

월파를 허용하는 투과성 방파제의 파랑변형에 관한 수치해석

김도삼* · 이광호*

*한국해양대학교 토목·환경시스템공학부

Numerical Analysis of Wave Transformation of Permeable Breakwater Permitting Wave Overtopping

DO-SAM KIM* AND KWANG-HO LEE*

*Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Wave Overtopping 월파, Permeable Breakwater, 투과성 방파제, VOF Method 보프법

ABSTRACT: In the past, ports have been mainly developed in natural harbors but nowadays ports are built wherever they can be economically justified. Therefore, construction of breakwater in areas that establishment of structure is disadvantageous is risen according to the change of conditions to the location for ports. In case of building gravity breakwater in such point, need that plane shapes of more reasonable section permitting wave overtopping is necessary. One of the earliest methods for solving unsteady incompressible flow including free surfaces is the MAC(Marker And Cell) method by Harlow and Welch(1965). Recently, VOF(Volume Of Fluid) method to improve several drawbacks of MAC method is suggested by Hirt and Nichols(1981) and utilized extensively in fields of hydrodynamics. Wave overtopping phenomenon is simulated including wave breaking for permeable breakwater by numerical analysis and investigated features of wave overtopping behind structure using VOF method.

1. 서 론

과거의 항만은 외해의 파랑으로부터 선박이 안전하게 피난할 수 있고 하역과 적화가 용이하고 선박의 수리 및 보수와 같은 부대서비스의 제공이 편리한 지형에 주로 발달하여 왔으나 근래에는 자연적인 지형에 앞서 경제적인 관점이 더욱 중요한 항만입지조건 중의 중요 인자로 인식되어 가고 있는 실정이다. 따라서 중력식 방파제를 설치할 경우 천단고를 적절히 조정하여 파고가 탁월한 파랑에 대해서는 월파를 허용하여 보다 합리적인 단면의 형상을 피하는 것이 필요하다. 투과성 중력식 방파제에 대해서는 직각입사파랑 뿐 아니라 경사입사파랑에 대해서도 이미 해석이 이루어졌으나(배기성과 김도삼, 2001) 아직까지 투과성 방파제의 월파현상을 해석한 예는 없다. 본 연구에서는 투과성 방파제를 대상으로 쇄파현상을 포함한 월파현상을 수치해석적으로 재현하고 더불어 구조물 배후에서 월파한 파랑의 특성을 고찰한다.

Harlow and Welch(1965)는 복잡한 자유표면 형태를 지닌 비압축성 유체운동을 해석하기 위해 유체영역에 marker입자를 분산시켜 유체면을 정의하는 방법인 MAC(Marker And Cell)법을 제안하였다. 이후 MAC법은 Amsden and Harlow(1970)에 의해 유체의 압력평가에 대한 계산방법을 개선시킨 SMAC(Simplified Marker And Cell)법으로 발전하였다. MAC법은

자유표면의 계산시 계산상의 아무런 제약을 받지 않는다는 장점이 있지만 2차원을 대상으로 개발된 계산수법이므로 3차원에서의 확장이 어렵고 또한 파동장과 같은 주기적인 유체운동의 해석시 계속해서 Marker입자를 발생시켜야 하므로 Marker입자의 관리가 어렵다. Hirt and Nichols(1981)는 이러한 MAC법의 이점을 가지면서 MAC법의 결점인 계산의 번잡성 등의 결점을 갖지 않는 VOF(Volume Of Fluid)법을 제안하였다. 현재 VOF법은 자유수면을 갖는 유체역학의 다양한 분야에서 활용되고 있고 국내에서도 이미 김도삼 등(2001)에 의해 소개된 바 있으나 아직까지 그 활용예가 매우 미진하다. 본 연구는 월파현상을 수치적으로 재현하기 위해 위의 VOF법을 적용한다.

2. 수치해석이론

본 연구는 해석영역내에 조파소스와 개경계처리를 위한 부가감쇠영역이 설치된 Fig. 1과 같은 수치파동수조내에 투과성 방파제를 설치한다.

