

해양수산정보 공동활용체계

# 해황정보생산 수치모델

## 개발결과보고서



해양수산부

## 목 차

I. 개요 .....	1
II. 과업 목표 및 내용 .....	1
2.1. 과업 목표 .....	1
2.2. 과업 내용 .....	1
III. 해양정보 생산 .....	3
3.1. 모델 개요 .....	3
3.2. 모델 구축 .....	10
3.3. 모델결과 검토 .....	17
IV. 기상정보 생산 .....	33
4.1. 모델 개요 .....	33
4.2. 모델 구축 .....	34
4.3. 모델결과 검토 .....	39
V. 파랑정보 생산 .....	43
5.1. 모델 개요 .....	43
5.2. 모델 구축 .....	51
5.3. 모델결과 검토 .....	55

## 표 목차

〈표-1〉 해양모델 수립 개요 .....	10
〈표-2〉 담수유입 입력자료 정보 .....	17
〈표-3〉 수위결과 검토 개요 .....	18
〈표-4〉 수위결과 재현성 평가 .....	20
〈표-5〉 유속결과 검토 개요 .....	21
〈표-6〉 유속결과 재현성 평가 .....	24
〈표-7〉 수온결과 검토 개요 .....	25
〈표-8〉 수온결과 재현성 평가 .....	27
〈표-9〉 염분결과 검토 개요 .....	29
〈표-10〉 염분결과 재현성 평가 .....	31
〈표-11〉 기상모델 수립 개요 .....	34
〈표-12〉 풍속결과 검토 개요 .....	40
〈표-13〉 풍속결과 재현성 평가 .....	42
〈표-14〉 파랑모델 수립 개요 .....	52
〈표-15〉 파고결과 검토 개요 .....	55
〈표-16〉 파고결과 재현성 평가 .....	57

## 그림 목차

<그림-1> 모델 수행 프로세스 .....	2
<그림-2> MOHID 모델 계산 모듈 개요도 .....	3
<그림-3> MOHID 수평·수직격자 체계도 .....	4
<그림-4> MOHID 물질이동 모듈의 계산흐름도 .....	7
<그림-5> 해양모델 수행 흐름도 .....	11
<그림-6> 해양모델 격자망(2.5분) 및 입력수심 .....	12
<그림-7> 해양모델 격자망(3분, 15분) .....	13
<그림-8> 전지구 해양순환모델 데이터 구조 .....	14
<그림-9> 전지구 해양순환모델 데이터 가시화 예 .....	15
<그림-10> 수위검증 정점도 .....	18
<그림-11> 수위 시계열 비교 .....	19
<그림-12> 해양모델 수위분포도 예 .....	20
<그림-13> 유속검증 정점도 .....	22
<그림-14> 유속 시계열 비교 .....	23
<그림-15> 해양모델 유속분포도 예 .....	24
<그림-16> 수온검증 정점도 .....	26
<그림-17> 수온 시계열 비교 .....	27
<그림-18> 해양모델 수온분포도 예 .....	28
<그림-19> 염분검증 정점도 .....	30
<그림-20> 염분 시계열 비교 .....	31
<그림-21> 해양모델 염분분포도 예 .....	32
<그림-22> 기상모델 수행 흐름도 .....	35
<그림-23> 기상모델의 격자망 예(파란색 : 9km) .....	36
<그림-24> 수치표면모델(Digital Surface Model, DSM) 예 .....	36
<그림-25> 전지구 기상재분석장 수집 데이터 예 .....	37
<그림-26> 전지구 기상재분석장 데이터 구조 .....	38
<그림-27> 전지구 기상재분석장 데이터 가시화 예 .....	38
<그림-28> 풍속검증 정점도 .....	40
<그림-29> 풍속 시계열 비교 .....	41
<그림-30> 기상모델 풍속분포도 예 .....	42
<그림-31> 파랑모델 수행 흐름도 .....	53



<그림-32> 파랑모델 격자망 및 입력수심 .....	54
<그림-33> 기상모델 결과 데이터 구조 .....	54
<그림-34> 파고검증 정점도 .....	56
<그림-35> 파고 시계열 비교 .....	57
<그림-36> 파랑모델 파고분포도 예 .....	58

## I. 개요

- 요구사항 명칭 : 수치모델을 이용한 과거 해황 정보 생산
- 수행목적
  - 연간 수위, 유속, 수온, 염분, 풍속, 파고 정보 생산
  - 자료 생산을 통한 지속적인 데이터 DB 누적·확보
  - 인공지능 고해상도(2.5분) 해황 예측자료 생산을 위한 학습자료 확보

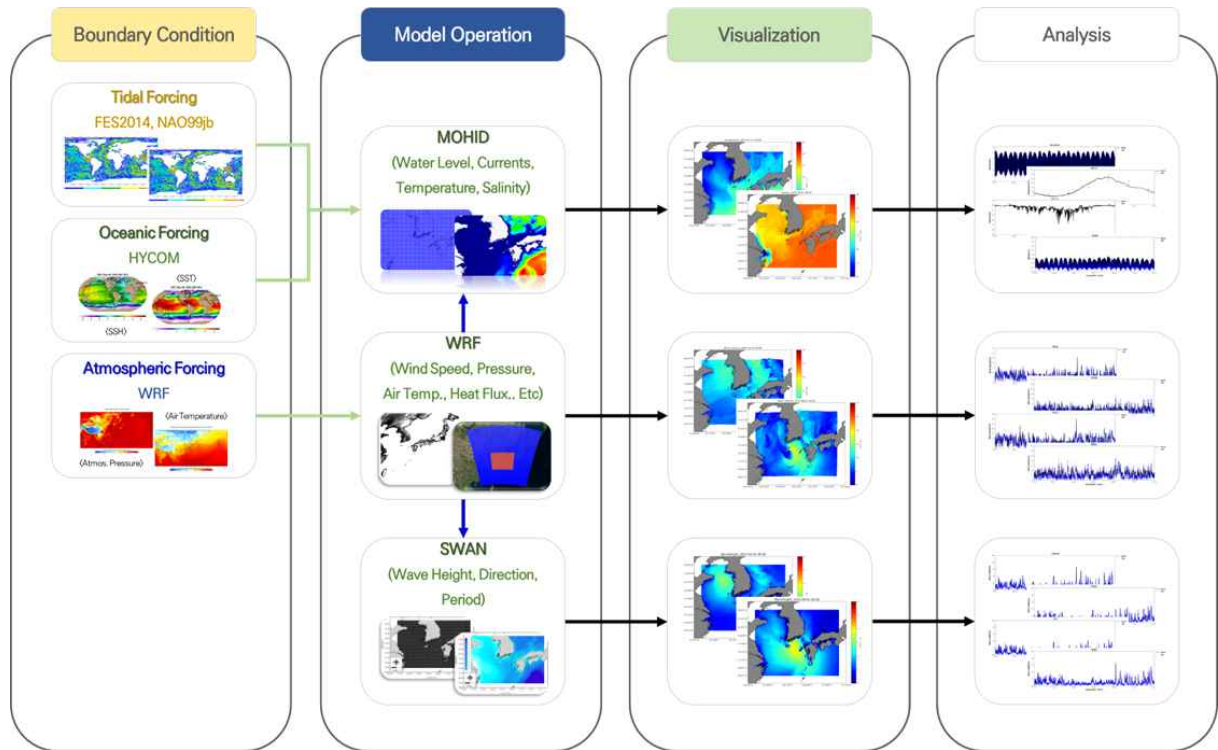
## II. 과업 목표 및 내용

### 2.1. 과업 목표

- 2022년 해황정보 생산에 필요한 해양모델, 기상모델, 파랑모델을 수립하고 관측자료와 검증을 통해 신뢰성 확보 후 각 모델별 해황정보(수위, 유속, 수온, 염분, 풍속, 파고) DB 생산

### 2.2. 과업 내용

- 모델수행에 필요한 입력 데이터(해양, 기상)를 수집 및 구축하고 모델 입력형태로 변환 수행
- 각 모델 별 초기 및 경계조건 생성 후 모델 수행
- 수행된 모델결과(수위, 유속, 수온, 염분, 풍속, 파고)의 신뢰성을 확보하기 위해 관측자료를 이용한 검증 수행

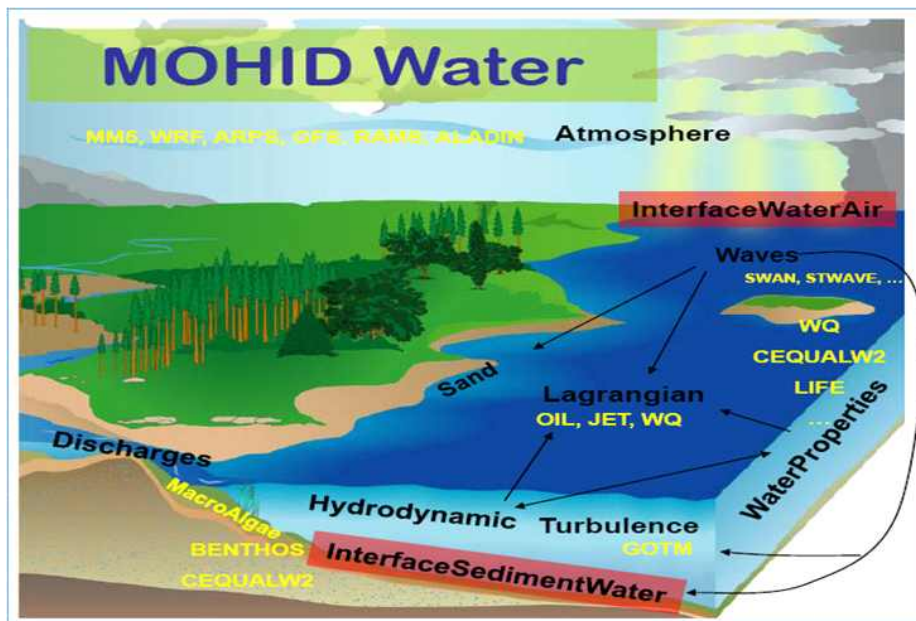


<그림-1> 모델 수행 프로세스

### Ⅲ. 해양정보 생산

#### 3.1. 모델 개요

- 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), 오일러리안 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-2> 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 유한체적법(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 조

간대 처리가 가능한 모델임

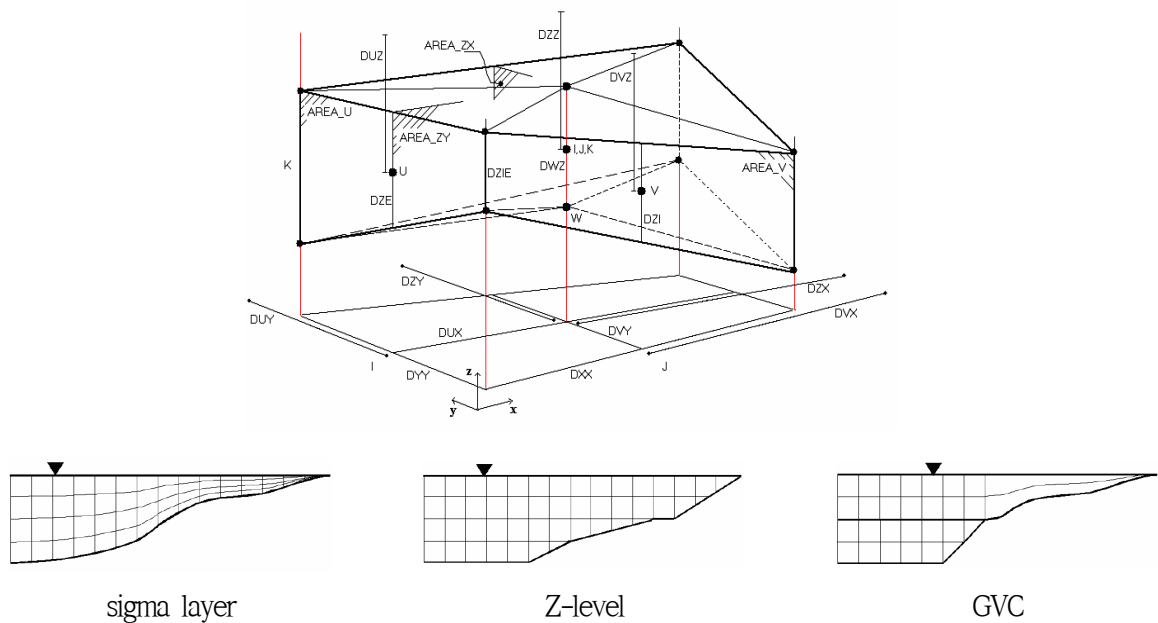
- MOHID 모델은 공간적으로 격자검사체적(cell control volume)을 이용하여 방정식을 차분하는 유한체적법을 사용함(Chippada et al., 1998). 검사체적  $\Omega$ 와 생성항  $Q$ 를 가지는 스칼라항  $U$ 에 대한 일반 보존법칙(general conservation law)은 다음과 같음

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

여기서,  $F$ 는 검사면  $S$ 를 통한 스칼라항의 플럭스(flux)를 의미함. 앞의 식을 차분하여 다음과 같이  $\Omega_j$ 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-3> 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 수질 연구(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

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

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

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

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

여기서,  $u$ ,  $v$ ,  $w$ 는 각각  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 방향으로의 속도벡터 성분,  $f$ 는 코리올리스 파라미터(Coriolis parameter),  $\nu_H$ ,  $\nu_t$ 는 수평 및 수직 방향에서의 난류점성계수(turbulence viscosity),  $\nu$ 는 분자동점성계수(molecular kinematic viscosity),  $p$ 는 압력이고,  $g$ 는 중력가속도이고,  $\rho$ 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  $\rho_0$ 와 밀도의 아

노말리(anomaly)  $\rho'$ 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- $\epsilon$  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),

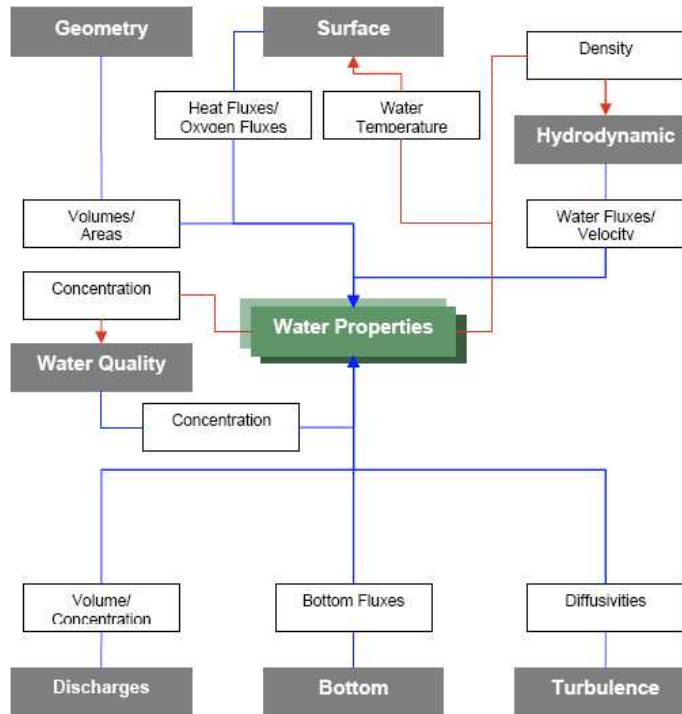
Backhaus and Hainbucher(1987), Pacanowski and

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-4>).
- 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,  $\nu'_H, \nu'_t$ 는 수평 및 수직 방향에서의 난류확산(eddy diffusivity),  $\nu'_A$ 는 분자확산(molecular diffusivity)임



<그림-4> 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

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



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

- 여기서,  $C_D$ 는 응력계수(drag coefficient)로 풍속의 함수이며,  $\rho_a$ 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,  $\kappa$ 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,  $\epsilon$ 는 물의 복사능(=0.97, emissivity of water)이며,  $T_w$ 는 수온,  $\sigma$ 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 대기과 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

