

유공벽에 의한 반사파의 산정 Estimation of Reflected Waves due to Perforated Wall

윤성범¹, 한상철², 남두현³
 Sung Bum Yoon¹, Sang Cheol Han² and Doo Hyun Nam³

1. 서 론

유공방파제는 유공벽과 유수실로 이루어져 있으며, 유공벽의 구멍 또는 슬릿을 통해 입사한 파가 유수실 내에서 중복파를 형성하여 입사파의 에너지를 일부 흡수함으로써 반사파를 저감시키는 역할을 하는 구조물이다.

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 et al., 1968; Tanimoto et al., 1976). 뒤이어 해석해에 대한 연구가 수행된 바 Kondo(1979)는 선형 진행파이론을 이용한 해석모형을 개발하였으며, Kakuno et al.(1992)은 접합 근사확장법을 이용한 해석모형을 개발하였고, Bennett et al. (1992)도 이와 유사한 해석모형을 개발하여 수리실험 자료와 비교하였다. Twu and Lin(1991)은 유공벽의 두께가 무시할 수 있을 정도로 얇은 다중유공방파제에 대해 선형 에너지소모모형을 이용한 반사율 산정 해석해를 개발하였다. 또한 Fugazza and Natale(1992)는 비선형 에너지소모모형을 이용하여 여러 개의 유공벽과 유수실을 가진 케이슨 방파제에 의한 반사율 산정 해석해를 개발하였고, Williams et al.(2000)은 유수실 내부의 흐름에 에너지소모를 추가한 해석해를 개발하였다.

본 연구는 실제 항만에 설치되는 유공벽면에 적용 가능한 수치모형을 개발하기 위한 기초연구로서 Fugazza and Natale(1992)의 반사율 산정 해석해를 분

석하여 Ijima et al.(1978) 및 Bergmann and Oumeraci(2000)의 실험결과와 비교하였다. 또한 유공벽에서의 반사율에 영향을 미치는 공극률, 유체 가속구간의 길이 및 파고의 변화에 따른 반사율 변화에 대해 평가해 보았고, 유공벽 및 유수실 배면 벽에서의 에너지 감쇠를 해석해에 도입하여 Fugazza and Natale(1992)의 해석결과를 Zhu and Chwang(2001)의 실험결과와 비교하여 그 적용성을 검토하였다.

2. Fugazza and Natale(1992)의 해석해

Fugazza and Natale(1992)는 정수면 하에서의 수심 h , 유수실 폭 B 를 갖는 Fig. 1과 같은 연직방향 슬릿(slit)형태의 유공방파제를 설정하였다. 입사파는 단일주기이고 미소진폭파이며 벽에 직각으로 입사한다고 가정하였다. 입사파의 파수 $k = 2\pi/L$ 이고, 여기서 L 은 파장이다.

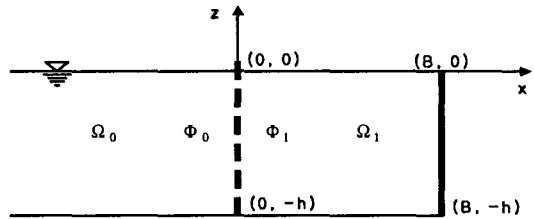


Fig. 1. Schematic diagram and coordinate system for calculation of wave reflection

선형파의 해는 입사파, 반사된 진행파 및 소멸파의 중첩원리를 속도 포텐셜 Φ 의 형태로 나타낼

1 한양대학교 공학대학 토목·환경공학과 교수
 2 한양대학교 공학대학 토목·환경공학과 석사과정
 3 한양대학교 공학대학 토목·환경공학과 석사과정

수 있고, 속도 포텐셜은 $(\partial_x \Phi, \partial_z \Phi) = (u, w)$, $\partial_t \Phi = -p/\rho$ 인 관계가 성립한다. 여기서 $p = p(z)$ 는 동수압이며, ρ 는 물의 밀도이다.

비압축성유체에 대한 유공벽에서의 연속방정식, 운동방정식은 각각 식 (1)과 (2)이고, 불투과성 구조인 뒷벽에서의 연속방정식은 식 (3)과 같다.

$$u_0 = u_1 \quad (1)$$

$$\frac{p_1}{\rho} - \frac{p_0}{\rho} + \frac{\alpha}{2} U |U| + \int_l \partial_t U dl = 0 \quad (2)$$

$$u_1 = 0 \quad (3)$$

여기서 U 는 유공벽체에서 공극률을 고려하여 구한 유량 평균유속, l 은 유체 가속구간의 길이, α 는 유공벽에서의 에너지 손실계수, r 은 유공벽의 공극률이다.

파동방정식의 해를 구하기 위해 식 (1)~(3)에 속도 포텐셜을 적용하면 식 (4)~(6)으로 변형되고, 식 (2)에서의 비선형 에너지 소산항은 식 (5)에서와 같이 선형화된다.

