

오픈 소스 라이브러리를 이용한 수치구조 구현 및 적용

박선호^{*†} · 이신형^{**}

* 한국해양대학교 해양공학과, ** 서울대학교 조선해양공학과

Development of Numerical Tank Using Open Source Libraries and Its Application

Sunho Park^{*†} · Shin Hyung Rhee^{**}

* Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

요 약 : 본 논문에서는 소스 코드가 공개된 라이브러리를 이용하여 선박의 성능을 예측할 수 있는 해석 코드를 개발하였다. 질량보존 방정식, 모멘텀 보존방정식, 난류를 고려하기 위해 난류모델과 벽함수를 고려하였다. 자유수면 계산을 위해 볼륨비 수송방정식을 고려하였고, 자유수면의 정확도 높은 계산을 위해 고차 도식을 포함하는 라이브러리를 개발하였다. 개발한 프로그램을 컨테이너선인 KCS에 적용한 결과 실험에서 포착된 자유수면 분포를 잘 예측하였다. 자항성능 평가 시 추진기 회전을 위해 GGI 라이브러리를 사용하였다. 계산결과 실험과 비교해 약 7% 정도의 정확도로 자항성능을 예측하였다. 캐비테이션 예측을 위해 이상 균질 모델을 포함하는 새로운 라이브러리를 개발하였다. 이상 균질 모델을 추진기에 적용한 결과 일반적으로 발생하는 얇은 층 캐비테이션을 잘 예측하는 것을 확인하였다. 오픈 소스 라이브러리를 이용하여 개발한 수치구조를 KCS에 적용한 결과 오픈 소스 라이브러리에 대한 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 선박 성능, 오픈 소스 라이브러리, 전산유체역학, 추진기 성능, 수치구조

Abstract : In this paper, ship performance prediction solver was developed using open source computational fluid dynamics (CFD) libraries. The mass- and momentum-conservation equations and turbulent model with a wall function for the turbulent closer were considered. The volume fraction transport equation with a high-resolution interface capturing scheme were selected for free-surface simulation. The predicted wave pattern around KRISO container ship (KCS) using developed program showed good agreement against existing experimental data. For the revolution of a propeller in the propulsive test, general grid interface (GGI) library was used. The predicted propulsive performance showed 7% difference against experimental data. Two-phase mixture model was developed to simulate a cavitation and applied to a propeller. The sheet cavitation on the propeller was predicted well. From results, the potential of the numerical tank developed by open source libraries was verified by applying it to KCS.

Key Words : Computational fluid dynamics (CFD), Open source library, Propeller performance, Ship performance, Numerical tank

1. 서 론

전산유체역학의 발달과 함께 실험에 의존하던 많은 부분들이 전산유체역학을 이용한 연구로 대체되고 있다. 선박의 성능평가를 위해 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 개발한 WAVIS와 범용 전산유체역학 소프트웨어인 STAR CCM+, Fluent, CFX 등이 사용되고 있다. 이러한 소프트웨어는 선박의 성능 평가에 있어서 편리하고 정확도 높은 결과를 도출하고 있어 산업체, 연구소, 대학에서 많이 활용하고

있다. 그러나 이와 같은 소프트웨어는 구입 및 유지보수 비용에 대한 비용이 매년 발생하여 구입 및 유지보수 비용에 대한 부담이 없는 소스 공개 코드(open source code)에 대한 관심이 차츰 증대되고 있다. 소스 공개 코드 중에서도 최근에 소스코드를 공개한 OpenFOAM에 대한 관심이 증대되고 있다. OpenFOAM은 비압축성 유동, 압축성 유동, 다상 유동, 난류, 연소, 열전달, 전자기, 고체역학 등을 포함하는 연속체역학과 관련된 다양한 라이브러리의 소스를 제공하고 있다(Jasak, 2009). 일반 공중 사용 허가서(GNU general public license, GNU GPL)를 사용하고 있기 때문에 누구나 무료로 다운로드 받아 사용할 수 있다.

