

10th OKUCC

수리학 분야에서 OpenFOAM 활용 현황과 전망

2023.10.19

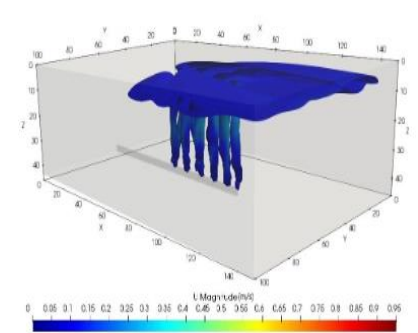
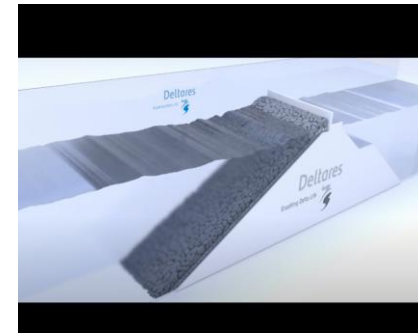
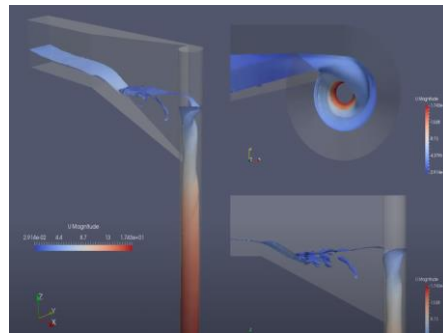
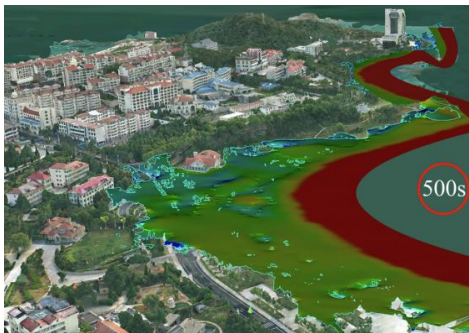
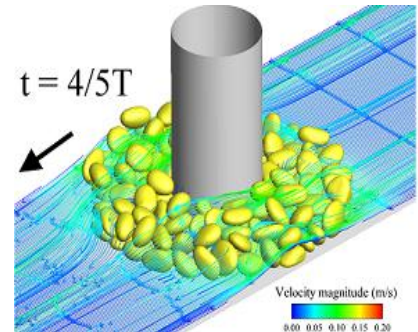
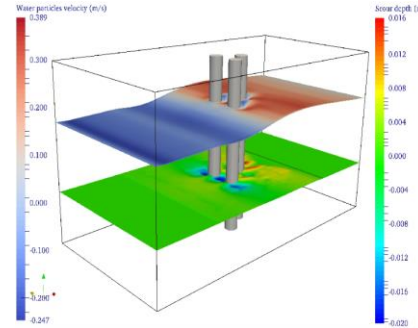
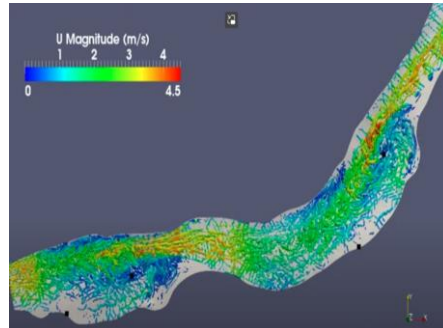
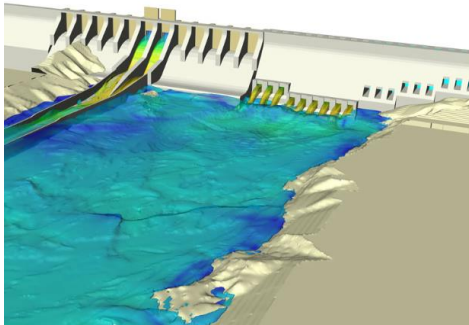
한국건설기술연구원 수자원하천연구본부
연구위원 이두한

수리학(Hydraulics)의 대상 분야

I 수리학과 CFD

수리학은 물과 관련된 토목구조물을 대상으로 함

- 수리구조물 - 댐, 저수지, 교량
- 하천 - 하도, 제방, 기타 하천시설 등
- 환경/생태 수리 - 하천 오염물 거동, 해안 방류, 어도 등
- 도시홍수 - 도시침수, 방수로 등
- 해안공학 - 해안 유동, 방파제 등 -> TU Delft, Deltares



수리학(Hydraulics)의 대상 분야

I 수리학과 CFD

◆ 수리학 분야 흐름의 특성

- 자유수면(Free surface)
- 높은 Reynolds number
- 공간적/시간적 범위가 매우 큼
- 조도계수가 매우 큼
- 경계면 형상의 복잡성 및 불규칙성

◆ 3D CFD 적용

- Reynolds-Averaged Navier–Stokes(RANS) 적용이 일반적임
- 격자크기 수십 cm 이상이며, 종횡비가 매우 큼
- OpenFOAM(InterFoam), FLOW3D, CFX 등



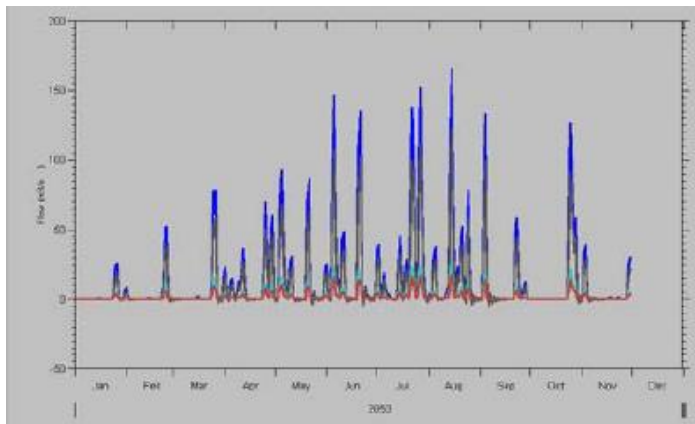
수리해석 모형

I 수리학과 CFD

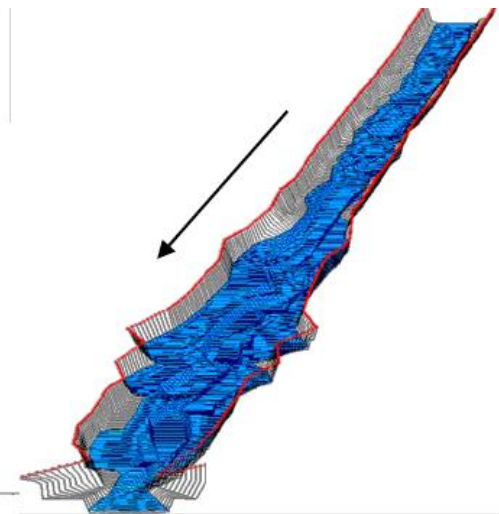
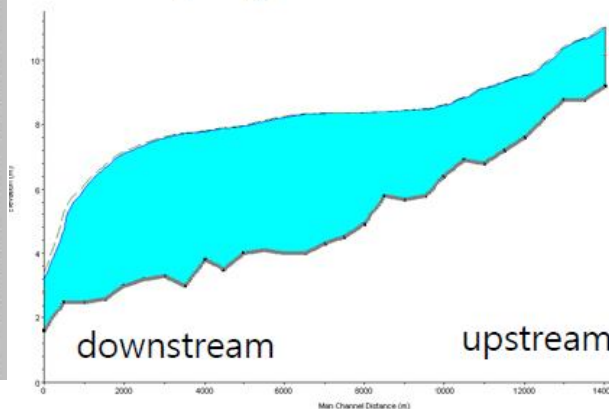
◆ 1차원 모형

- 1차원 Saint Venant 방정식 해석
- 단면 평균 유속, 수위 계산
- 공간규모: 수십 m – 수십 km
- 시간규모: 수 시간 – 수백 일
- 수리해석의 기본으로 주로 미공병단의 HEC-RAS 모델 적용

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g (S_0 - S_f) = 0$$



< Anyang-cheon at floods >



수리해석 모형

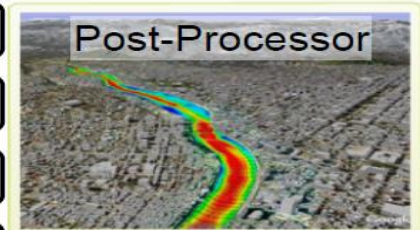
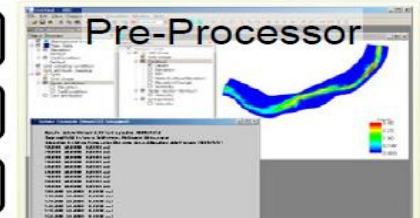
I 수리학과 CFD

◆ 2차원 모형

- 2차원 Saint Venant 방정식 해석(수심평균 유속)
- Navier-Stokes 방정식의 수심 적분 방정식(정수압 가정)
- 공간적/시간적 범위는 1차원 모형과 유사
- 도시 침수, 디지털 트윈 등으로 적용 분야 확대
- GIS, DEM, 위성영상 등과 연계 추세(HEC-RAS 2D 등)

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x_i} - g \frac{\partial (H+h)}{\partial x_i} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_i} \int_z^{H+h} \rho' dz - g \delta_{3i} + (v_L + v_T) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + v_T \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Nays2DH	Hokkaido Univ, Flow and sediment transport model
Nays2DFlood	Hokkaido Univ, Flow model for floods
ELIMO	Hokkaido Univ, Tsumami wave and reach time model
HDM-2D	Seoul National Univ, Transient/steady flow model
FaSTMECH	USGS, Flow and sediment transport model
StoRM	USGS, Flow model with wet/dry, sub/supercritical flow
River2D	Alberta Univ, Flow model and habitat simulations

