규칙파중 전진하는 선박의 유체역학적 응답에 대한 비정상 수치해석

박일룡^{†*}, 김광수*, 김진*, 반석호*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

Unsteady RANS Analysis of the Hydrodynamic Response for a Ship with Forward Speed in Regular Wave

Il-Ryong Park^{†*}, Kwang-Soo Kim*, Jin Kim* and Suak-Ho Van*

Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI*

Abstract

The present paper provides a CFD analysis of diffraction problem for a ship with forward speed using an unsteady RANS simulation method, a WAVIS code. The WAVIS viscous solver adopting a finite volume method has second order accuracy in time and field discretizations for the RANS equations. A two phase level-set method and a realizable $k-\epsilon$ turbulence model are adopted to compute the free surface and to meet the turbulence closure, respectively. To validate the capability of the present numerical methods for the simulation of an unsteady progressive regular wave, computations are performed for three grid sets with refinement ratio of $\sqrt{2}$. The main simulation is performed for a DTMB5512 model with a forward speed in a regular head sea condition. Validation of the present numerical method is carried out by comparing the present CFD results with available unsteady experimental data published in the 2005 Tokyo CFD Workshop: resistance, heave force, pitch moment, unsteady free surface elevations and velocity fields.

※Keywords: Ship diffraction problem(선박산란문제), Unsteady RANS flow(비정상 RANS유동), Incoming wave(입사파), Level-Set Method(LS방법), Finite volume method(유한체적법)

1. 서론

최근 설계단계에서 CFD(computational fluid

dynamics)에 대한 신뢰와 그 활용도가 높아지면
서 CFD의 연구는 선박의 조파문제와 난류유동을
보다 정확히 해석하기 위한 RANS(Reynolds
Averaged Navier-Stokes)방정식의 수치해석법에
많이 집중되어 있다. 이러한 노력의 궁극적 목적
은 선박조종과 파랑중 선박운동 문제에서 점성의
영향이 지배적인 선체주위 유동과 선체에 작용하

접수일: 2007년 11월 21일 승인일: 2008년 2월 10일

† 교신저자: irpark@moeri.re.kr, 042-868-7267

는 유체력, 그리고 선체와 입사파간의 강한 비선형 간섭들을 효과적으로 예측하려는 것이다. 자유수면을 포함한 점성유동 해석에 RANS기법을 적용한 국내 연구현황을 간략히 정리하면 다음과 같다. 유한체적법(FVM)과 경계추적법(interface tracking method)을 이용한 Kim(2000), 유한차분법(FDM)과 경계추적법을 이용한 Kim and Kim(2001), 유한차분법과 LS(level-set)법을 이용한 Hong et al.(2004), 유한차분법과 MAC(marker and cell)을 이용한 Lee et al.(2004), 유한체적법과 LS법을 이용한 Park et al.(2004), Kim and Park(2005), 그리고 Kim et al.(2005)의 연구들이 있으며, 유한체적법과 VOF(volume of fluid)법을 이용한 Park et al.(2005) 등의 연구사례가 있다. 상기 대부분 연구들은 선박의 직진 상황만을 고려하고 있다. 반면, Park et al.(2003)은 강제 횡요(roll) 조건을 가지고 전진하는 선박의 점성유동을 중첩격자법(overset grid method)과 밀도함수법(density function method)을 이용하여 해석한 바가 있다. 한편, 파랑중 선박 운동과 선체에 작용하는 유체력 계산에 현실적으로 적용되고 있는 포텐셜유동(potential flow) 해석법에 관한 국내연구로는 Lew and Kim(1986), Choi and Rhee(1988), Chun et al.(1992)과 Kim(2000) 등의 예가 있다.

여러 연구기관에서 개발되고 있는 CFD코드들을 보다 체계적으로 검증하고 발전시키기 위한 노력의 일환으로서 1994년 Tokyo CFD workshop으로부터 시작하여 2000년 Gothenburg CFD workshop, 2005년 Tokyo CFD workshop (Hino, editor, 2005)이 개최되었다. 특히, 2005년 Tokyo CFD workshop에 발표된 대부분의 CFD결과들을 살펴보면 벤치마킹을 위해 선정된 다양한 선형(hull form)들에 대한 정상상태(steady state) 난류 경계층과 선체주위 자유수면 변화 그리고 선체에 작용하는 유체력에 대한 예측 수준이 크게 높아졌음을 발견할 수 있다. 이는 지난 시간동안 CFD코드들이 여러 면에서 개선되었고, 사양이 높아진 PC나 병렬컴퓨터를 사용할 수 있게 되면서 이전보다 많은 수의 격자점을 사용할 수 있었기 때문이다. 현재, 정상유동 문제에 대한 검증을 바탕으로 선박의 비정상(unsteady)유동 문제에 대한

CFD의 검증이 계속 수행되고 있다. 특별히, 비정상 선박조종 문제에 대해 CFD를 검증할 체계적인 모형시험 데이터가 미국 IIHR, 한국 MOERI, 덴마크 FORCE Technology, 이탈리아 INSEAN, 일본 NMRI, 독일 HSVA, 네덜란드 MARIN, 프랑스 BEC, 폴란드 CTO, 불가리아 BSHC 등에 의해 공동으로 구축되고 있으며, 덴마크 코펜하겐에서 개최되는 SIMMAN2008에서 CFD결과들과 함께 발표될 예정이다. 2005년 Tokyo CFD workshop의 경우 규칙파(regular wave)중 전진하는 DTMB5512선형에 대한 모형시험 결과가 벤치마크 데이터로 제공된 바가 있다.

