

유공벽에 의한 파의 반사율 산정에 있어서 경험공식의 타당성

Validity of Empirical Formulas for Estimation of Reflection Coefficient of Waves Due to Perforated Wall

윤성범* · 이종인** · 한상철***

Yoon, Sung Bum · Lee, Jong In · Han, Sang Cheol

Abstract

The validity of the existing formulas for the estimation of reflection coefficient of waves due to perforated wall is investigated using the result of hydraulic experiments conducted with perforated walls of various thickness. The result shows that, when the wall is thick, the energy loss coefficient is reduced to 62% of the value evaluated using the existing formula for sharp-crested orifice. The result also shows that the length of inertia resistance increases linearly as the thickness of the wall increases. The width of chamber to achieve the minimum reflection of waves decreases as the length of inertia resistance increases. Thus, the result found in the present study can be useful for the design of perforated wall.

Keywords : perforated wall, reflection coefficient, hydraulic experiment, energy loss coefficient, length of inertia resistance

요 지

여러 가지 두께의 유공벽을 이용하여 다양한 파 조건에 대한 반사율 실험을 실시하고 기존 이론식의 타당성을 검토하였다. 그 결과 유공벽의 두께가 두꺼우면 에너지손실계수가 기존 이론식에 사용된 예연오리피스 공식의 약 62% 정도로 감소하며, 관성저항길이는 벽의 두께가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 관성저항의 길이가 증가할수록 최소반사율을 주는 유수실 폭이 감소한다. 그러므로 본 연구에서 얻어진 결과는 유공벽 설계시 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 유공벽 두께, 반사율, 수리실험, 에너지손실계수, 관성저항길이

1. 서 론

유공방파제는 유공벽과 유수실로 이루어져 있으며, 유공벽의 구멍 또는 슬릿을 통해 입사한 파 에너지의 일부를 소모시켜 반사파를 저감시키는 역할을 하는 구조물이다. 1961년 캐나다의 Jarlan(1961)에 의해 유공방파제가 실제에 적용된 이후 유공벽의 반사율에 대한 수리실험과 해석해 연구가 꾸준히 수행되어 오고 있다. 초기단계의 유공벽면에 의한 반사율 연구는 주로 수리실험을 통해 이루어졌다(Marks and Jarlan, 1968; Terret 등, 1968; Tanimoto 등, 1976). 뒤이어 해석해에 대한 연구가 수행된 바 Kondo(1979)는 선형진행파이론을 이용하여 하나 혹은 두 개의 유수실을 갖는 유공케이슨의 반사율 산정을 위한 해석해를 개발하였고, Kakuno 등(1992)은 접합근사화장법을 이용하여 한 개의 유수실을 가지는 유공케이슨에서의 반사율을 산정하는 해석해를 개발하였으며, Bennett 등(1992)도 이와 유사한 해석해를 개발하여 수리실험에 의한 결과와 비교하였다. Twu and

Lin(1991)은 유공벽의 두께가 무시될 수 있을 정도로 얇은 다중유공방파제에 대해 선형 에너지소산모형을 이용하여 반사율을 산정하는 해석해를 개발하였다.

Fugazza and Natale(1992)는 비선형 에너지소산모형을 이용하여 여러 개의 유공벽과 유수실을 가진 케이슨방파제에 의한 반사율을 산정하는 해석해를 개발하였다. Fugazza and Natale(1992)의 연구는 선형파이론에 근거하였으며 기존의 실험결과와 비교하여 해석결과를 검토하였다. 그 결과에 의하면 Kondo(1979)의 결과와 다르게 단일 유수실을 갖는 Jarlan형 방파제가 소파능력이 더 좋은 것으로 나타났다. Williams 등(2000)은 방파제 내부의 유수부에 있어서의 에너지소산을 감쇄함수에 근거하여 해석해를 개발하였고, Bergmann and Oumeraci(2000)는 대형수로에서 하나 혹은 여러 개의 유수실을 갖는 유공케이슨의 파력과 반사율을 산정하기 위한 수리모형실험을 수행하였다. Zhu and Chwang(2001)은 선형파 이론과 고유함수전개법으로 파와 연직벽 앞에 일정깊이로 잠긴 슬릿판의 상호작용에 대해 해석적으로

*정회원 · 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 교수(E-mail : sbyoon@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원(E-mail : jilee@kict.re.kr)

***대양컨설턴트 횡만부(E-mail : hansangcheol@gmail.com)

연구하여 실험결과와 비교하였다.

Ijima 등(1978)은 장파이론을 이용하여 경사입사파에 대한 유공방파제의 반사율을 산정하는 해석해를 개발하고 수리실험결과와 비교하였는 바, 우수실 내부에 설치되는 격실의 효과가 고려된 해석해도 제시하였다. Suh and Park(1995)은 확장형 완경사방정식에 근거한 Galerkin 고유함수를 이용하여 사석마운드 기초 위에 놓인 유공케이슨에 대하여 임의의 각도로 입사하는 파의 반사를 예측하는 수치모형을 개발하고 Ijima 등(1978)의 격벽이 없는 경우에 대한 실험결과와 비교하였다.

