



개수로 흐름에 대한 부력 수정 난류 모형의 적용성 검토

한국건설기술연구원 선임연구위원 이 두 한

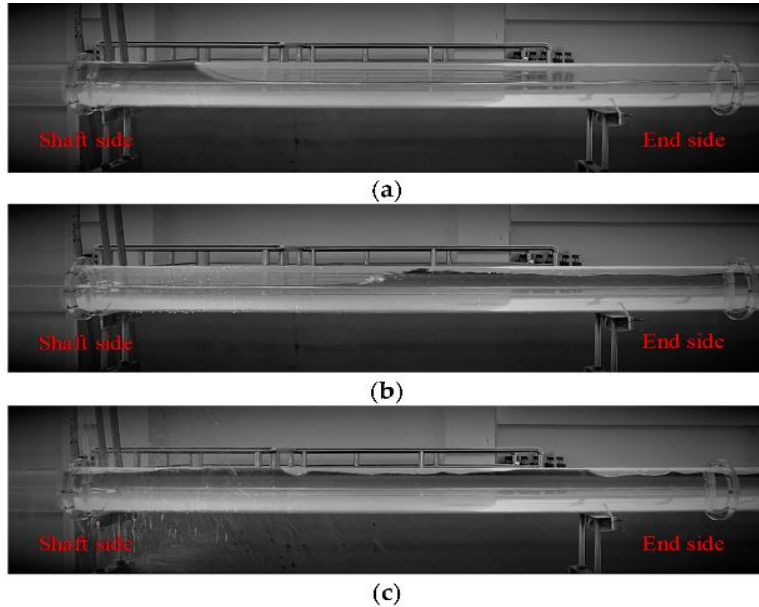
연구 배경

공기 혼입 흐름 해석의 어려움

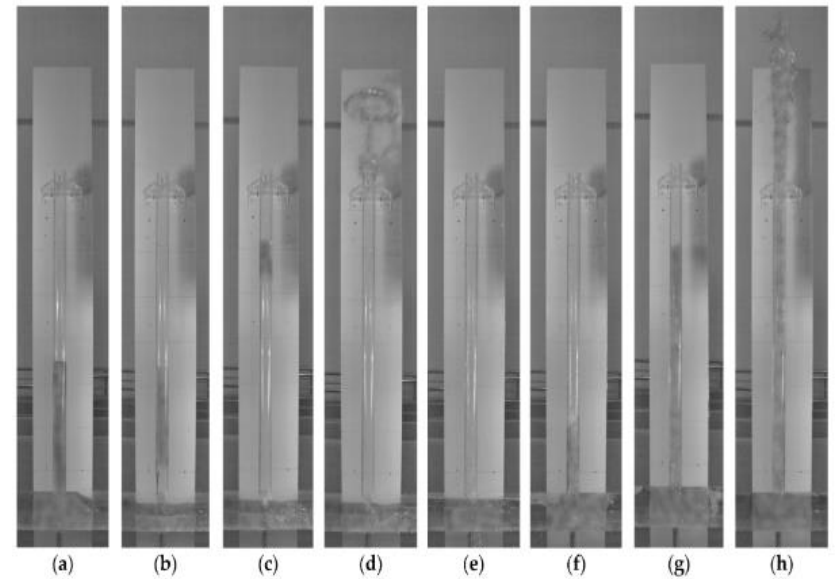
- ✔ 기후변화 대응을 위한 지하방수로 계획 등에서 공기혼입 흐름 해석 필요성 대두
- ✔ 에어포켓에 의한 설계유량 미확보 및 분출 현상 발생
- ✔ CFD 및 축소모형실험을 통한 설계 적합성 확인 어려움



지하방수로 계획



터널 내 에어포켓 형성



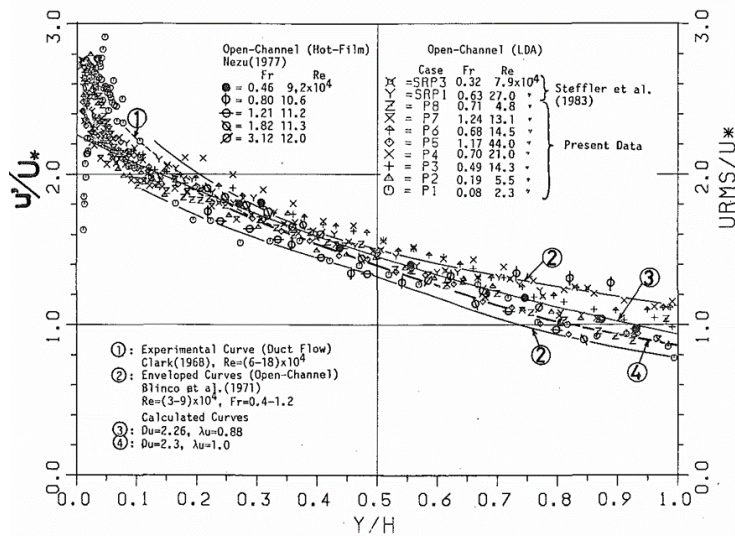
수직갱에서 분출현상(Geyser)