$x = 0$ 에 위치한 유공벽에서 식 (4), (5)와 같은 matching condition이 만족되어야 하고, $x = B$ 에 위치한 불투과성 구조인 뒷벽에서는 식 (6)과 같이 no-flux 조건을 만족해야 한다.

$$\partial_x \Phi_0 = \partial_x \Phi_1 \quad (4)$$

$$\partial_t \Phi_1 - \partial_t \Phi_0 - \beta \partial_x \Phi_0 - l \partial_{xt} \Phi_0 = 0 \quad (5)$$

$$\partial_x \Phi_1 = 0 \quad (6)$$

여기서 β 는 운동방정식을 선형화하기 위한 환산 손실계수이다.

Fugazza and Natale(1992)가 제안한 반사율 K_r 은 수학적인 유도를 통해 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_r = \frac{\sqrt{(C^2 + W^2)^2 + W^2 R^2 (W^2 R^2 + 2C^2 - 2W^2)}}{C^2 + W^2 (1 + R^2)} \quad (7)$$

여기서 P : 무차원 가속구간의 길이(= lk)

W : 무차원 유수실 폭(= $\tan(kB)$)

$C = 1 - PW$

R : 에너지 감소율(= $\beta \left(\frac{k}{w} \right)$)

환산 손실계수 β 는 식 (8)과 같이 에너지 감소율 R 과 연결되어 있다. α 는 유공벽에서의 에너지 손실계수로 식 (9)와 같다.

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

$$\alpha = \left(\frac{1}{r C_c} \right)^2 - 1 \quad (9)$$

여기서 H 는 파고, C_c 는 제트(jet)의 단면 수축계수로 Liberatore(1974)의 단일 유수실을 갖는 유공방파제의 실험결과와 해석결과를 비교하여 0.55를 얻었다.

Hattori(1972)와 Kondo(1979)는 그들의 실험에서 평면 오리피스를 사용하여 유공벽에서의 에너지 손실계수 α 를 식 (10)과 같이 산정하였고, 단면 수축계수 C_c 는 Mei(1989)가 예연 오리피스에 대해 산정한 경험식인 식 (11)을 사용하였다.

$$\alpha = \left(\frac{1}{r C_c} - 1 \right)^2 \quad (10)$$

$$C_c = 0.6 + 0.4 r^2 \quad (11)$$

유공벽에서의 운동방정식에서 관성항의 유체 가속구간의 길이 l 은 차단계수 C 를 도입하여 $2C$ 로 구하였다. 사각형 실린더에 대해 공극률이 1보다 작을 때 차단계수는 식 (12)와 같다(Flagg and Newman, 1971).

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

여기서 B_s 는 슬릿(slit)과 슬릿(slit)의 중심간 거리, a 는 공극의 간격, b 는 유공벽의 두께이며, 공극률 r 은 a/B_s 이다.

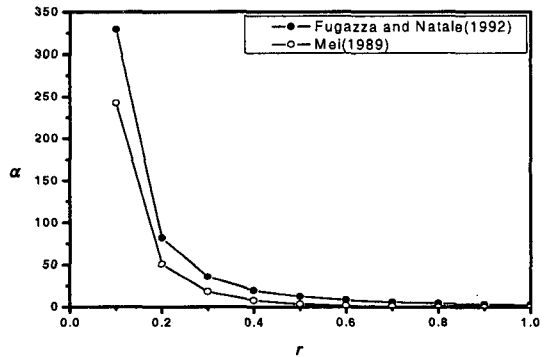


Fig. 2. Energy loss coefficient α versus porosity r

Fig. 2는 공극률 r 에 따른 Fugazza and Natale (1992)와 Mei(1989)에 의한 에너지 손실계수 α 를 비교한 것으로 Fugazza and Natale (1992)에 의한 에너지

손실계수 α 가 Mei(1989)에 의한 것보다 공극률이 작을 때는 그 차이가 크지만 공극률이 커질수록 그 차이는 감소한다. 따라서 공극률이 작은 경우에 단면 수축계수 C_c 를 적절히 선택해야 한다.

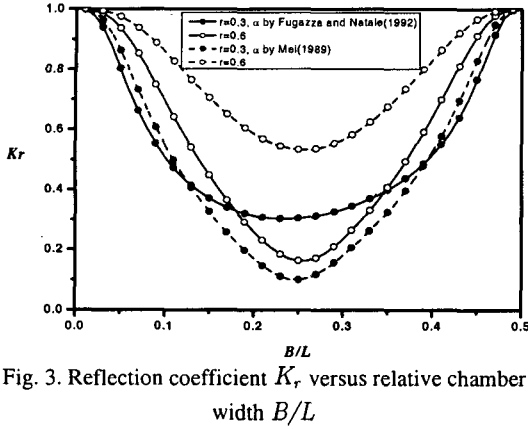


Fig. 3. Reflection coefficient K_r versus relative chamber width B/L

Fig. 3은 수심 $h = 3\text{ m}$, 입사파고 $H = 1\text{ m}$, 유수실 폭 $B = 4\text{ m}$, 공극률 r 이 0.3과 0.6인 경우에 Fugazza and Natale(1992)의 해석해를 이용하여 두 가지 에너지 손실계수 α 에 의한 반사율을 비교한 것으로 $B/L = 0.25$ 근방에서 최소 반사율이 나타난다.

