

불규칙파동장에 있어서 VOF법에 의한 투과성잠제의
파랑제어 특성에 관한 연구

A Study of the Wave Control Characteristics of the Permeable Submerged
Breakwater using VOF Method in Irregular Wave Fields

김도삼* · 이광호** · 유현상* · 김창훈* · 손병규***

Do Sam Kim*, Kwang Ho Lee**, Hyun Sang Yoo*,
Chang Hoon Kim* and Byoung Kyu Son***

요 지 : 최근 입사하는 파랑으로부터 해역을 보호하기 위해 다양한 형태의 해안구조물이 건설되어 왔다. 그 중에서 잠제는 경관성, 시공성, 환경성 측면의 우수한 장점 때문에 소파 및 표사제어 구조물로 폭넓게 사용되고 있다. 본 연구에서는 불규칙파동장에 설치된 VOF법에 기초한 2차원 수치파동수로를 적용하여 투과성잠제 배후에서 파랑에너지 변화특성과 전달율에 대하여 수치적으로 검토하였다. 주파수스펙트럼 해석결과로부터 쇄파가 발생한 경우 일렬 투과성잠제는 스펙트럼 피크가 단주기 쪽으로 이동하였으며, 이열 투과성잠제는 전 주기대에 걸쳐 파랑 에너지가 고르게 분포하고 있었다. 쇄파가 발생하지 않은 경우 투과성잠제 배후에서의 스펙트럼 피크는 유의주기대에서 나타나고 있었다. 투과율의 해석결과로부터 쇄파가 발생한 경우보다 쇄파가 발생하지 않은 경우에 투과성잠제 배후로 상당량의 파랑에너지가 전달되는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 투과성잠제, VOF법, 불규칙파, 주파수스펙트럼, 투과율

Abstract : The different types of coastal structures have been constructed for the protection of coastal region from the incident waves. Among them, the permeable submerged breakwater has been widely used as a wave dissipater and sediment transport controller because of its excellent advantages in scenery effects, construction efficiency and environment aspects. This study numerically investigated the characteristics of wave energy variations and transmission coefficient at the rear of the permeable submerged breakwater installed in the irregular wave field. To analyze it's performance numerically, a two-dimensional numerical wave flume based on VOF method was used. A frequency spectral analysis showed that the spectral peak moved to the short-period in the one-row submerged breakwater, and the wave energy was distributed evenly for the whole period in the two-row submerged breakwater in the case of breaking on the submerged breakwater. The spectral peak was shown to be converged within the significant wave period at the rear of the permeable submerged breakwater in the case of non-breaking conditions. From the result of transmission coefficients analysis, it was confirmed that a considerable quantity of wave energy was transmitted to the rear of the permeable submerged breakwater in the case of non-breaking rather than breaking.

Keywords : permeable submerged breakwater, VOF method, irregular waves, requery spectrum, transmission coefficient

*한국해양대학교 공과대학 토목환경시스템공학부(Corresponding author: Do Sam Kim, Division of Civil and environmental System Engineering, College of Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea. kimds@hanara.kmaritime.ac.kr)

**나고야대학교 대학원 공학연구과(Department of Civil Engineering, Nagoya University)

***국립수산과학원(National Fisheries Research and Development Institute)

1. 서 론

외해에서 내습하는 고파랑으로부터 연안역의 주요시설물을 보호하고, 해역을 정온화하기 위해 직립제, 경사제 혹은 혼성제 등과 같은 다양한 방파제를 건설하여 왔다. 한편 이러한 구조물들의 건설시 요구되는 막대한 공사비와 해수교환의 차단으로 인한 연안역의 수질악화가 문제로 대두되면서 최근에는 방파제의 본래의 목적 이외에 연안역의 수질환경에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 다양한 형태의 파랑제어구조물이 제안되고 있다. 그 중에서 잠제는 경관성, 시공성, 환경성의 측면에서 우수한 장점을 가지며, 국내에서는 처음으로 부산 송도해수욕장에 사빈유 실공으로 시공중에 있다.

잠제는 입사파랑의 투과율이 높기 때문에 잠제천단상에서 강제쇄파를 유도하여 잠제 배후로 투과되는 파랑에너지를 제어하는 것이 일반적이다. 이러한 잠제상에서는 수심의 급변부가 존재하므로 비선형파랑성분이 크게 발달하고, 평균수위가 상승하며, 특히 잠제 배후에서 파랑의 재생성과정을 나타내기 때문에 잠제는 많은 연구자들의 관심의 대상이었다(中村充 등, 1966; 加藤始, 1992). 하지만 지금까지의 연구들은 잠제상에서 발생하는 쇄파현상을 수치적으로 해석하기에는 어려움이 있어 주로 실험에 의존하여 왔고(合田良實, 1977; 權赫珉, 1996), 또한 규칙파를 대상으로 하는 투과율과 반사율과 같은 소파성능에 중점을 둔 연구가 대부분이었다(예로 김도삼, 2000). 따라서 본 연구에서는 쇄파를 수반한 불규칙파동장에 설치된 투과성잠제를 대상으로 잠제배후에서 파랑에너지의 변화와 투과율에 대해 고찰하고자 한다.

