

# 해양환경공학의 다목적 수치시뮬레이션을 위한 Virtual Reality 기술

박 종천\*

\*동경대학 대학원 환경해양공학전공

## Virtual Reality Technology for Multipurpose Numerical Simulation in Marine Environmental Engineering

JONG-CHUN PARK\*

\*Dept. of Environmental & Ocean Engineering, Univ. of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

**KEY WORDS:** 수치파동수조, 해양환경공학, Navier-Stokes 방정식, 파랑환경재현 장치, 다중격자계, 운동시뮬레이션, Snake형 조파기

**ABSTRACT:** A virtual reality technology for multipurpose numerical simulation is developed to reproduce and investigate a variety of ocean environmental problems in a 3D-Numerical Wave Tank. The governing equations for solving incompressible fluid motion are Navier-Stokes equation and continuity equation, and the Marker-Density function technique is adopted to implement the fully-nonlinear free-surface kinematic condition. The marine environmental situations, i.e. waves, currents, wind, etc., are reproduced by use of multi-segmented wavemaker on the basis of the so-called "snake-principle". In this paper, some numerical reproduction techniques for regular and irregular waves, multi-directional waves, Bull's-eye wave, wave-current, and solitary wave are presented, and a model test in motion with large amplitude of roll angle is conducted in the developed 3D-NWT, using a overlaid grid system.

### 서 론

최근, 물리수조(Experimental Wave Tank, EWT)에 있어서의 설치비용, 실험공간, 계측방법, 실험의 다양성 등의 제한에서 오는 한계를 극복하기 위하여, 시뮬레이션 공학에 기초하고 가상 공간의 컴퓨터를 이용한 수치파랑수조(Numerical Wave Tank, NWT)의 개발이 현저하다.

EWT나 NWT내에서 모형시험이나 연안류의 유동에 관한 실험 등을 수행할 경우, 실험역의 파랑환경을 정확히 모사해야 할 필요가 있다. 이를 위해서는 파랑이나 바람, 혹은 조류 등의 복잡한 환경재현이 필요하게 된다.

본 연구에서는, 해양환경공학의 다목적 수치 시뮬레이션을 위한 수치파랑환경의 재현기술과, 다중격자계를 사용한 모형선의 대진폭 운동시험의 기술을 개발한다. 수치파랑환경의 재현 시뮬레이션으로써는 규칙파 및 불규칙파와 실험역 해양파, 삼각파, 파랑-조류, 고립파를 수치적으로 재현하며, 시뮬레이션된 결과를 EWT의 값들과 비교하여 본 연구에서 개발한 기술들의 타당성을 확인한다. 모형선의 대진폭 운동시험 기술으로써는 외부수조격자계와 내부물체격자계를 중첩시켜 내부격자계의 운동에 의해 물체의 운동을 표현하는 다중격자계의 기술을 개발하고, 일정속도로 전진하며 20°의 대진폭 롤운동을 하는 Series60 (C<sub>b</sub>=0.6) 모형선에 응용한 예를 보인다.

### 2. NWT의 수치 시뮬레이션 기술

#### 2.1 시뮬레이션 기법

수치파랑수조 내의 비압축성 유동장을 풀기위한 지배방정식은 다음과 같은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{u} \cdot \mathbf{v})\mathbf{u} = -\nabla\phi + \nu\nabla^2[\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T] - \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} + \mathbf{K} \quad (1)$$
$$\nabla\mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{u}$ 는 속도벡터,  $\mathbf{v}$ 는 계산격자의 이동속도,  $t$ 는 시간,  $\nabla$ 은 연산자,  $\phi$ 는 정수압을 포함한 압력으로  $\phi = p/\rho + gz$ 과 같이 정의되며,  $\nu$ 는 동점성계수,  $\mathbf{K}$ 는 관성력을 포함한 외력을 각각 나타낸다.

$$\mathbf{K} = -2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u} - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r} - \frac{d\mathbf{V}_s}{dt}. \quad (3)$$

위 식의 우변의 항은 순서대로 코리올리력, 원심력, 각가속도에 의한 관성력, 병진가속도에 의한 관성력을 표시한다. 또한,  $\mathbf{V}_s$ 는 부유체 고정좌표계 중심에서의 선속벡터,  $\boldsymbol{\omega}$ 는 각가속도,  $\mathbf{r}$ 은 유체의 위치벡터를 의미한다. 단, 선체나 부유체의 운동을 포함하지 않는 경우  $\mathbf{K}$ 는 무시될 수 있다.

지배방정식은 유한체적법에 의해 이산화되어지며, 개량된 MAC법의 알고리즘을 이용하여 매시간 스텝의 경계조건을 이용하여 풀리게 된다.

수치파랑수조의 계산 알고리즘은 Park 등 (1999)과 같다.

