비정상 RANS 법과 중첩격자계를 이용한 횡파중 선박운동 수치해석

박일룡^{†*}, Seyed Hamid Sadat Hosseini^{**}, Frederick Stern^{**}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

IIHR Hydrosience & Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA 52242, U.S.A.**

Numerical Analysis of Ship Motions in Beam Sea Using Unsteady RANS and Overset Grid Methods

Il-Ryong Park^{†*}, Seyed Hamid Sadat Hosseini^{**} and Frederick Stern^{**}

Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI*

IIHR Hydrosience & Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA 52242, U.S.A.**

Abstract

The present paper presents the CFD result for a beam wave test case. An ONR tumblehome ship model with bilge keels is used. The beam wave test is for zero forward speed and roll and heave 2DOF with wave slope $a_k=0.156$ and wavelength $\lambda=1.12L_{pp}$, with L_{pp} the ship length. The problems is solved numerically with an unsteady Reynolds averaged Navier–Stokes approach. The free surface flow is computed using a single-phase level-set method and the motions in each time step are integrated using a predictor–corrector iteration approach which uses dynamic overset grids moving with relative ship motion. The predicted CFD results for motions and forces are compared with experimental data, showing a reasonable agreement.

※Keywords: Roll motion(횡동요), Heave motion(상하동요), Beam sea(횡파), CFD(계산유체역학), URANS approach (비정상 RANS 법), Overset grid(중첩격자), Level-set method(레벨셋법)

1. 서 론

일반적으로 선형설계 단계에서 파랑중 선박운동 응답은 주로 선형이론(linear theory)을 바탕으로

하는 포텐셜유동 해석법들을 이용하여 구하고 그 결과를 설계에 반영하고 있다(Cho et al. 2005, Chun et al. 1999, Jang et al. 2003). 이러한 해석법들 가운데 선체의 형상을 엄밀히 고려하고 주파수 영역에서 선박의 운동을 해석할 수 있는 수치기법들은 Ann and Rhee(1994), Cho and Choi(1993), Hong and Choi(1995), 그리고 Inglis

접수일: 2007년 9월 18일, 승인일: 2008년 2월 21일

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

and Price(1981)등에 의해 연구된 바 있다. 시간 영역 포텐셜유동 수치기법에 관한 연구로는 Gong and Rhee(1987), Lee et al.(2001), 그리고 Liapis and Beck(1985)등이 있다. 특별히 Beck and Leed(2001)는 2001 년 시점까지 선박의 내향성능 해석을 위해 각 관련 연구기관에서 개발된 프로그램들을 정리하여 소개하였다. 상기 수치해석 방법들은 포텐셜유동을 가정하고 있기 때문에 유체의 점성 영향이 큰 문제에는 적절하지 않다. 이러한 경우 계산시간은 다소 길어지지만 점성유동 지배 방정식을 푸는 CFD 해석법을 도입할 필요가 있다. 최근 CFD 는 선박의 내향성능 및 조종성능 해석과 같은 비정상 문제들에 대해 모형시험의 결과와 타당한 정도를 가지는 수치해석 결과들을 점차 제공하고 있다(Cura and Vogt 2002, Klemm 2005, Orihara and Miyata 2003, Weymouth et al. 2005, Wilson et al. 2005). 이는 최근 컴퓨터 성능과 다수의 CPU 를 활용하는 병렬계산기법의 발달로 인해 CFD 의 계산시간이 급격하게 감소하고 있기 때문이다. 선박의 운동과 연성된 점성유동 해석법에 관한 국내 연구사례에는 Park et al.(2003)이 대진폭 선박운동 해석에 중첩격자법을 적용한 바 있다. Kim et al.(2006)은 실제 선박의 횡동요를 해석하기 위한 기초 연구로서 자유수면을 포함한 2 차원 사각기둥의 강제 횡동요를 계산하였다. Cho et al.(2006)은 선박 내부의 점성유동은 유한체적법으로 계산하고 연성된 선박운동은 포텐셜유동을 가정하는 고차경계요소법으로 해석한 바 있다.

본 논문은 6 자유도 운동 해석이 가능한 CFDShip-Iowa 를 이용하여 횡파(beam sea)중 선박의 운동을 해석한 결과를 제공한다. CFDShip-Iowa 에 관한 자세한 설명은 홈페이지, <http://www.ihr.uiowa.edu/~shiphydro/cfdshipiowa.htm>를 참조할 수 있다. 수치해석법은 URANS 법(unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes approach)을 기반으로 하며, 자유수면과 선체운동 해석을 위해 LS 법(level-set method)과 동적 중첩 격자법(dynamic overset grid method)을 각각 도입하고 있다. 본 수치계산 결과에 대한 검증은 모형시험에서 제공하는 상하동요(heave)와 횡동요

(roll)의 2 자유도 운동 변위와 나머지 구속된 운동 방향들에 대해 예측된 힘과 모멘트 비교를 통해 수행되었다.

2. 문제의 정식화 및 수치해석 방법

본 연구에서 다루는 유동은 물과 공기 그리고 이들의 경계가 되는 자유수면이 혼합된 비압축성 유동이다. 공기의 밀도와 점도의 영향은 미소하여 무시할 수 있고 자유수면에서 압력은 항상 대기압 조건을 가지며, 표면장력의 영향은 미소하여 무시할 수 있는 것으로 가정하였다.

