

## 다방향 불규칙 파랑중 파일 방파제에 의한 산란파 스펙트럼 Scattering Wave Spectrum by a Pile Breakwater in Directional Irregular Waves

조 일 형\*  
Il-Hyoung Cho\*

**요 지** : 고유함수 전개법을 사용하여 구한 파일 방파제에 의한 규칙파의 산란 해석해를 다방향 불규칙파로 확장하였다. 규칙파중 입사파의 주파수 그리고 입사각을 변화시키면서 구한 반사율과 투과율 그리고 파랑하중을 가지고 산란파 스펙트럼과 하중 스펙트럼을 표현하였다. 주파수와 입사각의 함수인 2차원 스펙트럼을 적분하여 산란파와 파랑하중의 대푯값을 구하고 방향분포함수, 주파향, 잠긴깊이 그리고 공극율이 투과율과 파랑하중에 미치는 영향을 살펴보았다.

**핵심용어** : 고유함수 전개법, 커튼월 방파제, 파일 방파제, 다방향 불규칙파, 투과율, 산란파 스펙트럼

**Abstract** : The analytic solution of wave scattering of monochromatic waves on a pile breakwater by an eigenfunction expansion method is extended to the case of directional irregular waves. The scattering wave spectrum and the force spectrum can be expressed from the reflection coefficient, transmission coefficient and the wave forces obtained from changing frequencies and incident angles in monochromatic waves. By numerical integration of 2-dimensional spectrum which is function of frequencies and incident angles, the representative values for the scattered waves and wave forces are obtained and the dependence of the transmission coefficients and wave forces on the directional distribution function, the principal wave direction, the submergence depth, and porosity is analyzed.

**Keywords** : eigenfunction expansion method, curtain-wall breakwater, pile breakwater, directional irregular waves, scattering wave spectrum

### 1. 서 론

육지면적의 부족과 육상자원의 고갈문제가 심각하게 대두되고 있는 현 시점에서, 해양개발은 이를 해결할 수 있는 가장 현실적인 방법으로 인정되고 있다. 해양개발에 필요한 해양시설의 기능성과 안정성을 극대화하기 위해서 일반적으로 시설물 주위에 방파제를 설치하는 것을 생각할 수 있다. 하지만 흔히 사용되어 오던 중력식 방파제는 설치에 많은 시간과 비용이 소요되고 환경 및 생태계에 원치 않는 변화를 줄 수 있으며 설치 예정지의 수심, 지질 그리고 육지로부터의 거리등의 여건에 많은 제약을 받는 단점이 있다. 이를 해결하기 위한 대안으로 투과성 방파

제에 대한 관심이 점점 높아지고 있다.

투과성 방파제의 가장 간단한 형태로 파랑에너지가 밀집된 수면부의 파랑을 직립벽으로 차단하여 벽의 반사기능을 이용하여 투과파를 줄이는 커튼월(curtain-wall) 방파제가 있다. 이러한 형태의 방파제는 흐름이 직립벽 하부를 통하여 자유롭게 통과할 수 있기 때문에 조류나 하구부근의 흐름 등을 방해하지 않고 파랑만을 제어할 수 있어 환경 친화적인 항만 개발에 필요한 많은 장점들을 지니고 있다. 구조물의 중량이 적어 파일로 지지되는 형태이므로 깊은 수심과 연약 지반에 적합하나 파일로 지지되는 구조물이기 때문에 파랑하중을 견디는데 한계가 있다. 커튼월 방파제에 작용하는 파랑하중을 줄이는 목적으

\*제주대학교 해양정보시스템공학과(Department of Oceanic Information and System Engineering, Cheju National University, Ara 1, Jeju 690-756, Korea, cho0904@cheju.ac.kr)

로 불투과성 직립벽 대신에 사각기둥 또는 원기둥들을 일정한 간격을 가지고 배열하여 만든 파일(pile) 방파제를 대안으로 생각할 수 있다. 단파일 경우에는 커튼월 방파제와 마찬가지로 반사기능을 이용하여 투과파를 줄이지만 장파일 경우에는 커튼월 방파제와는 다른 소파기구를 가지고 있다. 즉, 파가 투과성 벽을 통과하면서 갑작스런 단면형상의 변화로 뚫린 부분을 통해 강한 제트흐름이 형성되어 점성에 의한 박리현상이 발생하여 파 에너지의 일부분을 소멸시켜 투과파의 에너지뿐만 아니라 반사파의 에너지를 줄일 수 있다. 따라서 방파제 주변에서 운항하는 선박의 안정성에 도움을 주며 파랑하중을 크게 줄일 수 있다는 이점을 가질 수 있다.

커튼월 방파제의 파랑제어효과에 관한 연구는 투과율과 반사율을 구하는 해석방법을 중심으로 수행되어 왔다. Ursell(1974)과 Haskind(1959)는 무한수심에서 두께가 얇은 직립벽에 대한 경계치문제를 풀어 반사율과 투과율을 구하였다. Liu and Abbaspour(1982)는 경계적분법을 이용하여 반사율과 투과율 그리고 파랑하중의 특성을 살펴보았다. Losada *et al.*(1992)과 Abul-Azm(1993)들은 파가 임의의 입사각을 갖고 들어올 때 커튼월 방파제에 의한 반사율과 투과율을 고유함수전개법(eigenfunction expansion method)을 사용하여 해석하였다. Losada *et al.*(1994)는 다방향 불규칙 파랑중 두께가 얇은 커튼월 방파제에 의한 산란파 스펙트럼을 구하고 이로부터 불규칙 파의 투과율을 구하였다. Isaacson *et al.*(1998)은 수면 아래 일정깊이 잠긴 투과성 파일 방파제에 대한 해석해를 고유함수전개법을 사용하여 구하였고, 2차원 수조에서 수행한 모형실험결과와 비교하였다. 그들은 해석결과를 얻는데 필요한 에너지 손실계수와 관성력 계수들에 대한 자세한 언급이나 관련식의 제시 없이 모형실험결과와 비교를 통하여 구하는 수준에 머물렀다.

파일 방파제에 대한 대표적인 연구논문들로 윤 등(2006)은 범용 난류유동해석 수치모형인 FLUENT를 이용하여 사각기둥들로 구성된 유공벽에서의 에너지 손실계수를 구하였다. Suh *et al.*(2006)는 파랑에너지가 밀집된 상부에는 커튼월을, 하부에는 사각기둥들을 배열하여 만든 커튼월-파일 방파제에 의한 반사율과 투과율 그리고 파랑하중을 고유함수전개법을 이용하여 규칙파 및 불규칙파에 대하여 살펴보고 모형실험결과와 비교하였다. 조·고(2007)는 원기둥들로 구성된 유공벽에서의 에너지 손실계수에 대한 산정식을 구하여 파일 방파제의 소파성능을 비선형 적분방정식을 풀어 해석하였다.

