

## VOF 법에 의한 불규칙파동장에 있어서 불투과잠제에 의한 파랑에너지 변형특성

### The Characteristics of Wave Energy Variations by Impermeable Submerged Breakwater Using VOF Method in Irregular Wave Fields

허동수\* · 김도삼\*\*

Dong Soo Hur\* and Do Sam Kim\*\*

**요 旨** : 본 연구는 불규칙파동장에 설치된 불투과잠제를 대상으로 잠제의 배후에서 파랑에너지의 변화특성을 고찰한다. 이를 위해 VOF법에 기초한 2차원수치파동수로를 이용하였다. VOF법은 쇄파를 포함한 자유수면의 수치모의가 가능한 가장 효과적인 방법이다. 잠제배후에서 주파수스펙트럼의 해석결과에 의하면 쇄파는 잠제의 파랑제어능에 중요한 역할을 하고 있음을 확인하였다. 잠제의 천단상에서 쇄파가 발생하는 경우에 일렬잠제는 파에너지가 단주기적으로 이동하고 이열잠제의 경우는 스펙트럼의 피크가 뚜렷하지 않고 비슷한 크기의 에너지가 전 주파수대에 걸쳐 분포됨을 확인하였다.

**핵심용어** : 불투과잠제, VOF법, 2차원수치파동수로, 주파수스펙트럼, 쇄파

**Abstract** □ This study is to numerically investigate the characteristics of wave energy variations propagating over impermeable submerged breakwaters with irregular waves. Two-dimensional numerical wave flume based on the VOF method was used. VOF method is the most efficient capable of simulating free surfaces including wave breaking. From the computed frequency spectrum results, wave breaking play important role in ability of the submerged breakwaters to dissipate incident wave energy. In case of occurring wave breaking, our analysis shows that wave energy moves to short wave period on one-row impermeable submerged breakwater's lee side and is widely distributed not having peak period on two-row impermeable submerged breakwater's lee side.

**Keywords** : impermeable submerged breakwater, VOF method, two-dimensional numerical wave flume, frequency spectrum, wave breaking

## 1. 서 론

잠제는 수면 아래에 건설되는 대표적인 친환경의 해안·항만구조물로 일본을 위시한 외국에서는 이안제 등과 같은 대체표사제어구조물로 잠제를 다수 시공해 왔으며, 국내에서는 처음으로 부산시의 송도해수욕장에 해안침식방지를 위해 잠제를 건설하고 있다. 잠제에 의한 파랑제어의 주요한 메커니즘은 천단상에서의 입사파랑과 구조물과의 마찰 및 입사파랑의 강제쇄파에 의한 에너지 소산이

다. 지금까지 잠제에 대한 파랑변형의 해석을 위해 많은 연구가 이루어져 왔으나 천단상에서 발생하는 쇄파현상을 수치모의한 연구는 미진한 실정이고, 더욱이 규칙파에 대한 반사율과 전달율 같은 소파성능에 중점을 둔 연구가 대부분이다. 따라서, 본 연구에서는 쇄파를 수반하는 불규칙파동장에 있어서 잠제배후에서의 파랑에너지를 해석함으로써 잠제의 천단상을 진행한 파랑의 변화양상을 고찰하고자 한다. 이 때 적용하는 잠제는 불투과성의 잠제로 한다.

\*나고야대학 대학원 공학연구과(Department of Civil Engineering, Nagoya University, Chikusa-Ku, Nagoya 464-8603, Japan. hur@civil.nagoya-u.ac.jp)

\*\*한국해양대학교 공과대학 토목환경시스템공학부(Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University)

