

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

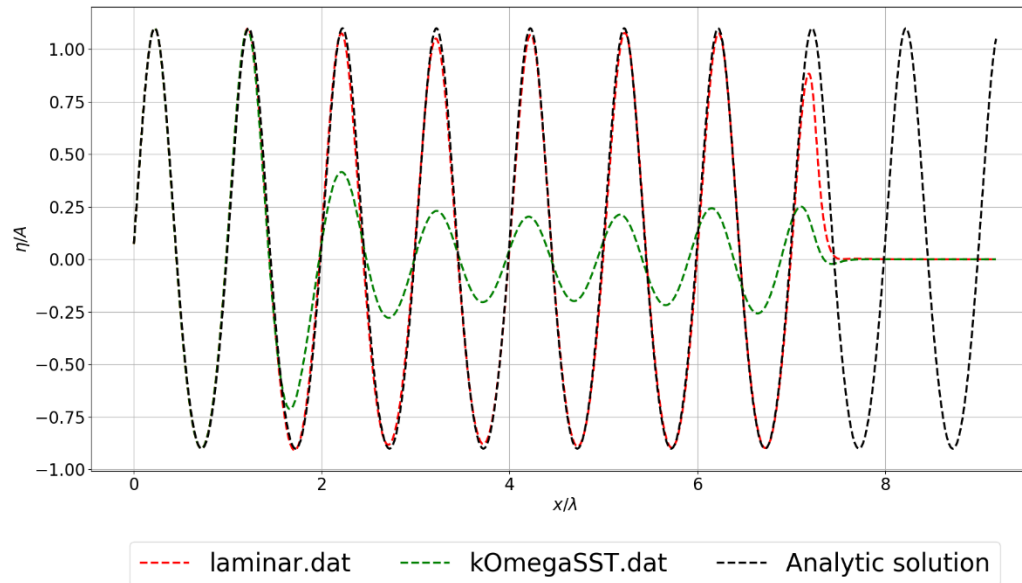
■ Contents

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 감쇠' 현상이 발생



1. 서론

✓ 선행 연구

논문 제목	내용
송성진, & 박선희. (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">waves2Foam 을 이용하여 wave run-up 해석 수행2차원 검증 과정에서 RANS 난류 모델 사용 시 파고 감쇠 효과 확인
Devolder, B., Troch, P., & Rauwoens, P. (2018). Performance of a buoyancy-modified k- ω and k- ω SST turbulence model for simulating wave breaking under regular waves using OpenFOAM®. Coastal Engineering, 138, 49-65.	<ul style="list-style-type: none">자유수면 인근에서 난류 운동 에너지의 비 정상적인 확산이 파고 감쇠의 원인으로 추정OpenFOAM을 이용하여 다상유동 해석 시 RANS 난류 모델이 'strictly incompressible' 가정이 들어가 있음을 확인Density-modified 및 Buoyancy modified 난류 모델을 이용하여 wave breaking 해석 수행 후 비교

✓ 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 (1st order)
 - time step Δt (1/2000 T)
- Gradient scheme: Linear (2nd order)
- Convection scheme: 2nd order upwind scheme (2nd 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 st order)
Gradient scheme	Linear (2 nd order)
Convection scheme	2 nd order upwind (2 nd order) with limiter
VoF scheme	TVD scheme (vanLeer) + interface compression & MULES

Governing equation

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

Momenu 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 α 값으로 구분

- α 가 1일 경우 liquid, 0일 경우 gas
- α 에 대한 수송 방정식을 풀어 liquid 와 gas 상의 분포를 결정
- α 수송방정식은 아래와 같이 나타나며 자유수면 인근에서 α 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_α 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 기법 을 사용