본 논문은 한국해양연구원/해양시스템안전연구소(MOERI)에서 개발된 기존 WAVIS프로그램을 비정상 RANS시뮬레이션에 적합하도록 개선하여 선수파(head sea)중에서 전진하는 DTMB5512선형의 산란문제(diffraction problem)에 적용한 결과를 소개하고 있다. 참고로, 최근 WAVIS는 정상 또는 비정상유동 문제 해석시 많은 격자수 사용으로 소요되는 방대한 계산시간을 효과적으로 줄이기 위해 MPI(message passing interface)병렬처리 기법을 도입하고 있다(Kim et al. 2006). 수치해석 결과에서는 먼저, 제한된 파수조(wave flume) 내 규칙파 진행문제에 대한 수치계산을 수행하여 WAVIS가 도입하고 있는 LS법과 비정상 해석기법들을 검증하였다. 마지막으로 DTMB5512선형의 산란문제에서 선체에 작용하는 힘과 모멘트, 그리고 각 힘들에 대한 조화분석(harmonic analysis) 결과, 선체주위의 파형분포와 선미 반류분포에 대한 각각의 모형시험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 본 수치기법의 타당성을 검증하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

수치해석을 위한 기본 좌표계는 선체의 진행방향과 반대방향을 x , 중력과 반대방향인 연직 상방향을 z , 그리고 우현으로 향하는 y 의 Cartesian 직교 좌표계이다. 좌표계의 원점은 선체 중심면(center plane)과 중앙면(midship), 그리고 정수면(calm free surface)이 만나는 점에 위

치시켰다. 공기와 물을 모두 포함하는 비압축성 난류 유동장에 대한 지배방정식인 연속방정식과 표면장력의 영향을 제외한 RANS방정식의 적분형태는 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_S \rho u_i n_i dS = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i u_j n_j dS = \\ \int_S (\tau_{ij} n_j - p n_i) dS + \int_{\Omega} \rho b_i d\Omega \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 Ω 는 면 S 의 경계를 가지는 검사체적(control volume)이며, n_i 는 단위 법선벡터(n_x, n_y, n_z)를 나타낸다. ρ 는 유체밀도이며, u_i 는 각 좌표축 방향의 유체속도 성분(u, v, w)을 나타낸다. τ_{ij} 는 점성과 난류에 의한 유효점성이며, p 는 압력을 나타낸다. 그리고 b_i 는 각 좌표 축 x_i 방향의 단위 질량당 체적력을 나타낸다. 지배방정의 모든 변수는 선속 U_{∞} , 선체 길이 L_{pp} , 그리고 물의 밀도 ρ_w 로 무차원화 되어있다.

유효점성 τ_{ij} 는 Boussinesq의 isotropic eddy viscosity model을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_{ij} = \mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (3)$$

여기서 δ_{ij} 는 Kronecker's delta를 나타내고, k 는 난류의 운동에너지 그리고 μ_e 는 난류 와점성계수(turbulent eddy viscosity) μ_t 와 유체의 운동학적 점성계수 μ 를 합한 유효점성계수를 나타낸다.

난류 와점성계수 μ_t 를 계산하기 위해 난류모형으로 realizable $k-\epsilon$ model(Shih et al. 1995)과 Launder and Spalding(1974)의 벽함수(wall function)기법을 도입하였다.

WAVIS코드는 지배방정식에 대한 기본 수치해석 방법으로 유한체적법(finite volume method)을 도입하고 있다. 시간적분법으로 2차 정도의 Three-time-level method(Ferziger and Perić, 1996)을 사용하였으며, 지배방정식의 대류항과 확산항은 3차 정도의 MUSCL(Monotonic Upstream Centered Scheme for Convection Laws, Van Leer 1979) 방법과 2차 정도의 중앙차분법

(central difference scheme)을 이용하여 각각 이산화하였다. 연속방정식을 만족시키기 위한 속도-압력의 연성은 SIMPLE(Ferziger and Perić 1996) 알고리즘을 통해 수행하였다. 최종적으로 이산화된 지배방정식에 대한 선형 연립방정식의 해는 SIP(Strongly Implicit Procedure)기법을 사용하여 구하였다(Stone 1968).

본 논문에서 지면상 제한으로 언급하지 못하는 상세한 수치 이산화기법은 Kim et al.(2000), Kim et. al.(2002), Ferziger and Perić(1996)의 문헌을 통해 볼 수 있다.

2.2 LS법(Level-Set Method)

WAVIS는 입사파와 선체가 야기하는 자유수면의 움직임을 해석하기 위해 이상(two phase) LS법을 도입하고 있다. 본 LS법의 개념은 Sussman et al.(1997)과 동일하지만, LS 이송방정식에 대한 수치기법은 유한체적법에 근거한 암시적(implicit) 접근법을 사용하고 있다. LS법은 물과 공기영역 그리고 두 유체의 경계인 자유수면을 LS함수 $\phi(x_i, t)$ 를 도입하여 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \phi(x_i, t) &> 0, \text{ if } x_i \in \text{water} \\ \phi(x_i, t) &< 0, \text{ if } x_i \in \text{air} \\ \phi(x_i, t) &= 0, \text{ if } x_i \in \text{free surface} \end{aligned} \quad (4)$$

