

## 선체주위 자유수면 유동 해석을 위한 VOF법 연구

박 일 룡\*

동의대학교 조선해양공학과

### A VOLUME OF FLUID METHOD FOR FREE SURFACE FLOWS AROUND SHIP HULLS

I.R. Park\*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui Univ.

*This paper describes a volume of fluid(VOF) method, mRHRIC for the simulation of free surface flows around ship hulls and provides its validation against benchmark test cases. The VOF method is developed on the basis of RHRIC method developed by Park et al.[1] that uses high resolution differencing schemes to algebraically preserve both the sharpness of interface and the boundedness of volume fraction. A finite volume method is used to solve the governing equations, while the realizable  $k-\varepsilon$  model is used for turbulence closure. The present numerical results of the resistance performance tests for DTMB5415 and KCS hull forms show a good agreement with available experimental data and those of other free surface methods.*

**Key Words :** 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD), VOF법(Volume of Fluid Method), 자유수면 유동(Free Surface Flow), 저항성능(Resistance Performance)

### 1. 서 론

자유수면과 구조물의 상호작용은 선박 및 해양구조물의 유체역학적 성능평가에서 다루어야 할 기본적이고 중요한 물리 현상 중 하나이다. 최근, CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용한 해석적 관점에서 이러한 문제는 다양한 수치해석 기법 중에서 주로 이상유동(Two-phase flow) 해석법으로 다루어지고 있는 추세이다. 본 논문에서는 이들 이상유동 해석법들 중에서 대표적인 상용프로그램인 FLUENT와 STAR-CCM+은 물론 CFD 해석에 관련된 다양한 연구에서 자유수면의 변형과 운동을 해석하기 위해 도입되고 있는 VOF(Volume Of Fluid)법을 다루고자 한다. VOF법의 경우 선박의 조파문제(Wave making problem)를 비롯하여 해양구조물과 관련된 복잡한 비선형 자유수면 유동 해석에 있어 타당한 해의 신뢰도를 가지는 강건한(Robust) 방법으로 알려져 있다[1-7]. 이전 연구에서 Park et al.[1]은 비압축성 자유수면 유동을 해석할 수 있는 HR차분(High Resolution differencing) 기반의 RHRIC(Refined

High Resolution Interface Capturing) VOF법으로 불리는 방법을 개발하였다. 이 방법은 질량보존 특성을 만족하기 위해 사용하는 상류차분법(Upwind differencing scheme)과 정확한 유체 경계면(Interface) 포착을 위해 도입하는 하류차분법(Downwind differencing scheme)을 적절한 방법으로 혼합한다. RHRIC법으로 구한 해는 Ubbink and Issa[8]가 개발한 2차 정도에 근접한 정확도를 가지는 CICSAM(Compressive Interface Capturing Scheme for Arbitrary Meshes)법과 유사하다[2]. 그러나, RHRIC와 CICSAM법은 유체간 경계면의 시간변화를 높은 정확도로 해석해야 하는 비정상 문제에 적합하며, 더불어 낮은 CFL(Courant - Friedrichs - Lewy) 값의 조건에서 해의 정확도가 유지되는 특징으로 인해 작은 계산시간 간격을 사용해야 하는 단점이 있다.

상대적으로 형상이 복잡하고 폭과 흘수에 비해 길이 차원이 큰 기하학적 특성을 가진 선박의 조파문제를 CFD로 해석할 때 일반적으로 선체주위로 불균일한 간격의 분포를 갖는 격자가 사용된다. 또한 설계단계에서 필요한 유체성능 정보를 빠른 시간에 얻기 위해 계산시간 간격을 크게 설정하여 문제를 해석할 경우가 많다. 이후, 본 논문의 수치해석 결과에서 RHRIC VOF법의 결과에 대해 논의하겠지만, 이러한 문제에 RHRIC법이 적용되기 위해서는 전체 계산영역에서 국부적으로 높은 CFL값을 가지더라도 타당한 정도의 해를 갖도록 적

Received: January 6, 2015, Revised: February 11, 2015,

Accepted: February 11, 2015.

\* E-mail: irpark@deu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.1.057>

© KSCFE 2015

절한 수정이 필요하다. 본 논문에서는 선체주위 자유수면 유동 해석에 적합하도록 새롭게 개발된 mRHRIC(modified RHRIC) VOF법과 이를 대표적인 CFD 검증 선형인 DTMB5415와 KCS 컨테이너운반선의 저항성능 해석에 적용한 결과를 소개한다. 수치해석 결과에서는 검증을 위해 모형시험 결과 및 다른 정식화를 사용하는 mRHRIC VOF법[9]과 Level-set법[10]의 수치해석 결과들과 비교하고 본 자유수면 해석기법의 타당성을 논의하였다.

