

경사수역에 설치된 잠제 주변의 유속장과 와의 발생에 대한 수치모의 Numerical Simulation of Velocity Fields and Vortex Generation around the Submerged Breakwater on the Sloped Bottom

허동수* · 김도삼**

Dong Soo Hur* and Do Sam Kim**

요 旨 : 잠제 주변의 유속장과 와의 발생에 대한 이해는 잠제의 소파메커니즘과 표사 및 구조물의 안정과 관련하여 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 본 연구에서는 일정한 경사수역에 설치된 불투과잠제 주변의 유속장의 해석과 와(vortex)의 발생을 수치적으로 모의하기 위해 자유수면의 추적기법인 VOF법에 기초하고 있는 김 등(2001, 2002)이 제안한 2차원 수치파동수로를 이용하였다. 특히, 잠제 주변의 정상류의 해석을 통해 잠제의 기하형상 및 파랑의 입사조건에 따른 와의 발생형태를 고찰하였다. 수치모의 결과 잠제 전면에서는 반시계방향의 와가 발생하였고 잠제 후면에서는 시계방향의 와가 발생하였으며 와의 크기는 입사파고와 주기에 가장 민감하였다.

핵심용어 : 불투과잠제, VOF법, 수치파동수로, 유속장, 와

Abstract □ The study of velocity fields and vortex generation around the submerged breakwater can be utilized as materials related to understanding of wave dissipation mechanism, sediment transport, and stability of structure. In the present study, two-dimensional numerical wave flume, based on the VOF method to trace free surface, developed by Kim *et al.*(2001, 2002) was used to numerically simulate velocity fields and vortex generation around the impermeable submerged breakwater installed at the uniform bottom. Especially, the characteristics of vortex generation due to the geometry of the structure and incident wave conditions are examined through the analysis of averaged-velocity fields around the impermeable submerged breakwater. From the numerical simulations, it is confirmed that a counter clockwise vortex is formed in front of the structure and a clockwise vortex develops behind the structure. Also, incident wave height and period have an sensitive effect on the strength of vortex.

Keywords : Impermeable submerged breakwater, VOF method, two-dimensional numerical wave flume, velocity-fields, vortex

1. 서 론

잠제는 주로 입사하는 파를 천단에서 강제쇄파시키거나 마찰을 통한 에너지 감소로 파를 제어하므로 잠제의 천단수심과 천단의 길이는 잠제의 성능에 가장 중요한 요소라고 할 수 있다. 일반적으로 잠제의 천단수심이 깊은 경우 잠제에 의한 파랑제어를 충분히 기대할 수 없으므로 입사파의 제어를 위한 적절한 천단수심이 필요하게 되

고 천단수심이 얇아짐에 따라 천단상에서 파의 대칭성이 무너지는 비선형성분이 탁월해진다. 지금까지 잠제에 관한 성능평가는 주로 포텐셜이론에 기초한 일정수심을 대상으로 반사율과 투과율에 중점을 둔 정상해석이 대부분으로 천단상에서 발생하는 쇄파를 포함한 강한 비선형성분파를 충분히 재현할 수 없었다. Ting and Kim(1994)은 수리실험을 통해 잠제 주변에서 와가 발생함을 지적하였고 Hung and Dong(1999)은 Marker and Cell(MAC)법

*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)

을 수정한 SUMMAC법을 이용하여 사다리꼴잠제와 직사각형잠제 주변의 와의 발생을 수치적으로 모의하였다. Chang *et al.*(2001)은 고립파를 대상으로 잠제 주변의 와의 발생에 대해 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용한 수치실험과 RANS방정식(Reynolds Averged Navier-Stokes Equations)을 이용한 수치해석을 통해 확인하였다. 그러나 지금까지의 연구는 일정수심에 설치된 잠제를 대상으로 하고 있으며 입사파랑은 비쇄파의 파랑조건으로 제한하여 잠제의 주요한 파랑제어 메커니즘인 천단상에서 발생하는 쇄파의 영향을 포함할 수 없었다. 김 등(2001, 2002)은 VOF법에 기초한 수치파동수로를 이용하여 일정수심에 설치된 볼투과잠제 및 투과잠제를 대상구조물로 하여 잠제의 천단상에서 발생하는 강한 비선형성 분과랑과 쇄파과정 및 쇄파후의 파랑변형 해석을 수행하고 유체입자의 속도장의 검토를 통해 잠제 주변에서 와(vortex)가 발생함을 지적하였다. 잠제 주변에서 발생하는 와가 잠제의 성능에는 큰 영향을 미치지 않지만 구조물 주변의 유속장 경향과 와의 발생형태에 대한 이해는 표사문제 및 구조물 주변의 침식과 관련하여 중요한 기초자료로 활용될 수 있다. 본 연구는 자유수면의 추적을 위해 유한차분법에 기초한 SOLA-VOF개념을 수치파동수로에 적용한 김 등(2001, 2002)의 수치파동수로에 볼투과사면의 적용을 위한 사면경계조건을 부가하여 Fig. 1과 같이 일정한 경사수역에 설치된 볼투과잠제 주변의 유속장 해석과 잠제의 기하형상 및 파랑의 입사조건에 따른 와(vortex)의 발생형태와 크기에 대한 수치모의를 수행하였다.

