

개선된 HRIC VOF 법에 의한 자유수면 유동해석

박일룡^{†*}, 김광수*, 김진*, 반석호*

한국해양연구원 해양시스템안전연구소*

Numerical Simulation of Free Surface Flow Using a Refined HRIC VOF Method

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

Maritime and Ocean Engineering Research Institute (MOERI), KORDI*

Abstract

In this paper, a VOF method called RHRIC (refined high resolution interface capturing) is introduced for solving the motion of the free surface and applied to the simulation of the advection of rigid interfaces of different shapes and a 2D dam-break problem, which are typical benchmark test cases. The numerical results for the interface advection cases are compared to the analytic solutions, while the available experimental data and other numerical results of various free surface methods for the dam-break problem are provided for the validation of the proposed VOF method. The same simulations were also carried out using the original HRIC scheme and a modified HRIC scheme called MHRIC for comparison. Although the RHRIC uses a simple order scheme, a basis of the original HRIC scheme, lower than the third-order ULTIMATE-QUICKEST used by the MHRIC, it provides an improved accuracy over the two previous HRIC methods.

※Keywords: VOF method(VOF법), High resolution differencing(HR차분), Interface advection (경계면 이송), Dam-break(댐붕괴), CFD(전산유체역학), Validation(검증)

1. 서론

선박의 저항을 비롯하여 선박운동과 관련된 선체의 내부와 외부유동 문제들에서 자유수면의 영향을 정확히 해석하기 위해 적용할 수 있는 다양한 수치해석 기법들이 계속 개발되고 있다.

먼저 이러한 자유수면 유동을 모델링하기 위한 수치해석 기법으로는 물의 영역만을 고려하는 단일유동(single-phase flow) 해석기법들이 있다. 대부분 포텐셜유동(potential flow)을 가정하는 경계요소법(boundary element method)과 점성유동(viscous flow) 해석법에서 격자이동법(moving grid method)으로 자유수면을 모델링하는 방법들이 여기에 속한다 할 수 있다(Hong and Choi 1995, Shin and Kang 1996, Jung et al.1998, Lee

접수일: 2009년 10월 20일, 승인일: 2010년 3월 17일

†교신저자: irpark@moeri.re.kr, 042-866-3452

and Choi 1998, Kim et al. 2000, Kim and Kim 2001, Kim et al. 2003). 그러나 공기 영역의 영향을 무시할 수 없거나 외부유동을 포함하여 구조물 운동과 연성된 복잡한 내부 자유수면 유동 해석을 함께 수행해야 할 경우 이상유동(two-phase flow) 해석기법이 더 적절하다고 할 수 있다. 이는 물리적 현상에 대한 모델링 면에서도 자연스럽게 자유수면 영역에서 압력변화가 클 경우 보다 현실적인 해를 제공하기 때문이다. 선박유체역학 분야에서 비압축성 자유수면 유동 해석 기법으로 활발히 사용되고 있는 이상유동 해석법은 크게 LS(level-set)법과 VOF(volume of fluid)법이 있다. 최근에는 각 방법을 개선하거나 타 기법과 접목한 다양한 방법들이 소개되고 있다(Song 2003, Sussman et al. 2007). 자유수면에 대한 해의 정도(order)를 2차 이상으로 높여야 할 특별한 적용 목적이 있는 경우에 대해 고차 기법들이 개발되고 있지만(Sussman et al. 2007), 수치해석 기법상 매우 복잡하고 현실적으로 프로그래밍도 어려워 지는 단점이 있다. 또한 격자계 특성에 대한 의존성이 커서 비직교(non-orthogonal)이며 격자 간격이 일정하지 않은 조건에서는 만족스러운 결과를 얻지 못할 수도 있다. 반면 현실적으로 활발히 사용되는 방법들은 자유수면에 대한 해의 정확도가 최소 1차 정도로 낮아질 수도 있지만 다양한 공학적 문제에 대해 만족할 수 있는 타당한 해를 제공하고 있다.

최근 Park et al.(2009)은 비압축성 자유수면 유동을 해석할 수 있는 HR차분(high resolution differencing)법에 기반을 둔 개선된 RHRIC(refined high resolution interface capturing) VOF법을 소개하였다. 본 논문에서는 이 방법과 현재 선박유체역학 분야에서 널리 사용되고 있는 같은 HR차분법 계열인 기존 HRIC(Muzaferija and Perić 1999)법과 MHRIC(modified HRIC, Fluent 2006)법을 비교하고 있다. 먼저 자유수면 해석 정도를 명확히 밝혀주는 대표적인 표준 검증 예인 주어진 유동장내 경계면 이송(interface advection) 문제를 통해 각 기법이 가지는 VOF값

이송 능력을 살펴보았다. 또 다른 표준 검증 예인 복잡한 자유수면과 압력의 변화를 해석해야 하는 댐붕괴(dam-break) 문제를 통해 본 논문에서 적용된 수치해석 기법들의 결과를 실험 및 타 수치해석 기법들의 결과와 비교하고 자유수면 해석 정확도에 대해 논의 하였다.

2. 수치 해석 방법

2.1 지배방정식

본 논문에서 다루는 비압축성(incompressible) 이상유동에 대한 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식과 연속(continuity)방정식의 적분표현은 다음과 같다.

$$\int_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho u_i d\Omega + \int_S \rho u_i \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \\ - \int_S p \mathbf{i}_i \cdot \mathbf{n} dS + \int_S \tau_{ij} \mathbf{i}_j \cdot \mathbf{n} dS + \int_{\Omega} \rho g_i d\Omega \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, S 는 유동장 검사체적(control volume) Ω 를 둘러싸는 경계면이며, \mathbf{v} 는 속도벡터이며 Cartesian 좌표계 성분 x_i 에 대한 속도성분 u_i 값들을 가진다. \mathbf{n} 은 유동장 경계면 S 에 대한 법선(normal)벡터이며, t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력을 각각 나타낸다. τ_{ij} 는 유체의 점성에 의해 발생하는 응력(stress)을 표시며, g_i 는 중력 가속도이다. 본 논문에서 표면장력에 의한 영향은 무시하였다. 이상유동에 대한 지배방정식에서 유체들 간의 구분은 밀도와 점성이 각 유체에 해당하는 값을 갖도록 이들을 함수화 시켜 나타낼 수 있다. VOF법을 도입할 경우 단위 검사체적내 각 유체가 차지하는 체적비율(volume fraction: $0 \leq \alpha \leq 1$)을 이용하여 밀도와 점성은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho(\alpha) = \alpha\rho_l + (1-\alpha)\rho_g \quad (3)$$

$$\mu(\alpha) = \alpha\mu_l + (1-\alpha)\mu_g \quad (4)$$

여기서 아래첨자 l 과 g 는 각각 액체와 기체를 나타낸다.

