

## Level-Set법을 이용한 일반상선의 저항성능 해석

박일룡<sup>†\*</sup>, 김진<sup>\*</sup>, 반석호<sup>\*</sup>

한국해양연구원 해양시스템안전연구소<sup>\*</sup>

### Analysis of Resistance Performance of Modern Commercial Ship Hull Form using a Level-Set Method

Il-Ryong Park<sup>†\*</sup>, Jin Kim<sup>\*</sup> and Suak-Ho Van<sup>\*</sup>

Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering(KRISO), KORDI<sup>\*</sup>

#### Abstract

The viscous free surface flow around KRISO container ship (KCS) is computed using the finite volume based multi block RANS code, WAVIS developed at KRISO. The free surface is captured with the Level-Set method and the realizable  $k-\epsilon$  model is employed for turbulence closure. The computations are carried out at model scale. For accurate free surface solution and its stable convergence the computations are performed with a suitable grid refinement around the free surface by applying an implicit discretization method based on a finite volume method to the Level-Set formulation. In all computational cases the numerical results agree well with experimental measurements.

※Keywords: Level-Set Method(레벨셋법), Commercial Hull Form(상선선형), Resistance Performance(저항성능), Free Surface Flow(자유수면 유동), Turbulent Flow(난류유동), Finite Volume Method(유한체적법)

#### 1. 서론

정수 중을 이동하는 수상선박의 비선형 조파문제(nonlinear ship wave problem)는 선박유체역학 분야의 오래된 연구과제 가운데 하나이며 현재까

지도 많은 관련 연구들이 수행되고 있다. 일반상선과 같이 현실적인 선형들에 대한 비선형 조파특성 해석은 80년대 후반 시점 포텐셜유동에 근거한 비선형 해법들이 개발되면서 시작되었다. 조파문제에 점성의 영향을 고려하기 시작한 것은 90년대 중반에 이른 시점이다. 현재까지도 일반상선 설계 시 필요한 선형의 저항성능 해석에는 비선형 포텐셜유동 해석법이 주로 이용되고 있다. 이는 포텐셜유동 해석법이 빠른 시간에 선형들 간의 조파특

접수일: 2004년 1월 26일, 승인일: 2004년 3월 8일

† 주저자, E-mail: irpark@kriso.re.kr

Tel:042-868-7267

성 우열을 가려내는 능력을 가지고 있다는 점도 있지만, 자유수면 유동을 고려하는 기존 점성유동 해석방법들이 일반상선에 대해 만족스러운 해를 보여주지 못하고 있는 이유도 있다.

대표적인 포텐셜유동 해법인 비선형 Rankine 소오스 패널법(김도현 등 2000, Raven 1996)은 유조선, 컨테이너선 등과 같은 여러 형태의 실제 상선선형의 조파성능 해석에 그 강한 적용성을 보여주고 있다. 그러나 점성의 영향과 자유수면의 비선형 특성이 매우 강한 선체근접 영역, 트랜섬과 추진기가 위치한 선미영역 그리고 쇄파현상이 나타나는 영역에서는 포텐셜유동 해가 실제보다 과장되게 추정되는 경향이 있으며, 경우에 따라서는 포텐셜유동 해 자체를 구하기 어려울 수 있다. 포텐셜유동 해석법은 일반상선의 정성적인 저항성능 해석능력은 매우 우수하지만 선체에 작용하는 힘과 선체설계에 유용한 선체주위 국부유동에 대한 정량적인 해석은 어렵다.

현재 점성의 효과를 고려한 비선형 자유수면 문제를 푸는 방법은 크게 경계추적법(interface tracking method)과 경계포착법(interface capturing method)으로 구분할 수 있다. 경계추적법은 이동격자계법(moving grid method) (김도현 2000, Bet et al. 1998, Hino 1994, Muzafertija/Peric 1997) 또는 자유수면의 움직임을 표현할 수 있는 입자들을 추적하는 방법으로 특징지어진다. 그 대표적인 방법인 이동격자법은 해의 일부로 자유수면을 계산하고 그 자유수면에 맞추어 다시 격자계를 생성하여 유동을 해석하는 방법이다. 이 방법은 자유수면의 위치를 좀 더 정확하게 추정할 수 있다는 장점이 있으나 쇄파(wave breaking)와 같이 자유수면 변형이 극심한 조건에 대해서는 격자표현과 움직임의 한계 때문에 적용하기 어려운 단점을 가진다. 입자를 추적하는 방법은 3차원 문제에서 충분한 해상도로 자유수면의 움직임을 해석하기 위해서 매우 많은 입자를 분포해야 하기 때문에 유동장에 사용된 격자점 외에 많은 입자들 각각에 대한 정보들을 기록하고 계산해야한다는 단점을 가진다.

경계추적법이 가지고 있는 단점을 극복해 줄 수 있을 것으로 판단되는 경계포착법은 대부분 자유

수면 아래의 물뿐만 아니라 공기의 유동을 함께 계산하는 방법이다. 일부 자유수면 아래 유동만을 해석하는 방법들도 있다. 경계포착법은 고정격자계(fixed grid system)를 사용하고 자유수면의 위치는 어떠한 물리량으로부터 계산한다. 현재까지 경계포착법으로 다양한 수치기법들이 개발되었는데 선박유체역학에 있어서 성공적으로 적용되고 있는 방법인 VOF법(Muzafertija/Peric 1999)과 Level-Set법(강국진 1996, 박일룡 2000, 박일룡/전호환(a) 1999, 박일룡/전호환(b) 1999, Hochbaum/Vogt 2000)이 주로 사용되고 있다.

