슬릿 케이슨을 통과하는 불규칙파의 변형

Transformation of Irregular Waves Propagating through Slit Caisson

민현성* · 조용식**

Min, Hyun-Seong · Cho, Yong-Sik

Abstract

The numerical efforts are presented for investigation of irregular waves passing a slit cassion and a warock block breakwater. In the numerical model, the Reynolds equations are solved by a finite difference method and k–ε model is employed for the turbulence analysis. To track the free surface displacement, the volume of fluid method(VOF) is employed. Numerical predictions of reflection and transmission coefficients are compared with those of the warock block breakwater with the slit caisson. Energy dissipation and seawater exchange rates of the slit caisson are better than those of the warock block breakwater.

key words : caisson, irregular wave , k–ε equations, RANS, VOF method

1. 서 론

연안으로 전파하는 파랑은 해저지형 및 구조물의 영향으로 굴절, 회절, 천수, 쇄파 및 반사와 같은 많은 변형을 겪게 되며, 이렇게 변형된 파랑은 연안구조물을 설계에 영향을 미친다. 케이슨식 구조물은 실제 시공현장에서 널리 쓰이고 있는 구조물의 형식으로, 입사하는 파랑을 몸체로 반사시키는데 주목적이 있다. 본 연구에서 다루게 되는 케이슨은 해수유동식 슬릿케이슨으로 효율적인 파랑의 반사의 효과와 해수유동을 통한 연안 환경의 개선에 기여할 수 있는 방파제 형식이다.

본 연구에서는 난류흐름의 평균운동을 표현하기 위하여 Reynolds 방정식과 k–ε모델을 사용하였으며, 복잡한 자유수면 형상을 표현하기 위하여 VOF(Volume of Fluid) 기법을 사용하였다. 또한, 실제현상과 가깝게 재현하기 위하여 스펙트럼을 이용한 불규칙파를 조파하였다.

2. 지배방정식과 수치기법

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 P로 구분된다.

$$u_i = \langle u_i \rangle + u_i', \quad P = \langle P \rangle + P' \tag{1}$$

유체의 흐름이 비압축성이라고 가정하면 평균 흐름은 식 (2)와 식(3)과 같은 Reynolds 방정식에 의해 지배받는다(Lin과 Liu, 1998).

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

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

식 (3)에서 ρ는 유체의 밀도를 나타내며, g_i는 중력가속도의 방향 성분을 의미한다. 또한, $\langle \tau_{ij} \rangle$는 평균 흐름의 점성 응력에 대한 텐서(tensor)이며, 뉴턴 유체(Newtonian fluid)에서는 분자 점성을 나타내는 μ와 평균 흐름의 변형률 텐서 $\langle \sigma_{ij} \rangle$를 이용하여 $2\mu\langle \sigma_{ij} \rangle$로 나타낸다. 여기서, $\langle \sigma_{ij} \rangle$는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다

* 한양대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail: near@hanyang.ac.kr

** 교신저자 · 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 · E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr

(Liu와 Lin, 1997).

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \tag{4}$$

조파된 파랑의 재반사로 인한 오차를 없애기 위하여 본 모형에서는 격자영역의 왼쪽과 오른쪽에 개방경계조건을 사용하였다.

난류 운동을 고려하기위한 k와 ε에 대한 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도되며, 그 결과로 식(5)가 유도된다.(Lin과 Liu, 1998).

$$k = \frac{1}{2}\langle u_i' u_i' \rangle, \quad \varepsilon = \nu \left\langle \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \right)^2 \right\rangle \tag{5}$$

식 (5)에서, ν는 동점성계수(molecular kinematic viscosity)를 의미한다.

3. 실험조건과 불규칙파의 재현

본 연구에서 사용된 조위는 도장항 해역의 삭망평균만조위(D.L.(+) 4.181m)이다. 실험에 적용된 파랑은 도장항 해역의 설계파 제원을 이용하여 설정하였으며, 본 실험에 적용된 실험파의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 실험파 제원

실험파 / 조위	원 형		모 형		비 고
	파고 (m)	주기 (sec)	파고 (m)	주기 (sec)	
H.W.L	2.5	9.18	0.167	2.37	실험상사 1/15
	2.9	5.50	0.193	1.42	

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

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

식 (6)에서 $S(f)$는 주파수 스펙트럼, $H_{1/3}$는 불규칙파의 유의파고, $T_{1/3}$는 유의파의 주기이며, f는 주파수를 나타낸다. 그림 1은 설계파의 목표 스펙트럼과 입사파 스펙트럼을 비교하여 도시한 것으로 재현된 불규칙파의 스펙트럼은 목표 스펙트럼과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