2.1 지배방정식

기본 좌표계는 선체의 진행 방향과 반대 방향을 x , 중력과 반대 방향인 연직 상방향을 z , 그리고 우현 방향을 y 로 하는 Cartesian 직교 좌표계이다. 좌표계의 원점은 선체의 F.P.위치와 중앙면(midship), 그리고 정수면(calm free surface)이 만나는 점에 위치시켰다. 앞서 설명한 가정 하에 유동의 지배방정식인 비압축성 RANS 방정식과 연속 방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\text{Re}_{eff}} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \right] + \mathbf{S} \quad (2)$$

여기서, $\mathbf{v}$ 와 p 는 각각 유속과 압력을 나타낸다. 중력가속도의 영향을 나타내는 항을 제외한 비관성(non-inertial) 가속도들의 영향은 $\mathbf{S}$ 항에서 고려된다.

지배방정식의 모든 변수는 물의 밀도, 선박의 길이 L_{pp} 그리고 선속 U_∞ 로 무차원화 되어있다. 압력항 p 는 절대압력 p_{abs} 와 중력가속도 그리고 난류에너지 k 값들을 엮은 형태로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{p_{abs}}{\rho U_{\infty}^2} + \frac{z}{Fr^2} + \frac{2}{3}k \quad (3)$$

여기서, z 는 임의의 점에서 자유수면을 기점으로 한 수직방향의 좌표값이다. Froude 수 Fr 는 유효 Reynolds 수 Re_{eff} 와 함께 다음과 같이 정의된다.

$$Fr = \frac{U_{\infty}}{\sqrt{gL_{pp}}} \quad (4)$$

$$Re_{eff} = \frac{U_{\infty} L_{pp}}{\nu + \nu_t} = \frac{1}{1/Re + \nu_t} \quad (5)$$

여기서, ν 와 ν_t 는 각각 층류와 난류 동점성 계수를 나타낸다.

2.2 자유수면

선체 주위 자유수면의 움직임은 Eulerian 방법의 일종인 단상(single phase) LS 법을 사용하여 구하였다. 자유수면의 위치는 거리함수 ϕ 를 사용하여 $\phi = 0$ (zero-level-set)인 면이 되도록 하였다. 다음 식은 주어진 속도장에 대해 자유수면의 움직임을 구하는 운동역학적 조건을 만족하는 이송방정식이다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (6)$$

공기의 밀도와 점성의 영향을 무시할 경우 자유수면에 대한 운동역학적 경계조건은 다음과 같다.

$$\nabla \mathbf{v}_{int} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (7)$$

$$p_{int} = \frac{z_{int}}{Fr^2} \quad (8)$$

여기서, $\mathbf{v}_{int}$, p_{int} , z_{int} 는 자유수면과 격자계가 만나는 점에서 내삽된 속도벡터, 압력 그리고 수직방향 좌표값을 나타낸다. $\mathbf{n}$ 은 자유수면에 수직한 단위 법선벡터이며 LS 함수를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{n} = -\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (9)$$

2.3 난류모형

난류 동점성계수 ν_t 는 Menter 의 blended $k-\omega/k-\varepsilon$ 모형(Menter 1994)을 통해 계산된다. CDFShip-Iowa 는 난류 경계층내 대수법칙이 존재하는 영역에 대해 벽함수 모델(wall function model)을 사용하는 접근법 대신 $y^+ < 1$ 의 조건을 만족하는 매우 조밀한 격자계와 상기 모형을 사용하여 난류 경계층을 직접 해석한다. 자유수면에서 난류 경계조건은 속도에 대한 조건과 마찬가지로 다음과 같이 부과하였다.

$$\nabla k_{int} \cdot \mathbf{n} = \nabla \omega_{int} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (10)$$

2.4 선체운동

선체의 운동은 전진속도가 있는 경우 선체와 같은 속도로 움직이는 한 관성 좌표계를 도입하여 계산할 수 있다. 일반적으로 강체의 6 자유도 운동은 선형 및 각운동량 보존을 나타내는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$F_{CGi} = m \frac{d^2 x_{CGi}}{dt^2} \quad (11)$$

$$L_{CGi} = \frac{d}{dt} \left(I_{ij} \frac{d\theta_{CGi}}{dt} \right) \quad (12)$$

여기서, F_{CGi} , L_{CGi} 는 각각 선체의 중력작용 중심점 CG(center of gravity)에 작용하는 힘과 모멘트의 i 운동 방향 성분을 나타낸다($i=1,2,3$:병진운동 전후동요(surge), 좌우동요 sway), 상하동요(heave), $i=4,5,6$:회전운동 횡동요(roll), 종동요(pitch), 선수동요(yaw)).

m 과 I_{ij} 는 각각 선체의 질량과 관성모멘트를 나타낸다. x_{CGi} , θ_{CGi} 는 각각 선체의 병진운동과 회전운동 변위를 나타낸다. 모든 운동 방향에 대해 선체의 운동변위, 속도와 가속도 그리고 선체

에 작용하는 힘과 모멘트를 변수로 하여 유도된 보다 상세한 식은 문헌(Fossen 1994)에서 찾을 수 있다.

식(11)과 (12)에 대한 수치해석은 predictor-corrector 법(Fig. 1)을 이용하였다. 우선 predictor 단계에서 다음과 같이 1 차정도의 Euler 법을 이용하여 선체의 운동 속도 $\dot{\varphi}$ 와 변위 φ 를 먼저 계산한다.

$$\dot{\varphi}^n = \dot{\varphi}^{n-1} + \Delta t \ddot{\varphi}^{n-1} \quad (13)$$

$$\varphi^n = \varphi^{n-1} + \Delta t \dot{\varphi}^{n-1} \quad (14)$$

여기서, 우변 가속도 성분은 식(11)과 (12)로부터 병진운동일 경우 선체 표면을 따른 힘에 대한 적분값 $\sum F_{CGi}/m$ 를, 각운동일 경우 $\sum L_{CGi}/I$ 를 나타낸다.