함수 $\phi(x_i, t)$ 는 다양한 형태로 정의할 수 있지만, 일반적으로는 자유수면으로부터 x_i 까지 계산된 법선(normal) 거리를 사용할 수 있다. 두 유체의 밀도와 점성계수는 각 유체영역에서 $\phi(x_i, t)$ 의 함수로 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho(\phi) &= \rho_a + (\rho_w - \rho_a)H(\phi) \\ \mu(\phi) &= \mu_a + (\mu_w - \mu_a)H(\phi) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, (ρ_w, μ_w) , (ρ_a, μ_a) 는 각각 물과 공기의 밀도와 점성을 나타내고, $H(\phi)$ 는 Heaviside함수이며 $H(\phi > 0)=1$, $H(\phi < 0)=0$, $H(\phi = 0)=0.5$ 의 값을 갖는다.

자유수면을 경계로 식(5)와 같이 수학적으로 엄밀히 정의된 밀도와 점성에 대한 식들은 수치해석을 위해서 불연속성(discontinuity)이 제거된 Heaviside함수를 도입하여 수정되어야 한다. 다음은 수치해석을 위해 미소영역($-\epsilon \leq \phi \leq \epsilon$)에서 Heaviside함수가 연속성(continuity)을 가지고 변

하도록 수정된 비선형 식을 나타낸다(Sussman et al. 1997).

$$H_{\epsilon}(\phi) = \begin{cases} 0 & \phi < -\epsilon \\ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\phi}{\epsilon} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\phi}{\epsilon}\right) \right) & |\phi| \leq \epsilon \\ 1 & \phi > \epsilon \end{cases} \quad (6)$$

여기서, $\epsilon=2\Delta h$ 를 사용하였다. 본 논문은 자유수면을 효과적으로 해석하기 위해 자유수면을 아래위로 감싸는 등간격 격자분포 영역을 유지시켰는데, 이때 Δh 는 그 영역에서 z방향 격자간격을 나타낸다.

LS함수 $\phi(x_i, t)$ 에 대한 이송방정식을 다음과 같이 적분 형태로 바꾸고 유한체적법으로 해를 구하였다.

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \phi d\Omega + \int_S \phi u_i n_i dS = 0 \quad (7)$$

식(7)의 시간적분법은 지배방정식 해법과 같이 2차 정도의 Three-time-level법을 사용하였으며, 대류항은 3차 정도의 MUSCL(Monotonic Upstream Centered Scheme for Conservation Laws, Van Leer 1979)법으로 이산화 하였다. 일반적으로 복잡한 형상을 가진 물체주위의 유동해석에 사용되는 격자계의 비직교성과 비균일성이 강할 경우 식(7)의 해는 수렴에 영향을 줄 수 있는 수치적 노이즈(noise)를 포함할 수도 있다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위해 실제 파고의 감쇠를 거의 일으키지 않으면서 비물리적 수치파를 효과적으로 제거해 주는 5점 Chebyshev smoothing scheme을 사용하였다(Xu 1992).

매 시간 자유수면 위치에 대한 거리함수인 LS함수 분포를 정확히 유지시키기 위해 다음과 같은 별도의 쌍곡선 방정식을 유한차분법(finite difference method)을 통해 풀었다(Sussman et al. 1997).

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \text{sign}(\phi_o)(1 - |\nabla \phi|) \quad (8)$$

여기서 τ 는 가상시간(dummy time)을 나타내고, ϕ_o 는 주어진 시간(t)에서의 LS함수로서 초기조건이 된다.

식(8)에 대한 시간적분은 Euler explicit법을 사

용하여 수행했으며, 우변 항은 2차 정도의 ENO법(Essentially Non-Oscillatory scheme, Harten et al. 1987)으로 이산화 하였다. 가상시간 간격은 $\Delta \tau=0.5\Delta h/10$ 을 사용했으며, 4회의 반복계산만으로도 영역 $(-\epsilon \leq \phi \leq \epsilon)$ 내에서 만족할 만한 해를 얻을 수 있었다.

2.3 입사파 모델

입사파 모델로서 선형파이론(linear wave theory)에서 유도된 규칙파의 파고와 속도분포 식(Newman 1977)을 사용하였다. 입사파의 경계조건으로서 선체의 상류에 있는 유동장의 입구면(inlet surface)에 LS함수와 함께 다음 식들을 적용하였다.

$$\phi(x, y, z, t) = \zeta(x, y, z, t) - z \quad (9)$$

$$\zeta(x, y, z, t) = A \cos(k_w x - 2\pi f t) \quad (10)$$

$$u(x, y, z, t) = U_{\infty} + \frac{A}{Fr} \sqrt{k_w} e^{k_w(z + \min(\phi, 0))} \cos(k_w x - 2\pi f t) \quad (11)$$

$$w(x, y, z, t) = \frac{A}{Fr} \sqrt{k_w} e^{k_w(z + \min(\phi, 0))} \sin(k_w x - 2\pi f t) \quad (12)$$

여기서, 각각 A 는 파진폭(wave amplitude), k_w 는 파수(wave number, $2\pi/\lambda$), λ 는 파장(wave length), f 는 조우 진동수(encounter frequency, $1/\lambda + 1/(Fr\sqrt{2\pi\lambda})$), Fr 은 Froude 수($U_{\infty}/\sqrt{gL_{pp}}$)를 나타낸다.

