

포말대 댐 붕괴 파랑 수치모형 연구



김열우
국립부경대학교
토목공학과 조교수
yarkim@pknu.ac.kr

01 머리말

포말대(swash zone)는 해안 지역 공동체에게 여가생활 영위, 생태계, 그리고 해안선 보호 측면에서 많은 이로움을 제공하는 지역이다. 하지만 포말대는 태풍과 해수면 상승 등에 취약하다. 따라서 미래의 위협을 가늠하기 위해 포말대에서 발생하는 수리현상을 정확히 이해하는 것이 중요하다. 포말대에서의 흐름 특성은 지속적으로 변하는 해수면 높이와 습윤 및 건조 현상 때문에 매우 복잡하다. 특히, 투수성 매체에서의 유체의 거동, 침투 및 유출 현상, 그리고 이에 따르는 압력의 반응 등을 정량화하는 것이 발전된 해안 지형 모의를 위해 필수적인 단계라고 할 수 있다.

기후변화의 영향은 직접적인 해안선뿐만 아니라 고해안(backshore) 지역의 급격한 침식 또는 침수 현상을 발생시킬 것으로 예상되고 있다. 하지만 비정상(unsteady) 천해 난류 다상(multi-phase) 물리 현상을 모의하는 것은 도전적인 연구 과제이다. 예를 들어, 포말대에서 발생하는 쇄파 현상은 공기의 동반이행(air entrainment) 현상과 급격한 해안지형의 변화를 동시에 발생시킨다. 따라서, 공기, 물, 그리고 토사 세 개의 상을 동시에 분석하는 것은 포말대 해안선과 사구의 진화과정을 이해하기 위해 필수적이라고 할 수 있다.

최근 SedWaveFoam이라 불리는 해수면 해석기능을 포함한 공유형(open-source) 토사이동 수치모형이 OpenFOAM을 기반으로 개발되었다 (Kim et al., 2018). SedWaveFoam을 이용하면 해수면부터 바닥 경계층까지 발생하는 수리현상과 토사이동을 동시에 모의 가능하다. SedWaveFoam은 비쇄파, 쇄파 등에 의해 발생하는 시트흐름(sheet flow)을 성공적으로 재현해낸 바 있다 (Kim et al.2018; Kim et al.2019; Kim et al., 2021). 하지만 SedWaveFoam은 토사의 상이 항상 공기에 노출되지 않음을 가정하고 개발되었다. 따라서 SedWaveFoam을 포말대에 적용시키기 위한 첫 번째 단계로 토사를 고정상으로 가정하여 수치모형을 수정하였다 (김열우와 정태화, 2021). 이렇게 수정된 SedWaveFoam은 투수성 모래 해변에서 발생하는 침투 및 누수현상의 영향을 확인하기 위해 댐 붕괴 파랑 수리모형실험 데이터와 비교되었다 (Kikkert et al., 2013).

02 수치모형

SedWaveFoam은 OpenFOAM 기반의 수치모형인 SedFoam(Cheng et al., 2017)과 InterFOAM(Klostermann et al., 2013)의 기능을 통합하여 만들어졌다. SedFoam은 이상(two-phase: 물과 모래) 토사이동 수치모형으로 바닥 경계층에서의 토사이동 연직 분포를 모의할 수 있다. InterFoam은 물과 공기를 비혼합성 유체로 가정하여 물-공기 경계면을 추적하는 기법을 기반으로 흐름특성을 모의한다. 포말대에서는 공기, 물, 그리고 토사의 상이 존재하기 때문에 질량보존 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial \phi^a}{\partial t} + \frac{\partial \phi^a u^a}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi^w}{\partial t} + \frac{\partial \phi^w u^w}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi^s}{\partial t} + \frac{\partial \phi^s u^s}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

여기서, 위 첨자 “a”, “w”, “s”는 각각 물, 공기, 토사의 상을 의미한다. 변수 u 와 ϕ 는 각 상의 유속과 농도를 나타낸다. 따라서, 세 개의 상의 농도의 합은 다음과 같이 정의된다.