최근 쇄파에 대한 연구가 지속되면서 수리실험에 의존해 오던 쇄파문제를 수치적으로 접근하려는 해석기법들이 다양하게 제안되고 있다. 이러한 쇄파에 관한 수치해석의 연구로는 경제적인방정식에 의한 2차원파동장에서 쇄파시 수면파형을 재현하고 있는 Longuet-Higgins and Cokelet(1976), Kioka(1983), Dold and Peregrine(1984), 김도삼 등(1997, 1998)의 연구와 MAC법을 이용한 Welch et al.(1966) 등의 연구가 있다. 그러나 경제적인방정식은 포텐셜이론에 기초하고 있기 때문에 쇄파후의 파랑변형 및 파의 재생성과정을 설명할 수 없으며, MAC법은 자유표면의 계산시 많은 시간과 용량을 필요로 하므로 3차원으로의 확장이 곤란한 단점이 있다. 이에 쇄파를 포함한 자유수면을 추적할 수 있는 VOF(Volume of Fluid; Hirt and Nichols, 1981)법을 활용한 수치파동수로의 연구개발이 최근 활발

하게 이루어지고 있으며(van der Meer et al., 1992; Troch, 1997; 海岸開發技術研究センター, 2001; 김도삼 등 2001, 2002; 김도삼 · 이광호, 2002; 이광호, 2002), 파 · 지반 · 구조물과의 상호작용해석(蔣勤 등, 2000) 및 불규칙파의 파력특성의 해석(許東秀 · 水谷法美, 2000) 등까지 적용되고 있다. 그러나 상술한 연구는 규칙파에 대한 연구가 대부분이며, 불규칙파를 대상으로 한 잠제의 파랑제어특성에 관한 연구는 미진한 실정이다.

본 연구에서는 수로 양 끝단에 부가감쇠영역이 설정된 2차원수치파동수로와 셀 크기의 변화와 함께 연직방향의 유속을 기상감쇠력으로 서서히 감소시켜 파랑에너지를 흡수하는 Hinatsu(1992)의 개경계처리법을 적용하여, 2차원 불규칙파동장에 설치된 투과성잠제에 대해 스펙트럼 해석으로부터 파랑에너지의 변화특성과 쇄파의 발생여부에 따른 잠제 배후에서의 투과율을 검토하였다.

2. 수치파동수로의 개요

2.1 기초방정식

본 연구에서 해석영역 양 끝단에 부가감쇠영역을 두고 유체영역에 조파소스가 설치된 Fig. 1과 같은 2차원수치파동수로를 고려한다. 유체를 비압축성의 점성유체로 가정하면 본 연구의 기초방정식은 조파소스를 포함하는 연속방정식(1)과 유체의 점성이 고려된 운동방정식(2), (3) 그리고 자유수면의 표현을 위한 VOF함수의 이류방정식(4)로 구성된다.

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = S^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - M_x - R_x \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial w}{\partial z} = -\gamma_v g_z - \gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - M_z - R_z \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \frac{2v}{3} \frac{\partial S^*}{\partial z} - \lambda w \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x u F)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w F)}{\partial z} = FS^* \quad (4)$$

여기서, $S^* = S(z, t)\delta(x-x_s)$ 로 조파위치 $x=x_s$ 에서의 조파소스의 밀도, δ 는 Dirac delta함수, u , w 는 각각 유체의 x , z 방향의 속도, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, g_z 는 중력

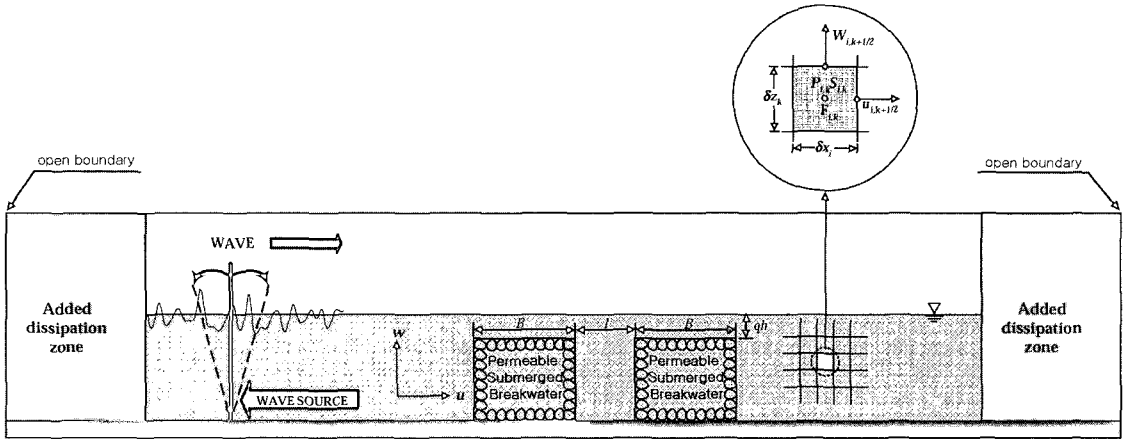


Fig. 1. Definition sketch of numerical wave flume.

