

KRISO 컨테이너 및 VLCC 선형에 대한 RANS 시뮬레이션

김진[†]*, 박일룡*, 김광수*, 반석호*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

RANS Simulations for KRISO Container Ship and VLCC Tanker

Jin Kim*, Il-Ryong Park*, Kwang-Soo Kim* and Suak-Ho Van*

Maritime & Ocean Engineering Research Institute (MOERI)/KORDI*

Abstract

The finite volume based multi-block RANS code, WAVIS developed at KRISO, is used to simulate the turbulent flow field around the KRISO container ship (KCS) and the modified KRISO tanker (KVLCC2M). The realizable $k-\epsilon$ turbulence model with a wall function is employed for the turbulence closure. The free surface flow with and without propeller is mainly investigated for the KCS and the double model flow is concerned for the KVLCC2M which is obliquely towed in still water. The computed results are compared with the experimental data provided by CFD Tokyo Workshop 2005 in terms of wave profiles, hull surface pressure and wake distribution with and without propeller for the KCS and wake distribution and hydrodynamic forces and moments with various drift angles for the KVLCC2M.

※Keywords: CFD(전산유체역학), RANS simulation(RANS 시뮬레이션), Free surface flow(자유수면 유동), Self-propelled condition(자항조건), Oblique condition(사항조건)

1. 서론

설계된 선박의 유체성능을 예측하기 위한 많은

접수일: 2005년 8월 10일, 승인일: 2005년 10월 10일

†주저자, E-mail: jkim@moeri.re.kr

Tel: 042-868-7216

연구노력은 현재까지 계속되고 있다. 일반적으로 선형의 유체성능 예측은 예인수조의 모형시험을 통해 수행되고 있다. 이론적인 해석법으로서 전산 유체역학(CFD)은 최근 10년 동안 상당히 발달하였다. 현재 CFD는 선형을 개발하고 그 성능을 평가하는데 있어서 설계자의 중요한 도구로 자리잡고 있다.

한국해양연구원 해양시스템안전연구소(KORDI/KRISO)는 선박의 유체성능을 보다 신빙성을 가지

고 해석할 수 있는 CFD 프로그램을 개발하였다. 현재 이 프로그램은 WAVIS 라는 이름으로 국내 대부분 조선소에서 실제선형의 유체성능 평가를 수행하는데 사용되고 있다. 또한 개발된 CFD 프로그램에 대한 검증에 대한 비교자료로서 실제선형에 대한 모형시험을 수행하여 그 데이터를 확보하고 있다(반석호 등 1997, 1998). 그리고 이 모형시험 데이터의 일부는 2005 CFD Tokyo Workshop(Hino 2005)과 Gothenburg 2000 CFD Workshop(Larsson et al. 2000)의 공식적인 검증자료로 제공되었다.

본 논문에서는 level-set 법을 이용한 자유수면 문제 해석, body-force 법을 이용한 자항문제 해석과 이중모형 유동을 가정한 선박의 사항문제에 본 WAVIS 를 적용한 결과를 보여준다. 여기서, 구체적인 수치해석 대상으로 2005 CFD Tokyo Workshop에서 제공된 검증 예제를 도입하였다. 산업 현장에서의 실질적인 사용을 고려해 개발된 WAVIS 는 벽함수 기법을 사용한 realizable $k-\epsilon$ 난류모형과 전체적으로 2 차 정도 정확도를 가지는 수치해석 기법을 사용하여 계산시간을 감소시켰다.

2. 수치해석 기법

본 연구에서는 대상 유체를 비압축성 유체로 가정하고 지배방정식으로는 운동량 이송식에 대하여 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 식을, 그리고, 질량보존을 위해 연속방정식을 정식화하였다. 수치 계산을 위한 기본 좌표계로는 선체의 진행 방향과 반대 방향을 x , 중력과 반대 방향인 연직 상방향을 z , 그리고 우현 방향을 y 로 하는 Cartesian 직교 좌표계를 사용하였고, 좌표계의 원점은 선체 중심면(center plane)과 중양면(midship), 그리고 정수면(calm free surface)이 만나는 점에 위치시켰다.