RANS 기반 자유수면 흐름 모의

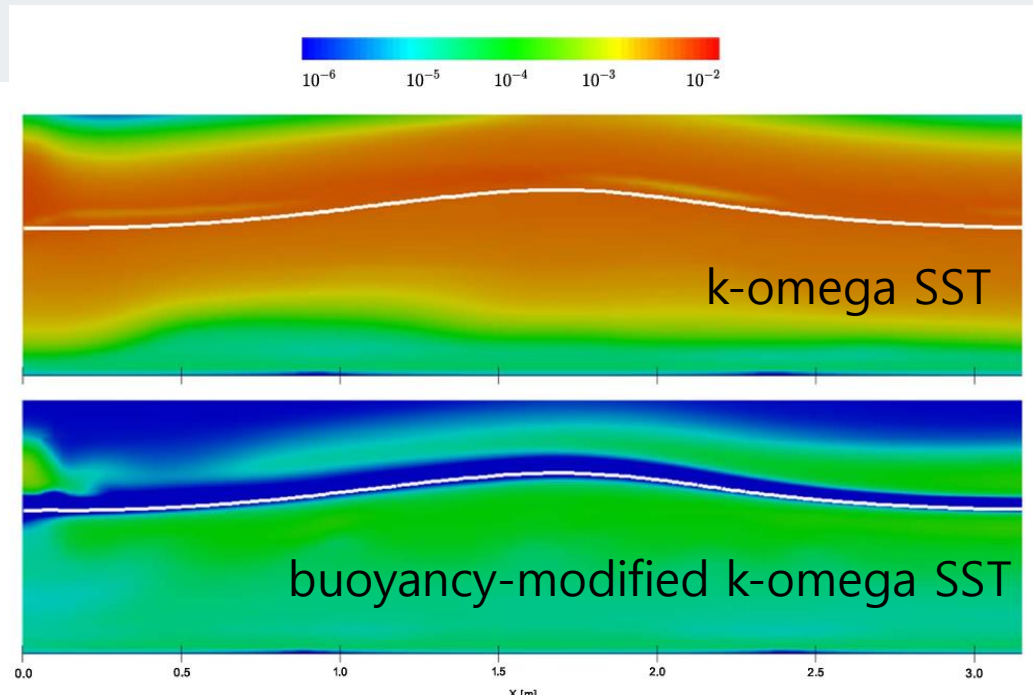


RANS 기반 이상유체흐름(Two Phase Flow)

- ✔ 계산 효율성이 높아 실무 CFD에서 적용성이 높음
- ✔ k-epsilon, k-omega SST 모형을 주로 적용 -> 난류 모형에 따라 흐름 해석 결과 상이
- ✔ 이상유체에 기존 난류 모형 적용시 비물리적 거동 발생 -> 자유수면 부근의 난류 운동에너지 증가 현상 발생
- ✔ LES 적용시에는 정확한 모의가 가능하나 -> 과도한 계산 시간, 수치적 불안정성 증가



난류운동에너지 수심별 분포 양상(Nezu and Rodi, 1986)



난류운동에너지 k-omega SST 모의 결과(Devolder et al., 2018)

이상유체 적용 난류모형



- ✔ 기존 난류모형은 단상유체에 개발 -> 이상유체 적용시 자유수면 경계면에서 유체 밀도의 급격한 차이로 높은 난류 에너지 생성 유발
- ✔ Devolder et al. (2018) 및 Frederix et al. (2018) -> 경계면의 난류에너지를 감세하는 이상유체 적용 수정 난류 모형 제안
- ✔ openfoam.com -> 해안공학분야에서 쇄파해석을 위해 개발된 Devolder et al. (2018) 모형 지원
- ✔ openfoam.org -> 원자핵공학분야에서 개발된 Frederix et al. (2018) 모형 지원 (경험인자 불확실, 자유수면 유속 과대 산정 발생)
- ✔ Devolder et al. (2018)의 부력 수정 난류모형은 중력방향으로 밀도차가 큰 경우 난류 운동에너지 생성 억제