지배방정식에 대한 기본적인 수치해석 방법은 유한체적법(finite volume method, FVM)이다. 시간적분법으로 2차 정도의 Three-Time-Level method (Ferziger and Perić, 1996)을 사용하였으며, 지배방정식의 대류항과 확산항은 3차 정도의 MUSCL(monotonic upstream centered scheme for convection laws, Van Leer 1979)방법과 2차 정도의 중앙차분법(central difference scheme)을 이용하여 각각 이산화 하였다. 연속방정식을 만족시키기 위한 속도-압력의 연성은 SIMPLE (Ferziger and Perić 1996)알고리즘을 통해 수행되었다. 최종적으로 이산화된 지배방정식에 대한 선형 연립방정식의 해는 SIP(strongly implicit procedure, Stone 1968)기법을 사용하여 구하였다. 본 논문에서 지면상 제한으로 언급하지 못하는 지배방정식에 대한 보다 상세한 수치 이산화 기법은 Ferziger and Perić (1996), Kim et al.(2002), Park et al.(2009)의 문헌을 통해 볼 수 있다.

2.2 VOF 법

두 유체의 경계면인 자유수면의 움직임은 다음의 VOF 이송방정식(transport equation)의 해를 통해 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \alpha d\Omega + \int_S \alpha \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (5)$$

여기서, 체적비율 α 는 액체영역에서 1, 기체영역에서 0, 그리고 두 유체의 경계면에서 $0 < \alpha < 1$ 의 값을 갖는다. 식 (5)에 대한 수치해석은 유동장에서 각 유체에 대한 질량보존(mass conservation)과 두 유체의 경계면이 되는 자유수면과 그 운동에 대한 정확한 해상도를 유지하도록 수행되어야 한다. 자유수면의 움직임은 시간과 주어진 속도장(velocity field)에 의존하므로 식(5)는 시간과 대류항에 대한 수치 모델링의

기법에 따라 해의 정확도 및 특성이 달라질 수 있다. 따라서 유체에 대한 질량보존과 자유수면의 움직임에 대한 정확한 모사를 위해 식(5)를 어떻게 적절한 수치 해석법을 도입하여 해석하느냐는 큰 이슈라 할 수 있다.

일반적으로 알려진 바와 같이 중앙차분법은 그 특성에 비추어 볼 때 이러한 문제를 푸는데 적합하지 않다. 상류차분법(upwind differencing, UD)의 경우 각 유체에 대한 질량보존을 위한 체적비율을 유지하는 기법으로 선택 가능하다. 그러나 일반적인 상류차분법은 자유수면 자체에 대한 표현과 및 그 움직임을 정확히 해석하는 데는 약점을 가지고 있다. 그 이유는 자유수면에 대한 해에 수치확산(numerical diffusion)이라는 해의 번짐 현상이 있을 수 있다. 반면 하류차분법(downwind differencing, DD)은 자유수면에 대한 모사에 있어 비교적 정확한 해를 제공한다. 그러나 이방법의 문제는 자유수면의 형상이 계단모양(step like)과 같은 비선형적인 형상, 즉 비현실적인 자유수면의 모양을 제공할 가능성이 있다. 특별히 유동의 흐름이 자유수면의 법선 방향에 대해 직각일 때 이러한 현상이 발생한다 (Hirt and Nichols 1981, Lafaurie et al. 1994). 결국 각 차분법의 장단점을 고려하여 식(5)를 정확히 해석할 수 있는 적합한 방법은 상류차분법과 하류차분법을 혼합하는 것이다. 기존 알려진 다양한 VOF법은 이러한 혼합기법을 도입하고 있다(Hirt and Nichols 1981, Muzafarjia and Perić 1999, Ubbink and Issay 1999, Fluent 2006). 그러나 혼합기법을 사용할 때 반드시 필요한 것은 두 기법을 적절하게 연결시키는 혼합함수(blending function)를 정의하는 것이다 (Ubbink and Issay 1999). 혼합함수는 유동의 방향과 자유수면의 기울기를 고려하여 두 차분법을 부드럽게 연속적으로 연결시킬 수 있어야 한다.

본 논문에서 도입한 방법은 기존 대표적인 VOF법인 HRIC, MHRIC 그리고 CICSAM (compressive interface capturing scheme for arbitrary meshes, Ubbink and Issay 1999)법들이

사용하는 개념을 도입하되 다른 형태의 차분법과 혼합함수를 사용하여 개발되었다(Park et al. 2009). 여기서, HRIC와 MHRIC의 차이점은 MHRIC법의 경우 CICSAM법 에서 사용되고 있는 3차 정도의 ULTIMATE QUICKEST(Leonard 1991)방법을 상류차분법으로 사용하고 있으며 하류차분법은 HRIC기법에서 사용된 방법을 유지하고 있다.

VOF법을 고차 차분법 계열들을 이용하여 개발할 때 NVD(normalized variable diagram, Leonard 1991)를 이용할 경우 개발되는 수치 기법의 특성을 한눈에 파악할 수 있다. NVD를 통해 정량화된 유체의 체적비율 $\tilde{\alpha}$ 는 다음과 같이 정의된다.

