

2020 해양과학기술협의회 공동학술대회

# RANS 난류모델의 밀도와 부력이 규칙파 생성에 미치는 영향에 관한 연구

부산 BEXCO

2020.07.22

서인덕\*, 정광열\*, 정재환\*\*, 조석규\*\*

\* 넥스트폼(주) 기술연구소

\*\* 선박해양플랜트 연구소

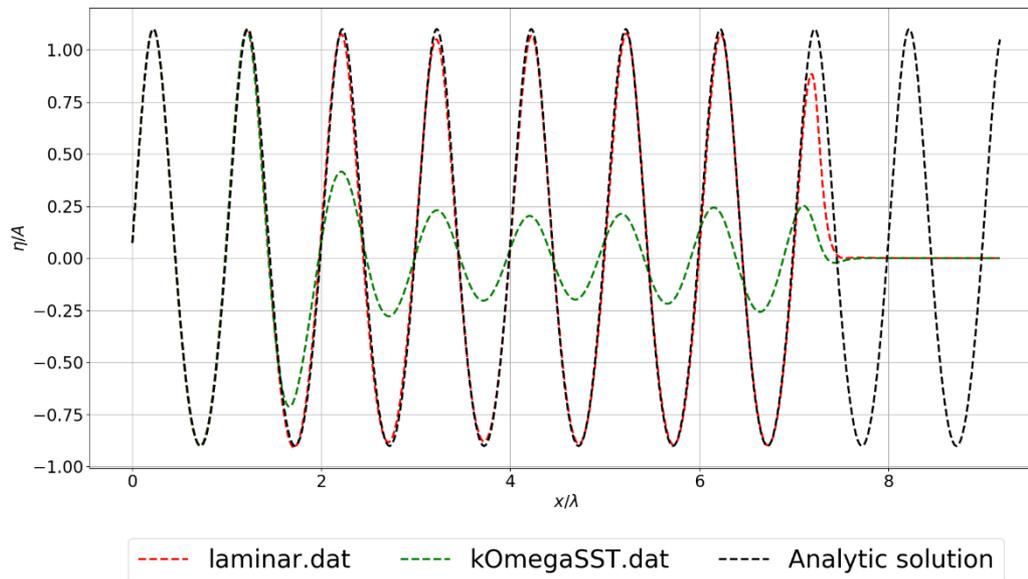
## ■ Contents

1. 서론
2. 수치 해석
3. 해석 조건
4. 해석 결과
5. 결론 및 향후 계획

# 1. 서론

## ✓ 연구 배경

- 해양구조물의 파랑 중 동역학적 특성을 추정하기 위해 CFD 해석이 활용
- Open-source CFD toolkit 중 하나인 OpenFOAM (Open-source Field Operator And Manipulator) 을 활용하여 해양구조물의 파랑 중 동역학적 특성을 해석하는 연구가 많이 진행되고 있음
  - OpenFOAM 을 기반으로 파랑 생성 해석을 수행하기 위해서는 waves2Foam, olaFlow 등 추가적인 라이브러리가 필요
- 선행 연구에 따르면 OpenFOAM을 이용하여 RANS 난류 모델을 고려한 파랑 생성 해석 시 파가 진행하고, 해석 시간이 지날수록 파고가 줄어드는 '파고 감소' 현상이 발생



# 1. 서론

## ✓ 선행 연구

논문 제목	내용
송성진, & 박선호. (2017). 전산유체역학을 이용한 규칙파와 원형 기둥 구조물의 상호작용 해석. Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy-Vol, 20(2), 63-75.	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ waves2Foam 을 이용하여 wave run-up 해석 수행</li><li>▪ 2차원 검증 과정에서 RANS 난류 모델 사용 시 파고 감쇠 효과 확인</li></ul>
Devolder, B., Troch, P., & Rauwoens, P. (2018). Performance of a buoyancy-modified k- $\omega$ and k- $\omega$ SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM®. Coastal Engineering, 138, 49-65.	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ 자유수면 인근에서 난류 운동 에너지의 비 정상적인 확산이 파고 감쇠의 원인으로 추정</li><li>▪ OpenFOAM을 이용하여 다상유동 해석 시 RANS 난류 모델이 'strictly incompressible' 가정이 들어가 있음을 확인</li><li>▪ <b>Density-modified</b> 및 <b>Buoyancy modified</b> 난류 모델을 이용하여 wave breaking 해석 수행 후 비교</li></ul>

## ✓ 연구 목적

- 선행 연구에서 제시한 밀도 및 부력항을 추가한 RANS 난류 모델을 비선형성이 강한 Breaking wave에 대해 적용하여 해석 수행
  - Breaking wave 해석 결과에 뚜렷한 변화가 발생하지 않음
- 선행연구에서 제안한 밀도 및 부력항을 추가한 RANS 난류 모델을 정규파 생성 해석수행 시 미치는 영향을 확인하는 것을 목적으로 한다

## 2. 수치 해석

### ✓ 수치 해석 기법

#### ➤ 지배 방정식

- Continuity equation
- Momentum equation (RANS,  $k - \omega$  SST 난류 모델)
- VoF transport equation

#### ➤ 속도-압력 연성

- PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) algorithm 사용

#### ➤ 이산화 기법

- Temporal scheme: Euler scheme (1<sup>st</sup> order)
  - time step  $\Delta t$  (1/2000 T)
- Gradient scheme: Linear (2<sup>nd</sup> order)
- Convection scheme: 2<sup>nd</sup> order upwind scheme (2<sup>nd</sup> order)
  - 해석 안정성을 위해 limiter 사용
- VoF convection scheme: TVD scheme (vanLeer)
- Interface Compression & MULES (Multi-dimensional Limiter for Explicit Solution)

Discretization scheme	
Temporal scheme	Euler (1 <sup>st</sup> order)
Gradient scheme	Linear (2 <sup>nd</sup> order)
Convection scheme	2 <sup>nd</sup> order upwind (2 <sup>nd</sup> order) with limiter
VoF scheme	TVD scheme (vanLeer) + interface compression & MULES