기존의 연구를 살펴보면 우수실 외부와 내부영역을 분리하고, 각각의 영역에 대해 포텐셜 이론을 이용하여 입사파와 반사파의 합성파로 분해한 다음, 우수실 외부의 반사파 진폭 및 내부의 입·반사파 진폭을 구하기 위해 유공벽 위치에서 질량 및 에너지 연속조건을 도입하여 접속시키는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 기존의 유공벽에 의한 반사율 산정기법의 핵심인 에너지손실계수의 산정에 주로 사용되어온 예연오리피스 공식의 타당성을 검토하기 위해 광범위한 수리실험을 실시하였다. 실험은 하나의 우수실을 갖는 유공벽에 직각으로 입사하는 파에 대해 반사율을 측정하였으며, 측정된 반사율과 기존의 Fugazza and Natale(1992)에 의한 해석해에 의한 반사율을 비교하여 에너지손실계수와 관성저항길이의 타당성을 검토하고자 하였다. 또한 공극률, 유공벽의 두께 및 파의 주기의 변화가 유공벽에서의 반사율에 미치는 영향을 규명하기 위한 기초적인 분석을 수행하였다.

2. 유공벽에 의한 반사율의 산정이론

2.1 Fugazza and Natale의 해석해

Fugazza and Natale(1992)은 정수면 하에서의 수심 h , 우수실 폭 B 를 갖는 그림 1과 같은 연직방향 슬릿(slit)형태의 유공방파제를 설정하여 입사파에 대한 반사율의 해석해를 산정하였다.

Fugazza and Natale(1992)가 제시한 입사파 진폭에 대한 반사파 진폭의 비율인 반사율 K_r 을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 $C=1-PW$ 이며, P 는 무차원 관성저항길이 ($=lk$), W 는 무차원 우수실 폭의 \tan 값, ($=\tan(kB)$), R 은 에너지손실률, ($=\beta k/\omega$), k 는 파수, l 은 관성저항길이이다. ω 는 파의 각진동수, B 는 우수실 폭이다. β 는 운동방정식을 선형화하기 위한 환산손실계수로 식 (2)와 같이 에너지손실률 R 과 연결되

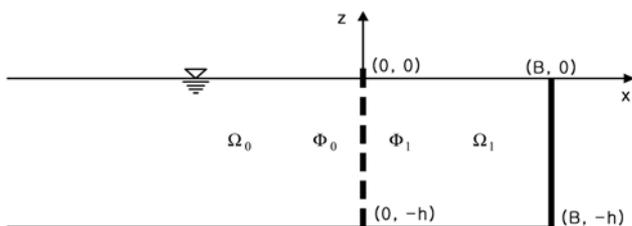


그림 1. 유공방파제 개념도

어 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 에너지손실계수로서 관수로에서 관의 급확대 또는 급축소 등에 의한 손실수두 계산에 사용되는 미소손실계수와 동일한 개념이며 무차원계수이다. 관성저항길이 l 은 파와 같은 부정류 흐름에서 슬릿기둥 자체의 체적에 해당하는 유체의 질량과 기동형상에 따른 부가질량이 유체에 가하는 힘 즉 저항력을 유발시키는 관성항의 계수로써 길이차원이다.

에너지손실계수 α 와 관성저항길이 l 이 유공벽에서의 반사율 K_r 에 미치는 영향을 알아보기 위해 수심 $h=0.5m$ 에서 주기 $T=1.7sec$ 의 규칙파에 대해 l 을 $0m$ 로 고정시킨 상태에서 다양한 α 에 대한 반사율을 식(1)을 이용하여 계산하고 그 결과를 그림 2에 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 l 과 α 가 고정된 상태에서 반사율 K_r 은 무차원 우수실폭($=B/L$, L 은 파장)이 증가하면 감소하다가 최소반사율이 나타나는 B/L 을 초과하면 다시 증가하여 $B/L=0.5$ 에서 다시 1로 회복된다. 여기서 α 가 0이라 함은 유공벽에 의한 에너지 소모가 전혀 일어나지 않는 이상적인 경우로서 입사파는 우수실의 뒷벽에서 모두 반사되어 반사율은 1이 된다. α 가 증가하면 유공벽에서의 에너지소산이 증가하므로 반사율이 감소하며, 최소반사율 또한 감소하게 된다. 그러나 α 가 더욱 증가하게 되면 유공벽의 공극을 통한 유체의 이동이 자유롭지 못하여 우수실로 유체의 유출입이 제한된다. 따라서 유공벽에 의한 실제적인 에너지소산은 오히려 감소하게 되고 반사율은 다시 증가한다. α 가 무한히 증가하면(즉 콘크리트 벽면과 같이 공극이 극히 작아 실제적으로는 불투수 벽면인 경우) 유공벽을 통한 유체의 유출입이 전혀 이루어지지 않으므로 에너지소산은 거의 없고 입사파는 유공벽(실제로는 불투수 벽)에서 모두 반사되어 반사율이 1에 이르게 된다. 그러므로 다른 입사파 특성이 동일한 경우 유공벽의 공극률을 변화시켜 α 를 조정함으로써 최소반사율을 주는 유공벽을 설계할 수 있을 것이다.

