

깊이가 유한한 다중 투수층 위에서의 파의 감쇠율 Wave Damping Rate Over Multi-layer Permeable Bed of Finite Depth

서경덕* · 도기덕**
Kyung-Duck Suh* and Ki Deok Do**

요 지 : Reid and Kajiura(1957)은 해저면에 무한한 깊이의 투수층이 존재할 경우의 파의 감쇠율을 유도하였다. 본 연구에서는 유한한 깊이의 투수층이 존재할 경우의 파의 감쇠율을 선형파이론을 이용하여 유도하였다. 그리고 이를 확장하여 해저면에 재질이 다른 2 층 또는 3 층의 투수층이 존재할 경우에 파의 감쇠율을 제시하였다. 다음으로 이를 환경사 방정식에 적용하여, 해저면에 투수층이 존재할 경우의 파의 투과율을 계산하였으며, 1층 투수층이 존재할 경우의 수치계산결과를 Flaten and Rygg(1991)의 적분식 방법과 비교하여 검증하였다.

핵심용어 : 파의 감쇠율, 투수층, 투과율, 선형파이론

Abstract : Reid and Kajiura(1957) has studied on the wave damping rate over a permeable bed of infinite depth. In this study, wave damping rate over a permeable bed of finite depth is derived by linear wave theory. It is then extended to derive wave damping rates over a double or triple layer, each of which consist of different material. Applying the wave damping rate to the mild slope equation, the wave transmission coefficient over a permeable bed has been calculated. The model has been verified by comparing with the result of Flaten and Rygg(1991)'s integral equation method in the case of a single-layer bed.

Keywords : wave damping rate, permeable bed, transmission coefficient, linear wave theory

1. 서 론

Reid and Kajiura(1957)는 바닥에 무한한 깊이를 가진 투수층이 존재할 경우에 파의 감쇠율을 투수층 내에서의 흐름이 Darcy의 법칙을 따른다고 가정하여 유도하였다. Liu and Dalrymple(1984)은 투수층의 깊이가 유한한 경우에 적용이 가능한 파의 감쇠율을 투수층 내에서의 흐름을 Dagan(1979)의 식으로 표현하여 유도하였다. Dagan(1979)의 식은 경계층으로 인한 파의 감쇠를 고려할 수 있는 형태이나, 이로 인한 파의 감쇠는 매우 적다. 위의 두 연구에서 투수층 내에서의 유체흐름을 표현하기 위하여 사용한 Darcy의 법칙과 Dagan(1979)의 식은 유속이 커서 난류흐름을 가지는 경우에는 적용이 불가능하다. 그리하여 Gu and Wang(1991)과 Rojanakamthorn et al.(1990) 등의 연구자들은 Sollitt and Cross(1972)가 제시한 식으로 투수층 내에서의 유체흐

름을 표현하여, 분산관계식과 파의 감쇠율을 유도하였다. 또한 Silva et al.(2002)은 Green의 2차 정리를 이용하여 유한한 깊이의 투수층이 바닥에 존재할 경우에 적용이 가능한 환경사 방정식을 직접 유도하였다. 그리고 이창훈 등(2007)은 투수층이 다층일 경우에 적용이 가능한 환경사 방정식을 Green의 2차 정리를 이용하여 유도하였다. 본 연구에서는 이창훈 등(2007)의 연구와 같이 투수층이 다층일 경우에 발생하는 파랑변형을 예측하였다. 본 연구에서는 이창훈 등(2007)의 연구와는 달리 선형파 이론을 이용하여 파의 감쇠율을 유도한 후, 이를 확장형 환경사 방정식에 적용하여 파랑변형을 해석하였다.

본 연구에서는 투수층 내에서의 유체흐름이 작다고 가정하여 Darcy의 법칙을 통해 표현하였다. Darcy의 법칙은 공극이 큰 자갈 같은 재질에서는 유속이 비교적 큰 난류흐름이므로 적용이 부적합하다. 이러한 경우에는 투수층 내에

*서울대학교 건설환경공학부(Corresponding author : Kyung-Duck Suh, Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea, kdsuh@snu.ac.kr)

**서울대학교 건설환경공학부(Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University)

서의 유체흐름을 Sollitt and Cross(1972)의 식이나 van Gent(1995)의 식으로 표현하여야 한다. Sollitt and Cross(1972)에서는 마찰계수 f 가 사용되는데, 이 값을 구하기 위해서는 투수층의 재질의 특성인 공극률과 투수계수뿐만 아니라 투수층 내에서의 유속이 필요한 단점을 가지고 있다. 그리고 van Gent(1995)의 식은 비선형항을 포함하고 있어서, 파의 감쇠율을 유도하는 데 많은 어려움을 가지고 있다. 이런 이유로 본 연구에서는 투수층 내에서의 유체흐름을 Darcy의 법칙을 통해 표현하였다. 그리고 선형파이론(Linear Wave Theory)를 이용하여 유한한 깊이의 투수층이 바닥에 존재할 경우의 파의 감쇠율을 유도하였다. 그리고 이를 확장하여 재질이 다른 2 개 또는 3 개의 투수층이 바닥에 존재할 경우의 파의 감쇠율을 유도하였다. 마지막으로 본 연구에서 구한 파의 감쇠율을 확장형 환경사 방정식에 적용하여, 해저면에 유한한 깊이의 투수층이 존재할 경우의 파의 투과율을 계산하였다. 투수층이 1개인 경우에는 Flaten and Rygg(1991)의 적분식 모형과 비교하여 모형을 검증하였다.

