

# 사각형형상 불투과성 수중방파제에 의한 불규칙파의 변형

## Transformation of Irregular Waves due to Rectangular Submerged Non-porous Breakwaters

황종길\* / 이승협\*\* / 조용식\*\*\*

Hwang, Jong-Kil / Lee, Seung-Hyeob / Cho, Yong-Sik

### Abstract

A combined experimental and numerical effort is presented for investigation of reflection of irregular waves due to rectangular submerged breakwaters. In the numerical model, the Reynolds equations are solved by a finite difference method and  $k-\varepsilon$  model is employed for the turbulence analysis. To track the free surface displacement, the volume of fluid method is employed. Numerical predictions of transmission and reflection coefficients are verified by comparing to laboratory measurements. Very reasonable agreements are observed. The reflection coefficients become stronger in proportion to numbers of submerged breakwaters.

**Keywords** : irregular wave, reflection coefficient, transmission coefficient, submerged non-porous breakwaters, VOF method,  $k-\varepsilon$  equations

### 요 지

본 연구에서는 사각형형상 수중방파제에 의한 불규칙파의 반사에 대하여 수리모형실험과 수치모형실험을 수행한 후 실험결과를 비교하였다. 수치해석 모형에서는 Reynolds 방정식을 지배방정식으로 사용하고 난류해석을 위해  $k-\varepsilon$  모델을 적용하였으며, 자유수면변위를 추적하기 위해 VOF기법을 사용하였다. 수리모형실험과 수치모형실험의 결과는 서로 잘 일치하였으며, 수중방파제의 배열이 증가함에 따라 반사율은 증가하였다.

**핵심용어** : 불규칙파, 반사율, 통과율, 불투과성 수중방파제, VOF 기법,  $k-\varepsilon$  방정식

### 1. 서 론

심해에서 발달한 파랑이 해안으로 전파하는 동안 해저지형 또는 구조물의 영향으로 인해 회절, 굴절, 반사, 천수 및 쇄파 등과 같은 변형을 겪게 되며, 파랑은 연안침식 및 해안구조물의 안전과 설계에 영향을 미친

다. 연안침식은 일반적으로 태풍 등과 같은 이상조건에서 발생한 후 평상시 다시 회복되는 양상을 가지며, 연안침식을 방지하는 구조물 중 수중방파제(submerged breakwater)는 입사하는 파랑에너지를 대규모로 감소시켜 연안침식을 방지할 뿐만 아니라 방파제를 수중에 건설함으로써 해역환경을 개선한다.

\* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정  
Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea  
(E-mail: hjk7707@ihanyang.ac.kr)

\*\* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정  
Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea  
(E-mail: pachen33@empal.com)

\*\*\* 교신저자, 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수  
Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University  
(E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

수중방파제와 관련된 국외 연구로서 Chang 등(2001)과 Lin(2004)은 고립파에 의한 사각형형상 수중방파제에서 파랑 전파에 대해 연구하였고, Hwung 등(2002)은 실험을 통해 투과성 수중방파제에 의한 파랑의 변형에 대해 연구하였다. Losada 등(1997)은 투과성 수중 계단 지형을 통과하는 파랑에 대한 수치모형실험과 수치해석을 수행하였으며, Mase 등(2000)은 수중방파제에 의한 파랑의 Bragg반사에 대한 실험을 실시하였다.

국내에서도 다양한 수치해석 기법을 통해 수중방파제에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다. 조용식 등(2002)은 사각형형상 수중방파제의 Bragg 반사에 대한 수치모형실험과 고유함수전개법을 이용한 해석을 통해서 연구를 하였으며, 전찬후 등(2003)은 투과성 사다리꼴형상 수중방파제의 Bragg 반사 특성에 대해서 연구하였다. 그렇지만, 이는 모두 입사파가 정현파인 조건에서 이루어졌다. 실제 해역에서의 파랑조건은 매우 불규칙하므로, 수중방파제의 현장 적용성을 검토하기 위해서는 불규칙파에 대한 반사특성의 해석이 필요하다. 허동수와 김도삼(2003)은 수중방파제 배후에서의 파랑에너지 변화를 수치모의하였지만, 이는 수치모형실험없이 수행되었고, 정재상 등(2004)은 고유함수전개법을 이용하여 불규칙파의 반사를 해석하였다.

본 연구에서는 난류 흐름의 평균운동을 표현하는 Reynolds 방정식을 지배방정식으로 하고, 난류 운동에너지와 소산율을 나타내는  $k-\epsilon$ 모델과 복잡한 자유수면 표현을 위해 VOF(volume of fluid) 기법을 사용하였다. 그리고 정확한 반사율을 산정하기 위하여, 수치모형 실험에서는 Goda와 Suzuki(1976)에 의해 제안된 2점법을 사용하여 입사파와 반사파를 분리하였으며, 수치모형 실험에는 박우선 등(1992)과 Suh 등(2001)에 의해 제안된 3점법을 사용하여 입사파와 반사파를 분리하였다. 따라서, 본 연구에서는 입사파가 불규칙파인 조건에서 불투과성 수중방파제에 의한 반사율과 통과율을 Reynolds 방정식,  $k-\epsilon$ 모델 및 VOF 기법을 적용한 수치모형에 의한 예측 결과와 수치모형실험의 관측결과를 비교하였으며, 수중방파제 저면폭의 변화에 따른 반사율을 해석하였다.

