한국해안·해양공학회 학술발표논문집 (2004)
2004년 8월 19일-21일
제15권, pp. 269-272

사각형형상 수중방파제에 의한 불규칙파의 반사
Reflection of Irregular Waves due to Rectangular Submerged Breakwater

황종길[1], 우종협[1], 조용식[1]
Jong-Kil Hwang[1], Jong-Hyub Woo[1] and Yong-Sik Cho[1]

1. 서 론

심해에서 발달한 파랑이 해안으로 전파하는 동안 해저지형 또는 구조물의 영향으로 인해 회절, 굴절, 반사, 천수 및 쇄파 등과 같은 변형을 겪게 되며, 파랑은 연안침식 및 해안구조물의 안전과 설계에 영향을 미친다. 연안침식은 일반적으로 태풍 등과 같은 이상조건에서 발생한 후 평상시 다시 회복되는 양상을 가지며, 연안침식을 방지하는 구조물 중 수중방파제(submerged breakwater)는 입사하는 파랑에너지를 대규모로 감소시켜 연안침식을 방지할 뿐만 아니라 방파제를 수중에 건설함으로써 해역환경의 개선을 가능하게 한다.

수중방파제와 관련된 국외 연구로서 Chang et al.(2001)과 Lin(2004)은 고립파에 의한 사각형형상 수중방파제에서 파랑 전파에 대해 연구하였고, Hwung et al.(2002)은 실험을 통해 투과성 수중방파제에 의한 파랑의 변형에 대해 연구하였다.

국내에서도 다양한 수치해석 기법을 통해 수중방파제에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다. 조 등(2002)은 사각형형상 수중방파제의 Bragg 반사에 대한 수리모형실험과 고유함수전개법을 이용한 수치해석을 통해서 연구를 하였으며, 전 등(2003)은 투과성 사다리꼴형상 수중방파제의 Bragg 반사 특성에 대해서 연구하였다. 그렇지만, 이는 모두 입사파가 정현파인 조건에서 이루어졌다. 실제 해역에서의 파랑조건은 매우 불규칙하므로, 수중방파제의 현장 적용성을 검토하기 위해서는 불규칙파에 대한 반사특성의 해석이 필요하다.

본 연구에서는 2열로 위치한 사각형형상 수중 방파제의 반사특성을 수리모형실험과 수치모형실험을 통해 검토하였다.

2. 지배방정식

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

$$u_i = <u_i> + u_i', \quad P = <P> + P' \tag{1}$$

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

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

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

$$<\tau_{ij}> = 2\mu <\sigma_{ij}> \tag{4}$$

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

1 한양대학교 토목공학과

와 같이 나타낼 수 있다(Liu and Lin, 1997).

$$-\rho\frac{k^3}{\varepsilon^2}\left[C_1\left(\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial x_l}\frac{\partial\langle u_l\rangle}{\partial x_j}+\frac{\partial\langle u_j\rangle}{\partial x_l}\frac{\partial\langle u_l\rangle}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial\langle u_l\rangle}{\partial x_k}\frac{\partial\langle u_k\rangle}{\partial x_l}\delta_{ij}\right)\right.$$
$$+C_2\left(\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial x_k}\frac{\partial\langle u_j\rangle}{\partial x_k}-\frac{1}{3}\frac{\partial\langle u_l\rangle}{\partial x_k}\frac{\partial\langle u_l\rangle}{\partial x_k}\delta_{ij}\right)$$
$$\left.+C_3\left(\frac{\partial\langle u_k\rangle}{\partial x_i}\frac{\partial\langle u_k\rangle}{\partial x_j}-\frac{1}{3}\frac{\partial\langle u_l\rangle}{\partial x_k}\frac{\partial\langle u_l\rangle}{\partial x_k}\delta_{ij}\right)\right]$$
$$\rho\langle u_i'u_j'\rangle=\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}-C_d\rho\frac{k^2}{\varepsilon}\left(\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial x_j}+\frac{\partial\langle u_j\rangle}{\partial x_i}\right) \quad (5)$$

식 (5)에서 C_d, C_1, C_2, C_3는 경험상수이고 δ_{ij}는 Kronecker delta 함수를 의미한다. 또한, k는 난류 운동 에너지, ϵ은 난류 운동 에너지의 소산율을 의미한다.

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.