#### Governing equation

Continuity eqn.:  $\nabla \cdot \vec{u} = 0$

Momentu eqn.:  $\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \{\mu_t [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T]\} + \vec{f}_b$

VOF eqn.:  $\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}) + \nabla \cdot \left( C_\alpha |\vec{u}| \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \alpha (1 - \alpha) \right) = 0$

## 2. 수치 해석

### ✓ VoF (Volume of Fraction) 기법

➤ 다상 유동 해석 시 Liquid 와 gas를 Volume Fraction  $\alpha$  값으로 구분

- $\alpha$  가 1일 경우 liquid, 0일 경우 gas
- $\alpha$  에 대한 수송 방정식을 풀어 liquid 와 gas 상의 분포를 결정
- $\alpha$  수송방정식은 아래와 같이 나타나며 자유수면 인근에서  $\alpha$  값의 비정상적인 확산을 방지하기 위해 compression term이 들어감
- Interface compression method

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}) + \underbrace{\nabla \cdot \left( C_\alpha |\vec{u}| \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \alpha (1 - \alpha) \right)}_{\text{compression term}} = 0$$

- 이 때 compression 정도를 나타내는 parameter인  $C_\alpha$  값에 따라 자유수면의 정도가 달라짐
- 작을 경우: numerical diffusion 발생
- 클 경우: 비 물리적인 oscillation 발생
- OpenFOAM에서는 비 물리적인 oscillation 을 막기 위해 FCT (Flux Corrected Transport) 기법 중 하나인 MULES 기법을 사용

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}) + \underbrace{\nabla \cdot \left( C_\alpha |\vec{u}| \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \alpha (1 - \alpha) \right)}_{\text{compression term}} = 0$$

$$\frac{(\alpha_p)^n - (\alpha_p)^0}{\Delta t} = -\frac{1}{V_p} \sum_f (F_u + \lambda F_C)^0$$

$$F_u = \phi_f \alpha_{f,upwind}$$

$$F_C = \phi_f \alpha_f + \phi_{rf} \alpha_{rf} (1 - \alpha_{rf}) - F_u$$

## 2. 수치 해석

### ✓ 난류 모델

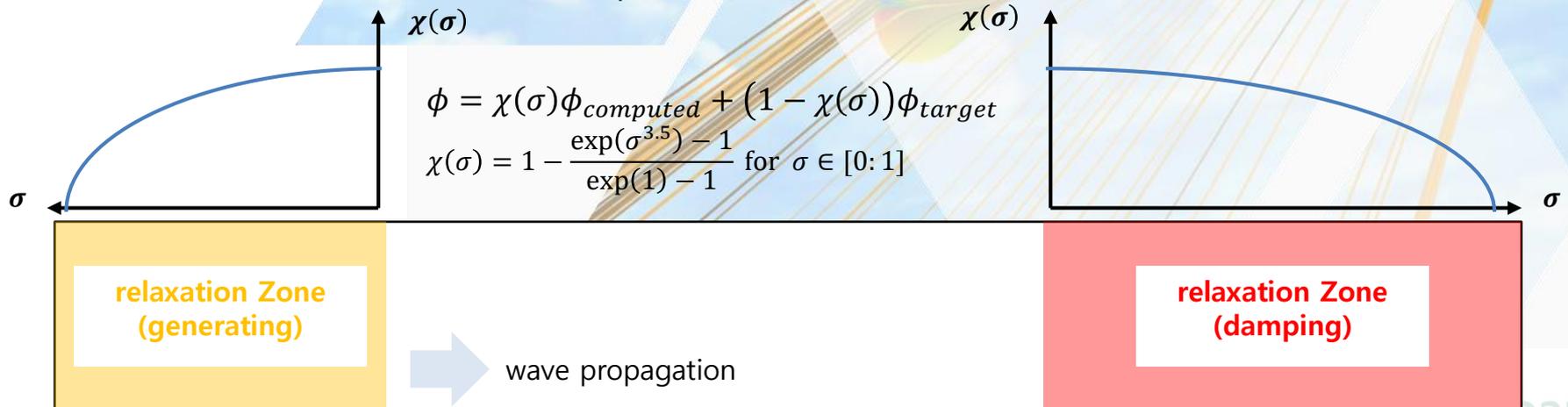
- RANS 난류 모델 중 2 equation 모델인  $k - \omega$  SST 난류 모델 사용

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = P_k - \beta^* w k$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \frac{\gamma}{\nu_t} G - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{w2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

### ✓ Wave relaxation 기법

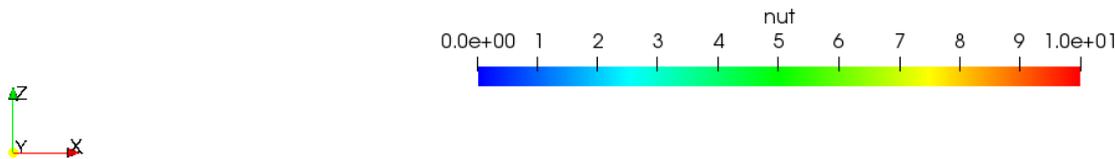
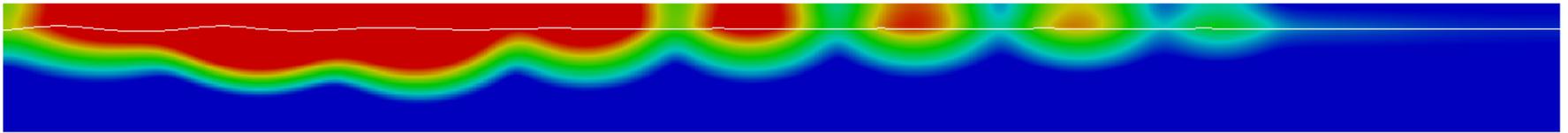
- wave를 생성하고 감쇠 시키기 위해 본 연구에서는 wave relaxation 기법을 사용
  - 속도 및  $\alpha$  분포가 사용자가 지정한 target 값이 되도록 explicit하게 relaxation 시키는 방법
  - 다음과 같은 방식으로 물리량을 update 시켜 줌