$r = 0.3$ 일 때 Fugazza and Natale(1992)에 의한 에너지 손실계수 α 가 Mei(1989)보다 15정도 크게 나타나 Fugazza and Natale(1992)에 의한 반사율이 작게 나타날 것으로 생각되지만 결과는 반대로 나타났다. $r = 0.6$ 인 경우도 Fugazza and Natale (1992)의 α 가 Mei(1989)보다 5정도 크게 나타나지만 반사율은 작게 나타났다. 이로부터 반사율 산정식 (7)이 에너지 손실계수 α , 환산 손실계수 β 및 에너지 감소율 R 이 상호 연관되어 있어 그 관계가 복잡함을 알 수 있다. 따라서 반사율 산정시 에너지 손실계수의 선정이 매우 중요하다.

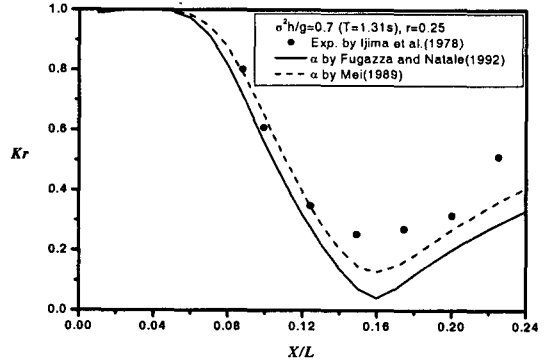
3. 실험적 연구

3.1 Ijima et al.(1978)의 수리실험

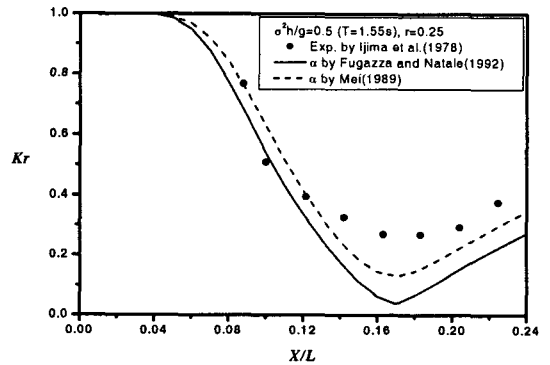
Ijima et al.(1978)의 수리실험은 길이 20 m , 폭 1 m , 높이 0.6 m 의 평면수조에 수심 $h = 30\text{ cm}$, 입사파고 $H = 3\text{ cm}$, 유공벽 두께 $b = 7\text{ cm}$, 공극률 $r = 0.25$ 의 육각형 구멍이 난 유공벽을 볼투과 연직벽 앞에 설치하여 주기를 고정시키고, 유수실 폭을 변화시키며 반사율을 측정하였다.

Fig. 4는 파가 직각입사하고 격벽이 없는 경우의 Ijima et al.(1978)의 실험결과와 Fugazza and

Natale(1992) 및 Mei(1989)에 의한 에너지 손실계수를 이용하여 계산한 반사율을 비교한 것이다. 여기서 X 는 유공벽 두께 b 와 유수실 폭 B 의 합이다. 유체 가속구간의 길이 l 은 사각형 실린더에 대한 차단계수로 계산한 0.32 m 가 사용되었다.



(a) $T = 1.31\text{ sec}$



(b) $T = 1.55\text{ sec}$

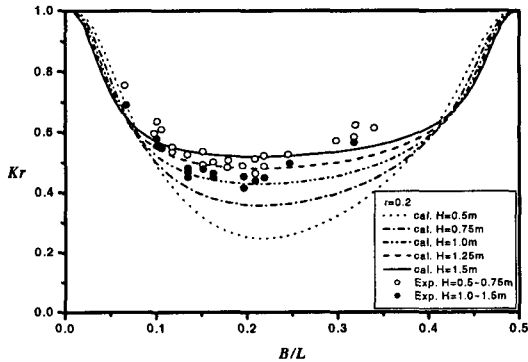
Fig. 4. Reflection coefficient K_r versus relative chamber width X/L