최근, 자유수면을 갖는 비압축성의 점성유체에 대한 수치모델링을 가능케 한 VOF(Volume of Fluid; Hirt and Nichols, 1981; 김 등, 2001, 2002; 이, 2002)이 제안된 이후 다양한 분야에서 이를 이용한 연구가 진행되고 있으며, 해안공학 분야에서도 이를 활용하는 연구가 증가하고 있는 추세에 있다. VOF법은 자유수면만을 추적하기 위한 기법이므로 해안공학분야에 이를 적절하게 활용하기 위해서는 효과적인 경계조건이 필요하게 된다. 따라서, 최근 몇년 동안 해안공학분야에서는 각 경계에서 효과적인 수치모의를 가능케 할 수 있는 경계조건을 부가하여 VOF법을 이용한 수치파동수로(numerical wave flume)에 대한 연구가 중점적으로 이루어져 왔다. 국외의 대표적인 연구 결과로는 일본의 沿岸開發技術研究센터에서 개발된 CADMAS-SURF(2001), Van der Meer 등의 SKYLLA(1992), Troch (1997)의 VOFbreak<sup>2</sup> 등을 들 수 있다. 특히, CADMAS-SURF는 부분셀(partial cell parameter)을 도입하여 셀내에 사면을 표현할 수 있는 NASA-VOF2D(Torrey et al., 1985) scheme을 적용하고 있으며, 사용자가 구조물의 형태 및 입사조건 등을 쉽게 입력하여 결과물을 얻을 수 있는 범용프로그램이다. 국내에서도 김 등(2001, 2002)과 이(2002)는 VOF법에 기초하여 개경계에서의 파의 재반사를 방지하기 위해 부가감쇠영역을 이용한 개경계조건과 수치조파기법을 이용한 수치파동수로를 제안하였다. 본 연구에서는 김 등(2001, 2002)과 이(2002)가 제안한 VOF법에 기초한 2차원수치파동수로에 불규칙파의 조파를 위한 불규칙수치조파기를 추가하여 불규칙파의 조파 성능을 검토하고, 이의 수치파동수로내에 불투과장치를 설치한 경우에 잠제배후에서 파랑에너지의 변화특성을 고찰한다.

## 2. 수치파동수로의 개요

본 연구에서 적용하고 있는 김 등(2001, 2002)과 이(2002)가 제안한 수치파동수로는 Fig. 1에 개념도를 나타내고 있는 바와 같이 부가감쇠영역을 설치하여 파의 재반사를 방지하고, 해석영역내에서 line-source에 의해 수치적으로 조파시킨다. 이하에서는 수치조파기를 이용한 불규칙파의 조파방법과 수치파동수로에 대해 간략히 소개한다.

### 2.1 기초방정식

수치파동수로의 기초방정식은 유체를 비압축성의 점성유체로 가정하여 식 (1)의 연속방정식과 식 (2)의 운동방정식, 그리고 자유수면을 추적하기 위해 Hirt and Nichols (1981)가 제안한 계단함수인 VOF함수에 대한 이류방정식 (3)으로 주어진다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = S\delta(x-x_s) \tag{1}$$

$$\begin{cases} \frac{Du}{Dt} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + v(\nabla^2 u) + \Psi \\ \frac{Dw}{Dt} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + v(\nabla^2 w) + \Psi - \lambda w - g_z \\ \Psi = \frac{v}{3}\frac{\partial}{\partial x} + \{S\delta(x-x_s)\} \end{cases} \tag{2}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Fu}{\partial x} + \frac{\partial Fw}{\partial z} = FS\delta(x-x_s) \tag{3}$$

여기서,  $u, w$ 는 각각  $x, z$ 방향으로의 유체입자의 속도,  $S$ 는 조파위치  $x-x_s$ 에서 조파소스의 밀도,  $\delta$ 는 Dirac delta 함수,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $p$ 는 압력,  $\Psi$ 는 조파소스로 인한 부가항,  $g_z$ 는  $z$ 방향으로의 중력가속도,  $\lambda$ 는 파의 재

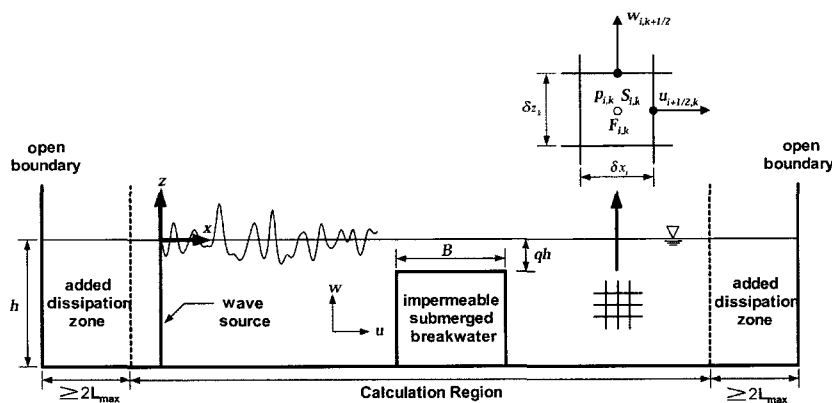


Fig. 1. Definition sketch of numerical wave flume.