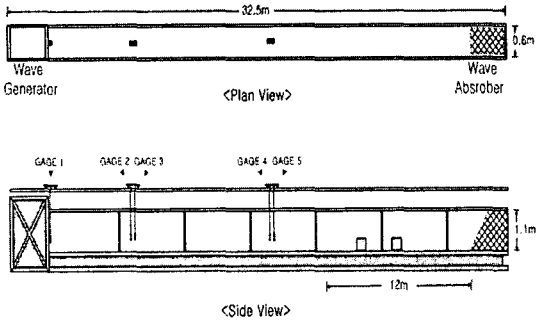

Fig. 1. 단면수로 개념도

사각형형상의 수중방파제는 Fig. 2에 도시한 것과 같이 하부폭(W_b)이 0.4m, 높이(h_s)가 0.4m이고, 수심(h)은 0.8m이며, 수중방파제의 배열은 2열을 대상으로 하였다. 수중방파제의 배치간격(d)은 2m로 설정하였다.

수리모형실험과 수치모형실험에 사용된 일방향 불규칙파는 식 (6)과 같은 Bretschneider-Mistuyasu 스펙트럼(Goda, 2000)을 목표 스펙트럼으로 설정하여 일방향 불규칙파를 재현하였다.

$$S(f)=0.205H_{1/3}^2T_{1/3}^{-4}f^{-5}\exp[-0.75(T_{1/3}f)^{-4}] \quad (6)$$

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

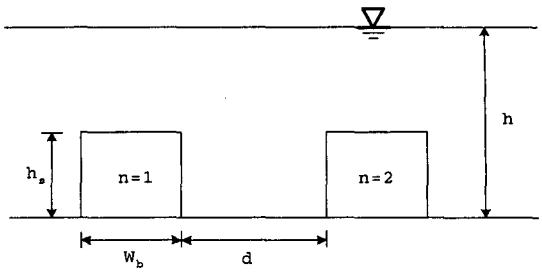

Fig. 2. 수리모형실험과 수치모형 단면 형상

수리모형실험에 사용된 불규칙파의 조파는 다음과 같은 과정을 반복하여 수행하였다. 불규칙파는 다른 주기와 파고 등을 가지는 선형파의 조합으로 나타낼 수 있으며, 목표 스펙트럼을 Fourier 변환하여 n개의 성분으로 분리하여 각각의 주기와 파고를 구하였다. 각 성분파의 대표 주파수는 스펙트럼 밀도의 면적을 가중치로 한 평균값으로 취하였다. 분리된 성분은 파랑의 중첩에 의해서 불규칙파를 합성하게 된다. 또한, 불규칙파의 특성을 나타내기 위해서는 충분한 시간동안 조파되어야하기 때문에, 수치모형실험에서는 최소 100파장 이상의 자료를 사용하기 위해서, 200sec 이상의 자료를 사용하였다.

Fig. 3은 $kh=0.5$인 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 사용하였다. Fig. 4는 $kh=0.5$인 경우, 3점법을 적용하여 2열 수중방파제의 입사파와 반사파를 분리한 그림이다. 분리된 입사파는 목표 입사파와 잘 일치하고 있음을 보여주며, 반사파는 0.23 Hz에서 에너지 밀도가 최대가 되었음을 보여준다.

4. 결 과 분 석

입사파와 반사파의 에너지는 각각의 파고의 자승에 비례하므로 파고의 비로 정의된 반사율은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$K_r=\sqrt{E_r/E_i} \quad (7)$$

여기서 E_i, E_r은 입사파와 반사파의 에너지이다.

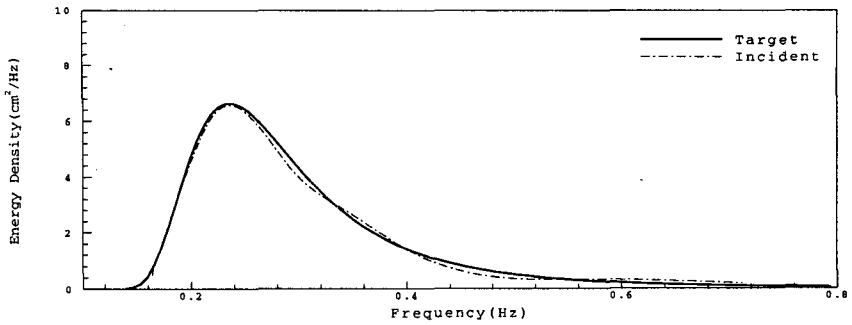

Fig. 3. Bretschneider-Mistuyasu 스펙트럼(kh=0.5)

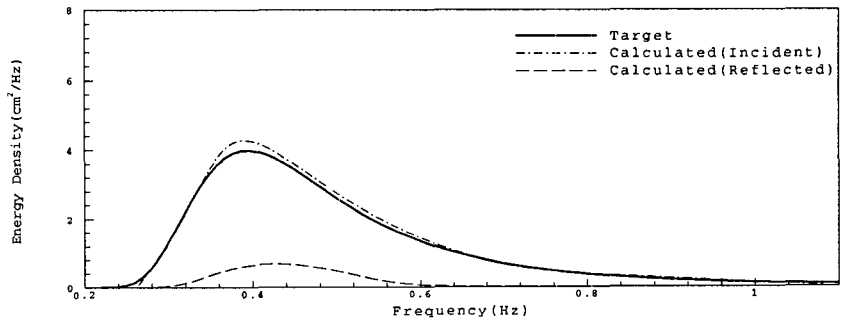

Fig. 4. 입 · 반사파 분리(m=2 kh=0.9)