## 2. 지배방정식과 수치기법

난류 흐름에서 속도는 평균 속도  $\langle u_i \rangle$ 와 난류 속도  $u_i'$ 로 구별되고, 압력은 평균 압력  $\langle P \rangle$ 와 난류 압력  $P'$ 로 구분되며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$u_i = \langle u_i \rangle + u_i', \quad P = \langle P \rangle + P' \quad (1)$$

식 (1)에서  $i=1, 2, 3$ 으로 차원을 나타낸다.

유체의 흐름을 비압축성으로 가정하면, 평균 흐름은 연속방정식 (2)와 운동량방정식 (3)과 같은 Reynolds 방정식에 의해 지배받는다(조용식과 전찬후, 2003).

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \tau_{ij} \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle u_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} \quad (3)$$

식 (3)에서  $\rho$ 는 유체의 밀도를 나타내며,  $g_i$ 는 중력가속도의 방향 성분을 의미한다. 또한,  $\langle \tau_{ij} \rangle$ 는 평균 흐름의 점성 응력에 대한 텐서이며, 뉴턴 유체에서는 분자 점성을 나타내는  $\mu$ 와 평균 흐름의 변형률 텐서  $\langle \sigma_{ij} \rangle$ 를 이용하여 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\langle \tau_{ij} \rangle = 2\mu \langle \sigma_{ij} \rangle \quad (4)$$

평균 흐름에서 난류 변동의 영향은 Reynolds 응력텐서를 이용하여 표현하는 것이 가능하다. Reynolds 응력텐서가 비선형 Reynolds 응력 모델로부터 평균흐름의 변형률과 상관관계가 있다고 가정하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다(Lin과 Liu, 1998).

$$\begin{aligned} \rho \langle u_i' u_j' \rangle &= \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - C_d \rho \frac{k^2}{\epsilon} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \\ &\quad - \rho \frac{k^3}{\epsilon^2} \left[ C_1 \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_i} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) \\ &\quad + C_2 \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_k} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \\ &\quad \left. + C_3 \left( \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_i} \frac{\partial \langle u_k \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{3} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_l \rangle}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

식 (5)에서  $C_d$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ 와  $C_3$ 는 경험상수이고,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta 함수이다. 또한,  $k$ 는 난류 운동에너지,  $\epsilon$ 은 난류 운동에너지의 소산율을 의미한다.

본 연구의 수치모형에 적용한  $k-\epsilon$ 모델은 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도된다(Lin과 Liu, 1998).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\nu_i}{\sigma_k} + \nu \right) \right] - \langle u_i' u_j' \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \epsilon \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\nu_i}{\sigma_\epsilon} + \nu \right) \right] \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \nu_i \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} &- C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_{1\epsilon}$ 과  $C_{2\epsilon}$ 는 경험상수이며, 식 (6)과 식 (7)의 결과로 식 (8)이 유도된다.

$$k = \frac{1}{2} \langle u_i' u_i' \rangle, \quad \epsilon = \nu \left\langle \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \right)^2 \right\rangle \quad (8)$$

식 (8)에서  $\nu$ 는 동점성계수(molecular kinematic viscosity)이다.

본 연구의 수치모형에서 Reynolds 방정식과  $k-\epsilon$  모델은 two-step projection 유한차분기법을 사용하여 해석하였다(Chorin, 1968). 시간항은 전방차분법으로 차분화하였고, 이송항은 중앙차분법과 풍상차분법(upwind scheme)의 조합으로 이산화하였다. 또한, 수치수조안에서 파랑이 반사없이 통과하도록 격자영역의 왼쪽과 오른쪽에 개방경계조건을 사용하였으며, 이는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c_0 \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

식 (9)에서  $\phi$ 는 평균 속도, 평균 자유수면변위 등과 같은 파랑의 성질이고,  $c_0$ 는 개방경계에서 파랑의 위상속도이다.

VOF 기법은 계산 격자의 형태를 정의하는 방법으로 자유수면을 정확하게 표현할 수 있으며, 자유수면 운동을 추적하는 밀도변화 방정식은 식 (10)과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \nu \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

먼저,  $\rho(x, y, t) = F(x, y, t)\rho_f$ 로 정의하고, 식 (2)에 식 (10)을 대입하면 식 (11)과 같이  $F(x, y, t)$ 에 대한 이송방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uF) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu F) = 0 \quad (11)$$

계산 격자의 위치가  $(i, j)$ 에 있을 경우 식 (11)은 식

(12)와 같이 유한차분 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{i,j}^{n+1} &= F_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} (u_{i+1/2,j}^{n+1} F_{i,j}^n - u_{i-1/2,j}^{n+1} F_{i,j}^n) \\ &- \frac{\Delta t}{\Delta y_i} (\nu_{i,j+1/2}^{n+1} F_{i,j}^n - \nu_{i,j-1/2}^{n+1} F_{i,j}^n) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서  $F_{i,j}^n$ ,  $F_{i,j}^n$ ,  $F_{i,j}^n$  및  $F_{i,j}^n$ 는 차례대로 계산 격자의 오른쪽, 왼쪽, 위쪽 및 아래쪽에서의  $F$ 의 값이며,  $F$ 에 대한 1차도함수는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)_{i,j}^n &= \\ \frac{[\frac{\Delta x_{i-1/2}}{\Delta x_{i+1/2}} (\hat{F}_{i+1,j}^n - \hat{F}_{i,j}^n) + \frac{\Delta x_{i+1/2}}{\Delta x_{i-1/2}} (\hat{F}_{i,j}^n - \hat{F}_{i-1,j}^n)]}{\Delta x_{i-1/2} + \Delta x_{i+1/2}} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $\hat{F}_{i+1,j}^n$ 는  $(i+1, j)$  격자에서의 계산 격자 값으로, 계산 격자 주위에 연직으로 위치해 있는 세 개 격자의 값을 평균하여 구한다.