수치계산에서 유동장 전체에 대한 초기조건으로서 $t=0$ 에 대한 상기 식들을 사용하였다. 유동장 입구 경계면에서 입사파 모델을 적용하는 본 방법은 모형시험과 같이 직접적인 조파기(wave maker)를 사용하여 정수상태(still water)로부터 시작하여 점진적으로 목적된 파를 생성하는 접근법보다 본 논문에서 풀고자하는 문제에 보다 효과적이다.

3. 수치해석 결과 및 검증

주어진 규칙파에 대한 선박의 산란문제를 해석하기에 앞서, 제한된 폭을 가진 파수조에서 진행

하는 규칙파 시뮬레이션에 본 수치기법을 적용하고 해석해와 비교하여 그 정도를 검증하였다.

선박의 산란문제에 사용된 선형은 축척비(scale ratio)가 46.6인 DTMB5512모형이다. 이 선형에 대한 체계적인 정상 및 비정상 모형시험 결과들은 2005 Tokyo CFD Workshop(Hino, editor, 2005)에 참가한 각 기관의 CFD기법과 그 해석결과에 대한 검증용으로 제공된 바가 있다. 본 논문에서 검증용으로 사용된 비정상 모형시험 결과는 미국 Iowa대학의 IHR 예인수조에서 계측된 자료들이다 (Gui et al. 2002, Longo et al. 2002).

3.1 규칙파 진행문제

유동장 영역이 $0.0 \leq x \leq 4.0$, $-0.2 \leq y \leq 0.2$, $-1.0 \leq z \leq 0.17$ 인 파수조에서 Froude수 $Fr=0.25$, $Re=4.0 \times 10^6$ 이며, 파장 $\lambda=1.0$, 파진폭 $A=0.004$ 인 규칙파의 시간진행을 계산하였다. 여기서, 수조의 좌우면, 윗면 및 바닥면은 대칭면(symmetry surface) 경계조건으로 처리하고, 입구와 출구는 2.3절의 입사파 조건을 부과하였다. $L_{pp}=1$ 로 설정하였다. 계산결과에서는 격자수 변화와 시간적분법에 따른 해의 변화를 선형파이론에서 얻은 해석해와 비교하였다.

수치계산에 사용된 격자계는 coarse grid ($150 \times 15 \times 40=90,000$), medium grid ($212 \times 15 \times 57=181,260$), 그리고 fine grid ($300 \times 15 \times 80=360,000$)이다. 여기서, 격자수 및 간격에 대한 변화 비율(grid refinement ratio)은 $\sqrt{2}$ 이다.

각 격자계는 x 방향과 y 방향으로 등간격 분포를 가지며, z 방향에 대해서는 파수면(wave surface)을 포함한 $-0.012 \leq z \leq 0.012$ 영역 내에서만 등간격 분포를 가지도록 하였다. Coarse grid는 파장당 38개, 파의 진폭당 6개의 격자점, medium grid는 각각 53개와 9개의 격자점, 그리고 fine grid는 각각 75개와 12개의 격자점 해상도를 가진다. 이 때 자유수면인 zero-level-set을 포함하는 LS함수의 변화율 두께(ϵ)는 각 격자계에서 파 진폭에 들어간 격자점들 사이 간격의 2배인 각각 0.0014, 0.0009, 0.0007이다. 최종적으로 병렬계산을 위해 모든 격자계는 동일하게 10개의 블록으로 나뉘었다.

Coarse, medium, 그리고 fine격자들에 대한 수치해석에 사용된 시간간격은 모두 동일하며, $\Delta t=0.001$ 이다. 시간적분법으로는 2차 정도인 Three-time-level법을 기본적으로 사용하지만 1차 정도인 Euler implicit법도 fine grid 해석시 적용하여 그 결과를 함께 비교하였다.

매 시간단계에서 수행된 비정상 해를 얻기 위해 지배방정식들의 잔여오차(residual)가 $1.0E-04$ 보다 작을 조건을 만족할 때까지 반복 계산을 수행하였다. 일반적으로 수렴이 늦은 압력방정식에 대해서는 최대 500회 반복 조건을 두었다. 이 때 속도, 압력 및 난류변수들에 대한 하향완화계수(under-relaxation factor)는 동일하게 0.9를 사용하였으며, 속도-압력-난류방정식을 푸는 전체 과정(outer iteration)을 2회 반복하도록 하였다.

모든 계산은 $t/T=3$ 동안 수행하였다. 여기서, 주어진 규칙파의 주기 $T=0.3850$ 이다. Fine grid(10block, 0.36M grid points)에 대한 소요 계산시간은 Linux PC cluster 10개의 Pentium IV 3.2GHz CPU를 사용해서 1.48시간이었다.