같은 계산 시간 단계의 Corrector 과정에서는 3 차정도의 다음의 SIMPSON 법을 이용하여 운동방정식을 풀고 보정된 선체 속도와 변위를 구한다.

$$\dot{\varphi}^n = \dot{\varphi}^{n-1} + \Delta t(5\ddot{\varphi}^n - 8\ddot{\varphi}^{n-1} + \ddot{\varphi}^{n-2}) \quad (15)$$

$$\varphi^n = \varphi^{n-1} + \Delta t(5\dot{\varphi}^n - 8\dot{\varphi}^{n-1} + \dot{\varphi}^{n-2}) \quad (16)$$

식(15)와 (16)은 우변에 구하고자 하는 n -시간 단계의 변수를 포함하기 때문에 Fig. 1 과 같이 반복해법을 이용하여야 한다.

앞서 계산된 선체의 운동 변화량에 따라 선체를 포함하는 격자계를 이동한 후 관성 좌표계를 사용하는 유동의 지배방정식에 선체 표면에서 선체와 같이 움직이는 유체의 속도, 즉 격자속도(grid velocity)를 고려해 주어야 한다. 격자속도는 다음의 2 차정도의 three-time-level 법을 이용하여 구한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{i,j,k}^n \Big|_{solid} &= \dot{\mathbf{x}}_{i,j,k}^n \Big|_{solid} \\ &\approx \frac{(1.5\mathbf{x}_{i,j,k}^n - 2\mathbf{x}_{i,j,k}^{n-1} + 0.5\mathbf{x}_{i,j,k}^{n-2})}{\Delta t} \end{aligned} \quad (17)$$

Fig. 1 Computation procedure

이러한 격자속도의 존재로 인하여 지배방정식의 전미분은 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\frac{D\varphi}{Dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot ((\mathbf{v} - \dot{\mathbf{x}})\varphi) \quad (18)$$

2.5 중첩격자법

CFDShip-iowa 는 선체와 복잡한 부가물의 격자계 생성과 선체 운동 해석을 유연하고 정확히 수행하기 위해 중첩격자법을 도입하고 있다. 유동 해석시 중요한 정보가 되는 격자간 중첩 영역의 활성점(active point), 비활성점(hole point) 그리고 내삽점(interpolated point)들은 Noack(2005)이 개발한 SUGGAR(Simulations with Structured, Unstructured, and Generalized Overset Grids)를 이용하여 탐색한다. 이 프로그램은 정렬 또는 비정렬 중첩격자를 대상으로 작성된 모든 유동 해석 코드들의 운동 제어 서브루틴과 연계되어 단일 또는 다수 물체의 6 자유도 운동 해석을 수행할 수 있도록 개발되었다. SUGGAR 는 중첩격자들 간의 모든 물리량의 내삽 결과가 2 차정도 이상이 되는 최적의 중첩격자 정보를 얻기 위해 다단계의 비선

형 탐색 알고리즘을 도입하고 있다. 다음은 CFDSHIP-IOWA에 도입된 임의 물리량 ψ 에 대한 trilinear 내삽식을 보여준다.

$$\psi_{\text{int}} = \sum_{i=9} \alpha_i \psi \quad (19)$$

여기서, α_i 는 trilinear 내삽법에 필요한 계수이며 주위 기부점(donor point)들로부터 계산된다.

2.6 입사파 모델

입사파는 유동장의 유입 경계면과 유출 경계면에 파고 ζ , 유속(U, V, W) 그리고 압력 p 에 대해 선형파이론으로부터 유도된 다음의 식들을 경계조건으로 적용하여 생성하였다.

$$\zeta(x, y, t) = a \cos(k_w X - 2\pi f t) \quad (20)$$

$$U(x, y, z, t) = \left(U_\infty + \frac{a}{Fr} \sqrt{k_w} e^{k_w z} \cos(k_w X - 2\pi f t) \right) \cos(\alpha) \quad (21)$$

$$V(x, y, z, t) = \left(U_\infty + \frac{a}{Fr} \sqrt{k_w} e^{k_w z} \cos(k_w X - 2\pi f t) \right) \sin(\alpha) \quad (22)$$

$$W(x, y, z, t) = \frac{a}{Fr} \sqrt{k_w} e^{k_w z} \sin(k_w X - 2\pi f t) \quad (23)$$

$$p(x, y, z, t) = \frac{a}{Fr^2} e^{k_w z} \left(\cos(k_w X - 2\pi f t) - \frac{1}{2} \frac{a}{k_w} \right) \quad (24)$$

$$X(x, y) = x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) \quad (25)$$

여기서, a 는 파진폭, k_w 와 f 는 파수(wave number)와 조우주기(encounter frequency)를 각각 나타낸다. α 는 선체와 입사파가 이루는 각도를 나타낸다. $X(x, y)$ 는 파가 진행하는 방향에 대한 좌표값을 나타낸다.