대류항의 차분에는 3차의 MUSCL형 상류스킴을 적용하며, 그 밖의 공간차분에는 2차의 중심차분을 사용한다. 시간에 관한 차분에는 2차의 Adams-Bashforth 법을 적용한다. 압력해법에는 SOR법을 이용한다. 난류모델로는 Dynamic SGS 난류모델을 적용한다.

쇄파 등의 비선형성이 강한 자유표면의 거동을 표현하기 위하여, 자유표면의 운동학적 조건은 식(4)과 같이 밀도함수의 수송 방정식을 풀어내는 밀도함수법에 의해 만족시킨다.

$$-\frac{\partial M_\rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} M_\rho = 0. \quad (4)$$

여기서,  $M_\rho$ 는 전 계산영역에 정의되는 밀도함수이며 0과 1사이의 값을 취하게 된다. 즉, 자유표면을 경계로 하는 두 유체의 밀도함수값을 각각 0과 1로 정의할 때, 자유표면은 0.5의 등치면으로 가정할 수 있게 된다.

한편, 자유표면의 동역학적 조건은 자유표면상에서의 속도의 삼과 Irregular Stars법을 이용해 만족시킨다.

## 2.2 수치파랑수조의 벽면경계조건

수치파랑수조의 각각의 벽면은 실험목적에 따라 크기와 형태, 성격 등이 유동적으로 변화할 수 있다. 기본적으로, 모든 벽면은 no-slip 조건을 적용하는 마찰벽면이나 free-slip 조건을 적용하는 미끄럼벽면으로 가정된다. 반사파가 문제가 되는 실험 등에서는 이를 막기위하여 수치소파장치가 도입된 완전개경계 조건(Park 등, 1999)이나 약한 개경계 조건(Kim 등, 2002)을 적용할 수 있도록 옵션이 설정되어 있다.

## 2.3 수치조파기의 경계조건

수치조파기는 플랩형이나 피스톤형의 조파기로서, 심수중력파 이론이나 천수파 이론에 의하여 각 조파판에 적절한 속도분포를 주게 된다. 방향파의 조파에 대하여서는, 선형중첩이론(Dean & Dalrymple, 1991)에 의해 surpentine형의 조파장치에 대한 속도조건을 주게 된다. 즉, 수치조파기의 각 조파판에는 다음과 같은 속도분포가 주어진다.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\cosh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \begin{pmatrix} \cos \theta_n \\ \sin \theta_n \end{pmatrix} \cos(k_{xn} + k_{yn} - \omega_n t - \epsilon_n), \quad (5)$$

$$w = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\sinh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \sin(k_{xn} + k_{yn} - \omega_n t - \epsilon_n). \quad (6)$$

여기서,  $x$ 와  $y$ 방향의 파수  $k_x$ 와  $k_y$ 는 파수에 대해  $k_x = k \cos \theta$ 와  $k_y = k \sin \theta$ 가 된다.  $A$ ,  $k$ ,  $\omega$ ,  $\theta$ ,  $\epsilon$ 은, 파의 진폭, 파수, 각주파수, 방향, 위상차를 각각 나타낸다. 또한  $N$ 은 파의 성분수를 나타낸다.

# 3. 파랑환경재현의 수치 시뮬레이션

## 3.1 규칙파의 조파 시뮬레이션

먼저, 수치조파 기술의 정확도와 특성을 파악하기 위하여, 규칙파의 조파 시뮬레이션을 행했다. 이때, 파도의 주기는

$T=2\text{sec}$ , 파고는  $H=0.2\text{m}$  파도의 기울기는  $H/L=1/31$ 으로 설정했다. 입구경계는 수치조파기를, 출구경계는 완전개경계조건을, 측면벽과 바닥면은 미끄럼 벽면 조건을 각각 설정했다.

Fig. 1은 규칙파를 재현하기 위하여 취해야 하는 격자의 크기와 샘플링 수에 관한 시뮬레이션 결과를 표시한다. 분할수를 증가시키으로써 한 값에 수렴하는 특성을 보이며, 보다 정확한 파도의 재현이 가능함을 알 수 있다. 결과적으로, 수치적으로 파도를 재현하기 위해서 파장에 대해서는 50분할 이상, 파고에 대해서는 20분할 이상, 주기에 대해서는 1000분할 이상의 값들이 필요하다는 사실을 알 수 있다. 이 조건은, 파도의 기울기가  $H/L \leq 1/20$ 인 범위내에서 공통적으로 적용이 된다.