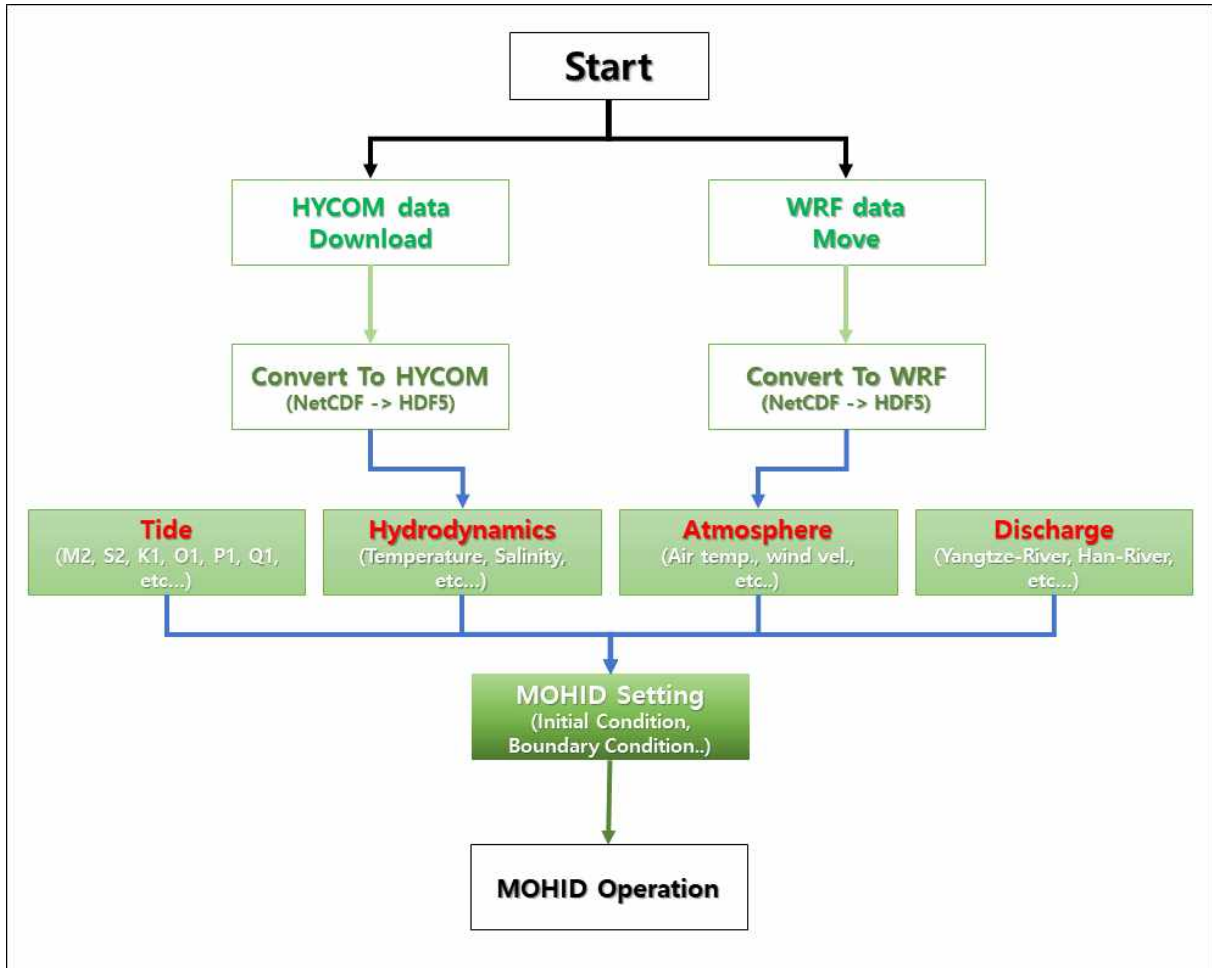
### 3.2. 모델 구축

#### 1. 수립 개요

- 2022년 해양정보 생산에 필요한 해양모델을 수립하고 수행하였으며, 해양모델 수립 개요를 <표-1>에 제시함

<표-1> 해양모델 수립 개요

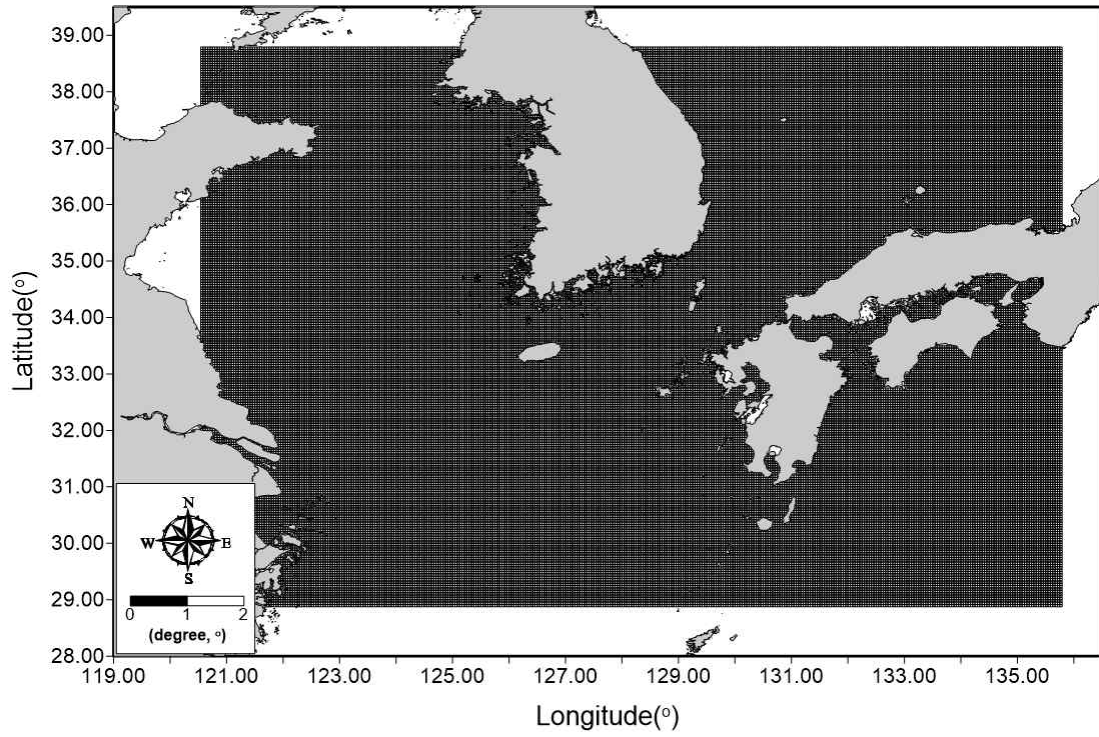
항 목		설 명
수립목적		- 2022년 해양정보 생산 중 수위, 유속, 수온, 염분 정보 생산을 위한 해양모델 수립
사용모델		- MOHID(Modelo Hidrodinamico, by Tech. Univ. of Lisbon, Portugal) 모델
모델구성	계산영역	- 위도 : 28.7°N ~ 39.0°N - 경도 : 120.3°E ~ 136.0°E
	격자해상도	- 수평 : 1/24°(약 4.6 km) - 수직 : 40층
입력조건	조석	- 16개 분조 합성조석(M2, S2, K1, O1, P1, N2, K2, Q1, T2, L2, 2N2, NU2, OO1, J1, MU2, Sa)
	하천유량	- 양자강, 황허, 한강, 임진강, 금강, 영산강, 섬진강, 낙동강, 예성강
	수온·염분	- HYCOM 자료(수온, 염분, 수위, 해류)
	기상	- WRF 모델 결과(풍속, 기압, 기온, 열속 등)
	계산간격	- 5~30초
	모의기간	- 2022년 1월 1일 ~ 2022년 12월 31일
생산자료		- 수위(Water level), 유속(Velocity), 수온(Temperature), 염분(Salinity)
생산주기		- 1시간 간격 / UTC
좌표계		- WGS 84(EPSSG: 4326)



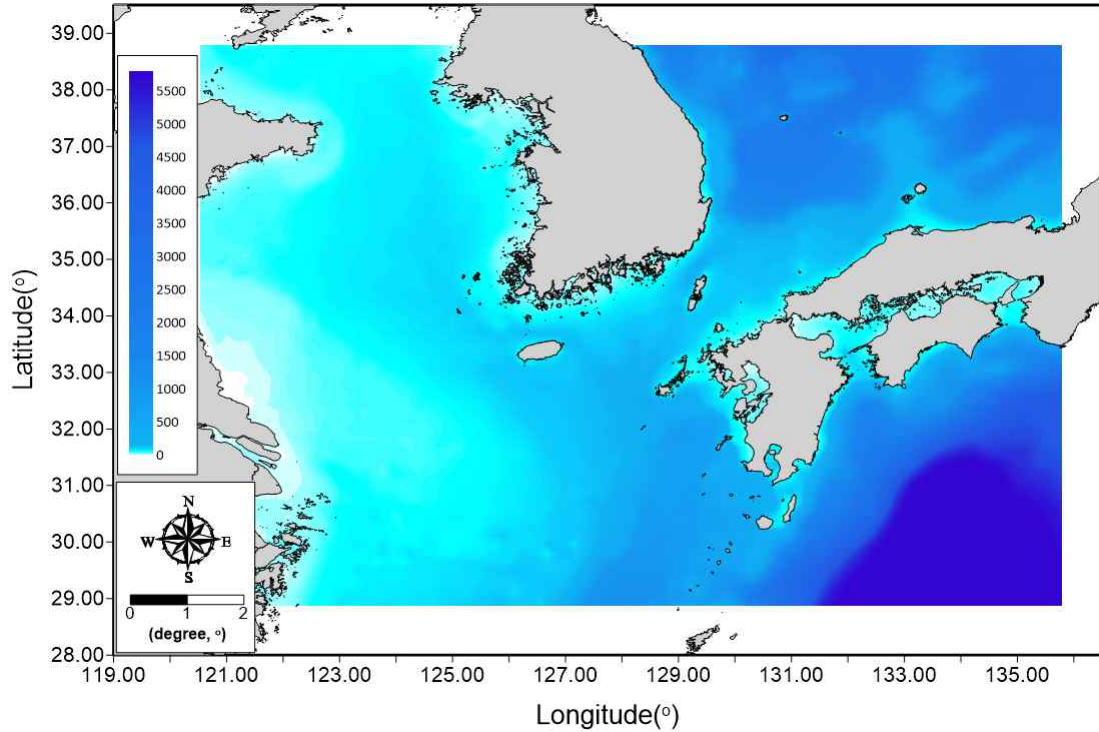
<그림-5> 해양모델 수행 흐름도

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



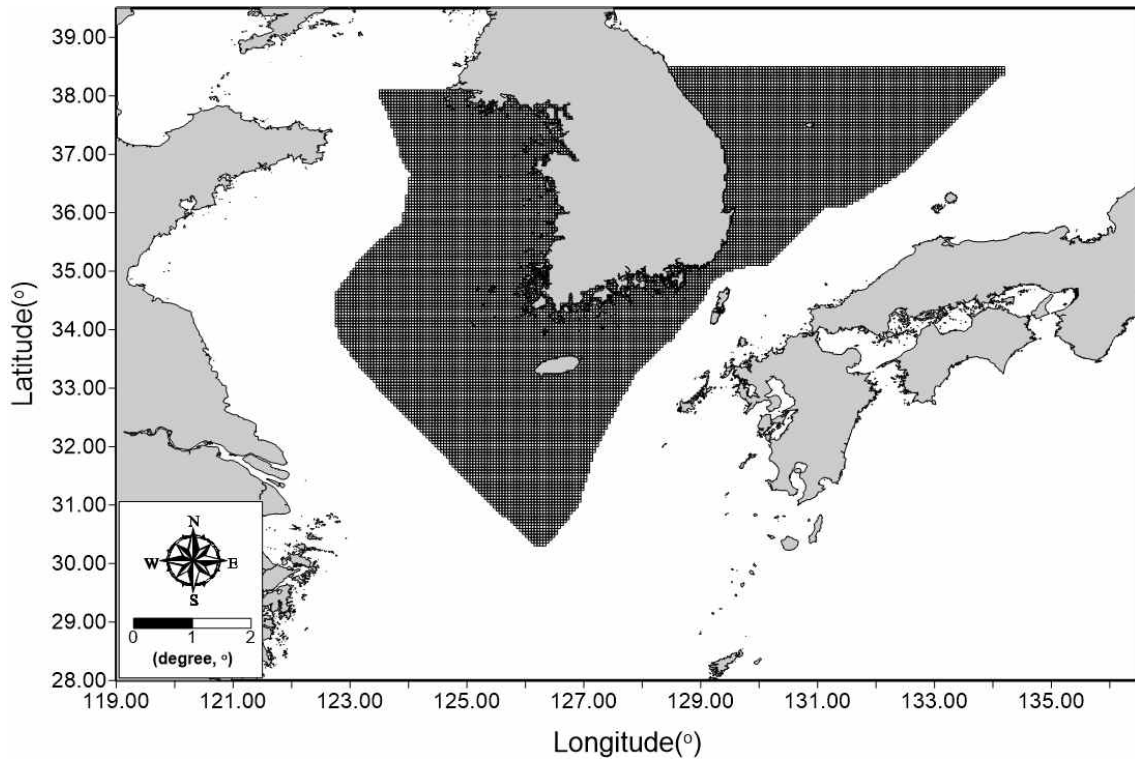
(a) Grid(2.5분)



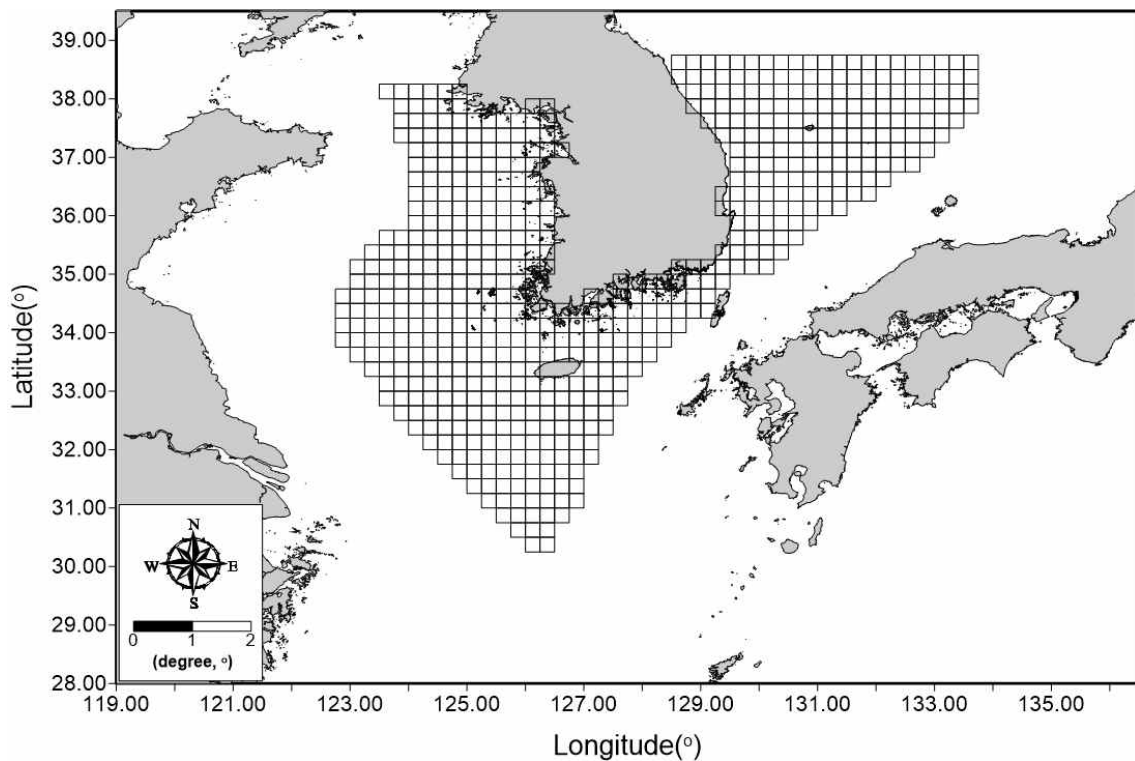
(b) Depth

<그림-6> 해양모델 격자망(2.5분) 및 입력수심





(a) Grid(3분)



(b) Grid(15분)

<그림-7> 해양모델 격자망(3분, 15분)

2) 전지구 해양순환모델(HYCOM)

○ Hybrid Coordinate Ocean Model(HYCOM)은 미국 Global Ocean Data Assimilation Experiment(GODAE)가 개발한 모델로 National Ocean Partnership Program(NOPP)에 참여하는 여러 기관의 협력 결과임(한국해양과학기술원, 2013). 해양모델의 초기 및 경계조건 자료 구축을 위해 HYCOM의 2022년 수온, 염분, 수위, 해류를 수집하여 적용함

Hycom_2022010100.nc	Hycom_2022010100.nc	Local File
depth	Depth	ID
lat	Latitude	ID
lon	Longitude	ID
salinity	Salinity	Geo2D
surf_elev	Water Surface Elevation	Geo2D
time	Valid Time	ID
water_temp	Water Temperature	Geo2D
water_u	u-veloc. [91,2H]	Geo2D
water_v	v-veloc. [91,2H]	Geo2D

File "Hycom\_2022010100.nc"

File type: Hierarchical Data Format, version 5

```

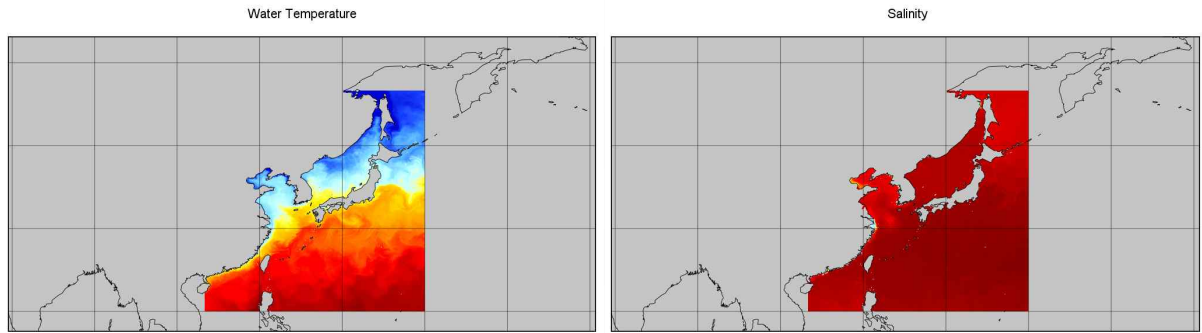
netcdf file:/F:/2023project/해양수산부/해수부_공동활용체계/01_Model/Hycom_2022010100.nc {
  dimensions:
    depth = 40;
    lat = 1001;
    lon = 501;
    time = 9;
  variables:
    double depth(depth=40);
      :long_name = "Depth";
      :standard_name = "depth";
      :units = "m";
      :positive = "down";
      :axis = "Z";
      :NAVO_code = 5; // Int

    double lat(lat=1001);
      :long_name = "Latitude";
      :standard_name = "latitude";
      :units = "degrees_north";
      :point_spacing = "even";
      :axis = "Y";
      :NAVO_code = 1; // Int

    double lon(lon=501);
      :long_name = "Longitude";
      :standard_name = "longitude";
      :units = "degrees_east";
      :modulo = "360 degrees";
      :axis = "X";
      :NAVO_code = 2; // Int

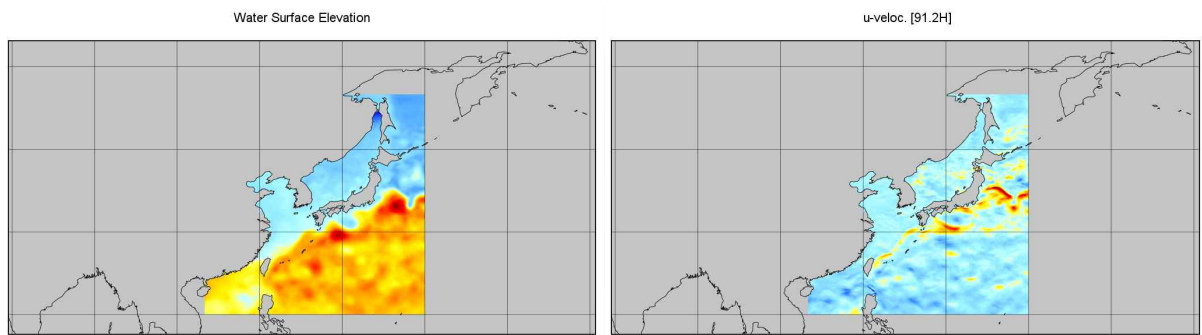
    double time(time=9);
      :long_name = "Valid Time";
      :units = "hours since 2000-01-01 00:00:00";
      :time_origin = "2000-01-01 00:00:00";
      :calendar = "gregorian";
      :axis = "T";
    
```

<그림-8> 전지구 해양순환모델 데이터 구조



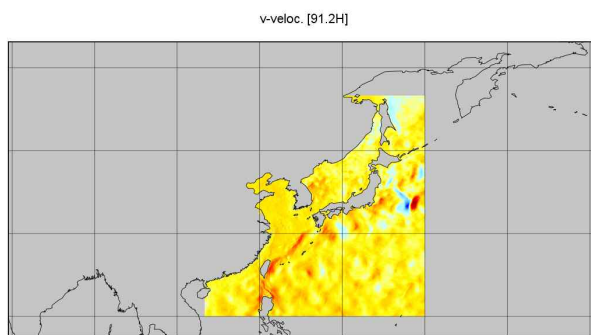
(a) Sea Surface Temperature

(b) Sea Surface Salinity



(c) Water Surface Elevation

(d) u-velocity



(e) v-velocity

<그림-9> 전지구 해양순환모델 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 전지구 해양순환모델(HYCOM) 예측자료를 공간적으로 입력함
- 기상 초기조건은 기상예측모델(Weather Research & Forecasting, WRF) 결과를 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 개방경계에 입력함
- 수온과 염분의 경계조건은 3시간 간격으로 제공하는 전지구 해양순환모델(HYCOM) 예측자료를 사용함
- 기상 개방경계 조건은 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 NCEP 재분석자료를 이용하여 기상예측모델을 모의하여 예측된 1시간 간격 기상 예측결과(기온, 기압, 풍속, 풍향, 열속 등)를 경계조건으로 입력함

### 3) 하천유량조건

- 해양모델의 담수유입은 총 9개의 하천(양자강, 황허, 한강, 임진강, 예성강, 금강, 영산강, 섬진강, 낙동강)의 유량자료를 입력함(<표-2>).

