대 한 조 선 학 회 논 문 집
제 42 권 제 6 호 2005 년 12 월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 42, No. 6, pp. 583-592, December 2005

LNG 운반선의 자유수면을 포함한 자항상태 난류유동장의 수치해석

김 진†*, 박일룡*, 김광수*, 반석호*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

RANS Computation of Turbulent Free Surface Flow around a Self Propelled KLNG Carrier

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

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

Abstract

The turbulent free surface flow around a self-propelled KRISO 138K LNG Carrier is numerically simulated using the finite volume based multi-block RANS code, WAVIS developed at KRISO. The realizable k-ε turbulence model with a wall function is employed for the turbulence closure. The free surface is captured with the Level-Set method and body forces are used to model the effects of a propeller without resolving the detail blade flow. In order to obtain an accurate free surface solution and stable convergence, the computations are executed with a proper fine grid refinement around the free surface and with an adoption of implicit discretization scheme for the Level-Set formulation. The computed velocity vectors at the several stations and wave patterns show a good agreement with the experimental results measured at the KRISO towing tank.

※Keywords: Turbulent free surface flow (난류자유수면), Multi-block grid (다중블록 격자계), Level-set method(레벨셋 방법), Wave pattern (파형), Self-propelled condition(자항조건)

1. 서언

매우 오래 전부터 수많은 공학자들이 선박의 유체역학적 성능을 추정하기 위한 노력을 경주해 오고 있다. 그러나, 종래에는 예인수조에서의 모형시험에 의해 실선의 유체성능을 예측하는 방법이 대부분이었으며, 이는 시간과 경비가 많이 소요되기 때문에 보통 한 척의 선형을 시험하고 설계를 마치는 실정이었다. 이러한 결점을 보완하고자 최근에는 전산유체역학(CFD)의 기법을 활용하려는 노력이 대안으로서 부각되고 있다. 현재, 점점 더 많은 설계자들이 이러한 전산유체역학을 이용한 기법을 선형설계의 개발을 위한 도구로 채택하는 일이 늘어나고 있다.

접수일: 2005 년 8 월 10 일, 승인일: 2005 년 10 월 8 일
†주저자, E-mail: jkim@moeri.re.kr
Tel: 042- 868-7216

현재까지 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(MOERI)에서는 선박의 유체역학적 성능을 추정하기 위한 수치해석 도구들이 보다 더 안정적으로 운용될 수 있도록 많은 노력을 기울여 왔다. 이 과정에서 개발된 선체주위의 유체성능 수치해석 프로그램인 " WAVIS" 는 현재 많은 조선소에서 실제 선형개발을 위한 도구로써 폭넓게 활용되고 있는 상황이다. 또한 이와 관련하여, 수치해석도구를 검증하기 위하여 실제 선형주위의 유동에 대한 실험 자료를 확보하여 수치해석 기법의 검증에 활용하고 있다 (반석호 등 1997, 박진호 1998). 얻어진 실험 자료들은 Gothenburg 2000 워크샵(Larsson et al. 2000)에서 대표 모형선박 자료로 채택되기도 하였다. 이들 모형시험 자료의 채택은 이전의 워크샵(Larsson et al. 1991, Kodama 1994)과 비교하여 더욱 현실적인 선체의 형상에 대한 수치해석 기법의 적용 및 비교를 가능하게 하였다. 그러나, 아쉬운 점은 Gothenburg 2000 워크샵까지는 주요한 관심은 선체 알몸저항에 초점이 맞추어져 있었다.

최근 반석호 등(2003)은 KRISO 138K LNG 운반선 (KLNG) 모형에 프로펠러와 타를 장착한 상태에서 선체주변의 유속과 파계를 예인수조에서 계측한 바 있다. 이러한 계측결과는 자행상태의 모형선 주변 유동장에 대하여 다양한 유동장 분석이 향후 가능하리라 생각된다. 뿐만 아니라, 기존 ITTC 벤치마크 자료였던 KRISO 콘테이너선(KCS)과 KRISO 대형유조선(KVLCC) 이외에 또 다른 벤치마크 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

