

수중투과성구조물에 의한 쇄파를 수반한 파랑변형 및 유속장 해석

Analysis of Wave Transformation and Velocity Fields Including Wave Breaking due to the Permeable Submerged Breakwaters

김도삼* · 이광호** · 김정수*

Do Sam Kim*, Kwang Ho Lee**, and Jung Soo Kim*

요 旨 : 최근, 구조물에 의한 쇄파를 수반한 다양한 파랑변형 해석법중에 자유수면의 추적기법인 VOF법을 이용한 수치해석기법이 각광을 받고 있다. 본 연구는 수중투과성구조물(잠제)에 의한 파랑변형 및 유속장의 해석을 위해 조파를 위한 line-source와 파의 재반사를 방지하기 위한 부가감쇠영역이 설치된 2차원수치파동수조에 잠제를 설치하고 구조물에 의한 파랑변형의 자유수면 추적을 위해 VOF법을 적용하였다. 2차원수치파동수조를 이용한 본 연구의 수치해석수법의 타당성 검증을 위해 수리실험을 실시하였으며 그 결과 본 수치해석결과와 잘 일치하였다. 일열잠제와 이열잠제에 대한 수치해석을 통해 잠제 주변 유속장 해석으로부터 일열잠제의 경우 배후에서 와가 발생하고 이열잠제의 경우 잠제사이와 잠제배후에서 와가 발생함을 확인하였으며 잠제의 천단상에서는 강한 비선형성분파가 발생하고 투과층내의 유속방향은 자유수면의 형상에 의해 좌우됨을 확인하였다.

핵심용어 : VOF법, 쇄파, 2차원수치파동수조, 부가감쇠영역, 수중투과성구조물(잠제), 투과층

Abstract □ Among various numerical methods of wave transformations including wave breaking by structure, models using VOF (Volume Of Fluid) method to trace free surface are getting into the spotlight recently. In order to analyze wave transformations and velocity of the wave fields due to the permeable submerged breakwater (PSB), This study applied VOF method to the two-dimensional wave channel installed line-source to generate waves and added dissipation zone to offer a non-reflective boundary. Hydraulic experiments was performed to obtain the application of two-dimensional numerical wave channel. The results of numerical experiments using the two-dimensional wave channel agree well with the experimental data. It was shown that vortices are formed behind the PSB, and in case of the 2-rowed PSB they also are occurred in between PSBs, strongly non-linear waves are developed on the crown of the PSB, and the direction of velocities in porous media is determined by the shape of free surface.

Keywords : VOF method, wave breaking, two-dimensional numerical wave channel, added dissipation zone, permeable submerged breakwater (PSB), porous media

1. 서 론

수중에 설치되어 파랑에너지를 제어하는 수중구조물(이하 잠제)은 본래의 항만구조물로서의 기능 뿐 아니라 천단의 유수역을 확보함으로써 연안환경에 미치는 영향을

최소화시킬 수 있기 때문에 기존 방파제의 대체구조물로 손색이 없다. 이러한 잠제의 파랑제어 가능성을 검토하기 위해 다양한 수치해석이 시행되어 왔다. 그 대표적인 연구예로 Somchai 등(1989), 磯部 등(1991), 喜岡 등(1994), 金 등(1998, 2000)이 있다.

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

**동의공업대학 토목과(Department of Civil Engineering, Dong-Eui Institute of Technology)

Somchai 등(1989)은 투수층내의 저항에 의한 에너지소산을 고려한 파랑변형의 해석모델을 제시하였고 磯部 등(1991)은 잠제를 고려한 비선형파동방정식, 喜岡 등(1994)은 비선형장파방정식을 이용하여 잠제와 파랑변형을 해석하고 있으나 이러한 수치해석은 쇄파를 대상으로 하는 파동장으로서의 적용이 곤란하다. 金 등(1998, 2000)은 경계요소법을 이용하여 투과성잠제에 의한 쇄파를 해석하고, 다열잠제의 파랑제어기능을 검토하고 있으나 이 역시 쇄파후 파동장계산이 수행될 수 없다는 큰 단점을 수반한다.

비압축성 점성유체에 대한 복잡한 자유수면을 효과적으로 수치모의할 수 있는 VOF법(Volume of Fluid Method; 이하 VOF법, Hirt and Nichols, 1981)이 제안된 이후 자유수면을 갖는 유체역학의 다양한 분야에서 이를 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 VOF법은 쇄파과정 및 쇄파후의 파형을 수치적으로 재현할 수 있어 최근 들어서 해안공학분야에서도 VOF법을 이용한 수치모델의 개발이 다양하게 시도되고 있는 단계이다. VOF법은 단지 자유수면을 모의하는 기법이므로 해안공학분야에 적용시 파랑의 전달과 반사를 정확하게 모의할 수 있는 효과적인 경계조건과 주기적인 파동장을 위한 조파방법이 필요하다. 이러한 경계조건과 조파방법을 결부시켜 VOF법을 활용한 대표적인 수치모델의 예로 SKYLLA(Van der Meer et al., 1992), CADMAS-SURF(日本 沿岸開發技術研究セソ

タ -, 2001), VOFbreak(Troch, P., 1997) 등을 들 수 있다. 국내에서도 金 등(2001)과 李(2002)에 의해 불투과잠제의 해석을 위한 VOF법을 활용한 2차원수치파동수조가 제안되었으나 아직까지 국내에서는 VOF법의 연구가 미진한 실정이다. 본 연구에서는 金 등(2001)과 李(2002)에 의해 제안된 VOF법에 기초한 2차원수치파동수조에 투과성잠제를 설치하여 수중투과성구조물에 대한 적용성을 검토하고 더불어 잠제주변 및 잠제투과층내의 유속장 특성의 고찰 및 일열투과잠제와 이열투과잠제의 기본적인 파랑제어기능을 검토한다.

2. 수치해석의 이론

본 연구의 2차원수치파동수조는 Fig. 1에 보인 바와 같이 양단에 부가감쇠영역을 설치하여 파의 재반사를 방지하고(Hinatsu, 1992) 해석영역내의 조파를 위한 line-source로 구성되어 있다(Brosen and Larsen, 1987).