## 2. 문제의 정식화와 수치해석 방법

### 2.1 지배방정식

본 논문이 다루는 이상유동(Two-phase flow)에 대한 지배방정식인 비압축성(Incompressible) Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식(Continuity equation)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

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

여기서  $\Omega$ 는  $S$ 의 경계면을 가지는 검사체적(Control volume)이며,  $n_i$ 는 단위 법선벡터를 나타낸다.  $\rho$ 는 유체밀도이며,  $u_i$ 는 각 좌표축 방향의 유체속도 성분 ( $u, v, w$ )을 나타낸다.  $\tau_{ij}$ 는 점성에 의한 유효응력이며,  $p$ 는 압력을 나타내고  $g_i$ 는 중력 가속도이다.

수치해석에서 지배방정식은 선체의 전진속도, 선체의 길이(Lpp) 그리고 물의 밀도로 무차원화시키고 유한체적법(Finite volume method)으로 이산화 하였다. 시간적분은 1차 정도의 Euler법으로 수행되며, 대류항과 확산항에 대한 이산화는 3차 정도의 MUSCL(Monotonic Upstream centered Scheme for Convection Laws)법[11]과 2차 정도의 중심차분법(Central differencing scheme)으로 수행하였다. 연속방정식은 SIMPLE [12] 알고리즘을 이용하여 만족시켰다. 난류모델은 Realizable k- $\epsilon$  모델을 사용하였다[13].

### 2.2 RHRIC VOF법

먼저, 기존의 RHRIC VOF법[1]을 간단하게 정리하면 다음과 같다. 유동장에서 자유수면은 각 유체가 차지하는 체적비율로 모델링하고 그 움직임은 다음의 이송방정식(Transport equation)을 풀어 구할 수 있다.

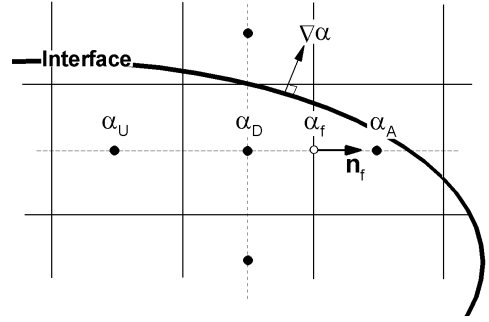


Fig. 1 Definition of local volume fractions

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \alpha d\Omega + \int_S \alpha u_i n_i dS = 0 \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 체적비율로서 액체 영역에서 1, 기체 영역에서 0, 자유수면 영역은  $0 < \alpha < 1$ 의 값을 갖는다.

식 (3)의 해는 상류차분법(Upwind difference scheme)과 하류차분법(Downwind difference scheme)을 적절히 혼합하는 방식으로 구해지며, 특별히 격자 경계면에서  $\alpha_f$  값을 정의하는 방법에 따라 VOF법의 특성이 달라질 수 있다. 일반적으로 고차 차분법을 유도할 때 사용하는 방법으로서 주어진 격자내 체적비율  $\alpha$ 는 아래와 같이 정규화(Normalization)할 수 있다.

$$\tilde{\alpha} = \frac{\alpha - \alpha_U}{\alpha_A - \alpha_U} \quad (4)$$

여기서, 아래첨자  $U$ 와  $A$ 는 Fig. 1에서 볼 수 있는 각각 상류격자(Upwind cell)와 수용격자(Acceptor cell)들을 나타내고  $D$ 는 기여격자(Donor cell)를 나타낸다. 하류차분법인 Hyper-C [14]법으로  $\alpha_f$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\tilde{\alpha}_{f(Hyper-C)} = \begin{cases} \min\left(\frac{\tilde{\alpha}_D}{C_o}, 1\right) & \text{where } 0 \leq \tilde{\alpha}_D \leq 1 \\ \tilde{\alpha}_D & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $C_o$ 는 Courant 수이며 아래 식 (6)과 같다.

$$C_o = \frac{\dot{m}_f \Delta t}{\Delta \Omega_D} \quad (6)$$

여기서,  $\dot{m}_f$ 는 격자 경계면에서의 질량유량이고,  $\Delta t$ 는 시간 간격,  $\Delta \Omega_D$ 는 기여격자의 체적이다. RHRIC법은 격자 경계

면을 통한 유체의 체적비율이 질량보존 특성을 만족하고, 경계면이 유동의 방향에 접할 때 경계면 형상을 왜곡하는 단점을 가진 하류차분법을 보완하는 다음과 같은 상류차분식을 가진다.

$$\tilde{\alpha}_f^{(HRIC)} = \begin{cases} \min(\tilde{\alpha}_D C_o + 2\tilde{\alpha}_D(1 - C_o), \tilde{\alpha}_f^{(HyperC)}) & \text{where } 0 \leq \tilde{\alpha}_D \leq 1 \\ \tilde{\alpha}_D & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (7)$$