LNG 선은 현재 조선소에서 가장 활발하게 건조되고 있는 선박 중 하나이다. 일반적으로 LNG 선의 선형은 VLCC 와 마찬가지로 비대한 형태를 취하고 있지만, 선속은 VLCC 보다 훨씬 더 고속으로 운항된다. 따라서, 선체 주변의 파형과 파계는 다른 선박에 비하여 단파장의 파들이 많이 형성되는 편이고, 수치적으로 파형을 제대로 구현하기에 매우 까다로운 편이다. 본 논문에서는 기존 WAVIS 코드에 레벨셋 방법(Level-Set method)을 적용하여 자유수면을 모사하고, 자항상태 조건을 적용하기 위해 프로펠러 효과를 체적력으로 대체하여 계산을 시도하였다. 또한 자유수면을 모사하기 위해서는 격자 해상도가 매우 높아야 하므로, 계산시간을 단축하기 위하여 코드의 병렬화를 구현하였다. 병렬화 방법으로는 다블록격자계의 각 격자블록을 하나의 CPU 에 할당하는 방식인 영역 분할법을 채택하였으며, 각 블록 경계면에서의 유동정보의 교환은 MPI(Message Passing Interface)을 이용하였으며 본 연구의 수치계산에는 LINUX PC 클러스터(Pentium IV3.2 GHz)에서 20 개의 노드를 사용하여 수행하였다.

2. 점성유동 해석기법

본 연구에서는 대상 유체를 비압축성 유체로 가정하고 지배방정식으로써 운동량 이송식에 대하여 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 식을, 그리고, 질량보존을 위해 연속방정식으로 정식화하였다. 수치 계산을 위한 기본 좌표계로는 선체의 진행 방향과 반대 방향을 x, 중력과 반대 방향인 연직 상방향을 z, 그리고 우현 방향을 y로 하는 Cartesian 직교 좌표계를 사용하였고, 좌표계의 원점은 선체 중심면(center plane)과 중앙면(midship), 그리고 정수면(calm free surface)이 만나는 점에 위치시켰다. 모든 식은 속도 (U_∞), 선체길이(L), 그리고 밀도 (ρ)로 무차원화했다.

연속 방정식과 운동량 이송방정식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 . \tag{1}$$

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

여기서 $u_i(u,v,w)$는 $x_i(x,y,z)$ 방향의 평균 속도 성분을 나타내고, p 는 정압, 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.

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

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.

$$\nu_e = \nu_t + \frac{1}{\mathrm{Re}} \tag{4}$$

한편 Re는 레이놀즈(Reynolds) 수이다.

본 연구에서는 이러한 3 차원 비압축성 RANS 코드로서 KRISO 에서 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-ε 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 계산해야하기 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 멀리할 수 있기 때문에 수치해의 안정성 측면에서 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 and Van(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).

3. 설계제원과 실험조건

Table 1 과 Fig. 1 은 KLNG 의 주요목과 정면도를 나타낸다. 또한 테스트 프로펠러 (KP632)의 주요제원은 Table 2 에 표시하였다. 예인 수조 시험을 위해, KLNG 의 모형선은 1/38.6364 의 축척비를 가지는 목형으로 제작되었고, 모형 프로펠러 직경은 0.22m 이다. 완전 난류유동을 재현하기 위해 난류촉진기를 station 19, 구형 선수 중간에서부터 거드 방향으로 10mm 간격으로 설치하였다.

예인수조 시험에서, 모델과 실선의 속도비가 축척비에 대하여 제곱근의 값을 가지는 푸르드 상사법칙을 적용한 선속으로 예인하였다. 이때, 레이놀즈 수 (Reynolds no.)와 푸르드 수 (Froude no.)

Table 1 Principal particulars of the test ship (KLNG)

KLNG	Prototype	Model
Scale ratio	38.6364	
Lpp (m)	266.0	6.8847
B (m)	42.6	1.1026
T (m)	11.3	0.2925
Displacement (m^3)	95940.0	1.6635
Wetted surf. area (w/o rudder) (m^2)	13831.0	9.2653
Rud. surf. area (m^2)	151.0	0.1012
C_B	0.7493	
C_M	0.9857	
Speed (m/s)	10.0317	1.6139
Froude No. (Fn)	0.1964	
Reynolds No. (Re)	$2.24X10^9$	$9.33X10^6$

Table 2 Principal particulars of the test propeller

KP 632	Prototype	Model
Scale ratio	38.6364	
Diameter (m)	8.5	0.22
Expanded area ratio	0.7641	
Pitch ratio	0.8895	
Hub ratio	0.16	
Rake ratio	0	
Skew angle (deg.)	29.92	
Number of blades	6	
Section type	NACA	

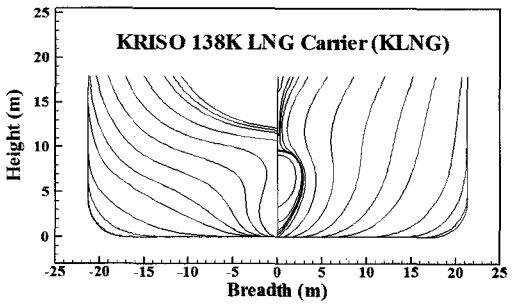


Fig. 1 The body plan of KRISO 138K LNG carrier

는 각각 9.33×10^{6} 과 0.1964 이다.

