

반원형형상 다열 수중방파제에 의한 Bragg 반사 Bragg Reflection due to Multi-arrayed Semi-circular Submerged Breakwater

전찬후¹·황종길¹·조용식¹

Chan-Hoo Jeon¹, Jong-Kil Hwang¹, and Yong-Sik Cho¹

1. 서 론

심해로부터 해안으로 전파해오는 파랑은 해저지형 또는 구조물 등의 영향을 받아 반사, 쇄파 등과 같은 변형을 겪게 되며, 이와 같은 파랑은 연안침식 및 해안구조물의 안전과 설계에 영향을 미친다.

수중방파제(submerged breakwater)는 입사하는 파랑에너지를 대규모로 감소시켜 연안침식을 방지할 뿐만 아니라 방파제를 수중에 건설함으로써 해양환경의 개선을 가능하게 한다. 또한, Bragg 반사를 이용하여 수중방파제를 건설할 경우, 연안의 불필요한 침식 및 퇴적현상을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 입사파에 의해 발생하는 해안구조물의 손상을 사전에 방지할 수 있다. 아울러, 항만의 정온도를 향상시키는 데 효과적으로 이용할 수 있다.

수중방파제와 관련된 국외 연구로서 Cooker *et al.*(1990)은 고립파와 반원형 수중방파제의 상호작용에 대해 연구하였고, Hwang *et al.*(2002)은 실험을 통해 수중방파제에 의한 파랑의 변형에 대해 연구하였다. 그리고 Losada *et al.*(1997)은 투과성 수중 계단지형을 통과하는 파랑에 대한 수리모형실험과 수치해석을 수행하였으며, Mase *et al.*(2000)은 수중방파제에 의한 파랑의 Bragg 반사에 대한 실험을 실시하였다.

국내에서도 다양한 수치해석 기법을 통해 Bragg 반사와 수중방파제에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 조 등(1999)은 정현파형 지형을 통과하는 파랑의 Bragg 반사에 대해 연구하였고, 김 등(2000)은 다양한 지형에서의 Bragg 반사 현상을 경계요소법을 이용하

여 검토하였으며, 조 등(2002)에 의해 사각형형상 수중방파제의 Bragg 반사에 대한 수리모형실험과 고유함수전개법을 이용한 연구가 이루어졌다. 또한, 전 등(2003)은 투과성 사다리꼴형상 수중방파제의 Bragg 특성에 대해서 연구하였다.

본 연구에서는 2열과 3열로 위치한 반원형형상 수중방파제의 Bragg 반사 특성을 불투과제와 투과제일 경우에 대하여 수리모형실험과 수치모형실험을 통해 알아보았다.

2. 지배방정식과 경계조건

2.1 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.

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

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

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

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

¹ 한양대학교 공과대학 토목공학과 (Corresponding Author: Yong-Sik Cho, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea, ysc59@hanyang.ac.kr)

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)와 같이 나타낼 수 있다(Liu and Lin, 1997).

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

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_p 에 대해서 평균된다. 게다가, 유체 변수들은 공간적으로 평균된 양과 변동되는 양으로 나뉘어 진다. 즉, u_i 는 $(\bar{u}_i + u_i'')$ 으로 나타내고 ρ_0 는 $\bar{\rho}_0 + \rho_0''$ 으로 표현된다. 여기서, n 은 공극체의 유효 공극율이다. 공간 평균된 Navier-Stokes 방정식은 식 (6)과 식 (7)과 같다(전 등, 2003).

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

$$\begin{aligned} \frac{1 + c_d}{n} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\bar{u}_i}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{1}{n^2} \frac{\partial \langle u_i'' u_j'' \rangle}{\partial x_j} \quad (7) \end{aligned}$$

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.

2.2 경계조건

평균 흐름에서 고체 경계에는 no-slip 경계조건을 적용하였다. 난류에서는 평균 흐름의 자유수면이 명확히 정의되지 않기 때문에 경계조건을 적용하기가 매우 어렵다(Brocchini and Peregrine, 1996; Liu and Lin, 1997). 주변 유속의 변동으로 인한 자유수면의 변동은 공기에서 물까지의 범위를 갖는 일정 두께의 층을 형성한다. 그러나 이 층의 두께를 결정하는데 어려움이 있기 때문에 본 연구에서는 자유수면 주위에서 밀도의 변동을 무시하고 난류 흐름에서 평균 자유수면은 층류 흐름과 동일하다고 가정한다. 따라서, 자유수면 주위의 밀도는 일정하다고 본다. 또한, 공기 흐름의 영향을 무시하여 평균 자유수면에 영응력(zero-stress) 조건을 이용하였다.