2.1 기초방정식

유체를 비압축성의 점성유체로 가정하면, 기초방정식은 식 (1)의 연속방정식과 투과층내부의 유체저항을 고려한 운동방정식 (2), (3), 그리고 자유수면을 추적하기 위한 식 (4)의 VOF 함수 $F(x, z, t)$ (이하 F)에 대한 이류방정식의

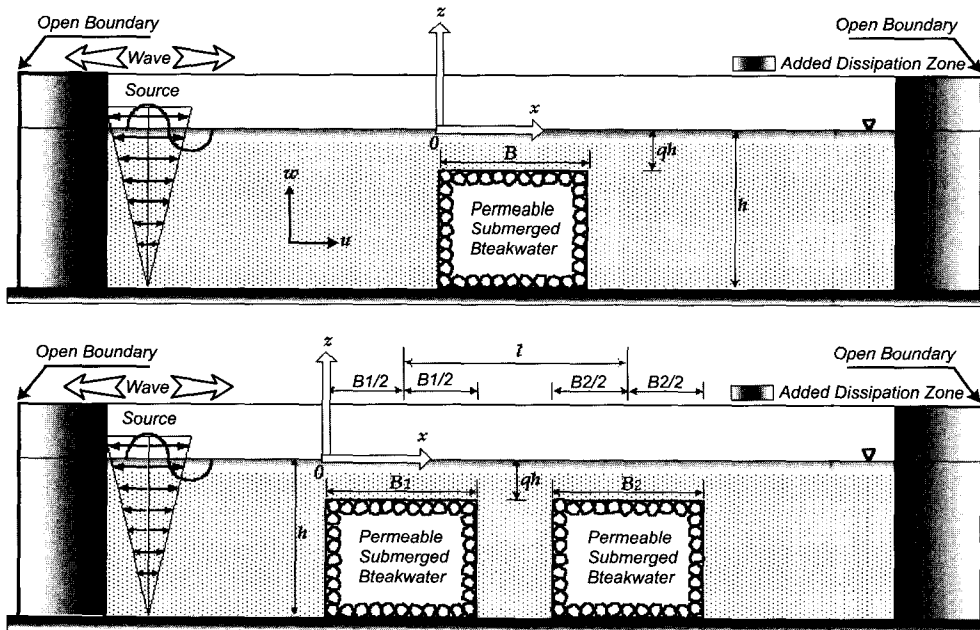


Fig. 1. Definition sketch for analysis of permeable submerged breakwater.

로 주어진다.

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

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} = & -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - M_x - R_x \\ & + 2v\gamma_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v\gamma_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{2v}{3} \gamma_x \frac{\partial S^*}{\partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

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

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

여기서, $S^*=S(z, t)\delta(x-x_s)$ 는 조파위치 $x=x_s$ 에서의 조파 source의 밀도, δ 는 dirac delta 함수, u, w 는 각각 유체의 x, z 방향의 속도, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, g_z 는 중력 가속도, ν 는 유체의 동점성계수($\nu=0.010 \text{ cm}^2/\text{sec}$), γ_v 는 유체공극율, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향의 면적공극율을 나타낸다. λ 는 부가감쇠영역에서의 감쇠계수로 x 방향의 운동방정식에 동일한 감쇠항을 첨가하지 않는 것은 x 방향으로의 똑같은 흐름에 대한 감쇠를 피하기 위함이고 x 방향으로 부가감쇠영역의 시작점에서부터 끝단까지 0에서부터 1까지 정현함수적으로 증가시키고 z 방향의 부(수심)방향으로 0까지 선형감소시킨 감쇠계수에 의해 연직 방향의 유속을 서서히 감쇠시키게 된다. M_x, M_z 는 관성력항으로 다음과 같다(榑山·鹿島, 1992; 李, 2002).

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

또한 항력항 R_x, R_z 는 등기분포저항으로써 다음과 같이 표현할 수 있다(榑山·鹿島, 1992; 李, 2002).

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

여기서 C_M, C_D 는 각각 관성력계수와 항력계수로 관성력계수 $C_M=(1+\kappa, \kappa$ =부가질량계수)은 실험으로 산정되지만 투과층 공극층의 유체 일부, 혹은 전부가 부가질

량이 되는 것으로 간주하고 투과층내의 체적공극율을 $\gamma_v=0.4$ (일반사석의 공극율 적용, 해양수산부, 1999)로 고려하면 관성력계수는 $1 \leq C_M \leq 1.67$ 의 범위를 갖는다. 본 연구에서는 관성력계수 $C_M=1.5$ 를, 항력계수 C_D 는 투과층의 사석을 지름이 일정한 구로 가정하고 $C_D=0.5$ (해양수산부, 1979)를 적용하였다.

2.2 계산방법

Fig. 1의 계산영역을 직사각형의 격자로 나누고 셀 내에서 종속변수인 유속 u, w 는 각각 셀 경계인 오른쪽과 위쪽에 위치시키고, 압력 p , 조파 source S 및 VOF 함수 F 를 셀 중앙에 위치시키는 엇갈린격자(staggered mesh)를 채용하고 격자 주위에 경계처리를 위한 가상셀을 둔다.

Fig. 2의 계산 흐름도에 나타낸 바와 같이 초기조건을 입력하고, 경계조건을 만족하도록 운동방정식 (2), (3)을 푸는 것으로 하여 다음 시간스텝에 있어서의 유속을 계산하고 유속과 압력을 조정하면서 일정한 수렴범위까지 연속방정식을 만족하도록 반복계산을 수행한다. 연속방정식을 만족하는 유속이 얻어지면 그 유속의 값을 이용하여 F 의 이류방정식을 계산할 수 있으며, 계산된 F 를 이용하여 파동장을 해석할 수 있다. 계산흐름을 각 시간스텝에서 반복하는 것으로 파동장의 시계열 계산을 수행한다.

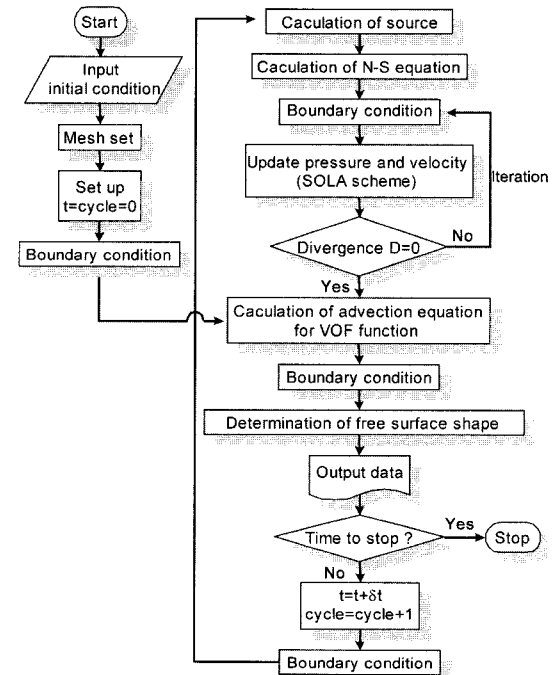


Fig. 2. Flow chart for computation.