최종적으로, RHRIC법에서는 식 (3)을 풀기위해 필요한 격자의 경계면에서 정규화된 체적비율  $\alpha_f$ 를 앞서 정의한 상류차분법과 하류차분법을 혼합하여 다음과 같이 구한다.

$$\tilde{\alpha}_f = \gamma_f \tilde{\alpha}_f^{(HyperC)} + (1 - \gamma_f) \tilde{\alpha}_f^{(HRIC)} \quad (8)$$

여기서,  $\gamma_f$ 는 하류차분법과 상류차분법을 부드럽게 잇는 혼합함수(Blending function)로 유동의 진행방향과 자유수면의 기울기에 대한 정보로 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_f = \cos^4(\theta_f) \quad (9)$$

$$\theta_f = \arccos \left| \frac{(\nabla \alpha)_f \cdot \mathbf{n}_f}{|(\nabla \alpha)_f| |\mathbf{n}_f|} \right| \quad (10)$$

상기와 같이 전개되는 RHRIC법은 0.5이하의 비교적 낮은 CFL 조건에서 자유수면의 해의 정확도가 타당하다는 제한을 갖는다.

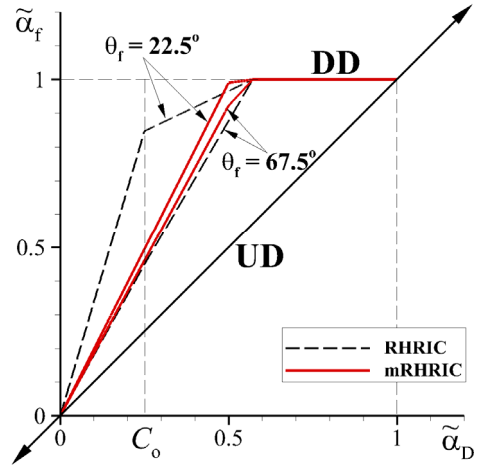
### 2.3 mRHRIC VOF법

선체주위 자유수면 유동 해석과 같이 격자 조건과 계산시간 간격 특성상 국부적으로 높은 CFL조건이 될 수 있는 문제에 적합하도록 RHRIC VOF법을 수정한 mRHRIC법은 다음과 같다.

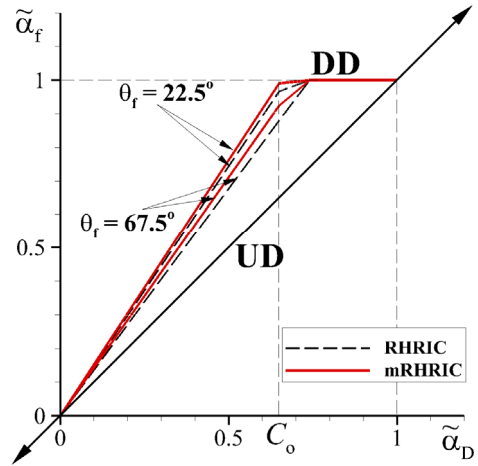
먼저 하류차분을 나타내는 식 (5)에 상류차분으로 전환할 수 있는 조건을 삽입하여 하나의 식에 질량보존 특성을 유지하면서 유체의 경계면 포착에 유리하도록 아래와 같이 수정되었다.

$$\tilde{\alpha}_f^{(HyperC)m} = \begin{cases} \min\left(\frac{\tilde{\alpha}_D}{C_o}, 2\tilde{\alpha}_D, 1\right) & \text{where } 0 \leq \tilde{\alpha}_D \leq 1 \\ \tilde{\alpha}_D & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (11)$$

여기서, 아래첨자  $m$ 은 수정된 식을 의미한다. 식 (7)의 상류



(a)  $C_o = 0.25$



(b)  $C_o = 0.65$

Fig. 2 Normalized variable diagram at  $\theta_f = 22.5^\circ, 67.5^\circ$   
UD:upwind differencing, DD:down- wind differencing

차분법의 경우 Courant 수  $C_o$ 조건을 부과하여 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$\tilde{\alpha}_f^{(HRIC)m} = \begin{cases} \tilde{\alpha}_f^{(HRIC)} & \text{where } 0 \leq \tilde{\alpha}_D \leq 1, C_o \leq 0.7 \\ \tilde{\alpha}_D & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (12)$$

유동의 진행방향과 자유수면의 기울기에 대한 정보로 나타나는 하류차분법과 상류차분법을 부드럽게 잇는 혼합함수 식 (9)의 차수를 줄여 완만하게 연결되도록 계획하여 다음과 같이 변경하였다.