### 3. 해석 조건

#### ✓ OpenFOAM $k - \omega$ SST 난류 모델

- Laminar 인 경우 파랑 생성 해석 시 analytic 한 파형을 잘 추정
- $k - \omega$  SST 난류 모델을 사용하여 파랑 생성 해석 시 파고 감쇠가 발생
  - Laminar 와 RANS 난류 모델을 적용했을 때 momentum equation을 비교해 보면 난류 점성계수  $\nu_t$ 의 유무밖에 나지 않음
  - $k - \omega$  SST 난류 모델을 적용하였을 때 감쇠가 발생한다는 것은  $\nu_t$ 에 의한 영향이라 생각할 수 있음



- 난류 점성계수는 난류 운동에너지  $k$  에 관한 식으로 표현됨

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}$$

» 난류 운동에너지  $k$  의 수송방정식에 문제가 있는것을 추정할 수 있음

# 3. 해석 조건

## ✓ OpenFOAM $k - \omega$ SST 난류 모델

- 비압축성 다상유동 해석 시

```
kOmegaSSTBase.C
template<class BasicEddyViscosityModel>
tmp<volScalarField>
kOmegaSSTBase<BasicEddyViscosityModel>::F2() const
{
    ...
    scalar(500) * (this->mu_ / this->rho_) / (sqr(y_) * omega)
    ...
}
...
template<class BasicEddyViscosityModel>
void kOmegaSSTBase<BasicEddyViscosityModel>::correct()
{
    ...
    const rhoField& rho = this->rho_;
    const alphaField& alpha = this->alpha_;
    ...
    tmp<fvScalarMatrix> omegaEqn
    (
        fvm::ddt(alpha, rho, omega_)
        + fvm::div(alphaRhoPhi, omega_)
        ...
    );
    ...
}
```

`incompressibleTurbulenceModel.C`  
`nu()` 로 정의

`IncompressibleTurbulenceModel.C`  
`geometricOneField` 로 정의 (모든 cell  
에서 1)

# 3. 해석 조건

## ✓ 사용된 RANS 난류 모델

### ➢ 2 equation RANS 난류 모델인 $k - \omega$ SST 난류 모델 사용

- OpenFOAM에서 incompressible multiphase 해석을 수행 시 사용되는 난류 모델은 아래와 같이 밀도에 의한 효과가 모두 배제된 'strictly incompressible'한 난류 수송 방정식을 사용

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = P_k - \beta^* w k$$
$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \frac{\gamma}{v_t} G - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{w_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

- 다상 유동 해석 시 VoF 알고리즘에서 밀도와 점성은 다음과 같이 표현

$$\rho = \alpha \rho_{liquid} + (1 - \alpha) \rho_{gas}$$
$$\mu = \alpha \mu_{liquid} + (1 - \alpha) \mu_{gas}$$

- 자유수면 주위에서는 Volume Fraction  $\alpha$  값이 0 과 1 사이의 값을 가지게 됨
  - 따라서 밀도와 점성이 상수가 아닌 변수로 취급
  - 난류 수송 방정식의 양변에서 소거될 수 없음

» OpenFOAM 을 이용하여 비압축성 다상유동 해석 시 난류 수송 방정식은 밀도에 의한 효과가 배제되어있음

### 3. 해석 조건

#### ✓ 사용된 RANS 난류 모델

##### ➤ OpenFOAM $k-\omega$ SST 난류 모델

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = P_k - \beta^* w k$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \frac{\gamma}{v_t} G - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{w_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

##### ➤ Density modified $k-\omega$ SST 난류 모델

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho (v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \rho P_k - \rho \beta^* w k$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho (v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \frac{\gamma}{v_t} \rho G - \rho \beta \omega^2 + 2\rho(1 - F_1) \frac{\sigma_{w_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

##### ➤ Buoyancy modified $k-\omega$ SST 난류 모델

- RANS 난류 모델에서 밀도 구배에 의한 부력 효과를 고려

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho (v + \sigma_k v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \rho P_k - \rho \beta^* w k - \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} g_j$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho (v + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] = \frac{\gamma}{v_t} \rho G - \rho \beta \omega^2 + 2\rho(1 - F_1) \frac{\sigma_{w_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

# 3. 해석 조건

## ✓ 파랑 생성 조건

### ➤ 2차원 정규파

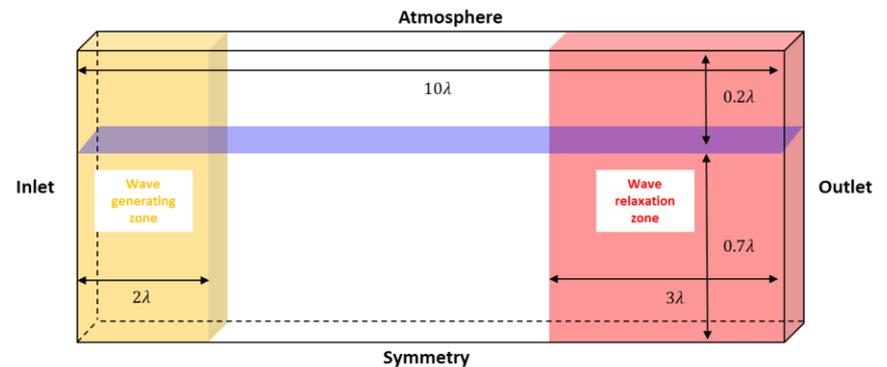
- Stokes 5<sup>th</sup> wave를 이용하여 파랑 생성 및 검증 수행

※ 27<sup>th</sup> ITTC Ocean Engineering Committee, MOERI condition

Case No.	Period $T$ [s]	Steepness $H/\lambda$ [-]	Height $H$ [m]	Length $\lambda$ [m]
wave 1.	9 s	1/30	4.21 m	126.36 m
wave 2.	9 s	1/16	7.90 m	126.36 m

