

## 다열 불투과성 수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 해석 Analysis of Multi-directional Random Waves Propagating over Multi Arrayed Impermeable Submerged Breakwater

정재상\* · 강규영\*\* · 조용식\*\*

Jae-Sang Jung\*, Kyu-Young Kang\*\* and Yong-Sik Cho\*\*

**요 지** : 본 연구에서는 고유함수전개법을 사용하여 다열 불투과성 수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 통과와 반사를 계산하였다. 입사하는 다방향 불규칙파랑은 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼과 Mitsuyasu 타입의 방향스펙트럼을 사용하여 재현하였다. 침두주파수의 Bragg 반사 조건에서 강한 반사가 발행하였다. 수중방파제가 3열이고, 상대높이가 0.6일 때 입사하는 다방향 불규칙파 에너지의 25% 이상이 외해로 반사되었다. 그리고, 최대분산계수  $s_{max}$ 가 증가할 경우, 다방향 불규칙파랑의 반사율도 증가하였다.

**핵심용어** : 다방향 불규칙파, 수중방파제, 고유함수 전개법, Bragg 반사

**Abstract** : In this study, transmission and reflection of multi-directional random waves propagating over impermeable submerged breakwaters are calculated by using eigenfunction expansion method. A series of multi-directional random waves is generated by using the Bretschneider-Mitsuyasu frequency and Mitsuyasu type directional spectrum. Strong reflection is occurred at the Bragg reflection condition of the peak frequency. If the row of breakwaters is fixed at 3 and the relative height of breakwater is fixed at 0.6, more than 25% of incident wave energy is reflected to offshore. It is also found that the reflection of directionally spreading random waves increases as the maximum spreading parameter  $s_{max}$  increases.

**Keywords** : multi-directional random waves, submerged breakwaters, eigenfunction expansion method, Bragg reflection

### 1. 서 론

심해에서 생성된 파랑은 지형변화에 의해 다양한 변형을 겪으면서 해안지역으로 전파해 온다. 입사해 오는 파랑은 해안선의 변화에 큰 영향을 주며, 또한 해안구조물의 설계 조건으로도 사용된다. 파랑에 의한 해안선의 변화 중 태풍 혹은 계절풍의 영향으로 발달한 고파랑에 의한 해안선의 침식문제는 우리나라에서도 널리 관심을 받고 연구가 수행되고 있는 주제이다(Jung and Cho, 2005). 일반적으로, 해안선의 침식을 방지하기 위해서 돌제(groin)나 이안제(offshore breakwater) 등이 건설되었다. 하지만, 환경적인 영향을 최

소화하고 해안경관의 보호를 위해서는 수중방파제(submerged breakwater)의 건설이 가장 바람직하다(이 등, 1999).

수중방파제의 개념은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 개념은 수중방파제 천단에서의 낮은 수심에 의해 천수(shoaling)를 인위적으로 발생시키며, 이에 의한 쇄파를 통해 입사하는 파랑의 에너지를 소산시키는 것이다(김, 2000). 두 번째 개념은 수중방파제 사이의 거리를 입사하는 파랑의 파장의 50%로 설정하여, 수중방파제와 입사파랑 사이의 공명현상(resonance)을 인위적으로 발생시킴으로써, 상당량의 파랑 에너지를 외해로 반사시키는 것이다(조 등, 2002). 본 연구에서는 이 두 가지 개념 중 두 번째 개념, 즉, 인위적

\*현대산업개발 토목설계팀(Civil Engineering Team Hyundai Development Company, 160 Samsung-dong, Gang Nam-gu, Seoul, 135-881, Korea, fmgon@hyundai-dvp.com)

\*\*한양대학교 토목공학과(Corresponding author: Yong-Sik Cho, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea, ysc59@hanyang.ac.kr)

인 Bragg 반사를 발생시켜 입사 파랑의 에너지를 감소시키는 수중방파제의 조건 결정에 대해 검토하였다. 다열 수중방파제의 경우, 1열 수중방파제에 비해 방파제의 천단고를 낮게 설계할 수 있기 때문에 비록 다열이긴 하지만 경제적으로 보다 유리하며, 소형 어선의 항해에 방해를 주지도 않으므로 안전성도 뛰어나다.

수중방파제에서의 파랑 변형은 규칙파 및 불규칙파를 대상으로 많은 연구자들에 의해 널리 연구되었다. 규칙파를 대상으로 한 연구는 다음과 같다. 이 등(2003)은 다양한 형상의 다열 수중방파제를 통과하는 규칙파의 반사에 관해 2차원 수리모형실험을 통해 연구하였으며, 사각형형상 및 사다리꼴 형상의 수중방파제가 가장 효과적임을 밝혔다. Johnson et al.(2005)은 1열 불투과성 수중방파제에서 파랑과 해류의 상호작용에 관해 3차원 수리모형실험을 통해 연구하였으며, Chang and Liou(2006)는 다열 수중방파제를 통과하는 규칙파의 Bragg 반사를 matching 법을 사용하여 수치적으로 해석하였다. Hsu et al.(2004)은 2열 불투과성 수중방파제를 통과하는 규칙파의 쇄파특성에 대해 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 모델을 이용하여 해석하였다. 이외에 투과성 구조물을 통과하는 규칙파의 변형에 관한 연구 역시 Ting et al.(2004), Rambabu and Mani (2005) 그리고 Tsai et al.(2006)이 수치해석 및 수리모형실험을 통해 수행하였다. 진술한 연구들에 의해 수중방파제를 통과하는 규칙파의 반사, 쇄파변형, 수중방파제의 유공율에 따른 파랑변형 등이 규명되었다.