Fig. 1은 $t/T=3$ 에서 세 격자계로부터 얻은 파형 결과를 비교하고 있다. Coarse grid의 결과의 경우 비교적 큰 수치오차로 인해 다른 두 결과보다 하류로 갈수록 파의 진폭이 줄어드는 현상을 보여주고 있다. Fine grid의 결과는 파정(wave crest)에서 파고대비 2%정도, 파저(wave trough)에서 1%정도 파진폭이 증가된 현상을 보이고 있다. 위상(phase)차이의 경우 하류에서 2.5%정도 길어진 것을 볼 수 있다. 이는 Reynolds수 효과, 즉 점성의 영향과 미소한 비선형 영향의 결과로 나타난 것으로 판단된다. 다음 절에서 소개될 3차원 선체와 입사파와의 산란문제에 대한 수치해석 결과로부터 앞서 결론을 내린다면, 이 정도의 자유수면 오차는 본 선박 산란문제에서 수용할 수 있는 정도로 판단된다. 결과적으로 파장당 50개 이상, 파진폭당 12개 이상의 격자점을 사용할 경우 타당한 수치해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 2는 $t/T=3$ 에서 fine grid결과 중 Euler implicit법과 Three-time-level법으로 계산된 파형을 비교하고 있다. 이 결과는 시간적분법 정확성의 중요도를 잘 보여주고 있다. 그러나 2차 정도

이상의 시간적분법들은 정도에 따라 계산시점 이전의 여러 시점의 결과가 필요한데, 문제는 각 시점의 유체상(fluid phase)이 서로 다를 수 있다. 이런 경우 수치적으로 특별한 처리법이 요구되며, 향후 본 유동해석 프로그램도 더 정확한 시간적분해를 구하기 위해 이러한 방법을 도입할 예정이다.

Fig. 3은 $t/T=3$ 시간에서 fine grid에서 계산된 규칙파의 3차원 등고선 분포를 보여주고 있다. 앞서 2차원 파형결과에서 보였듯이, y방향에 대한 외곡과 파고의 감소 없이 계산이 잘 이루어진 것을 나타내 보이고 있다.

Fig. 1 Wave profiles for three grids at $t/T=3.0$

Fig. 2 Wave profiles for two time integration methods at $t/T=3.0$

Fig. 3 3D view of the progressive regular wave at $t/T=3.0$

3.2 선박 산란문제

Fig. 4 DTMB model 5512

Table 1 Main parameters of the DTMB5512

DTMB 5512 (scale ratio = 46.6)	
Length LPP	3.048 m
Draft T	0.132 m
Beam B	0.406 m
Wetted surface area S	0.083 m ²
Block coefficient C _B	0.506

Fig. 4와 Table 1은 대상 선형인 DTMB5512 모형 형상과 주요제원(main parameters)을 보여주고 있다.

본 논문에서 수치계산 결과와 비교할 검증용 모형시험 데이터는 전체 저항(total resistance), 상하동요 힘(heave force) 그리고 종동요 모멘트(pitch moment)이며, 매 1/4주기 시간의 선체 주위의 비정상 파형과 선미 반류분포이다.

모형시험의 조건과 같이 수치계산에서 DTMB5512 모형에 대한 Froude수 $F_r=0.28$, Reynolds수 $Re=4.86 \times 10^6$ 이며, 입사파의 파장 $\lambda=1.5$, 파진폭 $A=0.006$, 그리고 파기울기(wave steepness) $A_k=0.025$ 이다. 무차원 조우 진동수 $\omega=1.83$ (0.919Hz)이다.

모형은 선수와 선미에서 각각 다른 값의 침하(sinkage)조건을 가진다. F.P.위치에서 침하량은 -0.0031 이며 A.P.에서는 -0.0007 이다. 모형시험은 정수중 상기 자세조건에서 모형에 작용하는 힘과 모멘트를 측정하고, 이 때 값들을 영점으로 사용하였다. 본 수치해석에서도 모형시험과 같이 입사파와 전진속도가 없는 정수중 계산을 먼저 수행하여 상하동요 힘과 종동요 모멘트를 구하였다.

Fig. 5 (a) H-O grid system for the DTMB5512

Fig. 5 (b) Close view of the grid design around the DTMB5512

Fig. 5 (a), (b)는 선수파 조건을 고려하여 작성된 DTMB5512모형 주위의 수치격자 분포를 보여주고 있다. 계산영역은 $-1.4 \leq x/Lpp \leq 1.5$, $0.0 \leq y/Lpp \leq 0.8$, $-0.03 \leq z/Lpp \leq 0.80$ 이며 선체의 F.P.와 A.P.는 정수면($z/Lpp=0.0$)의 $x/Lpp=-0.5$ 와 0.5 에 각각 위치하고 있다. 여기서, 선체표면은 유속이 없는 벽면 경계조건, 입구와 출구는 2.3절의 입사파 조건을 부과하였으며, 나머지 유동장 경계면에는 유동의 대칭조건을 주었다. 전체 격자점수는 $266 \times 119 \times 104 + 80 \times 42 \times 63$ (트랜성 하류영역), 3.42M이다. 난류모형에 도입한 벽함수법에 적절하도록 선체에서 첫 번째 격자점의 간격은 초기에 $y^+ \approx 60$ 을 계획하였으나, 실제 계산에는 약 $30 \leq y^+ \leq 100$ 분포를 유지하는 것으로 확인되었다.

선체가 놓인 $-0.5 \leq x/Lpp \leq 0.5$ 영역에서 x 방향

격자수는 128개이며, 파장당 약 137개 정도의 격자점들이 분포되어 있다. 파장을 위한 격자 해상도외, 격자계에서 요구되는 것은 입사파와 선체가 생성하는 파 그리고 파들의 상호간섭으로 발생하는 2차 파들을 적절히 포착할 수 있는 z 방향의 적절한 격자수와 격자분포이다. Fig. 5 (b)에서 볼 수 있듯이, 선체표면은 물론, 전체 계산영역에서 파수면이 존재하는 $-0.015 \leq z/Lpp \leq 0.015$ 영역내 z 방향 격자분포는 등간격이 유지되도록 하였다. 여기서, 파진폭당 사용된 격자점 수는 12개이다. 격자계는 병렬계산을 위해 21개의 블록으로 나누었다. 수치계산 시간간격 $\Delta t=0.001$ 이며 이는 한 파주기를 약 546개의 시간단계로 나누는 것에 해당한다. 수치계산은 $t/T=10$, $iteration=5465$ 까지 수행하였으며, Linux PC cluster 21개의 Pentium IV 3.2GHz CPU를 사용해서 56.16시간이었다.