2. 수치해석이론의 개요

2.1 지배방정식

비압축성 점성유체의 2차원운동에 대한 지배방정식은 식 (1)과 같고 연속방정식은 식 (2)와 같다.

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = S\delta(x-x_s) \quad (2)$$

식 (1)의 ψ 는 해석영역내의 조파소스로 인한 부가항, S 는 조파위치 $x-x_s$ 에서 조파소스의 밀도, δ 는 dirac delta 함수, u, w 는 x, z 방향으로의 유속, ρ 는 유체밀도, p 는 압력, g_z 는 z 방향의 중력가속도, λ 는 파의 재반사를 방지하기 위해 해석영역의 양 끝단에 설치한 부가감쇠영역에서의 감쇠계수이다.

자유수면의 추적을 위해 사용되는 VOF함수 F 는 $0 \leq F \leq 1$ 범위의 값을 가지며 각 셀내에서 $F=0$ 일 경우 기체셀, $F=1$ 일 경우 유체셀, $0 < F < 1$ 사이에서는 표면셀로 판단되어 자유수면을 추적하게 되며 다음의 이류방정식에 의해 VOF함수 F 가 이류된다.

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

2.2 경계조건

수치파동수로에 적용되는 경계조건으로는 자유수면에서의 유속조건과 압력조건, 구조물표면에서의 경계조건, 해석영역 측면에서의 개경계조건과 해저경사로 인한 사면경계조건이 있다. 자유수면에서 유속경계조건은 셀내(內)의 자유수면 형태에 따라 자유수면에 수평한 유속성분과 연직한 유속성분에 대한 경계조건을 별도로 적용한다. 즉, 수면에 수평한 유속은 유체가 존재하는 인접한 셀의 유속을 취하고, 연직한 유속에 대해서는 연속방정식을 적용한다. 자유수면의 압력에 대해서는 인접한 유체셀의 압력과 선형내삽하여 산정한다. 파의 재반사를 방지하기 위한

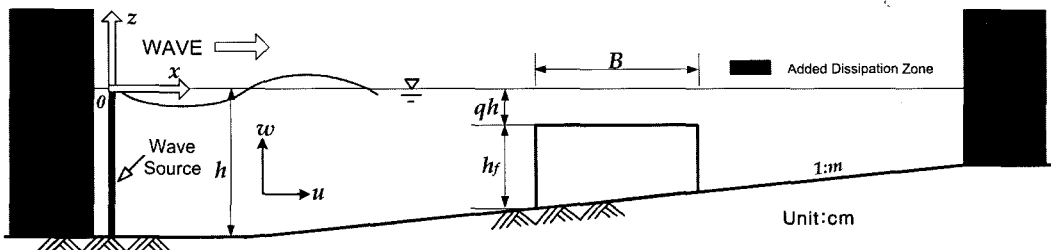


Fig. 1. Definition sketch of numerical wave channel.

측면에서의 경계조건은 가상감쇠력과 수평격자간격을 증가시키면서 연직방향의 유속을 감소시켜 파를 흡수하는 가상감쇠영역을 설치하였고(Hinatsu, 1992) 구조물표면에서는 법선방향의 불투과조건과 접선방향의 slip조건을 적용하였다. 사면에서의 경계조건은 구조물표면과 동일하게 법선방향의 불투과조건과 접선방향의 slip조건을 적용하였다. 수치파동수모의의 파의 발생은 Brorsen and Larsen(1987)이 제안한 line-source법을 이용하여 수치조파시켰다.

