

3차원 불규칙 수치파동수조(3D-NIT) 모델의 적용성에 관한 연구

이광호* · 백동진** · 김도삼**†

* 관동대학교 산학협력단, ** 한국해양대학교 건설공학과

Application of Three-Dimensional Numerical Irregular wave Tank(3D-NIT) Model

Kwang-Ho Lee* · Dong-Jin Baek** · Do-Sam Kim**†

* Industry and Academia Cooperation Foundation, Kwandong University, Kangwondo, 210-701, Korea

** Department of Civil Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 본 연구에서는 3차원수치파동수조에 규칙파뿐만 아니라 안정적인 불규칙파가 조파될 수 있는 새로운 조파시스템 3D-NIT (3-Dimensional Numerical Irregular wave Tank)모델을 제안한다. 그의 타당성을 검증하기 위하여 1) 조파지점에서 계산파형과 목표파형을 비교·검토하고, 2) 경사수심역에 설치된 호안구조물을 대상으로 산정된 기존 월파량에 대한 실험치와 비교·검토하며, 3) 연직원주 구조물에 작용하는 파력 및 구조물에 의한 파랑변형의 해석에 적용하여 기존의 수치 및 수리실험결과와 비교한다. 이상의 결과를 기초로 3D-NIT모델을 경사수심역에 설치된 원주구조물에 작용하는 쇄파력의 해석에 적용하여 입사파고, 구조물의 이격거리 등에 따른 작용쇄파력의 특성을 규명하고, 더불어 국내현장의 특수방파제에 적용하여 반사율, 월파량 등을 검토하였다. 그 결과 본 연구에서 제안하는 3D-NIT모델을 이용한 수치실험결과는 기존의 수리모형실험을 잘 재현하고 있음을 확인하였고 복잡한 형상을 갖는 해안구조물의 해석에 적용할 수 있음이 확인되었다.

핵심용어 : 3차원 불규칙 수치파동수조(3D-NIT) 모델, 파력, 월파량, 원주구조물, 특수방파제

Abstract : In this study, 3D-NIT(3-Dimensional Numerical Irregular wave Tank) model in which regular wave as well as stable irregular wave can be generated in 3-dimensional numerical irregular wave tank was proposed. To verify validity, the following steps need to be conducted: 1) comparative analysis between calculated waveforms and targeted waveforms at the wave generating point, 2) comparative analysis with the existing experimental values of overtopping volume estimated, targeting shore protection structures installed on a slope bed, 3) comparison with the existing numerical and hydraulic experimental results through application in the analysis on the wave deformation by structures and wave force acting on the vertical cylindrical structures. Based on the results, characteristics of the breaking wave forces according to incident waves and interval distance of structures were identified through application of 3D-NIT model in the analysis on the breaking wave forces acting on the cylindrical structures installed on a slope bed, and reflection and overtopping was reviewed through application in the special breakwaters on the domestic fields. The numerical results obtained the 3D-NIT model are in good agreement with experimental results, and its application to the complex-shpaed coastal structures is verified.

Key Words : 3-Dimensional Numerical Irregular wave Tank(3D-NIT) model, Wave force, Overtopping volume, Cylindrical structures, Special breakwater

1. 서 론

외해에서 내습하는 파랑으로부터 연안역의 주요 시설물을 보호하고 해역을 정온화하기 위해 연안역에 직립제, 경

사제 및 혼성제를 기본으로 다양한 방파제를 건설하여 왔고, 최근에는 주변경관과의 조화, 친수성 및 저반사의 목적 등으로 슬리트케이슨제로 대표되는 특수방파제가 많이 시공·계획되고 있다. 한편, 해역에 설치된 구조물은 외력을 지속적으로 받으므로 극한의 파랑환경조건하에서도 견딜 수 있는 충분한 강도가 구비될 필요가 있고, 이에 따라 특수방

* 대표저자 : 정희원, klee@kd.ac.kr, 033-649-7296

† 교신저자 : 정희원, kimds@hhu.ac.kr, 051-410-4463

과제에 의한 파랑제어 및 구조물에 작용하는 파력의 예측에 고정도 해석이 요구된다.

구조물의 파랑응답은 파랑과 구조물의 3차원적인 특성들로 인하여 복잡하게 나타나는 현상으로, 이를 고정도로 평가하기 위해서는 3차원구조물의 형상을 정확히 재현하고, 작용하는 불규칙파랑의 영향을 면밀히 검토할 수 있는 3차원 불규칙 수치파동수조(3D-NIT) 모델의 개발이 필요하다. 3D-NIT모델을 통하여 구조물과 파랑과의 간섭현상을 검토하는 경우 구조물에 의한 주변파동장의 3차원적인 시·공간 변화, 복잡한 구조물의 형상에 의한 파랑 상호간의 간섭현상, 구조물의 3차원적인 특성에 따른 작용파압 및 파랑의 월파현상까지도 수치적으로 검토할 수 있는 장점이 있다.

한편, 실험역에 주어지는 불규칙파의 재현에 있어서 복잡한 구조물의 경우에 지금까지의 수치해석기법으로 2차원수치해석을 통한 불규칙파의 해석이 주로 수행되어 왔고, 3차원수치해석의 경우에는 규칙파에 대해서만 해석이 이루어졌다. 따라서, 실험역에서의 파와 유사한 특성을 갖는 불규칙파에 대한 3차원수치해석의 수행에 많은 어려움이 있었기 때문에 불규칙파동장에서 파랑과 구조물 사이의 3차원적인 수리특성을 규명하기 위해 막대한 시간과 경비가 소요되는 수리모형실험을 수행하여 왔다.

본 연구에서는 수리실험에 의존해 오던 3차원 불규칙파와 구조물과의 상호작용에 의한 3차원 수리특성을 수치적으로 접근 가능하고, 복잡한 구조물에 대해서도 실험역에 주어지는 불규칙파의 재현이 가능한 3D-NIT모델의 개발 및 그의 적용성을 검토하는 것을 목적으로 한다. 세부내용으로 1) 조파지점에서 계산파형과 목표파형을 비교·검토하고, 2) 경사수심역에 설치된 호안구조물을 대상으로 추정된 기존의 월파랑의 실험치와 비교·검토하며, 3) 연직원주구조물에 작용하는 파력 및 구조물에 의한 파랑변형의 해석에 적용하여 기존의 수치 및 수리실험결과와 비교함으로써 수치모형을 검증하였다. 또한 이상의 결과를 기초로 3D-NIT모델을 경사수심역에 설치된 원주구조물에 작용하는 쇄파력의 해석에 적용하여 입사파고, 구조물의 이격거리 등에 따른 작용쇄파력의 특성을 규명하고, 더불어 국내현장의 특수방파제에 적용하여 반사율, 월파랑 등을 검토한다.