$$\gamma_f = |\cos(\theta_f)| \quad (13)$$

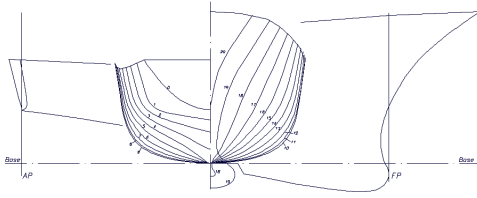


Fig. 3 DTMB5415 lines, bow and stern profiles

최종적으로 상기 식 (11)과 식 (12)는 혼합함수 식 (13)을 사용하여 식 (8)과 같이 격자 경계면에서의 정규화된 체적비율  $\alpha_f$ 를 구한다. Courant 수가 0.5보다 낮은 0.25일 때와 그보다 높은 0.65일 때 RHRIC와 mRHRIC의 식 (4)에 근거한 NDV(Normalized Variable Diagram)의 거동을 Fig. 2에서 비교하였다.

### 3. 수치해석 결과

개발된 새로운 VOF법은 검증을 위해 정수 중 저항성능 해석 문제에 적용하고 모형시험 및 타 수치기법인 Level-set과 mHRIC법의 결과와 함께 비교하였다. 대상 선형은 미해군의 DTMB5415 선형과 KRISO(선박해양플랜트연구소)의 KCS 컨테이너운반선이다. 검증은 주로 선체주위에 생성된 파와 저항 계수 비교를 통해 수행되었다.

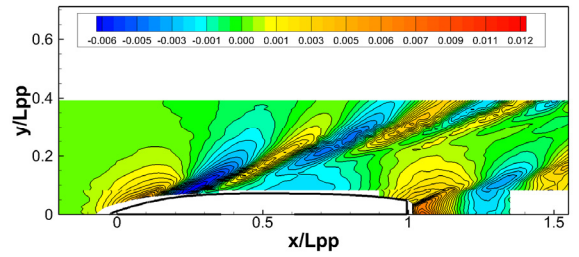
#### 3.1 DTMB5415 선형

Fig. 3와 Table 1은 대상 선형인 DTMB5415의 선도(Body plan)와 46.6 축척비의 모형선의 주요제원(Main parameters)을 보여주고 있다. 이 축척비의 모형선은 DTMB5512로 불리며 미국 IOWA대학의 IIHR에서 CFD 검증용 데이터 확보를 위한 목적으로 수행된 모형시험에 사용되었다. 수조시험에서 Froude 수  $Fr = 0.28$  그리고 Reynolds 수  $Re = 4.86 \times 10^6$ 이다. 모형선은 선수와 선미에서 다른 침하(Sinkage) 조건의 고정된 자세를 가지며, 배길이로 무차원화된 값으로 F.P.위치에서 침하량은 -0.0031이며 A.P.에서는 -0.0007이다.

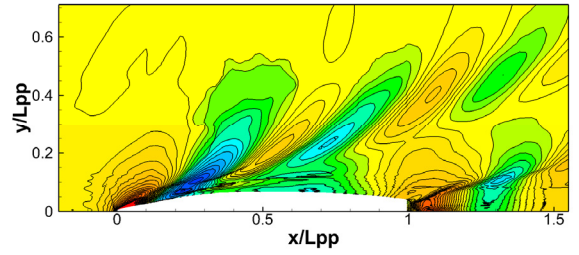
계산영역은  $-1.0 \leq x/Lpp \leq 2.0$ ,  $0.0 \leq y/Lpp \leq 1.0$ ,

Table 1 Main parameters of DTMB5415

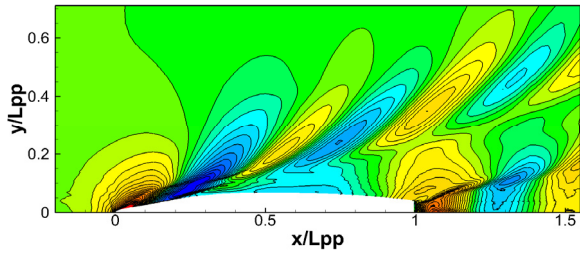
DTMB5415 (scale ratio = 46.6)	
Length LPP	3.048 m
Draft T	0.132 m
Beam B	0.406 m
Wetted surface area S	0.083 m <sup>2</sup>
Block coefficient CB	0.506



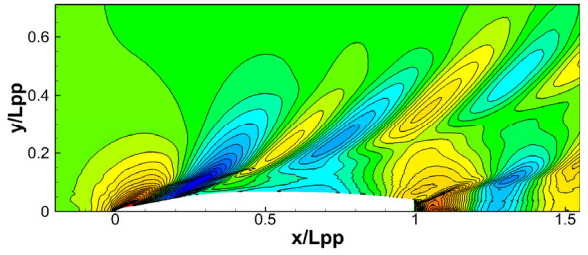
(a) EXP.