### 3. 실험조건과 입사파

본 실험에서 사용한 장비는 그림 1과 같이 폭 0.6 m, 높이 1.1m, 길이 32.5m의 수로와 전기서보 피스톤식 조파기로 구성된 단면 조파장치로서 일방향 불규칙파를 입사파로 사용하였다.

사각형형상의 수중방파제는 그림 2에 도시한 것과 같이 저면폭( $W_b$ )이 0.4m, 높이( $h_s$ )가 0.4m이고 수심( $h$ )은 0.8m이며, 수중방파제의 배열은 2열 및 3열을 대상으로 하였다. 수중방파제의 배치간격( $d$ )은 2m로 설정하였으며, 이는 조용식 등(2002)이 규칙파에 대해서 해석한 결과와 불규칙파에 대해서 해석한 정재상 등(2004)의 결과를 보면 모두 배치간격이 2m에서 반사율이 크게 나타났기 때문이다. 본 연구에서는 수중방파제가 불투과제인 경우에 대해 수치모형실험과 수리모형실험을 각각 수행하였다. 수치모형실험에서 수치수조의 크기는 42.0m×1.0m이며,  $x$ 방향 격자는 0.1m로 동일한 간격을 사용하였고,  $y$ 방향은 계산의 정확도를 높이기 위해 2개의 간격을 사용하였다. 자유수면과 수중방파제가 위치한 구간에서는 0.015m의 격자간격을 이용하였고, 그 외 구간의 간격은 0.02m를 사용하였으며, 시간 간격  $\Delta t$ 는 0.02sec를 사용하였다. 그리고 수치수조 양끝에서는 개방경계조건을 적용하여 파랑의 반사 없이 통과하도록 하였다.

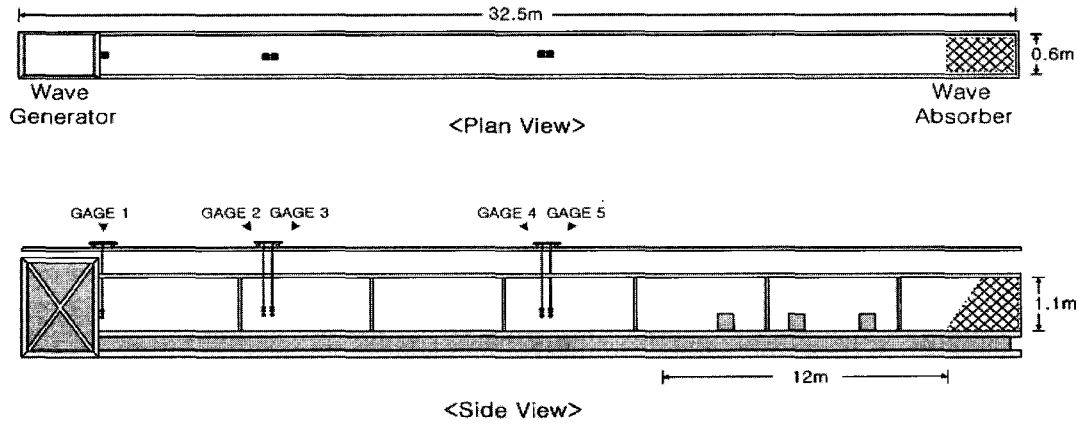


그림 1. 단면수로 개념도

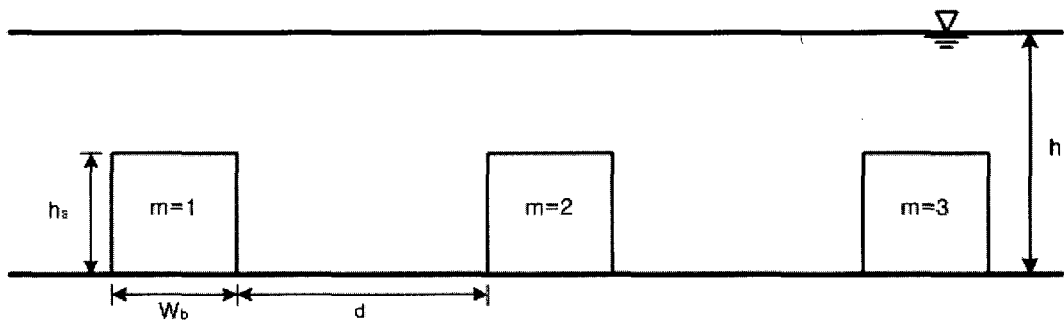


그림 2. 사각형형상 수중방파제 단면 형상

수리모형실험과 수치모형실험에 사용된 일방향 불규칙파는 식 (14)와 같은 Bretschneider-Mistuyasu 스펙트럼(Goda, 2000)을 목표 스펙트럼으로 설정하여 재현하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (14)$$

식 (14)에서  $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼,  $H_{1/3}$ 는 불규칙파의 유의파고,  $T_{1/3}$ 는 유의파의 주기이며,  $f$ 는 주파수를 나타낸다.