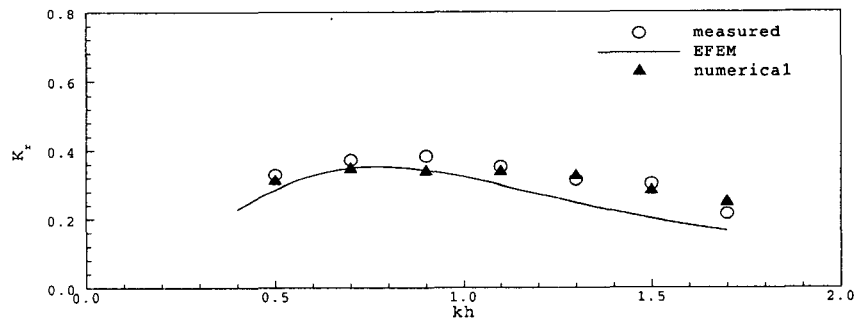

Fig. 5. 사각형형상 수중방파제의 반사율 (m=2)

그림 5는 불투과성 사각형형상 수중방파제의 반사율을 도시한 것이며, 수치모형실험 및 고유함수전개법(EFEM)으로 해석한 결과와 수리모형실험결과를 비교하였다. 정 등(2004)에 의해 계산된 고유함수전개법의 해석결과는 불규칙파를 다수의 규칙파의 중첩으로 구성하였으며, 각각의 규칙파의 해석결과를 합성하여 해석한 것이다.

수리모형실험결과와 수치모형실험 및 고유함수전개법에 의한 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 주기가 짧아질수록 고유함수전개법에 의한 해석결과

는 수리모형실험결과와 다소 차이를 보이고 있지만, 본 연구에서 수행한 수치모형실험결과는 수리모형실험결과와 매우 근사함을 알 수 있다. 고유함수전개법과 수리모형실험의 결과가 차이가 나는 이유는 고유함수전개법은 선형파이론에 기초한 것이고, 수치모형실험에서는 파랑의 비선형성이 고려되었기 때문으로 판단된다. 최대 반사율은 수리모형실험과 수치모형실험 모두 $kh=0.9$에서 나타났고, 반사율은 각각 0.38과 0.34로 나타났다

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 수심 평균된 방정식인 천수방정식과 Boussinesq 방정식으로 재현하기 어려운 자유수면 변위의 정확한 형상과 유속장을 표현하기 위해 Reynolds 방정식, $k-\varepsilon$모델 및 VOF 기법을 사용하였다. 수리모형실험 결과는 수치모형실험과 고유함수전개법을 이용한 결과와 비교하였고 정확한 반사율 산정을 위하여 수리모형실험의 파고기록은 2점법을 사용하여 입사파와 반사파를 분리하였으며, 수치모형실험의 파고기록은 3점법을 사용하여 분리하였다.

수치모형실험결과는 고유함수전개법을 이용한 결과보다 수리모형실험 결과와 잘 일치하였다. 고유함수전개법에 의한 결과는 주기가 짧아질수록 수리모형실험 결과와 차이가 발생하였지만, 수치모형실험에 의한 결과는 주기에 관계없이 비교적 잘 일치하였다

참고문헌

박우선, 오영민, 전인식 (1992). 최소자승기법에 의한 입·반사파의 분리기법, 한국해안해양공학회 논문집, **4**(3): 139-145.

전찬후, 조용식, 이종인 (2003). 사다리꼴형상 수중방파제에 의한 정현파의 Bragg 반사, 한국수자원학회논문집, **36**(5), 741-749.

정재상, 조대희, 조용식 (2004). 사각형형상 수중방파제를 통과하는 불규칙파의 반사, 한국수자원학회논문집, 심사중.

조용식, 이종인, 김영택 (2002). 사각형형상 수중방파제의 반사에 관한 수리실험, 한국수자원학회논문집, **34**(5): 563-573.

조용식, 전찬후 (2003). 크노이드파의 발생과 최대처오름높이, 한국해안해양공학회논문집, **15**(2): 80-85.

Chang, K.-A., Hsu, T.-J. and Liu, P. (2001). Vortex generation and evolution in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle. Part I. Solitary waves, Coastal Engineering. 44, pp. 13-36.

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.

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, Tainan, pp. 365-370.

Lin, P. (2004). A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles, Coastal Engineering. 51, pp. 35-51.

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.

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.