

수치모형을 이용한 Swash 지역에서의 댐-붕괴 파랑과 지하수의 상호작용 연구

Water
for future
학술/기술 기사
03



김 열 우

부경대학교 토목공학과
조교수
yarkim@pknu.ac.kr

전 세계 해수면은 2100년까지 0.46 ~ 1.89 m 상승할 것으로 예상된다 (Fox-Kemper et al., 2021, Climate Change). 해수면 상승은 극한 이벤트(예: 강한 파도, 만조, 폭풍 해일 등)의 빈도와 강도를 크게 증가시킬 것으로 예상되고 있다. 해수면 상승, 동적 수위, 해안선 변화 등의 요소의 복합적인 효과는 연안 위험도와 홍수 범위를 불균형하게 증폭시킬 수 있다. 지속적인 인구 증가와 해안 거주 선호를 고려하면 2100년까지 0.9 m의 해수면 상승으로 미국 대륙의 약 420만명이 침수 위험에 처하게 될 것으로 보인다. 만약 해수면 상승이 1.8 m에 도달하게 되면 침수 피해 예상 인원은 1310만 명으로 증가한다 (Hauer et al., 2016, Nature Climate Change). 따라서, 미래 위험도 평가를 위해서는 연안에서 발생하는 흐름에 대한 이해도 향상이 필수적이다.

해안 홍수 취약성을 대표하는 스와시(Swash) 지역은 파랑과 조수가 함께 해변을 가로질러 이동하는 지역으로 정의된다. 스와시 영역 내에서 발생하는 지표면-지하수면 유동은 다상(multi-phase), 천이(transient), 난류성(turbulent), 상호 의존적 과정이 특징인 복잡한 흐름을 생성한다. 스와시 지역의 흐름은 지표면 흐름(스와시), 지하수 흐름, 그리고 두 흐름의 상호작용으로 구분되는 세 개의 대표적인 요소로 구성되어 있다. 지표면 흐름의 관점에서는 파랑의 처오름(runup)

과 월파(overtopping)의 거동이 조수보다는 해수면 상승에 더 민감하며 해수면 상승에 따라 월파가 급격히 증가할 것으로 예상된다. 일반적으로 해안 홍수 평가 및 계획은 지표면 흐름의 예측에 집중되어 있으며 지하수의 영향을 고려하지 않는다. 만약, 해수면 상승으로 인한 지하수 범람을 고려한다면, 하와이 와이키키 해변의 침수 범위는 두 배 이상 증가할 것으로 예상된다 (Rotzoll & Fletcher, 2013, Nature Climate Change). 해안 지하수의 수위는 해수면 상승의 속도와 비슷한 양상을 가질 것으로 예상된다. Housego et al. (2021, Journal of Hydrology)에 따르면 거대한 파랑 또는 해일 등의 작용에 의해 지하수의 수위는 1 m 이상 증가할 수 있다. 이와 같은 지하수위 상승은 저지대 해안 지역에 위치하는 토목구조물의 피해를 유발할 수 있다.

스와시 지역에서는 침투/배출을 통해 지표면 흐름과 지하수 사이의 활발한 교환이 발생한다. 스와시 지역의 침투와 배출은 해변 토사의 간극률, 조수, 지하수의 수위 등 다양한 변수의 영향을 받는다. 기존 연구들은 위에 언급된 변수들이 토사 이동에 주는 영향을 우선적으로 정량화하는데 집중하였다. 이외, 침투, 유출 및 해변 특성은 경계층(boundary layer) 흐름과 파랑의 처오름에도 큰 영향을 미치지만 변수들 사이의 상대적 우위는 아직 확실하게 밝혀지지 않았다. 예를 들어, 침투 현상은 처오름의 거리를 감소시킬 수 있으므로 스와시 흐름을 정확히 재현하기 위해서는 필수적으로 고려해야 한다. 양방향 흐름 교환 현상에 대한 향상된 이해는 해수면 상승에 대한 스와시 흐름의 변화 예측을 위해 필수적이다. 많은 연구에 따르면 해변 지하수층이 침투 과정에서 중요한 역할을 한다고 밝혀지고 있다. 일반적으로, 얇은(높은) 지

하수층은 침투(유출)로 이어지며 바다(육상) 방향으로의 퇴적물 이동을 촉진한다. 또한, 해변 투과성, 모세관 현상 및 토사 구성의 이질성은 스와시 구역의 지하수 흐름 경로에 큰 영향을 미친다.