2. 수치해석이론의 개요

비압축성 점성유체에 대한 복잡한 자유수면을 효과적으로 수치모의할 수 있는 VOF법이 제안된 이후, 자유수면을 취급하는 많은 학문분야에서 이를 활용한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 특히, VOF법은 쇄파과정 및 쇄파후의 파형 변형특성을 수치적으로 재현할 수 있어 해안공학분야에서

도 VOF법을 활용한 수치모델이 많이 사용되고 있는 것은 주지의 사실이다. VOF법은 자유수면형만을 모의하는 기법이므로 이를 해안공학분야에 적용하는 경우는 파랑의 전달과 반사를 정확하게 모의할 수 있는 효과적인 무반사조건을 포함한 경계조건 및 수치조파법과 결부되어야 한다. 이것이 수치파동수조로 불리고, VOF법을 활용한 수치파동수조의 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다(CDIT, 2001; Van der Meer et al., 1992; Troch, 1997; 김 등, 2001; 김 등 2004; 허 등, 2005). 수치파동수조에 대한 보다 자세한 내용은 Lee and Mizutani(2009)의 연구를 참조하기 바란다.

본 연구의 3D-NIT모델은 기존의 2D-NIT(Two-Dimensional Numerical Irregular wave Tank)모델의 계산수법을 3차원으로 확장한 것으로, 자유표면의 해석모델에 VOF법을, 난류해석에는 $k-\epsilon$ 모델을 각각 적용하였다. 기초방정식은 3차원비압축성 점성유체를 대상으로 한 연속식 및 Navier-Stokes방정식을 PBM(Porous Body Model; 榑山 등, 1990)에 근거하여 확장한 다음의식(1)~(4)로 주어진다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_\rho \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} &= \frac{\lambda_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x v v}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v v}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w v}{\partial z} &= \frac{\lambda_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x w w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} &= \frac{\lambda_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w - \gamma_v g \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, t 는 시간, x, y 는 수평방향좌표, z 는 연직방향좌표, u, v, w 는 x, y, z 방향의 유속성분, ρ 는 유체밀도, p 는 압력, ν_e 는 분자동점성계수 ν 와 와점성계수 ν_t 의 합, g 는 중력가속도, γ_u 는 체적공극율, $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 는 x, y, z 방향의 면적공극율, D_x, D_y, D_z 는 경계에서 반사파의 제어를 위해 설치한 부

가감쇠영역에서의 에너지감쇠계수, S_ρ, S_u, S_v, S_w 는 해석영역 내의 조파를 위한 소스항, $\lambda_u, \lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 는 구조물로부터 받는 관성력효과를 나타낸 파라미터로 식(5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda_u &= \gamma_u + (1 - \gamma_u) C_M \\ \lambda_x &= \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_y &= \gamma_y + (1 - \gamma_y) C_M \\ \lambda_z &= \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, C_M 은 관성력계수, R_x, R_y, R_z 는 투과층에서의 저항력으로 식(6)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_y &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta y} (1 - \gamma_y) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_z &= \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, C_D 는 항력계수, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 x, y, z 방향의 격자 간격이다.

이상에서 나타낸 기초식들은 2D-CADMAS-SURF(CDIT, 2001)와 김 등(2004)에서 적용된 기초식들을 3차원으로 확장한 결과 혹은 불투과성의 경우는 이 등(2007)의 결과와 동일하다.

3D-NIT모델을 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우에 문제로 지적되는 평균수위상승을 억제하면서 안정적으로 불규칙파가 조파될 수 있는 시스템을 기술한다. 이는 기본적으로 Fujiwara(2005), 이(2007)가 제시하고 있는 방법과 동일하다. 그리고 불규칙파의 파운동을 디지털방식으로 작성하는 Goda방법에 따른 불규칙파의 조파방법도 간략히 기술한다. 불규칙파의 조파방법은 선형이론으로부터 얻어진 성분파의 주파수에 하나씩 순번을 붙여서 이를 무한급수의 합으로 고려하는 것이다. 조파지점에 있어서는 수면파형 η , 수평유속 u 및 연직유속 w 의 시간적인 변동이 필요하게 되며, 이들은 각각 식(7)~(9)로 주어진다.

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (7)$$

$$u(z,t) = \sum_{m=1}^M \left\{ 2\pi f_m \frac{\cosh(h+z)}{\sinh k_m h} \right\} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (8)$$

$$w(z,t) = \sum_{m=1}^M \left\{ 2\pi f_m \frac{\sinh(h+z)}{\sinh k_m h} \right\} a_m \sin(2\pi f_m t - \varepsilon_m) \quad (9)$$

여기서, ε_m 은 Random한 위상각, f_m 은 주파수, a_m 은 진폭, k_m 은 파수, M 은 성분파의 개수, h 는 수심이다. 단, 연직좌표 z 는 정수면에서 상방향을 (+)로 취하고, ε_m 및 f_m 의 선택 방법은 후술되며, 진폭 a_m 은 다음의 식(10)으로 정의된다.

$$a_m = \sqrt{2S(f)\Delta f} \quad (10)$$

여기서, Δf 는 주파수폭, $S(f)$ 는 파랑에너지밀도이며, 불규칙파의 스펙트럼은 불규칙파를 모의하는 데에 널리 사용되고 있는 식(11)의 Bretshneider-Mitsuyasu(Mitsuyasu, 1970) 스펙트럼을 적용하였다.

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (11)$$

여기서, $H_{1/3}$ 은 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의주기를 각각 나타낸다. 일반적으로 수치해석을 통해 불규칙파를 검토하는 경우 해석시간이 증가됨에 따라 평균수위가 상승하는 문제가 있다(CDIT, 2001; 이, 2007). 본 연구에서는 평균수위상승을 억제하는 방법으로 조파지점에서 수평유속을 산출할 때 각 성분파에 대응하는 Stokes파의 질량수송속도(Mass transport velocity)를 빼주는 방법을 적용한다(Fujiwara, 2005; 이, 2007). 즉, 식(8)에서 질량수송속도를 뺀 수평유속은 식(12)과 같이 표현된다.

$$u(z,t) = \sum_{m=1}^M \left\{ 2\pi f_m \frac{\cosh k_m (h+z)}{\sinh k_m h} \right\} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) - \bar{U}_m \quad (12)$$

여기서, Stokes파의 질량수송속도 \bar{U}_m 은 다음의 식(13)과 같이 주어진다.

$$\bar{U}_m = \frac{1}{2} \frac{\pi H_m}{T_m} \frac{\pi H_m}{L_m} \frac{\cosh 4\pi (h + \bar{z}_m) / L_m}{\sinh^2 (2\pi h / L_m)} \quad (13)$$

여기서, \bar{z}_m 은 물입자의 평균위치를 나타낸다.