&lt;표-2&gt; 담수유입 입력자료 정보

구 분	관측소	수집기간	기관명
한강	한강대교	2022.01.01 ~ 2022.12.31	한강홍수통제소
임진강	비룡대교	2022.01.01 ~ 2022.12.31	한강홍수통제소
금강	금강갑문	2022.01.01 ~ 2022.12.31	물환경정보시스템
영산강	영산강하구언(외)	2022.01.01 ~ 2022.12.31	한국농어촌공사
섬진강	하동군(읍내리)	2022.01.01 ~ 2022.12.31	물환경정보시스템
낙동강	낙동강하굿둑	2022.01.01 ~ 2022.12.31	낙동강홍수통제소
양자강(중국)	Datong	2022.01.01 ~ 2022.12.31	-

### 3. 모의기간 및 계산시간 간격

- 2022년 해황정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 기간이며, 모델의 계산시간 간격은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)의 안정조건에 의거하여 수치해의 안정성을 확보할 수 있도록 30초로 해양모델을 수행함
- 계산시간의 효율성을 위해 병렬화(MPI)를 적용하였으며, 1일 예측시간은 CPU(Intel(R) Xeon(R) Gold 6248R CPU @ 3.00GH) 4개, Thread 91개 적용 시 약 70분 소요됨

### 3.3. 모델결과 검토

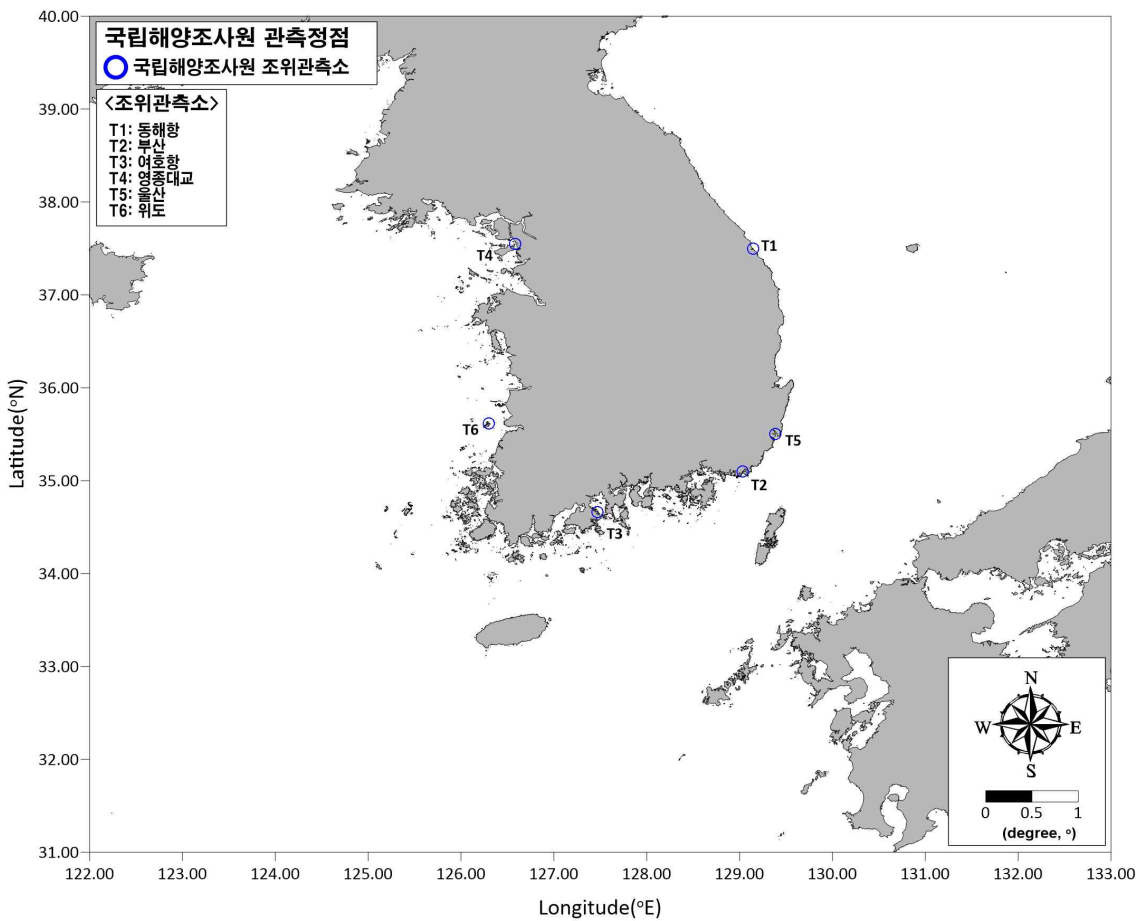
#### 1. 수위

- 2022년 해황정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료(국립해양조사원 조위검조소 6개소) 간의 정성검증 및 정량검증을 통해 생산된 결과의 정확도를 검토하였음. 검증에 사용된 모델결과와 관측자료는 조화분석을 통해 검증을 실시하였으며, 검증자료의 시간간격은 1시간 간격임. 수위검토 개요는 <표-3>에 제시하였으며, 수위검증 정점도는 <그림-10>과 같음

<표-3> 수위결과 검토 개요

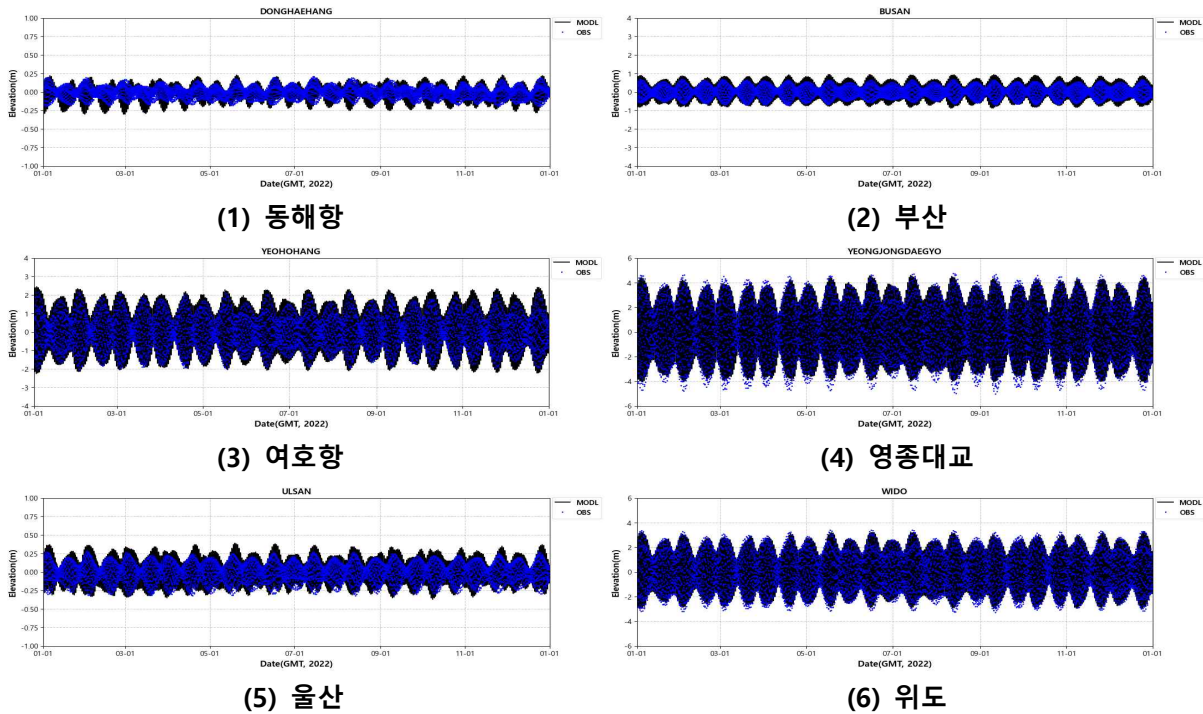
구분	내용
사용모델	MOHID(1/24°)
비교방법	정성검증(시계열 비교), 정량검증(RMSE, R, R <sup>2</sup> )
관측자료	국립해양조사원 조위검조소 6개소 (동해항, 부산, 여호항, 영종대교, 울산, 위도)
기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

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



<그림-10> 수위검증 정점도

- 2022년 해황정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료 간의 수위 시계열 비교를 실시한 결과, 관측치의 경향성을 잘 재현함(<그림-11>).

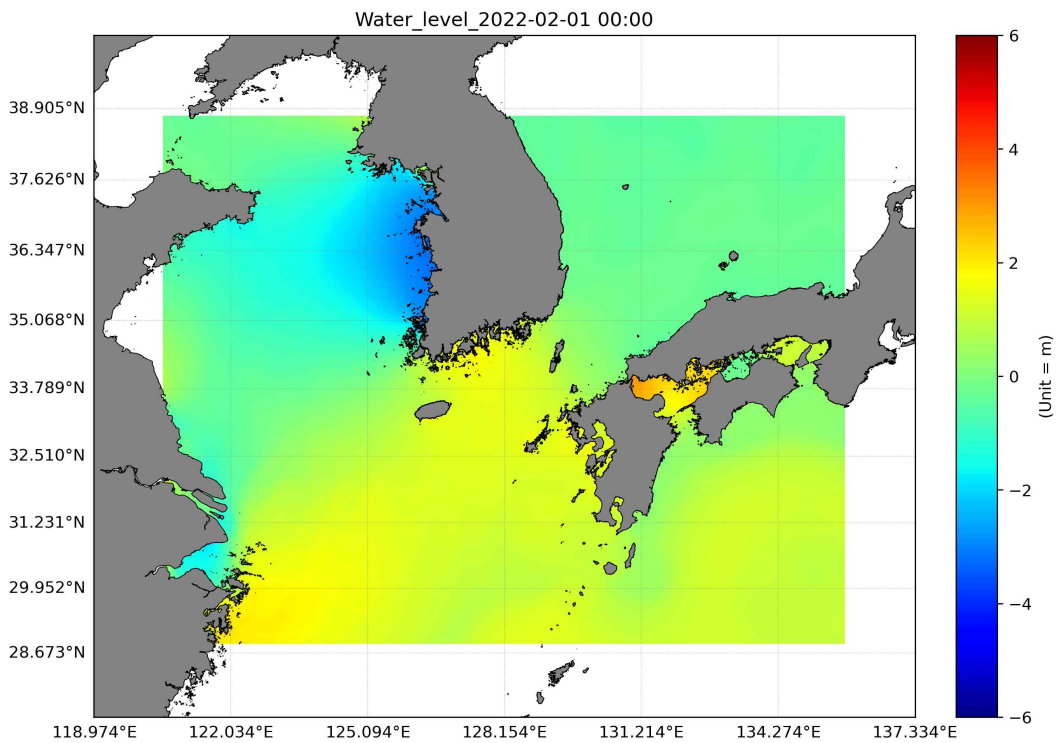


<그림-11> 수위 시계열 비교

- 모델결과와 관측자료 간의 정량적 비교를 위해 1시간 간격의 자료를 통계·분석하여 상관계수(R), 결정계수( $R^2$ ) 및 평균제곱근오차(RMSE)를 계산하고 검토하였음. 국립해양조사원 조위검조소 6개 소 수위의 평균 상관계수는 0.92, 결정계수는 0.86, 평균제곱근오차는 0.21m로 모델결과는 관측치와 높은 상관관계를 나타냄(<표-4>).

<표-4> 수위결과 재현성 평가

검조소	RMSE(m)	R	R <sup>2</sup>
동해항	0.07	0.74	0.55
부산	0.14	0.96	0.93
여호항	0.26	0.98	0.96
영종대교	0.36	0.99	0.98
울산	0.07	0.88	0.78
위도	0.38	0.97	0.94
전체 평균 평균제곱근오차(m)		0.21	
전체 평균 상관계수		0.92	
전체 평균 결정계수		0.86	



<그림-12> 해양모델 수위분포도 예

## 2. 유속

- 2022년 해황정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료(국립해양조사원 해양관측부이 6개소) 간의 정성검증 및 정량검증을 통해 생산된 결과의 정확도를 검토하였음. 검증에 사용된 모델결과와 관측자료는 3시간 간격의 이동평균 방법을 적용하여 도출하였고, 시간간격은 1시간 간격임. 유속검토 개요는 <표-5>에 제시하였으며, 유속 검증 정점도는 <그림-13>과 같음

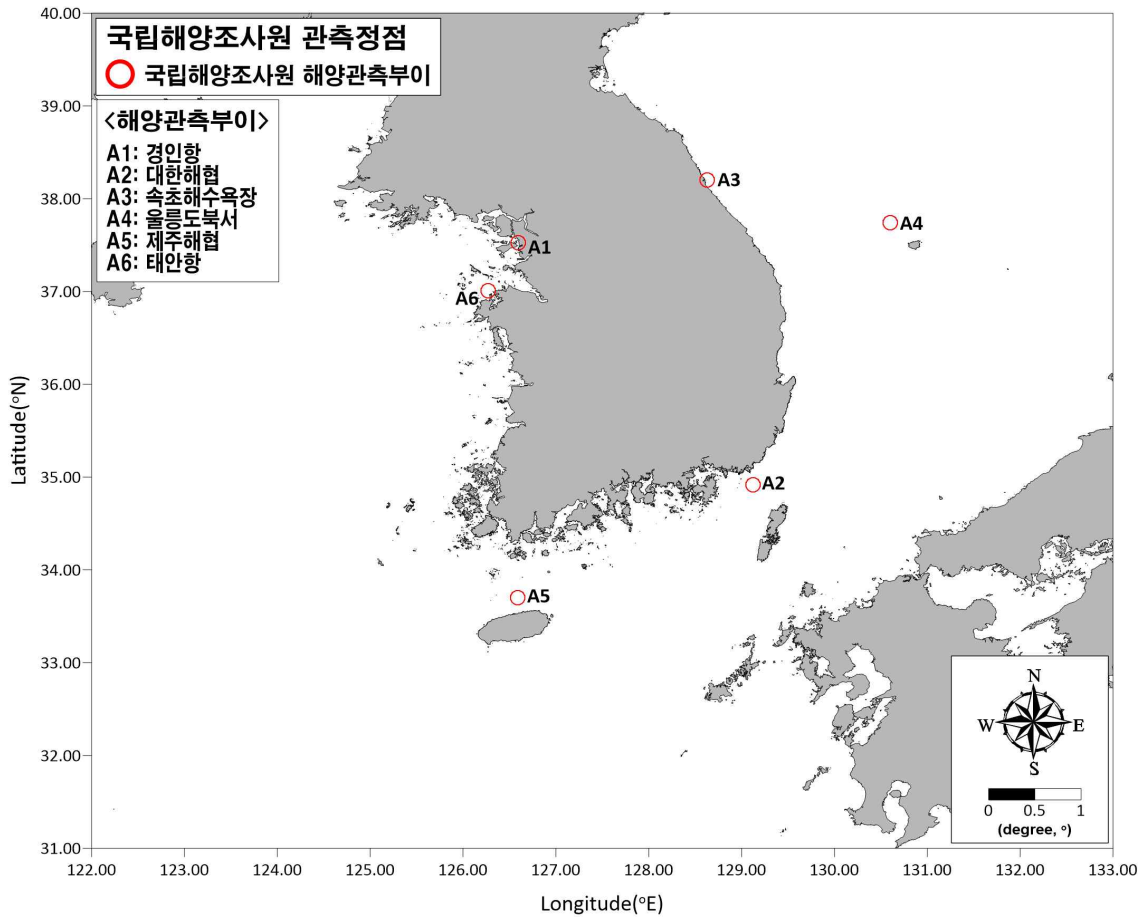
&lt;표-5&gt; 유속결과 검토 개요

구 분	내 용
사용모델	MOHID(1/24°)
비교방법	정성검증(시계열 비교), 정량검증(RMSE, R, R <sup>2</sup> )
관측자료	국립해양조사원 해양관측부이 6개소 (경인항, 대한해협, 속초해수욕장, 울릉도북서, 제주해협, 태안항)
기 간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

※ RMSE : Root Mean Square Error(평균제곱근오차)

※ R : Coefficient of correlation(상관계수)

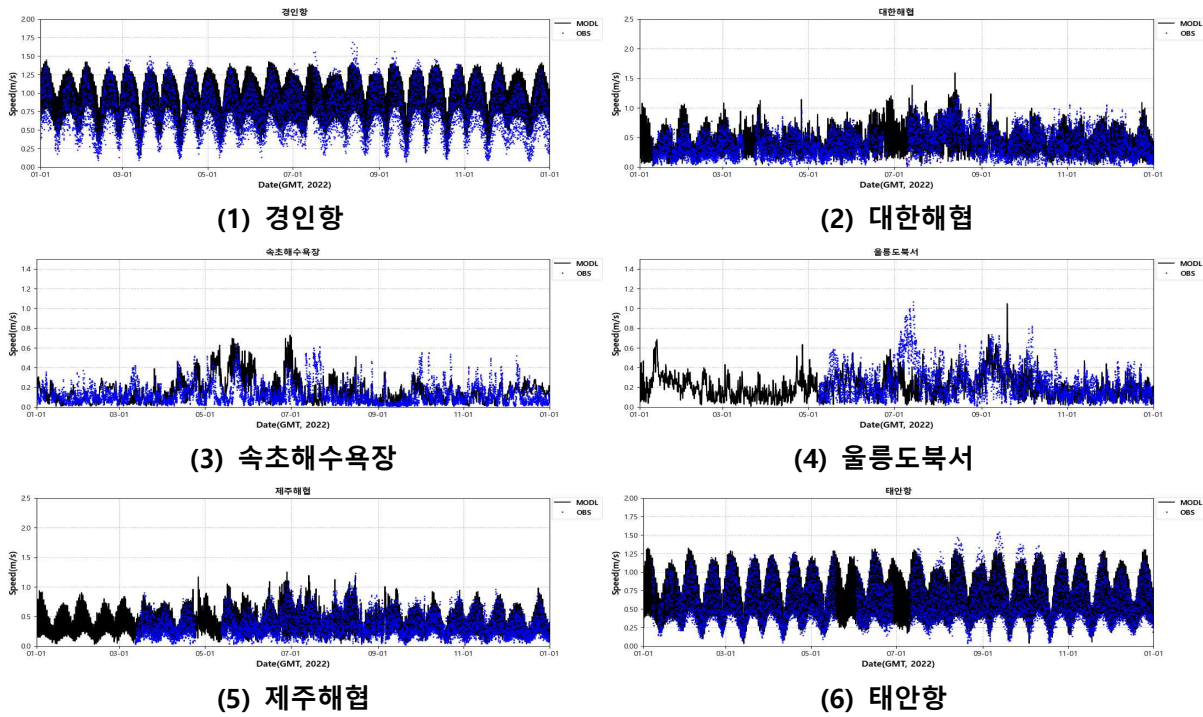
※ R<sup>2</sup> : Coefficient of determination(결정계수)



<그림-13> 유속검증 정점도

- 2022년 해양정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료 간의 유속 시계열 비교를 실시한 결과, 관측치의 경향성을 잘 재현함(<그림-14>).