스와시 구역 전체를 정확하게 모의하기 위해서는 지표면 흐름과 해변 지하수층 사이의 상호작용을 해석해야 한다. 위상 해석 수치모형인 Beach-Win은 비선형 천수방정식 (Nonlinear Shallow Water Equations)에 기반하여 지하수에 대한 파랑의 영향을 라플라스(Laplace) 방정식을 통해 부분적으로 결합하였다 (Li et al., 1997, Water Resources Research). Beach-Win 모형은 고주파의 수위 변동을 재현할 수 있지만 포화 상태의 지하수 흐름만 라플라스 방정식을 사용하여 고려된다는 한계가 있다. Desombre et al. (2012, Coastal Engineering Proceedings)은 지표면의 흐름에 대해서는 레이놀즈 평균 나비에-스톡스 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 방정식을 적용하고, 지하수 흐름에 대해서는 달시-브린크만-포츠하이머 (Darcy-Brinkman-Forchheimer) 공식을 사용하여 스와시 지역의 흐름을 모의하였다. 위의 RANS 기반 모형을 사용하여 주요한 지하수 흐름의 특성을 합리적으로 모의할 수 있으나 모세관 현상 등의 세밀한 특성은 무시되었다.

체적 평균 (Volume-Averaged) RANS 모델 COBRAS는 지표면과 지하수 유동을 포함할 수 있다 (Hsu et al., 2002, Coastal Engineering). COBRAS에서는 다공성 해변 투수층 내부의 지하수 흐름은 반-경험적 포츠하이머(Forchheimer) 방정식으로 모의된다. Pintado-Patiño et al. (2015, Journal of Geophysical Research: Oceans)은 COBRAS를 수정하여 발전된 수치모형이 스와

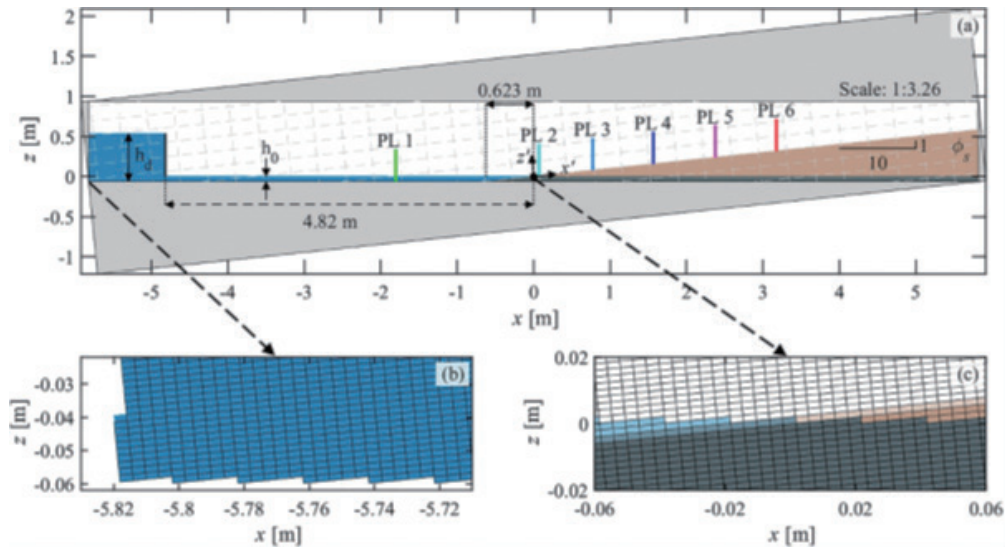


Figure 1. (a) Numerical setup and initial conditions replicating the Kikkert et al. (2013) permeable beach experiments. Air, surface water, groundwater, and sediment phases are white, blue, dark gray, and tan, respectively. The origin of both coordinate systems is at the intersection of the initial water surface and beach face (black circle), 0.621 and 4.82 m from the beach toe and gate, respectively. The colored vertical lines indicate the cross-shore deployment locations of the PIV-LIF (PL) systems. The surrounding light gray regions are not included in the numerical domain as shown by the enlarged views of the (b) lower left corner and (c) origin of the domain. The figure is adopted from Delisle et al. (2023, Journal of Geophysical Research: Oceans)

시 침투/배출에 대한 다공성 형질의 영향을 모의할 수 있음을 보여주었지만, 지하에서 발생하는 기포 포획 같은 현상을 포함할 수는 없었다. 여러 OpenFOAM 모형들(예: olaFlow, Higuera et al., 2014, Coastal Engineering; waves2Foam, Jensen et al., 2014, Coastal Engineering)이 파랑과 투수성 구조물(예: 잠재 방파제) 내부에서의 흐름을 모의할 수 있음을 보여주었지만, 토사와 같이 조밀한 투수성 구조에 적용된 예는 없다. 따라서, 고주파 자유 표면 변동과 지표면-지하수 피드백을 포함하며, 조밀한 토사로 구성된 해변을 모의할 수 있는 이상(Two-Phase) 수치모형이 필요하다고 할 수 있다.