3. 수리실험을 통한 수치모델 검증

본 수치모델의 타당성을 검증하기 위해 불투과 잠제에 의한 입사파랑의 파랑변형에 관한 수리실험을 실시하였다. 수리실험은 한국해양대학교의 2차원 조파수조를 이용하였으며 일정수심에서 실험하였다. 수조는 길이 25 m, 폭 1 m, 높이 1 m이며 피스톤형의 조파기와 수조의 양 끝단에 파의 재반사를 방지하기 위한 경사식 소파장치가 설치되어 있다. 실험에 사용된 파고계는 KENEK CHT4-30의 용량식파고계로, 잠제의 전·후면과 천단에 각각 파고계를 설치하였다.

실험에 사용된 파는 파고 7 cm, 주기 1.0 sec의 규칙파이며 잠제의 천단을 진행할 때 쇄파가 발생하였다. Fig. 1에 보인 바와 같이 수리실험에 의해 잠제의 전·후면과

천단에서 측정된 파형과 수치해석에 의한 파형이 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구의 근간으로 되는 김 등(2001, 2002)의 SOLA-VOF법에 기초한 수치파동수모의에 의한 수치해석결과의 타당성을 확인할 수 있다.

4. 수치해석

수리실험을 통해 유효성을 확인한 김 등(2001, 2002)의 수치모델에 사면 경계조건을 부과하여 입사조건과 잠제의 형상, 그리고 바닥경사의 변화에 따른 잠제 주변 유속장의 흐름경향과 와(vortex)의 발생형태를 고찰하기 위해 Table 1의 경우에 대한 수치해석을 실시하였다.

4.1 입사파고의 변화

Fig. 3~Fig. 5는 Table 1의 Case1~Case3에 대한 수치실험결과로 동일한 수심, 주기, 바닥경사에 대해 입사파고를 변화시켜 이에 따른 한 주기 동안의 잠제 주변에서의 유체입자속도의 변화과정을 보여주고 있다. 입사파고의 변화에 따라 유체입자의 속도벡터크기가 상이하지만 잠제를 통과하여 진행되는 유체입자의 전체적인 속도벡터 변화는 입사파랑이 잠제로 접근함에 따라($t/T=1/4$) 잠제에 의한 유수역의 갑작스런 감소로 인한 운동에너지의 증가

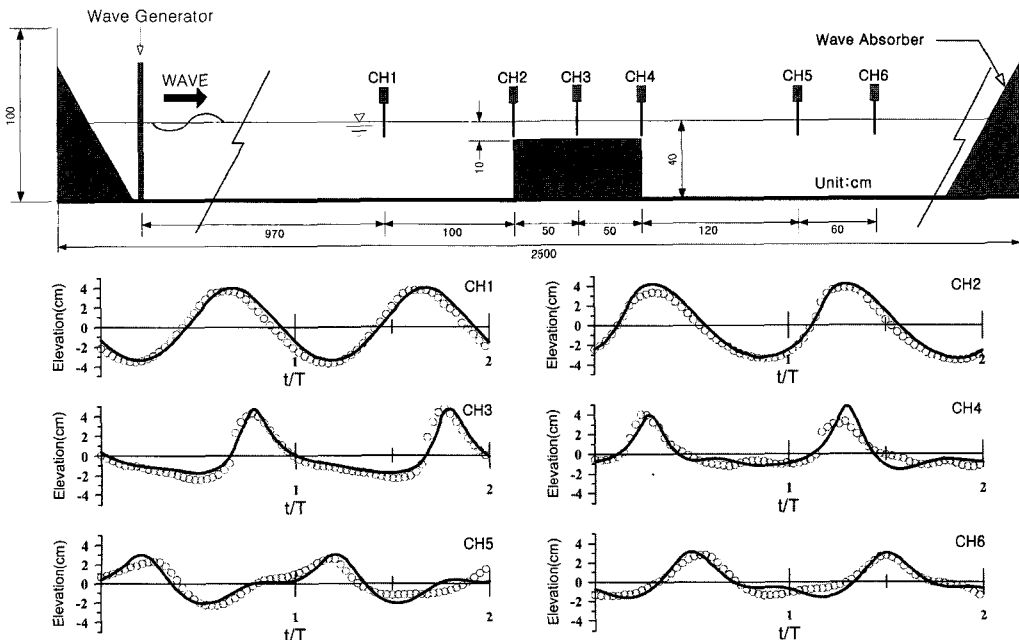


Fig. 2. Comparison of numerical solution results and experiment data. ○: Experiment ■: Numerical result.