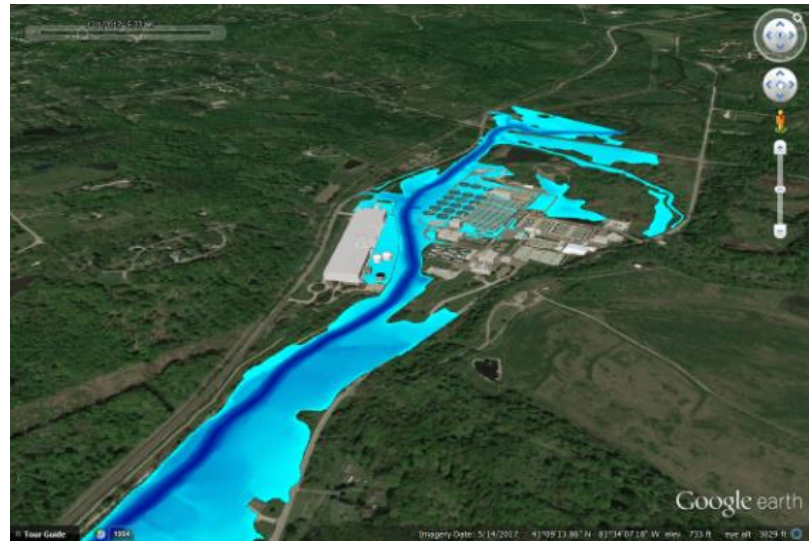
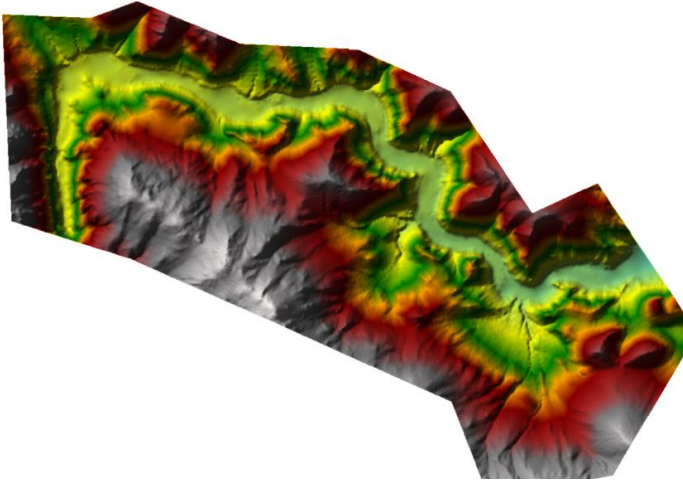


Ref: <http://i-ric.org>

수리해석 모형

I 수리학과 CFD

2차원 모형 적용 사례



수리해석 모형

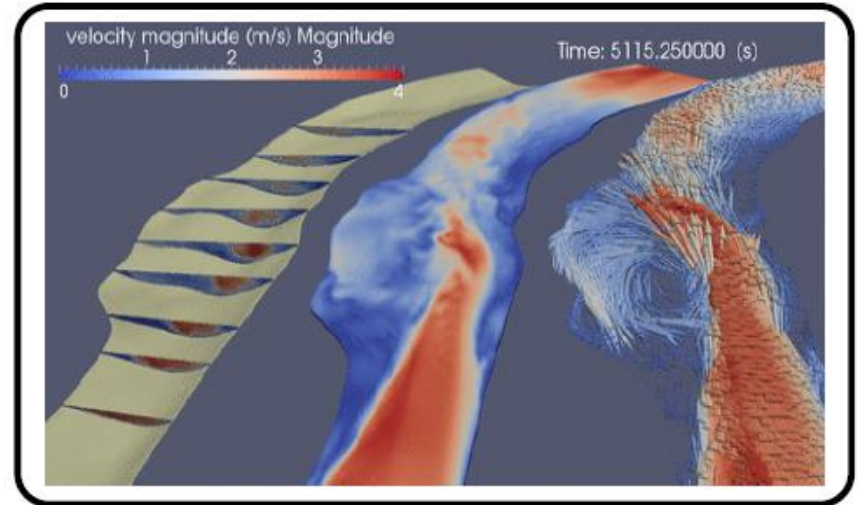
I 수리학과 CFD

수리분야 3차원 모형 분류

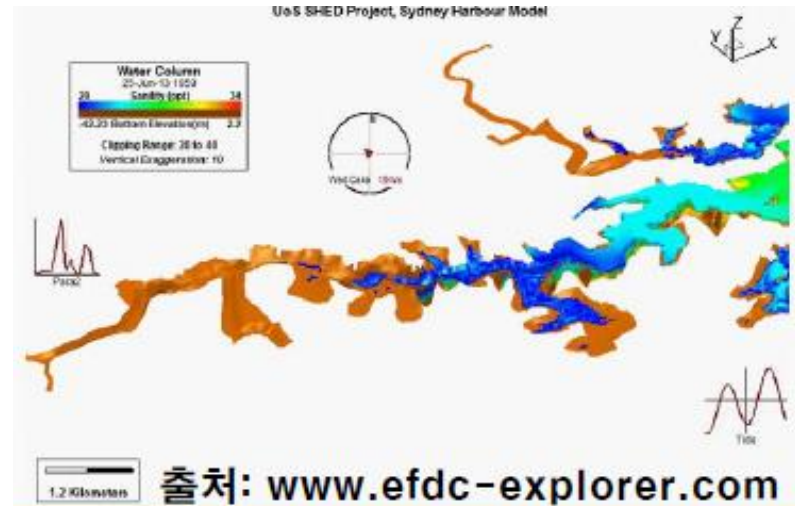
- 정수압 모형
 - EFDC, Delft3D, CH3D
- 동수압 모형
 - OpenFOAM, FLOW3D, CFX

동수압 모형 적용 분야

- 수리구조물 흐름 해석
- 하천 사행, 합류부 해석
- 유사 해석(평면 및 종단 변화)
- 간극수압대 해석
- 하천 내 물질 확산



출처: Mark Schmeckle, Arizona State Univ.



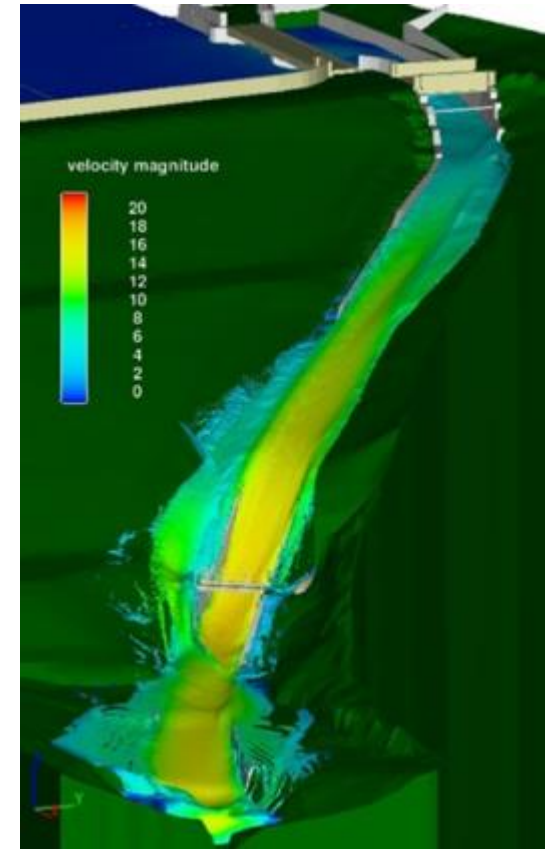
출처: www.efdc-explorer.com

댐 수리 해석

OpenFOAM 적용 사례

◆ 댐 CFD 해석 개요

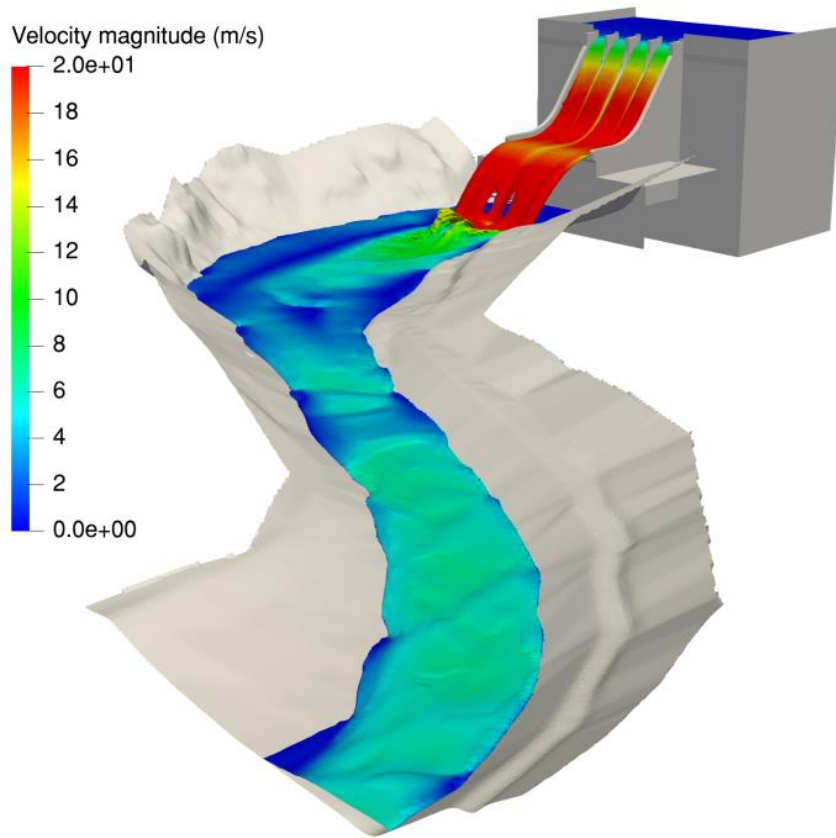
- 다양한 유량 조건에서 구조물과 흐름의 안정성 해석
- 해석영역: 댐 상류 저수지, 접근수로, 여수로, 감세지, 하류 흐름
- 전통적으로 수리모형실험으로 검증
- CFD는 예비설계 단계에서 주로 적용
- 일부 수리모형실험을 대체하는 추세
- 대표모형: OpenFOAM, FLOW3D, Ansys CFX 등



