기 때문이다.

마지막으로 판매·진열 단계에서는 일반적으로 -15°C 이하의 온도를 유지하며, 단기적인 온도 복구는 -12°C 이내에서 허용된다. 이는 상업적 유통 환경에서 일반적으로 적용되는 기준으로, 소비자 단계까지 선도를 유지하면서도 현실적 운영이 가능하도록 설정된 온도 범위이다.

종합하면, 어획 직후 냉각 → 급속 냉동 → 초저온 장기 저장 → 저온 운송 → 판매 단계로 이어지는 국제적 온도 기준 체계는 참다랑어·방어의 최종 품질을 결정하는 핵심 요소이다. 이러한 기준을 충족하는 콜드체인을 구축할 경우, 강원특별자치도에서도 고부가가치 난류성 어종의 안정적 유통·수출 기반을 마련할 수 있을 것이다.

제2절 일본·스페인 참다랑어·방어 양식산업 비교 및 산업화 시사점

일본과 스페인은 전 세계에서 참다랑어·방어 양식기술을 가장 선도하는 국가로 평가되며, 두 국가는 기후변화 시대의 수산자원 변동에 대응하기 위해 서로 다른 방식으로 산업 구조를 고도화해 왔다. 표에서 제시된 구분 항목은 두 국가의 기술 수준, 생산체계, 제도 운영 방식 차이를 명확하게 보여주며, 향후 강원특별자치도의 산업화 방향성 설정을 위한 중요한 비교 기준이 된다(표 3).

<표 3> 일본·스페인 참다랑어·방어 양식 산업 비교 및 시사점

구분	일본	스페인
주요 어종	방어(연 10만 톤 이상), 참다랑어	참다랑어 중심
기술 수준	완전양식 기술 상업화(킨다이대학)	국제 경쟁력 높은 육종센터(ICAR)
양식장 형태	원형·직사각형 가두리(20~50m)	수심양식(Submersible Pen) 도입
환경영향 관리	어업협동조합(FCA) 단위 관리	EU EIA 규정 적용
산업조직 구조	지역-민간-학계 연계	국가 R&D + 기업 컨소시엄

먼저, 주요 어종 측면에서 일본은 방어(연 10만 톤 이상 생산)와 참다랑어를 동시에 대규모 양식하는 국가로, 산업 규모와 시장 다양성이 매우 크다. 반면 스페인은 지중해를 중심으로 참다랑어 양식에 특화되어 있으며, 고급 시장을 겨냥한 단일 품목 중심 구조를 발전시켜왔다. 이러한 차이는 강원도가 어떤 산업화 모델을 선택할지 결정할 때 중요한 참고가 된다.

기술 구조에서도 차이가 두드러진다. 일본은 킨다이(近大)대학을 중심으로 세계 최초의 참다랑어 완전양식 상업화를 성공시켰으며, 사료·육종·질병관리 기술이 실용화 단계에 있다. “반면 스페인은 IEO 산하 ICAR/ICRA 등 연구 인프라를 기반으로 참다랑어 번식·종묘 생산 및 전주기 양식기술(완전양식) 개발을 추진해 왔으며(IEO, 2023), EU의 허가·환경영향평가(EIA) 등 규제·평가 체계 아래에서 환경관리 기준을 정교화해 왔다(EC, 2024). 요컨대, 일본은 ‘대규모 상업화 중심’, 스페인은 ‘고급·친환경 기술 중심’ 산업 구조를 갖춘 셈이다.

양식장 형태에서도 뚜렷한 차이가 나타난다. 일본은 연안에 설치된 원형·직사각형 가두리(20~50m) 기반 운영을 중심으로 하며, 지역 어업협동조합(FCA)과의 협력 체계를 통해 공간관리와 운영 효율성을 높여왔다. 대비적으로 스페인은 수심 깊은 해역에 설치하는 Submersible Pen(수중 가두리) 기술을 도입하여 태풍·고파랑 등

외부 환경 변화의 영향을 최소화하면서 지속 가능한 생산량을 확보하고 있다. 이는 기후변화로 환경 변동성이 커지는 동해에서도 매우 유의미한 기술적 비교 포인트이다.

