사석방파제 거치로 인한 해저지형변화 수치해석: 물리 기반 지형모형 SeoulFoam을 중심으로

Numerical Analysis of Modified Bed-profiles due to the Presence of a Rubble Mound Breakwater using Physics-Based Morphology Model[SeoulFoam]

조용준

서울시립대학교 토목공학과

Yong Jun Cho

Department of Civil Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

Abstract

Among the many scouring-protection works near a rubble mound breakwater, stacking armoring rocks in multiple or single layers are most popular. The rationale of these scouring-protection works is based on the Equilibrium regime or the maximum scouring depth. However, considering natural beaches, which constantly change their shape according to sea waves conditions, the equilibrium regime or the maximum scouring depth mentioned above seems to foot on the fragile physical background. In this study, in order to test the above hypothesis, numerical simulations were carried out on the partial reflection from the slopes of rubble mound breakwater, and its ensuing standing waves formed in the front seas of a breakwater, the change in the bed profiles due to the formation of standing waves, and scouring depth at the base of a rubble mound breakwater. In doing so, numerical simulations were implemented using OlaFoam, an OpenFoam-based toolbox, and SeoulFoam (Cho, 2020), a physics-based morphology model. Numerical results show that the wave length of sand waves is closely linked with the incoming wave period, while amplitudes of sand waves are determined by incoming wave height. Moreover, the seabed profiles underwent significant changes due to the presence of a rubble mound breakwater. It was shown that the size of sand waves increased when compared before the installation, and the shape of sand waves is getting skewed toward the shore direction. It was also shown that as exposure time to standing waves increased, the amplitude of sand waves also increased, and the scouring depth near the base of a breakwater increased. These results are contrary to the Equilibrium regime, and the scouring prevention works based on the stacking of armoring rocks should be re-evaluated.

Keywords : sand waves; physics-based morphology model; OlaFOAM; maximum scouring depth; rubble mound breakwater; standing waves

1. 서론

15세기 중엽에 대해해 시대가 시작될 무렵 거친 파랑으로부터 자유로운 정온한 수역을 얻으려는 인류의 노력은 시작되었다. 이러한 노력으로 자연에서 쉽게 얻을 수 있는 사석을 활용한 초기형태의 사석 방파제가 완성된다. 투석으로 조성된 경사식 사석방파제는 파랑에너지가 집중되는 평균 해수면과 이웃한 사면에서 진행되는 세굴로 변형되며 중국에는 평균 해수면 인근에 단이 형성된다. 이후 사석 경사제는 안정화 단계에 진입하여 상당 기간 추가적인 변형 없이 방파제로 기능한다. 이러한 변형과정은 파랑에 대한 내구성이 수월한 방파제 단면 형태를 우리에게 시사하며,

방파제 조성단계부터 평균 해수면 인근에 단을 배치하는 berm breakwater는 같은 맥락으로 이해할 수 있다.

방파제는 물동량의 증가와 조선 기술의 발전으로 선박이 대형화되고 파랑에 대한 우리의 이해가 깊어짐에 따라 다양한 형태로 진화한다. 현재 가용한 여러 가지의 형태의 방파제 중 내습하는 파랑에너지의 소산이란 관점에서 보면 여전히 사석 경사제가 가장 효율적이나 석재를 얻기 위한 채석과정에서 발생하는 환경훼손으로 인해 최근 들어 대형 케이슨을 활용한 직립제가 주류를 이룬다. 해상을 통한 물동량의 증가와 이로 인한 선박의 대형화로 현재 직립제는 수심 20~25m인 수역에 조성되며, 사석 경사제와 견줄만한 에너지 감쇄 효과를 얻기 위해 유수실, slit 등이 순차적으로

도입되며 진화한다. 그러나 전술한 유수실, slit 등은 유수실에 포획된 공기층의 이완·압축으로 생성되는 방사파로 인해 목적인 에너지 감쇄 효과가 효과적으로 구현되지 못하는 경우도 상당하며 이 경우 상당한 반사가 야기되며, 이렇게 형성된 정상파는 방파제 전면해역의 쇄굴로 이어져 방파제 안전을 위협할 수 있다[Fig. 1 참조]. 현재 기부 침식 방지공은 하천 수리학에서 이야기하는 평형하상[Equilibrium regime] (Sumer and Fredsoe, 2002) 혹은 최대 세굴 깊이 (Sumer and Fredsoe, 2002) 등의 개념에 준거해 돌을 다층 혹은 하나의 층으로 쌓아 보호하는 방법이 주류를 이루나, 이러한 방법은 잔류수압으로 인한 액상화현상으로 인해 방지공 밑에 있던 모래가 용출되는 등의 한계를 지니며 이는 방지공의 침하로 이어진다[Fig. 2, 3 참조]. 이와 더불어 해저지형은 내습하는 파랑에 대응하여 쉽 없이 그 모양이 바뀐다는 사실에 준거하면 쇄굴이 일정량 진행되면 더는 진행되지 않는다는 Equilibrium regime 혹은 최대 세굴심 등의 개념은 그 물리적 근거를 찾을 수 없다는 사실이 해안공학계에서 끊임없이 제기되고 있어, 전술한 기부 보호공은 한계를 지니는 것을 알 수 있다. (Cho and Kim, 2019; Cho and Chang, 2019; Cho et al., 2019).