그림 2에서 알 수 있듯이 최소반사율값 자체는 주어진 α 에 따라 변하지만, 최소반사율을 주는 값은 0.25로 일정하다. 이는 우수실 폭 B 가 입사파 파장 L 의 1/4이 되어 유공벽

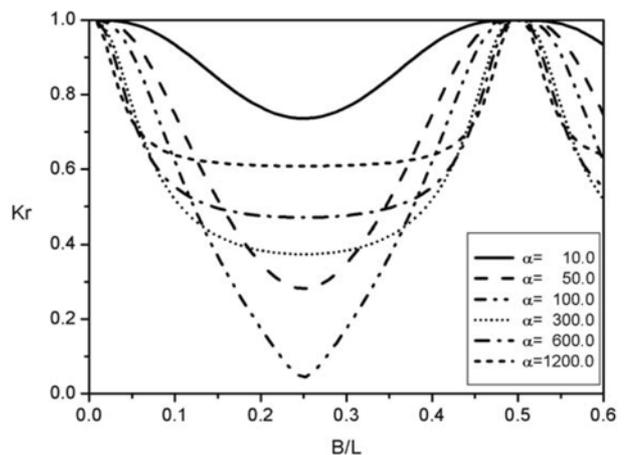


그림 2. 에너지손실계수 α 의 변화에 따른 반사율 변화 ($l=0m$)

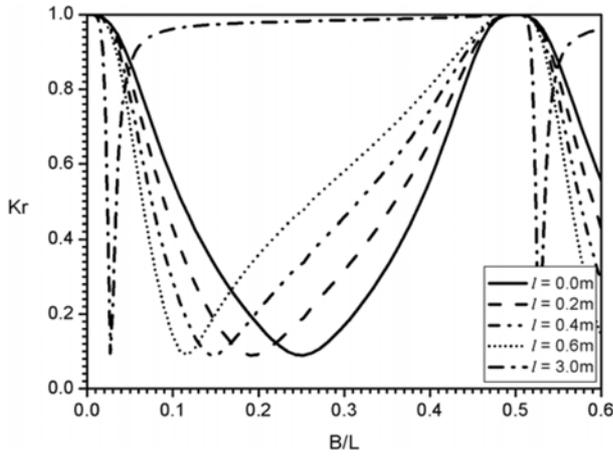


그림 3. 관성저항길이 변화에 따른 반사율 변화 ($\alpha=150$)

위치에서 중복파의 절점이 발생하므로 파의 수평유속성분이 최대가 되어 유공벽에 의한 에너지소산이 최대가 되므로 반사율은 최소가 된다. 그림 3은 그림 2에서와 같이 수심 $h=0.5m$ 에서 주기 $T=1.7sec$ 의 규칙파에 대해 에너지손실계수 α 를 인위적으로 150으로 고정시키고 다양한 관성저항길이 l 에 대해 반사율을 계산하여 제시한 것으로, 최소반사율 자체는 같으나 l 이 증가할수록 최소반사율이 발생하는 B/L 값이 감소함을 보여준다. 이는 l 이 파의 위상을 크게 변화시켜 중복파의 첫 번째 절점이 입사파의 1/4파장보다 짧은 위치에서 발생하도록 하는 것으로 판단된다. 이 두 가지 분석으로부터 에너지손실계수 α 는 에너지소모량을 결정하고, 관성저항길이 l 은 최소반사율을 주는 유수실의 폭을 결정해 줄 수 있다. 그러므로 에너지 손실계수와 관성저항길이를 정도 높게 산정하는 것이 유공벽 설계에 있어서 매우 중요함을 알 수 있다.

2.2 에너지손실계수 α

Hattori(1972), Kondo(1979) 및 Mei(1989)는 예연오리피스공식을 사용하여 유공벽에서의 에너지손실계수 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 단면수축계수이다. 정상흐름에서 예연오리피스를 통과하는 단면수축계수 C_c 는 유선분리현상이 뚜렷하게 발생할 정도로 레이놀즈수(Reynolds number)가 크다면 주로 공극률 r 에 의해 결정된다. 예연오리피스의 단면수축계수에 대한 Mei(1989)의 경험식은 식 (4)와 같다.