Fig. 4의 실험결과에서 주기 T 의 영향으로 주기가 커질수록 최소 반사율이 나타나는 X/L 의 위치가 오른쪽으로 이동하는데 해석결과의 반사율과 차이가 있다. Ijima et al.(1978)과 비슷한 공극률 0.3을 사용한 Fig. 3과는 반대로 Fig. 4에서는 Fugazza and Natale(1992)에 의한 반사율이 Mei (1989)에 의한 것보다 작게 나타났다. Fig. 3의 Fugazza and Natale(1992)의 해석해는 유수실 폭을 고정시키고 주기를 변화시키며 반사율을 산정했지만 Ijima et al.(1978)의 실험결과는 이와는 반대로 유수실 폭을 변화시키고 주기를 고정시켜 측정하였다. 또한 유공벽의 모양도 Fugazza and Natale(1992)의 해석해는 유공벽이 얇은 연직 슬릿(slot)에 대한 것이지만 Ijima et al.(1978)의 실험은 육각형 모양의 구멍이 난 유공벽

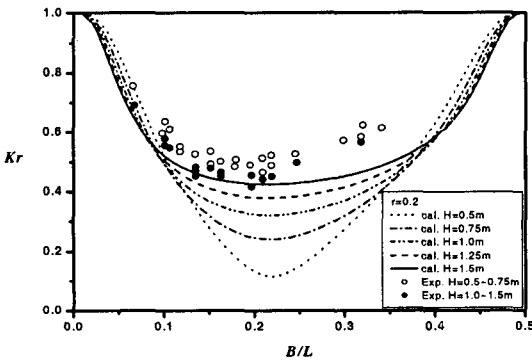
에 대한 결과이고 공극의 크기에 비해 유공벽의 두께가 크기 때문에 연직 슬릿(slit)에 비해 유공벽에서의 에너지 손실이 작게 발생하여 반사율에서 차이가 난다고 판단된다.

3.2 Bergmann and Oumeraci(2000)의 수리실험

Bergmann and Oumeraci(2000)의 수리실험은 길이 320 m, 폭 5 m, 깊이 7 m인 대형수조에 하나 혹은 여러 개의 유수실을 갖는 각기 다른 공극률의 유공방파제를 설치한 후 유수실 폭을 고정시키고 주기를 변화시키며 반사율을 측정하였다.



(a) α by Fugazza and Natale(1992)



(b) α by Mei(1989)

Fig. 5. Reflection coefficient K_r versus relative chamber width B/L

Fig. 5는 Bergmann and Oumeraci(2000)의 실험 조건, 즉 수심 $h = 4.0$ m, 공극률 $r = 0.2$, 유수실 폭 $B = 7.8$ m, 파고 $H = 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.5$ m으로 Fugazza and Natale(1992)의 반사율 산정 해석해를 Fugazza and Natale(1992)와 Mei (1989)에 의한 에너지 손실계수로 해석하여 실험결과와 비교한 것이다. 실험결과로부터 공극률 $r = 0.2$ 인 경우 $B/L = 0.2$ 에

서 최소 반사율이 나타난다. 파고가 증가함에 따라 실험결과는 반사율이 점차 감소하는데 해석해는 반사율이 점차 증가하여 서로 반대의 경향을 보이며 정량적으로도 상당한 차이를 보인다. Fugazza and Natale(1992)의 해석해는 얇은 연직 슬릿(slit)에 대한 것이지만 Bergmann and Oumeraci(2000)의 실험결과는 두께가 두꺼운 수평 슬릿(slit)의 유공벽이어서 연직방향 유속(w) 때문에 연직 슬릿(slit)에 비하여 유공벽에서 에너지 손실이 크게 발생할 것이다. 또한 Fugazza and Natale(1992)의 에너지 손실계수에 의한 반사율과 Mei(1989)에 의한 반사율의 차이가 생긴다. 따라서 수평 슬릿(slit)형태의 유공벽에 대한 실험결과와 같은 반사율을 얻기 위해서는 해석해의 개선이 필요하다.

4. 유공벽의 특성

4.1 공극률의 효과

반사율에 대한 공극률 r 의 영향을 알아보기 위해 Fugazza and Natale(1992)의 입사파 조건으로 공극률 $r = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 에 대해 반사율 산정 해석해의 계산치를 비교하였다. 또한 에너지 손실계수 α 는 식 (9)를, 단면 수축계수 C_c 는 0.55를 사용하였다.

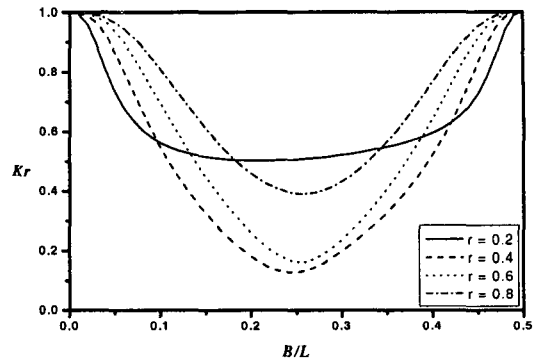


Fig. 6. Reflection coefficient K_r versus relative chamber width B/L

Fig. 6은 B/L 의 변화에 따른 유공벽에서의 반사율 변화를 나타낸다. B/L 이 0.25일 때 유공벽을 통과하는 유속의 크기와 위상이 입사파와 비슷하게 되어 입사파의 흡수효과가 가장 좋다. B/L 이 0.25보다 커지거나 작아지면 효율이 감소한다.