2. 파의 감쇠율 유도

2.1 1층 투수층

Fig. 1은 바닥에 유한한 깊이를 가진 1개의 투수층 존재할 경우의 모형도이다. 이 그림에서 z 는 정수면을 기준으로 연직 상방으로 양이 되는 연직좌표이며, 파는 수평 좌표 x 의 양의 방향으로 진행한다. 그리고 h 와 d 는 각각 수심과 투수층의 깊이를 나타낸다. 한편, Ω_1 과 Ω_2 는 각각 유체영역과 투수층을 나타낸다. 투수층은 완전포화상태로 생각할 수 있으므로, 다음과 같은 연속방정식을 만족시킨다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

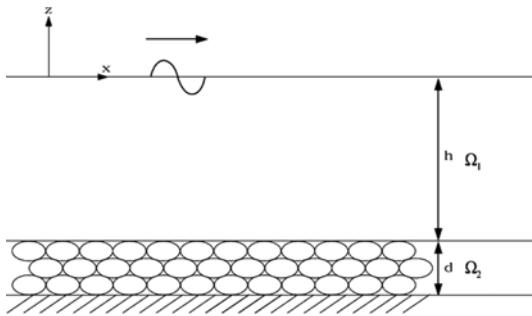


Fig. 1. Definition sketch of porous bottom of finite depth.

여기서, ∇ 는 3차원 미분 연산자이다. 투수층 내에서의 유속 \vec{u} 는 다음과 같은 Darcy의 법칙을 따른다고 가정한다.

$$\vec{u} = -\frac{K}{\mu} \nabla p_2 \quad (2)$$

여기서, K 는 투수계수, μ 는 점성계수, p_2 는 투수층 내에서의 압력이다. 식 (1)과 (2)로부터 투수층 내에서의 압력 p_2 는 다음과 같은 Laplace 방정식을 만족시킴을 알 수 있다.

$$\nabla^2 p_2 = 0 \quad (3)$$

유체영역의 속도포텐셜 ϕ_1 과 투수층에서의 압력 p_2 는 바닥면에서의 경계조건과 파의 주기성을 고려하여 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\phi_1(x, z, t) = [A \cosh k(h+z) + B \sinh k(h+z)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (4)$$

$$p_2(x, z, t) = [C \cosh k(h+z+d) + D \sinh k(h+z+d)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (5)$$

여기서, k 는 파수, σ 는 각주파수이다. 각각의 경계조건과 정합조건을 사용하면, 식 (4)와 (5)의 계수 A, B, C, D 를 결정할 수 있으며, 또한 분산관계식을 구할 수 있다. 투수층의 바닥경계조건은 다음과 같다.

$$w_2 = 0 \text{ at } z = -h-d \quad (6)$$

유체와 투수층의 경계($z=-h$)에서 압력과 유속이 연속이어야 함을 의미하는 동역학적 경계조건과 운동학적 경계조건은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = g\eta \text{ at } z = -h \quad (7)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi_1}{\partial z} \text{ at } z = -h \quad (8)$$

여기서, $\eta(x, t)$ 는 정수면으로부터 자유수면까지의 연직거리이다. 위의 경계조건과 유체와 투수층의 경계면에서의 정합조건을 이용하면, 식 (4)와 (5)의 계수 A, B, C, D 를 구할 수 있다.

$$A = \frac{C \cosh kd}{-i\rho\sigma} \quad (9)$$

$$B = \frac{K}{\mu} C \sinh kd \quad (10)$$

$$C = \rho g a \left(\cosh kd \cosh kh - i \frac{\sigma K}{\nu} \sinh kd \sinh kh \right)^{-1} \quad (11)$$

$$D = 0 \quad (12)$$

여기서, ν 는 유체의 동점성계수이다. 식 (9)-(12)에서 구한 계수를 식 (8)에 대입하면, 다음과 같은 분산관계식을 얻을 수 있다.

$$\sigma^2 - gk \tanh kh = -iR(gk - \sigma^2 \tanh kh) \tanh kd \quad (13)$$

여기서, $R = \sigma K / \nu$ 이다. 식 (13)은 복소수 형태이므로, 이 식을 만족하기 위해서 파수 k 는 다음과 같은 복소수 형태를 가져야 한다.

$$k = k_r + ik_i \quad (14)$$

파수 k 의 실수부분인 k_r 은 파장과 관계가 있으며, 허수부분인 k_i 는 투수층으로 인한 파의 감쇠율을 의미한다. 상대수심이 크지 않은 천해영역과 중간수심영역에서 $k_r h$ 의 값은 그리 크지 않으므로, 다음과 같은 식의 전개가 가능하다.

$$\tanh kh = \frac{\tanh k_r h + i \tanh k_i h}{1 + i \tanh k_r h \tanh k_i h} \approx \frac{\tanh k_r h + ik_i h}{1 + i \tanh k_r h k_i h} \quad (15)$$

식 (14)와 (15)를 식 (13)에 대입하고, $(Rk_i, (k_i)^2, k_i h) \ll 1$ 를 가정하여 식을 전개하면, 다음과 같이 정리된다.

$$\sigma^2 = gk_r \tanh k_r h \quad (16)$$

$$k_i = \frac{2Rk_r}{2k_r h + \sinh 2k_r h} \tanh k_r d \quad (17)$$

식 (16)은 식 (13)의 실수부를 정리한 것이며, 식 (17)은 식 (13)의 허수부를 정리한 것이다. 식 (17)은 바닥에 1층 투수층이 존재할 경우의 파의 감쇠율을 의미하며, 투수층의 깊이가 무한대로 커질 경우에는 Reid and Kajiura(1957)의 식과 같은 형태를 가진다. 투수층의 깊이와 상대수심에 따른 파의 감쇠율을 나타낸 것이 Fig. 2이다. Fig. 2를 살펴보면 심해영역에서는 투수층의 두께가 파의 감쇠율에 미치는 영향이 거의 없으며, 천해영역으로 갈수록 투수층의 두께가 파의 감쇠율에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있다.