† Corresponding Author : spark@kmou.ac.kr, 051-410-4329

오픈 소스코드를 이용한 조선 해양 산업에의 연구도 많이 진행되고 있다. Kissling et al.(2010)은 Volume of fluid (VOF) 방법과 Level-set 방법을 이용한 자유수면 포착 방법에 대해 개발하였다. Park and Rhee(2012)는 incompressible flow와 isothermal compressible flow 기반의 캐비테이션 계산 방법을 제안하였고 이를 초공동 캐비테이터에 적용하였다. Lee et al.(2014)는 고속선의 활주자세를 예측할 수 있는 자유수면 포착방법에 대해 연구하였다.

본 논문에서는 소스가 공개된 전산유체역학(CFD) 코드인 OpenFOAM을 기반(platform solver)으로 이용하여 선박의 저항, 추진기 단독성능, 자항, 캐비테이션 성능 추정용 CFD code를 개발하고 이를 선박에 적용하여 소스 공개 코드의 가능성을 평가하는 것을 목표로 한다.

2. 계산방법

2.1 지배방정식

속도와 압력을 계산하기 위해 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식을 고려하였고, 난류를 고려하기 위해 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 시간 평균하였고, 난류 모델을 고려하였다.

질량보존 방정식과 운동량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_m \vec{v}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, \vec{v} 는 속도벡터를 나타낸다. $\vec{\tau}$ 는 응력 텐서를 나타내고 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v}_m I \right] \quad (3)$$

여기서, I 는 단위 텐서를 나타낸다. 아래첨자 m 은 혼합류를 의미하고 혼합류에서의 밀도와 점성계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + \alpha_l \rho_l \quad (4)$$

$$\mu_m = \alpha_v \mu_v + \alpha_l \mu_l \quad (5)$$

여기서, α 는 체적분율을 나타내고, 아래첨자, l 과 v 는 액상과 기상을 의미한다.

운동량 보존 방정식을 시간평균하면 다음과 같이 Reynolds 응력항이 나타난다.

$$-\rho_m \overline{v_m v_m} = \mu_t \left[\left(\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \nabla \cdot \vec{v}_m) I \right] \quad (6)$$

여기서, μ_t 는 난류점성계수를 나타낸다. μ_t 는 Boussinesq 가설에 기반을 둔 $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용하여 계산하였다(Shih et al., 1995). Park and Yoon(2014)는 선박계산에서 realizable $k-\epsilon$ 난류모델이 좋은 결과를 내는 것을 보여 본 논문에서 선정하였다. 난류 운동 에너지(k)와 난류 소산율(ϵ)은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m k \vec{v}_m) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] \\ &+ G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \epsilon \vec{v}_m) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_k} \right) \nabla \epsilon \right] \\ &+ \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \rho \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (8) \end{aligned}$$

여기서

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{Sk/\epsilon}{Sk/\epsilon + 5} \right] \quad (9)$$

$$S = \sqrt{2 \left(\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T \right)} \quad (10)$$

여기서 G_k 는 속도의 구배로 인한 난류 운동에너지 생성항을 나타내고 G_b 는 부력에 의한 난류 운동에너지 생성항을 나타낸다. C_b , C_{1b} , C_2 , σ_k , σ_ϵ 는 0.09, 1.44, 1.9, 1.0, 1.2를 사용하였다. μ_t 는 $\rho_m C_\mu k^2/\epsilon$ 로 계산되며, 벽면에는 벽함수를 적용하였다(Park et al., 2012).

아래와 같은 볼륨비 이송 방정식을 고려하여 자유수면을 계산하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_m) + \nabla \cdot (\alpha \rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (11)$$

캐비테이션에 의한 상변화를 고려하기 위해 이상 균질 모델을 고려하였다. 이상 균질 모델로는 액체, 기체, 응축기체로 상을 정의한 Singhal et al.(2002) 모델을 고려하였으며, 각각의 이송방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_m) + \nabla \cdot (\alpha \rho_m \vec{v}_m) = & \quad (12) \\ - C_{cond} \frac{v_{ch}}{\gamma} \rho_v \rho_l \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P - P_v}{\rho_l}} \alpha & \\ + C_{evap} \frac{v_{ch}}{\gamma} \rho_v \rho_l \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P - P_v}{\rho_l}} (1 - \alpha) & \end{aligned}$$

여기서 P_v 는 증기압을 나타낸다. 캐비테이션의 소멸과 생성에 관계되는 계수 C_{cond} , C_{evap} 는 0.01, 0.01을 사용하였다.