모형선은 예인전차에 2 개의 클램프로 고정시켰으며, 모든 계측은 고정조건 (Fixed condition)하에서 수행되었다. 즉 trim 과 sinkage 는 모두 고정시켰다.

4. 계산 결과

4.1 격자 생성

수치해의 에러와 불확실성 (uncertainty)을 평가하기 위해서, 최소 3 개이상의 서로 다른 해상도의 격자계가 필요하다. 본 연구에서는 Stern et al. (2001)이 제안한 비정수격자분할비 (Non-integer grid refinement ratio) $r_G=\sqrt{2}$ 를 택하여 격자 해상도를 정하였다. 우선 미세 격자 (fine grid)를 생성하고, 거친 격자 (coarse grid)는 미세 격자의 두 점 중 한 점을 제거하는 방식으로 생성하였다. 그러나, 중간격자 (medium grid)는 정수값으로 결정되어지지 않기 때문에 미세 격자점들로부터 내삽하는 방식으로 생성하였다.

격자 생성은 상용 코드인 GRIDGEN (Pointwise Inc)을 이용하였다. 거친 격자, 중간 격자, 미세 격자 등 3 가지 격자계는 모두 반쪽 계산영역에서 10 개의 블록으로 나누어 구성하였다. Fig. 2 는 KLNG 모형 선에 대한 다중 블록 격자계를 나타낸 그림이다. 확대창을 보면 프로펠러 효과를 체적력으로 표현하기 위한 특별한 격자계를 추가하였음을 알 수 있다. 프로펠러 효과를 고려하지 않은 계산에서는 10 개 격자 블록의 반쪽 영역만으로 계산을 수행하였고, 자항상태의 계산을 위해서는 20 개 격자 블록의 전 계산영역에 대하여 계산을 수행하였다. Fig. 3 은 자유수면을 계산하기 위한 격자계 분포를 나타낸 그림이다. 총 격자수와 선체 표면에 가장 가까운 격자점에 대한 y^+ 값은 Table 3 에 표시하였다.

4.2 오류(verification)와 타당성(validation) 검증(V&V) 연구

수치해석 오류와 불확실성을 평가하기 위한 방법으로 Stern et al.(2001) 이 제시하여 ITTC 저항성 분과 위원회(Resistance Committee)에서 추천되어진 오류와 타당성 검증 방법 (V&V) 을 선택하였다. V&V 해석을 위하여 전저항값 (C_T)이 적분변수로 선택하였다. 본 연구에서는 유동해석의 불확실성과 오류에 대한 평가를 격자에 대해서만 수행하였다. Table 4 에 전저항 계수 C_T ,압력저항계수 C_P ,그리고 마찰저항계수 C_F 에 대한 격자 수렴도를 표시하였다. 여기서 오류값(error) E는 $E(\%) = (D-S)/D\times100$ 로 정의하고, 거친격자계와 중간격자계, 그리고 중간격자계와 미세 격자계 간의 수치해 변화는 각각 $\varepsilon_{32}=S_3-S_2$ 와 $\varepsilon_{21}=S_2-S_1$ 로 정의 하였다. 계산되어진 격자 수렴비 ($R_G=\varepsilon_{21}/\varepsilon_{32}$) 는 -0.37 이다. 이는 전저항 계수가 진동형 수렴성 (Oscillatory convergence) 을 보인다는 것을 의미한다. 진동형 수렴성에 대한 시뮬레이션 불확실성지수 (Simulation uncertainty) U_{SN} 은 수치해의 상방 경계치 (S_U)와 하방 경계치(S_L)를 이용하여 아래와 같이 평가할 수 있다.

