

잠제 주변의 세굴에 대한 수치모의에 관하여 On Modelling of Scouring around a Permeable Submerged Breakwater

허동수¹, 전호성², 최동석³, 배기성⁴
Dong Soo Hur¹, Ho Sung Jeon², Dong Seok Choi³ and Ki Seong Bae⁴

1. 서 론

최근 파랑에 의한 물리적인 외력으로부터 연안을 보호하기 위해 방파제, 잠제, 돌계 등과 같은 해안구조물이 많이 설치되고 있는 실정이다. 이와 같은 해안구조물 전면의 해저지반은 파랑류에 의해 세굴, 침하현상 등을 유발시킨다. 흐름의 변화에 의해 하부지반이 유실되는 현상 즉 세굴은 해상에 설치된 구조물의 기초 지지력을 감소시켜 구조물 붕괴를 유발하기도 한다. 이와 같은 재해를 방지하기 위해 해안구조물 전면 및 하부의 세굴기구를 밝히는 것은 해안공학적인 측면에서 무엇보다도 중요하며, 이러한 해저지반내의 모래입자의 침식, 운반, 퇴적작용과 유동화 해석을 위한 방법 중의 하나로 최근 개별요소법이 사용되고 있다.

개별요소법은 Cundall and strack(1979)에 의해 제창된 입상체의 동역학적 거동을 수치적으로 해석하는 불연속체의 시간영역 해석법으로, 요소간의 힘의 전달이 작용 및 반작용의 법칙을 따르는 것을 조건으로 하고 개개의 요소가 운동방정식을 만족하여 운동방정식에 따라 병진 및 회전변위를 시간차분식으로 바꾸어 시시각각으로 반복하여 계산을 수행하는 방법이다. 원래 암반의 대변형의 해석을 목적으로 개발되어 지금까지도 구조공학, 지반공학 등의 여러 분야에서 이용되며, 그 유효성이 확인되고 있다. 수공학에서 DEM이

적용되기 시작한 것은 최근이며, 伊福·住井(1993)은 혼합사의 이동기구에 따른 연구로서 저질을 구성하는 입경 및 저면에서의 점유율이 부유사 농도 및 표사량에 미치는 영향에 대해서 고찰을, 三島(1993)은 비사를 대상으로 saltation 입자가 저질입자군에 충돌했을 때의 저질입자군의 응답에 관하여 수치시물레이션을, 또한 後藤(1994)은 변동과압을 받는 해저지반 거동의 수치모의에 개별요소법을 이용하였다. 이후에도 荒木·出口(1997)은 사석구조물의 변형해석을, 前野(2006)은 VOF-DEM-FEM 연성모델에 의한 잠제의 거동해석 등에 적용하여, 최근 DEM의 활용이 해안분야까지 넓어지고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 해저지반을 대상으로 하여, 불투과성 잠제와 투과성 잠제 전면의 해저지반의 변형과 저질의 이동기구에 대해 검토하기 위해 파·구조물·해저지반의 상호작용을 고려할 수 있는 2차원 수치해석수법, LES-WASS-2D(허와 최, 2008)와 질점의 운동방정식을 기본으로 하여 정적인 문제뿐만 아니라 동적인 문제까지 적용이 가능한 개별요소법(DEM)의 연성해석 수법을 이용하여 잠제 전면의 세굴과 주변 해저면 저질의 이동기구에 대해 검토한다.

2. 연성해석수법

2.1 DEM의 개요

개별 요소법은 Cundall and strack(1979)에 의

1 경상대학교 해양토목환경 공학부 부교수(E-mail: dshur@nongae.gsnu.ac.kr)

2 발표자: 경상대학교 해양토목공학과 석사과정(E-mail: blackhorse18@naver.com)

3 경상대학교 해양토목공학과 석사과정(E-mail: mgbguy@naver.com)

4 경상대학교 해양토목환경 공학부 교수(E-mail: kiseong@gshp.gsnu.ac.kr)

하여 제안되었으며 요소의 집합체에 동역학적 거동을 수치적으로 해석하는 수법으로 요소간의 힘의 전달이 작용, 반작용의 법칙에 따르는 것을 조건으로 하고 요소간의 상호작용은 탄성스프링과 점성 Dash pot에 의해 표현하고 있다.