본 기사에서는 OpenFOAM을 기반으로 해수면 해석기능과 지하수 해석기능, 여러 개의 상(공기, 물, 토사)을 동시에 다룰 수 있는 새로운 수치

모형인 SedOlaFlow를 소개한다. 수치모형에 사용된 지배방정식과 수치모형개발에 대한 자세한 설명은 Delisle et al. (2023, Journal of Geophysical Research: Oceans)에 주어진다. SedOlaFlow는 댐-붕괴 파랑 수리모형실험 자료(Kikkert et al., 2013, Coastal Engineering)와 비교하여 검증되었다.

Figure 1은 검증에 사용된 실험의 이차원 격자 구성을 보여준다. 격자는 1/10의 토사 경사면에서 직각인 경계를 가지게 설정되었으며 snappyHexMesh 유틸리티를 사용하여 Figure 1a에서 회색으로 표시된 지역의 불필요한 영역이 삭제되었다 (Figures 1b and 1c). 사용된 격자의 해상도는 x, z 방향으로 각각 4 mm, 2 mm이며 총 1.46백만개의 격자점이 사용되었다. Figure 1의 수치 수조에서 좌측에 위치한 물기둥은 실험 시작과

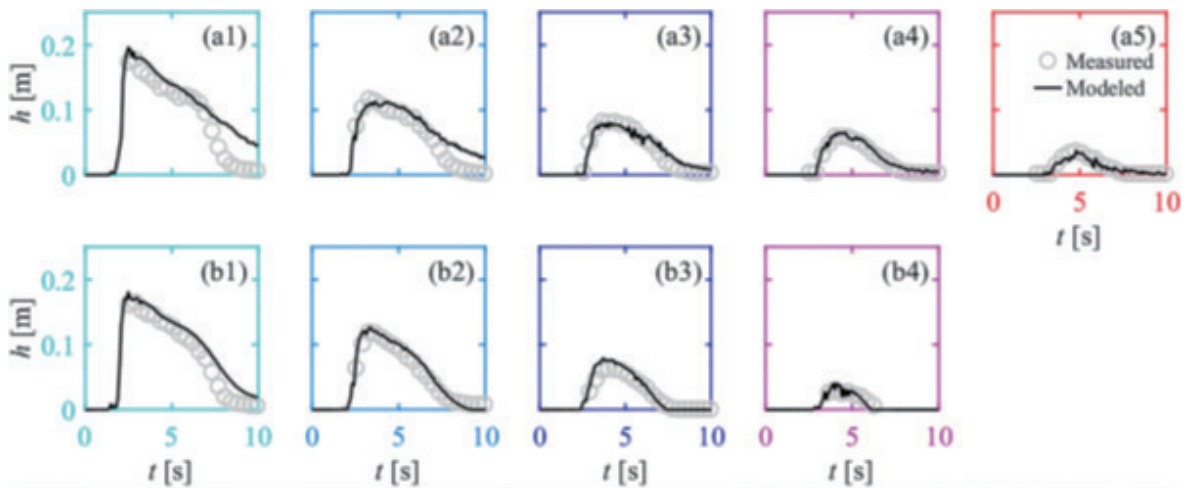


Figure 2. Time series of measured (open gray markers) and modeled (black solid curve) water depth (h) for the (a) sand and (b) gravel cases at (1) PL 2 (cyan), (2) PL 3 (light blue), (3) PL 4 (dark blue), (4) PL 5 (pink), and (5) PL 6 (red) corresponding to the swash zone sensor locations shown in Figure 1. The figure is adopted from Delisle et al. (2023, Journal of Geophysical Research: Oceans)