### ➤ 2차원 정규파 생성 해석

- 전체 도메인은 파도 파장의 10배
- Wave generating zone:  $2\lambda$
- Wave damping zone:  $3\lambda$



### ➤ 경계조건

	$\vec{u}$ [m/s]	$p$ [pa]	$\alpha$ [-]	$k$ [ $m^2/s^2$ ]	$\omega$ [1/s]
Inlet	Neumann	Neumann	Neumann	Neumann	Neumann
Outlet	Neumann	Dirichlet	Neumann	Neumann	Neumann
Atmosphere	Neumann	Neumann	Dirichlet	Neumann	Neumann
Symmetry	Symmetry	Symmetry	Symmetry	Symmetry	Symmetry

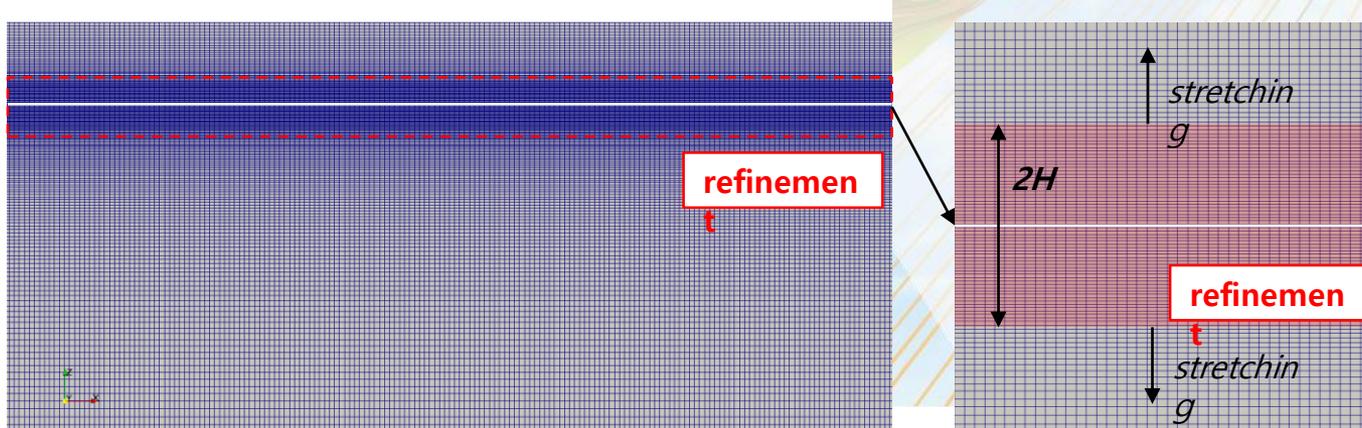
# 3. 해석 조건

## ✓ 격자 생성 조건

- 정렬 격자 사용
- 격자 생성 조건
  - $N_x$ : 한 파장 당 수평방향 격자 개수
  - $N_z$ : 한 파고 당 수직방향 격자 개수

Grid system	$N_x/\Delta x$ [m]	$N_z/\Delta z$ [m]	Total number
wave 1	100 개 / 1.25 m	20 개 / 0.2 m	180,000
wave 2	100 개 / 1.25 m	20 개 / 0.4 m	140,000

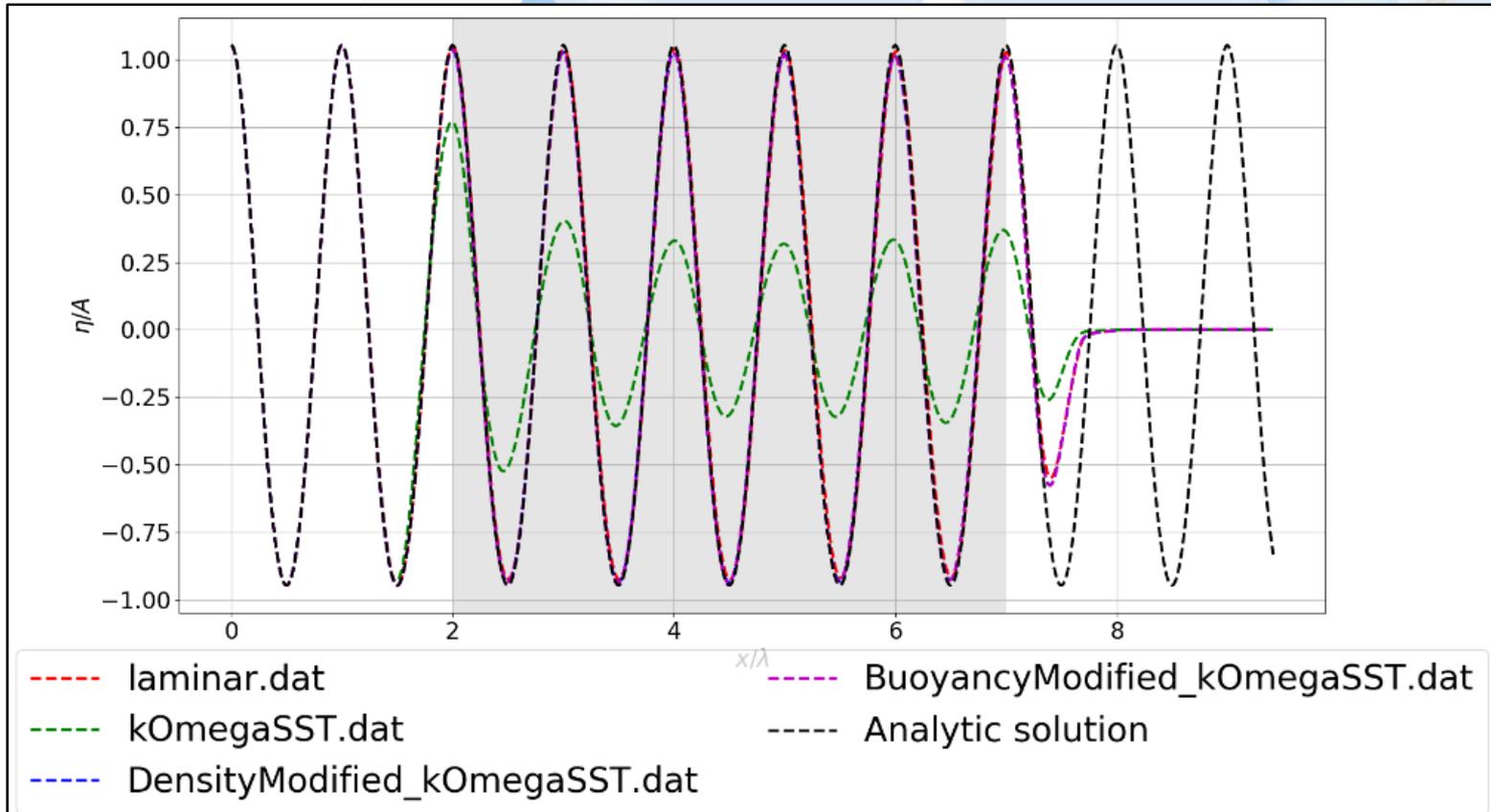
- 자유수면 인근 ( $-1.0H \sim 1.0H$ )에선 위와 같은 격자 밀도로 균일하게 격자 생성
- 그 외의 영역에서는 일정한 비율만큼 stretching 하여 격자 생성