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

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

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

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

2. 수치 해석

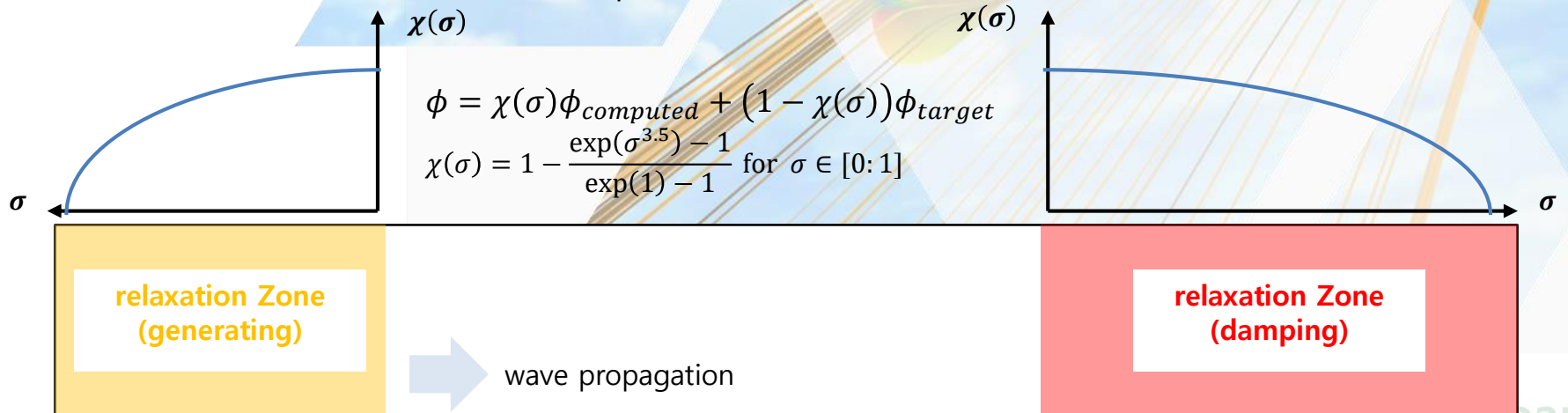
✓ 난류 모델

- 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

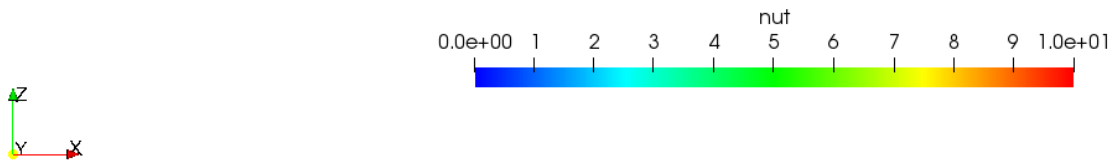
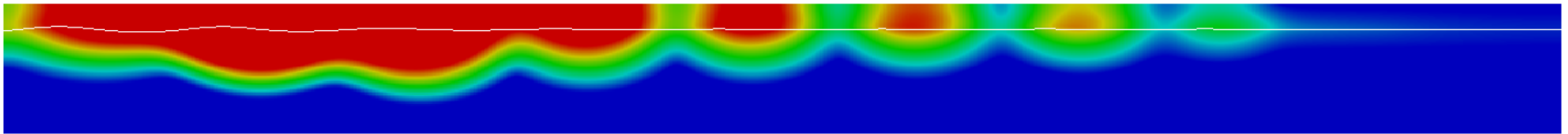
- wave를 생성하고 감쇠 시키기 위해 본 연구에서는 wave relaxation 기법을 사용
 - 속도 및 α 분포가 사용자가 지정한 target 값이 되도록 explicit하게 relaxation 시키는 방법
 - 다음과 같은 방식으로 물리량을 update 시켜 줌



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 ν_t 의 유무밖에 나지 않음
 - $k - \omega$ SST 난류 모델을 적용하였을 때 감쇠가 발생한다는 것은 ν_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 배제 된 '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 α 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 5th wave를 이용하여 파랑 생성 및 검증 수행

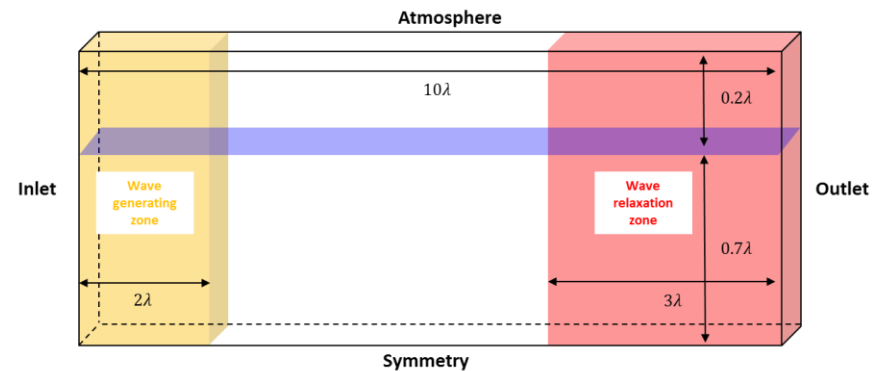
※ 27th ITTC Ocean Engineering Committee, MOERI condition

Case No.	Period T [s]	Steepness H/λ [-]	Height H [m]	Length λ [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: 2λ
- Wave damping zone: 3λ

➤ 경계조건



	\vec{u} [m/s]	p [pa]	α [-]	k [m^2/s^2]	ω [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