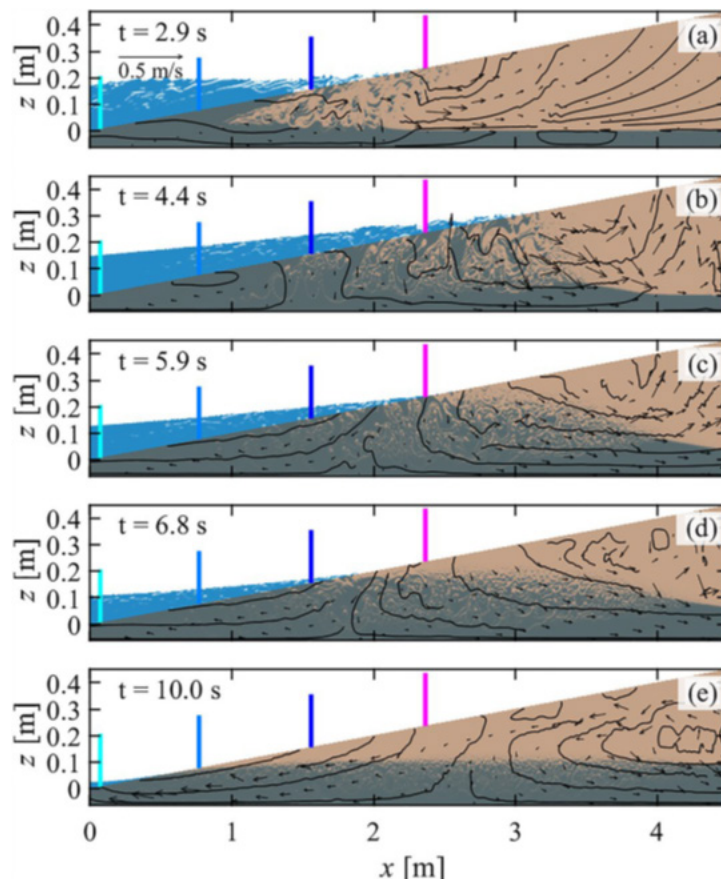


Figure 3. Snapshots of modeled water profiles at selected times for the gravel beach with fluid velocity vectors and streamlines shown as black arrows and curves, respectively. The colored vertical lines indicate correspond to the cross-shore deployment locations of PL 2 (cyan), PL 3 (light blue), PL 4 (dark blue), and PL 5 (pink). The figure is adopted from Delisle et al. (2023, Journal of Geophysical Research: Oceans)

동시에 중력에 의해 붕괴하여 경사면을 따라 진행하며 스와시 흐름을 형성한다. Figure 1에 표시된 직선들은 검증에 사용된 PIV-LIF (PL) 센서의 위치를 나타낸다. 실험에 사용된 투수성 토사는 자갈($d_{50} = 8.4 \text{ mm}$)과 모래($d_{50} = 1.3 \text{ mm}$)의 두 가지 경우로 구성되었다.

Figure 2은 PL2~PL6의 위치에서 수심변동시계열을 보여준다. 자갈과 모래 케이스 모두 수리모형실험(심볼)과 수치모형실험(실선) 결과가 좋은 일치도를 보여주는 것을 알 수 있다. 수치모형 검증은 본 기사에 포함된 수심변동시계열 이외에도 수심적분유속과 해안선 위치(shoreline position)

시계열을 이용하여 수행되었다.

Figure 3은 자갈 케이스에서 각 시간에 따른 침투/유출 현상과 지하 흐름 순환과정을 보여준다. 자갈 해변에서는 침투 현상으로 인해 불포화 지역이 포화 지역으로 빠르게 변경되며 내륙 방향으로 회전하는 순환현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 자갈 해변과 모래 해변의 순환 현상은 상이한 특성을 지니고 있으며 이는 해변의 투수성이 파랑의 처오름 과정에 큰 영향을 가지고 있음을 나타낸다. 새롭게 개발된 SedOlaFlow은 현재 다양한 흐름 및 토사 조건에서 상세한 검토를 진행중이다.

참고문헌

본 기사는 한국해양과학기술원 기관목적사업 “해양에너지지 및 항만·해양구조물 고도화 기술 개발(PEA0131)” 과제와 2021년도 정부(교육부) 재원 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2021R1F1A 1062223)의 지원을 받아 수행되었습니다. 코드 및 출판된 사례에 관한 자료는 아래와 같이 공개되어 있습니다.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7946415> (source code; “SedOlaFlow,” 2023) and <https://doi.org/10.5281/zenodo.7946411> (case setup; Delisle, 2023).