본 연구에서는 이러한 인식에 기초하여 더욱 합리적인 기부침식 방지공 개발을 위한 기초연구로 사석 경사식 방파제 전면해역에서의 해저지형이 내습하는 파랑과 부분반사로 형성되는 정상 파동계에 따라 변화되는 양상을 살펴보고자 한다. 이 과정에서 openFoam 기반 물리기반 지형모형인 SeoulFoam이 활용되며 수치모의는 scale effect로 인한 오류를 최소화하기 위해 실험역을 대상으로 수행된다.

2. 수치모형

수치모의는 OpenFoam 기반 tool box인 OlaFoam과 물리기반 지형모형인 SeoulFoam (Cho, 2020) 을 활용하여 수행하였으며, 이해를 돕기 위해 2.1절과 2.2절에는 OlaFoam과 물리 기반 지형모형인 SeoulFoam을 정리하였다.

2.1 OlaFoam

OlaFoam에서 파랑 모형은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation)와 질량 보존식으로 구성되며, 자유수면은 VOF [Volume Of Fraction] 법을 활용하여 추적된다. 난류 모형으로는 $k-\epsilon$ 모형을 사용하였다 (Pope, 2004).

OlaFoam (Higuera et al. 2013a; Higuera et al., 2013b)에서 사용되는 파랑 모형인 RANS, 연속 방정식을 기술하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

Fig. 1. The pattern of steady boundary layer streaming in the vertical plane under standing waves [reproduced from Sumer and Fredsoe(2002)]

(a) Scouring protection works using one layer of rock

(b) Protection works using multiple layers of rock armor

Fig. 2. Scouring protection works using rock armor [reproduced from Sumer and Fredsoe(2002)]

Fig. 3. Definition sketch of the suction removal of sediments out of the armor block layer [reproduced from Sumer and Fredsoe(2002)]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) \\ = -\nabla p^* - \mathbf{g} \cdot \mathbf{X} \nabla \rho + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu_{eff} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 $\mathbf{U}$ 는 속도벡터, $\mathbf{g}$ 는 중력가속도벡터, $\mathbf{X}$ 는 위치벡터를 각각 나타낸다. μ_{eff} 는 $\mu + \rho \nu_{turb}$ 로 정의되는 동점성계수, p^* 는 유사 동압력을 각각 나타낸다.

이상 유체를 해석하기 위한 VOF식을 기술하면 다음과 같으며,

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} \gamma + \nabla \cdot \mathbf{U}_c \gamma (1 - \gamma) = 0 \quad (3)$$

여기서 γ 는 VOF법에서 자유수면을 추적하기 위해 도입된 지표로, 1에 가까울수록 액체 상태, 0에 가까울수록 기체 상태를 나타내며 본 논문에서는 자유수면의 위치를 $\gamma = 0.5$ 로 정의하였다.

2.2 Porous media에서의 파랑모형-VARANS equations

사석 경사식 방파제의 본체는 사석으로 구성되며, 이 경우 다공성 매질에서 발생하는 형상항력과 관성항력으로 인해 파랑 모형은 적절하게 수정되어야 한다. Darcy(1856)의 사질토 내부에서의 유체 흐름에 관한 연구 이후, 다공성 매질에서의 유체 해석을 형상항력으로 기술하려는 시도는 다공성 매질에서의 유동 해석에 큰 흐름을 형성한다. 층류의 경우 선형 형상항력만으로도 해석할 수 있으나, Forcheimer (1901)는 Reynolds 수가 큰 흐름에도 적용할 수 있도록 이차 형상항력 항을 추가하였으며, Polubarinova와 Kochina(1962)는 1901년에 Forcheimer가 제시한 식을 비정상류로 확장하기 위해 관성력을 추가하였다.

본 논문에서는 del Jesus et al.(2012)에 의해 제시된 VARANS [Volume Averaged Reynolds Averaged Navier Stokes Eq.]를 사용하였으며 이를 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$(1+c) \frac{\partial}{\partial t} \frac{\rho u_i}{n} + \frac{u_j}{n} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\rho u_i}{n} = - \frac{\partial}{\partial x_i} p + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{1}{n} \right) - A \frac{u_i}{n} - B \frac{u_i}{n} \left| \frac{u_i}{n} \right| \quad (5)$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{u_i}{n} \gamma = 0 \quad (6)$$

여기서 u 는 평균유속 또는 Darcy속도, n 은 공극율, A 와 B 는 형상항력 계수, c_1 은 VOF 계수, c 는 관성력 형상항력 계수로 물성치에 종속한다.