2.3 VOF 법에 의한 자유수면의 이류계산

자유수면의 추적을 위해 식 (4)의 VOF 함수를 이용한다. 식 (4)의 F 는 $0 \leq F \leq 1$ 의 범위를 가지며, $F=1$ 일 경우는 유체셀로, $F=0$ 일 경우는 기체셀로, $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단할 수 있다. 따라서 각 셀에서의 F 값으로 자유수면을 판별할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 계산의 편의를 위해 표면셀은 $F=1$ 인 유체셀과 $F=0$ 인 기체셀 사이에 존재한다는 가정을 부가하였다. 즉 유체가 기체를 포함하는 경우 이를 무시하고 유체셀로 간주하였다. F 의 차분식은 이류항에 의한 수치확산을 제어하기 위해 donor-acceptor법을 적용시켜 이류면에서의 VOF 함수 F_{AD} 의 값을 식 (7)로 구할 수 있다(Hirt and Nichols, 1981; 金 등, 2001; 李, 2002).

$$\begin{cases} F_{AD}u_{i+1/2,k}^{n+1}\delta t = \\ \quad \text{sgn}(u_{i+1/2,k}^{n+1})\text{MIN}\{F_{AD}|u_{i+1/2,k}\delta t + CF, F_D\delta x_D\} \\ CF = \text{MAX}\{(1.0 - F_{AD})|u_{i+1/2,k}^{n+1}\delta t - (1.0 - F_D)\delta x_D, 0.0\} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, 식 (7)의 MIN 은 donor 셀의 보유 유체량 보다 더 많은 유체가 이류되는 것을 방지하고, MAX 는 acceptor 셀의 보유 기체량보다 더 많은 기체가 이류되는 것을 방지한다. 자유수면의 형태는 표면셀 주변의 VOF 함수를 산정하여 VOF 함수의 합이 최대인 방향, 즉 유체가 많이 분포된 방향을 실제의 자유수면의 형상과 가까운 것으로 판정하였다.

2.4 경계조건

수면에 평행한 유속경계조건은 표면셀의 자유수면형태에 따라 유체가 존재하는 방향의 유체셀 경계면의 유속을 해당하는 셀 경계면에 취하고 표면에 수직인 유속경계조건은 표면셀에서의 연속방정식이 만족되도록 값을 결정하였다. 표면셀에서의 압력은 셀 내의 압력 정의위치와 표면셀의 자유수면 형태의 판별에 따른 유체셀의 정의위치와의 2점간 압력을 선형내삽하여 산정하였다.

개경계조건으로는 앞서 기술한 부가감쇠영역을 적용하

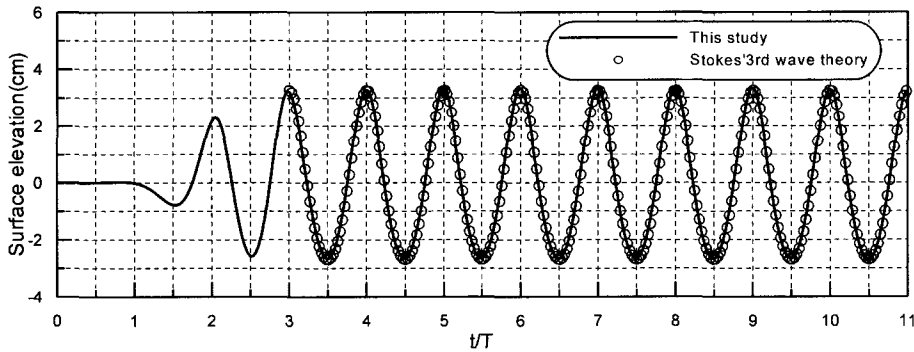


Fig. 3. Comparison of stokes'3rd wave and computed wave.

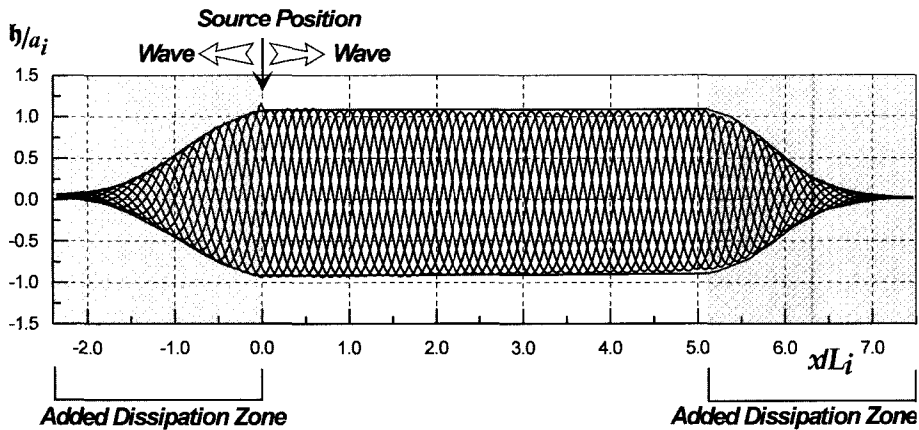


Fig. 4. Profiles of computed waves at each time step during one wave period.

였으며 바닥에서의 법선방향유속의 경계조건은 불투과조건을 적용하였고 점선방향 유속경계조건은 점성유체를 대상으로 하고 있기 때문에 non-slip 조건을 적용하는 것이 일반적이나 격자간격을 구조물 표면이나 바닥근방에서 형성되는 경계층 두께까지 세세하게 분할하고 있지 않으므로 slip 조건을 적용하였다.

