

수치파 수조를 이용한 설계파 생성에 관한 연구

정성재^{†*}, 안희춘*, 신종근*, 최진**

국립수산과학원 수산공학팀*
부산대학교 조선해양공학과**

A Study on the Generation for the Design Waves with a Numerical Wave Tank

Seong-Jae Jeong^{†*}, Heui-Chun An*, Jong-Keun Shin and Jin Choi**

Fisheries Engineering Division, NFRDI*
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan Univ.**

Abstract

In this study, a new numerical procedure for the generation of a nonlinear tailored group of waves is presented. The procedure is based on the transient wave group technique. In order to integrate the nonlinearity during the wave propagation in the computational method, the Navier-Stokes equations are applied as governing equations. The governing equations are discretized by finite volume approximation. The deformation of the free water surface in each time step is pursued with a moving grid. A two-dimensional, numerical wave tank for the simulation of the wave propagation is developed and tested in detail. The numeric results are compared first with analytical wave theories and with measurements, in order to examine the correctness of the numerical wave tank. Wave surface elevation and associated fields of velocity and pressure are numerically computed and compared with measurements. Very good agreements show up.

※ Keywords : Design wave(설계파), Numerical wave tank(수치파수조), Nonlinear wave(비선형파), CFD(전산유체역학); Validation(검증), Finite volume method (유한체적법)

1. 서론

해상에서 관측되는 파도는 불규칙파이며 방향성

을 가지고 있고 비대칭적이다. 비선형파는 해안 등의 천수영역에서 빈번하게 발생하며 파랑의 진행방향으로 해수가 이동하며 에너지의 전달을 일으킨다. 특정공간과 시간에서 파도들이 순간적으로 중첩되면서 발생하는 최대파는 Transient 파를 이용하여 구현할 수 있다. 최대파의 영향으로 인한 선박의 운동을 파악하고 구조설계를 위해서는

접수일: 2004년 7월 18일, 승인일: 2005년 2월 23일

†주저자, E-mail : denkmal@momaf.go.kr

Tel : 051-720-2592

최대파 생성기법의 개발과 수조실험을 통한 생성과 검증, 최대파와 구조물의 상호작용으로 인한 동적거동 해석이 필수적이다. 수치파 수조는 빠른 연산속도를 가진 컴퓨터의 개발 및 실용화와 더불어 파랑하중의 추정 및 평가를 위해 사용되고 있는 방법이다. 중력식 플랫폼이나 TLP(Tension Leg Platform)과 같은 해양구조물이 출현하면서 wave run-up 이나 비대칭 파에 의한 충격력에 의한 ringing 현상 등의 해석 등이 중요한 설계관점이 되고 있다(홍사영 등 1996). 수치파 수조를 이용한 시뮬레이션의 용이함과 다양한 최대 파들을 간단하게 생성 및 비교할 수 있다는 장점으로 인해 파의 방향성을 고려하지 않는 2 차원 규칙파를 이용한 실험방법이 선호되고 있다(Jeong 2003). 특히, 최대파로 알려져 있는 “ Freak waves ” (Haver and Andersen 2003)의 생성을 위해서는 간단한 모델을 이용한 방법이 점점 더 중요한 역할을 하고 있다.

본 연구에서는 Fortran 프로그램을 이용하여 2 차원 수치파 수조를 구현하였다. 진행 파의 유동장과 비선형성 및 점성이 전산유체계산에서 직접 고려될 수 있도록 하기 위해 Navier-Stokes 방정식을 기본방정식으로 사용하였으며, 유한체적법(Finite volume method)을 사용하여 기본방정식을 이산화 하였다. 대수적 격자형성법을 이용하여 수치파 수조에서의 유동장을 계산하고, 각각의 time step 에서 변화하는 유체의 속도장과 자유표면은 동격자 (Moving grid)를 통해 계산되도록 하였다. 수치파 수조의 정도와 유용성을 확인하기 위해서 시간영역에서 규칙파를 시뮬레이션 하였으며 이를 이론적(해석적) 방법과 비교하였다. 수치파 수조의 조파기 역할을 위한 입력 값으로는 선형파 이론과 실험에 이용된 조파기의 위치 제어 값에서 수평방향의 속도성분을 계산하여 경계조건으로 주었다.