2.7 수치계산 과정

CFDSHIP-IOWA는 일반 좌표계와 유한차분법(finite difference method)을 사용하여 지배방정식

을 이산화한다. 코드는 MPI(message passing interface)기법을 바탕으로 병렬컴퓨터 시스템에서 구동되도록 작성되었다. 지배방정식의 대류항과 확산항의 이산화는 2차 이상의 다양한 상류(upwind) 및 중앙(central) 차분법들을 선택하여 수행할 수 있다. 연속방정식을 만족시키기 위해 압력과 속도를 연성시키는 방법으로 PISO(Issa 1985)알고리즘을 도입하고 있다. 전체적인 계산 흐름도는 Fig. 1과 같다. 그림에서 매 시간 선체 운동으로 변경된 중첩격자 정보는 앞서 설명한 SUGGAR를 통해 구한다. 문제 해석을 위해 작성된 중첩격자계의 정보를 탐색하고 생성하는 SUGGAR의 계산 시간은 전체 격자점 수가 1M(백만) 이하일 경우 전체 CPU 시간의 5%이치만 6M 이상일 경우 30%까지 오르기 때문에, 현재 계산 시간을 감소시키기 위한 연구가 계속 수행되고 있다. 생성된 최종 연립방정식의 해는 block Jacobi ILU와 BCGS를 이용하는 PETSc toolkit(Balay et al. 2002)을 이용하여 구한다. 본 수치계산에서 Fig. 1의 PISO Loop는 3-4회 그리고 6DOF Corrector는 4-5회 반복하도록 하였다. 여기서 각 단계의 반복계산의 회수는 관련 방정식의 잔차(error residual)가 1×10^{-4} 이하가 될 경우를 기준으로 하였다. 연속방정식을 만족시키기 위한 Pressure Poisson 방정식은 최대 300회 반복하여 풀었으며 L2-norm 잔차가 5×10^{-4} 이면 수렴된 해를 얻은 것으로 판단하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 대상 선형 및 모형시험 조건

수치계산은 이탈리아 INSEAN에서 수행된 모형시험의 조건을 따랐다(Olivieri et al. 2006). Fig. 2의 대상 선형은 미국 ONR에서 모형시험과 CFD에 대한 검증용으로 설계한 ONR5613 모델이며, 특별히 계획 흡수선 위로 tumblehome 형상을 가진다. 선체에 부착된 빌지킬(bilge keel)과 대상 선형의 주요 파라미터들은 Table 1에 나타내었다.

모형시험은 전진속도 없이 횡파중에 놓여있는 모형선의 횡동요와 상하동요의 2자유도 운동변위

와 구속된 운동들에 대해 측정된 힘과 모멘트를 제공하고 있다. 여기서, 선박의 운동은 선체의 중력 작용점 CG 를 중심으로 발생한다. 실제 INSEAN 은 동일한 파장의 세가지 횡파 조건에서 모형시험을 수행하였는데 본 수치계산에서는 그 중 대진폭 횡파 조건을 선택하였다. 선체로 입사되는 횡파는 빌지킬이 부착된 ONR5613 선형의 횡동요 공진 주파수(0.65Hz)에 해당하는 파장 $\lambda/L_{pp}=1.12$, 파진폭 $a/L_{pp}=0.0278$, 파기울기 $a_k = 0.156$ 의 조건들을 가진다. 수치계산은 $\Delta t=0.01$ 로 하여 5 주기 동안 수행되었으며 이는 한 주기당 약 265 회에 해당하는 시간 해상도를 가진다.

Fig. 2 ONR5613 model

Table 1 Principal particulars of ONR body
ONR tumblehome (5613)
scale ratio=46.6

L_{PP}	3.305 m
Draft (T)	0.118 m
Beam (BWL)	0.403 m
Displ. (V)	0.087 m ³
LCG	1.708 m (Aft of FP)
KG	0.165 m
GMT	0.043 m
K_{XX}	0.153 m (38% BWL)
$K_{YY} = K_{ZZ}$	0.826 m (25% L_{PP})
Bilge Keels	Chord L.= 33.55 mm Longi. L.= 1098 mm

3.2 격자계

본 문제와 같이 비정상 자유수면, 난류경계층, 그리고 와류 거동을 모두 정확히 계산하기 위해서는 기본적으로 지배방정식과 선체 운동방정식을 정확히 풀어야 한다. 또한 문제의 특성에 적합한 격자계를 생성하여야 한다. CFDShip-Iowa 의 격자의 존성에 따른 정상 및 비정상 문제에 대한 검증은

Carrica et al.(2006), Wilson et al.(2006), Carrica et al.(2007) 등이 수행하였으며, 본 수치계산은 이를 바탕으로 격자계 형태와 격자점 수를 결정하였다. 전체 사용한 격자수는 3.56M 이며, Fig. 3 에 나타난 입사파를 위한 1st background block 에 0.78M 격자점이 있으며, 선체에 의한 산란파 해상을 위한 2nd background block 에 0.76M, 난류와 와류유동이 지배적인 선체를 위한 hull block 에 1.33M, 그리고 bilge keel block 에 0.68M 개의 격자점들이 사용되었다. Hull block 과 bilge keel block 들의 격자 단면은 Fig. 4 에서 볼 수 있다. 전체 유동장의 크기는 Fig. 3 에 나타내었으며 O-형태인 hull block 과 bilge keel block 격자계를 제외한 나머지 두 배경 격자계는 직사각 6 면체의 Cartesian 격자계이다. 그림에서 횡파는 선체의 우현의 유동장 입구에서 입력되어 좌현으로 진행한다.

Fig. 3 Background grid system

Fig. 4 Surface grids for hull and bilge keel

Fig. 5 Overset grid systems; (a) initial raw grids at $t/T = 4.2$, (b) overset grids optimized at $t/T = 4.2$, (c) overset grids optimized at $t/T = 4.6$

Fig. 4 는 소나돔(sonar dome)과 센터스케그(center skeg)를 포함하는 선체 표면과 별도의 격자 블록으로 처리한 빌지킬 주위의 표면격자 분포를 보여주고 있다.