모든 식은 속도 (U_∞), 선체길이(L), 그리고 밀도 (ρ)로 무차원화하였다. 연속 방정식과 운동량 이송방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i, \quad (2)$$

여기서 $u_i(u, v, w)$ 는 $x_i(x, y, z)$ 방향의 평균 속도 성분을 나타내고, p 는 압력, f_i 는 체적력을 나타낸다. τ_{ij} 는 점성과 난류에 의한 유효응력을 나타내며, 유효 응력은 Boussinesq 의 isotropic eddy viscosity model 을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 k 는 난류의 운동에너지이고, ν_e 는 turbulent eddy viscosity ν_t 에 유체의 운동학적 점성계수 ν 를 합한 유효 점성계수로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nu_e = \nu_t + \frac{1}{Re} \quad (4)$$

한편 Re 는 레이놀즈(Reynolds) 수이다.

본 연구에서는 이러한 3 차원 비압축성 RANS 코드로서 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 이미 개발한 WAVIS 를 활용하였다. 이 코드는 실제 선형의 유동장에 대하여 적용해보고 검증한 바 있다 (Kim and Van 2000, Kim et al. 2002).

난류모형에 대해서는, realizable $k-\epsilon$ model (Shih et al. 1995)을 적용하였다. 벽근처의 경계층에 대하여 보다 엄밀한 계산을 위해서는 near-wall turbulence model 을 이용하는 것이 바람직하나, 벽면 아주 가까운 곳까지 유동을 계산해야 하기 때문에 대단히 많은 수의 격자가 필요하고, 수치계산을 수행할 때의 수렴성 및 안정성이 크게 떨어지는 등 많은 어려움에 봉착하게 된다. 본 연구에서는 수치 계산의 정도를 유지하면서도 효율성을 보장하기 위해서 벽면에서 적당한 위치에서 난류 경계층 이론에서 널리 알려진 벽법칙을 사용하기로 하고 현재 가장 많이 쓰이고 있는 Launder and Spalding's wall function (Launder and Spalding 1974)을 적용하였다. 이를 사용하면 벽면에서 첫번째 격자의 위치를 통상 near wall

model 을 사용할 때보다 100 배 정도 띄울 수 있기 때문에 매우 유리하다. 주어진 운동량 방정식을 이산화 하기 위해서 본 연구에서는 유한 체적법을 사용하였다. 대류항에 대해선 3 차 정도를 가지는 QUICK 기법을, 확산항에 대해선 중앙 차분법을 적용하였다. 또한 속도장에 대한 divergence-free 조건을 만족 시키는 압력장을 구하기 위해 SIMPLEC 방법을 적용하였다. 이러한 수치기법에 대한 보다 자세한 설명은 Kim et al.(2000)의 참고 문헌을 참조하기 바란다.

자유수면을 모사하기 위해 레벨셋 기법 (Level-Set method, Sussman et al. 1997)을 적용하였다. 보다 정도 높은 자유 수면을 모사하고 수렴성을 보장하기 위해 자유 수면 근처의 격자 개수를 충분히 늘려서 생성하였으며, 레벨셋 기법을 정식화할 때 내재적 이산화 방법을 도입하였다.

프로펠러 효과를 모델링하기 위해서, 프로펠러 날개 주변의 국부 유동을 직접 계산하는 방법 대신, 지배방정식에 체적력의 형태로 분포시키는 방법을 채택하였다 (Stern et al. 1988). 이 방법은 축대칭 체적력을 반경방향과 회전방향으로 분포시키며 반경과 회전방향은 다음과 같은 식에 의해 분포의 크기를 결정한다.

