

해양수산정보 공동활용체계

미래예측모델 개발결과보고서



해양수산부

목 차

I. 개요	1
II. 과업 목표 및 내용	1
2.1. 과업 목표	1
2.2. 과업 내용	1
III. 예측정보 생산	3
3.1. 모델 개요	3
3.2. 예측모델 구축	13
3.3. 예측모델 검토	19

표 목차

<표-1> CMIP6 참여기관 목록	5
<표-2> 예측모델 수립 개요	13
<표-3> 담수유입 입력자료 정보	18
<표-4> 수온결과 검토 개요	19
<표-5> 수온결과 재현성 평가	21
<표-6> 수온결과 검토 개요	24
<표-7> 특보구역별 수온 상승변화	25

그림 목차

<그림-1> 모델 수행 프로세스	2
<그림-2> 기후변화 시나리오 프로젝트 추진 흐름도	3
<그림-3> 기후변화 시나리오 예측모델 공유 흐름도	4
<그림-4> MOHID 모델 계산 모듈 개요도	6
<그림-5> MOHID 수평·수직격자 체계도	7
<그림-6> MOHID 물질이동 모듈의 계산흐름도	10
<그림-7> 예측모델 수행 흐름도	14
<그림-8> 해양모델 격자망 및 입력수심	15
<그림-9> CMIP6 MRI Atmosphere Model 자료구조 예	16
<그림-10> CMIP6 MRI Ocean Model 자료구조 예	17
<그림-11> CMIP6 MRI Ocean Model 표층 데이터 가시화 예	17
<그림-12> 수온검증 정점도	20
<그림-13> 수온 시계열 비교	21
<그림-14> 예측모델 2015년 수온분포도 예	23
<그림-15> 수온상승 비교 정점도	25
<그림-16> 2015-2050년 월별 수온분포도 예	29
<그림-17> 2015-2050년 수온분포도	35

I. 개요

- 요구사항 명칭 : 미래예측 시나리오 기반 예측정보 생산
- 수행목적
 - CMIP6 기후변화 시나리오(SSP5-8.5)에 따른 전지구 예측모델 결과를 기반으로 한 지역상세화 예측모델 수립
 - 기후변화 시나리오 기반 예측모델 결과를 통한 월별/연도별 수온 변화 자료 제공

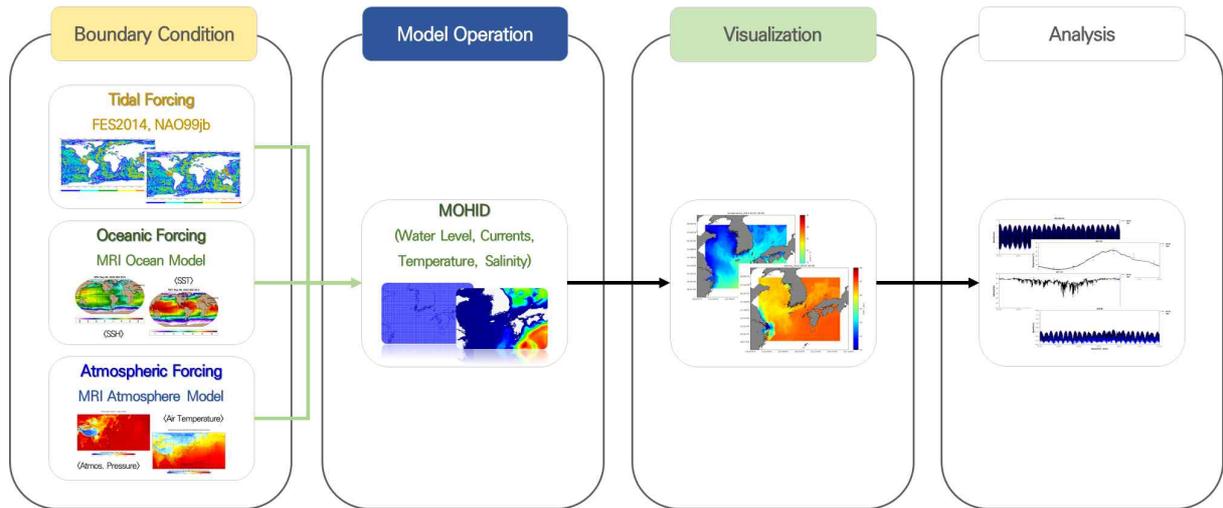
II. 과업 목표 및 내용

2.1. 과업 목표

- CMIP6 기후변화 시나리오에 따른 전지구 예측모델 결과를 기반으로 한 지역상세화 예측모델 수립을 통한 월별/연도별 수온 변화 DB 생산 및 제공

2.2. 과업 내용

- CMIP6 기후변화 시나리오(SSP5-8.5) 데이터(해양, 기상)를 수집하고 모델 입력형태로 변환 수행
- 기후변화 시나리오 중 고탄소 시나리오(SSP5-8.5) 기반 초기 및 경계조건 생성 후 모델 수행
- 예측모델의 신뢰성을 확보하기 위해 2015년 수온 관측자료를 이용한 검증 수행



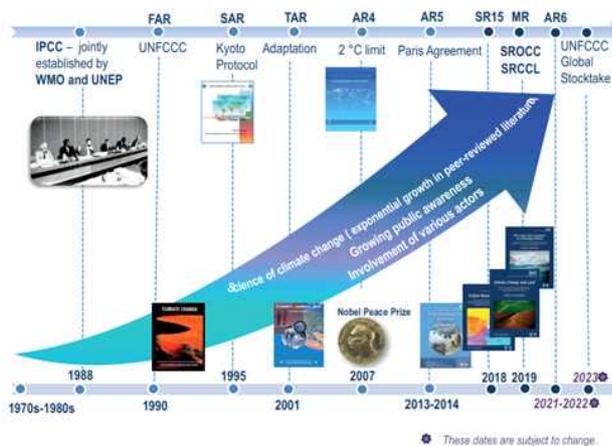
<그림-1> 모델 수행 프로세스

Ⅲ. 예측정보 생산

3.1. 모델 개요

1. IPCC AR6 기후변화 시나리오

- 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)는 기후변화에 대한 이해, 잠재적 영향력 및 원인 규명과 기후변화에 따른 사회경제적 영향 대응전략에 대한 과학적 정보를 제공하기 위해 1990년 제1차 평가 보고서를 시작으로 5~6년 간격으로 평가 보고서를 발간하고 있음(<그림-2>).
- 평가 보고서와 관련하여 산출되는 온실가스 배출량 시나리오는 인구증가, 경제발전, 신기술 개발과 같은 미래의 불확실한 요소들에 관해서 인간이 미래의 기후변화에 얼마나 영향을 미칠 수 있는지를 탐색하는데 이용되며, 이러한 인위적인 온실가스 배출로 인해 발생하는 기후변화의 잠재적 결과를 연구할 목적으로 실현 가능한 미래의 다양한 경로로 제공됨
- 현재 제6차 평가 보고서(AR6)를 작성하고 있으며, 2015년~2022년까지 총 8개의 보고서를 작성하는 것으로 결정하여 진행 중임. 제6차 평가 보고서(AR6)에서는 공통사회경제경로(SSP, Shared Socio-economic Pathways)라 불리는 시나리오를 구성함(기상청, 2020). SSP 시나리오는 제5차 평가 보고서에 사용된 대표농도경로(RCP, Representative Concentration Pathways)와 연계 및 다양한 미래 사회상의 반영을 위해 4종의 표준 SSP 경로(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)를 설정하여, 각 시나리오들이 서로 다른 상황의 미래의 경우에 기후변화로 인해 세계가 얼마나 크고 작은 영향을 받을지 분석하는데 제공됨



<그림-2> 기후변화 시나리오 프로젝트 추진 흐름도

- IPCC 기후변화 시나리오는 세계 기후연구프로그램(WCRP, World Climate Research Programme)의 결합 모델 상호 비교 프로젝트(CMIP, Coupled Model Intercomparison Project)를 통해 산출되며, WCRP의 기후 모델링 워킹 그룹의 기반 시스템 패널(WIP, WGCM Infrastructure Panel)은 CMIP 모델 출력에 대한 이용과 분석을 용이하게 하는 소프트웨어 개발 프로젝트를 지원함
- WIP는 글로벌 데이터 인프라(ESGF, Earth System Grid Federation)에 대한 권고사항을 제공하는데, 이 권고안에 따라 각 모델링 센터는 ESGF 노드를 구축하고 운영하여 CMIP 자료를 공유하고 있음(Lee et al., 2020).
- IPCC 제6차 평가 보고서(AR6)와 관련하여 WCRP 산하 WGCM은 2014년부터 전지구 시나리오 산출 및 비교 평가를 위한 6번째 프로젝트인 CMIP6를 추진하고 있음



<그림-3> 기후변화 시나리오 예측모델 공유 흐름도

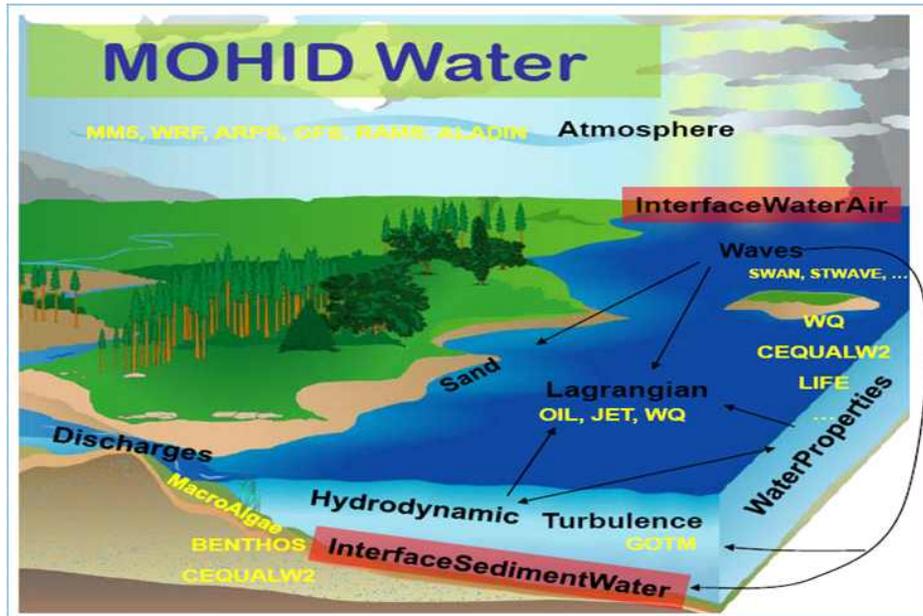
- CMIP6는 전세계 40여개 모델링 센터에서 100개 이상의 모델을 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 예측모델 결과를 산출·제공함
- 산업화 이전인 1850년부터 2100년까지의 기간에 대해 에어로졸, 기상, 육상, 해양, 생물 등 9개 영역에 대하여 예측결과를 제공함

<표-1> CMIP6 참여기관 목록

CMIP6 참여기관 목록					
1. ARE	미국	15. E3SM-Project	미국	29. NCC	노르웨이
2. AS-RCEC	대만	16. EC-Earth- Consortium	유럽	30. NERC	영국
3. AWI	독일	17. ECMWF	영국	31. NIMS-KMA	대한민국
4. BCC	중국	18. FIO-QLNM	중국	32. NIWA	뉴질랜드
5. CAMS	중국	19. HAMMOZ- Consortium	유럽	33. NOAA-GFDL	미국
6. CAS	중국	20. INM	러시아	34. NTU	대만
7. CCCR-IITM	인도	21. IPSL	프랑스	35. NUIST	중국
8. CCCma	캐나다	22. KIOST	대한민국	36. RTE-RRTMGP- Consortium	미국
9. CMCC	이탈리아	23. MIROC	일본	37. RUBISCO	미국
10. CNRM- CERFACS	프랑스	24. MOHC	영국	38. SNU	대한민국
11. CSIRO	호주	25. MPI-M	독일	39. THU	중국
12. CSIRO- ARCCSS	호주	26. MRI	일본	40. UA	미국
13. DKRZ	독일	27. NASS-GISS	미국	41. UHH	독일
14. DWD	독일	28. NCAR	미국		

2. 예측모델

- 해수순환 및 침수·노출시간 평가는 MOHID 모델을 사용하여 수행함. MOHID 모델은 포르투갈 리스본 대학 소속의 IST(Instituto Superior Técnico)의 MARETEC(Marine and Environmental Technology Research Center)에서 1985년부터 개발된 모델로 해양과 호소 등에서 1, 2, 3차원의 적용이 가능한 모델임
- MOHID 모델은 연안과 하구역에 적용할 수 있는 다기능 3차원 수치해석 모델로 기본적으로 조석 및 해일과 같은 연안 및 하구역에서의 물리적 작용을 계산하며, 유체특성(수온, 염분 등), 오일리리안 물질이동, 라그랑지안 물질 이동, 난류(turbulence), 퇴적물의 이동, 침식과 퇴적, 기상 및 파랑조건 고려, 수질 및 생태, 유류확산 등을 계산할 수 있는 60개 이상의 모듈로 구성되어 있으며, 네스팅(nesting) 기법을 적용함으로써 보다 정밀하게 관심지역의 해황을 재현할 수 있는 모델임



<그림-4> MOHID 모델 계산 모듈 개요도

- MOHID 모델은 수평적으로 직교(cartesian) 또는 직교곡선(orthogonal curvilinear)격자체계를 사용하며, 수직적으로 시그마(sigma)좌표계와 Z-level 좌표계를 개별적으로 또는 혼합하여 사용할 수 있는 GVC(General Vertical Coordinate) 시스템의 적용이 가능함. 공간적으로는 유한 체적법(finite volume technique, Martins et al., 1999, 2000)을 사용하며, 시간적으로는 반음해(semi-implicit) ADI(Alternate Direction Implicit) 알고리즘을 사용하여 계산상의 안정성 제약을 최소화함. 또한, 이동경계 처리가 가능하고, 조간대가 넓게 분포한 우리나라의 지형에 필수적인 조간대 처리가 가능한 모델임