가속도, ν 는 유체의 동점성계수($\nu=0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$), λ 는 부가감쇠영역의 감쇠계수, γ_v 는 체적공극율, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향의 면적공극율, F 는 $0 \leq F \leq 1$ 의 값을 갖는 VOF함수, M_x, M_z 는 관성력항으로서 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\begin{cases} M_x = (1-\gamma_v)C_M \frac{Du}{Dt} = (1-\gamma_v)C_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ M_z = (1-\gamma_v)C_M \frac{Dw}{Dt} = (1-\gamma_v)C_M \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \end{cases} \quad (5)$$

또한 R_x, R_z 는 항력항으로 등기분포저항을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} R_x = \frac{1}{2\delta x} C_D (1-\gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \\ R_z = \frac{1}{2\delta z} C_D (1-\gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \end{cases} \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 C_M, C_D 는 각각 관성력계수와 항력계수로 관성력계수 $C_M=(1+\chi, \chi$ 는 부가질량계수)은 실험으로 산정되지만 투과층 공극층의 일부 혹은 전부가 부가질량이 되는 것으로 간주하고 투과층내의 공극율을 $\gamma_x=0.4$ (일반사석의 공극율 적용, 해양수산부, 1999)로 간주하면 관성력계수는 $1 \leq C_M \leq 1.67$ 의 범위를 갖는다. 본 연구에서는 관성력계수 $C_M=1.5$ 를, 항력계수 $C_D=0.5$ (해양수산부, 1999)를 적용하였다.

2.2 경계조건

수치파동수로에서 고려되어야 할 경계조건으로는 자유

표면경계조건, 구조물표면에서의 경계조건, 그리고 수로 양 끝단에 위치한 부가감쇠영역에서의 경계조건이 있다.

자유표면경계조건은 유속경계조건과 압력경계조건으로 구성되며, 유속경계조건 중에서 수평유속은 자유표면의 형태에 따라 인접한 유체셀의 경계면에서의 유속을 표면셀 경계면의 유속으로 취하고, 따라서 연직유속은 표면셀에서의 연속방정식이 만족되는 값으로 결정된다. 또한 자유표면에서의 압력은 표면셀에서 압력의 정의위치와 유체셀의 정의위치의 2점간의 압력을 선형내삽하여 산정된다. 개경계조건은 전술한 바와 같이 부가감쇠영역을 적용하여 연직유속을 가상감쇠력에 의해 서서히 감쇠시키는 Hinatsu (1992)의 개경계처리법을 적용하였다. 바닥에서 법선방향 유속의 경계조건은 불투과조건을 적용하였고, 접선방향 유속의 경계조건은 slip조건을 적용하였다.

2.3 불규칙파의 조파

본 연구에서는 불규칙파를 조파시키기 위해 Brorsen and Larsen(1987)이 제안한 식 (7)의 조파소스강도를 적용하였다.

$$S = \begin{cases} \{1 - \text{Exp}(2t/T_{1/3})\} \cdot \left(2 \sum_{i=1}^N U_i \left(\sum_{i=1}^N \eta_i + h \right) / (\eta_s + h) \right) & : t/T_{1/3} \leq 3 \\ 2 \sum_{i=1}^N U_i \left(\sum_{i=1}^N \eta_i + h \right) / (\eta_s + h) & : t/T_{1/3} \geq 3 \end{cases} \quad (7)$$

여기서, t 는 조파경과시간, $T_{1/3}$ 는 유의주기, U_i 는 각 성

분파에 대한 수평유속성분으로 미소진폭파이론에 의한 유속을 사용하였고, 갑작스런 조파로 인한 계산의 불안정성을 피하기 위해 $3t/T_{1/3}$ 까지는 서서히 조파소스의 강도를 증가하는 것으로 하였다.

불규칙파를 수치실험하기 위해 식 (8)의 Bretschneider-Mitsuyasu(1970)의 스펙트럼을 적용하였다.

$$S(f) = 0.257H_{1/3}^2 T_{1/3}^4 f^{-5} \text{Exp}[-1.03(T_{1/3}f)^4] \quad (8)$$

여기서, $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도, f 는 주파수, $H_{1/3}$ 은 유의파고를 나타낸다.

또한 불규칙파의 위상각은 Lehmer(1951)에 의해 제안된 선형합동법(linear congruential method)을 이용하여 [0, 1]사이에 분포하는 난수를 발생시킨 후 위상을 조정하기 위해 2π 를 곱하여 [0, 2π]사이에 분포하는 값을 취하

도록 하였다.

3. 해석결과

3.1 불규칙파의 조파검증

Fig. 2는 구조물이 설치되어 있지 않은 수심 $h=50$ cm의 수차파동수로내에 유의파고 $H_{1/3}=5$ cm, 유의주기 $T_{1/3}=1.0$ sec의 불규칙파를 조파시켰을 때 조파소스로부터 $x \approx 0.67 L_{1/3}$, $1.32 L_{1/3}$, $1.98 L_{1/3}$, $2.65 L_{1/3}$ 지점에서 취득한 주파수스펙트럼과 Bretschneider-Mitsuyasu스펙트럼을 비교한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 목표스펙트럼과 계산스펙트럼이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으며 본 연구에서 적용한 수치파동수로에서 기대한 불규칙파를 만족스럽게 재현하고 있는 것으로 판단된다.