투과체와 외부 흐름간의 경계면은 유체의 흐름과 투과체간의 상호작용에서 가장 중요한 경계이다. 외부의 평균 흐름은 투과체 내에서의 평균 흐름과 동일하지 않다. 투과체 내의 평균 흐름은 원칙적으로 난류 변동을 포함하고 있다. 그러나 투과체에서 최대 난류의 길이크기는 공극의 크기와 공간평균에 사용된 길이크기에 제한을 받기 때문에 평균 흐름은 난류변동을 거의 포함하지 않아야 한다. 따라서, 외부의 평균 흐름과 투과체 내에서의 평균 흐름은 난류와 상관없이 같은 흐름 체계를 갖는다고 가정하는 것이 타당하다. 그러므로, 평균 흐름의 속도와 투과체와 외부흐름의 경계면에 평균된 속도와 압력의 연속성을 적용하는 것이 가능하다(Liu et al., 1999)

3. 실험조건과 입사파

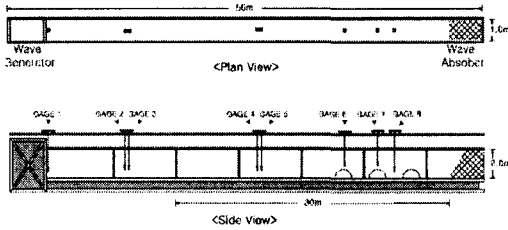


Fig. 1. Experimental wave flume.

본 실험에서 사용한 장비는 Fig. 1과 같이 폭 1m, 높이 2m, 길이 56m의 수로와 전기서보 피스톤식 조파기로 구성된 단면 조파장치로서 규칙파인 정현파를 입사파로 사용하였다. 실험수로는 조파판 전면에 부착된 파고계로부터 얻은 자료를 바탕으로 반사파 흡수식 제어가 가능하고, 수로 양쪽 끝 부분에는 반사파를 흡수하기 위해 여러 겹의 다공성 구조로 된 소파장치가 설치되어 있다.

Fig. 2는 실험에 사용된 단면형상이다. 사용된 모형은 불투과체인 합판을 이용하여 제작한 후 실험을 수행하였다. 사용된 수중방파제 모형의 높이(h_b)는 0.4m로 고정하였고, 저면폭(W_b)이 0.8m이고, 방파제간 거리(d)는 2m이다.

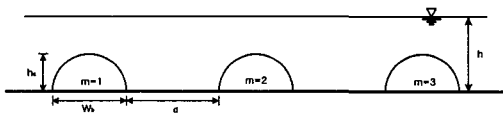


Fig. 2. Experimental section.

Fig. 3은 본 연구에서 입사파로 사용한 정현파에 대해 해석해와 수치해를 비교한 것으로, 정현파의 파고는 0.04m이다. Fig. 3에서 실선은 해석해, 점선은 수치해로서 수치해가 정현파를 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 세로축의 ζ 는 자유수면변위이며, 단위는 m이다.

4. 결과분석

Fig. 4와 Fig. 5는 불투과성과 투과성 반원형형상 수중방파제에 대해 배열 수(m) 변화에 따른 반사계수를 각각 도시한 것이다. 불투과성 수중방파제에 대해서는 VOF모형 및 고유함수전개법(EFEM)으로 해석한 결과와 수치실험결과를 비교 도

시하였고, 투과성 수중방파제는 VOF모형을 이용한

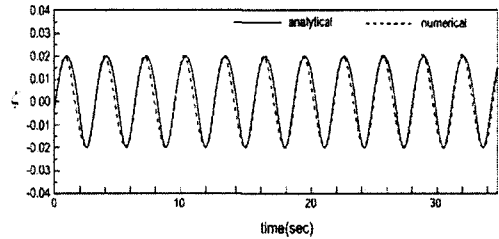


Fig. 3. Incident wave.

수치해석 결과값만을 나타내었다. 고유함수전개법은 조용식 등(2002)에 자세히 설명되어 있다. 그림에서 실선은 고유함수전개법에 의한 결과이고, 검은 원은 수치모형실험 결과값이다. 사각형은 불투과성 수중방파제에 의한 반사계수이고, 삼각형은 투과성 수중방파제에 의한 반사계수이다. 여기서, 사각형과 삼각형은 VOF방법을 이용한 수치모형실험의 결과값이다.

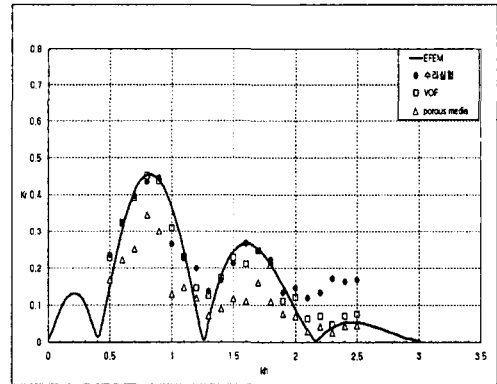


Fig. 4. Reflection coefficients due to submerged breakwater($m=2$).

Fig. 4는 반원형형상의 수중방파제가 2m 간격으로 2개($m=2$)가 설치된 경우의 결과이다. 불투과성 수중방파제일 경우에 수치실험결과와 VOF모형 및 고유함수전개법에 의한 해석결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 제1 공진주기는 $kh \approx 0.8$, 제2 공진주기는 $kh \approx 1.6$ 에서 발생하였으며, 최대 반사계수는 약 0.45 정도로 나타났다. Table 1에 나타난 것과 같이, 공진주기는 전 등(2003)이 발표한 사다리꼴형상 수중방파제일 경우보다 약간 큰 값에서 발생하였고, 최대 반사계수는 반원형형상이 사다리꼴형상에 비해 작은 값을 나타내었다. 투과성 수중방파제인 경우는 불투과성 수중방파제에 의한 반사계수의 약 60~70%값을

나타내었다.