수치모형실험에서 불규칙파의 조파는 다음과 같은 과정을 반복하여 수행하였다. 불규칙파는 다른 주기와 파고 등을 가지는 선형파의 조합으로 나타낼 수 있다. 불규칙파의 성분을 분리하기 위해서, 목표 스펙트럼을 Fourier 변환하여  $n$ 개의 성분으로 분리하고 각각의 주기와 파고를 구하였다. 각 성분파의 대표 주파수는 스펙트럼 밀도의 면적을 가중치로 한 평균값으로 취하였다. 분리된 성분은 파랑의 중첩에 의해서 불규칙파를 합성하게 된다. 불규칙파의 특성을 나타내기 위해서는 충분한 시간동안 조파되어야하기 때문에, 수치모형실험

에서는 최소 100파 이상이 되도록 하기 위하여 200sec 이상의 자료를 사용하였다.

그림 3은  $kh=0.5$ 인 경우 입사파 스펙트럼을 목표 스펙트럼과 비교하여 도시한 것으로 재현된 불규칙파의 스펙트럼은 목표 스펙트럼과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

표 1은 목표 파랑과 입사 파랑의 유의 파고와 유의 주기를 비교한 것으로, 영점상향교차법(zero-upcrossing method)(Goda, 2000)을 적용하여 산출하였다. 산출된 결과를 비교해보면 목표 파랑과 입사 파랑의 유의 파고와 유의 주기는 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이는 입사 파랑이 잘 재현되었음을 보여준다.

수로내에 진행되는 파랑은 구조물에 의해 반사되며, 반사된 파랑은 조파판까지 역 진행하며 다시 재반사된다. 이러한 과정이 반복적으로 발생하기 때문에 수로내에는 다중 반사계가 형성된다. 따라서, 입사파와 반사파가 중첩된 파랑으로부터 입사파와 반사파를 분리하는 것은 수치모형실험과 수치모형실험에서 매우 중요한 일이다.

본 연구에서는 입사파와 반사파를 분리하기 위해서 수치모형실험에서는 Goda와 Suzuki(1976)에 의해 제안된 2점법을 사용하였고, 수치모형실험에서는 박우선 등

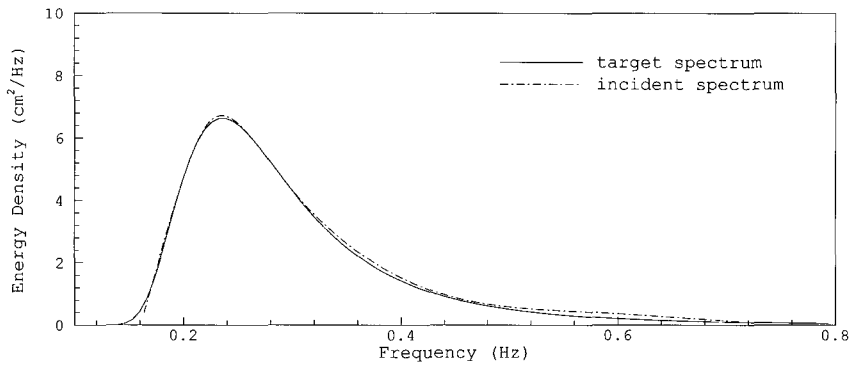


그림 3. 목표스펙트럼과 입사파 스펙트럼 비교 ( $kh=0.5$ )

표 1. 목표 파랑과 입사 파랑의 유의파고와 유의주기 비교

$kh$	Target Wave		Incident Wave	
	$H_{1/3}(\text{cm})$	$T_{1/3}(\text{sec})$	$H_{1/3}(\text{cm})$	$T_{1/3}(\text{sec})$
0.5	4.00	3.733	3.99	3.718
0.7	4.00	2.759	4.03	2.782
0.9	4.00	2.235	3.97	2.291
1.1	4.00	1.912	3.94	1.906
1.3	4.00	1.696	3.96	1.725
1.5	4.00	1.540	3.98	1.596
1.7	4.00	1.423	3.97	1.478

(1992)과 Suh 등(2001)에 의해 제안된 3점법을 사용하였다. 박우선 등(1992)과 Suh 등(2001)에 제안된 3점법은 다음과 같다.

$$\eta_i(t) = \frac{H_i}{2} \cos(k_i x - \omega_a t + \phi_i) \quad (15)$$

$$\eta_r(t) = \frac{H_r}{2} \cos(k_r x - \omega_a t + \phi_r) \quad (16)$$

입사파( $\eta_i$ )와 반사파( $\eta_r$ )를 식 (15)와 (16)으로 표현하면, 구조물 전방에 설치된 파고계에서 측정되는 파랑은 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서,  $H$ 는 파고,  $k$ 는 파수,  $\phi$ 는 위상각을 나타내고,  $\omega_a$ 는 절대 각진동수를 나타낸다. 그리고, 아래첨자  $i$ 와  $r$ 은 각각 입사파와 반사파를 나타내며,  $e_n(t)$ 은  $n$ 번째 파고계의 파고기록에 포함된 파랑의 측정오차이다.

$$\eta_n(t) = \frac{H_i}{2} \cos(k_i x_n - \omega_a t + \phi_i) + \frac{H_r}{2} \cos(k_r x_n - \omega_a t + \phi_r) + e_n(t) \quad (17)$$

식 (17)은 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\eta_n(t) = X_1 \cos(\omega_a t - k_i x_n) + X_2 \cos(\omega_a t + k_r x_n) + X_3 \sin(\omega_a t - k_i x_n) - X_4 \sin(\omega_a t + k_r x_n) + e_n(t) \quad (18)$$

식 (18)에서  $x_n$ 은 기준점으로부터  $n$ 번째 파고계까지의 거리를 나타내며,  $X_j$ 는 입사파와 반사파의 파고 및 위상에 관련된 미지의 계수이다.