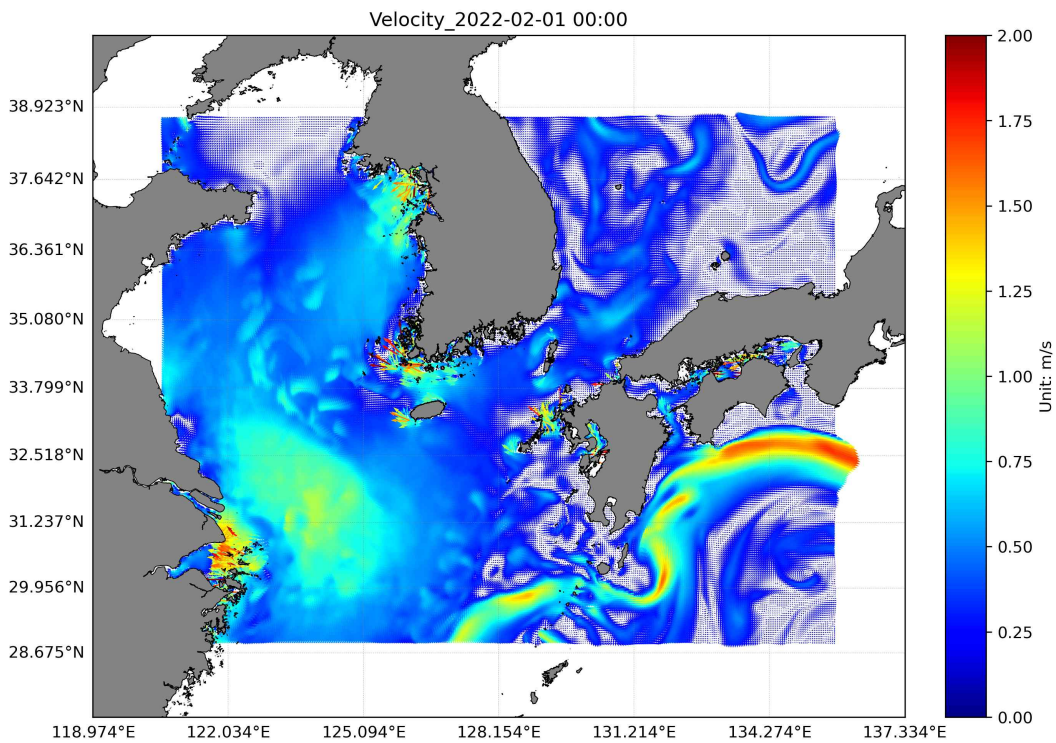
<그림-14> 유속 시계열 비교

- 모델결과와 관측자료 간의 정량적 비교를 위해 1시간 간격의 자료를 통계·분석하여 상관계수(R), 결정계수( $R^2$ ) 및 평균제곱근오차(RMSE)를 계산하고 검토하였음. 국립해양조사원 해양관측부이 6개 정점과 검토한 결과, 전체 정점 유속의 평균 상관계수는 0.56, 결정계수는 0.38, 평균제곱근오차는 0.18m/s로 나타남. 모델 분석결과, 서해, 남해의 유속 재현은 비교적 높은 상관관계를 나타내었으나, 동해의 유속은 낮은 상관관계가 나타났는데 이는 장기간 누락된 결측자료와 데이터의 품질 문제, 모델의 격자해상도(1/24°)에 기인한 것으로 분석됨(<표-6>). 이에, 예측모델 유속결과를 이용한 데이터 표출 및 연계, 타 연구에 이용 시 본 검증결과를 충분히 검토 후 사용해야 할 것으로 판단됨



<표-6> 유속결과 재현성 평가

관측정점	RMSE(m/s)	R	R <sup>2</sup>
경인항	0.25	0.80	0.64
대한해협	0.21	0.55	0.31
속초해수욕장	0.14	0.22	0.05
울릉도북서	0.19	0.23	0.05
제주해협	0.16	0.69	0.47
태안항	0.15	0.87	0.75
전체 평균 평균제곱근오차(m/s)	0.18		
전체 평균 상관계수	0.56		
전체 평균 결정계수	0.38		



<그림-15> 해양모델 유속분포도 예

## 3. 수온

- 2022년 해양정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 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. 수온검토 개요는 <표-7>에 제시하였으며, 수온검증 정점도는 <그림-16>과 같음

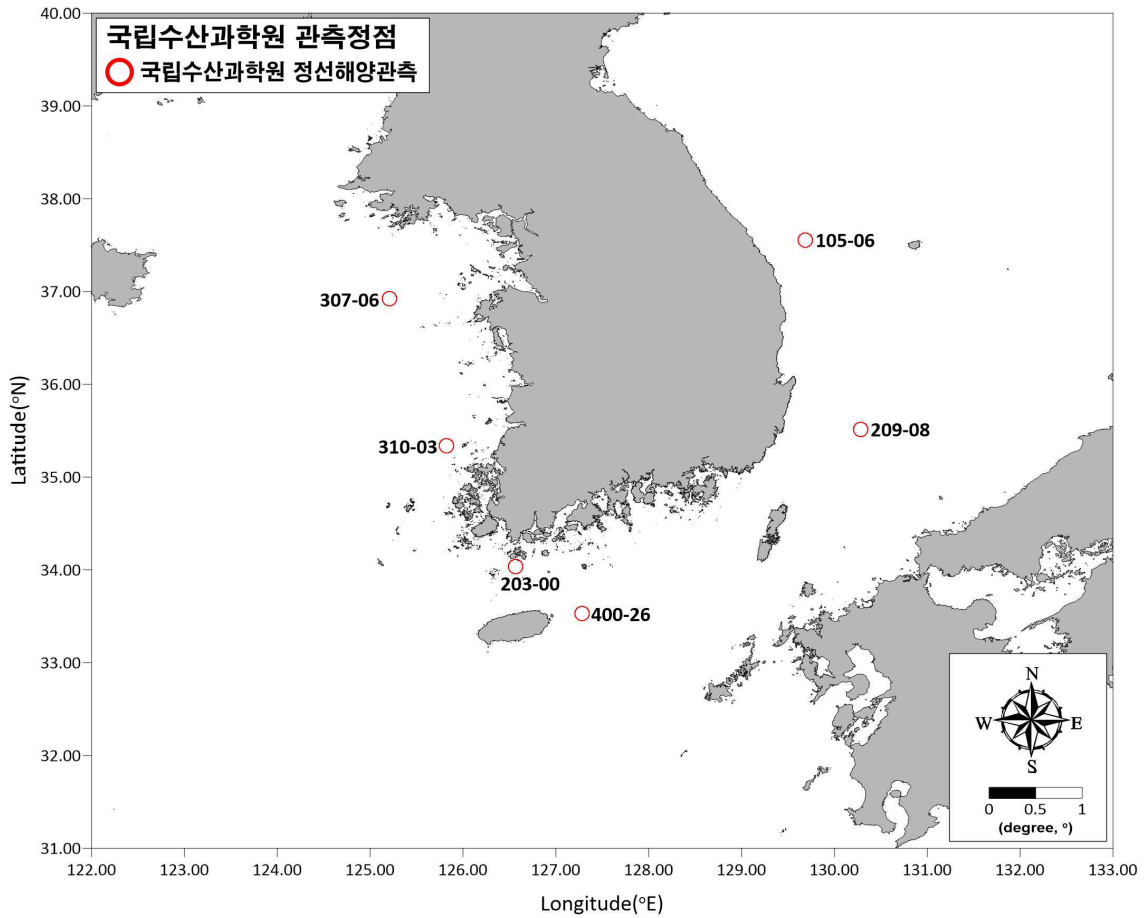
&lt;표-7&gt; 수온결과 검토 개요

구 분	내 용
사용모델	MOHID(1/24°)
비교방법	정성검증(시계열 비교), 정량검증(RMSE, R, R <sup>2</sup> )
관측자료	국립수산과학원 정선해양관측정점 6개 정점 (105-06, 203-00, 209-08, 307-06, 313-03, 400-26)
기 간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

※ RMSE : Root Mean Square Error(평균제곱근오차)

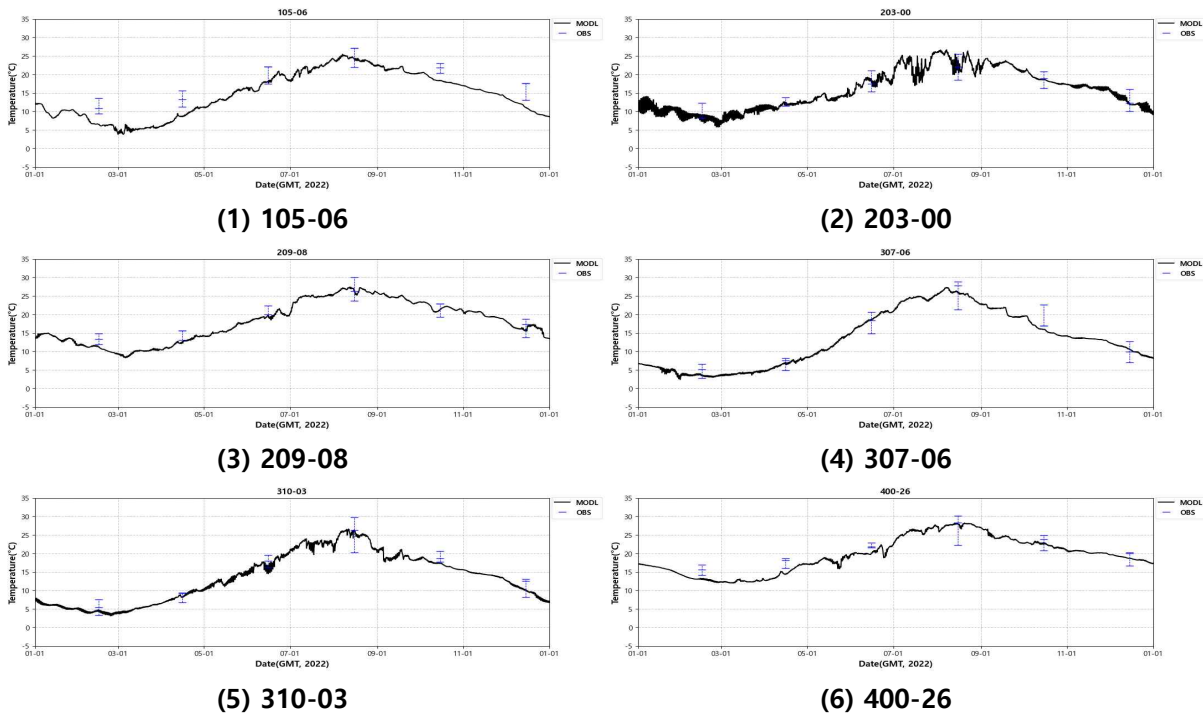
※ R : Coefficient of correlation(상관계수)

※ R2 : Coefficient of determination(결정계수)



<그림-16> 수온검증 정점도

- 2022년 해양정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료 간의 수온 시계열 비교를 실시한 결과, 관측치의 경향성을 잘 재현함. 2012년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 10년간의 관측자료에서 관측월 기준 최대, 최소값을 산출하여 시계열에 반영함으로써 모델결과의 재현성과 신뢰도를 높임(<그림-17>).

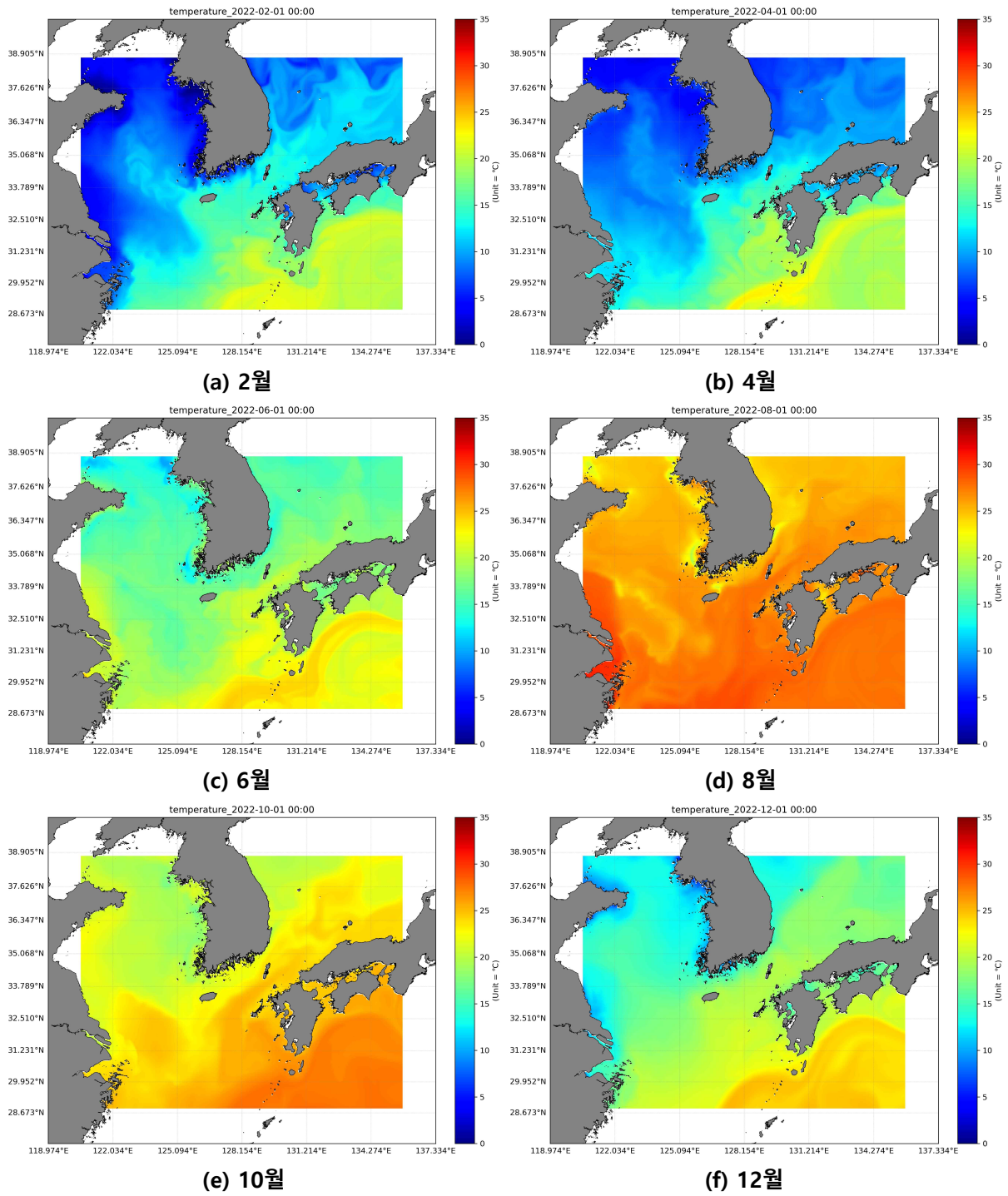


<그림-17> 수온 시계열 비교

○ 모델결과와 관측자료 간의 정량적 비교를 위해 상관계수(R), 결정계수( $R^2$ ) 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 1.96°C로 모델결과는 관측치와 높은 상관관계를 나타냄(<표-8>).

<표-8> 수온결과 재현성 평가

관측정점	RMSE(°C)	R	$R^2$
105-06	4.50	0.99	0.98
203-00	0.45	1.00	0.99
209-08	2.02	0.99	0.99
307-06	1.14	0.99	0.99
310-03	1.55	1.00	0.99
400-26	2.08	0.99	0.99
전체 평균 평균제곱근오차(°C)		1.96	
전체 평균 상관계수		0.99	
전체 평균 결정계수		0.99	



<그림-18> 해양모델 수온분포도 예

## 4. 염분

- 2022년 해양정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료(국립수산과학원 정선해양관측정점 6개) 간의 정성검증 및 정량검증을 통해 생산된 결과의 정확도를 검토하였음. 검증에 사용된 모델결과의 시간간격은 1시간 간격, 정선해양관측자료는 연 6회(2월, 4월, 6월, 8월, 12월) 관측한 자료를 이용함. 염분검토 개요는 <표-9>에 제시하였으며, 염분검증 정점도는 <그림-19>와 같음

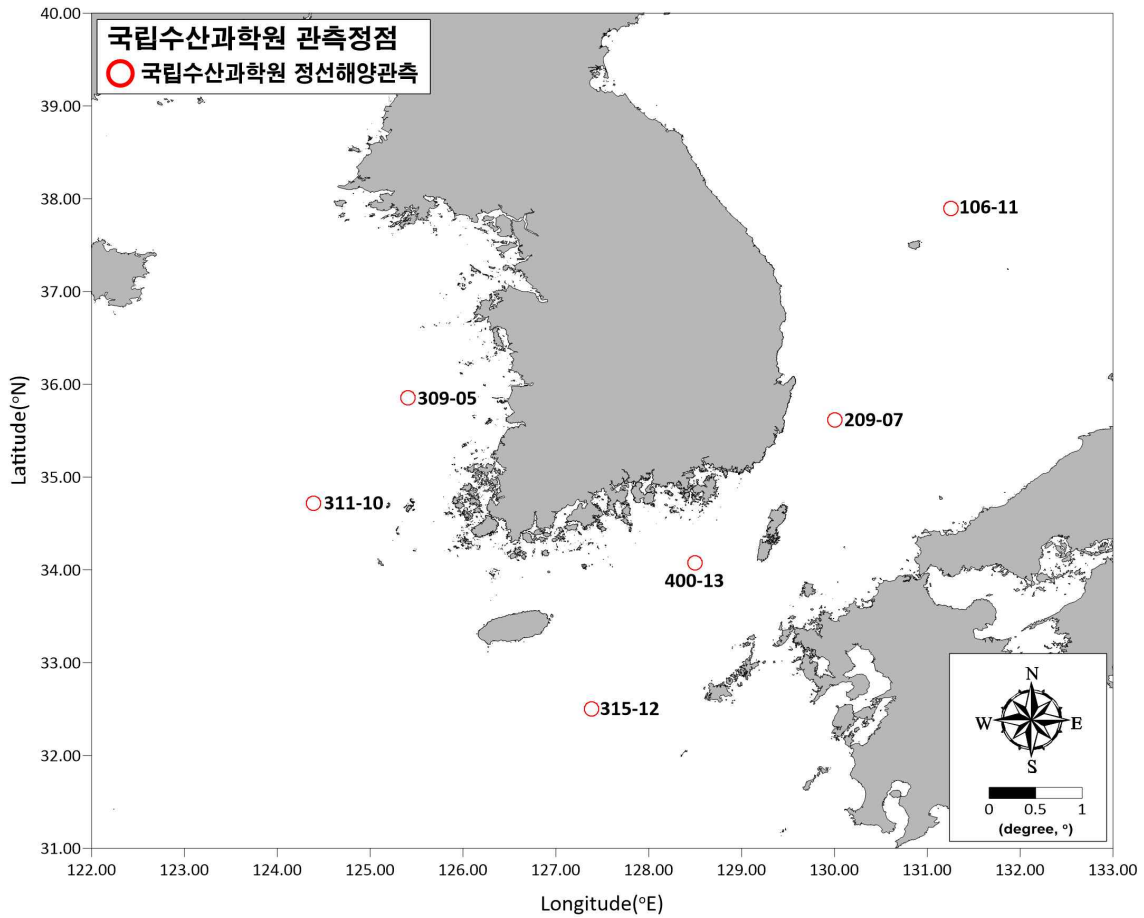
&lt;표-9&gt; 염분결과 검토 개요

구분	내용
사용모델	MOHID(1/24°)
비교방법	정성검증(시계열 비교), 정량검증(RMSE, R, R <sup>2</sup> )
관측자료	국립수산과학원 정선해양관측정점 6개 정점 (106-11, 209-07, 309-05, 311-10, 315-12, 400-13)
기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

※ RMSE : Root Mean Square Error(평균제곱근오차)

※ R : Coefficient of correlation(상관계수)

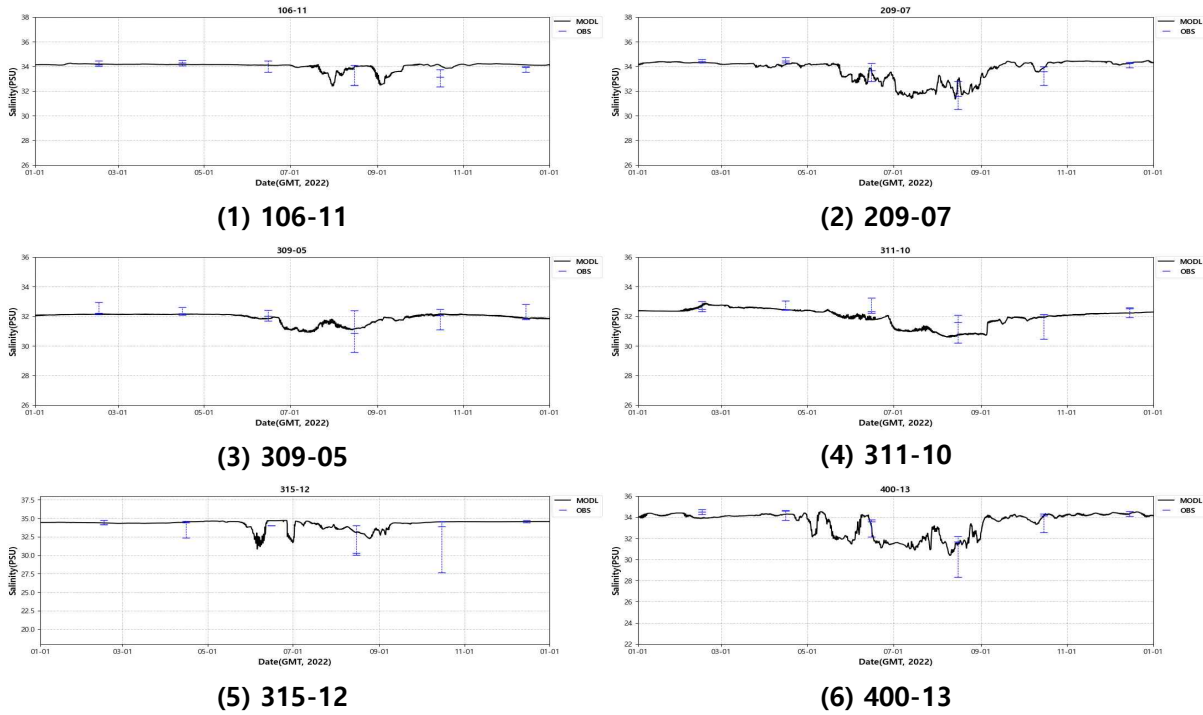
※ R2 : Coefficient of determination(결정계수)



<그림-19> 염분검증 정점도

- 2022년 해황정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료 간의 염분 시계열 비교를 실시한 결과, 관측치의 경향성을 잘 재현함. 2012년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 10년간의 관측자료에서 관측월 기준 최대, 최소값을 산출하여 시계열에 반영함으로써 모델결과의 재현성과 신뢰도를 높임(<그림20>).