다공성 물질에서 비어있는 공간에 존재하는 유체의 속도

를 의미하는 실제 속도 U 는 평균유속 또는 Darcy속도를 나타내는 u 와 다음과 같은 관계식을 추종하며

$$U = \frac{u}{n} \quad (7)$$

선형 형상항력계수 A , 비선형 형상항력 계수 B 는 다음과 같이 정의되며[Fig. 4 참조]

$$A = \alpha \frac{(1-n)^3}{n^2} \frac{\mu}{D_{50}^2} \quad (8)$$

$$B = \beta \left(1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-n}{n^2} \frac{\rho}{D_{50}} \quad (9)$$

여기서 D_{50} 은 다공성 물질의 명목직경, KC 는 Keulegan-Carpenter수를 각각 나타내며 KC 는 다음과 같이 정의된다.

$$KC = \frac{T_o u_M}{D_{50} n} \quad (10)$$

식 (10)에서 u_M 은 최대 진동 속도, T_o 는 진동주기를 나타내며, KC 는 vortex induced vibration으로 인해 야기되는 마찰

(a)

(b)

Fig. 4. Trajectories of damping coefficient A and B by varying d_{50} for specific void ratio

을 고려하기 위해 도입되었다. 마찰 매개 변수들과 연관되어 α 와 β 는 조정되며, 관성력 계수 c 값은 0.34로 유지된다.

본 논문에서는 del Jesus et al. (2011)의 실험결과를 토대로, 방과제를 구성하는 사석의 명목직경 $D_{n50} = (M_{50}/\rho_r)^{1/3}$ 은 0.015 m, 투수계수는 0.41, 선형 형상 항력계수 $A=10,000$, 비선형 형상항력 계수 $B=6$ 로 취하였으며, 여기서 M_{50} 는 누적 분포에서 중앙에 해당하는 사석 질량, ρ_r 는 사석 밀도를 각각 나타낸다.

2.3 물리기반 지형모형 SeoulFoam

물리기반 지형모형 SeoulFoam은 부유사 해석을 위한 이송확산 방정식과 표사수지 개념으로부터 유도된 Exner식으로 구성된다 (Cho, 2020; Jacobsen et al., 2014). 전술한 Exner식의 유도과정에는 소류사와 바닥으로 회귀하는 부유사를 고려하였으며, 표사 초기이송, 부유사 농도 저면 경계치, 소류사 이송을 산출과정에는 Shields Diagram, 삼차원 수치 모의된 유동계 정보로부터 직접 산출된 저면 전단응력이 활용된다(Cho, 2020; Jacobsen et al., 2014).

2.3.1 이송확산 방정식

이송확산 방정식은 다음과 같이 기술할 수 있으며,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot [(\gamma \mathbf{u} + \mathbf{w}_f)c] = \nabla \cdot [\gamma(\nu + \nu_t)\nabla c] \quad (11)$$

여기서 c 는 단위체적당 부유사 농도, $\mathbf{w}_f$ 와 $\mathbf{u}$ 는 각각 표사 침강속도와 유속 벡터를 나타내며, ν 와 ν_t 는 각각 동점성계수와 와동점성계수를 나타낸다.

SeoulFoam에서는 식(11)로 정의되는 초기·경계치 문제를 완결하는 데 필요한 바닥에서의 순간 체적 표사 농도 c_b 는 다음과 같이 산출되며 (Cho, 2020; Jacobsen et al., 2014),

$$c_b = \frac{c_o}{\left(1 + \frac{1}{\lambda_b}\right)^3} \quad (12)$$

여기서 c_o 는 최대 부유사 농도를 나타내며 본 논문에서는 0.35의 값을 취하였으며, λ_b 는 바닥에서의 순간 선형 표사 농도를 나타내며 다음과 같이 기술될 수 있다 (Bagnold, 1954; Einstein, 1950).

$$\lambda_b^2 = \frac{\kappa^2 \alpha_1^2}{0.013 s \theta'} \left(\theta' - \theta'_c - \frac{\pi}{6} \mu_d pEF \right) \quad (13)$$

식(13)에서 θ' 는 Shields parameter를 나타내며 이를 기술하면 다음과 같으며,

$$\theta' = \frac{\tau_b}{\rho(s-1)gd} \quad (14)$$

여기서 τ_b 는 저면 전단응력, s 는 모래 비중, ρ 는 해수 밀도, d 는 모래 지름을 각각 나타낸다. 식 (13)에서 pEF 는 표사가 움직이는 확률을 나타내며 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$pEF = \left[1 + \left(\frac{\frac{1}{6} \pi \mu_d}{\theta' - \theta'_c} \right)^4 \right]^{-1/4} \quad (15)$$

식 (15)에서 μ_d 는 동적 마찰계수를 나타낸다.