본 논문은 KRISO가 개발한 WAVIS 수치계산 시스템(반석호 등 1998)에 Level-Set방법을 도입하여 실제상선 주위의 복잡한 비선형 점성 자유수면 유동에 적용하여 결과를 검증한 내용을 소개하고 있다. 과거 조파문제에 대한 실험자료 가운데 Series60 선형에 대한 비교연구를 주로 수행하였다. 그러나 이 배는 현재 건조되는 실제선박과는 많은 차이를 보이는 이상적인 선형이어서 점성 자유수면 유동 해석 기법들의 검증에 위한 비교자료로서는 충분치 않은 것으로 평가되고 있다. 그러므로 본 논문에서는 ITTC benchmark database로서 2000년에 개최된 Gothenburg 2000 a Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics (<http://www.iuhr.uiowa.edu/gothenburg2000/>)의 검증자료로 활용된 바 있는 KRISO 3600TEU 컨테이너선(KCS)의 실험결과를 개발된 수치해석 기법을 검증하는데 사용하였다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1. 유한체적법

비압축성 난류유동의 지배방정식인 연속방정식과 표면장력의 영향을 제외한 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) 방정식의 적분형태는 다음과 같다.

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

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

여기서  $\Omega$ 는 면  $S$ 의 경계를 가지는 검사체적(control volume)이며,  $n_i$ 는  $(n_x, n_y, n_z)$ 의 단위 법선벡터를 나타낸다.  $\rho$ 는 유체밀도이며,  $u_i$ 는  $(u, v, w)$ 의 유체속도 성분을 나타낸다.  $\tau_{ij}$ 는 점성과 난류에 의한 유효응력을 나타내며,  $p$ 는 압력을 나타낸다. 그리고  $b_i$ 는 각 좌표 축  $x_i$ 방향의 단위질량당 체적력을 나타낸다. 유효응력은 Boussinesq의 isotropic eddy viscosity model을 사용하여 다음과 같이 나타낼 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  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker's delta를 나타내고,  $k$ 는 난류의 운동에너지 그리고  $\mu_e$ 는 난류와점성계수(turbulent eddy viscosity)  $\mu_t$ 에 유체의 운동학적 점성계수  $\mu$ 를 합한 유효점성계수를 나타낸다.

본 논문은 난류유동 해석을 위해 realizable  $k-\epsilon$  모형(Shih et al. 1995)을 벽함수(wall function) 기법과 함께 도입하였다.

WAVIS는 김우전 등(2000), Kim et. al.(2002), Ferziger/Perić(1996)의 문헌에 상세하게 설명된 유한체적법(finite volume method)을 사용하여 지배방정식의 해를 구한다. 시간항에 대한 시간적분법은 2차 정도의 Euler implicit법을 사용하였으며, 운동량 이송 방정식의 대류항과 확산항은 QUICK(Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics) 방법과 중앙 차분법을 이용하여 각각 이산화하였다. 속도-압력의 연성을 위해서 SIMPLEX(Ferziger/Perić 1996)방법을 사용하였으며, 이산화(discretization)된 선형연립방정식의 해는 SIP(Strongly Implicit Procedure)기법을 사용하여 구하였다.

2.2. Level-Set방법

본 논문에서 자유수면 유동해석을 위해 도입한 Level-Set법 개념은 Sussman et al.(1997)과 동일하지만, 수치해석법은 유한체적법을 근거로 한 암시적(implicit) 접근법을 사용하여 복잡한 형상주위 자유수면 유동해석에 적합하도록 하였다. Level-Set법은 물과 공기영역 그리고 두 유체의 경계인 자유수면을 함수  $\phi(x_i, t)$ 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  $\phi(x_i, t)$ 의 형태는 여러 가지로 정의할 수 있지만, 일반적으로는 자유수면으로부터 정확히 계산된 법선 거리값을 사용한다. 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,  $(\rho_w, \mu_w), (\rho_a, \mu_a)$ 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 변하도록 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  $\epsilon=2.0\Delta h$ 로 하였으며, 격자간격  $\Delta h$ 는 정수상태의 자유수면에 근접한 격자들 가운데 z방향 격자간격이 가장 큰 값을 취하도록 하였다.

Level-Set 함수  $\phi(x_i, t)$ 에 대한 이송방정식은 아래 식(7) 같이 적분형태로 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 Euler implicit법을 사용하였으며, 대류항은 3차 정도의 MUSCL(Monotonic Upstream Centered Scheme for Conservation Laws, Van Leer 1979)법으로 이산화 하였다. 일반적으로 복잡한 형상주위 유동해석에 사용된 비정규, 비균일 간격 특성을 갖는 격자분포의 영향으로 식(7)의 해는 수렴에 영향을 주는 수치적 노이즈(noise)가 포함되어 있기 때문에 이를 제거해 주어야 한다. 본 논문에서는 실제 파고의 감쇠를 거의 일으키지 않는 Beddhu et al.(1998)가 사용한 필터링 식을 사용하였다.