부력 수정 k-omega SST 모형

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho(\nu + \sigma_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \rho P_k + G_b - \rho \beta^* \omega k$$
$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$
$$= \frac{\gamma}{\nu_t} \rho G - \rho \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

부력항

$$G_b = - \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_j} g_j$$

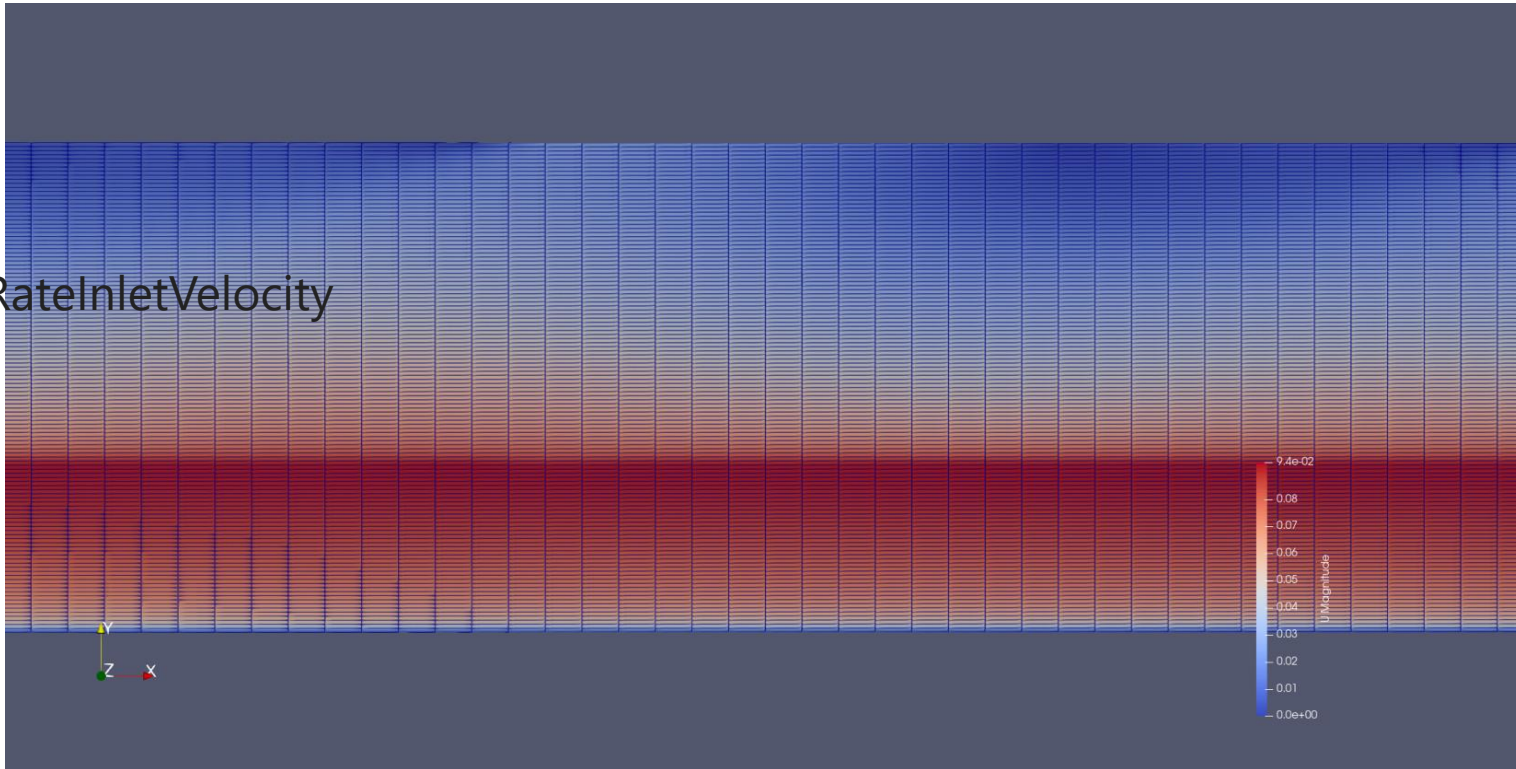
부력수정 k-omega SST 모형(Devolder et al., 2018)