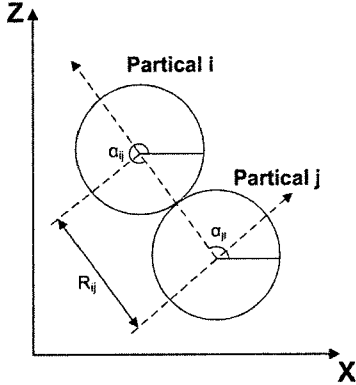


Fig. 1. Coordinates of two dimensional elements

Fig. 1은 개별요소법의 원리를 2차원 좌표계로 나타낸 것으로 요소i(반경: r_i)와 요소j(반경: r_j)간의 접촉조건은 식(1)과 같다.

$$r_i + r_j \geq \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (1)$$

개개의 요소가 만족해야 할 운동방정식은 병진 및 회전에 대해 각각 식(2)-(4)와 같으며, 여기서 m 은 요소의 질량을 \dot{u} 와 \dot{w} 는 요소 i 의 수평 및 연직유속성분을 $\dot{\omega}$ 는 각속도를 V 는 요소 i 의 체적을 ρ_s 는 요소의 밀도를 m' 및 I' 은 요소 i 의 부가질량 및 부가 관성 모멘트를 나타낸다. 또한, $\sum [F_x]_{ij}$ 와 $\sum [F_z]_{ij}$ 는 요소 i 에 작용하는 힘(접촉력)의 총합으로서 수평 및 연직성분을 $\sum [M]_{ij}$ 는 모멘트의 총합을 나타낸다.

$$(m + m')\dot{u} = \sum_j [F_x]_{ij} + [f_x] \quad (2)$$

$$(m + m')\dot{w} = \sum_j [F_z]_{ij} + [f_z] + V(\rho_s - \rho_w)g \quad (3)$$

$$(I + I')\dot{\omega} = \sum_j [M]_{ij} \quad (4)$$

요소에 작용하는 수평 및 연직 성분의 파력은 식(5), (6)을 이용하여 산정되며, 여기서 C_D 는 항력계수, C_M 은 관성력 계수, D 는 요소의 직경, ρ 는 물의 밀도, u 와 w 는 각각 x 방향과 z 방향의 수직속도를 의미한다.

$$f_x = \frac{1}{8} C_D \rho \pi D^2 u \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{1}{6} C_M \rho \pi D^3 \dot{u} \quad (5)$$

$$f_z = \frac{1}{8} C_D \rho \pi D^2 w \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{1}{6} C_M \rho \pi D^3 \dot{w} \quad (6)$$

2.2 LES-WASS-2D의 개요

본 연구의 외력조건인 유속장의 시계열 해석에 이용되는 LES-WASS-2D는 허와 최(2008)에 의해 개발된 2차원수치해석수법으로서 무반사조파를 위한 조파소스(조파원천)항이 포함된 연속방정식과 Porous Media의 적용을 위하여 투과성내의 유체저항으로서 관성저항(Sakakiyama and kajima, 1992), 난류저항(Ergun, 1952; van Gent, 1995) 및 층류저항(van Gent, 1995; Liu and Masliyah, 1999)을 도입한 수정된 Navier-Stokes 운동방정식과 자유표면을 추적하기 위한 VOF함수인 이류방정식으로 구성되어 있다. 또한 난류모델로서 Sub-grid scale 모델을 이용한 LES모델을 도입하고 있다.

3. 계산결과

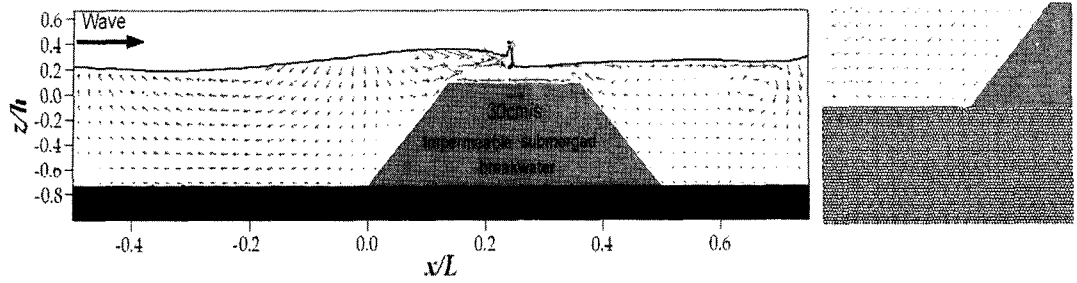
개별요소법(DEM)과 LES-WASS-2D(허와 최 2008)의 연성해석수법을 이용하여 잠제 저면의 저질이동에 대한 정성적인 검토를 수행하였다. 수심($h=30\text{cm}$)과 입사파의 주기($T_I=1.2\text{S}$)를 고정하고 입사파고를 두 종류($H_I=5\text{cm}, 7\text{cm}$)로 한 경우에 있어서, 먼저, LES-WASS-2D를 이용하여 유속장을 산정하고, 이에 따른 외력을 개개의 요소에 적용하여 요소의 이동위치를 산정한 후, 불투과성 및 투과성 잠제 저면의 해저지반 저질입자의 초기 이동과정에 대해 고찰하였다. 개별요소법에 이용된 상세한 계산조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Set-up conditions of DEM simulation