2.1 기초방정식

유체를 비압축성의 점성유체로 가정하면 기초방정식은 식 (1)의 연속방정식과 식 (2), (3)의 운동방정식, 그리고 자유표면을 모의하기 위한 VOF함수 $F(x, z, t)$ 의 이류방정식 식 (4)로 구성된다.

제1저자 김도삼 연락처: 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

· 051-410-4463 kimds@hanara.kmaritime.ac.kr

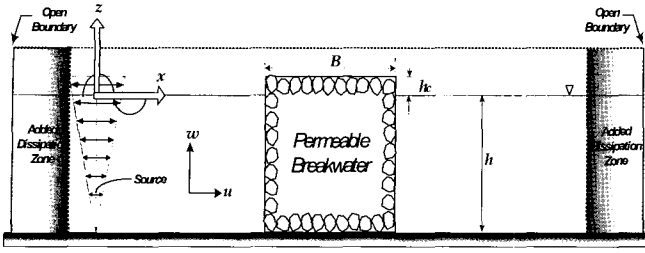


Fig. 1 Definition sketch of numerical wave channel

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

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

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

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

여기서, $S^* = S(z, t)\delta(x - x_s)$ 는 조파위치 $x = x_s$ 에서의 조파 source 의 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 중력가속도, ν 는 유체의 동점성계수, λ 는 부가감쇠영역에서의 감쇠계수, γ_v 는 유체의 체적공극율, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향의 면적공극율을 나타낸다. M_x, M_z 는 관성력항, R_x, R_z 는 항력항으로 투과층 내부의 저항을 나타내며 F 는 $0 \leq F \leq 1$ 의 값을 갖는 VOF함수이다. 지금부터 이러한 부가적인 항들에 대해서 설명한다.

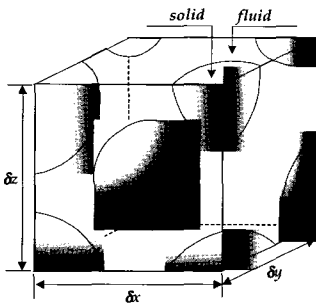


Fig. 2 Porosity

체적공극율과 면적공극율

Fig. 2와 같은 체적요소 $\delta V (= \delta x \delta y \delta z)$ 의 유체가 차지하는 체적을 δV_f 로 정의하면 체적요소 δV 에 대한 체적공극율은 식 (5)와 같다.

$$\gamma_v = \frac{\delta V_f}{\delta V} \quad (5)$$

또한 각 방향의 면적요소 δS 에 대해 유체가 차지하는 면적을 각 방향별로 정의하면 면적공극율은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \gamma_x = \frac{\delta S_x}{\delta y \delta z} = \frac{\delta y \delta z - \{\text{solid surface area}\}}{\delta y \delta z} \\ \gamma_y = \frac{\delta S_y}{\delta x \delta z} = \frac{\delta x \delta z - \{\text{solid surface area}\}}{\delta x \delta z} \\ \gamma_z = \frac{\delta S_z}{\delta x \delta y} = \frac{\delta x \delta y - \{\text{solid surface area}\}}{\delta x \delta y} \end{cases} \quad (6)$$

본 연구는 2차원 파동장을 대상으로 하므로 $\gamma_y, \delta y$ 는 무시하였고 $\gamma_v, \gamma_x, \gamma_z = 0.4$ 를 적용하였다.

유체저항

Sakakiyama and Kajima(1992)은 투과성 구조물의 비선형 해석을 위해 투과층내의 유체저항인 관성력과 항력에 대해 각각 다음 식을 제안하였다.

$$\begin{cases} M_x = (1 - \gamma_v) C_M \frac{Du}{Dt} \\ M_z = (1 - \gamma_v) C_M \frac{Dw}{Dt} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} R_x = \frac{1}{2\Delta x} \rho C_D (1 - \gamma_x) w \sqrt{u^2 + w^2} \\ R_z = \frac{1}{2\Delta z} \rho C_D (1 - \gamma_z) u \sqrt{u^2 + w^2} \end{cases} \quad (8)$$

여기서 C_M, C_D 는 각각 관성력계수와 항력계수로 본 연구에서는 $C_M = 1.5, C_D = 0.5$ (Iwagaki, 1979)를 적용하였다.

