

유공벽의 두께를 고려한 파의 에너지손실계수 Energy Loss Coefficient of Waves Considering Thickness of Perforated Wall

윤성범* · 이종인** · 남두현*** · 김선형*

Sung Bum Yoon*, Jong In Lee**, Doo Hyun Nam*** and Seon Hyung Kim*

요 지 : 본 연구에서는 범용난류유동수치모형인 FLUENT를 이용하여 다양한 유공벽의 두께와 흐름 조건에 대한 수치실험을 실시하고, 그 결과를 이용하여 유공벽의 두께가 고려된 새로운 에너지손실계수 산정식을 얻었다. 그 결과 유공벽의 두께가 두꺼워질수록 에너지손실계수 α 가 감소하여 기존의 예연오리피스 공식에 의한 값의 최대 40% 정도까지 감소함을 알 수 있었다. 새로운 공식의 타당성을 검토하기 위해 본 연구에서 제시한 공식을 이용하여 파 반사율을 구하고 기존의 공식에 의한 반사율 및 수리실험을 통해 측정된 결과와 비교하였으며, 새로운 공식의 우수성이 확인되었다.

핵심용어 : 유공벽, 파 반사율, 에너지손실계수, 유공벽 두께, 난류유동 수치모형

Abstract : In the present study extensive numerical experiments are conducted using the CFD code, FLUENT, to investigate the energy dissipation due to perforated walls for various wall-thickness and flow conditions. A new empirical formula for energy loss coefficient considering the effect of the thickness of perforated wall is obtained based on the results of computational experiments. It is found that the energy loss coefficient decreases as the wall-thickness increases and the maximum coefficient reduction reaches upto 40% of the value calculated using the conventional formulas for the sharp-crested orifice. To check the validity of the new formula the reflection coefficient of waves due to perforated wall is evaluated and compared with the results of existing theories and hydraulic experiments. The result shows that the new formula is superior to the conventional ones.

Keywords : perforated wall, reflection coefficient of wave, energy loss coefficient, thickness of wall, CFD

1. 서 론

유공방파제는 유공벽의 구멍 또는 슬릿을 통해 입사한 파 에너지의 일부를 소모시켜 반사파를 저감시키는 역할을 하는 구조물이다. 유공방파제는 Jarlan(1961)에 의해 처음으로 실제에 적용되었다. 유공벽에 의한 반사율 연구는 초기에는 주로 수리실험(Marks and Jarlan, 1968; Terret 등, 1968; Tanimoto 등, 1976)을 통해 이루어졌으나, 뒤이어 해석해에 대한 연구가 활발히 진행되어 상당한 이론적 발전이 있었

다. Kondo(1979)와 Fugazza and Natale(1992)은 선형파 이론을 이용하여 여러개의 유수실을 갖는 유공케이슨의 반사율 산정을 위한 해석해를 개발하였고, Bergmann and Oumeraci(2000)는 대형 수로에서 하나 혹은 여러 개의 유수실을 갖는 유공케이슨의 파력과 반사율 산정을 위한 수리모형 실험을 수행하였다. Zhu and Chwang(2001)은 선형파 이론과 고유함수전개법(eigenfunction expansion method)으로 파와 연직벽 앞에 일정깊이로 잠긴 슬릿판의 상호작용에 대해 해석적으로 연구하여 실험결과와 비교하였다.

*한양대학교 공학대학 토목환경공학과 (Corresponding Author: Sung Bum Yoon, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Kyunggi 426-791, Korea. sbyoon@hanyang.ac.kr)

**한국건설기술연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Ilsan, Korea)

***대영엔지니어링 (Daeyoung Engineering Co. Ltd., Seoul, Korea)

실제 항만의 외곽방파제 및 항내 안벽에 적용하기 위한 경사입사파에 대한 연구도 수행되었다. Ijima 등(1978)은 장파이론을 이용하여 경사입사파에 대한 유공방파제의 반사율 산정 해석해를 개발하고 수리실험 결과와 비교하였는 바, 유수실 내부에 설치되는 격실의 효과가 고려된 해석해도 제시하였다. Suh and Park(1995)은 확장형 완경사방정식에 근거한 고유함수전개법을 이용하여 사석 마운드 기초 위에 놓인 유공케이슨에 대하여 임의의 각도로 입사하는 파의 반사를 예측하는 수치모형을 개발하고 Ijima 등(1978)의 격벽이 없는 경우에 대한 실험결과와 비교하였다.

윤 등(2006)은 기존의 유공벽 반사율 해석해에 공통적으로 적용되는 에너지손실계수와 유체가속구간의 길이 산정 공식의 타당성을 검토하기 위한 광범위한 수리실험을 실시하고, 실험에 의한 에너지손실계수 및 유체가속구간의 길이와 공식에 의한 값을 비교하여 유공벽의 두께가 이들에 미치는 영향을 규명한 바 있다. 윤 등(2006)은 두꺼운 유공벽의 에너지손실계수는 예연오리피스 공식에 기초한 기존의 공식에 의한 값의 62% 정도로 작으며, 유체가속구간의 길이도 유공벽의 두께와 밀접한 관계가 있음을 밝혔다. 그러나 예연오리피스와 두꺼운 오리피스 사이의 중간 두께에 대해서는 파력에 의한 유공벽의 진동이 심해 실험에 의한 에너지손실계수를 구하는데 어려움이 있어 완전한 에너지손실계수 산정공식을 개발하지는 못했다.