Table 1. Conditions of numerical simulation

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9
h (cm)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
H_i (cm)	3.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
T (cm)	1.5	1.5	1.5	1.0	1.25	1.5	1.5	1.5	1.5
h_f (cm)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
1 : m	1:20	1:20	1:20	1:20	1:20	1:20	1:20	1:10	.
B (cm)	100	100	100	100	100	80	60	100	100
qh (cm)	5	5	5	5	5	5	5	5	5

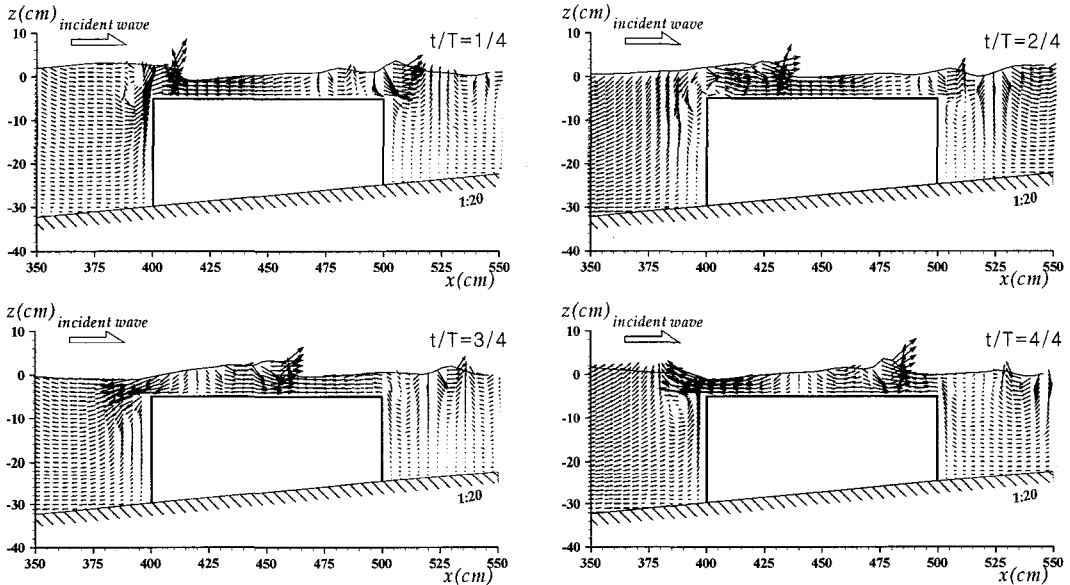


Fig. 3. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater for Case1.

로 인해 속도벡터의 크기가 상당히 증가되고 증가된 유체입자의 속도벡터가 잠제의 천단상을 진행하면서 쇄파가 진행되며($t/T=2/4-3/4$) 쇄파로 인한 에너지의 감소로 인해 잠제 배후에서의 속도벡터의 크기가 감소한다($t/T=4/4$). 특히, 입사파랑이 접근함에 따라 잠제 전면의 우각부에서 반시계방향의 와가 발생하고($t/T=1/4$) 입사파랑이 잠제의 천단을 진행하면서 잠제 전면의 우각부에서 발생한 와는 서서히 소멸됨과 동시에 반대로 잠제 배후의 우각부에서 잠제 전면의 우각부에 발생한 와의 방향과 반대인 시계방향의 와가 서서히 발달하고 있음이 확인된다($t/T=2/4-3/4$). 잠제의 양 우각부에서 발생한 와의 크기는 Fig. 3~Fig. 5를 비교해 볼 때 입사파랑의 파고가 증가함에 따라 와의 크기가 커짐을 확인할 수 있다.

Fig. 3~Fig. 5에서 확인된 바와 같이 잠제 전면의 우각부에서는 반시계방향의 와의 흐름이 발생하고 잠제 배후의 우각부에서는 시계방향의 와의 흐름이 발생함을 확

인할 수 있으며 입사파고의 증가에 따라 와의 규모와 범위가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 Case1~Case3의 정상류(定常流, \bar{V})에 대한 결과로 정상류는 식 (4)에 의해 계산될 수 있다.

$$\bar{V} = \frac{1}{3T} \int_{\tau}^{\tau+3T} \vec{V} dt \tag{4}$$

식 (4)에서 τ 는 데이터의 취득시점이고 T 는 입사파의 주기, \vec{V} 는 x, z 방향의 유체입자의 속도인 u, v 의 합벡터이다.