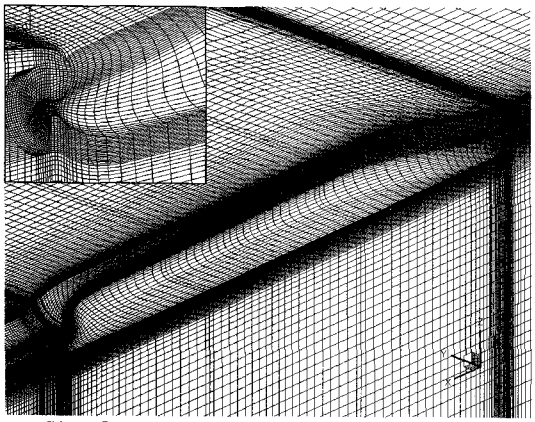


Fig. 2 Partial view of multi block grid system for KRISO 138K LNG carrier

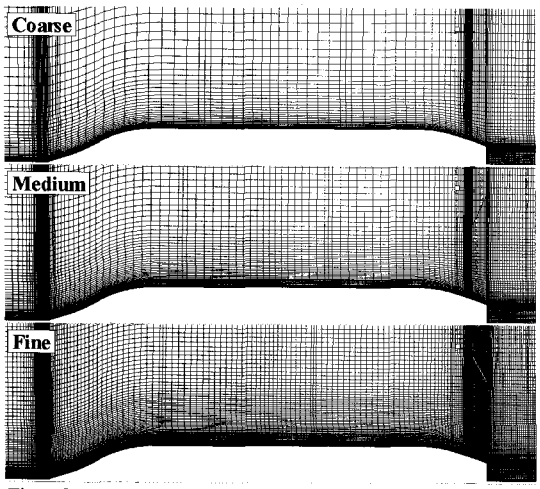


Fig. 3 Comparison of grid distribution around the free surface

Table 3 Comparison of grid resolution

	Total cell number	$y+$
Coarse grid	319,676	120
Medium grid	831,264	85
Fine grid	2,295,328	60

$$U_{SN} = \frac{1}{2}(S_U - S_L)/D \times 100 \quad (5)$$

이 식을 이용하여 계산하면 계측치 대비 수치해의 불확실성지수 U_{SN} 은 3%이다. 참고로, 계측치의 전저항 불확실성지수는 1.3%로 추정된 바 있다(반석호 등 2003). 타당성 불확실성지수

Table 4 Grid convergence of the resistance coefficients ($\times 10^{-3}$)

	Coarse (S_3)	Medium (S_2)	Fine (S_1)	Data (KRISO)
C_T	3.9942	3.7594	3.8464	3.9160
E	-2.0%	4.0%	1.8%	
ε		0.2348	-0.0870	
C_P	0.9982	0.7630	0.8155	0.8630
E	-15.7%	11.6%	5.5%	
ε		0.2352	-0.0525	
C_F	2.9960	2.9964	3.0309	3.0530
E	1.9%	1.9%	0.7%	
ε		0.0004	-0.0345	

(Validation uncertainty) U_V 는 다음 식과 같이 계산될 수 있다.

$$U_V = \sqrt{U_{SN}^2 + U_V^2} \quad (6)$$

위 식으로 계산된 불확실성지수 U_V 는 3.3%이다. 오류값 E 의 절대값이 타당성 불확실성지수 U_V 보다 작기 때문에($|E| < U_V$), 전저항값은 3.3%수준에서 타당하다고 평가될 수 있다. 이들 불확실성지수 및 오류해석을 위한 자세한 방법은 Stern et al.(2001)을 참고하기 바란다.

선측 파형에 대한 V&V 연구도 수행하였다. Fig. 4a 는 KRISO 의 계측치와 3 가지 격자계에서 수행된 파형을 비교한 그림이다. 격자계의 해상도가 높을수록, 파형은 계측치에 점점 더 가까운 결과를 보여준다. Stern et al.(2001)은 파형 타당성 평가를 위해 평균 선측 파형의 차이값에 대한 L2 norm 을 제안한 바 있다. 격자 수렴도비 R_G, 정확도정도 p_G, 수정 factor C_G, 격자 불확실성지수 U_G, 오차 E, 그리고 타당성 불확실성지수 U_V 등을 Table 5.에 나타내었다. 선측 파형을 살펴 보면 단조 수렴성을 보이고 있으며, 최대 파고 ($\zeta_{\max}/L_{PP}$ = 8.123×10^{-3}) 의 2.5% 수준으로 타당성을 평가할 수 있다. 한편 선측파형에 대한 격자 불확실성지수는 최대 파고에 대하여 1.8%이다. Fig.4b 는 선측파형에 대하여 오차 E 와 타당성 불확실성지수 의 U_V를 백분율로 비교한 그림이며, 선체길이(L_{PP})로 무차원화하였다.

Table 5 Verification & validation of wave profile

R_G	p_G	C_G	U_G	E	U_V
0.57	1.62	0.76	1.8%	1.3%	2.5%

% of $\varsigma_{\max}/L_{PP}$

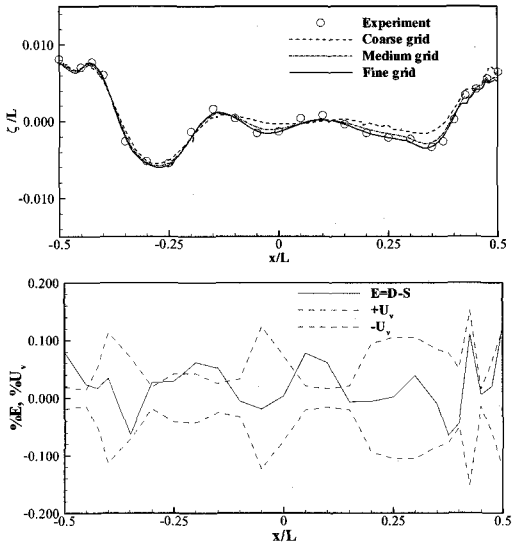


Fig. 4 Comparison of wave profile along the hull surface (a) and validation (b)