반사를 방지하기 위해 해석영역의 양 끝단에 설치한 부가감쇠영역에서의 감쇠계수이다. 셀 내의 물리량은 Fig. 1에 보인 바와 같이 셀 경계에 유속  $u, w$ 를 위치시키고, 셀 중앙에 압력  $p$ , 조파소스  $S$  및 VOF함수  $F$ 를 위치시키는 엇갈린 격자를 채용한다.

## 2.2 경계조건

수치파동수로에 적용되는 경계조건으로는 자유수면에서의 유속조건과 압력조건, 구조물표면에서의 경계조건, 수로의 양 끝단에서의 개경계조건이 있다. 자유수면에서의 유속경계조건은 수면에 평행한 유속경계조건과 수면에 연직인 유속경계조건으로 대별된다. 수면에 평행한 유속경계조건은 유체가 존재하는 인접한 유체셀의 유속을 취하고, 수면에 연직인 유속경계조건은 연속방정식이 만족되도록 유속값을 결정한다. 또한, 자유수면에서의 압력은 인접한 유체셀의 정의위치와 표면셀 내의 압력 정의위치와의 2점간의 압력을 선형보간하여 산정한다. 개경계조건으로는 앞서 기술한 바와 같이 계산영역의 양 끝단에 부가감쇠영역을 접속시켜 파를 흡수하는 개경계조건을 적용하며, 부가감쇠영역의 길이는 입사파의 최소주파수에 해당되는 파장의 2배이상으로 하였다. 구조물표면 및 바닥에서는 법선방향으로 불투과조건을 접선방향으로는 slip조건을 적용하는 것으로 한다.

## 2.3 불규칙파의 조파

본 연구에서 적용하는 수치파동수로에서의 조파는 Brorsen and Larsen(1987)이 제안한 식 (4)의 조파소스강도를 이용한다.

$$S = \begin{cases} \{-2t/T_{1/3}\} \cdot 2 \sum_{i=1}^N U_i \left( \sum_{i=1}^N \eta_i + h \right) / (\eta_s + h) & : t/T_{1/3} \leq 3 \\ 2 \sum_{i=1}^N U_i \left( \sum_{i=1}^N \eta_i + h \right) / \eta_s + h & : t/T_{1/3} > 3 \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에서  $t$ 는 조파를 시작한 시각으로부터의 경과시간,  $T_{1/3}$ 은 입사파의 유의주기이다.  $U_i$ 는 각 성분파에 대한 수평유속성분으로 미소진폭파이론에 의한 유속을 사용하였으며, 갑작스러운 조파로 계산이 불안정해지는 것을 방지하기 위해  $3t/T_{1/3}$ 까지는 서서히 조파소스의 강도를 증가하는 것으로 하였다.

불규칙파를 수치모의하기 위한 스펙트럼으로는 널리 사용되고 있는 식 (5)의 Bretschneider-Mitsuyasu(1968, 1970)의 스펙트럼을 적용하였다.

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

여기서,  $S(f)$ 는 파랑에너지의 밀도,  $f$ 는 주파수,  $H_{1/3}$ 은 유의파고를 나타낸다. 불규칙파를 모의하기 위한 주파수  $f$ 의 선택방법에는 주파수 스펙트럼을 등구간으로 분할하는 방법이나 각각의 성분파의 진폭이 거의 같도록 하는 등에너지로 분할하는 방법 등이 이용된다. 본 연구에서는 Bretschneider-Mitsuyasu의 스펙트럼에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(1977)에 의해 제안된 다음의 식 (6)을 이용하여 주파수를 선택하였다.

$$f_m = \frac{1.007}{T_{1/3}} \left[ \ln \left( \frac{2M}{2m-1} \right) \right]^{-1/4} \quad (6)$$

여기서,  $M$ 은 성분파의 수를 나타낸다.