수중방파제를 통과하는 불규칙파랑에 관한 연구 역시 많은 진척이 있었다. 일방향 불규칙파랑에 관한 연구는 Bailard et al.(1992), Lara et al.(2006) 및 Johnson(2006)에 의해 수행되었으며, 다방향 불규칙파랑은 Rosada et al.(1996), Hur et al.(2003) 그리고 Hur(2004)에 의해 각각 수행되었다. 하지만 이들의 연구는 모두 1열 수중방파제를 통과하는 파랑의 쇄파 혹은 수중방파제 유공율에 따른 파랑 변형에 관한 것이었다. 국내 연구로 정 등(2004)은 고유함수전개법을 이용하여 다열 불투과성 수중방파제를 통과하는 불규칙파랑의 반사를 계산하였으며, 2차원 수리모형 실험과 비교하였다. 황 등(2004)은 강비선형 모델인 VOF법을 사용하여 다열 수중방파제에서 불규칙파랑의 통과와 반사를 계산하였다. 하지만 이들은 파랑의 방향분포는 고려하지 않았다. 본 연구에서는 현재까지 거의 수행된 적이 없는 2열 이상의 다열 수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 반사 및 통과를 고유함수 전개법을 사용하여 수치적으로 계산하였다. 쇄파는 고려하지 않았으며, Bragg 반사가 발생하

는 파랑 및 다열 수중방파제의 조건을 사용하였다.

본 연구에서는, 입사하는 다방향 불규칙파랑의 생성을 위해 Bretschneider(1968)에 의해 제안되고 Mitsuyasu(1970)에 의해 계수가 결정된 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하였다. 그리고, 파랑의 방향분포의 재현을 위해, Mitsuyasu et al.(1975)에 의해 제안된 방향 분포함수(directional spreading function)를 사용하였다. 적용된 수치해석 기법은 선형파 이론에 근거한 고유함수 전개법(eigenfunction expansion method)이며, 다방향 불규칙파랑의 에너지 스펙트럼을 무수히 많은 규칙파로 분해하여 각각의 계산 결과를 합성하는 방법을 사용하였다. 정 등(2004)은 이와 같은 해석방법을 이용하여 일방향 불규칙파랑에 대해 수치해석을 수행하였으며, 수리모형실험 결과와 비교하였을 때 매우 잘 일치하는 결과를 보였다.

다음장에서는 규칙파의 통과 및 반사를 계산할 수 있는 고유함수전개법에 대해 서술하였고, 3장에서는 본 연구에 적용된 다방향 불규칙파랑 스펙트럼식을 기술 하였다. 4장에서는 다열 불투과성 수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 반사 및 통과를 수치해석을 통해 해석한 결과를 제시하였으며, 마지막으로 5장에서는 결론을 기술하였다.

## 2. 고유함수 전개법

본 연구에서는 Cho and Lee(2000)가 사용한 고유함수전개법을 이용하여 불투과성 수중방파제를 통과하는 파랑의 반사율을 산정하였다. 입사의 해저지형으로 입사하는 입사파와 반사파, 그리고 해저지형을 통과하는 통과파를 지배하는 방정식은 미소진폭파이론에 의해 다음과 같이 주어진다. Eq. (1)은 통과파와 소멸파(evanescent wave)의 속도포텐셜이며, Eq. (2)는 반사파와 소멸파의 속도포텐셜을 나타낸다.

$$\Phi_m^+ = \left\{ A_m^+ e^{i\lambda_m x} \cosh k_m (h_m + z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{m,n}^+ e^{-\lambda_{m,n} x} \cos K_{m,n} (h_m + z) \right\} e^{i(k_y - \omega t)} \quad (1)$$

$$\Phi_m^- = \left\{ A_m^- e^{-i\lambda_m x} \cosh k_m (h_m + z) + \sum_{n=1}^{\infty} B_{m,n}^- e^{+\lambda_{m,n} x} \cos K_{m,n} (h_m + z) \right\} e^{i(k_y - \omega t)} \quad (2)$$

Eqs. (1)과 (2)에서 아래 첨자  $m$ 은 서로 다른 수심을 갖는 영역을 나타내며,  $n$ 은 고려된 소멸파의 수를 나타낸다. 진

쪽  $A_m^+$ ,  $A_m^-$ ,  $B_{m,n}^+$ ,  $B_{m,n}^-$  는 모두 복소수함수이며, 진행파와 소멸파의 파수  $k_m$ 과  $K_{m,n}$ 는 모두 실수이며, Eq. (3)의 분산 방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$\omega^2 = gk_m \tanh k_m h_m, \quad \omega^2 = -gK_{m,n} \tanh K_{m,n} h_m \quad (3)$$

또한, Eqs. (1)과 (2)에 사용된 진행파와 소멸파의  $x$ 축 방향의 파수인  $l_m$ 과  $\lambda_{m,n}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$l_m = (k_m^2 - k_y^2)^{1/2}, \quad \lambda_{m,n} = (K_{m,n}^2 + k_y^2)^{1/2}$$

Eqs. (1)과 (2)을 해석하기 위하여 2가지의 접합조건이 필요하다. 첫째 조건은  $x$ 축 방향의 흐름 윗은 연속이라는 조건이다. 임의의 지점  $x = x_m$ 에서 Eq. (5)와 같다.

$$\int_{-h_m}^0 \frac{\partial \Phi_m}{\partial x} f_{m',n} dz = \int_{-h_{m+1}}^0 \frac{\partial \Phi_{m+1}}{\partial x} f_{m',n} dz, \quad x = x_m \quad (5)$$

둘째 조건은 압력이 연속임을 나타내며 Eq. (6)과 같다.

$$\int_{-h_m}^0 \Phi_m f_{m',n} dz = \int_{-h_{m+1}}^0 \Phi_{m+1} f_{m',n} dz, \quad x = x_m \quad (6a)$$

$$\begin{cases} f_{m',n} = \cosh k_m (h_{m'} + z), & n = 0 \\ f_{m',n} = \cos K_{m',n} (h_{m'} + z), & n > 0 \end{cases} \quad (6b)$$

Eq. (6)에서  $h_{m'} = \max(h_m, h_{m+1})$  가 적용된다. 앞의 속도 퍼텐셜 함수인 Eqs. (1)과 (2)를 Eq. (6)에 대입하면 미지수가  $2(m-1) \times (n+1)$ 인 선형행렬식이 유도되며, 선형행렬식을 해석하여 미지수인 진폭의 값을 알 수 있다(Cho and Lee, 2000). 그리고, 반사율은 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{|A_1^-|}{|A_1^+|} \quad (7)$$