본 연구에서는 유공벽에 의한 반사율 산정기법의 핵심인 에너지손실계수를 정도 높게 산정하기 위해 유공벽의 두께를 고려할 수 있는 공식을 개발하고자 한다. 전술한 바와 같이 유공벽의 두께가 얇아지면 유공벽 자체의 진동으로 정도 높은 수리실험이 어려우므로, 본 연구에서는 범용난류 유동해석 수치모형인 FLUENT를 이용하여 원형 오리피스 또는 슬릿 형태의 유공벽에서 벽두께에 따른 에너지손실계수를 산정하고, 이를 이용하여 에너지손실계수 산정식을 개발한다.

2. 유공벽 반사율 산정 이론

Fugazza and Natale(1992)은 정수면 하에서의 수심 h , 유수실 폭 B 를 갖는 Fig. 1과 같은 연직방향 슬릿(slit)형태의 유공방파제를 설정하여 입사파에 대한 반사율 해석해를 산정하였다. Fugazza and Natale(1992)이 제안한 입사파 진폭에 대한 반사파 진폭의 비율인 반사율 K_r 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

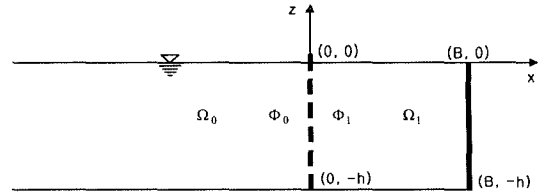


Fig. 1. Definition sketch of perforated wall.

$$K_r = \frac{\sqrt{(C^2 + W^2)^2 + W^2 R^2 (W^2 R^2 + 2C^2 - 2W^2)}}{C^2 + W^2 (1 + R)^2} \quad (1)$$

여기서, P 는 무차원 유체가속구간의 길이($=lk$), R 은 에너지 감소율($=R(k/\omega)$), W 는 무차원 유수실 폭의 \tan 값($=\tan(kB)$), $C = 1 - PW$ 이며, k 는 파수, l 은 유체가속구간의 길이, ω 는 파의 각진동수, B 는 유수실 폭이다.

β 는 운동방정식을 선형화하기 위한 환산손실계수로 식 (2)와 같이 에너지 감소율 R 과 연결되어 있다.

$$\beta = \frac{8\alpha H\omega}{9\pi} \frac{|W|}{\sqrt{W^2(R+1)^2 + C^2}} \frac{5 + \cosh(2kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \quad (2)$$

여기서 H 는 파고이며, α 는 에너지 손실계수이다.

2.1 Mei(1989)의 계수 산정

Hattori(1972), Kondo(1979) 및 Mei(1989)는 예연 오리피스(sharp-crested orifice)공식을 사용하여 유공벽에서의 에너지 손실계수 α 를 식 (3)과 같이 산정하였다.

$$\alpha = \left(\frac{1}{rC_c} - 1 \right)^2 \quad (3)$$

여기서 r 은 면적공극률, C_c 는 단면 수축계수이다. 정상 흐름에서 예연 오리피스를 통과하는 단면 수축계수 C_c 는 레이놀즈수(Reynolds number)가 박리현상(separation)이 뚜렷하게 발생할 정도로 크다면 주로 공극률 r 에 의해 결정된다. 예연오리피스에 대해 Mei(1989)에 의해 제시된 경험식은 식 (4)와 같다.

$$C_c = 0.6 + 0.4r^2 \quad (4)$$

한편 Mei(1989)는 Morse and Ingard(1968)의 장파에 대한 해석결과를 이용하여 사각형 실린더의 유공벽에 대한 관성항의 유체가속구간의 길이 l 을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{l}{B_s} = \frac{b}{a} \left(1 - \frac{a}{B_s} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{1}{2} \left(\tan \frac{\pi a}{4B_s} + \cot \frac{\pi a}{4B_s} \right) \right] \quad (5)$$

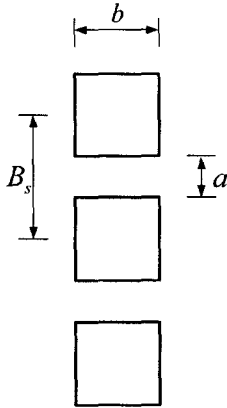


Fig. 2. Various dimension of perforated wall.

여기서 B_s 는 슬릿과 슬릿의 중심간 거리, a 는 공극의 간격, b 는 유공벽의 두께이며, 공극률 r 은 a/B_s 로서 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 식 (5)의 우변 첫째 항은 유공벽 사각형 기동자체의 원래질량효과이며, 두 번째 항은 기동의 형상에 따른 부가질량(added mass)효과를 나타낸다.

