

유체-구조 상호작용을 고려한 해안사석구조물의 거동분석

Fluid-Structure Interaction Analysis for Behavior of Rubble Mound Structure

강 경 원* · 정 상 엽** · 한 동 석***

Kang, Kyoung-Won · Chung, Sang-Yeop · Han, Tong-Seok

요 약

지형 및 환경에 따라 해안 사면의 침식, 세굴을 막기 위한 효과 있는 해안구조물의 설치가 필요하다. 본 연구에서는 유체-구조 상호작용을 고려해서 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 조파 실험 모델링을 하고, 해안사석구조물과 상호작용에 의한 유체 흐름을 분석하였다. 사석의 유무와 크기, 개수 등의 변수를 조정하여 서로 다른 4가지 경우에 따른 결과를 비교 분석하였다. 또한 해안사석구조물을 구성하는 투수 콘크리트의 특성 분석을 위하여 CT 이미지를 사용하여 투수 콘크리트의 공극 분포를 관찰하였다. 투수 콘크리트의 특성에 큰 영향을 미치는 공극 분포의 파악을 위하여 확률 분포 함수를 사용하여 투수 콘크리트 공극의 공간적 분포를 분석하였다.

Keywords : 해안사석구조물, 유체-구조 상호작용, 투수 콘크리트, 공극 분포, CT 이미지 처리

1. 서 론

파도에 의한 해안 사면의 침식, 세굴을 막기 위해 해안구조물을 설치하는데 이러한 해안구조물의 형태 중 수직 벽 형태의 구조물인 경우 해안 저면에 세굴이 발생하고 바닥을 지지해주는 지반이 약해지기 때문에 해안구조물이 붕괴되는 현상이 발생한다. 이런 현상을 방지하기 위해 해안구조물의 형태를 경사가 있게 만들고, 해안구조물은 사석구조물의 형태로 파도를 분산시켜 해안 저면의 세굴을 방지 할 수 있다. 또한 사석구조물의 투수성을 높여 세굴 방지 효과를 크게 하기 위해 사석을 투수콘크리트로 제작한다. 이러한 해안사석구조물의 세굴 방지 효과를 검증하기 위해서는 원칙적으로 많은 비용이 요구되는 조파 실험을 해야 한다. 이러한 조파실험에 선행 하여 모델링을 수행하고 실험결과의 검증 및 추가 분석을 하여 조파실험에 따르는 고비용에 대한 큰 절감 효과를 기대할 수 있게 된다.

본 연구에서는 조파 실험 모델링의 초기 단계로 사석구조물의 유무와 크기에 따른 유속과 파고의 차이를 살펴봄으로서 사석구조물이 파도에 어떠한 영향을 미치는지 확인하였다. 또한, 사석을 구성하는 투수콘크리트의 강도 및 투수성에 큰 영향을 미치는 공극 분포 특성에 대해 CT 이미지를 활용하여 공간적 분포를 확인하였다.

* 학생회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 석박사통합과정 kwkang@yonsei.ac.kr

** 학생회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 sychung@yonsei.ac.kr

*** 교신저자 · 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 조교수 tshan@yonsei.ac.kr

2. 사석구조물을 고려한 유체-고체 상호작용 해석

본 연구는 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA(1s971s R5.0, LSTC)를 사용하여 유체-고체 상호작용 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 조파실험장치는 그림 1과 같이 3차원 모델(x, y, z 좌표계)로 Eulerian 좌표계를 사용하였다. 유체 메쉬는 두층으로 나누어 모델링 했으며 위층은 공기, 아래층은 물 부분으로 나누어 모델링하였다. 모델의 크기는 x=10m, y=1m, z=2m 이고 파도는 왼쪽 벽면에 y=1m, z=1.1m 크기의 판을 밀어 형성하였다. 사석은 반지름이 0.25m 와 0.1m 인 구 형상으로 모델링 하였다. 유체 전체에 중력(9.8m/s²)을 가하고, 파도를 형성하는 판으로 0.5m/s의 속력을 1초간 가하였으며 해석 시간은 10초로 하였다.