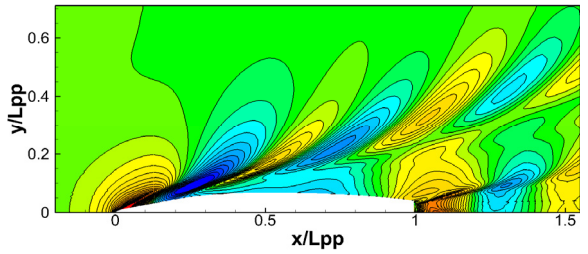
(b) RHRIC



(c) mRHRIC



(d) mHRIC



(e) Level-set

Fig. 4 Comparison of the wave pattern around DTMB5415 hull form

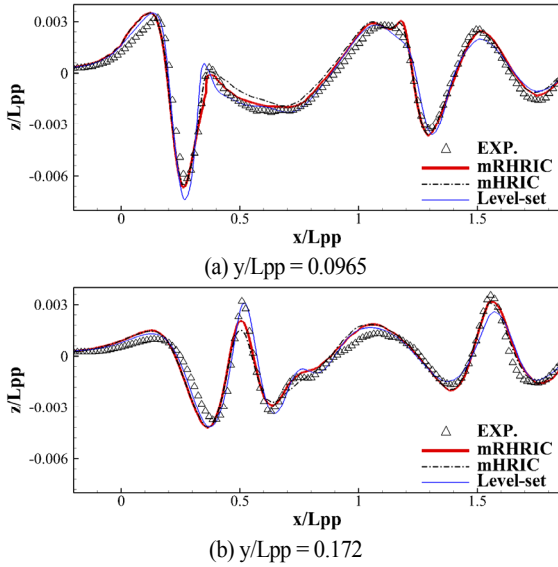


Fig. 5 Comparison of longitudinal wave cuts for DTMB5415 at  $y/L_{pp} = 0.0965$  &  $0.172$

$0.03 \leq z/L_{pp} \leq -1.0$  이며 선체의 F.P.와 A.P.는 정수면( $z/L_{pp} = 0.0$ )의  $x/L_{pp} = 0.0$ 과  $1.0$ 에 각각 위치하고 있다. 여기서, 선체 표면은 유속이 없는 벽면 경계조건, 입구는 선속에 해당하는 유속 조건을 부과하였으며, 나머지 유동장 경계면에는 유동의 대칭조건을 주었다. 정렬격자를 사용하였으며, 전체 격자점수는  $280 \times 90 \times 100 + 80 \times 100 \times 50$ (트랜십 하류영역), 약  $2.93$  M이다. 격자의 크기는 Kim et al.[15]의 저항성능 해석에 사용된 medium 격자보다 약 25% 더 크며, 계산시간 간격은  $0.005$ 이다. 선체로부터 첫 번째 격자점들의 무차원 거리는  $50 < y^+ (= u^{\tau} \Delta y / \nu) < 150$ 의 범위에 있다. 여기서,  $u_{\tau} (= \sqrt{\tau_w / \rho})$ 는 마찰속도(Friction velocity),  $\nu$ 는 동점성계수(Kinematic viscosity),  $\tau_w$ 는 벽면 전단력(Wall shear stress)이다.

Fig. 4는 모형시험에서 측정한 DTMB5415 모형선 주위 3차원 파형 분포와 RHRIC, mRHRIC, mHRIC, 그리고 Level-set법으로 구한 해를 각각 비교하고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 RHRIC VOF법의 결과는 선체주위로 다소 왜곡된 비물리적인 파형의 분포를 보이고 있다. 이러한 결과의 이유는 CFL조건

Table 2 Comparison of the resistance coefficient for DTMB5415

Method	$C_T \times 10^3$
RHRIC	4.742
mRHRIC	4.692
mHRIC	4.680
Level-set	4.544
Exp.	4.610

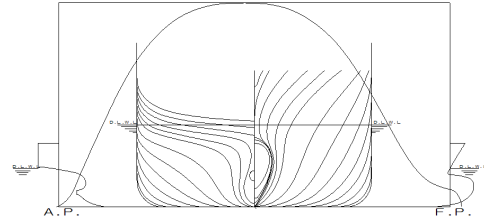


Fig. 6 KCS lines, bow and stern profiles

의 제한과 함께 자유수면 유동 문제의 경우 유동의 진행방향에 경계면이 접하는 형태의 문제로 RHRIC법에 사용된 상류 차분법에 의한 자유수면 왜곡이 그 원인이 될 수 있다.

