

연직 슬릿 유공벽의 투수계수 계산 방법의 비교

서경덕*·지창환**·김열우***

Comparison of Methods to Calculate Permeability Parameter of Perforated Wall with Vertical Slits

Kyung-Duck Suh*, Chang-Hwan Ji** and Yeul Woo Kim***

Key Words : Perforated Wall(유공벽), Permeability Parameter(투수계수), Vertical Slit(연직슬릿)

Abstract

Mathematical models have been developed to calculate hydrodynamic characteristics of perforated-wall structures. Most of the models separate the fluid regions into front and back of the wall, assume the solution in each region, and calculate the solution by using the matching condition at the wall. The matching condition involves the permeability parameter, which can be calculated by the methods proposed by Mei et al. or Sollitt and Cross. In this study, we compare these two methods. The former is advantageous because all the related variables are known, but it gives wrong result in the limit of long waves, i.e. zero transmission and perfect reflection of very long waves. In deep water, the latter predicts smaller transmission and larger reflection than the former, and vice versa in shallow water. In the latter method, the friction coefficient decreases as the wall thickness or the porosity of the wall increases.

1. 서론

최근 유공방파제, 커튼월-파일 방파제, 투수식 소파관 방파제 등 연직 슬릿 유공벽을 포함하는 방파 구조물이 많이 이용되고 있다. 이에 따라 유공벽에서의 파의 반사, 투과, 파력 등 수리 특성을 계산하기 위한 수학적 모형들이 개발되어져 왔다. 대부분의 모형들은 유공벽 전후로 유체 영역을 분리하여 각 영역에서의 해를 가정하고 유공벽에서의 정합조건을 이용하여 해를 구하는 방법을 사용하고 있다. 유공벽에서의 정합조건을 나타내는 계수로서 투수계수(Permeability parameter)가 사용되는데, 이를 계산하는 방법으로 Mei 등[1]의 방법과 Sollitt와 Cross[2]의 방법이 주로 사용된다. 본 연구에서는 이 두 방법의 장단점 및 문제점 등을 비교, 분석한다.

2. 수학적 모형

Fig. 1에 나타난 연직 슬릿 유공벽을 생각한다. 여기서, h 는 수심, b 는 유공벽의 두께이다. 방파제로부터 파의 진행방향으로 x 의 양의 방향, 정수면으로부터 연직 상방으로 z 의 양의 방향이 되도록 직교좌표계 (x, z) 를 잡는다. 두 인접한 부재의 중심간의 거리를 $2A$, 슬릿의 폭을 $2a$ 로 하여 유공율이 $r = a/A$ 가 되도록 한다. 파고 H_i 의 규칙파가 x 의 양의 방향으로 입사한다. 유체 영역을 영역 1($x \leq 0$)과 영역 2($x \geq 0$)로 나눈다.

비압축성 유체와 비회전성 운동을 가정하면, Laplace 방정식을 만족시키는 속도 포텐셜이 존재한다. 자유수면 경계조건을 선형화 시키면, 속도 포텐셜 $\Phi(x, z, t)$ 에 대한 경계치 문제를 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 \quad \text{at } z = 0 \quad (2)$$

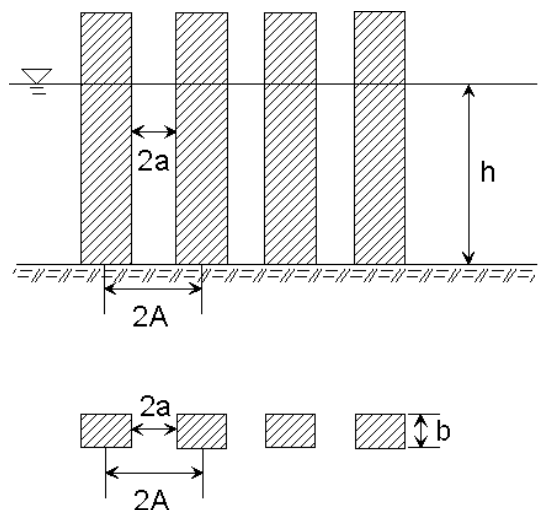


Fig. 1. Definition sketch of a perforated wall with vertical slits: (upper) front view; (lower) top view.