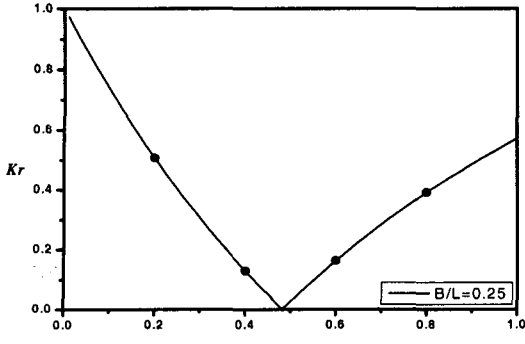


Fig. 7. Reflection coefficient K_r versus porosity r

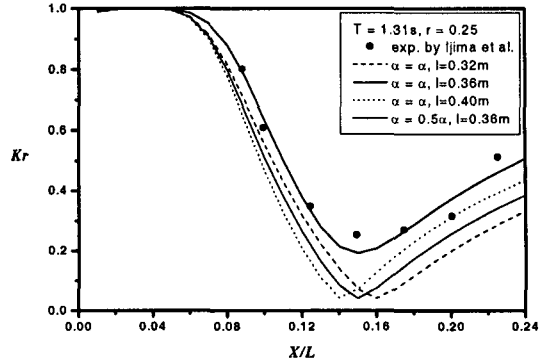
Fig. 7은 B/L 을 0.25로 고정시킨 상태에서 공극률 r 에 따른 반사율의 변화를 나타낸다. 유수실 폭이 이 조건을 만족한 상태에서도 유공벽의 공극률 r 이 작아짐에 따라 반사율이 계속 감소하는 것이 아니라 공극률 r 에 따라 반사율이 변한다. 여기서 특기할 만한 사항은 공극률 r 이 1이면 유공벽이 존재하지 않는 경우이므로 반사율이 1이어야 하나, 식 (9)에 의한 에너지 손실계수 α 가 0이 되지 않아 반사율이 0.6에 달하므로 식 (11)과 같은 단면 수축계수의 보정이 필요하다.

4.2 유체 가속구간의 길이 효과

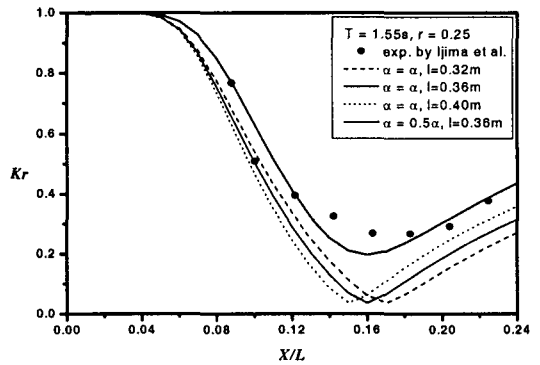
유체 가속구간의 길이 l 이 반사율에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fugazza and Natale(1992)의 해석해로 Ijima et al.(1978)의 수리실험과 같은 조건, 즉 주기 $T = 1.31, 1.55$ sec, 수심 $h = 30$ cm, 파고 $H = 3$ cm, 공극률 $r = 0.25$ 으로 계산하여 Ijima et al.(1978)의 실험결과와 비교하였다.

Fig. 8은 유체 가속구간의 길이 l 에 따른 반사율 변화를 나타낸다. 본래의 유체 가속구간의 길이 $l = 0.32$ m를 사용했을 때 Ijima et al.(1978)의 실험결과와 정량적·정성적으로 차이를 보이나, 그 길이를 0.36 m로 조절하면 실험결과의 반사율 최소치를 보이는 X/L 과 일치하지만 정량적으로는 차이가 난다. 이로부터 유체 가속구간의 길이 l 이 증가하면 최소 반사율을 보이는 X/L 이 감소하고, 반대로 그 길이가 감소되면 최소반사율을 보이는 X/L 이 증가하는데, 유체 가속구간의 길이 l 이 반사율 자체의 크기 변화에는 크게 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다. 유공벽에서의 에너지 손실계수 α 를 50% 감소시키면 해석해가 실험결과와 비슷한 반사율을 보인다. 따라서 실험결과에 근접한 반사율을 얻기 위해서는 유공벽에서의 에너지 손실계수 α 값의 개선이 필요

함을 알 수 있다.