식 (5)~(8)에서 알 수 있듯이 투과층 외부의 영역에서는 체적공극율과 면적공극율이 $\gamma_v, \gamma_x, \gamma_z = 1.0$ 이 되므로 기초방정식은 투과층 외부의 영역에서도 만족하게 된다.

2.2 계산수법

Fig. 1의 계산영역을 직사각형의 격자($\delta x = 2.0\text{cm}, \delta z = 1.0\text{cm}$)로 나누고 각 셀에서의 유속과 압력을 엇갈리게 배치하는 MAC법과 동일한 엇갈린 격자를 채용한다.

수치계산을 위한 이산화는 시간항에 대해 전진차분근사를 공간에 대해서는 중앙차분근사를 적용하며 운동방정식의 이류항에는 수치확산을 방지하기 위해 매개변수를 이용하여 1차정도의 상류차분과 2차정도의 중앙차분을 혼합한 증여(donor) 차분근사를 적용한다. 이상과 같이 운동방정식의 차분근사에 의해 각 시간 step마다 각 방향의 유속 u, w 를 구할 수 있고 식

(1)의 연속방정식이 만족하도록 압력을 적당히 조정하여 유속을 재 산정한 후에 VOF함수를 이류시킴으로써 파동장의 시계열 계산을 수행한다.

2.3 VOF법

각 셀에서 계산된 VOF함수로부터 $F=1$ 일 경우 유체셀로, $F=0$ 일 경우 기체셀로 $0 < F < 1$ 일 경우 자유표면을 갖는 표면셀로 판단할 수 있다. 그러나 질량을 갖지 않는 MAC법의 Marker입자와 달리 VOF함수 F 는 유체의 체적율의 이류이므로 수치확산의 문제가 발생한다. 즉 VOF함수의 수치확산은 자유표면의 형상을 판단할 수 없음을 의미하므로 수치확산을 방지하기 위한 적절한 제어가 필요하다. Hirt and Nichols(1981)는 이러한 VOF함수의 수치확산을 방지하기 위한 식 (9)의 차분식을 적용하였다.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{AD} u_{i+1/2,k}^{n+1} \delta t = \\ \quad \text{sgn}(u_{i+1/2,k}^{n+1}) \text{MIN}\{F_{AD} u_{i+1/2,k}^{n+1} \delta t + CF, F_D \delta x_D\} \\ CF = \text{MAX}\{(1.0 - F_{AD}) |u_{i+1/2,k}^{n+1} \delta t| \\ \quad - (1.0 - F_D) \delta x_D, 0.0\} \end{array} \right. \quad (9)$$

여기서, 첨자 D, A 는 각각 Fig. 3의 donor셀과 acceptor셀을 의미하고 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.

식 (9)의 VOF함수를 이류시킴으로 인해 Fig. 4와 같은 자유표면을 수치적으로 모델화할 수 있다.

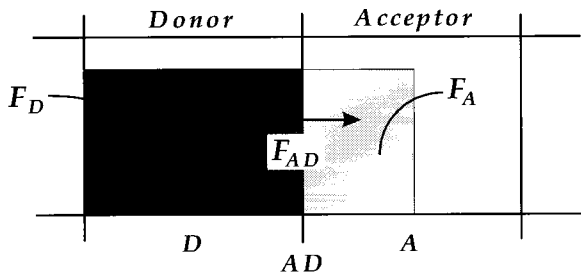


Fig. 3 Definition of donor-cell and acceptor-cell

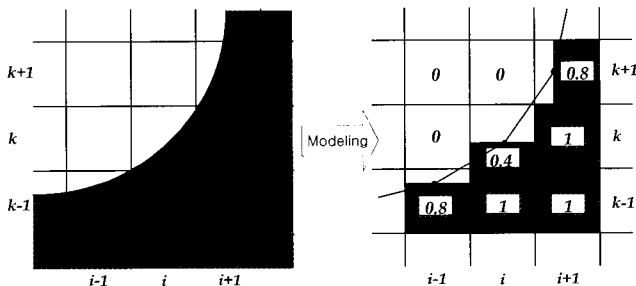


Fig. 4 Free surface using VOF Function

2.4 경계조건

자유표면에서의 유속경계조건은 표면에 수평한 유속에 대해서는 유체셀 경계면의 유속을 표면셀 경계면의 유속으로 취하고 표면에 수직한 유속에 대해서는 VOF함수 F 를 계산할 때 표면셀에서의 연속방정식이 만족되도록 값을 결정한다.