일반적으로 자유수면에 대한 법선방향 거리함수인 Level-Set 함수분포를 정확히 유지시키기 위해 다음의 방정식을 사용한다(Sussman et al. 1997).

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

여기서  $\tau$ 는 가상시간(dummy time)을 나타내고,  $\phi_o$ 는 주어진 시간( $t$ )에서의 Level-Set함수로서 초기조건이 된다.

식(8)의 시간적분은 Euler explicit법을 사용하고, 우변은 2차 정도의 ENO(Harten et al. 1987)법으로 이산화하였다. 가상시간 간격은  $\Delta \tau = 0.5 \Delta h/10$ 으로 하여 4회의 반복계산만으로도 ( $-\epsilon \leq \phi \leq \epsilon$ )내에서 만족한 해를 얻을 수 있었다.

식(8)에 대한 계산 소요시간을 감소시키기 위해 유동장 전체를 계산영역으로 지정하지 않고 미소영역( $-\epsilon \leq \phi \leq \epsilon$ ) 근방으로 제한시켰다.

### 3. 수치해석 결과 및 검증

개발된 수치해석 기법에 대한 검증은 ITTC

benchmark database로서 2000년에 개최된 Gothenburg 200 a Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics의 검증자료로 활용된 바 있는 KRISO 3600TEU 컨테이너선(KCS) 대한 모형시험 결과(<http://www.ihr.uiowa.edu/gothenburg2000/>)를 이용하여 수행하였다. 또한 패널법을 이용한 비선형 포텐셜유동 해석결과를 본 수치계산 결과와 함께 비교하였다.

KRISO 컨테이너선 KCS는  $L=230m$ ,  $B=32.2m$ ,  $D=10.8m$ ,  $C_B=0.6505$ 의 주요한 형상특성을 가진다. 선속은 24노트(knots)이며 Froude수는 0.26에 해당한다. 수치계산은 모형시험 조건과 같이 레이놀즈수  $R_e=1.4 \times 10^7$ 에서 계획수 상태를 유지하도록 선체의 자세를 고정하여 수행하였다.

정확하고 효율적인 유동해석 기법의 개발도 중요하지만 해의 정도를 높이기 위해서 유동조건에 적합한 격자계를 생성하는 것 역시 수치해석 과정에서 중요하다. 특히 자유수면 유동해석에서 자유수면을 포함하는 영역의 격자분포 형태는 수치해석결과에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서 선체 주위 격자는 상용프로그램 GRIDGEN을 사용하여 생성했으며, 선체 우현 유동영역을 H-O형태의 다중블록(multi block) 공간 격자계로 구성하였다.

격자계는 선체를 포함하는 1개의 격자블록과 트랜섬 후류영역의 2개의 격자블록으로 총 3개의 격자블록으로 구성되어 있다. 수치해석 영역은 각 좌표계 방향으로  $-1.3 \leq X(x/L) \leq 1.35$ ,  $0 \leq Y(y/L) \leq 0.8$ ,  $0.215 \leq Z(z/L) \leq 0.85$ 이다. 본 수치해석 기법에서는 매 계산시간 주어진 속도장에 대해 자유수면의 움직임을 정확하게 계산하기 때문에 계산영역의 경계들로부터 유입될 수 있는 수치반사파로 인한 해의 왜곡 영향이 미소하다. 이러한 이점을 고려해 선체주위 조파현상을 보다 높은 해상도로 해석하기 위해 격자점들을 선체주위와 트랜섬 후류영역에 다소 집중할 수 있도록 자유수면의 폭을 비교적 좁게 하였다.

수치결과에서 격자계 의존성을 살펴보기 위해 Table 1에 설명된 Coarse grid, Medium grid, Fine grid를 생성하였다. Medium grid는 선체와 자유수면 그리고 트랜섬 후류영역의 각 좌표방향

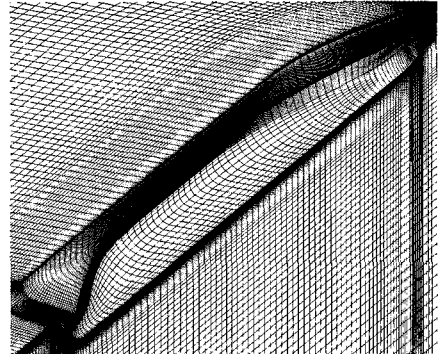
격자점 수를 Coarse grid보다 모두 2배 증가시켜 생성하였으며, Fine grid는 상류영역을 제외한 자유수면, 선체표면 그리고 트랜섬 후류영역의 각 좌표방향 격자점 수를 Medium grid보다 1.3배 증가시켜 생성하였다.

Table 1 Comparison of grid resolution

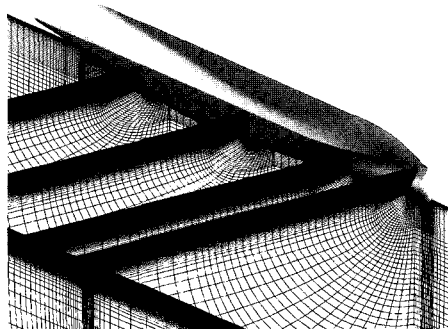
Grid	Hull	Field	Total cells	$y^+$
Coarse grid	1525	90×35×30	99399	264
		23×15×11 23×12×4		
Medium grid	6357	180×70×60	795192	132
		46×30×22 46×24×8		
Fine grid	11535	227×92×80	1756580	66
		60×39×29 60×30×10		

그 외 선체표면과 전체 유동장의 격자점 수를 Table 1에서 볼 수 있으며, 선체표면으로부터의 첫 번째 격자점에서의  $y^+$  값을 비교하였다.