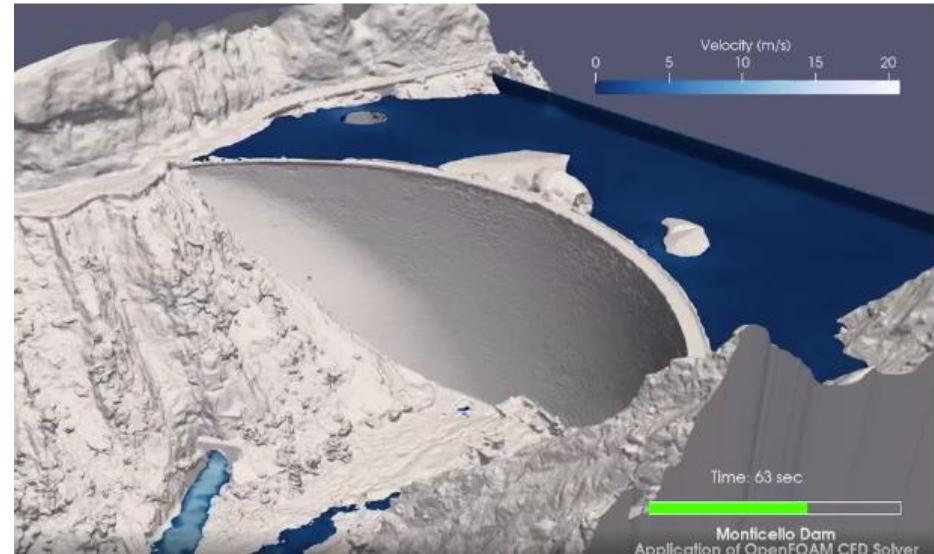
댐 수리 해석

OpenFOAM 적용 사례

◆ 댐 CFD 해석 사례



<Sa Stria Dam, Italy>

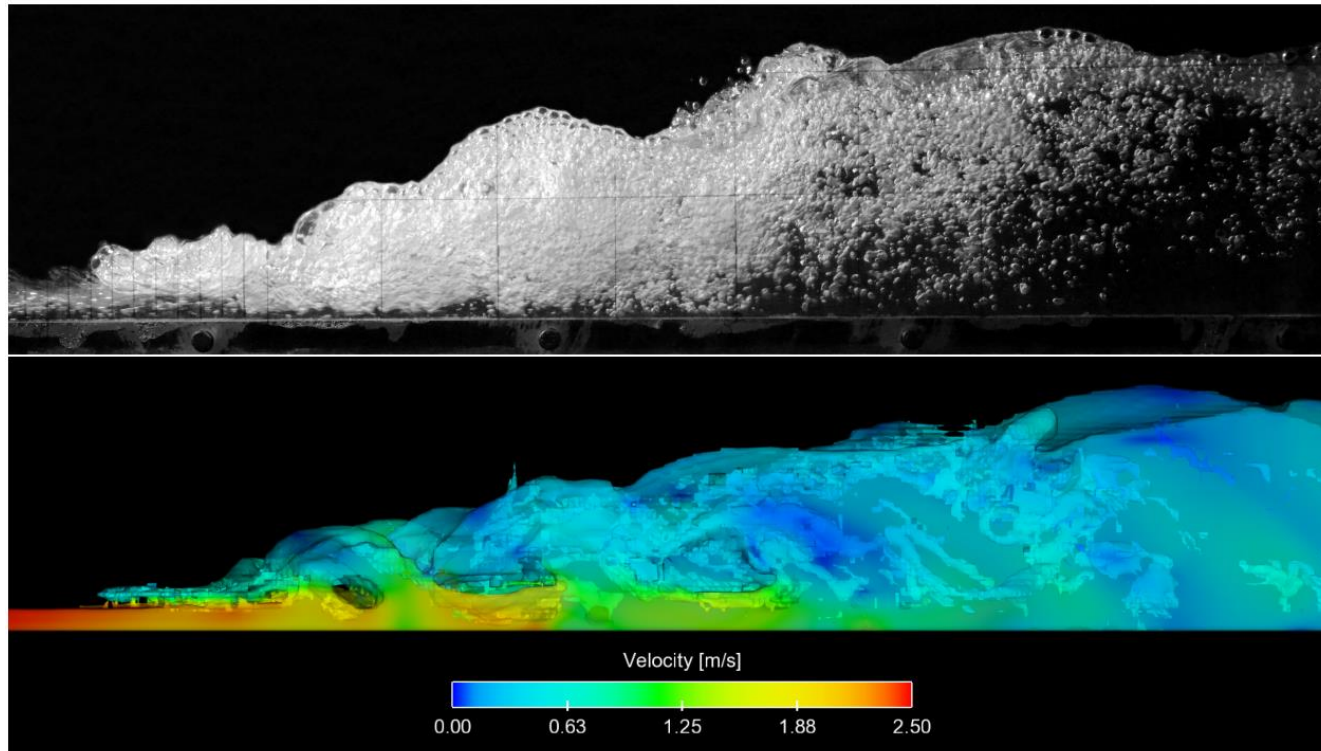


<Monticello Dam, California>

Hydraulic jump

II OpenFOAM 적용 사례

- 높은 Froud number에서 전단흐름, 자유수면, 공기혼입 등의 복합 거동 해석
- 다양한 실험 및 수치 모의 사례가 많아 수리분야의 벤치마킹으로 활용
- 관련 기법은 고유속 수리구조물 해석에 활용



Hydraulic jump

OpenFOAM 적용 사례

- RANS 모형의 평균 유동 정확도는 90% 수준으로 실무적인 적용이 가능한 수준으로 평가됨
- 단, 재순환영역의 규모에 대한 오차가 높은 편임
- RNG k- ϵ 모형도 공기혼입 모형 도입으로 정확도 향상
- DES 및 LES는 정확도는 높으나 고비용으로 실무 적용에는 한계
- 특히, LES-VoF 기법의 수치불안정 문제 발생

Table 5. Numerical simulation studies of hydraulic jumps and inlet Froude number (F_1).

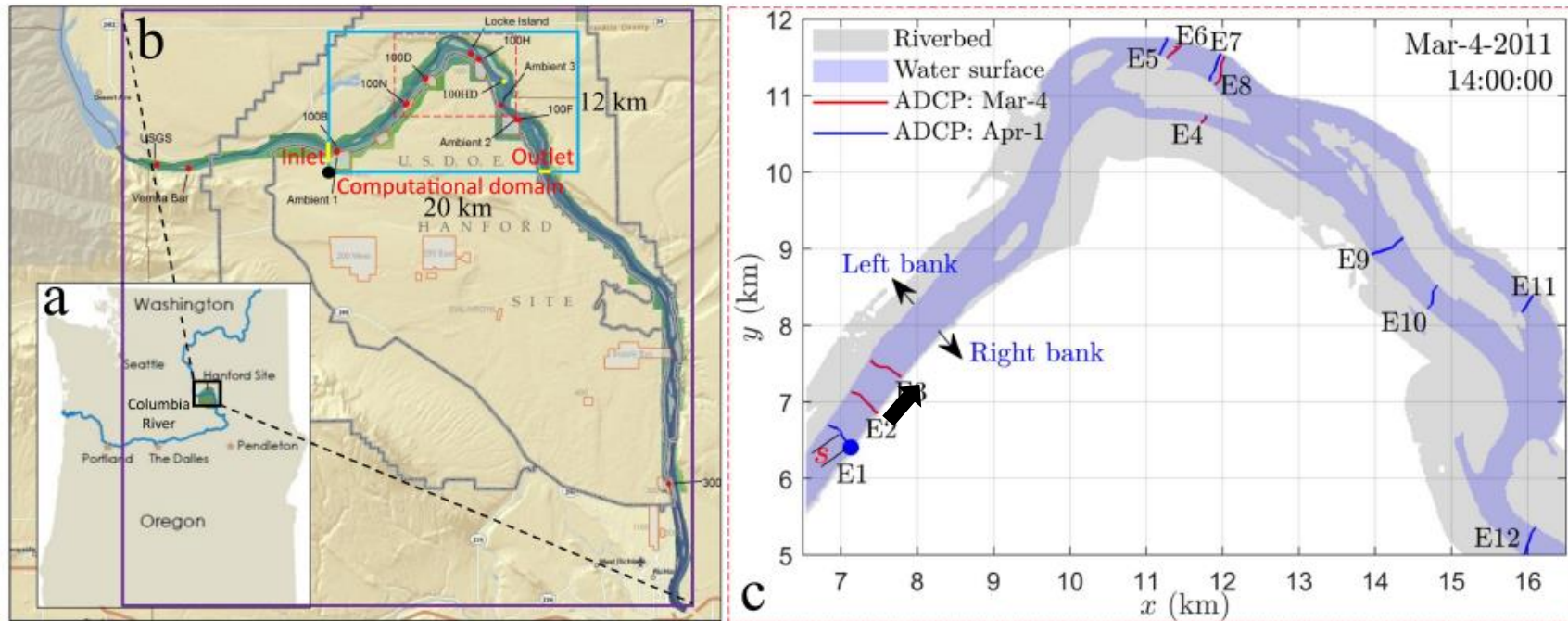
Flow Field Description	References	Year	Numerical Approach	Turbulence Model	Resolution Dependence Study	F_1
Lagrangian Methods	Lopez et al. [57]	2010	SPH	$k - \epsilon$	Meshless method	3.25, 3.41, 3.58, 3.61, 3.64, 4.12, 4.45, 4.88, 5.13, 5.24, 6.62, 7.06, 7.16
	De Padova et al. [58]	2013	XSPH	mixing length and $k - \epsilon$	Meshless method	3.90, 8.30
	De Padova et al. [59]	2018	XSPH	mixing length and $k - \epsilon$	Meshless method	2.58, 2.66, 2.70, 3.89, 4.99, 5.11
Eulerian Methods	Chippada et al. [60]	1994	RANS	STD $k - \epsilon$	–	2.00, 4.00
	Zhao et al. [61]	2004	RANS	STD $k - \epsilon, k - l$	–	1.46
	Gonzalez and Bombardelli [62]	2005	RANS	STD $k - \epsilon$	✓	2.00, 2.50, 3.32
	Carvalho et al. [14]	2008	RANS	RNG $k - \epsilon$	–	6.00
	Abbaspour et al. [63]	2009	RANS	STD $k - \epsilon$ RNG $k - \epsilon$	–	4.00, 4.70, 5.00, 5.70, 5.80, 6.10, 7.00, 7.20, 8.00
	Ma et al. [64]	2011	RANS	SST $k - \omega$	–	1.98
	Ebrahimi et al. [65]	2013	RANS	STD $k - \epsilon$	–	3.00, 3.30, 3.60, 3.60, 5.00, 5.70, 6.70, 8.00
	Bayon-Barrachina and Jiménez [66]	2015	RANS RANS	STD $k - \epsilon$ RNG $k - \epsilon$ SST $k - \omega$	✓	6.10
	Witt et al. [67]	2015	RANS	realizable $k - \epsilon$	✓	2.43, 3.65, 4.82
	Bayon et al. [5]	2016	RANS	RNG $k - \epsilon$	✓	6.50
	Witt et al. [68]	2018	RANS	realizable $k - \epsilon$	✓	2.43, 3.65, 4.82
	Harada and Li [69]	2018	RANS	$k - \epsilon, k - \omega$	✓	5.80
	Valero et al. [6]	2018	RANS	RNG $k - \epsilon, k - \epsilon$	✓	3.12, 3.88, 4.20, 6.17, 6.37, 6.47, 8.27, 9.52
	Ma et al. [64]	2011	DES		✓	1.98
	Jesudhas et al. [70]	2018	DES		✓	8.5
Gonzalez and Bombardelli [62]	2005	LES		✓	2.00, 2.50, 3.32	
Lubin et al. [71]	2009	LES		–	5.09	
Mortazavi et al. [19]	2016	DNS	Full solution of all the scales	✓	2.00	