자유표면에서의 압력경계조건은 표면셀의 형태에 따라 인접 유체셀의 압력과 선형내삽하여 결정한다. 단 본 연구에서는 자유표면의 표면장력은 무시하였다.

개경계조건은 수치파동수조의 양쪽에 부가감쇠영역을 설치하여 가상감쇠력에 의해 파를 감쇠시키는 Hinatsu(1992)의 개경계처리를 적용하였다. 또한 바닥에는 slip조건을 적용하였다.

2.5 조파조건

Brosen and Larsen(1987)은 수치파동수조내의 line-source를 설치하여 식 (10)의 조파소스로 인해 해석영역내의 양쪽(x 의 +방향과 x 의 -방향)으로 파를 전달시키는 조파기법을 제안하였다.

$$S = \begin{cases} \{1 - \exp(-2t/T_i)\} \cdot 2U_o & : t/T_i \leq 3 \\ 2U_o & : t/T_i > 3 \end{cases} \quad (10)$$

여기서, U_o 는 조파위체에서의 수평방향의 유체입자속도이고, T_i 는 입사주기이다.

이후 Ohyama and Nadaoka(1991)은 수치파동수조내에 구조물이 설치된 경우 조파소스의 위치에서 반사파의 영향을 고려하여 조파소스 지점에서 연속적분치가 반사파가 없는 경우와 분포형상이 상사가 되도록 식 (11)을 고려하였다.

$$S = \begin{cases} 1 - \exp(-2t/T_i) \cdot 2U_o(\eta_o + h)/(\eta_s + h) & : t/T_i \leq 3 \\ 2U_o(\eta_o + h)/(\eta_s + h) & : t/T_i > 3 \end{cases} \quad (11)$$

여기서, η_s 와 η_o 는 각각 조파소스 위치에서의 수위변동과 조파소스에 의해 기대되는 수위변동을 나타낸다. 본 연구에서는 구조물에 의한 반사파가 존재하는 경우로 이상의 것을 모두 고려하여 조파하였다.

2.6 안정조건

계산의 수치안정을 피하기 위하여 Courant조건을 만족하도록 식 (12)에 의해 시간스텝을 조정하였다.

$$\delta t < \min \left\{ \frac{\delta x}{|u|_{\max}}, \frac{\delta z}{|w|_{\max}} \right\} \quad (12)$$