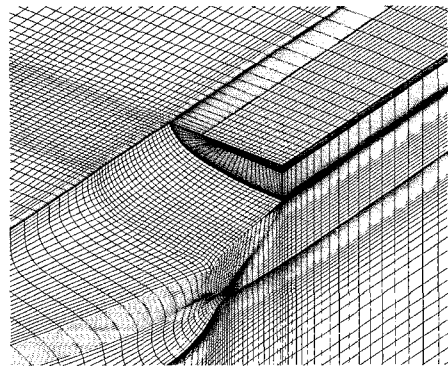
Fig. 1은 선박주위 자유수면 문제해석에 적합하고 해석결과의 정도를 향상시킬 수 있다고 판단되는 격자계 구성형태를 Medium grid를 중심으로 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 선체표면과 근접한 대칭면( $y=0$ ) 그리고 자유수면  $z$ 상방향에 있는 경계면의 격자분포 모습을 보여주고 있다. 자유수면의 위치와 움직임을 효과적으로 계산하기 위해 자유수면이 지나는 선측영역에 격자를 집중시킨 모습을 볼 수 있다. 선박주위 조파현상은 일반 상선의 경우 선박길이의 차원과 비교할 때 최대 약 2% 정도에 해당하는 미소한 차원의 파고를 가진다. 그러나 선체로부터 유기되는 파형의 분포는 쇄파현상 등을 동반하기도 하는 매우 복잡한 비선형 구조를 가지고 있다. 그러므로 Fig. 1(b)와 같이 파형의 파고와 비선형 특성을 높은 해상도로 해석할 수 있도록 자유수면 근방 상하방향에 균일하게 집중된 격자계층을 만들어 주어야 한다. 자유수면 유동해석에서 Fig. 1(b)의 격자분포 형태는 선박주위 자유수면 수치해석에 적합한 유형의 격자계 모습이라 판단된다. 트랜섬 후방에서 생성되는 복잡한 파형을 보다 정확히 시뮬레이션하기 위해 2



(a) Grid distribution around the hull



(b) Grid distribution around the free surface



(c) Grid distribution around the transom

Fig. 1 Partial view of multi block grid system for KRISO 3600TEU container ship

개의 격자블록을 Fig. 1(c)와 같이 생성하였다.

앞서 설명한 바와 같이 본 수치계산에서 자유수면을 통한 밀도변화 경계층의 두께는  $\epsilon=2.0\Delta h$ 로 하였으며, 격자간격  $\Delta h$ 는 정수상태 자유수면에

근접한 격자점들 가운데서  $z$ 방향으로 격자간격이 가장 큰 값을 찾아 자동으로 결정되도록 하였다. 본 논문에서 Fine grid는  $\Delta h = 2.32 \times 10^{-3}$  이다.

Table 2 Comparison of time segment, total iteration No. and CPU time

Grid	$\Delta t$	Iteration No.	CPU time(h)
Coarse grid	0.005	8000	12
Medium grid	0.005	8000	60
Fine grid	0.005	8000	129

모든 계산은 2.8GHz의 CPU속도를 가진 PENTIUM-IV에서 수행되었으며, 수치계산 시간간격과 반복횟수는 3가지 격자계에 대해 모두 동일하게 적용하였다. 계산의 시작에서 최종적으로 끝난 시점까지 걸린 실제 CPU시간은 Table 2에서 비교하여 나타내었다.

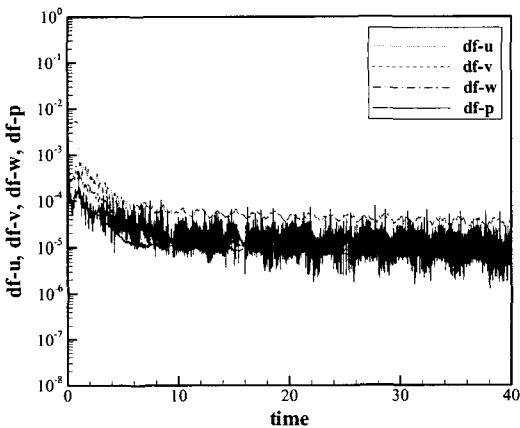


Fig. 2 Iterative convergence of velocities and pressure for Fine grid

Fig. 2는 Fine grid를 사용한 계산에서 세 속도 성분과 압력의 시간에 대한 전체 격자수에서의 평균

차이를 나타내고 있다. 시간  $t=20$  정도에서 각 성분의 시간차이 변화 기울기가 줄어든 것을 볼 수 있다. 실제로  $t=20$  시간대에서 선체주위의 파는 거의 수렴한 단계에 접어든 것을 확인할 수 있었다. 계산 소요시간이 부담스러울 경우 계산은 이 시간까지 수행하고 그 결과를 사용해도 충분할 것으로 판단된다.