2.3.2 물리기반 지형모형

물리기반 지형모형 Exner식은 다음과 같이 기술할 수 있으며 (Cho, 2020; Jacobsen et al., 2014),

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{1-e_d} [\nabla \cdot \mathbf{q}_b + \mathbf{E} + \mathbf{D}] \quad (16)$$

여기서 e_d 는 공극률을 나타내며, 침식률을 나타내는 $\mathbf{E}$ 는 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$\mathbf{E} = -(\nu + \nu_t) \frac{\partial c}{\partial \mathbf{n}} |N| \quad (17)$$

식(17)에서 $\mathbf{n}$ 은 저면에서의 단위 외향 법선벡터를 나타내며, 따라서 외향 법선벡터 $\mathbf{N}$ 은 다음과 같이 정의되며,

$$\mathbf{N} = |N| \mathbf{n} \quad (18)$$

여기서 $|N|$ 은 경계 인근 육면체로 구성된 셀에서 바닥과 접하는 면의 면적을 나타낸다. 식(16)에서 중력에 의해 바닥으로 회귀하는 모래를 나타내는 $\mathbf{D}$ 는 침강속도 $\mathbf{w}_f$ 와 유속 $\mathbf{u}$ 의 합을 저면법선 벡터 $\mathbf{N}$ 에 투영하여 산출되며 이를 내적을 활용하는 경우 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$\mathbf{D} = c_b [(\mathbf{w}_f + \mathbf{u}) \cdot \mathbf{N}] \quad (19)$$

여기서 c_b 는 바닥에서의 순간 체적 표사농도를 나타내며 식(12)에 이미 정의한 바 있다. 식(16)에서 $\mathbf{q}_b$ 는 소류사 이송률을 나타내며 다음과 같이 기술할 수 있으며,

$$\mathbf{q}_b = \frac{1}{6} \pi d pEF \mathbf{u}_b \quad (20)$$

여기서 소류사 이송속도 $\mathbf{u}_b$ 는 다음과 같이 정의되는 평형

방정식으로부터 산출된다 (Cho, 2020; Cho, 2019; Jacobsen et al., 2014).

$$w_r + f_f + f_D = 0 \quad (21)$$

표사에 작용하는 중력 w 은 다음과 같이 기술될 수 있으며,

$$w = \frac{\pi}{6} \rho (s-1) d^3 g \quad (22)$$

바닥과 나란한 방향으로 작용하는 접선방향 성분 w_r 은 외적을 활용하는 경우 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$w_r = \frac{1}{|N|^2} [N \times (w \times N)] \quad (23)$$

표사가 u_b 라는 속도로 움직이는 경우 생성되는 마찰력 f_f 은 운동마찰계수와 수직반력으로 기술하면 다음과 같다.

$$f_f = -\frac{1}{|N|} |w \cdot N| \mu_d \frac{u_b}{|u_b|} \quad (24)$$

모래 입자에 작용하는 항력 f_D 는 다음과 같이 기술될 수 있으며,

$$f_D = \frac{1}{2} \rho c_s \frac{\pi}{4} d^2 |u_r| u_r \quad (25)$$

여기서 u_r 은 상대속도를 나타내며 $u_{nw,r} - u_b$ 로 정의되며, c_s 는 항력과 물에 잠긴 모래 입자의 부력에 의한 중량감소를 설명해 주는 계수로 Luque (1974)의 실험결과에 준거하면 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$c_s = \frac{4\mu_d}{3a^2 \frac{1}{2} \theta'_c} \quad (26)$$

3. 수치 모의

내습하는 파랑에 노출되는 시간에 따른 해저지형의 변화와 사석방파제 기부에서의 침식양상을 살펴보기 위해 수치 모의를 수행하였으며, 수치 모의는 OpenFoam 기반 tool box인 OlaFoam과 물리기반 지형모형인 SeoulFoam을 활용하여 수행하였다. 이해를 돕기 위해 Fig. 5에는 수치수조와 사석방파제 제원을 정리하였으며, 도시된 계산영역은 $1,152,000$ ($3600 \times 320 \times 1$) 개의 절점을 사용하여 이산화하였다. 수심은 해안선으로부터 $60 \sim 80$ m 떨어진 지점까지 경사가 $1/10$ 내외인 급경사의 전 빈이 포진하며 이후 수심이 10 m 내외인 간조 단구[low tide terrace]가 넓게 포진하는 동해안 지형 특성을 고려하여 8 m, 9 m, 11 m로 취하였으며 (Cho, 2019; Cho and Chang, 2019, Cho and Kim, 2019, Cho et al., 2019), 파형은 간조 단구에서의 수심을 고려하여 유한 수심에서의 대표적 비선형 파랑모형으로 알려진 Cnoidal wave로 취하였다(Cho, 2019; Dean and Dalrymple, 2002). 모래 직경은 동해안에 분포하는 모래 특성을 고려하여 $d_{50} = 0.2$ mm, 0.4 mm, 0.8 mm로 취하였다(Cho, 2019; Cho and Chang, 2019, Cho and Kim, 2019, Cho et al., 2019). Table 1에는 수치모의에 사용된 파랑 제원을 정리하였다.

