소스공개 라이브러리를 활용한 선박 저항계산 CFD 코드 개발

박 선 호,¹ 박 세 완,¹ 이 신 형,^{*2} 이 상 봉,³ 최 정 은,³ 강 선 형³

¹서울대학교 조선해양공학과

²서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소

³현대중공업 선박해양연구소

CFD CODE DEVELOPMENT FOR THE PREDICTION OF THE SHIP RESISTANCE USING OPEN SOURCE LIBRARIES

Sunho Park,¹ Se Wan Park,¹ Shin Hyung Rhee,^{*2} Sang Bong Lee,³ Jung-Eun Choi³ and Seon Hyung Kang³

¹Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul Nat'l University

²Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul Nat'l University

³Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., LTD.

Reynolds-averaged Navier-Stokes equations solver based on a pressure-based cell-centered finite volume method was developed using OpenFOAM libraries, which was an open source and providing computational continuum mechanics libraries. For the reasonable development of the turbulent boundary layer on the bow of the ship, specified library was developed. Grid sensitivities, such as skewness and aspect ratio of a cell, were tested for the solution convergence. Pressure, turbulent kinetic energy, turbulent dissipation rate contours on the ship surface computed by the developed CFD code were compared with those computed by the commercial CFD code, Fluent.

Key Words : 소스공개(Open Source), 선박 저항(Ship Resistance), 전산유체역학(CFD)

1. 서 론

전산유체역학의 발달로 선박의 선형개발 시 실험에 의존하던 부분들이 점차 줄어들고 많은 부분이 전산유체역학을 이용한 연구로 대체되고 있다. 선박의 성능 평가를 위한 상용 전산유체역학 소프트웨어로는 한국의 해양연구원에서 개발한 WAVIS[1,2], 스웨덴 FLOWTECH에서 개발한 SHIPFLOW, 범용 소프트웨어인 FLUENT[3-8], STAR-CCM+, CFX 등이 사용되고 있다. WAVIS와 SHIPFLOW는 선박의 성능 평가에 있어서는 편리하고 우수한 결과를 제공하나 선박의 형상 및 수치 방법이 한정되어 있는 단점이 있다. 이에 반해 FLUENT, STAR-CCM+, CFX는 형상 및 기능에 대한 제한은 없으나 선

박 전용 소프트웨어에 비해 사용이 어렵고 계산 시 시간이 많이 요구되는 단점이 있다. 이와 같은 상용 소프트웨어는 구입 및 유지보수에 많은 비용이 들어간다. 특히, 계산량이 늘어남에 따라 병렬 계산에 필요한 병렬 처리 라이선스를 별도로 구매해야 하기 때문에 비용측면에서 많은 부담이 되고 있다. 이로 인해 무료 전산유체역학 프로그램에 대한 관심이 증대되고 있고, 이 중에서도 최근 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[9]. 일반 공중 사용 허가서(GNU general public license, GNU GPL)를 사용하고 있기 때문에 누구나 무료로 다운로드 받아 사용할 수 있다.

이미 외국의 산업체, 연구소, 대학에서는 소스공개 라이브러리를 다양하게 사용하고 있으며, 매년 개최되는 국제 OpenFOAM 워크샵에서는 약 100여 편의 논문이 발표되는 등 많은 분야에서 사용하고 있다. 이에 반해 국내에서는 소스공개 라이브러리를 많이 사용하고 있지 않는 실정이다. 소스공개 라

Received: November 27, 2011, Revised: June 13, 2012,

Accepted: June 14, 2012.

* Corresponding author, E-mail: shr@snu.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.2.021

© KSCFE 2012

Fig.1 Body plan of KCS

이브러리를 이용한 국내의 논문으로는 박준권 등[10]이 레벨셋 기법으로 전기습윤 현상을 해석하였고, 김종태와 송진호[11]는 용융물 풀에 대한 자연대류 현상을 해석하였다. 박선호와 이신형[12, 13]은 썬기형상에서 발생하는 초공동 유동과 비틀어진 날개에서 발생하는 구름형 공동 유동을 해석하였다.

조선 산업에서는 소스공개 라이브러리와 관련된 해석 사례가 최근까지도 보고되지 않고 있는 반면에 상용 전산유체역학 소프트웨어에 대한 의존도는 계속해서 심화되고 있다. 이에 본 논문에서는 해양연구원에서 선형과 실험자료를 공개한 컨테이너선인 KCS의 저항성능 추정을 위하여 소스공개 라이브러리를 기반으로한 선박저항성능 계산 전용 CFD 코드를 개발하였다. 개발된 CFD 코드의 검증은 많은 선박 계산관련 논문[3-8]에서 정도를 검증한 상용 소프트웨어인 FLUENT의 결과와 비교하면서 진행하였다.

2. 대상선박

한국해양연구원에서 개발하여 공개한 컨테이너선(KCS)을 대상선박으로 선정하였다[14]. KCS는 선형 및 실험결과가 공개되어 있어 검증자료로 많이 활용되며, 단면형상 및 주요제원은 각각 Fig. 1 및 Table 1과 같다. Froude 수 0.26, Reynolds 수 1.4×10^7 에서 계산이 진행되었다.