# 4. 해석 결과

## ✓ 난류 모델 별 파형 비교

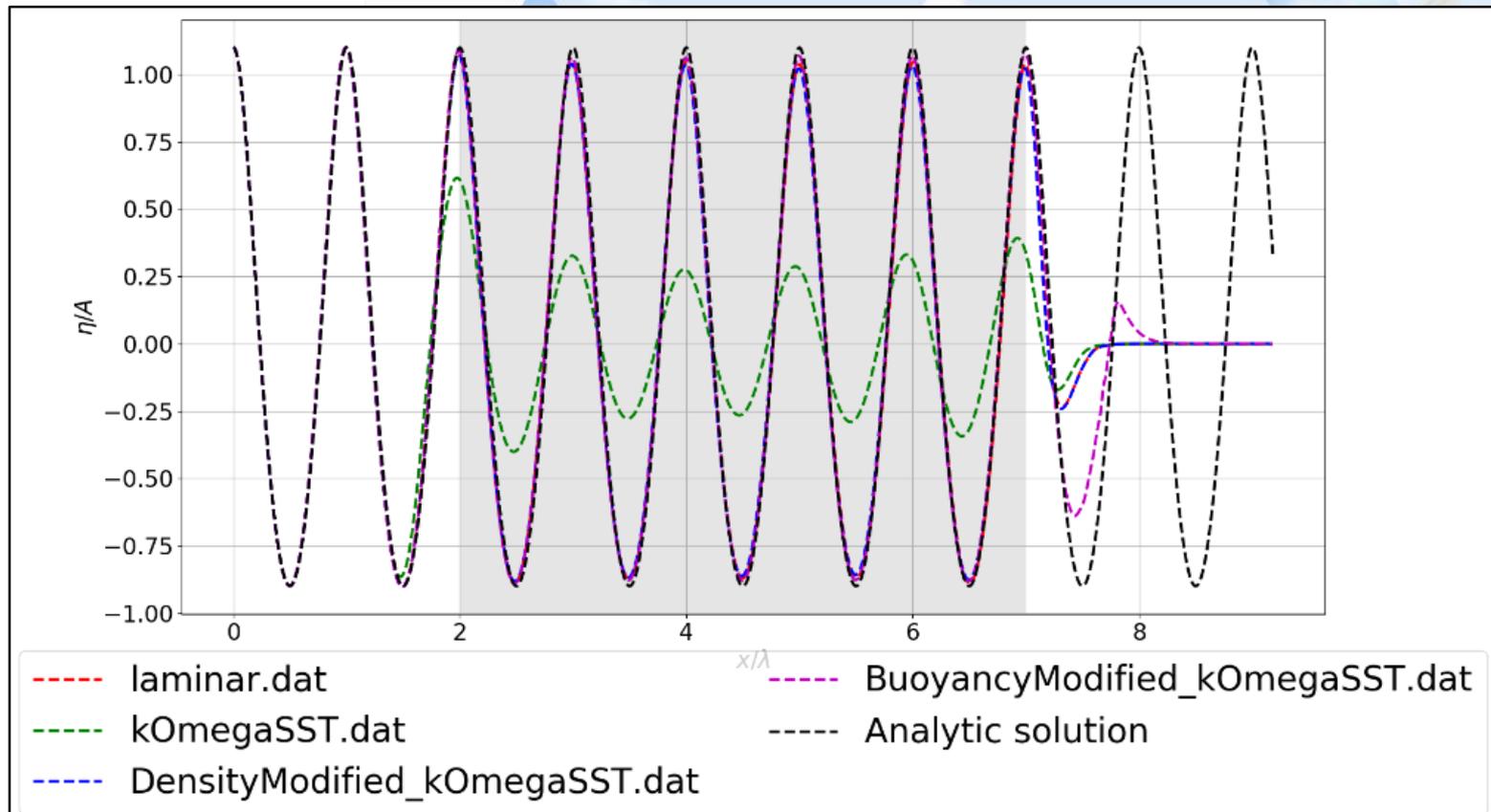
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave1( $H: 4.21\text{ m}$ ,  $H/\lambda = 1/30$ )