4. 수치 결과

4.1 SeoulFoam 검증

Fig. 6, 7에는 SeoulFoam의 정성적 검증을 위해 수행한 일정 수심부에서의 파랑 이행과정과 해저 지형변화를 각각 정리하였다. 목표했던 파형이 정확하게 조파되어 해안을 향해 진행하는 것을 알 수 있으며, 연흔의 파장은 내습하는

Fig. 5. Definition sketch of numerical wave flume with a rubble-mound breakwater

Table 1. List of wave conditions used in the numerical simulations

Cases	$H[m]$	$T[s]$	$h_o[m]$	$d_{50}[mm]$
RUN 1, 2, 3	4.0	12.5	11.0	0.2, 0.4, 0.8
RUN 4, 5, 6	4.0	8.5	11.0	0.2, 0.4, 0.8
RUN 7, 8, 9	4.0	12.5	9.0	0.2, 0.4, 0.8
RUN 10, 11, 12	4.0	8.5	9.0	0.2, 0.4, 0.8
RUN 13, 14, 15	4.0	12.5	8.0	0.2, 0.4, 0.8
RUN 16, 17, 18	4.0	8.5	8.0	0.2, 0.4, 0.8
RUN P1	4.0	12.5	11.0	0.2
RUN P2	4.0	8.5	11.0	0.2

Fig. 6. Snapshots of numerically simulated wave field in RUN P1 and P2 **Fig. 7.** Comparison of bed-profiles observed in RUN P1 and RUN P2 after being exposed for 115 s

파랑의 주기에 의해 특정되며, 연흔의 진폭은 내습하는 파랑의 파고에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 유한 수심대역에서 비선형 정도를 나타내는 수심대비 진폭 비를 나타내는 $a/h=0.18$ 가 상대적으로 작아 연흔은 정연한 모습을 지니며 왜도와 같은 비정형성은 찾아볼 수 없다.

4.2 파랑

Fig. 8에는 RUN1에서 관측되는 자유수면 snapshot을 순차적으로 도시하였다. Fig. 9에는 수심이 처오름과 월파에 미치는 영향을 예시하고 검증자료로 활용하기 위해 RUN1, RUN13 [$h=8m$]에서 관측되는 월파 양상을 비교하였다. Fig. 10에는 Wave Gauge NO 1, 2, 3, 4에서 관측되는 자유수면 시계열자료를 도시하였다[RUN 4].

목표했던 파형이 정확하게 조파되어 정연하게 사석방파제를 향하여 진행하는 것을 확인할 수 있으며[Fig. 8 참조], 수심이 얇은 경우[RUN 13] 비선형 파랑의 대표적인 성정인 뾰족한[peaky] 파마루와 얇고 긴 파곡을 관측할 수 있다

[Fig. 9(b) 참조]. 이러한 파랑 거동으로 미루어 보면 수치모의는 상당한 정도로 수행된 것으로 판단된다. 사석방파제 사면에 거치된 Wave Gauge NO4의 경우 천수 효과로 인해 파고가 증가하는 것을 확인할 수 있으며 강해진 비선형성으로 파동계에 출현하는 고차 조화성분으로 인해 이중 파마루가 형성되는 것을 관측할 수 있다[Fig. 10(b) 참조].

Fig. 11에는 Wave Gauge NO1에서 관측되는 수평 방향 유속성분의 수직 방향 분포가 하나의 단위 주기에 걸쳐 변화하는 양상을 도시하였다[RUN 7]. 위상별 흐름 특성을 모두 담아내기 위해 하나의 단위 주기를 13개의 frame으로 나누어 자세하게 구성하였다. 전 수심대역에서 먼바다 방향의 저류가 우월한 것으로 드러나 사석방파제에서 상당한 반사가 진행되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12, 13에는 Wave Gauge NO2, 4에서 관측되는 $[u, w]$ 로 구성된 위상공간에서 속도벡터 $\mathbf{u}$ 가 그리는 궤적을 도시하였다[RUN 7]. 자유수면 수면에 가까워질수록 궤적이 반시계 방향으로 틀어진 모양을 띠는 것이 이채롭다. 이러한 현상은 먼바다를 향하

Fig. 8. Sequential snapshots of numerically simulated wave field in RUN 1 [$h=11 \text{ m}$]

Fig. 9. Water depth's effect on the run-up height and its associated overtopping

Fig. 10. Time series of numerically simulated water surface displacement at Wave Gauge NO1, 2, 3 and 4 [$h = 11 \text{ m}$, $T = 8.5 \text{ s}$ and $H = 4 \text{ m}$]

는 저류와 방파제를 향하는 Stokes drift가 만나서 생성되는 전단력에 기인하는 것으로 판단되며, 이러한 추론의 근거는 수평 방향 유속성분의 연직 방향 분포에서 찾을 수 있다 [Fig. 11 참조]. 또한 전 수심대역에서 먼바다를 향하는 흐름의 세기가 방파제를 향하는 흐름의 세기보다 우월하다. 방

파제 사면에 거치된 Wave Gauge NO4의 경우 처오름의 세기가 처내림의 세기보다 우월하다.