* 서울대학교 건설환경공학부, kdsuh@snu.ac.kr

** 서울대학교 건설환경공학부, hokma1@snu.ac.kr

*** 서울대학교 건설환경공학부,

bigland7@snu.ac.kr

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = -h \quad (3)$$

여기서 ω 는 파의 각주파수이고, g 는 중력가속도이다. 시간 t 에 대한 주기운동을 가정하면, 위 문제에 대한 해를 다음과 같이 가정할 수 있다:

$$\Phi(x, z, t) = \text{Re} \left\{ -\frac{igH_i}{2\omega} \frac{1}{\cosh(kh)} \phi(x, z) \exp(-i\omega t) \right\} \quad (4)$$

여기서 $i = \sqrt{-1}$ 이며, Re 는 복소수의 실수부를 나타낸다. 파수 k 는 분산관계식 $\omega^2 = gk \tanh(kh)$ 를 만족시켜야 한다. 각 영역에서 속도 포텐셜의 공간적 변화를 나타내는 $\phi(x, z)$ 를 계산해야 한다. 유공벽 근처에서의 유체 운동의 길이 스케일이 파장으로 나타내지는 원역에서의 길이 스케일에 비해 훨씬 작다고 가정하면, 수학적으로 유공벽의 두께를 영이라고 가정할 수 있다. 그러면 $\phi_1(x, z)$ 와 는 $x = 0$ 에서 다음의 정합조건을 만족시켜야 한다:

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = iG(\phi_1 - \phi_2) \quad \text{at } x = 0 \quad (5)$$

여기서 침자는 유체 영역을 나타낸다. 이 정합조건은 두 영역에서의 수평 질량 플럭스(또는 수평 유속)가 유공벽의 위치에서 같아져야 함을 나타내며, 또한 슬릿에서의 수평 유속이 유공벽 양쪽의 속도 포텐셜의 차이, 즉 압력차에 비례한다는 것을 나타낸다. 투수계수라 불리는 비례상수 G 는 일반적으로 복소수이다. 경계치 문제 (1)–(3)은 각 영역에서의 해를 다음과 같이 무한급수해로 표시하여 고유함수 전개법을 이용하여 풀 수 있다 (예로서 Isaacson 등[3]):

$$\phi_1 = \phi_i - \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos[\mu_m(h+z)] \exp(\mu_m x) \quad (6)$$

$$\phi_2 = \phi_i + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos[\mu_m(h+z)] \exp(-\mu_m x) \quad (7)$$

여기서 $\phi_i = \cosh[k(h+z)] \exp(ikx)$ 는 입사파 속도 포텐셜이며, 파수 μ_m 은 분산관계식 $\omega^2 = -g\mu_m \tan(\mu_m h)$ 의 해이다. 식 (6)과 (7)은 자유수면 경계조건 (2)와 바닥 경계조건 (3)을 만족시킨다. 식 (6)과 (7)을 정합조건 (5)에 대입하고 수직적분하면 계수 A_m 에 대한 행렬 방정식을 얻을 수 있다. 이 행렬 식을 풀면 반사율과 투과율은 다음과 같이 주어진다:

$$C_r = |A_0| \quad (8)$$

$$C_t = |1 + A_0| \quad (9)$$

에너지 손실율은 다음과 같이 나타내지며

$$C_i = 1 - C_r^2 - C_t^2 \quad (10)$$

이는 입사파 에너지 중 유공벽에 의해 소산되는 에너지의 비율을 나타낸다.