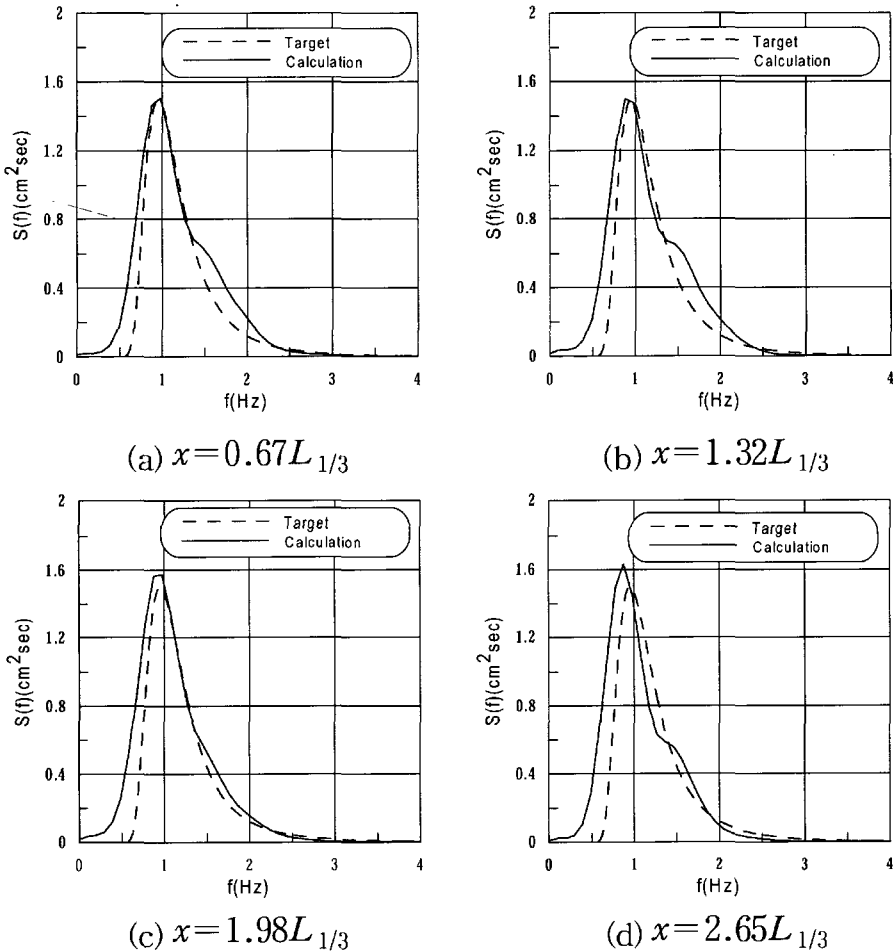


Fig. 2. Comparison of target spectrum and calculated spectrum.

3.2 잠제배후에서 파랑에너지의 변화

잠제배후에서 파랑에너지의 변화를 고찰하기 위해 Table 1에 나타난 제원을 갖는 일렬 및 이렬잠제를 적용하였다.

Fig. 3은 일렬(Case 1)과 이렬(Case 3)로 구성된 투과성잠제에 대해 파랑에너지의 전달특성을 나타낸 것으로, 천단상에서 쇄파가 발생하는 천단수심 $qh=5\text{ cm}$, 유의파고 $H_{1/3}=5\text{ cm}$, 유의주기 $T_{1/3}=1.20, 1.30, 1.50, 1.60\text{ sec}$ 에 대한

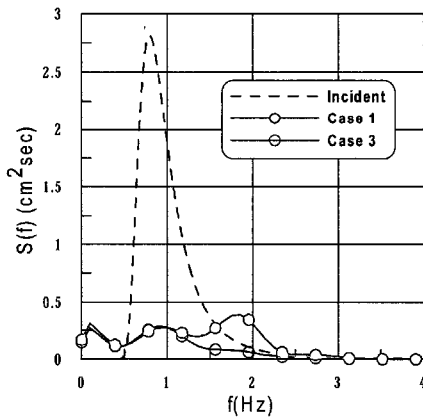
주파수스펙트럼의 결과이다.

Case 1에서 스펙트럼의 피크는 유의주기가 증가할수록 입사파의 유의주기대에서 단주기쪽으로 이동하는 현상을 나타내고 있으며, 입사파랑의 에너지감쇠 또한 크게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 일렬잠제에서 스펙트럼의 피크가 단주기쪽으로 이동하는 현상은 김도삼 등(2001)이 지적한 바와 같이 잠제의 천단상에서 쇄파된 파랑이 잠제

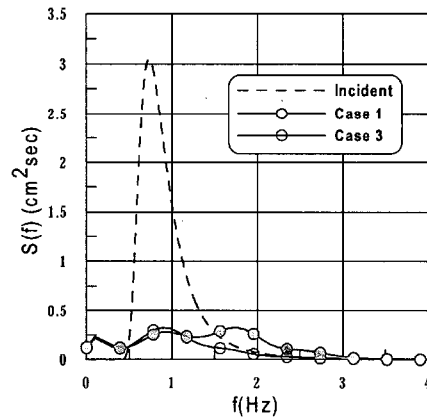
Table 1. Conditions of numerical simulation