2.2 2층 투수층

바닥에 유한한 깊이를 가진 투수층이 2층으로 존재할 경우에 파의 감쇠율을 유도하는 과정은 2.1절과 유사하다. 유체영역의 속도포텐셜 ϕ_1 과 첫 번째 투수층에서의 압력 p_2 ,

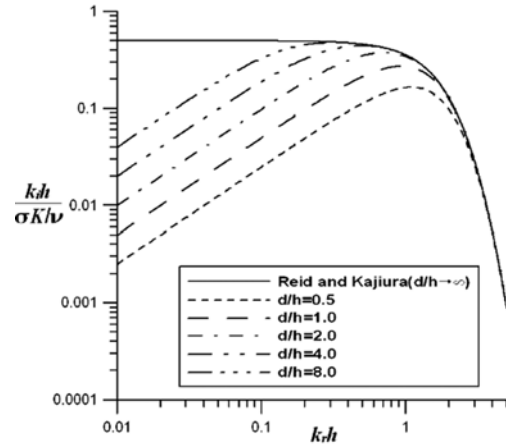


Fig. 2. Dimensionless damping coefficient versus relative depth.

두 번째 투수층에서의 압력 p_3 는 바닥에서의 경계조건과 파의 주기성을 고려하여 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\phi_1(x, z, t) = [A \cosh k(h+z) + B \sinh k(h+z)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (18)$$

$$p_2(x, z, t) = [C \cosh k(h+z+d_1) + D \sinh k(h+z+d_1)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (19)$$

$$p_3(x, z, t) = [E \cosh k(h+z+d_1+d_2) + F \sinh k(h+z+d_1+d_2)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (20)$$

여기서, d_1 은 첫 번째 투수층의 두께이며, d_2 는 두 번째 층의 두께이다. K_1 과 K_2 는 첫 번째와 두 번째 투수층의 투수계수이다. 식 (18)-(20)에서의 계수와 분산관계식은 2.1절과 같이 경계조건과 정합조건을 이용하면 구할 수 있다. 식 (21)은 2층 투수층이 바닥에 존재할 경우의 분산 관계식이다.

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1} \tanh kd_1 \tanh kd_2 \right) (\sigma^2 - gk \tanh kh) = -i(R_1 \tanh kd_1 + R_2 \tanh kd_2) (gk - \sigma^2 \tanh kh) \quad (21)$$

여기서, $R_1 = \sigma K_1 / \nu$, $R_2 = \sigma K_2 / \nu$ 이다. 2.1절과 같은 방법으로 식 (21)을 풀면, 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\sigma^2 = gk_r \tanh k_r h \quad (22)$$

$$k_i = \frac{R_1 \tanh k_r d_1 + R_2 \tanh k_r d_2}{1 + \frac{R_2}{R_1} \tanh k_r d_1 \tanh k_r d_2} \frac{2k_r}{2k_r h + \sinh 2k_r h} \quad (23)$$

식 (23)은 바닥에 재질이 다른 2개의 투수층이 존재할 경

우의 파의 감쇠율이다. 식 (23)에서 각각의 투수층의 재질을 나타내는 투수계수를 같은 값으로 하고, 투수층의 두께를 $d_1 = d_2 = 0.5d$ 로 하여, 식을 연산하면 바닥면에 1개의 투수층이 존재할 경우의 파의 감쇠율인 식 (17)을 얻을 수 있다. 그리고 식 (23)에서 두 번째 투수층을 불투수층 또는 두께가 0인 경우를 생각하면, 식 (23)은 식 (17)과 같이 한 개의 투수층이 바닥면에 존재할 경우의 파의 감쇠율과 같은 결과를 제시한다.

2.3 층 투수층

바닥에 유한한 깊이를 가진 투수층이 3 층으로 존재할 경우의 파의 감쇠율을 유도하는 과정은 2.1절과 유사하다. 유체영역의 속도포텐셜 ϕ 과 첫 번째 투수층에서의 압력 p_2 , 두 번째 투수층에서의 압력 p_3 , 그리고 세 번째 투수층에서의 압력 p_4 는 바닥에서의 경계조건과 파의 주기성을 고려하여 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\phi_1(x, z, t) = [A \cosh k(h+z) + B \sinh k(h+z)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (24)$$

$$p_2(x, z, t) = [C \cosh k(h+z+d_1) + D \sinh k(h+z+d_1)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (25)$$

$$p_3(x, z, t) = [E \cosh k(h+z+d_1+d_2) + F \sinh k(h+z+d_1+d_2)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (26)$$

$$p_4(x, z, t) = [G \cosh k(h+z+d_1+d_2+d_3) + H \sinh k(h+z+d_1+d_2+d_3)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (27)$$

여기서, d_1 과 d_2 , 그리고 d_3 는 각 투수층의 두께이며, K_1 과 K_2 , 그리고 K_3 는 각 투수층의 투수계수이다. 식 (24)-(26)에서의 계수와 분산관계식은 2.1절과 같이 경계조건과 정합조건을 이용하면 구할 수 있다. 식 (28)은 3층 투수층이 바닥면에 존재할 경우의 분산관계식이다.