## 3. 해석결과

### 3.1 불규칙파의 조파검증

수치파동수로에서 불규칙파의 조파성능을 검증하기 위해 구조물이 설치되어 있지 않는 수심  $h = 50$  cm의 수치파동수로내에 유의파고  $H_{1/3} = 4$  cm, 유의주기  $T_{1/3} = 1.0$  sec의 불규칙파를 조파시켰다. 소스지점에서 조파개시후  $t/T_{1/3} = 15$ 까지 목표치와 계산치의 파형에 대한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

조파지점에서 계산파형이 목표한 파형보다 파곡에서는

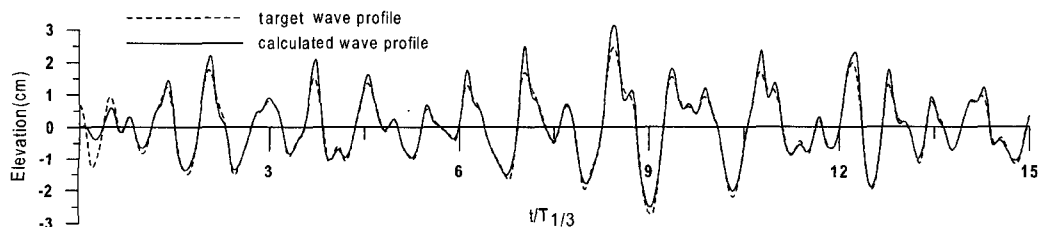


Fig. 2. Comparison of target wave profile and calculated wave profile.

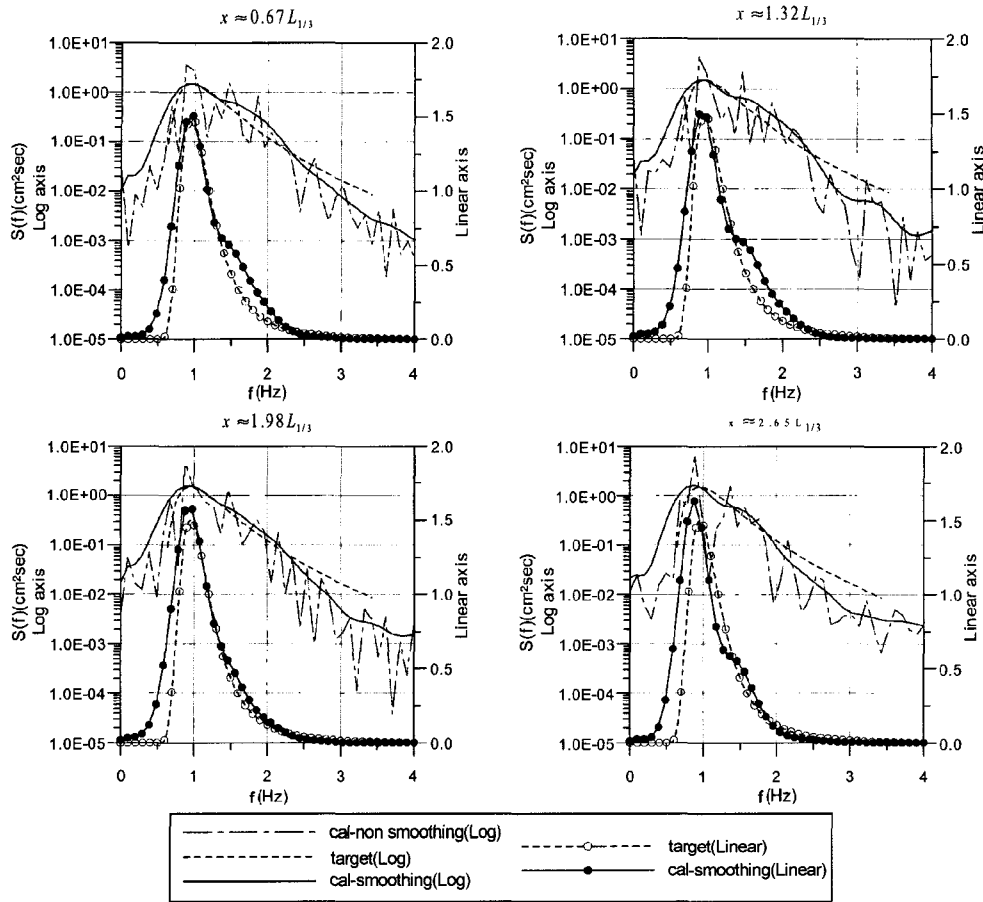


Fig. 3. Comparison of target spectrum and calculated spectrum at each point.