$$\phi^a + \phi^w + \phi^s = 1 \quad (4)$$

만약, 토사 유속을 0으로 정의하고, 물과 공기의 상을 혼합유체로 가정하면 질량보존 방정식은 다음의 식으로 간략화된다.

$$\frac{\partial \phi^f u^f}{\partial x_i} = \frac{\partial U^f}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

여기서, “f” 위 첨자는 물-공기 혼합유체를 의미하고, $U^f = \phi^f u^f$ 로 정의된다.

물과 공기 사이의 경계면은 volume of fluid 방법을 기반으로 경계면 압축기법 (Klostermann et al., 2013)을 사용하여 경계면 확산을 다음과 같이 최소화 할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi^w}{\phi^f} \right) + \frac{1}{\phi^f} \left[\frac{\phi^w}{\phi^f} U^{f_i} + \frac{\phi^w}{\phi^f} \left(1 - \frac{\phi^w}{\phi^f} \right) U^{r_i} \right] = 0 \quad (6)$$

여기서, 상대속도 U^r 는 $U^r = U^w - U$ 로 정의되며 경계층 구배를 따라 반복계산으로 결정된다.

이와 비슷하게, 혼합유체에 대한 운동량 방정식은 다음과 같이 간략화될 수 있다.

$$\frac{1 + C_m}{\phi^f} \frac{\partial \rho^f U^{f_i}}{\partial t} + \frac{1}{\phi^f} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\rho^f U^{f_j}}{\phi^f} U^{f_i} \right) = - \frac{\partial p^f}{\partial t} + \rho^f g \delta_{i3} + \sigma_{i\gamma} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\phi^w}{\phi^f} \right) + \frac{1}{\phi^f} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{1}{\phi^f} M_i^{fs} \quad (7)$$

여기서, ρ^f 는 혼합유체의 밀도, C_m 은 부가질량계수, g 는 중력가속도이다. 식 (6) 우항의 세 번째 항은 표면장력을 나타낸다. 유체 전단력 τ_{ij}^f 는 부력을 고려하는 $k-\epsilon$ 난류 계산식을 사용하여 계산된다. 두 개의 상 사이에 발생하는 운동량 전달을 의미하는 M_i^{fs} 는 각 상의 속도차이를 고려하여 계산된다 (Cheng et al., 2017).

03 실험결과

3.1 댐 붕괴 방식의 포말대 흐름

Kikkert et al. (2013)의 수리모형실험 조건과 동일한 연장 12.4 m, 깊이 1.5 m의 수치모형 수조가 제작되었다 (그림 1). 초기 댐 붕괴 전의 수심은 수문 좌측에서는 600 mm, 우측에서는 62 mm로 설정되었다. 사각형의 균등한 격자가 사용되었으며, 격자의 크기는 흐름방향 4 mm, 연직방향 2 mm로 사용되었다. 수리모형실험과 동일하게, 수문에서 4.2 m 떨어진 지점에서 1:10의 기울기를 가지는 고정된 토사 사면이 설치되었으며 토사 직경은 1.3 mm로 주어졌다. 연직방향 토사분포는 다음의 식을 이용하여 주어진다.

$$\phi^s = \frac{\phi^{s_0}}{2} \{ 1 + \tanh[A(z_b - z)] \} \quad (8)$$

여기서, z_b 는 각 x 지점에서의 사면 연직높이, ϕ^{s_0} 은 최대토사 농도이다. 사면의 다짐 정도를 고려하여 세 가지의 최대토사 농도가 고려되었으며 ($\phi^{s_0} = 0.55, 0.61, 0.70$), $A = 2400$ 으로 설정되었다.