$$\begin{aligned}
 f_{bx} &= A_x r^* \sqrt{1-r^*} \\
 f_{b\theta} &= A_\theta \frac{r^* \sqrt{1-r^*}}{(1-R_H)r^* + R_H}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 r^* &= \frac{r/RP - RH}{1 - RH} \\
 r &= \sqrt{(y - Y_PROP_CENTER)^2 + (z - Z_PROP_CENTER)^2} \\
 A_x &= \frac{C_T}{(DXPROP) 16(4 + 3RH)(1 - RH)} \\
 A_\theta &= \frac{K_Q}{(DXPROP) J^2 \pi(4 + 3RH)(1 - RH)}
 \end{aligned}$$

이며 RP 는 프로펠러 반경, RH 는 허브 반경, 그리고 DXPROP 은 체적력이 분포되는 셀의 축방향(x

거리로써 프로펠러가 회전할때의 최대 축방향 거리로 입력한다.

3. 수치해석 결과

KRISO Container Ship (KCS)

KCS 모형선 주위 자유수면 유동에 대해 프로펠러 영향의 유무에 따른 수치계산을 수행하였다 (Reynolds number $Re=1.4 \times 10^7$, Froude number $Fn=0.26$).

일반적으로 수치해석 결과의 정도는 수치해석 기법에 의존한다. 그러나 계산조건에 적합한 수치 격자를 생성하여 사용하는 것 또한 해의 정도를 높이데 중요하다. 특별히 자유수면 유동을 해석할 때 도입된 자유수면 주위의 격자분포 특징은 수치해석 결과에 큰 영향을 준다. 본 논문에서는 이전 연구결과(박일룡 등 2004)를 참고하여 KCS 우현 자유수면에는 30,238 개의 격자점을 분포하였다. 모형선이 생성할 수 있는 최고 파고와 최저 파저의 z 좌표 위치를 고려하여 이 둘을 포함하는 영역에서는 연직방향으로 약 32 개의 격자점이 차지하도록 하였다. 주어진 KCS IGES 파일로부터 격자계는 상용프로그램 GRIDGEN 을 이용하여 전체 모양이 O-H 형태가 되도록 생성되었다. 선미 프로펠러를 포함한 수치계산 조건을 고려하여 수치 격자계는 선형의 우현과 좌현 영역 모두를 포함하고 있다. 여기서, 전체 격자점수는 1,963,496 개이다.

Fig. 1 은 본 논문에서 사용된 KCS 주위 다블록 격자계를 보여주고 있다. 선미에서 다른 격자 블록과 인접한 원형 실린더 격자 블록은 프로펠러 체적력을 보다 잘 분포시키기 위해 만들어졌다. 그림에 보인 격자는 프로펠러 유무에 따른 모든 수치해석에 동일하게 사용되었다.

Table 1 은 모형시험과 수치계산에서 얻어진 마찰저항계수(C_F), 압력저항계수(C_D) 그리고 전체저항계수(C_T)을 비교하고 있다. 모형시험의 마찰저항은 ITTC-1957 의 공식으로부터 계산된 결과이며 압력저항은 잉여저항(residuary resistance)을 나타낸다. 그러므로 이 항목들에 대해서는 수치해석에서 얻어진 결과와 직접 비교하는 것은 무리가

Table 1 Comparison of the resistance coefficients

	$C_F \times 10^3$	$C_P \times 10^3$	$C_T \times 10^3$
Computation (Error)	2.773	0.823	3.596 (1%Exp)
Experiment	2.830 (ITTC)	0.730	3.560



Fig. 1 Grid Systems for the KCS

있다. 본 수치해석에서 얻은 전체저항계수는 모형 시험과 비교하여 약 1%의 오차를 보여주고 있다.

Fig. 2 와 3 은 레벨셋법을 이용하여 계산된 선체 주위 전체 파형분포와 선체표면을 따른 선속 파형을 실험결과와 각각 비교하고 있다. 수치해석 결과는 모형시험 결과와 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 특히 수치계산 결과는 트랜섬 뒤쪽의 선미 파의 같이 복잡한 자유수면을 잘 묘사하고 있어 본 논문에서 사용된 레벨셋법이 비선형 자유수면 문제 해석에 적합한 수치기법으로 판단된다.