작게 파봉에서는 다소 높게 조파되고 있으나 전체적으로 목표치와 비교하여 파형과 위상이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 3은 해석영역내에서 조파개시후 조파 지점으로부터 각각  $x \approx 0.67L_{1/3}$ ,  $1.32L_{1/3}$ ,  $1.98L_{1/3}$ ,  $2.65L_{1/3}$ 의 위치에서 취득한 파형에 대해 주파수 스펙트럼을 계산하고, 이 결과를 목표스펙트럼(Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼)과 함께 비교한 것이다.

Fig. 3의 각 지점에서 얻어진 스펙트럼으로부터 잘 알

수 있듯이 본 계산에서 적용한 수치파동수로내에서의 계산스펙트럼은 목표스펙트럼의 밴드폭과 피크를 잘 재현하고 있으므로 기대한 불규칙파를 만족스럽게 조파시키는 것으로 판단된다.

### 3.2 불투과잡제의 배후에서의 파랑에너지 변화

Table 1과 같은 대표적인 잡제모델을 상정하여 불투과 잡제 배후에서 파랑에너지의 전달특성을 고찰하였다.

Table 1. Conditions of numerical simulation

	Case1	Case2	Case3
Model	One-row ISB(Impermeable Submerged Breakwater)		Two-row ISB
B (cm)	100		30
q	0.125	0.25	0.125
B/l	·		0.75
h (cm)	40		

\*l: 이열잡제의 제체간 이격거리(파의 진행방향으로의 배열).