잠제 천단상의 흐름을 살펴보면 자유수면부근에서는 해안쪽으로 향하는 빠른 유속이 확인되고 잠제의 천단부근에서는 바다쪽을 향하는 강한 흐름이 발생된다. 특히, 입사파의 쇄파가 발생하는 잠제 천단의 앞쪽부분에서 이러한 현상이 뚜렷하며 자유수면부근과 잠제 천단에서의 흐름이 서로 반대인 이러한 흐름의 분리현상은 잠제 천단의 유수역을 통한 해수교환의 유효성을 나타낸다.

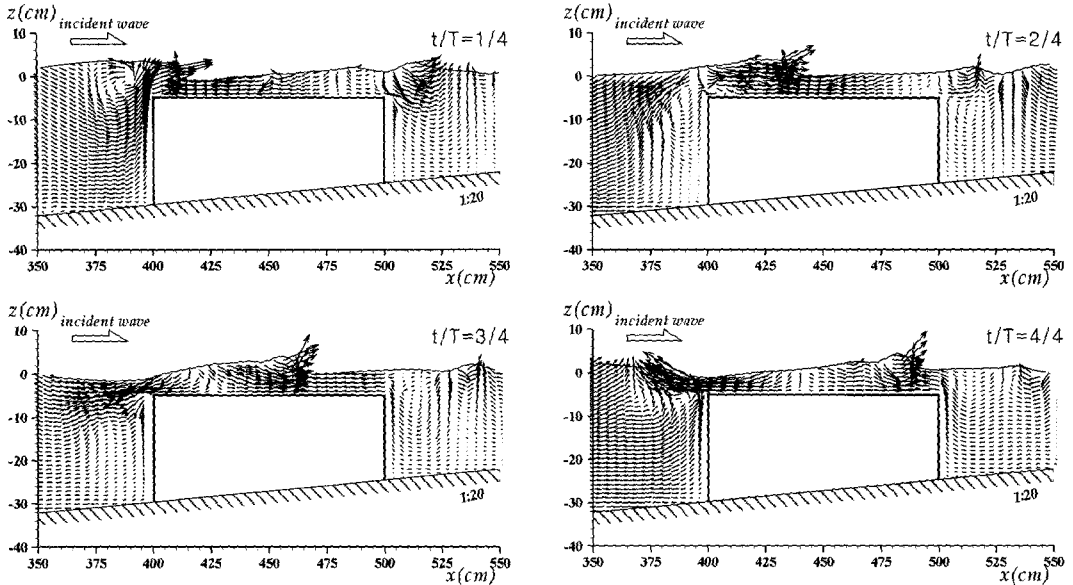


Fig. 4. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater for Case2.

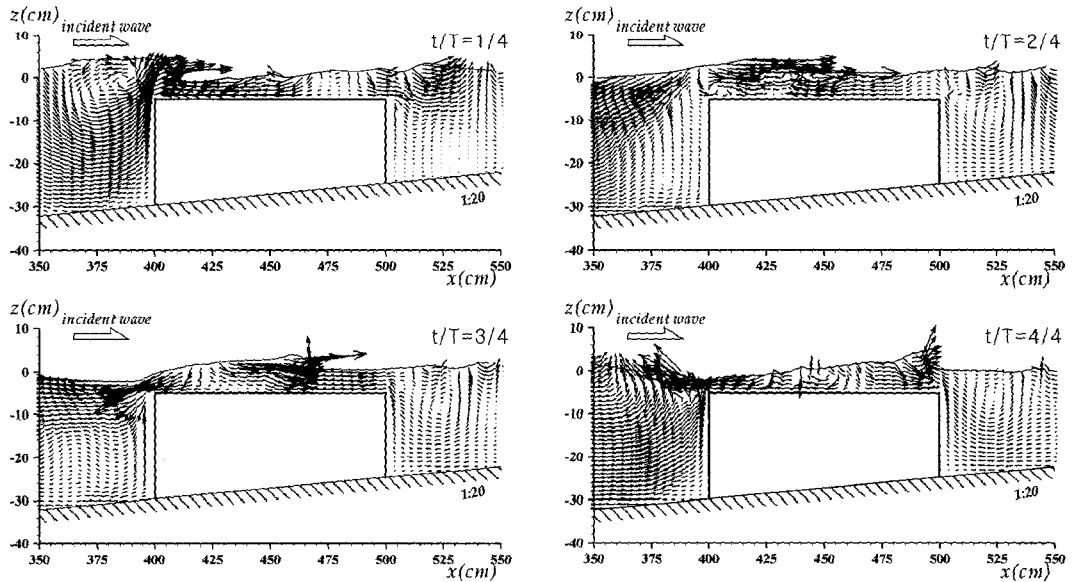


Fig. 5. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater for Case3.

