

중첩 격자계를 이용한 물체운동의 수치 시뮬레이션

박종천^{†*}, 전호환^{*}, 송기종^{**}

부산대학교 조선해양공학과^{*}, 현대중공업 선박해양연구소^{**}

Numerical Simulation of Body Motion Using a Composite Grid System

Jong-Chun Park^{*}, Ho-Hwan Chun^{*} and Ki-Jong Song^{**}

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University^{*}
Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.^{**}

Abstract

A CFD simulation technique has been developed to handle the unsteady body motion with large amplitude by use of overlapping multi-block grid system. The three-dimensional, viscous and incompressible flow around body is investigated by solving the Navier-Stokes equations, and the motion of body is represented by moving effect of the grid system. Composite grid system is employed in order to deal with both the body motion with large amplitude and the condition of numerical wave maker in convenience at the same time. The governing equations, Navier-Stokes (N-S) and continuity equations, are discretized by a finite volume method, in the framework of an O-H type boundary-fitted grid system (inner grid system including test model) and a rectangular grid system (outer grid system including simulation equipments for generation of wave environments).

In this study, several flow configurations, such as an oscillating cylinder with large KC number, are studied in order to predict and evaluate the hydrodynamic forces. Furthermore, the motion simulation of a Series 60 model advancing in a uniform flow under the condition of enforced roll motion of angle 20° is performed in the developed numerical wave tank.

※Keywords: Composite grid system(중첩격자계), Body motion with large amplitude(대진폭 물체운동), CFD(전산유체역학), 3D Numerical Wave Tank(3D 수치파동수조)

1. 서언

접수일자:2003년 7월 6일, 승인일자:2003년 8월16일

†주저자, E-mail:jcpark@pnu.ac.kr

Tel: 051-510-2480

선박이라고 하는 시스템은 규모가 크고 단가가 높기 때문에 시제선의 제작은 극도로 제한이 되며, 시제선의 제작이 가능하다고 하더라도 이들

구조물의 유체역학적인 성능을 모든 임의의 파랑 환경 하에서 실험에 의해 평가하기란 힘들다.

선박은 열악한 해상환경에 상시 노출되어 있으며, 슬래밍 등과 같은 여러 가지 비선형성이 강한 운동을 하게 되는데, 이는 선박의 안전성 면에 중대한 영향을 미친다. 실험실에서 관측되어지는 파랑은 여러 방향으로부터 에너지가 전달되는 다방향 불규칙 파의 특성을 갖고 있으며, 선박의 운동에 관한 응답특성은 실험역 파랑의 방향성에 의해 크게 변화한다. 또한 파랑 성분간의 상호간섭으로 인해 저주파 혹은 고주파의 서로 다른 형태의 공진 현상을 불러 일으켜 선박에 심각한 결과를 초래하기도 한다. 선박의 일생동안 경험할 것이라고 예상되는 대진폭의 선체운동에 대한 예측은 선박 설계에 있어 가장 중요한 요소이다.

지금까지 선박의 저항 및 운동 성능 및 하중/안전성의 예측과 평가에는, 종래 수조실험이 많이 이용되어져 왔지만, 일반적으로 막대한 비용과 시간을 필요로 하며 또한 실험 기술로부터의 제약과 척도(scale)영향을 받는다는 커다란 결점이 있다. 이에, 저비용, 고효율의 수치 시뮬레이션에 의한 접근은 필수 불가결하며 앞으로도 점점 더 그 중요성이 강조되어질 것이다. 특히, 선박설계에 있어서 Computational Fluid Dynamics(CFD) 기술을 이용한 Simulation based Design(SBD)은 비선형성 물리 현상의 이해를 기본으로 한 선형 및 해양 구조물의 비교 평가가 가능하며 이들의 최적화 설계와 안전성을 위한 내항 성능이 뛰어난 선박 설계가 가능하다.

