

투과성 구조물에 의한 불규칙파의 최대 처오름 높이와 반사 Maximum Run-up Heights and Reflection of Irregular Waves due to Porous Structure

이승협¹, 배용훈¹, 이종인², 조용식¹

Seung-Hyeob Lee¹, Yong-Hoon Bae¹, Jong-In, Lee² and Yong-Sik Cho¹

1. 서 론

심해에서 근해로 진입한 파랑은 해안선을 따라 처오름과 내림을 반복한다. 해안에서의 처오름높이는 해안구조물 설계에 있어서, 구조물의 높이 및 방파제의 높이를 산정하는데 매우 중요한 요소이다.

우리나라의 해안구조물 설계기준은 대부분 일본과 미국의 설계기준을 적용하고 있지만, 선진국의 실험 보고서와 설계기준은 대부분 Rock을 이용한 결과이기 때문에, TTP(Tetrapod)를 주로 사용하는 우리나라에 적용하기에는 많은 문제점을 가지고 있다.

처오름높이에 대한 연구는 국내·외에서 많이 수행되고 있지만, 고립파와 크노이드파 같은 규칙파에 대한 연구가 대부분이며, 불투과성 구조물에서 주로 수행되어 왔다.

처오름높이에 관련된 국외 연구로는 Hall and Watts(1953)은 수리모형실험을 통하여 고립파의 처오름높이 산정을 발표하였으며, Synolakis et al(1988)은 크노이드파의 처오름높이에 관한 근사해석해를 제시하였다. 이는 모두 입사파가 규칙파인 조건에서 수행되었으며, 실제 해역에서의 파랑조건은 매우 불규칙하므로, 실무에 적용 가능한 처오름높이를 산정하기 위해서는 입사파가 불규칙파인 조건에서 수행되어야 한다.

본 연구에서는 입사파가 불규칙파이고, TTP를 사용한 투과성 구조물에서 주기의 변화에 따른 처오름높이와 반사율에 대해 수리모형실험을 수행하였으

며, 수치모형실험을 통하여 수리모형실험결과를 검증하였다.

2. 지배방정식

난류 흐름에서 속도는 평균 속도 $\langle u_i \rangle$ 와 난류 속도 u_i' 로 구별되고, 압력은 평균 압력 $\langle P \rangle$ 와 난류 압력 P' 로 구분되며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$u_i = \langle u_i \rangle + u_i', \quad P = \langle P \rangle + P' \quad (1)$$

식 (1)에서 $i=1, 2, 3$ 으로 차원을 나타낸다. 유체가 비압축성이라고 가정하면 평균 흐름은 식 (2)와 식(3)과 같은 Reynolds 방정식에 의해 지배 받는다(조와 전, 2003).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial u_i' u_j'}{\partial x_j} \quad (3)$$

식 (3)에서 ρ 는 유체의 밀도를 나타내며, g_i 는 중력가속도의 방향 성분을 의미한다. 또한, $\langle \tau_{ij} \rangle$ 는 평균 흐름의 점성 응력에 대한 텐서이며, 뉴턴 유체에서는 분자 점성을 나타내는 μ 와 평균 흐름의 변형률 텐서 $\langle \sigma_{ij} \rangle$ 를 이용하여 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\langle \tau_{ij} \rangle = 2\mu \langle \sigma_{ij} \rangle \quad (4)$$

평균 흐름에서 난류 변동의 영향은 Reynolds 응력 텐서를 이용하여 표현하는 것이 가능하다. Reynolds 응력텐서가 비선형 Reynolds 응력 모델로부터 평균 흐름의 변형률과 상관관계가 있다고 가정하면 식 (5)

1 한양대학교 토목공학과

2 한국건설기술연구원 수자원부 선임연구원

와 같이 나타낼 수 있다(Liu and Lin,1997).

$$\begin{aligned} \rho \langle u'_i u'_j \rangle &= \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - C_d \rho \frac{k^2}{\epsilon} \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \\ &- \rho \frac{k^3}{\epsilon^2} \left[C_1 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \right] \\ &+ C_2 \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \\ &+ C_3 \left(\frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 C_d , C_1 , C_2 , C_3 는 경험상수이고 δ_{ij} 는 Kronecker delta 함수를 의미한다. 또한, k 는 난류 운동 에너지, ϵ 은 난류 운동 에너지의 소산율을 의미한다.

투과체는 복잡한 구조이기 때문에 투과체 내에서 직접 Navier-Stokes 방정식을 해석하는 것은 어렵다. 일반적으로, Navier-Stokes 방정식은 대표 공극 크기보다 크고 자연현상에서의 대표 길이 단위보다는 작은 길이 단위 l 에 대해서 평균된다. 게다가, 유체 변수들은 공간적으로 평균된 양과 변동되는 양으로 나뉘어 진다. 즉, u_i 는 $(\bar{u}_i + u'_i)/n$ 으로 나타내고 P_0 는 $\bar{P}_0 + P'_0$ 으로 표현된다. 여기서, n 은 공극체의 유효 공극율이다. 공간 평균된 Navier-Stokes 방정식은 식 (6)과 식 (7)과 같다(전 등, 2003).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{1 + c_A}{n} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\bar{u}_j}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial x_i} + \frac{\nu}{n} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{1}{n^2} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (7)$$

본 연구에서 지배방정식은 유한차분 two-step projection 기법을 사용하여 해석하였다. 시간항은 전방차분법으로 차분화하였고, 이송항은 중앙차분법과 풍상차분법의 조합으로 이산화하였다. 또한, 자유수면을 추적하기 위하여 밀도변화 방정식을 이용한 VOF 기법을 적용하였다.