2. 수치파 수조의 이론

2.1 Navier-Stokes 방정식

점성이 있는 유체가 존재하는 경계영역 내부에서의 운동방정식은 연속방정식과 함께 사용하는 Navier-Stokes 방정식이며 다음과 같은 벡터

형태로 쓸 수 있다.

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{\rho} \vec{f} \quad (2)$$

여기서 \vec{v} 는 속도벡터, t 는 시간, p 는 압력, ρ 는 밀도, μ 는 동점성계수, \vec{f} 는 외력을 나타낸다. 식 (1)과 (2)는 속도성분과 압력 항을 가진 비선형 편미분방정식 형태로 나타내어진다. 기본방정식의 이산화와 시간에 따라 변화하는 자유표면을 경계로 두고 해석하기 위해서는 위의 기본방정식 외에도 공간보존의 법칙(space conservation law: Demirzic and Peric 1988)이 고려되어야 한다. 또한 이러한 기본방정식은 유한체적법을 이용하여 이산화할 수 있다. 기본방정식을 적분형으로 다시 써 보면 다음과 같다:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} d\Omega - \int_S \vec{v}_s \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho(\vec{v} - v_s) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \int_S \rho \vec{v} (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot \vec{n} dS \\ = \int_S \vec{T} \cdot \vec{n} dS + \int_{\Omega} \rho \vec{g} d\Omega \end{aligned} \quad (5)$$

Ω 는 유체로 가득 찬 경계영역내부를 가리키며 ρ 유체의 밀도, S 경계영역의 표면적, \vec{n} 법선벡터, \vec{v} 속도, \vec{v}_s 경계영역의 표면속도, \vec{T} 응력텐서 및 \vec{g} 중력가속도를 나타낸다. 중력만이 체적력으로 작용하고 응력을 속도구배와 점성으로 나타낼 수 있는 Newton 유체에 있어서의 점성항은 τ_{ij} 로 나타낼 수 있고 직교좌표계의 x_i 방향에서의 단위벡터 \vec{i} 를 사용하여 속도성분 u_i 에 대한 운동량보존법칙은 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot \vec{n} dS \\ = \int_S \vec{t}_i \cdot \vec{n} dS + \int_{\Omega} \rho g_i d\Omega \end{aligned} \quad (6)$$

$$\vec{t}_i = \tau_{ij} \vec{i}_j - p \vec{i}_i = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \vec{i}_j - p \vec{i}_i \quad (7)$$

2.2 경계조건

시간에 따라 변화하는 자유표면이 있는 유동장 문제의 해석을 위해서는 자유표면에 대한 경계조건을 우선 고려해야 한다.

정적경계조건 (kinematic boundary condition)

자유표면을 통해 유출되거나 유입되는 유체의 양은 없다; 즉 자유표면으로부터 유체는 이탈하지 않는다. 이 조건은 공간보존의 법칙(3)과 연속방정식(4)을 동시에 만족시킴으로써 계산과정에서 충족시킬 수 있다:

$$\int_{S_{fs}} \rho (\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (8)$$

동적경계조건 (dynamic boundary condition)

자유표면에 있어서 법선방향과 접선방향에 작용하는 힘은 평형을 이루고 있다. 즉 자유표면을 사이에 두고 작용하는 힘은 동일하고 방향은 법선방향을 기준으로 할 때 반대로 작용한다.

$$p - 2\mu \left(\frac{\partial v_n}{\partial n} \right) \Big|_{fluid} = p \Big|_{air} \quad (9)$$

$$\mu \left(\frac{\partial v_t}{\partial n} + \frac{\partial v_n}{\partial t} \right) \Big|_{fluid} = 0 \quad (10)$$

여기서 v_n 과 v_t 는 자유표면에서 법선과 수평 방향의 속도성분을 나타낸다. 아울러 다음의 경계조건들 또한 수치파수조를 이용한 계산을 위해 고려되어야 한다:

유입(inlet)

유입부에서는 속도값이 초기값으로 주어져야 한다. 만약 속도가 주어진다면 그곳에서의 유량이 계산되고 이는 상미분방정식에 있어서 Dirichlet 경계조건으로 취급할 수 있다.