부력 수정 난류 모형 종류 조건 적용



- ✓ Nezu and Rodi (1986)의 종류 실험에 적용(openfoam.com)
- ✓ 연직 2차원(길이 18 m, 높이 0.3 m) → 모의 시간 3,000초에서 종류 형성 확인(연직방향 셀 240개, 이때 $y_{plus} = 2.69$)
- ✓ 이상유체로 종류 모의시 경계조건 설정 주의 필요

variableHeightFlowRateInletVelocity

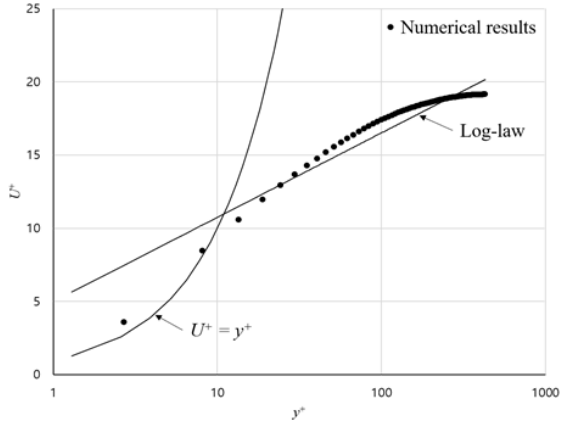


outletPhaseMeanVelocity

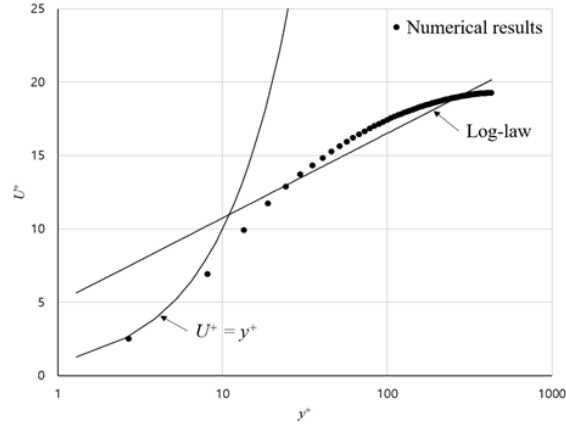
부력 수정 난류 모형 종류 조건 적용 결과



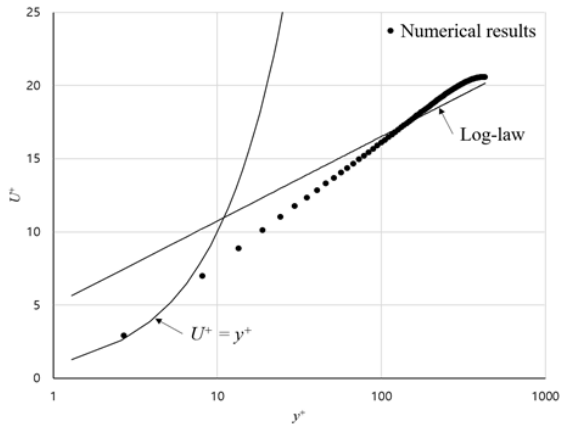
점성저층/완충층/로그법칙 층 등의 유속 분포 비교, 자유수면 유속분포식과 비교