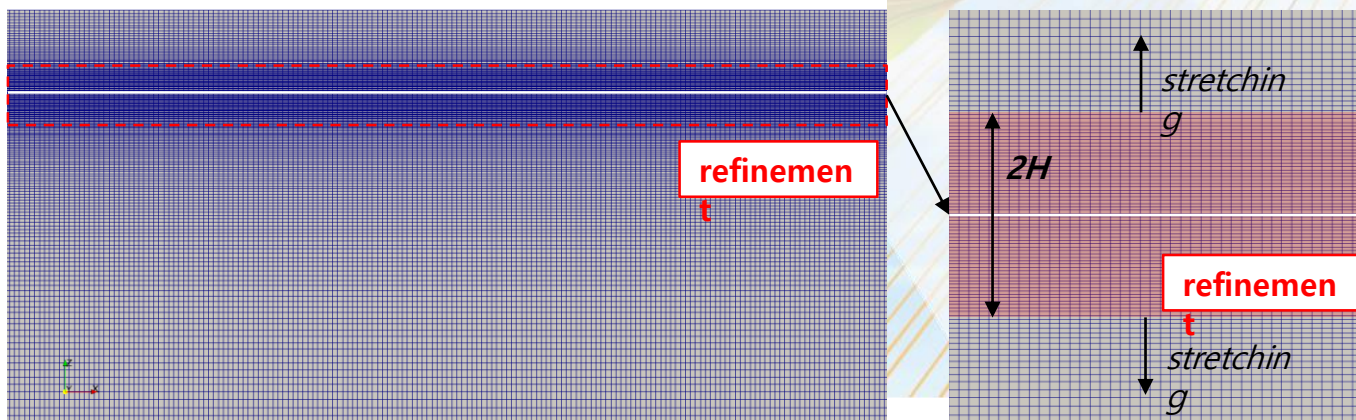
➤ 정렬 격자 사용

➤ 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

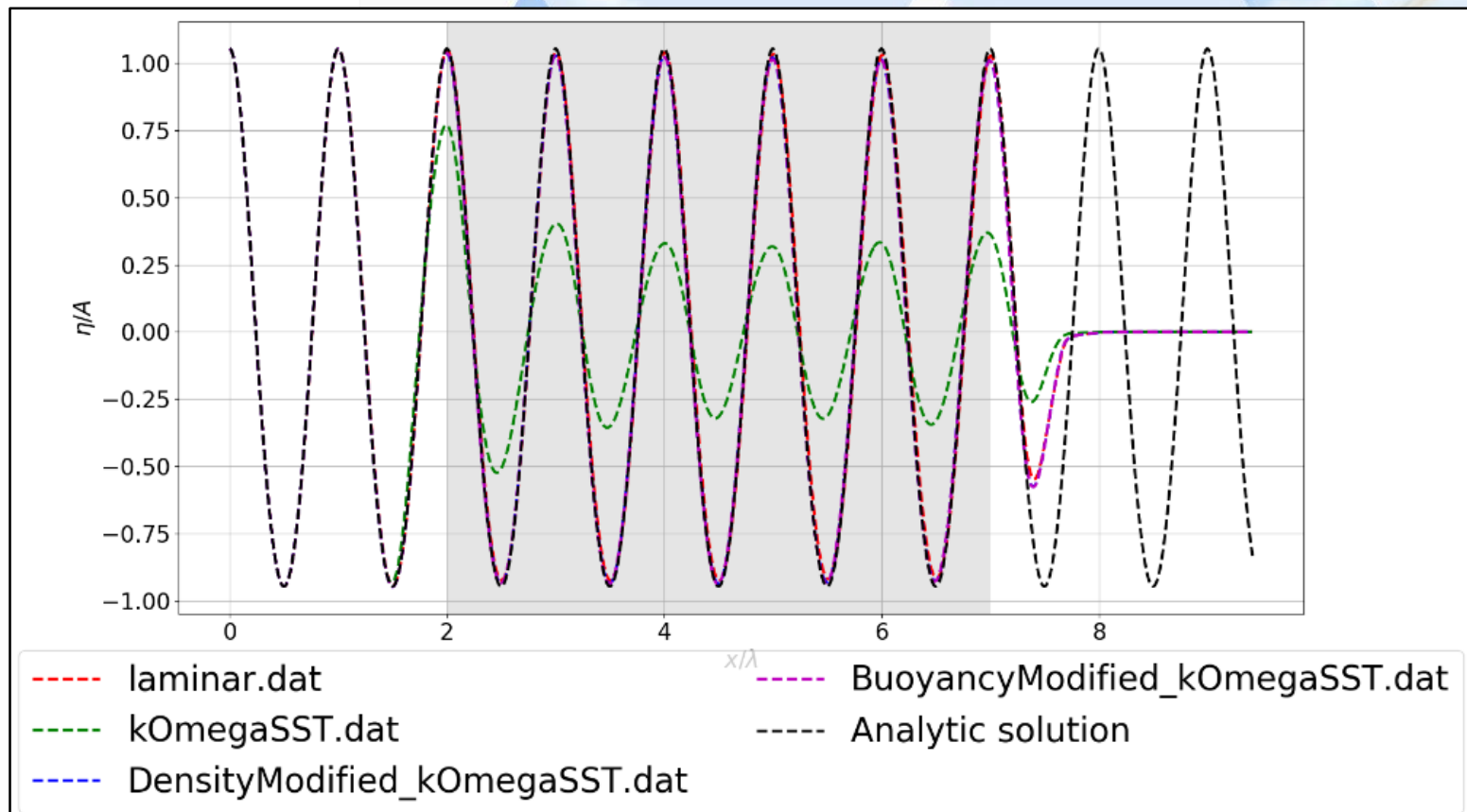
- 자유수면 인근 ($-1.0H \sim 1.0H$)에선 위와 같은 격자 밀도로 균일하게 격자 생성
- 그 외의 영역에서는 일정한 비율만큼 stretching 하여 격자 생성