4.3 부유사

Fig. 14에는 시간에 따른 부유사 농도분포 변화를 정리하

Fig. 11. Evolution of shoreward velocity during unit wave period at Wave Gauges NO 1 in RUN 7

(a) at $z = 4.5 \text{ m}$ and $z = 7.0 \text{ m}$

(b) at $z = 1.5 \text{ m}$ and $z = 4.5 \text{ m}$

(c) at $z = 0.5 \text{ m}$ and $z = 1.5 \text{ m}$

Fig. 12. Evolution of velocity vector during the unit wave period at varying heights [Wave Gauge NO 2 in RUN 10]

Fig. 13. Evolution of velocity vector during the unit wave period at Wave Gauge NO 4 in RUN 10

였다. 사석방파제 전면해역에서 바닥으로부터 연행된 모래 무리가 파랑이 진행됨에 따라 이행되는 양상이 정교하게 묘사되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15에는 이해를 돕기 위해 사석방파제 전면해역에서 관측되는 부유사 농도 시계열자료와 연직분포를 정리하였다.

4.4 해저 지형변화

Fig. 16에는 사석방파제 거치가 해저지형에 미치는 영향을 살펴보기 위해 사석방파제 거치 전후의 해저지형을 비교하였다. 사석방파제 사면에서 진행되는 부분반사와 이로 인해 전면해역에 형성되는 정상파는 해저지형에 상당한 영향을 미치는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 연흔의 크기는 증가하며 전면으로 왜도된 모양을 띠는 것을 알 수 있다.

Fig. 17에는 내습하는 파랑에 노출되는 시간에 따라 변하는 해저지형을 정리하였다[RUN1]. 왜도된 모양의 연흔이 형성되는 것을 확인할 수 있으며 노출되는 시간이 증가함에 따라 연흔의 진폭도 같이 증가하며, 방파제 기부 인근 수역에서의 쇄굴심도 깊어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 18에는 연흔 형상에 주기가 미치는 영향을 살펴보기 위해 94 s 경과 후 RUN9, RUN12에서 관측되는 해저지형을 비교하였다. 연흔의 진폭은 비슷하였으나, 연흔의 파장은

Fig. 14. Sequential snapshots of numerically simulated suspended load [$h = 11\text{ m}$, $T = 8.5\text{ s}$ and $H = 4.0\text{ mm}$]

입사 파랑의 주기가 상대적으로 긴 RUN9에서 크게 관측되었으며, 연흔의 진폭은 입사 파랑의 파고에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 19(a)에는 모래 입경 차이가 결과하는 연흔 모양 변화를 살펴보기 위해 111.2 s 경과 후 RUN1, 2, 3에서 관측되는 연흔 형상을, Fig. 19(b)에는 RUN4, 5, 6에서 관측되는 연흔 형상을 비교하여 수록하였다.

모래가 거칠수록 연흔 진폭과 방파제 기부에서의 세굴심은 증가하며, 연흔 마루가 형성되는 위치도 먼바다 쪽으로 이동하였다[Fig. 19(a) 참조]. 이러한 경향은 주기가 상대적으로 짧은 RUN4, 5, 6에서도 유사하게 관측된다. 이러한 차

(a) Sampled time series of numerically simulated suspended load concentration at $z = 0.01\text{ m}$ and $z = 0.04\text{ m}$

(b) Evolution of suspended load concentration profile at $x = 250\text{ m}$

Fig. 15. Time series of numerically simulated suspended load concentration and its evolution [$h = 11\text{ m}$, $T = 8.5\text{ s}$ and $H = 4.0\text{ mm}$]

이를 만드는 기제를 다루기 위해서는 본 논문에서 활용한 물리 기반 지형모형인 SeoulFoam에서의 저면 전단응력 산출 과정을 이해할 필요가 있으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

저면 전단응력의 정확한 모의는 물리 기반 지형모형의 정확성을 가름하는 중요한 인자로 보인다. 현재 가용한 대부분 지형모형에서는 예외 없이 마찰계수 f , quadratic friction Law, 수심 방향으로 평균된 유동계 정보를 활용하여 저면 전단응력이 산출되며, quadratic friction Law를 기술하면 다음과 같다 (Nielsen, 1993).

$$\tau_b = \frac{1}{2} f \rho V^2 \quad (27)$$

여기서 저면 조도와 wave Reynolds NO.에 종속하는 마찰계수 f 는 Lab scale에서 수행된 수리모형실험에서 측적된 자료에 준거하여 산출한다. 이 과정에서 활용되는 수리모형 실험의 상당 부분은 flat bottom, 정상 상태의 파동계를 대상으로 수행되었다. 그러나 왜도 혹은 왜곡된 파동계의 경우 연안 방향의 흐름 지속시간이 먼바다 방향의 흐름보다 짧은 지속시간으로 인해 경계층이 충분히 발달하지 못한다. 상기한 사실을 상기하면 기존 지형모형은 비선형 파동계에서 표사 이송을 기술하기에는 한계를 지니는 것을 알 수 있다.

SeoulFoam의 경우 저면 인근 경계층에서의 유속이 정밀하게 모의되며, 이렇게 모의된 유동계로부터 저면 전단응력은 다음과 같이 산출된다.