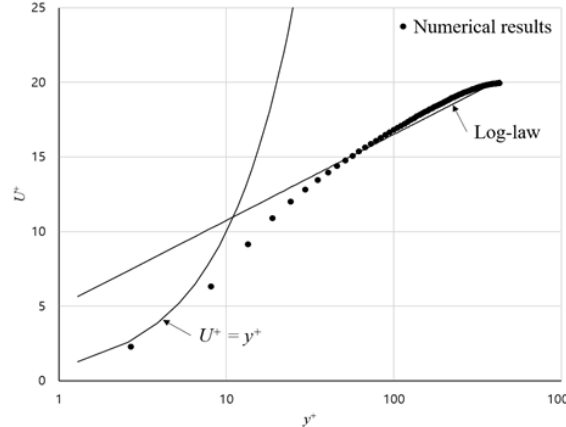
(a) $k-\epsilon$ model



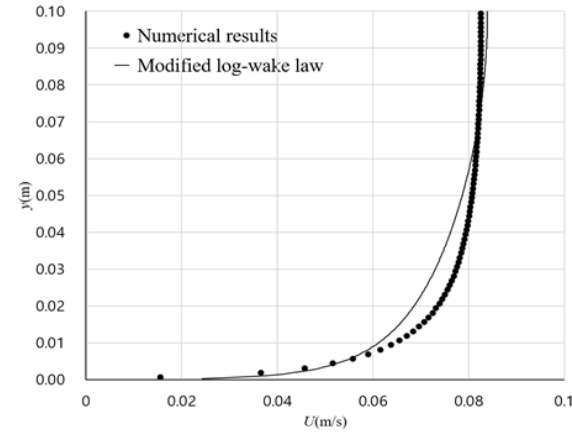
(b) $k-\omega$ SST



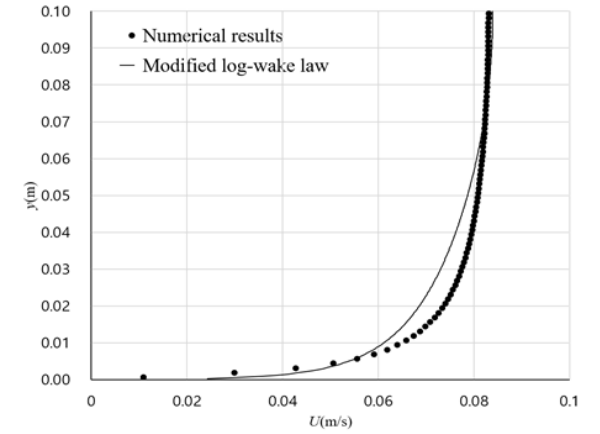
(c) buoyancy modified $k-\epsilon$ model



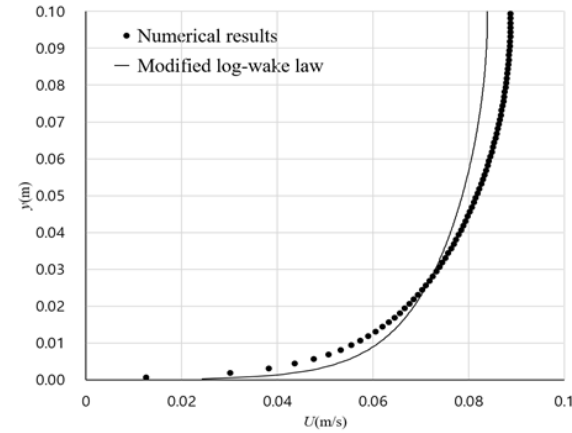
(d) buoyancy modified $k-\omega$ SST model