매 시간단계에서 수렴된 비정상 해를 얻기 위해 지배방정식들의 잔여오차 한계, 반복계산 수, 하향 완화계수, 그리고 outer iteration의 조건은 3.1절에 설명한 바와 동일하게 설정하였다.

Fig. 6은 수치계산과 모형시험에서 얻어진 시간 변화에 대한 저항(CT), 상하동요 힘(CH) 그리고 종동요 모멘트(CM)를 각각 비교하고 있다. 각각의 모형시험 결과에 대해 본 수치해석은 타당한 결과를 보여주고 있다. 저항(CT)의 경우 진폭에 대해 잘 일치하고 있다. 상하동요 힘(CH)과 종동요 모멘트(CM)의 경우 최저치에서 모형시험 결과보다 각각 낮고 높게 예측하고 있다. 우선 두 결과는 모형시험과는 다른 영점의 위치를 보여주고 있기 때문에 모형시험 결과에 비해 한쪽으로 치우친 것으로 보인다. 앞서 설명한 바와 같이 정수중 모형에 작용하는 힘과 모멘트를 구해서 그 값들을 영점으로 취하였는데, 이 값들에서 차이를 보인 것으로 판단된다. 이후 비교될 타 기관의 수치계산 결과에서도 같은 현상을 발견할 수 있는데, 영점 계산에 대해서도 상세한 모형시험 계측결과가 제공되고 수치해석 결과도 같이 검증하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

상기 힘과 모멘트 비교 결과들에서 나타난 위상차이는 2005 Tokyo CFD Workshop(Hino, editor,

2005)에 발표된 타기관의 모든 수치해석 결과에서도 발견할 수 있다. Carrica et al.(2006)이 지적했듯이 이러한 위상 차이는 단순히 수치해석 결과만의 오차가 아닌 모형선과 수치계산에서 서로 다른 형태로 발생한 장파장(long wave length) 파의 존재가 그 원인인 것으로 예상된다. 이러한 파가 발생한 원인으로는 모형시험과 수치계산간의 모형의 서로 다른 초기 출발조건과 규칙파의 비선형 응답 등으로 발생한 것으로 생각해 볼 수 있지만, 향후 보다 엄밀한 연구가 필요하다. 실제로 이러한 영향들은 위상뿐 아니라 힘과 모멘트의 진폭에 대해서도 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

Table 2는 힘과 모멘트에 대해 조화분석을 수행한 결과를 모형시험과 타 수치계산 결과들과 비교하고 있다. 참고로, IIHR은 FDM과 단상(single phase) LS법을 이용하는 CFDSHIP-IOWA를 개발하고 있으며, ECN/BER은 FDM과 경계추적법

을 이용하는 ICARE,ECN/CNRS는 FVM과 VOF법을 도입하는 ISIS, 마지막으로 SVA는 FVM과 이상 LS법을 사용하는 nep III라는 이름의 코드를 개발하고 있다.

Table 2 Zeroth and first harmonic amplitudes and first harmonic phases

	CT		
	0 th amplitude	1 st amplitude	1 st phase(deg.)
Experiment	0.00462	0.00608	-63.3
Present	0.00481	0.00673	-79.1
IIHR	0.00464	0.00655	-20.9
ECN/BER	0.00480	0.00710	-
ECN/CNRS	0.00516	0.00638	-63.0
SVA	0.00496	0.00676	-25.9

	CH		
	0 th amplitude	1 st amplitude	1 st phase(deg.)
Experiment	-0.0334	0.03574	-140.0
Present	-0.0271	0.03312	-101.2
IIHR	-0.0338	0.04010	-103.0
ECN/BER	-0.0335	0.04150	-
ECN/CNRS	-0.0315	0.03510	-121.0
SVA	-0.0292	0.03898	-105.1

	CM		
	0 th amplitude	1 st amplitude	1 st phase(deg.)
Experiment	-0.000608	0.0108	-58.8
Present	-0.001097	0.0131	-79.1
IIHR	-0.000570	0.0122	-22.6
ECN/BER	-0.001050	0.0124	-
ECN/CNRS	-0.003000	0.0002	-63.0
SVA	-0.002200	0.0130	-22.2

Fig. 6 Time history of resistance, heave force, and pitch moment

Fig. 7 Wave elevation contours at four time instants

전체 저항(CT)에 대한 0th amplitude는 IIHR01, 1th amplitude와 1th phase는 ENC/CNRS01 잘 예측하고 있으나, 한 기관이 다른 기관들보다 모든 항목에 대해 일관성 있게 더 나은 결과를 보이고 있지는 않다. 이런 현상은 상하동요 힘(CH)과 종동요 모멘트(CM)의 조화해석 결과에서도 발견할 수 있다. 종동요 모멘트(CM)에 대한 0th amplitude는 상대적으로 작은 값이지만 IIHR의 결과를 제외하고 비교적 모형시험 값보다 상당히 치우친 것을 볼 수 있다. 본 수치계산 결과는 0th amplitude, 1th amplitude 그리고 1th phase에 대한 모든 비교에서 비교적 타당한 정도를 보이고 있으며, 힘과 모멘트의 1th phase의 경우 ECN/CNRS의 결과와 함께 비교적 일관성 있는 일치를 보여주고 있다.