4. 해석 결과

✓ 난류 모델 별 파형 비교

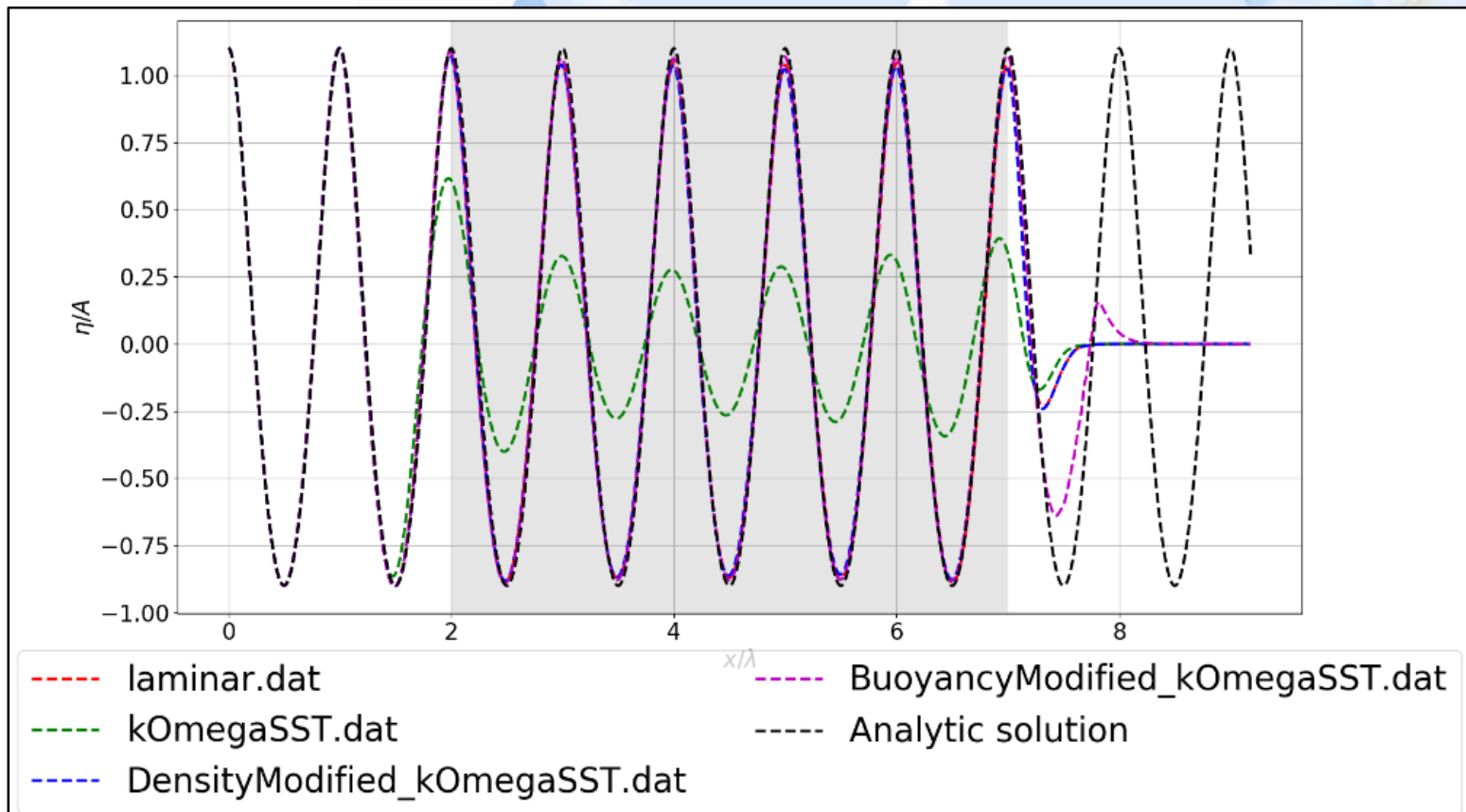
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave1($H: 4.21\text{ m}$, $H/\lambda = 1/30$)