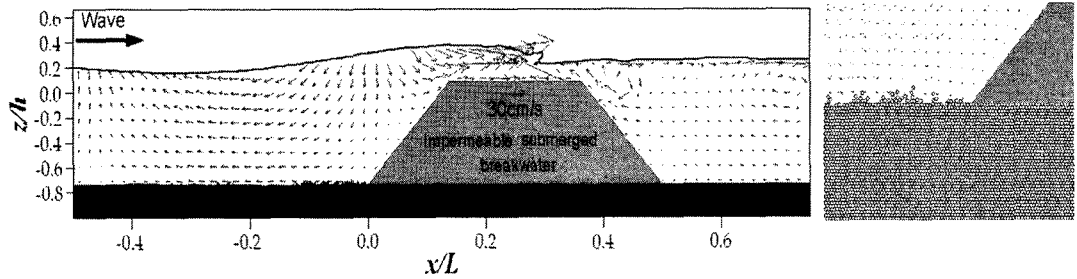
구분	단일입경저질
계산간격(s)	1.0×10^{-4}
계산대상영역(cm)	$x=225, z=50$
격자크기(cm)	$\Delta x=0.5, \Delta z=0.5$
요소의 입경(cm)	$d=0.25$
요소의 밀도(g/cm^3)	$\rho=1.81$

3.1 불투과성 잠제 저면의 저질이동기구

Fig. 2는 주기 1.2sec의 경우에 대한 불투과성

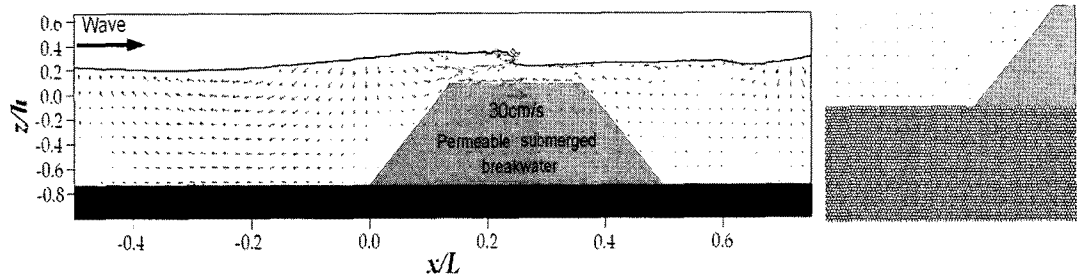


(a) $H_1=5\text{cm}$ $t/T=0.43$

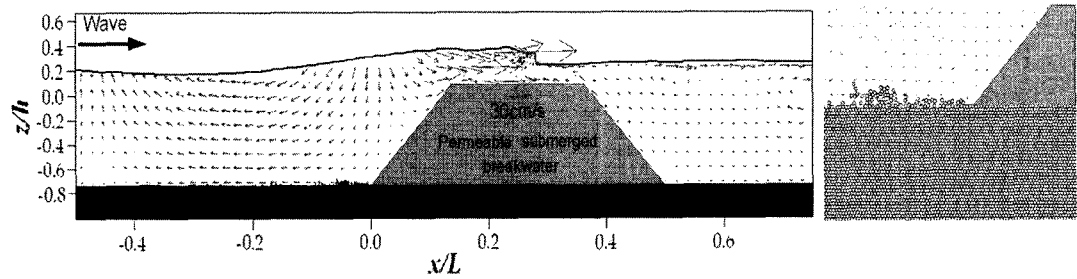


(b) $H_1=7\text{cm}$ $t/T=0.43$

Fig. 2. Mechanism on bottom material movement around a impermeable submerged breakwater



(a) $H_1=5\text{cm}$ $t/T=0.43$



(b) $H_1=7\text{cm}$ $t/T=0.43$

Fig. 3. Mechanism on bottom material movement around a permeable submerged breakwater

잠재 전면의 저질이동에 관한 연성해석수법의 계산결과를 나타내고 있으며, 해석시간 $t/T=0.43$ 의

경우이다.