4.2 입사주기의 변화

Fig. 7은 동일한 입사파고, 수심, 잠제폭에 대해 입사주기만을 변화시킨 Case3, Case4 및 Case5에 있어서 잠제 주변의 정상류의 결과를 도식한 것이다. 입사파랑의 주기가 길어질수록 잠제 전면과 배후에서 생성되는 와의 발생범위와 크기가 커짐을 확인할 수 있고, 잠제 전면의 자유수면에서($350 \leq x \leq 375$) 잠제로 접근하는 유속벡터의 크

기는 잠제 전면에서의 와의 규모가 상대적으로 적은 입사주기가 가장 짧은 Case4의 경우가 가장 두드러짐을 알 수 있다. 이는 잠제 전면에서 형성되는 반시계방향의 와가 잠제로 접근하는 유체의 흐름에 상당한 영향을 미치고 있기 때문이라 판단되며 입사파랑의 쇄파가 발생하는 잠제 전단의 전면부에서의 자유수면 부근의 흐름은 주기에 따라 큰 변동을 보이지 않음이 확인된다.

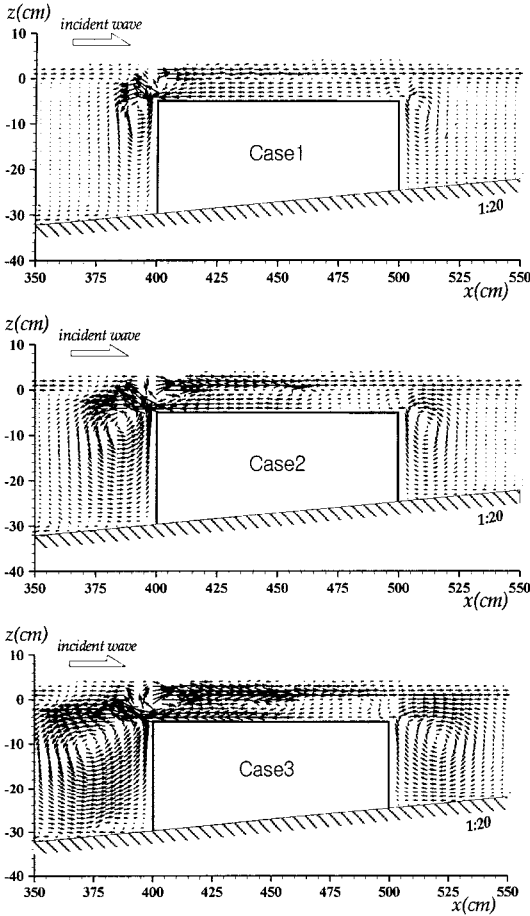


Fig. 6. Averaged-velocity fields for Case1~Case3.

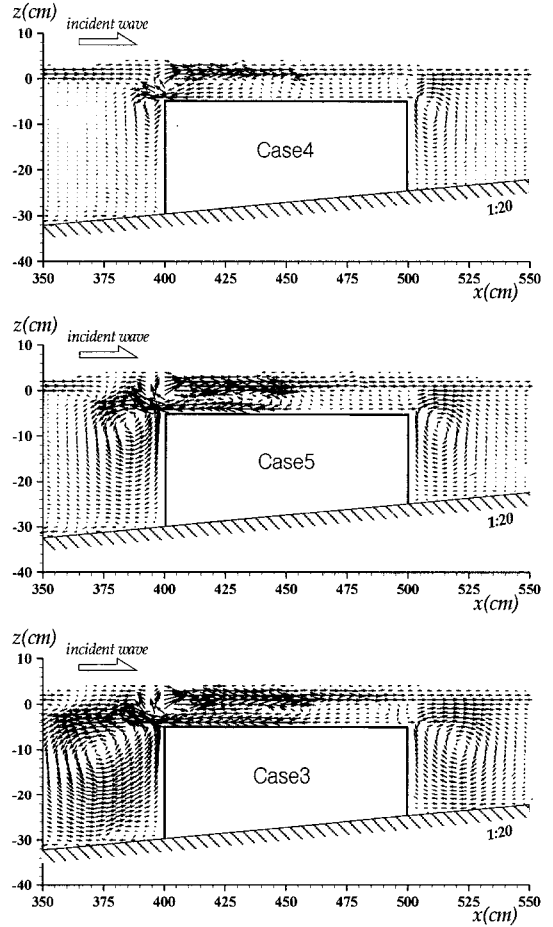


Fig. 7. Averaged-velocity fields for Case3, Case4, and Case5.