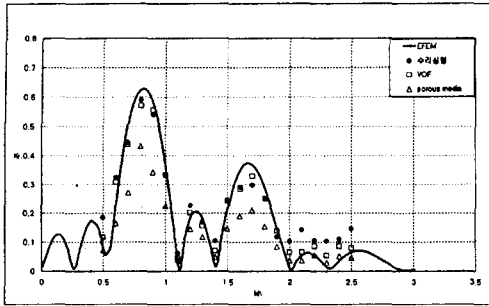


Fig. 5. Reflection coefficients due to submerged breakwater(m=3).

Fig. 5는 반원형형상의 수중방파제가 2m 간격으로 3개(m=3) 설치된 경우이다. 2열로 배열된 경우와 마찬가지로 불투과성 수중방파제인 경우에 수리실험결과와 고유함수전개법에 의한 결과, VOF모형의 결과가 전체적으로 잘 일치하고 있다. 최대반사는 $kh \approx 0.8$, 제2 공진주기는 $kh \approx 1.7$ 에서 발생하였으며, 제1 공진주기에서의 반사계수는 대략 0.6정도로 2열일 경우와 마찬가지로 전 등(2003)에 의한 사다리꼴형상의 반사계수보다는 작은 값을 나타내었다. 투과성 수중방파제일 경우는 불투과성 수중방파제에 의한 반사계수의 60~70% 정도를 나타내었다.

Table 1. Comparison of trapezoidal and semi-circular type

	사다리꼴형상				반원형형상			
	불투과성		투과성		불투과성		투과성	
	2열	3열	2열	3열	2열	3열	2열	3열
최대 반사계수	0.50	0.68	0.34	0.50	0.44	0.60	0.34	0.43
제1 공진 주기(kh)	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8
제2 공진 주기(kh)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.6	1.7	1.6	1.7

5. 결 론

본 연구에서는 반원형형상 수중방파제의 Bragg 반사 특성을 검토하기 위해 수리모형실험과 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 VOF기법을 적용한 모형을 사용하였으며, 제체가 불투과성일 경우에는 선형파이론에 기초한 고유함수전개법을

이용한 모형에 의한 수치해석 결과를 첨가하였다. 전체적으로 VOF모형에 의한 해석결과와 고유함수전개법에 의한 결과는 수리실험결과와 잘 일치하였다. 본 연구의 결과, 제체의 배열 수가 늘어날수록 높은 반사계수를 나타냈고, 공진주기는 투과성 여부 및 배열 수와는 관계없이 유사한 위치에서 발생하였으며, 투과성 제체에 의한 반사계수가 불투과성에 비해 작게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(한양대학교 해안공학연구실)으로 수행되었기에 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- 김영택, 조용식, 이정규, 2000. 2차원 경계요소법을 이용한 Bragg 반사 해석. 한국수자원학회논문집, 33(6), 805-814.
- 조용식, 김창완, 이종인, 1999. 정현파형 지형을 통과하는 파랑의 Bragg 반사. 대한토목학회논문집, 19(2-6), 705-710.
- 조용식, 이종인, 김영택, 2002. 사각형형상 수중방파제의 반사에 관한 수리실험. 한국수자원학회논문집, 35(5), 563-573.
- 조용식, 전찬후, 2003. 크노이드파의 발생과 최대 초오름높이. 한국해양해양공학회지, 15, 인쇄중
- 전찬후, 조용식, 이종인, 2003. 사다리꼴형상 수중방파제에 의한 정현파의 Bragg 반사. 한국수자원학회논문집, 36, 인쇄중
- Brocchini, M., and Peregrine, D.H., 1996. Integral flow properties of the swash zone and averaging. *Journal of Fluid Mechanics*, 317, 241-273.
- Cooker, M.J., Peregrine, D.H., Vidal, C. and Dold, J. W., 1990. The interaction between a solitary wave and a submerged semicircular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 215, 1-22
- Hwung, H.-H., Tu, S.-Y. and Hwang, K.-S., 2002. The interaction of a solitary wave and a submerged porous breakwater. *Proceedings of the 5th International Conference on Hydrodynamics*, 365-370, Tainan.
- 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.

- Liu, P. L.-F., Lin, P., Chang, K.-A. and Sakakiyama, T., 1999. Numerical modeling of wave interaction with porous structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 125(6), 322-330.
- Losada, I.J., Patterson, M.D. and Losada, M.A., 1997. Harmonic generation past a submerged porous step. *Coastal Engineering*, 31, 281-304.
- Mase, H., Oki, K., Kitano, T. and Mishima, T., 2000. Experiments on Bragg scattering of waves due to submerged breakwaters. *Coastal Structures '99*, 659-665.
- Shih, T.-H., Zhu, J.L. and Lumley, J.L., 1996. Calculation of wall-bounded complex flows and free shear flows. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 23, 1133-1144.