Fig. 3은 마찰저항과 압력저항 변화를 시간에 대해 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있는 저항성분의 진동현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 정상상태에서 자유수면 파가 생성되기 시작하면서 매우 다양한 파장 또는 파수를 가지는 파가 생성된다. 수렴과정에서 유출면으로 빠져나가는 성분도 있지만 선체주위에 머물러 존재하는 파들 때문에 수치해의 정상상태로 수렴하는 것을 지연시킨다(Alessandrini/Delhommeau 1994). 또한 트랜섬 유동과 같이 실제적으로 발생하는 선체주위 비정상 유동의 영향이 저항성분의 진동에 일부의 영향을 끼치는 것으로 생각된다.

상대적으로 격자간격이 큰 Coarse grid는 해의 진동에 영향을 미치는 파의 소산을 가속시키기 때문에 다른 두 격자에 대한 결과보다 빠르게 정상상태로 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. Medium과 Fine grid의 결과에서는 작지만 시간에 따라 진동의 폭이 감소하고 있는 것을 볼 수 있다.

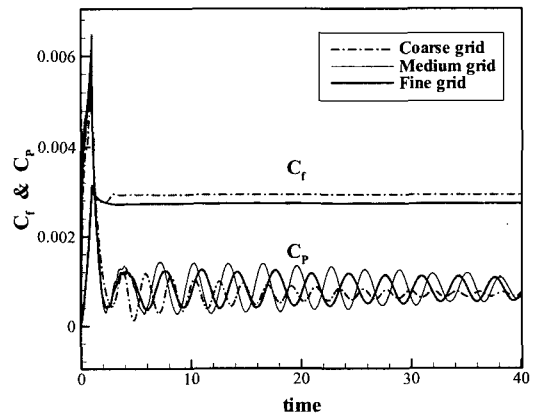


Fig. 3 Comparison of convergence history of resistance coefficients

Table 3 Comparison of Resistance coefficients

Grid	$C_f \times 10^3$	$C_p \times 10^3$	$C_t \times 10^3$	differ.
Coarse grid	2.924	0.702	3.626	+1.85%
Medium grid	2.739	0.840	3.579	+0.53%
Fine grid	2.722	0.816	3.538	-0.62%
EFD(KRISO) (ITTC line)	2.830	(0.730)	3.560	-

Table 3은 선체가 받는 저항에 대해 수치해석과 모형시험 결과들을 서로 비교한 도표이다. 여기서 실험의 마찰저항은 ITTC 마찰저항 공식을 통해 얻은 값이다. 파형해석에 있어 격자 해상도가 부족한 것으로 판단되는 Coarse grid의 전체저항 계수가 +1.85%의 차이로 비교적 실험값에 근접한 것을 볼 수 있다. Medium grid와 Fine grid를 사용해서 계산된 전체저항 계수는 실험값과의 차이가 평균해서  $\pm 0.58\%$  정도여서 만족스러운 결과를 나타내고 있다. Table 3에 나타난 결과를 살펴볼 때 본 수치기법은 정량적인 면에서 조파저항을 포함하는 일반상선의 전체저항을 잘 예측하는 것으로 판단된다.

이후 파형분석 결과를 통해 다시 확인할 수 있는 사실로서 선체주위 저항성능 추정에서 Medium grid 정도의 해상도를 가지는 격자를 사용하여도 만족스러운 해를 얻을 수 있다.