3. 수치해석의 검증

3.1 최대수면상승고의 검토

3차원파동장에 설치된 비균등단면의 연직원주구조물과 파랑과의 비선형간섭에 따른 구조물주변의 파랑변형에 대하여 해석해 및 2차오더의 회절산란포텐셜을 유도한 眞田(1998)의 수치해석결과 및 수리실험결과와 본 수치해석결과

를 비교·검토한다.

Fig. 1에서 적용한 구조물은 상이한 두 직경으로 구성된 원주구조물(하부; 직경 50 cm, 높이 30 cm, 상부; 직경 33 cm, 높이 15 cm)이 일정수심 $h = 45\text{ cm}$ 의 3차원수치파동수조에 놓여 있고, 이에 입사파고 $H = 3\text{ cm}$, 입사주기 $T = 1.0\text{ sec}$ 의 규칙파가 내습하는 경우에 수치해석을 수행하였다. 수치계산에서는 개경계에서 발생할 수 있는 파랑의 재반사가 해석영역의 파동장에 미치는 영향을 방지하기 위하여 부가감쇠영역을 설치하며(Hinatsu, 1992), 부가감쇠영역의 길이는 입사파장 L 의 2배 이상으로 하였다.

x 축에 따른 $y = 0\text{ cm}$ 와 $y = 25\text{ cm}$ 의 위치 및 연직원주구조물의 주위에서 무차원최대수면진폭 $2\eta_{\text{max}}/H$ (η_{max} 는 최대진폭, H 는 입사파고)의 공간분포에 대하여 眞田(1998)의 수치해석결과 및 수리실험결과와 비교한 계산결과를 Fig. 1에 각각 제시한다. 결과를 살펴보면 원주 전면에서 가장 큰 무차원최대진폭이 나타나고, 이는 원주구조물의 전면에서 구조물에 의한 반사회절파와 입사파의 중첩으로 중복파가 형성된 결과 때문이다. 그리고, Fig. 1 (a)와 (b)에서 본 연구의 수치해석결과가 眞田(1998)의 수리실험치를 전체적으로 잘 재현하고 있다.

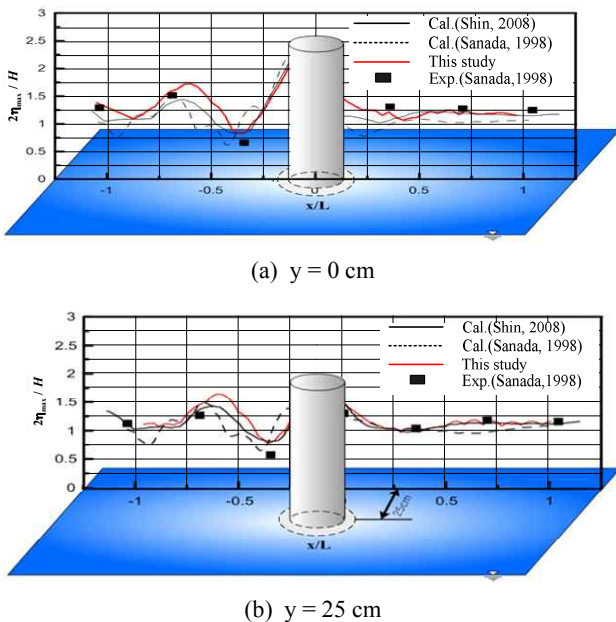


Fig. 1. Spatial distribution of non-dimensional maximum water levels around circular cylinder with un-uniform cross-section.

3.2 파력의 검토

균등단면의 연직원주구조물에 작용하는 파력의 변화특성에

대하여 $h/a = 1.16$ (a 는 연직원주구조물의 반경), $H/a = 0.232$ 인 경우에 기존의 수리실험결과(Chakrabarti and Tam, 1975) 및 수치해석결과(喜岡와 石田, 1984; 村上 등, 1993)와 본 연구의 수치해석결과를 비교·검토한다. 무차원최대파력 $F_{\text{max}}/\rho g a^2 (H/2)$ 에 대하여 기존의 수리실험 및 수치해석결과와 비교한 것을 Fig. 2에 제시한다.

결과를 살펴보면 실험치가 주어져 있는 $ka > 0.75$ (k 는 파수, $k = 2\pi/L$)의 범위에서는 본 연구의 수치해석결과는 수리실험결과를 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 실험치가 주어지지 않은 $ka < 0.75$ 의 범위는 $D/L < 0.2$ (D 는 원주구조물의 직경)로 항력이 지배적인 소형구조물의 영역으로서, 본 해석법으로 파력을 산정하는 데는 과도한 계산시간이 소요되어 파력산정에 상당한 무리가 있다. 여기서, 村上 등 (1993)의 결과에서 해가 발산하는 것은 그들이 적용하고 있는 Stokes 2차파이론의 적용범위를 초과하기 때문이다.

결과적으로, $ka > 0.75$ 의 영역에서 항력과 관성력이 동시에 고려되는 Navier-Stokes의 운동방정식에 근거한 본 연구의 수치해석이 타당한 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

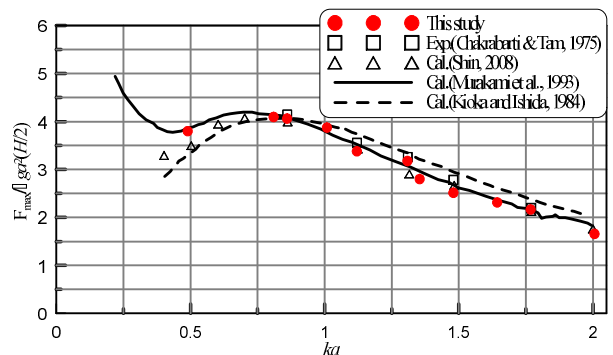


Fig. 2. Non-dimensional maximum wave force acting on circular cylinder with uniform cross-section.