2.2 경계 조건

Fig. 1은 사용된 경계조건을 나타낸다. 입구조건에는 Dirichlet 조건으로 설정하였고, 출구는 Neumann 조건으로 설정하였다. Far-field에는 대칭 조건을 주었고, 위쪽 경계조건에는 Neumann 조건으로 설정하였다(Park, 2014).

전체 도메인은 자유수면 아래와 위 두 개의 파트로 구성되어 있다. 자유수면 아래는 이 분원 실린더 형태로 되어 있고, 자유수면 위 부분은 직사각형의 형태로 구성되어 있다.

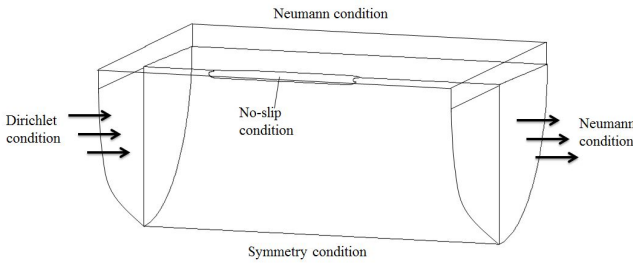


Fig. 1. Boundary conditions.

2.3 수치 모델링

질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식, 볼륨비 이송 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 PISO 알고리즘을 선택하였다(Issa, 1985). 대류항은 van Leer 도식(van Leer, 1979)으로 차분하였고, 확산항은 2차 중심 차분을 사용하였다. 볼륨비는 하류차분과 중심차분을 혼합한 이산화 방법을 사용하여 계산하였다. 혼합류에 대해서는 상태방정식으로부터 밀도와 점성의 변화를 계산하였다. 계산의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid (AMG) 방법을 사용하였고, Gauss-Seidel 반복 계산법을 이용하였다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 저항성능

계산에 사용된 모형선은 형상 및 실험결과가 공개된 Kriso

Container Ship (KCS)에 대해 진행하였다(Kim et al., 2001). 저항성능, 추진기 단독성능, 저항성능 해석결과는 Kim et al. (2001)의 실험결과와 비교하였다. KCS의 주요제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Principal particulars of KCS

Designation	Prototype	Model
Scale ratio	1	1/31.6
Speed (m/s)	12.3467	2.1964
Froude number (Fr)	0.26	0.26
Reynolds number (Re)	2.4×10^9	1.4×10^7
Length (m)	230.0	7.2786
Breadth (m)	32.2	1.0190
Depth (m)	19.0	0.6013
Draft (m)	10.8	0.3418
Wetted surface area (m)	9,498.0	9.5121
Displacement (m)	52,030.0	1.6490
Block coefficient (C_B)	0.6505	0.6505

저항성능에 대해 계산을 진행하였다. 계산영역은 선수, 선미, 폭, 깊이 방향으로 각각 1L, 3L, 1.5L, 1.5L의 크기로 설정하였다. 여기서 L은 모형선의 수선간 길이를 나타낸다. 저항성능에서는 선체의 반만 고려하여 계산을 진행하였다. Fig. 2는 선미 표면과 공간에서의 격자를 보여주고 있다. 격자는 Gridgen을 이용하여 생성하였다. 가능한 자유수면과 평행하도록 생성하였으며, 총 150만개의 정렬 격자를 사용하였다. 계산에 상용된 선체 표면의 격자는 $y^+ \approx 80$ 정도이다.

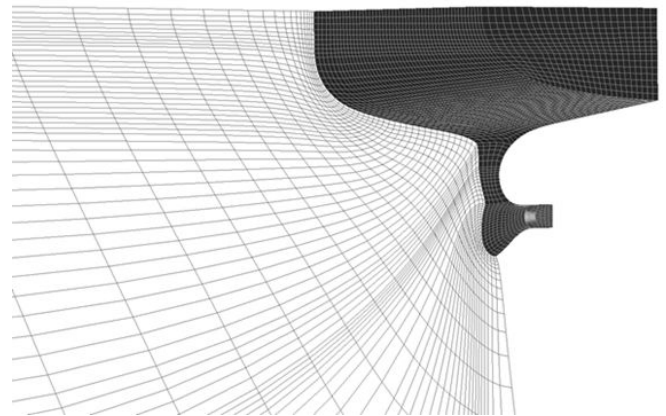


Fig. 2. Mesh around stern.