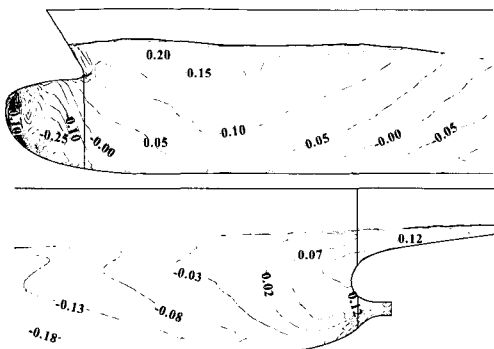


Fig. 4 Computed surface pressure distribution on the hull surface

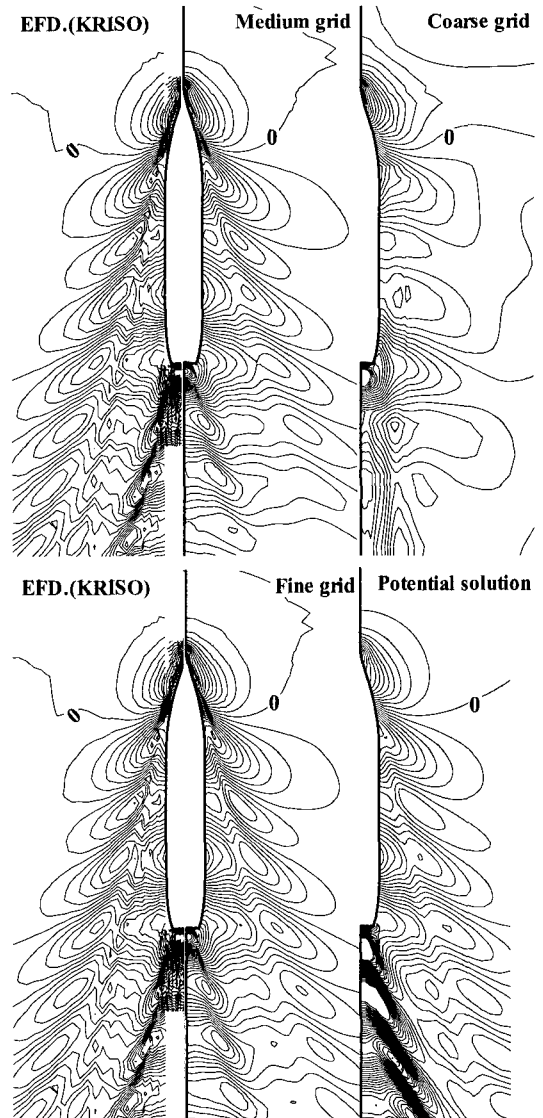


Fig. 5 Comparison of wave patterns

Fig. 4에는 계산으로부터 얻어진 선체 표면 압력이 주어졌다. 선수부는 커다란 구상 선수로 인해 심한 압력 구배가 존재하는 것을 볼 수 있으며, 선미부에서는 큰 압력구배 없이 두껍게 발달된 점성 경계층의 영향으로 약간의 압력 증가를 볼 수 있다. 특별히 선체표면에 생성된 파형에 따른 압력분포의 특징을 잘 살펴볼 수 있다.

Fig. 5는 Level-Set법으로 계산된 전체적인 파형분포를 모형시험에서 예측된 결과와 함께 비선

형 포텐셜유동 해석법으로 얻은 결과와 비교하고 있다. 포텐셜유동 해는 전체적으로 실험파형과 잘 일치하고 있다. 그러나 점성영향이 큰 영역과 연직방향으로만 격자를 이동하여 자유수면 움직임을 해석하는 방법으로 구하기 힘든 자유수면 변형이 지배적인 선수와 선측의 근점영역 그리고 트랜섬 후류영역에서 실험결과와 차이를 보이고 있다.

본 수치계산의 Medium grid의 결과는 Fine grid와 함께 포텐셜유동 파형이 실험과 차이를 보이는 영역에서 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 그러나 트랜섬 뒤쪽 후류영역에서 횡방향으로 멀어지면서 파고와 파들 간의 간섭현상이 희미한 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 조파문제 해석법이 가지는 정도에 그 원인이 있을 수 있지만, 격자수의 부족 또한 큰 원인으로 작용한 것으로 판단된다. Fine grid에서 계산된 파형분포는 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 특히 비선형성이 강한 트랜섬 후류의 자유수면 파형분포를 잘 예측하고 있다. 또한 선박과 비교적 멀리 떨어진 하류영역에서 수치계산은 파고와 파의 위상들이 모형시험에서 예측한 결과와 잘 일치하고 있다. 보다 많은 격자점들을 이 지점에 분포하여 수치계산을 수행할 경우 파들 간의 간섭현상을 실험결과와 같이 포착해낼 수 있을 것으로 본다.

Fig. 6은 Fine grid 파형결과에서 선수와 선미부분을 확대하여 파형분포를 상세하게 실험결과와 비교한 그림이다. 선수파형의 비교에서 본 수치기법은 선수를 타고 오르는 높은 파와 주위 파형분포를 잘 해석하고 있어 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 선미파형의 경우 트랜섬 자유수면 유동이 비선형성과 비정상 특성이 강하기 때문에 예측된 실험파형에 작은 진폭의 파형들을 볼 수 있다. 수치계산결과는 트랜섬 주위와 하류방향 파형분포를 모형시험에서 예측된 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 일반적으로 포텐셜유동 해석법과 경계추적법들이 트랜섬 유동을 해석하는 데 많은 어려움을 가지고 있지만 본 논문에서 사용한 Level-Set법은 이러한 문제에 대해 강력한 수치기법인 것을 확인할 수 있다.

다음은 파형을 2차원적으로 비교하여 계산된 파형 정도를 자세히 살펴볼 수 있도록 하였다.

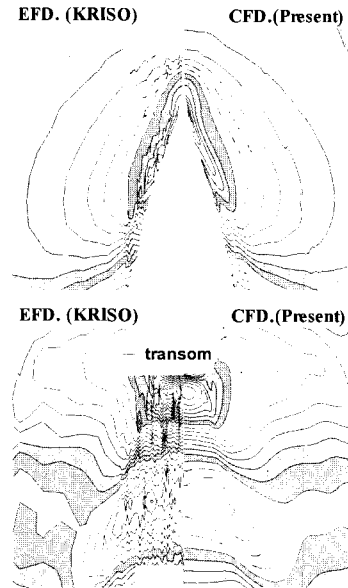


Fig. 6 Comparison of bow & stern wave

Fig. 7은 선측 선체표면에서 파고( $H=h/L$ ) 분포를 비교하고 있다. 포텐셜유동 해석결과는 선수와 선수 어깨부근에서 실험과 차이를 보이고 있다. Level-Set법을 이용한 Medium grid와 Fine grid의 결과들은 선체표면을 따라 실험결과와 잘 일치하고 있다. 선수에서 파고가 가장 높은 부분에서 수치계산결과가 실험파고에 약간 못 미치고 있는 것을 볼 수 있지만, 선수표면을 타고 오르는 얇은 sheet같은 선수파를 예측할 때 생길 수 있는 오차범위에 계산결과가 포함될 것으로 생각된다.