3. 투수계수의 계산

식 (5)는 유공벽에 직각 방향의 유속이 복소수 비례상수에 의해 유공벽 양쪽의 압력차에 비례한다는 것을 나타낸다. 투수계수 G 의 물리적 의미를 설명하기 위하여 식 (5)를 다음과 같이 나타낸다:

$$\phi_2 = \phi_1 + \frac{i}{G} \frac{\partial \phi_1}{\partial x}, \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad \text{at } x = 0 \quad (11)$$

그러면, i/G 의 실수부는 관성 효과에 의한 유속과 압력 사이의 위상 차와 관계되며, 허수부는 유공벽에서의 저항에 해당된다.

투수계수를 계산하는 방법은 몇 가지가 있다. Mei 등[1]은 저항과 관성 효과를 각각 수두손실계수 및 유효 오리피스 길이로 나타내었다. 한편, Sollitt와 Cross[2]는 이들을 마찰계수 및 부가질량계수로 각각 나타내었다. Mei 등[1]에 기초한 투수계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$G = \frac{1}{\frac{\beta}{\omega} - i\ell} \quad (12)$$

여기서 β 는 운동방정식의 비선형 이류가속도 항을 선형화 하여 유도되는 에너지 소산 계수이며, ℓ 은 유효 오리피스 길이로서 유공벽을 통해 발생하는 제트의 길이이다.

연직 슬릿 유공벽에 대한 에너지 소산 계수는 Kim[4]에 의해 다음과 같이 주어진다:

$$\beta = \frac{8\alpha}{9\pi} H_i \omega \frac{1}{\sqrt{(R+2)^2 + P^2}} \frac{5 + \cosh(2kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \quad (13)$$

여기서 $P = \ell k$, $R = \beta k / \omega$ 이며, α 는 수두손실계수이다. 위 식을 다시 정리하면 β 에 대한 5차 방정식이 되며, eigenvalue 방법으로 풀 수 있다. Suh 등[5]은 유효 오리피스 길이 ℓ 이 차단계수 C 와

$$\ell = 2C \quad (14)$$

의 관계가 있음을 보였으며, Flagg와 Newman[6]은 다음과 같은 차단계수 식을 제안하였다:

$$C = \frac{b}{2} \left(\frac{1}{r} - 1 \right) + \frac{2A}{\pi} \left[1 - \log(4r) + \frac{1}{3} r^2 + \frac{281}{180} r^4 \right] \quad (15)$$

수두손실계수 α 는 평판 오리피스 공식(Mei[7])에 의해 다음과 같이 주어진다:

$$\alpha = \left(\frac{1}{r C_e} - 1 \right)^2 \quad (16)$$

여기서 C_e 는 경험 수축계수로서, Mei 등[1]은 다음 공식을 사용할 것을 제안하였다:

$$C_e = 0.6 + 0.4r^2 \quad (17)$$

Sollitt와 Cross[2]에 기초한 투수계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$G = \frac{r}{b(f - is)} \quad (18)$$

여기서 f 는 마찰계수이며, s 는 관성계수로서

$$s = 1 + C_m \frac{1-r}{r} \quad (19)$$

로 주어지며, C_m 은 부가질량계수이다.

4. 투수계수 계산 방법의 비교

식 (12)–(17)로 나타내지는 Mei 등[1]의 방법은 입사파의 파고, 주기, 유공벽의 기하학적 변수 등 투수계수 계산에 필요한 모든 관련 변수들을 알고 있다는 점에서 유리하다. 반면에, Sollitt와 Cross[2]의 방법에서는, 마찰계수와 부가질량계수를 사전에 알 수 없기 때문에 관측치와 계산치를 가장 잘 일치시키는 값들을 찾아내야 한다. Sollitt와 Cross[2], Losada 등[8], Yu[9], Isaacson 등[3], Zhu와 Chwang[10], Hossain 등[11] 많은 연구자들은 투과성 구조물의 반사율 및 투과율에 대한 실험치와 계산치의 비교를 통하여 $C_m = 0$, 즉 $s = 1$ 의 값을 사용할 것을 제안하였다. 최근에 Li 등[12]은 마찰계수가 유공벽의 두께와 수심에 관련이 있음을 제안하였다.