본 연구에서는 임의의 입사각을 갖는 규칙파중 수면 아래 일정깊이 잠긴 커튼월과 파일 방파제의 반사율과 투과율 그리고 파랑하중을 구하는 고유함수전개법을 제안하고 주파수와 입사각을 바꿔가면서 얻은 전달함수들과 입사파의 스펙트럼을 곱하여 산란파(반사파, 투과파) 스펙트럼과 하중 스펙트럼을 구하였다. 이렇게 구한 주파수와 입사각의 함수인 2차원 스펙트럼들을 적분하여 반사파와 투과파 그리고 파랑하중의 대푯값들을 구하고 이 값들과 방향분포함수(directional distribution function, spreading function)와 주파향(principal wave direction), 잠긴 깊이 그리고 공극율과의 관련성을 분석하였다.

## 2. 다방향 불규칙파 스펙트럼

Fig. 1과 같이 수심( $h$ )이 일정한 유체영역 내에 수면 아래로  $d$ 만큼 잠긴 파일 방파제가 놓여 있고 다방향 불규칙파가 주파향( $\theta_0$ )를 갖고 파일 방파제에 들어온다고 생각하자. 유한수심에서의 입사파의 스펙트럼은 다음식과 같이 쓸 수 있다(Hesselmann, 1973).

$$S_I(\omega, \theta) = S(\omega)G(\omega, \theta)R(\omega_*)$$

윗식에서  $S(\omega)$ 는 주파수 스펙트럼(frequency spectrum)으로 다음과 같다.

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp[-1.25(\omega/\omega_p)^4] \gamma^{\exp\left[\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p}\right]} \quad (2)$$

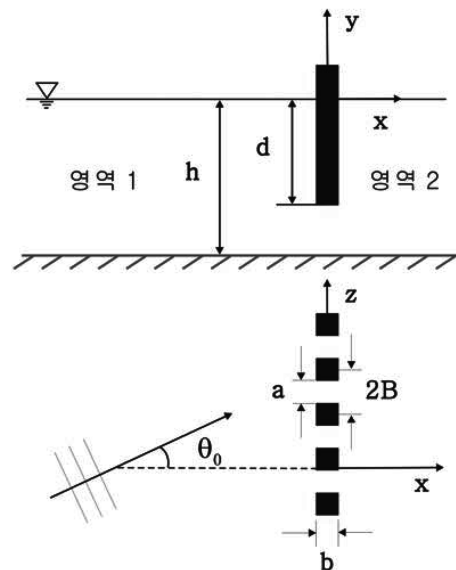


Fig. 1. Definition sketch of a pile breakwater.

여기서  $\omega_p$ 는 최대주파수(peak frequency)이며,  $\alpha=0.076 \left(\frac{gX}{U^2}\right)^{-0.22}$ 는 풍속( $U_w$ ) 그리고 취송거리( $X$ )와 관련된 계수로 취송거리를 알지 못할 때 보통 0.0081값을 취한다.  $\omega \leq \omega_p$ 일 때,  $\sigma=0.07$ .  $\omega > \omega_p$ 일 때  $\sigma=0.99$ 이다. JONSWAP 스펙트럼 일 때  $\gamma$ 는 1부터 7사이의 값을 가지며 평균 JONSWAP 스펙트럼인 경우  $\gamma=3.3$ 이다.  $\gamma \rightarrow 1$ 일 때 JONSWAP 스펙트럼은 P-M(Pierson-Moskowitz) 스펙트럼에 수렴한다. 스펙트럼의 방향성을 나타내는 방향분포함수는 아래식으로 주어진다.

$$G(\omega, \theta) = G_o \cos^{2s} \left( \frac{\theta - \theta_o}{2} \right)$$

$$G_o = \left[ \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s} \left( \frac{\theta - \theta_o}{2} \right) d\theta \right]^{-1}$$

$$s = \begin{cases} s_{\max} \cdot (\omega/\omega_p)^5 & \text{if } \omega \leq \omega_p \\ s_{\max} \cdot (\omega/\omega_p)^{-2.5} & \text{if } \omega \geq \omega_p \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $s_{\max}$ 는 방향집중도( $s$ )의 최대값을 나타내며, 입사각  $\theta_o$ 는 주파향( $\theta_o$ )로부터 반시계방향으로 양의 방향으로 잡았다.

수심의 영향을 나타내는  $R(\omega_*)$ 는 다음식과 같다.

$$R(\omega_*) = f^{-2} \left[ 1 + \frac{2\omega_*^2 f}{\sinh(2\omega_*^2 f)} \right]^{-1} \quad (4)$$

여기서  $1 = f \tanh(\omega_*^2 f)$ ,  $\omega_*^2 = \omega^2 h/g$ 이다. 식 (1)에서 입사파의 방향성을 무시하고 수심의 영향만을 고려한 스펙트럼(= $S(\omega)R(\omega_*)$ )을 TMA(Texel, MARSEN, ARSLOE data sets) 스펙트럼이라 부른다(Bouws et al., 1985).

### 3. 산란파 스펙트럼

선형 포텐셜이론에 따라 속도포텐셜( $\Phi$ )을 도입하고, 유동은 주파수  $\omega$ 를 갖고 조화운동을 한다고 가정하면 속도포텐셜과 파일 방파제에서의 수평방향 속도는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi(x, y, z, t) = Re \left\{ -\frac{ig}{\omega} A \psi(x, y, z) e^{-i\omega t} \right\}$$

$$U(y, z, t) = Re \left\{ -\frac{ig}{\omega} A \bar{u}(y, z) e^{-i\omega t} \right\} \quad (5)$$

여기서  $A$ 는 입사파의 진폭이며  $g$ 는 중력가속도이다. 파일 방파제가  $z$ 축 방향으로 일정하고 무한히 길다고 가정하여  $\psi(x, y, z) = \phi(x, y) e^{k \sin \theta \cdot z}$ ,  $\bar{u}(y, z) = u(y) e^{k \sin \theta \cdot z}$ 로

치환하면 속도포텐셜( $\phi$ )과 수평방향 속도( $u$ )는  $x$ 에 무관한 함수가 된다. 여기서  $k_o$ 는 입사파의 파수(wave number)를 나타낸다. 새로 정의된 속도포텐셜은 아래와 같은 경계치 문제를 만족한다.