Fig. 4 에서 6 은 프로펠러의 유무에 따른 KCS 선형 주위 유동 계산에서 프로펠러 위치 바로 뒤쪽 $x/L_{pp}=0.4911$ 위치에서 축방향(x) 속도분포와 접선방향 속도벡터를 실험결과와 비교하고 있다.

Fig. 4 에서 선미 프로펠러 유동을 고려하지 않은 수치해석 결과는 모형시험의 계측결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 프로펠러 중심 부근에서 실험결과보다 낮은 축방향 속도분포를 나타내는 것은 프로펠러 허브에 대한 수치격자 모델링을 정확하게 하지 않았기 때문이다.

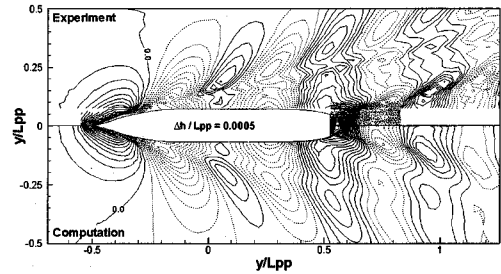


Fig. 2 Comparison of wave patterns

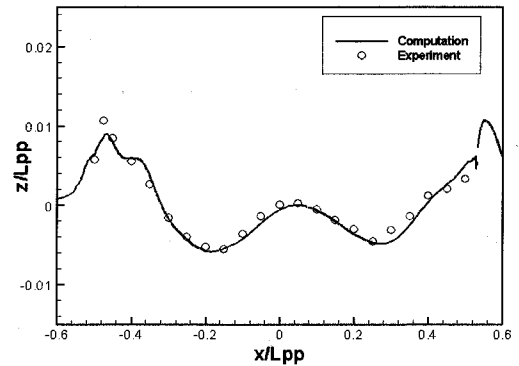


Fig. 3 Comparison of hull surface wave profile

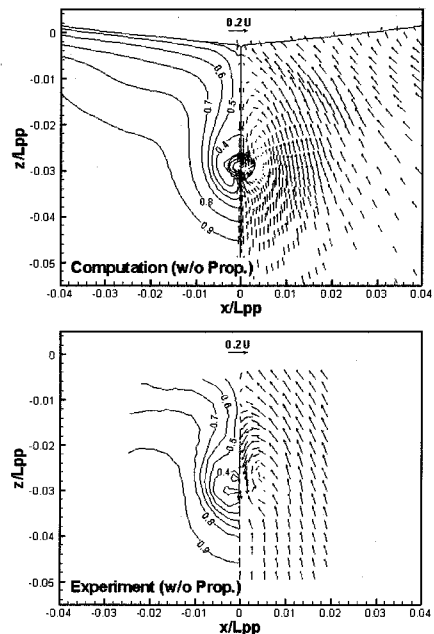


Fig. 4 Comparison of wake distribution at $x/L_{pp}=0.4911$

프로펠러 유동의 효과는 추력과 토크 계수 $K_T = 0.170$, $K_Q = 0.0228$ 를 바탕으로 유도된 체적력을 프로펠러가 차지하는 선미 영역에 분포하여 전체 수치해석을 수행하는 것으로 고려하였다.

Fig. 5 는 프로펠러 바로 뒤쪽의 축방향 속도분포를 비교하고 있다. 프로펠러에 유입되는 유동의 입사각(angle of attack)에 영향을 미치는 점선방향의 속도분포가 국부적으로 다르기 때문에 일반적으로 모형시험 결과에서는 축방향 속도가 우현이 좌현보다 가속된 형태를 보여준다. 그러나 본 논문에서 도입된 축방향(x)과 점선방향의 성분으로 분리될 수 있는 프로펠러 체적력(Stern et al. 1988)은 축대칭 형태를 가지고 있기 때문에 수치해석 결과에서 축방향 속도가 좌현과 우현에서 거의 동일한 분포를 나타내고 있다.