Fig. 5 는 $Y(y/L_{pp})=0.5$ 위치에서 바라본 각 격자계의 2 차원 단면 형상을 나타내고 있다. (a)는

$t/T = 4.2$ 시간에서 초기 원본 중첩격자계를 보여주고 있으며 (b)는 (a)와 같은 시간에서 SUGGAR에 의해 탐색되어 유동 해석코드에 전달되는 새로운 중첩격자계를 보여주고 있다. (c)는 다른 시간 $t/T = 4.6$ 에서 선체의 운동에 대해 새롭게 탐색된 중첩격자계를 보여주고 있다. 2.5 절에서 설명한 바와 같이 SUGGAR 는 격자간 2 차 정도 이상의 내삽결과를 유도하기 위해 블록간 격자 간격이 유사한 영역을 탐색하고 계산에 필요치 않는 다수의 비활성 점들을 찾아주어 수치계산의 효율성을 높여준다.

3.3 운동변위와 유체력

Fig. 6 은 수치계산에서 얻은 상하동요 변위와 INSEAN 의 모형시험에서 계측된 결과를 비교하고 있다. 변위가 최소가 되는 부근에서 계산된 진폭이 모형시험 결과보다 다소 작게 예측되었지만 전체적으로 수치해석 결과가 모형시험의 결과에 대해 타당한 일치를 보여주고 있다.

Fig. 7 은 횡동요 변위에 대해 수치계산과 모형시험 결과를 비교하고 있다. 마찬가지로 수치해석 결과가 모형시험과 유사한 경향을 보이지만 최대

Fig. 6 Comparison of heave amplitude

Fig. 7 Comparison of roll amplitude

및 최소 횡동요 변위는 모형시험 결과보다 다소 작게 예측된 것을 볼 수 있다.

이러한 차이는 선체 전반에서 발생하는 복잡한 비정상 유동박리, 와류거동, 산란파 등을 정확히 해석하는데 필요한 격자 해상도 부족에서 발생한 수치감쇠 오차와 수치해석법에 도입된 수치모델들에 의한 모델링 오차가 만들어 내는 것으로 생각된다. 특별히 모델링 오차의 경우 입사파 생성을 위해 2.6 절의 선형파이론을 도입으로 인한 기여가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8 Comparison of sway force

Fig. 9 Comparison of surge force

Fig. 10 Comparison of pitch moment

Fig. 8 은 선체 측면에 작용하는 힘 R_y (sway force)을 비교하고 있다. 최소 및 최대값 부분에서 다소 작게 예측되었지만 상대적으로 큰 힘이기 때문에 수치계산 결과가 모형시험의 결과와 유사한 경향을 보여 주고 있다.

Fig. 9 와 10 은 $X(=x/L_{pp})$ 축방향 힘 R_x (surge force)와 종동요(pitch) 모멘트 M_y 에 대해 계산된 결과를 모형시험에서 예측된 결과와 비교하고 있다. 앞서 Fig. 8 의 R_y 와 비교했을 때 R_x 와 M_y 는 10 배 정도 작은 값이어서 Fig. 6 과 7 에서 설명한 CFD 의 한계와 모형시험과 정확히 일치하지 않는 계산조건의 가능성 등으로 인하여 CFD 가 정량적으로 예측하기 어려운 것으로 판단된다. 이들 힘들은 매우 비선형적인 거동을 보이고 있으며, 현재 모형시험 측면에서도 R_x 가 가지는 4~5 차의 고차 조화성분들이 발생한 원인에 대해 분석중에 있다. Fig. 10 의 종동요 모멘트 M_y 는 CFD 에서 작게 예측되었지만 겉보기 결과와는 달리 다음절의 조화해석 결과를 보면 정성적으로 모형시험과 일치하는 것을 볼 수 있다.

3.4 조화해석

Fig. 11 은 3.3 절의 결과에서 힘 R_y 와 종동요 모멘트 M_y 에 대한 조화해석 결과를 비교하고 있다. R_y 의 경우 입사파의 진동수인 1 차 조화성분이 지배적이며 CFD 결과에서도 동일한 결과를 보여주고 있다. 종동요 모멘트 M_y 의 경우 Fig. 10 에서 설명한 바와 같이 CFD 가 정량적인 면에서 작게 예측하였지만 모형시험 결과와 마찬가지로 2 차 조화성분이 1 차 성분보다 큰 현상을 잘 예측하고 있다.

다음은 M_y 의 비선형 거동에 대해 간략히 고찰하였다. Fig. 12 는 Olivieri et al.(2006)의 논문에서 발췌한 $a_k = 0.073$ 과 0.156 두 횡파(점선으로 표시) 조건에서 예측된 M_y 의 변화와 조화해석 결과를 보여주고 있다. 파진폭이 작은 $a_k = 0.073$ 경우 2 차 조화성분도 다소 크지만 1 차 조화성분이 지배적인 것을 볼 수 있으며, 파저 영역에서 미소한 비선형 거동을 발견할 수 있다. 파진폭이 증가하면서 $a_k = 0.156$ 의 M_y 가 전체적으로

Fig. 11 Comparison of amplitude functions; (a) R_Y , (b) M_Y

Fig. 12 Pitch moments and amplitude functions (Olivieri et al 2006); (a) medium amplitude wave, (b) large amplitude wave

증폭되었고 동시에 $a_k = 0.073$ 파저에서 보였던 작은 비선형적 거동이 명확히 증폭된 것을 볼 수 있다. 이러한 결과로 인하여 1 차와 2 차 조화성분의 크기가 반전되어 나타나고 있다. $a_k = 0.156$ 결과의 비선형 현상은 대진폭 운동시 나타나는 연성효과(coupling effect)가 그 원인 것으로 판단된다.