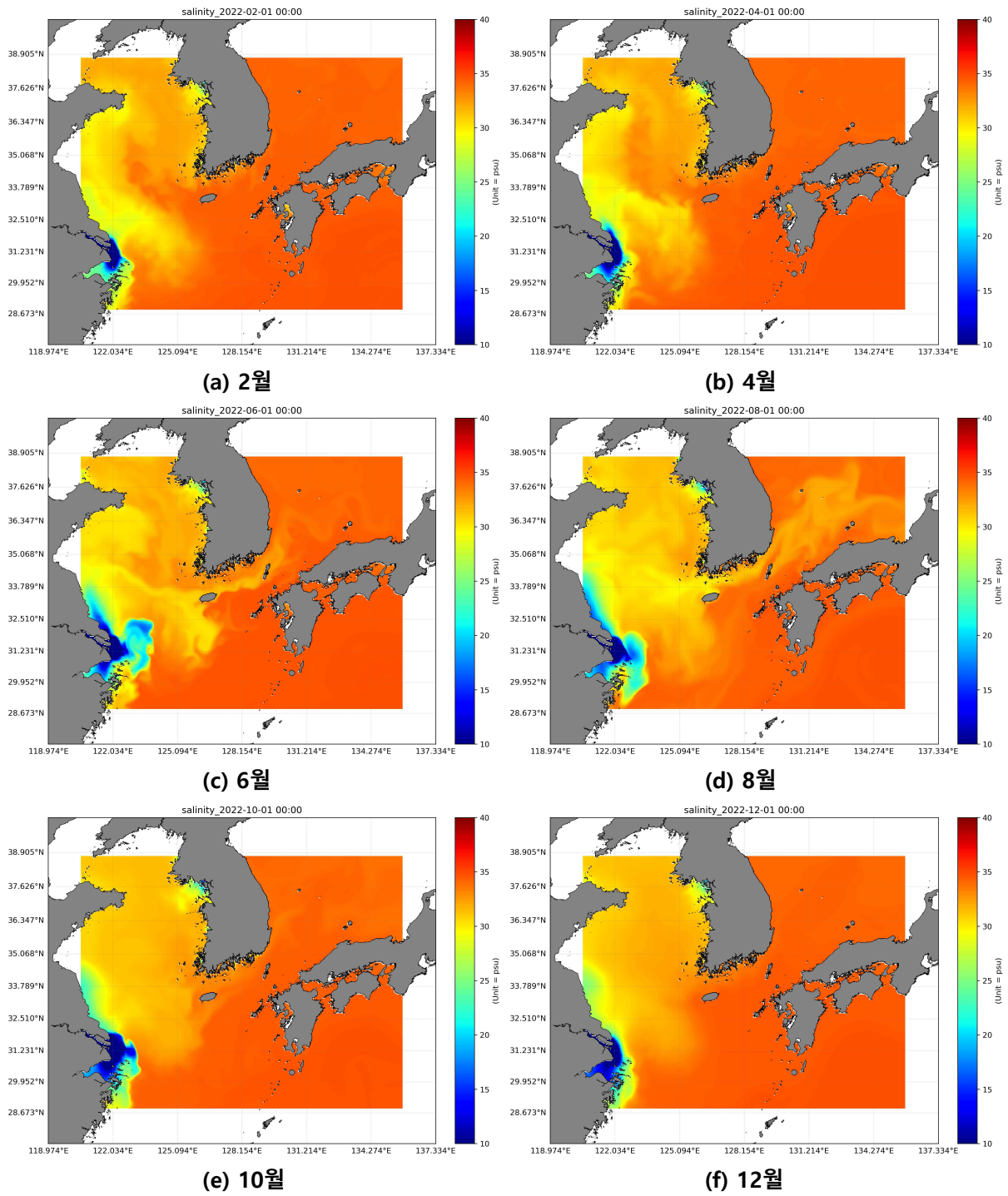
<그림-20> 염분 시계열 비교

○ 모델결과와 관측자료 간의 정량적 비교를 위해 상관계수(R), 결정계수( $R^2$ ) 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 염분의 평균 상관계수는 0.97, 결정계수는 0.94, 평균제곱근오차는 0.61PSU로 모델결과는 관측치와 높은 상관관계를 나타냄(<표-10>).

<표-10> 염분결과 재현성 평가

관측정점	RMSE(PSU)	R	$R^2$
106-11	0.78	0.96	0.92
209-07	0.45	0.98	0.96
309-05	0.15	0.97	0.94
311-10	0.44	0.94	0.89
315-12	1.42	0.99	0.98
400-13	0.39	0.98	0.96
전체 평균 평균제곱근오차(PSU)	0.61		
전체 평균 상관계수	0.97		
전체 평균 결정계수	0.94		





<그림-21> 해양모델 염분분포도 예

## IV. 기상정보 생산

### 4.1. 모델 개요

- 기상정보 생산을 위하여 차세대 기상모델 WRF(Weather Research & Forecasting) version 4.5 모델을 사용함
- WRF 모델은 1970년대 초반 미국 국립기상연구소 NCAR(National Center for Atmospheric Research)와 국립환경예측센터 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 공동으로 개발한 모델로 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 산하 단체 NCEP과 AFWA(Air Force Weather Agency)에서 현업기상모델로 사용되고 있음
- WRF 모델은 Arakawa-C 격자체계를 사용하며, 연직 격자로는 Eulerian 질량좌표계를 사용함(순고은, 2014).
- 수치계는 3차 Runge Kutta split-explicit 시간적분을 사용하여 이류항에 대해서 6차 중심차분법을 도입하였고, 플럭스 형태의 진단 방정식을 사용하여 질량, 운동량, 엔트로피, 스칼라양을 보존함
- WRF의 기본적인 구성은 전처리 과정인 WPS(WRF Preprocessing System)와 모델을 수행하는 WRF로 구성되어 있으며, WPS는 3단계로 구성되어 있음. 먼저 지형 및 토지피복도 등의 지형경계자료 생성을 위한 GEOGRID는 예측하고자하는 대상 영역을 설정하는 단계이며, UNGRIB은 초기 추정 입력값으로부터 등기압면의 기상자료를 생성함. 마지막 단계인 METGRID는 GEOGRID에 의해 생성된 모델 격자에 UNGRIB을 통해 정리된 기상장을 METGRID.TBL을 사용하여 일정한 등기압면의 수평 격자점 자료로 내삽하는 과정을 통해 전처리가 수행됨
- WRF는 2단계로 구성되어있으며, 먼저 WRF의 전처리 단계인 REAL은 WPS에서 생성된 자료를 이용하여 진단적 계산과 연직적인 내삽과정을 통하여 자료의 재구성 등의 작업을 수행함. REAL 작업으로부터 WRF의 초기값과 경계조건의 입력자료가 생성되면 WRF에서 생성된 자료를 수치적분하여 기상상태를 모사함

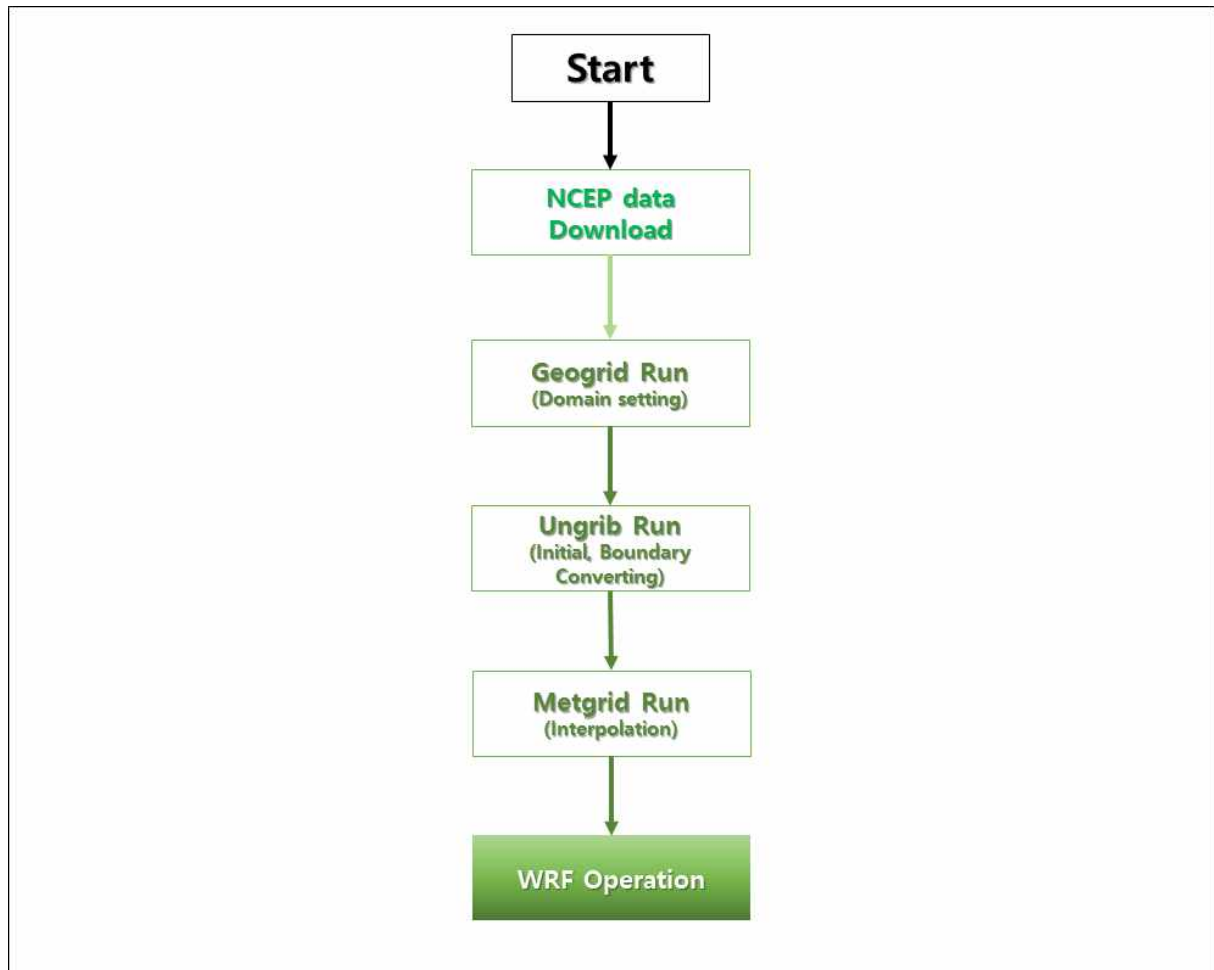
## 4.2. 모델 구축

### 1. 수립개요

- 2022년 해황정보 중 풍속 정보생산에 필요한 기상모델을 수립하고 수행하였으며, 기상모델 수립 개요를 <표-11>에 제시함

<표-11> 기상모델 수립 개요

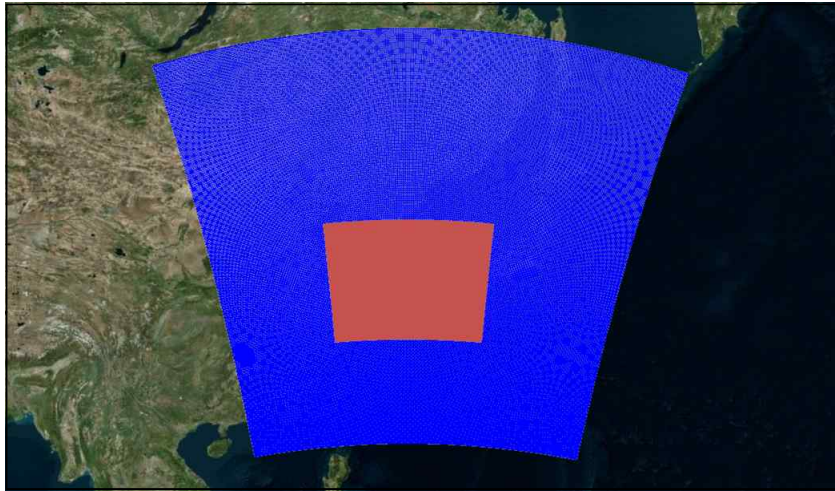
항 목		설 명
수립목적		- 2022년 해황정보 생산 중 풍속 정보 생산을 위한 기상모델 수립
사용모델		- WRF(Weather Research & Forecasting) version 4.5 모델
모델구성	계산영역	* 위도 : 18.4°N ~ 50.1°N * 경도 : 113.2°E ~ 155.0°E
	격자해상도	- 수평 : 9 km - 수직 : 32층
입력조건	광역기상장	NCEP-FNL 0.25° 6시간 간격 기상장
	수치표고자료	NOAA 2010 수치지형(30초 격자)
	모의기간	- 2022년 1월 1일 ~ 2022년 12월 31일
생산자료		- 풍속(Wind Speed)
생산주기		- 1시간 간격 / UTC
좌표계		- WGS 84(EPGS: 4326)



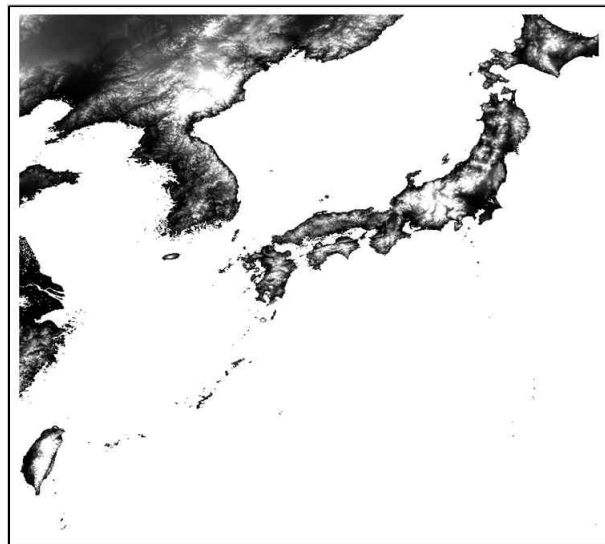
<그림-22> 기상모델 수행 흐름도

1) 격자체계

- 계산에 사용된 격자수는 수평적으로 159,900개(390×410)이고, 9 km 해상도의 격자를 사용하였으며, 수직적으로는 32개 층으로 구성됨(<그림-23>).



<그림-23> 기상모델의 격자망 예(파란색 : 9km)

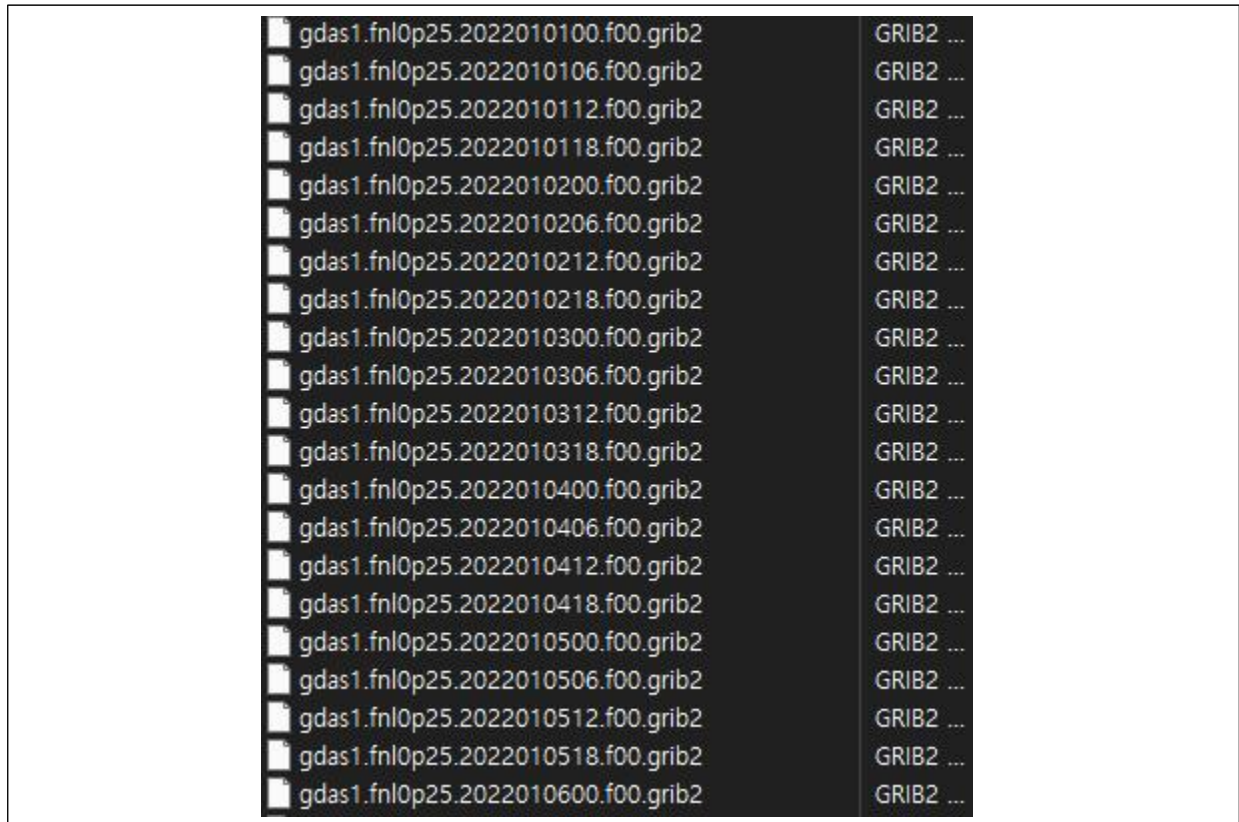


<그림-24> 수치표면모델(Digital Surface Model, DSM) 예

2) 전지구 기상재분석장(NCEP-FNL)

- 기상장 모의에 필요한 입력 기상자료는 National Centers for Environmental Prediction(NCEP)의 Final(FNL) 전지구 재분석자료를 사용하였음. 입력자료 생성을 위해 1년간 자료 수집을 실시하였으며, 수집자료 파일 포맷형태는 GRIB2형태로 제공됨
- 이 자료는 바람, 기온, 습도 지면기압과 토양 수분 등의 자료를 포함하여 전지구를 0.25°의 해상도로 나누어 6시간 간격으로 제공되고 26개 층의 연직층을 포함함

- GRIB2 파일 포맷으로 수집된 FNL자료는 WRF모델의 WPS 수행 시 모델 영역에 맞춰 내삽과정을 진행하며, 해당과정을 통해 모델에 입력자료 형태로 변환됨