3. 해석결과

3.1 조파파형 및 부가감쇠영역의 검증

Fig. 3은 line-source로부터 발생된 파형의 검증을 위해

구조물이 설치되지 않은 수치파동수조에서 입사파고 $H_i = 6$ cm, 주기 $T = 1.4$ sec, 수심 $h = 40$ cm의 조건하에 $x = 1.0L_i$ 위치에서의 시간파형을 측정하여 stokes 3차파와의 시간파형을 비교한 것으로 조파 시작시 수면의 거동이 불안정하게 되는 것을 방지하기 위해 $t/T \leq 3$ 까지는 강도를 서서히 증가시키고 있어 $t/T = 3$ 주기까지 파형이 서서히 증가하고 있는 모습을 보이고 있고 $t/T \geq 3$ 주기 이후부터 파형이 안정된 모습을 보이고 있으며 stokes 3차파와의 이론치와 매우 잘 일치하고 있다. Fig. 4는 부가감쇠영역을 포함한 전 계산영역의 공간파형을 나타내고 있다. 해석영역의 양끝단에 접속시킨 부가감쇠영역에서 파

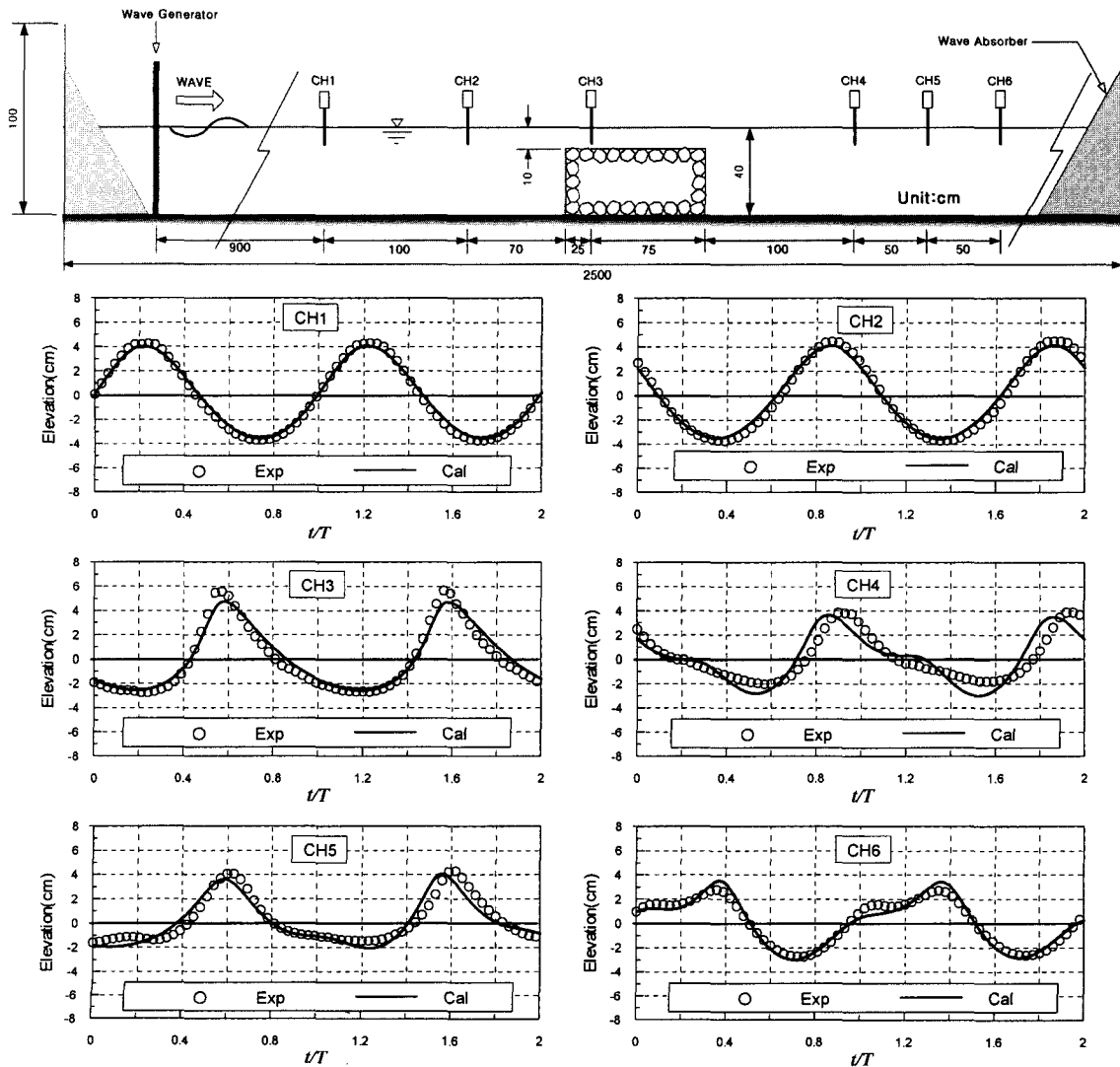


Fig. 5. Comparison of numerical solution results and experiment data.

의 감쇠가 발생하고 해석영역내에서의 파형은 일정한 포락선을 형성하고 있음이 확인된다. 구조물에 의한 파랑변형 해석을 위한 수치실험에서는 구조물 배후에서 발생하는 비선형파랑의 충분한 소파효과를 위해 시작점에서부터 그 끝단까지 격자간격을 지수함수적으로 증가시켜 최소폭을 $6L_i(L_i$: 입사파 파장)로 하였다.

3.2 수치실험 결과와의 비교

2차원수치파동수조를 이용한 본 수치해석 결과의 타당성 검증을 위해 수치실험을 실시하였다. 실험 장치는 한국해양대학교의 2차원 조파수조(제원: L : 25 m × W : 1 m × H : 1 m)를 이용하였으며 수조에 설치된 조파기는 피스톤형으

로 조파기의 후면과 수조의 끝단에는 경사식 소파장치가 설치되어 있다. 투과성잠제 전면과 후면에서의 파고의 측정은 용량식파고계를 사용하였고 모형제작을 위해 사용된 사석은 평균입경이 5.5~6.5 cm, 공극율은 0.4이다. 실험에 이용된 입사파는 투과성잠제 전단부에서 쇄파가 발생하는 $H_i = 7$ cm, 주기 $T = 1.0$ sec의 규칙파이며 Fig. 5는 실험에 사용한 투과성잠제의 제원과 파고계의 위치, 그리고 각 파고계에서 취득된 실험결과와 본 수치해석의 결과를 나타내고 있다. Fig. 5로부터 수치실험에 의한 잠제의 전·후면에서의 시간파형과 본 수치해석의 결과가 매우 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으며 특히 본 수치해석결과는 입사파랑이 투과성잠제로 입사하면서 잠제 전단에서의 쇄파발생과 투과

