

투과성 사다리꼴형상 수중방파제에 의한 Bragg 반사

Bragg Reflection due to Porous Submerged Breakwaters with Trapezoidal Type

전 찬 후*, 조 용 식**

1. 서 론

수중방파제(submerged breakwater)는 입사하는 파랑에너지를 대규모로 감소시켜 해안침식(beach erosion)을 방지할 뿐만 아니라 방파제를 수중에 건설함으로써 해역환경의 개선과 생태계 보전이 가능하다. 더욱이, Bragg 반사를 이용한 수중방파제는 침식된 해안에 모래를 다시 공급하는 기존 해안보호 방법의 수동적이고 비경제적인 점을 극복할 수 있는 과학적이고 능동적이며 실용적인 차세대 해안보호 기술이며, 방파제가 수면위로 돌출되지 않아 주변의 경관과도 조화를 이룬다. 또한, Bragg 반사를 이용하여 수중방파제를 설계 및 시공할 경우, 연안의 불필요한 침식 및 퇴적현상을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 입사파에 의해 발생하는 해안구조물의 손상을 사전에 방지할 수 있다. 아울러, 항만의 정온도를 향상시키는데 효과적으로 이용할 수 있다.

최근, 일부 선진국에서 파랑에너지를 획기적으로 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 수중에 건설함으로써 연안의 경관을 보호할 수 있는 수중방파제에 관한 연구가 보고되었다(Groenewoud 등, 1997; Tomasicchio, 1997). 국내에서도 경계요소법과 고유함수 전개법을 이용한 수치해석을 통해 수중방파제에 대한 다양한 연구가 이루어져왔다(김도삼, 2000; 김도삼 등, 2000; 김도삼, 2001). 또한, 사각형 형상 수중방파제의 Bragg 반사에 대한 수리모형 실험과 고유함수 전개법을 이용한 수치해석을 통한 연구가 이루어졌다(조용식 등, 2002). 그러나, 현장 적용에 가장 현실적인 투과성 사다리꼴형상 수중방파제에 관한 실험과 이에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 수리모형실험과 VOF(volume of fluid) 기법을 이용한 수치해석 모델을 이용하여 투과성 사다리꼴형상 수중방파제의 Bragg 반사 특성에 대해 조사한다.

2. 지배방정식과 경계조건

투과체에서의 흐름은 Navier-Stokes 방정식으로 지배되며 식 (1)과 식 (2)와 같이 표현된다.

* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea. (e-mail) wjscksgn@ihanyang.ac.kr

** 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, (e-mail) ysc59@hanyang.ac.kr

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

여기서, ν 는 동점성계수, u_i 는 공극체 내 순간 속도의 i 번째 요소 성분, P_0 는 순간 유효 압력을 나타낸다.

공극체는 복잡한 구조이기 때문에 공극체 내에서 직접 Navier-Stokes 방정식을 해석하는 것은 어렵다. 일반적으로, Navier-Stokes 방정식은 대표 공극 크기보다 크고 자연 현상에서의 대표 길이 단위보다는 작은 길이 단위 l_p 에 대해서 평균된다. 게다가 유체 변수들은 공간적으로 평균된 양과 변동되는 양으로 나뉘어진다. 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. 식 (1)과 식 (2)를 공간 평균된 Navier-Stokes 방정식으로 나타내면 식 (3)과 식 (4)와 같다(Liu 등, 1999).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1+c_A}{n} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\bar{u}_j}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial x_i} + \frac{\nu}{n} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{1}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i'' \bar{u}_j''}{\partial x_j} \quad (4)$$

식 (4)의 우변항에서 두 번째 점성항은 세 번째 항에 비해 매우 작은 값을 나타낸다. 그러나, 이 항은 전단력을 나타내며 미세 부분에서 공극체와 외부 흐름간 연결 부근에서 점진적으로 중요한 역할을 하고 있다. 공극체 내에서 가속되는 유체에 의해 발생하는 질량 효과를 고려하기 위해서 시간에 대한 미분항을 식 (5)와 같이 표현한다(Liu 등, 1999).

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \left(\frac{1+c_A}{n} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \quad (5)$$

식 (5)에서, c_A 는 추가된 질량 계수이고 Van Gent(1995)가 제안한 $\gamma_p(1-n)/n$ 식을 사용하였다.

식(4)의 우변 마지막 항이 나타내는 공간 속도 변동의 상관관계는 식 (6)과 같은 선형 마찰력과 비선형 마찰력의 조합으로 구성하였다.

$$-\frac{1}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i'' \bar{u}_j''}{\partial x_j} = -g a_p \bar{u}_i - g b_p u_c \bar{u}_i \quad (6)$$

여기서, a_p 와 b_p 는 경험상수이고 u_c 는 $\sqrt{\bar{u}_i u_i}$ 이다 또한, 우변의 첫 번째 항은 점성 효과에 의해 발생한 마찰력을 나타내고, 두 번째 항은 난류 효과에 의한 마찰력을 의미한다. 레이놀즈 수가 작을 때는 점성 효과가 중요하며, 반대인 경우에는 난류 효과가 큰 영향을 미치게 된다.

흐름과 공극체간의 상호 작용에서 가장 중요한 경계는 공극체와 외부 흐름간의 경계면이다. 엄밀히 말하면, 외부의 평균 흐름은 공극체 내에서의 평균 흐름과 동일하지 않다. 공극체 내의 평균 흐름은 원칙적으로 난류 변동을 포함하고 있다. 그러나 공극체에서 최대 난류의 길이 크기는 공극의 크기와 공간평균에 사용된 길이 크기 l_p 에 제한을 받기 때문에 평균된 흐름은 난류 변동을 거의 포함하지 않아야 한다. 따라서, 외부의 평균 흐름과 공극체 내에서의 평균 흐름은 난류와 상관 없이 같은 흐름 체계를 갖는다고 가정하는 것이 타당하다. 그러므로, 평균 흐름의 속도와 공극체와 외부 흐름의 경계면에 평균된 속도와 압력의 연속성을

적용하는 것이 가능하다.