<그림-25> 전지구 기상재분석장 수집 데이터 예



gdas1.fn10p25.2022010100.f00.grib2	gdas1.fn10p25.2022010100.f00.grib2	Local File
● Absolute_vorticity_isobaric	Absolute vorticity @ Isobaric surface	Geo2D
● altitude_above_msl	Specific altitude above mean sea level	1D
● altitude_above_msl1	Specific altitude above mean sea level	—
● Apparent_temperature_height...	Apparent temperature @ Specified heigh...	Geo2D
● Best_4_layer_Lifted_Index_sur...	Best (4 layer) Lifted Index @ Ground or ...	Geo2D
● Categorical_Freezing_Rain_su...	Categorical Freezing Rain @ Ground or ...	Geo2D
● Categorical_Ice_Pellets_surfac...	Categorical Ice Pellets @ Ground or wat...	Geo2D
● Categorical_Rain_surface	Categorical Rain @ Ground or water surf...	Geo2D
● Categorical_Snow_surface	Categorical Snow @ Ground or water su...	Geo2D
● Cloud_mixing_ratio_hybrid	Cloud mixing ratio @ Hybrid level	Geo2D
● Cloud_mixing_ratio_isobaric	Cloud mixing ratio @ Isobaric surface	Geo2D
● Cloud_water_entire_atmospha...	Cloud water @ Entire atmosphere layer	Geo2D
● Composite_reflectivity_entire...	Composite reflectivity @ Entire atmosph...	Geo2D
● Convective_available_potentia...	Convective available potential energy @ ...	Geo2D
● Convective_available_potentia...	Convective available potential energy @ ...	Geo2D
● Convective_inhibition_pressur...	Convective inhibition @ Level at specific...	Geo2D
● Convective_inhibition_surfac...	Convective inhibition @ Ground or water...	Geo2D
● depth_below_surface_layer	Depth below land surface	1D
● depth_below_surface_layer_b...	bounds for depth below surface layer	2D
● Dewpoint_temperature_height...	Dewpoint temperature @ Specified heigh...	Geo2D
● Field_Capacity_surface	Field Capacity @ Ground or water surface	Geo2D
● Frictional_Velocity_surface	Frictional Velocity @ Ground or water su...	Geo2D
● Geopotential_height_cloud_cel...	Geopotential height @ Cloud ceiling	Geo2D
● Geopotential_height_highest_tr...	Geopotential height @ Highest troposphe...	Geo2D
● Geopotential_height_isobaric	Geopotential height @ Isobaric surface	Geo2D
● Geopotential_height_maximu...	Geopotential height @ Maximum wind le...	Geo2D
● Geopotential_height_potential...	Geopotential height @ Potential vorticity ...	Geo2D
● Geopotential_height_surface	Geopotential height @ Ground or water s...	Geo2D
● Geopotential_height_tropopause	Geopotential height @ Tropopause	Geo2D
● Geopotential_height_zeroDeg...	Geopotential height @ Level of 0°C isoth...	Geo2D
● Graupel_snow_pellets_hybrid	Graupel (snow pellets) @ Hybrid level	Geo2D
● Graupel_snow_pellets_isobaric	Graupel (snow pellets) @ Isobaric surface	Geo2D
● Haines_index_surface	Haines index @ Ground or water surface	Geo2D
● height_above_ground	Specified height level above ground	—
● height_above_ground1	Specified height level above ground	1D
● height_above_ground2	Specified height level above ground	1D
● height_above_ground3	Specified height level above ground	1D
● height_above_ground4	Specified height level above ground	—
● height_above_ground5	Specified height level above ground	1D
● height_above_ground_layer	Specified height level above ground	—
● height_above_ground_layer1	Specified height level above ground	—

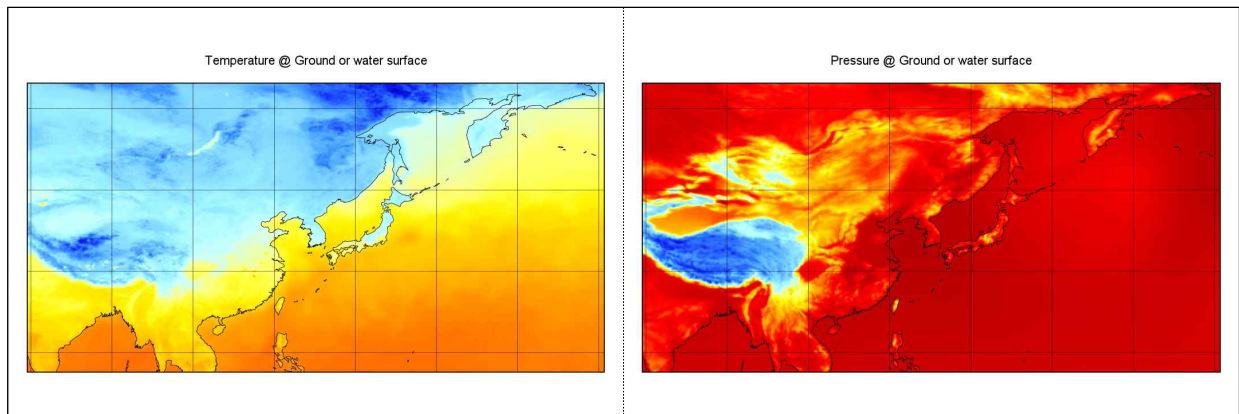
**File "gdas1.fn10p25.2022010100.f00.grib2"**

File type: GRIB2 Collection

```

netcdf file:/F:/2023project/해양수산부/해수부_공동활용체계/01_Model/gdas1.fn10p25.2022010100.f00.grib2 {
  dimensions:
    lon = 1440;
    lat = 721;
    reftime = 1;
    time = 1;
    height_above_ground = 1;
    pressure_difference_layer = 1;
    height_above_ground1 = 2;
    altitude_above_msl = 3;
    altitude_above_msl1 = 1;
    isobaric = 41;
    height_above_ground_layer1 = 1;
    height_above_ground_layer1 = 1;
    pressure_difference_layer1 = 3;
    pressure_difference_layer2 = 1;
    height_above_ground2 = 7;
    sigma_layer = 4;
    depth_below_surface_layer = 4;
    height_above_ground3 = 3;
    isobaric1 = 22;
    height_above_ground4 = 1;
    height_above_ground5 = 2;
    potential_vorticity_surface = 2;
    sigma = 1;
    hybrid = 1;
    hybrid1 = 2;
  variables:
    int LatLon_Projection;
    :grid_mapping_name = "latitude_longitude";
    :earth_radius = 6371229.0; // double
        
```

<그림-26> 전지구 기상재분석장 데이터 구조



<그림-27> 전지구 기상재분석장 데이터 가시화 예

## 2. 초기 및 경계조건

### 1) 초기조건

- 기상모델의 초기조건은 계산영역을 '0'으로 하는 cold start를 부여하였음
- 기상장 초기조건은 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 NCEP 재분석자료를 이용하여 0.25° 기상재분석 결과(풍속, 기온, 습도 등)를 입력함

### 2) 경계조건

- 모델의 경계조건은 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 6시간 간격, 수평해상도 0.25° 간격의 NCEP-NCEP의 기상장(풍속, 기온, 습도 등)을 기반으로 대상영역에 내삽하여 WRF(Weather Research & Forecasting) version 4.5 모델을 수행함

## 3. 모의기간 및 계산시간 간격

- 2022년 해황정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 기간이며, 모델의 계산시간 간격은 Adaptive Time step을 사용하여 최소 시간간격 18초, 최대 시간간격 135초로 기상모델을 수행함
- 계산시간의 효율성을 위해 OpenMP를 적용하였으며, 1일 예측시간은 CPU(Intel(R) Xeon(R) Gold 6248R CPU @ 3.00GHz) 1개, Thread 40개 적용 시 약 90분 소요됨

## 4.3. 모델결과 검토

### 1. 풍속

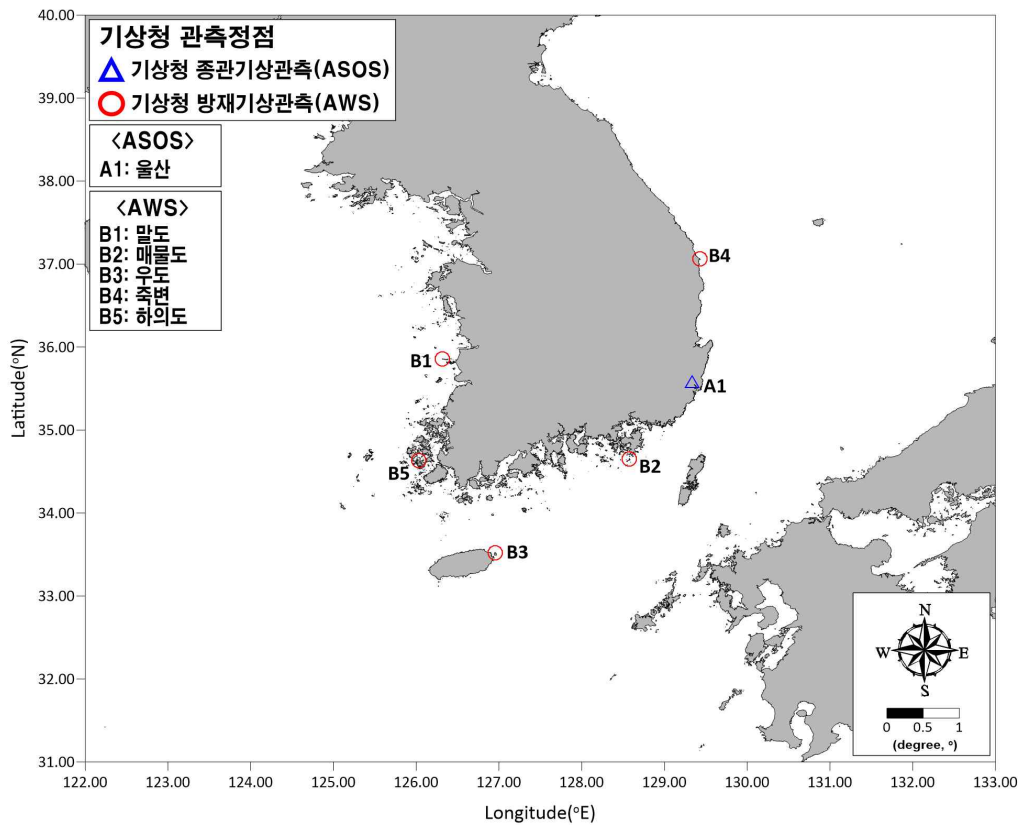
- 2022년 해황정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료(기상청 종관기상관측, 방재기상관측 6개 정점) 간의 정성검증 및 정량검증을 통해 생산된 결과의 정확도를 검토하였음. 검증에 사용된 모델결과와 관측자료는 3시간 간격의 이동평균 방법을 적용하여 도출하였고, 시간 간격은 1시간 간격임



<표-12> 풍속결과 검토 개요

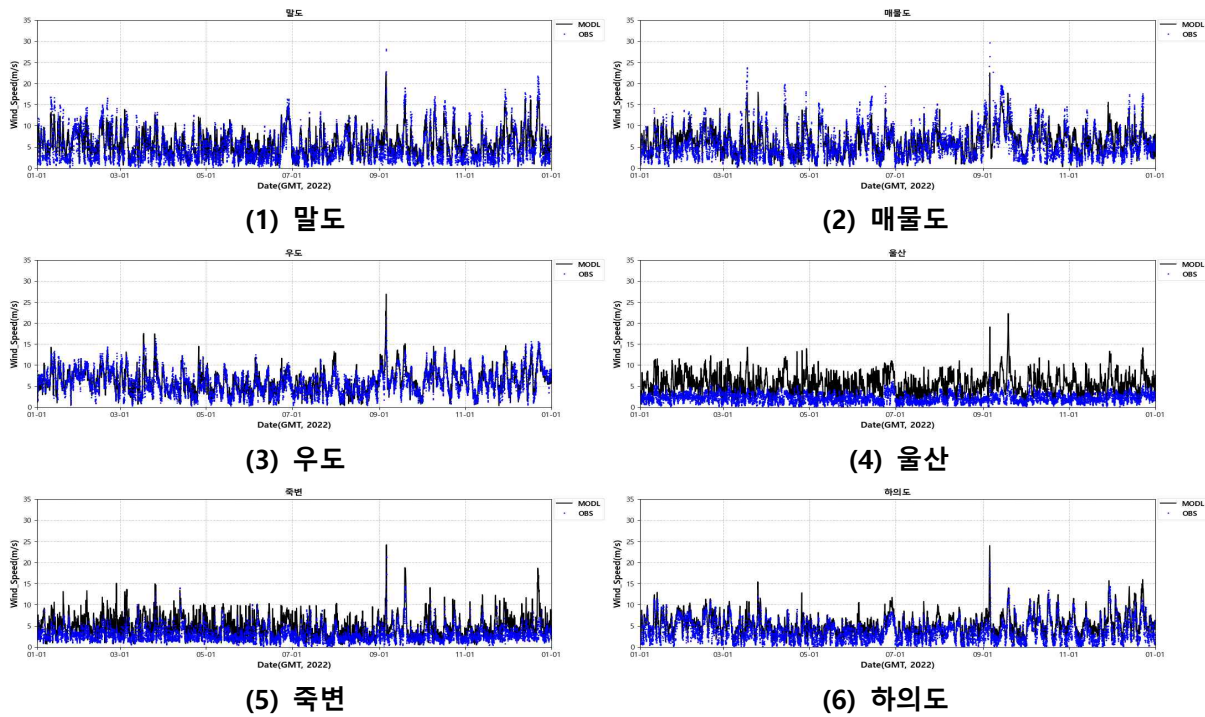
구분	내용
사용모델	WRF(9km)
비교방법	정성검증(시계열 비교), 정량검증(RMSE, R, R <sup>2</sup> )
관측자료	기상청 종관기상관측 1개 정점, 방재기상관측 5개 정점 (말도, 매물도, 우도, 죽변, 하의도)
기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

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



<그림-28> 풍속검증 정점도

○ 2022년 해양정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료 간의 풍속 시계열 비교를 실시한 결과, 관측치의 경향성을 잘 재현함(<그림-29>).

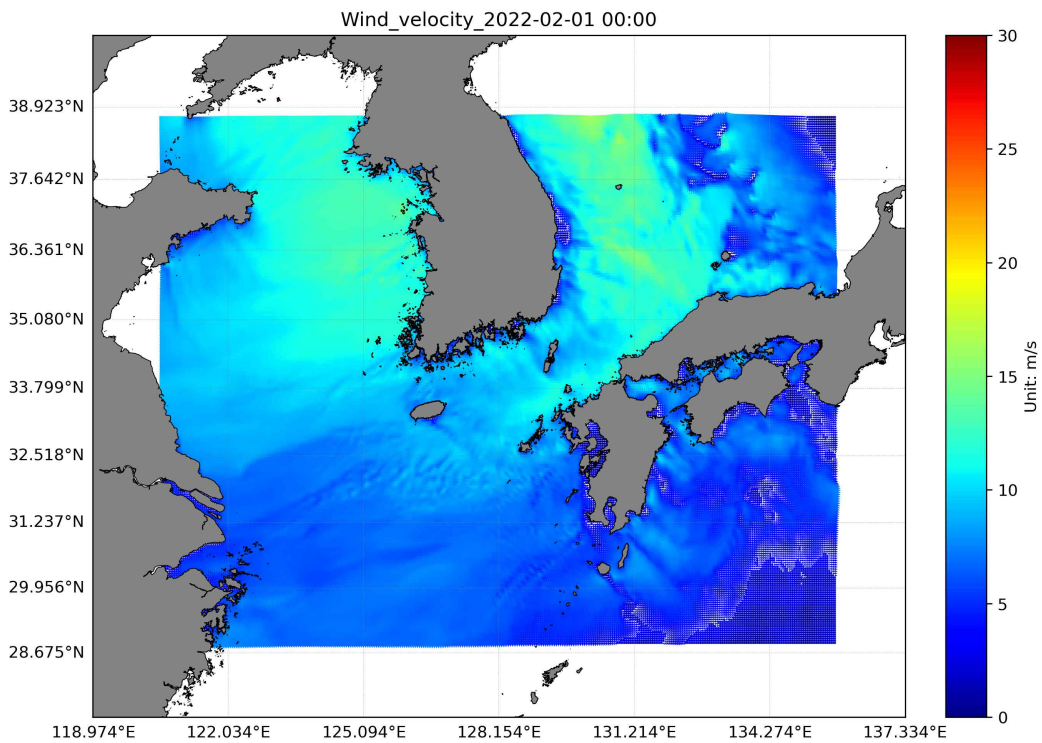


<그림-29> 풍속 시계열 비교

- 모델결과와 관측자료 간의 정량적 비교를 위해 1시간 간격의 자료를 통계·분석하여 상관계수(R), 결정계수( $R^2$ ) 및 평균제곱근오차(RMSE)를 계산하고 검토하였음. 기상청 종관기상관측, 방재기상관측 6개 정점과 검토한 결과, 전체 정점 풍속의 평균 상관계수는 0.77, 결정계수는 0.59, 평균 제곱근오차는 2.49m/s로 모델결과는 관측치와 높은 상관관계를 나타냄(<표-13>).

<표-13> 풍속결과 재현성 평가

관측정점	RMSE(m/s)	R	R <sup>2</sup>
말도	2.27	0.82	0.67
매물도	2.41	0.76	0.58
우도	1.57	0.86	0.74
울산	3.91	0.65	0.42
죽변	2.68	0.67	0.45
하의도	2.12	0.84	0.70
전체 평균 평균제곱근오차(m/s)	2.49		
전체 평균 상관계수	0.77		
전체 평균 결정계수	0.59		



<그림-30> 기상모델 풍속분포도 예

## V. 파랑정보 생산

### 5.1. 모델 개요

#### 1. 모델의 개요

- 파랑정보 생산에 사용된 SWAN 모델은 네덜란드 델프트(Delft) 대학에서 개발된 제3세대 파랑 모델로 주어진 입사파, 바람, 해저면 및 해류 조건으로부터 연안역, 호수, 하구 등의 파랑을 계산할 수 있는 모델임
- 이 모델의 기본방정식은 파랑작용의 평형방정식(wave action balance equation)이며, 사용되는 파랑에너지의 원천항(source term)에 따라 제 1세대, 제 2세대 및 제 3세대 모델로 분류함. 또한, SWAN 모델은 기본적으로 구조(structured)격자와 비구조(unstructured)격자를 선택하여 사용할 수 있으며, WAM, WAVEWATCH III 및 광역의 SWAN 모델 결과를 바로 네스팅(nesting)하여 사용지역에 적용할 수 있는 장점을 가짐
- SWAN 모델에서 고려되는 파랑의 전파과정(propagation process)은 다음과 같음
  - 공간 좌표상의 전파과정
  - 수심과 해류의 공간변화에 따른 굴절(refraction)
  - 회절(diffraction)
  - 수심과 해류의 공간변화에 따른 천수(shoaling)
  - 반대 방향 흐름에 의한 파의 블록킹(blocking)과 반사(reflection)와 구조물에 의한 파의 투과(transmission) 또는 구조물에 의한 반사
- SWAN 모델에서 고려되는 파랑의 생성(generation)과 소산(dissipation) 과정은 다음과 같음
  - 바람에 의한 생성
  - 백파(whitecapping)에 의한 파의 소산
  - 수심 변화로 유발되는 쇄파(wave breaking)에 의한 파의 소산
  - 저면 마찰(bottom friction)에 의한 파의 소산
  - 심해 및 천해역 모두에서 파의 상호작용(wave-wave interaction)에 의한 파의 소산
- 이상의 과정 이외에도 평균 해상에서의 wave-induced set-up을 계산할 수 있음
- SWAN 모델에서 파랑은 2차원 작용 스펙트럼으로 표현됨. 강한 비선형 조건에서도 스펙트럼을 사용하는 이유는 스펙트럼이 비선형 조건의 파랑을 통계적으로 충분히 서술할 수는 없지만, 파랑의 2차 모멘트 스펙트럼 분포는 예측이 가능하기 때문임. 여기서 고려되는 스펙트럼은 에너지 밀도 스펙트럼(energy density spectrum)  $E(\sigma, \theta)$ 가 아니고 작용 밀도 스펙트럼(action density spectrum)  $N(\sigma, \theta)$ 를 의미함. 흐름이 존재하는 경우 작용 밀도(action density)는 보존되지만 에너지 밀도(energy density)는 보존되지 않기 때문에 작용이 에너지 보다는 일반화된 물리량임. 작용 밀도 스펙트럼과 에너지 밀도 스펙트럼의 관계는 다음과 같음

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

여기서,  $\sigma$ 는 각주파수(intrinsic angular frequency)로 절대 각주파수(absolute angular frequency)  $\omega$ 와 다음과 같은 관계를 가짐

$$\omega = \sigma + \vec{K} \cdot \vec{U}$$

여기서,  $\vec{K}$ 와  $\vec{U}$ 는 각각 파수와 유속 벡터임

## 2. 작용평형방정식

○ 파랑 스펙트럼의 발달은 작용평형 방정식에 의하여 기술됨

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

○ 위 식에서 좌변의 제 1항은 작용 밀도의 시간 변화량, 제 2항과 제 3항은 지리적 공간에서의 작용의 전파, 제 4항은 수심과 흐름의 변화에 의한 상대주파수의 천이, 그리고 제 5항은 수심과 흐름에 의한 굴절을 나타냄. 선형파 이론에 의한 파랑의 전파속도는 아래와 같음

$$c_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x$$

$$c_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla d \right] - c_g \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{K} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right]$$

여기서,  $s$ 와  $m$ 은 각각 파향선(wave ray)과 파향선에 수직인 좌표를 의미함. 다음의 파랑 평형방정식의 우변은 원천항(source and dissipation)을 나타내며 이는 파랑의 생성, 소산 및 비선형상호작용에 의한 에너지 전달을 포함함

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$$

여기서,  $S_{in}$ 은 바람에 의한 에너지 유입,  $S_{ds}$ 는 파랑에너지의 소산,  $S_{nl}$ 은 비선형 파랑 상호작용을 나타냄

## 3. 바람에 의한 에너지 유입

- SWAN 모델에서 바람에 의한 파랑의 생성은 다음 식으로 표현함

$$S_{\in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta)$$

여기서,  $A$ 는 선형파의 성장을,  $BE$ 는 파의 지수적 성장을 의미함. SWAN 모델에서 풍속,  $U_{10}$ 은 10m 고도의 값이며, 모델에 적용되는 마찰속도(friction velocity)는 다음과 같이 정의됨

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2$$

여기서,  $C_D$ 는 마찰계수(drag coefficient)로 다음과 같이 정의됨(Wu, 1982).