# 4. 해석 결과

## ✓ 난류 모델 별 파형 비교

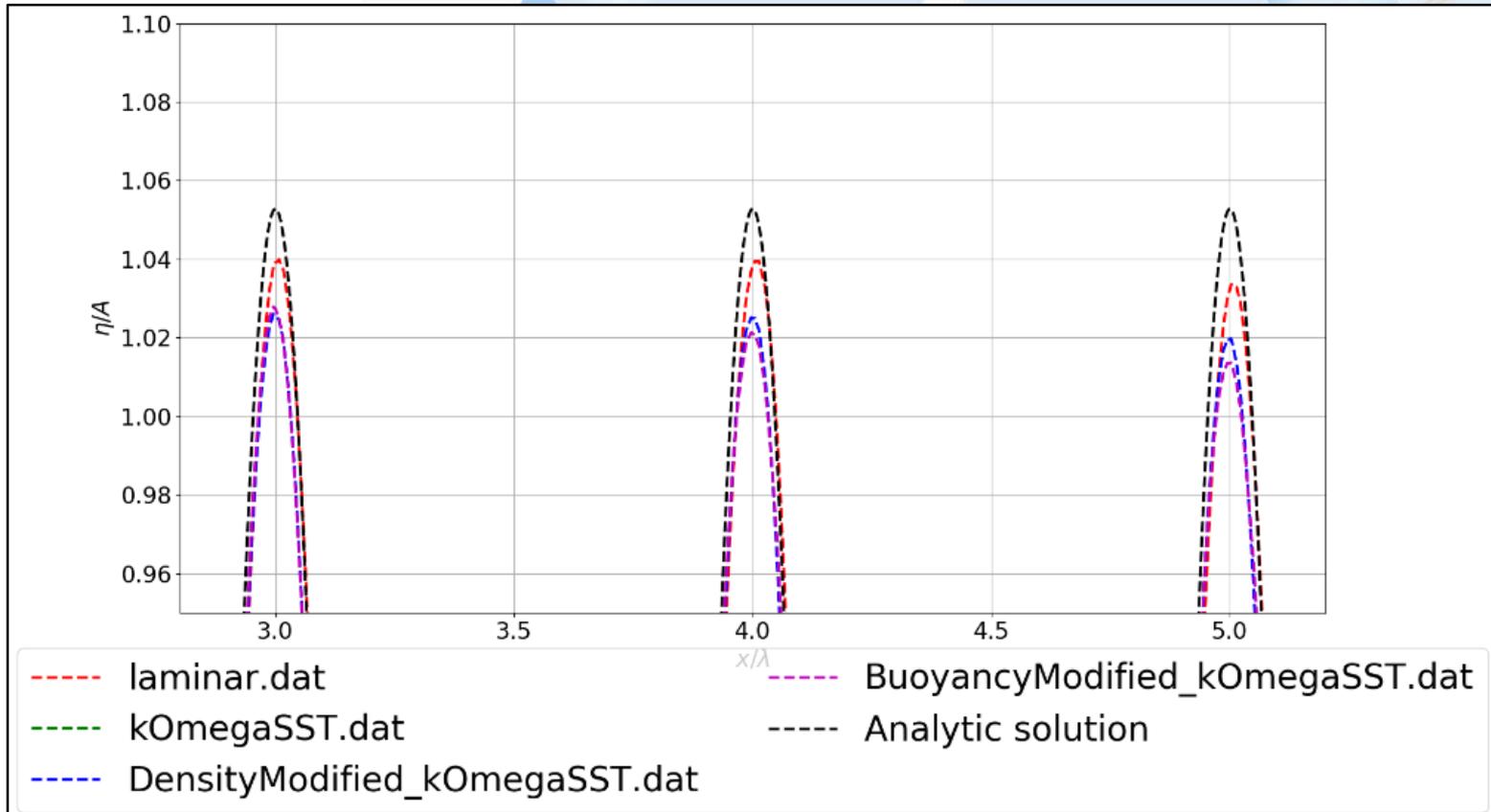
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave2 ( $H: 7.90\text{ m}$ ,  $H/\lambda = 1/16$ )



## 4. 해석 결과

### ✓ 난류 모델 별 파형 비교(파고 인근 확대)

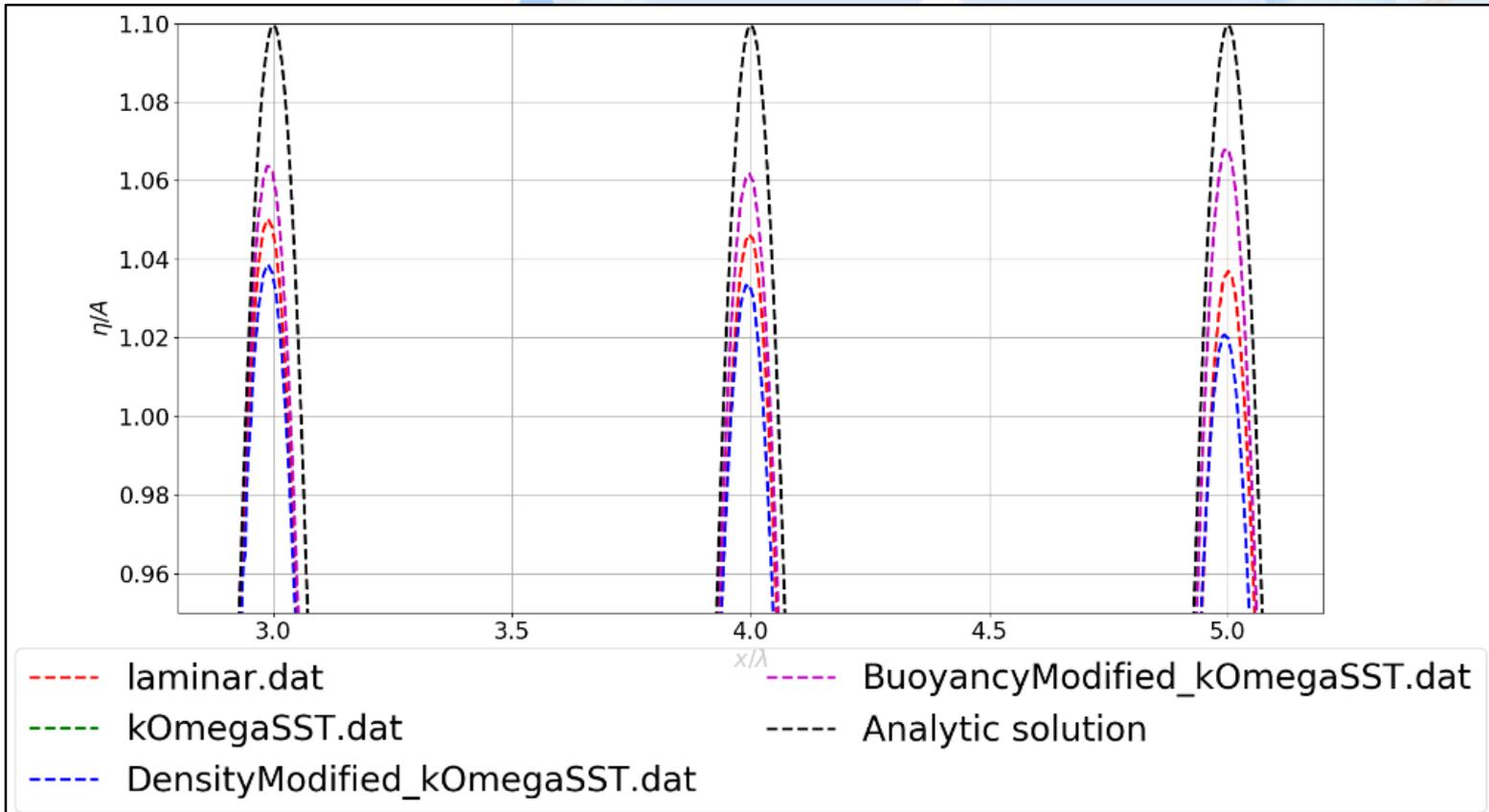
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave1( $H: 4.21\text{ m}$ ,  $H/\lambda = 1/30$ )