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

한편 Fugazza and Natale(1992)는 Liberatore(1974)의 단일 유수실을 갖는 유공방파제에 대한 실험결과와 해석결과를 비교하여 에너지손실계수 α 를 경험적으로 다음과 같이 수정하였다.

$$\alpha = \left(\frac{1}{rC_c} \right)^2 - 1 \quad (5)$$

또한 단면수축계수 C_c 를 다음과 같이 수정하여 제안하였다.

$$C_c = 0.55 \quad (6)$$

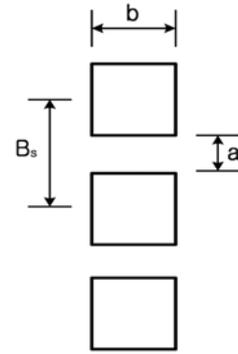


그림 4. 유공벽체의 각종 제원 개념도

2.3 관성저항길이 l

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

$$\frac{1}{B_s} = \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b}{B_s} \right) + \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{1}{2} \left(\tan \frac{\pi a}{4B_s} + \cot \frac{\pi a}{4B_s} \right) \right] \quad (7)$$

여기서 B_s 는 슬릿과 슬릿의 중심간 거리, a 는 공극의 간격, b 는 유공벽의 두께이며, 공극률 r 은 a/B_s 로서 그림 4에 나타난 바와 같다. 식 (7)의 우변 첫째 항은 유공벽 사각형 기둥 자체의 체적에 해당하는 유체의 질량효과이며, 두 번째 항은 기둥의 형상에 따른 부가질량(added mass)효과를 나타낸다.

또한 Fugazza and Natale(1992)는 관성저항길이 l 의 정의가 명확하지 않으므로 l 의 값으로 유공벽의 두께인 b 를 사용할 것을 제안하였다.

$$l = b \quad (8)$$

한편 Flagg and Newman(1971)은 관성저항길이 l 을 식 (9)와 같이 제안하였으며, Kakuno and Liu(1993)는 이를 이용하여 뒷벽이 없는 유공벽에서의 반사 및 전달파를 해석한 바 있다.

$$\frac{1}{B_s} = \frac{b}{a} \left(1 - \frac{a}{B_s} \right) + \frac{2}{\pi} \left[1 - \ln \left(\frac{4a}{B_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{a}{B_s} \right)^2 + \frac{281}{180} \left(\frac{a}{B_s} \right)^4 \right] + O \left(\left(\frac{a}{B_s} \right)^6 \right) \quad (9)$$

여기에서도 우변 첫째항은 질량효과를, 두 번째 항은 부가질량효과를 나타낸다.

3. 수리실험

앞에서는 에너지손실계수 α 와 관성저항길이 l 이 유공벽에서의 반사율 K_r 에 미치는 영향이 매우 크고, 주어진 수리조건으로부터 이들 값을 도출해내는 여러가지의 해석적 및 경험적 공식이 제시되어 있음을 살펴보았다. 본 연구에서는 이러한 기존의 공식들이 얼마나 신뢰성이 있는지 그 타당성을 검토하기 위한 수리실험을 실시하였다.

본 실험은 한국건설기술연구원 방파제 실험동의 2차원 조파수로에서 실시되었다. 조파수로는 그림 5에 보인 바와 같이 길이 50m, 높이 2.0m, 폭 1.0m의 철제구조로 되어 있으며, 조파관 부근과 구조물 설치지점 부근의 수로바닥은 수평이며 높이는 40 cm로 그 사이 16m 구간은 1/40의 완경사로 연결되어 있다. 수로의 한쪽 측면은 강화유리로 되어

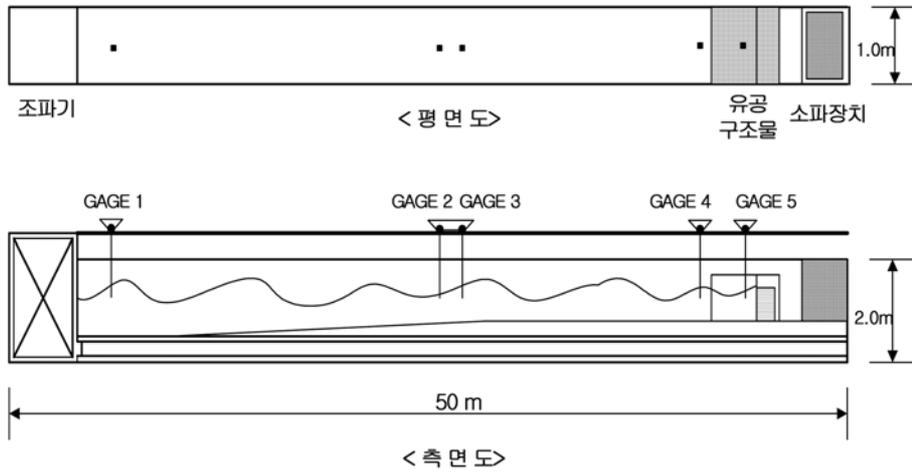


그림 5. 단면 조파수로 개념도

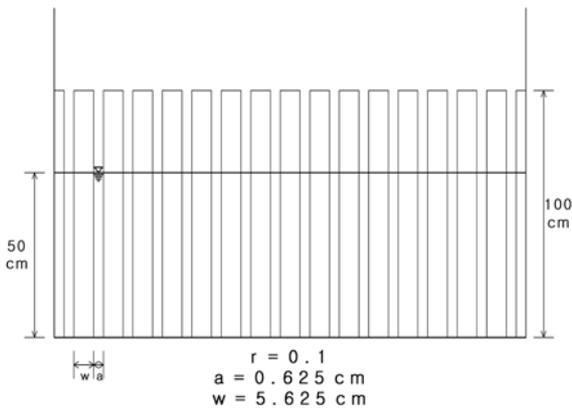


그림 6. 유공벽 모형 개념도

있어 외부에서 관찰이 가능하다. 수로의 좌측 끝단에는 유압식 Piston형 조파장치가 설치되어 있으며, 반대편 끝에는 소파시설이 설치되어 있다.