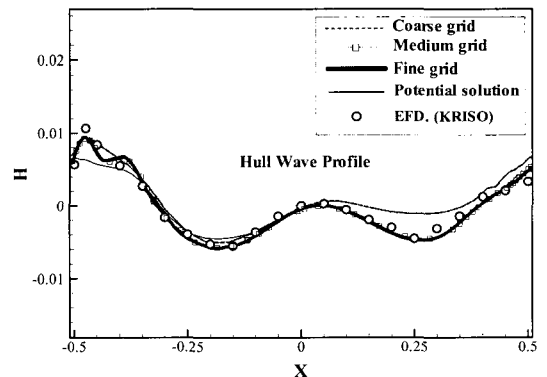


Fig. 7 Comparison of hull surface wave profile



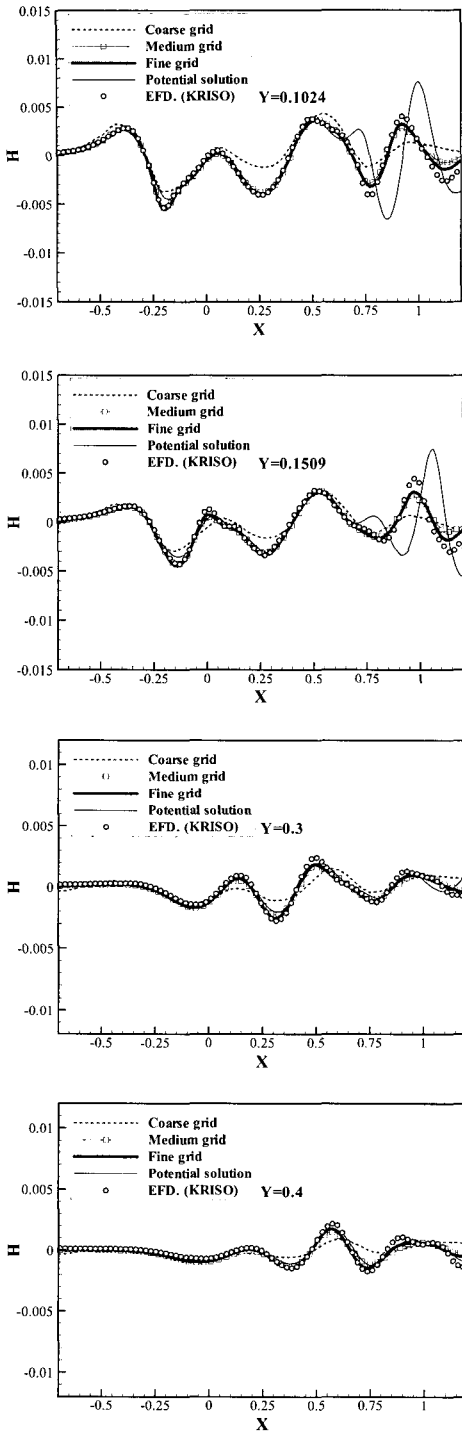


Fig. 8 Comparison of longitudinal wave cuts at  $Y=0.102, 1509, 0.3, 0.4$

Fig. 8은  $Y=0.1024, 0.1509, 0.3, 0.4$ 의 각각의 위치에서 배길이 방향  $x$ 좌표계를 따라 파고(longitudinal wave cut)를 비교한 그림이다. 본 수치계산결과들은 모든  $Y$  위치에서 비선형 포텐셜 유동 해석결과보다 파형과 진폭, 파의 위상에서 실험결과와 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 선체에서 멀리 떨어진 하류영역에서 Level-Set법으로 계산한 결과들의 파의 진폭이 실험결과보다 작은 것을 볼 수 있는데, 앞서 Fig. 5의 파형분포에서 설명한 바와 마찬가지로 이러한 차이는 격자수 부족에서 오는 것이라 판단된다.

Fig. 9는  $X=0.4825$ 의 프로펠러 위치에서  $x$ 축 방향 속도분포를 비교한 그림이다. 프로펠러 허브 아래쪽부분을 제외하고 본 계산과 비교적 잘 일치하고 있다. 허브 아래부근에서 유속성분 모두가 실험과 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 수치계산에서 사용한 격자분포 영향, 프로펠러 허브형상을 자세히 표현 못한 데서 발생한 오차 또는 선택한 난류모형의 영향 때문에 발생하였다고 우선 판단할 수 있다. 향후 이에 대해 자세한 분석을 수행해 보아야 할 것으로 판단된다.