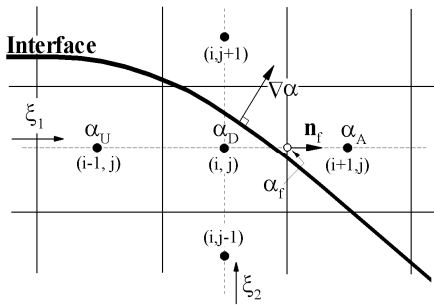


Fig. 1 Definition of local variables for normalized variable diagram (NVD).

$$\tilde{\alpha} = \frac{\alpha - \alpha_U}{\alpha_A - \alpha_U} \quad (6)$$

여기서 아래첨자 U 와 A 는 각각 상류격자(upwind cell)와 수용격자(acceptor cell)들을 나타낸다(Fig. 1 참조). 그림에서 중앙의 격자는 기여격자(donor cell) D 를 나타내며 이 격자를 둘러싼 경계에서 각 유체의 체적비율들이 내삽(interpolation)된다. 실제로 등 간격이 아닌 일반 격자시스템에서는 격자의 특성을 고려할 경우 각 변수에 대한 NVD는 격자 좌표값에 대해 정규화된 $\tilde{\xi}_1 = (\xi_1 - \xi_{1U}) / (\xi_{1A} - \xi_{1U})$ 를 고려하여야 한다. 그러나 본 논문에서 도입된 차분법은 격자의 특성에 영향을 받지 않는 표현을 가진다. 즉, 1차 정도 상류차분법은 $\tilde{\alpha}_f = \tilde{\alpha}_D$, 하류차분법은 $\tilde{\alpha}_f = 1$, 1차 정도 이상의 고차 상류차분법으로

$\tilde{\alpha}_f = 2\tilde{\alpha}_D$ 이다.

수치확산을 감소시키며 자유수면의 거동을 해석하기 위해 RHRIC가 도입하는 하류차분법, Hyper-C(Leonard 1991)는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\tilde{\alpha}_{f(HyperC)} = \begin{cases} \min\left(\frac{\tilde{\alpha}_D}{C_o}, 1\right) & \text{where } 0 \leq \tilde{\alpha}_D \leq 1 \\ \tilde{\alpha}_D & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, $\tilde{\alpha}_f$ 는 격자 경계면(cell face) f 에 대한 정량화된 체적비율이다. C_o 는 Courant number 이며 다음과 같이 정의된다.

$$C_o = \frac{\dot{m}_f \Delta t}{\Delta \Omega_D} \quad (8)$$

여기서, \dot{m}_f 는 격자 경계면 f 에서의 유량을 나타내며, Δt 는 시간간격, $\Delta \Omega_D$ 는 기여격자 D 의 체적을 나타낸다. 본 수치기법은 CICSAM과 MHRIC가 도입하는 고차의 ULTIMATE-QUICKEST 기법 대신 HRIC에서 도입하는 비교적 간단하고 차수는 낮은 $\tilde{\alpha}_f = 2\tilde{\alpha}_D$ 를 사용한다. 하류차분법과 상류차분법을 혼합한 최종의 형태는 다음과 같다.

$$\tilde{\alpha}_{f(HRIC)} = \begin{cases} \min(\tilde{\alpha}_D C_o + 2\tilde{\alpha}_D(1 - C_o), \tilde{\alpha}_{f(HyperC)}) & 0 \leq \tilde{\alpha}_D \leq 1 \\ \tilde{\alpha}_D & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (9)$$

자유수면의 정확한 해상을 위해 도입한 하류차분법과 질량보존을 위해 도입한 상류차분법을 부드럽게 이어줄 혼합함수는 앞서 설명한 바와 같이 유동의 진행방향과 자유수면의 기울기에 대한 정보를 고려한 다음의 형태로 표현된다.

$$\gamma_f = \cos^4(\theta_f) \quad (10)$$

$$\theta_f = \arccos \left| \frac{(\nabla \alpha)_f \cdot \mathbf{n}_f}{\|(\nabla \alpha)_f\| \|\mathbf{n}_f\|} \right| \quad (11)$$

여기서 \mathbf{n}_f 는 격자 D 와 A 를 잇는 법선벡터이다. 본 연구에서 사용한 혼합함수는 CICSAM 에서 도입한 $\gamma_f = 0.5(\cos(2\theta_f)+1) = \cos^2(\theta_f)$ (Ubbink and Issay 1999)보다 높은 차수를 가지는 것을 알 수 있으며 수치실험을 통해 상기 고차의 혼합함수가 본 VOF법에 적합함을 알 수 있었다. 최종 기여격자 D 의 경계면에 대해 유도된 체적 비율은 다음과 같다.

$$\tilde{\alpha}_f = \gamma_f \tilde{\alpha}_f (HyperC) + (1-\gamma_f) \tilde{\alpha}_f (HRIC) \quad (12)$$

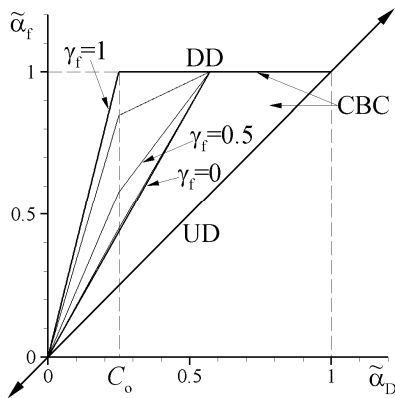


Fig. 2 NDV for the present VOF advection algorithm. UD: upwind differencing, DD: downwind differencing, CBC: convection boundedness criteria.

격자 D 경계면 f 에서 실제 체적비율은 정규화된 값으로부터 다음같이 환산된다.

$$\alpha_f = \alpha_D(1-\beta_f) + \alpha_A\beta_f \quad (13)$$

여기서,

$$\beta_f = \frac{\tilde{\alpha}_f - \tilde{\alpha}_D}{1 - \tilde{\alpha}_D} \quad (14)$$

본 VOF법의 NDV그림은 Fig. 2와 같다. 식(5)를 해석하기 위해 도입된 수치 전개법은 지배유동

방정식을 해석하기 위해 도입한 FVM법을 이용하였다. 중심점 적분법칙(midpoint integral rule)를 이용할 경우 VOF 이송방정식의 대류항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_S \alpha \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS \approx \sum_c \alpha_c^m \dot{m}_c^{m-1}, \quad c = e, w, n, s \quad (15)$$

여기서, 위 첨자 m 과 $m-1$ 은 수치계산에서 현재와 이전 시간을 각각 의미한다. 아래 첨자 c 는 격자 D 를 둘러싸고 있는 경계면들을 나타내며, e, w, n , 그리고 s 는 격자의 동(east), 서(west), 남(south), 그리고 북(north)면을 나타낸다.