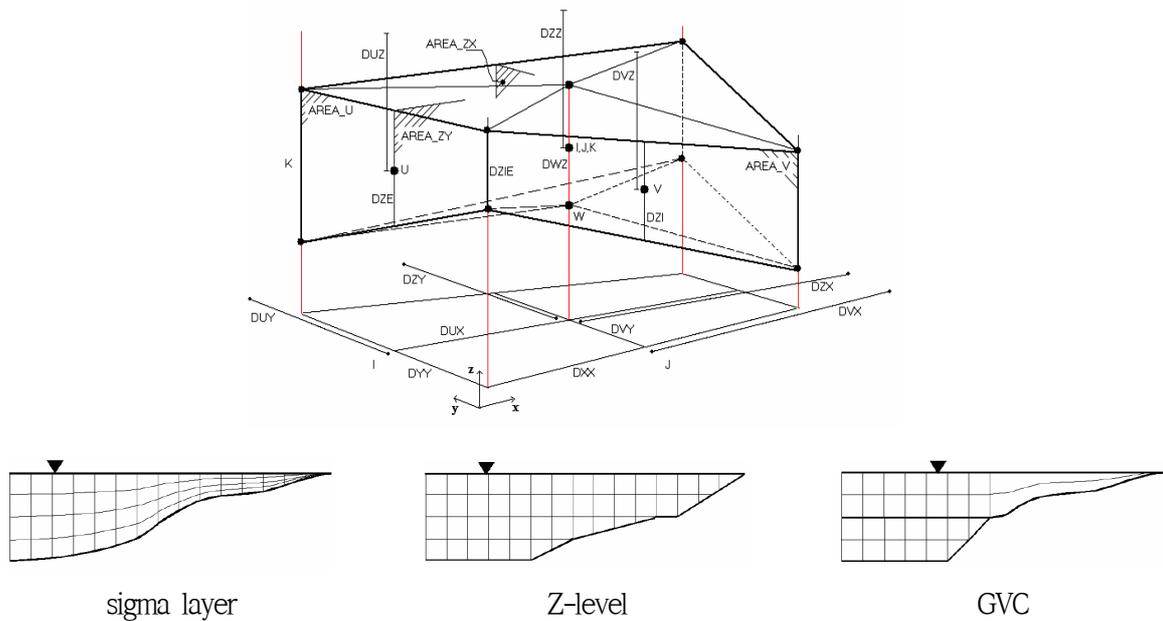
- MOHID 모델은 공간적으로 격자검사체적(cell control volume)을 이용하여 방정식을 차분하는 유한체적법을 사용함(Chippada et al., 1998). 검사체적 Ω 와 생성항 Q 를 가지는 스칼라항 U 에 대한 일반 보존법칙(general conservation law)은 다음과 같음

$$\partial_t \int_{\Omega} U d\Omega + \oint_S \vec{F} d\vec{S} = \int_{\Omega} Q d\Omega$$

여기서, F 는 검사면 S 를 통한 스칼라항의 플럭스(flux)를 의미함. 앞의 식을 차분하여 다음과 같이 Ω_j 와 U_j 를 얻을 수 있음

$$\partial_t (U_j \Omega_j) + \sum_{faces} \vec{F} \cdot \vec{S} = Q_j \Omega_j$$

- 이 방법은 격자구조(cell geometry)와는 독립적으로 방정식을 계산하므로, 물리적 변수들과 격자구조를 분리하여 계산할 수 있음. 이러한 공간 좌표계의 독립성은 어떤 형태의 격자구조도 적용이 가능하므로, 모델은 수평적으로 직교격자나 직교곡선격자체계, 그리고 수직적으로는 GVC 격자체계를 채택함으로써 계산의 효율성을 증대할 수 있음



<그림-5> MOHID 수평·수직격자 체계도

1) 기본 방정식

- MOHID 모델은 현재 다양한 지역에서 연구에 적용되고 있으며, 북대서양의 흐름(Neves et al., 1998; Coelho et al., 2002; Santos et al., 2002)과 유류확산(Leitão, 2003), 만내의 잔류시간과 부영양화, 순환구조에 대한 연구(Cancino & Neves, 1999; Martins, 1999; Villarreal et al., 2002; Braunschweig et al., 2003; Vaz et al., 2007; Saraiva et al., 2007), 연안의 라군(lagoon)에서의 수질연구(Trancoso et al., 2005) 등에 적용된 바 있음. MOHID 모델은 삼차원 비압축성 유체의 이동에 대한 방정식을 계산하며, 정수압 가정은 브시네스크(Boussinesq)와 레이놀드(Reynolds) 근사(approximation)를 가정함. 직교좌표계에서 모델의 x, y 방향의 운동방정식과 연속방정식, 정수압 근사식은 다음과 같이 정의됨

$$\begin{aligned} \partial_t u = & -\partial_x(uu) - \partial_y(uv) - \partial_z(uw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \partial_x p \\ & + \partial_x((v_H + v))\partial_x u + \partial_y((v_H + v))\partial_y u + \partial_z((v_t + v))\partial_z u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial_t v = & -\partial_x(vu) - \partial_y(vv) - \partial_z(vw) - fu - \frac{1}{\rho_0} \partial_y p \\ & + \partial_x((v_H + v))\partial_x v + \partial_y((v_H + v))\partial_y v + \partial_z((v_t + v))\partial_z v \end{aligned}$$

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0$$

$$\partial_z p + g\rho = 0$$

여기서, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향으로의 속도벡터 성분, f 는 코리올리스 파라미터(Coriolis parameter), ν_H, ν_t 는 수평 및 수직 방향에서의 난류점성계수(turbulence viscosity), ν 는 분자동점성계수(molecular kinematic viscosity), p 는 압력이고, g 는 중력가속도이고, ρ 는 밀도를 의미함. 밀도는 UNSECO 상태방정식(UNSECO, 1981)을 사용하여 계산함

- 연속방정식을 저면으로부터 수심 z 까지 적분함으로써 수직 속도(w)를 계산할 수 있음

$$w(z) = \partial_x \int_{-h}^z u dx + \partial_y \int_{-h}^z v dy$$

- 모델에서 자유표면 방정식은 연속방정식을 전 수심(자유표면, $\eta(x,y)$ 에서 저면 $-h$ 까지)에 대하여 적분하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있음

$$\partial_t \eta = -\partial_x \int_{-h}^{\eta} u dz + \partial_y \int_{-h}^{\eta} v dz$$

- 만약, 압력 p 로부터 대기압 p_{atm} 을 추출할 수 있고 밀도로부터 기준밀도 상수 ρ_0 와 밀도의 아노말리(anomaly) ρ' 를 구분할 수 있다면, 정수압 가정식을 자유표면으로부터 수심 z 까지를 적분하여 다음과 같이 압력을 계산할 수 있음

$$p(z) = p_{atm} + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z \eta \rho' dz$$

- 앞의 식과 브시네스크 가정을 적용하여, x_i 방향에서의 수평 압력경도를 다음과 같이 세 가지 요소로 구분 지을 수 있음

$$\partial_{x_i} p = \partial_{x_i} p_{atm} - g\rho_0 \partial_{x_i} \eta - g \int_z \eta \partial_{x_i} \rho' dz$$

- 총압력경도는 대기압의 경도와 순압경도(barotropic pressure gradient), 경압경도(baroclinic pressure gradient)의 합으로 표현됨. 모델에서 공간에 대한 차분은 유한체적법을 사용하며, 시간에 대한 차분은 Arakawa-C Grid Type에 대하여 정의된 ADI(Alternate Direction Implicit) 방법을 적용함. 난류(turbulence)모델은 k- ϵ 모델과 Mellor-Yamada 2차 오더 난류마감모델(turbulent close model)이 기본으로 다음과 같이 다양한 모델을 적용할 수 있음

수평난류 : 상수(constant), Smagorinsky(1963), 유속과 수심의 비

수직난류 : 상수(constant), Nihoul(1984), Leendertse and Liu(1978),

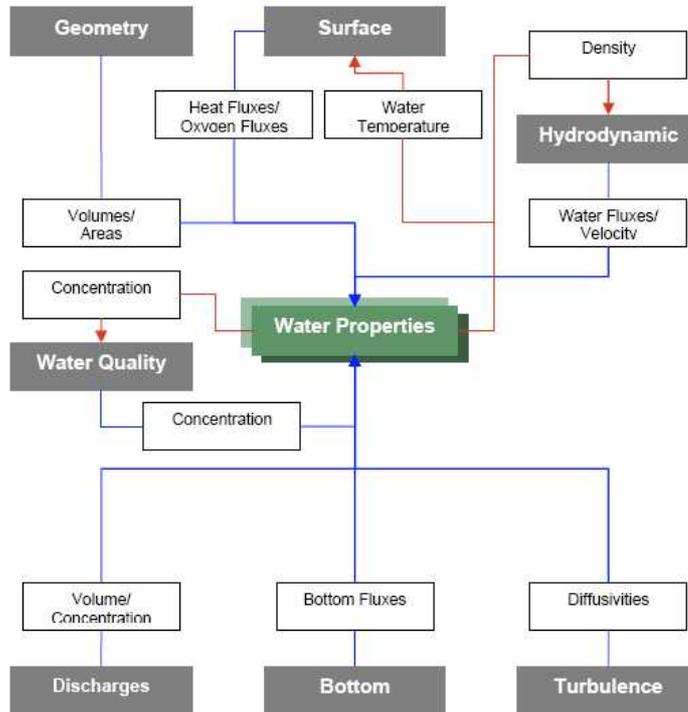
Backhaus and Hainbucher(1987), Pacanowski and

Philander(1981), GOTM(Burchard et al, 1999)

- 모델에서 운동량(Momentum), 물질(mass and heat)의 이동항은 1, 2, 3차 오더의 전방차분법과 중앙차분법 그리고 TVD(Total Variation Diminishing) 방법을 적용하여 계산할 수 있고, 이류(advection)항은 양해, 반음해, 음해법을 사용하여 계산할 수 있음
- 모델에서 물질의 이동은 오일러리안(Eulerian) 방법을 적용하여, 이류 및 확산, 하천 혹은 인위적인 유량, 해저면(sediment fluxes) 및 해수면(heat and oxygen fluxes) 물질 교환, 입자성 물질의 침강 및 내부의 물질 생성 소멸(water quality)에 의한 물질의 이동을 계산하며, 수온, 염분, 부유물질, 수질(용존산소, 플랑크톤, 인, 질소, 규소 등)을 모의할 수 있음(<그림-6>).
- 모델에서 이류와 확산에 의한 물리적 수송작용은 모든 수질 상태변수들에 대해 수학적으로 동일한 형태를 취함. 즉, 물리적 수송작용은 수송하는 물질의 성질에 의하여 영향을 받지 않음. 이류 및 확산에 의한 물질의 이동은 다음의 질량보존 방정식을 이용하여 계산함

$$\begin{aligned} \partial_t A = & -\partial_x(uA) - \partial_y(vA) - \partial_z(wA) \\ & + \partial_x(\nu'_H \partial_x A) + \partial_y(\nu'_H \partial_y A) + \partial_z((\nu_t + \nu'_A) \partial_z A) + (Source - Sink) \end{aligned}$$

- 여기서, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향으로의 속도벡터 성분, ν'_H, ν'_t 는 수평 및 수직 방향에서의 난류확산(eddy diffusivity), ν'_A 는 분자확산(molecular diffusivity)임



<그림-6> MOHID 물질이동 모듈의 계산흐름도

- MOHID 모델에서 밀도의 계산은 Leendertsee, UNESCO, Linear, Mellor, Jackett & McDougall의 방법을 선택하여 적용할 수 있으며, 연안에서는 UNESCO(1981) 방법을 추천함

$$\rho = (5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S) / ((1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2) - (3.8 + 0.01T)S + 0.698 + (5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S))$$

2) 경계 조건

- 모델에서 해수면을 가로지르는 이류흐름(advective flux)은 0으로 가정하며, 이 조건에 따라 표층에서의 수직흐름은 다음과 같이 0으로 가정함

$$Wflux|_{surface} = 0$$

- 표층에서 운동량의 확산은 quadratic friction law를 사용하여 계산된 바람응력(wind stress)을 입력하여 고려함

$$\nu \frac{\partial v_H}{\partial z} \Big|_{surface} = \vec{\tau}_w$$

$$\vec{\tau}_w = C_D \rho_a \vec{W} |\vec{W}|$$

- 여기서, C_D 는 응력계수(drag coefficient)로 풍속의 함수이며, ρ_a 는 대기밀도, W 는 해면상 10m 높이에서의 풍속임. 모델 내의 응력계수(drag coefficient)는 Large and Pond(1981)의 식에 의해 다음과 같이 계산됨

$$C_D = 1.14e^{-3} \quad (W < 10m/s)$$

$$C_D = 4.4e^{-4} + 6.5e^{-5} \vec{W} |\vec{W}| \quad (10m/s < W < 26m/s)$$

- 모델에서 해저면을 가로지르는 이류흐름(advective flux)은 없으며, 운동량의 확산은 다음과 같은 quadratic law를 이용한 non-slip 방법으로 계산된 해저마찰을 고려함

$$v \frac{\partial v_H}{\partial z} \Big|_{bottom} = C_D v_H |v_H|$$

여기서, C_D 는 바닥응력계수(bottom drag coefficient)로 다음과 같음

$$C_D = \left(\frac{\kappa}{\log \left(\frac{z + z_o^b}{z_o^b} \right)} \right)^2$$

여기서, κ 는 von Karman 상수이며, z_o^b 는 조도계수(bottom roughness length)임

모델에서 육지를 가로지르는 흐름은 없으며, 개방경계에서 조위, 유속 등을 부여할 수 있으며 Baroclinic radiation 경계조건은 Orlansky, Constant, Oey & Chen의 방법을 적용할 수 있음