3.3 월파랑의 검토

Fig. 3은 호안의 전면수심 h , 여유고 h_c 의 변화를 파라미터로 하여 산정된 호안월파랑을 Goda(1985)의 실험치와 비교한 결과이다. 그림 내에는 불규칙파랑에 의한 월파랑을 산정하기 위하여 고려된 해역의 2차원단면형상이 주어졌고, 주기 $T_0 = 13.83\text{ sec}$, 환산심해파고 $H'_0 = 4\text{ m}$ 의 목표파가 설정되었다. 그리고 월파랑의 산정에 이용한 불규칙파는 파가 안정적인 것으로 판단되는 조파 개시후 50 sec에서부터 600 sec 사이의 파이며, 호안의 마루위에 설치된 수평유속계로부터 얻어진 수평유속에 미소단면적을 곱하여 산정한 미소월파랑을 전 단면에 대해 합하고 시간평균하여 월파랑을 산정하였다.

Fig. 3으로부터 본 연구의 계산결과는 전체적으로 실험결과를 약간 과소평가 하고 있으나 호안의 전면수심 및 여유고의 변화에 따른 월파량의 특성을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. 한편, 월파량에 대한 실험결과와 수치계산 사이의 차이는 월파량의 측정방법의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 수리실험에서는 구조물 배후에 설치된 월파측정용 상자를 설치하여 구조물을 완전히 월파한 수량으로부터 월파량을 측정하는데 반해 본 연구에서는 호안의 마루위를 통과하는 수평유속으로부터 월파량을 산정하고 있기 때문에 으로 판단된다. 또한 본 연구에서 적용하고 있는 수치모델은 액체의 거동만을 해석하는 단상류 모델로 월파시에 발생하는 격자크기 이하의 소규모의 비말(Droplet)의 거동에 대해서는 무시하고 있기 때문에 수리실험에 비해 월파량을 과소평가할 수 있다. 하지만 10^3 이상의 오더를 갖는 월파량에 대해서는 수리실험 결과를 잘 재현하고 있으므로 본 연구에서 적용한 수치모델은 월파량을 수치적으로 예측함에 있어서 그 적용성이 충분하게 인정된다고 할 수 있다.

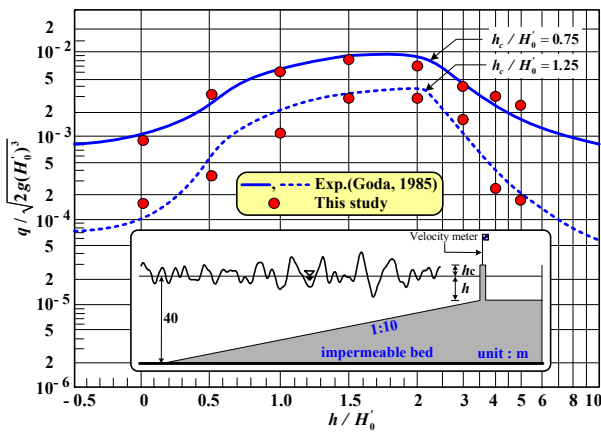


Fig. 3. Comparison between experimental results and numerical ones for wave overtopping rate on vertical seawall over a impermeable sea bottom slope of 1/10 ($H_0/L_0 = 0.017$).

4. 3D-NIT모델의 적용

4.1 연직원주구조물에 작용하는 쇄파력해석

본 연구에서는 이상에서 타당성이 검증된 3D-NIT모델을 원주구조물에 작용하는 쇄파력의 해석에 적용하여 그 특성을 검토한다. 쇄파에 대한 이론 및 실험적 연구는 오래 전부터 많은 연구자들에 의해서 수행되어 왔고, 최근에는 과도수파생성법(조 등, 2001)에 의한 쇄파현상의 재현 및 비선형과의 3차원수치해석법에 의한 연구가 수행되어 오고 있

다(신, 2008). 본 논문에서는 3D-NIT모델을 적용하여 쇄파가 발생할 경우에 쇄파전의 영역, 쇄파영역 및 쇄파후의 영역에 각각 원주구조물이 설치된 경우에 작용쇄파력과 파랑변형의 특성을 조사하여 3D-NIT모델의 적용성을 검토한다.

1) 수치파동수조

Fig. 4와 같은 수심 $h = 30\text{cm}$ 를 갖는 규칙파동장의 경사수심역에 설치된 원주구조물을 대상으로 파력을 산정하였다. 적용한 규칙파는 주기 $T = 1.4\text{sec}$, 파고 $H = 2 \sim 6\text{cm}$ 이다. Table 1은 본 연구에서 대상으로 하는 수치파동수조의 실험조건을 나타내며, 여기서 d 는 경사수심이 이후의 일정수심역에서 수심, s 는 경사수심 끝단부에서 원주구조물의 전면까지 이격거리이다.

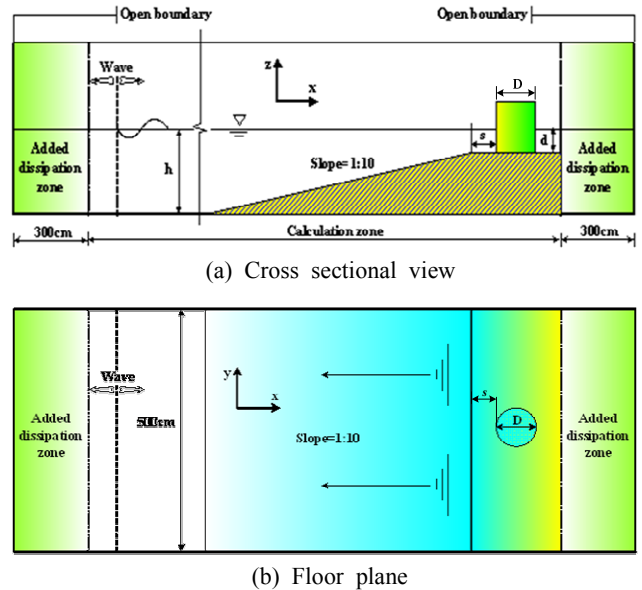


Fig. 4. Definition sketch of 3D-NIT for analysis of wave-breaking force acting on circular cylinder.