시간 적분법으로 2차 정도의 Crank-Nicolson 법을 사용하면 식(5)는 최종적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha_D^m \frac{\Delta\Omega_D}{\Delta t} + \sum_c \frac{1}{2} \alpha_c^m \dot{m}_c^{m-1} = \alpha_D^{m-1} \frac{\Delta\Omega_D}{\Delta t} - \sum_c \frac{1}{2} \alpha_c^{m-1} \dot{m}_c^{m-1}, \quad c = e, w, n, s \quad (16)$$

일반적으로 정상(steady) 문제를 해석할 경우 1차 정도의 시간 적분법을 사용하여도 무난하지만, 비정상(unsteady) 문제를 해석할 경우는 상기와 같이 2차 정도 이상의 시간 적분법을 사용하여야 정확한 자유수면의 움직임을 구할 수 있다.

3. 수치 해석 결과

본 장에서는 선박유체역학 분야에서 주로 사용되고 있는 HRIC와 MHRIC법과 함께 본 논문에서 도입된 RHRIC VOF법을 비교하고 있다. 잘 알려진 표준 검증 예인 경계면 이송(interface advection) 문제의 수치해석 결과는 주어진 해석해(초기 형상)와 비교하였으며, 2차원 댐붕괴(dam break)문제에 대한 결과들은 실험과 타 수치기법들의 결과와 비교 하였다.

3.1 경계면 이송

VOF법의 경계면 이송 정도를 정확히 검증할 수 있는 표준 검증 예는 주어진 속도장에 놓여진 다양한 모양의 경계면들에 대한 시간 변화를 계산한 후 초기 모양에 대비된 변화량을 검토하기 위하여 마련되었다. 구체적인 검증 예는 잘 알려진 Rudman shape(Rudman 1998)과 Zalesak slotted disk(Zalesak 1979)가 있다.

병진이동 문제

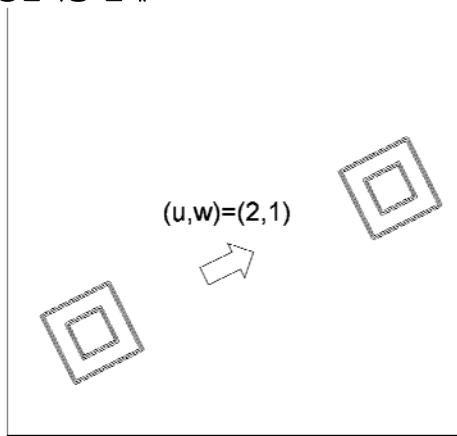


Fig. 3 Schematics of the advection of a hollow shape interface

본 검증 예(Rudman 1998)는 좌표축에 평행한 속이 파여진 사각형, 축에 대해 26.57° 기울어진 사각형과 마찬가지로 속이 파인 원 모양의 경계면들을 다룬다. 각 사각형 경계면의 외부 폭은 0.8m 이고 내부 폭은 0.4m 이다. 원의 경우 사각형의 폭과 동일한 외부 및 내부 지름 값을 가진다. 각 경계면은 경사각을 가지고 각 축방향 속도 (2,1)의 값을 갖는 속도장에 놓여있다(Fig. 3 참조). 계산영역은 중심이 (0,0)에 있으며 $4 \times 4m^2$ 의 크기를 가진다. 본 검증 예는 격자수는 200x200이며 등간격을 갖는 정구 격자계를 사용하는 것으로 정해져 있다. 초기 경계면들의 중심은 (0.75, 0.75)에 놓여 있으며, 시뮬레이션 후 최종 좌표는 이론적으로 (3.25, 2.0)이어야 한다. 총 시뮬레이션 횟수는 500이며 이에 해당하는 Courant number는 0.25에 해당한다.

Fig. 4는 각 방법으로 계산된 경계면들의 최종 시간단계에서의 모습을 초기 형태와 비교하고 있다. 여기서 등고선 레벨(contour level)은 체적 비율 값 0.025, 0.5 그리고 0.975를 나타낸다. 보다 고차의 차분법을 이용하는 MHRIC법이 HRIC법보다 초기 모양을 더 잘 유지하고 있다. 또한 해의 번짐 현상 정도를 평가할 수 있는 초기 경계면의 두께 역시 HRIC법보다 비교적 잘 유지하고 있다. 반면 MRHIC보다 비교적 간단하고 낮은 차수의 차분법을 도입하고 있지만 RHRIC법의 해의 정도는 두 HRIC계열보다 나은 것을 볼 수 있다. 초기 모양은 물론 경계면의 두께 모두 잘 유지하고 있어 질량보존이 두 방법보다 양호하고 경계면 두께를 잘 유지하고 해의 번짐이 적은 것을 볼 수 있다.

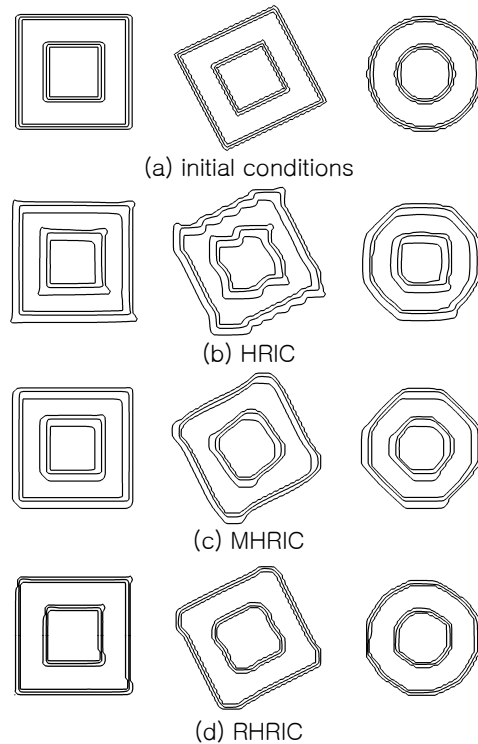


Fig. 4 Advection with an unidirectional velocity field. Contours of the volume fraction are plotted at $\alpha = 0.025, 0.5, \text{ and } 0.975$.