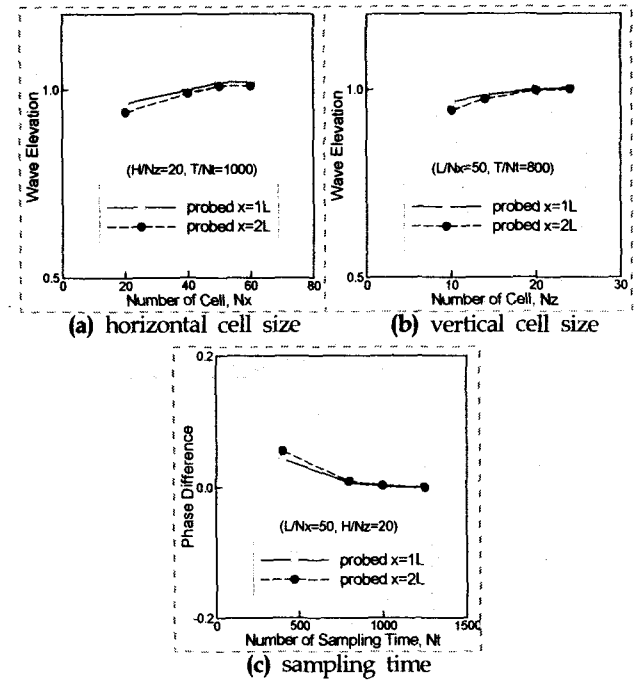


Fig. 1 Results of convergence tests for regular wave.

## 3.2 불규칙파의 조파 시뮬레이션

불규칙파의 수치조파는 주파수에 관한 파도의 에너지 스펙트럼으로부터 각 성분별 파고와 주파수를 도출하고 위상차는 0과  $2\pi$ 사이의 난수열에서 시시각각 선택한다.

본 연구에서는 Goda(1987)에 의해 연안해역 모델로 개량된 Bretschneider-Mitsuyasu형의 주파수 스펙트럼  $S(f)$ 을 사용했다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^6 \exp[-0.75(T_{1/3} f)]^{-4}. \quad (7)$$

윗식에서  $f$ 는 주파수를,  $H_{1/3}$ 과  $T_{1/3}$ 은 각각 유의파고와 유의주기를 나타낸다. 얻어진 에너지 값에 대하여  $A = \sqrt{2S(f)df}$ 에 의해 각 성분에 관한 파고를 계산한다. 여기서,  $df$ 는 성분간의 주파수 간격이다.

Fig. 2는 목표 스펙트럼과 비교하여 얻어진 시뮬레이션 결과이다. 입력한 파도의 성분은 64성분이며 유의파고와 유의주기는 각각  $H_{1/3}=0.05\text{m}$ 와  $T_{1/3}=1.33\text{sec}$ 이다.

Case1의 경우는  $\Delta x = L_{1/3}/50$ ,  $\Delta z = H_{1/3}/20$ ,  $\Delta t = T_{1/3}/800$ 의 계산조건을, Case2의 경우는  $\Delta x = L_{1/3}/150$ ,  $\Delta z = H_{1/3}/20$ ,  $\Delta t = T_{1/3}/2000$ 의 계산조건을 사용했다. 시뮬레이션으로부터 얻어진 스펙트럼은 초기 위상차의 값을 서로 달리한 5가지 결과를 평균하여 얻어졌다. Case2의 경우 목표 스펙트럼과 잘 일치하고 있다. 단, 1.5 Hz를 넘는 고주파성분에 대해서는 시뮬레이션에서 얻어진 에너지분포가 작게 나타나 있는데, 이것은 수치적인 소산(numerical dissipation)에서 비롯된 것으로 생각된다. 이 영역에서의 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 좀더 작은 격자간격을 사용해야 할 것이다.

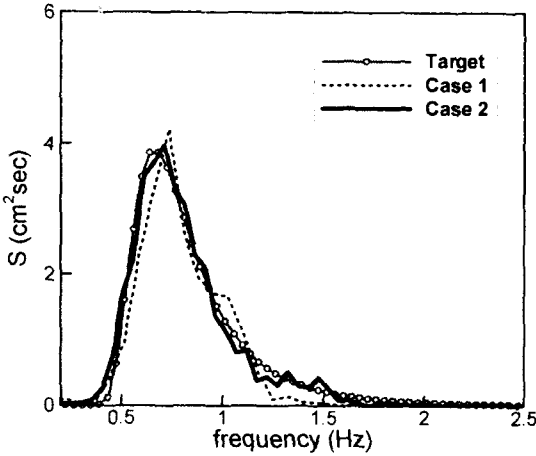


Fig. 3 Comparison of target and simulated wave spectra for irregular wave.

### 3.3 2면조파기를 이용한 실험역 해양파의 재현 시뮬레이션

실험역의 파랑은 다방향성의 불규칙파이며, 주파수 스펙트럼  $S(f)$ 과 방향 스펙트럼  $G(\theta, f)$ 을 이용한 에너지 스펙트럼에 의해 대표적으로 나타낼 수가 있다.

$$s(f; \theta) = s(f) \cdot G(\theta, f). \quad (8)$$

실험역의 파랑에 대해서는 다양한 모델식이 제안되어 있으며, 본 연구에서는 식(6)의 주파수 스펙트럼과 식(7)의 Mitsuyasu형의 방향 스펙트럼을 이용했다.