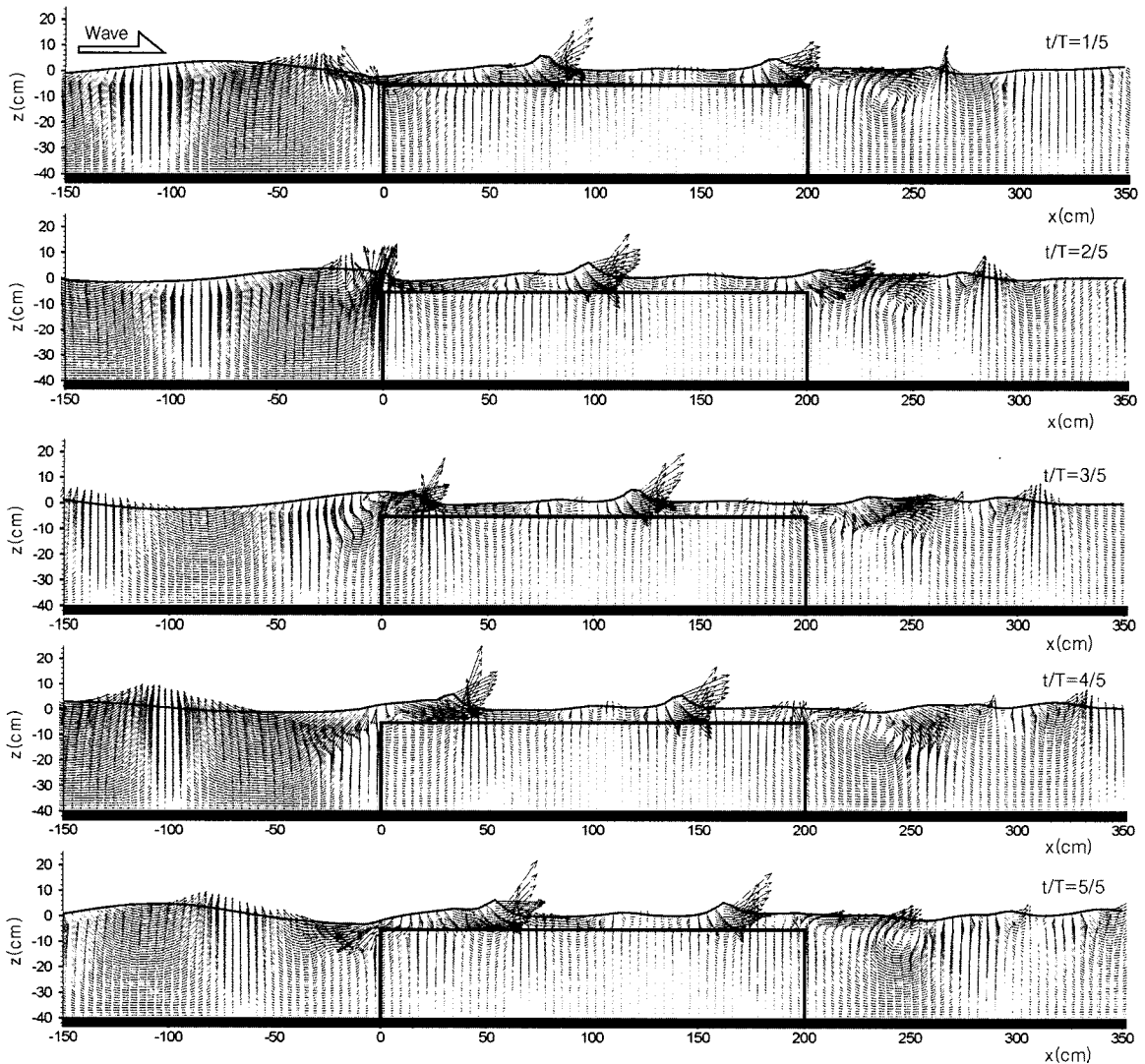


Fig. 6. Velocity fields due to the one-row permeable submerged breakwater.

층내의 유체저항으로 인한 잠제후면에서의 비선형파랑의 발생 및 파랑의 재생성과정을 잘 재현하고 있다.

3.3 수치해석 결과

Fig. 6은 각각 입사파고 $H = 6\text{ cm}$, 주기 $T = 1.2\text{ sec}$ 의 입사조건에 대한 한 주기 동안의 시간 step에 따른 일열 잠제(폭: $B = 200\text{ cm}$, 천단수심: $qh = 5\text{ cm}$, 체적공극율 및 면적공극율: $\gamma_v = \gamma_s = \gamma_c = 0.4$)의 유속분포를 나타낸다. 입사파의 파봉이 잠제로 접근함에 따라 잠제에 의한 수심의 급변화로 인해 잠제 전면상에서 유체입자속도의 기울기가 급해지는 비선형파랑성분이 급격히 발달하고($t/T = 1/5 \sim 2/5$) 잠제천단상을 진행함에 따라 쇄파가 진행되며($t/$

$T = 3/5 \sim 5/5$) 잠제배후의 자유수면부근에서는 해안쪽을 향하는 강한 흐름이 형성됨을 알 수 있다. 또한, 구조물 배후에서는 투과층의 저항으로 인해 감소된 유속성분과 잠제의 천단상을 진행하는 강한 유속성분이 결합하면서 $200\text{ cm} \leq x \leq 270\text{ cm}$ 에서 시계방향의 강한 와(Vortex)가 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 입사조건에 대한 이열잠제($B_1 = B_2 = 80\text{ cm}$, $l = 0.75L$; L 은 입사파장, $qh = 5\text{ cm}$, $\gamma_v = 0.4$)의 유속분포를 나타낸다. 일열잠제와 동일하게 잠제에 의한 수심의 급변화로 인해 잠제 전면에서의 비선형파랑성분이 크게 발달하고 첫 번째 잠제의 천단상에서 쇄파가 발생하며 잠제의 사이($80\text{ cm} \leq x \leq 146\text{ cm}$)와 배후