3. 해석결과

Fig. 5와 Fig. 6은 투과성 방파제의 천단을 입사파랑이 유효하는 경우, 천단고의 변화에 따른 유효현상의 특징을 고찰하기

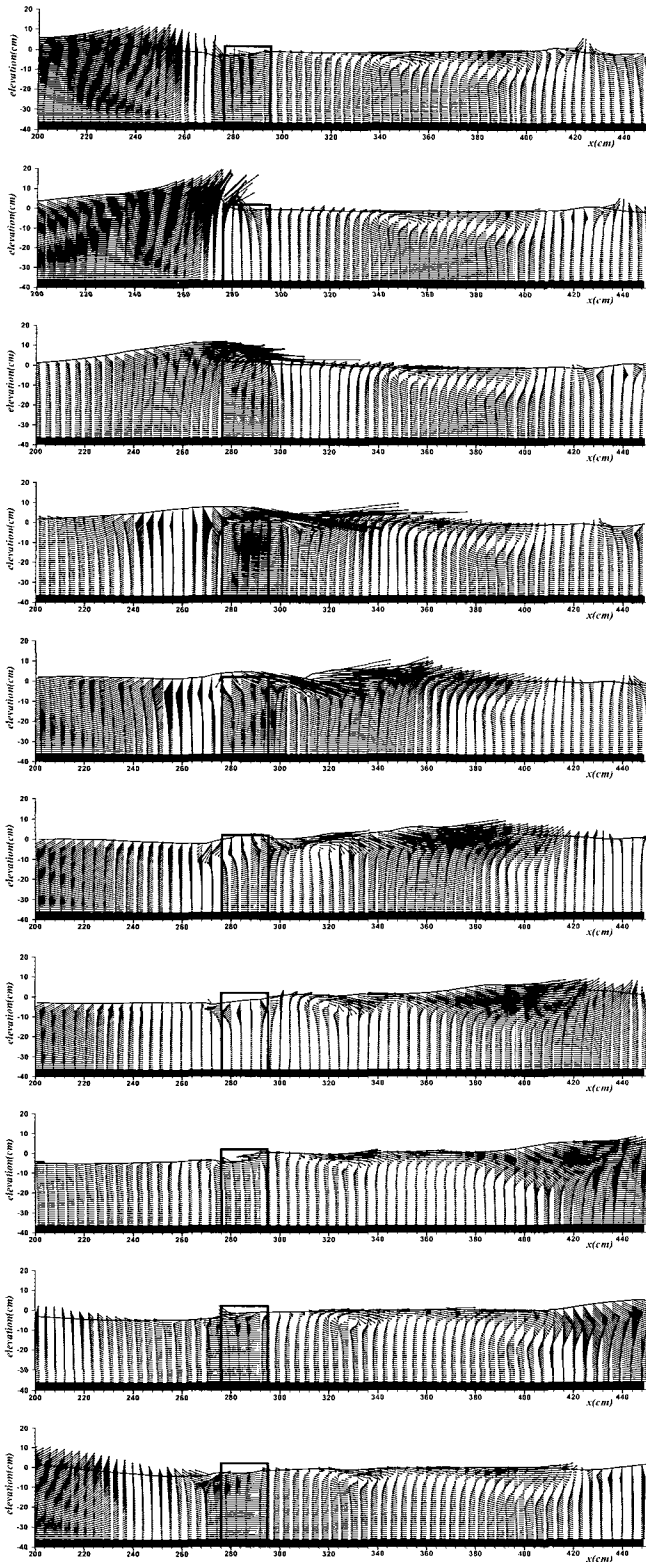


Fig. 5 Spatial distribution of velocity

($H_i = 10\text{cm}$, $T_i = 2.0\text{sec}$, $h_c = 2.0\text{cm}$, $h = 37\text{cm}$)

위해 동일한 입사파랑의 조건하에 한 주기동안의 유체입자의 속도벡터를 도식하였다. Fig. 5와 Fig. 6 모두 천단상으로 입사파가 율파하여 구조물 배후로 전달되는 일련의 율파과정을 잘