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} < 7.5 \text{ m/s} \\ (0.8 + 0.06 \text{ s/m} \times U_{10}) \times 10^{-3} & \text{for } U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s} \end{cases}$$

- 바람에 의한 파의 선형 성장을 계산하는  $A$ 는 Phillips(1957)에 의한 공진 기구를 반영하는 것으로, Pierson-Moskowitz(PM) 주파수보다 낮은 저주파의 성장을 제한하기 위해 Cavaleri & Malanotte-Rizzoli(1981)의 식을 사용함(Tolman, 1992).

$$A = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{g^2 2\pi} [U_* \max(0, \cos(\theta - \theta_w))]^4 H$$

$$H = \exp(-(\sigma/\sigma_{PM}^*)^{-4}) \quad \text{with} \quad \sigma_{PM}^* = \frac{0.13g}{28U_*} 2\pi$$

- 여기서,  $\theta_w$ 는 풍향,  $H$ 는 필터,  $\sigma_{PM}^*$ 는 Pierson & Moskowitz에 따른 완전발달 해상상태(fully developed sea state)상에서의 첨두주파수(peak frequency)임. 한편,  $B$ 는 Miles(1957)의 전단기구를 나타내며 SWAN 모델에서는 Komen et al.(1984)의 식과 Janssen(1991)의 식 중에서 선택할 수 있음. Komen et al.(1984)의 식은 Snyder et al.(1981)의 식에 근거를 두고 있으며 다음 식으로 나타낼 수 있음

$$B = \max \left[ 0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( 28 \frac{U_*}{C_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right] \sigma$$

- 여기서,  $C_{ph}$ 는 위상속도(phase speed),  $\rho_a$ 와  $\rho_w$ 는 각각 공기와 해수의 밀도임. 이 식은 WAM 모델에서 채택되고 있는 식으로 Janssen(1991)은 경계층 효과와 해면의 조도에 의한 바람과 파랑의 상호작용을 고려하여 다음과 같이 계산함

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left( \frac{U_*}{C_{ph}} \right) \max [0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \sigma$$

여기서,  $\beta$ 는 Miles상수로서 무차원 임계고( $\lambda$ )를 사용하여 다음 식으로 계산됨

$$\beta = \frac{1.2}{\kappa^2} \lambda \ln^4 \lambda a \quad \text{for } \lambda \leq 1$$

$$\lambda = \frac{gz_e}{C_{ph}^2} e^r, \quad r = \kappa c / |U_* \cos(\theta - \theta_w)|$$

여기서,  $\kappa$  는 Von Karman 상수로서 0.41을 취하며  $z_e$  는 해면의 유효조도임

○ 풍속의 분포를

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left[ \frac{z + z_e - z_o}{z_e} \right]$$

로 간주하면 유효 조도길이는 다음 식으로 계산됨

$$z_e = \frac{z_o}{\sqrt{1 - \frac{\tau_w}{\tau}}}$$

여기서,  $\tau$  는 총응력(total stress)이며 조도길이는 다음의 관계식으로부터 주어짐

$$z_o = \hat{\alpha} \frac{U_*^2}{g}$$

여기서,  $\hat{\alpha} = 0.01$  이며, 파랑 응력(wave stress)은 다음과 같이 계산됨

$$\vec{\tau}_w = \rho_w \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sigma BE(\sigma, \theta) \frac{\vec{k}}{k} d\sigma d\theta$$

○ SWAN 모델에서는 위에서 언급한 일련의 식과  $z = 10\text{m}$  상에서의 풍속  $U_{10}$  을 사용하여 반복법으로 B를 계산함

#### 4. 백파에 의한 에너지 소산

○ 심해 파랑의 계산에 있어 백파(whitecapping)는 가장 이해가 어려운 자연현상임 제 3세대 SWAN 모델에서는 Hasselmann(1974)이 제안한 표면 펄스 모델(surface pulse model)을 응용함. 이 모형에 포함된 계수는 심해에서 충분히 발달된 파랑(fully arisen seas)의 에너지 평형을 고려하여 계산되므로 백파 모형의 계수 결정은 바람 입력항의 계산법에 의존하게 됨. 유한수심에 적용하기 위해 파수항을 재정의하면 다음과 같음

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma} \frac{k}{k}(\sigma, \theta)$$

$$\Gamma = \Gamma_{KJ} = C_{ds} \left( (1 - \delta) + \delta \frac{k}{k} \right) \left( \frac{\tilde{s}}{\tilde{s}_{PM}} \right)^P$$

여기서,  $\tilde{\sigma}$ ,  $\tilde{k}$  는 평균주파수와 평균파수이며,  $\Gamma$  는 파형경사에 따른 계수임.  $\tilde{s}$  는 파형경사(overall wave steepness)이고,  $\tilde{s}_{PM}$  은 PM 스펙트럼에 대한  $\tilde{s}$  값임. 또한, 평균 파형경사  $\tilde{s}$  는

$$\tilde{s} = \tilde{k} \sqrt{E_{tot}}$$

로 정의됨.  $\tilde{\sigma}$  와  $\tilde{k}$  와 총파랑에너지,  $E_{tot}$  는 각각 다음과 같이 정의됨

$$\tilde{\sigma} = \left( E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-1}$$

$$\tilde{k} = \left( E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-2}$$

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

- SWAN 모델은 두 가지 형태의 바람 계산식을 가지므로, 앞의 식에 적용되는 계수들도 두 가지의 형태를 가짐. Komea et al.(1984) 식의 적용 시에는

$$C_{ds} = 2.36 \times 10^{-5}, \quad \delta = 0, \quad P = 4$$

가 적용되며, Janssen(1991) 식의 적용 시에는

$$C_{ds} = 4.10 \times 10^{-5}, \quad \delta = 0.5, \quad P = 4$$

가 적용됨. 이 상수들은 Komen et al.(1984)와 Janssen(1991)이 이상적인 파랑 성장 조건하에서의 에너지 균형을 고려하여 얻은 것임

## 5. 저면에 의한 에너지 소산

- 저면에서 에너지 소산은 저면마찰(bottom friction), 저면운동(bottom motion), 침투(percolation) 및 불규칙 저면상의 산란(bottom scattering) 등에 의하여 발생함(Shemdin et al., 1978). 모래로 구성된 대륙붕에서의 에너지 소산은 주로 마찰 때문에 발생함. JONSWAP 실험에서 스펙트럼 파랑 모델에 사용할 수 있는 마찰 소산식을 유도하였는데(Hasselmann et al., 1973) 이 식은 선형 모델로서 마찰계수의 선택이 적당한 경우 여러 조건 특히 너울과 폭풍에 대해서 좋은 결과를 도출하였음
- SWAN 모델은 JONSWAP의 경험적 선형 모형(Hasselmann et al., 1973), Collins(1972)의 항력마찰 모형, Madsen et al.(1988)의 와점성 모형을 적용하여 저면 마찰을 계산하며, 이들 식은 모두 다음의 식으로 표현할 수 있음

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta)$$

여기서,  $C_{bottom}$  은 저면 마찰계수로서 일반적으로  $U_{rms}$  로 정의되는 저면에서의 궤도 운동(bottom orbital motion)에 영향을 받음

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$



- JONSWAP에서 사용된 경험적인 선형 모형에서는  $C_{bottom} = 0.038m^2s^{-3}$  식을 사용하였는데 이 값은 너울에 대해서도 적용할 수 있음. 일반적으로 저면마찰 계수는 파랑조건(wave condition)에 의존하지만, Bouws and Komen(1983)이 풍파에 대해서 제안한  $C_{bottom} = 0.067m^2s^{-3}$  식은 많은 경우에서 유효한 것으로 보고된 바 있음. Collins(1972)의 항력마찰 모형에서는 다음과 같은 식이 유도됨

$$C_{bottom} = C_f g U_{rms}$$

여기서,  $C_f = 0.015$  (Collins,1972)이며, Madsen et al.(1988)의 와점성 모형에서는 다음 식을 사용함

$$C_{bottom} = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms}$$

여기서,  $f_w$  는 Jonsson(1966) 공식으로부터 구해지는 무차원 마찰계수임

$$\frac{1}{\sqrt[4]{f_w}} + \log_{10} \left[ \frac{1}{\sqrt[4]{f_w}} \right] = m_f + \log_{10} \left[ \frac{a_b}{K_N} \right]$$

여기서,  $m_f = -0.08$  (Jonsson and Carlsen, 1976)이며  $a_b$  는 저면 부근에서 수립자 운동의 진폭 (excursion amplitude)이고  $K_N$  은 저면의 조도임

$$a_b^2 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

여기서,  $a_b/K_N$  가 1.57 보다 작으면 무차원 마찰계수는  $f_w = 0.30$ 으로 적용함(Johnson, 1980).

## 6. 쇄파에 의한 에너지 소산

- 임의 파랑장(random wave)에서 수심에 의하여 발생하는 쇄파에 의한 파랑 에너지 소산의 계산에는 단파(bore) 모형이 적용됨(Battjes and Janssen, 1978). 쇄파에 의한 단위면적당 평균에너지 소산율(mean rate of energy dissipation,  $D_{tot}$ )은 다음과 같이 정의됨

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left( \frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) H_m^2 = -\alpha_{BJ} Q_b \tilde{\sigma} \frac{H_{max}^2}{8\pi}$$

여기서,  $\alpha_{BJ} = 1$  임. 또한,  $Q_b$  는 쇄파로 다음의 식으로 계산됨

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2}$$

여기서,  $H_m$  은 주어진 수심에서의 최대파고이며,  $\tilde{\sigma}$  는 평균주파수로 다음과 같이 계산됨

$$\tilde{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sigma E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

- 쇄파 소산의 스펙트럼 분포 특성을 Battjes and Beji(1992)와 Vincent et al.(1994)의 실험으로부터

유추해 보면 쇄파가 파랑 스펙트럼의 형상에는 영향을 주지 않는 것으로 판단됨. 이러한 사실에 근거하여 Eldeberky and Battjes(1996)는 파랑 스펙트럼에 비례하는 쇄파 소산 공식을 도출하였으며 이것이 SWAN 모델에서 사용되는 쇄파 소산 공식임

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) = \frac{\alpha_{BJ} Q_b \tilde{\sigma}}{\beta^2 \pi} E(\sigma, \theta)$$

- SWAN 모델에서 최대파고  $H_m = \gamma d$  로 계산되며, 여기서,  $\gamma$ 는 쇄파계수이고,  $d$ 는 총 수심임

#### 7. 4파 비선형상호작용

- 심해에서 4파 비선형상호작용(또는 제3차 비선형상호작용, quadruplet wave-wave interactions)효과는 스펙트럼의 첨두주파수를 저주파쪽으로 이동시키는 것임. 이 현상은 약비선형으로서 수학적인 방정식은 Hasselmann(1960)에 의하여 제안되었음. 4파 비선형상호작용을 엄밀하게 계산하는 데는 매우 많은 계산시간이 소요되므로 WAM 모델에서는 이산 상호작용 근사법(DIA, discrete interaction approximation)을 사용하고 있으며 SWAN 모델도 이 방법을 그대로 도입하였음. 이 근사법은 무수히 많은 4파 상호작용 배치 중에서 가장 영향이 큰 하나의 배치만을 고려하는 것임(실제로는 이 배치에 대한 경상[mirror symmetrical]도 고려하므로 총 배치수는 2개임). 배치에 포함된 4파의 주파수는 다음과 같음

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma, \quad \sigma_3 = \sigma(1 + \lambda) = \sigma^+, \quad \sigma_4 = \sigma(1 - \lambda) = \sigma^-$$

여기서,  $\lambda = 0.25$  임. 첫 번째 배치에서 두 개의 파수 벡터는 동일함. 반면에 다른 두 파는 각각 상대적으로  $\theta_3 = 11.5^\circ$ ,  $\theta_4 = -33.6^\circ$ 의 각도를 가짐. 한편, 두 번째 배치에서는  $\theta_3 = -11.5^\circ$ ,  $\theta_4 = 33.6^\circ$ 가 됨. 심해에서의 이산 상호작용 근사는 다음과 같이 나타낼 수 있음

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)$$

- 위 식 우변의 제 1항은 제 1배치에 의한 비선형상호작용이며 제 2항은 제 2배치(제 1배치의 경상 배치)에 의한 비선형상호작용으로 아래와 같이 계산됨

$$S_{nl4}^*(\sigma, \theta) = 2\delta S_{nl4}(\alpha_1\sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_2\sigma, \theta) - \delta S_{nl4}(\alpha_3\sigma, \theta)$$

여기서,  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = (1 + \lambda)$ ,  $\alpha_3 = (1 - \lambda)$ 이며, 각 항은 다음과 같이 계산됨( $i = 1, 2, 3$ ).

$$\begin{aligned} & \delta S_{nl4}(\alpha_i\sigma, \theta) \\ &= C_{nl4} (2\pi)^2 g^{-4} \left( \frac{\sigma}{2\pi} \right)^{11} \left[ E^2(\alpha_i\sigma, \theta) \left\{ E \frac{(\alpha_i\sigma^+, \theta)}{(1+\lambda)^4} + \frac{E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1-\lambda)^4} \right\} - 2 \frac{E(\alpha_i\sigma, \theta) E(\alpha_i\sigma^+, \theta) E(\alpha_i\sigma^-, \theta)}{(1-\lambda^2)^4} \right] \end{aligned}$$

여기서,  $C_{nl4} = 3 \times 10^7$  임

- 한편,  $S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)$ 는 위 식에 상대 파향을 대입하여 계산할 수 있음. Hasselmann and Hasselmann(1981)은 JONSWAP, 스펙트럼에 대하여 천해에서의 4파 상호작용을 정밀하게 계산하였음. 이들은 천해에서의 상호작용을 심해파에 대한 값으로 표현하는 아래와 같은 공식을 도출하여 WAM 모델에 도입하였으며 SWAN 모델에서도 같은 방법으로 천해에서의 4파 상호작용

을 고려함

$$S_{nl4,finite\ depth} = R(k_P d) S_{nl4,infinite\ water}$$

여기서,  $R$ 은

$$R(k_P d) = 1 + \frac{C_{sh1}}{k_P d} (1 - C_{sh2} \cdot k_P d) \exp(C_{sh3} - k_P d)$$

로 정의되며,  $k_P$ 는 JONSWAP 스펙트럼의 첨두 파수이고  $d$ 는 수심임. 또한,  $C_{sh1} = 5.5$ ,  $C_{sh2} = 6/7$ ,  $C_{sh3} = -1.25$ 로 주어짐

### 8. 3파 비선형상호작용

- 파장과 파고에 비하여 수심이 얇아지게 되면 3파 비선형상호작용(또는 제2차 비선형상호작용, triad interactions)의 영향을 무시할 수 없게 됨. 3파 비선형 상호작용은 파랑의 에너지를 저주파 영역에서 고주파 영역으로 이동시킴. 3파 비선형상호작용에 의해서 생성되는 저주파 영역은 SWAN 모델에서는 고려하지 않음. Eldeberky(1996)는 3파 비선형 상호작용을 계산하기 위한 LTA(Lumped Triad Approximation)라고 하는 근사법을 제안하였으나, 본 모델에서는 이를 다소 변형한 Eldeberky & Battjes(1995)의 DTA(Discrete Triad Approximation)방법을 채택하였음

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta)$$

$$S_{nl3}^+ = \max \left\{ 0, \alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 \mid \sin(\beta) \mid \left[ E^2\left(\frac{\sigma}{2}, \theta\right) - 2E\left(\frac{\sigma}{2}, \theta\right) E(\sigma, \theta) \right] \right\}$$

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(2\sigma, \theta)$$

여기서,  $\alpha_{EB}$ 는 조정가능 비례상수이고,  $\beta$  (biphase)는 다음과 같이 정의됨

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh \left[ \frac{0.2}{Ur} \right]$$

그리고,  $Ur$  (Ursell number)은 다음과 같이 주어짐

$$U_\gamma = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s \bar{T}^2}{d^2}, \quad \bar{T} = \frac{2\pi}{\sigma}$$

또한, 상호작용계수  $J$ 는 다음과 같이 정의됨(Madsen & Sorensen, 1993).

$$J = \frac{k_{\sigma/2}^2 (gd + 2c_{\sigma/2}^2)}{k_\sigma d \left( gd + \frac{2}{15} gd^3 k_\sigma^2 - \frac{2}{5} \sigma^2 d^2 \right)}$$

한편, 3파 비선형 상호작용은  $0.1 < U_\gamma < 10$ 인 경우에만 계산함

## 9. 회절현상

- SWAN 모델에서 회절은 Holthuijsen et al.(2003)이 제안한 위상-분리 굴절-회절 근사 (phase-decoupled refraction-diffraction approximation)을 적용함. 이 근사는 위상 정보를 제거한 굴절과 회절에 대한 완경사방정식(mild-slope equation)에 기초함. 가장 간단한 경우에 흐름이 없다고 가정을 하면( $C_r = 0$ ) 수심과 공간상에서 회절이 없는 곳의 전달 속도는 다음과 같이 표현할 수 있음

$$C_{X,0} = \frac{\partial \omega}{\partial \kappa} \cos(\theta) \quad , \quad C_{Y,0} = \frac{\partial \omega}{\partial \kappa} \sin(\theta) \quad , \quad C_{\theta,0} = -\frac{1}{\kappa} \frac{\partial \omega}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial n}$$

여기서,  $\kappa$ 는 파수이고, 아이코날(Eikonal) 방정식에 따라  $K^2 = \kappa^2(1 + \delta)$ 임.  $\delta$ 는 회절에 대한 변수로 다음과 같음

$$\delta = \frac{\nabla \cdot (CC_g \nabla H_s)}{CC_g H_s}$$

여기서,  $E(x,y)$ 는 파랑장의 총에너지( $\sim H_s^2$ )이며, 회절에 의한 전파속도는 다음과 같이 정의됨

$$C_X = C_{X,0} \bar{\delta}, \quad C_Y = C_{Y,0} \bar{\delta}, \quad C_\theta = C_{\theta,0} \bar{\delta} - \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial x} C_{y,0} + \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial y} C_{x,0}$$