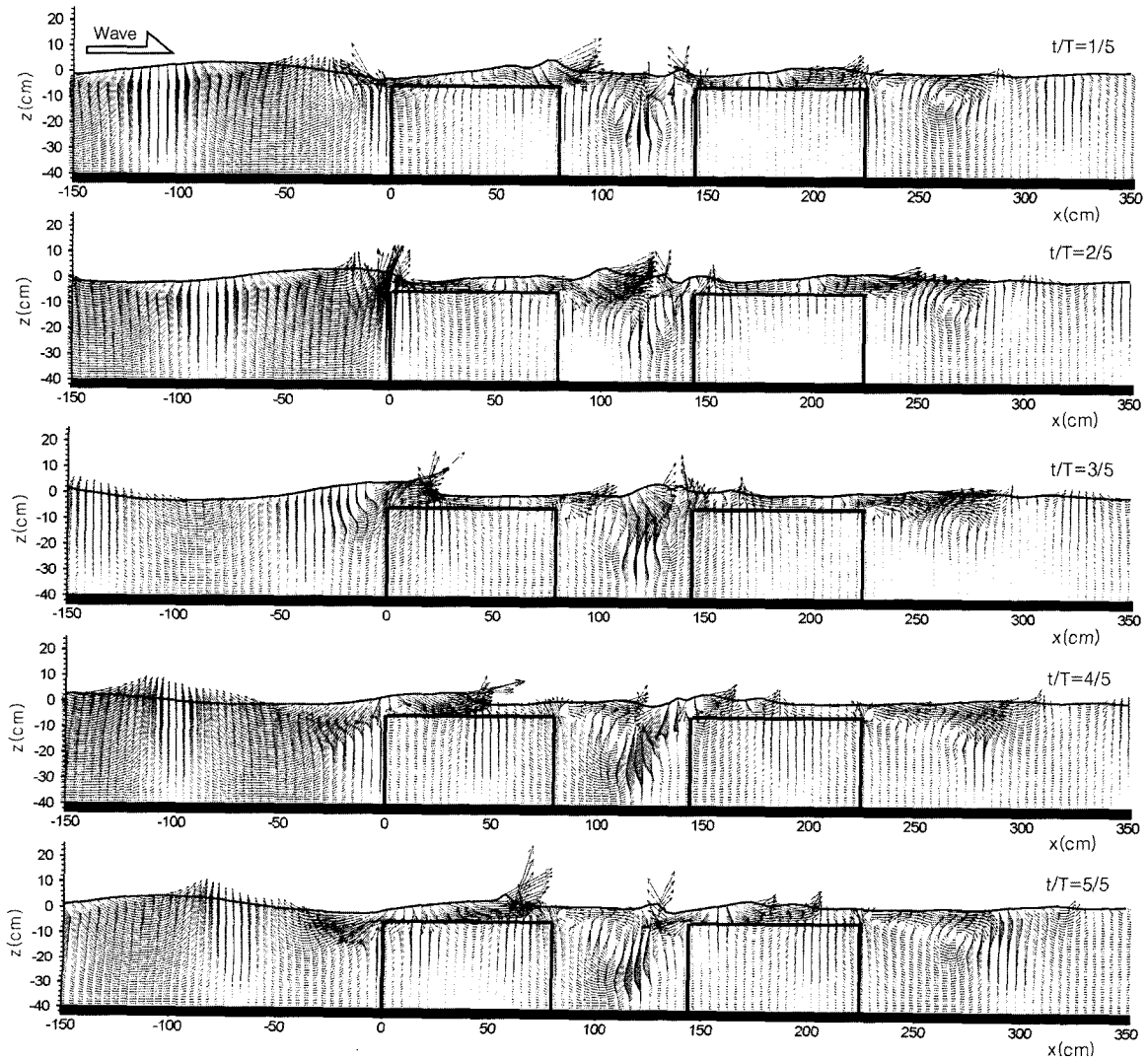


Fig. 7. Velocity fields due to the two-row permeable submerged breakwater.

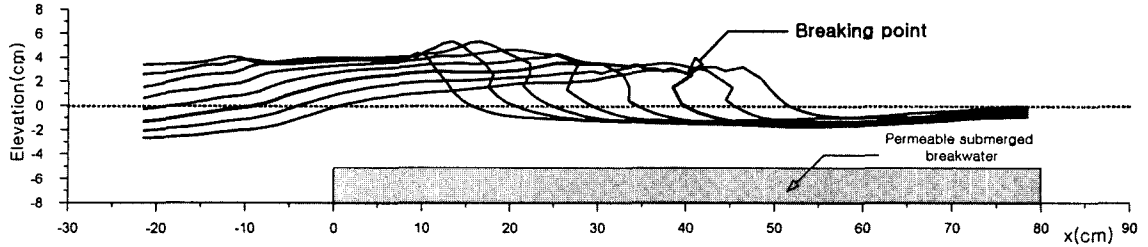


Fig. 8. Wave profiles on the crown of the submerged breakwater.

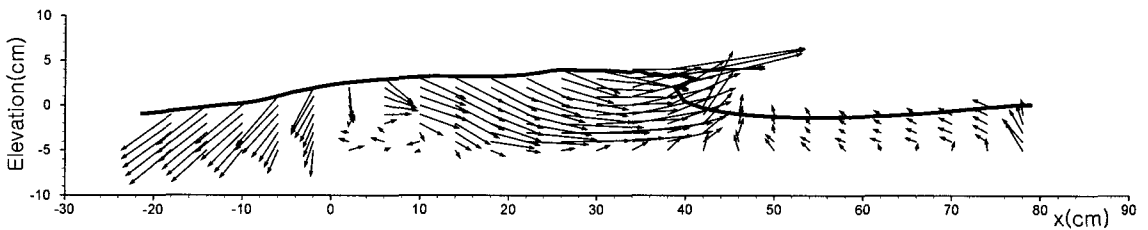


Fig. 9. Velocity vectors captured at the instant of wave breaking on the crown of the submerged breakwater.

($240\text{ cm} \leq x \leq 300\text{ cm}$)에서 시계방향의 강한 와가 발생함을 알 수 있다. 특히 이열잡제의 경우 잡제의 사이에서 트렌치와 같은 파랑제어효과를 가져옴으로써 잡제배후영역에서의 유체입자의 속도벡터크기가 일열잡제에 비해 상대적으로 적음을 알 수 있다. 일열잡제와 이열잡제 모두 전 시간스텝에 있어서 잡제의 형상과 배치에 따라 와의 크기는 다소 차이를 보였으나 방향은 시계방향으로 일정함을 보였다. 이러한 와의 발생은 투과성잡제에 의한 파동장해석에 있어 회전류해석이 유체의 비회전을 가정한 포텐셜이론에 비해 보다 고정도해석이 가능함을 보여준다.