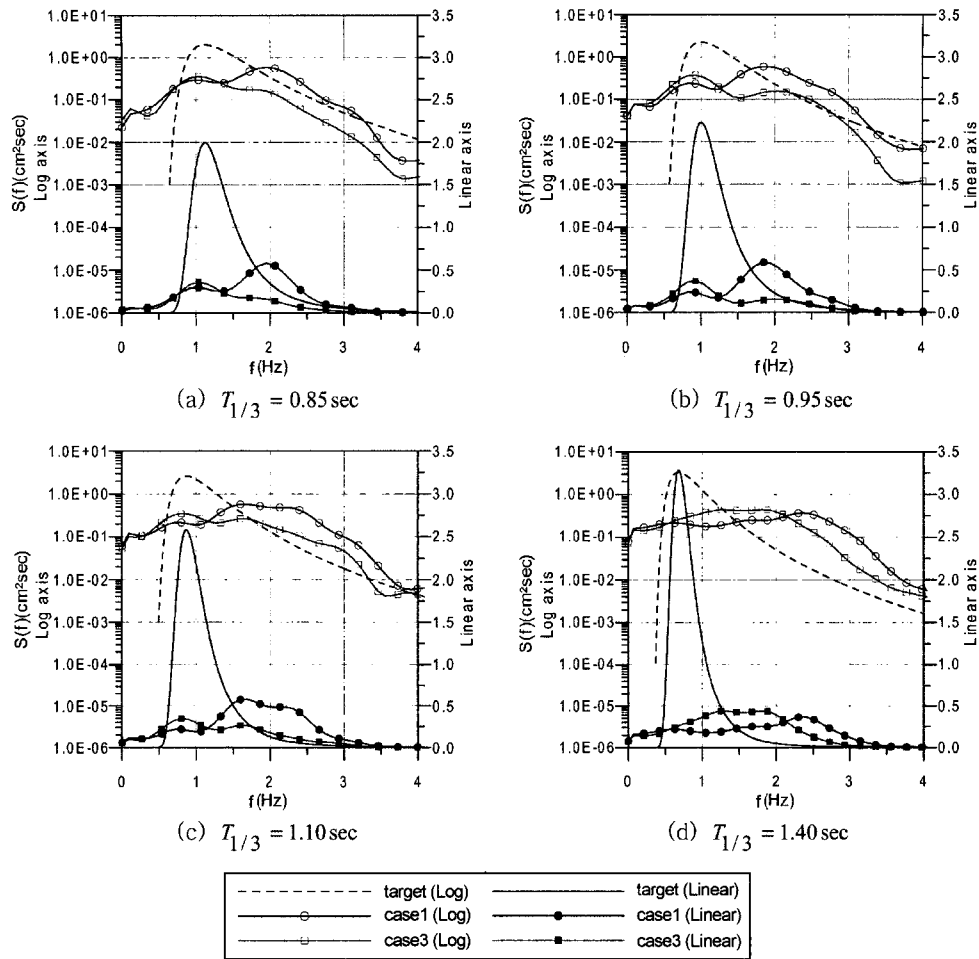


Fig. 4. Comparison of frequency spectrum for 1-row ISB and 2-row ISB at the rear of the structure.

Fig. 4는 일렬불투과감제(Case1)와 이렬불투과감제(Case3)에 있어서 파랑에너지의 전달특성을 고찰한 것으로, Case1과 Case3의 감제에 대해 천단상에서 쇄파가 발생하도록 유의파고  $H_{1/3}=5$  cm로 한 경우 유의주기  $T_{1/3}=0.85, 0.95, 1.10, 1.40$ 에 대한 결과이다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 일렬불투과감제와 이렬불투과감제 모두 감제배후에서 상당한 에너지의 감소를 보이고 있다. 일렬에 대한 파랑에너지 스펙트럼의 최대피크는 입사파의 경우보다 단주기 쪽에서 발생하며 특히, Fig. 4(d)의 경우는 Fig. 4(a-c)의 경우에 비해 훨씬 단주기 측에서 스펙트럼의 피크가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 일렬감제에 있어서 스펙트럼의 피크가 입사파의 유의주기에 비해 단주기 측에서 발생하는 현상은 김 등(2001)이 지적한 파의 분열현상에 기인하는 것으로

판단된다. 파의 분열현상은 감제의 천단상에서 입사파랑이 쇄파하여 쇄파된 파랑이 감제 배후에서 파의 재생성 과정을 거치면서 고주파 성분을 포함한 2차파봉이 발생하는 현상이며, 파랑에너지 해석결과로부터 불규칙과동장에서도 동일한 메커니즘을 이루고 있는 것으로 판단된다. 이 열의 경우는 일렬에 비해 스펙트럼의 피크가 뚜렷하게 나타나지 않고 비슷한 크기의 에너지가 전 주파수대에 걸쳐 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 유의주기가  $T_{1/3} \leq 1.10$  sec인 Fig. 4(a-c)의 경우에 에너지밀도가 일렬에 비해 적고,  $T_{1/3} = 1.40$  sec인 Fig. 4(d)의 경우는 일렬과 거의 유사하나 전체적으로 스펙트럼의 밴드폭은 일렬에 비해 작으며 스펙트럼의 피크는 일렬과는 상이하게 입사파의 유의주기보다 장주기 측에서 발생하지만 입사파의 유의주기와의 차이는 매우 작다. 그러나  $T_{1/3} = 1.40$  sec의 경우는