여기서,  $\bar{\delta} = \sqrt{1 + \delta}$ 임

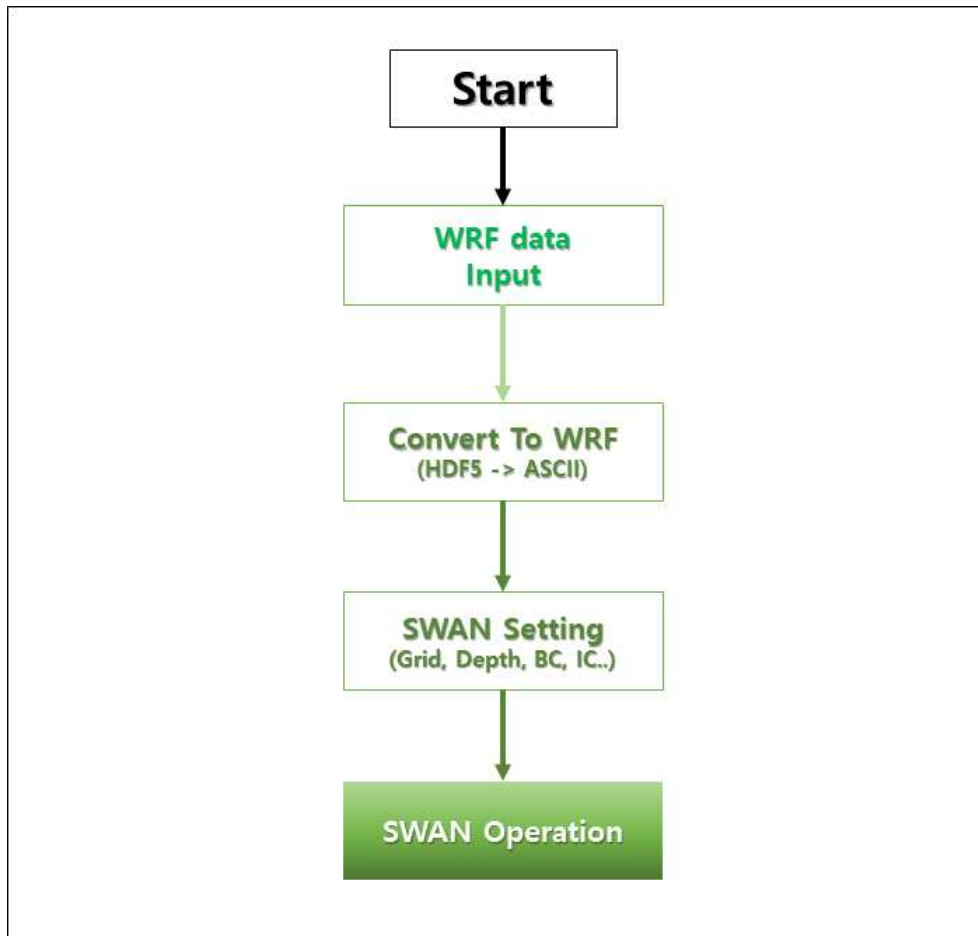
## 5.2. 모델 구축

### 1. 수립 개요

- 2022년 해황정보 중 파고 정보생산에 필요한 파랑모델을 수립하고 수행하였으며, 파랑모델 수립 개요를 <표-14>에 제시함

&lt;표-14&gt; 파랑모델 수립 개요

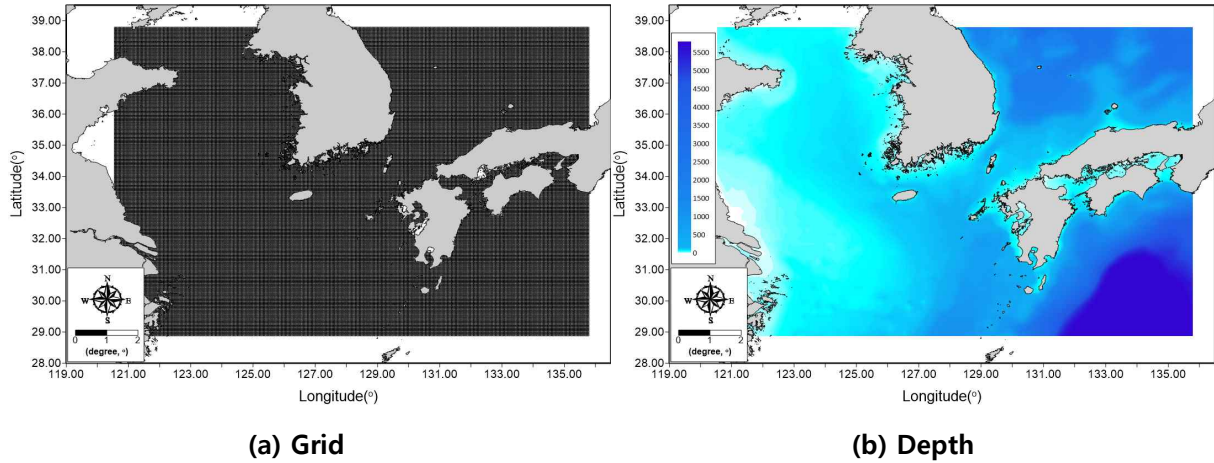
항 목		설 명
수립목적		- 2022년 해황정보 생산 중 파고 정보 생산을 위한 파랑모델 수립
사용모델		- SWAN Cycle III version 41.45
모델구성	계산영역	- 위도 : 28.7°N ~ 39.0°N - 경도 : 120.3°E ~ 136.0°E
	격자구성	- 직교 격자체계(1/24°, 약 4.6 km)
입력조건	기상조건	- WRF 모델 결과(풍속, 풍향)
	모의기간	- 2022년 1월 1일 ~ 2022년 12월 31일
생산자료		- 파고(Wave Height)
생산주기		- 1시간 간격 / UTC
좌표계		- WGS 84(EPSSG: 4326)



<그림-31> 파랑모델 수행 흐름도

#### 1) 격자체계

- 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(<그림-32>).
- 모형의 성분파 분할은 주파수 24개, 방향 24개 성분으로 분할하였고, 방향집중도 매개변수는 풍속과 동시고려임을 감안하여 17,1을 적용함

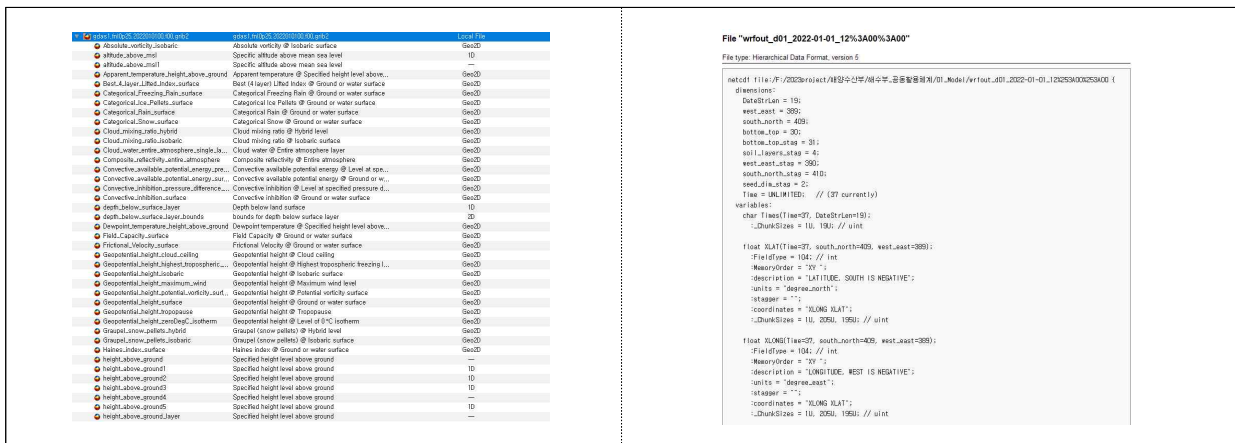


<그림-32> 파랑모델 격자망 및 입력수심

2. 초기 및 경계조건

1) 초기조건

○ 기상 초기조건은 기상예측모델(Weather Research & Forecasting, WRF) 결과를 공간적으로 입력함



<그림-33> 기상모델 결과 데이터 구조

## 2) 경계조건

- 기상 개방경계 조건은 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 NCEP 재분석자료를 이용하여 기상예측모델을 모의하여 예측된 1시간 간격 기상 예측결과 중 풍속(wind velocity)을 파랑모델의 경계조건으로 입력함

## 3. 모의기간 및 계산시간 간격

- 2022년 해황정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 기간이며, 모델의 계산시간 간격은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)의 안정조건에 의거하여 수치해의 안정성을 확보할 수 있도록 30초로 해양모델을 수행함
- 계산시간의 효율성을 위해 OpenMP를 적용하였으며, 1일 예측시간은 CPU(Intel(R) Xeon(R) Gold 6248R CPU @ 3.00GHz) 1개, 40개 Thread 적용 시 약 60분 소요됨

## 5.3. 모델결과 검토

## 1. 파고

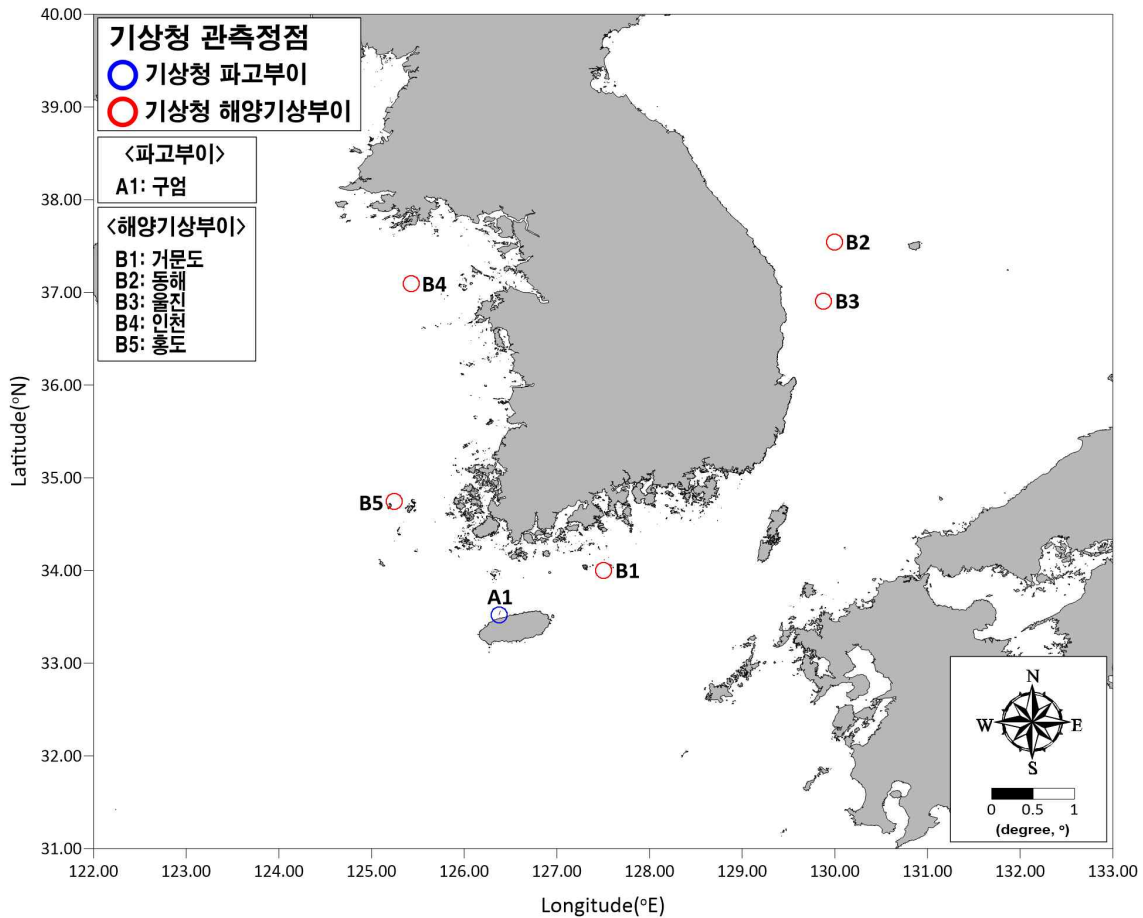
- 2022년 해황정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료(기상청 파고부이, 해양기상부이 6개 정점) 간의 정성검증 및 정량검증을 통해 생산된 결과의 정확도를 검토하였음. 검증에 사용된 모델결과와 관측자료의 시간간격은 1시간 간격임. 파고검토 개요는 <표-15>에 제시하였으며, 파고검증 정점도는 <그림-34>와 같음

&lt;표-15&gt; 파고결과 검토 개요

구분	내용
사용모델	SWAN(1/24°)
비교방법	정성검증(시계열 비교), 정량검증(RMSE, R, R <sup>2</sup> )
관측자료	기상청 파고부이 1개 정점, 해양기상부이 5개 정점 (거문도, 구엄, 동해, 울진, 인천, 홍도)
기간	2022.01.01 ~ 2022.12.31

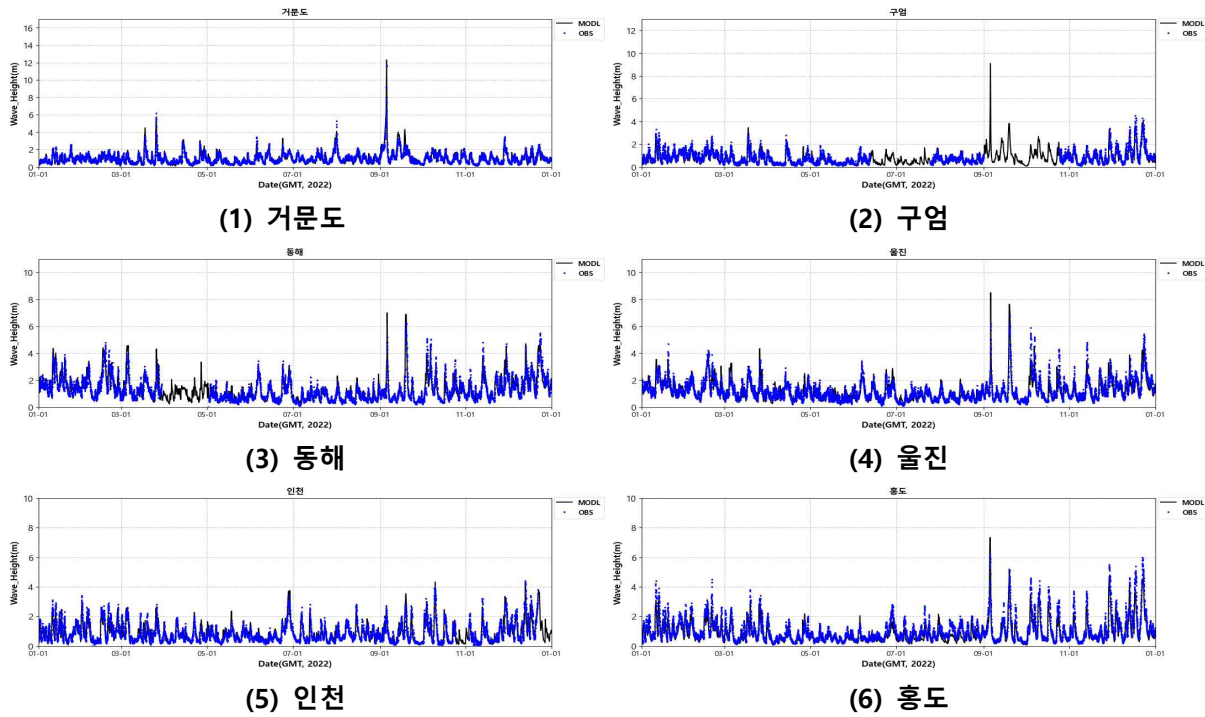


- ※ RMSE : Root Mean Square Error(평균제곱근오차)
- ※ R : Coefficient of correlation(상관계수)
- ※ R2 : Coefficient of determination(결정계수)



<그림-34> 파고검증 정점도

- 2022년 해양정보 생산을 위해 2022년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 1년간의 모델결과와 관측자료 간의 파고 시계열 비교를 실시한 결과, 관측치의 경향성을 잘 재현함(<그림-35>).

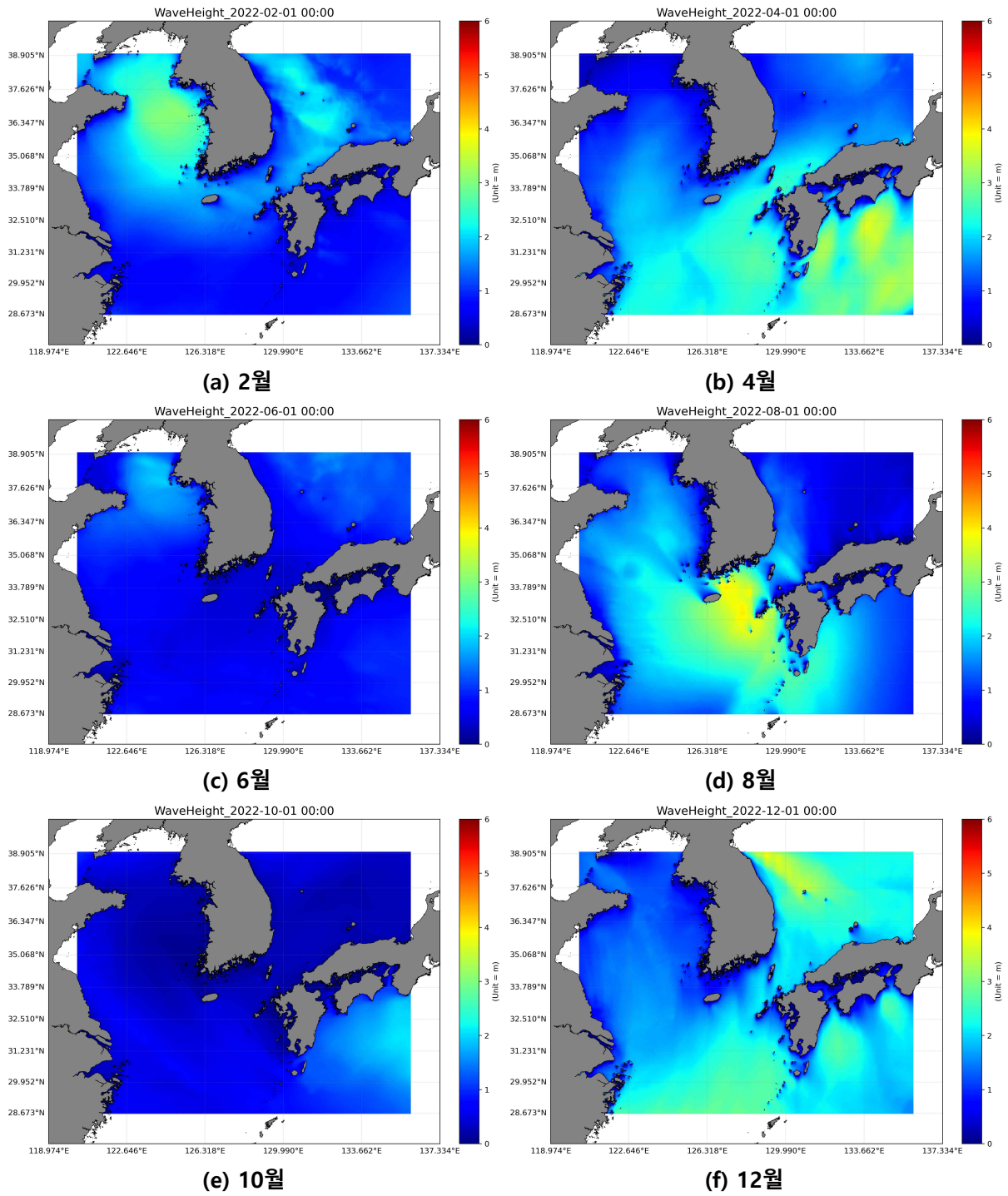


<그림-35> 파고 시계열 비교

○ 모델결과와 관측자료 간의 정량적 비교를 위해 1시간 간격의 자료를 통계 분석하여 상관계수(R), 결정계수(R<sup>2</sup>) 및 평균제곱근오차(RMSE)를 계산하고 검토하였음. 기상청 파고부이, 해양기상부이 6개 정점과 검토한 결과, 전체 정점 파고의 평균 상관계수는 0.92, 결정계수는 0.84, 평균제곱근 오차는 0.32m로 모델결과는 관측치와 높은 상관관계를 나타냄(<표-16>).

<표-16> 파고결과 재현성 평가

관측정점	RMSE(m)	R	R <sup>2</sup>
거문도	0.30	0.92	0.85
구업	0.24	0.93	0.86
동해	0.36	0.92	0.84
울진	0.37	0.89	0.80
인천	0.27	0.91	0.84
홍도	0.38	0.93	0.87
전체 평균 평균제곱근오차(m)	0.32		
전체 평균 상관계수	0.92		
전체 평균 결정계수	0.84		



<그림-36> 파랑모델 파고분포도 예