Fig. 8은 Fig. 7의 이열잡제에 대한 첫 번째 잡제의 천단을 진행하는 입사파랑의 수면변동을 나타낸다. Fig. 7

의 유체입자의 속도분포에서 확인한 바와 같이 입사파랑이 잡제의 천단을 진행하면서 수심의 급변화와 투과층의 유체저항으로 인해 파형경사가 점점 급해져 쇄파가 발생하고 있음이 확인된다. Fig. 9는 Fig. 8의 쇄파점에서 속도벡터를 도식한 것으로 쇄파점에서의 빠른 유속성분이 발생하고 쇄파점 이후의 유체입자의 속도방향은 바다측을 향하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9의 쇄파시 쇄파위치에서의 VOF 함수의 계산결과와 VOF 함수에 의한 자유수면을 나타낸다. Fig. 10(a)는 이류계산된 VOF함수이며 Fig. 10(b)는 앞서 상술한 바와 같이 본 수치계산상의 편의를 위해 적용한 VOF 함수 $F = 1$ 인 유체셀과 $F = 0$ 인 기체셀 사이에서만

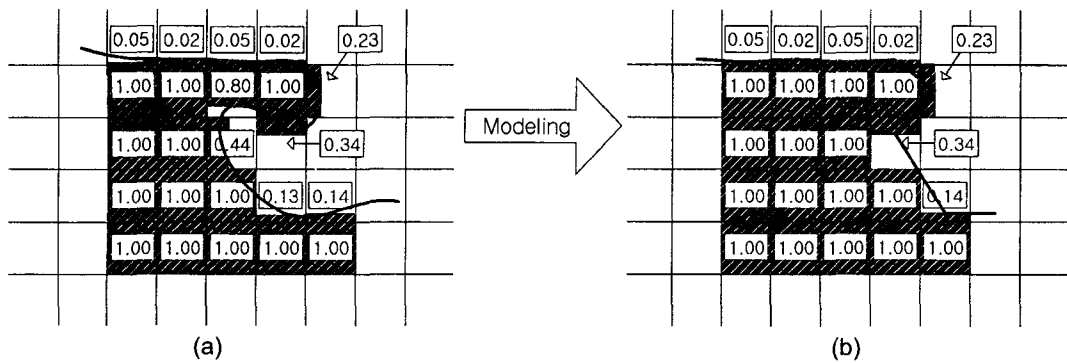


Fig. 10. Evaluation of free surface shape.

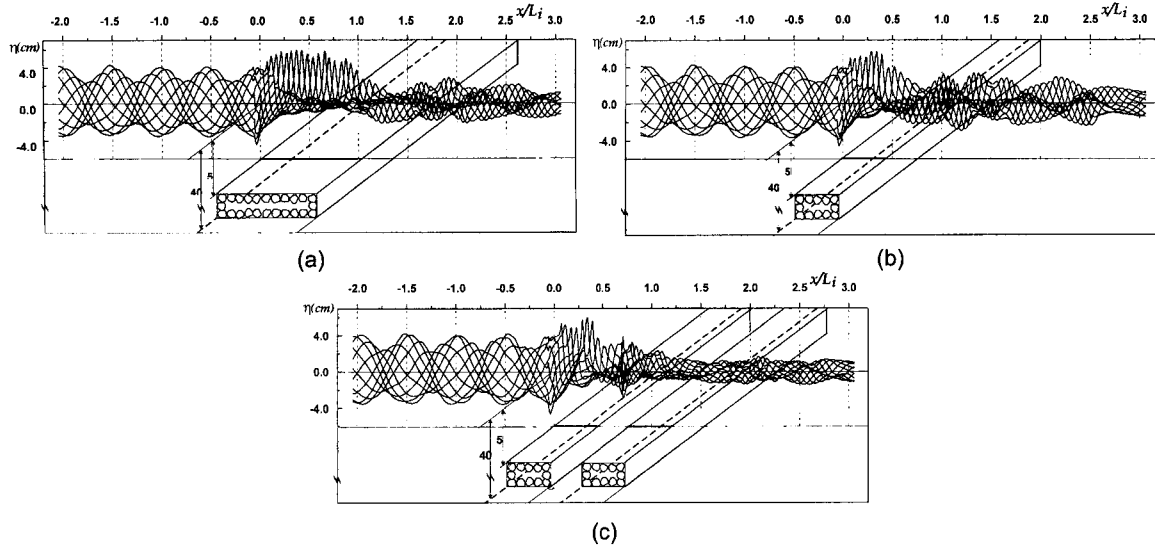


Fig. 11. Spatial distributions of water level.

표면셀이 존재한다는 가정에 의해 산정된 자유수면의 형상이다. Fig. 9에서와 같이 VOF함수가 $0 < F < 1$ 이라 할지라도 표면셀로 판단되지 않는 경우가 발생되어 실제의 자유수면형의 형상을 보다 간단하게 취급하게 되어 쇄파파형의 형상에 대한 정도를 떨어뜨릴 수는 있지만, 반대로 유속이나 압력의 경계조건의 처리가 보다 확실하게 이루어질 수 있으므로 수치계산상의 안정을 꾀할 수 있다.

Fig. 11(a)는 Fig. 6의 조건에 따른 공간수면변동에 대한 결과를 나타낸다. 잠제 전면에서는 잠제에 의한 반사파와 입사파의 위상간섭으로 인해 부분중복파가 형성되어 일정한 포락선을 형성하고 있고 Fig. 6에서 확인한 바와 같이 잠제천단상에서의 파봉이 뾰족하고 파곡이 평탄해지는 강한 비선형성분파가 발생함을 재차 확인할 수 있으며 잠제배후에서는 투과잠제를 통과하면서 수면변동이 감

소함을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 Fig. 11(a)와 동일한 입사조건에서 잠제의 폭을 0.4배로 감소시켜 계산한 결과로 잠제 전면에서의 수면변동은 Fig. 11(a)와 거의 동일하지만 잠제폭의 감소에 따른 유체저항길이의 감소로 잠제배후에서의 수면변동은 Fig. 11(a)에 비해 상대적으로 크다. Fig. 11(c)는 Fig. 7의 조건에 대한 공간수면변동에 대한 결과로 이열잠제에서도 일열잠제와 동일하게 잠제천단상에서 강한 비선형성분파가 발생하고 그 크기는 해안측의 잠제상에서 발생한 비선형효과보다 바다측에서 발생한 비선형성분파가 더욱 크다. 또한 잠제배후에서의 수면변동은 Fig. 11(a), (b)의 일열투과잠제에 비해 상당히 감소하였음이 확인된다.