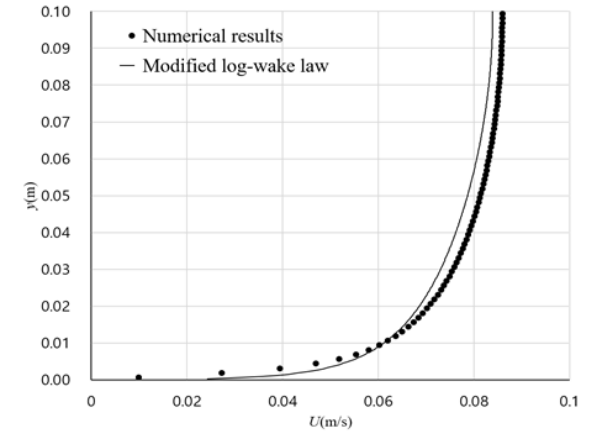
(a) $k-\epsilon$ model



(b) $k-\omega$ SST model



(c) buoyancy modified $k-\epsilon$ model

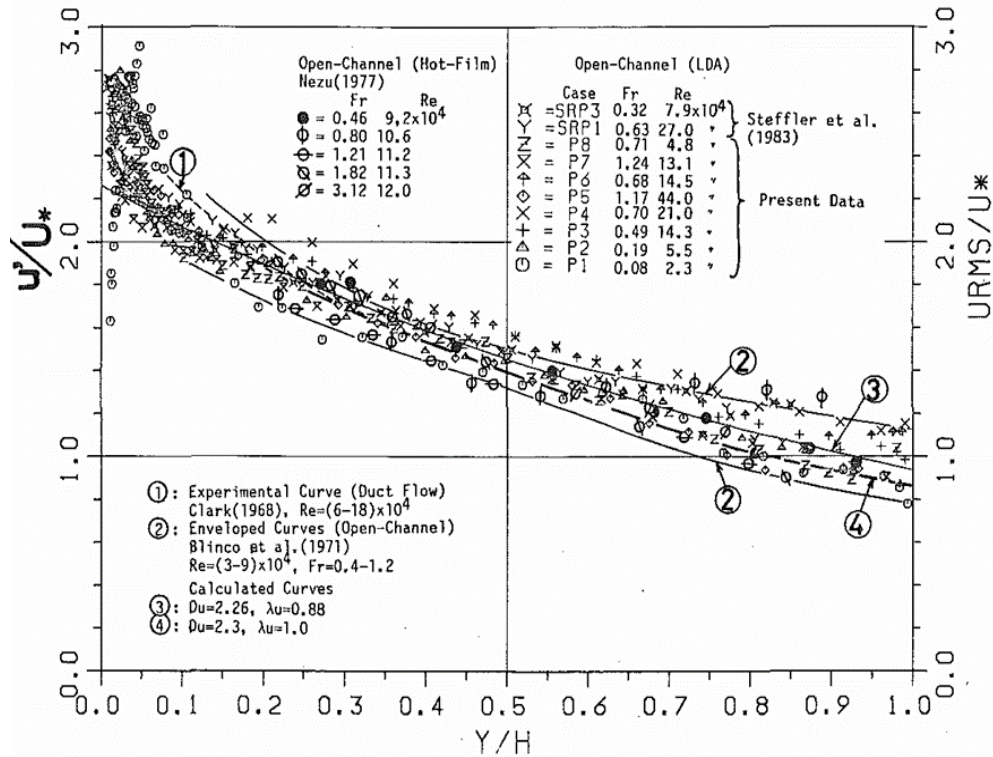


(d) buoyancy modified $k-\omega$ SST model

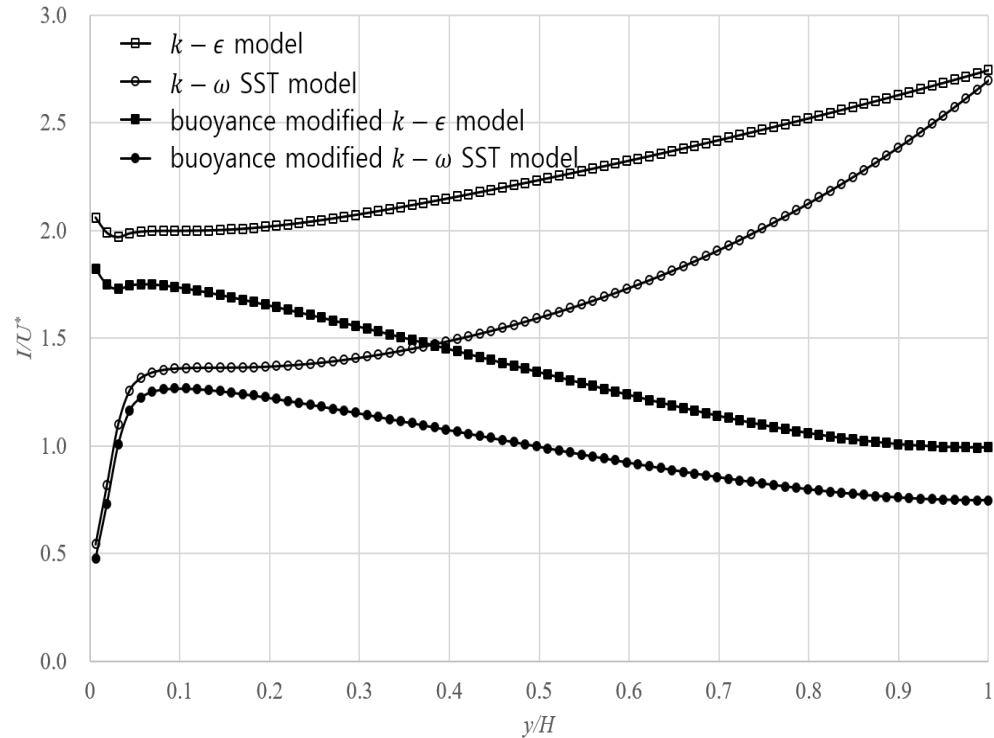
수심 방향 난류운동에너지 분포 비교



- ✔ 부력 수정 난류 모형은 자유수면 부근 난류 운동에너지 감소 현상을 정성적으로 재현
- ✔ 단, 바닥면 부근의 높은 난류에너지 재현은 한계

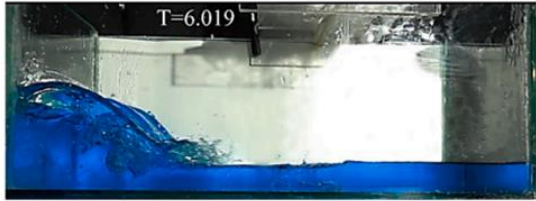


Turbulence intensity of Nezu and Rodi experiments(Nezu and Rodi, 1986).