수리실험 조건은 유공벽 위치에서 수심 h 가 50 cm, 입사파의 파고 H 가 2 cm이고, 주기 T 는 1.1와 1.7sec의 2가지 규칙파를 조파기로부터 발생시켰다. 수리실험에 사용된 유공벽은 공극률 r 은 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, 1.05m의 7가지 경우에 대해 실험하여 파의 주기, 유수실 폭 및 벽두께의 변화에 따른 반사율 K_r 을 측정하였다. 유공벽은 이크릴로 제작하였으며 제원은 그림 6과 같다.

조파판에서 파를 발생시키고 어느 정도 시간이 경과하면

유공구조물로부터의 반사파가 바닥경사 변화부와 조파판에 도달하여 재반사되므로 시간이 경과할수록 입사파와 반사파의 파고가 증가하거나 감소하게 된다. 이러한 실험장치의 한계점으로 인해 재반사가 영향을 미치지 않는 시간구간이 짧아 일반적인 방법으로는 반사파 측정이 불가능하였다. 본 연구에서는 이러한 한계점을 인식하고 조파판을 통해 공급한 에너지와 유공벽에 의해 소산되는 에너지가 평형을 이루어 정상상태에 이를 때까지 계속적으로 파를 조파하고 입사파 성분이 원하는 입력파와 같아지도록 조파판의 진동폭을 조절하였으며, 파가 정상상태에 도달한 것을 확인한 다음 입사파와 반사파를 측정하여 반사율을 구하였다. 향후 수로의 수심을 일정하게 하여 재반사 도달시간을 충분히 길게 함으로써 좀 더 효율적인 실험을 재수행할 필요성이 있다.

4. 수리실험 결과 및 분석

표 1은 수리실험에 의해 측정된 반사율의 값을 유공벽 두께 b , 입사파 주기 T 및 유수실의 폭 B 별로 정리한 것이다. 그림 7-9는 주기 T 가 1.1sec인 입사파에 대해 유공벽의 두께 b 가 각각 1 cm, 2 cm, 3 cm인 경우에 대해 에너지손실계수 α 및 관성저항길이 l 을 Fugazza and Natale(1992)와 Mei(1989)의 공식을 이용하여 계산한 반사율 K_r 을 수리실험에 의한 측정치와 비교하여 제시한 것이다. Fugazza and Natale(1992)의 경우 에너지손실계수 α 는 식(5)와 식(6), 관성저항길이 l 은 식(8)에 의해 구했으며, Mei(1989)의 경우 각각 식(3)과 식(4) 그리고 식(7)에 의해 구했다. 이들 그림에서 공통적으로 나타나는 현상은 Fugazza and Natale

표 1. 관측 반사율 K_r

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

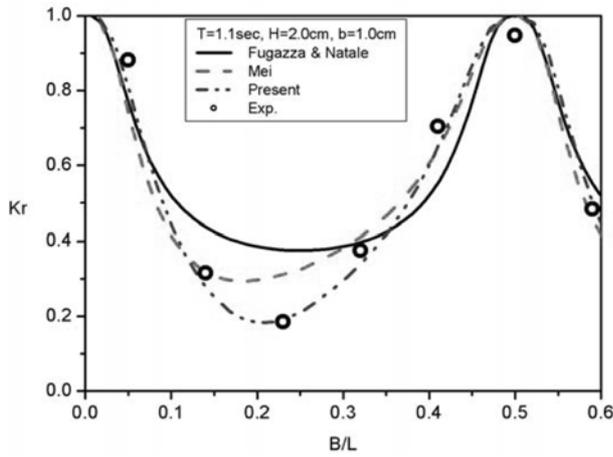


그림 7. 반사율 계산치와 관측치의 비교
($T=1.1$ sec, $H=2.0$ cm, $b=1.0$ cm)

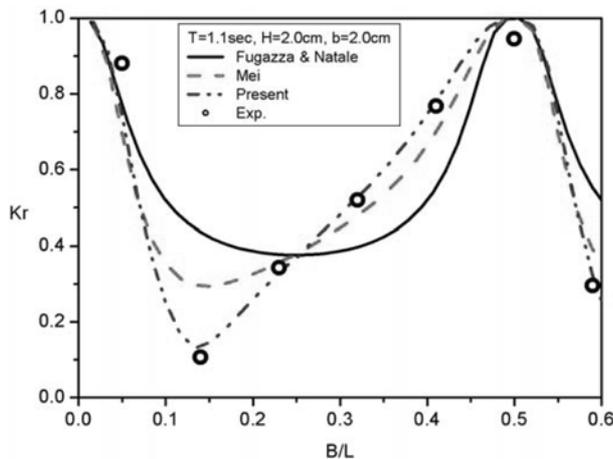


그림 8. 반사율 계산치와 관측치의 비교
($T=1.1$ sec, $H=2.0$ cm, $b=2.0$ cm)