3. 실험조건과 입사파

본 실험에서 사용한 장비는 그림 1과 같이 폭 0.6m,

높이 1.1m, 길이 32.5m의 수로와 전기서보 피스톤식 조파기로 구성된 단면 조파장치로서 일방향 불규칙파를 입사파로 사용하였다. 사용된 입사파는 유의주기를 1.4sec에서 2.4sec까지 0.2sec간격으로 변화시켰으며, 유의파고는 0.04m로 고정하였다. 수심은 0.5m로 동일한 조건에서 수행하였다. 투과성 구조물의 제원은 경사가 1/1.5이고, TTP, 피복재와, 사석으로 이루어져 있으며, TTP와 피복재의 두께는 각각 0.09m, 0.02m이다. 또한 각각의 투과율은 45%, 20%와 10%이다.

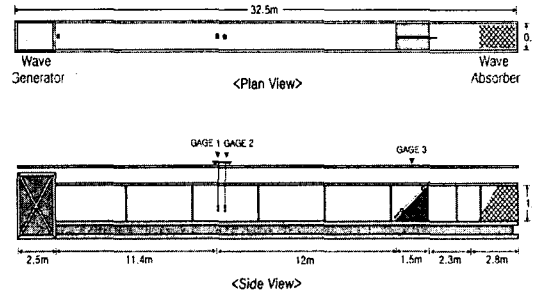


Fig. 1. 단면수로 개념도

수리모형실험과 수치모형실험에 사용된 일방향 불규칙파는 식 (8)과 같은 Bretschneider-Mistuyasu 스펙트럼(Goda, 2000)을 목표 스펙트럼으로 설정하여 일방향 불규칙파를 재현하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (8)$$

여기서, $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼, $H_{1/3}$ 는 불규칙파의 유의파고, $T_{1/3}$ 는 유의파의 주기이며, f 는 주파수를 나타낸다.

불규칙파의 특성을 나타내기 위해서는 충분한 시간동안 조파되어야 하기 때문에, 수리모형실험에서는 최소 500파장 이상의 자료를 사용하였고, 수치모형실험에서는 최소 100파장 이상의 자료를 사용하기 위해서 200sec 이상의 자료를 축적하여 결과를 산정하였다.

Fig. 2는 $T_{1/3}=2.0$ sec인 경우 입사파 스펙트럼을 목표 스펙트럼과 비교하여 도시한 것으로 재현된 불규칙파의 스펙트럼은 목표 스펙트럼과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

본 연구서는 입사파와 반사파가 중첩된 파랑으로부터 입사파와 반사파를 분리하기 위해서 수리모형실험에서는 Goda and Suzuki(1976)에 의해 제안된 2점법을 사용하였고, 수치모형실험에서는 박 등(1992)과 Suh et al.(2001)에 의해 제안된 3점법을 사용하여 반사율을 산정하였다.

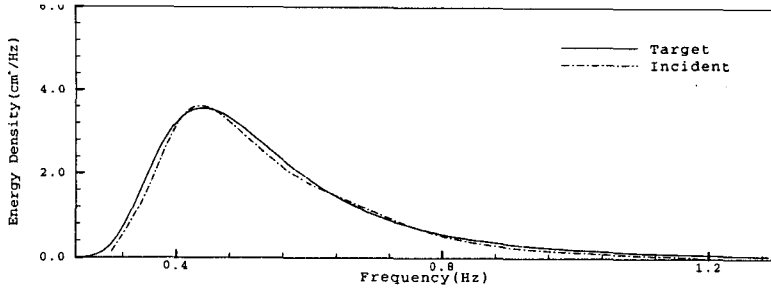


Fig. 2. Bretschneider-Mistuyasu 스펙트럼 ($T_{1/3}=2.0\text{sec}$)