2.2 Fugazza and Natale(1992)의 계수 수정

Fugazza and Natale(1992)은 Liberatore(1974)등의 단일 유수실을 갖는 유공방파제에 대한 실험결과와 해석결과를 비교하여 에너지손실계수 α 를 다음과 같이 수정하였다.

$$\alpha = \left(\frac{1}{rC_c}\right)^2 - 1 \tag{6}$$

또한 단면수축계수 C_c 를 다음과 같이 수정하여 제안하였다.

$$C_c = 0.55 \tag{7}$$

또한 Fugazza and Natale(1992)은 유체가속구간의 길이 l 의 정이가 명확하지 않으므로 l 값으로 유공벽의 두께인 b 를 사용할 것을 제안하였다.

$$l = b \tag{8}$$

3. 에너지손실계수 도출 수치실험

식 (3)의 에너지손실계수 α 는 예연 원형 오리피스에 관한 식이므로 유공벽의 두께, 구멍의 크기와 형상의 영향이

고려되어 있지 않다. 본 절에서는 난류유동을 계산할 수 있는 CFD(Computational Fluid Dynamics)모델인 FLUENT Code를 이용하여 원형 및 슬릿(slit) 형태의 오리피스에 대해 벽두께의 영향이 고려된 에너지 손실계수 α 를 구하고자 한다.

3.1 수치실험 개요

오리피스를 통과하는 유동은 좁은 오리피스를 통과하면서 박리현상이 발생하고 난류거동에 의해 에너지가 손실된다. 난류 유동은 변수들의 순간적인 변화를 나타내는 Navier-Stokes방정식을 이용하여 해석할 수 있으나, 시간 및 공간적으로 심한 변동(fluctuation)을 수반하므로 수치해석이 쉽지 않다. 그러므로 FLUENT 모형에서는 변수를 시간평균한 값과 변동값으로 분리하여 얻은 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)계열의 난류유동방정식을 사용한다. 유동방정식은 연속방정식과 운동방정식 이외에 추가적으로 운동방정식에 사용되는 난류동점성계수 ν 를 구하기 위한 난류운동 에너지수송방정식(turbulence transport equation)을 필요로 한다. 본 연구에서 고려되는 유동은 Reynolds 수(수로폭과 유입부 단면평균유속을 사용하여 결정)가 $4 \times 10^3 \sim 8 \times 10^5$ 정도인 난류에 해당한다. 따라서 낮은 Reynolds 수의 흐름에 효과적이며 벽근처에서의 다양한 격자의 변화에 대한 수치오차가 상대적으로 적고 일관성 있는 결과를 예측할 수 있는 1-equation 계열의 Spalart-Allmaras모형을 사용하였다.

해석영역은 FLUNET에서 제공하는 격자생성프로그램인 Gambit을 사용하여 슬릿(slit)에 대해서는 면대칭 2차원모형, 원형(circular) 오리피스에 대해서는 축대칭 2차원모형을 사용하여 3차원 흐름을 2차원으로 단순화하였다. 오리피스 두께에 대한 효과를 고려하기 위해 벽두께를 까지의 범위에서 9가지의 두께에 대해 수치해석하였으며, 각각의 두께에 대해 3가지 공극률(10%, 20%, 30%)을 선정하고 Reynolds 수를 $4 \times 10^3 \sim 8 \times 10^5$ 범위내의 8가지 경우를 택하여 총 432개의 경우에 대해 수치모의하였다. 완전히 발달된 유속분포를 얻기 위해 Fig. 3에 보인 바와 같이 $40 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 의 긴

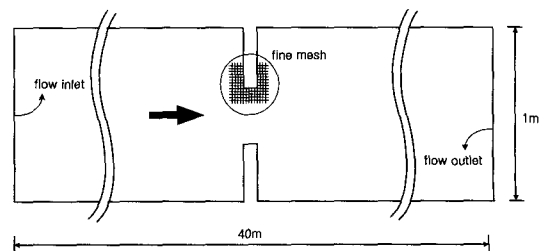


Fig. 3. Computational domain of flow field for orifice.

해석영역을 구성하였다. 또한 난류모형인 Spalart-Allmars의 특성과 벽근처에서의 압력 경사에 대한 정도 높은 해석을 위해 오리피스 단면 벽근처에서는 조밀한 격자를 생성하였다. Fig. 3은 축대칭 모델의 오리피스 두께변화에 따른 해석영역을 보여주고 있다.

3.2 에너지손실계수의 산정법

난류수치해석 결과로부터 예연 오리피스에서의 에너지손실계수 α 를 구하는 방법은 다음 식 (9)에 의한다.

$$\alpha = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (9)$$

여기서 ΔP 는 오리피스의 단면 급축소 및 급확대에 의한 압력강하이며, V 는 상류유입부에서의 단면평균유속을 의미한다. ΔP 는 대칭축에서 오리피스 상류 정수압과 하류 정수압의 차를 구하였다. Fig. 4는 공극률 30% 및 오리피스 두께 $b=0.075$ m에서 $Re = 1.0 \times 10^5$ 의 축대칭 모델로 수치모의를 통해 얻은 정수압 분포를 나타내는 바, 오리피스를 지나면서 압력이 급격히 강하된 다음 다시 어느정도 회복되지만 원상태대로 회복되지 않음을 알 수 있다. 이 차이가 오리피스로 인한 에너지소모이다. Fig. 5는 같은 상태일 때 오리피스 주변의 유속분포를 나타낸다.