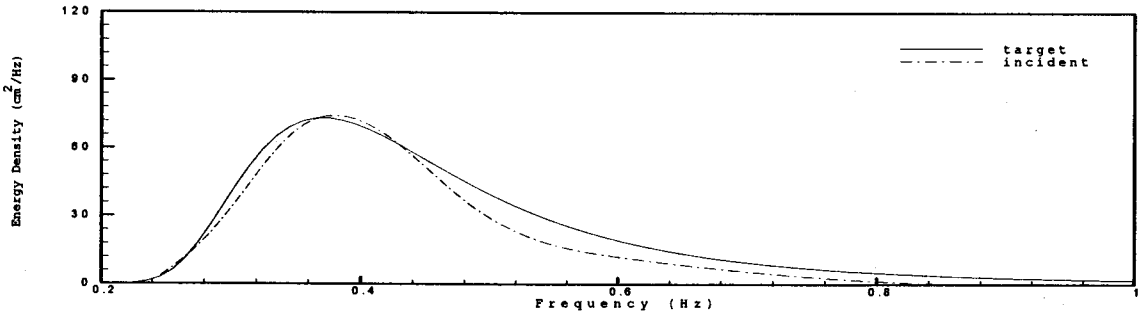

그림 1. 설계파의 스펙트럼 비교 (조위: H.W.L., 파고: 2.5m, 주기: 9.18sec)

4. 실험단면

본 연구에서는 와록블럭(Warock Block) 방파제와 슬릿 케이슨에 대한 수치모형실험을 수행하였으며, 단면의 형상은 그림 2와 그림 3과 같다. 와록블럭 방파제에 대한 실험은 슬릿 케이슨과의 비교를 위하여 수행하였다. 그림 2는 와록블럭 방파제에 대한 실제 구조물의 단면형상을 나타낸다. 그림 4는 본 수치모형에 사용된 구조물의 형상을 나타낸다. 와록 블록으로 구성된 구조물의 단면은 위치에 따라 형상이 다르기 때문에, 2차원 수치해석모형에서 격자의 구성에는 어려움이 있다. 따라서, 구조물 격자는 그림 4와 같이 구성하였다. 외측과 내측 해수유동 통로의 입구높이는 단위 폭 당 면적을 기준으로 결정하였으며, 구조물 내에서의 해수유동 통로는 단위 폭당 면적을 기준으로 투과성 격자를 적용하여 제어하였다. 슬릿 케이슨의 단면형상은 와

록블럭 방파제와 같은 이유로 종슬릿의 면적과 케이슨 사이의 해수유동 통로의 면적을 기준으로 전면 슬릿부에 유공률을 적용하여 격자를 구성하였다.

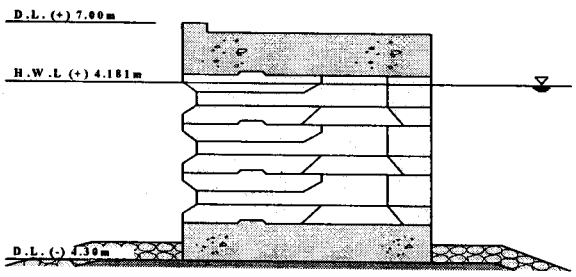

그림 2. 와록블록 방파제 실제 단면형상

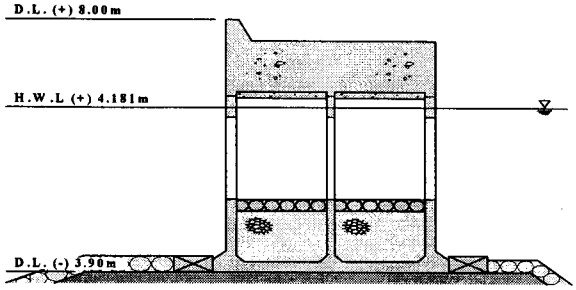

그림 3. 슬릿 케이슨 실제 단면형상

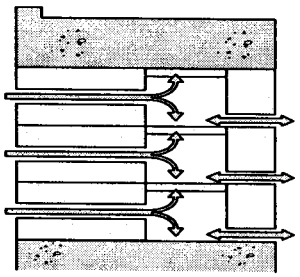

그림 4. 와록블록 방파제 실제 단면형상

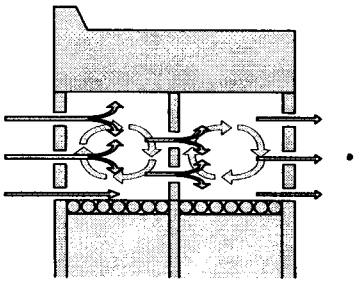

그림 5. 슬릿 케이슨 실제 단면형상

5. 실험결과 분석 및 결론

5.1 반사율

와록블록 방파제와, 슬릿 케이슨에서의 반사율을 계산하였다. 반사율의 계산은 박우선 등(1992)에 의해 제안된 3점법을 사용하였다. 표 2는 각 실험 안 별 반사율을 정리한 것이다. 그림 6은 각 실험 안에 대하여 설계파를 기준으로 정리하여 도시한 것이다. 와록블록 방파제의 반사율보다 슬릿 케이슨의 반사율이 더 작게 계산되었다. 이는 슬릿 케이슨의 케이슨 유수실에서 와록블럭 방파제의 내부에서보다 강한 와류의 발생으로 인한 파랑에너지 저감효과 때문인 것으로 판단된다.