	Crown width(B)	Crown depth(qh)	Separated distance(l)	Model
Case 1	200	5	-	One-rowed permeable submerged breakwater
Case 2	200	10	-	
Case 3	80	5	60	Tow-rowed permeable submerged breakwater
Case 4	80	5	80	

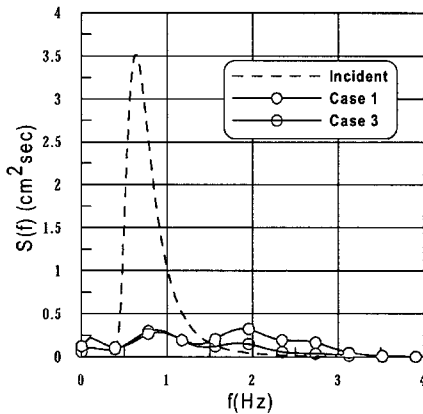
unit: cm



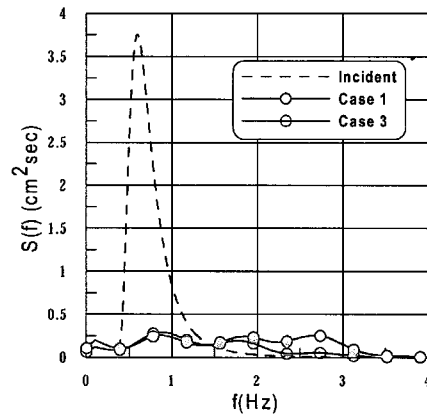
(a) $T_{1/3} = 1.20\text{ sec}$



(b) $T_{1/3} = 1.30\text{ sec}$



(c) $T_{1/3} = 1.50\text{ sec}$



(d) $T_{1/3} = 1.60\text{ sec}$

Fig. 3. Comparison of frequency spectrum for Case 1 and Case 3.

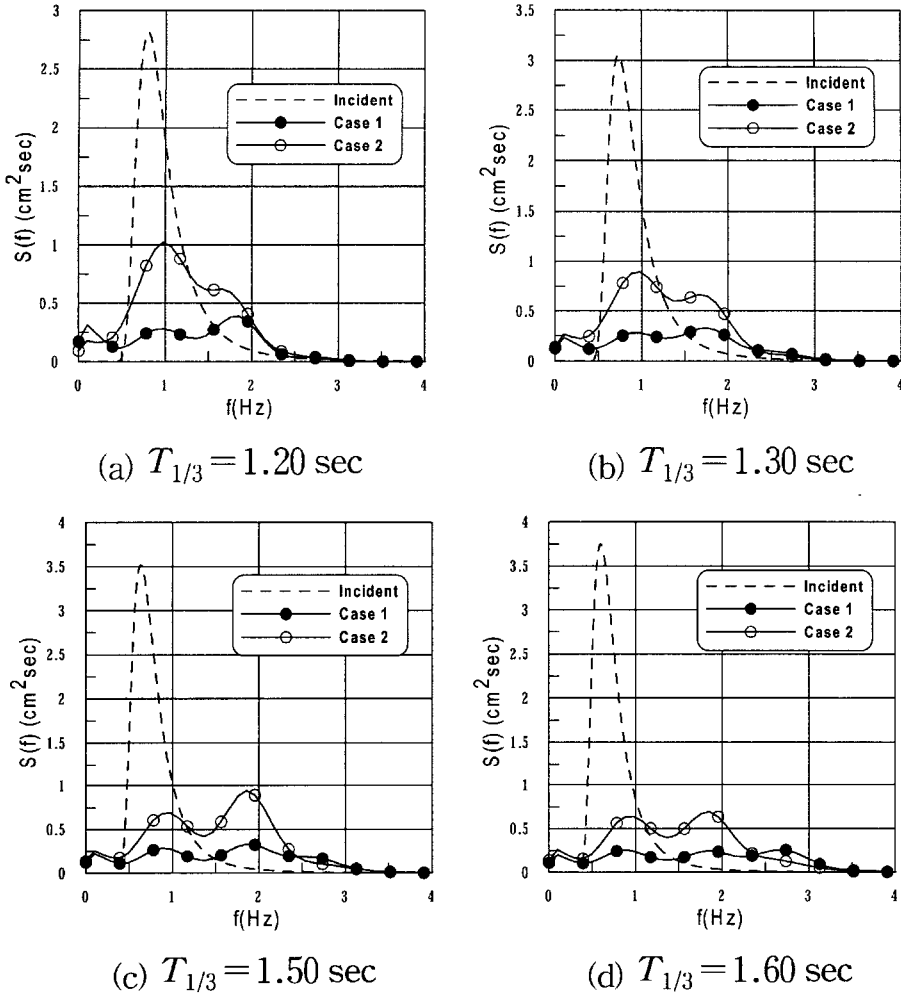


Fig. 4. Comparison of frequency spectrum for Case 1 and Case 2.