- 해수면에서 열속(heat flux)은 단파복사(solar shortwave radiation), 대기장파복사(air longwave radiation), 해수장파복사(water longwave radiation), 현열속(sensible heat flux) 및 잠열속(latent heat flux)으로 나눌 수 있으며, 이러한 열속은 복사방법에 따라 복사열속(단파복사, 대기 장파복사, 해수 장파복사)과 비복사열속(현열속, 잠열속), 수온에 독립적인 열속(단파복사, 대기 장파복사)과 수온의 함수인 열속(해수 장파복사, 현열속, 잠열속)으로 구분할 수 있음
- 단파복사(solar shortwave radiation, Q)의 계산식은 다음과 같음

$$Q = Q_o A_t (1 - 0.65 C_n^2) (1 - R_s)$$

여기서, Q_o 는 대기 표층에서 태양단파복사(W/m^2), A_t 는 대기투과 계수, C_n 은 운량, R_s 는 알베도(albedo)임. 대기 표층에서의 태양단파복사 Q_o 는 다음과 같이 정의됨

$$Q_o = \frac{I_o}{r^2} \text{senz}$$

여기서, I_o 는 태양상수($1353 W/m^2$, Brock(1981)), r 은 동경벡터(radius vector), z 는 태양고도(solar

height)임. 동경벡터 r 은 다음과 같이 계산할 수 있음(Nicolls & Child, 1979).

$$r = 1.0 + 0.017 \cos\left[2\pi \frac{(186 - d)}{365}\right]$$

여기서, d 는 Julian day임

- 장파복사(longwave radiation flux)는 Stefan-Boltzman law을 사용함

$$R_{br} = \epsilon^* \sigma^* (273.15 + T_w)^4$$

여기서, ϵ 는 물의 복사능(=0.97, emissivity of water)이며, T_w 는 수온, σ 는 Stefan-Boltzman상수 ($5.669 \times 10^{-08} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$)임

- 잠열속(latent heat flux)은 증발열의 양으로 표현되며, 모델은 다음과 같이 Dalton's law를 사용함

$$H_L = (19.0 + 0.95 U_w^2) * (e_{s,w} - r_h * e_{s,a})$$

여기서, $e_{s,w}$ 은 물의 포화압력(water pressure of saturation, mmHg), r_h 는 상대습도(relative humidity), $e_{s,a}$ 는 대기의 포화압력(air pressure of saturation)임

- 모델에서 대기와 해양의 온도차에 따른 현열속(sensible heat flux)은 다음과 같이 Bowen's law를 사용하여 계산함

$$H_s = C_b (19.0 + 0.95 U_w^2) * (T_w - T_a)$$

여기서, C_b 는 Bowen의 상수(0.47mmHg/K), U_w 는 해면 10m 상공에서의 풍속, T_w 는 수온, T_a 는 대기온도(K)임

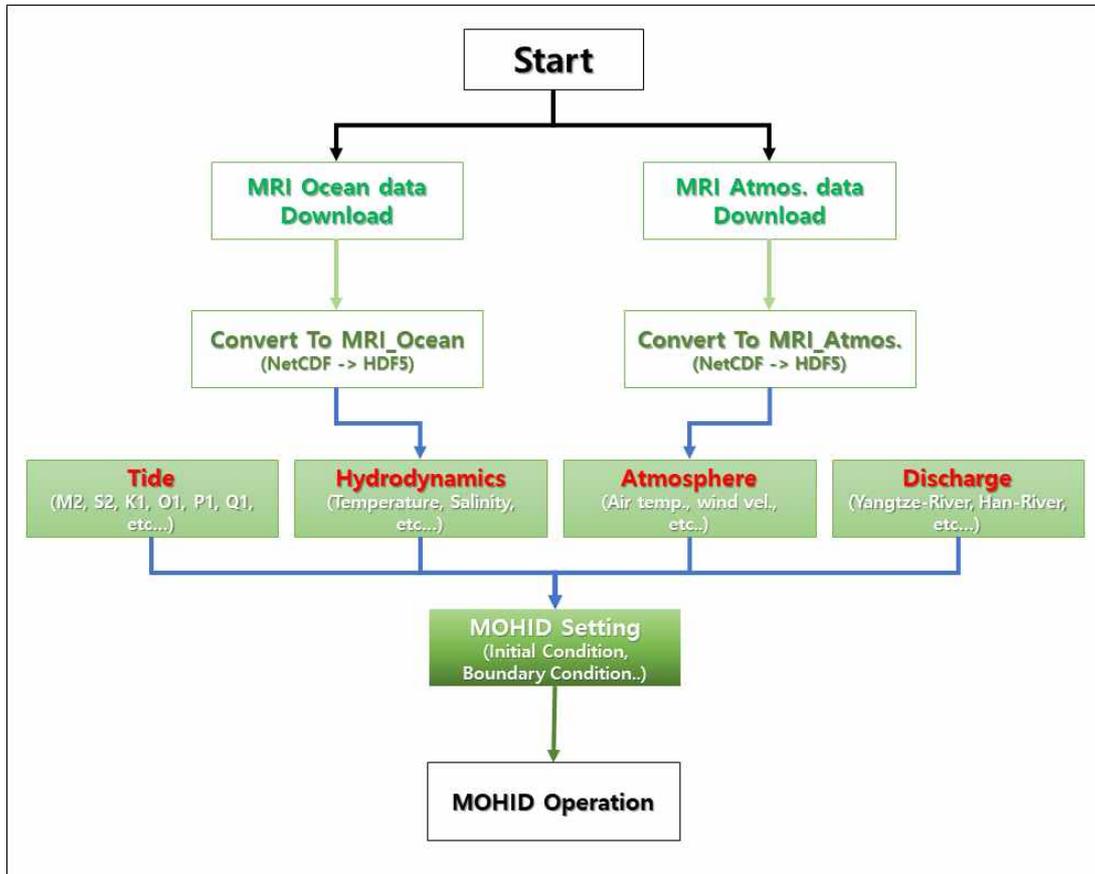
3.2. 예측모델 구축

1. 수립 개요

- IPCC AR6 기후변화 시나리오에 따른 전지구 예측모델 결과를 기반으로 한 지역상세화 예측 모델을 수립하고 수행하였으며, 예측모델 수립 개요를 <표-2>에 제시함

<표-2> 예측모델 수립 개요

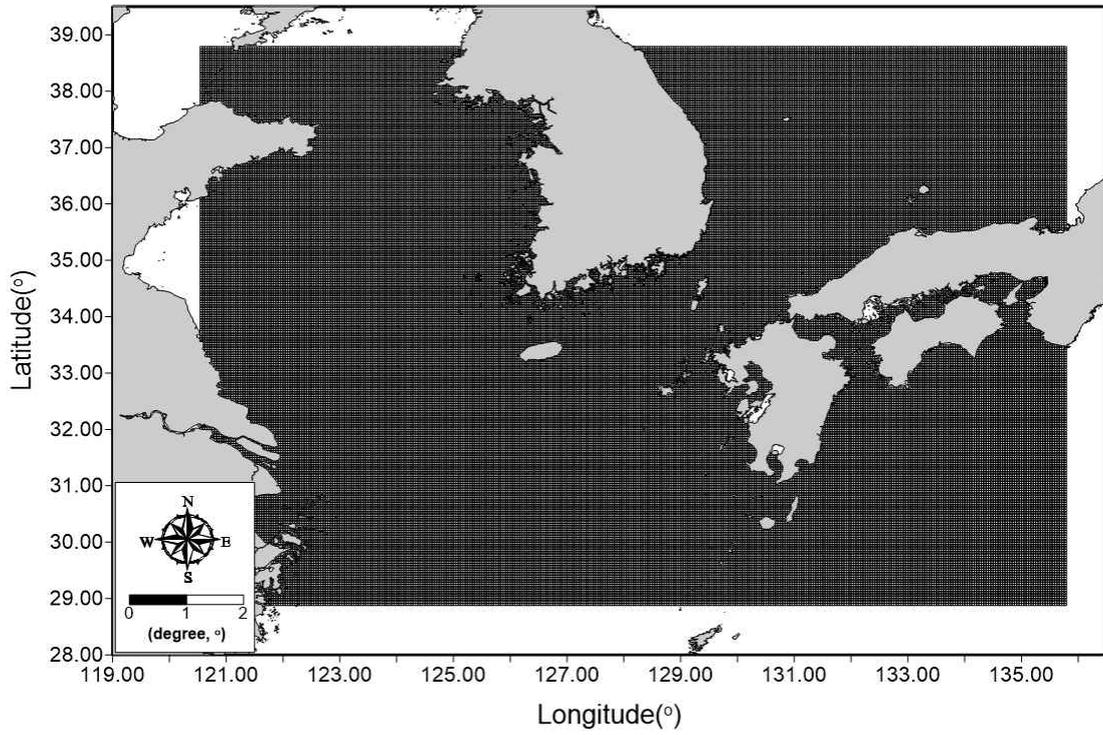
항 목		설 명
수립목적		- IPCC AR6 기후변화 시나리오(SSP)에 따른 전지구 예측모델 결과를 기반으로 한 지역상세화 예측모델 수립
사용모델		- MOHID(Modelo Hidrodinamico, by Tech. Univ. of Lisbon, Portugal) 모델
기후변화 시나리오		- 적용 시나리오 : SSP5-8.5 - 제공기관 : MRI(Meteorological Research Institute, Japan) - 수직해상도 - 기상 : 80층 / 해양 : 61층
모델구성	계산영역	- 위도 : 28.7°N ~ 39.0°N - 경도 : 120.3°E ~ 136.0°E
	격자해상도	- 수평 : 1/24°(약 4.6 km) - 수직 : 33층
입력조건	조석	- 16개 분조 합성조석(M2, S2, K1, O1, P1, N2, K2, Q1, T2, L2, 2N2, NU2, OO1, J1, MU2, Sa)
	해양	- MRI Ocean Model(수온, 염분, 수위, 해류)
	기상	- MRI Atmosphere Model(풍속, 기압, 기온, 열속 등)
	하천유량	- 양자강, 황허, 한강, 임진강, 금강, 영산강, 섬진강, 낙동강, 예성강
	계산간격	- 60초
	모의기간	- 현재상황 : 2014년 1월 1일 ~ 2014년 12월 31일(1년) - 미래예측 : 2015년 1월 1일 ~ 2050년 12월 31일(35년)
생산자료		- 수온(Temperature)
생산주기		- 1시간 간격 / UTC
좌표계		- WGS 84(EPGS: 4326)



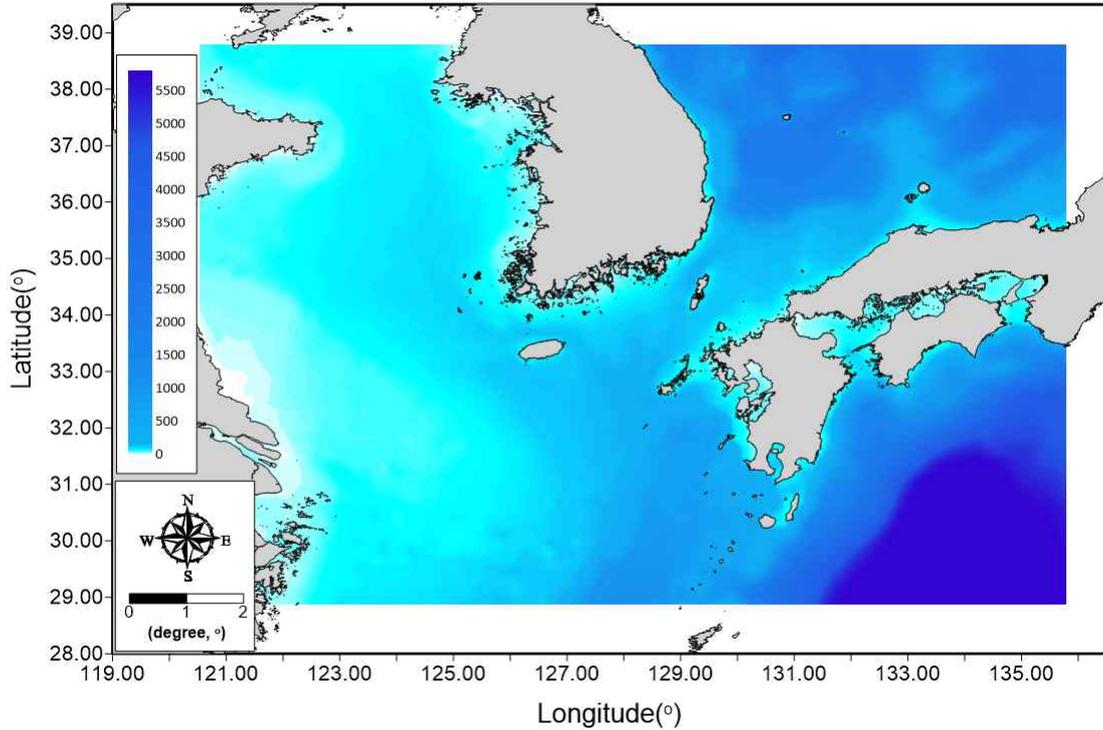
<그림-7> 예측모델 수행 흐름도

1) 격자망 및 입력수심

- 계산에 사용된 격자수는 수평적으로 87,108개(366×238)이고, 격자간격은 X, Y 방향 모두에 대해 1/24° 해상도의 정방격자로 구성하였으며, 수심은 국립해양조사원에서 간행된 해도 및 이용 가능한 수심자료를 이용하여 입력함



(a) Grid



(b) Depth

<그림-8> 해양모델 격자망 및 입력수심

2) 기후변화 시나리오 기반 예측모델

- CMIP6는 전세계 40여개 모델링 센터에서 100개 이상의 모델을 이용하여 기후변화 시나리오에 따른 예측모델 결과를 산출·제공함
- 산업화 이전인 1850년부터 2100년까지의 기간에 대해 에어로졸, 기상, 육상, 해양, 생물 등 9개 영역에 대하여 예측결과를 제공함
- 전지구 과거기후 및 미래 시나리오 예측결과의 자료제공 시간 간격은 3시간, 6시간, 일평균, 월평균으로 제공함
- CMIP6 예측모델 중 MRI(Meteorological Research Institute, Japan) 자료를 선정하여 초기 및 경계조건으로 적용함
- CMIP6 MRI Atmosphere Model의 입력자료는 26개로 구성되어 있으며, CMIP6 MRI Ocean Model의 입력자료는 12개로 구성되어 있음
- 제공되는 예측결과 중 기상 예측결과는 일평균의 시간 해상도를 가지며, 해양 예측결과는 월 평균 간격의 시간 해상도를 가짐. 공간적으로는 기상 및 해양예측결과 모두 100km의 공간해상도를 가짐