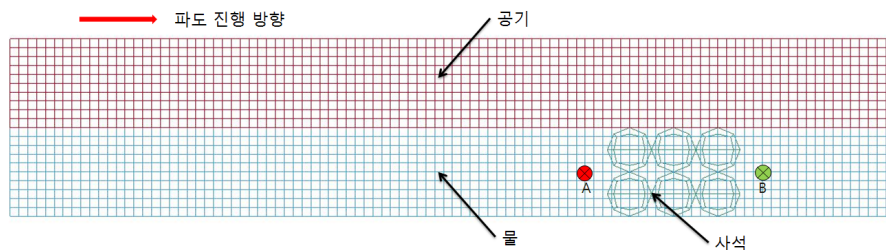


그림 1 조파실험장치 모델 메쉬

본 연구에서 사용된 밀도(ρ)와 해수의 압력(p)과의 관계를 규정하는 상태방정식은 실험에 의한 선형 다항식(linear polynomial equation)인 근사 상태 방정식으로 표현한다(김재현, 2007 ; Kim 등, 2008):

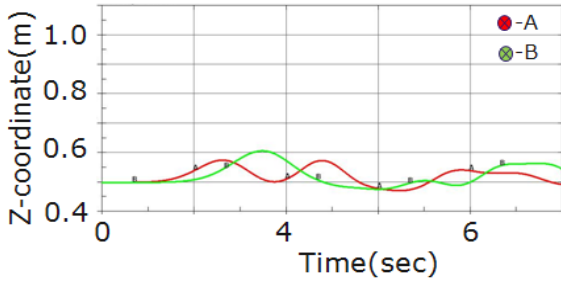
$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (2)$$

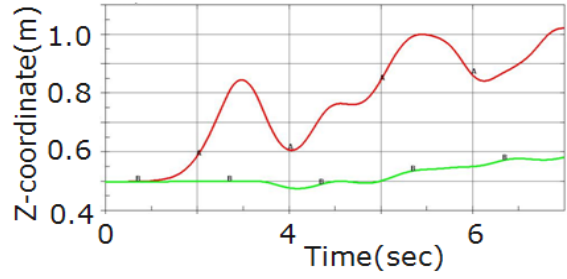
여기에 사용된 변수 값은 해수의 초기 밀도 $\rho_0 = 1025 \text{ kg/m}^3$, $C_0 = 0.0 \text{ Pa}$, $C_1 = 2.036 \times 10^9 \text{ Pa}$, $C_3 = 0.14 \times 10^9 \text{ Pa}$, $C_4 = 0.4934$, $C_5 = 1.3937$, $C_6 = 0$, 해수의 단위체적당 내부에너지 값 $E = 1.89 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ 를 사용하였고, 해수의 압력 p 로 정의 하였다.

사석구조물이 파도의 흐름에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 4가지 경우를 설정하여 각 경우의 파고와 유속을 살펴보았다. 첫 번째 경우는 사석구조물 없이 유체의 흐름만 모델링하였고, 두 번째, 세 번째 경우는 사석의 반지름이 0.25m로 각각 8개, 12개의 사석을 배열 하여 모델링 하였다. 마지막으로 네 번째 경우는 사석의 반지름이 0.1m인 사석의 개수가 125개이며 두 번째 경우의 사석구조물 부피와 같게 모델링하였다.

네 가지 경우 모두 같은 지점에서 유속과 파고를 확인하였으며, 그 지점은 임의로 사석 앞 0.25m지점과 사석 뒤 0.25m지점으로 정하였다. 그림 1의 (a) 와 (b)에서 파도가 사석을 지난 후 파고가 낮아짐을 확인할 수 있고, 그림 2의 (a) 와 (b)를 통해서 파도가 사석을 지나면서 유속이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

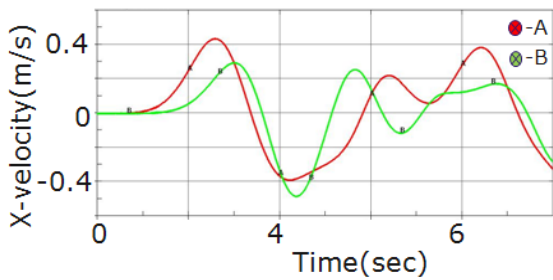


(a) 사석 앞 지점에서의 파고

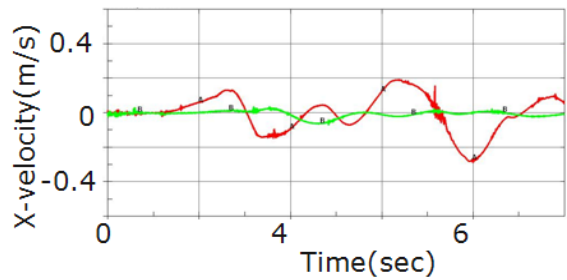


(b) 사석 뒤 지점에서의 파고

그림 1 시간에 따른 파고 변화



(a) 사석 앞 지점에서의 유속



(b) 사석 뒤 지점에서의 유속

그림 2 시간에 따른 유속 변화

또한 네 가지 경우 중에서 두 번째 경우와 세 번째 경우를 비교하면 사석의 개수(x방향)가 늘어남에 따라 파고와 유속이 감소하는 것을 확인하였다.