### 3. 입사파랑의 스펙트럼

파랑의 특성은 주파수 스펙트럼만으로는 충분히 기술할 수는 없다. 파장과 파고의 불규칙한 변동의 현상과, 여러 방향에서 성분파가 겹치는 것을 표현하는 다방향 불규칙파랑의 생성을 위해 다음과 같은 스펙트럼식이 사용된다(Goda, 2000).

$$S(f; \theta) = S(f) \cdot G(f; \theta) \quad (8)$$

여기서,  $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼으로써 본 연구에서는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하였으며, 다음 식과 같이 표현된다.

$$S(f) = 0.25 H_{1/3}^2 T_{1/3}^4 f^{-5} \exp\{-1.03(T_{1/3} f)^{-4}\} \quad (9)$$

Eq. (9)에서,  $H_{1/3}$ 은 유의파고,  $T_{1/3}$ 은 유의주기,  $f$ 는 파랑의 주파수를 의미한다.

Eq. (8)에서,  $G(f; \theta)$ 는 방향함수 혹은 방향 분포함수로 불려진다. 방향 스펙트럼의 관측은 매우 어렵고 많은 노력을 필요로 하기에, 표준형을 정하는 것이 어렵다. 그러나 Mitsuyasu et al.(1975)은 클로버잎 부이식(cloverleaf buoy) 파랑계를 이용한 면밀한 관찰결과에 근거하여 방향함수를 제시 하였으며, 다음 식과 같다.

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2s} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (10)$$

방향함수는 방향별 에너지 분포상태를 나타내지만, 그 함수형은 주파수마다 다른 것이 보통이기 때문에, 주파수를 파라미터로서 포함한다. 또, 방향함수는 차원을 가지지 않고, Eq. (11)과 같이 정규화 된다.

$$\int_{-\pi}^{\pi} G(f; \theta) d\theta = 1$$

Eq. (10)에서,  $\theta$ 는 입사파랑의 파향각을 나타낸다.  $G_0$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$G_0 = \left[ \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s} \left( \frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \quad (12)$$

여기서, 확장계수  $s$ 는 방향함수의 집중도를 나타내는 파라미터이며, 주파수 스펙트럼의 피크부분에서 최대가 되며, 피크부분에서 벗어남에 따라 차례로 감소하는 형태로 되어있다. 즉,  $S(f)$ 의 최대값 근처에서 에너지의 방향 분산이 최소가 된다. 본 연구에서  $\theta_{\min}$  및  $\theta_{\max}$ 은 각각  $-\pi/2$ 와  $\pi/2$ 가 사용되었다. 즉, 외해로 나가는 파랑에 대해서는 검토하지 않았다. Eq. (12)에서,  $s$ 의 최대치  $s_{\max}$ 는 Eq. (13)과 같이 표현할 수 있다(Goda and Suzuki, 1975).

$$s = \begin{cases} s_{\max} \cdot (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ s_{\max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & : f \geq f_p \end{cases} \quad (13)$$

여기서,  $f_p$ 는 극대 주파수를 뜻하고,  $s_{\max}$ 는  $s$ 의 최대값을 의미한다.

## 4. 수치해석 결과

### 4.1 수중방파제에서 다방향 불규칙파랑의 통과 및 반사특성

본 절에서는, 다양한 수중방파제의 제원에 대한 수치해

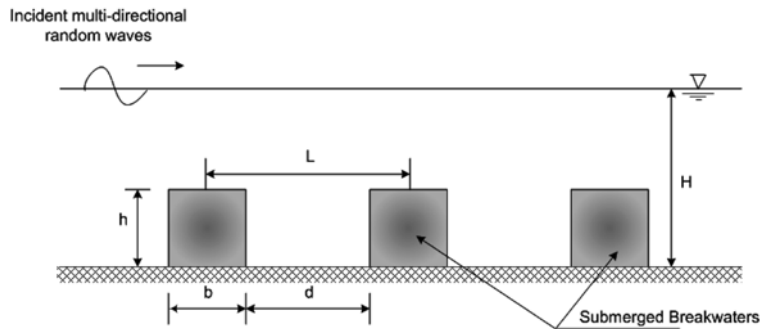


Fig. 1. Definition sketch of the condition of numerical analysis.

석을 통해 수중방파제의 적용성을 평가하였다. 입사하는 다방향 불규칙파랑의 경우  $\Delta\theta = 5^\circ$ ,  $\Delta kh = 0.01$  을 적용하였다. 또한, 파랑의 입사각의 분포는  $-70^\circ \sim 70^\circ$  사용하여 29개의 방향성분과 40개의 주기성분으로 다방향 불규칙파랑을 구성하였다. 즉, 다방향 불규칙 파랑의 해석을 위해 1,160개의 규칙파를 Cho and Lee(2000)에 의한 방법으로 해석한 후, 다시 재합성하여 입사파랑, 통과파랑, 반사파랑의 스펙트럼을 재현하였으며 파랑의 반사율을 계산하였다.

수치해석에 사용된 수중방파제의 형상 및 각 변수에 대한 설명은 Fig. 1과 같다. 수심  $H$ 는 0.8m이며, 방파제 사이의 거리  $d$ 는 2.0m, 수중방파제 중심 사이의 거리  $L$ 은 2.4m 그리고,  $b$ 는 수중방파제의 폭을 나타내며, 0.4m이다.

수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 입사, 통과, 반사에 대한 스펙트럼을 Figs. 3~5에 도시하였다. 수중방파제의 상대높이  $h/H$ 는 0.5, 수중방파제의 열수  $m$ 은 4이며,  $s_{\max}$ 는 10, 25, 75를 각각 사용하였다. 일반적으로  $s_{\max}$ 가 10인 경우는 풍파, 25인 경우는 파형경사가 비교적 큰 너울, 75인 경우는 파형경사가 비교적 작은 너울의 특성을 갖는다(Goda, 2000). 본 연구에서 사용한 입사파랑의 목표 스펙트럼과 재현된 스펙트럼은 Fig. 2에서 비교하였다. 비교 결과 재현된 파랑은 실제 목표 스펙트럼과 잘 일치함을 알 수 있다.