Francescutto(2002)에서 다루었듯이 선체와 부가물의 형상적 특성과 비선형 자유수면 변화 등으로 인해 횡동요 각이 커질 때 발생하는 비선형적 유체정역학 및 동역학 힘의 변화가 같은 평면상의 운동뿐만 아니라 서로 직교하는 평면상의 운동 성분들간의 연성효과를 증폭시킬 수 있다. 대진폭 운동시 발생하는 이러한 연성운동에 대해서는 향후 보다 면밀한 연구가 필요하다.

3.5 와류거동과 자유수면

Fig. 13 은 $t/T = 4.58$ 시간 선체표면, 소나돔, 발지킬, 그리고 센터스케그 전반에 걸쳐 생성된 복잡한 축 방향 와류(axial vorticity) 분포를 보여

주고 있다. 그림에서 와류 강도의 범위는 $-30 \sim 30$ 이다.

Fig. 14 는 횡파에 대비된 횡동요의 시간변화를 보여주고 있으며, 그림에 나타난 횡동요 값이 최대, 최소, 그리고 영인 4 시점(P1, P2, P3, P4)에서 자유수면과 와류거동의 변화를 관찰하였다.

Fig. 15 는 P1, P2, P3, P4 시점들과 $Y(=y/L_{PP})=0.08$ 단면에서 선체와 자유수면의 상대 위치 그리고 유선분포와 와류거동의 변화를 보여주고 있다. 이 단면은 날카로운 선저 형상의 특성으로 인해 비교적 큰 와류를 생성한다.

횡요각이 영인 P1 에서는 선체가 음의 횡동요(시계 방향) 상태에 놓여있으나 입사파에 의해 선체의 운동과 같은 방향 속도성분을 가진 주위 유체입자들의 상대운동(유선참조)으로 인해 선체의 운동방향과 같은 음의 와류①이 좌현으로 발달되는 것을 볼 수 있다. 이 같은 와류는 Jung et al.(2007) 에서 설명한 바와 같이 횡동요 감쇠효과를 가지기 보다 횡동요 운동을 증폭시킬 가능성을 가진다.

음의 최대 횡동요 각을 갖는 P2 시점에는 선체 주위 유체입자들의 운동 방향과 선체와의 상대운동으로 횡동요 감쇠효과를 발생시키는 양(반시계방향)의 와류②가 선체 우현에 발달된 것을 볼 수 있다. 한편 음의 와류①은 비교적 그 강도를 유지하며 선체의 운동과 파 입자들의 영향으로 선저로 이동하여 와류②에 바로 근접해 있다.

양의 횡동요 상태에 있는 P3 지점에서 와류①은 선저로부터 우현으로 밀려 떨어져 있으며 주위 유체 입자들과의 상대운동 또는 수치감쇠를 야기하는 격자 해상도의 부족에서 기인된 영향으로 많이 감쇠되었다. 선체와 같은 운동방향의 양의 와류②는 크게 발달되어 선체 우현에 근접해 있다. 이러한 와류는 앞서 설명한 바와 같이 선체의 경계층을 교란하여 압력 변화 및 마찰저항의 변화를 가져오며 횡동요를 가속시킬 수도 있다. 이 시점에서 새로운 와류③이 선저 가장자리에서 발달하기 시작한 것을 볼 수 있다.

횡동요의 방향이 변하며 최대 횡요각을 갖는 P4 시점에서는 P3 시점에서 발달되던 음의 와류③이 보다 크게 발달되어 있고 와류②는 선체에서

멀어지면서 강도와 그 크기가 약해진 것을 볼 수 있다.

Fig. 16 은 발지킬을 포함하는 $Y=0.517$ 단면에서 P1, P2, P3, P4 시점들의 결과를 비교하고 있다.

P1 시점에서는 음의 횡동요 상태에 놓인 선체의 좌현 발지킬에서 같은 음의 와류②가 발달되고 있으며 양의 와류③이 우현 발지킬에서 발달되기 시작하고 있다. 이러한 현상은 앞서 설명한 바와 같이 국부적으로 선체와 부가물의 각 영역에서 입사파와 산란된 유동의 영향으로 선체 운동과 유체 입자들간의 상대 운동이 다르기 때문에 발생한 것임을 알 수 있다. 양의 와류①과 음의 와류④는 각각 좌현과 우현 발지킬에서 박리되어 선저에 머물고 있는 와류들이며 특별히 와류④는 선저 중심부에서 우현 발지킬 아래 영역에 길게 걸쳐 있다.

Fig. 13 Perspective views of axial vorticity contours around the hull

Fig. 14 Roll amplitude corresponding to the wave (dashed line)

Fig. 15 Axial vorticity contours and stream lines at $y/L_{pp}=0.08$

횡동요 운동의 방향이 변하며 최소 횡요각을 갖는 P2 에서는 좌현 발지킬에서 새로운 양의 와류 ⑥가 발달되고 있고 P1 시점에서 볼 수 있었던 와류 ①은 감소로 소멸되었다. 음의 와류 ②는 발지킬에서 박리되어 좌현 발지킬로부터 약간의 거리를 두고 머물고 있다. 우현 발지킬의 양의 와류 ③은 선체운동의 영향으로 크게 발달되어 있으며 세력이 감소한 음의 와류 ④는 선체와 와류 ③ 사이의 상호작용으로 변형된 모습을 보여주고 있다.