Fig. 6 은 Fig. 5 와 동일한 위치에서 점선방향 속도벡터 분포를 비교하여 나타내고 있다.

KCS 의 형상계수(form factor)를 계산하기 위해 자유수면 영향을 무시한 이중모형 유동을 계산하였다.

Table 2 는 저항계수들과 2005 CFD WORKSHOP 에서 추천하는 공식($1+k=(C_T)_{double\ model}/C_{FD}$)으로 계산된 형상계수를 나타내고 있다. 예인조건에서 계산된 전체저항은 Table 1 에 주어져 있으며 공칭반류(nominal wake fraction, w_n)는 0.723 (ref. 0.686 in experiment)이다. 본 논문에서 얻어진 KCS 저항해석 관련 모든 파라미터들은 2005 CFD WORKSHOP 논문집(Hino 2005)에 제출되어 실험결과 및 타 연구자들의 결과와 비교되어 있다. 본 수치해석 결과는 모형시험 결과와 잘 일치하였다.

KRISO VLCC2M (KVLCC2M)

모형선 스케일($Re = 3.945 \times 10^6$) 조건에서 KVLCC2M 선형의 사향상태($0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 12^\circ$) 유동 해석을 수행하였다. 여기서, KVLCC2M 은 KRISO 에서 개발된 KVLCC 선형을 일본 NMRI(National Maritime Research Institute)에서 부분적으로 수정되어 2005 CFD WORKSHOP 의 표준선형들 가운데 하나로서 제공된 선형이다.

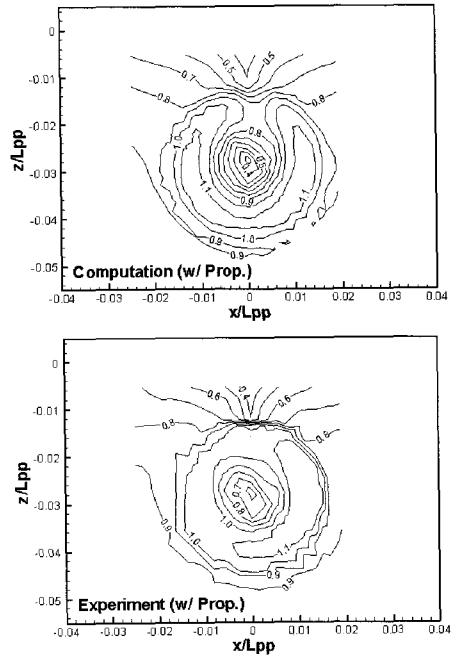


Fig. 5 Axial velocity contours at $x/L_{pp}=0.4911$

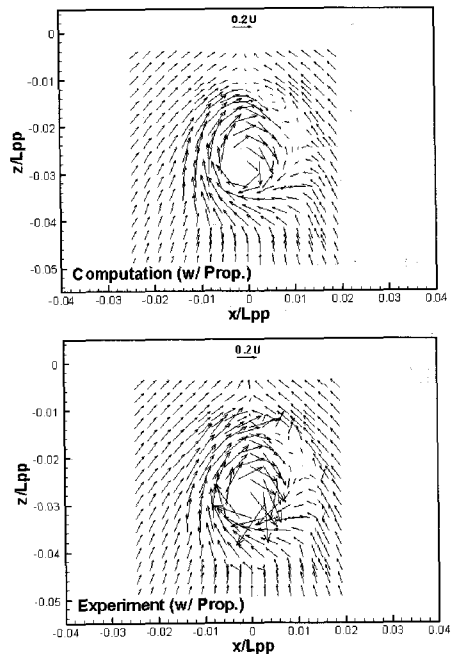


Fig. 6 Cross flow vectors at $x/L_{pp}=0.4911$

Table 2 Resistance Coefficients for the double model

$C_T \times 10^3$	$C_F \times 10^3$	$C_P \times 10^3$	$1+k$
3.115	2.719	0.396	1.101