Mei 등[1]의 방법은 장파에 대하여 틀린 결과를 나타낸다. 식 (13)에서 보듯이, kh 가 영으로 감에 따라, β 가 무한대가 되어, 장파의 에너지가 완전히 소산됨을 나타낸다. 이는 장파의 경우 파의 투과가 전혀 발생하지 않음을 의미하는데, 물리적으로 장파는 방파제를 전혀 감지하지 못하고 완전 투과가 발생하게 되므로, 이는 절대적으로 틀린 결과이다.

본 연구에서는 투수계수 계산에 Mei 등[1]의 방법과 Sollitt와 Cross[2]의 방법을 사용하여 반사율과 투과율, 에너지 손실율을 계산하고, 두 방법을 사용한 결과가 근접하도록 하는 마찰계수를 구하였다. 이렇게 구한 마찰계수가 유공벽의 두께, 유공율 등과 어떠한 관계를 갖는지를 고찰하였다.

수심 h 는 2.4 m로 일정하게 하였다. 유공벽의 두께와 유공율의 영향을 검토하기 위하여, 유공벽의 두께 b 를 7.2, 14.4, 21.6 cm로 변화시켜서 $b/h = 0.03, 0.06, 0.09$ 가 되도록 하였으며, 각각의 b/h 값에 대하여 $A = 14.4$ cm로 일정하게 유지하면서 a 를 1.44, 3.6, 7.2 cm로 변화시켜서 $r = 0.1, 0.25, 0.5$ 가 되도록 하였다.

Fig. 2는 $b/h = 0.06, r = 0.25$ 인 경우 두 가지 투수계수 계산 방법을 사용하여 계산한 투과율, 반사율, 에너지 손실율을 상대수심 kh 의 함수로 나타낸 것이다. 이 경우 두 결과가 근접하도록 하는 마찰계수는 $f = 1.0$ 이다. 앞에서 언급한 바와 같이 Mei 등의 방법은 장파로 갈수록 (즉, kh 가 영에 가까이 갈수록) 투과율은 작아지고 반사율은 증가하는 틀린 결과를 나타낸다. 일반적으로 심해 영역에서는 Sollitt와 Cross의 방법이 Mei 등의 방법보다 투과율은 작게, 반사율은 크게 계산하고 있으며, 천해 영역에서는 그 반대가 된다. 유공벽의 두께, 유공율 등 유

공벽의 기하학적 변수가 달라지더라도 이러한 경향은 그대로 유지된다.

유공벽의 기하학적 변수들을 달리 하면서 Mei 등의 방법과 Sollitt와 Cross의 방법을 이용하여 계산한 수리학적 계수들이 잘 일치하도록 하는 마찰계수를 구하여 Table 1에 제시하였다. 유공벽의 두께가 커짐에 따라 마찰계수가 작아지며, 유공율이 커짐에 따라 마찰계수가 작아진다.

Fig. 3과 Fig. 4는 마찰계수 f 를 b/h 또는 유공율 r 의 함수로 나타낸 것이다. b/h 와 r 이 증가함에 따라서 마찰계수 f 는 작아지는 경향을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 하나의 b/h 와 r 에서도 여러 개의 마찰계수 값을 가지게 되므로, 마찰계수는 b/h 또는 r 의 함수로만 표현하는 것에는 무리가 있다.

Fig. 5는 마찰계수 f 를 b/h 와 r 을 곱한 형태인 br/h 의 함수로 나타낸 것이며 br/h 가 증가함에 따라서 마찰계수가 작아지는 경향을 가지고 있다. 위의 Fig. 4와 Fig. 5에 비해서 보다 일정한 경향을 가지고 있으며, 추세선과 잘 일치하고 있다.