배후에서 파의 재생성과정을 거치면서 고주파성분을 포함한 2차파봉이 발생하는 파의 분열현상에 기인하는 것으로 판단된다. Case 3의 경우에는 전체적으로 Case 1에 비해 입사파랑의 에너지감쇠가 크게 나타나고 있으며, 스펙트럼의 피크는 유의주기대와 거의 동일한 주기대에서 존재하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Case 1의 경우와는 달리 뚜렷한 스펙트럼의 피크는 존재하지 않으며, 스펙트럼의 밴드폭도 좁게 나타나고 있다. 이열잡제의 경우 단주기쪽의 피크가 발생하지 않는 것은 바다측 잡제의 천단상에서 쇄파에 의해 발생한 고주파성분이 해안측 잡제상을 진행하면서 여과되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4는 이열잡제에 대해 천단수심의 변화에 따른 파

랑에너지의 분포를 나타낸 것이다. 천단수심 $qh=10$ cm인 Case 2의 $T_{1/3}=1.20, 1.30$ sec의 경우는 쇄파가 발생하지 않은 경우로 유의주기대 부근에서 스펙트럼의 피크가 존재하며, 쇄파가 발생한 유의주기 $T_{1/3}=1.50, 1.60$ sec의 경우에는 단주기쪽으로 이동된 주파수 $f=1.5\sim 2.0$ Hz 부근에서 스펙트럼의 피크가 나타남과 동시에 유의주기대 부근에서도 피크가 나타나고 있다.

이열잡제에 대해서 이격거리를 변화시킨 Case 3과 Case 4에 대한 잡제배후에서 주파수스펙트럼의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 전주기대에서 미소한 차이를 보이고 있으나 전체적으로 에너지분포와 스펙트럼의 밴드폭이 거의 동일하며, 스펙트럼의 피크는 유의주기대 부근에서 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 본 연구에

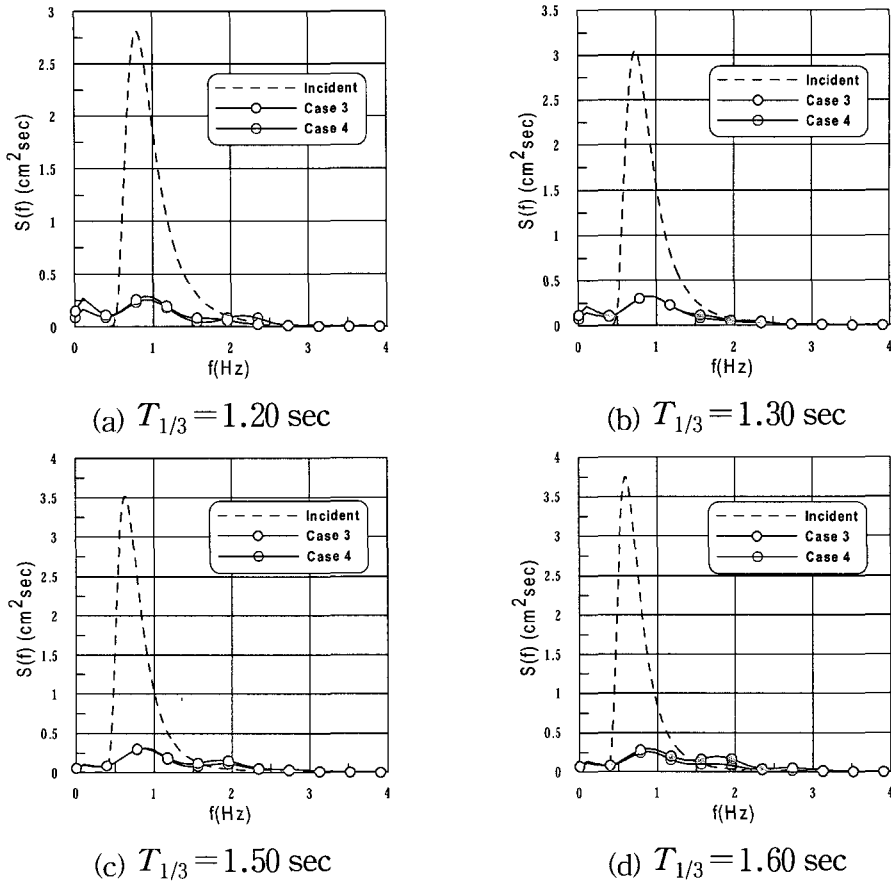


Fig. 5. Comparison of frequency spectrum for Case 3 and Case 4.

서 검토한 이격거리만으로는 이격거리의 변화에 따른 파랑에너지의 변화특성을 정확하게 판단할 수 없으므로 보다 다양한 이격거리에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 투과성잠제의 스펙트럼 변화양상은 허동수·김도삼(2003), 유현상(2004)이 검토한 불투과성잠제 배후에서의 스펙트럼 변화양상과 거의 동일하게 나타나고 있었으나 잠제배후에서의 파랑에너지는 다소 차이를 보이고 있었다.

이하여 불투과성잠제와 투과성잠제 배후에서의 파랑에너지를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6은 일렬과 이열잠제에 있어서 쇄파의 유무에 따른 투과성잠제와 불투과성잠제(유현상, 2004)의 투과율을 나타낸 것으로, 불투과성 구조물의 제원은 본 연구에서 고려하고 있는 투과성 구조물의 제원과 동일하다.