$$G(\theta, f) = G_0 \cos^{2S}[(\theta - \theta_p)/2], \quad (9a)$$

$$G_0 = \left[ \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos^{2S}(\theta/2) d\theta \right]^{-1}, \quad (9b)$$

$$S = \begin{cases} S_{max} (ff_p)^5 & : f \leq f_p \\ S_{max} (ff_p)^{-2.5} & : f > f_p \end{cases} \quad (9c)$$

여기서,  $\theta$ 는 방향을,  $\theta_p$ 와  $f_p$ 는 각각 방향과 주파수의 peak치를 나타내며,  $f_p = 1/T_{1/3}$ 으로 주어진다. 또한,  $G_0$ 는  $G(\theta, f)$ 를 정규화하기 위한 정수이며,  $S_{max}$ 는 방향 스펙트럼의 집중도(Goda & Suzuki, 1975)를 나타낸다.

본 시뮬레이션에서는 유효해석영역의 증대를 목적으로 NWT의 2면에 듀얼페이스의 수치조파기를 설치했다. 조파기의 맞은 면에는 완전개경계의 조건을 부여했다. 입력한 파도의 조건은

$H_{1/3} = 0.05 \text{ m}$ ,  $T_{1/3} = 1.33 \text{ sec}$ ,  $S_{max} = 5$ ,  $\theta_p = 0$ 이며,  $16 \times 16$ 의 성분을 입력했다. 3차원 시뮬레이션의 경우 컴퓨터의 용량제한으로 인해,  $\Delta x = \Delta y = L_{1/3}/20$ ,  $\Delta z = H_{1/3}/20$ ,  $\Delta t = T_{1/3}/2000$ 의 비교적 큰 격자간격을 이용했으며, 총 150만의 격자를 사용했다.

Fig. 4는 시뮬레이션 된 단파장 파랑의 순간적인 파형을 보이며, Fig. 5는 4개의 파고계로부터 측정된 파고의 시계열 데이터를 재해석해서 얻어낸 방향 스펙트럼을 목표 스펙트럼과 비교했다. 이때, 방향 스펙트럼의 재해석에는 Hashimoto 등(1994)의 EMEP법을 이용했다. NWT에서 재현한 다방향불규칙파의 스펙트럼은 하나의 피크를 갖으며, 입력한 스펙트럼의 성질을 잘 표현하고 있다고 말할 수 있다. 보다 정확한 결과를 위해서는 3.2절의 불규칙파의 경우와 같이 작은 격자간격을 사용해야 한다.

Fig. 6은 주파수의 피크치에서의 방향함수를 표시한다. 전체적으로 목표함수를 잘 재현하고 있다. 단, 시뮬레이션의 결과에서 좌우 비대칭의 특성이 나타나 있는데, 이는 2면의 조파장치에서 생성한 파도가 다른 한면에서 반사한 반사파의 영향 때문으로 보인다(Hiraishi 등, 1998).

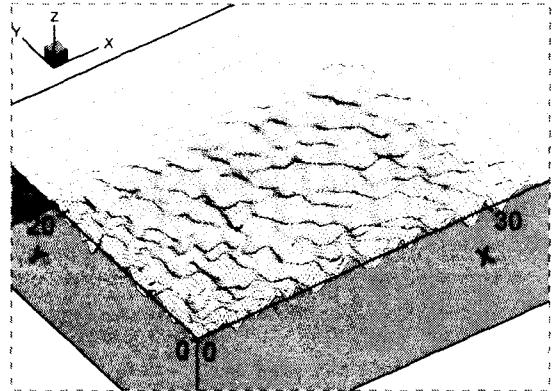


Fig. 4 3D snap-shot of wave configuration for short-crest waves.

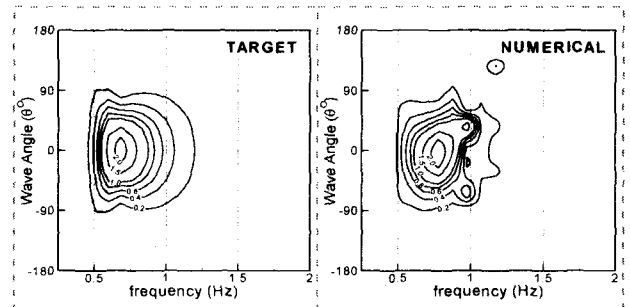


Fig. 5 Comparison of directinal spectrum in energy contour map.

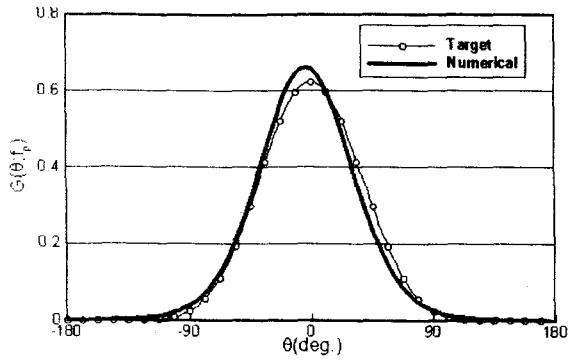


Fig. 6 Analyzed directional function at peak frequency.