입사파랑의 첨두주파수는 Fig. 1에서 표현된 수중방파제의 제원에서 Bragg 반사가 발생할 조건으로써, 0.504 Hz가 사용되었다. 따라서, Figs. 3(c)~5(c)에서와 같이 Bragg 반사에 의한 강한 반사 스펙트럼을 볼 수 있다. Figs. 3(b)~5(b)에서는 Figs. 3(c)~5(c)의 반사 때문에 통과파랑의 에너지 스펙트럼은 상당히 감소한 것을 확인할 수 있다. 그리고, 파랑의 방향 집중도가 비교적 큰  $s_{\max}$ 가 75인 경우 방향 집중도가 비교적 작은  $s_{\max} = 10$  및 25인 경우에 비해 반사파 스펙

트럼의 첨두가 뾰족한 형태로 생성됨을 알 수 있다.

Fig. 6는 각각의  $s_{\max}$ 값에 대해, 방파제의 열수 및 상대높이가 변화할 경우 파랑의 에너지 반사계수를 도시하였다. 에너지 반사계수는 다음 식을 이용하여 구한다.

$$Er = \frac{\sum_{i=0}^{imax} \sum_{j=0}^{jmax} A_{1ij}^{-2}}{\sum_{i=0}^{imax} \sum_{j=0}^{jmax} A_{1ij}^{+2}} \quad (14)$$

여기서,  $A_{1ij}^{+}$ 는 입사파랑의 진폭,  $A_{1ij}^{-}$ 는 반사파랑의 진폭이며, 아래첨자  $i$ 는 주파수 성분으로써  $i$ 번째 파랑을 뜻하며,  $j$ 는 방향성분으로  $j$ 번째 파랑을 뜻한다. 방향분산계수  $s_{\max}$ 가 클수록 에너지 반사계수가 커지는 것을 볼 수 있으며,  $s_{\max}$ 가 75이고 수중방파제가 5열, 상대수심이 0.7일 경우 입사파랑 에너지의 50% 이상이 반사되는 것을 알 수 있다. 방향분산계수  $s_{\max}$ 가 25 및 75일 경우 반사계수는 비슷한 크기를 보이는 반면,  $s_{\max}$ 가 10일 경우는 반사계수가  $s_{\max} = 25$  및 75인 경우보다 작아 계산되었다. 일반적으로  $s_{\max}$ 가 10인 경우는 풍파로써 심해파의 특성을 가지며,  $s_{\max}$ 가 25 및 75인 경우는 주 파향으로의 방향 집중도가 큰 너울로 친해파의 특성을 가진다. 즉, 수중방파제가 건설될 친해역에서 너울에 대한 효과적인 파랑 반사를 기대할 수 있다. Bailard et al.(1992)은 원호형 수중방파제를 통과하는 일방향 불규칙파랑의 반사에 관해 연구하였는데, 입사파랑 에너지의 25% 이상을 외해로 반사할 경우, 해안의 침식을 억제할 수 있다는 결론을 도출하였다. 본 연구에서의 수치해석 결과 수중방파제가 3열이고, 상대높이가 0.6일 때 입사하는 다방향 불규칙파 에너지의 25% 이상이 외해로 반사되었다.

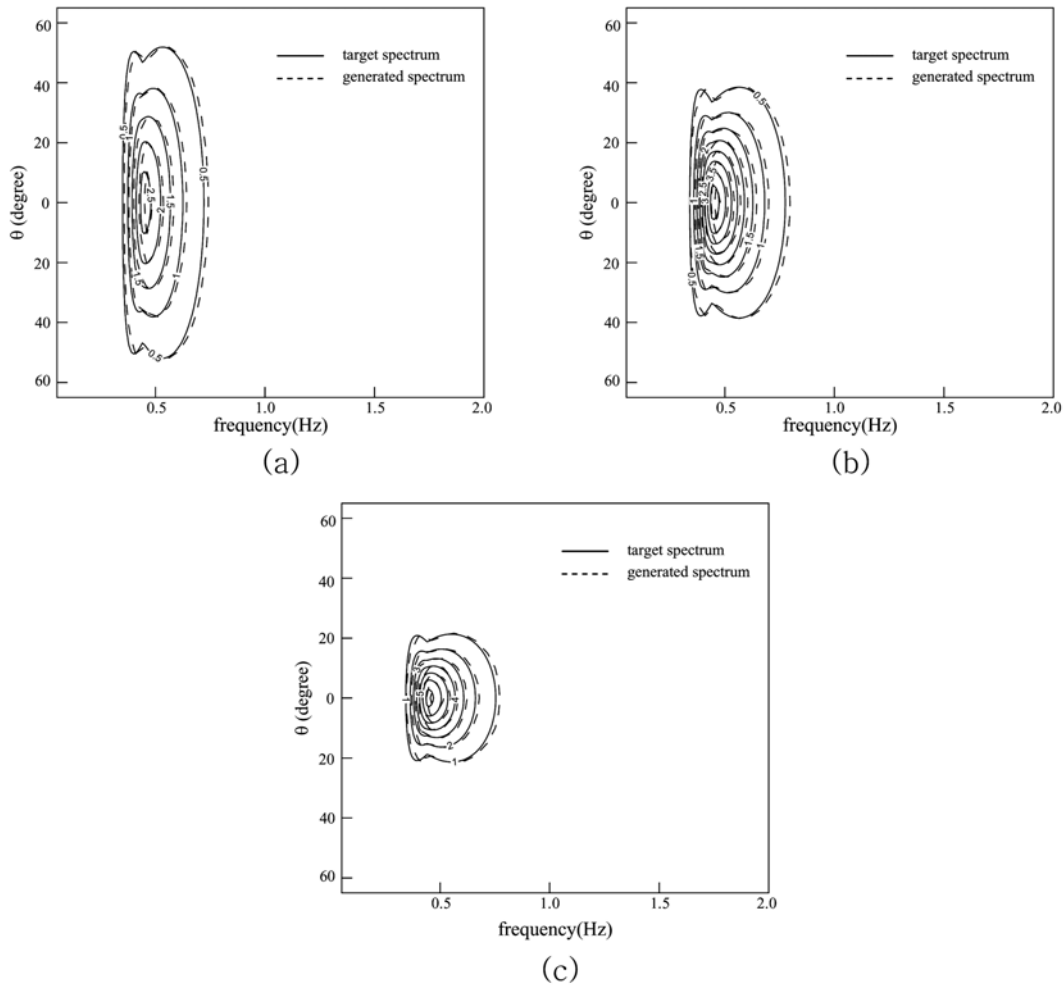


Fig. 2. Comparison of target and generated spectrum: (a)  $s_{max} = 10$ , (b)  $s_{max} = 25$ , (c)  $s_{max} = 75$ .