반면, mRHRIC법의 결과는 이러한 문제를 해결하기 위해 개발된 의도대로 모형시험과 타 수치기법의 결과와 좋은 일치를 보여주고 있다. 파형분포 상으로는 mRHRIC법이 Level-set법과 같이 mHRIC법보다 선체에서 떨어진 하류영역에서 발산파(Divergent wave)의 감쇠가 약간 적고 반면, 트랜십 하류 영역 자유수면의 경우 mHRIC법과 같이 Level-set법보다 모형시험 결과에 유사한 일치를 보여준다.

Fig. 5는  $y/L_{pp} = 0.0965$ 과  $0.172$  위치에서 상류에서 하류로 선체길이 방향을 따라 측정한 2차원 파형 분포를 수치해석 결과들과 비교하고 있다. 참고로, 모형시험의 경우 하류  $x/L_{pp} = 1.85$ 위치까지 측정한 데이터가 있다. 선측 근방  $y/L_{pp} = 0.0965$ 에서는 mRHRIC가 모형시험과 다소 좋은 일치를 보이고 있고,  $y/L_{pp} = 0.172$ 에서 Level-set법이 선체중심( $x/L_{pp} = 0.5$ ) 근방에서 모형시험의 파정과 파저 위치에 대해 다른 두 방법보다 다소 일치하는 결과를 보여준다. Level-set법의 경우 선미 후류에서는 모형시험 대비 다소 감쇠된 파형 특성을 보인다. 본 그림의 선측을 따른 2차원 파형 분포 비교에서 mRHRIC VOF법과 mHRIC법은 Level-set법에 대비해서는 서로 비슷하지만 다른 거동을 보이고 있는 것을 볼 수 있으며, 앞서 3차원 파형 분포에서 살펴본 바와 같이 선미 후류에서 Level-set법보다 모형시험 결과와 나은 일치를 보여주고 있다.

Table 2는 모형시험에서 측정한 저항계수를 각각의 수치기법으로 구한 값과 비교하고 있다. mRHRIC법과 mHRIC법의 결과들은 모형시험보다 약간 큰 값을 보이고 Level-set법은 보다 작은 값을 가지나, 모두 작은 오차내에서 측정한 저항값과

Table 3 Main parameters of KCS model

KCS (scale ratio = 31.6)	
Length LPP	7.2786 m
Draft T	0.3418 m
Beam B	1.0190 m
Wetted surface area S	9.4379 m <sup>2</sup>
Block coefficient CB	0.651

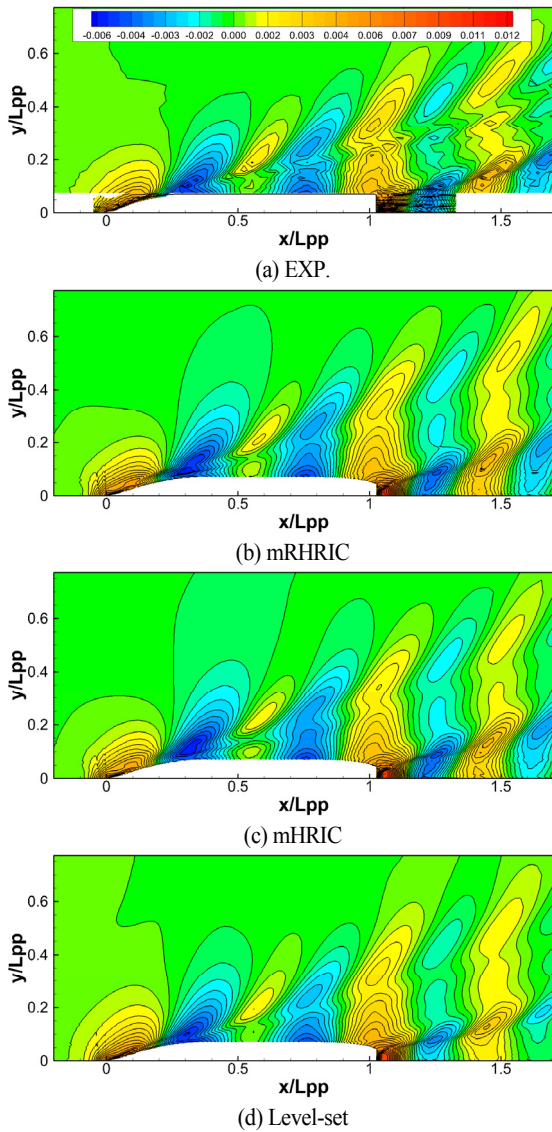


Fig. 7 Comparison of the wave pattern around KCS hull form

타당한 일치를 보여주었고 있다. 파형 분포 비교에서 다소 차이를 보였고, 타 수치기법의 결과보다는 다소 크지만 RHRIC법의 결과가 예상과는 달리 모형시험 값과 약 3%이내의 작은 차이를 보이고 있다. 참고로, 계산시간의 경우 세 VOF법은 거의 같으며, Level-set법이 level-set함수 재초기화 과정을 갖는 수치해석 특성으로 다른 방법보다 증가하였다[10].