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \tanh k d_2 \tanh k d_3 + \frac{R_2}{R_1} \tanh k d_1 \tanh k d_2 \right. \\ & \left. + \frac{R_3}{R_1} \tanh k d_1 \tanh k d_3 \right) (\sigma^2 - g k \tanh k h) \\ & = -i(R_1 \tanh k d_1 + R_2 \tanh k d_2 + R_3 \tanh k d_3 \\ & + R_1 \frac{R_3}{R_2} \tanh k d_1 \tanh k d_2 \tanh k d_3)(g k - \sigma^2 \tanh k h) \quad (28) \end{aligned}$$

여기서, $R_1 = \sigma K_1 / v$, $R_2 = \sigma K_2 / v$, $R_3 = \sigma K_3 / v$ 이다. 2.1절과 같은 방법으로 식 (28)을 풀면, 다음과 같은 식을 유도할 수

있다.

$$\sigma^2 = g k_r \tanh k_r h \quad (29)$$

$$k_r = \frac{2k_r}{2k_r h + \sinh 2k_r h} \frac{R_1 \tanh k_r d_1 + R_2 \tanh k_r d_2 + R_3 \tanh k_r d_3 + R_1 \frac{R_3}{R_2} \tanh k_r d_1 \tanh k_r d_2 \tanh k_r d_3}{1 + \frac{R_3}{R_2} \tanh k_r d_2 \tanh k_r d_3 + \frac{R_2}{R_1} \tanh k_r d_1 \tanh k_r d_2 + \frac{R_3}{R_2} \tanh k_r d_2 \tanh k_r d_3} \quad (30)$$

3. 확장형 완경사 방정식에 적용

Berkhoff(1972)는 파의 굴절과 회절, 그리고 천수를 동시에 고려할 수 있는 완경사 방정식을 제시하였다. Booij(1981)는 완경사 방정식에 쇄파에 의한 에너지 소산을 고려할 수 있는 항을 추가한 식을 제안하였는데, 식의 형태는 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \phi) + (C C_g k^2 + i C_g \sigma \gamma) \phi = 0 \quad (31)$$

여기서, C 는 파속, C_g 는 군속도이며, γ 가 포함된 항은 수심에 따른 쇄파 소산을 고려할 수 있는 항이다. 본 연구에서는 Booij(1981)가 제시한 식(31)의 γ 를 2장에서 유도한 투수층으로 인한 파의 감쇠현상 대체하여, 투수층이 존재하는 경우의 파의 감쇠현상을 해석하였다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같은 형태이다.

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \phi) + (C C_g k_r^2 + i C_g \sigma k_i) \phi = 0 \quad (32)$$

식 (32)는 바닥경사가 완만한 지형에서만 적용이 가능하다. 이를 바닥 지형의 변화가 큰 경우에 적용하기 위해서는 바닥경사의 제곱항과 바닥의 곡률항을 추가하여야 한다. 이에 대한 연구는 Massel(1993), Chamberlain and Porter(1995), Chandrasekera and Cheung(1997), Suh et al.(1997) 등에서 진행되었다. 본 연구에서는 Chandrasekera and Cheung(1997)이 아래와 같이 제시한 확장형 완경사 방정식을 사용하였다.

$$\nabla \cdot (C C_g \nabla \phi) + (C C_g k_r^2 + i C_g \sigma k_i) \phi + [f_1(k_r, h) + f_2(k_r, h)] \phi = 0 \quad (33)$$

여기서, $f_1(k_r, h)$ 와 $f_2(k_r, h)$ 는 다음과 같다.

$$f_1(k_r, h) = \frac{-4k_r h \cosh(k_r h) + \sinh(3k_r h) + \sinh(k_r h) + 8(k_r h)^2 \sinh(k_r h)}{8 \cosh^3(k_r h) [2k_r h + \sinh(2k_r h)]} + \frac{k_r h \tanh(k_r h)}{2 \cosh^2(k_r h)}$$

$$f_2(k_r, h) = \frac{\operatorname{sech}^2(k_r h)}{6 [2k_r h + \sinh(2k_r h)]^3}$$

$$(8(k_r h)^4 + 16(k_r h)^3 \sinh(2k_r h) - 9 \sinh^2(2k_r h) \cosh(2k_r h) + 12(k_r h) [1 + 2 \sinh^4(k_r h)] [k_r h + \sinh^4(2k_r h)])$$

4. 수치 해석

4.1 1층 투수층

Flaten and Rygg(1991)은 바닥에 1층의 투수층이 존재할 경우의 파랑변형을 Green 함수를 이용하여 지배방정식과 경계조건을 직접 해석하는 적분식 모형을 제시하였다. 투수층이 1층인 경우의 파의 감쇠율은 식 (17)과 같다. 본 연구에서는 식 (17)에서 유도한 파의 감쇠율을 고려한 확장형완경사방정식의 결과와 Flaten and Rygg(1991)의 결과와 비교하여 수치해석결과를 검증하였다. Fig. 3은 바닥에 둔덕지형의 투수층이 존재하는 경우의 모형도이다.

Fig. 3에서 투수층의 두께를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$d = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ b + b \sin(\lambda x - \pi/2) & 0 < x < 0.5 \lambda_s \\ 2b & 0.5 \lambda_s < x < W - 0.5 \lambda_s \\ b + b \sin(\lambda x - \pi/2) & W - 0.5 \lambda_s < x < W \\ 0 & x > W \end{cases} \quad (34)$$

여기서, $\lambda_s = 2\pi/l$, W 는 둔덕의 길이이다. 본 연구에서 사용한 값은 $h_0 = 10$ m, $b = 2$ m, $W = 6\lambda_s = 300$ m이며, 투수층의 투수계수는 0.0 m^2 , $1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, $4.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 로 하였다.