# 4. 해석 결과

## ✓ 난류 모델 별 파형 비교(파고 인근 확대)

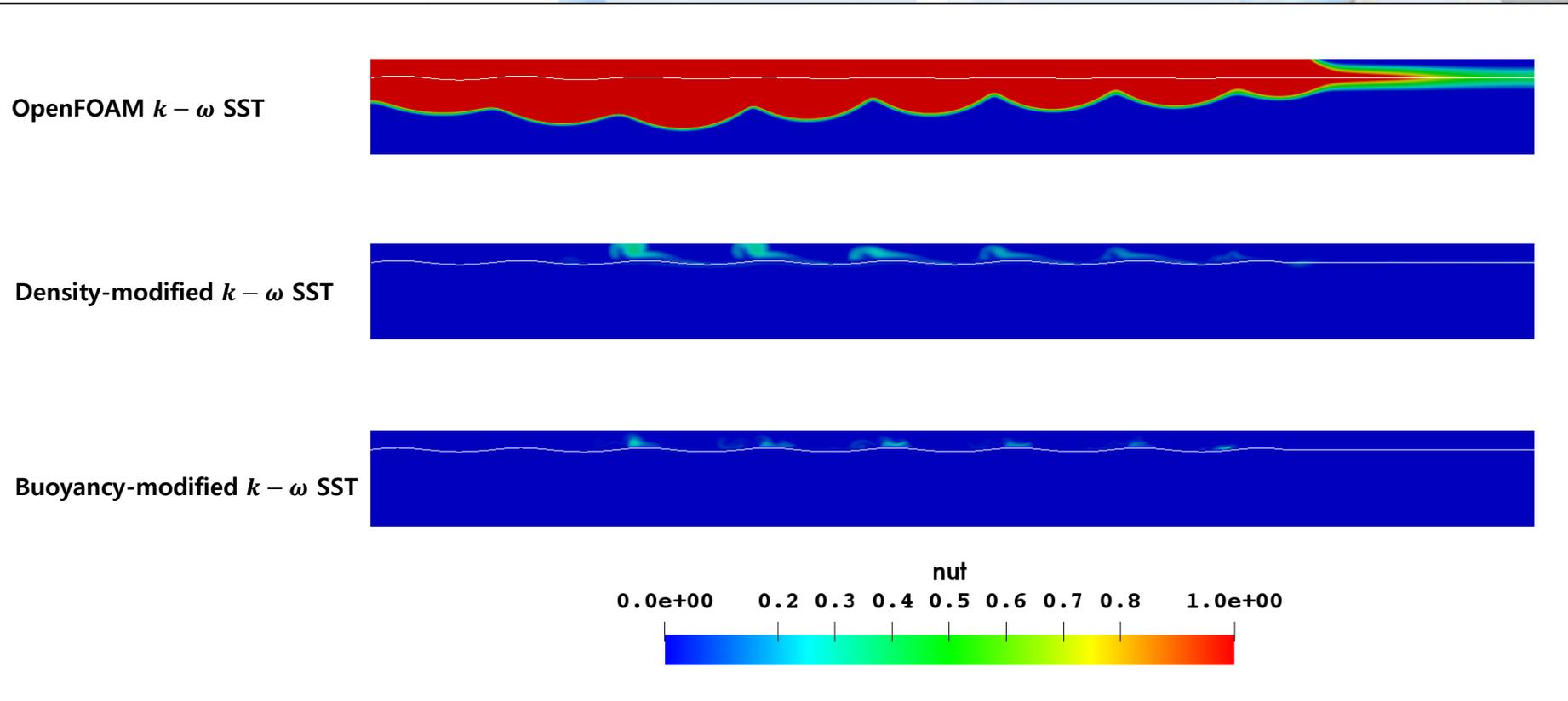
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave2 ( $H: 7.90\text{ m}$ ,  $H/\lambda = 1/16$ )