표 2. 반사율 실험결과

조위	설계파	와록블록 방파제	슬릿 케이슨
H.W.L	H=2.5m, T=9.18sec	0.697	0.627
	H=2.9m, T=5.50sec	0.703	0.683

5.2 전달율

본 연구 전달율은 선박의 이동이 잦은 부근인, 방파제 후면에서 50m 떨어진 위치에서 측정하였다. 불규칙파의 수치모형에서 전달율은 식 (7)과 같이 정의 된다.

$$K_T = \frac{H^t_{1/3}}{H^i_{1/3}} \tag{7}$$

여기서, $H^i_{1/3}$는 입사하는 불규칙파의 유의 파고, $H^t_{1/3}$은 방파제를 지나 전달된 파랑의 유의파고를 나타낸다. 전달파의 유의파고는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$H^t_{1/3} \equiv H_s = \sqrt{8 \times \sum_{i=1}^{imax} A_i^2} \tag{8}$$

여기서, A_i는 에너지밀도 스펙트럼에서 분해 된 각 파랑 성분의 진폭을 나타낸다. 본 연구에서는 입사하

는 불규칙파의 스펙트럼을 100개의 규칙파 성분으로 분해하여 계산하였다. 표 3은 각 실험안 별 전달율을 정리한 것이다. 그림 7은 각 실험안에 대하여 설계파를 기준으로 정리하여 도시한 것이다.

표 3. 전달율 실험결과

조위	설계파	와록블록 방파제	슬릿 케이슨
H.W.L	H=2.5m, T=9.18sec	0.245	0.384
	H=2.9m, T=5.50sec	0.357	0.389

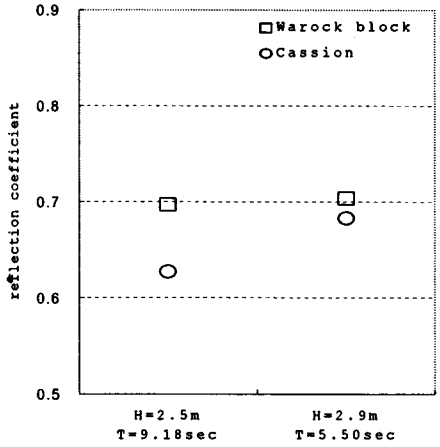

그림 6. 반사율 비교

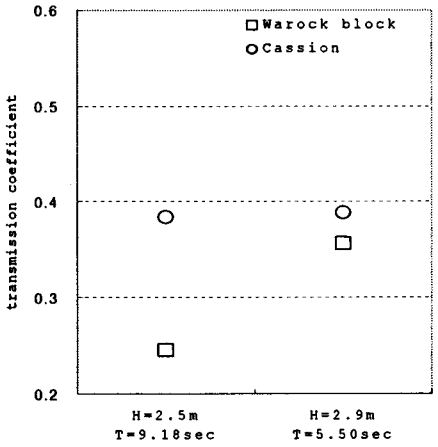

그림 7. 전달율 비교

5.3 결론

본 연구에서 입사파가 설계파인 조건 하에서 와록블럭 방파제와 슬릿 케이슨에 대한 수치모형실험을 수행하여 반사율 및 전달율을 계산하여 비교하였다. 반사율 계산 결과 슬릿 케이슨의 반사율이 더 작게 계산되었으며, 이는 슬릿 케이슨 내에서 많은 에너지가 손실되기 때문이라고 판단된다.

전달율의 측정위치는 선박의 유동빈도가 높은 방파제 후면에서 50m 떨어진 지점에서 측정하였으며, 계산결과 슬릿 케이슨에서의 전달율이 더 크게 계산되었다. 와록블럭 방파제보다 슬릿 케이슨에서 해수의 유동이 활발하게 일어나는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부 해양한국발전프로그램(KSGP) 연구개발사업에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

1. 박우선, 오영민, 전인식 (1992). "최소자승기법에 의한 입 · 반사파의 분리기법." 한국해안해양공학회논문집, 제4권, 제3호, pp. 139-145.
2. 정재상, 조대희, 황종길, 조용식 (2004). "사각형형상 불투과성 수중방파제를 통과하는 불규칙파의 반사." 한국수자원학회논문집, 제37권, 제9호, pp. 729-736.
3. Goda, Y., (2000). Random seas and design of maritime structures, 2nd edition, World Scientific, Singapore.
4. Lin, P. and Liu, P.L.-F., (1998). "A numerical study of breaking waves in the surf zone." Journal of Fluid Mechanics, Vol. 359, pp. 239-264.
5. Liu, P.L.-F., and Lin, P., (1997). "A numerical model for breaking wave: the volume of fluid method." Research Rep. CACR-97-02. Center for Applied Coastal Research Ocean Engineering. Lab., Univ. of Delaware, Newark, Delaware 19716.