CMIP_NC_AR_ATMOS_20150101.nc	CMIP_NC_AR_ATMOS_20150101.nc
GLW	Surface Downwelling Longwave Radiation
height	height
HFX	Surface Upward Sensible Heat Flux
HGT	HGT
LH	Surface Upward Latent Heat Flux
LU_INDEX	LU INDEX
OLR	Surface Upwelling Longwave Radiation
PSFC	Surface Air Pressure
Q2	Near-Surface Relative Humidity
SLP	Sea Level Pressure
SST	Near-Surface Air Temperature
SWDOWN	Surface Downwelling Shortwave Radiation
T2	Near-Surface Air Temperature
time	time
Times	Times
U10	Eastward Near-Surface Wind
V10	Northward Near-Surface Wind
x	Longitude
x_stag	x stag
XLAT	XLAT
XLAT_U	XLAT U
XLONG	XLONG
XLONG_U	XLONG U
XTIME	XTIME
y	Latitude
ZLONG_U	ZLONG U

```

float OLR(time=01, y=41, x=97):
  :FillValue = 1.0E20; // float
  :standard_name = "surface_downwelling_longwave_flux_in_air";
  :long_name = "Surface Downwelling Longwave Radiation";
  :comment = "The surface called 'surface' means the lower boundary of the atmosphere. 'longwave' means l
  :units = "W m^-2";
  :original_name = "DLWB";
  :cell_methods = "area: time: mean";
  :cell_measures = "area: areacella";
  :history = "2019-05-26T05:23:41Z altered by CMOR: replaced missing value flag (-9.99e+33) with standard mis
  :chunkSizes = 1, 160, 320; // int
  :timestep = "1";
  :coordinates = "height";
  :missing_value = 1.0E20; // float

float OLR(time=01, y=41, x=97):
  :FillValue = 1.0E20; // float
  :standard_name = "surface_upwelling_longwave_flux_in_air";
  :long_name = "Surface Upwelling Longwave Radiation";
  :comment = "The surface called 'surface' means the lower boundary of the atmosphere. 'longwave' means l
  :units = "W m^-2";
  :original_name = "ULWB";
  :cell_methods = "area: time: mean";
  :cell_measures = "area: areacella";
  :history = "2019-05-26T05:32:02Z altered by CMOR: replaced missing value flag (-9.99e+33) with standard mis
  :chunkSizes = 1, 160, 320; // int
  :timestep = "1";
  :coordinates = "height";
  :missing_value = 1.0E20; // float

float SWDOWN(time=01, y=41, x=97):
  :FillValue = 1.0E20; // float
  :standard_name = "surface_downwelling_shortwave_flux_in_air";
  :long_name = "Surface Downwelling Shortwave Radiation";
  :comment = "Surface solar irradiance for UV calculations.";
  :units = "W m^-2";
  :original_name = "DSWB";
  :cell_methods = "area: time: mean";
  :cell_measures = "area: areacella";
  :history = "2019-05-26T05:40:34Z altered by CMOR: replaced missing value flag (-9.99e+33) with standard mis
  
```

<그림-9> CMIP6 MRI Atmosphere Model 자료구조 예

CMIP_NCAR_OCEAN_20150116.nc	CMIP_NCAR_OCEAN_20150116.nc
Depth	Depth
Latitude	latitude
Longitude	longitude
MT	MT
salinity	Sea Water Salinity
ssh	Sea Surface Height Above Geoid
temperature	Sea Water Potential Temperature
time	time
u	Sea Water X Velocity
v	Sea Water Y Velocity
X	x coordinate of projection
Y	y coordinate of projection

```

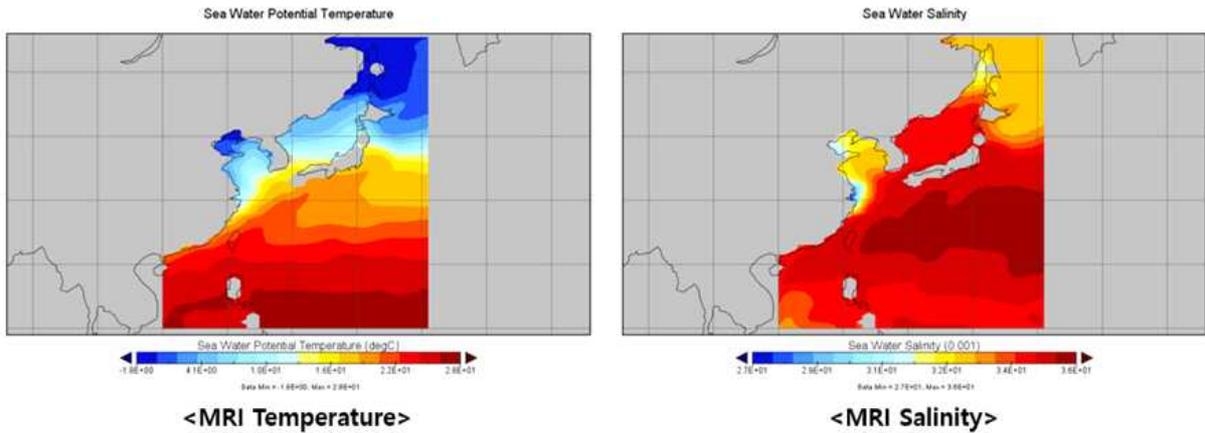
float temperature(time=1, Depth=61, Y=92, X=42);
:FillValue = 1.0E20; // float
:standard_name = "sea_water_potential_temperature";
:long_name = "Sea Water Potential Temperature";
:comment = "Diagnostic should be contributed even for models using conservative temperature as prognostic t";
:units = "degC";
:cell_methods = "area: mean where sea time: mean";
:cell_measures = "area: areacello volume: volcello";
:history = "2019-12-09T11:09:52Z altered by CMOR: replaced missing value flag (-9.99e+33) and corresponding";
:_ChunkSizes = 1, 21, 182, 180; // int
:coordinates = "latitude longitude";
:missing_value = 1.0E20; // float

float salinity(time=1, Depth=61, Y=92, X=42);
:FillValue = 1.0E20; // float
:standard_name = "sea_water_salinity";
:long_name = "Sea Water Salinity";
:comment = "Sea water salinity is the salt content of sea water, often on the Practical Salinity Scale of 1";
:units = "0.001";
:cell_methods = "area: mean where sea time: mean";
:cell_measures = "area: areacello volume: volcello";
:history = "2019-12-09T11:09:52Z altered by CMOR: replaced missing value flag (-9.99e+33) and corresponding";
:_ChunkSizes = 1, 21, 182, 180; // int
:coordinates = "latitude longitude";
:missing_value = 1.0E20; // float

float u(time=1, Depth=61, Y=92, X=42);
:FillValue = 1.0E20; // float
:standard_name = "sea_water_u_velocity";
:long_name = "Sea Water X Velocity";
:comment = "Prognostic x-wind velocity component resolved by the model.";
:units = "m s-1";
:cell_methods = "time: mean";
:history = "2019-12-09T14:15:32Z altered by CMOR: replaced missing value flag (-9.99e+33) and corresponding";
:_ChunkSizes = 1, 21, 181, 180; // int
:coordinates = "latitude longitude";
:missing_value = 1.0E20; // float

float v(time=1, Depth=61, Y=92, X=42);
:FillValue = 1.0E20; // float
    
```

<그림-10> CMIP6 MRI Ocean Model 자료구조 예



<그림-11> CMIP6 MRI Ocean Model 표층 데이터 가시화 예

2. 초기 및 경계조건

1. 초기조건

- 해수유동을 재현하기 위한 초기조건은 해수유동 및 해수면의 차이가 없는 것(Cold Start)으로 설정함. 해수유동의 폐경계조건(close boundary condition)은 육지 경계면을 가로지르는 흐름은 없는 것으로 설정하였고, 모델의 해저면을 가로지르는 이류 흐름(advective flux)은 없는 것으로 설정함
- 수온과 염분의 초기조건은 CMIP6 MRI Ocean Model의 기후변화 시나리오 예측자료를 공간적으로 입력함
- 기상 초기조건은 CMIP6 MRI Atmosphere Model의 기후변화 시나리오 예측자료를 공간적으로 입력함

2. 경계조건

- 조석조건으로 FES2014(Finite Element Solution)의 조석자료를 비교·분석하여 추출한 주요 16개 분조(M2, S2, K1, O1, Q1, P1, N2, K2, 2N2, MU2, NU2, L2, T2, J1, OO1, Sa)의 조화상수를 개방 경계에 입력함
- 수온과 염분의 경계조건은 1개월 간격으로 제공하는 CMIP6 MRI Ocean Model의 기후변화 시나리오 예측자료를 사용함
- 기상 개방경계 조건은 CMIP6 MRI Atmosphere Model의 1일 간격 기상예측결과(기온, 기압, 풍속, 풍향, 열속 등)를 공간적으로 입력함

3. 하천유량조건

- 예측모델의 담수유입은 총 9개의 하천(양자강, 황허, 한강, 임진강, 예성강, 금강, 영산강, 섬진강, 낙동강)의 누년평균 유량자료를 입력함(<표-3>).

<표-3> 담수유입 입력자료 정보

구 분	관측소	수집기간	기관명
한강	한강대교	1999.03.18 ~ 2022.12.31	한강홍수통제소
임진강	비룡대교	2005.01.01 ~ 2022.12.31	한강홍수통제소
금강	금강갑문	2008.01.01 ~ 2022.12.31	물환경정보시스템
영산강	영산강하구언(외)	1997.01.13 ~ 2022.12.31	한국농어촌공사
섬진강	하동군(읍내리)	1999.01.01 ~ 2022.12.31	물환경정보시스템
낙동강	낙동강하굿둑	2010.01.02 ~ 2022.12.31	낙동강홍수통제소
양자강(중국)	Datong	2004.01.01 ~ 2022.12.31	-

3. 모의기간 및 계산시간 간격

- 예측모델의 수행기간은 현재상황에 대하여 2014년 1월 1일부터 2014년 12월 31일까지 1년 간 모의하였으며, 미래예측은 2015년 1월 1일부터 2050년 12월 31일까지 35년간 모의하였음. 모델의 계산시간 간격은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)의 안정조건에 의거하여 수치해의 안정성을 확보할 수 있도록 60초로 예측모델을 수행함
- 계산시간의 효율성을 위해 병렬화(MPI)를 적용하였으며, 1일 예측시간은 CPU(Intel(R) Xeon(R) Gold 6248R CPU @ 3.00GH) 134개 적용 시 약 140분 소요됨

3.3. 예측모델 검토

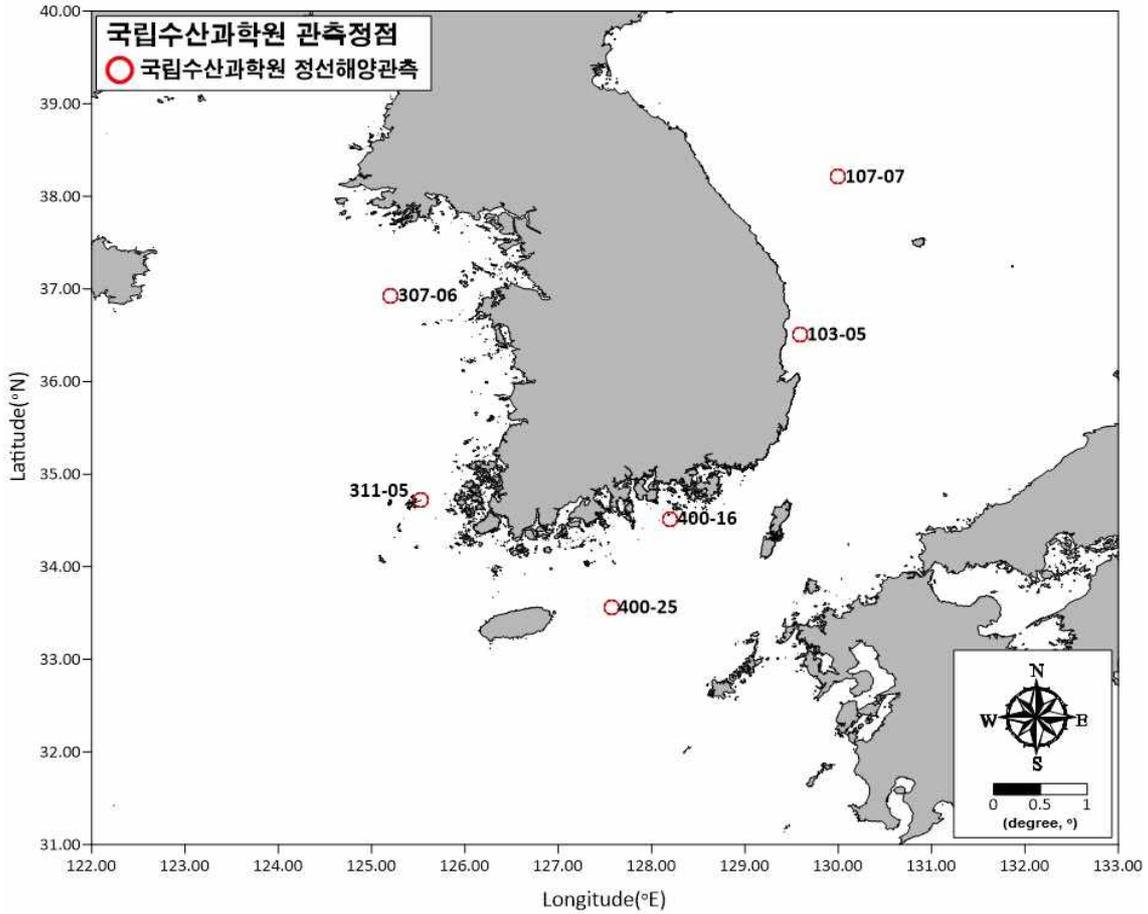
1. 현황검증

- IPCC AR6 기후변화 시나리오(SSP)에 따른 지역상세화 예측모델 수립 및 모델의 신뢰성 검토를 위해 2015년 1월 1일부터 2015년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료(국립수산과학원 정선해양관측정점 6개 정점) 간의 정성검증 및 정량검증을 통해 생산된 결과의 정확도를 검토하였음. 검증에 사용된 모델결과의 시간간격은 1시간 간격, 정선해양관측자료는 연 6회(2월, 4월, 6월, 8월, 10월, 12월) 관측한 자료를 이용함