Table 1. Condition of numerical analysis for circular cylinder

Run	Slope	T(s)	H(cm)	h(cm)	D(cm)	d(cm)	s(cm)
case1	1:10	1.4	2~6	30	60	4	0
case2	1:10	1.4	4	30	60	4	0~80

2) 쇄파력

Fig. 5(a)는 Fig. 4에서 정의된 무차원이격거리 $ks = 0$ 지점에 원주구조물이 설치된 경우에 Ursell수 $U_r = 3.44, 5.16, 6.87, 8.59, 10.31$ (각각 파고 $H = 2 \sim 6\text{cm}$ 에 해당)로 Ursell수의 변

화에 따른 무차원파력의 시간변화를 나타낸 것이다. 정상상태로 판단되는 $t/T \approx 3$ 이후의 무차원파력의 결과를 살펴보면 $U_r = 3.44, 5.16, 6.87$ 까지는 무차원최대파력이 증가하지만 $U_r = 8.59$ 이상부터는 오히려 무차원최대파력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 $U_r = 8.59$ 이상부터 경사수심의 끝단부 이전 지점에서 쇄파가 발생하여 쇄파로 인한 파랑에너지가 많이 소산된 결과로 판단된다. 따라서, Ursell수가 더 커지더라도 쇄파가 발생하는 위치에 따라 낮은 파고에서도 높은 파력이 작용할 수 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 5(b)는 Fig. 4에서 무차원최대파력이 발생한 $U_r = 6.87$ 에 대하여 구조물의 무차원이격거리 $ks = 0, 0.58, 1.17, 1.75, 2.33$ 로 변화시킨 경우에 구조물의 무차원이격거리에 따른 무차원최대파력의 크기를 검토한 결과이다. 결과를 살펴보면 구조물의 무차원이격거리가 증가함에 따라 무차원파력이 감소하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 결과는 기본적으로 원주구조물이 설치된 지점의 이전에 쇄파가 발생하였기 때문이며, 결과적으로 쇄파후의 파랑에 대한 무차원파력의 변화를 나타낸 것으로 볼 수 있다. 여기서, 무차원이격거리 $ks > 0.5$ 의 영역에서 변화율은 $ks < 0.5$ 의 영역에서 변화율보다 작은 값을 나타낸다. 이러한 경향은 쇄파후에 파랑에너지의 전이에 따른 재생성과정을 통하여 정상상태의 파랑이 어느 정도 재생성된 것에 기인하는 것으로 판단된다(Iwata et al., 1996).

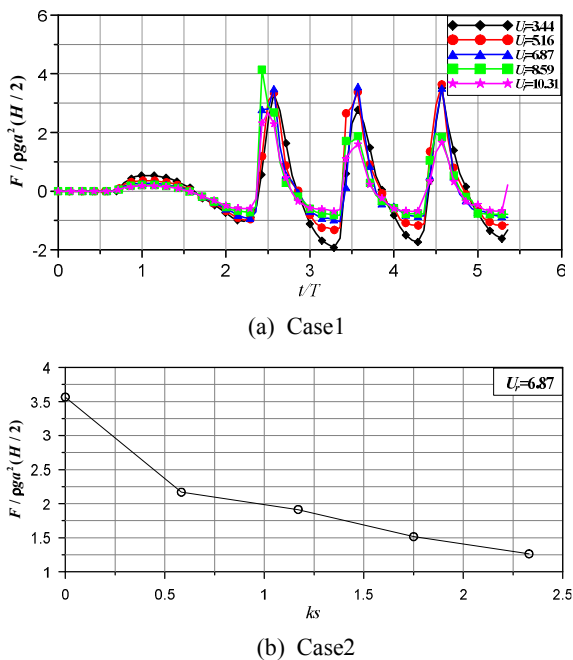


Fig. 5. Wave force acting on circular cylinder.

4.2 특수방파제의 반사율과 월파랑 해석

특수방파제는 파력에 대해서 중량으로 저항하는 형식의 구조물로, 주로 혼성제의 직립부를 초과성능이나 내파안정성 등의 측면에서 개량한 구조물이다. 이러한 형식의 특수방파제는 지금까지의 파랑제어만이 주목적이던 방파제의 개념과 달리 친환경적이고, 보다 효과적인 파랑제어를 목적으로 복잡한 파랑변형을 유도시켜 반사파를 저감시킴과 동시에 주변환경과의 경관을 고려하여 고안된 방파제라 할 수 있다.

1) 수치파동수조

수심 $h = 17.0, 19.5m$ 를 갖는 불규칙파동장에 설치된 Fig. 7(a)의 육각슬릿케이슨(H케이슨) 안벽과 Fig. 7(b)의 요철곡면슬릿케이슨(I케이슨) 안벽을 대상으로 반사율과 월파랑을 산정하기 위하여 본 연구의 3D-NIT모델을 적용한다. 이에 적용한 불규칙파는 유의주기 $T_{1/3} = 7.0, 15.5$ sec, 유의파고 $H_{1/3} = 1.4, 2.5m$ 를 목표로 각각 성분파 200개를 선형 중첩하였다. 3D-NIT모델은 구조물로부터 반사파의 영향을 최소화하기 위한 무반사형식의 조파소스와 수치파동수조의 양 끝단에서 반사파를 제어하기 위해 에너지감쇠영역을 고려하고 있다. 실험에 사용된 3차원파동수조는 길이 312.5 m, 폭 43.5 m, 높이 31.5 m인 직사각형수조이다.

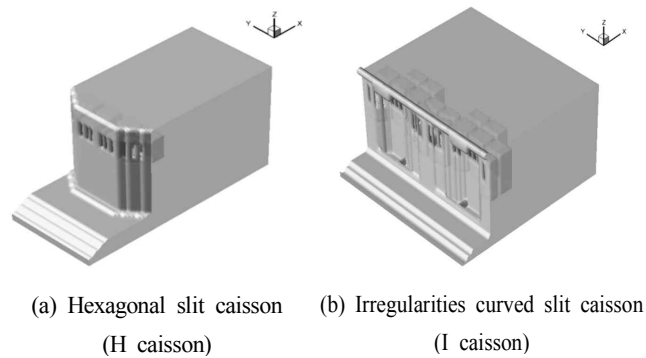


Fig. 7. Shape of specialized breakwater applied to the west quay wall of A harbor.