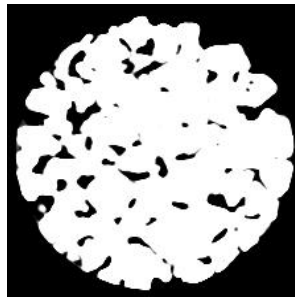
3. 사석을 구성하는 투수 콘크리트의 특성 분석

본 연구에서는 사석 구조물의 유체-고체의 상호작용을 보다 다양한 스케일에서 관찰하기 위하여, 사석을 구성하고 있는 투수 콘크리트의 특성을 마이크로 스케일에서 분석하였다. 그림 3(a)는 실제 투수 콘크리트의 시편이다. 투수 콘크리트 내부에 존재하는 공극은 육안으로 직접 관찰하기 어렵기 때문에, 공극의 분포 상태를 파악하는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 육안으로 보이지 않는 콘크리트 내부를 관찰하기 위해서 CT(computed tomography)를 활용하여 그림 3(b)의 콘크리트 단면을 얻고, 이를 적층하여 그림 3(c)의 투수 콘크리트 디지털 시편을 표현하였다.

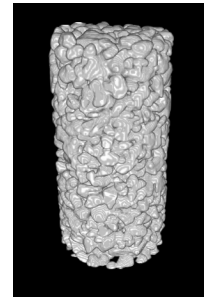
투수 콘크리트 내부의 공극의 공간적 분포를 파악하기 위해 확률 분포 함수인 two-point correlation과 lineal-path function을 사용하여 공극 분포의 특성을 파악하였다. 이를 위하여, 그림 3(c)의 투수 콘크리트 시편 내부에서 그림 4(a)와 같은 정육면체 모양의 투수 콘크리트를 샘플링하여 공극 분포를 분석하였다. 확률 분포 함수의 결과를 살펴보면 그림 4(b)와 (c)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 4(b)와 (c)는 x, y, z방향으로 투수 콘크리트 시편 내부에 분포하는 공극의 공간적 분포 상태가 방향에 따라 거의 유사함을 나타낸다. 추후에 투수 콘크리트의 공극 분포에 따른 투수성 및 콘크리트 강도 등을 분석하는 연구를 통해, 공극 분포와 콘크리트의 물리적 특성의 상관관계를 파악하는 멀티 스케일 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 실제 투수 콘크리트 시편

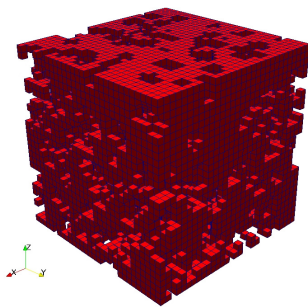


(b) CT로 촬영한 콘크리트 단면

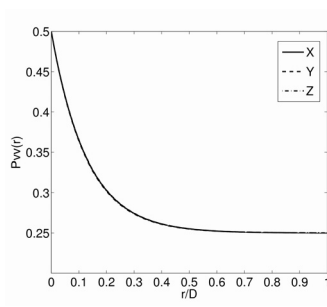


(c) 투수 콘크리트 디지털 시편

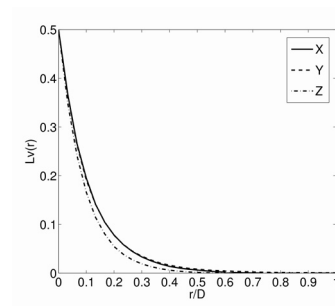
그림 3 투수 콘크리트 시편 및 CT 이미지



(a) 투수 콘크리트 메쉬



(b) Two-point correlation function



(c) Lineal-path function

그림 4 투수 콘크리트 메쉬 및 확률 분포 함수

4. 결 론

본 연구에서는 유체-고체 상호작용 해석을 이용하여 해안사석구조물을 고려했을 때 파도의 유속 변화와 파고 변화를 살펴보았다. 그 결과, 해안사석구조물에 의해 유속과 파고의 감소를 확인하였다. 또한 CT 이미지를 사용하여 투수 콘크리트의 공극 분포를 관찰 하고, 공극의 공간적 분포를 파악 하기 위해 확률 분포 함수인 two-point correlation과 lineal-path function을 사용하여 공극 분포의 특성 및 등방성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 #09지역기술혁신 B-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김재현 (2007) ALE기법을 이용한 수중함의 수중폭발 충격응답 해석에 관한 연구, **한국해양환경공학회지**, 10(4), pp. 218~226.
- Kim, J.-H. and Shin, H.-C. (2008) Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygen tank, *Ocean Engineering*, 35, pp. 812~822.