과거 20여 년 간의 컴퓨터 능력의 실질적 향상과 수치 시뮬레이션 기술의 혁신적인 발달에 힘입어 CFD 기술을 이용한 다양한 수치 파랑수조의 기술이 제안되어 왔다(Miyata et al. 1985, Kodama 1985, Hino 1997, Tahara et al. 1999, 김 우전 등 2000 등). 하지만 지금까지의 연구는 선체를 고정한 채 일정 속도로 전진하는 경우가 대부분이었으며, 선체 운동을 동시에 취급한 예는 거의 없다. 또, 해양 구조물의 경우에 있어서도 외력인 파랑의 조건으로서도 미소 진폭 파의 단일방향 성분만을 고려한 예가 대부분이며, 쇄파 현상을 동반하는 실험역의 다방향 불규칙파의 파랑 환

경 조건을 디지털 파랑수조에서 재현하고 연구한 예는 아직 없다. 이에, 정수 중에서의 선체 저항 성능 추정 뿐 만이 아니라, 극한 해상의 설계 조건 하에서, 혹은 보다 실제적인 파랑 조건 하에서, 보다 큰 진폭의 선체 운동을 취급할 수 있는 핵심 기술 개발이 필요하며, 이를 위해서는 최첨단 디지털 파랑수조의 비선형성 시뮬레이터 개발이 필요하다.

본 연구에서는, 가까운 장래에 디지털 파랑수조의 구축을 목적으로, 대진폭의 물체운동을 시뮬레이션하기 위하여 중첩 격자계를 이용한 CFD 기술을 개발했다. 다목적 파랑환경을 재현할 수 있는 직교격자계(수치파랑수조)와 물체를 포함하는 내부의 물체적합 격자계(물체격자)를 서로 중첩하고, 물체 격자계만을 운동시킴으로써 대진폭의 물체운동을 표현하였다. 시뮬레이션 예로서, 2차원 원형 주상체의 병진 운동과 Series 60 선형의 대진폭(20°)의 횡동요를 시뮬레이션하였다.

2. 수치 시뮬레이션 기술

2.1 지배방정식

유동장의 지배방정식은 Navier-Stoks 방정식과 연속 방정식이며, 유한 체적법에 의해 이산화 된다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{v})\mathbf{u} = -\nabla \phi + \frac{1}{Re} \nabla \cdot [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] + \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} + \mathbf{K} \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{2}$$

여기서, $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ 는 속도벡터, \mathbf{v} 는 계산격자의 이동속도이며 본 연구에서는 $\mathbf{v} = 0$ 이다. 그리고 t 는 시간, ϕ 는 정수압을 포함한 압력으로 $\phi = p/\rho + gz$ 와 같이 정의되며, Re 는 레이놀즈 수, $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ 는 난류응력, \mathbf{K} 는 관성력을 포함한 외력을 각각 나타낸다.

$$\mathbf{K} = -2\mathbf{w}_0 \times \mathbf{u} - \mathbf{w}_0 \times (\mathbf{w}_0 \times \mathbf{r}) - \frac{d\mathbf{w}_0}{dt} \times \mathbf{r} - \frac{d\mathbf{V}_s}{dt} \tag{3}$$

윗 식의 우변의 항은 순서대로 코리올리력, 원심력, 각가속도에 의한 관성력, 병진가속도에 의한 관성력을 표시한다. 또한, V_0 는 부유체 고정좌표계 중심에서의 선속벡터, w_0 는 각속도, r 은 유체의 위치벡터를 의미한다. 단, 선체나 부유체의 운동을 포함하지 않는 경우 K 는 무시될 수 있다.

2.2 격자계

격자계는 중첩 격자계를 사용한다. 내부 격자계는 물체를 포함하는 격자계로서 O-O나 O-H 형태의 물체 적합 격자를, 외부 격자계는 H-H 형태의 단순한 직교 좌표계를 채용한다. 물체의 운동은 내부 격자 전체를 운동시킴으로써 표현하고 있으며 지배방정식의 대류항에는 내부 격자의 이동에 의한 이류 속도를 고려하고 있다. 한편, 외부 격자계는 수치수조로서 각종의 수치 파랑 환경 재현 장치가 장착되어져 있다.

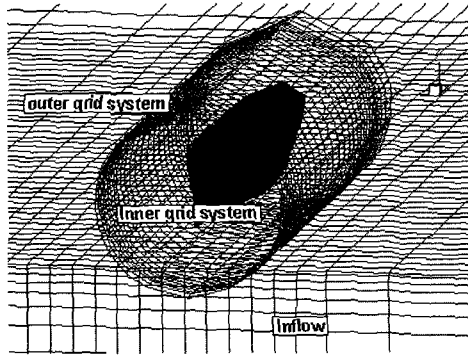


Fig. 1 Composite grid system.

2.3 계산 알고리즘

내부 격자계의 계산 알고리즘은 기본적으로 Park et al. (2001)과 같고, 외부 격자계의 경우는 Park et al. (1999)과 유사하다.