본 연구에서 적용한 수치파동수조에서는 파진행방향으로 슬릿케이슨 방파제를 재현하기 위하여 $\Delta x = 0.5m$, 수치파동수조의 폭방향에 대해서는 $\Delta y = 0.5m$, 높이방향에 대해서는 $\Delta z = 0.5m$ 의 일정한 격자를 각각 적용하였다. 일반적으로 슬릿케이슨제는 케이슨의 전면에 돌출된 유수실에 의해 경사입사파랑에 대한 초과효과를 기대할 수 있도록 설계된다. 그러나 3차원수치실험에 적용하는 3D-NIT모델은 직접적으로 경사입사파랑을 조파하는 것이 불가능하다. 이

를 극복하기 위해 직각입사파랑에 대해 수치파동수조내에 구조물을 경사지게 설치하는 경우에는 경사입사파랑에 대해서도 직접적인 검토가 가능하지만 경사지게 입사하는 파랑에 의한 구조물로부터 반사파의 소파를 위해 수치파동수조 측면에서 추가적인 계산영역이 필요하게 되며, 이에 따라 계산시간 또한 급격하게 증가하게 된다. 따라서, 본 3차원 수치해석에서는 직각입사파랑과 3차원 구조물과의 간섭현상만을 검토하는 것으로 한다.

2) 반사율

전술한 실험조건을 적용한 3차원 수치파동수조에서 Fig. 8과 같이 구조물로부터 파장 L 만큼 떨어진 지점에 y 축방향으로 파고계 간격 $L/4$ 로 7개의 파고계를 설치한 후 획득된 데이터를 평균하여 슬릿케이슨체에 의해 발생하는 반사파의 특성을 검토하였다. 본 연구에서는 반사율을 추정하기 위하여 Goda and Suzuki(1976)에 의한 2점법을 사용하였다. 반사율의 추정결과를 Table 2에 나타내었으며, 결과를 살펴보면 H케이슨보다 I케이슨이 반사율이 낮게 추정되었다. 이는 H슬릿의 경우 슬릿 상부에서 마루까지 상치콘크리트가 위치하게 되고, 그에 따른 상치콘크리트의 영향으로 반사율이 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 유의주기 $T_{1/3} = 7\text{sec}$ 인 경우는 반사율이 많이 저감되지만, 유의주기 $T_{1/3} = 15.5\text{sec}$ 인 경우는 반사율의 저감이 크게 나타나지 않았다. 슬릿케이슨의 기본적인 반사율의 특성을 고찰한 Tanimoto and Yoshimoto(1982)의 연구결과에 의하면 슬릿케이슨의 유수실의 폭과 입사파장과의 관계는 반사율에 큰 영향을 미치며 주기가 감소함에 따라 비교적 작은 유수실 폭을 갖는 슬릿케이슨에서 반사율을 제어할 수 있다고 보고하고 있다. 따라서 본 연구에서 적용하고 있는 슬릿케이슨의 경우 유수실의 크기가 제한적이기 때문에 긴 주

기의 파랑제어는 다소 무리가 있는 것으로 판단된다. 하지만 대상지역에 평상시 발생하는 평상파랑의 경우는 짧은 주기파랑이 지배적이며 짧은 주기파랑일 때 수심에 따른 반사율은 전면부가 직벽에 가까운 H케이슨보다 복잡한 형태의 I케이슨에서 반사율의 저감율이 62.2%와 18.75%로 각각 나타났다. 이는 I케이슨에서 복잡한 형태로 주어지는 본체 전면 슬릿부의 유수실 내부에서 상당량의 파랑에너지가 소산된 결과에 기인한 것으로 판단된다. 한편, Table 2로부터 유의주기 $T_{1/3} = 15.5\text{sec}$ 에 대한 I케이슨의 반사율의 결과를 살펴보면 H케이슨의 경우와 달리 설치수심에 따른 반사율의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 전면부가 직벽에 가까운 H케이슨의 경우 설치수심(정수면의 위치)에 따라 반사율이 민감하게 변화하는 반면에 I케이슨은 후술하는 비월파의 조건하에서 전면의 불규칙적인 형상에 의해 상대적으로 반사율이 크게 좌우되지 않음을 알 수 있다.

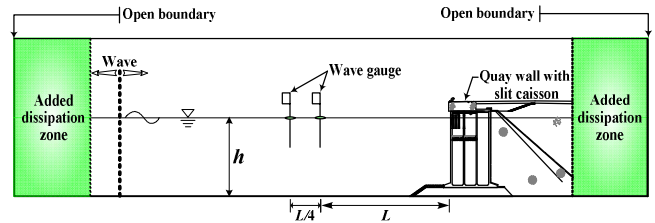


Fig. 8. Definition sketch of the numerical wave tank with specialized quay wall.

3) 월파랑

Table 3은 슬릿케이슨을 갖는 안벽의 단면형상 및 단면 특성에 따른 순간월파랑 q_s 와 누적월파랑 Q_v 의 시간변화를 제시한 것이며, Fig. 9는 Table 3의 결과를 도식화하여 나타

Table 2. Comparison of the reflection coefficient according to the type of specialized breakwater and incident wave condition

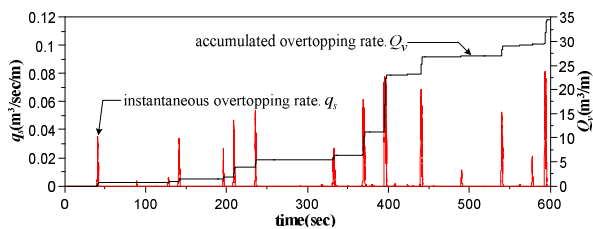
	Run			Reflection coefficient	Reduction rate of reflection coefficient(%)
	$h(m)$	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(sec)$		
Hexagonal slit caisson	19.05	2.5	15.5	0.87	-
	19.05	1.4	7.0	0.90	-
	17.00	2.5	15.5	0.78	-
	17.00	1.4	7.0	0.48	-
Irregularities curved slit caisson	19.05	2.5	15.5	0.83	4.60
	19.05	1.4	7.0	0.34	62.22
	17.00	2.5	15.5	0.71	8.97
	17.00	1.4	7.0	0.39	18.75

Table 3. Comparison of overtopping rate according to the type of specialized breakwater and incident wave condition

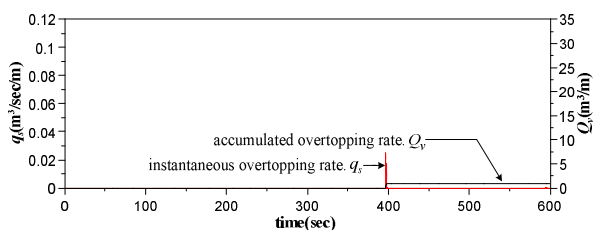
	Run			Overtopping
	$h(m)$	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(sec)$	rate($m^3/sec/m$)
Hexagonal slit caisson	19.05	2.5	15.5	0.0575
	19.05	1.4	7.0	0.0010
	17.00	2.5	15.5	0.0015
	17.00	1.4	7.0	0.0000
Irregularities curved slit caisson	19.05	2.5	15.5	0.0016
	19.05	1.4	7.0	0.0000
	17.00	2.5	15.5	0.0000
	17.00	1.4	7.0	0.0000

낸 그림이다. 월파량의 산정에 이용한 불규칙파는 50 sec에서부터 600 sec 사이의 파이며, 순간월파량 q_s 는 호안 전면 상부에 설치된 유속계로부터 얻어진 월파량을 합하고 이를 경과시간으로 나누어 산정하였다(Goda, 1985).