유출(outlet)

유출부에서는 속도성분을 경계면 내에서 추정된 계산치를 이용하여 전체적인 질량보존의 법칙이 만족되도록 하여야 한다.

벽(wall)

벽에서의 유체의 속도는 벽의 속도와 동일하도록 주어야 한다(대부분 0).

2.3 전산유체역학을 이용한 유동장 계산

유동장의 계산을 위해서는 기본방정식을 이산화 시켜야 하고 이산화는 유한체적법을 사용하였다. 기본방정식을 시간(time), 대류 (convection), 확산(diffusion), 생성(source)의 4 개의 항으로 분리한 다음 각항에 대하여 이산화 시켰다. 시간항의 이산화는 Euler 음해법(Implicit Euler method)을 이용하였고, 대류항은 중앙차분도식(central-difference scheme: CDS)와 상류도식(upwind-difference scheme: UDS)을 혼합하여 적용하였다 확산항은 계산하고자 하는 검사체적의 경계면에서 이웃한 격자의 변수값을 참조하여 평균값을 계산하여 이용하였다. 생성항은 압력과 마찰력을 계산에 필요하며 역시 격자들의 평균값을 이용하였다.

2.4 자유표면의 결정

자유표면은 격자가 매 시간간격(time step)마다 변화하는 자유표면에 상응하는 위치로 이동하는 경계면추적법(Interface tracking method)을 사용하였다. 자유표면을 결정하기 위해서는 우선 현재 시간에서 자유표면의 위치와 압력이 알려져 있다는 전제하에 운동량방정식과 연속방정식을 풀어야 한다. 우선 선형화된 운동량방정식을 계산하여야 하고, 여기에서 구한 속도성분은 연속방정식을 만족시키지 못하기에 질량보존이라는 가정을 통해 속도성분이 보정치를 사용하여 운동량방정식 내부

의 압력보정치의 구배와 상응하도록 만들어 주어야 한다. 이렇게 하여 압력수정방정식이 만들어지게 된다. 자유표면의 동압력은 운동량방정식에서 계산된 추정된 압력을 적용하여 구하지만 자유표면에서의 속도성분이 그곳에 분포된 압력교란을 야기시키기에 정적경계조건을 만족시키지 못한다. 정적경계조건은 반복계산을 통해 자유표면의 위치를 이동시킴으로써 압력교란을 유발시키지 않는 상태로 충족시키게 된다. 이때 자유표면의 위치는 자유표면에 해당되는 격자내부의 체적이 계산된 격자내부의 용출량에 상응하도록 이동하게 된다. 이를 위해서 공간보존의 법칙 (3)이 응용된다.

2.5 선형방정식의 해

지배방정식들의 각 항이 근사식으로 나타낼 수 있게 된다면 각 검사체적에는 다음과 같은 형식을 가진 하나의 대수방정식으로 표현된다.

$$A_p \phi_p = \sum_{nb} A_{nb} \phi_{nb} + Q_p \quad nb = e, w, n, s$$

위의 식에서 계수 A_{nb} 는 대류와 확산항에서 계산된 값들을 포함하고 있으며 A_p 는 비정상유동에서 계산된 항들 및 생성(Source)항에서 음해법으로 계산된 보존적이 아닌 항들이 포함되어 있다. 전체적인 유동장의 선형방정식은 다음과 같은 행렬식의 형태로 나타낼 수 있다:

$$[A]\{\phi\} = \{Q\}$$

여기서 ϕ 는 미지수가 포함된 벡터행렬이며, A 는 계수행렬, Q 는 생성항의 벡터행렬이다.

선형방정식은 SIP(Strong Implicit Procedure) 반복법을 이용하여 해를 구하였다. 운동량방정식과 연속방정식을 결합시키기 위하여 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘(Patankar 1980)을 사용하였다.