회전이동 문제

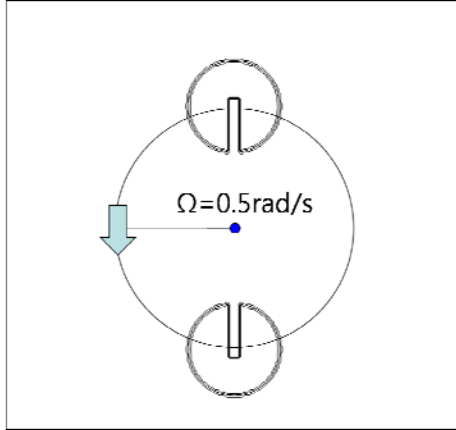


Fig. 5 Schematics of the advection of a slotted disk interface.

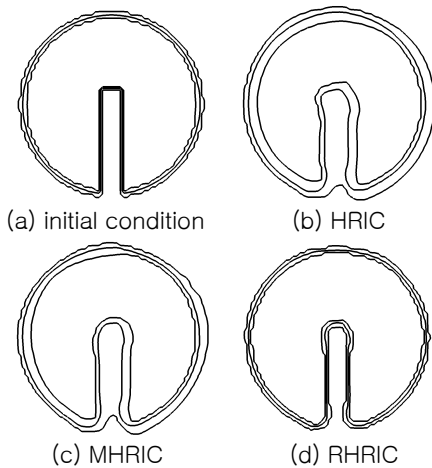


Fig. 6 Zalesak's test for solid body rotation of a slotted circle. Contours of the volume fraction are plotted at $\alpha = 0.025, 0.5, \text{ and } 0.975$.

본 검증 예(Zalesak 1979)는 앞선 예보다 복잡한 속도장에서 홀이 파인 원형의 경계면 (slotted disk shape)이 이동하는 문제이다. 계산영역과 수치 격자는 전 절의 병진이동 문제의 조건과 동일하다. 경계면의 지름은 $1.0m$ 이며 폭 $0.12m$, 깊이 $0.6m$ 의 잘려진 영역을 가진다. 초기 위치는 $(2.00, 2.75)$ 에 있으며, 속도장은 각속도 $0.5rad/s$ 이고 회전중심은 $(2.0, 2.0)$ 이다(Fig. 5 참조). 전체

계산 시간 횟수는 한 바퀴 회전하는 동안 2524 이며 이때 Courant number는 0.25에 해당한다.

Fig. 6의 결과를 살펴보면, 앞서 일정 경사각을 가지고 흐르는 유동장 속에 놓인 경계면들의 병진이동 문제의 결과와 같이, 본 방법이 두 HRIC 계열 VOF법보다 나은 결과를 보여주고 있다. 모서리가 되는 불연속 영역에서 부드럽게 다듬어지는 경향을 제외하고 전체적인 모양과 경계면의 두께(등고선 레벨 참조)가 비교적 타 방법들 보다 잘 유지하고 있다.

3.2 2 차원 댐붕괴 문제

댐붕괴 문제는 다양한 자유수면 모델링 기법들의 정도를 검증하기 위해 자주 인용되는 또 다른 검증 예이다. 대표적인 실험은 Martin and Moyce (1952)에 의해 수행되었으며 자유수면의 변화에 대해 예측된 결과를 제공하였다. 그러나, 이후 네델란드 MRAIN(Zhou et al. 1999)에서 수행된 댐붕괴 실험은 보다 긴 시간 동안 예측된 자유수면의 변화와 함께 탱크 표면에 작용하는 압력 변화를 예측한 결과를 제공하고 있다. 실제 이 실험은 슬로싱(sloshing) 및 그린워터(green water)현상을 이해하기 위한 기초적 연구의 일환으로 수행되었다. 실험에서 탱크의 크기는 $(3.22m, 1.0m, 2.0m)$ 이며 초기 탱크내 물기둥의 크기는 $(1.2m, 1.0m, 0.6m)$ 이다(Fig. 7 참조).

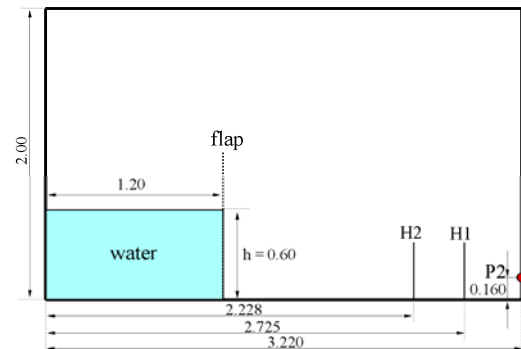


Fig. 7 A two-dimensional dam-break: problem definition and measurement points for water heights and pressure.

실험에서 탱크내 자유수면의 높이는 그림에서 볼 수 있듯이 탱크의 왼쪽 벽면으로부터 각각 2.725m, 2.228m 떨어진 위치에 있는 H1과 H2에서 측정되었다. 탱크내 압력의 변화는 탱크 바닥으로부터 0.16m 높이의 위치 P2에 직경 0.09m의 원형 단면의 압력 측정센서(circular pressure transducer)를 설치하여 측정하였다. 수치해석에서는 문제를 이상적으로 2차원 문제로 가정하고 해석하였다(Colagrossi and Landrini 2003, Nielsen 2003). 수치해석에서 자유수면의 높이는 실험에서와 같이 H1과 H2위치에서 최고점의 자유수면의 위치를 측정하고 각 지점에서 자유수면 아래에 공기가 찬 영역(air pocket)이 발생하였을 경우 그 지름을 뺀 값을 최종 자유수면의 높이로 결정하였다(Zhou et al. 1999, Colagrossi and Landrini 2003). 압력의 경우는 타 연구에서 논의되었듯이 압력센서의 아래쪽 끝 단에서 읽혀진 값을 실험결과와 비교하였다(Colagrossi and Landrini 2003, Nielsen 2003).