하천 흐름 해석

OpenFOAM 적용 사례

◆ Columbia River(Chen et al., 2021)

- 30km 구간, 5년 동안의 흐름 모의(최대시간 간격 3sec)

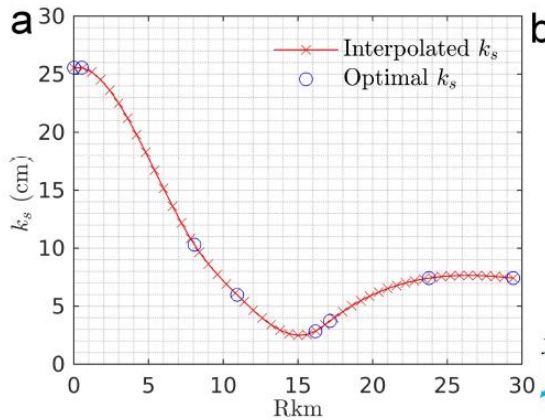
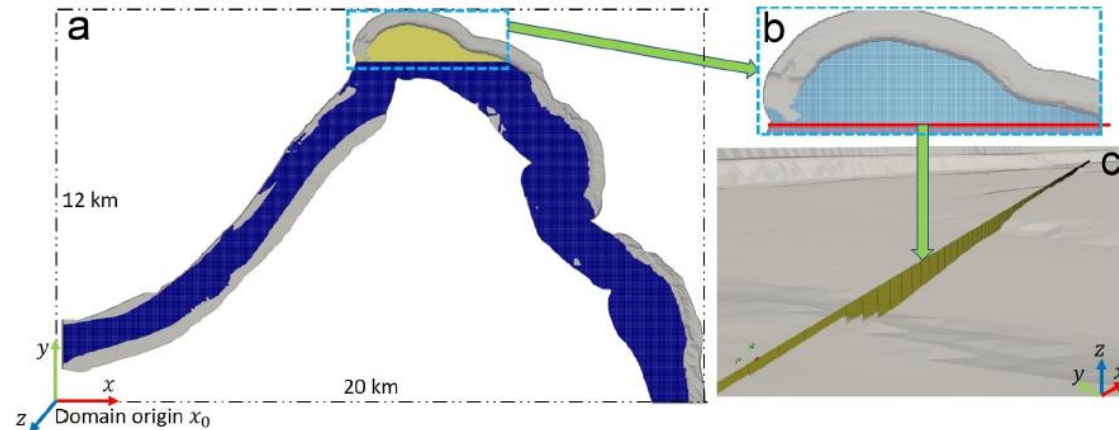


하천 흐름 해석

OpenFOAM 적용 사례

◆ Columbia River(Chen et al., 2021)

- 50개 구간으로 구분하여 조도계수 보정
- 경계조건은 1D 모형과 연계하여 설정
- 512개 영역으로 구분하여 CPU 512개 사용(계산시간 6day, 1.1million CPU hours)
- LiDAR 측량에 의한 DEM 자료 활용
- 격자크기 20m×20m×1.0m

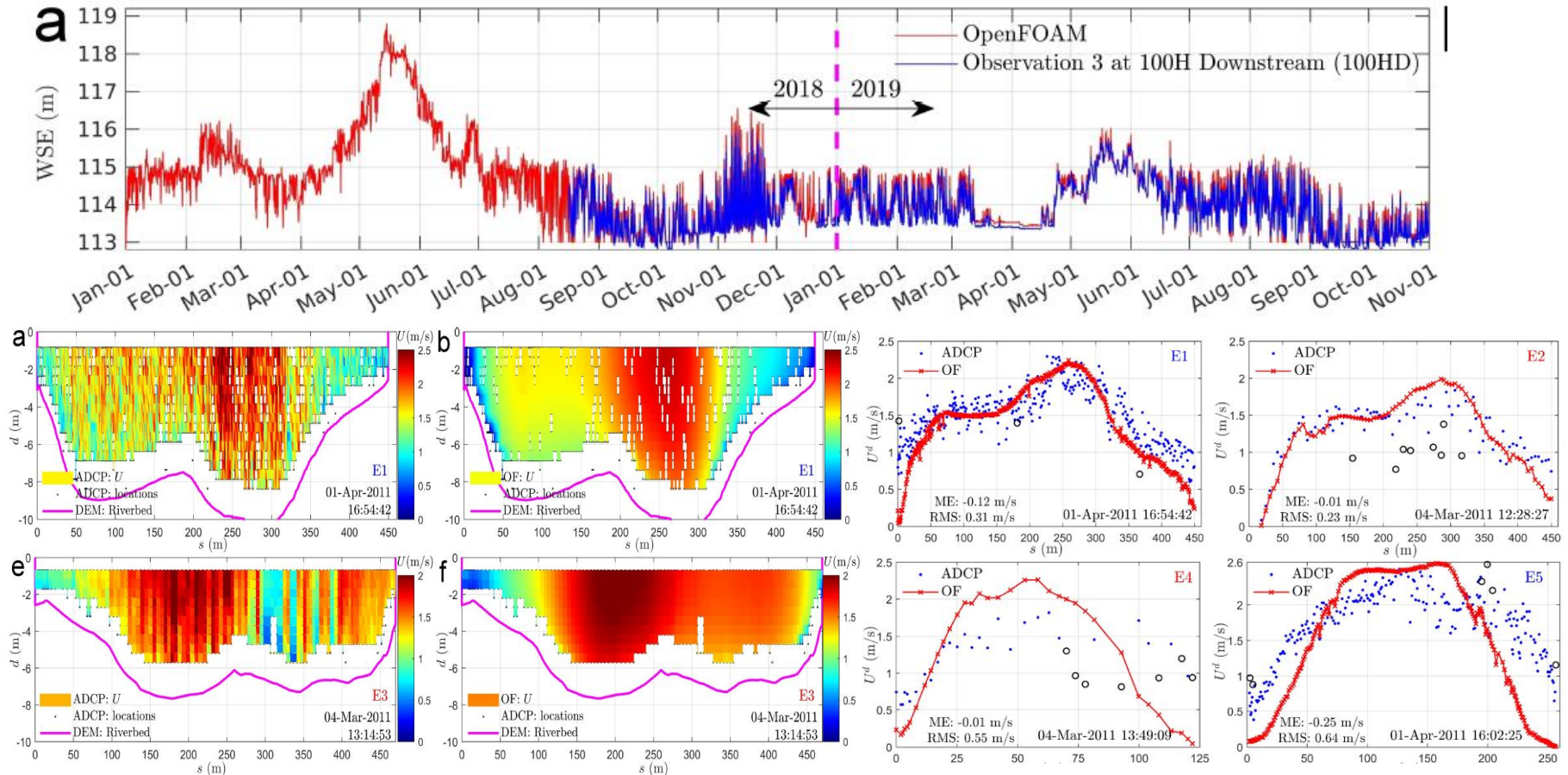


하천 흐름 해석

OpenFOAM 적용 사례

Columbia River(Chen et al., 2021)