또한 환경영향 관리 체계에서도 차이가 크다. 일본은 어업협동조합 단위의 지역 관리 중심으로 운영되며, 지역의 역사적 전통과 공동경영 체계가 유지되는 구조이다. 반면 스페인은 EU 환경영향평가(EIA) 규정에 따라 수질, 생태계, 서식지 영향 등을 과학적·법률적 기준으로 평가하는 엄격한 환경관리 체계를 적용하고 있다. 이는 강원특별자치도 양식장의 환경관리 기준 설정 시 고려해야 할 중요한 기준선이 된다.

마지막으로, 산업 조직 구조에서도 두 국가는 서로 다른 시스템을 가진다. 일본은 지역 지방정부-어업협동조합-민간기업-대학이 연계된 지역 기반 구조를 발전시켜왔으며, 스페인은 국가 연구기관과 대기업 중심의 R&D 컨소시엄을 통해 산업화 속도를 높이는 방식이다. 이는 강원특별자치도가 어떤 산업 생태계를 구축할지 결정할 때 매우 중요한 시사점을 제공한다.

이상의 비교를 종합하면, 강원특별자치도는 일본의 지역 기반 산업 생태계 (연구·기업·지역 연계) 강점과 스페인의 과학적 환경관리(EIA 기반 입지·규모·운영 기준) 접근을 결합한 혼합형 산업화 전략을 검토할 필요가 있다. 집약적 해상 양식은 지역 수질·저서·생태계에 영향을 줄 수 있으므로, 입지·규모·운영 기준을 과학적 평가틀(EIA/환경관리)로 관리하는 체계가 요구된다(Faulwetter et al., 2025). 또한 고부가가치 어종 산업화는 양식기술 고도화뿐 아니라 유통(초저온)·가공·생산 체계의 동시 고도화가 병행되어야 하며, 참다랑어 양식·번식 기술은 최근 빠르게 진전하고 있다(Frontiers in Animal Science, 2024; Aquaculture, 2024).

제3절 냉동·유통 인프라 구축 전략

방어·참다랑어와 같은 고부가가치 난류성 어종의 품질을 유지하기 위해서는 어획 직후부터 소비 단계까지 일관된 초저온 콜드체인이 필수적이다. [표 4]는 전냉고, 급속냉동고, 터널냉동고, 초저온저장고, IoT 기반 온도관리 시스템 등 핵심 시설의 기술 요건과 해외 벤치마킹 포인트를 정리한 것이다. 이러한 시설은 국제적인 품질 기준을 충족하기 위해 반드시 갖추어야 하는 요소로, 일본·중국·EU·ASEAN 등 주요 수산물 선도국의 표준과 비교해도 경쟁력을 확보하는 데 필수적이다.

<표 4> 주요 냉동·가공 시설 유형과 기능

시설	주요 기능	기술 요건	벤치마킹 목표
전냉고	4℃ 도달	2 시간 내 냉각	일본·중국 초기냉각 표준
급속냉동고	-40~-50℃	24~48 시간 급속냉동	참다랑어 필수
터널냉동고	대량 연속 처리	-40℃ 이하	자동화·에너지 효율
초저온저장고	-50℃ 장기보관	변동폭±1℃	수출용 필수
IoT 온도관리	실시간 모니터링	데이터 로깅	ASEAN·EU 공통 규정

먼저, 전냉고(pre-chiller)는 어획 직후 어체를 빠르게 4℃까지 떨어뜨려 부패를 억제하고 미생물 증식을 방지하는 역할을 수행한다. 특히 참다랑어·방어와 같이 체온이 급격히 상승하는 대형 어류는 초기냉각 속도가 품질을 좌우하는 핵심 요소이므로, 2시간 이내 목표 온도 도달은 일본·중국 등 주요 수산 선진국이 공통으로 적용하는 관리 기준이다.