본 수치해석에서는 타 연구와는 달리 난류 유동을 고려하였다. 도입된 난류모형은 표준 $k-\epsilon$ 모델과 함께 벽함수(wall function)기법 그리고 난류유동 경계층을 충분히 해상할 수 있는 격자를 사용하였다. 격자는 336x112의 수를 가지고 탱크 벽면에서의 경계층을 잘 해상하기 위해 벽면에서 10cm 떨어진 영역 안에 벽에 법선방향으로 60개의 격자점을 더 추가하였다. 이러한 격자 집중은 탱크의 바닥과 오른쪽 벽면에 대해서만 하였다. 벽면에 근접된 첫 번째 격자점의 거리는 $8.0E-5m$ 이며 이를 무차원 거리 $y^+ (= u^{\tau} y / \nu)$ 로 환산했을 때 본 수치 해석 결과에서 최대 약 60의 값을 보여주었다. 여기서 $u^{\tau} (= \sqrt{\tau_w / \rho})$ 는 마찰속도(friction velocity), ν 는 동점도(kinematic viscosity) 그리고 τ_w 는 벽면 전단력(wall shear stress)을 나타낸다. 수치해석에서 Courant number는 0.25가 지켜지도록 매시간 계산 시간간격이 변하도록 하였다.

Fig. 8 (a), (b), (c) 와 (d)는 H1과 H2위치에서

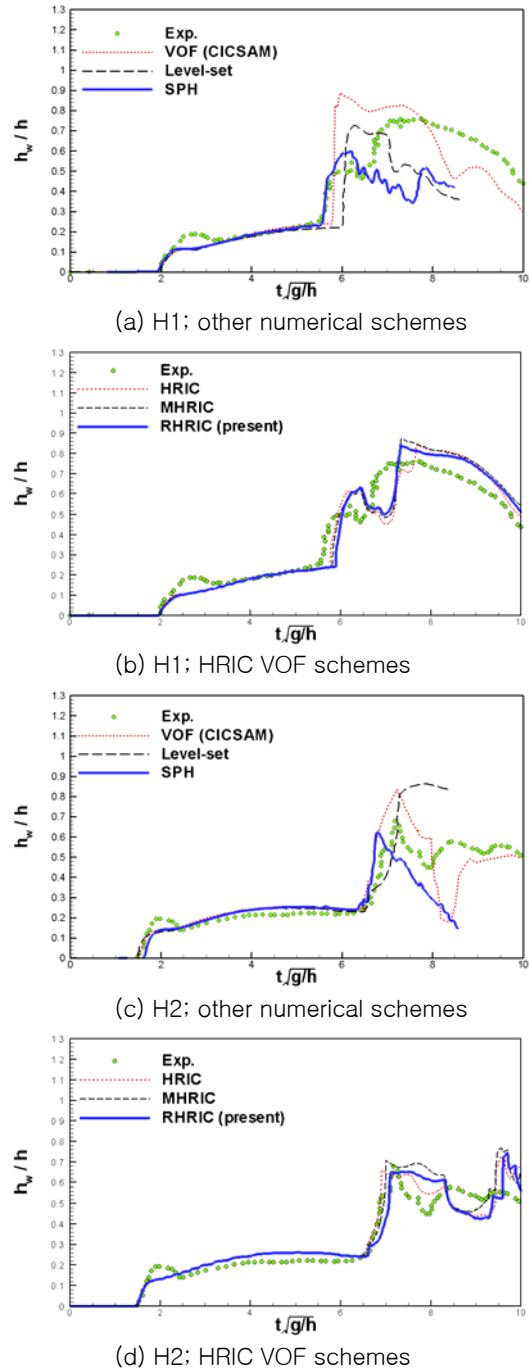


Fig. 8 Vertical water heights at two measurement points, H1 and H2.

세 VOF법으로 계산한 자유수면의 높이(h_w/h)와 타 연구자의 자유수면 해석기법: VOF(CICSAM, Nielsen 2003), Level-set(Colicchio et al. 2002) 그리고 SPH(Colagrossi and Landrini 2003),의 결과와 비교하고 있다. 무차원시간 $t\sqrt{g/h} \approx 6.0$ 까지 모든 수치기법들이 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 실험 결과에서 볼 수 있는 탱크내 물이 계측 센서에 도착했을 때 센서 표면을 타고 오른 듯한 초기 변화를 제외하고 모든 수치 해석 결과는 실험과 비교적 만족스러운 일치율을 보여주고 있다. 흘러 내린 물이 오른쪽 벽에 도달한 후 plunging breaking 현상이 발생하는 시간 근처인 $t\sqrt{g/h} \approx 6.0$ 이후부터는 실험은 물론 각 수치 해석 결과들 간에도 다소 차이를 보여주고 있다(a, c). 이는 plunging breaking 현상이 발생한 후 탱크내 실제 자유수면과 유동장의 변화는 작은 스케일의 유동현상과 난류특성을 포함하여 매우 복잡해지는데 이러한 현상을 수치적으로 그대로 재현하지 못한 것이 그 이유인 것으로 판단된다. 개별적으로는 각각 검증된 다양한 수치해석 기법들이 비교된 그림(a)와 (c)에서 볼 수 있듯이 이러한 문제에서는 자유수면의 해석 정도도 중요하지만 댐붕과 유동에 관련된 실제 물리적 현상인 초기조건, 벽면의 표면 거칠기 및 난류 등의 영향을 제대로 고려하는 것이 실험결과에 더 근접한 해를 제공하는 것으로 밝혀지고 있다(Colagrossi and Landrini 2003, Park et al. 2009). 이러한 의미에서 난류가 고려된 본 수치해석 결과가 타 연구자들의 결과보다 실험결과에 더 근접한 타당한 일치율을 보여주고 있다. 단순히 자유수면의 높이를 비교한 그림(b)와 (c)에서는 비교된 HRIC기법들 결과들 사이의 차이는 두드러지지 않는 것으로 보여지고 있다.