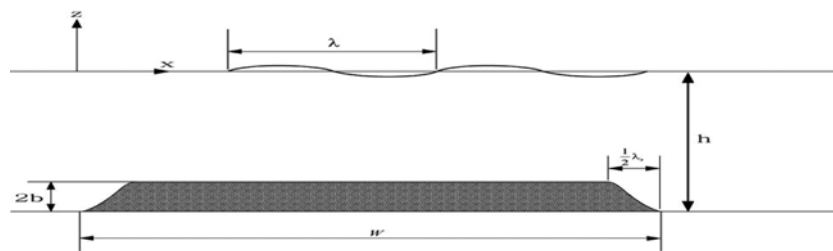


Fig. 3. Definition sketch of shoal.

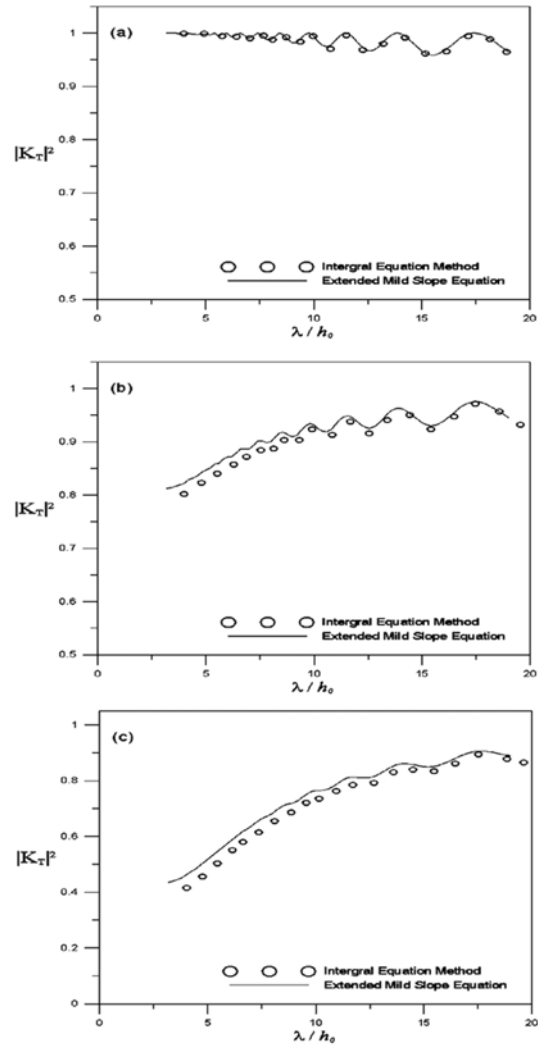


Fig. 4. Square of norm of transmission coefficient for periodic waves over shoal. (a) $K = 0.0 \text{ m}^2$, (b) $K = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, (c) $K = 4.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$

본 연구에서 사용한 확장형 완경사 방정식과 Flaten and Rygg(1991)의 적분식 모형으로 계산된 둔덕 배후에서의

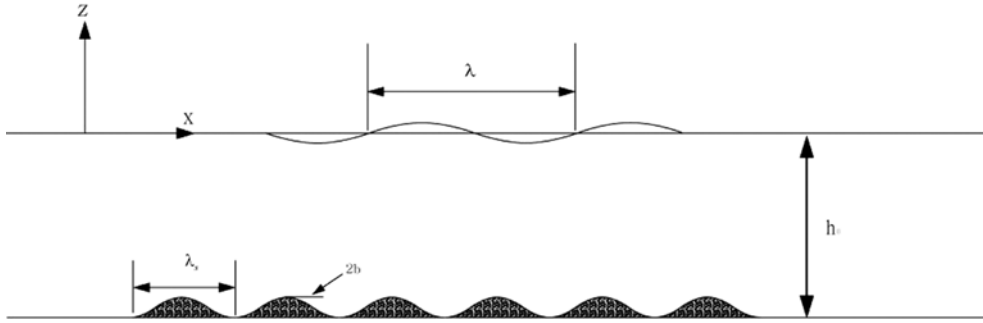


Fig. 5. Definition sketch of ripple patch.

투과율은 Fig. 4에 비교하였다. Fig. 4의 x 축에서의 λ 는 투수층이 존재하지 않는 지점에서의 파장을 의미하며, y 축은 투과율의 제곱값으로 하였다. Fig. 4를 보면, 파의 감쇠율 k_i 를 사용하여 해석한 확장형 환경사 방정식의 수치결과가 Flaten and Rygg(1991)이 제시한 적분식 모형과 거의 일치함을 알 수 있다.

바닥에 투수층이 사런형태로 존재할 경우의 파랑변형은 다음과 같다. Fig. 5는 사런형태의 투수층이 존재할 경우의 모형도이며, 식 (35)는 투수층의 두께를 식으로 표현한 것이다.

$$d = b + b\sin(lx - \pi/2) \quad 0 < x < N\lambda_s \quad (35)$$

여기서, $\lambda_s = 2\pi/l$, N 은 사런의 개수이다. 수치계산에 사용된 값은 $h_0 = 10$ m, $\lambda_s = 50$ m, $b = 1$ m, $N = 6$ 이며, 투수층의 투수계수는 0.0 m², 1.0×10^{-8} m², 4.0×10^{-8} m²로 하였다. 확장형 환경사 방정식과 Flaten and Rygg(1991)의 적분식 모형으로 계산된 사런 지형 배후에서의 투과율은 Fig. 6에 비교하였다. Fig. 6의 축에서의 k_i 는 파수이며, y 축은 투과율의 제곱값으로 나타내었다. Fig. 6를 보면, 파의 감쇠율 k_i 를 사용하여 해석한 확장형 환경사 방정식의 수치결과와 Flaten and Rygg(1991)이 제시한 적분식 모형의 결과와 거의 일치한다. 위의 둔덕과 사런 지형 배후에서의 투과율에 대한 본 모형과 적분식 모형의 비교를 통하여 본 모형의 적합성을 검증하였다.