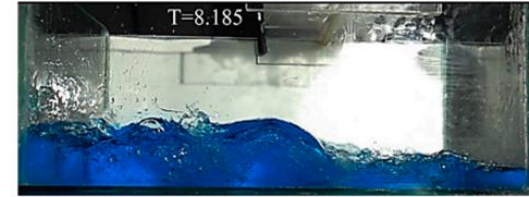
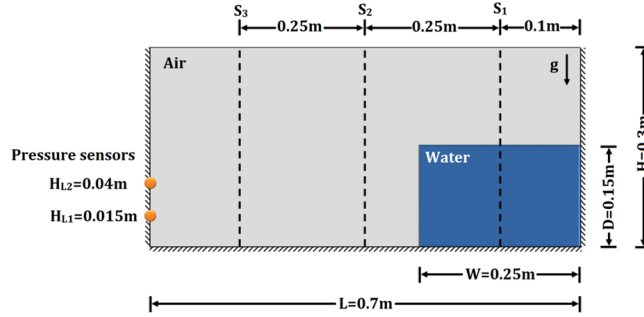


Turbulence intensity of selected turbulence models

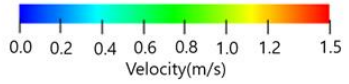
2차원 댐 붕괴 흐름 모의 - 수면 변화 비교



(a) experimental result (Garoosi et al., 2022)



(a) experimental result (Garoosi et al., 2022)



(b) interFoam+ $k-\omega$ SST



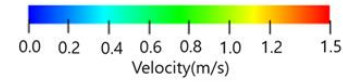
(c) interFoam+
buoyance modified $k-\omega$ SST



(d) interIsoFoam+ $k-\omega$ SST



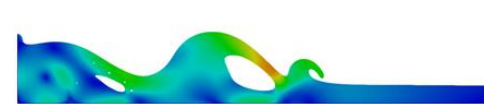
(e) interIsoFoam+
buoyance modified $k-\omega$ SST



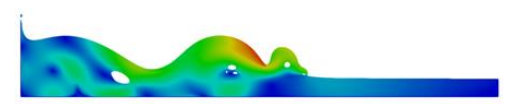
(b) interFoam+ $k-\omega$ SST



(c) interFoam+
buoyance modified $k-\omega$ SST

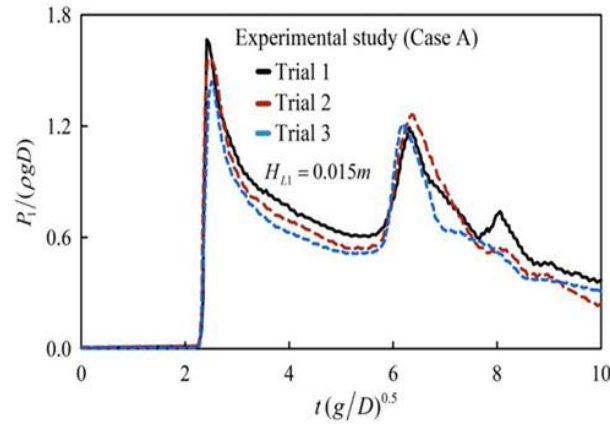
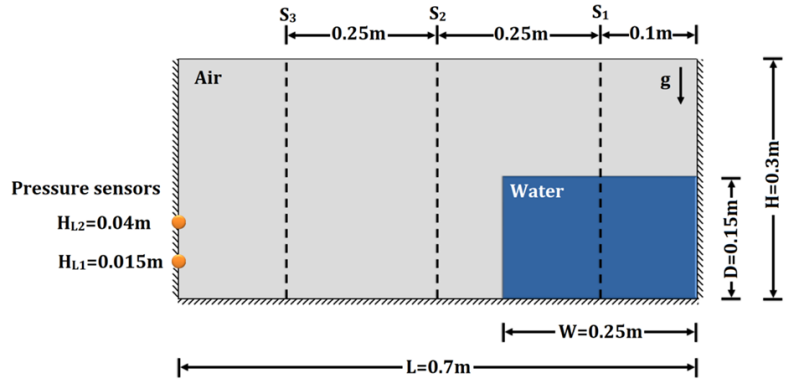