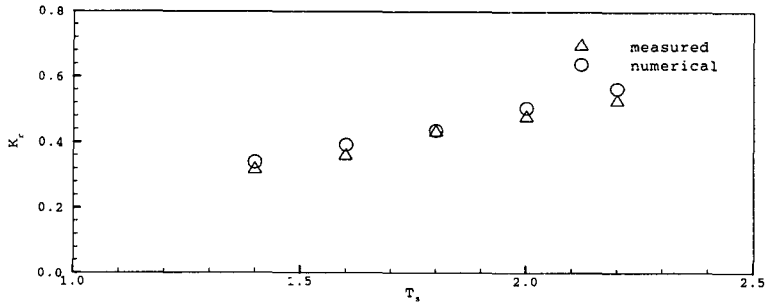


Fig. 3. 유의주기 ($T_{1/3}$) 변화에 따른 반사율

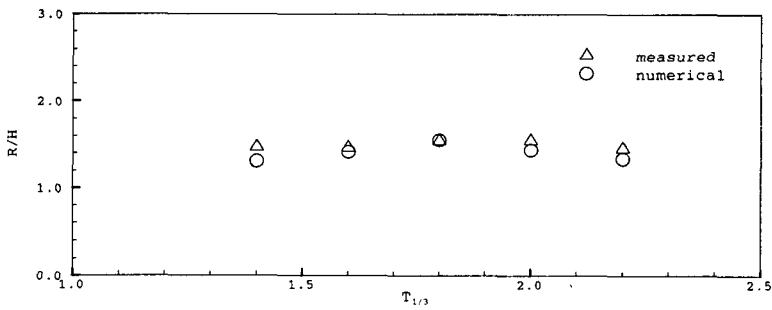


Fig. 4. 유의주기 변화에 따른 최대 처오름높이(3%)

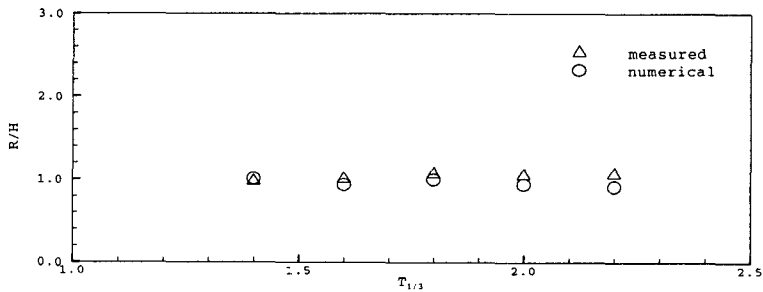


Fig. 5. 유의주기 ($T_{1/3}$) 변화에 따른 최대 처오름높이(1/3)

4. 결과 분석

Fig. 3은 투과성 구조물에서 유의주기에 따른 반사율을 도시한 것이며, 수리모형실험결과를 수치모형실험결과와 비교하였다. 수리모형실험과 수치모형실험의 결과는 전체적으로 잘 일치하고 있음을 보여주며, 동일한 유의파고를 가질 경우 유의주기가 증가할수록 반사율 또한 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 유의주기 변화에 따른 최대 처오름높이를 유의파고로 나눈 무차원 값을 수리모형실험과 수치모형실험결과를 도시한 것이다. Fig. 4는 최대 처오름높이를 내림차순으로 정렬하여 상위 3%에 해당하는 값의 평균이고, Fig. 5는 상위 1/3에 해당하는 값의 평균이다. 전체적으로 수리모형실험과 수치모형실험의 결과는 잘 일치 하였으며, 상위 3%에 해당하는 값을 나타내는 Fig. 4의 결과가 Fig. 5의 결과보다 크게 산정됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 수심 평균된 방정식인 천수 방정식과 Boussinesq 방정식으로 재현하기 어려운 자유수면 변위의 정확한 형상과 유속장을 표현하기 위해 Reynolds 방정식, $k-\epsilon$ 모델 및 VOF 기법을 사용하였다.

정확한 반사율 산정을 위하여 수리모형실험의 파고기록은 2점법을 사용하여 입사파와 반사파를 분리하였으며, 수치모형실험의 파고기록은 3점법을 사용하여 분리하였다. 산정된 결과는 서로 잘 일치 하였다. 수리모형실험과 수치모형실험의 유의주기의 변화에 따른 최대 처오름높이는 매우근사하게 계산되었다.

참고문헌

- 박우선, 오영민, 전인식 (1992). 쇄소자승기법에 의한 입·반사파의 분리기법, 한국해양공학학회 논문집, 4(3): 139-145.
- 조용식, 전찬후 (2003). 크노이드파의 발생과 최대 처오름높이, 한국해양공학학회논문집, 15(2): 80-85.
- 전찬후, 조용식, 이종인 (2003). 사다리꼴형상 수중 방파제에 의한 정현파의 Bragg 반사, 한국수자원학회논문집, 36(5), 741-749.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, Proc. 15th Int Coastal Eng. Conf., American Society of Civil Engineers, Reston VA, USA, pp. 828-845.
- Goda, Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures, World Scientific, Singapore.
- Hall, J.V. and Watts, J.W. (1953). "Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes." Technical Memorandum 33, Beach Erosion Board, US Army of Corps of Engineers, USA.
- Liu, P. L.-F. and Lin, P. (1997). A numerical model for breaking wave: the volume of fluid method, Res. Rep. No.. CACR-97-02, University of Delaware, USA.
- Synolakis, C.E., Deb, M.K. and Skjelbreia, J.E. (1988). The anomalous behavior of the runup of cnoidal waves. Physics of Fluids A, 31, pp. 3-5.
- Suh, K.D., Park, W.S. and Park, B.S. (2001). Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes, Coastal Engineering. 43, pp. 149-159.