- 수위 관측값 및 유속(ADCP) 측정값과 비교
- 수위는 10cm 내외 오차 발생, 단면 유속 분포는 유사하게 모의

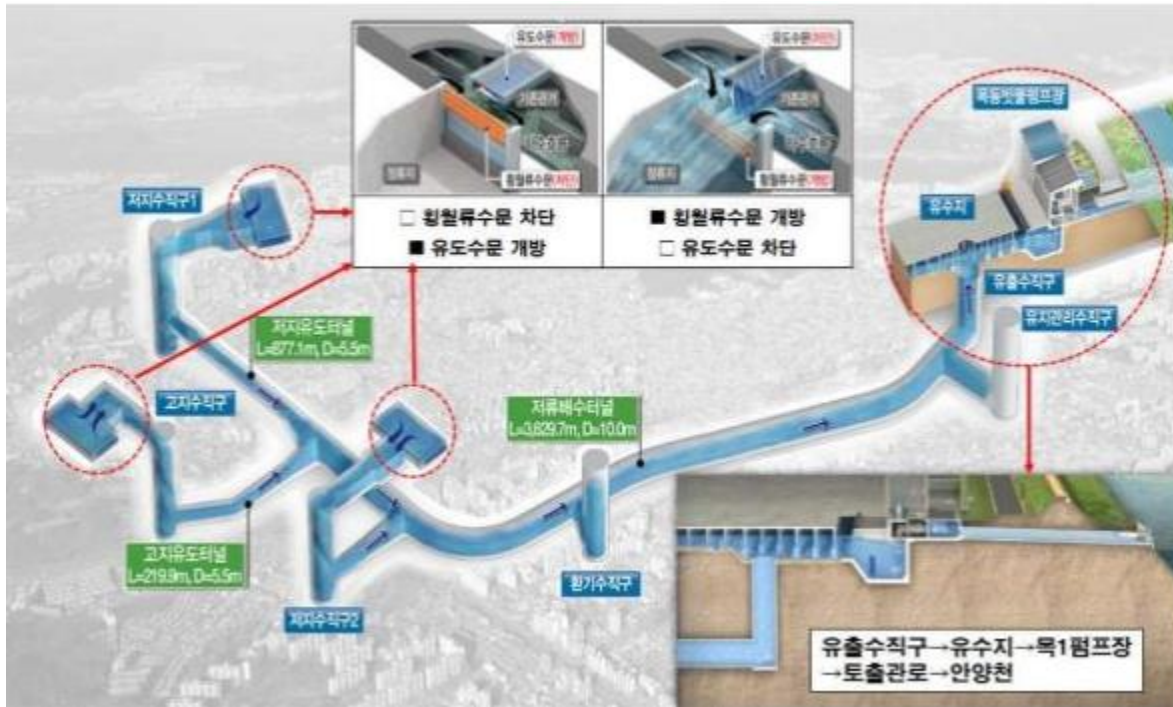


지하 방수로

OpenFOAM 적용 사례

◆ 빗물터널 사업

- 기후변화에 따른 홍수량 증가로 도시침수 해결 방안으로 제시
- 서울을 시작으로 부산, 대전 등 도심 빗물터널 사업 활성화 예상

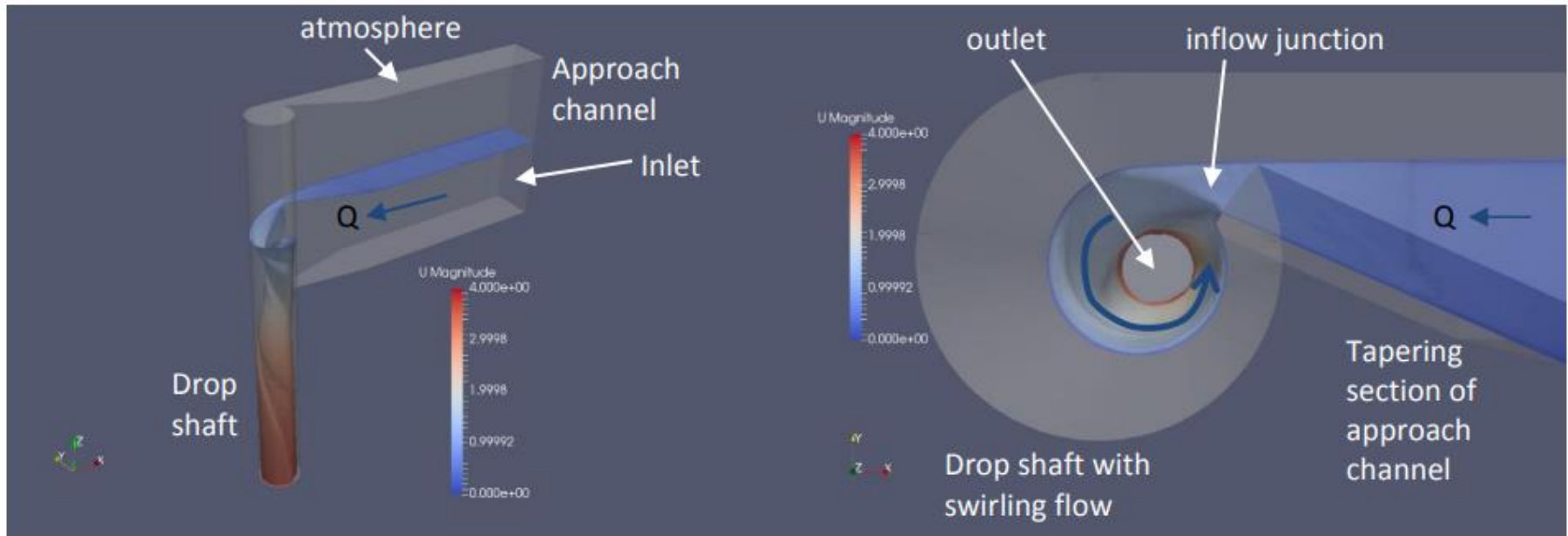


지하 방수로

OpenFOAM 적용 사례

◆ Vortex intake(수직유입구)

- 대규모 유량의 지하방수로 안정적인 유입을 위한 수직 유입구
- 흐름질식방지를 위한 구조물 규모 및 형태 결정 필요
- 공기연행 및 진동 등의 해석 필요



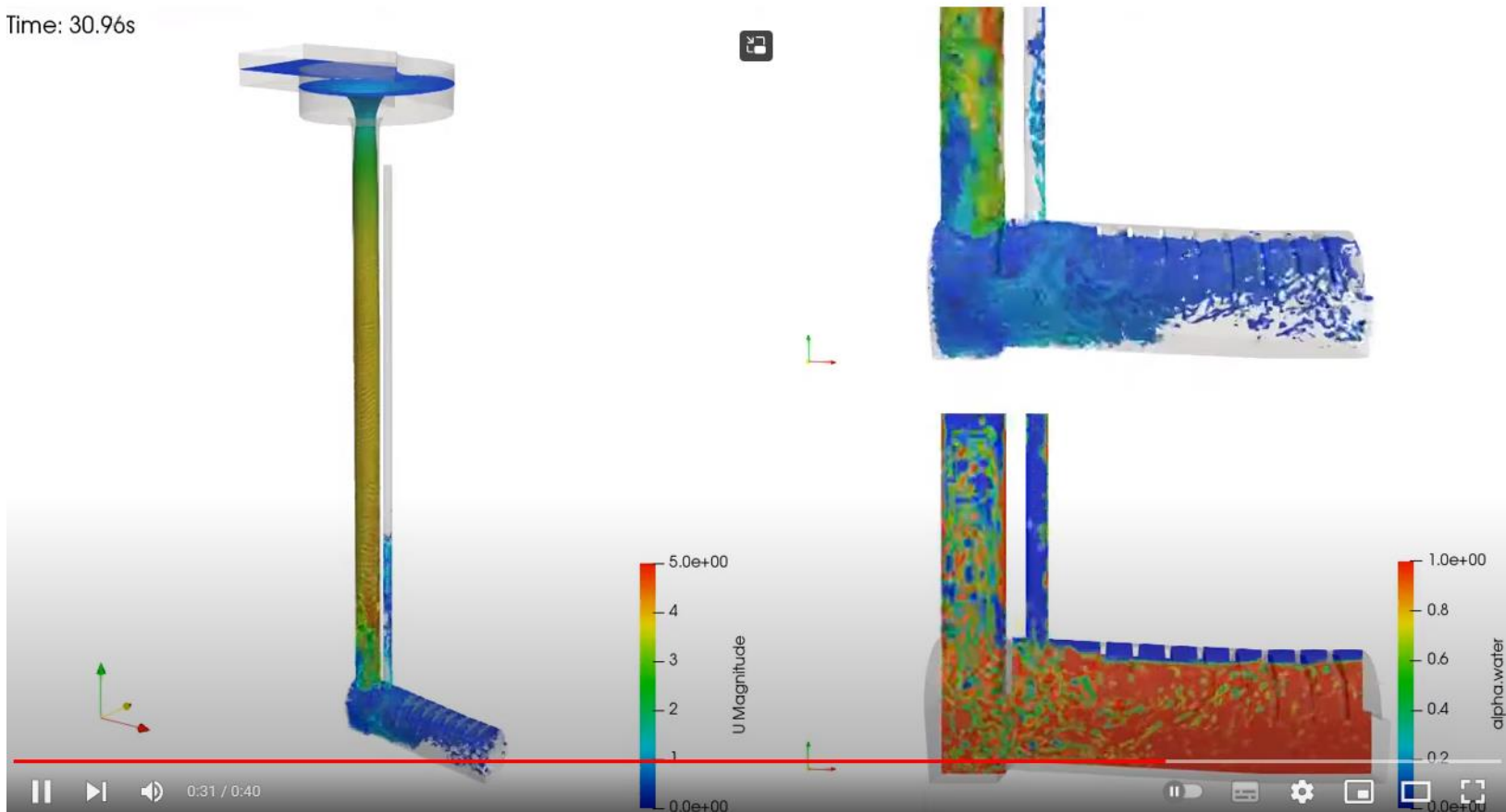
지하 방수로

OpenFOAM 적용 사례

지하 유입구 해석 사례

- 나선형 유입구 및 공기 챔버 해석

Time: 30.96s

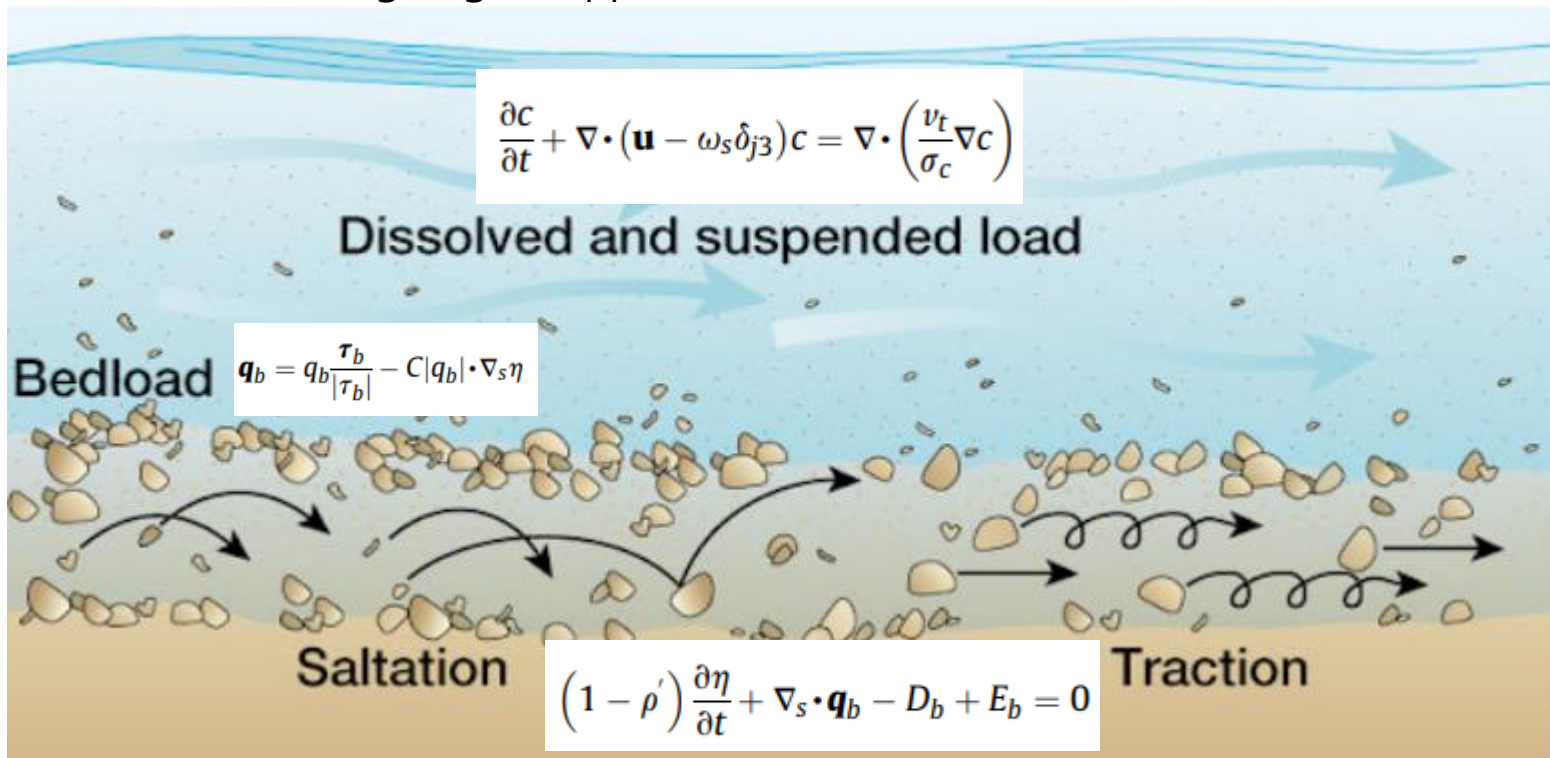


유사이송 OpenFOAM Solver

OpenFOAM 적용 사례

유사이송 및 하상변동

- 흐름에 의한 유사 침식, 퇴적, 이송 등을 해석
- 3개의 방정식(소류사 이송, 부유사 이송, 하상변동) 해석
- 또는 입자이동(Lagrangian approach) 모델 적용