<표-4> 수온결과 검토 개요

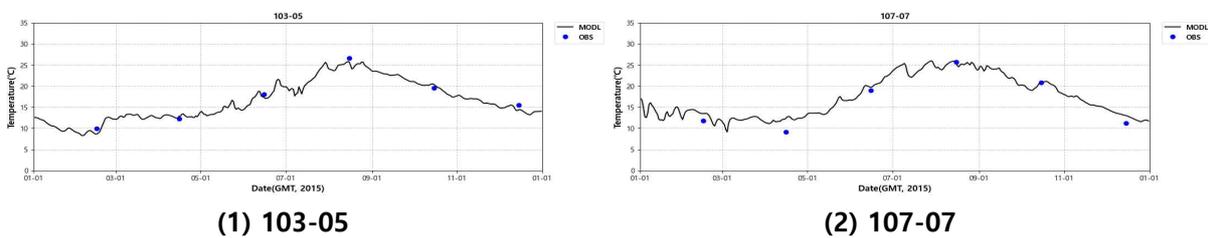
구분	내용
사용모델	MOHID(1/24°)
비교방법	정성검증(시계열 비교), 정량검증(RMSE, R, R ²)
관측자료	국립수산과학원 정선해양관측정점 6개 정점 (103-05, 107-07, 307-06, 311-05, 400-16, 400-25)
기간	2015.01.01 ~ 2015.12.31

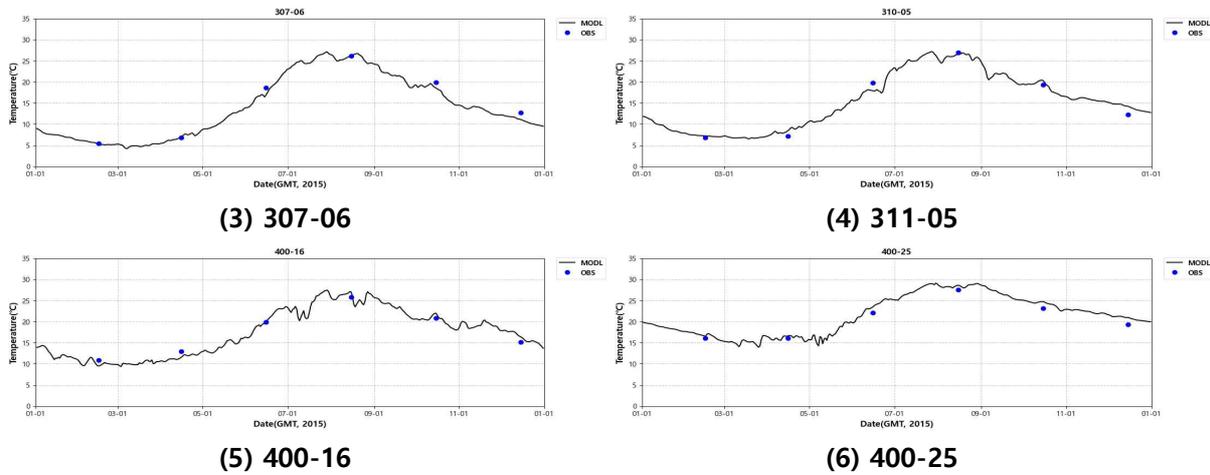
- ※ RMSE : Root Mean Square Error(평균제곱근오차)
- ※ R : Coefficient of correlation(상관계수)
- ※ R2 : Coefficient of determination(결정계수)



<그림-12> 수온검증 정점도

○ IPCC AR6 기후변화 시나리오(SSP)에 따른 지역상세화 예측모델 수립 및 모델의 신뢰성 검토를 위해 2015년 1월 1일부터 2015년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료 간의 수온 시계열 비교를 실시한 결과, 관측치의 경향성을 잘 재현함(<그림-13>).



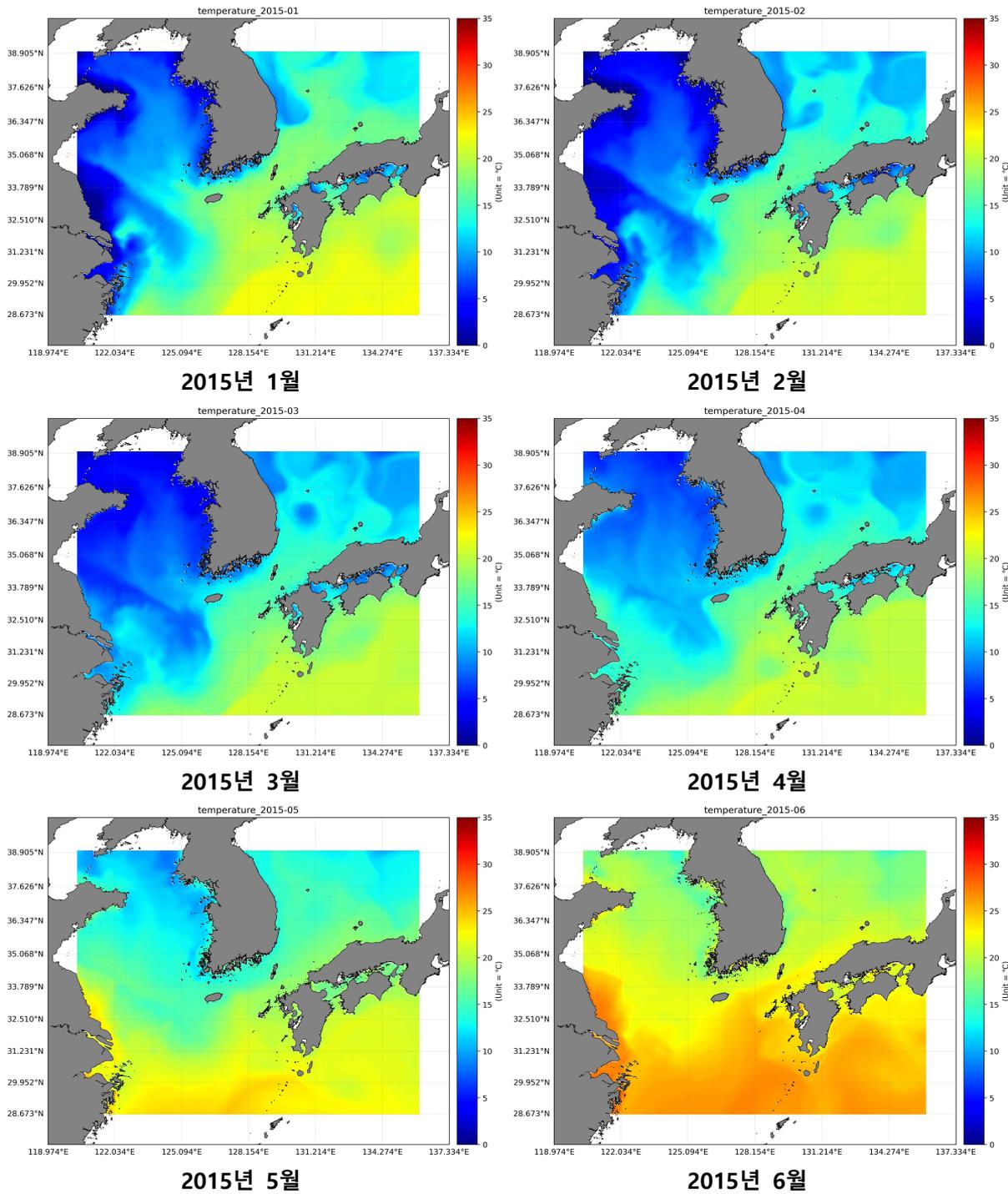


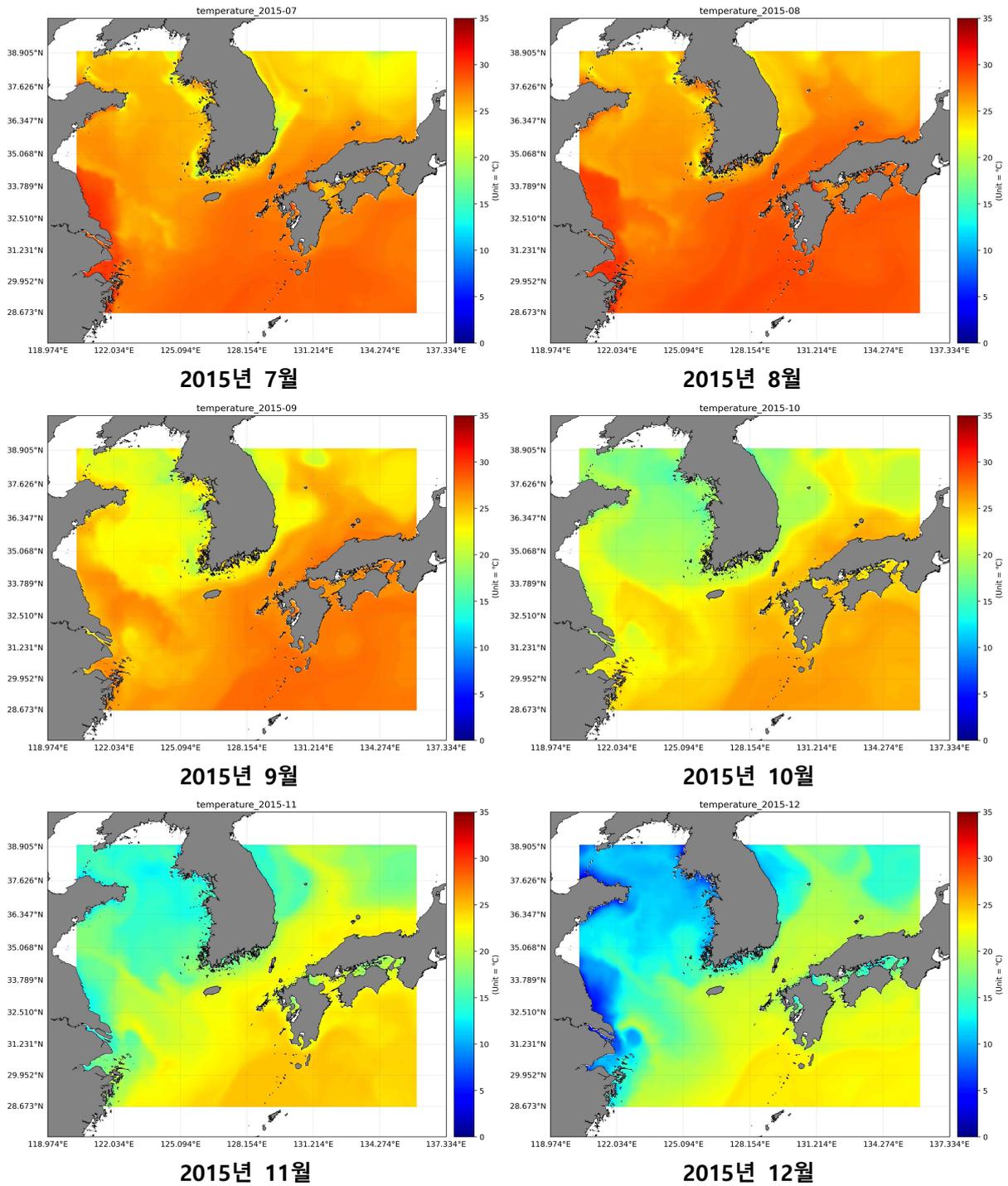
<그림-13> 수온 시계열 비교

○ 모델결과와 관측자료 간의 정량적 비교를 위해 상관계수(R), 결정계수(R²) 및 평균제곱근오차(RMSE)를 계산하고 검토하였음. 모델결과는 일평균, 관측자료는 연 6회(2, 4, 6, 8, 10, 12월) 관측한 자료를 이용함. 국립수산과학원 정선관측정점 6개 정점과 검토한 결과, 전체 정점 수온의 평균 상관계수는 0.99, 결정계수는 0.99, 평균제곱근오차는 1.37°C로 모델결과는 관측치와 높은 상관관계를 나타냄(<표-5>).