3.2 KCS 선형

Fig. 6와 Table 3은 KCS 컨테이너운반선의 선도와 모형선

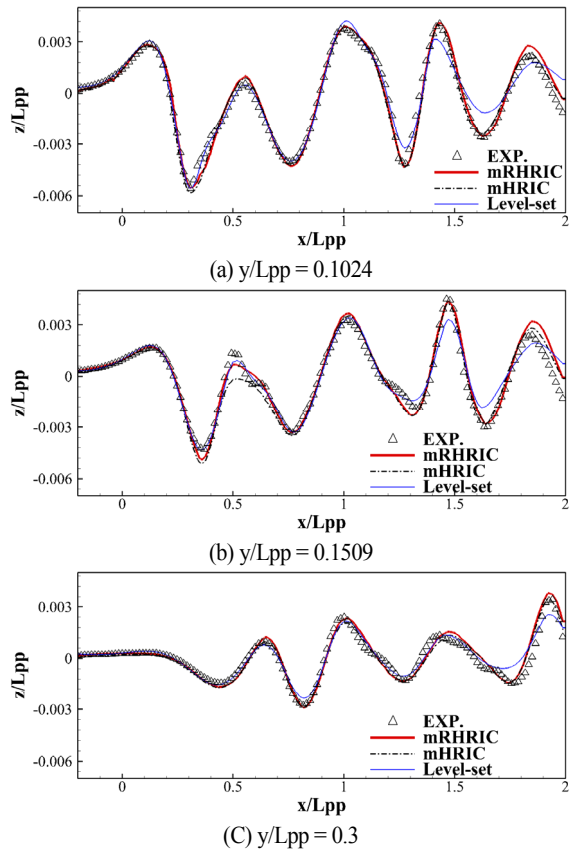


Fig. 8 Comparison of longitudinal wave cuts for KCS at  $y/L_{pp} = 0.1024, 0.1572 \text{ \& } 0.3$

의 주요제원을 나타내고 있다. 모형시험은 KRISO에서 CFD 검증용 데이터 확보를 위한 동일한 목적에서 수행되었다. 계산영역은 앞서 설명한 DTMB5415에 대한 수치격자와 같으며 격자의 크기는 약 2.97M이다. 선체 벽면으로부터 첫 번째 격자점까지의 무차원 거리는  $50 < y^+ < 150$ 의 범위에 들도록 하였다. 수조시험에서 Froude 수  $Fr = 0.26$  그리고 Reynolds 수  $Re = 1.4 \times 10^7$ 이다.

Fig. 7은 KRISO 선형시험수조에서 계측한 KCS 모형선 주위 3차원 파형 분포와 수치해석법 mRHRIC, mHRIC, 그리고 Level-set법으로 구한 해를 각각 비교하고 있다. 세 수치기법의 결과 모두 선수에서 시작되어 하류로 전파되는 발산파의 형태를 잘 재현하고 있다. 계측된 파형에서 볼 수 있는 파계(Wave system)간 복잡한 패턴은 사용된 격자 수준으로 해상하기 어려운 짧은 파 성분 또는 수치해석에서는 수치감쇠의 영향으로 나타나지 않는 성분들이다. 비교된 수치해석 결과들 가운데 새롭게 개발된 mRHRIC법이 모형시험의 결과에 보다



근접한 것을 볼 확인할 수 있다. 파 등고선이 나타내는 진폭의 경우 Level-set법이 트랜섬 뒤쪽 영역을 포함하여 하류 영역에서 모형시험보다 작아지는 경향을 보이고 있다. 반면, mRHRIC법과 mHRIC법의 결과는 같은 영역에서 계측된 파형과 진폭의 크기에 근접한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 8은  $y/L_{pp} = 0.1024, 0.1509$ 와  $0.3$  위치에서 상류에서 하류로 선체길이 방향을 따라 계측한 2차원 파형 분포를 수치해석 결과들과 비교하고 있다. 선측 근방  $y/L_{pp} = 0.1024$ 와  $0.1509$ 에서는 mRHRIC법과 Level-set법이 mHRIC법보다 계측된 파에 대해 나은 일치를 보여주고 있으며, 선측에서 다소 떨어진  $y/L_{pp} = 0.3$ 과 하류 영역에서는 mRHRIC VOF법과 mHRIC법이 더 나은 일치를 보여준다. 대체로 앞서 3차원 파형 분포 비교에서 확인한 바와 같이 본 논문에서 소개하는 mRHRIC VOF법이 모형시험에서 계측한 파와 잘 일치하는 결과를 보여주는 것으로 판단된다.