### 3.4 삼각파의 조파 시뮬레이션

선박을 포함한 해양구조물의 안전성 면에 있어서 악영향을 주는 조건 중 하나는 삼각파의 등장이다. 삼각파는 여러 방향의 파도들이 한곳에 집중을 하여 나타나는 집중파이며, 그 초점에서는 기대 이상의 큰 파고가 생성된다. 이를 Bull's-eye파라고도 한다.

삼각파를 NWT 내에서 재현하기 위해, 수치조파기의 각 조파 판에는 식(9)와 같은 위상차를 강제적으로 주게 된다.

$$\varepsilon = k\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (10)$$

여기서,  $x_i$ 와  $y_i$ 는 조파영역내의 격자의 좌표이며,  $x_j$ 와  $y_j$ 는 집중파의 초점의 좌표를 나타낸다.

본 연구에서는 일정한 파고( $H=1\text{ cm}$ )와 일정한 주기( $T=2\text{ sec}$ )를 갖는 파도가 초점에 집중하는 경우를 시뮬레이션했다. Fig. 7은 삼각파가 재현된 예를 보이는데, 왼쪽 그림은 측면벽이 설치된 경우를, 오른쪽 그림은 완전개방경계를 설치한 경우를 보이고 있다. 왼쪽 그림에서는 초점근방의 파형에 측면벽으로 인한 반사파의 영향이 나타남을 알 수 있다. Fig. 8은 초점을 지나는 횡단면에서의 파형분포를 실험과 비교했다. 실험값과 시뮬레이션 값은 좋은 일치를 보이고 있으며, 특히 초점에서의 파고가 주어진 파고의 약 9배까지 증폭해 있음을 나타내고 있다.

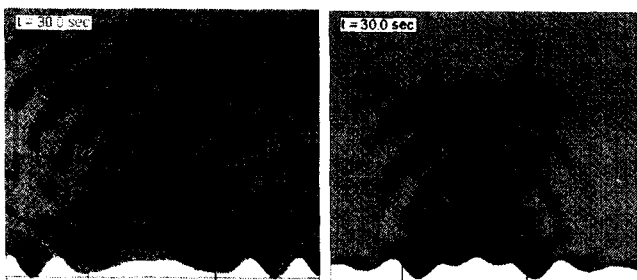


Fig. 7 Wave configuration of Bull's-eye waves; with side wall(left) and without side wall(right).

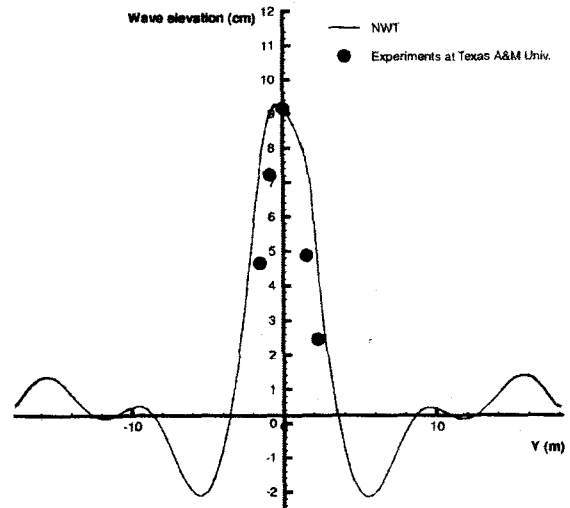


Fig. 8 Comparison of wave profile between experiments and present NWT at cross-section of a focused point.

### 3.5 파랑-조류의 재현 시뮬레이션

파랑과 조류(current)가 공존하는 흐름장을 해석하기 위하여 지금까지의 파랑재현 기술에 조류생성의 조건을 추가하게 된다. 즉, 조류는 흐름장 전체에 일정한 속도에 이르기까지 가속을 거쳐 서서히 도입이 되며, 수치조파기로부터는 조류의 유속을 고려한 조파를 한다. 이때 조류는 연직방향의 성분을 갖지 않는 것으로 가정한다. 따라서 식(5)의  $\omega_n$ 은 다음과 같이 수정된다.

$$\omega_n = \omega_n + k_n U \quad (11)$$

여기서,  $U$ 는 조류의 속도를 나타낸다.

조류의 흐름장에서의 도입은 Navier-Stokes 방정식(1)의 외력항  $K$ 에 가속도 항을 추가함으로써 얻어진다.

Fig. 9는 파도-조류의 재현 시뮬레이션 결과를 표시한다. 이때 도입된 조류는  $F_n = U/\sqrt{gd} = 0.01$ 이며,  $d$ 는 수조의 깊이를 나타낸다.