자유수면을 포착하기 위하여 하류와 상류 차분을 이용하는 고차의 도식인 Interface compression(Rusche, 2002), SuperBee

(Roe, 1985), vanLeer(van Leer, 1979), modified HRIC(Muzaferija, 1998), modified CICSAM(Waclawczyk and Koronowicz, 2008)을 사용하여 계산하였다. Fig. 3은 선체 표면에서의 수선간 길이로 무차원화된 자유수면 높이를 나타낸다. 자유수면은 볼륨비가 0.5인 값을 나타낸다. 도식마다 자유수면 높이의 차이는 보이나 전체적으로 거의 유사한 성능을 보이는 것을 볼 수 있다. 트랩섬 주위의 격자 형상이 Fig. 2와 같이 공간상에서 휘어져 있어서 선미쪽에서 계산결과가 실험과 다소 차이 나는 것을 확인할 수 있다.

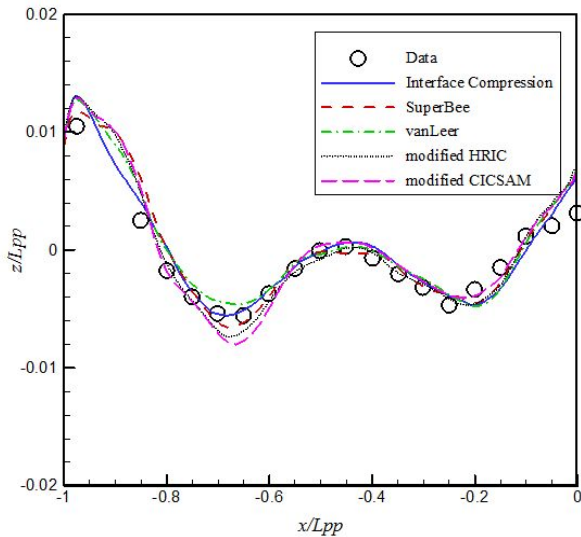


Fig. 3. Hull wave profile.

Fig. 4는 Interface compression 도식을 이용하여 계산한 결과로 선체 주위의 자유수면 분포를 나타낸다. 위의 그림은 실험결과를 나타내고 아래 그림은 계산결과를 나타낸다. 전체적으로는 유사하나 폭방향으로 멀어질수록 실험과 다소 차이를 나타내는데 이것은 폭방향으로 멀어질수록 Fig. 2와 같이 격자가 작아지기 때문으로 판단된다. 개발한 코드가 선박의 저항성능을 예측하는데 어느 정도 신뢰도를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

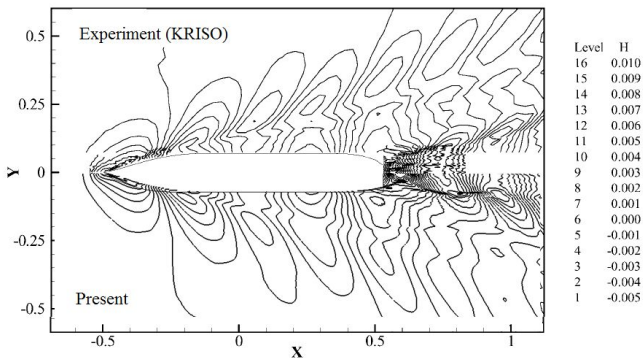


Fig. 4. Wave pattern around KCS.

3.2 추진기 단독성능

추진기 단독성능에 대한 계산을 수행하였다. 단독성능이기 때문에 추진기를 회전시키지 않고 물을 회전시켰다. 물의 회전은 모멘텀 보존 방정식에 소스항에 코리올리의 힘 (Coriolis force)과 원심력을 포함하여 고려하였다.

단독성능 계산은 추진기의 회전수를 고정시키고 전진속도를 변화하면서 계산하였다. Fig. 5는 추력 및 토크 계수에 대해 계산결과와 실험결과를 비교한 그래프이다. 추력 계수의 경우는 실험과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 토크 계수는 실험보다 약간 크게 계산된 것을 확인할 수 있다. 차이가 가장 크게 계산된 경우도 그 차이가 5% 이하로 격자 및 계산조건을 최적화하면 좀 더 정확도 높은 계산이 이루어질 것으로 판단된다.