Fig. 9의 결과를 살펴보면 전체적으로 I케이슨의 경우가 H케이슨단면보다 월파량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 H케이슨단면의 본체의 형상이 직립의 불투과벽체에 가깝고, 또한 본체의 불투과벽체의 비율이 슬릿부가 차지하는 비율보다 상대적으로 크기 때문에 본체 전면부에서 급격한 처오름으로 인한 것으로 판단된다.



(a) Hexagonal slit caisson



(b) Irregularities curved slit caisson

Fig. 9. Time variation of overtopping rate ($h = 19.05m$, $H_{1/3} = 2.5m$, $T_{1/3} = 15.5sec$).

Fig. 10은 H케이슨단면 및 I케이슨에 $h = 19.05m$, $H_{1/3} = 2.5m$, $T_{1/3} = 15.5sec$ 의 조건에 대한 구조물 주변에

서 수위의 시·공간적인 3차원 변화과정을 나타낸 것으로, 제시된 결과를 보면 3차원 수치파동수조는 유수실의 영향으로 유수실이 존재하는 부분과 유수실이 존재하지 않는 단면과의 수면변동이 구분되는 수면변동 및 월상황의 3차원적인 특성을 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 VOF법에 의한 수면추적법과 $k-\epsilon$ 난류모델에 기초하여 쇄파시 자유수면변동까지도 정밀하게 추적할 수 있는 3D-NIT모델을 이용하여 규칙파 및 불규칙파의 조파특성과 그에 의한 작용파력, 반사율 및 월파유량을 검토하였으며, 3차원에서도 안정적으로 규칙파 및 불규칙파가 조파될 수 있는 것을 검증·확인하였다. 그리고, 불규칙파동장의 경사수심역에 설치된 호안구조물을 대상으로 호안배후로 전달되는 월파량의 해석, 원주구조물에 작용하는 쇄파력에 적용하였고, 더불어 국내현장의 특수방파제에 본 3D-NIT모델을 적용하여 반사율과 월파량 등을 검토하였으며, 이로부터 얻어진 주요한 사항을 아래에 기술한다.

1. 3D-NIT모델을 이용하여 불규칙파를 검토하는 경우 문제로 되는 평균수위상승문제를 해결하여 안정적으로 불규칙파를 조파할 수 있는 새로운 조파시스템을 구축하였다.

2. 본 연구에서 제안한 3D-NIT모델에 의한 규칙파 및 불규칙파의 조파파랑에 의한 결과를 실험치와 비교·검토한 결과 수리실험을 잘 재현하므로 본 3D-NIT모델의 타당성이 검증되었다.

3. 불규칙파동장의 경사수심역에 설치된 호안구조물을 대상으로 산정된 월파량을 실험치와 비교·검토한 결과 호안의 전면수심 및 여유고의 변화에 따른 월파량의 특성을 잘 재현하고 있음을 알 수 있었고 10^{-3} 이상의 오더를 갖는 월파량에 대해서는 수리실험 결과를 높은 정도를 재현하였다.