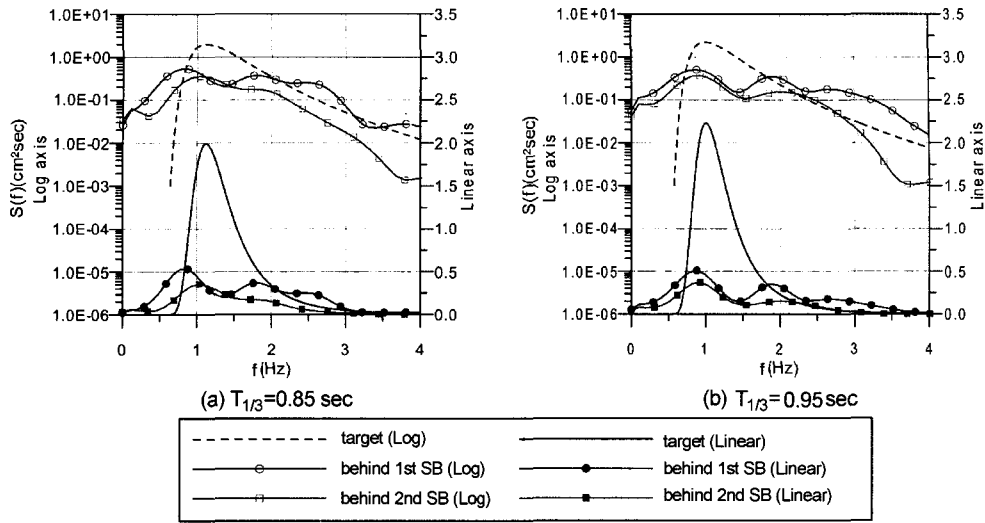


Fig. 5. Comparison of frequency spectrum for 1st ISB and 2nd ISB in Case3.

오히려 입사파의 유의주기보다 단주기 측에서 스펙트럼의 피크가 나타난다. 이열잠제의 경우 단주기 쪽의 피크가 발생하지 않는 것은 바다측 첫번째 잠제의 천단상에서 쇄파에 의해 발생한 고주파성분이 해안측 잠제상을 진행하면서 소규모의 2차쇄파가 발생하여 여파되기 때문인 것으로 판단된다. 이는 Case3의 이열잠제를 대상으로 하여 입사파의 유의주기  $T_{1/3} = 0.85 \text{ sec}$ ,  $0.95 \text{ sec}$ 에 대해 바다측 잠제(첫번째 잠제) 배후에서의 스펙트럼과 해안측 잠제(두번째 잠제) 배후에서의 스펙트럼을 비교한 Fig. 5로부터 확인할 수 있다. 한편,  $T_{1/3} = 1.40 \text{ sec}$ 의 경우와 같이

유의주기가 큰 경우에 이열잠제에 의한 파랑제어 효과를 충분히 기대하기 위해서는 적절한 잠제폭을 선정하는 것이 필요하다고 판단된다.

Fig. 6은 잠제의 천단상에서 발생하는 쇄파규모에 따라 이열잠제에 있어서 파랑에너지의 전달특성을 나타낸다. Fig. 6(a)에서 Case2의 일렬볼투과잠제는 잠제 천단상에서 쇄파가 발생하지 않는 경우로 쇄파가 발생하는 Case1의 경우에 비해 에너지가 크다. 또한, 쇄파의 발생으로 피크가 단주기측으로 이동한 Case1의 경우와는 상이하게 Case2에서는 입사파의 유의주기와 같은 주기대에서 피

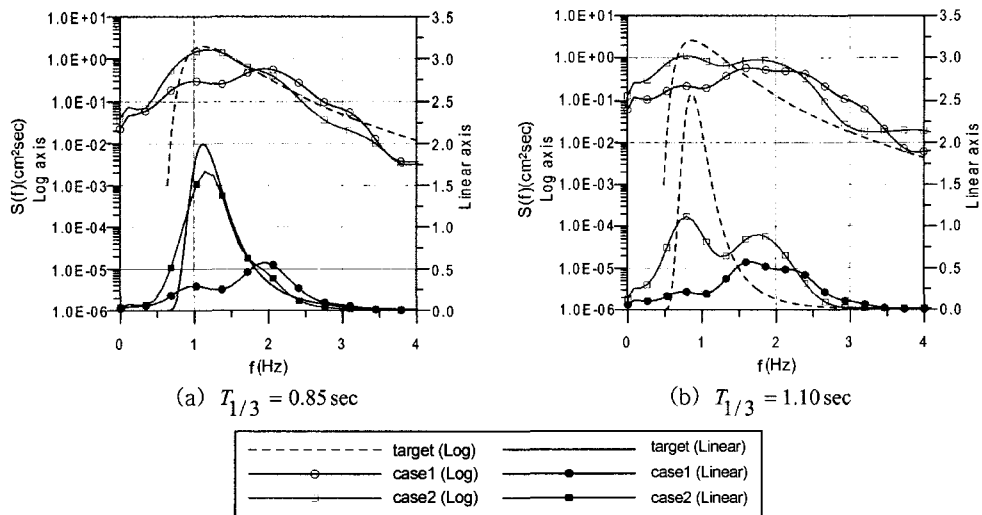


Fig. 6. Comparison of frequency spectrum for Case1 and Case2 at the rear of the structure.