Fig. 7은 $t/T=0, 1/4, 2/4$, 그리고 $3/4$ 주기에선 선체 주위 파형분포를 모형시험에서 계측한 결과와 비교하고 있다. 각 주기에서 격자점의 수가 비교적 많이 분포된 선체근방($0.0 \leq y/Lpp \leq 0.2$)과 특히, 트랜섬 후류의 수치계산 파형이 모형시험과 잘 일치하고 있다. 보다 많은 격자점을 이외의 영역에서 추가할 경우 선체와 수선파가 만든 2차 교란파 성분들을 잘 포착할 수 있을 것으로 판단된다. 힘과 모멘트의 시간변화와 비교했을 때, 입력된 선수파의 파정이 모형의 F.P.를 지나는 $t/T=0$ 직후 시간 동안에 저항(CT)과 모멘트(CM)가 최대값을 가지며, 상하동요 힘(CH)은 파정이 선체 중앙부를 지나는 시점에 최대값을 보인다. 반면, 저항(CT)과 모멘트(CM)의 최소치는 파정이 선미 A.P.지점을 통과하는 시점이 $t/T=3/4$ 시점 부근에서 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 $t/T=0, 1/4, 2/4$, 그리고 $3/4$ 주기에선 $x/Lpp=0.435$ 면의 x방향 속도분포(u)를 모형시험에서 계측한 결과와 비교하고 있다. 모든 주기에서 수치해석 결과는 모형시험의 경향과 잘 일치하고 있다. DTMB5512 선형의 반류는 선수 소나돔(sonar dome)에서 발생한 보텍스(vortex)가 선체의 난류경계층과 반응하여 주로 나타난 결과이다. 그러므로 수치해석에서는 이러한 소나돔의 보텍스가 선미까지 도달하는 시점까지 해상할 수 있는 적절한 격자분포와 강인한 난류모형이 필요하다. 그림에서 모형시험에 대비된 차이는 수치해

Fig. 8 u contours at four time instants (left: CFD, right: Exp., (a) $t/T=0/4$, (b) $t/T=1/4$, (c) $t/T=2/4$, (d) $t/T=3/4$)

Fig. 9 v contours at four time instants (left: CFD, right: Exp., (a) $t/T=0/4$, (b) $t/T=1/4$, (c) $t/T=2/4$, (d) $t/T=3/4$)

Fig. 10 w contours at four time instants (left: CFD, right: Exp., (a) $t/T=0/4$, (b) $t/T=1/4$, (c) $t/T=2/4$, (d) $t/T=3/4$)

석의 모델링 오차(modeling error) 또는 수치격자 계에 의한 수치확산 오차(numerical diffusion error)가 그 원인인 것으로 판단된다. 덧붙여, 앞서 힘과 모멘트의 비교에서 설명한 것과 같이 수치해석과 모형시험 사이에 존재하는 위상차이 때문에 같은 물리적 현상이 나타나는 동일시점에 대한 비교가 안 된 것으로 판단된다.

Fig. 9와 10은 $t/T=0, 1/4, 2/4$, 그리고 $3/4$ 주기에서 $x/Lpp=0.435$ 면의 y 방향 및 z 방향 속도분포 v, w 를 모형시험에서 측정한 결과와 각각 비교하고 있다. 본 수치해석 결과들이 각 주기에서 모형시험에 대해 보여주는 일치와 차이의 정도는 2005 Tokyo CFD Workshop(Hino, editor, 2005)에 보인 타 기관의 수치해석 결과와 비슷하며, 전체적으로 모형시험의 경향과 잘 일치하고 있다.

4. 결 론

선수파중 전진하는 DTMB5512선형의 산란문제 해석에 비정상 RANS시뮬레이션 기법이 보강된 WAVIS를 적용하였다. 먼저, 규칙파의 시간진행 시뮬레이션을 수행하여 비정상 수치해석에 대한 WAVIS의 성능을 검증하고 주어진 파 조건에 적절한 격자 해상도를 살펴보았다.

DTMB5512선형의 산란문제에 대한 수치해석 결과의 검증은 저항, 상하동요 힘 그리고 종동요 모멘트, $1/4$ 조우주기마다 예측된 선체주위의 파형과 선미 $x/Lpp=0.435$ 면에서 각 방향의 속도분포 비교를 통해 수행되었다. 본 WAVIS의 수치해석 결과는 타 연구기관들의 수치해석 결과들과 함께 모형시험 결과와 타당한 일치를 보여주었다. 선박의 비정상유동에 대한 CFD결과의 검증이 보다 정확히 수행되기 위해서는 CFD와 모형시험 사이에서 간과될 수 있는 시뮬레이션 조건의 차이와 파에 의한 비선형 영향에 관한 면밀한 연구가 더 필요한 것으로 판단된다(Carrica et al. 2006).