4.3 잠제폭의 변화

Fig. 8은 동일한 입사조건하에서 잠제의 폭만을 변화시켜 그에 따른 와의 발생형태를 나타낸 것이다. Case3과 Case7은 잠제폭의 차이로 와의 발생위치만 상이할 뿐 발생형태와 크기는 거의 유사하고 Case6의 경우는 Case3과 Case7에 비해 상대적으로 적은 와가 발생함을 알 수 있다. 즉, 입사파고와 주기를 변화시킨 Fig.6 및 Fig.7과 같은 와의 크기에 대한 일정한 상관관계를 찾아 볼 수 없다. 이는 일반적으로 잘 알려진 잠제폭의 변화에 따른 입사파랑의 반사율과 전달율의 차이에 기인된 것으로 판단 된다.

4.4 바닥경사의 변화

Fig. 9는 바닥경사의 변화에 따른 와의 발생형태를 나타낸 것으로 잠제 전면에서 형성되는 와의 크기는 바닥

경사가 가장 급한 Case8의 경우가 가장 크고 잠제 배후에서 형성되는 와는 바닥의 경사가 없는 Case9의 경우가 가장 큼을 알 수 있다. 이러한 현상은 수심의 변화가 커짐에 따라 바다에서 입사파랑의 반사가 커지므로 잠제 전면에서의 와의 크기는 바닥의 경사가 급한 Case8이 가장 크고 잠제 배후에서의 와의 크기는 바닥경사가 없는 Case9의 경우가 가장 크게 나타난다.

5. 결 론

본 연구는 SOLA-VOF법을 이용한 수치파동수로모델(김 등, 2001, 2002)의 적용성을 검토하기 위해 일정수심에 설치된 불투과잠제에 의한 파랑변형 수리실험을 실시하여 수치계산결과와 수리실험결과가 잘 일치함을 보였다. 이를 근거로 수치파동수로에 사면경계조건을 부가하여 변동

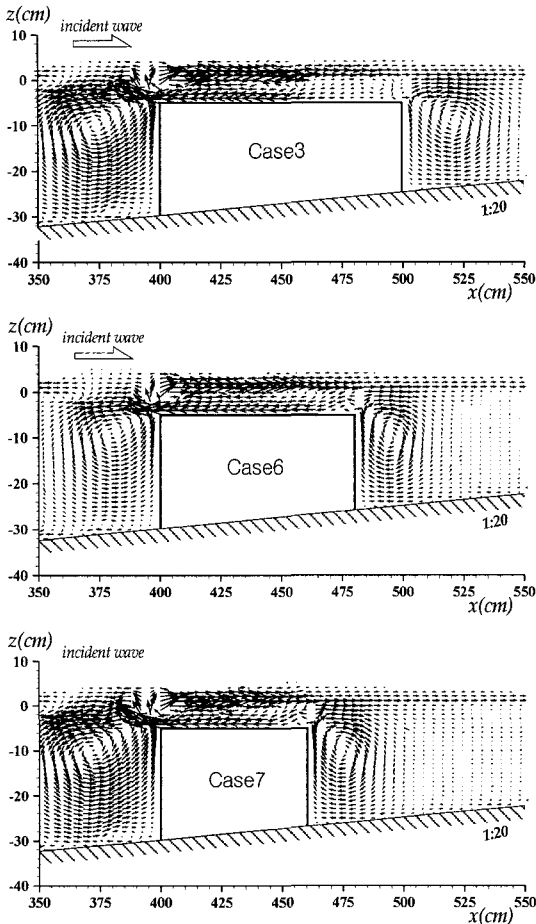


Fig. 8. Averaged-velocity fields for Case3, Case6, and Case7.