3.3 에너지손실계수의 산정 결과

수치모의를 통해 얻은 에너지손실계수 α 의 타당성을 검토하기 위해서 Mei(1989)가 제안한 예연 원형 오리피스에 대한 경험식인 식 (3)과 비교하였다. Figs. 6과 7은 공극률 r 에 따른 Mei(1989)와 수치모의에 의한 에너지 손실계수

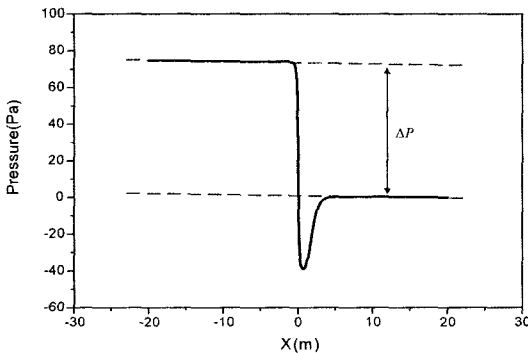


Fig. 4. Pressure distribution along center line of orifice ($b=0.075$ m, $a=0.3$ m, $r=0.3$, $Re=1.0 \times 10^5$).

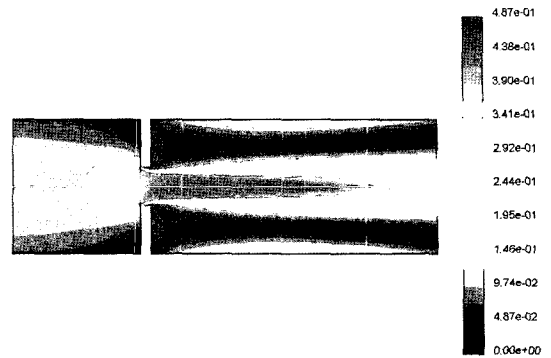


Fig. 5. Velocity distribution around orifice (velocity unit: m/s, $b=0.075$ m, $a=0.3$ m, $r=0.3$, $Re=1.0 \times 10^5$).

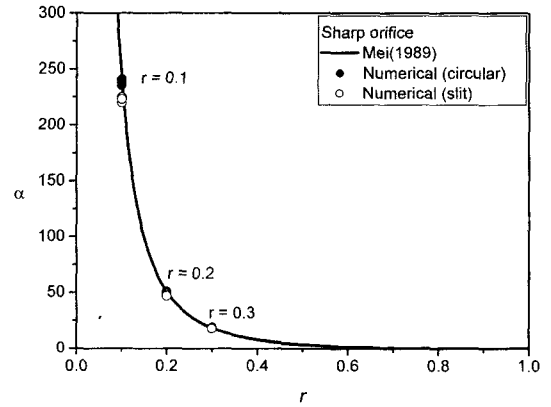


Fig. 6. Comparison of analytical and calculated energy loss coefficient for sharp-crested orifice ($b=0.004$ m).

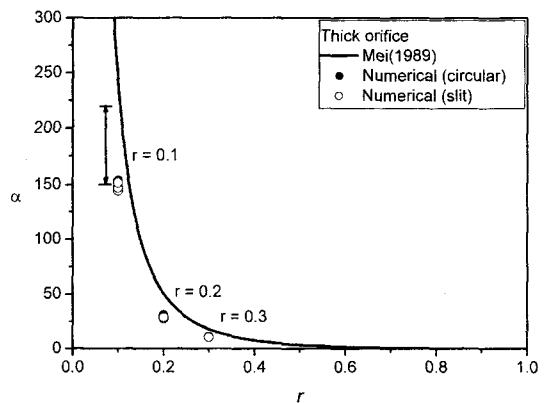


Fig. 7. Comparison of analytical and calculated energy loss coefficient for thick orifice ($b=1.0$ m).

α 의 변화를 나타낸다. Fig. 6에 보인 바와 같이 벽두께가 0.004 m로 예연 오리피스에 가까운 경우 수치모의에 의한 에너지손실계수 α 와 Mei(1989)에 의한 결과가 거의 같게

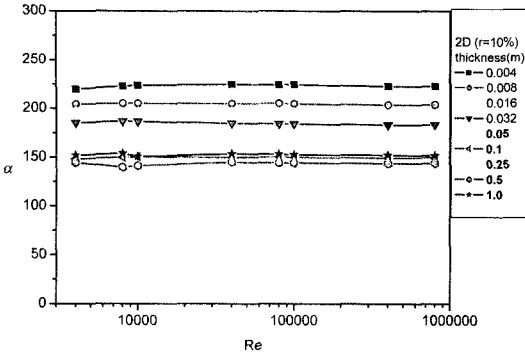


Fig. 8. Effect of Reynolds number on energy loss coefficient (slit, $r = 0.1$).