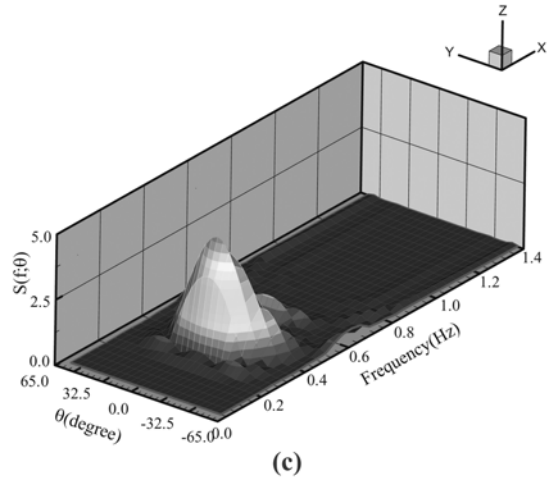
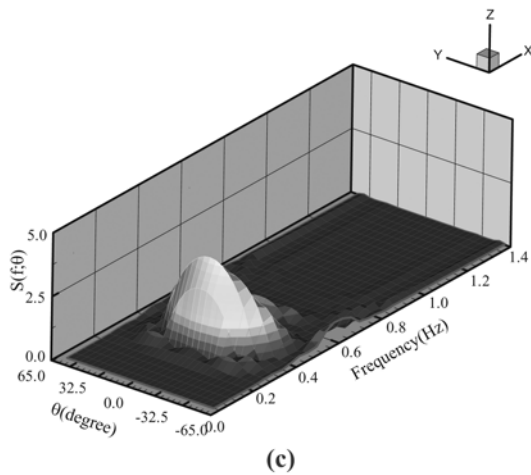
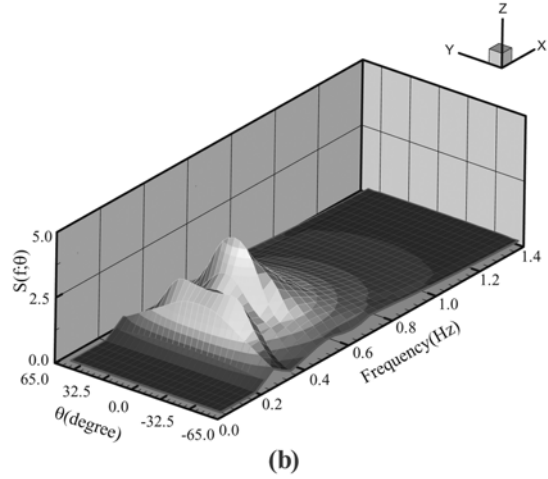
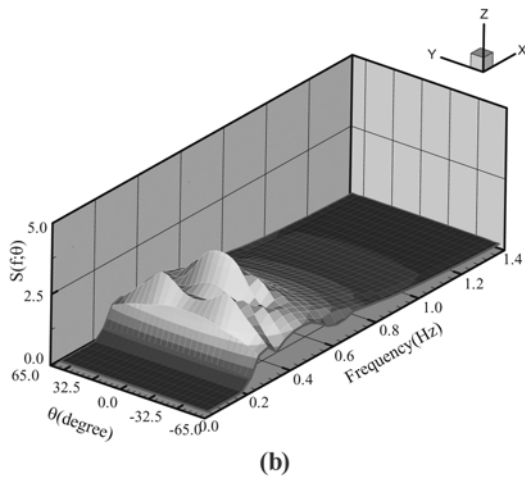
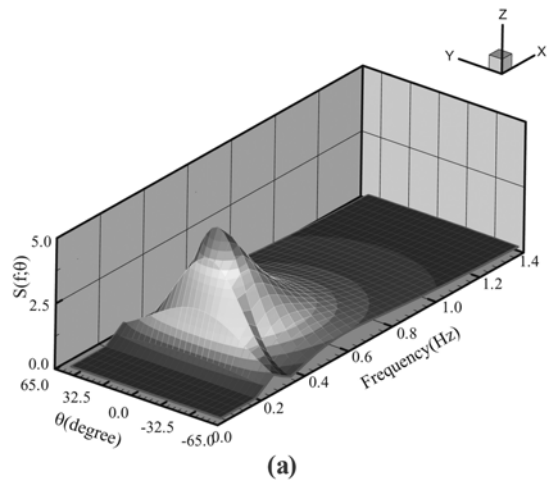
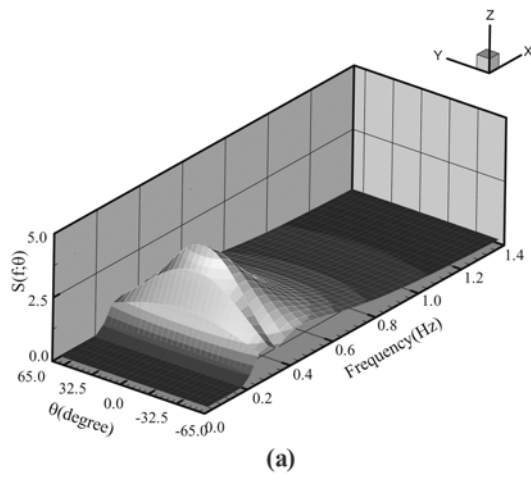
#### 4.2 매개변수의 변화에 따른 반사율