향후 파랑중 선박의 6자유도 운동 문제를 해석할 수 있도록 본 WAVIS의 기능을 계속 확장할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 과제(PN0105A)와 MOERI/KORDI의 기본연구과제(PE0122A)의 일부로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- Carrica, P.M., Wilson, R.V. and Stern F., 2006, "Unsteady RANS simulation of the ship forward speed diffraction problem," *Computers & Fluids*, Vol. 35, pp. 545-570.
- Choi, J.K. and Rhee, K.P., 1988, "On the Hydrodynamic Coefficients of a 3-dimensional Body with a Forward Speed," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 25, No. 3, pp. 19-25 (in Korean).
- Chun, H.H., Kim, M.S. and Yang, J.H., 1992, "Computations of Dynamic Wave Loads of a Catamaran," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 29, No. 4, pp. 75-86 (in Korean).
- Ferziger, J.H. and Perić, M., 1996, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin.
- Gui, L., Longo, J., Metcalf, B., Shao J and Stern F., 2002, "Forces, moment and wave pattern for surface combatant in regular head waves. Part II: Measurement results and discussion," *Exp. Fluids* Vol. 32, pp. 27-36.
- Harten, A., Engquist, B., Osher, S. and Chakravathy, S., 1987, "Uniformly High-Order Accurate Essentially Nonoscillatory Schemes, III," *Journal of Computational Physics*, Vol. 71, pp. 231-303.
- Hino, T.(editor), 2005, *Proc. of CFD Workshop Tokyo 2005*, Japan
- Hong, C.B., Shin, S.C., Kim, J.J. and Choi, S.H., 2005, "A Numerical Study to Evaluate the Resistance Performance of a Ro-Pax Hull Form in Shallow Water," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 42, No. 4, pp. 315-321(in Korean).

- Kim, D.H., 2000, A Study on Numerical Methods for Nonlinear Wave-Making Problems, Ph.D dissertation of Seoul National University.
- Kim, J., Park, I.R., Kim, K.S. and Van, S.H., 2005 "RANS Computation of Turbulent free Surface Flow around a Self Propelled K LNG Carrier," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 6, pp. 583-592 (in Korean).
- Kim, J.J. and Kim, H.T., 2001 "Computation of Turbulent Flow around a Ship Model with Free-Surface," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 1, pp. 1-8(in Korean).
- Kim, K.S., Kim, J., Park, I.R., Kim, G.D., Kim, S.H. and Van, S.H., 2006, "MPI-Parallelized RANS simulation of turbulent free surface flow around a practical ship," Inter. Conf. on Parallel CFD 2006, Busan, Korea.
- Kim, W.J., Kim, D.H. and Van, S.H., 2000, "Development of Computational Methods for Viscous Flow around a commercial Ship Using Finite-Volume Methods," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 4, pp. 19-31(in Korean).
- Kim, W.J., Kim, D.H. and Van, S.H., 2002, "Computational study on turbulent flows around modern tanker hull forms," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 38, No. 4, pp. 377-406.
- Kim, W.J. and Park, I.R., 2005, "Topological View of Viscous Flow behind Transom Stern," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 4, pp. 322-329(in Korean).
- Kim, Y.H., 2000, "Computation of the Linear and Nonlinear Hydrodynamic Forces on Slender Ships with Zero Speed in Waves: Infinite-Depth Case," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 2, pp. 1-13(in Korean).
- Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 3, pp. 269-289.
- Lee, Y.G., Choi, D.S. and Kim, K.S., 2004, "A Study on the Hull Form Design of High-Speed Trimaran," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 39, No. 4, pp. 60-71 (in Korean).
- Lew, J.M. and Kim, H.C., 1986 "On the Prediction Method of Added Resistance of Ships in Regular Head Waves," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 23, No. 2, pp. 14-20(in Korean).
- Longo J., Shao J., Irvine M. and Stern F., 2002, "Phase-averaged PIV for Surface Combatant in Regular Head Waves," 24th ONR symp. on naval hydrodynamics, Fukuoka, Japan
- Newman J.N., 1977, Marine Hydrodynamics. Cambridge: MIT Press.
- Park, I.R., Kim, J. and Van, S.H., 2004, "Analysis of Resistance Performance of Modern Commercial Ship Hull Form using a Level-Set Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 79-89 (in Korean).
- Park, I.R., Kim, W.J., Kim, J. and Van, S.H., 2005, "A Study on a VOF Method for the Improvement of Free Surface Capturing," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 2, pp. 88-97(in Korean).
- Park, J.C., Chun, H.H. and Song, K.J., 2003, "Numerical Simulation of Body Motion Using a Composite Grid System," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No. 5, pp. 36-42(in Korean).
- Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabir, A. and Zhu, J., 1995, "A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation," Computers and Fluids, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238.
- Stone, H.L., 1968, "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multi-directional Partial

Differential Equations,” SIAM J. Numer. Anal., Vol. 5, pp. 530–558.

- Sussman, M., Fatemi, E., Smerera, P. and Osher, S., 1997, “An Improved Level-Set Method for Incompressible Two-Phase Flows,” Computers and Fluids, Vol. 27, No. 5–6, pp. 663–680.
- Van Leer, B., 1979, “Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V:A Second-Order Sequel to Godunov’s Method,” Journal of Computational Physics, Vol. 32, pp. 101–136.
- Xu, H., 1992, ‘Numerical Study of Fully Nonlinear Water Waves in Three Dimensions, Ph.D. dissertation, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

< 박 일 룡 >

< 김 광 수 >

< 김 진 >

< 반 석 호 >