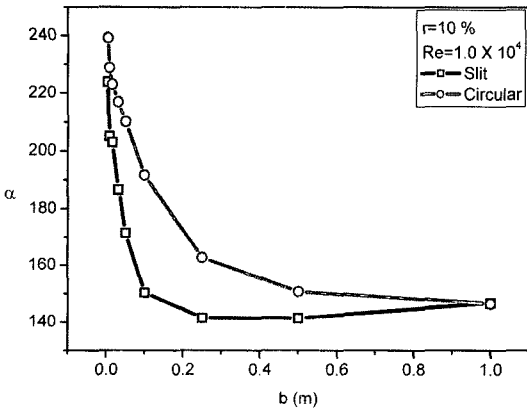


Fig. 9. Variation of energy loss coefficient associated with wall thickness ($r = 0.1$, $Re = 1.0 \times 10^4$).

나타나 본연구의 수치모의가 정도 높게 이루어졌음을 알 수 있다. Fig. 7에 보인 바와 같이 오리피스 두께가 1 m로 두꺼운 경우 수치모의를 통해 얻은 에너지손실계수 α 는 크게 감소하였다. 이로부터 오리피스 두께가 에너지손실계수 α 에 미치는 영향이 매우 중요함을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 슬릿 형태의 오리피스에 대해 Reynolds 수의 변화에 따른 에너지 손실계수 α 의 변화를 도시한 것으로 Reynolds 수가 $4 \times 10^3 \sim 8 \times 10^5$ 인 난류 구간에서는 Reynolds 수에 대한 영향은 매우 작은 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9와 10은 오리피스 두께가 에너지 손실계수 α 에 미치는 영향을 보여주고 있는 바, 유공벽이 두꺼워질수록 에너지 손실계수가 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한 슬릿의 경우 원형 오리피스에 비해 에너지 손실계수 α 가 더 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 같은 면적 공극률을 갖는 유공벽에서 슬릿형식보다 3차원 효과를 기대할 수 있는 원형유공형식이 에너지 손실이 더 크다는 것을 나타낸다. 그러나 면적

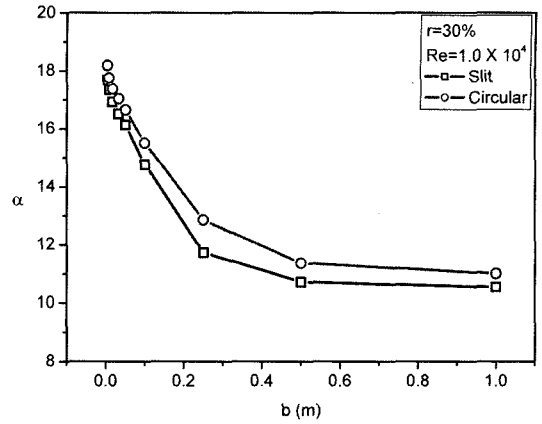


Fig. 10. Variation of energy loss coefficient associated with wall thickness ($r = 0.3$, $Re = 1.0 \times 10^4$).

공극률이 증가할수록 오리피스 구멍형상에 따른 차이는 작아짐을 알 수 있다.

유공벽 두께가 에너지손실계수에 미치는 영향이 고려된 경험공식을 도출하기 위해 두께 b 를 슬릿사이의 간격 a (또는 오리피스 직경 D)로 나누어 무차원화시키고, 에너지손실계수 α 는 식 (3)으로 계산되는 예연 원형 오리피스의 에너지손실계수 $\alpha^*(Mei, 1989)$ 로 나누어 무차원화하였다. Fig. 11은 무차원 벽두께 b/a 에 따른 무차원 에너지손실계수 α/α^* 의 변화를 보여주고 있는 바, 벽두께를 무차원화함으로써 Fig. 9나 10의 경우와 달리 슬릿과 원형 오리피스에 대한 모든 수치모의의 결과가 하나의 곡선으로 수렴됨을 보여준다. 또한 무차원 벽두께가 증가함에 따라 무차원 에너지손실계수는 지수함수적으로 감소하는 것을 알 수 있으

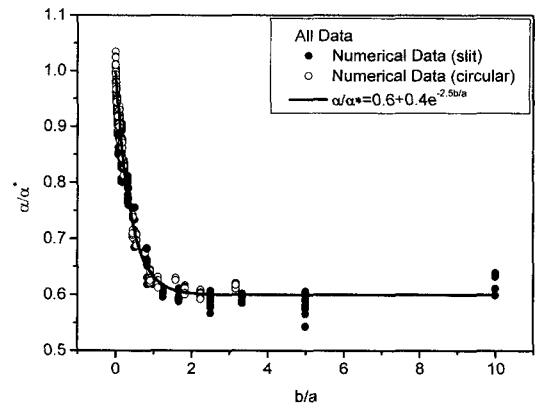


Fig. 11. Distribution of energy loss coefficient associated with wall thickness.