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - k_o^2 \sin^2 \theta \phi = 0, & (\text{in } \Omega) \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0, & (\text{on } y=0) \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, & (\text{on } y=-h) \end{cases} \quad (6)$$

파일 방파제에 의하여 나누어진 유체영역을 각각 영역 1, 영역 2라 할 때 식 (6)과 방사경계조건식을 만족하는 각 영역에서의 속도포텐셜은 아래 식과 같이 표현된다.

$$\phi_1(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} (e^{-\alpha_n x} \delta_{n0} + A_n e^{\alpha_n x}) f_n(y)$$

$$\phi_2(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n e^{-\alpha_n x} f_n(y) \quad (7)$$

여기서  $\delta_{n0}$ 는  $n=0$ 일 때 1이고,  $n \neq 0$ 일 때 0의 값을 갖는 Kronecker-Delta함수이다.  $\alpha_o$ 는 진행파(propagating wave)의 파수로  $\alpha_o = -ik_o |\cos \theta|$ 이며,  $\alpha_n (= \sqrt{k_o^2 \sin^2 \theta + k_n^2})$ 는  $n \geq 1$ 인 비진행파(non-propagating wave)의 파수이다. 고유함수  $f_n(y)$ 은 식 (8)과 같으며  $k_n$ 은 식 (9)의 선형 분산식을 만족한다.

$$f_n(y) = \begin{cases} \frac{\cosh k_o(y+h)}{\cosh k_o h} & (\text{for } n=0) \\ \frac{\cos k_n(y+h)}{\cos k_n h} & (\text{for } n=1, 2, \dots) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} k_o \tanh k_o h = \frac{\omega^2}{g} & (n=0) \\ k_n \tan k_n h = -\frac{\omega^2}{g} & (n=1, 2, \dots) \end{cases} \quad (9)$$

식 (7)에 나타난 미지수인  $A_n, B_n$ 을 구하기 위하여 두 영역이 만나는 경계면( $x=0$ )에서 정합조건식(matching condition)을 적용하자. 먼저  $x=0$ 에서 영역 1,2의 수평방향 속도가 서로 같다는 연속방정식을 적용하면 다음과 같다. 이때 파일 방파제에서의 수평방향 속도를 앞에서 같이 고유함수의 전개식으로 표현한다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} = u(y) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n f_n(y) \quad (-h \leq y \leq 0) \quad (10)$$

식 (7)을 식 (10)에 대입하여  $A_n, B_n$ 을  $u_n$ 으로 표현하여 영역 1,2에서의 속도포텐셜을 다시 쓰면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_1(x,y) &= -\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ (e^{-\alpha_n x} + e^{\alpha_n x}) \delta_{n0} + \frac{u_n}{\alpha_n} e^{\alpha_n x} \right\} f_n(y) \\ \phi_2(x,y) &= -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{u_n}{\alpha_n} e^{-\alpha_n x} f_n(y) \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 미지수인  $u_n(n=0,1,2,\dots)$ 을 구하기 위해서는 추가적인 정합조건식이 필요하다. 파일 방파제에서의 정합조건식은 아래와 같이 표현된다(Mei et al., 1974).

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = 2C \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\alpha}{2} |U|U \quad (-d \leq y \leq 0) \quad (12)$$

식 (12)의 오른쪽의 첫 번째 항은 물입자의 가속도에 비례하는 관성항을 나타내며  $C$ 는 파일 방파제의 공극율과 국부형상의 함수인 차단계수(blockage coefficient)이다. 사각형 단면인 경우 Flagg and Newman(1971)의 근사해는 아래와 같이 주어진다.

$$C = \frac{b}{2} \left( \frac{1}{P} - 1 \right) + \frac{2B}{\pi} \left[ 1 - \log(4P) + \frac{1}{3} P^2 + \frac{281}{180} P^4 \right] + O(P^6) \quad (13)$$

여기서 공극율  $P = \frac{a}{2B}$ 이며,  $a$ 는 사각형 슬릿의 뚫린 폭,  $b$ 는 슬릿의 두께를 나타낸다.

식 (13)의 오른쪽의 두 번째 항은 박리에 의한 에너지 손실을 나타내는 점성항이다. 파가 파일 방파제를 통과하면서 갑작스런 단면현상의 변화로 박리현상이 발생하여 파 에너지가 손실된다. 여기서 에너지 손실계수( $\alpha$ )은 파일 방파제의 공극율과 단면형상에 밀접한 관계가 있다. FLUENT 상용코드에서 난류유동을 계산할 수 있는 Spalart-Allmars 모형을 사용하여 구한 사각형 단면에 대한 맞춤식은 아래와 같다(윤 등, 2006).

$$\alpha = 0.6 \left( \frac{1}{PC_c} - 1 \right)^2 \quad (14)$$

예연오리피스(sharp-edged orifice)에 대한 수축계수의 경험식은  $C_c = 0.6 + 0.4P^2$ 이다. 사각기둥을 일정한 간격으로 배열한 파일 방파제의 경우 이 식은 적합하지 않다. 사각형 슬릿의 두께의 영향을 고려하기 위하여 Huang(2007)은 아래와 같은 경험식을 제시하였다.

$$C_c = \gamma + [1 - \gamma] P^2, \quad \gamma = 0.6 + 0.4 \tanh \left[ \frac{b}{2a} \right] \quad (15)$$

여기서  $\frac{b}{2a} \rightarrow 0$ 일 때 식 (15)은  $C_c = 0.6 + 0.4P^2$ 에 수렴하고,

$\frac{b}{2a} \rightarrow \infty$ 일 때는 1에 접근한다. 이와같이 공극율과 단면형상의 함수인 수축계수는 식 (14)에 주어진 에너지 손실계수를 통하여 반사율과 투과율에 영향을 준다.

물입자 속도의 제곱에 비례하는 비선형 점성항을 물입자의 속도에 선형적으로 비례한다고 가정하여 Lorentz 변환을 통하여 식 (12)을 선형화시키면 다음과 같다.

$$\phi_2 - \phi_1 = 2Cu + \frac{i\beta}{\omega} u \quad (-d \leq y \leq 0) \quad (16)$$

여기서  $\beta$ 는 선형화된 손실계수(linear loss coefficient)로 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{16a}{9\pi} A \omega \frac{1}{\sqrt{(R+2)^2 + G^2}} \frac{5 + \cosh(2k_o d)}{2k_o d + \sinh(2k_o d)} \quad (17)$$

여기서  $R = \beta \left( \frac{k_o \cos \theta}{\omega} \right)$ ,  $G = 2Ck_o \cos \theta$ 이다. 식 (17)은  $\beta$ 에 관한 4차 방정식이다. 이 방정식을 수치적으로 풀어  $\beta$ 를 구한다. 불투과성 커튼월인 경우 식 (16)은 벽면 경계조건식( $u=0$ )으로 바뀐다.