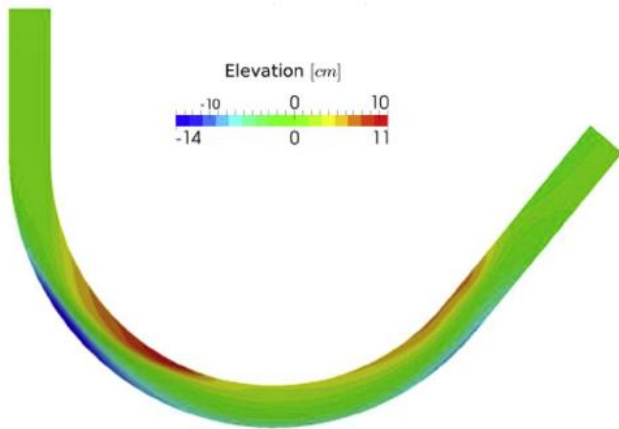


하상변동 OpenFOAM Solver

OpenFOAM 적용 사례

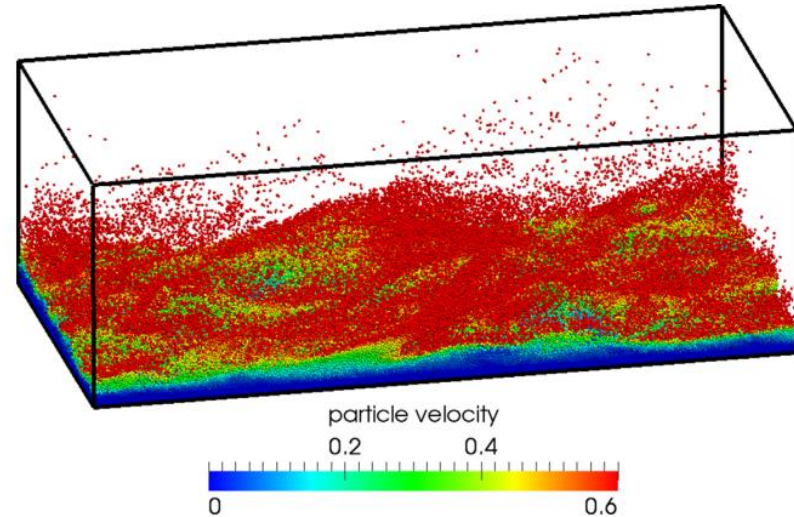
sedFOAM(Sattar et al., 2017)

- 이동격자 적용



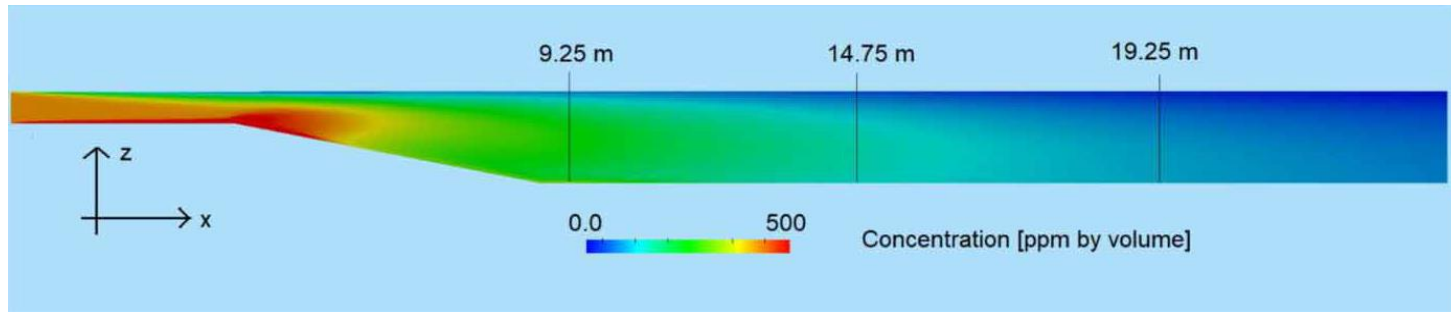
SediFoam(Sun & Xiao, 2016)

- Lagrangian model



sediDfritFoam(Olsen, 2023)

- drift-flux approach

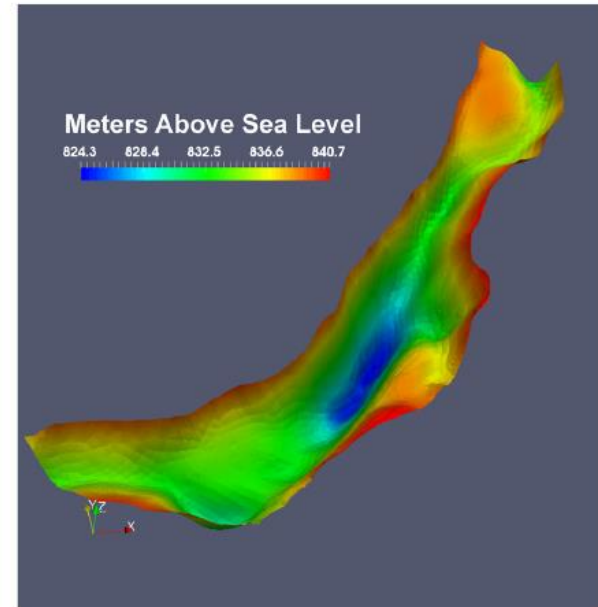
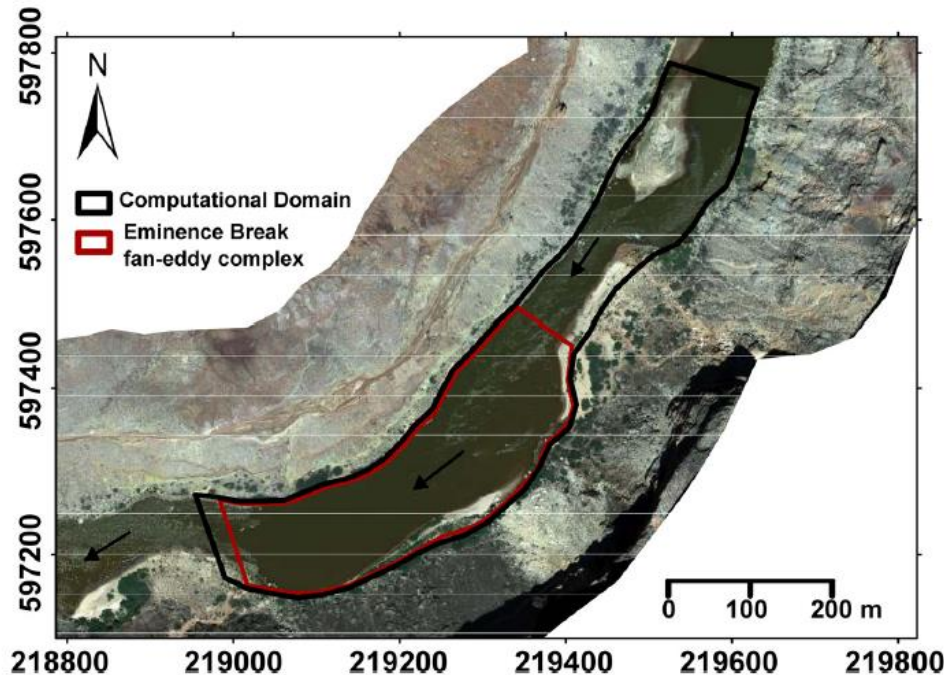


하천 하상변동 해석

OpenFOAM 적용 사례

Colorado River(Alvarez et al., 2021)

- 하천 규모에 DES 및 유사 이송 모의
- 길이 약 1km, 강폭 78-149m, 수심 0.6-17m
- 격자 크기 0.7-1.0m
- 모의시간 4hr -> 슈퍼컴(cpu 95)으로 계산시간 54hr