<표-5> 수온결과 재현성 평가

관측정점	RMSE(°C)	R	R ²
103-05	0.93	0.99	0.98
107-07	1.67	1.00	0.99
307-06	1.10	0.99	0.99
311-05	2.10	1.00	0.99
400-16	1.16	0.99	0.99
400-25	1.23	1.00	0.99
전체 평균 평균제곱근오차(°C)	1.37		
전체 평균 상관계수	0.99		
전체 평균 결정계수	0.99		





<그림-14> 예측모델 2015년 수온분포도 예

2. 기후변화 시나리오 기반 예측결과

- 구축된 예측시스템을 기반으로 2015년 1월 1일부터 2050년 12월 31일까지 35년간에 대한 기후변화 시나리오 기반 미래예측을 실시하였음. 미래예측은 IPCC AR6 기후변화 시나리오 중 최악의 고탄소 시나리오인 SSP5-8.5 시나리오를 적용하였으며, 2050년까지의 예측결과 중 황해, 동해, 남해, 동중국해에 비교위치를 선정하고 예측모델의 35년간 연평균 예측 수온을 도출한 후 선형회귀 분석방법을 적용하여 2015년 대비 2050년의 수온 상승 값을 산출하였음

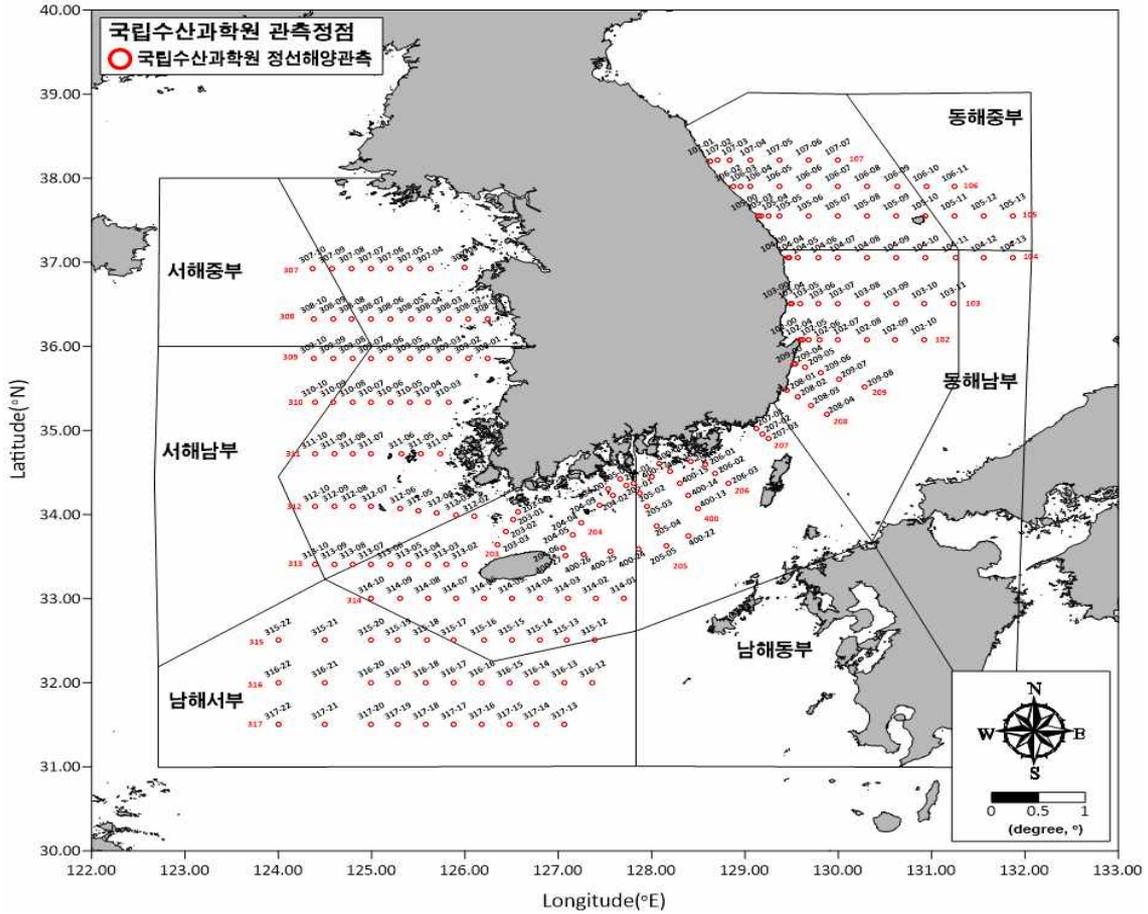
<표-6> 수온결과 검토 개요

구분	내용
시나리오 종류	SSP5-8.5(고탄소 시나리오)
비교방법	시계열 비교
관측자료	국립수산과학원 정선해양관측정점 205개 정점 (102, 103, 104, 105, 106, 107, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 400)
기간	2015.01.01 ~ 2050.12.31 (35년)

※ RMSE : Root Mean Square Error(평균제곱근오차)

※ R : Coefficient of correlation(상관계수)

※ R2 : Coefficient of determination(결정계수)

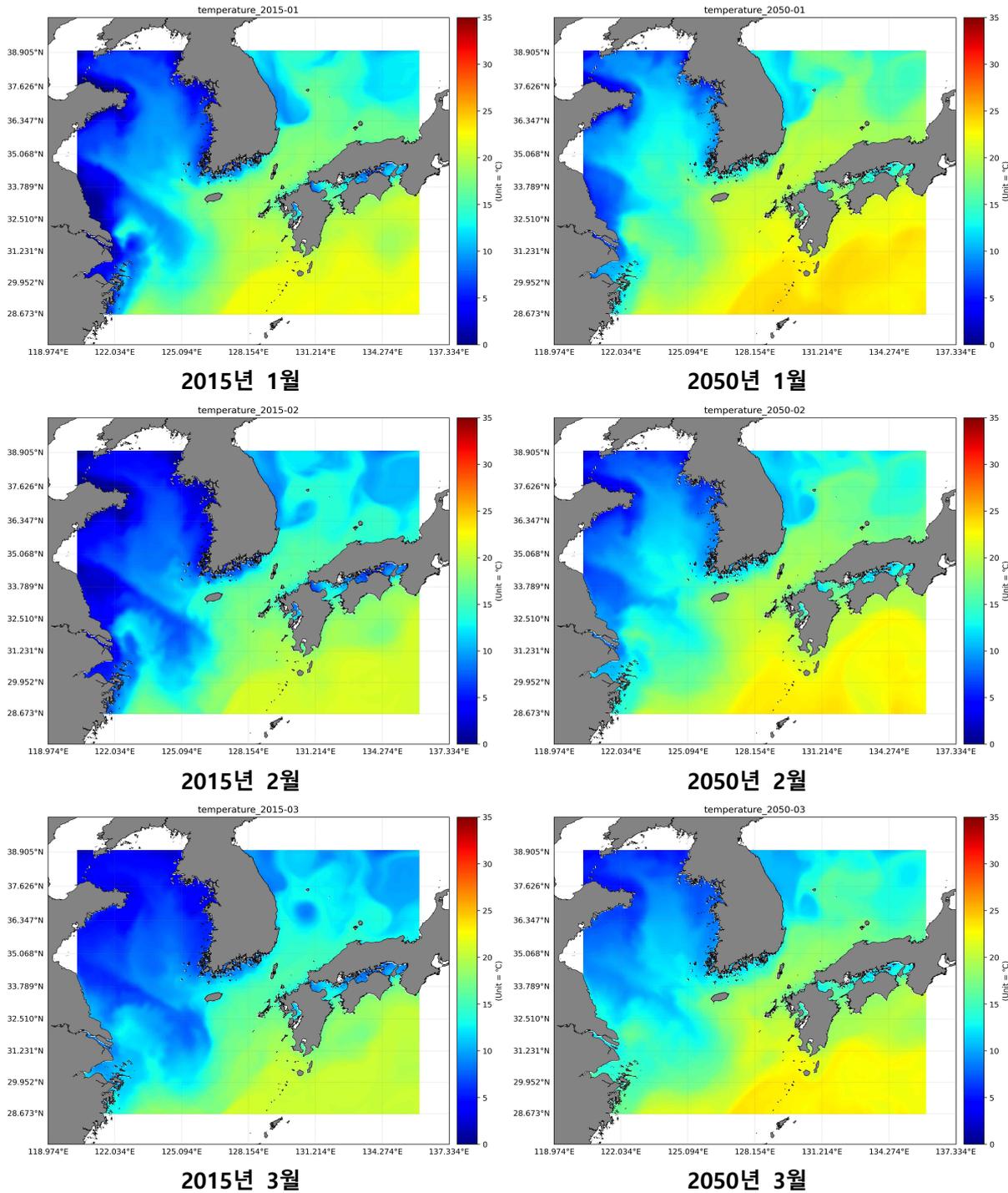


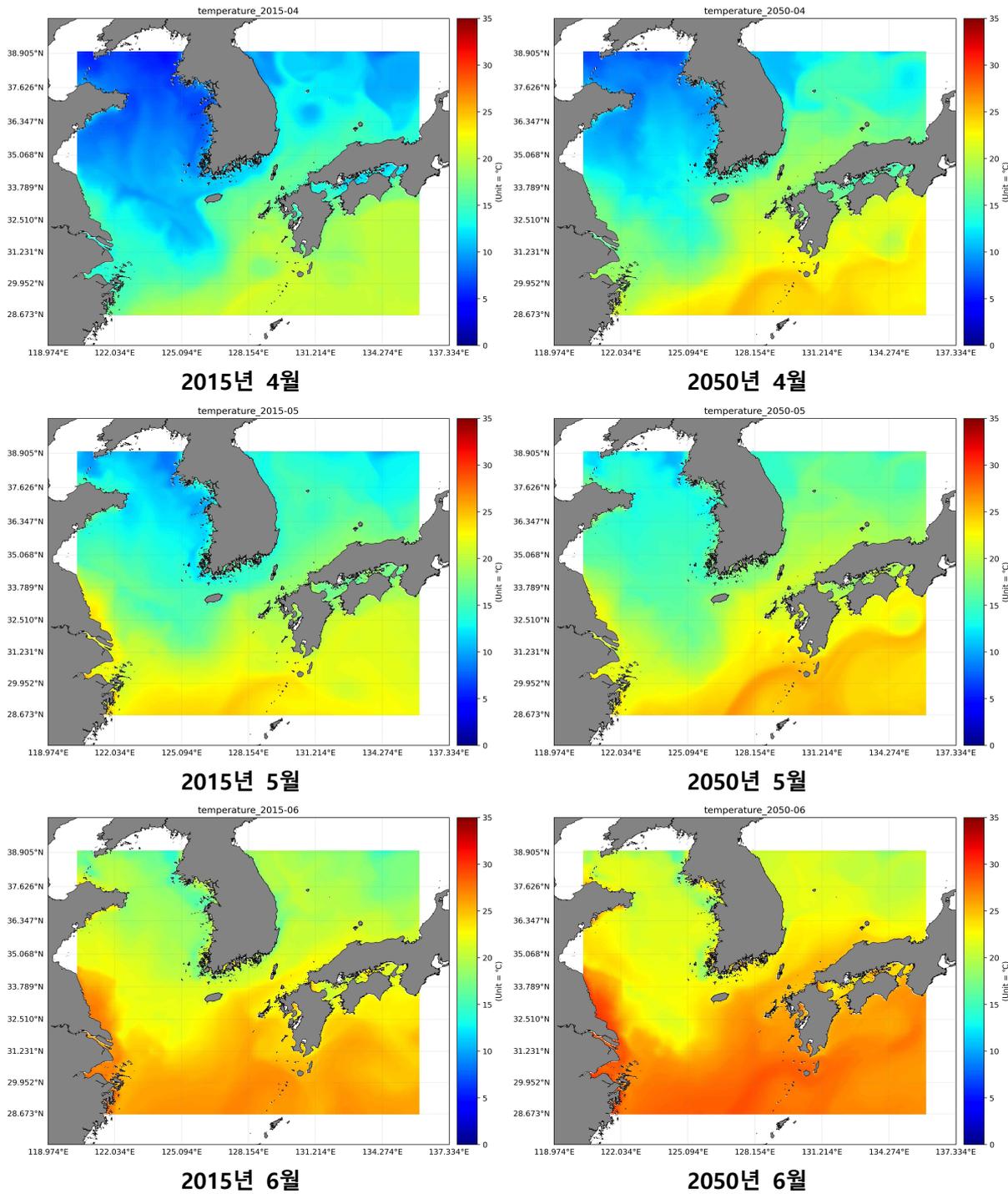
<그림-15> 수온상승 비교 정점도

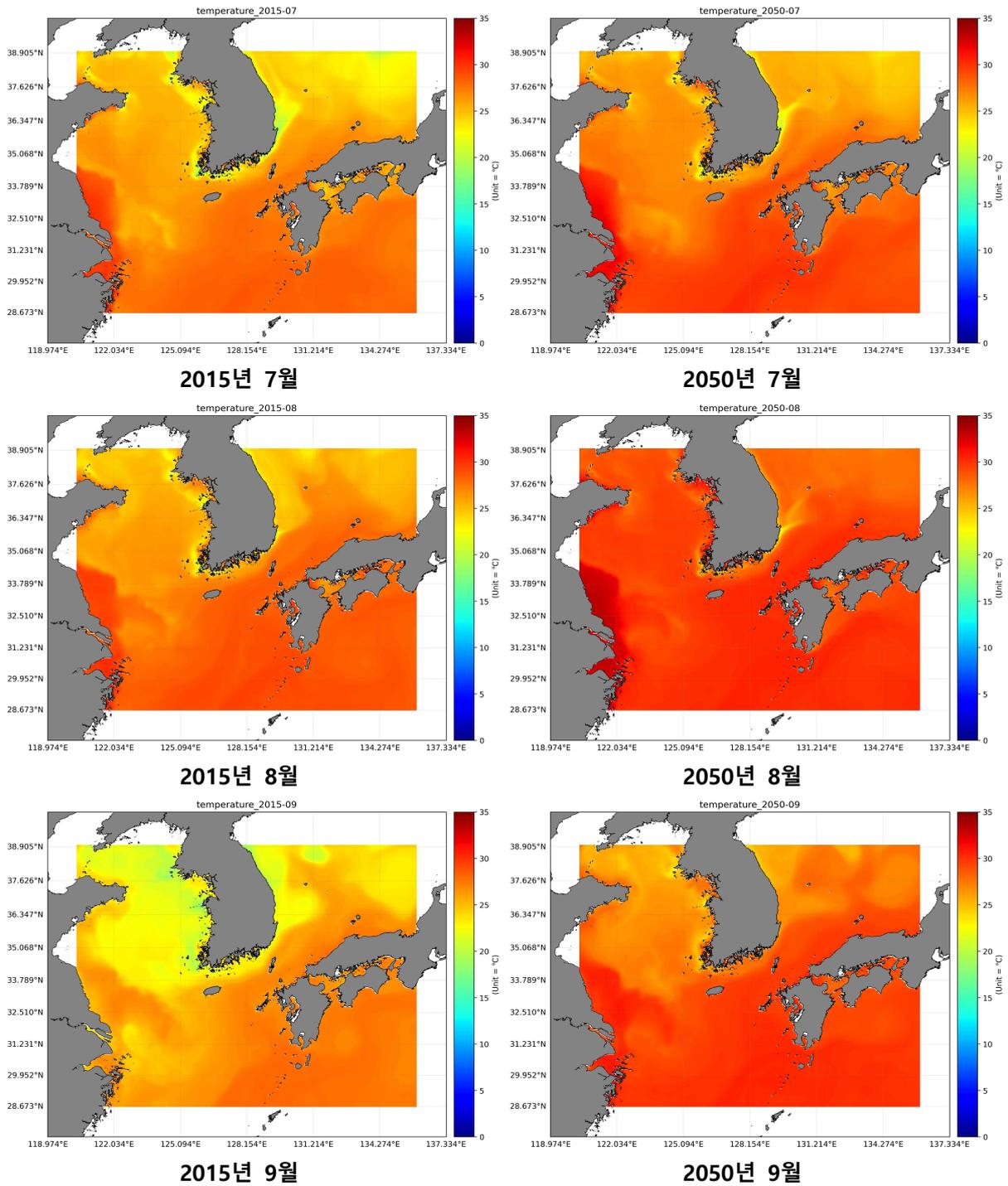
○ 예측모델의 35년간 연평균 예측 수온을 도출하여 기상청 예·특보구역별 수온 상승 값을 산출·검토하였음. 검토 결과, 2015년의 평균 수온은 17.20°C 로 예측하였고, 2050년의 평균 수온은 19.63°C 로 예측하여 2015년 대비 약 2.43°C 높게 예측하였음(<표-7>).