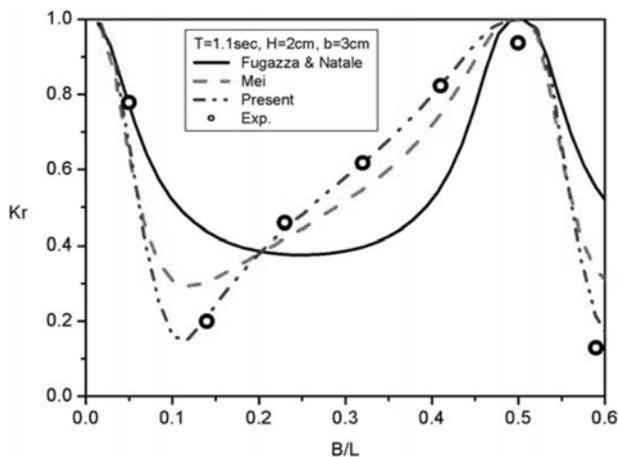


그림 9. 반사율 계산치와 관측치의 비교
($T=1.1$ sec, $H=2.0$ cm, $b=1.0$ cm)

(FNI으로 표기)에 의한 계산치는 전반적으로 실측된 반사율과 매우 다른 경향을 보이며, 최소반사율을 주는 무차원 유수실의 폭 B/L 역시 과대평가되고 있다. 한편 Mei에 의한 계산치는 반사율이 Fugazza and Natale에 의한 것보다 개선된 경향을 보여준다 실측치에 비해 여전히 최소반사율이 과대평가되고 있으며, 최소반사율을 주는 B/L 은 Fugazza and Natale에 비해 상당히 개선되었으나 유공벽이 얇은 두께 1 cm의 경우 실측치와 상당한 차이를 보이고 있다. 반사율을

더 정도 높게 산정하기 위해 에너지 손실계수 α 및 관성저항길이 l 을 임의적으로 조정하여 가장 실측치와 근접하는 결과를 주는 α 와 l 을 구하고 다음 절의 표 2와 표 3에 각각 α_{ex} 와 l_{ex} 로 제시하였다. 이를 이용하여 식(1)에 의해 산정한 반사율을 그림 7-9에 함께 제시("present"로 표시)한 바, 반사율의 전반적인 분포나 최소반사율 및 이에따른 유수실폭 등 모든 점에서 기존의 이론식보다 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 이들 결과로부터 유공벽에서의 반사율 해석해인 식(1)의 정밀도는 현실적인 α 와 l 의 산정에 의해 좌우된다는 것을 알 수 있다.

5. 에너지손실계수 평가

전술한 방법으로 표 1에 주어진 6가지 경우에 대한 최적 α 와 l 을 구하고 이를 각각 표 2와 표 3에 기존의 이론식에 의한 값과 비교하여 제시하였다. Fugazza and Natale(FNI으로 표기)의 식(5)에 의한 에너지 손실계수 α_{FNI} 가 359이고 Mei의 식(3)에 의한 α_{Mei} 는 242인 반면, 실측치에 의한 α_{ex} 는 표 2에 제시된 바와 같이 평균적으로 151로 각종 이론치가 과대산정되어 있다. 그림 10은 무차원 유공벽두께 b/a 에 대한 각종 에너지손실계수비 α/α_{Mei} 의 분포를 도시한 것으로서 실측치가 예언오리피스 공식인 Mei에 의한 이론치의 약 62% 정도로 작음을 알 수 있다. 이는 벽이 두꺼워지면 유선분리부 직하류에 압력이 매우 낮은 부분이 발생하게 되어 유선분리를 방해하므로 단면수축은 감소하게 된다. 이로

표 2. 에너지손실계수

b (cm)	T (sec)	α_{ex}	α_{Mei}	α_{FNI}	α_{ex}/α_{Mei}
1.0	1.1	165.0	242	359	0.68
	1.7	155.0			0.64
	평균	160.0			0.66
2.0	1.1	140.0			0.58
	1.7	151.0			0.62
	평균	145.5			0.60
3.0	1.1	146.0	0.60		
	1.7	150.0	0.62		
	평균	148.0	0.61		
전체평균					0.62

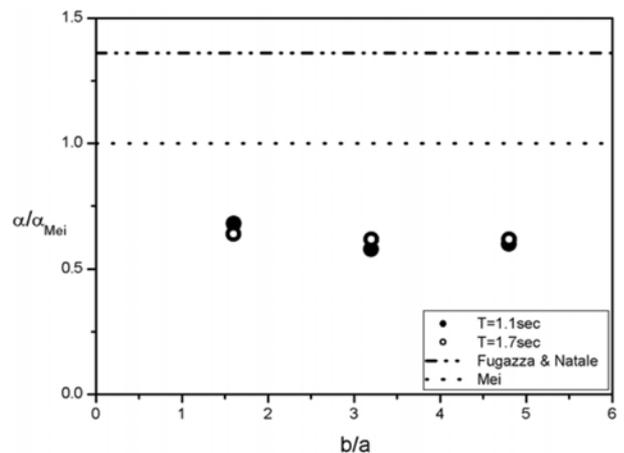


그림 11. 관성저항길이 비교

부터 유공벽의 두께가 에너지손실계수에 미치는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다. 한편 Fugazza and Natale의 경험식에 의한 에너지손실계수는 실측된 값에 비해 과대평가되어 있다.