본 절에서는 다양한 매개변수의 변화에 따른 반사율을 계산하였다. 특히, 최대방향분산계수( $s_{max}$ ), 방파제의 상대높이 ( $h/H$ ) 그리고 상대폭( $b/H$ )의 변화에 대해 검토하였다. Fig. 7에서 방파제의 상대높이가 0.6이고 4열인 경우  $s_{max}$ 의 변화 및 입사파랑의 주기에 따른 에너지 반사율을 도시하였다. 입사하는 다방향 불규칙파랑의 파수(wave number)  $k$ 는 유의파고의 주기를 기준으로 하였다. 계산결과, 입사파랑이  $kh=1$ 인 조건에서 공명반사가 일어남을 볼 수 있다. 이는 정등(2004)의 계산결과와 같으며, 다방향 불규칙 파랑 역시 Bragg 반사 조건에서 강한 반사가 발생함을 알 수 있다. 그리고, 최대방향분산계수  $s_{max}$ 의 값이 클수록, 다시 말해서 방향 집중도가 클수록, 반사율이 더욱 커짐을 알 수 있다. 수

치해석에 사용된 수중방파제의 간격은 주파향이고 극대주파수인 파랑에서 Bragg 반사가 발생하도록 설정되었다. 따라서, 방향 집중도가 클수록 파랑이 주파향 근처에 집중되므로 반사율은 더욱 커지게 된다.

Fig. 8은  $s_{max}$ 가 25이고 방파제가 4열인 경우 입사파랑 주기 및 방파제의 상대높이에 따른 파랑의 에너지 반사계수를 도시한 그림이다. 역시  $kh = 1$  부근에서 공명반사가 발생하였으며, 방파제의 상대높이가 증가할수록 파랑의 에너지 반사계수 역시 크게 증가함을 알 수 있다. Figs. 7 and 8을 비교해 볼 때, 입사파랑의 방향집중도에 비해 방파제의 상대높이가 파랑의 반사에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 9에서는  $s_{max}$ 가 25, 방파제가 4열이고 상대높이가



**Fig. 3.** Directional spectrum of multi-directional random waves propagating over submerged breakwaters: (a) incident waves, (b) transmitted waves, (c) reflected waves ( $s_{\max} = 10$ ,  $h/H = 0.5$ ,  $m = 4$ ).

**Fig. 4.** Directional spectrum of multi-directional random waves propagating over submerged breakwaters: (a) incident waves, (b) transmitted waves, (c) reflected waves ( $s_{\max} = 25$ ,  $h/H = 0.5$ ,  $m = 4$ ).

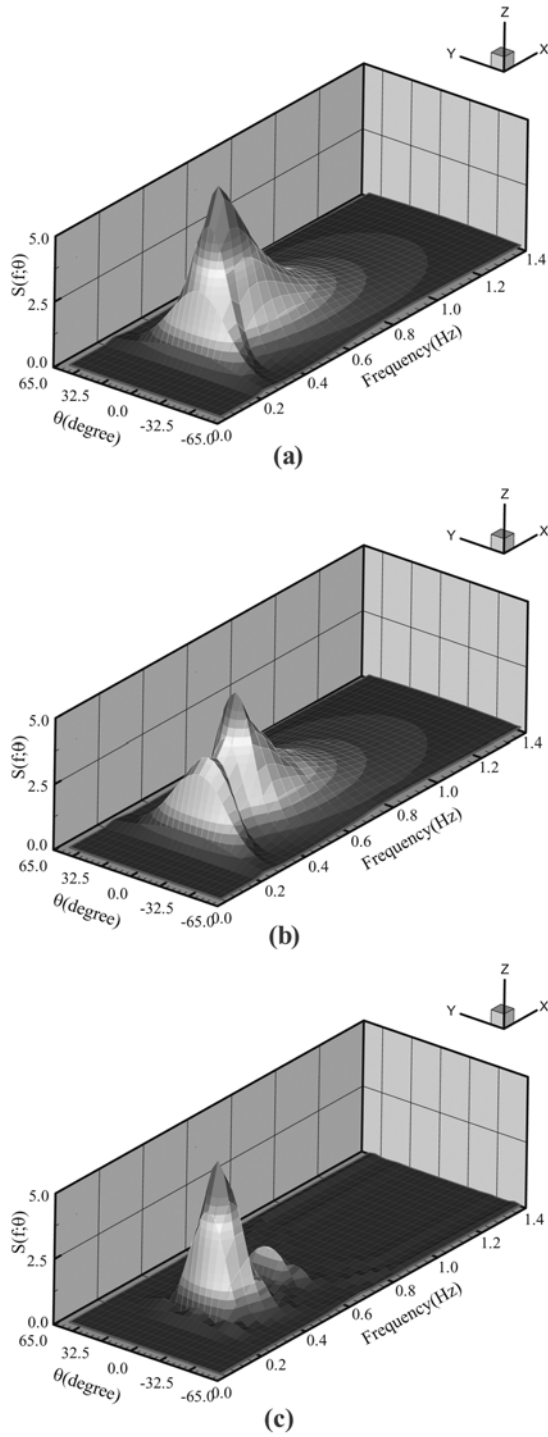


Fig. 5. Directional spectrum of multi-directional random waves propagating over submerged breakwaters: (a) incident waves, (b) transmitted waves, (c) reflected waves ( $s_{\max} = 75$ ,  $h/H = 0.5$ ,  $m = 4$ ).