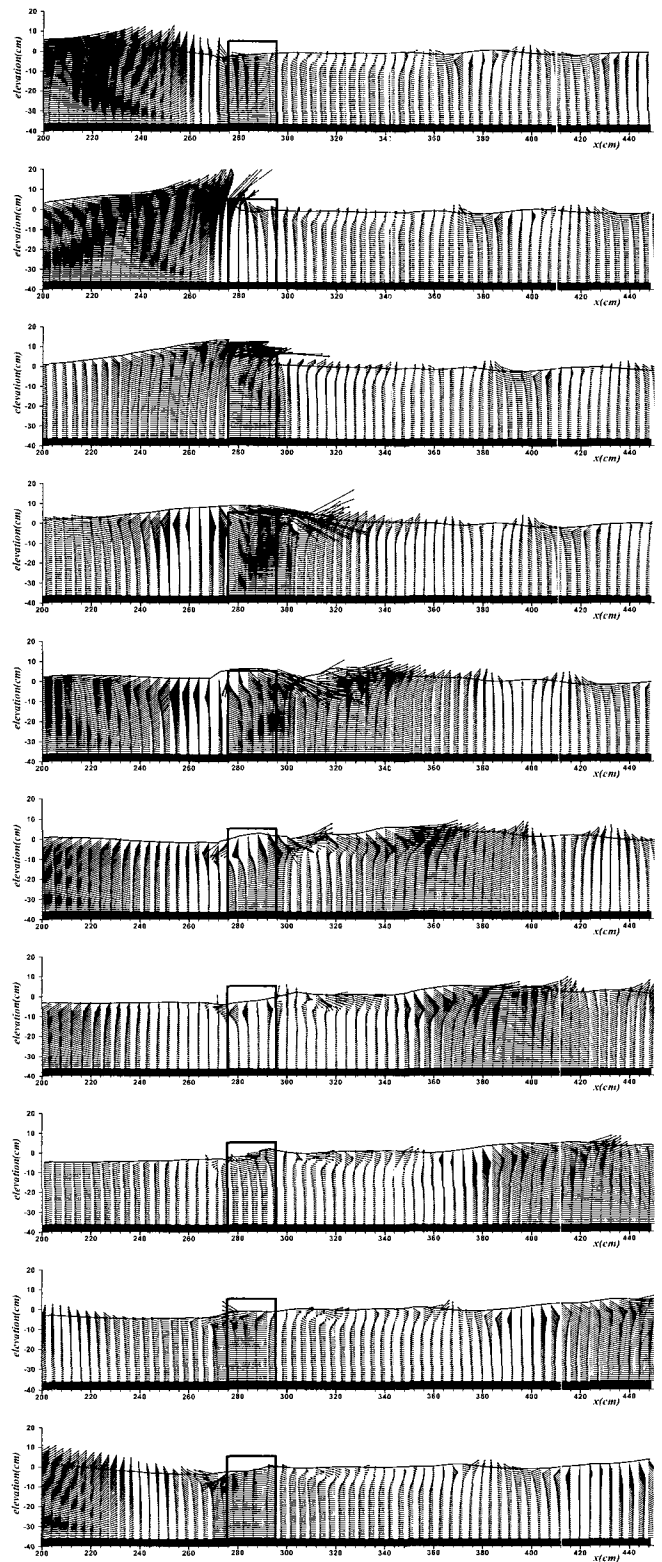


Fig. 6 Spatial distribution of velocity

($H_i = 10\text{cm}$, $T_i = 2.0\text{sec}$, $h_c = 5.0\text{cm}$, $h = 37\text{cm}$)

재현하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6의 비교로부터 구조물 전면에서의 유체입자의 속도벡터의 차이는 거의 유사하지만 입사파랑의 율파후 구조물 배후에서의 유체입자의

운동특성은 확연히 구별된다.

Fig. 6에 비해 상대적으로 천단이 낮은 Fig. 5의 경우 구조물 천단상으로의 월파량이 많고 입사파랑의 운동에너지의 유입이 많기 때문에 월류된 유량이 구조물배후의 표면에서 매우 빠른 유속을 형성하고 있고 이는 투과층의 저항으로 인해 구조물배후에서의 감소된 유속성분과 결합하면서 시계방향의 강한 와(渦)가 형성됨을 알 수 있다. 또한 이러한 와는 일정한 부분에서만 발생하지 않고 시간에 따라 약간씩 이동하며 와의 발생으로 인한 유속성분이 바닥까지 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

천단고가 3cm 증가된 Fig. 6 역시 구조물 천단상으로 월파가 발생하여 구조물 배후의 표면유속을 가속화시키는 경향이 발생한다. 그러나 천단고 상승으로 인한 월류량의 감소와 월파한 파랑의 위치에너지가 Fig. 5에 비해 우세하므로 월파직후의 유체입자 속도벡터의 기울기가 바다쪽으로 더욱 기울어져 있음을 알 수 있고 구조물배후에서의 입사파랑의 운동에너지의 감소로 인해 Fig. 5와 같이 자유수면 부근에서의 빠른 유속이 관찰되지 않고 와의 형성도 극히 미세하다.