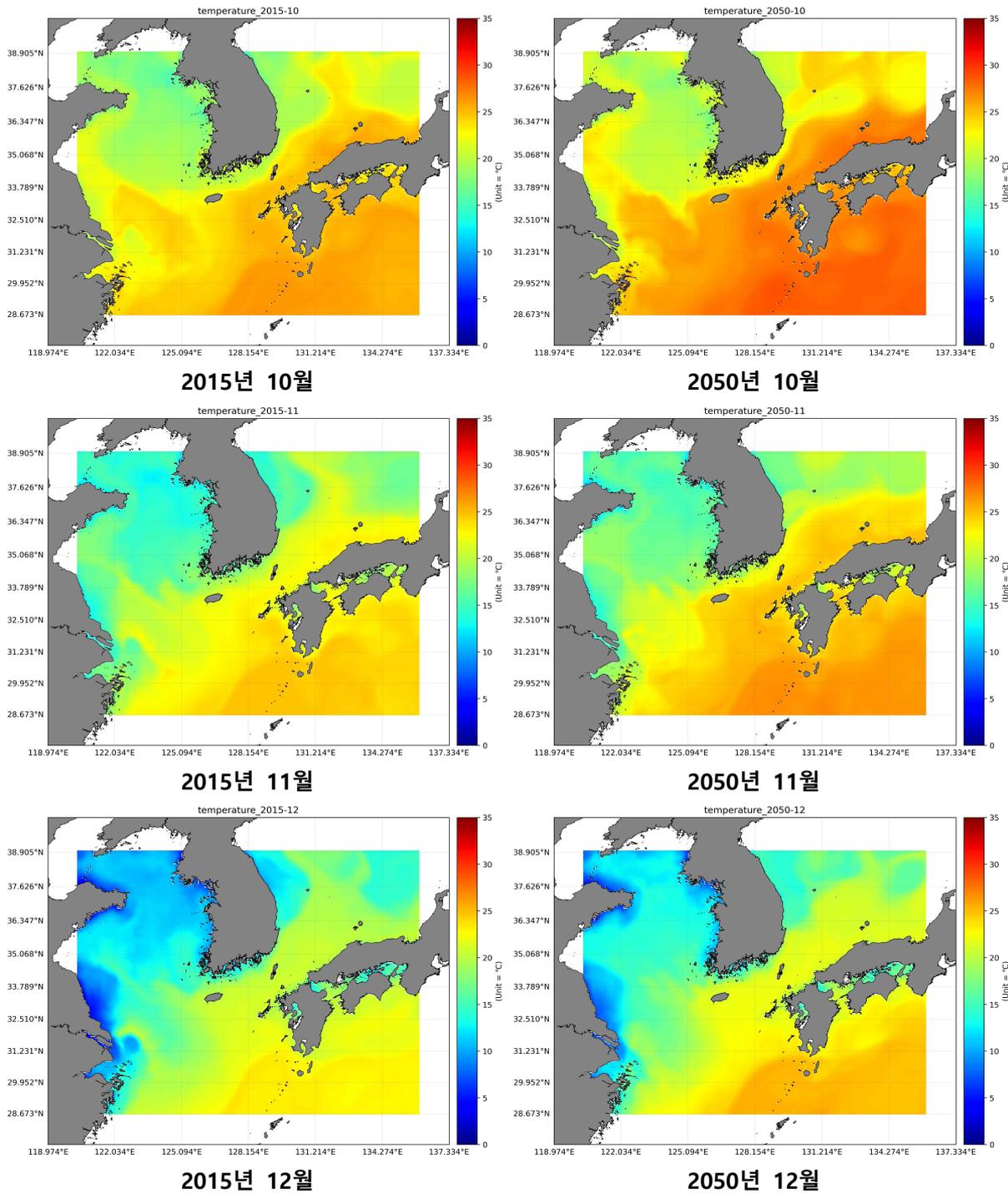
<표-7> 특보구역별 수온 상승변화

구 분	2015년	2050년	차이
서해중부	14.40	17.18	2.78
서해남부	16.10	18.55	2.45
남해서부	19.44	21.89	2.45
남해동부	18.91	21.51	2.60
동해남부	17.76	20.26	2.50
동해중부	16.58	18.38	1.80
평균(°C)	17.20	19.63	2.43