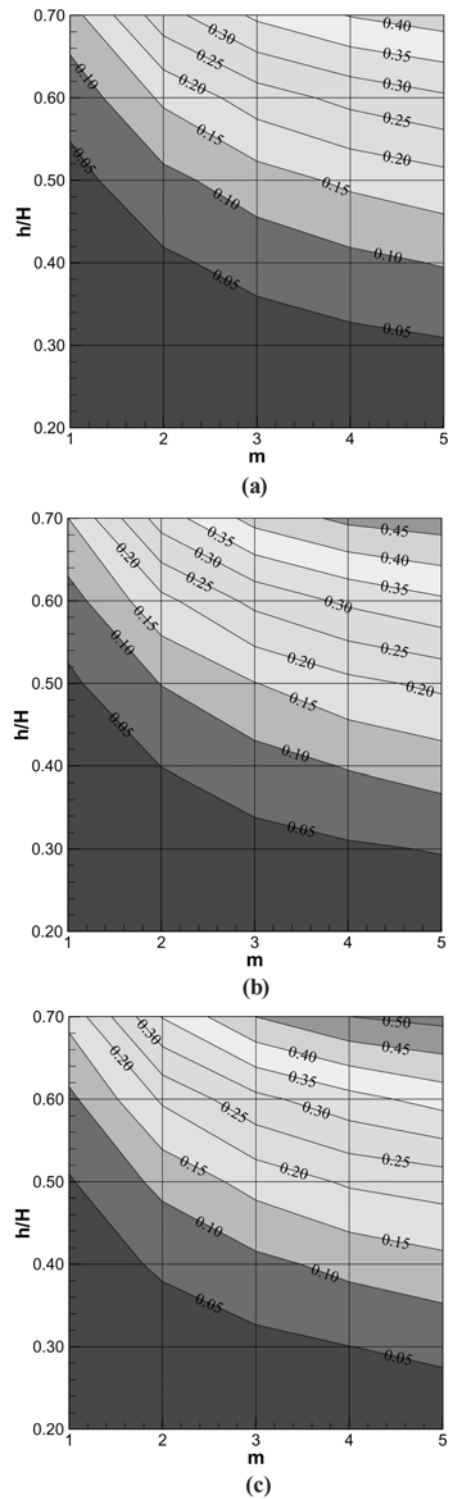


Fig. 6. Energy reflection coefficient of multi-directional random waves: (a)  $s_{\max} = 10$ , (b)  $s_{\max} = 25$ , (c)  $s_{\max} = 75$ .

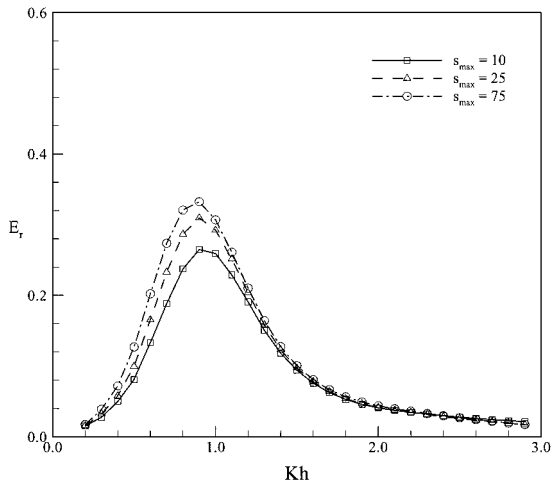


Fig. 7. Energy reflection coefficient as varying wave period ( $h/H = 0.6, m = 4$ ).

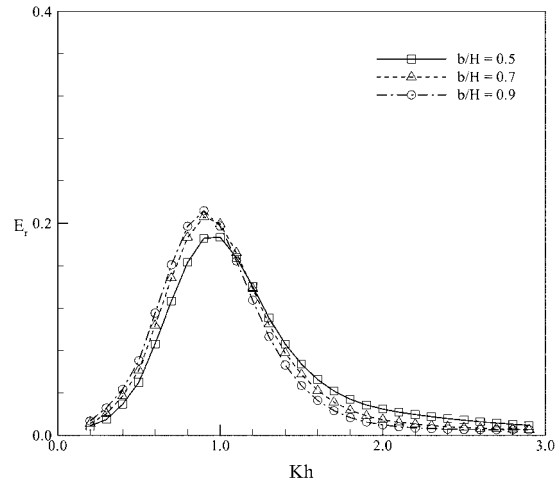


Fig. 9. Energy reflection coefficient as varying breadth of submerged breakwaters ( $s_{max} = 25, m = 4, h/H = 0.5$ ).

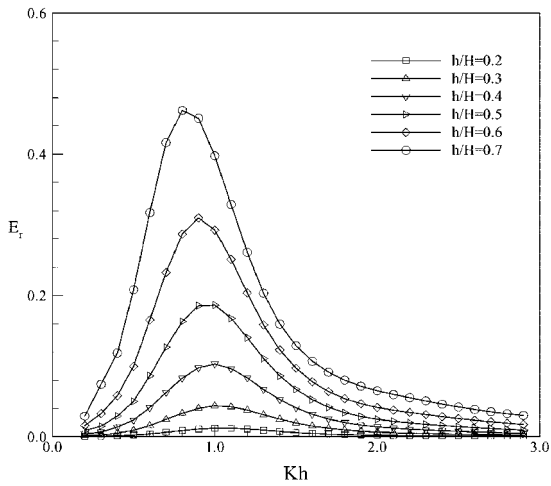


Fig. 8. Energy reflection coefficient as varying relative height of submerged breakwaters ( $s_{max} = 25, m = 4$ ).

0.5인 경우, 수중방파제의 상대폭 변화에 따른 에너지 반사 계수를 나타내었다. 수중방파제의 상대폭( $b/H$ )은 0.5에서 0.9까지 변화시켰으며, 수중방파제 중심 사이의 거리는 동일하게 설정하였다. 즉, 수중방파제 중심 사이의 거리( $L$ )는 각 경우에 있어서 동일하게 2.4 m로 결정하였다. 수중방파제 중심 사이의 거리는 같기 때문에, 수중방파제의 상대폭 변화에 상관없이  $kh=1$  부근에서 공명반사가 발생하였다. 수중방파제의 상대폭이 증가할수록 에너지 반사율 역시 증가하였다. 조(2004)는 유한요소법을 이용하여 수중방파제의 폭 변화에 따른 규칙파의 반사를 해석하였