투과율은 식 (9)와 같이 정의된다.

$$K_T = \sqrt{E_T/E_I} \tag{9}$$

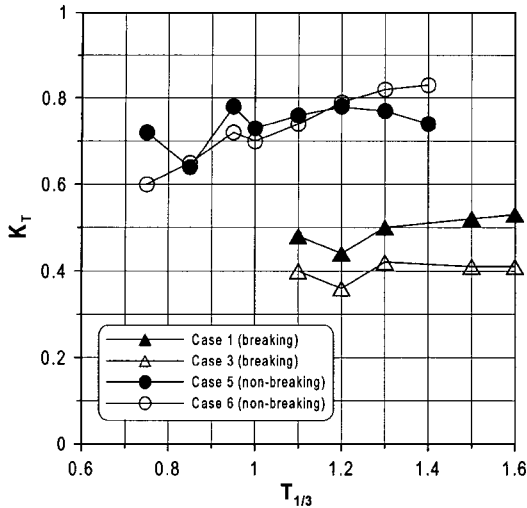
여기서, E_T 는 투과파의 에너지, E_I 는 입사파의 에너지를 나타낸다.

투과율의 산정시 입사파에너지와 투과파에너지는 조파 후 안정된 파형이 나타나는 시간으로부터 40 sec 동안 취

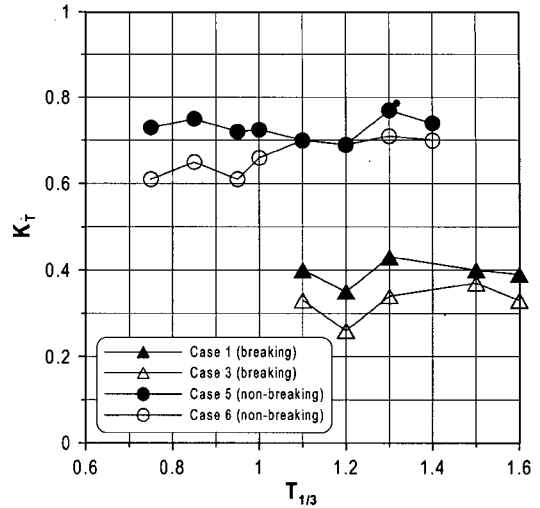
Table 2. Conditions of numerical simulation

	Crown width(B)	Crown depth(qh)	Separated distance(l)	Model
Case 5	100	10	-	One-rowed permeable submerged breakwater
Case 6	50	10	50	Tow-rowed permeable submerged breakwater

unit: cm



(a) Permeable Submerged Breakwater



(b) Impermeable Submerged Breakwater

Fig. 6. Comparison of transmission coefficient for breaking and non-breaking condition.

특한 data를 사용하였으며, 쇄파가 발생하지 않는 경우에 투과성잠제의 제원은 Table 2와 같다.

Fig. 6의 (a)의 경우는 투과성잠제의 투과율을 나타낸 것으로 비쇄파 조건인 Case 5와 Case 6의 투과율은 유사한 값을 나타내고 있으며, 주기가 증가할수록 다소 높아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 쇄파가 발생한 Case 1과 Case 3의 경우에는 비쇄파 조건의 경우보다 상당히 작은 투과율을 나타내고 있으며, 전 주기대에서 거의 동일한 크기를 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6의 (b)의 경우는 불투과성잠제의 투과율을 나타낸 것으로 투과성잠제와 마찬가지로 비쇄파 조건의 경우보다 쇄파가 발생한 Case1과 Case3의 경우에 잠제배후에서의 파랑에너지 감쇠가 크게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으며, 잠제배후에서의 전체적인 파랑에너지 감쇠량은 불투과성잠제의 경우가 투과성잠제의 경우보다 크게 나타나고 있지만 그 차이는 미소하다.

4. 결 론

본 연구에서는 VOF법에 기초하여 불규칙파동장내에 설치된 일렬 및 이렬의 투과성잠제에 의한 파랑에너지의 변화특성과 투과율을 고찰하였다. 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 일렬잠제의 경우 유의주기가 증가할수록 스펙트럼

의 피크가 단주기쪽으로 이동하고, 파랑에너지의 감쇠도 크게 나타난다. 이렬잠제의 경우 일렬잠제에 비해 잠제배후에서의 파랑에너지가 작게 나타나고, 스펙트럼의 피크는 유의주기대에서 나타난다.

(2) 쇄파가 발생하지 않은 경우는 잠제배후에서 파랑에너지의 감쇠가 상대적으로 작으며 스펙트럼의 피크는 유의주기대 및 단주기쪽에서도 나타난다.

(3) 이격거리를 변화시킨 경우 잠제배후에서 스펙트럼의 밴드폭이 거의 동일하게 나타나고 있다. 그러나 본 연구에서 검토한 이격거리만으로는 이격거리의 변화에 따른 파랑에너지의 변화특성을 정확하게 판단할 수 없으므로 보다 다양한 이격거리에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

(4) 불투과성잠제와 투과성잠제 배후에서의 파랑에너지 변화를 확인한 결과 불투과성잠제의 경우가 투과성잠제의 경우보다 감쇠량이 크게 나타나고 있지만 그 차이는 미소하며, 불투과성잠제와 투과성잠제에 의한 파랑에너지 변화에 대해서는 보다 다양한 단면에 대한 비교·검토가 필요할 것으로 판단된다.