Table 3 The number of grid points

Coarse	Medium	Fine
387,936	1,081,466	2,919,784

Table 4 The grid convergence of integral variables

	Coarse	Medium	Fine	Data
$C_T \times 10^{-3}$	4.2146	3.9784	3.8844	4.26
$C_F \times 10^{-3}$	3.3037	3.2959	3.2719	3.55
$C_P \times 10^{-3}$	0.9109	0.6825	0.6125	0.71
$1+k$	1.276	1.207	1.187	1.2

Table 5 Verification of integral variable

R_G	ρ_G	C_G	U_G
0.398	2.66	1.51	2.96% C_T

Table 6 Validation of integral variable

	E	U_V	U_D	U_{SN}
% C_T	8.8	3.0	0.7	2.96

CFD 수치해석 기법의 검증 도구로서 Stern et al.(2001)이 제공한 V&V(Validation & Verification) 절차를 적용하기 위해 격자 조밀도를 체계적으로 변화시켜 세 가지 격자계를 생성하였다. 여기서, 격자 조밀도 비율(r_G)은 정수가 아닌 $\sqrt{2}$ 를 사용하였다. 격자계 생성은 먼저 가장 조밀한 fine grid를 만들고 각 격자선 방향으로 매 2 번째 격자점들을 제외시켜 가장 소밀한 coarse grid를 만들 수 있다. 그러나 medium grid의 경우 격자 조밀도가 정수가 아니기 때문에 fine grid와 coarse grid를 바탕으로 내삽(interpolation)을 통해 생성한다. 전체 격자계는 네 개의 블록으로 구성하였으며 전체 격자점의 수는 Table 3에 비교하여 나타내었다.

V&V 절차에서 적분변수로서 전체저항계수 C_T 를 이용하였다. Table 4는 마찰저항계수(C_F), 압력저항계수(C_P), 전체저항계수(C_T) 그리고 형상계수

($1+k = C_T / C_F$)에 대한 격자의 수렴도를 보여주고 있다. 전체저항계수(C_T)에 대한 격자 수렴비 R_G 의 값은 0.398이다. 이 사실은 전체저항계수 C_T 는 격자계가 조밀해 질수록 단조수렴(monotonic convergence)의 특성을 가진다고 할 수 있다. V&V 해석과정에서 얻어진 정도 차수(accuracy order, ρ_G) 그리고 수정 인자(correction factor, C_G)와 같은 다른 변수들은 Table 5에서 볼 수 있다.

Table 5에서 격자 불확실성(grid uncertainty) $U_G = 2.96\%$ C_T 는 다음과 같은 과정을 통해 구해졌다. 해석에서 얻을 수 있었던 반복적 불확실성(iterative uncertainty) U_I 는 무시할 수 있었으므로 수치 시뮬레이션 불확실성(numerical simulation uncertainty) U_{SN} 은 격자 불확실성 U_G 와 같다고 할 수 있다. 모형시험에서 제공된 데이터의 불확실성 U_D 는 $0.7\% C_T$ 이다. Table 6에서 U_D 와 U_{SN} 로부터 검증 불확실성(validation uncertainty)이 $3.0\% C_T$ 인 것으로 나타났다. 해석결과에서 $|E| > U_V$ 로 나타났기 때문에 결론적으로 본 수치기법으로 구한 적분변수인 전체저항계수 C_T 는 'verified' 되었다고 할 수 있으나 오차 $|E| = 8.8\% C_T$ 수준으로 'validated'되지는 않았다고 판단할 수 있다.

Fig. 7은 세 격자계로 계산한 프로펠러면의 축방향 속도분포를 나타내고 있다. 그림에서 격자수가 증가하면서 고리(hook)모양의 반류특성이 뚜렷해지는 것을 볼 수 있다.