파일 방파제 하부의 뚫린 경계면에서 만족해야 할 정합조건식은 아래와 같다.

$$\phi_2 = \phi_1 \quad (-h \leq y \leq -d) \quad (18)$$

식 (11)를 정합조건식 (16)과 (18)에 대입한 후 고유함수의 직교성을 이용하여 정리하면 최종적으로 풀어야 할 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{N_n \delta_{nm}}{\alpha_n} + \left( C + \frac{i\beta}{2\omega} \right) \Pi_{nm} \right\} u_n = -N_0 \delta_{0m} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (19)$$

여기서  $N_n \delta_{nm} = \int_{-h}^0 f_n(y) f_m(y) dy$ ,  $\Pi_{nm} = \int_{-d}^0 f_n(y) f_m(y) dy$ 이다. 식 (19)에 주어진 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고유함수의 개수를  $N$ 개 취한다. 대수방정식을 풀어  $u_n(n=0,1,\dots,N)$ 이 계산되면 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율은 식 (11)로부터  $R_f = \left| 1 + \frac{u_0}{\alpha_0} \right|$ ,  $T_r = \left| -\frac{u_0}{\alpha_0} \right|$ 이다.

주파수와 입사각의 함수로 표현되는 전달함수인 반사율과 투과율이 얻어지면 산란파(반사파, 투과파) 스펙트럼은 아래식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_R(\omega, \theta) &= R_f(\omega, \theta)^2 S_I(\omega, \theta) \\ S_T(\omega, \theta) &= T_r(\omega, \theta)^2 S_I(\omega, \theta) \end{aligned} \quad (20)$$

산란파 스펙트럼이 얻어지면 다방향 불규칙파에 대한 반사율과 투과율은 다음식과 같다.

$$C_R = \sqrt{\frac{m_R}{m_I}}$$

$$C_T = \sqrt{\frac{m_T}{m_I}} \tag{21}$$

여기서  $m_p, m_R, m_T$ 는 아래와 같이 정의된 2차원 스펙트럼 곡선 아래의 체적을 뜻한다.

$$m_I = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_0^{\infty} S_I(\omega, \theta) d\omega d\theta$$

$$m_R = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_0^{\infty} S_R(\omega, \theta) d\omega d\theta$$

$$m_T = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_0^{\infty} S_T(\omega, \theta) d\omega d\theta \tag{22}$$

여기서 입사각에 대한 적분은  $\theta_{\max} = \theta_o + \pi/2, \theta_{\min} = \theta_o - \pi/2$ 로 놓고 분할개수를 30개로 잡아 이후 모든 계산을 수행하였다. 식 (22)에서 계산된  $m_p, m_R, m_T$ 를 가지고 불규칙파의 대푯값인 입사 유의파고, 반사 유의파고, 그리고 투과 유의파고는 각각  $H_{I1/3} = 4.004\sqrt{m_I}, H_{R1/3} = 4.004\sqrt{m_R}, H_{T1/3} = 4.004\sqrt{m_T}$ 이다.

#### 4. 하중 스펙트럼

규칙파에 의한 파일 방파제에 작용하는 파랑하중은 파일 방파제 전후의 입력차를 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F(t) = \rho g A \int_{-d}^0 [\phi_1(0, y) - \phi_2(0, y)] dy e^{-i\omega t}$$

$$= 2\rho g \sum_{n=0}^{\infty} X_n I_n \eta(t) \tag{23}$$

여기서  $X_n = (\delta_{n0} + \frac{u_n}{\alpha_n}), I_n = \frac{\text{sink}_n(d-h) + \text{sink}_n h}{k_o \cos k_n h}$ 이며,  $\eta(t)$  ( $=e^{-i\omega t}$ )는 수면 변위이다.

파랑하중과 수면변위의 공분산(covariance) 함수를 각각  $R_F(t), R_{\eta}(t)$ 라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_F(t) = \lim_{\tau_o \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau_o} \int_{-\tau_o/2}^{\tau_o/2} F(t)F(t+\tau) dt$$

$$R_{\eta}(t) = \lim_{\tau_o \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau_o} \int_{-\tau_o/2}^{\tau_o/2} \eta(t)\eta(t+\tau) dt \tag{24}$$

위에 주어진 공분산 함수에 Fourier 변환을 취하면 아래와 같이 파랑하중과 수면변위에 대한 스펙트럼을 구할 수 있다.

$$S_F(\omega, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_F(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

$$S_{\eta}(\omega, \theta) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{\eta}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \tag{25}$$

식 (23)을 식 (24)에 대입한 후 식 (25)을 이용하면 파랑하중 스펙트럼과 입사파 스펙트럼 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$S_F(\omega, \theta) = |H_F(\omega, \theta)|^2 S_{\eta}(\omega, \theta) \tag{26}$$

여기서 전달함수  $H_F(\omega, \theta) = 2\rho g \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} X_n^* X_m^* I_n^* I_m}$ 이며, 윗첨자 \*는 공액복소수이다. 파랑하중 스펙트럼으로부터 유의 파랑하중  $F_{1/3}(=4.004\sqrt{m_F})$ 을 구할 수 있다.

#### 5. 계산결과 및 고찰

Fig. 2는 수심의 영향을 나타내는 함수  $R(\omega_*)$ 를 무차원화된 주파수  $\omega_*(= \omega^2 h/g)$ 에 따라 그린 그림이다. 무차원화된 주파수가 크다는 것은 파장에 비해 수심이 깊은 무한수심을 뜻하며 이때  $R(\omega_*)$ 는 1에 수렴하는 것을 알 수 있다. 반대로  $\omega_*$ 가 작다는 것은 천수역을 의미하며  $R(\omega_*) \rightarrow \omega_*^2/2$ 로 근사된다.

사각형 슬릿의 두께가 에너지 손실계수에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Huang(2007)이 제시한 수축계수에 대한 경험식 (15)을 이용하여 에너지 손실계수를 구하였다. Fig. 3에서  $x$ 축은 파일 방파제의 공극율이다. 슬릿의 두께( $b$ )를 슬릿의 뚫린 폭( $a$ )으로 무차원화시킨  $b/a=0.5, 1.0, 2.0$ 에 대하여 비교하였다. 공극율이 0.2까지는 두께의 변화가 에너지 손실계수에 영향을 주어 슬릿의 두께가 커질수록 에너지 손실계수는 줄어든다. 그러나 공극율이 0.2보다 큰 값을 가질 때 두께의 영향은 무시할 수 있

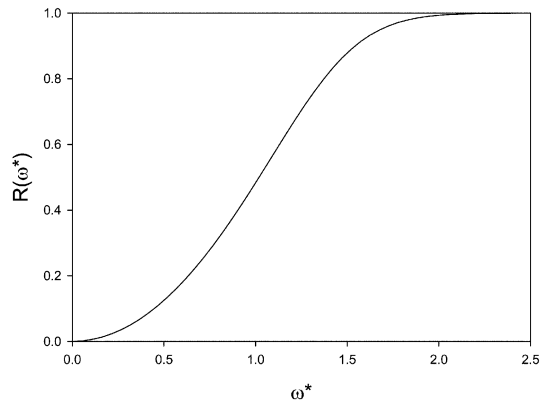


Fig. 2. Depth function as a function of  $\omega_*(= \omega^2 h/g)$ .