지배방정식은 유한 체적법에 의해 이산화 되며, 개량된 MAC법의 알고리즘을 이용하여 매시간 스텝의 경계 조건을 이용하여 풀리게 된다.

외부 격자에서 각 물리 변수는 엇갈림 격자 상에, 내부 격자에서는 격자 중앙에 정의되어 있다. 대류항의 차분에는 3차의 MUSCL형 상류 차분을 적용하며, 그 밖의 공간 차분에는 2차의 중심 차

분을 사용한다. 시간에 관한 차분에는 2차의 Adams-Bashforth 법을 적용한다. 압력 해법에는 SOR법을 이용한다. 난류 모델로는 Dynamic SGS 난류 모델(Germano et. al., 1991)을 적용한다.

쇄파 등의 비선형성이 강한 자유표면의 거동을 표현하기 위하여, 자유표면의 운동학적 조건은 식 (4)과 같이 밀도함수의 수송방정식을 풀어내는 밀도함수법(Miyata & Park, 1995)에 의해 만족시킨다.

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} + \nabla \cdot (uM_p) = 0 \tag{4}$$

여기서, M_p 는 전 계산영역에 정의되는 밀도함수이며 0과 1사이의 값을 취하게 된다. 즉, 자유표면을 경계로 하는 두 유체의 밀도함수 값을 각각 0과 1로 정의할 때, 자유표면은 0.5의 등가면으로 가정할 수 있게 된다.

한편, 자유표면의 동역학적 조건은 자유표면상의 압력이 0과 같다는 조건을 적용하였으며, 자유표면상의 속도 외삼과 Irregular Stars법(Chan & Street, 1970)을 이용해 만족시킨다.

2.4 격자간 보간법

격자간의 경계에 놓인 물리량들은 보간을 통해 정보를 교환하게 되는데 이에 대해 2차원인 경우 인근 4점을 사용하는 선형 보간의 경우와 9점을 사용하는 2차보간법을 각각 적용해 보고 타당성을 검토해 보았다. 선형 보간의 경우 Fig.2에서 보는 바와 같이

$$u_x = (1-\lambda)(1-h)U_0 + \lambda(1-h)U_1 + (1-\lambda)hU_2 + \lambda hU_3 \tag{5}$$

과 같고, 2차 보간의 경우는

$$u_x = U_0 + h \left(\frac{U_1 - U_2}{2} \right) + \lambda \left(\frac{U_2 - U_4}{2} \right) + \left[\frac{1}{2} h^2 (U_1 + U_3 - 2U_0) + \beta (U_2 + U_4 - 2U_0) + \frac{1}{4} h \lambda (U_5 - U_6 + U_7 - U_8) \right], \tag{6}$$

이 된다. 각 격자의 경계근방에 놓인 물리량들은

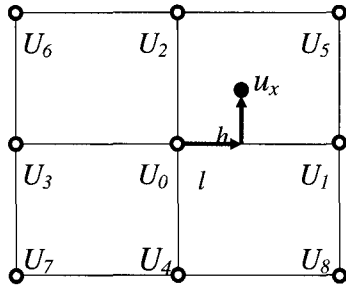


Fig. 2 Interpolation by 9-points.

이들 식에 의해 내삽되며, 내삽된 값들은 각 격자계의 유동장을 풀 때 경계 조건으로 주어지게 된다.

3. 물체운동의 시뮬레이션

3.1 2D 원형 주상체의 운동 시뮬레이션

본 연구에서 개발한 수치해석기법의 타당성과 정확도를 확인하기 위하여, 먼저 2차원 원형 주상체(반경 r)가 단일방향으로 운동하는 경우의 유동장을 해석해 보았다. 내부 격자계는 최대반경 R 을 갖는 O형 격자계를, 외부 격자계는 직각 격자계를 각각 사용하였다. 주상체는 Keulegan-Carpenter (KC) 수에 따라 진동을 하며, 본 연구에서는 $KC=0.1, 1, 2, 4, 10, 13, 20$ 의 7가지 경우에 대해 시뮬레이션하였다. 이때 레이놀즈 수는 1000으로 설정하였다.