파랑이  $N$ 개의 파고계로부터  $T_m$  시간동안 동시에 측정된다고 가정하면, 파고계에 포함된 오차 제곱의 총합은 식 (19)와 같이 표현된다.

$$\epsilon^2 = \sum_{n=1}^N \int_0^{T_m} [e_k(t)]^2 dt \quad (19)$$

오차제곱의 총합을  $X_j$ 에 대해 최소화하면, 입사파와 반사파의 파고와 위상은 얻을 수 있다. 이는 식 (20)과 같이 표현할 수 있으며, 이로부터 얻어지는 선형 대수 방정식을 풀어  $X_j$ 를 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial \epsilon^2}{\partial X_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (20)$$

계산된  $X_j$ 를 이용하여 입사파와 반사파의 위상을 구할

수 있으며,  $X_j$ 와 위상을 식 (21)에 대입하여 입사파고와 반사파고를 얻을 수 있다.

$$H_i = \frac{2(X_1 + X_3)}{\cos \phi_i + \sin \phi_i}, \quad H_r = \frac{2(X_2 + X_4)}{\cos \phi_r + \sin \phi_r} \quad (21)$$

본 연구에서는 불규칙파의 입사파와 반사파를 분리하기 위해서 각 파랑의 성분별로 상기의 과정을 반복하여 적용하였다.

적용된 3점법을 검증하기 위해서 수치수조 안에 장애물이 없는 완전통과와 높이 0.9m의 장애물을 설치한 완전반사의 두 가지 경우에 대해서 각각의 반사율을 구하였다. 사용된 입사파의 제원은 유의파고 0.04m, 유의주기는 3.7333sec이고, 수심은 0.8m이다. 그림 4는 3점법을 적용하여 완전통과와 완전반사의 조건에서 입사파와 반사파를 분리한 그림이며, 분리된 입사파는 목표 입사파와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 완전통과인 경우 반사율은 0.037이며, 완전반사인 경우에는 1.009이었다.

그림 5는  $kh=0.5$ 인 경우, 검증된 3점법을 적용하여 3열 수중방파제의 입사파와 반사파를 분리한 그림이다. 분리된 입사파는 목표 입사파와 잘 일치하고 있음을 보

여주며, 0.23Hz에서 에너지 밀도가 최대가 되었음을 보여준다.

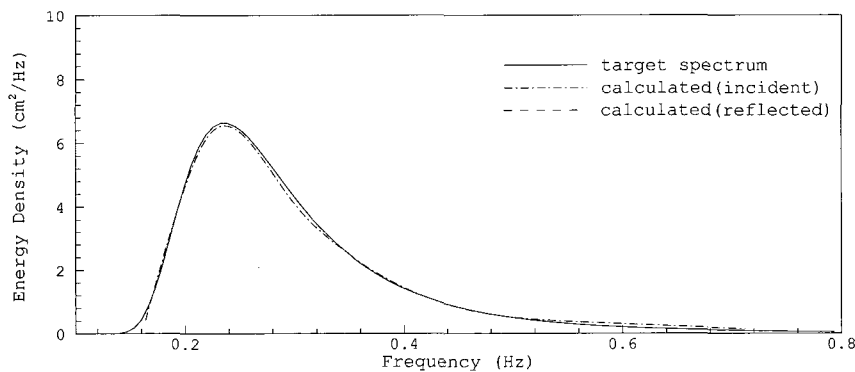
#### 4. 결과분석

입사파와 반사파의 에너지는 각각의 파고의 자승에 비례하므로 파고의 비로 정의된 반사율( $R$ )과 통과율( $T$ )은 식 (22)와 같이 표현할 수 있다.

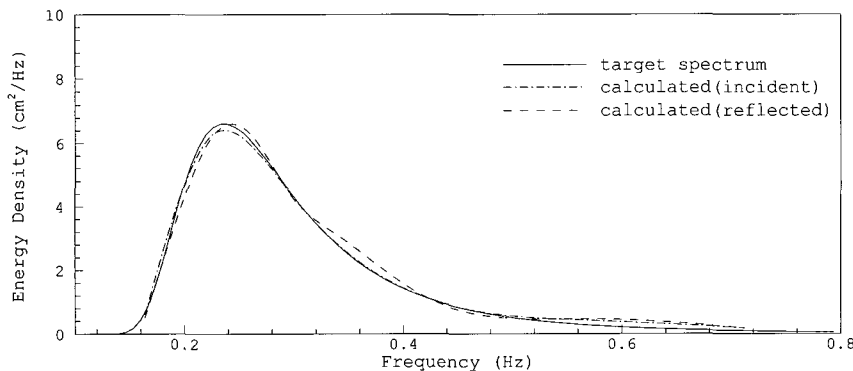
$$R = \sqrt{E_r/E_i}, \quad T = \sqrt{E_t/E_i} \quad (22)$$

여기서  $E_i$ ,  $E_r$  및  $E_t$ 은 차례대로 입사파, 반사파 및 통과파의 에너지이다.