KCS 모형선에 대해 모형시험과 수치해석에서 얻은 저항계수 값들은 Table 4에서 볼 수 있다. 각 수치기법의 해는 앞서 설명한 DTMB5415 선형에 대한 결과와 유사한 경향을 보여주고 있으며, 계측된 모형시험의 저항계수와 타당한 일치를 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 선체주위 자유수면 유동 해석에 적합하도록 기존 RHRIC VOF법을 수정하여 새롭게 개발한 mRHRIC법을 소개하고 그 정도를 검증하였다. CFD 검증을 위한 대표적인 선형인 DTMB5415 모형선에 대한 선체주위 파형과 저항계수 추정에서 mRHRIC VOF법이 기존의 RHRIC법보다 우수한 것을 확인할 수 있었다. 타 수치기법인 Level-set법과 mHRIC VOF법과의 비교에서 DTMB5415와 KCS선형의 선체주위 파형 추정은 본 수치기법, mRHRIC법이 근소하지만 모형시험 결과에 보다 좋은 일치를 보여주었다. 저항계수 추정은 모형시험의 불확실성 및 수치해석의 오차 등을 고려할 때 작은 오차 내에서 서로 비슷한 정확도를 보여주었다.

향후 본 방법에 대한 수학적 개선 여지를 더 조사하고 다양한 선종에 대한 검증을 통해 해의 정도를 높이는 연구를 계속 수행할 예정이다.

Table 4 Comparison of the resistance coefficient for KCS

Method	$C_T \times 10^3$
mRHRIC	3.603
mHRIC	3.597
Level-set	3.541
Exp.	3.557

#### 후 기

본 논문은 2014년 동의대학교 일반연구과제사업(2014A A166)의 연구비 지원을 통해 작성되었음을 밝힙니다.

#### References

- [1] 2009, Park, I.R., Kim, K.S., Kim, J. and Van, S.H., "A Volume-of-fluid Method for Incompressible Free Surface Flows," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 61(12), pp.1331-1362.
- [2] 2005, Rhee, S.H., Makarov, B.P., Krishinan, H. and Ivanov, V., "Assessment of the Volume of Fluid Method for Free Surface Wave Flow," *Journal of Marine Science and Technology*, 10(4), pp.173-180.
- [3] 2010, Seo, J.H., Seol, D.M., Lee, J.H. and Rhee, S.H., "Flexible CFD Meshing Strategy for Prediction of Ship Resistance and Propulsion Performance," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2(3), pp.139-145.
- [4] 2010, Shin, H.K. and Jung, J.H., "Circular Motion Test Simulation of KVLCC1 Using CFD," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(3), pp.377-387.
- [5] 2012, Nam, B.W., Kim, Y.H., Yang, K.K., Hong, S.Y. and Sung, H.G., "Numerical Study on Wave-induced Motion of Offshore Structures Using Cartesian-grid based Flow Simulation Method," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 26(6), pp.7-13.
- [6] 2014, Lee, S.B. and Lee, Y.M., "Statistical Reliability Analysis of Numerical Simulation for Prediction of Model-Ship Resistance," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(4), pp.321-327.
- [7] 2014, Park, S.H. and Rhee, S.H., "Numerical Diffusion Decrease Of Free-Surface Flow Analysis Using Source Term In Volume Fraction Transport Equation," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.19, No.1, pp.15-20.
- [8] 1999, Ubbink, O. and Issa, R.I., "A Method for Capturing Sharp Fluid Interfaces on Arbitrary Meshes," *Journal of Computational Physics*, 153(1), pp.26-50.
- [9] 2006, Fluent., *Fluent 6.3 Users Guide*. Fluent Inc.
- [10] 2004, Park, I.R., Kim, J. and Van, S.H., "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.

- [11] 1979, Van Leer, B., "Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V:A Second-Order Sequel to Godunov's Method," *Journal of Computational Physics*, 32, pp.101-136.
- [12] 1980, Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," *Taylor & Francis, ISBN 978-0-89116-522-4*.
- [13] 1995, Shih, T.H., Liou, W.W., Shabir, A. and Zhu, J., "A New Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation," *Computers and Fluids*, 24(3), pp.227-238.
- [14] 1991, Leonard, B.P., "The ULTIMATE Conservative Difference Scheme Applied to Unsteady One-dimensional Advection," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 88(1), pp.17-74.
- [15] 2011, Kim, J., Park, I.R., Kim, K.S., Van, S.H. and Kim Y.C., "Development of a Numerical Method for the Evaluation of Ship Resistance and Self-Propulsion Performances," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.147-157.