6. 관성저항길이 평가

표 3과 그림 11은 Fugazza and Natale (l_{FN1}), Mei (l_{Mei}), Flagg and Newman (l_{FN2}) 및 실측(l_{ex})에 의한 관성저항길이 l 을 비교하여 제시하고 있다. 그림 11에서 보인 바와 같이 Fugazza and Natale의 경우 부가질량 등이 고려되어 있지 않아 전반적으로 l 이 과소평가되어 있으며, Mei 및 Flagg and Newman에 의한 l 은 약간의 차이를 보이거나 전반적으로 비슷한 경향을 보인다. 유공벽 두께가 두꺼운 $b=2$ cm 및 3 cm의 경우만을 고려하면 Flagg and Newman에 의한 l 이 실측치와 가장 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 유공벽 두께 b 가 1 cm로 가장 얇은 경우에는 실측치가 Mei 및 Flagg and Newman에 의한 l 보다 과소평가되어 있고, 또한 값의 변동이 심하여 기존 이론치의 타당성을 평가하기 어렵다. 실험과정 중의 유안에 의한 관찰 결과에 의하면 유공벽 두께 b 가 1 cm로 가장 얇은 경우에는 파력에 의해 유공벽이 상당히 움직였으며, b 가 2 cm인 경우에는 판이 약간 움직였으나 무시할만한 수준이었다. 이러한 경향은 파고가 증가함에 따라 더욱 심해져 실측된 값이 감소하며 심지어는

표 3. 관성저항길이 비교

b (cm)	T(sec)	l_{ex} (m)	l_{Mei} (m)	l_{FN1} (m)	l_{FN2} (m)
1.0	1.1	0.080	0.127	0.010	0.166
	1.7	0.063			
	평균	0.072			
2.0	1.1	0.245	0.217	0.020	0.256
	1.7	0.240			
	평균	0.243			
3.0	1.1	0.342	0.307	0.030	0.346
	1.7	0.343			
	평균	0.343			

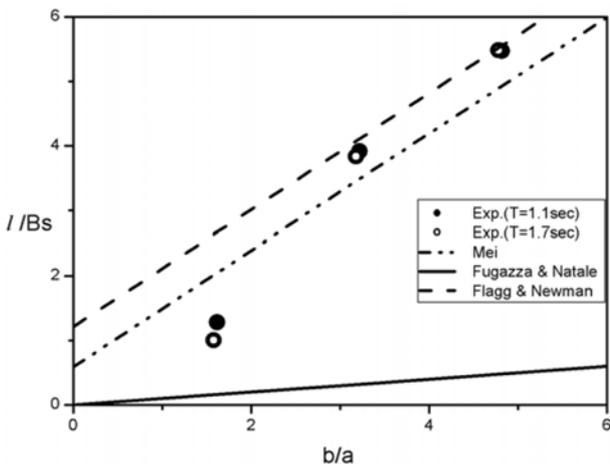


그림 11. 관성저항길이 비교

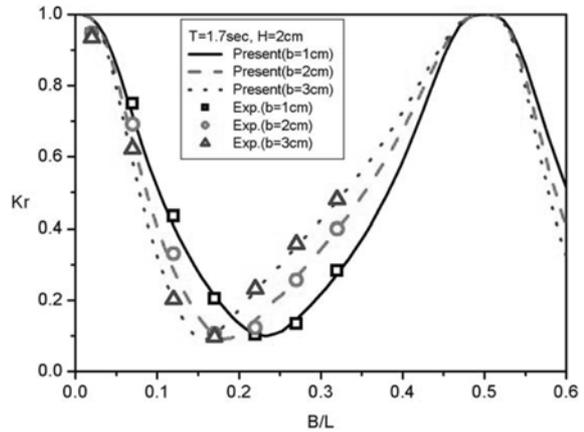


그림 12. 유공벽 두께에 따른 반사율의 변화

음(-)의 값을 가지는 등 기존 이론식의 기본가정을 벗어난다. 이러한 현상을 종합하여 판단해 볼 때 기존 이론식을 적용하기 위해서는 유공벽이 파력에 의해 진동하지 않도록 강성이 우수한 재질을 사용해야 할 것이다. 그러므로 유공벽 두께가 두꺼운 $b=2$ cm 및 3 cm의 경우만을 고려하여 평가하면 Flagg and Newman의 이론식인 식(9)가 가장 우수한 결과를 주는 것으로 판단된다.