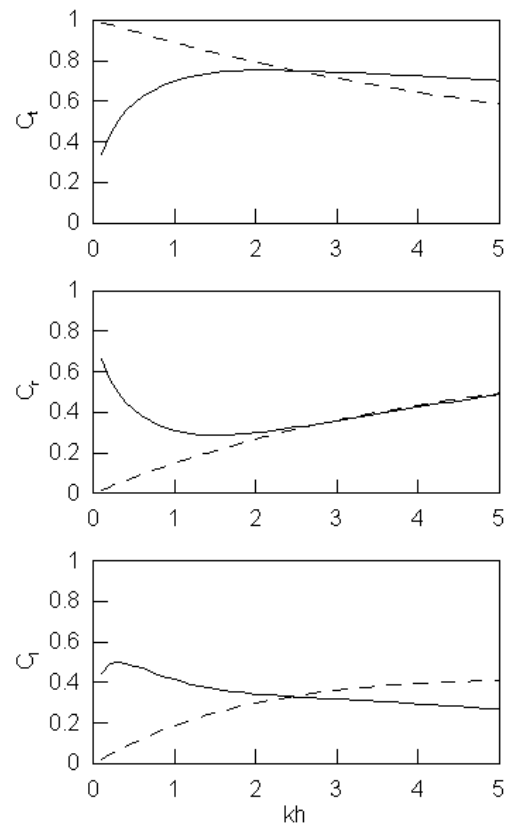


Fig. 2. Comparison of hydrodynamic coefficients calculated with the permeability parameters of Mei et al.[1] (solid lines) and Sollitt and Cross[2] (dashed lines); $b/h = 0.06, r = 0.25$, and $f = 1.0$ was used.

Table 1. Friction coefficient giving good concurrence between the hydrodynamic coefficients calculated by using Mei et al.'s method and Sollitt and Cross's method.

	$r = 0.1$	$r = 0.25$	$r = 0.5$
$b/h = 0.03$	3.3	2.0	1.0
$b/h = 0.06$	1.8	1.0	0.3
$b/h = 0.09$	1.0	0.6	0.15

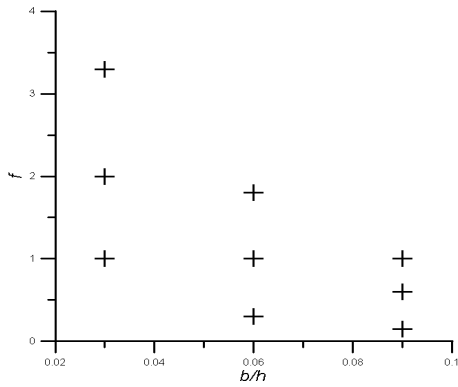


Fig. 3. Relationship between b/h and f .

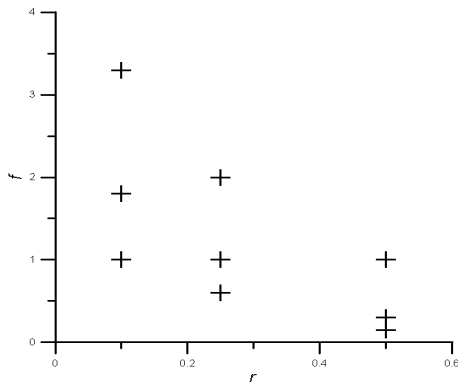


Fig. 4. Relationship between r and f .

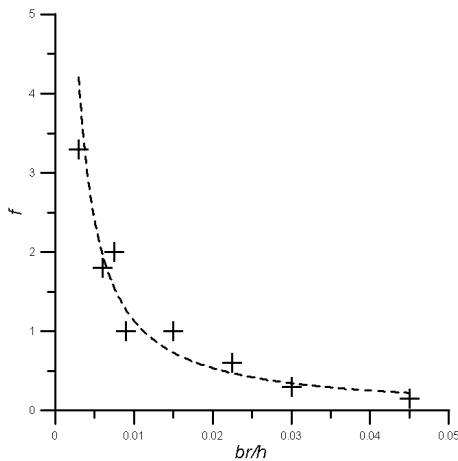


Fig. 5. Relationship between br/h and f .