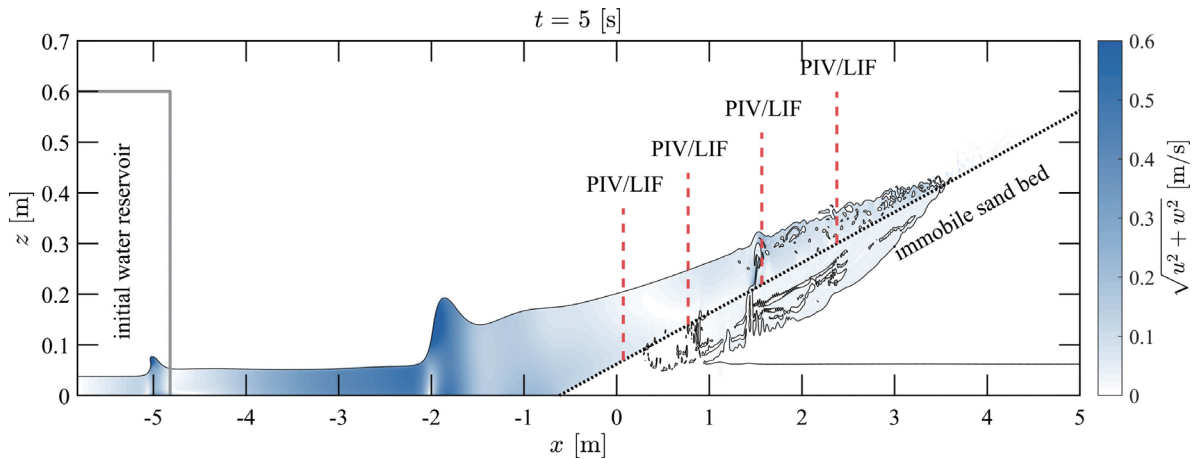


그림 1. A snapshot of absolute velocity at (a) s and with contour (black curves) where initial water reservoir and immobile sand bed are illustrated using a gray box and black dotted line, respectively. The red dashed lines represent PIV/LIF sensor locations. 김열우와 정태화 (2021) 발췌.

수치모형 상에서 수심 h 는 연직방향으로 모든 격자의 ϕ^w 를 합하여 계산된다. 댐 붕괴 파랑의 도착시기($t \approx 2$ s)에는 초기 해안선($x=0$) 부근에서 사용된 ϕ^w 와 상관없이 모두 잘 예측되었다 (그림 2a와 2b). 하지만, 쳐내림(backwash, $t \geq 5$ s) 시기에는 수치모형이 사용된 토사 유공율에 민감함을 확인할 수 있다 (그림 2c와 2d). 일반적으로, 높은 ϕ^s 은 토사 바닥면으로부터 강한 항력을 유발시킨다. 수치모형실험 결과에서는 감소된 ϕ^s 가 수심을 보다 잘 예측하는 것으로 나타난다 (그림 2의 파란 실선). 수심 예측의 Index of Agreement (IA) 는 각각 0.98 ($\phi^s = 0.55$), 0.92 ($\phi^s = 0.61$), 0.83 ($\phi^s = 0.70$)으로 주어진다.

이와 유사하게, 파랑의 쳐오름 시 수심적분 바닥평행 유속 u_b 는 잘 예측되었다 (그림 3). 하지만, 쳐내림 시 발생하는 오차의 경우, 공기의 동반이행 현상의 오류 또는 수문 개방 운동의 차이 등으로 예상될 수 있다. 예를 들어, 실제 수리모형실험의 경우와 다르게, 수문의 개방 운동은 고려되지 않고 수치모형에서는 수문의 삭제로 구현되었다. 수심 시계열 예측과는 반대로 쳐내림 시 $\phi^s = 0.70$ 의 수치모형 실험결과가 관측값과 보다 유사함을 보이는데, 이는 M_i^{fs} 에 포함되어 침투 현상을 계산하는 Darcy-Forchheimer 계수들의 상호조율이 아직 완전하지 않은 것으로 보인다.