그림 6과 그림 7은 불투과성 사각형형상 수중방파제의 배열 수(m) 변화에 따른 반사율과 통과율을 각각 도시한 것이다. 수치모형실험 및 고유함수전개법(EFEM)으로 해석한 반사율 결과를 수리모형실험 결과를 비교하였다. 정재상 등(2004)에 의해 계산된 고유함수전개법의 해석결과는 불규칙파를 다수의 규칙파의 중첩으로 구성하였으며, 각각의 규칙파의 해석결과를 합성하여 해석한 것이다.



(a) 완전통과



(b) 완전반사

그림 4. 3점법 검증

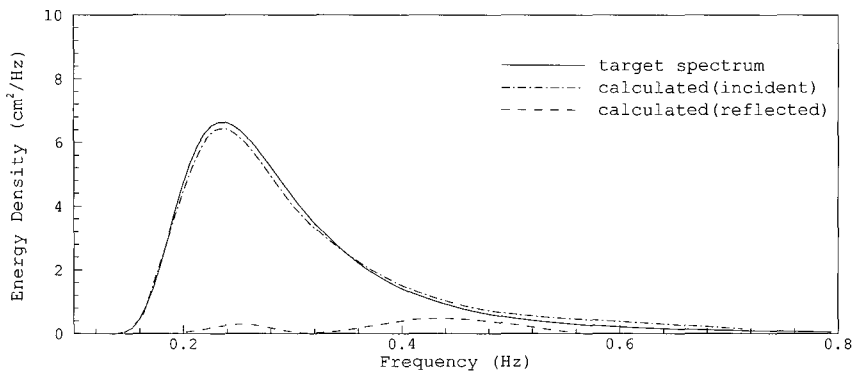


그림 5. 입사파와 반사파 분리 ( $m=3$ ,  $kh=0.5$ )

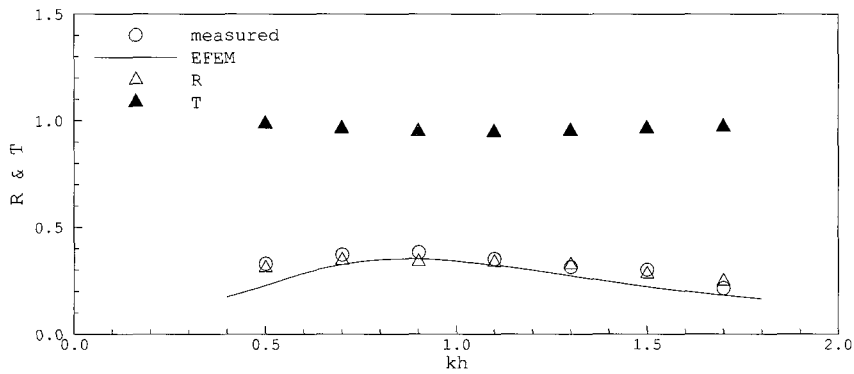


그림 6. 사각형형상 수중방파제의 반사율과 통과율 ( $m=2$ )

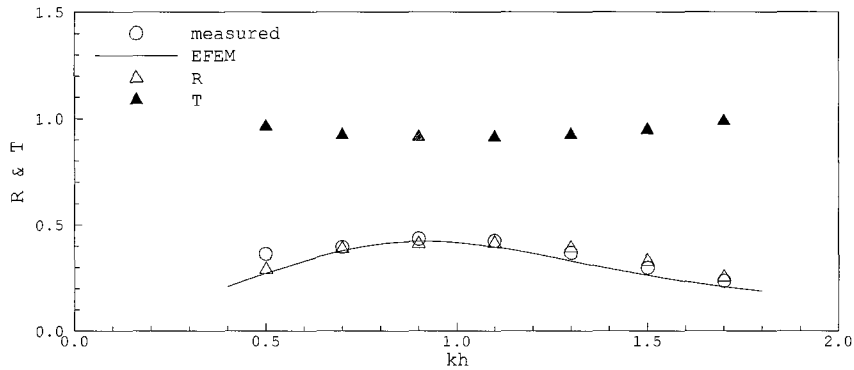


그림 7. 사각형형상 수중방파제의 반사율과 통과율 ( $m=3$ )

그림 6은 사각형형상 수중방파제가  $2m$  간격으로 2개( $m=2$ )가 설치된 경우로서, 수리모형실험 결과와 수치모형실험 및 고유함수전개법에 의한 해석결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 주기가 짧아질수록 고유함수전개법에 의한 해석결과는 수리모형실험 결과와 다소 차이를 보이고 있지만, 본 연구에서 수행한 수치모형실험 결과는 수리모형실험 결과와 매우 근사함을 알 수 있다. 최대 반사율은 수리모형실험과 수치모형실험 모두  $kh=0.9$ 에서 나타났고, 반사율은 각각 0.38과 0.34였다.

그림 7은 사각형형상의 수중방파제가  $2m$  간격으로

3개( $m=3$ ) 설치된 경우로서 그림 6의 경우와 마찬가지로 수리모형실험 결과와 수치모형실험의 결과가 전체적으로 잘 일치하고 있다. 고유함수전개법에 의한 결과는  $m=2$ 인 수중방파제의 경우와 마찬가지로  $kh < 1.0$  범위에서는 수리모형실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있으나,  $kh > 1.0$ 인 범위에서는 약간의 차이를 나타내고 있다. 최대 반사율은 수리모형실험과 수치모형실험 모두  $kh \approx 1.1$ 에서 나타났고, 반사율은 각각 0.42와 0.41로 나타났다.