격자간 보간법의 계산결과에 의하면, 1차보간과 2차보간의 차이는 두드러지지 않았으며, 내부격자계의 R 이 물체의 직경에 비해 작은 경우(즉, $R < 2r$)에는 오히려 1차 보간 쪽이 더 나은 결과를 보였다. 이는 내부 격자계의 격자 크기가 외부 격자의 크기에 비해 상대적으로 작은 경우, 경계면 상에서 보간에 사용되는 물리량들이 많아짐에 따라 불안정한 보간을 유기할 수 있기 때문이다. 즉, Fig.2에서와 같이 $U_5 \sim U_8$ 과 같은 점들이 격자간 경계에 포함되지 않을 경우, 이 값들은 주위에서 보간에 의해 구해진 값이거나 아니면 다른 불안정한 값들을 사용하여 이미 구해진 불안정한 값들이 될 우려가 있다. 따라서 이러한 경우 정확

도를 낮추어 1차보간법을 적용하는 것이 더 유리할 수 있다. 본 연구에서는 이후 1차보간법을 적용하기로 한다.

Fig.3은 1차보간법에 의해 얻어진 단일 흐름을 받는 주상체 주위의 압력장을 나타낸다. 격자간 경계($2r$)주위의 압력분포가 연속적으로 표현이 되고 있다.

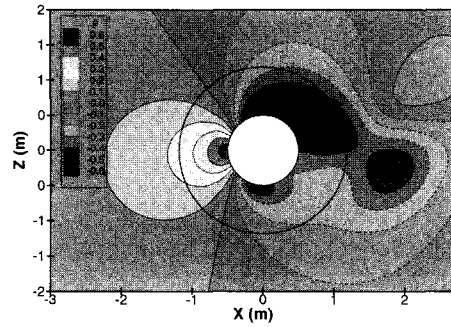


Fig. 3 Typical contour of pressure field for 2D case using an overlaid grid system.

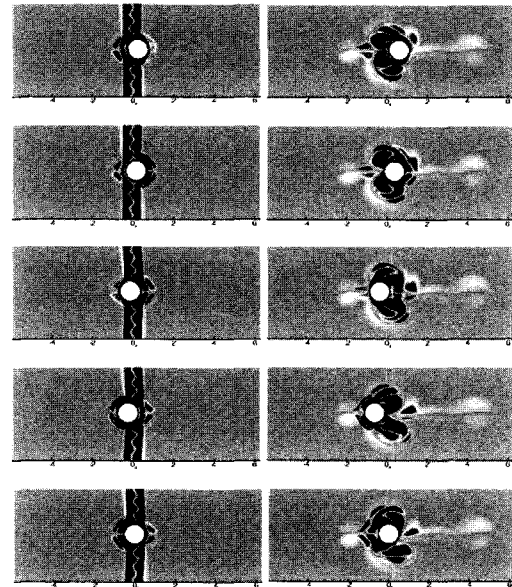


Fig. 4 Time-sequences of vortical fields around a circular cylinder oscillating horizontally with $KC=1$ (left) and 4 (right).

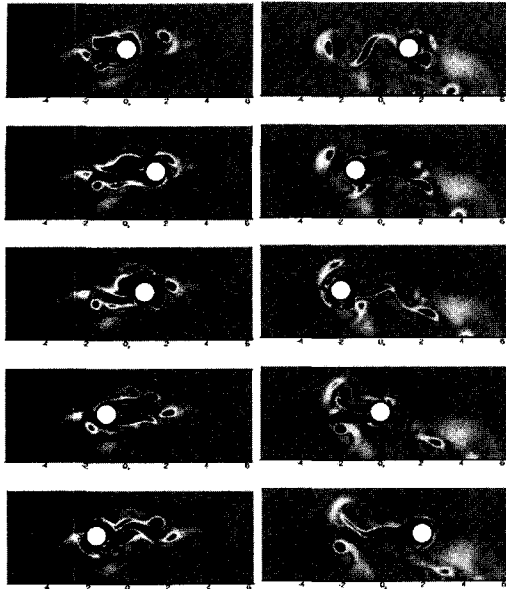


Fig. 4 Continued, with KC=10(left) and 13(right).

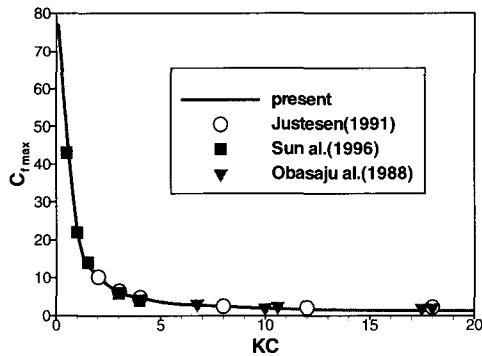


Fig. 5 Comparison of the computed in-line force coefficients, C_{fmax} , as a function of KC.