Fig. 16. Modification of bed-profiles due to the presence of rubble mound breakwater [in RUN P1 and RUN 1 after 115 s]

Fig. 17. Evolution of bed profile for $d = 0.2\text{mm}$, $T = 12.0\text{s}$, $H = 4.0\text{ mm}$ and $h = 11.0\text{m}$ [RUN1]

Fig. 18. Comparison of bed profile by varying the wave period
[$d = 0.8\text{ mm}$, $T = 8.5\text{ s}$, 12.0 s , $H = 4.0\text{m}$, and $h = 9\text{m}$] [RUN12, RUN9]

(a) $h = 11\text{ m}$, $T = 12.0\text{ s}$ and $H = 4.0\text{ mm}$

(b) $h = 11\text{ m}$, $T = 8.5\text{ s}$ and $H = 4.0\text{ mm}$

Fig. 19. Comparison of bed-profile by varying sand diameter and wave period
[$d = 0.8\text{ mm}$, $T = 8.5\text{ s}$, 12.0 s , $H = 4.0\text{m}$, and $h = 9\text{m}$]

$$\frac{\tau_b}{\rho} = (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (28)$$

이는 기존에 사용되던 마찰계수 f 로부터 자유로우며 왜
도 혹은 왜곡된 저면 전단응력의 모의가 가능하다. 이러한

장점으로 인해 SeoulFoam의 경우 정상 파동계의 마디[node]
에서 연행된 모래가 경계층 boundary layer streaming에 의해
배[antinode]로 이송되며 형성되는 사주[sand bar]를 정확하
게 재현한 바 있다 (Nielsen, 1993)[Fig. 20 참조]. 따라서 상
기한 SeoulFoam에서의 저면 전단응력 산출과정으로 가능
하면, 거친 모래로 구성된 저면 인근에서의 큰 전단응력의

Fig. 20. Sequential snapshots of sand bars under the antinodes due to the settlement of sediments, which was salated under the surface nodes where the near-bed velocities are strongest, convected toward the surface antinode by the boundary layer drift [reproduced from Nielsen (1993)].

Fig. 21. Spatial variation of bottom shearing stress

로 많은 모래가 연행되며, 이렇게 연행된 거친 모래는 상대적으로 큰 침강속도로 바닥으로 회귀하는 양도 증가하여 큰 진폭의 연흔이 결과되는 것으로 판단된다[Fig. 21 참조].

5. 결론

현재 가용한 여러 가지 양식의 방파제 중 사석 방파제는 내습하는 파랑에너지의 소산이란 관점에서 보면 가장 효율적이나 사면에서의 부분반사로 전면 해역에 형성되는 정상파로 인해 기부에서 상당한 침식이 진행될 수 있다. 기부에서의 세굴은 피복층의 붕괴로 이어질 수 있으며, 이러한 피

복층 붕괴는 사석 경사식 방파제의 주 파괴 양식으로 여겨진다. 현재 기부 침식 방지공은 Equilibrium regime 혹은 최대 세굴 깊이와 같은 개념에 준거해 돌을 다층 혹은 하나의 층으로 쌓아 보호하는 방법이 주류를 이루나, 해양환경에 따라 쉽 없이 그 모양을 바꾸는 자연 해빈을 고려하는 경우 전술한 Equilibrium regime 혹은 최대 세굴 깊이라는 개념의 논리적 근거는 상당히 취약해 보인다. 이와 더불어 사석 직층에 준거한 기부 침식 방지 공은 정상파에 노출되는 경우 잔류수압의 증가로 인한 액상화현상으로 인해 방지공 밑에 있던 모래가 용출되는 등의 한계를 지니며 이는 방지공의 침하로 이어진다.

본 논문에서는 전술한 가설을 확인하기 위해 사석 방파제 사면에서의 진행되는 부분반사와 이로 인해 전면해역에 형성되는 정상파, 정상파 형성에 따른 해저지형 변화, 사석 방파제 기부에서의 세굴 등을 수치 모의하였다. 이 과정에서 수치 모의는 OpenFoam 기반 tool box인 OlaFoam과 물리 기반 지형모형인 SeoulFoam (Cho, 2020)을 활용하여 수행하였다. 먼저 물리 기반 지형모형인 SeoulFoam의 정성적 검증을 위해 일정 수심부에서의 파랑 전파과정과 해저 지형변화를 수치 모의하였다. 모의 결과 연흔의 파장은 내습하는 파랑의 주기에 의해 특정되며, 연흔의 진폭은 내습하는 파랑의 파고에 의해 결정되는 것을 모의 되었으며, 유한 수심 해역에서 비선형 정도를 나타내는 수심 대비 진폭 비를 나타내는 $a/h=0.18$ 가 상대적으로 작아 연흔은 정연한 모습으로 비정형성은 찾아볼 수 없었다. 또한 사석 방파제 거치로 인해 해저지형은 상당한 변화를 겪으며, 거치 전과 비교해 연흔의 크기는 증가하였으며 파랑 진행 방향으로 왜도된 모양을 띠는 것으로 모의 되었다. 이와 더불어 정상파에 노출되는 시간이 증가함에 따라 연흔의 진폭도 같이 증가하며, 방파제 기부 인근 수역에서의 세굴도 깊어지는 것을 확인하였다. 그 밖에도 모래가 거칠수록 연흔 진폭과 방파제 기부에서의 세굴 깊이는 증가하였으며, 연흔 마루가 형성되는 위치도 먼바다 쪽으로 이동하였다. 이러한 경향은 주기가 상대적으로 짧은 경우에서도 유사하게 관측된다. 전술한 현상은 거친 모래로 구성된 저면 인근에서의 큰 전단 응력으로 많은 모래가 연행되며, 이렇게 연행된 거친 모래는 상대적으로 큰 침강속도로 바닥으로 회귀하는 양도 증가하여 큰 진폭의 연흔이 결과되는 것으로 판단된다.