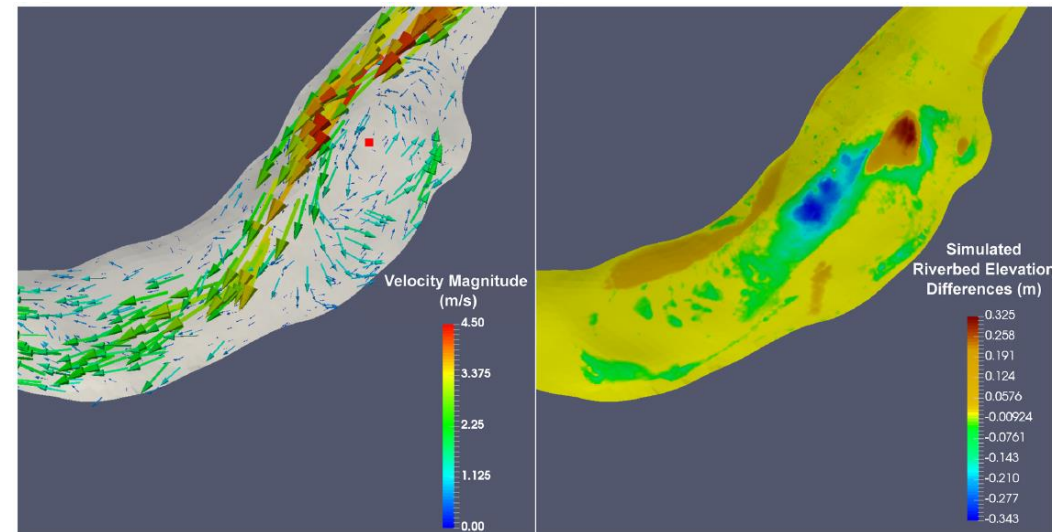
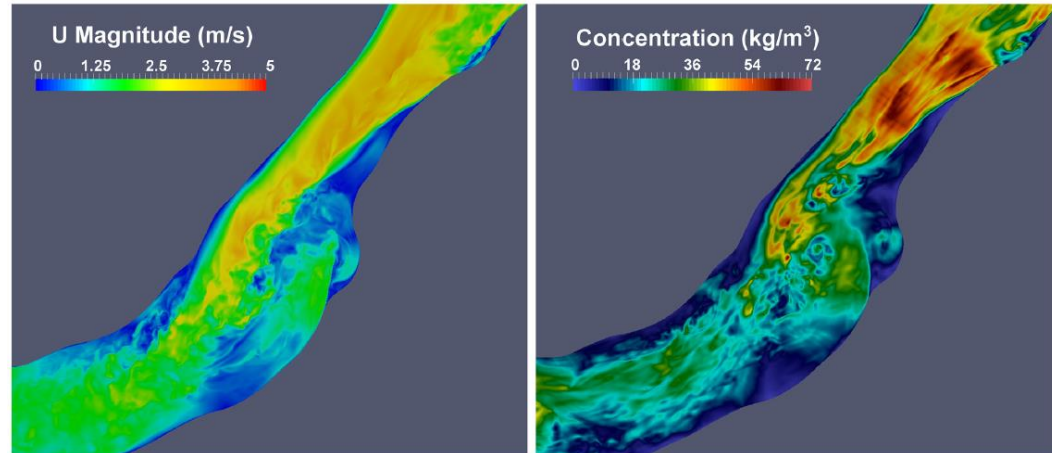
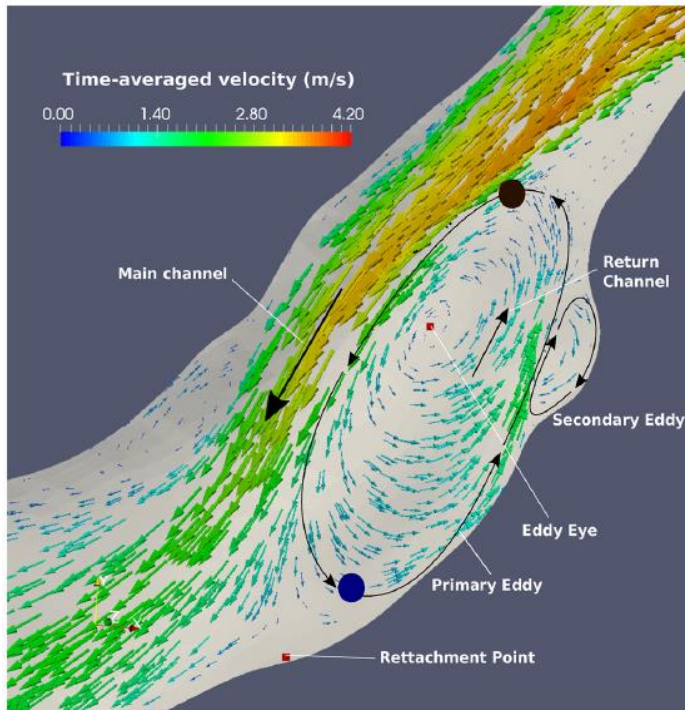
<대상 지역 지형 자료>

하천 하상변동 해석

OpenFOAM 적용 사례

Colorado River(Alvarez et al., 2021)

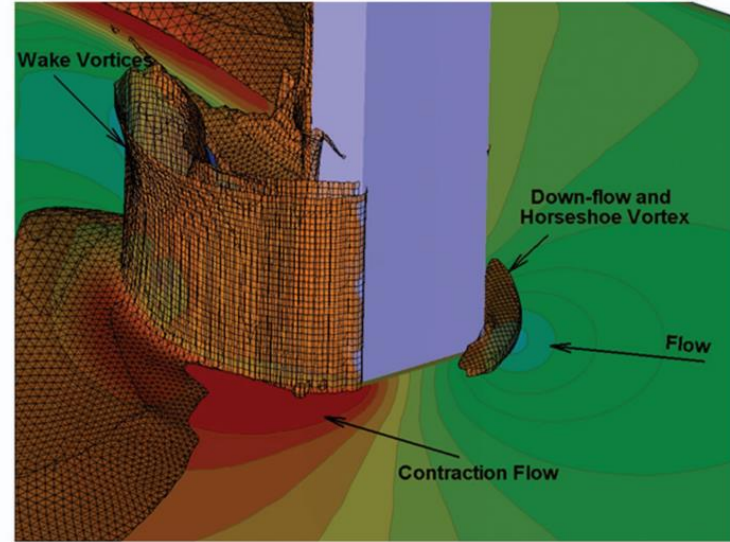
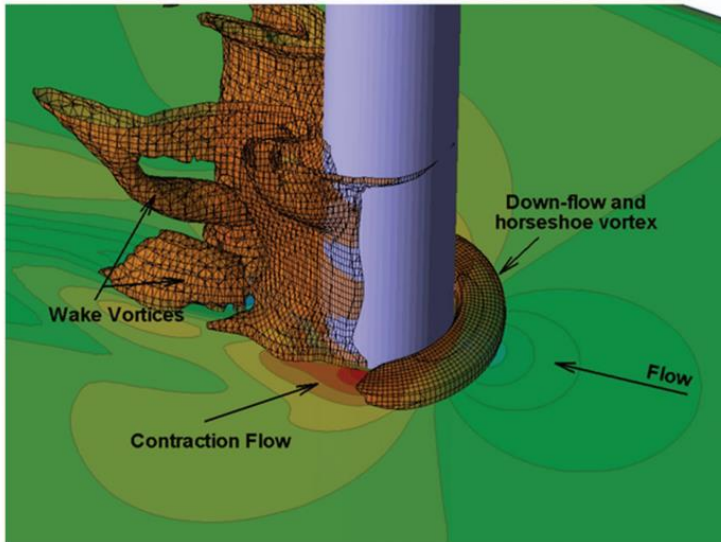
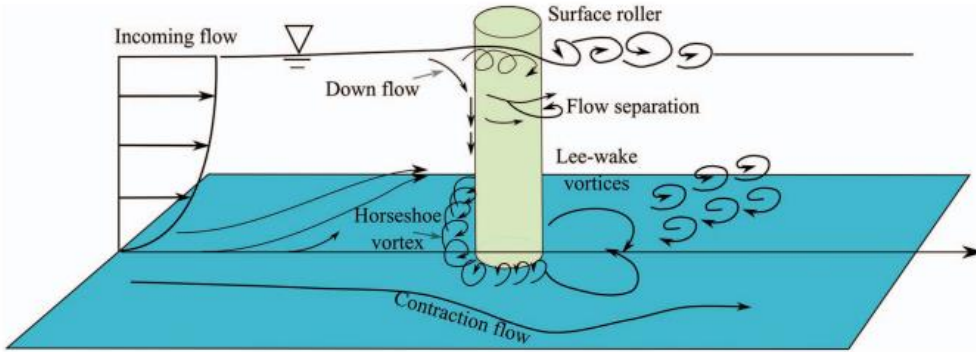
- 수면은 2D 모의(OpenFOAM) 결과를 시간별로 격자 자동 생성
- 길이 약 1km, 강폭 78-149m, 수심 0.6-17m
- 격자 크기 0.7-1.0m



교량 세굴(국부 세굴)

OpenFOAM 적용 사례

교량 세굴 메커니즘



<교량 세굴 3D RANS 모의(Lai et al., 2003)>

교량 세굴(국부 세굴)


 OpenFOAM 적용 사례

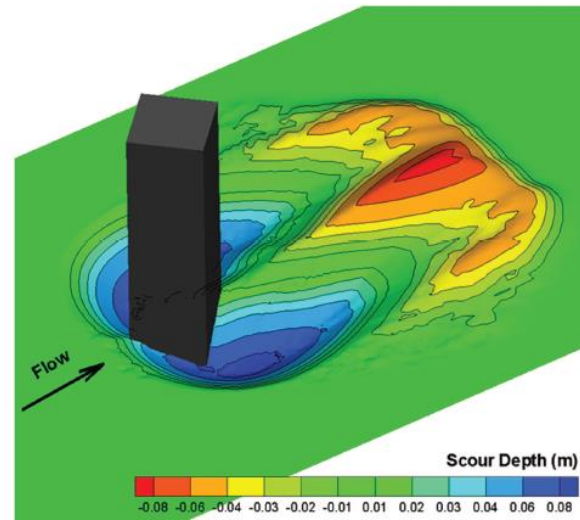
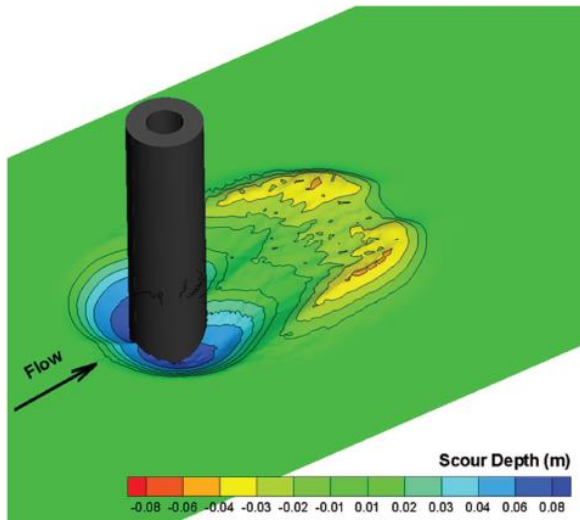

 교량 세굴 모의 관련 연구(Yong et al., 2022)