3. 수치파 수조의 구현과 검증

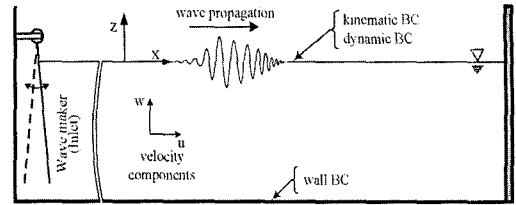


Fig. 1 Numerical wave tank

수치파수조는 Fig. 1 에 나타낸 것처럼 2 차원으로 구성되었다. 경계조건들과 좌표 및 속도성분들을 하나의 진행파와 함께 Fig. 1 에 함께 나타내었다. 조파기는 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 움직이는 벽으로 적용하였으며, 접선방향의 속도는 상대적으로 적다는 가정하에 법선방향의 속도성분만을 고려하였다. 유출부의 경계조건은 벽으로 하여 수치파수조 속의 유량은 일정하도록 고정시켰다. 공간보존의 법칙에 의해 법선방향의 속도에 의해 격자는 연속방정식과 공간보존의 법칙을 만족시키기 위해 이동하게 된다.

수치파 수조의 검증을 위해 입력값으로 주어진 규칙파 ($H=0.12[m]$, $T=2.0[s]$)에 대해서 격자의 크기를 체계적으로 변경시켰으며, 시간간격도 아울러 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 계산의 정도 및 수치계산으로 인해 야기되는 오차의 크기를 평가할 수 있다. 우선 격자크기에 따른 계산결과를 확인하기 위해 시간간격을 고정시키고 3 종류의 다른 격자를 생성시켰다. 파고는 수치파 수조의 조파기로부터 20[m] 떨어진 거리에서 측정하였으며 실험에서도 동일한 위치에서 파고를 측정해 비교하였다. 체계적으로 변화시킨 격자크기에 따른 파고의 측정치를 Fig. 2 에 보였다. 각 격자 형태에 따른 계산결과와의 차이는 약 4 배의 격차를 보였으며 이것은 이산화 과정에서 2 차항을 고려할 때 얻어지는 정도의 개선치와 상응하는 것을 확인 할 수 있었다.

시간간격에 따른 계산정도 확인을 위해 3 종류의 시간간격으로 계산을 수행하여 비교했으며 그 결과를 Fig. 3 에 보였다. 비정상유동의 계산을 위해 사용한 Euler 음해법(Implicit Euler method)은 1 차항 까지만 이산화시켰다.

이산화 과정에서 1 차항 까지만 고려한 결과

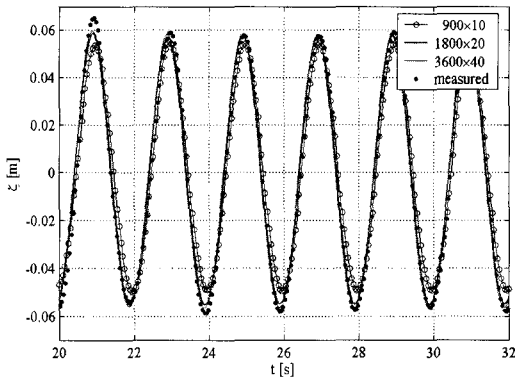


Fig. 2 Wave elevations with the grid variation

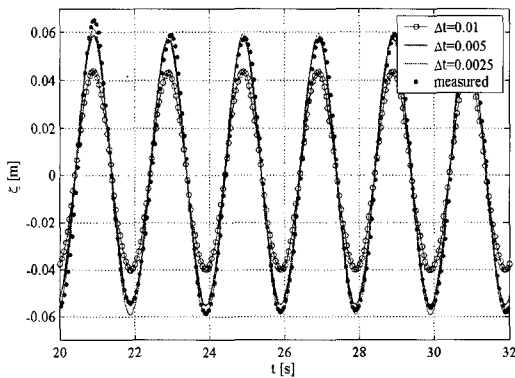


Fig. 3 Wave elevations with the time step variation

로 인한 정확도의 차이를 $\Delta t = 0.01[s]$ 와 다른 두 계산결과를 통해 명확하게 구별할 수 있다. 아울러 시간간격은 시뮬레이션과정에서 파고에만 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

이 두 가지의 검증계산을 통해 수치파 수조를 통한 시뮬레이션에서 Δt 의 증가로 인해 계산 정도가 낮아지는 것이 격자크기로 인한 정도의 저하 보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