(a) $T = 1.31$ sec



(b) $T = 1.55$ sec

Fig. 8. Comparison of the experimental result of Ijima et al.(1978) and the analytical model of Fugazza and Natale(1992)

4.3 파고의 효과

파고 H 가 반사율에 미치는 영향을 알아보기 위해 Bergmann and Oumeraci(2000)에 제시된 입사파 조건, 즉 수심 $h = 4$ m, 파고 $H = 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ m, 공극률 $r = 0.2, 0.33, 0.5$, 유수실 폭 $B = 7.8$ m에 대하여 Fugazza and Natale (1992)의 해석해의 계산치를 Bergmann and Oumeraci(2000)의 단일 유수실에 대한 실험결과에 비교하였다.

Fig. 9는 공극률 $r = 0.2, 0.33, 0.5$ 에 대해 파고 H 가 0.25 m에서 0.25 m간격으로 2.0 m까지 증가할 때 에너지 감소를 R 에 따른 반사율 변화를 나타낸다.

공극률이 0.5인 경우에는 공극이 커서 공극률을 제외한 다른 조건은 동일한 상태에서 β 가 작으므로 R 이 작고 반사율은 크다. H 가 증가하면 β 가 증가하고 이에 따라 R 이 증가하므로 반사율이 감소하다가 H 가 일정 수준 이상으로 커지면 반사율이 증가하게 된다. 공극률 $r = 0.2$ 인 경우는 공극이 작아 유공벽에서

저항이 커지기 때문에 유공벽에서 반사가 많이 일어나 유수실로의 에너지 전달이 작다. 그러므로 파고 H 가 증가함에 따라 유공벽에서의 저항이 증가하여 유공벽을 통한 물의 유출입이 더욱 감소하므로 반사율이 커지게 된다. 공극률 $r=0.33$ 인 경우는 공극률 $r=0.2$ 와 0.5 의 두 경우의 경향이 모두 나타난다. 따라서 실험결과와 같은 경향의 반사율을 얻기 위해 유공벽에서의 에너지 손실계수 α 값의 개선이 필요하다.

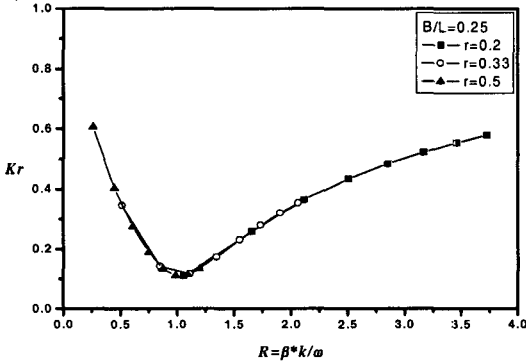


Fig. 9. Reflection coefficient K_r versus rate of wave energy decay R

5. 유속의 연직성분에 의한 에너지 감쇠

Fugazza and Natale(1992)의 해석해와 같이 연직방향 슬릿(slit)형태의 유공방파제를 설정하고, 유공벽에 유속의 연직성분에 의한 에너지 감쇠를 도입한다.

비압축성유체에 대한 유공벽에서의 연속방정식은 식 (13), 운동방정식은 식 (14)와 같다. 연속방정식의 왼쪽, 즉 외해쪽의 유공벽에 에너지 감쇠항($i\delta\Phi_0$)을 추가하고, $x=0$ 에 위치한 유공벽에 다음과 같은 matching condition을 도입한다.

$$\frac{\partial\Phi_0}{\partial x} - i\delta\Phi_0 = \frac{\partial\Phi_1}{\partial x} \quad (13)$$

$$\frac{\partial\Phi_1}{\partial t} - \frac{\partial\Phi_0}{\partial t} - \beta\frac{\partial\Phi_0}{\partial x} - l\frac{\partial^2\Phi_0}{\partial x\partial t} = 0 \quad (14)$$

$x=B$ 에 위치한 불투과성 구조인 뒷벽에서의 연속방정식은 식 (15)와 같이 no-flux 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{\partial\Phi_1}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

여기서

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= a_0 e^{i(kx-wt)} + (c_0 + id_0) e^{i(-kx-wt)} \quad (16) \\ \Phi_1 &= (a_1 + ib_1) e^{i(kx-wt)} + (c_1 + id_1) e^{i(-kx-wt)} \quad (17) \end{aligned}$$

이며 a_0 는 외해에서의 입사파의 진폭으로 주어진 값이며, c_0 와 d_0 는 외해에서의 반사파의 진폭, a_1 과 b_1 은 유수실 내에서의 입사파의 진폭, c_1 과 d_1 은 유수실 내에서의 반사파의 진폭으로 matching condition을 이용하여 결정된다.