7. 유공벽 두께의 영향 평가

그림 12는 유공벽 두께 b 가 유공벽의 반사율에 미치는 영향을 알아보기 위해 파의 주기가 1.1sec이고 파고가 2 cm인 경우에 대해 유공벽의 두께를 1 cm, 2 cm 및 3 cm로 변화시켜가며 유수실폭에 따른 반사율의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 보인 바와 같이 유공벽이 두꺼워질수록 관성저항 길이가 증가하여 최소반사율을 주는 무차원 유수실폭은 점점 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 얻어진 결과는 유공벽 설계시 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 유공벽이 두꺼워지면 에너지손실계수도 감소하여 최소반사율의 값 자체도 어느 정도 영향을 받을 것으로 예상되었으나, 본 실험에서 사용한 유공벽이 모두 두꺼운 오리피스에 해당되어 그림 12에 보인 바와 같이 에너지손실계수가 예연오리피스($b=0$)의 약 62%로 일정하므로 에너지손실계수의 영향은 나타나지 않고 관성저항길이 효과만 나타난 것으로 판단된다. 그러나 향후 다양한 공극률, 벽두께, 파 조건 등에 대한 종합적인 추가실험을 실시하여 이를 확인할 필요성이 있다.

8. 결론 및 토의

본 연구에서는 여러 가지 두께의 유공벽을 이용하여 다양한 파 조건에 대한 반사율 실험을 실시하고 기존 이론식의 타당성을 검토하였다. 또한 실험결과를 심층 분석하여 기존 이론식의 문제점과 그 이유를 밝히고, 이에 대한 개선책을 제시하였다. 본 연구의 결과를 종합하면 다음과 같이 결론을 제시할 수 있다.

1. 유공벽의 두께가 두꺼우면 에너지손실계수 α 가 기존 이론식에 사용된 예연오리피스 공식의 약 62% 정도로 감소한다.

2. 관성저항길이 l 은 Flagg and Newman의 이론식이 가장 우수한 것으로 평가되었다.
3. 유공벽을 본 실험에서와 같이 강성이 떨어지는 아크릴로 제작하는 경우 파력에 의해 유공벽이 진동하므로 관성저항길이 l 이 심하게 감소하여 유공벽을 강성체로 가정한 기존의 이론치와 매우 다른 결과를 보인다. 그러므로 기존의 많은 연구에서 발표된 실험자료를 이용할 경우 특별한 주의를 요한다.
4. 예연오리피스와 두꺼운 오리피스 사이의 중간 두께에 대해서는 더 많은 실험과 연구가 필요하다.

감사의 글

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

참고문헌

- Bennett, G.S., McIver, P., and Smallman, J.V. (1992) A mathematical model of a slotted wavescreen breakwater. *Coastal Eng.*, 18, pp. 231-249.
- Bergmann, H. and Oumeraci, H. (2000) Wave loads on perforated caisson breakwaters. *Proc. 27th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, Sydney, 2, pp. 1622-1635.
- Flagg, C.N. and Newman, J.N. (1971) Sway added-mass coefficients for rectangular profiles in shallow water. *J. Ship Research*, 15, pp. 257-265.
- Fugazza, M. and Natale, L. (1992) Hydraulic design of perforated breakwaters. *J. Waterw. Port Coastal Eng.*, 118, pp. 1-14.
- Hattori, M. (1972) Transmission of waves through perforated wall. *Coastal Eng. in Japan.*, 15, pp. 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, pp. 245-250 (in Japanese).
- Jarlan, G.E. (1961) A perforated vertical wall breakwater. *Dock Harbour Auth.*, XII (486), pp. 394-398.
- Kakuno, S. and Liu, P.L.-F. (1993) Scattering of water waves by vertical cylinders. *J. Waterw., Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, 119, pp. 302-322.
- Kakuno, S., Oda, K., and Liu, P.L.-F. (1992) Scattering of water waves by vertical cylinders with a backwall. *Proc. 23rd Coastal Eng. Conf.*, ASCE, Venice, 2, pp. 1258-1271.
- Kondo, H. (1979) Analysis of breakwaters having two porous walls. *Proc. Coastal structures '79*, ASCE, 2, pp. 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, pp. 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, pp. 1121-1140.
- Mei, C.C. (1989) *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves.*, World-Scientific, Singapore, 2nd printing with correction, 258p.
- Morse, P.M. and Ingard, K.U. (1968) *Theoretical acoustics.* McGraw-Hill, New York.
- Suh, K.D. and Park, W.S. (1995) Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters. *Coastal Eng.*, 26, pp. 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, pp. 1104-1120.
- Twu, S.W. and Lin, D.T. (1991) On a highly effective wave absorber. *Coastal Eng.*, 15, pp. 389-405.
- Williams, A.N., Mansour, A.M., and Lee, H.S. (2000) Simplified analytical solutions for wave interaction with absorbing-type caisson breakwaters. *Ocean Eng.*, 27, pp. 1231-1248.
- Zhu, S. and Chwang, A.T. (2001) Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall. *Coastal Eng.*, 43, pp. 93-104.

(접수일: 2006.3.24/심사일: 2006.6.21/심사완료일: 2006.10.11)