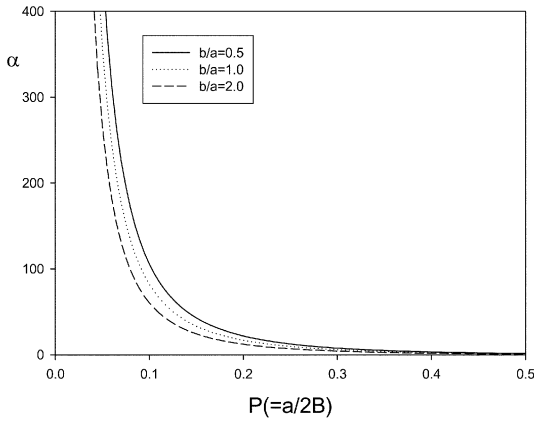


Fig. 3. Energy loss coefficients as a function of non-dimensional thickness  $b/a$  and porosity  $P$ .

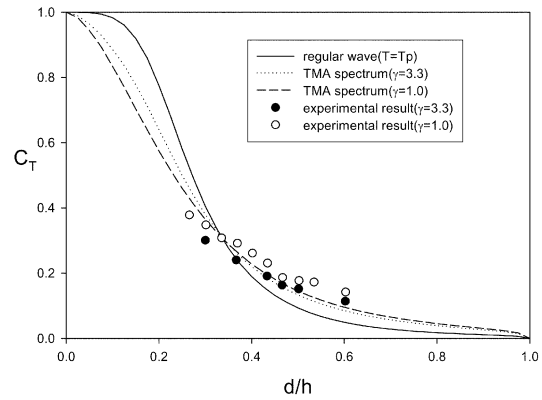
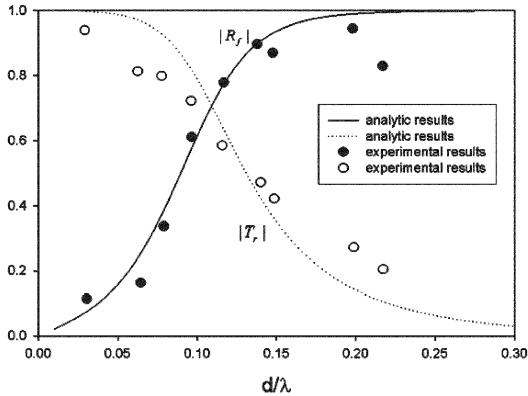
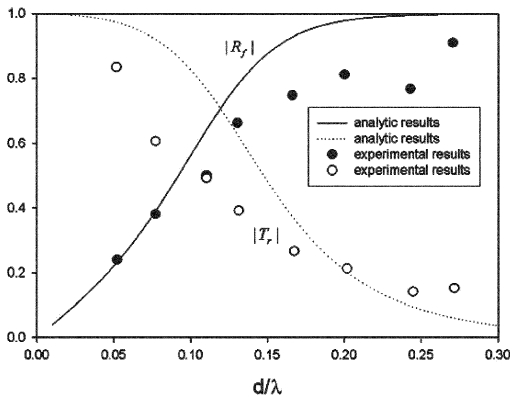


Fig. 5. Transmission coefficients for a curtain-wall breakwater as a function of non-dimensional submergence depth,  $T_p = 5 \text{ sec}$ ,  $\theta_o = 0^\circ$ .



(a)  $d/h=0.353$



(b)  $d/h=0.609$

Fig. 4. Comparison of analytic and experimental results for a curtain-wall breakwater as a function of  $d/\lambda$  in regular waves.

을 만큼 작다는 것을 알 수 있다.

고유함수전개법을 사용한 해석결과의 타당성을 검증하

기 위하여 규칙파중 커튼월의 해석해와 모형실험결과를 비교한 그림이 Fig. 4이다. x축은 잠긴깊이와 파장의 비로 잡았다. 실선은 반사율을, 점선은 투과율을 나타내고 있다. 대체적으로 해석결과는 모형실험결과를 정성적으로 잘 따라가고 있다.  $d/h=0.353$ 의 결과가  $d/h=0.609$ 보다 모형실험결과와 더 잘 일치하고 있다. 이는 커튼월의 잠긴깊이가 깊을수록 벽 하부로 빠른 흐름이 형성되어 커튼월에 의한 박리현상이 일어나 포텐셜이론에서는 고려하지 못한 에너지 손실효과가 발생하여 모형실험결과가 해석결과보다 다소 적게 나오기 때문이다.

수심이 18.3 m이며 입사파의 최대주기가 5초일 때 커튼월 방파제의 잠긴 깊이를 바꿔가면서 구한 해석해와 모형실험결과(ASTF, 1992)를 Fig. 5에서 비교하였다. 입사파는 방향성 없이 커튼월에 수직방향( $\theta_o = 0^\circ$ )으로 들어온다고 가정하였다. x축은 수심으로 무차원화된 잠긴 깊이로 잡았다. 실선은 입사파의 주기를  $T_p$ 로 잡은 규칙파에 대한 투과율을 나타내며 점선은 입사파의 방향성을 고려하지 않은 TMA 스펙트럼을 사용한 결과로 굵은 점선은 TMA 스펙트럼중  $\gamma=3.3$ 인 평균 JONSWAP 스펙트럼을 사용한 투과율이며 가는 점선은  $\gamma=1.0$ 인 P-M 스펙트럼을 사용한 투과율이다. 동그라미는 TMA 스펙트럼을 사용하여 재현한 불규칙파에 대한 모형실험결과들이다. 예상대로 TMA 스펙트럼을 이용한 해석결과가 규칙파를 사용한 결과보다 모형실험결과를 잘 따라가고 있다. 규칙파의 결과는 무차원화된 잠긴 깊이가 0.3를 기준으로 잠긴 깊이가 얕으면 단일방향(unidirectional) 불규칙파에 대한 결과들에 비하여 다소 큰 값을 주며 잠긴 깊이가 깊으면 상대적으로 작은 값들을 주고 있다. 그러나 값 차이가 크

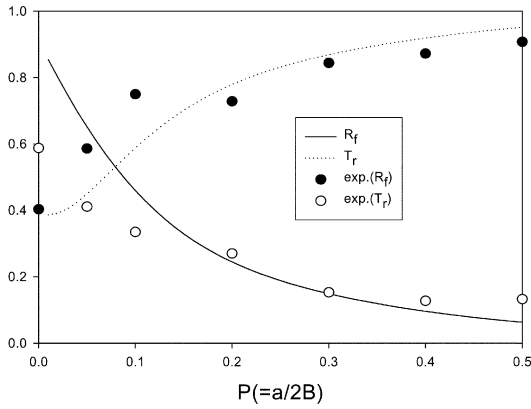


Fig. 6. Comparison of analytic and experimental results for a pile breakwater as a function of  $d/\lambda$  in regular waves  $T = 1.0$  sec,  $d/h = 0.5$ ,  $H/\lambda = 0.07$ .