Fig.4에는 네 가지의 다른 KC 수로 진동하고 있는 주상체 주위의 와류장의 시간변화를 나타낸다. KC 수가 비교적 작은 경우($KC < 10$), 물체주위에는 상하 대칭적인 와류특성이 보이며, KC 수가 큰 경우에는 비대칭 특성이 강해지며 동시에 비선형성 특성이 두드러진다. 각각의 진동상태에서 주상체의 운동방향에 작용하는 항력계수의 변화를

타 계산결과와 비교하여 Fig.5에 나타낸다. 여기서, 타 계산결과와 비교하여 물체를 고정하고 주위의 유체장의 흐름을 제어하여 얻은 결과이다. 이로부터 본 방법은 $KC \geq 10$ 의 대진폭 변위 운동에 따른 운동특성을 잘 표현하고 있다.

3.2 Series 60 모형선의 대진폭 운동 시뮬레이션

3차원의 시뮬레이션 예로써, 일정 속도 ($Fn=0.316$)로 전진하는 Series60 모형선 ($C_b=0.6$) 주위의 흐름장을 시뮬레이션하였으며, 단일 격자계(Park et al. 1999)를 사용한 경우와 비교하였다. 두 경우 모두 내부 물체 격자계는 O-H형의 격자계를 채용하고 있으며, 동일한 크기의 내부 계산 영역만을 비교해 볼 때 단일 격자계와 중첩 격자계의 격자 크기 및 격자 수는 동일하다. 이때, 레이놀즈 수는 10^6 이다.

Fig.6은 모형선이 일정속도로 항주할 때 생성되는 파형을 나타내며, 아랫 그림의 빨간 실선은 Interface의 위치를 나타낸다. 다중격자계의 경우 물체에서 멀리 떨어진 곳에서의 파도의 재현이 단일 격자계에 비해 뛰어나 있음을 알 수 있다. 이는 중첩 격자계의 경우 외부 격자계가 물체로부터 멀리 떨어진 곳에서 동일한 격자 크기를 갖고 동일한 정확도를 갖기 때문이라 할 수 있다.

Table 1에는 저항 계수의 값을 비교하였다. 전 저항의 값에는 큰 차이는 없었으나, 중첩 격자를 채용한 경우 다소 실험값에 근접해 있음을 알 수 있다.

다음은, 상기조건하에서 일정속도로 항주하며 20° 의 대진폭 강제 횡동요를 하는 경우의 수치 시뮬레이션을 행했다. Fig.7에는 운동중의 모형선 근처의 압력장을 나타내며, 그림중의 빨간 실선은

Table 1 Comparison of total resistance.

	C_p	C_f	C_t
CFD (single)	2.20×10^{-4}	2.38×10^{-4}	4.58×10^{-4}
CFD (overlaid)	2.15×10^{-4}	2.44×10^{-4}	4.59×10^{-4}
EFD	2.07×10^{-4}	2.99×10^{-4}	5.06×10^{-4}

로 표시된 반 원호는 Interface의 위치를 나타낸다. 대진폭의 강제운동에도 불구하고 Interface 근처의 물리량은 연속적으로 풀려져 있음을 알 수 있다. Fig.8은 강제운동 중 선체에 작용하는 모멘트의 시간변화를 나타낸다.

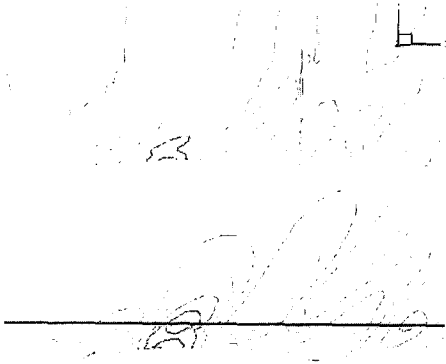


Fig. 6 Wave height contours around a Series60 model advancing at $Fn=0.316$ computed by a single-grid system(above) and a composite grid system (below).

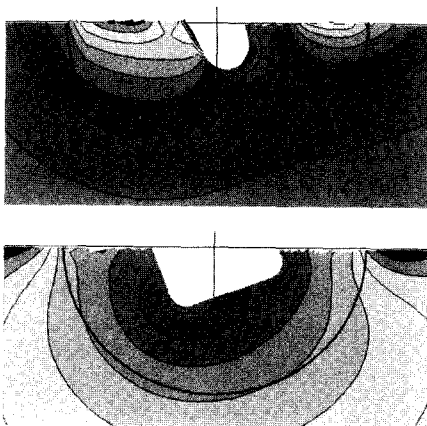


Fig. 7 2D snap-shot of pressure field around Series60 ($C_b=0.6$) model advancing at $Fn=0.316$ with 20 degrees of forced roll motion; near bow SS1.5(above) and at midship(below).