4.2 2층 투수층

바닥에 2층 투수층이 존재할 경우의 수치모형은 다음과 같이 구성하였다. Fig. 3과 같은 둔덕지형을 투수층으로 하였으며, 이 둔덕지형의 위쪽 1/2을 첫 번째 투수층깊이로 하였으며, 아래쪽 1/2을 두 번째 투수층의 깊이로 하였다. 각 투수층의 깊이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

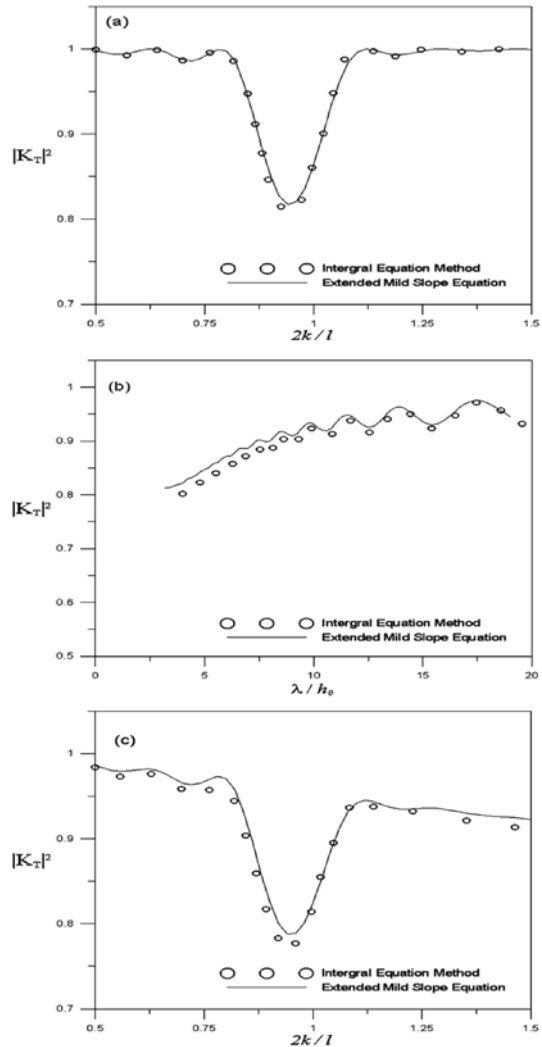


Fig. 6. Square of norm of transmission coefficient for periodic waves over a ripple patch (a) $K = 0.0$ m², (b) $K = 1.0 \times 10^{-8}$ m², (c) $K = 4.0 \times 10^{-8}$ m²

$$d = d_2 = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \frac{1}{2}[b + b\sin(lx - \pi/2)] & 0 < x < 0.5\lambda_s \\ b & 0.5\lambda_s < x < W - 0.5\lambda_s \\ \frac{1}{2}[b + b\sin(lx - \pi/2)] & W - 0.5\lambda_s < x < W \\ 0 & x > W \end{cases} \quad (36)$$

식 (36)의 각각의 계수들의 값은 4.1절에서 둔덕지형의 수치모형과 같은 값을 사용하였으며, 수치해석결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 K_1 은 첫 번째 투수층의 투수계수이며,

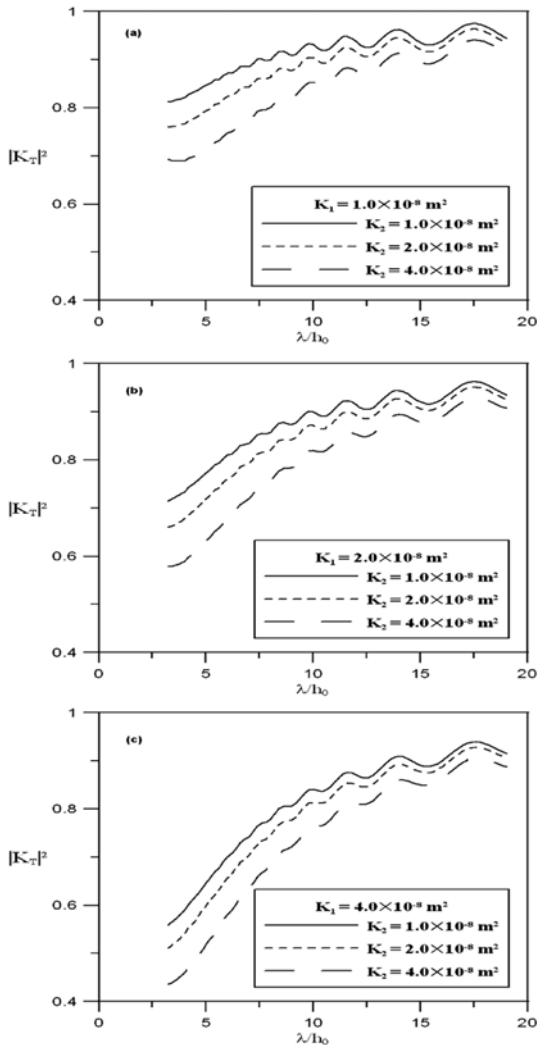


Fig. 7. Square of norm of transmission coefficient for periodic waves over a double-layer shoal. (a) $K_1 = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, (b) $K_1 = 2.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, (c) $K_1 = 4.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$

K_2 는 두 번째 투수층의 투수계수이다.