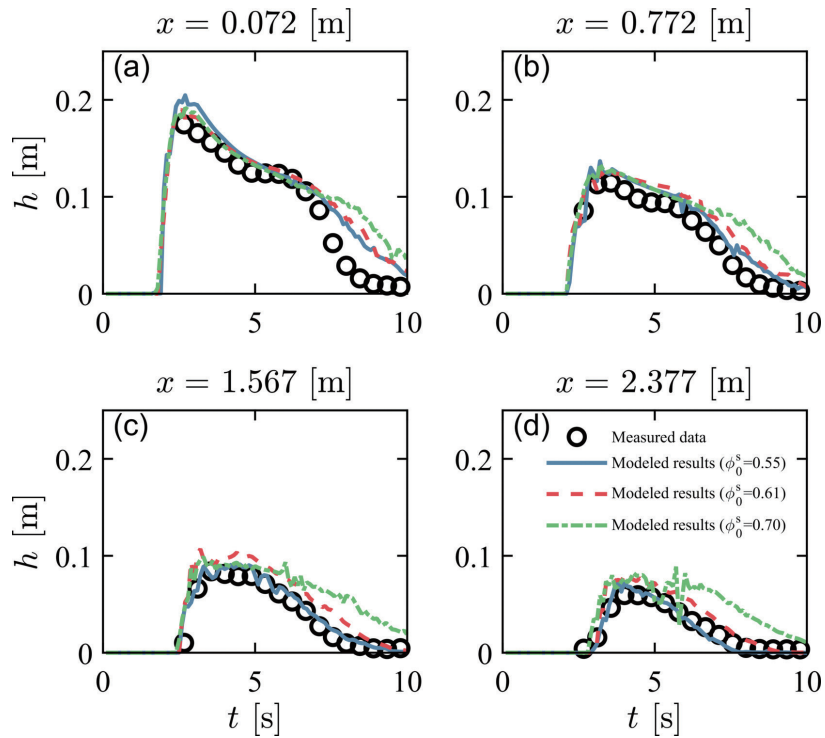


그림 2. The effect of porosity in the timeseries of flow depth (measured data: circles; modeled results with $\phi_0^s = 0.55$: blue solid curves; $\phi_0^s = 0.61$: red dashed curves; $\phi_0^s = 0.70$: green dash-dotted curves). 김열우와 정태화 (2021) 발췌.