상기한 모의 결과는 사석을 다층 혹은 하나의 층으로 쌓는 방식의 기부 침식 방지 공의 이론적 근거로 활용되는 Equilibrium regime과는 각을 이루는 것으로 사석 적층에 준거한 현재의 기부 침식 방지 공을 재평가하는 작업이 필요해 보인다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 “연안 침식 저감기술 개발” 성과 중 일부분으로, 지원에 감사드립니다.

References

- Bagnold, R. A. (1954). “Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear.” *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 1954, Vol. 225, No. 1160, pp. 49-63.
- Cho, Y. J. (2020). “Development of the physics-based morphology model as the platform for the optimal design of beach nourishment project: A numerical study.” *J. Mar. Sci. Eng.*, Vol. 8, pp. 828.
- Cho, Y. J., (2020). “Numerical Analysis of the changes in sea wave conditions by the presence of LCB [Low Crested Breaker]: Centered on rip current formed at the open Inlet between LCB.” *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 7, No. 4, pp. 181-193.
- Cho, Y. J. (2019). “Numerical analysis of the beach stabilization effect of an asymmetric ripple mat.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 4, pp. 28-39.
- Cho, Y. J. and Bae, J. H. (2019). “On the feasibility of freak waves formation within the harbor due to the presence of Infra-gravity waves of bound mode underlying the ever-present swells.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 1, pp. 17-27 (in Korean).
- Chang, P. S. and Cho, Y. J. (2019). “Preliminary study on the development of a platform for the optimization of beach stabilization measures against beach erosion III - centering on the effects of random Waves occurring during the unit observation period, and infra-gravity waves of bound mode, and boundary layer streaming on the sediment transport.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 6, pp. 434-449 (in Korean).
- Cho, Y. J. and Kim, I. H. (2019). “Preliminary study on the development of platform for the selection of an optimal beach stabilization measures against the beach erosion-centering on the yearly sediment budget of the Mang-Bang beach.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 1, pp. 28-39.
- Cho, Y. J., Kim, I. H. and Cho, Y. J. (2019). “Numerical analysis of the grand circulation process of Mang-Bang beach- centered on the shoreline change from 2017. 4. 26 to 2018. 4. 20.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 31, No. 3, pp. 101-114.
- Cho, Y. J. and Kang, Y. K. (2017). “The Effect of Skewness of Nonlinear Waves on the Transmission Rate through a Porous Wave Breaker.” *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 29, No. 6, pp. 369-381.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*.
- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (2002). *Coastal Processes with Engineering Applications*, Cambridge University Press, New York, NY.
- del Jesus, M., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2012). “Three-dimensional interaction of waves and porous structures. Part I: Numerical model formulation.” *Coast. Eng.*, Vol. 64, pp. 57-72.
- Einstein, H. A. (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flow*, Tech. Bull. No. 1026, U.S. Dept.

- of Agriculture, Washington, DC.
- Higuera, P., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2013a). "Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: application to OpenFOAM." *Coast. Eng.*, Vol. 71, pp. 102-118.
- Higuera, P., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2013b). "Simulating coastal engineering processes with OpenFOAM." *Coast. Eng.* Vol. 71, pp. 119-134.
- Jacobsen, N. G., Fredsoe, J. and Jensen, J. H. (2014). "Formation and development of a breaker bar under regular waves. Part 1: Model description and hydrodynamics." *Coastal Engineering*, Vol. 88, pp. 182-193
- Forcheimer, P. (1901). "Wasserbewegung durch Boden." *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, Vol. 45, pp. 1782-1788.
- Fredsoe, J. and Deigaard, R. (1992). "*Mechanics of Coastal Sediment Transport*." World Scientific.
- Luque, R. F. (1974). "*Erosion and transport of bed-load sediment*." Ph.D. dissertation, Delft University of Technology.
- Nielsen, P. (1993). "*Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*." World Scientific Publishing Co.
- Nielsen, A. W., Sumer, B. M., Fredsoe, J. and Christensen, E. D. (1962). "Scour protection around offshore wind turbines and monopiles." In: Burns, Susan E.; Bhatia, Shobha K.; Avila, Polubarinova-Kochina, P. (eds.). "*Theory of Ground Water Movement*." Princeton University Press.
- Pope, S. B. (2004). "Ten equations concerning the large-eddy simulation of turbulent flows." *New Journal of Physics*, Vol. 6, No. 35, pp. 1-24.
- Sumer, B. M. and Fredsoe, J. (2002). "*The mechanics of scour in the marine environment*." World Scientific.