4. 해석 결과

✓ 난류 모델 별 파형 비교

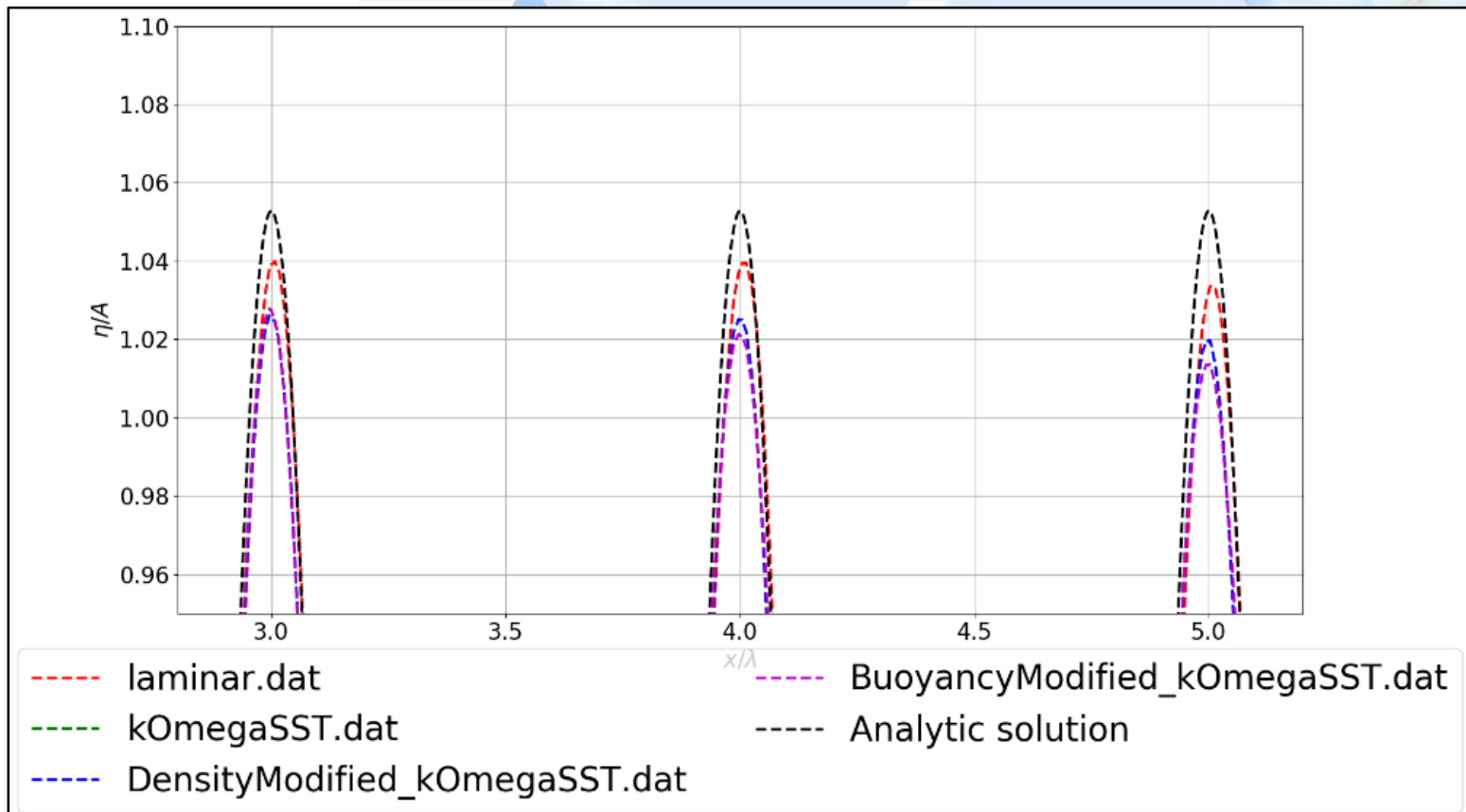
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave2 ($H: 7.90\text{ m}$, $H/\lambda = 1/16$)



4. 해석 결과

✓ 난류 모델 별 파형 비교(파고 인근 확대)