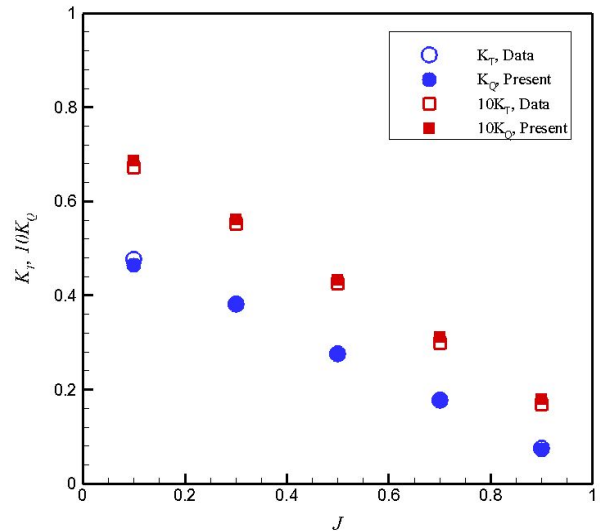


Fig. 5. K_T and $10K_O$ of open water test.

3.3 저항성능

저항성능에 대해 계산을 진행하였다. 추진기의 회전은 오픈 소스 라이브러리에서 제공하는 general grid interface (GGI) 기법을 이용하여 고려하였다. 계산영역의 크기는 저항성능 계산 시와 동일하게 설정하였다. 격자는 Fig. 6과 같이 추진기를 포함하는 작은 실린더는 비정렬 격자로 구성하였고, 그 바깥쪽 영역은 정렬 격자로 구성하였다. 40만 개의 비정렬 격자와 200만개의 정렬 격자를 사용하여, 총 240만개의 격자로 격자계를 구성하였다.

최종적으로 n_b 는 0.8로 계산되었다. 이는 실험값보다 약 7% 큰 값을 나타낸다. 비록 실험과는 차이를 나타내나, 격자, 도식, 경계조건에 대한 최적화가 이루어지면 좀 더 정확하게 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 정확한 예측보다는 자유수면 및 추진기의 회전을 고려할

수 있는 수치수조를 구현하는데 목적이 있었고, KCS의 저항값이 자유수면과 추진기의 회전을 고려하여 계산된 것으로 수치수조가 잘 구현되었다고 판단한다.

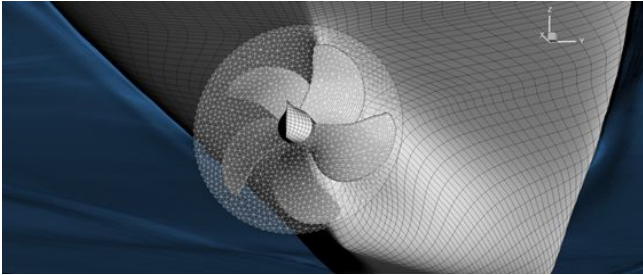


Fig. 6. Mesh around propeller.

3.4 캐비테이션 성능

추진기의 캐비테이션 성능을 판단하기 위해 이상 균질 모델을 포함한 계산을 진행하였다. Fig. 7은 추진기 표면에서의 압력계수 분포와 캐비테이션을 보여준다. 캐비테이션은 볼륨비값 0.5을 나타낸다. KP505의 캐비테이션에 대해 공개된 데이터는 없으나 일반적인 추진기에서 발생하는 캐비테이션 분포와 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 수치수조의 개발 목적에 맞게 잘 구현되었다고 판단된다.

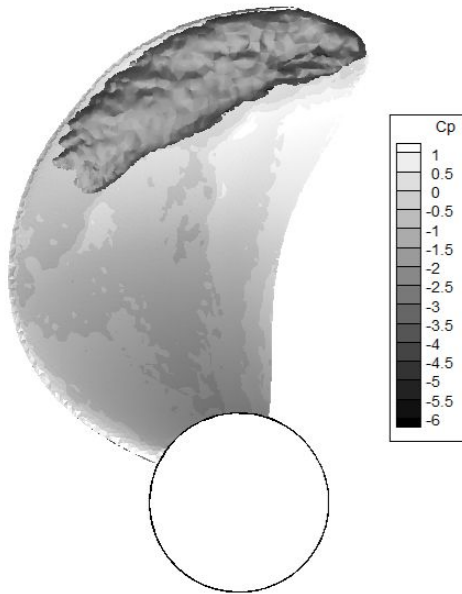


Fig. 7. Cavitation and pressure contours on suction side of propeller blade.