Fig. 12는 일열잠제의 자유수면형상에 따른 투과층 내에서 물입자 속도를 도식한 것으로 투과층내에서 유속방

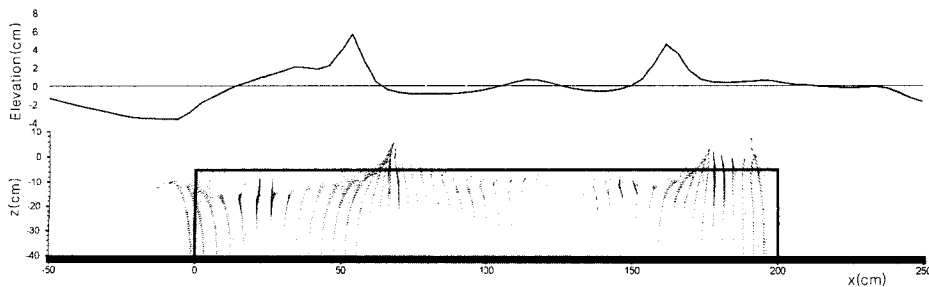


Fig. 12. Spatial distribution of velocity in the permeable submerged breakwater.

향은 자유수면과 약간의 위상차를 가지고 자유수면의 변화에 따라 파봉이 위치할 때는 x 축의正的 방향(해안쪽)으로 향하는 흐름이 발생하고 반대로 파곡이 위치할 때는 x 축의 負의 방향(바다쪽)으로 향하는 흐름이 발생하며 zero-up점과 zero-down점에서는 각각 위와 아래방향의 흐름이 발생한다. 따라서, 잠제의 투과층내 유속방향은 일반 파동장의 유속방향과 동일하게 자유수면의 형상에 의해 좌우됨을 확인할 수 있으며 자유수면과의 위상차는 투과층내의 유체저항에 기인된 것으로 판단 된다.

4. 결 론

본 연구는 수중투과성구조물(잠제)에 의한 파동장 해석을 위해 VOF법을 수치파동수조에 적용한 수치해석기법을 도입하였으며 잠제의 천단상에서 쇄파가 발생하는 일열잠제에 대한 수리실험을 통한 잠제 전면과 배후에서 파랑변형에 대한 결과와 본 연구의 수치해석결과의 비교를 통해 수중투과성구조물에 대한 2차원수치파동수조의 유효성을 검증하였다. 이를 근거로 수치파동수조내의 일열잠제와 이열잠제에 대한 파랑변형과 유속분포를 고찰한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) VOF법을 이용한 자유수면의 추적을 통해 잠제의 천단에서 발생하는 쇄파파형을 재현할 수 있었다.
- (2) 일열잠제의 경우 잠제배후에서 시계방향의 강한 와가 형성되고 이열잠제의 경우 잠제배후와 잠제사이에서 각각 와가 형성된다.
- (3) 일열잠제보다 이열잠제의 경우가 잠제배후에서의 파고의 감쇠효과가 우수하다.
- (4) 잠제에 의한 수심급변화로 천단상에서 강한 비선형 성분파가 발생한다.
- (5) 투과층내의 유속방향은 자유수면의 형상에 따라 결정된다.

이로써 본 연구의 VOF법에 기초한 2차원수치파동수조를 이용한 수치실험방법은 수중투과성구조물의 설계시 물입자의 유속분포, 압력, 수면변동 등의 다양한 정량적인 고정도 정보를 동시에 산정할 수 있는 매우 유용한 수법이라 판단되며, 본 연구에서 대상으로 한 수중직사각형구조물 뿐 아니라 사면을 갖는 구조물과 수심변화 등을 고려하기 위해서는 적절한 사면경계조건에 대한 연구가 향후 필요하며 이를 계속 연구중에 있다.

감사의 글

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

참고문헌

- 김도삼, 허동수, 정연태, 윤덕영, 1998. 투과성잠제에 의한 쇄파의 수치해석에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 17(II-5): 477-492.
- 김도삼, 2000. 다열잠제에 의한 파랑의 전달율과 반사율, 대한토목학회논문집, 20(1-B): 85-94.
- 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수, 2001. VOF법에 기초한 불투과잠제 주변파동장의 해석, 대한토목학회논문집, 21(5-B): 551-560.
- 이광호, 2002. VOF법에 의한 不透過性潛堤 및 透過性潛堤 周邊波動場의 碎波를 包含한 FULL NONLINEAR 解析에 관한 研究, 석사학위논문, 한국해양대학교.
- 해양수產部, 1999. 港灣 및 漁港 設計基準(上).
- 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 the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, 39, pp. 201-225.
- 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, pp. 1-11.
- Somchai Rojanakmthron, 磯部雅彦, 渡辺 晃, 1989. 透過潛堤による波浪變形モデル, 日本海岸工学論文集, 36: 643-647.
- Troch, P., 1997. VOFbreak², 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. *Proceedings 23rd International Conference on Coastal Engineering*, Venice, Italy, pp. 1772-1784.
- 磯部雅彦, 芝 和彦, Eric Cruz Cruz, 渡辺 晃, 1991. 透過潛堤による非線型波浪變形について, 日本海岸工学論文集, 38: 551-555.
- 柳山 勉, 鹿島遼一, 1992. ポーラスボディモデルによる透過性防波堤周辺の波動解析手法の開発, 電力中央研究報告書, 48p

松見吉晴, 石田明雄, 木村 光, 1993. 廣幅潛堤に發生する流體壓力の數値シミュレーション. 日本海岸工學論文集, **40**: 781-785.

喜岡 涉, 甲斐宏典, 平岡慎司, 1994. 透水層上の長波方程式と透過潛への適用性について. 日本海岸工學論文集, **41**: 711-715.

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

Received May 5, 2002

Accepted June 7, 2002