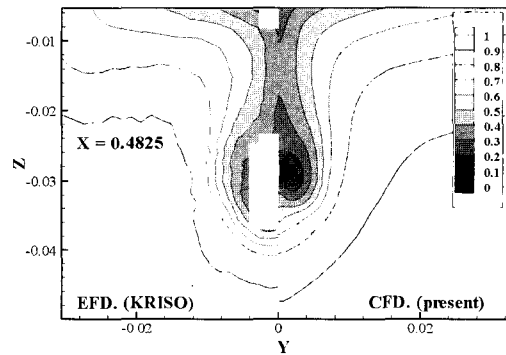


Fig. 9 Comparison of wake distribution at  $X=0.4825$

#### 4. 결론

복잡한 형상의 일반상선에 대한 조파특성 해석을 위해 Level-Set방법을 도입한 RANS시뮬레이션 기법을 개발하였다. ITTC benchmark

database인 KRISO 3600TEU 컨테이너선의 모형 시험 결과를 본 방법으로 얻어진 수치계산결과를 비교, 검토하는데 이용하였다. 수치계산 결과들은 모형시험에서 계측된 저항, 파형 그리고 반류분포 결과 모두에 대해 정성적, 정량적인 일치를 보여 주었다.

자유수면 유동문제에 있어 충분히 조밀하고 적절한 격자계를 사용할 경우, 점성과 자유수면의 비선형성이 지배적인 선체 근방의 국부영역뿐만 아니라 전체 자유수면 계산영역에서 향상된 해석 결과를 얻을 수 있음을 보였다. Level-Set방법을 복잡한 형상의 선박주위 자유수면 유동해석에 적용할 때 유한체적법을 바탕으로 하는 암시적 이산화법을 사용하여 해를 구하는 것이 보다 안정적이고 유리한 것으로 판단된다. 쇄파현상 등이 포함된 선체주위 복잡한 비선형 자유수면 유동해석에는 Level-Set방법과 같은 경계포착법 계열들이 강력한 수치기법으로서 적합하다고 판단된다.

앞으로 본 방법을 비정상문제에 대해 검증을 수행할 예정이며, 점성유동 해석기법들의 가치는 단점인 많은 계산시간이 소요되는 문제를 해결하기 위한 연구를 계속 수행해나가야 할 것으로 본다.

## 후 기

본 논문의 내용은 과학기술부의 “수상선박 및 잠수체의 유체성능 해석시스템 개발”과제의 연구 내용 일부임을 밝혀드립니다.

## 참 고 문 헌

- 강국진, 1996, “Zero-level-set 방법을 사용한 자유표면파 계산,” 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 237-240.
- 김도현, 김우전, 반석호, 2000, “패널법을 이용한 일반 상선의 비선형 조파문제 해석,” 대한조선학회논문집, 제37권, 제4호, pp. 1-11.
- 김도현, 2000, 비선형 조파문제 해석을 위한 수치 기법 연구, 박사학위논문, 서울대학교 조선해양공학과.
- 김우전, 김도현, 반석호, 2000, “유한체적법을 이용한 상선주위의 난류유동 계산에 관한 연구,” 대한조선학회논문집, 제37권, 제4호, pp. 19-31.
- 박일룡, 2000, Applications of a Level-Set Method to Incompressible Viscous Flow with the Free Surface, 박사학위논문, 부산대학교 조선해양공학과.
- 박일룡, 전호환, 1999(a), “유한체적법에 의한 자유수면 유동해석에서 Level-Set기법에 대한 연구,” 대한조선학회논문집, 제36권 제2호, pp. 40-49.
- 박일룡, 전호환, 1999(b), “접수와 이수문제에서 강체주위 유동해석,” 대한조선학회논문집, 제36권, 4호, pp. 37-47.
- 반석호, 김우전, 김도현, 윤현세, 1998, 선박의 저항 성능 향상 기술, 산업자원부, 공업기반 과제 보고서, 한국해양연구원.
- Alessandrini, B. and Delhommeau, G., 1994, “Simulation of Three-Dimensional Unsteady Viscous Free Surface Flow around a Ship Model,” Int. J. Numer. Methods in Fluids, Vol.19, pp. 321-342.
- Beddhu, M., Jiang, M.Y., Taylor, L.K. and Whitfield, D.L., 1998, “Computation of Steady and Unsteady Flows with a Free Surface Around the Wigley Hull,” Applied Mathematics and Computation, Vol. 89, pp. 67-84.
- Bet, F., Hanel, D., and Sharma, S., 1998, “Numerical Simulation of Ship Flow by a Method of Artificial Compressibility,” Proceedings of the Twenty Second Symposium on Naval Hydrodynamics, pp.173-182.
- Ferziger, J.H. and Perić, M., 1996, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag, Berlin.
- 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., 1994, “A Study of Grid Dependence in Navier–Stokes Solutions for Free Surface Flows around a Ship Hull,” *Journal of the Society Naval Architects of Japan*, v. 176, pp. 11–18.
  - Hochbaum, A. C. and Vogt, M., 2000, “Flow and Resistance Prediction for a Container Ship,” *Gothenburg 2000 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics*, 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.
  - Muzaferija, S. and Peric, M., 1997, “Computation of Free Surface Flows Using Finite Volume Method and Moving Grids,” *Numer. Heat Transfer, Part B*, Vol. 32, pp. 369–384.
  - Muzaferija, S. and Peric, M., 1999, “Computation of Free Surface Flows Using Interface–Tracking and Interface–Capturing Methods,” Chap. 2, in Mahrenholtz, O. and Markewicz, M., *Nonlinear Water Wave Interaction*, Computational Mechanics Publications.
  - Raven, H.C., 1996, *A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem*, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
  - 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.
  - 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.



< 박 일 봉 >   < 김 진 >   < 반 석 호 >