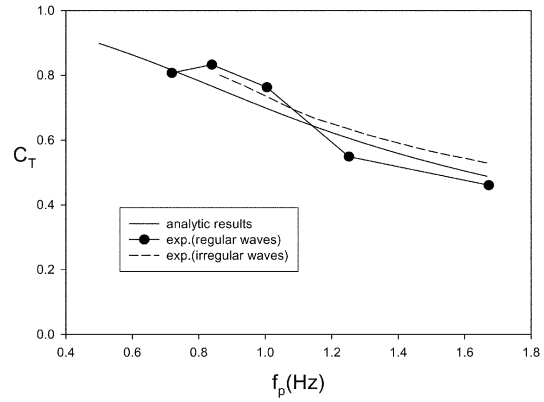


Fig. 7. Comparison of analytic and experimental results measured from regular and irregular waves for a pile breakwater  $H_{1/3} = 5.0$  cm,  $P = 0.1$ ,  $d/h = 0.5$ ,  $\theta_o = 0^\circ$ .

지 않기 때문에 안전율을 고려하는 공학적 설계관점에서 규칙파의 결과를 설계에 반영하는 것도 큰 무리가 없으리라 판단된다.

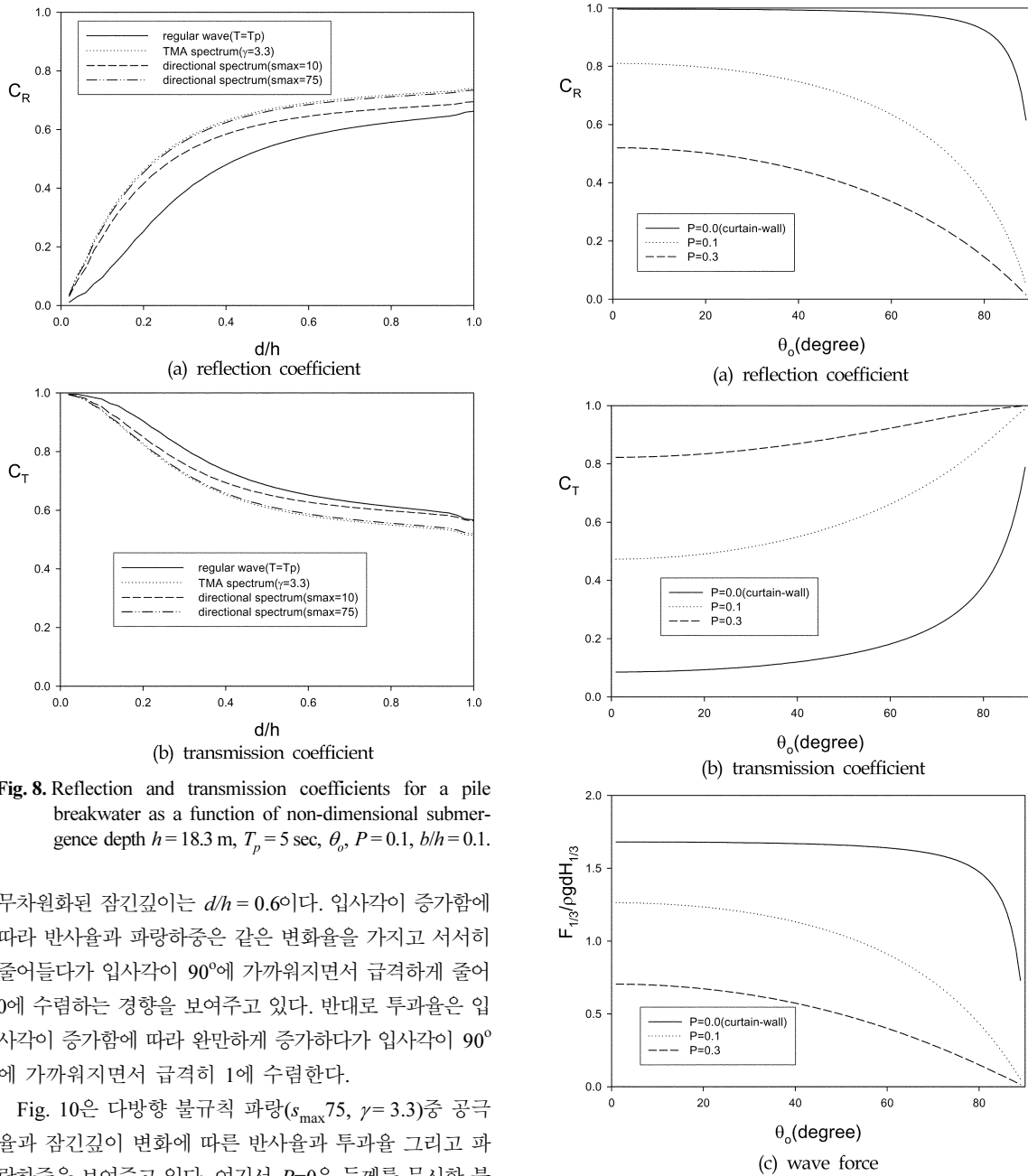
파일 방파제에 대한 해석해의 타당성을 검증하기 위하여 사각형 슬릿을 일정한 간격으로 배열하여 만든 파일 방파제에 대한 해석결과와 Isaacson et al.(1998)의 모형 실험결과를 Fig. 6에서 비교하였다. 수심은 0.45 m이며 파일 방파제의 잠진깊이는 0.225 m이다. 사각형 슬릿의 두께는 1.3 cm이며 슬릿의 폭( $=2B-a$ )은 2.0 cm이다. 슬릿의 간격을 바꿔가면서 6개의 공극율( $P=0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ )에 대하여 반사율과 투과율을 측정하였다. 실험에서 사용한 입사파의 주기는 1.0 sec이며 이에 해당하는 수심과 입사파의 파장의 비는  $kh=1.9$ 이다. 파형경사( $H/\lambda$ )를 0.07로 유지하였다. 파일 방파제에 전면 3개의 파고계를 설치하여 입사파와 반사파를 분리하였고 후면에 2개의 파고계를 설치하여 투과파고를 측정하였다. 공극율이 0.2보다 큰 영역에서는 해석해와 모형실험결과는 잘 일치하고 있으나 공극율이 0.1보다 작은 영역에서는 둘 사이의 값 차이가 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 조건에 대하여 불규칙파에 대한 해석해와 모형실험결과를 비교한 그림이다. 유의파고는 5 cm, 파일 방파제의 공극율은 0.1, 그리고 파형경사는 0.02이다. 모형실험에서 사용한 불규칙파는 입사파의 방향성을 고려하지 않은 Bretschneider 스펙트럼을 사용하였다. Bretschneider 스펙트럼에 대한 수학적식은  $S(\omega) = 0.1687H_{1/3}^2 \left(\frac{\omega_{1/3}}{\omega}\right)^4 \exp[-0.675(\omega_{1/3}/\omega)^4]$ 이다. 여기서  $H_{1/3}$ ,  $\omega_{1/3}$ 는 유의파고와 유의주파수를 의미한다. x축은 최대주파수를