Fig. 5 는 세가지 격자계에서 계산된 wave contour 를 나타낸 그림이다. Fig. 4 에 보였듯이 선측 파형은 계측치와 거의 일치함을 알 수 있지만, 선체주변으로 전파되는 파형은 계측치와 비교할 때 계산치가 좀 더 소산이 된 형태를 보이고 있다. 이는 격자계의 해상도에 기인한 문제로 파악되며, 더 높은 해상도의 파형을 구하기 위해 미세 격자계보다 더욱 더 세분화하였고(finer grid), Fig. 6 에 나타내었다. 이 격자계는 총 6,330,400 의 격자점을 가지고 있으며, 선체에 가장 가까운 격자점까지의 y^+는 미세격자계의 경우와 동일하게 했다. 더욱 더 세분화한 격자계의 결과를 살펴보면 선수근처의 파형에 대하여 계측치와 거의 차이가 없으나, 여전히 선체 주변영역으로 전파되는 파형은 계측치와 비교하여 볼 때, 다소 소산이 일어난 결과를 보이고 있다.

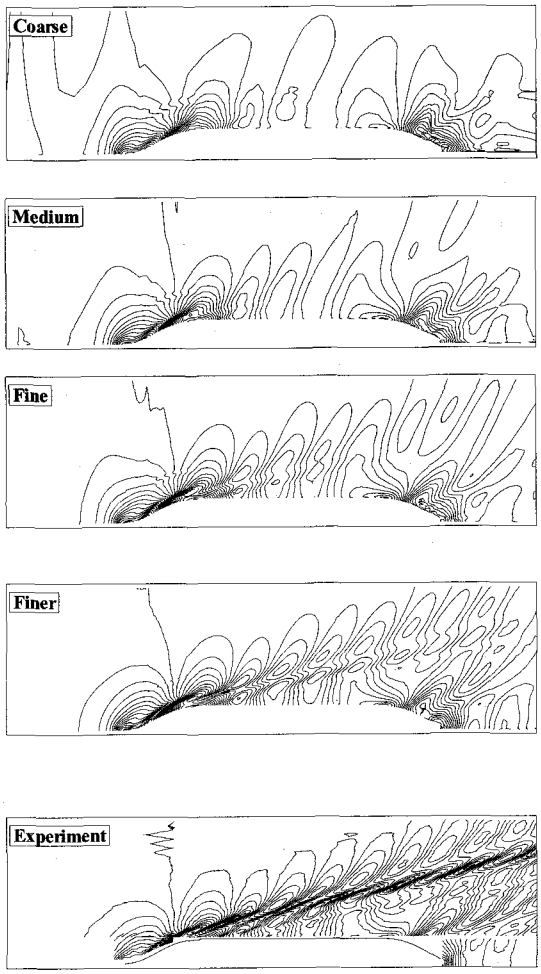


Fig 5. Comparison of wave patterns

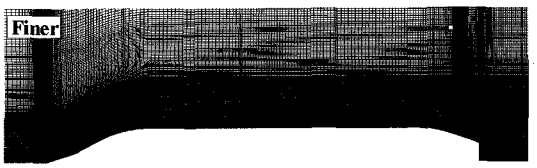


Fig. 6 finer grid distribution around the free surface

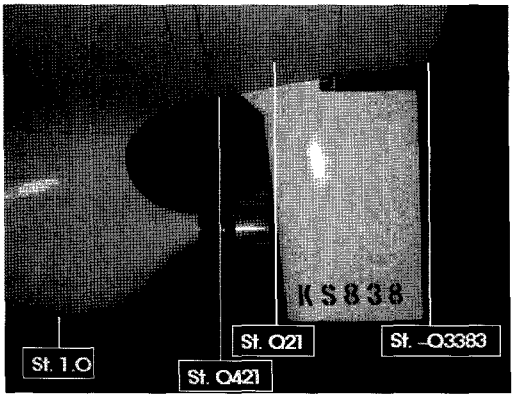


Fig. 7 Measuring and calculating station for local velocity fields of the KLNG ship