다. 조의 연구에서도 본 연구 결과와 마찬가지로 수중방파제의 폭이 증가할 경우 반사율 역시 증가하였다. 하지만, 수중방파제의 폭이 증가할수록 장주기파에 대한 반사율이 증가한다고 하였는데, 이는 방파제 사이의 거리( $d$ )는 일정하게 두고 폭만 변화시켜서 방파제 중심 사이의 거리( $L$ )가 증가하였기 때문이다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 다열 수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 반사특성을 분석하였다. 고유함수 전개법을 이용하여 다방향 불규칙파랑의 통과 및 반사를 계산하였다. 계산결과 첫째, 다방향 불규칙파랑의 경우 역시 입사파랑 첨두주파수의 Bragg 반사 조건에서 강한 반사가 발생함을 확인하였다. 둘째, 수치해석 결과 3열 이상, 방파제의 상대높이 0.6 이상일 때 25% 이상의 파랑 에너지가 반사되었다. 마지막으로, 최대방향분산계수( $s_{max}$ ), 방파제의 상대높이( $h/H$ ) 및 상대폭( $b/H$ )이 증가할 경우, 다방향 불규칙파랑 에너지의 반사율이 증가함을 확인하였다.

본 연구에서는 선형파 이론에 근거한 수치해석을 통해 수중방파제의 적용성을 평가하였다. 하지만, 실제 해역에서는 파랑의 방향성분 및 주기성분 사이의 비선형 효과 역시 존재할 것이므로, 3차원 수리모형실험 및 비선형의 해석이 가능한 수치모형을 통해 보다 심층적인 검증이 필요할 것으로 사료된다.



## 감사의 글

본 연구는 해양수산부 해양한국발전 프로그램에 의해 지원되었습니다.

## 참고문헌

- 김도삼 (2000). 다열잠제에 의한 파랑의 전달율과 반사율. 대한토목학회논문집, 20(1B), 85-94.
- 이종인, 조용식, 이정규 (1999). 경사지형에서의 Bragg 반사. 한국수자원학회논문집, 32(4), 447-455.
- 이종인, 김영택, 조용식 (2003). 수중방파제 형상에 따른 규칙파의 반사실험. 한국해양해양공학회지, 15(3), 165-175.
- 정재상, 조대희, 황종길, 조용식 (2004). 사각형형상 불투과성 수중방파제를 통과하는 불규칙파의 반사. 한국수자원학회논문집, 37(9), 729-736.
- 조용식, 이종인, 김영택 (2002). 사각형형상 수중방파제의 반사에 관한 실험. 한국수자원학회논문집, 34(5), 563-573.
- 조원철 (2004). 폭 변화에 따른 잠제의 파랑 차단 성능. 한국해양해양공학회지, 16(4), 206-212.
- 황종길, 이승협, 조용식 (2004). 사각형형상 수중방파제에 의한 불규칙파의 변형. 한국수자원학회논문집, 37(11), 949-958.
- Bailard, J.A., DeVries, J.W. and Kirby, J.T. (1992). Consideration in using Bragg reflection for storm erosion protection. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 118, 62-74.
- Bretschneider, C.L. (1968). Significant waves and wave spectrum. *Ocean Industry*, Feb. 40-46.
- Chang, H.-K. and Liou, J.-C. (2006). Long wave reflection from submerged trapezoidal breakwaters. *Ocean Engineering*, in press.
- Cho, Y.-S. and Lee, C., (2000). Resonant reflection of waves over sinusoidally varying topographies. *Journal of Coastal Research*. 16(3), 870-876.
- Goda, Y. (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. World Scientific, Singapore.
- Goda, Y. and Suzuki, Y. (1975). Computation of refraction and diffraction of sea waves with Mitsuyasu's directional spectrum, *Tech. Note Port and Harbour Res. Inst.*, No. 230. (in Japanese)
- Hur, D.-S. (2004). Deformation of multi-directional random waves passing over an impermeable submerged breakwater installed on a sloping bed. *Ocean Engineering*, 31(10), 1295-1311.
- Hur, D.-S., Kawashima, N. and Iwata, K. (2003). Experimental study of the breaking limit of multi-directional random waves passing over an impermeable submerged breakwater. *Ocean Engineering*, 30(15), 1923-1940.
- Hsu, T.-W., Hsieh, C.-M. and Hwang, R.R. (2004). Using RANS to simulate vortex generation and dissipation around impermeable submerged double breakwaters. *Coastal Engineering*, 51(7), 557-579.
- Johnson, H.K., Karambas, T.V., Avgeris, I., Zanuttigh B., Gonzalez-Marco, D. and Caceres, I. (2005). Modelling of waves and currents around submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 52(10-11), 949-969.
- Johnson, H.K. (2006). Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 53(1), 39-48.
- Jung, J.-S. and Cho, Y.-S. (2005). Propagation of directionally spreading random waves over multi-arrayed submerged breakwaters. *Proc. of the 3rd Inter. Conf. on Asian and Pacific Coasts.*, 167-170.
- Lara, J.L., Garcia, N. and Losada, I.J. (2006). RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*, 53(5-6), 395-417.
- Mitsuyasu, H. (1970). On the growth of spectrum of wind-generated waves (2)-spectral shape of wind waves at finite fetch. *Proc. Japanese Conf. Coastal Eng.*, 1-7. (in Japanese).
- Mitsuyasu, H. et. al. (1975). Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. *J. Physical Oceanogr.*, 5(4), 750-760.
- Rambabu, A.C. and Mani, J.S. (2005). Numerical prediction of performance of submerged breakwaters. *Ocean Engineering*, 32(10), 1235-1246.
- Rosada, I.J., Silva, R. and Rosada, M.A. (1996). Interaction of Non-breaking directional random waves with submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 28(3-4), 249-266.
- Tsai, C.-P., Chen, H.-B. and Lee, F.-C. (2006). Wave transformation over submerged permeable breakwater on porous bottom. *Ocean Engineering*, 33(11-12), 1623-1643.
- Ting, C.-L., Lin, M.-C. and Cheng, C.-Y. (2004). Porosity effects on non-breaking surface waves over permeable submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 50(4), 213-224.

---

Received November 14, 2006

Accepted January 30, 2007