나타내며 y축은 투과율이다. 동그라미는 규칙파에 대한 모형실험결과이고 점선은 Bretschneider 스펙트럼을 가지고 재현한 불규칙파에 대한 모형실험결과이다. 해석결과는 불규칙파에 대한 모형실험결과와 비교하면 주파수에 관계없이 일정하게 약간 작은 값을 주지만 대체적으로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 규칙파에 대한 모형실험결과도 불규칙파의 모형실험결과와 큰 차이 없이 해석결과를 잘 따라가고 있다.

Fig. 8은 공극율 0.1인 파일 방파제가 놓여 있는 경우 잠진깊이 변화에 따른 반사율과 투과율을 보여주고 있다. 수심은  $h=18.3$  m이며 입사파의 최대주기는 5 sec이다. 슬릿은 정사각형 단면을 가지며 가로( $b$ )와 세로( $2B-a$ )의 길이는 수심의 1/10인 1.83 m이며 파형경사( $H/\lambda$ )는 0.01이다. 실선은 주기가 5 sec인 규칙파에 대한 투과율이다. 가는 점선은 방향성을 고려치 않은 TMA 스펙트럼을 사용한 투과율이다. 굵은 점선( $s_{max}=10$ )과 일점쇄선( $s_{max}=75$ )은 방향성 스펙트럼을 사용한 결과이다. 규칙파에 대한 결과는 불규칙파에 대한 결과에 비하여 반사율은 작고 투과율은 크게 나타났다. 단일방향 TMA 스펙트럼을 사용한 결과와 입사파의 에너지가 주파향에 밀집된 너울파( $s_{max}=75$ )에 대한 방향성 스펙트럼을 이용한 결과는 거의 일치하였다. 그러나 에너지가 주파향으로부터 넓게 분포된 풍파 스펙트럼( $s_{max}=10$ )의 결과는 TMA 스펙트럼의 결과보다 투과율은 약간 크게, 반사율은 약간 작게 나타났다.

Fig. 9는 Fig. 8과 같은 조건아래에서 방향성을 무시한 TMA 스펙트럼( $\gamma=3.3$ )을 사용하여 입사각 변화에 따른 반사율과 투과율 그리고 파랑하중을 보여주고 있다. 이때



**Fig. 8.** Reflection and transmission coefficients for a pile breakwater as a function of non-dimensional submergence depth  $h = 18.3$  m,  $T_p = 5$  sec,  $\theta_o$ ,  $P = 0.1$ ,  $b/h = 0.1$ .

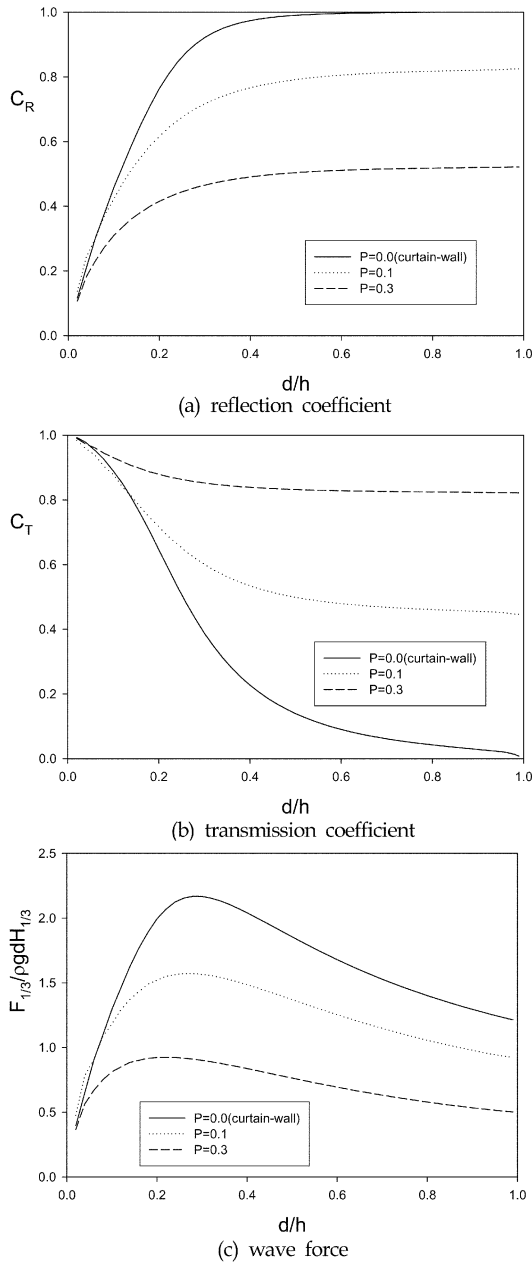
무차원화된 잠긴깊이는  $d/h = 0.6$ 이다. 입사각이 증가함에 따라 반사율과 파랑하중은 같은 변화율을 가지고 서서히 줄어들다가 입사각이  $90^\circ$ 에 가까워지면서 급격하게 줄어 0에 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 반대로 투과율은 입사각이 증가함에 따라 완만하게 증가하다가 입사각이  $90^\circ$ 에 가까워지면서 급격히 1에 수렴한다.