Fig. 7을 분석해 보면 각 층이 파의 투과율에 미치는 영향을 알 수 있다. Fig. 7에서 첫 번째 투수층의 투수계수를 증가시킬 경우에 파의 투과율이 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 첫 번째 투수층의 투수계수가 일정하고, 두 번째 투수층의 투수계수가 증가할 경우에는 첫 번째 투수층의 투수계수에 따른 변화에 비하여 파의 투과율은 그리 큰 변화를 보이지 않는다. 이는 유체와 인접한 첫 번째 투수층의 투수계수가 투과율에 미치는 영향이 더 크다는 것을 의미하며, 유체와 인접한 투수층이 파랑 에너지 감쇠에 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그리고 두 번째 투수층도 첫 번째 투수층보다는 작지만 파랑 에너지 감쇠에 영향을 미치고 있다.

4.3 3층 투수층

바닥에 3층 투수층이 존재할 경우의 수치모형은 다음과 같이 구성하였다. Fig. 3과 같은 둔덕지형을 투수층으로 하였으며, 이 둔덕지형의 1/3씩을 첫 번째 투수층, 두 번째 투수층, 그리고 세 번째 투수층의 깊이로 하였다. 각각의 투수층의 깊이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$d = d_2 = d_3 = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \frac{1}{3}[b + b\sin(lx - \pi/2)] & 0 < x < 0.5\lambda_s \\ \frac{2}{3}b & 0.5\lambda_s < x < W - 0.5\lambda_s \\ \frac{1}{3}[b + b\sin(lx - \pi/2)] & W - 0.5\lambda_s < x < W \\ 0 & x > W \end{cases} \quad (37)$$

식 (37)의 각각의 계수들의 값은 4.1절에서 둔덕지형의 수치모형과 같은 값을 사용하였으며, 수치해석결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 K_1 은 첫 번째 투수층의 투수계수, K_2 는 두 번째 투수층의 투수계수, K_3 는 세 번째 투수층의 투수계수이다.

Fig. 8을 분석해 보면, 바닥면에 재질이 다른 3개의 투수층이 존재함으로써 인하여 생기는 파의 감쇠효과를 알 수 있다. 바닥면에 재질이 다른 2개의 투수층이 존재할 경우와 마찬가지로 유체와 가장 인접한 첫 번째 투수층의 투수계수가 파의 투과율에 미치는 영향이 두 번째 또는 세 번째 투수층의 투수계수에 비해 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한 첫 번째 투수층의 투수계수를 고정시킨 후에 두 번째 또는 세 번째 투수층의 투수계수를 변화시키면 두 번째 투수층의 투수계수가 세 번째 투수층의 투수계수에 비하여 파의 투과율에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나 두 번째 투수

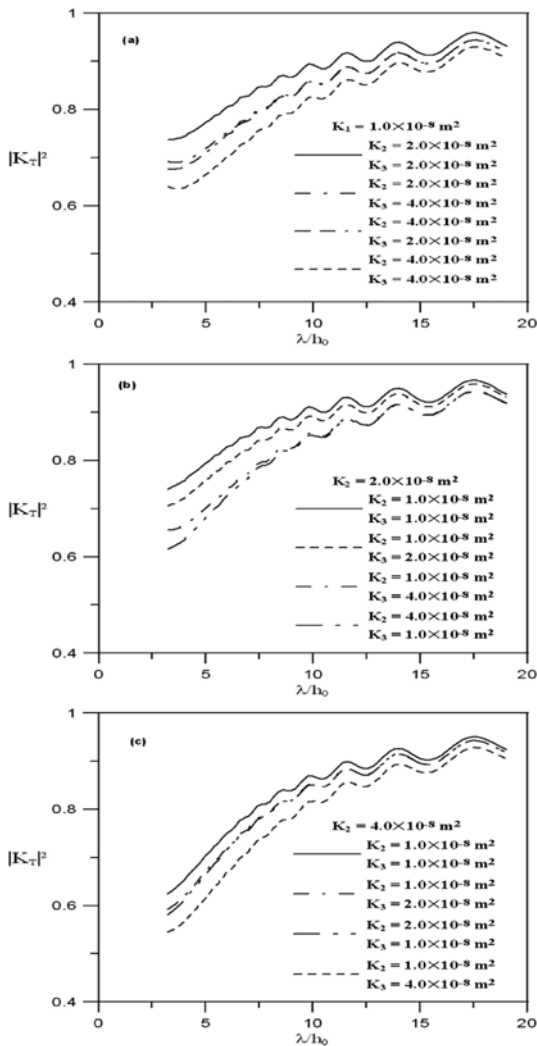


Fig. 8. Square of norm of transmission coefficient for periodic waves over a triple-layer shoal. (a) $K_1 = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, (b) $K_2 = 2.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, (c) $K_3 = 4.0 \times 10^{-8} \text{ m}^2$