며, bla 가 1.5에 이르면 $d\alpha^*$ 가 0.6의 일정한 값을 가진다. 또한 bla 가 4.0이상이 되면 유공벽 두께에 따른 관마찰 에너지 손실이 추가적으로 발생하여 $d\alpha^*$ 가 다시 증가하는 것을 알 수 있다. bla 가 4.0이하인 경우에 대해 회귀분석하여 얻은 경험식은 식 (10)과 같다.

$$d\alpha^* = 0.6 + 0.4 e^{-2.5(b/a)} \tag{10}$$

3.4 본 연구의 계수 산정법

본 연구에서 제안하는 에너지손실계수 α 는 벽체의 두께에 의한 영향을 고려하여 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\alpha = (0.6 + 0.4e^{-2.5(b/a)}) \left(\frac{1}{rC_c} - 1 \right)^2 \tag{11}$$

여기서 단면 수축계수 C_c 는 Mei(1989)에 의해 제시된 경험식 (4)를 준용한다. 한편 Flagg and Newman(1971)은 유체가속구간의 길이 l 을 식 (12)와 같이 제안하였으며, 윤 등(2006)은 수리실험에 통해 Flagg and Newman의 공식이 기존의 여러 식들 중에서 가장 정도가 높은 것임을 확인한 바 있다.

$$\frac{l}{B_s} = \frac{b}{a} \left(1 - \frac{a}{B_s} \right) + \frac{2}{\pi} \left[1 - \ln \left(\frac{4a}{B_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{a}{B_s} \right)^2 + \frac{281}{180} \left(\frac{a}{B_s} \right)^4 \right] + O \left(\left(\frac{a}{B_s} \right)^6 \right) \tag{12}$$

4. 개선된 에너지손실계수의 타당성 검토

본 연구에서 개발된 에너지손실계수 산정식 (11)의 타당성을 윤 등(2006)에 의해 수행된 수리실험 결과를 이용하여 검토하였다. 윤 등(2006)의 실험은 한국건설기술연구원 방파제 실험동의 길이 50 m, 높이 2.0 m, 폭 1.0 m의 2차원 조파수로에서 실시되었다. 수리실험 조건은 수심 h 가 50 cm, 입사파의 파고 H 가 2 cm이고, 주기 T 는 1.1 sec 및

1.7 sec의 2가지 규칙파를 조파기로부터 발생시켰다. 수리실험에 사용된 유공벽은 공극률 μ 이 0.1, 슬릿(slit)의 중심간 거리 B_s 는 6.25 cm, 공극의 간격 a 는 0.625 cm에 대해 유공벽의 두께 b 는 1 cm, 2 cm, 3 cm의 3가지로 변화시켰다. 유수실 폭 B 는 0.08, 0.24, 0.41, 0.57, 0.73, 0.89, 1.05 m의 7가지 경우에 대해 실험하여 파의 주기, 유수실 폭 및 벽 두께의 변화에 따른 반사율 K_r 을 결정하였다. 표 1은 수리실험에 의해 측정된 반사율 값을 유공벽 두께 b , 입사파 주기 T 및 유수실의 폭 B 별로 정리한 것으로 윤 등(2006)에 제시된 바와 같다.

Fig. 12는 입사파 주기 T 가 1.1 sec이고 유공벽의 두께 b 가 1 cm인 경우에 대해 에너지손실계수 α 및 유체가속구간의 길이 l 을 Mei(1989), Fugazza and Natale(1992) 및 본 연구의 산정법을 이용하여 계산한 반사율 K_r 을 수리실험에 의한 측정치와 비교하여 제시한 것이다. 그림에서 보인 바와 같이 Fugazza and Natale(FN1으로 표기)에 의한 계산치는 전반적으로 실험된 반사율과 매우 다른 경향을 보이며, 최소반사율을 주는 무차원 유수실의 폭 B/L 은 실험치와 근접한 결과를 보여준다. 한편 Mei에 의한 계산치는 반사율이 FN1에 의한 것보다 개선된 경향을 보여주나 실

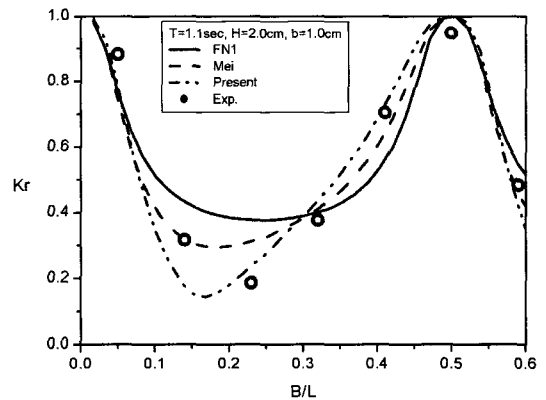


Fig. 12. Comparison of measured and calculated reflection coefficient ($T=1.1$ sec, $b=1$ cm, $H=2$ cm).