4. 결론

소스코드가 공개된 라이브러리를 이용하여 선박의 저항 성능, 추진기 단독성능, 저항성능, 추진기 캐비테이션 성능을 예측할 수 있는 수치수조를 구현하였다. 선박의 저항성능을 예측하기 위해 자유수면을 계산할 수 있는 라이브러리를 개발하였다. 또한, 저항성능 계산을 위해 GGI 라이브러리를 활용하였으며, 추진기 캐비테이션 계산을 위해 이상 균질 모델을 포함하는 라이브러리를 개발하였다.

개발한 수치수조를 실험 자료가 공개된 KCS에 적용한 결과 실험결과와 잘 맞는 부분도 있고 조금 차이나는 부분도 있음을 확인하였다. 계산을 위한 기능상의 구현은 모두 재현되었기 때문에 격자 및 경계조건 등을 최적화 하면 실험결과와의 차이는 줄어들 것으로 기대된다.

본 논문을 통해 오픈 소스 라이브러리를 활용한 선박 성능 추정방법에 대해 가능성을 확인하였다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2013학년도 한국해양대학교 “신진교수정착연구비”의 지원과 한국해양대학교 산학협력 선도대학(LINC) 사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Jasak, H.(2009), Open FOAM: open source CFD in research and industry, International Journal of Naval Architecture Ocean Engineering. Vol. 1, pp. 89-94.
- [2] Kissling, K., S. Schutz and M. Piesche(2010), Numerical Investigation of the deformation and break-up mechanism droplets in a high-pressure emulsification orifice with a coupled volume-of-fluid/level-set method, 5th OpenFOAM Workshop, Gothenburg, Sweden, June 21-24.
- [3] Park, S. and S. H. Rhee(2012), Incompressible and compressible flows with cavitation, 7th OpenFOAM workshop, Darmstadt, German, June 25-28.
- [4] Lee, H., S. Park and S. H. Rhee(2014), Dynamic interface compression method for high speed surface craft, 9th OpenFOAM workshop, Zagreb, Croatia, June 23-26.
- [5] Shih, T. H., W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang and J. Zhu (1995), A new k-ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - model development and validation, Computers & Fluids, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238.

- [6] Park, D. W. and H. S. Yoon(2014), Effect of grid, turbulence modelling and discretization on the solution of CFD, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 20, No. 4, pp. 419-425.
- [7] Park, S., S. W. Park, S. H. Rhee, S. B. Lee, J. E. Choi, and S. H. Kang(2012), CFD code development for the prediction of the ship resistance using open source libraries, *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 21-27.
- [8] Park, D. W.(2014), Effects of opening condition of the fore body on the resistance and self-propulsion performance of a ship, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 20, No. 1, pp. 78-85.
- [9] Issa, R. I.(1985), Solution of Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator Splitting, *Journal of Computational Physics*, Vol. 62, pp. 40-65.
- [10] van Leer, B.(1979), Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, *Journal of computational Physics*, Vol. 32, No. 1, pp. 101-136.
- [11] Kim, W. J., S. H. Van and D. H. Kim(2001), Measurement of flowd around modern commercial ship models, Vol. 31, pp. 567-578.
- [12] Rusche, H.(2002), Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions, Ph.D Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- [13] Roe, P. L.(1985), Some contributions to the modelling of discontinuous flows, 15th Summer Seminar on Applied Mathematics, La Jolla, CA, June 27 - July 8.
- [14] Muzaferija, S., M. Peric, P. Sames and T. Schelin(1998), A two-fluid Navier-Stokes solvers to simulate water entry, 22th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington D.C.
- [15] Waclawczyk, T. and T. Koronowicz(2008), Remarks on prediction of wave drag using VOF method with interface capturing approach, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 8, pp. 5-14.

Received : 2014. 09. 25.

Revised : 2014. 12. 08.

Accepted : 2014. 12. 26.