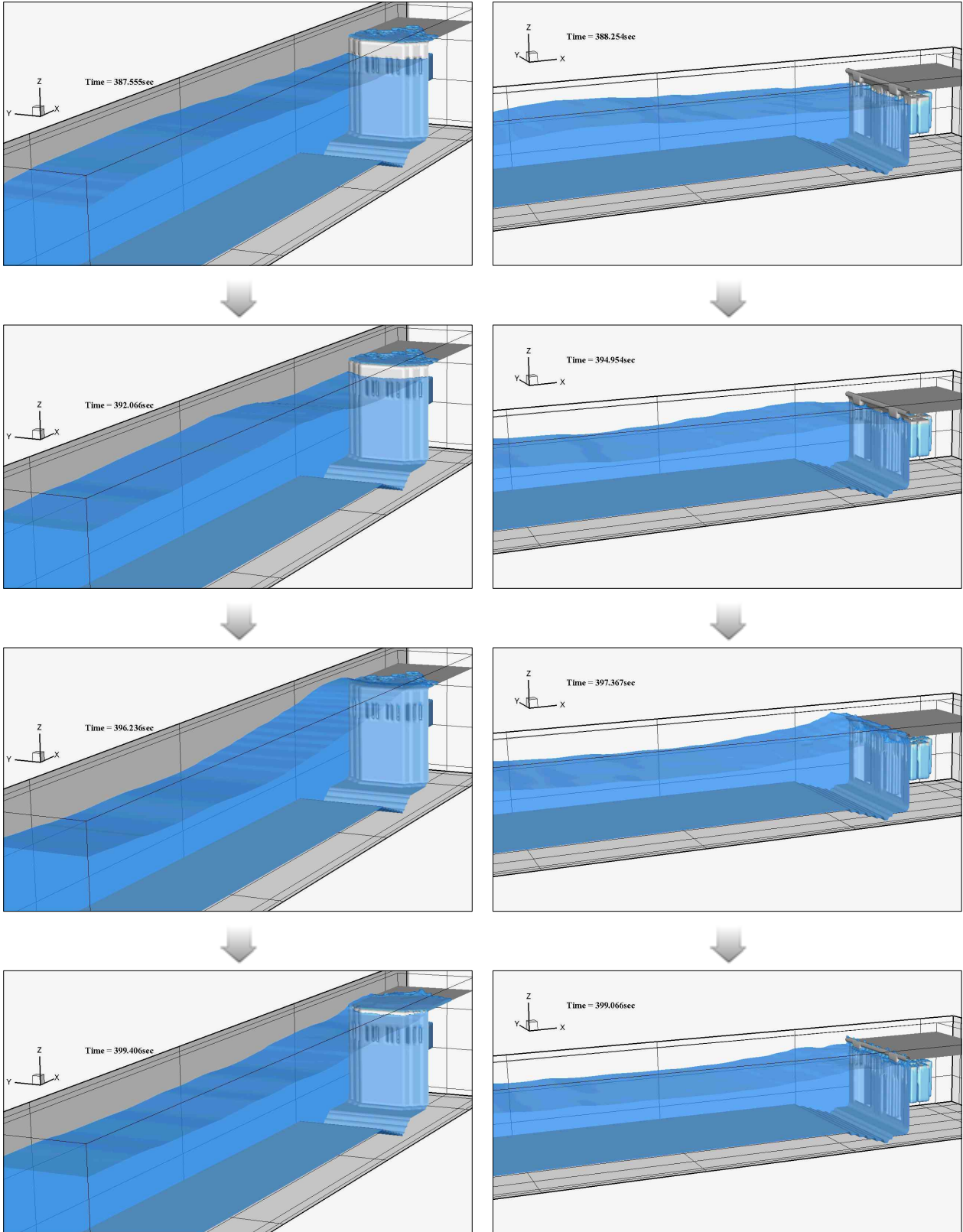


Fig. 10. Time variation of free surface around structure for the case of $h = 19.05\text{ m}$, $H_{1/3} = 2.5\text{ m}$, $T_{1/3} = 15.5\text{ sec}$.

3차원 불규칙 수치파동수조(3D-NIT) 모델의 적용성에 관한 연구

4. 경사수심을 갖거나 복잡한 형태를 가진 특수방파제에 의한 파랑변형 및 월파량에 3D-NIT모델을 적용한 결과 타당한 결과를 나타내므로 3차원수리실험에서 요구되는 막대한 시간과 경제적인 측면을 보완할 수 있는 해석기법으로 그 유용성이 기대된다.

본 연구에서 제안한 3차원 수치모델의 효용성을 증대시키기 위해 경제적인 계산에 대한 고민이 필요하며 이에 대한 연구를 지속할 계획에 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김도삼, 이광호, 유현상, 김창훈, 손병규(2004), 불규칙 파동장에 있어서 VOF법에 의한 투과성감제의 파랑제 특성에 관한 연구, 한국해양·해양공학학회논문집, 16(3), pp. 121-129.
- [2] 김도삼, 이광호, 허동수, 김정수(2001), VOF법에 기초한 불투과 잠재 주변 파동장의 해석, 대한토목학회논문집, 제21권, 제1호, pp. 31-35.
- [3] 신동훈(2008), 연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 구조물에 의한 비선형파랑변형 및 지형변동의 해석, 박사논문, 한국해양대학교, pp. 89-94.
- [4] 이광호, 이상기, 신동훈, 김도삼(2007), 3차원 VOF법에 의한 연직 주상구조물에 작용하는 파력과 구조물에 의한 파랑변형 해석, 한국해양공학회지, 12(2), pp. 12-21.
- [5] 이민기(2007), CADMAS-SURF에 의한 불규칙파랑의 해석과 월파량추산에 관한 연구, 석사학위논문, 한국해양대학교, p. 38.
- [6] 조효제, 구자삼, 이상길(2001), 과도 수파중의 복합실린더에 작용하는 쇄파력에 관한 연구, 한국해양공학회지, 15(4), pp. 3-8.
- [7] 허동수, 김창훈, 이광호, 김도삼(2005), 파·구조물·지반의 비선형 동적응답해석을 위한 직접수치해석기법의 개발, 한국해양·해양공학회지, 17(2), pp. 86-97.
- [8] 喜岡 涉, 石田 昭(1984), 円柱に作用する第2次近似回折波波力, 海岸工学講演會論文集, 31, pp. 620-624.
- [9] 榑山 勉, 阿部宣行, 鹿島遼一(1990), ポーラスモデルによる透過性構造物周邊の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 37, pp. 554-558.
- [10] 村上啓介, 吉田明德, 入江 功(1993), 任意斷面形狀の鉛直柱体と波の非線形干渉解析法. 海岸工学論文集, 40(2), pp. 846-850.
- [11] 眞田 武(1998), 大型海洋構造物による非線形回折散亂波の2次近似解析解とその応用に關する研究, 工学博士學位論文, 名古屋大學大學院, p. 223.
- [12] CDIT(2001), Research and Development of Numerical Wave Channel(CADMAS-SURF), CDIT library, No. 12, p. 296.
- [13] Chakrabarti, S. K. and W. A. Tam(1975), Interaction of waves with large vertical cylinder, J. Ship Res., 19, pp. 23-33.
- [14] Fujiwara, R.(2005), A method for generation irregular waves using CADMAS-SURF and applicability for wave transformation and overtopping, Coastal Eng., JSCE, 52, pp. 41-45.
- [15] Goda, Y.(1985), Random seas and design of maritime structures, University of Tokyo press, p. 323.
- [16] Goda, Y. and Y. Suzuki(1976), Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, Proc. 15th ICCE, ASCE, pp. 828-845.
- [17] Hinatsu, M.(1992), Numerical simulation of unsteady viscous nonlinear waves using moving grid system fitted on a free surface, J. Kansai Soc. Nav. Archit. Japan, 217, pp. 1-11.
- [18] Iwata, K., K. Kawasaki and D. S. Kim(1996), Breaking limit, breaking and post breaking wave deformation due to submerged structure, ICCE, 2, pp. 2338-2351.
- [19] Lee, K. H. and N. Mizutani(2009), A numerical wave tank using directing-forcing immersed boundary method and its application to wave force on a horizontal cylinder, 51(1), pp. 27-48.
- [20] Mitsuyasu, H.(1970), On the growth of spectrum of wind-generated waves(2)-spectral shape of wind waves at finite fetch, Proc. Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, pp. 1-7.
- [21] Tanimoto, K. and Y. Yoshimoto(1982), Theoretical and experimental study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall, Report of the port and harbour research institute, 23(3), pp. 43-77.
- [22] Troch, P.(1997), VOFbreak, a numerical model for simulation of wave interaction with rubble mound breakwater, Proc. 27th IAHR Congress, San Francisco, USA, pp. 1366-1371.
- [23] Van der Meer, J. W., H. A. H. Petit, P. van den Bosch, G. Klopmanm and R. D. Broekens(1992), Numerical simulation of wave motion on and in coastal structures, Proc. 23rd ICCE, ASCE, pp. 1772-1784.

원고접수일 : 2012년 06월 11일

원고수정일 : 2012년 08월 13일 (1차)

2012년 09월 11일 (2차)

게재확정일 : 2012년 10월 26일