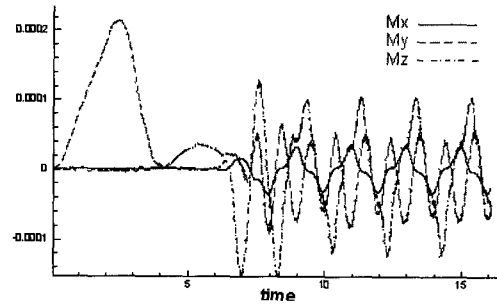


Fig. 8 Time-series of simulated moments.

4. 결 언

대진폭의 물체운동을 시뮬레이션하기 위하여 중첩 격자계를 이용한 CFD 기술을 개발했다. 다목적 파랑환경을 재현할 수 있는 직교 격자계(수치 파랑수조)와 물체를 포함하는 내부의 물체적합 격자계(물체격자)를 서로 중첩하고, 물체 격자계만을 운동시킴으로써 대진폭의 물체운동을 표현하였다. 이때 격자간의 경계면에서는 선형보간법에 의해 물리량의 정보를 교환하도록 하였다. 시뮬레이션 예로서, 2차원 원형주상체의 병진운동과 3차원 Series 60 선형의 20° 대진폭 횡 운동을 시뮬레이션하였다. 결과적으로 본 시뮬레이션 기법에 의해 대진폭의 물체 운동 시뮬레이션이 가능하다는 사실을 알 수 있었다.

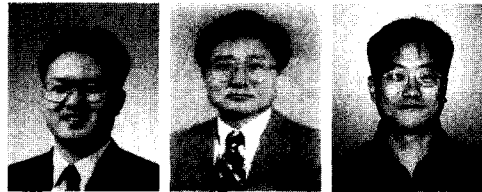
후 기

본 연구는 해양수산부 해양한국발전프로그램(KSGP)의 연구개발사업과 한국과학재단 첨단조선공학 연구센터(ASERC)의 지원 하에 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- 김우전, 김도현, 반석호 2000, "유한체적법을 이용한 상선주위의 난류유동 계산에 관한 연구", 대한조선학회논문집, Vol.37-4, pp.19-30.
- Chan, R.K.C. and Street, R.L. (1970), "A Computer Study of Finite Amplitude Water Waves", J. of Computational Physics, Vol. 6,

- pp 68-9.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. & Cabot, W.H. (1991), "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model", Phys. Fluids, A Vol. 3, pp 1760-1765.
 - Hino, T. 1997, "An unstructured grid method for incompressible viscous flows with a free surface", AIAA-97-0862,.
 - Justesen, P. 1991, "A numerical study of oscillating flow around a circular cylinder", J. of Fluid Mech., Vol.222, pp.157-196.
 - Miyata, H., Nishimura, S. & Masuko, A. 1985, "Finite-difference simulation of nonlinear waves generated by ship of arbitrary three-dimensional configuration", J. of Computational Physics, Vol.60- 3, pp.391-436.
 - Miyata, H. & Park, J.C. 1995, "Ch. 5 Wave Breaking Simulation", Advances in Fluid Mechanics, Potential flow of fluids, edited by M. Rahman, Computational mechanics publications, pp.149-175.
 - Obasaju, E.D., et al. 1988, "A study of forces, circulation and vortex patterns around a circular cylinder in oscillating flow", J. of Fluid Mech., Vol. 196, pp.467-494.
 - 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., Ooga, T. & Gotoda, K. 2001, "Motion Simulation of a Sailing Boat in Oblique Waves with Three Degrees of Freedom", J. Society of Naval Architects Japan, vol.190, pp.191-199. (Japanese)
 - Sun, X. & Dalton, C. 1996, "Application of the LES method to the oscillating flow past a circular cylinder", J. of Fluids and Structures, Vol.10, pp.851-872.
 - Tahara, Y. 1999, "Wave Influences on Viscous Flow around a Ship in Steady Yaw Motion", J. Society of Naval Architects Japan, vol.186, pp.157-168.



< 박종천 > < 전호환 > < 송기종 >