선체가 양의 횡동요 상태에 놓인 P3 시점에서는 음의 와류 ②가 주위 유동의 영향으로 선체와 함께 좌현 발지킬 아래로 이동한 것을 볼 수 있다. 양의 와류 ⑥는 좌현 발지킬에서 박리되어 선체 쪽을 향한 발지킬 면에 근접해 있으며 선체와 강한 상호작용 상태에 있는 것을 볼 수 있다. 우현 발지킬에서 박리된 양의 와류 ③은 크기가 증폭되어 있으며 수면쪽으로 바라보는 발지킬 등 바로 위에 자리잡고 있어 와류 ⑥와 마찬가지로 선체의 압력

변화에 미치는 영향이 클 것으로 예상된다. 음의 와류 ④는 거의 감소되어 약간의 흔적만을 보이고 있다. 그림에서 횡동요 감소에 영향을 미칠 새로운 음의 와류 ⑥이 생성되고 있는 것을 볼 수 있다.

횡동요의 방향이 변하며 최대 횡요각을 갖는 P4 시점에서는 강도가 약해진 음의 와류 ②가 선체의 운동으로 생긴 상대 위치 변화로 좌현 발지킬에서 멀지만 여전히 존재해 있다. 양의 와류 ⑥는 운동하는 발지킬과 새로 생성되는 음의 와류 ⑦과의 상호작용에 놓여 있는 것을 볼 수 있다. 우현 발지킬에서 생성된 음의 와류 ⑥은 선체 운동의 영향으로 강도와 크기가 증가하였으며 양의 와류 ③은 발지킬과 음의 와류 ⑥과의 상호작용으로 변형되어 있고 강도는 다소 감소한 것을 볼 수 있다. Fig. 17은 센터스케그를 포함하는 $Y=0.85$ 단면에서 P1, P2, P3, P4 시점의 결과들을 비교하고 있다. 여기서의 결과는 $Y=0.08$ 단면의 결과와 매우 유사한 유동 특성을 보여주고 있어 Fig. 16에 대한

Fig. 16 Axial vorticity contours and stream lines at $Y=0.517$ Fig. 17 Axial vorticity contours and stream lines at $Y=0.08$

Fig. 18 Wave contours at P4 time instant

설명으로 대치한다.

Fig. 15 에서 17 까지 선체와 자유수면의 상대 위치, 유체 입자 운동 그리고 대표적으로 큰 와류들의 거동을 살펴보았다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 경계층에서 박리되거나 선체 표면에 머물

러 있는 와류들이 선체 전반에 걸쳐 발생하는 것을 볼 수 있다. Kim et al.(2006)과 Jung et al.(2007)의 연구결과에서 설명한 바와 같이 선체와 선체 부가물에서 발생하는 다양한 와류들은 와류 상호간, 자유수면 그리고 선체와의 상호작용을 통해 선체 표면의 경계층을 교란하여 마찰력과 압력 변화를 발생시키고 선체 운동의 변화를 초래한다. 이 때 선체에서 발생하는 와류는 선체 형상의 특성과 입사파 조건에 따라 횡동요를 감소시키거나 반대로 횡동요를 가속시키는 효과를 가질 수 있다.

Fig. 18 은 P4 시점에 대한 자유수면의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 선체 근방에서 발생한 산란파의 방사 현상과 이로 인하여 교란된 횡파의 모습을 잘 보여주고 있다.

4. 결 론

비정상 RANS 법과 중첩격자법을 이용하여 횡파 중 ONR5613 선형의 운동을 고려한 난류유동 해석을 수행하였다. 상하동요와 횡동요의 2 자유도 운동의 범위와 구속된 운동 방향의 힘과 모멘트에 대해 모형시험과 수치계산 결과를 비교하였으며, 선체와 선체 부가물 주위에서 발생한 와류 거동의 특성을 살펴보았다. 본 수치계산 결과는 INSEAN의 모형시험 결과와 만족스러운 일치율을 보여주었으며 대진폭 횡동요 운동의 원인으로 발생한 중동요 모멘트의 비선형적 특성도 타당하게 예측하였다. 횡동요 감쇠에 주요 역할을 하는 선체와 필지 킬에서 발생한 와류 거동에 대한 본 수치해석 결과의 고찰은 타 연구결과와 비교했을 때 물리적인 타당성을 보여주었다. 향후 다양한 문제 해석을 통한 검증이 더 필요하지만, 선박조종을 포함하여 파랑중 선박운동 문제에 본 수치기법이 매우 효과적인 방법들 가운데 하나임을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2005 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된

연구이며(KRF-2005-214-D00401), 본 연구내용은 미국 ONR(Office of Naval Research)의 Dr. Patrick Purtell 이 관리하는 N00014-01-1-0073 과 N00014-04-1-0288 과제와 MOERI/KORDI 의 기본연구과제(PE0122A)의 일부입니다.