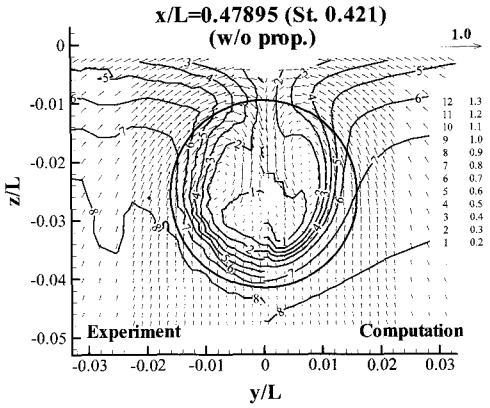


Fig 8. Comparison of axial velocity contours and transverse vectors at st. 0.421

4.3 선미 주위의 국부유동장

나선(bare hull)에서의 속도장 계측은 4 개의 평면 (1, 0.421, 0.21, -0.3383)에서 수행되었으며, 자항상태 즉 프로펠러가 회전하고 있을 때 유동장 계측은 타가 없는 경우 St. 0.21 위치에서 계측하였고, St. -0.3383 에서는 타가 있을 경우와 없을 경우 모두 계측하였다. 이 때 St. 0.421 위치가 프로펠러 평면이며, St. 21 은 타의 앞날 끝위치에 해당한다. 또한 St.-0.3383 은 트랜섬 선미 끝단 위치에 해당한다. 이러한 계측위치를 Fig. 7 에 나타내었다.

Fig. 8 은 프로펠러 평면 (St.0.421)에서의 축방향 속도장과 횡방향 속도벡터를 동시에 나타내고, 계측치와 비교한 그림이다.

결과를 보면, 프로펠러 반경 안쪽으로 빌지 보텍스가 생성되고, 선미 보스 아래쪽으로 낮은 속도 영역이 나타나 실험과 유사한 유동장을 얻었음을 확인할 수 있다.

앞서 밝혔듯이, 프로펠러 자항 효과를 모델링하기 위해 비대칭 체적력을 프로펠러 블록에 분포시켰다. 추력과 토크는 전진비 J=0.547 일 때의 단독시험 결과를 자항조건(K_T=0.24 , K_Q=0.0356)에 맞추어 적용하였다. Fig. 8 에 나타내었듯이, 프로펠러가 반류상에서 회전하고 있을때, 좌현쪽의 반경방향 속도 성분은 프로펠러의 회전방향과 같은 방향이지만, 반면 우현쪽의 속도성분은 회전방향