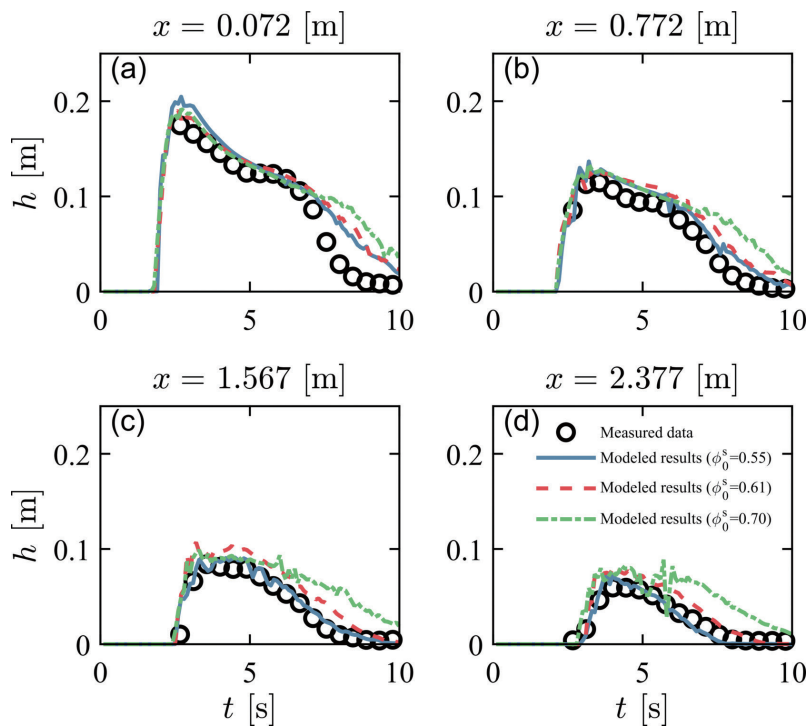


그림 3. Timeseries of depth-averaged bed parallel velocity (measured data: circles; modeled results with $\phi_0^s = 0.55$: blue solid curves; $\phi_0^s = 0.61$: red dashed curves; $\phi_0^s = 0.70$: green dash-dotted curves). 김열우와 정태화 (2021) 발췌.

04 결론

댐 붕괴 조파 방식을 이용한 포말대 흐름특성에 대한 수치모형 연구가 진행되었다. 투수성 모래사변으로 구성된 포말대에서 발생하는 흐름을 모의하기 위해 해수면 해석기법이 포함된 SedWaveFoam이 사용되었다. 특이한 SedWaveFoam의 장점은 복잡한 해안선을 가진 경우에도 유속장과 투수/유출 현상을 동시에 모의할 수 있다는 것이다. SedWaveFoam은 수리모형실험 관측값과 비교하여 검증되었다. 특히, 처내림 상황에서는 해수면 변위와 수심적분 유속을 잘 예측해내었다.

처내림 현상을 모의하기 위해서는 운동량 전달 항에 포함된 항력 계수들의 조율이 필요한 것으로 보인다. 특히, 다양한 유공율을 가지는 모래를 사용하여 그 영향을 보다 정확히 판단해야 할 것으로 보인다. 또한, 연직방향 압력 구배의 영향을 고려하기 위해서는 유체의 침투로 인해 발생하는 토사의 다공성 탄성 거동에 대한 이해가 추가되어야 할 것으로 보인다. 앞으로는, 토사를 유동상으로 회복하여 포말대 토사 이동에 대한 연구 역시 필요한 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2021R1F1A1062223). 기사의 상당 부분은 김열우와 정태화(2021)에서 발췌함.

참고문헌

1. 김열우, 정태화 (2021). "투수성 모래 해변에서의 쇄파의 처오름과 처내림 수치 모형 연구". 한국연안방재학회 논문집, 제 7권, 제 4호. pp. 281-285.
2. Cheng, Z., Hsu, T.-J. and Calantoni, J. (2017). "SedFoam: a multi-dimensional Eulerian twophase model for sediment transport and its application to momentary bed failure". Coastal Engineering, Vol. 119, pp. 32-50.
3. Kikkert, G. A., Pokrajac, D., O'Donoghue, T. and Steenhauer, K. (2013). "Experimental study of bore-driven swash hydrodynamics on permeable rough slopes". Coastal Engineering., Vol. 79, pp. 42-56.
4. Kim, Y., Cheng, Z., Hsu, T.-J. and Chauchat, J. (2018). "A numerical study of sheet flow under monochromatic nonbreaking waves using a free surface resolving Eulerian two-phase flow model". J. Geophys. Res. Ocean., Vol. 123, pp. 4693-4719.
5. Kim, Y., Mieras, R., Cheng, Anderson, D., Z., Hsu, T.-J., Puleo, J. and Cox, D. (2019). "A numerical study of sheet flow driven by velocity and acceleration skewed near-breaking waves on a sandbar using SedWaveFoam". Coastal Engineering, Vol. 152, pp. 103526.

6. Kim, Yeulwoo, Ryan S. Mieras, Dylan Anderson, and Timu Gallien. (2021). "A Numerical Study of Sheet Flow Driven by Skewed-Asymmetric Shoaling Waves Using SedWaveFoam" *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 9, 936.
 7. Klostermann, J., Schaake, K. and Schwarze, R. (2012). "Numerical simulation of a single rising bubble by VOF with surface compression". *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 71, No. 8, pp. 960-982.
-