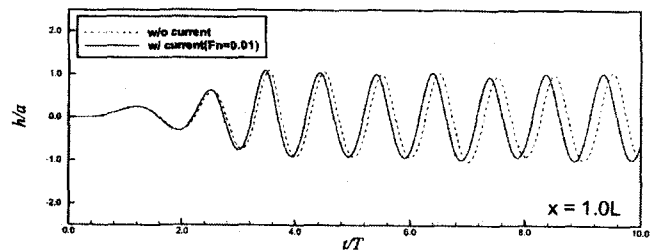


Fig. 9 Time history of wave profiles for the regular waves with current and without current.

### 3.6 고립파의 조파 시뮬레이션

NWT는 문제의 설정에 따라 실험역의 지형을 포함한 해안 및 해양류의 계산에 응용될 수 있다. 일반적인 조석류의 계산에는 앞에서 서술한 규칙파의 조파기술을 사용하면 되지만, 경우에 따라서는 쓰나미와 같은 특수한 파도의 영향을 고려해야 할 필요가

있게 된다. 본 연구에서는 연안에 도달하는 쓰나미를 단순한 고립파로 가정하고 고립파 생성에 대한 조파기술을 확립한다.

고립파 생성에 관한 기술로는 세가지 방법이 있다. 첫번째는 NWT내에 고립파의 초기 프로파일을 주는 방법(Case1)이며, 두번째는 입구경계의 파고를 조절하는 방법(Case2)이다. 세번째는 EWT에서와 같은 방법으로 조파기에 이동속도를 제공하는 방법(Case3)이다.

Case1의 경우, Boussinesq의 근사식을 이용해 얻어낸 고립파의 파형을 NWT내에 초기설정하며, 그와 동시에 흐름장의 속도분포와 압력분포를 각 계산격자에 초기조건으로 주게 된다 (Chan & Street, 1970).

Case2의 경우, 일반적으로 Boussinesq의 근사식으로부터 매시간 스텝의 파고를 얻어내며, 입구경계에의 수치조파기에 속도조건 대신 파고변화를 적용하게 된다.

Case3의 경우, 피스톤형의 수치조파기를 도입하며 그에 대한 이동변위는 식(12)에 따른다.

$$\xi_{(cm)} = A_1 \tanh(A_2 t - A_3) \quad (12)$$

여기서,  $A_1, A_2, A_3$ 는 고립파의 진폭, 주기, 위상차를 나타내는 계수이다. Fig. 10에는 조파기의 이동변위에 대한 시간변화를 나타낸다.

수치조파기는 실제로 고정된 벽으로 가정을 하고 있기 때문에 이동변위를 조건으로 주는 대신에 식(13)와 같은 조파기의 이동 속도에 대한 값을 경계값으로 주게 된다.

$$u_{(cm/sec)} = A_1 A_2 \operatorname{sech}^2(A_2 t - A_3) \quad (14)$$

Fig. 11에는 세가지의 방법에 의해 생성한 고립파의 파형을 비교했다. 각각의 방법에는 장단점이 있지만, 최종적으로 얻어낸 결과는 서로 일치함을 알 수 있다. Fig. 12는 파고의 시간 변화에 대한 Case3의 결과와 EWT의 계측값에 대한 비교를 보이며, 고립파 생성에 대한 타당성을 입증한다.

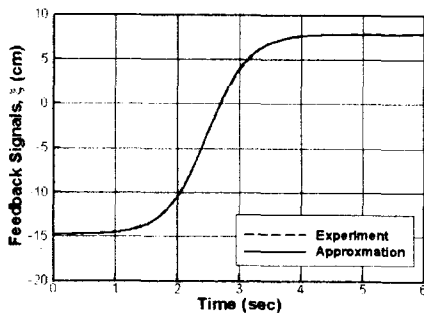


Fig. 10 Wave paddle trajectories for generation of solitary wave (tsunami).

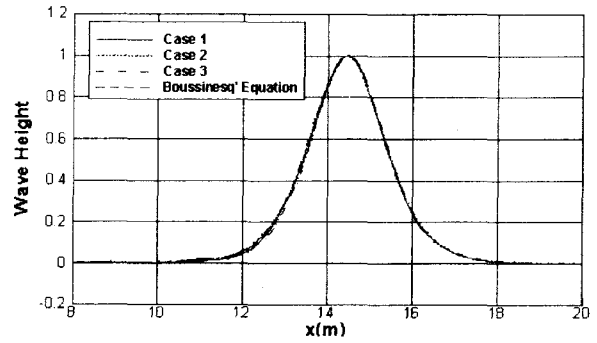


Fig. 11 Comparison of fully-developed tsunami profile.

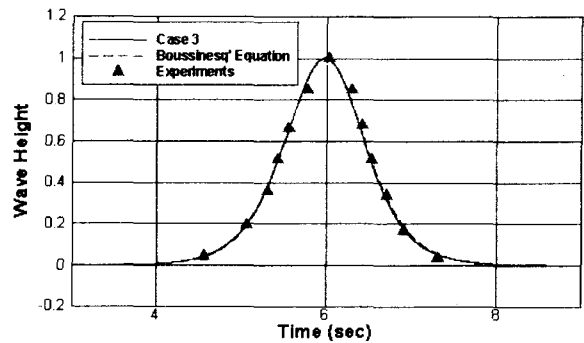


Fig. 12 Comparison of wave height.