그림 6과 7에서 반사율과 통과율은  $R^2 + T^2 \approx 1$ 을 만족하고 있음을 알 수 있다. 이는 파랑이 좌우대칭인

지형을 통과할 때 에너지 보존법칙에 의해서, 반사율과 통과율을 각각 제곱한 합이 1.0이 됨을 의미한다. 즉, 본 수리모형실험에 의한 결과는 파랑의 에너지보존을 잘 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 8은 사각형형상 수중방파제의 배열에 따른 반사특성을 비교하기 위해 수리모형실험과 수치모형실험 결과를 도시한 것이다. 수리모형실험과 수치모형실험 모두 배열의 수가 증가할수록 반사율 또한 증가하였으며, 최대 반사율은  $kh \approx 1$  부근에서 나타났다. 배열 수에 관계없이 공진이 발생하는  $kh$ 는 모두  $0.9 < kh < 1.1$  이었다. 이는 수리모형실험 및 수치모형실험 결과 모두 Bragg 반사 조건인  $kh \approx 1$  부근에서 공명현상에 의해 반사율이 증폭되었다고 판단된다.

그림 9와 10은 수리모형실험에서 2m 간격으로 3개 ( $m=3$ ) 설치된 수중방파제의 저면폭의 변화에 따른 반사율과 에너지 소산율을 도시한 것이다. 수심을 기준으로 방파제의 높이( $h_b$ )는 0.4m로 고정시키고, 저면폭( $W_b$ )은 수심을 기준으로 0.3h~1.1h까지 0.2h씩 증가시켰다. 수중방파제의 높이를 0.5h로 고정시킨 것은, 실제 해역에 수중방파제를 설치할 경우, 선박의 운항에 지장이 없도록 하기 위함이다.

그림 9에서 저면폭이 0.9h보다 커지면,  $kh \approx 1.1$  부근

에서 반사율이 갑자기 작아지는 것을 알 수 있다. 반사율이 갑자기 작아지는 것은 저면폭의 증가에 따른 쇄파가 발생하였기 때문으로 판단된다. 이를 확인하기 위해서, 그림 10에서 에너지 소산율( $C_f$ )을 도시하였다. 에너지 소산율은  $C_f = 1 - R^2 - T^2$ 로 나타낼 수 있다. 에너지 보존법칙에 의해 좌우대칭인 지형을 지나는 파랑의 반사율과 통과율의 제곱의 합은 1을 만족해야 하지만, 저면폭이 0.9h보다 커지면 1보다 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 쇄파에 의해서 차이만큼 에너지 손실이 발생하였기 때문이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기존의 수심 평균된 방정식인 천수방정식과 Boussinesq 방정식으로 재현하기 어려운 자유수면 변위의 정확한 형상과 유속장을 표현하고 난류운동 에너지의 공간적인 분배를 결정하기 위해 Reynolds 방정식,  $k-\epsilon$  모델 및 VOF 기법을 사용하였으며, 수리모형실험 결과는 수치모형실험과 고유함수전개법을 이용한 결과와 비교하였다. 그리고 정확한 반사율 산정을 위하여 수리모형실험의 파고기록은 2점법을 사용하여 입사파와 반사파를 분리하였으며, 수치모형실험의 파고기록은 3점법을 사용하여 분리하였다.

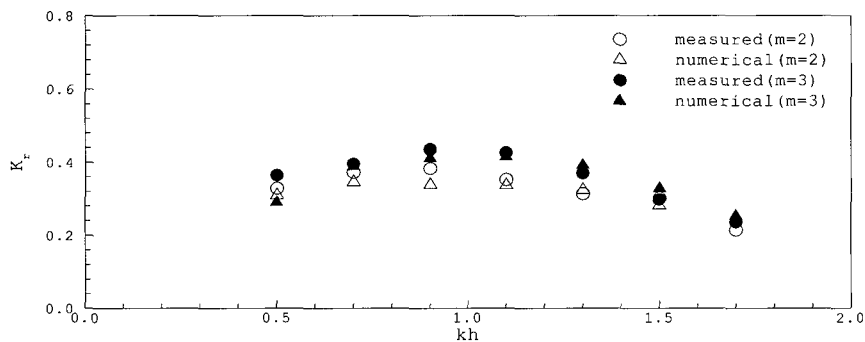


그림 8. 수중방파제 배열에 따른 반사율

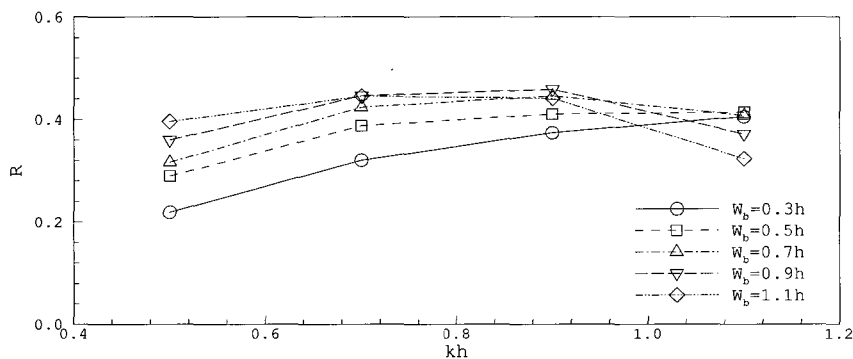


그림 9. 수중방파제 저면폭의 변화에 따른 반사율 ( $m=3$ )