다음 단계인 급속냉동고(blast freezer)는 참다랑어 고급 횡감 유통에 필수적인 시설로, -40~-50℃의 온도 범위에서 24~48시간 동안 신속하게 어체를 냉동시켜 세포 조직 손상을 최소화한다. 붉은살 생선의 색변(갈변)을 방지하고 선도 유지 효과가 크기 때문에, 일본 수산물 유통 체계에서도 참다랑어 품질 확보를 위한 핵심 공정으로 분류된다.

터널 냉동고(tunnel freezer)는 대량의 어류를 연속 처리할 수 있는 산업용 냉동 시스템으로, -40°C 이하의 저온을 일정하게 유지하면서 자동화 처리량을 극대화하는 데 적합하다. 에너지 효율성과 생산성을 동시에 확보할 수 있어, 선진국에서는 대규모 어항이나 가공단지에서 필수 설비로 운영되고 있다.

장기 보관을 위해서는 초저온저장고(-50°C 이하)가 필요하다. 이 시설은 온도 변동폭을 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 수준으로 엄격하게 관리하여, 장기간 보관 시에도 수율 감소와 품질 저하를 최소화한다. 초저온저장 및 전 구간 온도 데이터 로깅(모니터링·이탈 알람)은 프리미엄 수산물의 품질·안전·추적성을 좌우하는 핵심 요소로, 지역/국제 가이드 라인에서도 콜드체인 관리체계(기록·추적)를 강조한다(SEAFDEC/MFRD, 2019; Mustafa et al., 2024). 또한 IoT 기반 센서·무선망을 활용한 온습도 모니터링은 공급망 위험(이탈·품질 저하)을 조기에 탐지하는 기술로 제안된다(Prasinou et al., 2025).

종합하면, 전냉고·급속냉동·터널냉동·초저온저장·IoT 관리로 이어지는 콜드체인 시스템은 방어·참다랑어 산업화를 위한 기본 인프라이며, 국제 시장 진출과 지역 내 고부가가치 창출을 위해 반드시 구축해야 하는 필수 기술 체계라 할 수 있다.

국제적으로 방어·참다랑어 산업은 ① 초저온 유통기술, ② 자동화 가공·선별, ③ 고도화된 양식기술, ④ 어항 기반 클러스터 운영, ⑤ 제도적 유연성이라는 공통 요소를 기반으로 발전해왔다. 이러한 요소는 기후변화로 난류성 어종 출현이 증가하고 있는 강원특별자치도의 산업화 전략 구상에 매우 유의미한 시사점을 제공한다.

본 장은 일본·스페인 등 국외 사례를 중심으로 방어·참다랑어 산업화의 구조와 시사점을 정리한 기초 분석 단계이다. 따라서 이를 강원특별자치도의 여건에 맞는 실질적 산업화 모델로 구체화하기 위해서는 후속 연구가 필수적이다. 우선 방어와 참다랑어를 대상으로 생산·유통·가공·판매로 이어지는 전주기적 가치사슬(Value

Chain)을 체계적으로 분석하고, 사업성·수익성·리스크를 포함한 경제성 평가가 함께 수행될 필요가 있다. 또한 강릉·속초·동해·삼척 등 어항 단위로 현재 인프라 수준과 확장 가능성을 진단하여, 어느 거점에 무엇을 우선 구축할지에 대한 우선 순위와 단계적 추진 전략을 마련해야 한다. 특히 프리미엄 시장 진입을 위해 요구되는 초저온 콜드체인은 초기 투자비와 운영비가 큰 만큼, 구축 비용 대비 품질 개선·가격 프리미엄·수출 경쟁력 제고 효과를 정량적으로 분석하고, 현실적인 투자·운영 모델을 설계하는 연구가 필요하다. 나아가 브랜드화 및 수출 확대를 위해 목표 시장의 수요 구조, 품질·인증 요구, 경쟁국 동향 등을 포함한 국제 시장 분석도 병행되어야 한다.