Table 1. Measured reflection coefficients, K_r (Yoon et al., 2006)

b (cm)	T (sec)	B (cm)						
		8.0	24.0	41.0	57.0	73.0	89.0	105.0
1.0	1.1	0.881	0.316	0.185	0.375	0.704	0.947	0.483
	1.7	0.944	0.750	0.435	0.204	0.103	0.134	0.283
2.0	1.1	0.880	0.107	0.342	0.520	0.768	0.945	0.296
	1.7	0.948	0.691	0.331	0.107	0.123	0.257	0.400
3.0	1.1	0.778	0.199	0.459	0.617	0.823	0.937	0.129
	1.7	0.934	0.622	0.202	0.097	0.232	0.358	0.480

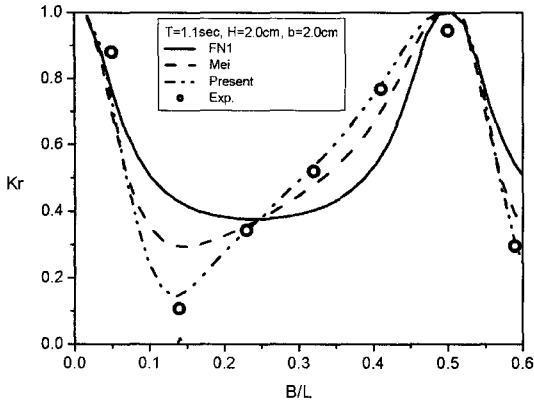


Fig. 13. Comparison of measured and calculated reflection coefficient ($T=1.1$ sec, $b=2$ cm, $H=2$ cm).

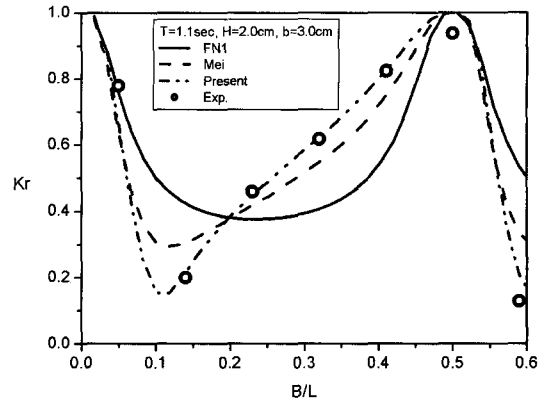


Fig. 15. Comparison of measured and calculated reflection coefficient ($T=1.1$ sec, $b=3$ cm, $H=2$ cm).

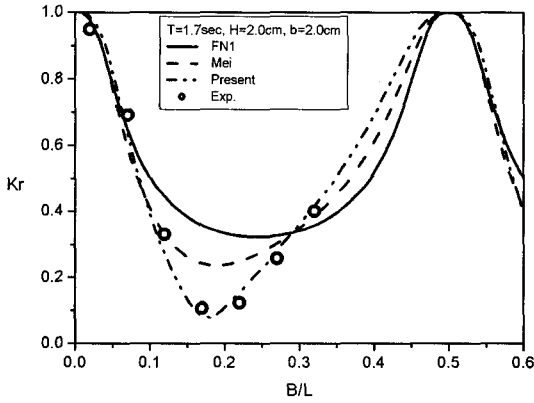


Fig. 14. Comparison of measured and calculated reflection coefficient ($T=1.7$ sec, $b=2$ cm, $H=2$ cm).

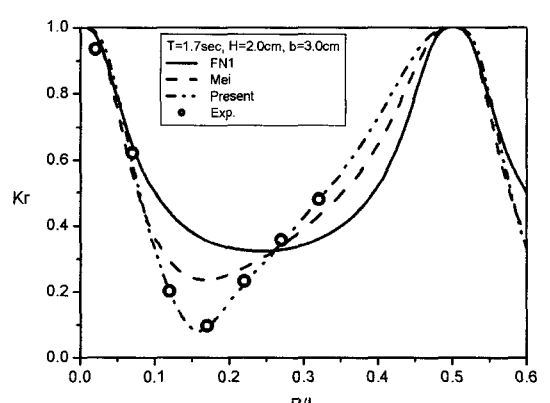


Fig. 16. Comparison of measured and calculated reflection coefficient ($T=1.7$ sec, $b=3$ cm, $H=2$ cm).

측치에 비해 여전히 최소반사율이 과대평가되고 있으며, 최소반사율을 주는 B/L 은 실측치보다 과소 평가되고 있다. 본 연구에서 제안한 에너지 손실계수 α 및 Flagg and Newman (1971)의 유체가속구간의 길이 l 을 이용하여 산정한 반사율은 최소반사율 자체는 다른 기법에 비해 크게 개선된 결과를 주나, 최소반사율을 주는 유수실폭은 Mei의 경우와 마찬가지로 실험치에 비해 과소 평가되었다. 이는 윤 등(2006)에 의해 지적된 바와 같이 유공벽이 얇아 파력에 의해 유공벽이 진동하였기 때문이며, Fugazza and Natale(1992)의 식 (8)이 다른 방법보다 더 우수하다는 것을 의미하지는 않는다. 이러한 현상은 본 논문에는 제시하지 않았으나 다른 주기의 파에 대해서도 일관되게 나타났다.