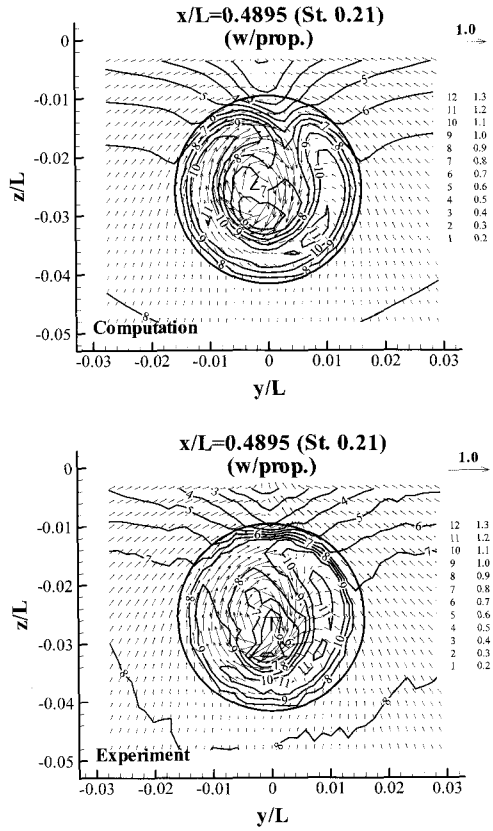


Fig. 9 Comparison of velocity fields at st. 0.21 with propeller

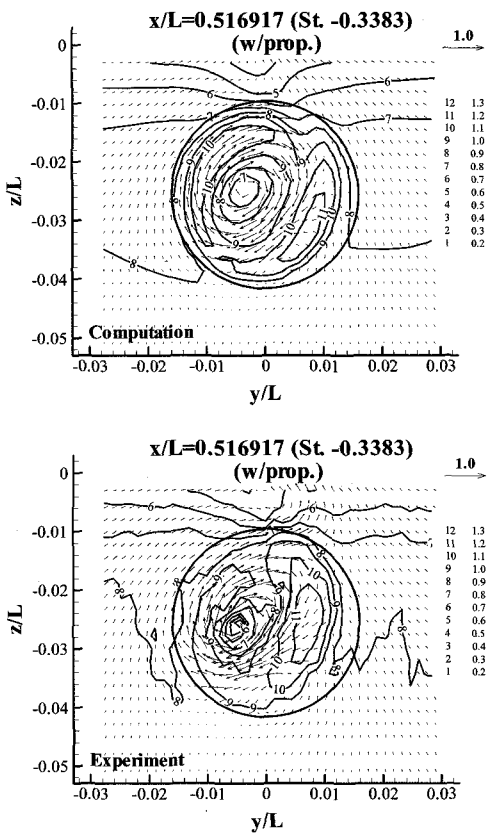


Fig. 10 Comparison of velocity fields at st. -0.3383 with propeller

에 대하여 반대방향의 속도성분을 가지게 된다. 따라서, 우현쪽의 반경방향 속도가 상대적으로 증가하기 때문에 프로펠러 날개면의 받음각도 커지게 된다. 다시 말하면, 프로펠러 날개면이 우현에 위치하게 될 때, 프로펠러 날개 부하는 더욱 증가한다고 말할 수 있다. 또한, 프로펠러 반류도 좌현에 위치할 때보다 우현에 위치할 때 더욱 더 가속된다고 할 수 있다.

Fig. 9 는 St. 0.21 위치에서 속도장을 비교한 그림이다. 이 위치는 프로펠러면 뒤쪽 후류 방향으로 프로펠러 직경의 33% 지점에 해당된다. 수치해 결과를 살펴보면 비대칭 체적력을 분포시켰으므로 더 이상 우현에서 가속되지는 않지만, 시계방향으로의 회전성분을 확인할 수 있다.

Fig. 10 은 선미 끝단 위치 St.-0.3383 위치에서의 속도장 비교를 나타낸 그림이다. 이 위치는 프로펠러면 뒤쪽 후류 방향으로 프로펠러 직경의 119% 지점이다. 프로펠러 면에서 비교적 멀리 떨어진 위치이고, 수치해와 계측치가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 회전 중심이 좌현 쪽으로 이동해 있고, 그 중심에는 저속영역이 나타나 있다. 이는 와류 중심으로 모멘텀이 작은 유체가 집중되기 때문이라고 할 수 있다.

4.4 선미파에 대한 프로펠러 효과

선미파형에 대한 프로펠러 효과를 살펴보기 위해서 트랜섬 선미 후방으로 4 개의 횡단면을 설정하고 각 단면에서의 파형을 실험자료와 비교하였다. 각각의 횡단면 위치는 Fig. 11 에 표시하였다.

Fig. 12 는 4 개의 서로 다른 횡단면에서 프로펠러에 기인한 파형을 수치해석의 결과와 계측자료를 비교한 그림이다. 계측자료와 비교하여 계산결과가 다소 낮은 파고를 나타내고 있다. 그러나 프로펠러 때문에 발생하는 자유 수면의 상승효과는 일관되게 나타난다. 나선 (bare hull)일 경우, 선미파는 선미후방 가운데 지점에서 최고치를 보이고 있으며, 프로펠러를 고려한 경우 프로펠러가 트랜섬 선미 후방영역에서 자유수면 상승 효과를 준다고 말 할 수 있다. 비록 미약하지만, x=0.5576 의 위치까지도 프로펠러 회전에 기인한 선미파의 상승효과가 나타난다.