Fig. 10은 다방향 불규칙 파랑( $s_{max} = 75$ ,  $\gamma = 3.3$ )중 공극율과 잠긴깊이 변화에 따른 반사율과 투과율 그리고 파랑하중을 보여주고 있다. 여기서  $P=0$ 은 두께를 무시한 불투과성 커튼월을 의미한다. 입사파를 반사시켜 투과파를 줄이는 커튼월 방파제는 예상대로 파일 방파제에 비하여 반사율은 크게 투과율은 낮게 나타났다. 공극율이 커짐에 따라 반사율과 파랑하중은 줄어들며 반대로 투과율은 커지는 경향을 보여주고 있다. 공극율에 따른 반사율과 투과율의 변화 폭은 잠긴깊이가 깊을수록 더욱 커진다. Fig. 10c의 파랑하중 곡선을 살펴보면 파일 방파제에 작용하는 파

**Fig. 9.** Reflection and transmission coefficients, wave forces for a pile breakwater as a function of incidence angle and porosity in TMA irregular waves,  $h = 18.3$  m,  $T_p = 5$  sec,  $\gamma = 3.3$ ,  $d/h = 0.6$ ,  $b/h = 0.1$ .

랑하중이 불투과성 커튼월 방파제에 비하여 크게 줄어들며 잠긴깊이 변화에 따라 완만한 곡선분포를 보여주고 있다. 투과율만을 가지고 볼 때 커튼월 방파제가 파일 방파





**Fig. 10.** Reflection and transmission coefficients, wave forces for a pile breakwater as a function of non-dimensional submergence depth and porosity in directional irregular waves ( $s_{\max} = 75$ ,  $\gamma = 3.3$ ),  $h = 18.3$  m,  $T_p = 5$  sec,  $\theta_o = 0^\circ$ ,  $b/h = 0.1$ .

체에 비하여 우수하다. 그러나 파일 방파제는 커튼월 방파제에 비하여 파랑하중이 작기 때문에 안정성 측면에서 비교우위에 있으며 반사파를 줄일 수 있어 방파제 주변에서 운항하는 선박의 안정성에도 도움을 준다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 규칙파중 파일 방파제에 의한 산란파와 파랑하중의 해석결과를 다방향 불규칙파로 확장하여 방향 분포함수, 입사각, 잠긴깊이 그리고 공극율이 반사율과 투과율에 미치는 영향을 살펴보고 모형실험결과와 비교하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 규칙파중 커튼월 방파제와 파일 방파제에 대한 해석해와 모형실험결과는 대체로 잘 일치하였다. 방향성을 고려하지 않은 TMA 스펙트럼을 사용한 불규칙파에서도 해석하는 모형실험결과를 잘 따라가고 있음을 확인하였다. 이로부터 해석모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

2) 파일 방파제의 경우 불규칙파의 투과율이 규칙파의 투과율에 비하여 낮게 반사율은 높게 나왔으나 이들 사이의 값 차이는 크지 않기 때문에 안전율을 고려하는 공학적 설계관점에서 규칙파의 결과를 설계에 반영하는 것도 큰 무리가 없으리라 사료된다.

3) 방향성을 고려하지 않은 단일방향 TMA 스펙트럼을 사용한 결과와 입사파의 에너지가 주파수에 밀집된 너울파( $s_{\max} = 75$ )의 다방향 스펙트럼을 이용한 결과는 거의 일치하였다. 또한 너울파의 다방향 스펙트럼의 결과는 풍파의 다방향 스펙트럼의 결과에 비하여 반사율은 커지고 투과율은 줄어드는 경향이 나타났다.

4) 단일방향 TMA 스펙트럼을 사용한 해석결과에서 커튼월 방파제와 파일 방파제 모두 입사각이 증가함에 따라 반사율과 파랑하중은 같은 변화율을 가지고 서서히 줄어들다가 입사각이  $90^\circ$ 에 가까워지면서 급격하게 줄어 0에 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 반대로 투과율은 입사각이 증가함에 따라 완만하게 증가하다가 입사각이  $90^\circ$ 에 가까워지면서 급격히 1에 수렴한다.

5) 다방향 불규칙 파랑중 공극율이 커짐에 따라 반사율과 파랑하중은 줄어들며 반대로 투과율은 커지는 경향을 보여주었다. 또한 공극율에 따른 반사율과 투과율의 변화 폭은 잠긴깊이가 깊을수록 더욱 커진다.

## 참 고 문 헌

- 윤성범, 이종인, 남두현, 김선형 (2006). 유공벽의 두께를 고려한 파의 에너지손실계수. 한국해양해양공학회지, **18**(4), 321-328.
- 조일형, 고희준 (2007). 원형 파일 방파제에 의한 반사율과 투과율. 한국해양해양공학회지, **19**(1), 38-44.
- Abul-Azm, A. G. (1993). Wave diffraction through submerged

- breakwaters. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.* ASCE, **119**, 587-605.
- ASTF, (1992). Wave barrier research. *Engineering Report*, Alaska Sci. and Technol. Foun., **39**.
- Bouws, F., Gunther, H., Rosenthal, W., Vincent, C.L. (1985). Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water: 1. Spectral form. *J. Geophys. Res.*, **90**, 975-986.
- Flagg, C.N. and Newman, J.N. (1971). Sway added-mass coefficients for rectangular profiles in shallow water. *J. Ship Research*, **15**, 257-265.
- Haskind, M. D. (1959). Radiation and diffraction by a flat plate floating vertically. *Prikl. Mat. Mekh.*, **23**, 546-556.
- Hesselmann, K. (1973). Measurement of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsches Hydr. Zeit.*, **A12**, 1-95.
- Huang, Z. (2007). Wave interaction with one or two rows of closely spaced rectangular cylinders. *Ocean Engineering*, **34**, 1584-1591.
- Isaacson, M., Premasiri, S., Yang, G. (1998). Wave interactions with vertical slotted barrier. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.* ASCE, **124**, 118-126.
- Liu, P. L-F. and Abbaspour, M. (1982). Wave scattering by a rigid thin barrier. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Div.* ASCE, **108**, 479-490.
- Losada, I. J., Losada, M. A., Roldan, A. J. (1992). Propagation of oblique incident waves past rigid vertical thin barriers. *Appl. Ocean Res.* **14**, 191-199.
- Losada, I. J., Losada, M. A., Losada, R. (1994). Wave spectrum scattering by vertical thin barriers. *Appl. Ocean Res.* **16**, 123-128.
- Mei, C. C., Liu, Philip L-F. and Ippen, A.T. (1974). Quadratic loss and scattering of long waves. *J. Waterways Harbors and Coastal Eng.* ASCE, **100**, 217-239.
- Suh, K.D., Shin, S. and Cox, D.T. (2006). Hydrodynamic characteristics of pile-supported vertical wall breakwaters. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.* ASCE, **132(2)**, 83-96.
- Uesell, F. (1974). The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **43**, 372-382.

---

Received July 30, 2007

Accepted December 5, 2007