입사파 진폭에 대한 반사파 진폭의 비율인 반사율 K_r 은 식 (16)과 (17)을 $x=0$ 에 위치한 유공벽의 연속방정식과 운동방정식, 그리고 $x=B$ 에 위치한 불투과성 구조인 뒷벽에서의 연속방정식에 대입하여 실수부와 허수부로 분리한 다음 수학적 유도과정을 거쳐 식 (18)과 같이 유도하였다. 식 (18)에서 δ 가 0이면 Fugazza and Natale(1992)의 반사율 산정식 식 (7)과 같게 된다.

$$K_r = \frac{\sqrt{(C^2 + W^2)^2 + W^2 R^2 (W^2 R^2 + 2C^2 - 2W^2) + E_D}}{C^2 + W^2 (1 + R)^2} \quad (18)$$

여기서

$$E_D = \frac{\delta^2}{k^2} \frac{\delta^2}{k^2} + 2W^2(1 + R^2 + 4C^2 R^2) - 2C^2 \quad (19)$$

P : 무차원 가속구간의 길이(= lk)

W : 무차원 유수실 폭(= $\tan(kB)$)

$C = 1 - P W$

R : 에너지 감쇠율(= $\beta \left(\frac{k}{w} \right)$)

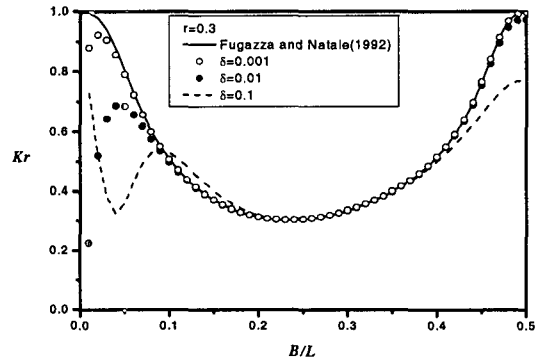


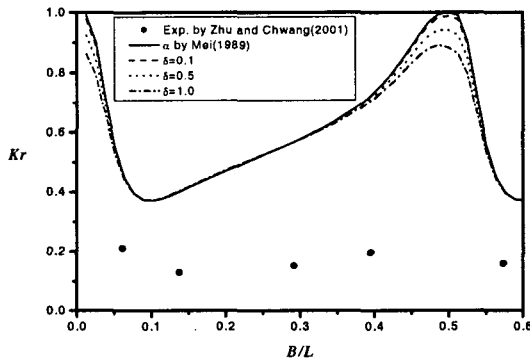
Fig. 10. Reflection coefficient K_r versus relative chamber width B/L

Fig. 10은 Fugazza and Natale(1992)에 제시된 입사파 조건으로 Fugazza and Natale(1992)의 반사율 산정해석해와 유공벽에 유속의 연직성분 w 에 의한 에너지 감쇠를 도입한 경우에 대한 반사율 변화를 나타낸

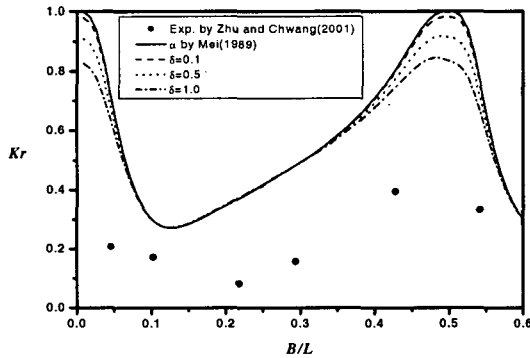
다. $B/L = 0.25$ 이면 유공벽면에서 유속의 연직성분 w 가 0이므로 연직유속에 의한 유공벽에서의 에너지 감쇠가 나타나지 않으므로 기존의 해석해와 반사율이 일치한다. B/L 이 0.25일 때보다 유수실 폭 B 가 커지거나 작아지면 유공벽에 연직유속에 의한 에너지 감쇠를 추가적으로 도입한 경우 에너지 감쇠가 나타나 기존 해석해의 반사율과 차이가 발생한다.

Fig. 11은 Zhu and Chwang(2001)에 제시된 입사파 조건과 Mei(1989)에 의한 에너지 손실계수로 유공벽에 추가적으로 에너지 감쇠를 도입한 경우에 대해 산정한 반사율을 유공벽이 완전히 잠긴 경우에 대한 Zhu and Chwang(2001)의 실험결과와 비교한 것이다. 유체 가속구간의 길이 l 는 사각형 실린더에 대한 차단체수로 계산하였다.