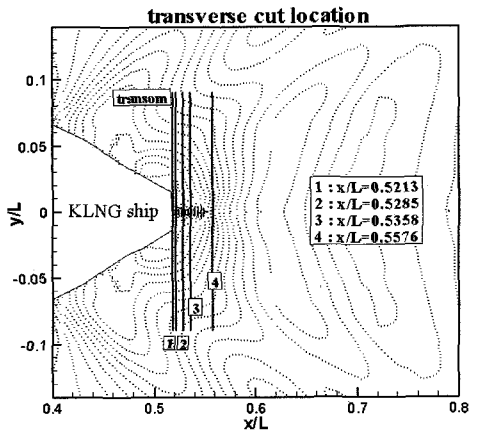


Fig. 11 Measuring and calculating locations for transverse stern wave cuts

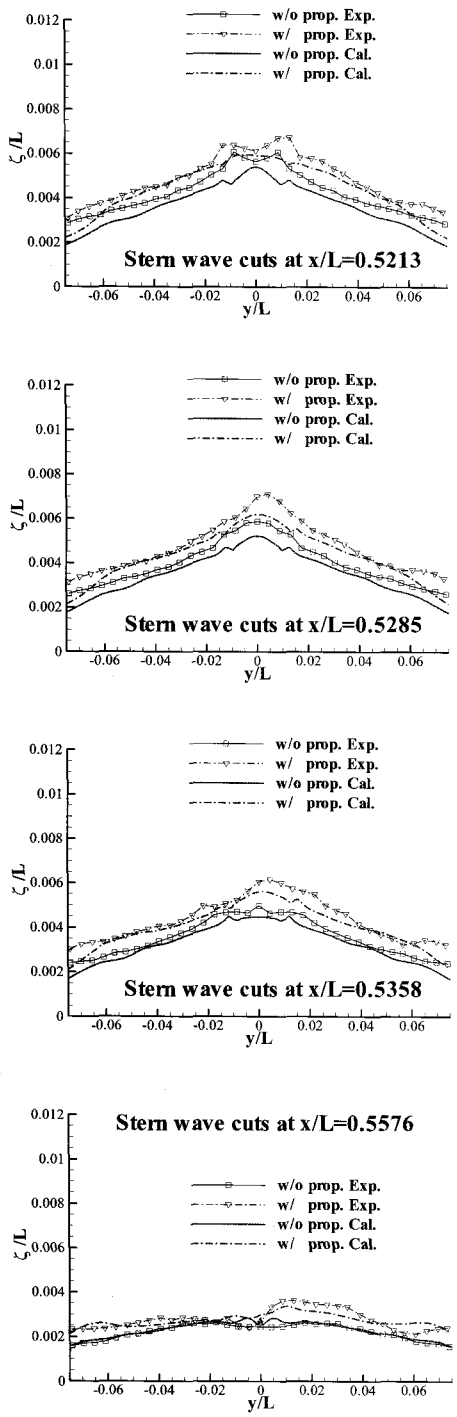


Fig. 12 Comparison of stern waves along various transverse cuts

5. 결론

자항상태의 KRISO 138K LNG 선 주변의 자유수면을 포함한 난류유동 수치해석을 유한체적법을 이용하고 다중 블록 RANS 코드로써 MOERI 에서 개발한 WAVIS 를 응용하여 수행하였다. 자유수면은 레벨셋 방법을 이용하여 모사하고, 프로펠러 효과를 고려하기 위해 체적력을 분포시키는 방법을 적용하였다.

Stern et al.(2001) 제안한 방식대로 수치해석 결과에 대하여 오류와 타당성 평가 (V&V)를 수행하였다. 전 저항계수를 적분변수로 채택하여 오차(error), 시뮬레이션 불확실성지수 (simulation uncertainty), 타당성 평가 불확실성 지수 (validation uncertainty)를 살펴보면, 각각 실험치 대비 1.8%, 3.0%, 3.3%으로 계산되었다. 선체 표면을 따른 파형은 단조 수렴성을 보였으며, 최대 파고의 2.5% 수준으로 타당성을 평가되었다.

여러 스테이션 위치에서 계산된 속도장은 프로펠러가 있는 경우와 프로펠러가 없는 경우 모두 KRISO 예인수조에서 계측된 자료와 비교적 잘 일치하였다.

다만, 뚱뚱한 선형에 비하여 높은 푸르드 수 (Fr=0.196)를 가지는 LNG 선 주변의 파형은 일반 선박과 달리 매우 예리한 파고를 가지며 단파장의 파들이 많이 발생하게 되는데, 본 수치해석에서는 수치적 소산 현상으로 계측된 파형과 깨끗하게 일치하지는 않았다. 향후 자유수면의 격자 수를 좀 더 늘린다면 더 높은 해상도의 결과를 얻을 수 있으리라고 기대한다.

후 기

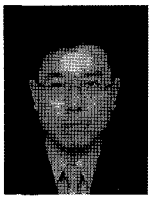
본 연구는 과학기술부 과제 (PN00630 & PN00690) 와 KRISO/KORDI 의 기본연구과제 (PE00950)의 일부로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

• 반석호, 김우전, 김도현, 임근태, 이춘주, 엄주열, 1998, " 300K VLCC 모형주위의 유동 계

측," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 185-188.
- 반석호, 윤현세, 이영연, 박일룡, 이춘주, 김우전, 2003, " KRISO 138K LNG 운반선 모형 주위의 국부 유동장 계측," 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 2 호, pp. 1-10.
- 반석호, 임근태, 김우전, 김도현, 윤현세, 이춘주 , 1997, " 3600TEU 급 컨테이너선 모형주위의 유동 계측," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 300-304.
- 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 Van, S.H., 2000, " Comparisons of turbulent flows around two modern VLCC hull forms," Proceeding of a Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics: Gothenburg 2000, Gothenburg, Sweden.
- Kodama, Y. (ed), 1994, Proceeding of CFD Workshop Tokyo, Japan
- Larsson, L., Patel, V.C. and Dyne, G. (ed), 1991, Ship viscous flow, Proceeding of SSPA-CTH-IIHR Workshop, Gothenburg, Sweden
- Larsson, L., Stern, F. and Bertram, V. (ed), 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., Coleman, H. and Paterson, E., 2001, " Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations - Part 1: Methodology and Procedures," ASME J. Fluids Eng., Vol. 123, 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 >