(d) interIsoFoam+ $k-\omega$ SST

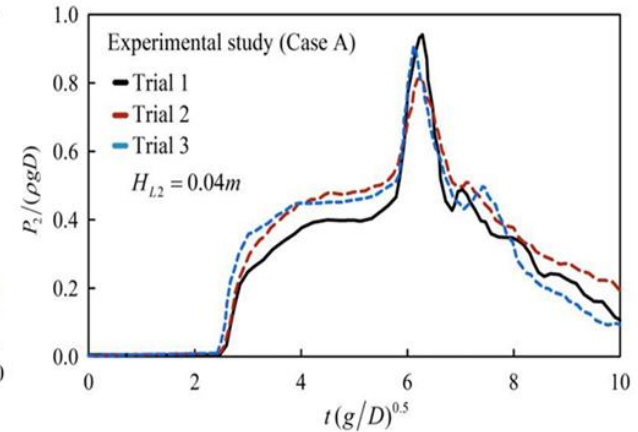


(e) interIsoFoam+
buoyance modified $k-\omega$ SST

2차원 댐 붕괴 흐름 모의 - 압력 변화 비교

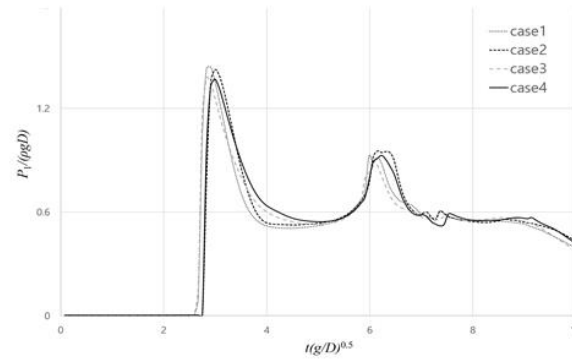


(a) pressure at H_{L1}

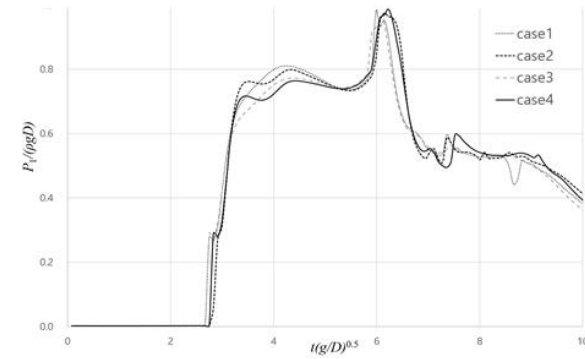


(b) pressure at H_{L2}

The time history of pressure variations at two different sampling points



(a) pressure at H_{L1}



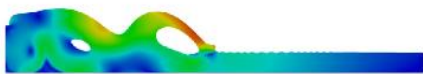
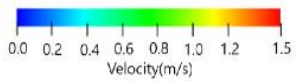
(b) pressure at H_{L2}

The time history of pressure variations at two different sampling points

부력 수정 k-omega SST 모형 적용성 고찰



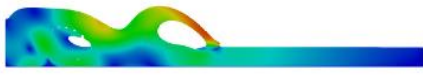
- ✔ 개수로 등류 흐름 조건에서 부력 수정 k-omega SST 모형은 연직유속 분포를 비교적 유사하게 재현하며, 난류운동에너지를 물리적으로 타당하게 모의
- ✔ 댐붕괴파 모의시 VOF 기법에 따라 상이한 결과 -> 난류 모형의 문제? 계산 과정의 문제?
- ✔ InterFoam 적용시 공동(cavity)을 과소하게 모의
- ✔ InterIsoFoam 적용시 비물리적인 공동 형태 모의
- ✔ 부력 수정 모형은 중력 방향의 밀도차를 고려 -> 경계면 형상에 따른 난류 감쇄 모의에 한계가 있을 것으로 추정됨



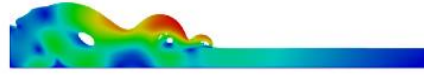
(b) case1



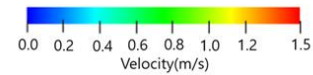
(c) case2



(d) case3



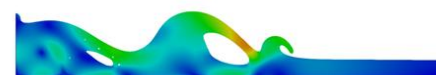
(e) case4



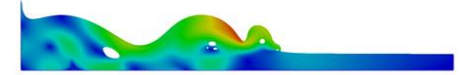
(b) interFoam+ $k-\omega$ SST



(c) interFoam+
buoyance modified $k-\omega$ SST



(d) interIsoFoam+ $k-\omega$ SST



(e) interIsoFoam+
buoyance modified $k-\omega$ SST