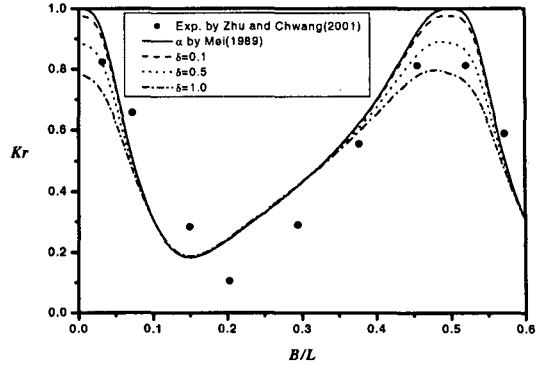
실험결과와 해석결과는 주기가 커질수록 반사율이 작아지고 최소 반사율이 나타나는 B/L 의 위치도 오른쪽으로 이동하는 것을 보여준다. 또한 상대적으로 단파($T = 0.5, 0.6$ sec)의 경우 실험결과에 뚜렷한 경향이 없으나, 장파($T = 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ sec)의 경우 유공벽에서의 w 에 의한 추가적인 에너지 감쇠를 δ 를 조절하여 고려하면 B/L 이 0.0과 0.5 근방에서 실험결과와 비슷한 경향을 나타낸다.



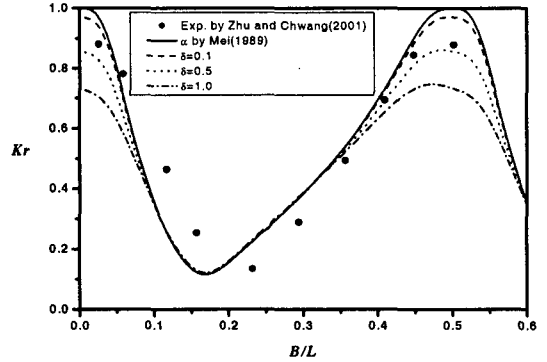
(a) $T = 0.5$ sec



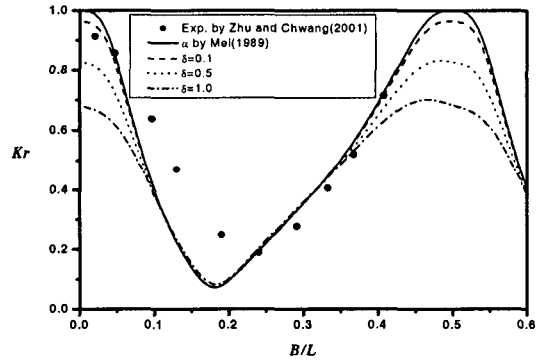
(b) $T = 0.6$ sec



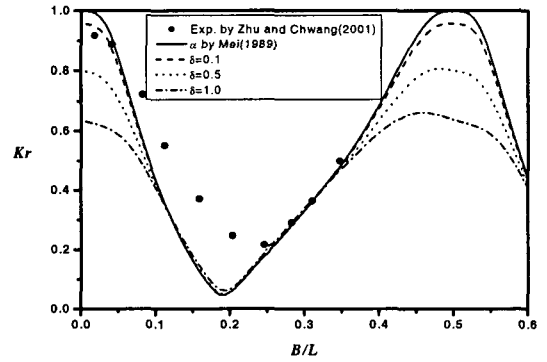
(c) $T = 0.7$ sec



(d) $T = 0.8$ sec



(e) $T = 0.9$ sec



(f) $T = 1.0$ sec

Fig. 11. Reflection coefficient K_r versus relative chamber width B/L

6. 결 론

본 연구에서는 직각 입사파에 대한 Fugazza and Natale(1992)의 반사율 산정 해석해와 Ijima et al.(1978)의 격벽이 없는 경우에 대한 실험결과, Bergmann and Oumeraci(2000)의 대형 수조에서의 실험결과를 비교·분석하여 공극률, 유체 가속구간의 길이, 파고의 변화가 유공벽에서의 반사율과 밀접한 관계가 있음을 확인하였다. 기존의 해석하는 각 요소의 효과를 고려하고 있으나 정량적은 물론 정성적으로도 실제와 차이가 있다. 반사율은 실험실 규모와 유공벽의 모양에 따라 차이가 있고, 유수실 폭을 고정할 경우와 변화시키며 측정할 경우에 따라서도 그 결과가 다르다. 유공벽에 유속의 연직성분에 의한 추가적인 에너지 감쇠를 도입한 결과 상대적으로 장파인 경우는 Zhu and Chwang(2001)의 실험결과와 같은 경향을 나타낸다.

참고문헌

- Bennett, G.S., McIver, P. and Smallman, J.V. (1992). A mathematical model of a slotted wavescreeen breakwater. *Coastal Eng.*, 18, 231-249.
- 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.*, XII (486), 394-398.
- 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, 1258-1271.
- 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, 258.
- 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, 38. (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.
- Twu, S.W. and Lin, D.T. (1991). On a highly effective wave absorber. *Coastal Eng.*, 15, 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, 1231-1248.
- Zhu, S. and Chwang, A.T. (2001). Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall. *Coastal Eng.*, 43, 93-104.