자유수면을 무시한 이중모형 유동을 가정하여 KVLC2M의 사항상태 계산을 수행하였다. Fig. 8은 coarse, medium, fine grid에서 계산한 축방향 힘계수(C_X), 측면 작용 힘계수(C_Y), 요(yaw) 모멘트계수(C_N), 그리고 유체력의 종 중심점(longitudinal center position, C_N / C_T)을 보여주고 있다. 그림에서 Coarse grid와 medium grid결과 사이의 차이보다 medium grid와 fine grid결과 간의 차이가 명확히 작은 것을 확인할 수 있다. 유체력과 모멘트계수에 대한 V&V 해석결과와 자세한 내용은 2005 CFD WORKSHOP의 논문집에서 볼 수 있다. 참고로 workshop 모형시험의 데이터 불확실성이 사항 각도 $0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$ 에 대해서만 제공되었기 때문에 본 논문에서는 파라메트릭 스플라인

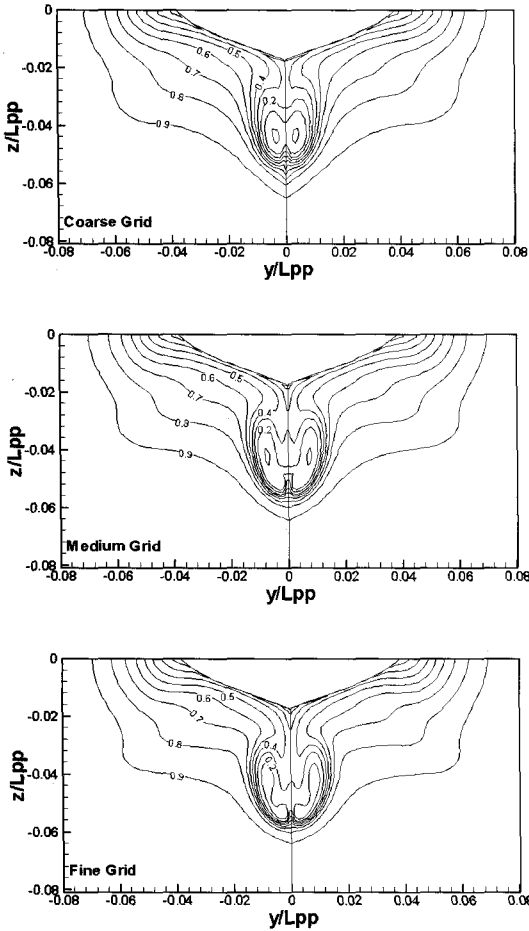


Fig. 7 Axial velocity contours on the propeller plane

(parametric spline) 내삽을 한 후 격자 불활성성을 구하였다.

4. 결론

WAVIS 를 이용한 RANS 시뮬레이션을 통해 KCS 선형 주위 프로펠러 유무에 따른 점성 자유수면 유동과 이중모형 유동을 가정한 KVLC2M 의 사항상태의 유동 특성을 조사하였다. 개발된 WAVIS 는 주어진 모든 유동문제에 성공적으로 적용되었다. KCS 선형 문제의 경우 프로펠러를 고려한 조건과 그렇지 않은 모든 조건에 대해 본 수치해석