Fig. 7은 Fig. 5와 Fig. 6의 경우에 대해 조파후 6주기~12주기까지의 구조물 천단상에서 월파되는 파고를 입사파고로 무차원화시킨 결과이다. 천단이 낮은 ①의 경우가 ②의 경우에 비해 월파고가 높고, 각 주기별로 일정한 월파고를 보여주고 있다.

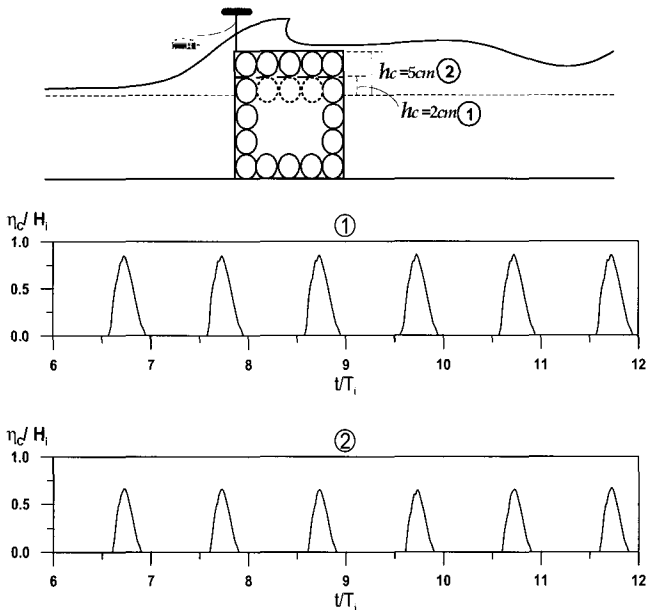


Fig. 7 Comparison of wave overtopping height

4. 결 론

본 연구는 투과성구조물에 대한 입사파랑의 월파현상을 수치파동수조내에서 수치적으로 재현하기 위해 VOF법을 이용하여 해석하였다. VOF법을 이용한 수치파동수조내의 해석결과는 입사파랑이 구조물천단상으로 진행하여 구조물배후에 미치는 영향까지의 일련의 월파현상을 매우 잘 재현하고 있음을 확인하였으며 구조물 천단상에서의 주기별 월파고의 측정으로부터 주기적인 월파현상을 고찰하는 데 있어 본 수치해석기법의 효용성이 기대된다. 또한 유체입자의 속도벡터장의 고찰로부터

입사파랑의 월파를 많이 허용하는 저천단의 경우 구조물 배후에서의 시계방향의 강한 와가 형성됨을 확인하였다.

본 연구에서는 직사각형의 투과성 방파제를 대상으로 하였지만 금후 대상구조물을 사다리꼴의 사석방파제로 확대함과 동시에 불규칙파에 대해서 연구를 수행할 계획이며 월파현상에 대한 보다 타당성있는 검증을 위해 수치실험을 수행할 계획에 있다.

후 기

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.

참 고 문 헌

배기성, 김도삼 (2001). "경사입사파랑중의 사석방파제에 의한 반사율과 투과율에 관한 연구", 한국해양공학학회지, 제15권 제1호, pp 31-35.

김도삼, 이광호, 허동수, 김정수 (2001). "VOF법에 기초한 불투과잠재 주변파동장의 해석", 대한토목학회논문집, 제21권 제5-B호, pp 551-560.

Amsden, A.A. and Harlow, F.H. (1970). "The SMAC method : A numerical technique for calculating incompressible fluid flow", Rep. No. LA-4307, Los Alamos National Laboratory.

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

Harlow, F.H. and Welch, J.E. (1965). "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface", Phys. of Fluids, Vol 8, No 12, pp 2182-2189.

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, No 217, pp 1-11.

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

Iwagaki, Y. (1979). Coastal Engineering, pp 225-254.

Ohyama, T. and Nadaoka, K. (1991) "Development of a numerical wave tank in nonlinear and irregular wave field with non-reflecting boundaries", JSCE, No 429/II -15, pp 77-86.

Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). "Porous body model analysis of nonlinear wave tank transformation through permeable breakwaters", Abiko Research Laboratory Rep. No. U91048, pp 1-48.

2002년 2월 4일 원고 접수

2002년 3월 19일 최종 수정본 채택