## 4. 대진폭 운동의 모형시험 시뮬레이션

### 4.1 다중격자계를 이용한 물체의 운동 시뮬레이션

EWT에서 부유체 혹은 해상수송체 등의 모형시험을 행할 경우, 수조내에 모형을 도입하게 된다. 그와 마찬가지로 NWT에서는, Fig. 13에 보이는 바와 같이, 물체를 포함하는 또다른 격자계(내부물체격자계)를 NWT내(외부수조격자계)에 도입을 하여 각각의 격자계에서 계산을 행한다. 즉, 기본적으로 파랑환경의 재현은 외부수조격자계에서, 물체의 운동은 내부물체격자계만을 전체적으로 이동시킴으로써 물체의 운동 시뮬레이션을 가능하게 한다. 단, 두 격자계가 접하는 Interface에 적당한 경계조건을 부여해야 하는데, 본 연구에서는 Interface에서의 물리량의 정보를 선형보간법에 의해 교환을 함으로써 내부와 외부의 흐름장을 연결시키고 있다.

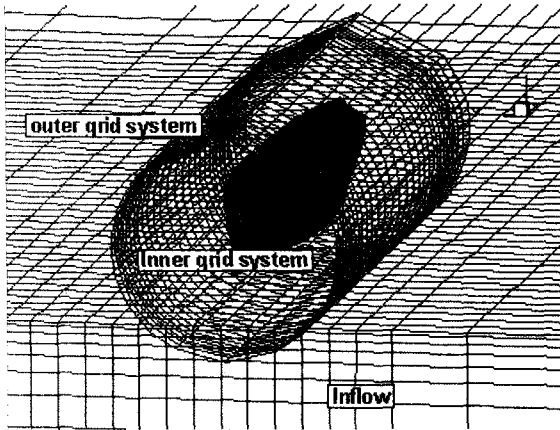


Fig. 13 Overlaid grid system.

#### 4.2 해상수송체의 대진폭 운동 시뮬레이션

본 시뮬레이션 기술의 타당성을 확인하기 위해, 일정속도 ( $F_n=0.316$ )로 전진하는 Series60 모형선 ( $C_b=0.6$ ) 주위의 흐름장을 단일격자계를 사용한 경우와 비교하였다. 두 경우 모두 내부물체격자계는 O-H형의 격자계를 채용하고 있으며, 레이놀즈 수는  $10^6$ 이다. Fig. 14는 모형선이 일정속도로 항주할 때 생성되는 파형을 나타내며, 아랫 그림중의 빨간 실선은 Interface의 위치를 나타낸다. 다중격자계의 경우 물체에서 멀리 떨어진 곳에서의 파도의 재현이 단일격자계에 비해 뛰어나 있음을 알 수 있다.

다음은, 상기조건외 일정속도로 항주하며  $20^\circ$ 의 대진폭 강제 롤운동을 하는 경우의 수치 시뮬레이션을 행했다. Fig. 15에는 운동중의 모형선 근처의 압력장을 나타내며, 그림중의 빨간 실선으로 표시된 반원호는 Interface의 위치를 나타낸다. 대진폭의 강제운동에도 불구하고 Interface 근처의 물리량은 연속적으로 풀려져 있다. Fig. 16은 운동중 모형선에 작용하는 모멘트의 시간변화를 나타낸다.

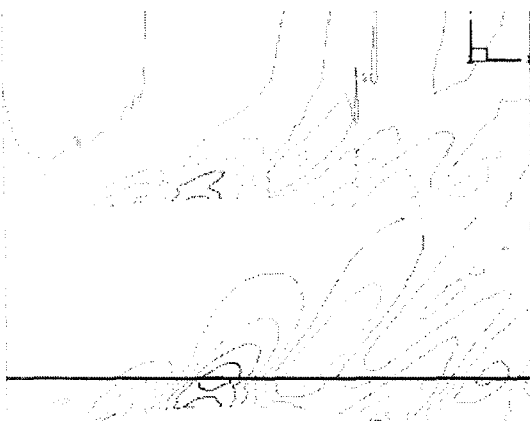


Fig. 14 Wave height contours around a Series60 ( $C_b=0.6$ ) model advancing at  $F_n=0.316$  computed by single-grid system (above) and overlaid-grid system (below).