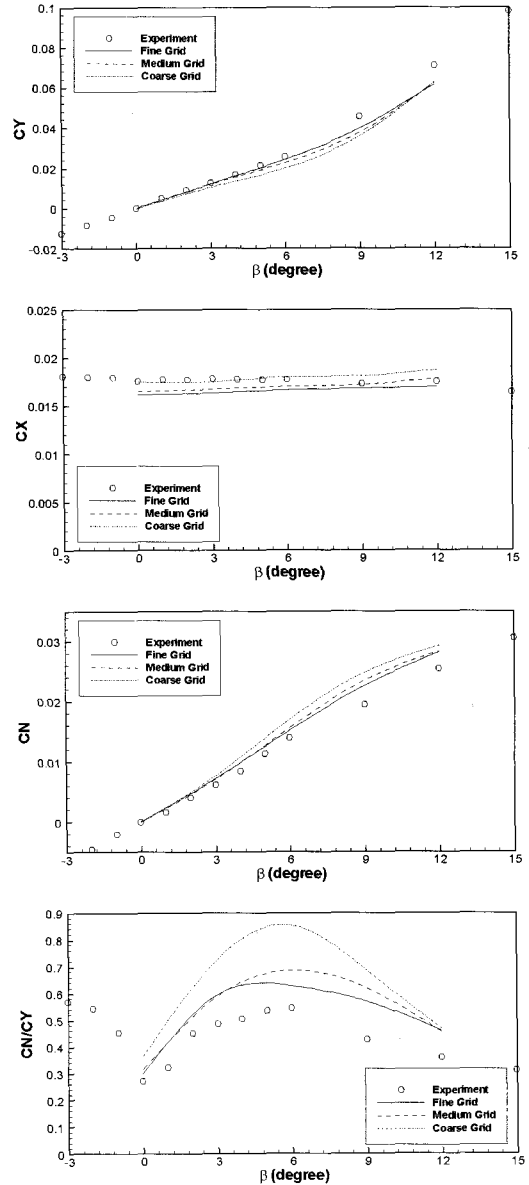


Fig. 8 Hydrodynamic forces and moments with various drift angles

결과는 실험결과와 잘 일치하였다. KVLC2M 선형의 수치해석에서 계산된 전체저항 계수는 모형시험 결과와 8.8% C_T 의 오차를 나타 내었다. 현재 전산유체역학의 수준에서 자유수면 을 고려한 수치해석이 매우 어려운 작업이 아니

로, 앞으로는 선박 저항성능 해석시 자유수면 영향을 고려하여 전체저항계수를 구해야 할 것으로 판단된다. 아울러, VLCC 선형과 같이 낮은 Froude 수 특성을 가진 저속선형에 대한 유동해석 결과를 개선하기 위해서는 벽면 근방 난류 경계층을 보다 정확히 모사할 수 있는 난류모형을 도입해야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문의 내용은 산업자원부에서 지원하는 과제(PN00630 & PN00690)와 한국해양연구원의 기본과제(PE00950)의 연구결과의 일부임을 밝혀드립니다.

참 고 문 헌

- 박일룡, 김진, 반석호, 2004, " Level-Set 법을 이용한 일반상선의 저항성능 해석," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 2 호, pp. 79-89.
- 반석호, 임근태, 김우전, 김도현, 윤현세, 엄주열, 1997, " 3600TEU 급 컨테이너선 모형주위의 유동 계측," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 300-304.
- 반석호, 김우전, 김도현, 임근태, 이춘주, 엄주열, 1998, " 300K VLCC 모형의 유동 계측," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 185-188.
- Hino, T.(ed.), 2005, Proc. Of CFD Workshop Tokyo 2005, Tokyo, Japan.
- Kim, W.J. and Van, S.H., 2000, " Comparisons of turbulent flows around two modern VLCC hull forms," Proc. of a Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics: Gothenburg 2000, Gothenburg, Sweden.
- 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.
- Larsson, L., Stern, F. and Bertram, V., (ed.), 2000, Gothenburg 2000: A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Gothenburg,

- Sweden.
- Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974, " The numerical computation of turbulent flows," Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., Vol. 3, pp. 269-289.
- Shih, T.H., Liou, W.W., Shabir, A. and Zhu, J., 1995, " A new eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - model development and validation," Computers and Fluids, Vol. 24, pp. 227-238.
- Stern, F., Kim, H.T., Patel, V.C. and Chen, H.C. 1988, " A viscous flow approach to the computation of propeller-hull interaction," Journal of Ship Research, Vol. 32, No. 4, pp. 246-262.
- Stern, F., Wilson, R.V., Colemann, H. and Paterson, E.G., 2001, " Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations - Part 1: Methodology and Procedure," ASME J. Fluids Engineering, Vol. 123, No. 4, pp.793-802.
- 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.



< 김 진 > < 박 일 룡 >



< 김 광 수 > < 반 석 호 >