마지막으로 기후변화가 어종 분포와 어장 형성 시기를 변화시키는 점을 고려하여, 기후변화 시나리오 기반 어종 분포 예측(Valavi et al., 2023; van Steenderen et al., 2024)과 이를 바탕으로 한 산업화 적기(時期) 분석을 수행함으로써 중장기 전략의 불확실성을 줄일 필요가 있다.

결론적으로, 본 장에서 제시한 국제 사례는 강원특별자치도의 방어·참다랑어 산업화 방향을 모색하는 데 유용한 참고가 될 수 있으나, 실제 실행전략으로 전환하기 위해서는 위와 같은 후속 연구를 종합적으로 수행하여 정책·투자·운영의 근거를 정교화할 필요가 있다.



참고 문헌

- Bahri, T., et al, (2021). Adaptive management of fisheries in response to climate change: FAO fisheries and aquaculture technical paper No. 667 (Vol. 667). Food & Agriculture Org..
- European Commission. (2024). Commission Staff Working Document: Implementing the Strategic Guidelines for EU aquaculture – Regulatory and administrative framework for aquaculture. SWD(2024) 95 final (Brussels, 16 April 2024).
- Faulwetter, S., et al. (2025). Large-scale analysis of environmental and ecological impacts of marine finfish aquaculture in the Aegean and Ionian Sea (Eastern Mediterranean). *Science of the Total Environment*, 956, 178060.
- Golden, A. S., et al. (2024). Enhancing the adaptive capacity of fisheries to climate change: Bridging academic theory and management practice through practitioner interviews. *Marine Policy*, 168, 106321.
- Jiang, Q., et al (2022). Effects of frozen storage temperature on the quality and oxidative stability of bigeye tuna flesh after light salting. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 3069–3077.
- Kritzer, J. P., Costello, C., Mangin, T., & Smith, S. L. (2019). Responsive harvest control rules provide inherent resilience to adverse effects of climate change and scientific uncertainty. *ICES Journal of Marine Science*, 76(6), 1424–1435.
- Memarzadeh, M., Britten, G. L., Worm, B., & Boettiger, C. (2019). Rebuilding

global fisheries under uncertainty. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(32), 15985-15990.

Meyer, B., & Emam, W. (2024). Welfare implications of closed-cycle farming of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*). *Frontiers in Animal Science*, 5, 1445306.

Mustafa, M. F. M. S., Navaranjan, N., & Demirovic, A. (2024). Food cold chain logistics and management: A review... *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101343.

Nakazawa, N. et al. (2020). Effects of ultra-low temperature storage on myoglobin stability and lipid oxidation of skipjack tuna meat. *International Journal of Refrigeration*, 114, 52-60.

Prasinos, E. et al. (2025). IoT services for monitoring food supply chains. *Applied Sciences*, 15(14), 8019.

Valavi, R., Elith, J., Lahoz-Monfort, J. J., & Guillera-Arroita, G. (2023). Flexible species distribution modelling methods perform well on spatially separated testing data. *Global Ecology and Biogeography*, 32(3), 369-383.

Van Steenderen, C. J., & Sutton, G. F. (2024). Climate covariate selection influences MaxEnt model predictions and predictive accuracy under current and future climates. *Ecological Modelling*, 498, 110872.

Wang, J. et al. (2022). Effects of frozen storage temperature on water-holding capacity and physicochemical properties of bluefin tuna. *Foods*, 11(15), 2315.



연구책임 | 권 순 만

정책연구 2025

기후변화에 따른 동해 수산자원(방어, 참다랑어 등)
어장 분포 진단과 미래 예측 및 이용 방안

- * 인 쇄 _ 2025년 12월
- * 발 행 _ 2025년 12월
- * 발 행 인 _ 최병수
- * 발 행 처 _ 한국기후변화연구원
- * 주 소 _ 24239 강원도 춘천시 수변공원길 11
- * 홈페이지 _ www.kric.re.kr