## 4. 해석 결과

### ✓ 자유수면 인근 난류 점성계수 비교

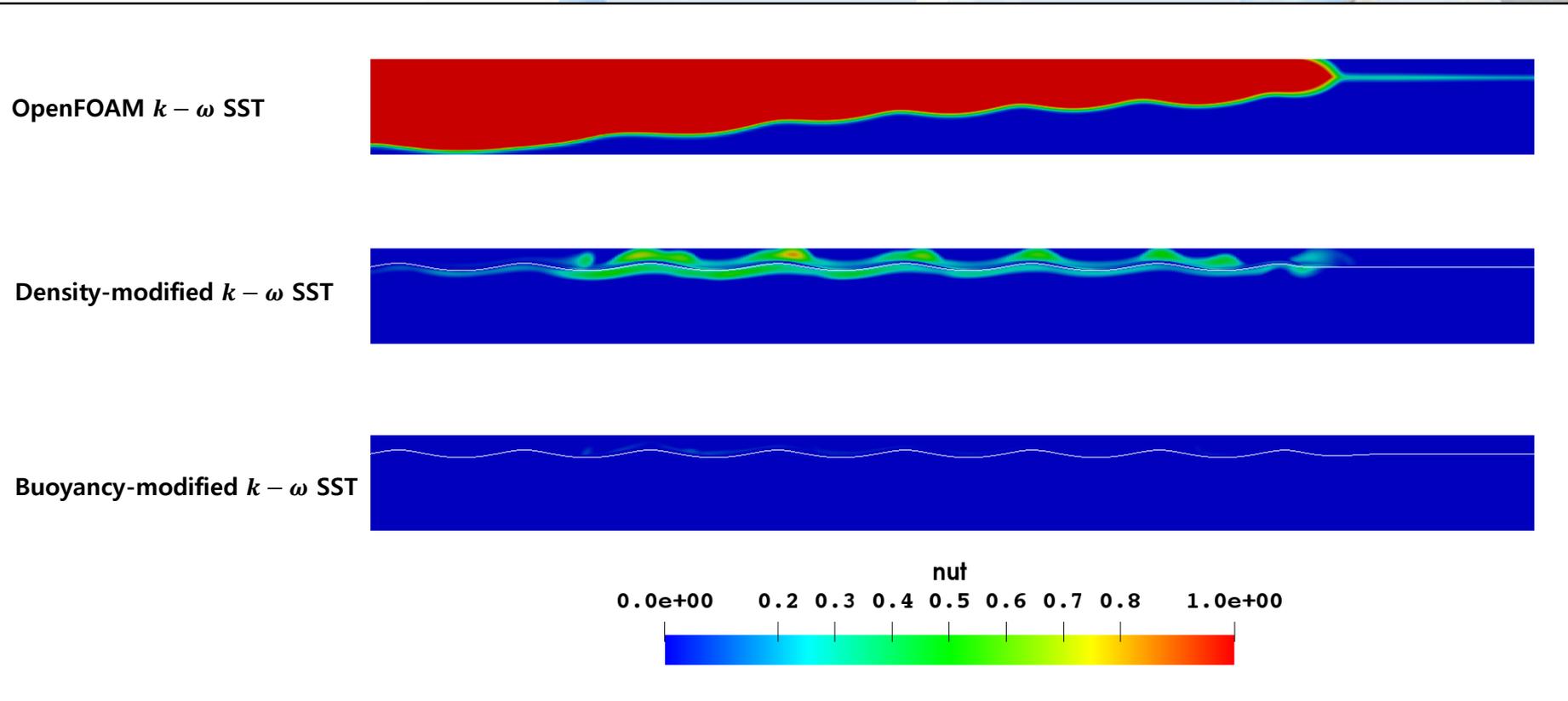
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave1( $H: 4.21\text{ m}$ ,  $H/\lambda = 1/30$ )



## 4. 해석 결과

### ✓ 자유수면 인근 난류 점성계수 비교

- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave2 ( $H: 7.90\text{ m}$ ,  $H/\lambda = 1/16$ )



# 5. 결론

## ✓ 연구 결론

- 2가지 wave 조건에 대하여 2차원 정규파 생성 해석을 OpenFOAM 을 이용하여 수행 (waves2Foam library 활용)
- OpenFOAM 에서 제공하는  $k - \omega$  SST 난류 모델을 사용하여 2차원 파랑 생성 해석을 수행할 경우 파고 감쇠 현상이 발생하여 analytic 한 stokes 5<sup>th</sup> wave 파형을 생성하지 못하는 것을 확인
  - 비압축성 다상유동 해석시 OpenFOAM에서 strictly incompressible 가정을 한 난류 수송 방정식을 사용함을 확인
  - 하지만 다상유동 해석 시 자유수면 인근에서는 밀도가 volume fraction에 의해 변하는 값이므로 이를 사용할 경우 자유수면 인근에서 비물리적인 난류 점성계수 확산이 발생하고 그것이 파고 감쇠를 야기함
- 선행 연구에서 제안한 밀도 및 부력효과를 고려한 난류 모델 (각각 Density modified, Buoyancy modified  $k - \omega$  SST) 을 이용하여 2차원 정규파 생성 해석을 수행 및 비교
  - Density-modified  $k - \omega$  SST 난류 모델과 Buoyancy modified  $k - \omega$  SST 난류 모델을 사용했을 경우 자유수면 인근에서 비물리적인 난류 점성계수의 확산이 억제되는 것을 확인
  - Density 및 Buoyancy modified  $k - \omega$  SST 모두 파고 감쇠효과가 줄어듬
  - Buoyancy modified  $k - \omega$  SST 을 사용했을 경우 난류 점성계수 확산이 적게 일어났으며 파고가 높고 wave steepness 가 큰 wave2 조건에서 analytic 한 파형에 더 유사한 파를 생성

# 5. 결론

## ✓ 향후 계획

- 비선형성이 더 크게 나타나는 wave run-up 혹은 breaking wave 해석에 적용 및 결과 비교
  - Buoyancy modified  $k - \omega$  SST 난류 모델의 경우 기체 온도 변화에 따른 밀도 구배가 발생하였을 때 natural convection 효과를 고려하기 위해 개발 된 모델
  - 다상 유동 해석에서 volume fraction 으로 인하여 발생하는 밀도구배에 적용 가능한지에 대한 논란이 존재
  - 따라서 비선형성이 크게 나타는 현상에 대해 적용하여 검토 수행 예정

감사합니다