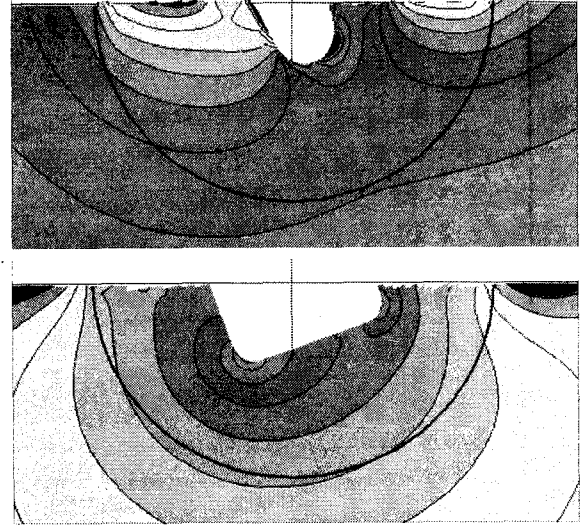


Fig. 15 2D snap-shot of pressure field around Series60 ( $C_b=0.6$ ) model advancing at  $F_n=0.316$  with 20 degrees of forced roll motion: near bow SS1.5 (above) and at midship (below).

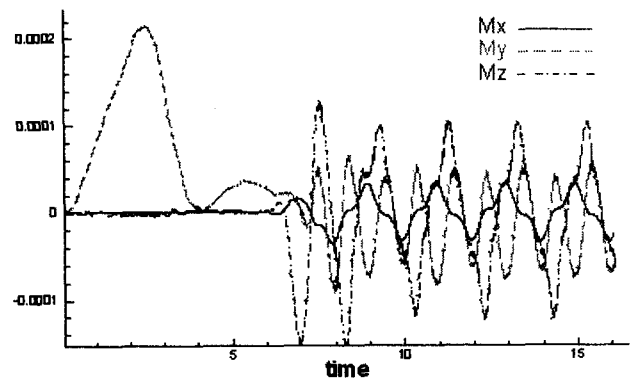


Fig. 16 Time-history of simulated moments

## 5. 결 론

본 연구에서는 해양환경공학의 다목적 수치 시뮬레이션의 수행을 목적으로 NWT 시뮬레이션을 위한 Virtual Reality 기술을 개발했다. 개발된 NWT내에서 다양한 파랑환경의 재현기술과 다중격자계를 이용한 모형의 대진폭 운동시험의 기술을 개발하였다. 수치파랑환경의 재현 시뮬레이션으로써는 규칙파 및 불규칙파와 실제역 해양파, 삼각파, 파랑-조류, 고립파, 추월파를 수치적으로 재현하였으며, 시뮬레이션된 결과를 EWT의 값들과 비교하여 본 연구에서 개발한 기술들의 타당성을 확인하였다. 모형선의 대진폭 운동시험 기술으로써는 일정속도로 전진하며  $20^\circ$ 의 대진폭 롤운동을 하는 Series60 ( $C_b=0.6$ ) 모형선에 응용한 예를 보였다.

본 기술들은 가까운 장래에 선박 및 해양구조물들의 모형시험

과 실험역의 흐름특성 파악을 위한 수치시험 등을 포함한 해양 환경분야의 다목적 수치시뮬레이션을 위해 유용하게 활용될 것이다.

## 참 고 문 헌

- Chan, R.K.C. and Street, R.L. (1970b), "SUMMAC-A Numerical Model for Water Waves ", *Technical Report No.135*, Dept. of Civil Engineering, Stanford University.
- Dean, R.G. & Dalrymple, R.A. (1991), "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", World Scientific Publ..
- Goda, Y. (1987), "Standard Spectra and Statistics of Sea Waves Derived by Numerical Simulation", 34th Japanese Conf. on Coastal Engineering, pp 131-135.
- Goda, Y. & Suzuki, Y. (1975), "Computation of Refraction and Diffraction of Sea Waves with Mitsuyasu's Directional Spectrum", *Technical Note of Port and Harbor Research Institute*, No. 230, pp 1-45.
- Hashimoto, N., Nagai, T. & Asai, T. (1994), "Extension of Maximum Entropy Principle Method (MEP) for Estimating Directional Wave Spectrum", 24th Int. Conf. on Coastal Engineering, vol.1, pp 232-246.
- Hiraishi, T., Hirayama, K. & Maruyama, H. (1998), "Applicability of Dual Face Serpent-type Wave Generator", *Report of the Port and Harbor Research Institute (PHRI)*, vol.37-4, pp 3-35.
- Kim, M.H., Niedzwecki, J.M., Roesset, J.M., Park, J.C. & Tavassoli, A., & Hong, S.Y. (200b), "Fully Nonlinear Multi-Directional Wave Simulations By 3D Numerical Wave Tanks", *J. of OMAE, ASME transaction*, Vol. 123, pp 124-133.
- Park, J.C., Kim, M.H. & Miyata, H. (1999), "Fully Nonlinear Free-Surface Simulations By a 3D Viscous Numerical Wave Tank", *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 29, pp 685~703.
- Park, J.C. & Miyata, H. (2002), "Ship Motion Simulation in Directional Waves Using a 3D Numerical Wave Tank Simulation Technique", *Int. J. of Ocean Engineering and Technology, KCORE*, Vol. 4-2, pp 1~5.