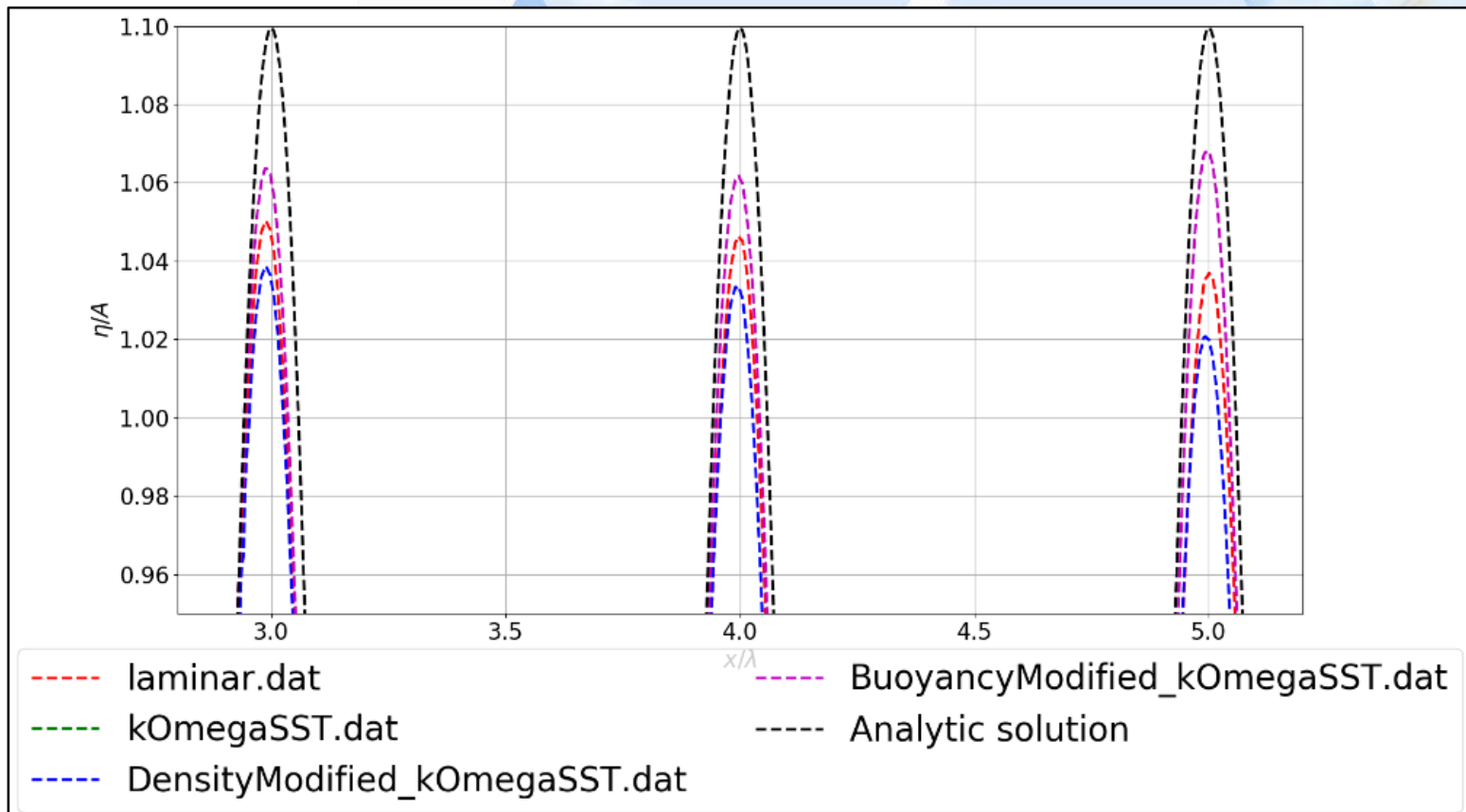
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave1($H: 4.21\text{ m}$, $H/\lambda = 1/30$)



4. 해석 결과

✓ 난류 모델 별 파형 비교(파고 인근 확대)