수심역에 설치된 볼투과잠제를 진행하는 파랑의 유속장해석을 통해 입사파랑이 구조물로 접근하여 잠제의 천단상을 통과한 후 잠제 배후에 이르는 일련의 유속벡터의 특성을 수치모의하였고, 이를 통해 잠제 전면 및 배후에서 발생하는 와는 입사파랑이 구조물로 접근하면서 구조물에 의한 입사파랑의 반사로 반시계방향의 와가 발달하고 입사파랑이 잠제의 천단을 진행하면서 잠제 전면에서 생성된 와는 점차 소멸됨과 동시에 잠제 배후에서 반시계방향의 와가 형성됨을 확인하였다. 또한, 잠제 주변의 정상류 해석을 통해 입사조건, 구조물형상 및 바닥경사에 따른 와의 발생형태를 고찰하였다. 그 결과 와의 크기는 입사파랑고와 주기에 가장 민감하게 반응하였고 입사파랑고와 주기가 증가함에 따라 와의 크기도 비례하여 커지는 현상을 보였다. 바닥경사의 변화에 대해서는 급경사일수록 잠제전면부에서의 와의 크기가 현저했고 완경사일수록 잠제

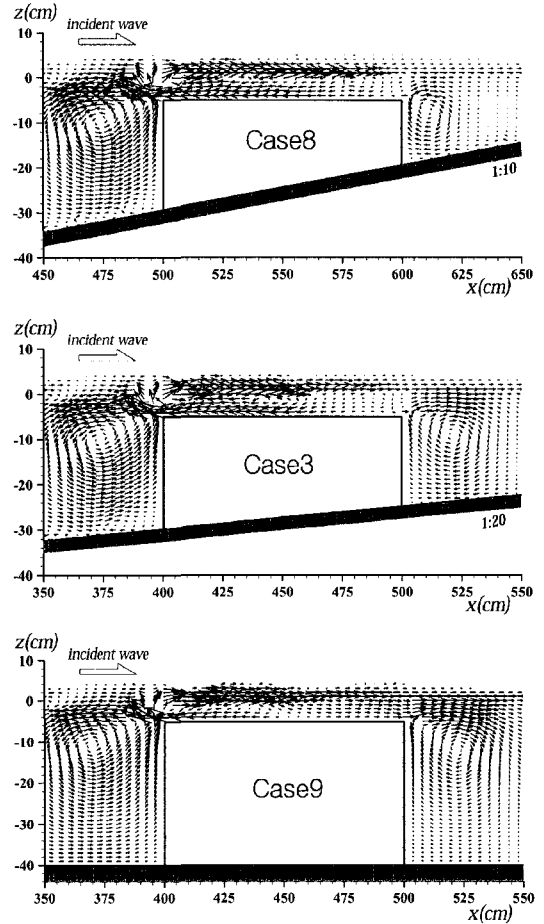


Fig. 9. Averaged-velocity fields for Case3, Case8, and Case9.

배후에서의 와의 크기가 현저하게 발생하였다. 또한, 전 Case에 걸쳐 잠제 천단상의 유수역에서 발생하는 흐름은 해안쪽으로 빠른 흐름이 자유수면부근에서 발생하였고 잠제 상면에서는 바다쪽에서의 흐름이 탁월하였다. 이로써 일반적으로 잘 알려진 잠제의 해수교환성을 수치해석적으로도 확인할 수 있었다.

본 연구의 잠제 주변에서 유체입자 속도벡터의 분포와 정상류 해석을 통한 와의 발생형태에 대한 고찰은 잠제의 본래 기능인 파랑제어기능과 더불어 잠제 주변의 흐름을 이해하는데 있어서 상당한 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 산·학·연 연구개발사업의 일환인 해상도시건설을 위한 해역정온화 종합기술

개발(R&F/00-24-01)의 한 과제로 수행된 것으로, 연구비의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김도삼, 이광호, 김정수, 2002. 수중투과성구조물에 의한 쇄파를 수반한 파랑변형 및 유속장 해석, 한국해양·해양공학회지, **14**(2): 171-181.
- 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수, 2001. VOF 법에 기초한 불투과장애 주변파동장의 해석, 대한토목학회논문집 **21**(5-B): 551-560.
- Brorsen, M. and J. Larsen, 1987. Source generation of nonlinear gravity waves with the boundary integral equation method, *Coastal Eng.*, **11**, pp. 93-113.
- Chang, K.A., Hsu, T.J. and Liu, P.L.-F, 2001. Vortex generation and evolution in water waves propagating over a submerged rectangular obstacle. Part I. Solitary waves, *Coastal Eng.*, **44**, pp. 13-36.
- 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.
- Huang, C.J. and Dong, C.M., 1999. Waves deformation and vortex generation in water waves propagating over a submerged dike, *Coastal Eng.*, **37**, pp. 123-148.
- Ting, F.C.K. and Kim, Y.K., 1994. Vortex generation in water waves propagating over a submerged obstacle, *Coastal Eng.*, **24**, pp. 23-49.

Received June 9, 2003

Accepted August 18, 2003