참 고 문 헌

- Ann, S.P. and Rhee, K.P., 1994, " Analysis of Manoeuvrability of a Ship in Waves by 3-Dimensional Panel Method," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 4, pp. 82-98(in Korean).
- Balay, S., Buschelman, K., Gropp, W., Kaushik, D., Knepley, M., Curfman, L., et al., 2002, PETSc User Manual, ANL-95/11-Revision 2.1.5. Argonne National Laboratory
- Beck, R. and Reed, A., 2001, " Modern Seakeeping Computations for Ships." 23rd ONR symp. on naval hydrodynamics, Val de Reuil, France.
- Carrica, P.M., Wilson, R.V., Noack, R.W. and Stern, F., 2007, " Ship motions using single-phase level set with dynamic overset grids," Computers & Fluids, Vol. 36, No. 9, pp. 1415-1433.
- Carrica, P.M., Wilson, R.V. and Stern, F., 2006, " Unsteady RANS simulations of the ship forward speed diffraction problem," Computers & Fluids, Vol. 35, No. 6, pp. 545-570.
- Cho, I.H. and Choi, H.S., 1993, " Wave Responses and Ship Motions in a Harbor Excited by Long Waves (II)," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 82-98(in Korean).
- Cho, S.K., Hong, S.Y., Kim, J. and Park, I.R., 2006, " A Numerical Study on the Coupled Dynamics of Ship and Flooding Water, " Journal of the Society of Naval Architects of

- Korea, Vol. 43, No. 6, pp. 87–93(in Korean).
- Cho, S.K., Hong, S.Y., Lee, K.J., Kyoung, J.H. and Kim, Y.S., 2005, “ 24th ITTC Benchmark Study on Numerical Prediction of Damage Ship Stability,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 5, pp. 435–447(in Korean).
 - Chun, H.H., Kim, M.S. and Yang, J.H., 1999, “ Computations of Dynamic Wave Loads of a Catamaran,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 36, No. 2, pp. 50–60(in Korean).
 - Cura, Hochbaum A., and Vogt, M., 2002, “ Towards the Simulation of Seakeeping and Maneuvering based on the Computation of the Free Surface Viscous Flow.” 24th ONR symp. on naval hydrodynamics, Fukuoka, Japan.
 - Fossen, Tl., 1994, Guidance and Control of Ocean Vehicles. New York: Wiley.
 - Francescutto, A., 2002, "Roll-sway-heave coupling in beam waves", Proceedings (CD) of 12th International Symposium on Offshore and Polar Engineering – ISOPE'2002, Kita-Kyushu, Vol. 3, pp. 281–287.
 - Gong, I.Y. and Rhee, K.P., 1987, “ Linear Time Domain Analysis of Radiation Problems,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 24, No. 4, pp. 9–18(in Korean).
 - Hong, S.Y. and Choi, H.S., 1995, “ Analysis of Steady and Unsteady Flow Around a Ship Using a Higher-Order Boundary Element Method,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 32, No. 1, pp. 42–57(in Korean).
 - Inglis, R.B. and Price, W.G., 1981, "The Influence of Speed Dependent Boundary Conditions in Three Dimension Ship Motion Problem," International Shipbuilding Progress.
 - Issa, R.I., 1985, “ Solution of the implicit discretized fluid flow equations by operator splitting.” Journal of Computational Physics, Vol. 62, pp 40–65.
 - Jang, T.S., Yoon, D.H., Hong, S.Y., Park, K.D. and Song, M.J., 2003, “ A Study on Seakeeping of Container Ships,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No. 3, pp. 16–21(in Korean).
 - Jung, K.H., Suh, S.B. and Chun, H.H., 2007, “ Experimental Study on the Eddy Making Damping Effect at the Roll Motion of a Rectangular Barge,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 267–278(in Korean).
 - Kim, J., Kim, S.H., Kim, K.S., Park, I.R. and Van, S.H., 2006, “ A RANS-based Simulation for the Prediction of Hydrodynamic Rolling Moments around Rectangular Cylinders with Free Surface,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 6, pp. 667–674(in Korean).
 - Klemt, M., 2005, “ RANSE Simulation of Ship Seakeeping using Overlapping Grids,” Ship Tech. Res., Vol. 52, pp. 65–81.
 - Lee, H.Y., Park, H.S. and Shin, H.K., 2001, “ Transient Motion Analyses for a Ship Advancing in Irregular Waves,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 3, pp. 47–53(in Korean).
 - Liapis, S. and Beck, R.F., 1985, "Seakeeping Computations using Time Domain Analysis," Proc. 4th Int. Conf. Num. Ship Hydrodynamics.
 - Menter, F.R., 1994, “ Two-equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications.” AIAA J., Vol. 32, No. 1, pp. 598–605.
 - Noack, R., 2005, “ SUGGAR: A General Capability for Moving Body Overset Grid Assembly.” AIAA paper 2005–5117, 17th AIAA computational fluid dynamics conf.

Toronto, Ontario, Canada.

- Olivieri, A., Campana, E.F., Francescutto, A. and Stern, F., 2006, " Beam Sea Tests of Two Different Ship Models in Large Amplitude Regular Waves" Proceedings of the 9th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles.
- Orihara, H. and Miyata, H., 2003, " Evaluation of added resistance in regular incident waves by computations fluid dynamics motion simulation using overlapping grid system." J. Mar. Sci. Technology, Vol. 8, pp. 47-60.
- 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).
- Weymouth, G., Wilson, R. and Stern, F., 2005, " RANS CFD Predictions of Pitch and Heave Ship Motions in Head Seas," J. Ship Res., Vol. 49, pp. 80-97.
- Wilson, R.V., Carrica, P.M. and Stern, F., 2006, " Unsteady RANS simulation of a surface combatant with roll motion," Computers & Fluids, Vol. 35, No. 5, pp. 419-451.

< 박 일 룡 >

< Seyed Hamid Sadat Hosseini >

< Frederick Stern >