크가 존재한다. Fig. 6(b)의 경우는 Case1과 Case2 모두 잠제 천단상에서 쇄파가 발생하는 경우로 쇄파의 규모는 천단수심이  $g=0.25$ 인 Case2에 비해 천단수심이  $g=0.125$ 인 Case1의 경우가 크다. Case2의 경우는 쇄파의 발생으로 인해 유의주기대에 비해 단주기대인 1.8Hz부근에서도 피크가 존재하지만 유의주기대에서도 피크가 존재한다. 따라서, 쇄파의 규모가 커짐에 따라 유의주기대에서의 에너지감쇠가 크게 발생함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 VOF법을 이용한 수치파동수로내에 수치조파에 의한 불규칙파를 발생시켜 해석영역내 임의점에서 수치조파기로부터 전파된 파형에 대한 주파수 스펙트럼 해석을 실시함으로써 목표스펙트럼의 기대한 불규칙파를 수치적으로 만족스럽게 조파됨을 확인하였다. 이를 근거로 하여 수치파동수로내에 대표적인 일렬과 이열 불투과장애 모델을 상정하여 잠제 배후에서 파랑에너지의 변화특성을 고찰한 결과, 잠제상에서 쇄파가 발생한 경우에 일렬과 이열 모두 잠제 배후에서 상당한 에너지 감쇠를 보였으며, 특히 일렬의 경우는 스펙트럼의 피크가 단주기적으로 이동하면서 피크의 높이도 뚜렷하였고, 이열의 경우는 일렬에 비해 스펙트럼의 피크가 뚜렷하지 않고 전 주파수에 걸쳐 에너지가 고르게 분포됨을 확인하였다. 또한, 쇄파가 발생하지 않는 경우에는 유의주기대와 같은 주기대에서 스펙트럼의 피크치가 존재함을 알 수 있었다.

일반적으로 많은 노동과 시간이 요구되는 수리실험과 비교해 볼 때 수치파동수로내에 불규칙파를 조파시키는 것이 가능하므로 구조물의 설계시 이를 활용한 수치실험의 역할이 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 산·학·연 연구개발 사업의 일환인 해상도시건설을 위한 해역정온화 종합기술 개발(R&F/00-24-01)의 한 과제로 수행된 것으로, 연구비의 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

김도삼, 이광호, 허동수, 김정수, 2001. VOF법에 기초한 불투과장애 주변파동장의 해석, 대한토목학회논문집 21(5-

B): 551-560.

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

이광호, 2002. VOF법에 의한 불투과성장애 및 투과성장애 주변파동장의 쇄파를 포함한 FULL NONLINEAR 해석에 관한 연구, 석사학위논문, 한국해양대학교.

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

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

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.*, pp. 1-7.

Bretschneider, C. L., 1968. *Significant waves and wave spectrum*, Ocean Industry, pp. 40-46.

Torrey, M. D., Cloutman, L. D., Mjolsness, R.C., Hirt, C. W., 1985. NASA-VOF2D: a computer program for incompressible flows with free surfaces. Report LA-10612-MS. Los Alamos Scientific Report, Los Alamos, NM, USA.

Troch, P., 1997. VOFbreak<sup>2</sup>, a numerical model for simulation of wave interaction with rubble mound breakwaters, *Proceeding 27th IAHR Congress*, San Francisco, USA, pp. 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, pp. 1772-1784.

Goda, Y., 1977. Numerical experiments on statistical variability of ocean waves, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.* 16(2), pp. 3-26.

沿岸開発技術研究センター, 2001. CADMAS-SURF(数値波動水路の研究・開発), 財団法人 沿岸開発技術研究センター, 日本.

Received June 16, 2003

Accepted September 29, 2003