층의 투수계수와 세 번째 층의 투수계수를 서로 바꿀 경우에는 파의 투과율에는 큰 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Reid and Kajiura(1957)의 연구를 확장하여, 유한한 깊이의 투수층 위를 진행하는 파의 감쇠율을 유도하였다. 그리고 이를 확장하여 재질이 각기 다른 2개 또는 3개의 투수층이 존재할 경우의 파의 감쇠율을 유도하였다. 본 연구에서 유도한 파의 감쇠율을 확장형 환경사방정식에 적용하여, 투수층 둔덕과 사면 위를 진행하는 파

에 대한 수치 실험을 수행하였다. 바닥면에 1층의 투수층 존재할 경우에 수치해석결과를 Flaten and Rygg(1991)의 적분식 방법의 수치 결과와 비교하여 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

유한한 깊이의 투수층에 대하여 파의 감쇠율과 투수층의 두께, 그리고 수심사이의 연관성을 검토하였다. 예상했던 대로 수심이 깊은 심해영역에서는 투수층의 두께가 파의 감쇠율에 미치는 영향이 거의 없으나, 천해영역에서는 투수층의 두께가 파의 감쇠율에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었다. 또한 투수층의 재질을 나타내는 투수계수가 커질수록 투수층으로 인한 파의 감쇠효과가 커져서 투과율이 감소하는 결과를 보였으며, 재질이 다른 2개 또는 3개의 투수층이 존재할 경우에 유체와 인접한 첫 번째 층의 투수계수가 파의 투과율에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 두 번째 층과 세 번째 투수층의 투수계수의 변화가 파의 투과율에 미치는 영향은 첫 번째 층에 비하여 적으나, 어느 정도 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 파의 감쇠율을 유도하기 위하여 투수층 내에서의 흐름을 Darcy의 법칙을 통해 표현하였다. 그러나 Darcy의 법칙은 공극이 큰 자갈과 같은 재질에서는 유속이 비교적 큰 난류흐름을 가지므로 적용이 부적합하다. 즉, 투수층 내에서 유속이 느릴 경우에는 Darcy의 법칙과 같이 선형식을 만족시키나, 유속이 커질 경우에는 Sollitt and Cross(1972)나 van Gent(1995)와 같이 비선형성이 추가되어야 하기 때문이다. 그러므로 향후 연구에서는 파가 일정 깊이의 투수층 위를 지나갈 경우에 투수층 내에서의 흐름을 연구할 필요가 있다. 또한 본 연구에서는 파의 감쇠율을 검증하기 위하여 Flaten and Rygg(1991)이 제시한 적분식 모형 결과를 이용하였다. 그러나 어떤 수치모형을 다른 수치모형으로 검증하기 보다는 수리모형실험을 통해 검증하는 것이 합리적이다. 그러므로 향후에는 수리모형실험을 투수층이 1층, 2층 그리고 3층인 경우에 실시하여 본 연구에서 제시하는 파의 감쇠율을 검증할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국해양수산기술진흥원의 ‘항만구조물 신뢰성 설계법 개발’ 연구과제(PM48400)와 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 지원을 받았습니다. 본 연구는 서울대학교 공학연구소에서 수행되었습니다.

참고문헌

- 이창훈, 이진욱, 최혁진, 김택구, 이정만 (2007). 투과성 매질을 전파하는 파랑의 시간의존방정식. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회논문집. 2218-2221.
- Berkhoff, J.C.W. (1972). Computation of combined refraction-diffraction. Proceeding of 13th Intl. Conf. of Coastal Engineering, Vancouver, Canada, 471-490.
- Booij, N. (1981). Gravity waves on water with non-uniform depth and current. Ph.D. Dissertation, Delft University of Tech, Delft, Netherlands.
- Chamberlain, P.G. and Porter, D. (1995). The modified mild-slope equation. *J. Fluid Mech.*, 291, 393-407.
- Chandrasekera, C.N. and Cheung, K.F. (1997). Extended linear refraction-diffraction model. *J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., ASCE*, 123(5), 280-296.
- Dagan, G. (1979). The generalization of Darcy's law for non-uniform flows. *Water Resour. Res.*, 15, 1-17.
- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific, Singapore.
- Flaten, G. and Rygg, O.B. (1991). Dispersive shallow water waves over a porous sea bed. *Coastal Engineering*, 15(4), 347-369.
- Gu, Z. and Wang, H. (1991). Gravity waves over porous bottoms. *Coastal Engineering*, 15, 497-524.
- Liu, P.L.-F. and Dalrymple, R.A. (1984). Damping of gravity water waves due to percolation. *Coastal Engineering*, 8, 33-49.
- Massel, S.R. (1993). Extended refraction diffraction equation for surface waves. *Coastal Engineering*, 19, 97-126.
- Reid, R.O. and Kajiura, K. (1957). On the damping of gravity waves over a permeable seabed. *Trans. Am. Geophys. Union.*, 38, 662-666.
- Rojanakamthorn, S., Isobe, M., Watanabe, A. (1990). Modeling of wave transformation on submerged breakwater. 22nd Intl. Conf. of Coastal Engineering, New York, USA, 1060-1073.
- Silva, R., Salles, P., Palacio, A. (2002). Linear waves propagating over a rapidly varying finite porous bed. *Coastal Engineering*, 44, 239-260.
- Sollitt, C.K. and Cross, R.H. (1972). Wave transmission through permeable breakwater. 13th Intl. Conf. of Coastal Engineering, Vancouver, Canada, 1827-1846.
- Suh, K.D., Lee, C., Park, W.S. (1997). Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography. *Coastal Engineering*, 32, 91-117.
- van Gent, M.R.A. (1995). Porous flow through rubble mound material. *J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg., ASCE*, 121(3), 176-181.

Received January 21, 2009

Accepted March 31, 2009