3. 실험결과와 수치해석

투과성 사다리꼴형상 수중방파제의 Bragg반사에 대한 수리모형실험은 규칙파를 입사파로 하였다. 그림 1과 그림 2는 각각 방파제 간격이 $2m$ 이고 방파제가 2열과 3열로 위치해 있을 경우의 파수(kh)에 따른 반사율을 나타낸다. 그림에서 삼각형은 수리모형실험에 의한 결과값이고 원형은 VOF법을 이용한 수치해석 결과이다. 2열로 위치했을 경우는 실험값과 수치해석 값이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있고, 3열로 위치했을 경우는 작은 차이는 보이지만 경향은 잘 일치하고 있다. 그림에 볼 수 있듯이, 방파제 배열에 상관없이 최대 공진주기는 비슷한 파수에서 나타나고 있지만, 배열이 증가함에 따라 반사율은 큰 폭으로 증대됨을 알 수 있다.

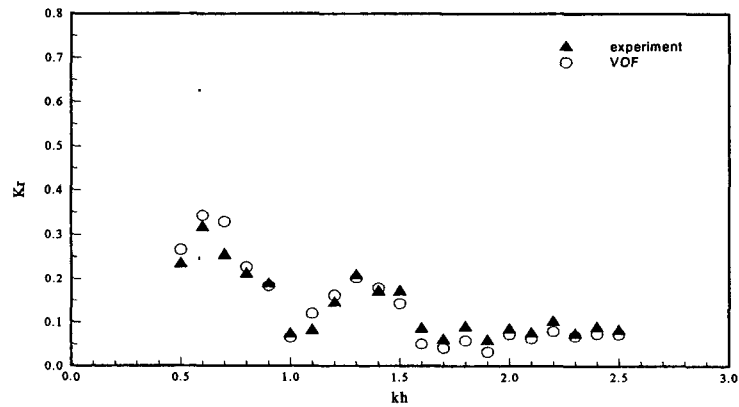


그림 1. 투과체 사다리꼴형상($m=2$, $d=2$)의 반사율

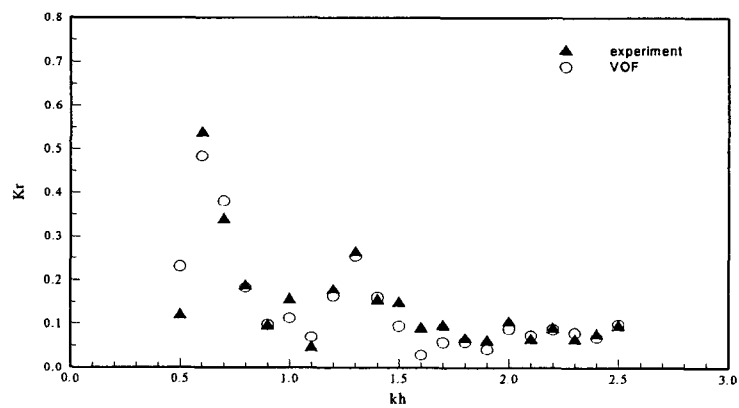


그림 2. 투과체 사다리꼴형상($m=3$, $d=2$)의 반사율

4. 결 론

본 연구에서는 투과성 사다리꼴형상 수중방파제에 의한 Bragg반사 특성을 알아보기 위해 수리모형실험과 수치해석을 수행하였다. 수치해석 모델은 Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 하고 밀도변화 방정식을 이용한 VOF 기법을 사용하여 정확성을 향상시켰다. 수리모형실험과 수치해석의 결과는 2열일 경우에 매우 잘 일치하였고, 3열일 경우 다소 차이는 있으나 그 경향은 잘 일치하였다. 최대 공진주기가 나타나는 위치는 두 경우가 비슷하였고, 반사율은 수중방파제가 3열로 위치한 경우가 2열보다 큰 값을 나타내었다.

감사의 글

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

참고문헌

- 김도삼, 2000. “다열잠제에 의한 파랑의 전달율과 반사율.” **대한토목학회논문집**, 제20권, 1-B호, pp. 85-94.
- 김도삼, 정성호, 이봉재, 김인철, 2000. “경사입사파랑중의 수중다열방파제에 의한 Bragg반사.” **대한토목학회논문집**, 제 20권, 5-B호, pp. 737-745.
- 김도삼, 2001. “2열투과성잠제에 의한 경사입사파랑의 반사율과 전달율에 관한 연구.” **대한토목학회논문집**, 제 21권, 3-B호, pp. 249-258.
- 조용식, 이종인, 김영택, 2002. “사각형형상 수중방파제의 반사에 관한 수리실험.” **한국수자원학회논문집**, 제35권, 5호, pp. 563-573.
- Groenewoud, M.D., Graff, J., Claessen, E.W.M. and Biezen, S.C., 1997. “Effect of submerged breakwater on profile development.” *Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 2429-2441, U.S.A.
- 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, Vol. 125, No. 6, pp. 322-330.
- Tomasichio, U., 1997. “Submerged breakwaters for the defence of the shoreline at Ostia field experiences, comparison.” *Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 2404-2417, Orlando, USA.
- Van Gent, M. R. A., 1995. “Wave interaction with permeable coastal structures.” PhD thesis, Delft University, Delft, The Netherlands.