(a),(b)는 각각 파고 5cm 및 파고 7cm의 경우

를 나타낸다. 지면관계상 다양한 해석시간에 대한 그림을 전부 나타낼 수는 없지만, 그림으로부터 흐름에 따라 개개의 요소들이 부유와 소류상태로 이동하는 것을 확인할 수 있으며, 파고가 큰 (b)의 경우가 파고가 작은 (a)의 경우보다 상대적으로 잠제전면에서의 요소들이 활발하게 움직이는 것을 알 수 있다.

3.2 투과성 잠제 저면의 저질이동기구

Fig. 3은 주기 1.2sec의 경우에 대한 투과성 잠제 전면의 저질이동에 관한 연성해석수법의 계산결과를 나타내고 있으며, 해석시간 $t/T=0.43$ 의 경우이다. (a),(b)는 각각 파고 5cm 및 7cm의 경우에 대한 잠제 전면 저질의 움직임을 나타내고 있다. 불투과성 잠제의 경우와 마찬가지로 전반적으로 해저지반의 요소들이 소류 및 부유상태로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한, 파고 7cm의 (b)의 경우, 불투과성 잠제 전면 저질의 움직임을 나타내고 있는 Fig. 2(b)에 비해 더욱 저질의 움직임이 활발한 것을 알 수 있으며, 쇄굴현상이 재현되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 DEM(개별요소법)과 LES-WASS-2D(허와 최, 2008)의 연성해석수법을 개발하여, 모래지반위에 불투과성 및 투과성 잠제가 설치되어 있는 경우에 대해 저질이동기구의 특성에 관하여 정성적으로 고찰하였다.

그 결과 불투과성 잠제가 설치된 경우와 투과성 잠제가 설치된 경우 모두다 파고가 클수록 상대적으로 작은 파고의 경우보다 구조물 전면에서 저질의 이동이 활발함과 동시에 쇄굴현상을 재현할 수 있었으며, 특히 투과성잠제의 경우 전면 저질의 운동이 더욱 활발한 것을 확인할 수 있었다.

이상에 근거하여 실 해역에서의 해저지반의 이동 및 퇴적과 해안구조물의 안전성에 큰 영향을 주는 침식 및 쇄굴 특성을 파악하기 위해서는 다양한 수치모형 실험뿐만 아니라 본 연구에서 제안한 연성해석수법과 같은 수치모델의 개발 및 검증과 개발한 모델의 고정도화에 관하여 활발한 검토가 이루어졌으면 하는 바람이다.

참고문헌

- 허동수, 김도삼. (2003) VOF 법에 의한 불규칙파동장에 있어서 불투과잠제에 의한 파랑에너지 변형특성 한국해양해양공학회지, 1017 -7116, 15(4), 207-213
- 허동수, 최동석 (2008). 투과성잠제의 비탈면경사가 주변 파동장에 미치는 영향. 대한토목학회논문집, 28(2B), 249-259.
- Cundall, P.A. and Strack O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
- 伊福誠, 住井勝彦. (1993). 波による底質の移動に及ぼす粒径のシミュレーション, *海岸工学論文集*, 37, 759-763.
- 三島豊秋, 秋山誠司, 土屋義人. (1993). 飛砂における砂粒の反発機構の数値解析, *海岸工学論文集*, 40, 271-275.
- 後藤仁志, 酒井哲郎, 富永圭司, 豊田泰晴. (1994). 変動波庄を受ける海底地盤の挙動の数値模擬への個別要素法の応用, *海岸工学論文集*, 41, 596-600.
- 荒木進歩, 出口一郎. (1997). 捨石防波堤の断面変形に関する研究. *海岸工学論文集*, 44, 531-535.
- 前野詩朗, 小川 誠, Lechoslaw G. Bierawski. (2006). VOF-DEM-FEM連成モデルによる潜堤の挙動解析, *海岸工学論文集*, 53, 886- 890.