References	Numerical method/code	Turbulence treatment	Sediment load	Equilibrium or nonequilibrium sediment formula	Single size or multisize sediment	Sand slide treatment	Scour hole tracking method	Free surface?	Notes
Olsen and Melaen (1993)	FVM, SSIM	RANS (k -epsilon)	Suspended load (van Rijn 1989)	Equilibrium	Single	Limit maximum bed elevation change	Multiple meshes	No	Scour prediction is not good in the frontal side of the pier; prediction at sides is acceptable; clear-water scour only.
Roulund et al. (2005)	FVM, EllipSys3D	RANS (k -omega SST)	Bed load (Engelund and Fredsoe 1976)	Equilibrium	Single	Adjust the bed load transport rate	Dynamic mesh deformation	No	General good agreement along the centerline, especially the horseshoe vortex. Live-bed scour.
Liu and Garcia (2008)	FVM, OpenFOAM	RANS (k -epsilon)	Both loads (van Rijn 1984b; Engelund and Fredsoe 1976)	Equilibrium	Single	Adjust the bed load transport rate	Dynamic mesh deformation	Yes	Good agreement at the back of the pier. Discrepancies also observed elsewhere.
Khosronejad et al. (2011; 2012)	FVM, FSI-CURVIB	URANS (k -omega)	Bed load (van Rijn 1993)	Equilibrium	Single	Adjust bed mesh based on mass balance	Immersed boundary method	No	The maximum scour depth is well captured but the scour rate is overpredicted. Clear-water scour only.
Afzal et al. (2015)	FDM, REEF3D	URANS (k -omega)	Both loads (van Rijn 1984b; Engelund and Fredsoe 1976)	Equilibrium	Single	Adjust bed node elevation based on mass balance	Level-set method	Yes	Scour depth under current is well captured but the scour depth under wave is overestimated.
Baykal et al. (2015)	FVM, OpenFOAM	URANS (k -omega)	Both loads (Engelund and Fredsoe 1976)	Equilibrium	Single	Same as Roulund et al. (2005)	Dynamic mesh deformation	No	Shape of the scour hole seems adequate.
Cheng et al. (2017)	FVM, START-CCM+	URANS + HM (reliable k -epsilon + Spalart-Allmaras)	Bed load (van Rijn 1984b)	Equilibrium	Single	Yes	Remeshing	No	Proposed the improvement of scour prediction by using the augmented bed shear stress method.
Khosronejad et al. (2020)	FVM, FSI-CURVIB	LES model	Both loads (van Rijn 1993)	Equilibrium	Single	Adjust bed mesh based on mass balance	Immersed boundary method	No	The model is applied to the scour at field scale.
Nagel et al. (2020)	FVM, OpenFOAM version v1906	URANS (k -omega)	Two-phase model for sediment mixture	N/A	N/A	N/A	Two-phase flow model	No	The prediction is good at the initial stage, but equilibrium is underestimated.
Zhang et al. (2020)	FVM, in-house code	LES	Bed load (Engelund and Fredsoe 1976)	Equilibrium	Single	Adjust bed mesh based on mass balance	Mesh deformation	No	Scour depth at both upstream and downstream are well predicted by the model.
Song et al. (2021)	FVM, OpenFOAM version v2006	RANS (k -omega)	Bed load (Engelund and Fredsoe 1976)	Equilibrium	Single	Slope limited diffusion	Immersed boundary method	No	The maximum scour depth of the vertical cylinder is underestimated but the model successfully captured the scour around an object with a complex foundation.

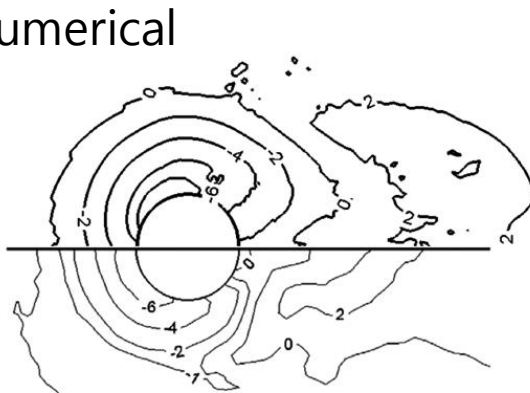
교량 세굴(국부 세굴)

OpenFOAM 적용 사례

교량 세굴 모의 사례(Lai and Wu, 2018) – 세굴공 모의/실험 비교



numerical



experiment



교량 세굴(국부 세굴)

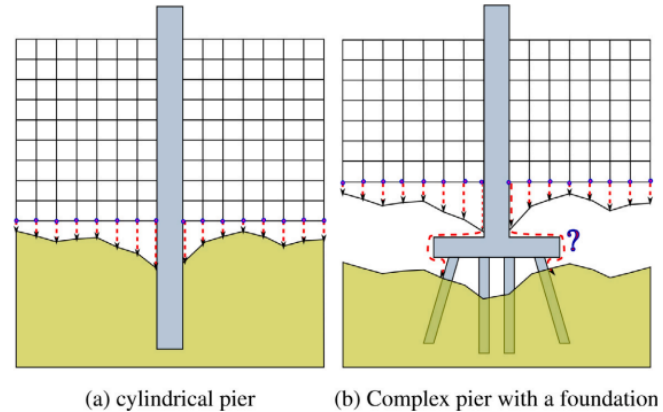
OpenFOAM 적용 사례

모의 기법

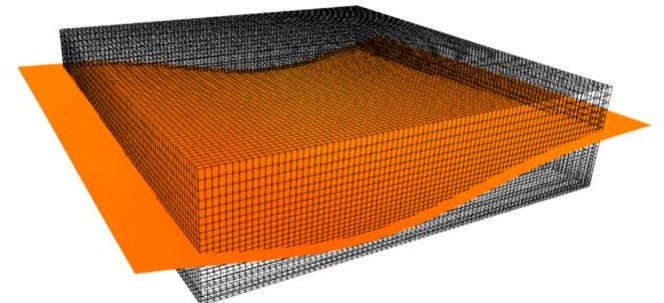
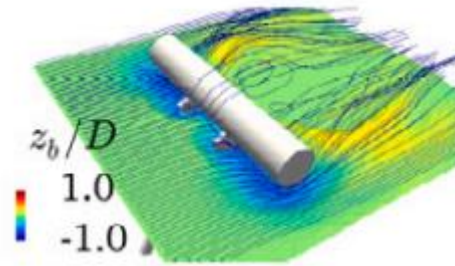
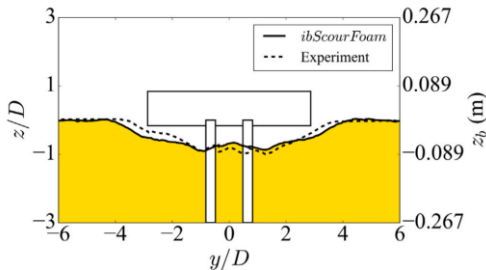
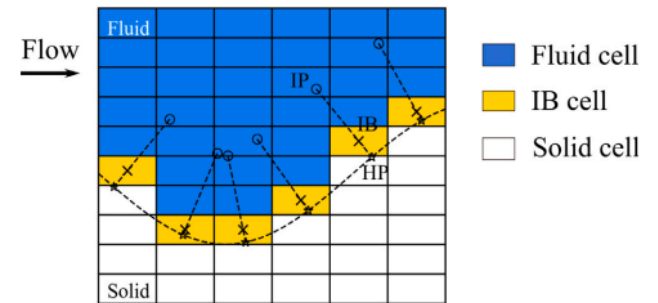
- 지배방정식은 하상변동과 동일
- 실무적 적용에서 하상추적 기법이 중요

하상 추적

- Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE) method
 - 하상변동에 따라 격자 자동 생성
 - 형상이 복잡한 경우 발산 발생
- Two-phase Eulerian–Eulerian model(sedFoam)
 - 하상층과 흐름층을 구분하여 모의
 - 유사와 물의 혼합층에 대한 매개변수 필요
- Immersed boundary method(ibScourFoam)
 - 하상경계면을 별도층(IB)으로 구분
 - 계산시간 및 수치 불안정 증가



<ALE 한계>



수리분야 3D CFD 적용 전망

III OpenFOAM 활용 전망

◆ 3D CFD 활용 추세

- 기후변화(홍수 및 환경)로 인한 수리학적 과제 증가
- 국내 및 국외의 수리모형실험 축소 -> CFD 활용 증대
- CFD가 수리모형실험을 대체하기에는 한계가 있으나 적용 분야 확대 추세

◆ 댐 등 고정상 수리구조물

- 댐 등 구조물 수리해석은 모의 공간범위 확대와 모의정확도 향상(격자, 난류) 필요
- LES-VOF 모의의 계산 불안정성 해결 필요

해결과제

III OpenFOAM 활용 전망

◆ 유사이송

- 수리실험을 대체하기 위해 모의 정확도 향상 필요
- 국부적인 흐름 불안정 모의에는 RANS 모형 한계
- 공간 및 시간 간격 문제

◆ 2차원 모형

- 침수모의 필요성 증대로 활성화 분야 중 하나
- 대규모 자연지형에 대한 측량자료 연계 강화 필요
- 관련 모듈 개발 필요

해결과제

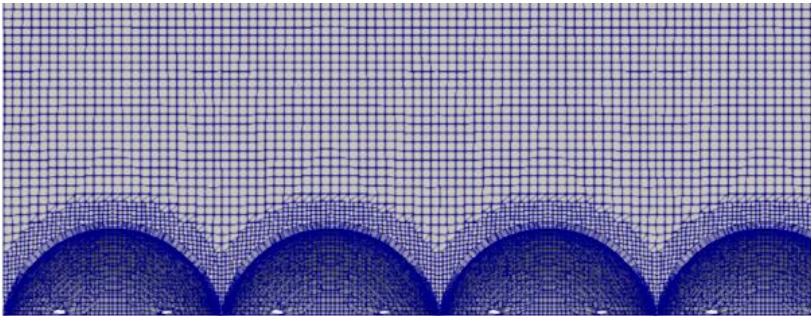
III OpenFOAM 활용 전망

◆ LES-VOF

- 수리실험을 대체하기 위해 모의 정확도 향상 필요
- 국부적인 흐름 불안정 모의에는 RANS 모형 한계
- LES-VOF 모의의 계산 불안정성 및 계산시간 해결 필요

◆ 조도계수

- 일반적으로 조고로 고려
- 거석 및 나무 등 자연지형물 고려에 한계
- 다양한 지형 구조요소에 대한 고려 방안 정립 필요





감사합니다