4. 계산결과 및 고찰

비선형 규칙파의 파열(wave train)을 수치파 수조에서 생성하였고 이를 실험치와 비교하였다. 생

성시키고자 하는 목표파는 비선형성을 가진 설계파인 Stoke II 파를 기준으로 하였다. 제어시그널은 선형파 이론에서 파형을 나타내는 $\zeta = \zeta_a \cos(kx - \omega t)$ 를 이용하여 생성시켰으며, $\zeta_a = 0.15$ 및 $0.2[m]$ 로 주었다. 또한 각 파열에 있어서의 주기는 두 경우 모두 동일하게 $T=2.5[s]$ 를 사용하였다. 수치파 수조의 길이는 $L=150[m]$, 깊이는 $d=1.5[m]$ 로서 만들어져 있다. 시뮬레이션에 사용된 유체의 동점성계수 $\mu=1.0E-3[Ns/m^2]$ 및 밀도 $\rho=1000[kg/m^3]$ 를 상수로 주어 유동장 계산에서 고려하였다. Euler 유동의 계산에 있어서는 동점성계수를 0로 하여 계산을 수행하였다. 또한 수치파수조의 계산영역은 x 방향으로 1800 개, z 방향으로 20 개의 격자로 구성되어 있으며 시간간격 Δt 는 $0.005[s]$ 이다.

실험과 시뮬레이션에 사용된 제어시그널은 $\zeta_a = 0.15[m]$ 를 이용하여 얻어진 조파기의 변위이며, 변위로부터 계산된 조파기의 속도와 Fourier 스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 조파기의 속도는 수치파 수조의 유입부의 경계조건으로 사용하기 위해 계산되었으며, 또한 수치파 수조의 검증에서 사용되었던 것과 같이 파고는 조파기에서 부터 거리 $x=20[m]$ 에서 측정되었다. 이렇게 시뮬레이션을 통해 예측된 파고를 식을 통해 얻은

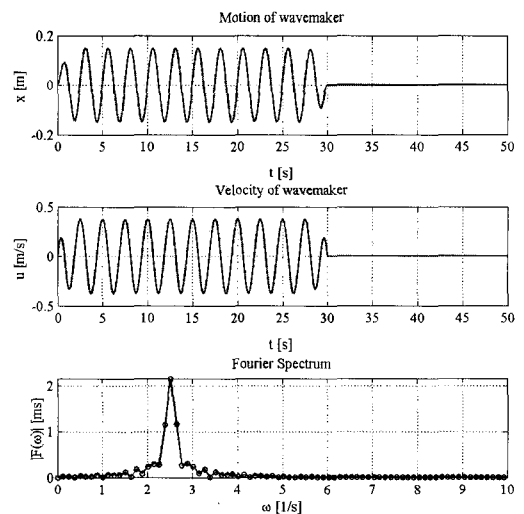


Fig. 4 Motion and velocity of wavemaker

계산값과 비교하였다.

Fig. 5 에 선형파 이론, Euler 유동, Stokes II 및 실험치를 Navier-Stokes 방정식을 적용한 수치파 수조의 결과치와 함께 시간범위 $t=20$ 부터 $t=30$ 까지의 영역 내에서 비교하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 Euler 유동으로 계산된 파고는 비점성유동의 특징으로 인해 Navier-Stokes 방정식보다 높게 나타났다. 실험결과와 가장 근접한 결과는 Navier-Stokes 방정식으로 시뮬레이션하여 얻은 파형이며, Navier-Stokes 방정식 결과 및 실험 결과 모두 비선형파인 Stokes II 파형 특징에 있어서는 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이러한 비선형 파형은 높은 파봉과 낮고 평활한 파저를 통해 그 특징을 명확하게 확인할 수 있다.