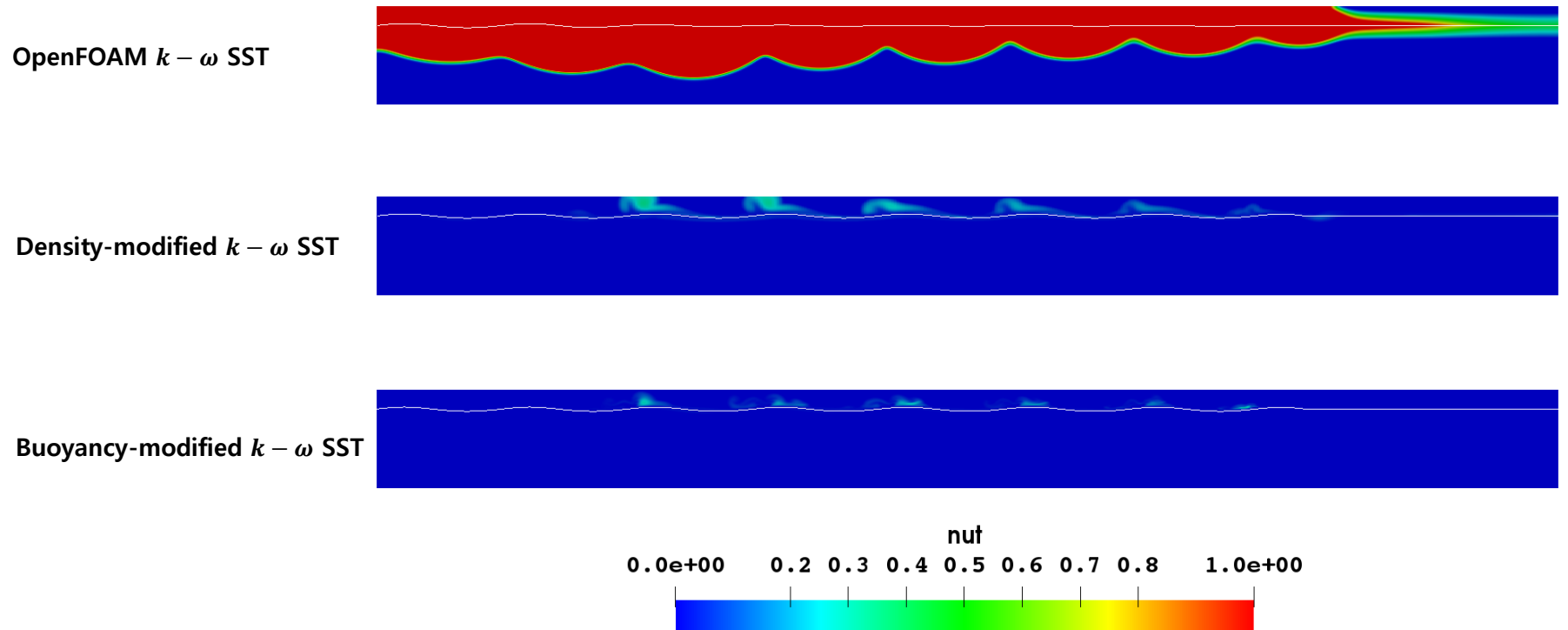
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave2 ($H: 7.90\text{ m}$, $H/\lambda = 1/16$)



4. 해석 결과

✓ 자유수면 인근 난류 점성계수 비교

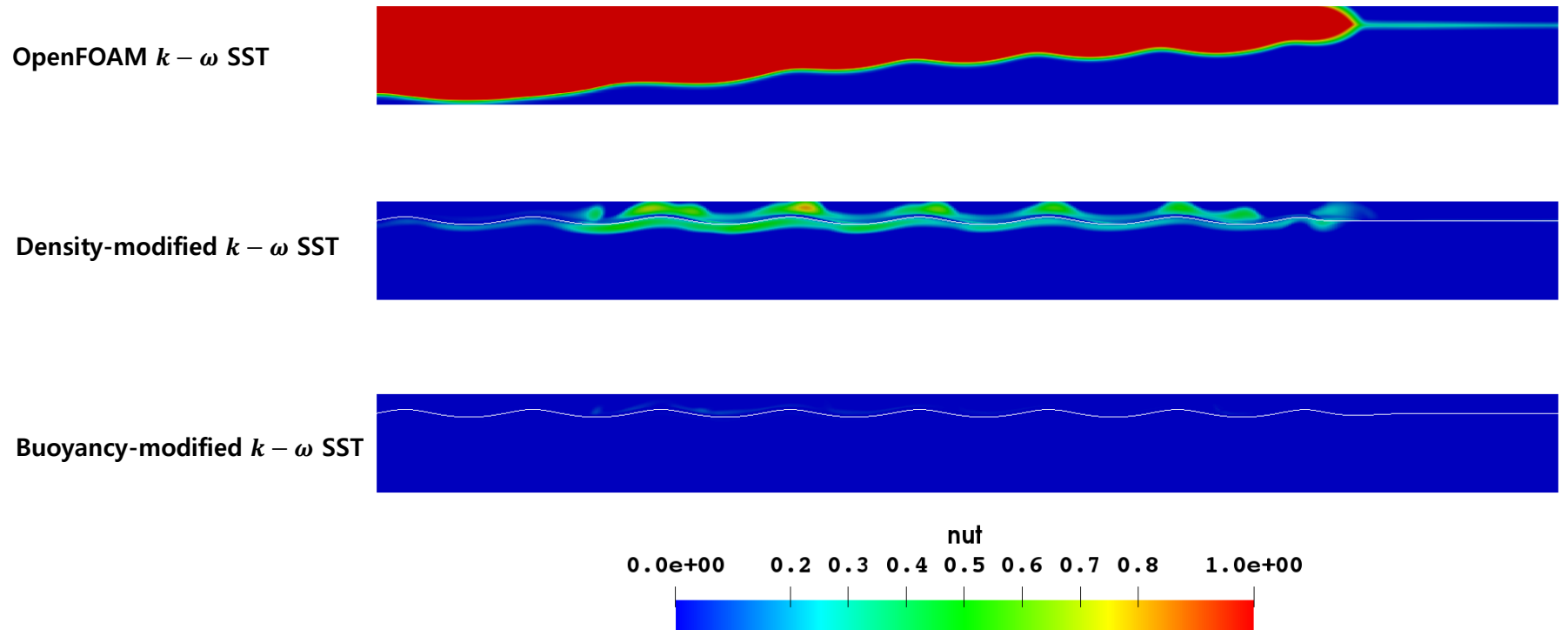
- 20 주기 해석 수행 후 파형 비교
- wave1($H: 4.21\text{ m}$, $H/\lambda = 1/30$)