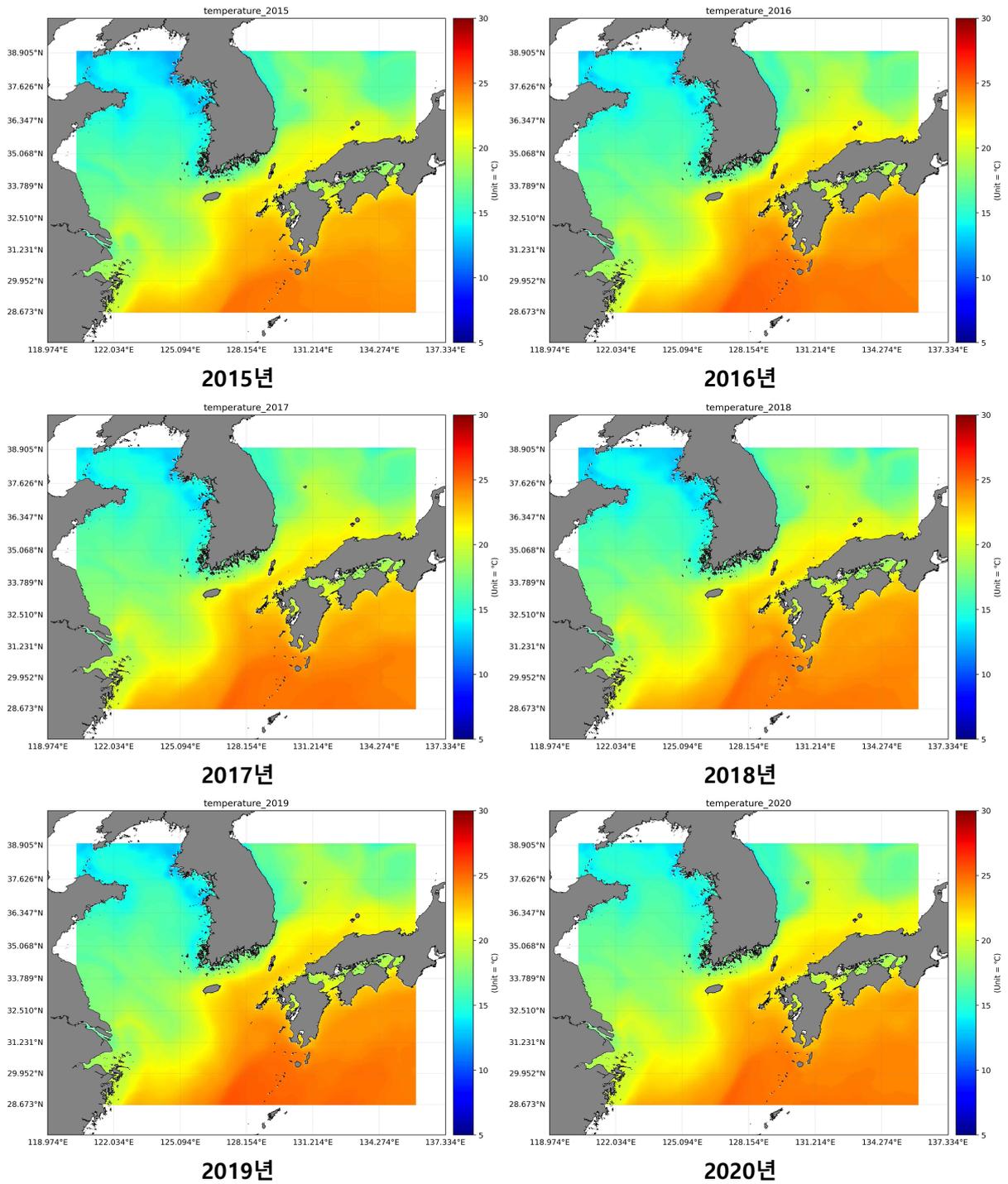


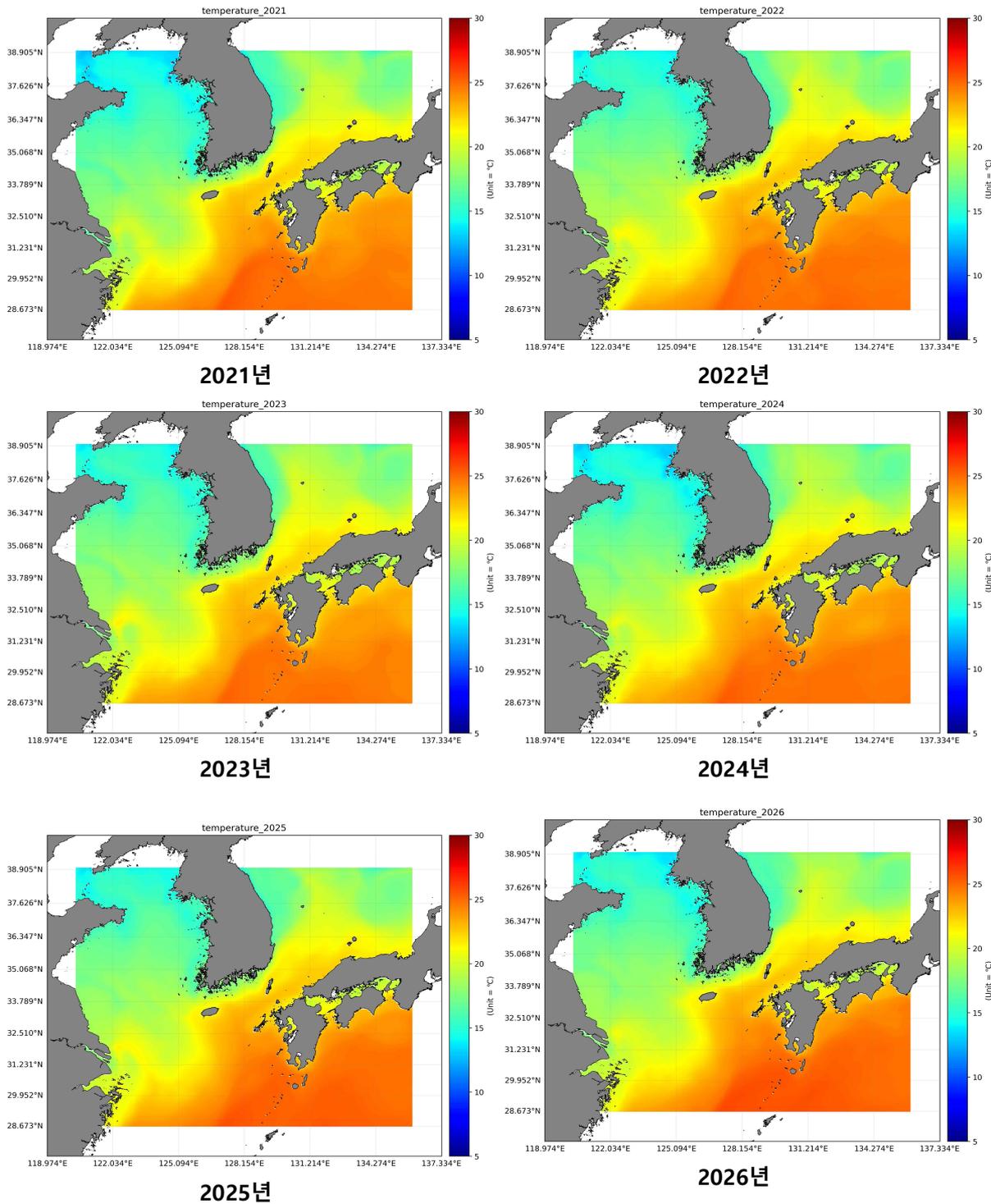


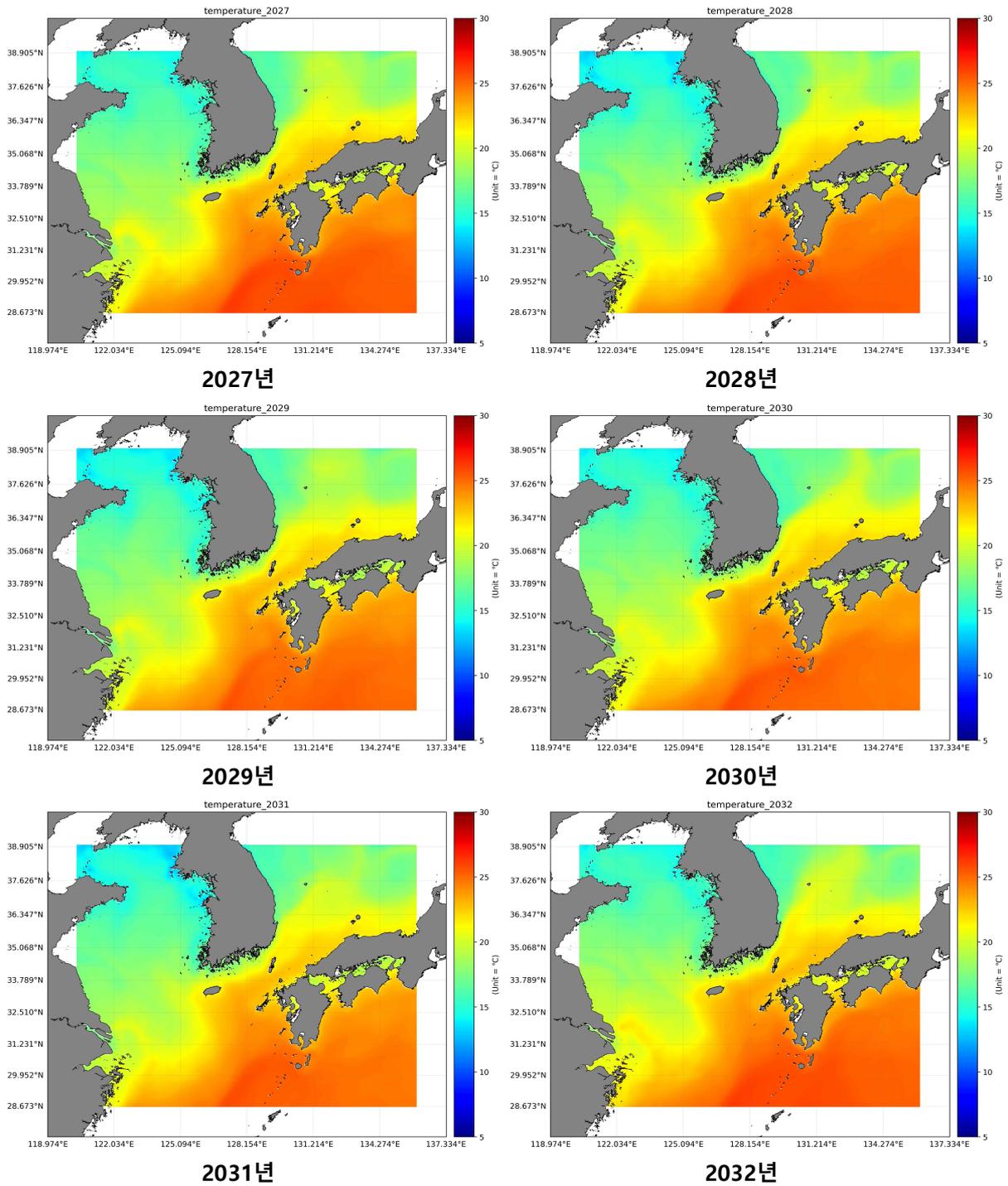


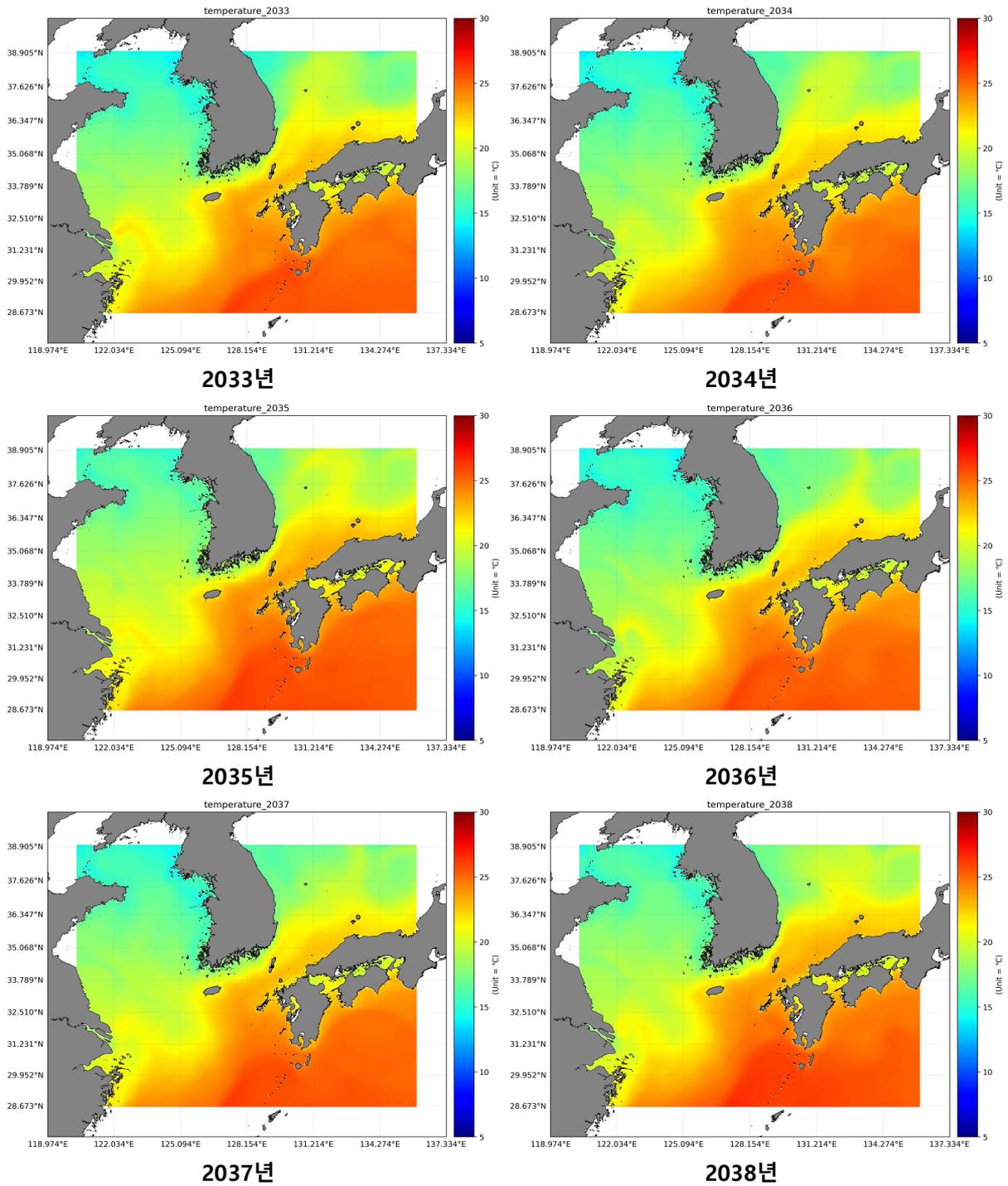


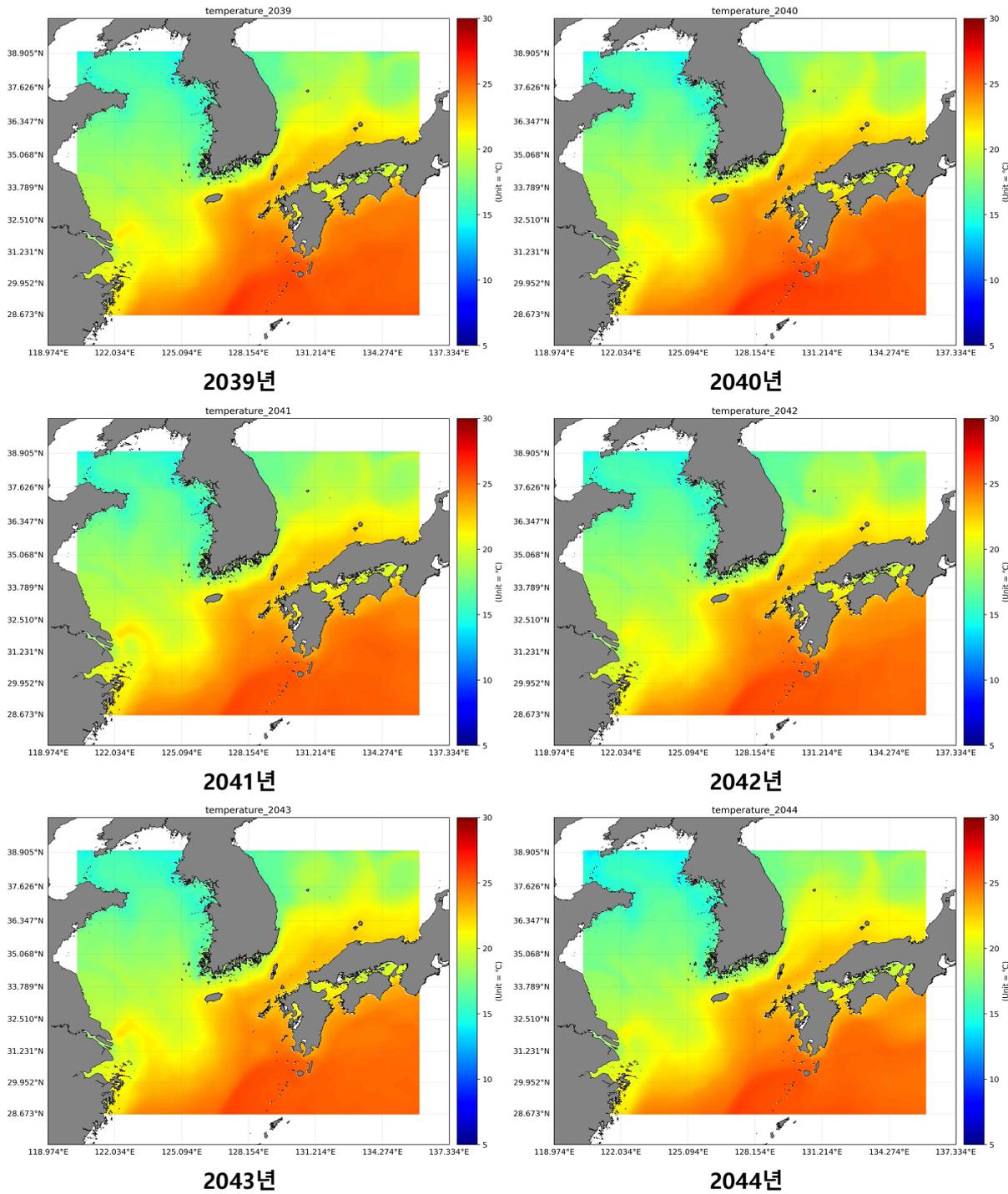
<그림-16> 2015-2050년 월별 수온분포도 예

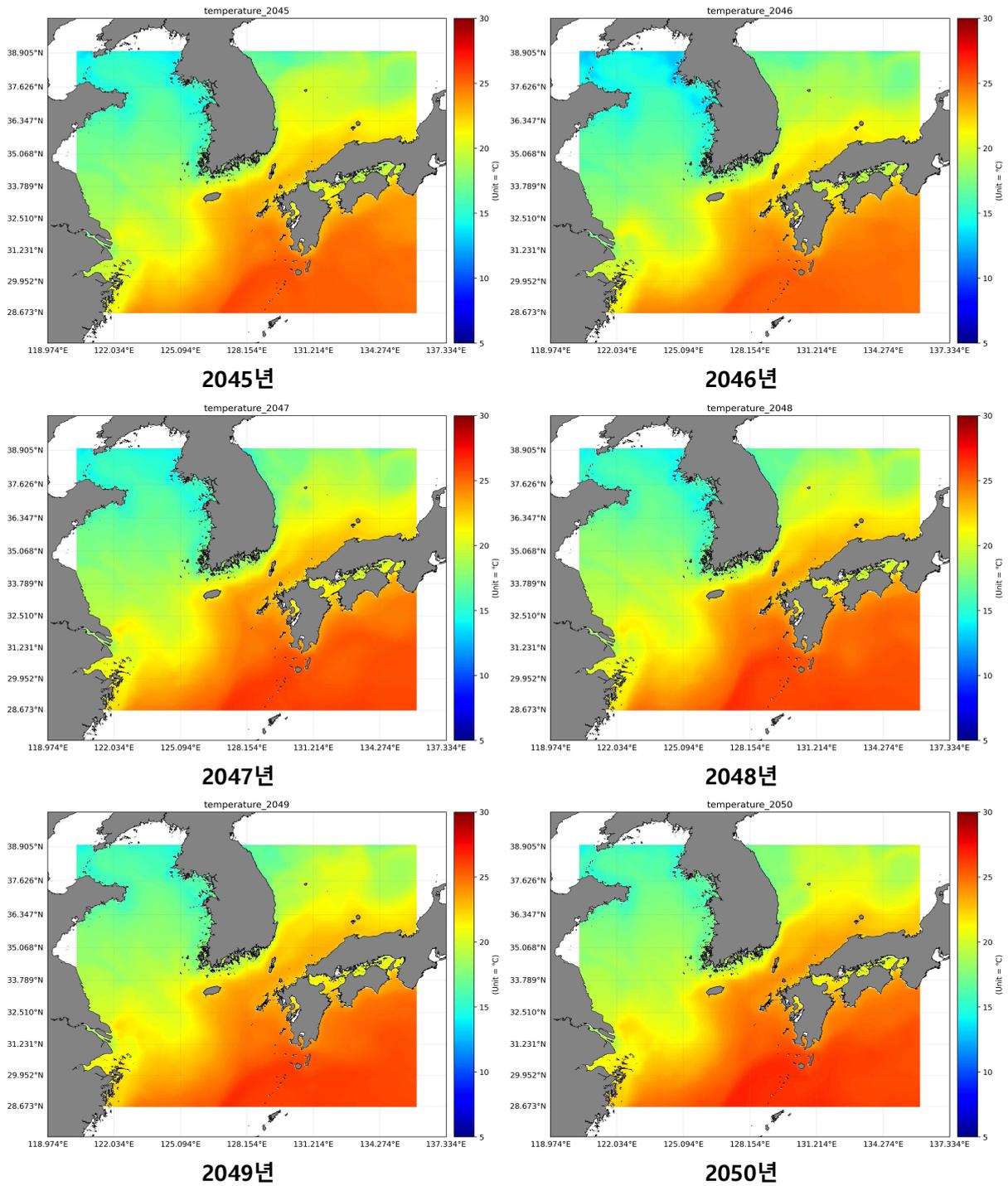












<그림-17> 2015-2050년 수온분포도