Fig. 6 은 transient 파가 위치에 따라 이동하는 모습과 함께 시뮬레이션 시작시간으로 부터 $t=30[s]$ 경과했을 때의 속도와 압력분포를 나타내었다. 이를 통해서 수면하의 속도장과 압력분포를 확인할 수 있으며 최대속도는 최대파고 일 때 파봉의 아래에서 발생한다는 것을 확인할

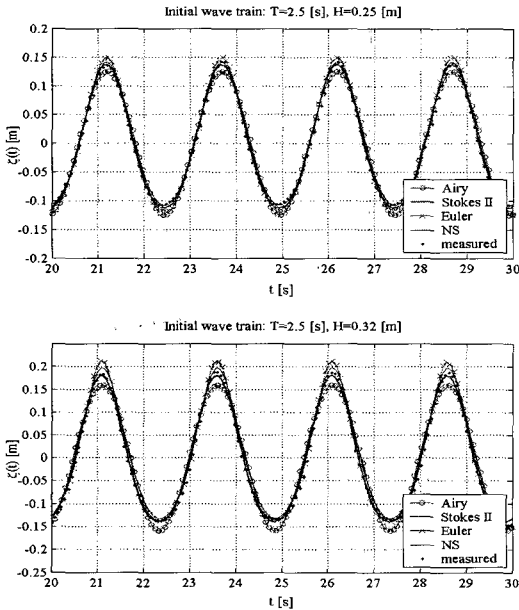


Fig. 5 Comparison of results of simulation with wave theories

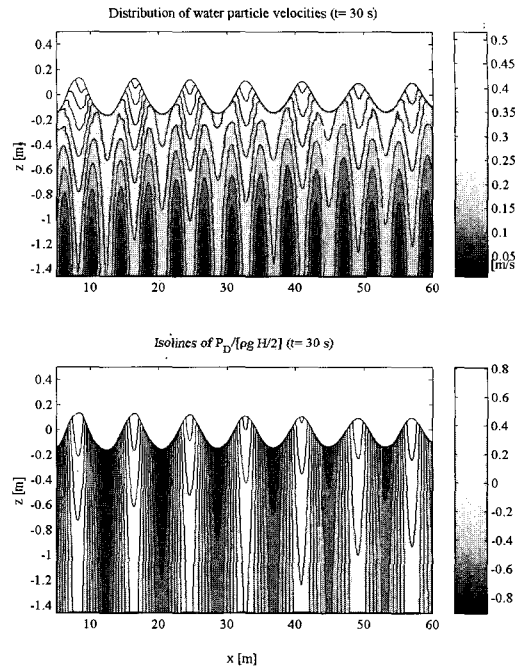


Fig. 6 Distribution of the particle velocities and dynamic pressure

수 있었다.

Navier-Stokes 방정식을 이용한 수치파 수조에서의 시뮬레이션은 IBM RS-6000 워크스테이션으로 7 CPU 시간이 소요되었다.

5. 결론

Navier-Stokes 방정식을 지배방정식으로 사용하여 수치파수조를 구현하였다. 조파기 제어함수를 통해 생성한 시그널을 이용하여 비선형설계파를 구현하였고 실험치 및 Stokes II 파의 이론으로 얻은 결과와 비교하였다. 수치계산을 통해 얻은 값들은 실험치와 잘 일치함을 보였으며 유동장아래의 유동특성을 정확하게 잘 보여주고 있다. 이 논문에서 구현된 수치파수조는 사용자가 정의하는 설계파의 생성 및 반복실험에 의하지 않고서도 수치적인 시뮬레이션을 통해 빠르고 정확하게 진행파가 생성하는 유동특성을 재

현할 수 있다. 이를 통해 실험에 소요되는 시간 및 비용을 최소화 할 수 있을 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

- 홍사영, 홍 섭, 김병현, 1996, "부유구조물 파랑 응답 해석", 대한조선학회 논문집, 제 33 권, 제 4 호, pp. 13-20.
- Demirdzic, I. and Peric, M., 1988, "Space conservation law in finite volume calculations of fluid flow," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 8, pp. 1037-1050.
- Haver, S and Andersen, O.J., 2003, "Freak Waves: Rare Realizations of a Typical Population or Typical Realizations of a Rare Population?," In Proceedings of the 10th int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE) Vol. III, pp. 123-130.
- Jeong, S.J., 2003 "A Study on the generation of nonlinear design-wave train in numerical wave tank," Technical university of Berlin, D83

- Patankar, S.V., 1980, Numerical Heat transfer and Fluid Flows, Hemisphere Publ. Cambridge, Mass.



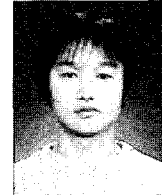
< 정성재 >



< 안희춘 >



< 신종근 >



< 최진 >