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

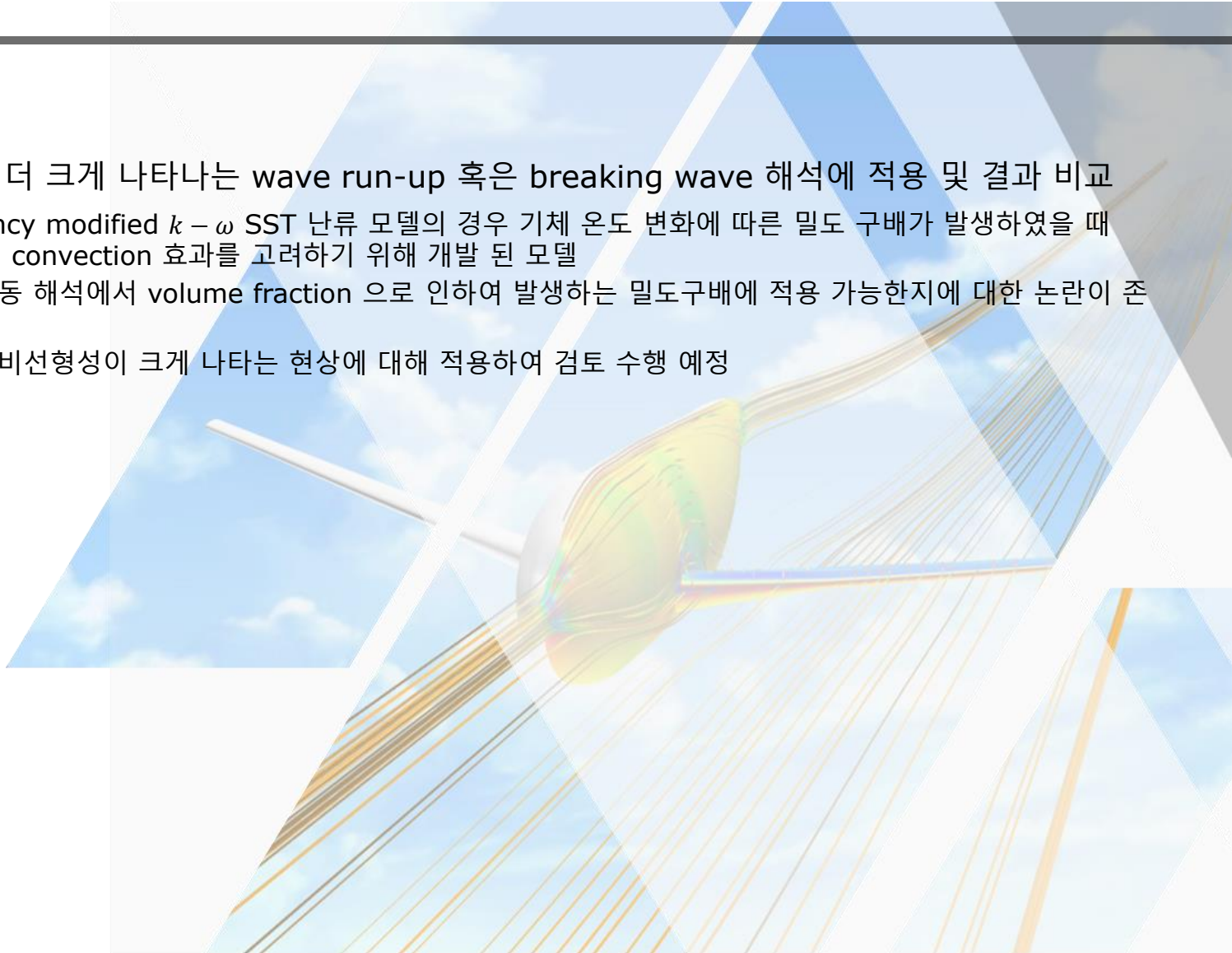
✓ 연구 결론

- 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 5th 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