Fig. 9 (a)와 (b)는 탱크의 오른쪽 벽면 P2지점에서 계측된 압력 값을 다양한 수치해석 결과들과 비교하고 있다. 전체적으로 본 수치 해석은 첫 번째와 두 번째의 압력 정점 사이의 시간 동안 실험과 타 수치 해석법의 결과보다 다소 과도하게 예측하고 있다. 그러나 plunging breaking 현상이 발생하는 시간 근처인 $t\sqrt{g/h} \approx 6.0$ 이후부터는

앞서 자유수면 높이의 비교에서와 마찬가지로 실험은 물론 각 수치해석 결과들 간에 많이 다른 양상을 보여주고 있으며, 타 수치해석 결과의 경우 실험결과보다 과도하게 예측된 것을 볼 수 있다(a). 반면, 본 수치해석은 이 시점에서 실험결과에 근접한 타당한 일치율을 보여주고 있다(b). HRIC 해석법들이 보여주는 서로 간의 차이는 $6 < t\sqrt{g/h} < 8$ 시간 동안 MHRIC와 RHRIC가 HRIC보다 실험결과에 더 근접한 결과를 보여주고 있다.

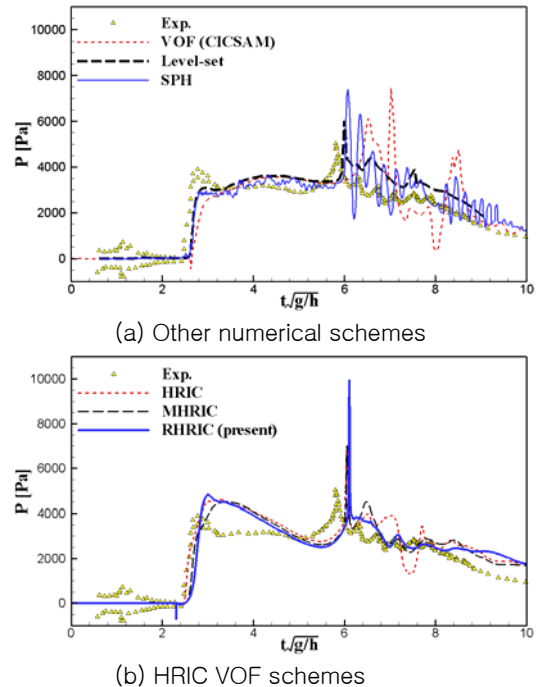


Fig. 9 Pressure time history at a measurement point, P2 on the right wall.

Fig. 10은 주어진 비슷한 시점에서 세 VOF법으로 계산된 자유수면의 모습을 보여주고 있다. 전체적으로 서로 비슷한 결과를 보여주고 있지만, RHRIC법이 다른 두 방법보다 적은 수치확산을 유발하기 때문에 자유수면의 두께가 더 얇고 작은 스케일의 유동을 좀 더 자세하게 묘사하고 있는 것을 볼 수 있다.

댐붕괴 후 발생하는 중요한 자유수면 유동의 시간변화 특성에 대한 물리적 설명은 RHRIC 수치해석 기법과 관련된 참고문헌 Park et al. (2009)이 이미 잘 제공하고 있어 참고 바란다.

4. 결론

본 논문에서는 HR차분법 기반의 개선된 HRIC VOF법인 RHRIC를 소개하고 현재 선박유체역학 분야에서 널리 사용되고 있는 기존 HRIC법과 MHRIC법과 비교하였다. 비교 검증을 위해 주어진 유동장에서 다양한 모양의 경계면이 병진이동하거나 회전이동 하는 예와 복잡한 자유수면 유동이 발생하는 댐붕괴 문제를 해석하였다. 경계면 이동 문제 해석결과에서는 RHRIC법이 MHRIC보다는 차수가 낮고 HRIC와 같은 정도의 HR차분법을 바탕으로 하고 있지만 기존 두 방법보다 수치확산 오차가 감소된 결과를 보여주었다.

복잡한 자유수면의 변화가 동반되는 댐붕괴 문제에서는 HRIC VOF법들의 결과와 함께 타 연구자들의 다양한 자유수면 해석기법들의 결과를 실험결과와 비교하였다. 개별적으로 모두 검증된 자유수면 해석기법들임에도 불구하고 각 수치해석 결과는 실험은 물론 각 수치해석 기법들 간에도 다소 차이를 보여 주었다. 이는 댐붕괴와 같은 복잡한 유동문제에서는 자유수면 움직임 자체에 대한 해석 정확도도 중요하지만 이와 연성된 내부유동의 변화에 영향을 미치는 유동의 초기조건, 벽면의 표면 거칠기, 난류 등의 영향을 제대로 고려해야 하는 것으로 설명될 수 있다. 실제 난류영향을 고려한 본 논문의 결과는 기존 타 수치해석 결과들보다 비교적 실험결과와 타당한 일치를 보여주었다. 그러나 향후 이 문제와 관련된 난류특성에 대해 보다 심도 깊은 연구가 필요하다고 판단된다. 단순한 자유수면의 높이 비교는 HRIC계열 VOF법들 간의 차이를 명확히 나타내는 것이 어려웠지만, 보다 고차의 차분 기법인 MHRIC와 함께 RHRIC는 압력비교에서 HRIC보다 나은 결과를 보여 주었다.

자유수면에 대한 해상도에 대해서는 RHRIC가 다른 두 HRIC기법들보다 수치확산이 훨씬 적은 결과를 보여 주었다.

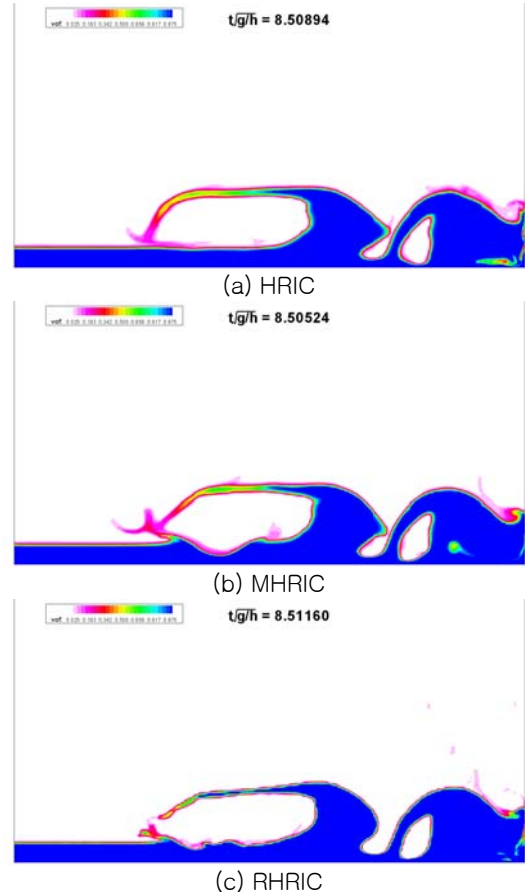


Fig. 10 Volume fractions of the three VOF methods computed at around a similar time instant.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업 과제(PNS131C)와 한국해양연구원 해양시스템 안전 연구소(MOERI/KORDI)의 기본연구과제(PES132A)의 지원으로 작성되었습니다.