4. 결론

본 연구에서는 연직 슬릿 유공벽의 투수계수를 계산하기 위해 제안된 Mei 등[1]의 방법과 Sollitt와 Cross[2]의 방법을 비교, 분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

(1) Mei 등의 방법은 입사파의 파고 및 주기, 유공벽의 기하학적 변수들로부터 투수계수를 직접 계산할 수 있다. 반면에, Sollitt와 Cross의 방법에서는 반사율, 투과율 등 수리학적 특성들의 실험치와 계산치를 플롯팅 하여 이들이 잘 일치하도록 하는 마찰계수를 시행착오법으로 구해야 한다.

(2) Mei 등의 방법은 장파 영역에서 파고 대부분 반사되고 투과가 거의 일어나지 않는다는 잘못된 결과를 준다. 따라서 장파에 대해서는 이 방법을 사용해서는 안 된다.

(3) 심해 영역에서는 Sollitt와 Cross의 방법이 Mei 등의 방법보다 투과율은 작게, 반사율은 크게 계산하고 있으며, 천해 영역에서는 그 반대가 된다.

(4) Sollitt와 Cross 방법에서의 마찰계수는 유공벽의 두께가 커짐에 따라 작아지며, 유공율이 커짐에 따라 작아진다. 유공벽의 기하학적 변수들과 마찰계수 사이의 관계에 대한 실험적 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 해양한국발전프로그램(KSGP) 연구개발사업과 해양수산연구개발과제인 '항만구조물 신뢰성 설계법 개발' 과제의 지원을 받았음.

참고문헌

- [1] Mei, C.C., Liu, P.L.-F., Ippen, A.T., Quadratic loss and scattering of long waves, J. Waterw., Harbors Coastal Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 100 (1974), pp. 217-239.
- [2] Sollitt, C.K., Cross, R.H., Wave transmission through permeable breakwaters, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., 3 (1972), pp. 1827-1846.
- [3] Isaacson, M., Premasiri, S., Yang, G., Wave interactions with vertical slotted barrier, J. Waterw., Port, Coastal Ocean Eng., 124 (1998), pp. 118-126.
- [4] Kim, B.H., Interactions of waves, seabed and structures, PhD dissertation, Seoul National Univ., Seoul, Korea (1998).
- [5] Suh, K.D., Son, S.Y., Lee, J.I., Lee, T.H., Calculation of irregular wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters using a regular wave model, Proc. 28th Coastal Eng. Conf., 3 (1972), pp. 1709-1721.
- [6] Flagg, C.N., Newman, J.N., Sway added-mass coefficients for rectangular profiles in shallow water, J. Ship Res., 15 (1971), pp. 257-265.
- [7] Mei, C.C., The applied dynamics of ocean surface waves, Wiley, New York (1983).
- [8] Losada, I.J., Losada, M.A., Baquerize, A., An analytical method to evaluate the efficiency of porous screens as wave dampers, Applied Ocean Res., 15 (1993), pp. 207-215.
- [9] Yu, X., Diffraction of water waves by porous breakwaters, J. Waterw., Port, Coastal Ocean Eng., 121 (1995), pp. 275-282.
- [10] Zhu, S., Chwang, A.T., Analytical study of porous wave absorber, J. Eng. Mech., 127 (2001), pp. 326-332.
- [11] Hossain, A., Kioka, W., Kitano, T., Transmission of long waves induced by short-wave groups through a composite breakwater, Coastal Eng. J., 43 (2001), pp. 83-97.
- [12] Li, Y., Liu, Y., Teng, B., Porous effect parameter of thin permeable plates, Coastal Eng. J., 48 (2006), pp. 309-336.