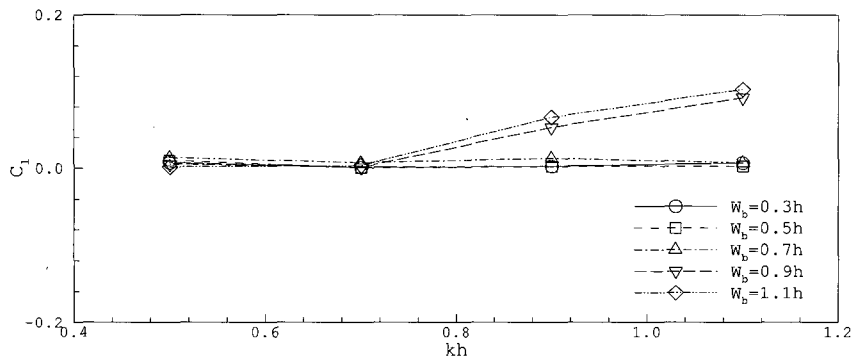


그림 10. 수중방파제 저면폭의 변화에 따른 에너지 소산율 ( $m=3$ )

수치모형실험 결과는 고유함수전개법을 이용한 결과보다 수리모형실험 결과와 잘 일치하였다. 고유함수전개법에 의한 결과는 주기가 짧아질수록 수치모형실험 결과와 차이가 발생하였지만, 수치모형실험에 의한 결과는 주기에 관계없이 비교적 잘 일치하였다. 또한, 수중방파제의 배열이 증가할수록 반사율은 증가하였지만, 공진주기는 비슷한 위치에서 발생하였다. 반사율과 통과율을 각각 제곱한 합이 1.0이 됨을 통해서 파랑의 에너지보존을 잘 만족하고 있음을 확인할 수 있었다.

수중방파제 저면폭의 증가에 따른 수리모형실험을 수행한 결과, 반사율은 저면폭이 증가함에 따라 증가하지만, 일정크기를 초과하면 오히려 감소함을 알 수 있었다. 이러한 현상이 발생하는 여러 가지 원인 중에서, 가장 큰 원인은 쇄파가 발생하여 에너지를 감소시켰기 때문으로 판단된다.

수중방파제의 목적이 반사율을 증가시키고 쇄파를 발생시켜 에너지를 감소시키는 것이다. 단순히, 수중방파제의 높이를 증가시켜 반사율을 증가시키는 방법은 선박운항에 방해줄 수 있다. 따라서, 수중방파제의 저면폭의 변화와 배열의 변화에 관한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 산학연 공동기술개발 컨소시엄 과제로 중소기업청, 서울특별시 및 (주)대영엔지니어링으로부터 재정적 보조를 받았기에 이에 사의를 표합니다.

### 참고 문헌

박우선, 오영민, 전인식 (1992). "최소자승기법에 의한 입·반사파의 분리기법." *한국해양공학학회논문집*, 제4권, 제3호, pp. 139-145.

조용식, 이종인, 김영택 (2002). "사각형형상 수중방파제의 반사에 관한 수리실험." *한국수자원학회논문집*, 제34권, 제5호, pp. 563-573.

조용식, 전찬후 (2003). "크노이드파의 발생과 최대 처오름높이." *한국해양해양공학학회논문집*, 제15권, 제2호, pp. 80-85.

전찬후, 조용식, 이종인 (2003). "사다리꼴형상 수중방파제에 의한 정현파의 Bragg 반사." *한국수자원학회논문집*, 제36권, 제5호, pp. 741-749.

정재상, 조대회, 황종길, 조용식 (2004). "사각형형상 수중방파제를 통과하는 불규칙파의 반사." *한국수자원학회논문집*, 인쇄중.

허동수, 김도삼 (2003). "VOF법에 의한 불규칙파동장에 있어서 불투과장애에 의한 파랑에너지 변형특성." *한국해양해양공학학회논문집*, 제15권, 제4호, pp. 207-213.

Chang, K.-A., Hsu, T.-J. and Liu, P. (2001). "Vortex generation and evolution in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle. Part I. Solitary waves." *Coastal Engineering*, Vol. 44, pp. 13-36.

Chorin, A.J., (1968). "Numerical solution of the Navier-Stokes equations." *Math Comput*, Vol. 22, pp. 745-762.

Goda, Y. (2000). "Random Seas and Design of Maritime Structures." World Scientific, Singapore.

Goda, Y. and Suzuki, Y. (1976). "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments." *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 828-845, USA.

Hwung, H.-H., Tu, S.-Y. and Hwang, K.-S. (2002). "The interaction of a solitary wave and a submerged porous breakwater." *Proceedings of the*

- 5th International Conference on Hydrodynamics*, pp. 365-370, Taiwan.
- Lin, P. and Liu, P. L.-F., (1998). "A numerical study of breaking waves in the surf zone." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 359, pp. 239-264.
- Lin, P. (2004). "A numerical study of solitary wave interaction with rectangular obstacles." *Coastal Engineering*, Vol. 51, pp. 35-51.
- Losada, I.J., Patterson, M.D. and Losada, M.A. (1997). "Harmonic generation past a submerged porous step." *Coastal Engineering*, Vol. 31, pp. 281-304.
- Mase, H., Oki, K., Kitano, T. and Mishima, T. (2000). "Experiments on Bragg scattering of waves due to submerged breakwaters." *Coastal Structures '99*, pp. 659-665.
- Suh, K.D., Park, W.S. and Park, B.S. (2001). "Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes." *Coastal Engineering*, Vol. 43, pp. 149-159.
- (논문번호:04-78/접수:2004.08.11/심사완료:2004.10.11)