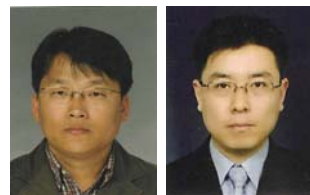
참 고 문 헌

- Colicchio G, Colagrossi A, Greco M, Landrini M., 2002, " Free-surface flow after a dam break: a comparative study," *Ship Technology Research*; **49**(3):95-204.
- Colagrossi, A. and Landrini, M., 2003, " Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics," *J. Comput. Phys.* 191, pp.448-475.
- Ferziger, J.H., and Perić, M., 1996, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer-Verlag, Berlin.
- Fluent, 2006, *Fluent 6.3 users guide*, fluent inc.
- Hirt, C.R., and Nichols, B.D., 1981, " Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," *J. Comput. Phys.* 39, pp.201-225.
- Hong, C.B., 2003, " Numerical Investigation of High-Speed Ship Wash in Restricted Waterway," Ph.D thesis, Hiroshima University, Japan.
- 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.
- Jeong, U.C., Yasuaki Doi, and Kasu-hiro Mori, 1998, " Numerical Investigations on Vortical Flows and Turbulence beneath the Free Surface around Bow," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 35, No. 1, pp.15-23.
- Kim, H.E., and Lee, Y.G., 2003, " A Basic Research of Air Bubble Locus around the Ship Hull," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 37, No. 4, pp.48-55.
- Kim, J.J. and Kim, H.T., 2001, " Computation of Turbulent Flow around a Ship Model with Free-Surface," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 38, No. 1, pp.1-8.
- Kim, W.J., Kim, D.H. and Van, S.H., 2000, " Development of Computational Methods for Viscous Flow around a commercial Ship Using Finite-Volume Methods," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 37, No. 4, pp.19-31.
- Kim, Y.J., Ha, Y.R., and Hong, S.Y., 2003, " Numerical Calculation of the free-Surface Flows around a Submerged Body," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 40, No. 2, pp.11-20.
- Lafaurie, B., Nardone, C., Scardovelli, R., Zaleski, S., and Zanetti, G., 1994, " Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with SURFER," *J. Comput. Phys.* 113, pp.134-147.
- Lee, D.Y. and Choi, H.S., 1998, " A Study on the Sloshing of Cargo Tanks Including Hydroelastic Effects," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 35, No. 4, pp.27-37.
- Leonard, B.P., 1991, " The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 88, pp.17-74.
- Martin, J.C., and Moyce, W.J., 1952, " An experimental study of the collapsed liquid columns on a rigid horizontal plate," *Phil. Trans. Roy. Soc. London A. Math., Phys. Eng. Sci.*, 244, pp.312-324.
- 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.
- Nielsen, K.B., 2003, " Numerical prediction of green water loads on ships," Ph.D thesis, Technical University of Denmark.

- Park, I.R., Kim, K.S., Kim, J. and Van, S.H., 2008, " Unsteady RANS Analysis of the Hydrodynamic Response for a Ship with Forward Speed in Regular Wave," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 1, pp.29-41.
- Park, I.R., Kim, K.S., Kim, J., and Van, S.H., 2009, " A volume-of-fluid method for incompressible free surface flows," Int. J. Numer. Meth. Fluids 61, pp.1331-1362.
- Park, I.R., Kim, W.J., Kim, J. and Van, S.H., 2005, " A Study on a VOF Method for the Improvement of Free Surface Capturing," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 2, pp.88-97.
- Rudman, M., 1998, " A volume tracking method for interfacial flows with large density variations," Int. J. Numer. Methods Fluids 28, pp.357-378.
- Shin, M.S. and Kang, K.J., 1996, " Numerical Simulation of Free-Surface Flows around a Series 60($C_B=0.6$) model ship," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 33, No. 2, pp.13-29.
- Shin, S.M., and Kim, D.H., 2004, " Internal Wave Computations based on a Discontinuity in Dynamic Pressure," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 4, pp.17-29.
- Son, G, 2003, " Efficient implementation of a coupled level-set and volume-of-fluid method for three-dimensional incompressible two-phase flows," Numer. Heat Transf. B 43, pp.549- 565.
- Stone, H.L., 1968, " Iterative Solution of Implicit Approximations of Multi-directional Partial Differential Equations," SIAM J. Numer. Anal., Vol. 5, pp. 530-558.
- Sussman M., Smith K.M., Hussaini M.Y., Ohta M., and Zhi-Wei R., 2007, " A sharp interface

method for incompressible two-phase flows," J. Comput. Phys. 221, pp. 469- 505.

- Ubbink, O. and Issay, R.I., 1999, " A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes," J. Comput. Phys. 153, pp. 26- 50.
- Van Leer, B., 1979, " Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, V:A Second-Order Sequel to Godunov' s Method," J. Comput. Phys., Vol. 32, pp. 101-136.
- Yum, D.J., and Yoon, B.S., 2008, " Numerical Simulation of Slamming Phenomena for 2-D Wedges," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 5, pp.477-486.
- Zalesak, S.T., 1979, " Fully multi-dimensional flux corrected transport algorithms for fluids," J. Comput. Phys. 31, pp.335- 362.
- Zhou, Z.Q., De Kat, J.O., and Buchner, B., 1999, " A nonlinear 3-D approach to simulate green water dynamics on deck," in: Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Nantes, FRANCE. pp. 5.1- 1,15.



< 박 일 흥 > < 김 광 수 >



< 김 진 > < 반 석 호 >