(5) 쇄파의 발생유무에 따른 투과율의 검토로부터 쇄파시 투과율의 뚜렷한 감쇠를 확인할 수 있었으며, 잠제의 파랑제어기능을 검토하는 데에 귀중한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

김도삼 (2000). 다열장애에 의한 파랑의 전달율과 반사율. 대한토목학회논문집, 20(1-B), 85-94.

김도삼, 이광호 (2002). 월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑변형에 관한 수치해석. 한국해양공학회지, 16(2), 1-5.

김도삼, 이광호, 김정수 (2002). 수중투과성구조물에 의한 쇄파를 수반한 파랑변형 및 유속장 해석. 한국해양·해양공학회지, 14(2), 171-181.

김도삼, 이광호, 허동수, 김정수 (2001). VOF법에 기초한 불투과장애 주변파동장의 수치해석. 대한토목학회논문집, 21(5-B), 551-560.

김도삼, 허동수, 윤덕영, 정연태 (1997). 수치파동수조 중에 놓인 장애에 의한 쇄파의 수치해석. 대한토목학회논문집, 17(2-3), 251-259.

김도삼, 허동수, 정연태, 윤덕영 (1998). 투과성장애에 의한 쇄파의 수치해석에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 18(2-1), 59-65.

이광호 (2002). VOF법에 의한 불투과성장애 및 투과성장애 주변 파동장의 쇄파를 포함한 FULL NONLINEAR 해석에 관한 연구. 석사학위논문, 한국해양대학교.

유현상 (2004). 2차원 불규칙 파동장에 있어서 VOF법에 기초한 장애에 의한 파랑에너지의 변화특성에 관한 연구. 석사학위논문, 한국해양대학교.

허동수, 김도삼 (2003). VOF법에 의한 불규칙파동장에 있어서 불투과장애에 의한 파랑에너지 변형 특성. 한국해양안·해양공학회지, 15(4), 207-213.

해양수산부 (1999). 港灣 및 漁港設計基準 (上).

Brorsen, M. and Larsen, J. (1987). Source generation of nonlinear gravity waves with the Boundary integral equation method. Coastal Eng., 11, 93-113.

Dold, J.W. and Peregrine, D.H. (1984). Steep unsteady water waves, An efficient computation scheme. Proc. 19th Coastal Eng. Conf., 1, 955-967.

Hinatsu, M. (1992). Numerical simulation of unsteady viscous nonlinear waves using moving grid system fitted on a free surface. J. Kansai Soc. Naval Architects, Japan, 217, 1-11.

Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid(VOF) method for dynamics of free boundaries. J. Comp. Phys., 39, 201-225.

Kioka, W. (1983). Numerical analysis of breaking waves in a shallow water. Coastal Eng. in Japan, 26, 11-18.

Lehmer, D.H. (1951). Mathematical methods in large-scale computing units. Proceedings of the Second Symposium on Large Scale Digital Computing Machinery, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts. 141-146.

Longuet-Higgins, M.S. and Cokelet, E.D. (1976). The deformation of steep surface waves on water.I. A Numerical Method of Computation. Proc. Roy. Soc. Lond., 350, 1-26.

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 Engrg., 1-7 (in Japanese).

Troch, P. (1997). VOFbreak2; A numerical model for simulation of wave interaction with rubble mound breakwaters. Proceeding 27th IAHR Congress, San Francisco, USA, 1366-1371.

van der Meer, J.W., Petit, H.A.H., van den Bosch, P., Klopman, G. and Broekens, R.D. (1992). Numerical simulation of wave motion on and in coastal structures. Proceeding 23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, Italy, 1772-1784.

Welch, H.E., Harlow, F.H., Shannon, H.P. and Daly, B.J. (1966). The MAC method-A computing technique for solving viscous incompressible, transient fluid flow problem involving free surfaces. LA-3425.

中村充, 白石英彦, 佐々木泰雄 (1966). 潜堤による消波について. 第13回海岸工学講演會講演集, 76-79.

合田良實 (1977). 港灣構造物の耐波設計. 麗島出版會, 日本.

加藤始 (1992). 透過潜堤による波高減衰効果と堤内水位上昇に関する研究. 海岸工学論文集, 39, 636-640.

權赫珉 (1996). 複合断面による不規則波浪の碎破變形に関する研究. 工学博士學位論文, 横浜國立大學大学院, 日本.

許東秀, 水谷法美 (2000). 潜堤上の擬岩に作用する不規則波の波力特性とその豫測手法. 海岸工学論文集, 47, 751-755.

蔣勤, 高橋重雄, 村西佳美, 磯部雅彦 (2000). 波・地盤・構造物の相互作用に関するVOF-FEM豫測モデルの開発. 海岸工学論文集, 47, 51-55.

海岸開發技術研究センター (2001). CADMAS-SURF數値波動水路の開発・研究. 財團法人 海岸開發技術研究センター, 日本.

Received March 5, 2004

Accepted July 9, 2004