Fig. 13과 14는 유공벽의 두께 b 가 2 cm로 일정하고, 입사파 주기 T 가 각각 1.1 및 1.7 sec인 경우에 대해 각 산정 기법에 의해 계산된 반사율을 실측에 의한 것과 비교한 것

이다. 이 경우에는 유공벽의 두께가 2 cm로 두꺼워 파력에 의한 유공벽의 진동현상이 거의 관찰되지 않았으며 각 산정기법의 타당성을 검토하기에 적당한 경우이다. 2개의 그림에 보인 바와 같이 Fugazza and Natale(FN1으로 표기)에 의한 계산치는 전반적으로 실측값보다 매우 큰 반사율을 주며, 최소반사율을 주는 무차원 유수실의 폭 B/L 이 과대 평가되는 경향이 있다. Mei에 의한 계산치는 최소반사율이 실측치에 비해 크게 평가되고 있으며, 최소반사율을 주는 B/L 은 실측치와 근접하게 나타나고 있다. 한편 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 산정한 반사율은 최소반사율 자체는 물론 최소반사율을 주는 유수실폭에 있어서도 실험치와 근접한 매우 우수한 결과를 준다.

Fig. 15와 16은 유공벽의 두께 b 가 3 cm로 가장 두꺼운 경우에 대해 입사파 주기 T 가 1.1 및 1.7 sec로 변화함에 따

른 반사율변화를 실측에 의한 것과 비교한 것이다. 이 경우에도 유공벽의 두께가 2 cm인 경우와 거의 비슷한 경향을 보이며, 본 연구에서 제안한 방법이 가장 우수한 결과를 준다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 범용 난류유동 수치모형인 FLUENT를 이용하여 유공벽에 의한 에너지손실계수 산정 수치실험을 실시하고, 유공벽의 두께를 고려한 에너지손실계수 산정식을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 공식은 기존의 실험자료를 이용하여 그 타당성을 검토하였다. 본 연구의 결과를 종합하면 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.

(1) 유공벽의 두께가 두꺼울수록 에너지손실계수 α 가 기존 이론식에 사용된 예연오리피스 공식보다 감소하는 바, 무차원 유공벽두께의 지수함수적으로 감소한다.

(2) 유공벽의 두께가 유공간격의 약 1.5배 이상이면 두꺼운 오리피스로 간주할 수 있으며, 이때의 에너지손실계수는 예연 오리피스의 60%에 이른다.

(3) 유공벽의 두께가 유공간격의 약 4배 이상이면 판마찰이 추가되어 에너지손실계수는 다시 증가한다.

(4) 기존 이론식에 의한 결과와의 비교를 통하여 새로운 에너지손실계수의 우수성이 입증되었다.

감사의 글

본 연구는 2단계 BK21 사업의 일환으로 대림산업이 한양대학교 첨단 글로벌 건설리더 양성사업단에 지원한 연구비에 의해 수행되었기에 감사를 표합니다.

참고문헌

윤성범, 이종인, 한상철 (2006). 유공벽에 의한 파의 반사율 산정에 있어서 경험공식의 타당성. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 26(6B), 633-639.

Bergmann, H. and Oumeraci, H. (2000). Wave loads on perforated caisson breakwaters. Proc. 27th Coastal Eng. Conf., ASCE, Sydney, 2, 1622-1635.

Flagg, C.N. and Newman, J.N. (1971). Sway added-mass coefficients for rectangular profiles in shallow water. J. Ship Research, 15, 257-265.

Fugazza, M. and Natale, L. (1992). Hydraulic design of perforated breakwaters. J. Waterw. Port Coastal Eng., 118, 1-14.

Hattori, M. (1972). Transmission of waves through perforated wall, Coastal Eng. in Japan., 15, 69-79.

Ijima, T., Okuzono, H. and Ushifusa, Y. (1978). The reflection coefficients of permeable quaywall with reservoir against obliquely incident waves. Rep. Coll. Eng., Kyushu Univ., 51, 245-250 (in Japanese).

Jarlan, G.E. (1961). A perforated vertical wall breakwater. Dock Harbour Auth., (486), 394-398.

Kondo, H. (1979). Analysis of breakwaters having two porous walls. Proc. Coastal structures '79, ASCE, 2, 962-977.

Liberatore, L. (1974). Experimental investigation on wave-induced forces on jarlan type perforated breakwaters. Atti del XIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Napoli, Italy, 101-109 (in Italian).

Marks, M. and Jarlan, G.E. (1968). Experimental study on a fixed perforated breakwater. Proc. 11th Coastal Eng. Conf., ASCE, London, 3, 1121-1140.

Mei, C.C. (1989). The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves. World-Scientific, Singapore, 2nd printing with correction, 258p.

Suh, K.D. and Park, W.S. (1995). Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters. Coastal Eng., 26, 177-193.

Tanimoto, K., Haranaka, S., Takahashi, S., Komatsu, K., Todoroki, M. and Osato, M. (1976). An experimental investigation of wave reflection, overtopping and wave forces for several types of breakwaters and sea walls. Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst., Ministry of Transport, Japan, 246, 38p. (in Japanese, with English abstract).

Terret, F.L., Osorio, J.D.C and Lean, G.H. (1968). Model studies of a perforated breakwater. Proc. 11th Coastal Eng. Conf., ASCE, London, 3, 1104-1120.

Zhu, S. and Chwang, A.T. (2001). Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall. Coastal Eng., 43, 93-104.

Received October 24, 2006

Accepted November 28, 2006