Table 1 Principal particulars of KCS

Speed (m/s)	12.3467
Length (m)	230.0
Breadth (m)	32.2
Depth (m)	19.0
Draft (m)	10.8
Wetted surface area (m ²)	9,498.0
Displacement (m ³)	52,030.0
Block coefficient (CB)	0.6505

3. 계산 방법

3.1 지배방정식

속도와 압력을 계산하기 위해 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식을 고려하였고, 난류를 고려하기 위해 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 시간 평균하였고, 난류모델을 고려하였다. 지배방정식은 박선호와 이신형[12, 13]에 상세히 기술되어 있다. 난류 모델로는 Shih et al.[15]이 제안한 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

3.2 수치 방법

질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식을 비압축성 기반 정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 SIMPLE 알고리즘을 선택하였다. 대류항은 van Leer 도식[16]으로 차분으로 차분하였고, 확산항은 2차 중심차분을 사용하였다. 계산 매트릭스의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid (AMG) 방법을 사용하였고, 계산 매트릭스는 Gauss-Seidel 반복 계산법을 이용하였다.

4. 해석 결과 및 토의

소스공개 라이브러리를 이용하여 Weller et al. [17]와 같이 CFD 코드(SNUFOAM_v01)를 작성하였다. KCS에 대하여 SNUFOAM_v01과 FLUENT를 이용하여 수치 해석하였고, 두 결과를 비교하여 소스공개 라이브러리의 정도를 검증하였다. 선박은 좌·우현이 대칭이기 때문에 선박의 절반만 모델링하여 계산하였으며, 계산영역의 크기는 선수/선미 방향으로 각각 1L/3L, 폭/바다 방향으로 각각 1L/1L의 크기로 선정하였다. 입구 경계면에는 속도를 Dirichlet 조건으로 설정하였고, 출구 경계면에는 압력을 Dirichlet 조건으로 설정하였다. 배의 표면에는 no-slip 조건을 설정하였고, 대칭면과 바깥면은 대칭경계조건을 설정하였다. 자유수면은 slip 조건을 적용하였다. 격자계는 총 40만개의 육면체 격자로 구성하였다.

SNUFOAM_v01과 FLUENT를 이용하여 KCS에 대해 계산하였다. Fig. 2는 선수에서의 압력, 난류운동에너지(turbulent kinetic energy, k), 난류 소산율(turbulent dissipation rate) 분포를 보여준다. 압력은 거의 동일하나 난류 운동에너지와 소산율은 SNUFOAM_v01과 FLUENT의 계산결과가 많이 다른 것을 알 수 있다. 또한, SNUFOAM_v01을 이용한 계산에서는 Fig. 3과 같이 각 변수들의 residual 값이 작아지지 않는 것을 확인할 수 있다. FLUENT의 결과가 맞다고 단정하기는 어려우나 선박계산에서 이미 정도를 입증하였고 FLUENT를 대체하는 코드를 개발하는 목적이 있기 때문에 FLUENT의 결과가 맞다는 가

Fig. 2 Comparison of SNUFOAM_v01(left) and FLUENT(right) around the bow

Fig. 3 Residual history of SNUFOAM_v01

정 하에 연구를 진행하였다.

Residual이 수렴하지 않는 원인을 찾기 위해 residual이 급격히 증가할 때의 계산결과를 검토하였다. Fig. 4와 같이 격자의

Fig. 4 Computation error at high aspect ratio cells

세장비(aspect ratio)가 큰 입·출구와 바깥 영역에서 변수가 수렴하지 않고 잘못된 값으로 계산되는 것을 알 수 있다. 세장비가 큰 격자에서 변수를 잘못 계산하고 이로 인해 다른 격자에도 영향을 미친 것으로 추정된다.

세장비가 큰 격자(최대 세장비: 750)에서의 계산 오류를 수정하기 위해 Fig. 5와 같이 세장비가 작아지도록 격자(최대 세장비: 160)를 구성하였다. 세장비가 작은 격자는 상대적으로 skewness가 좋지 않게 구성되었다. 세장비가 작은 격자를 사용한 계산에서는 Fig. 6과 같이 residual이 수렴하는 결과를 얻었다. 세장비의 향상으로 Fig. 3과 같이 수렴하지 않은 계산이 Fig. 6과 같이 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 소스 공개 라이브러리는 skewness보다는 세장비에 더 민감한 것을

(a) high aspect ratio with low skewness mesh
(maximum aspect ratio: 750)

(b) low aspect ratio with high skewness mesh
(maximum aspect ratio: 160)

Fig. 5 Meshes on symmetry plane

Fig. 6 Residual history with low aspect ratio mesh

(a) pressure

(b) turbulent kinetic energy

(c) turbulent dissipation rate

Fig. 7 Comparison of SNUFOAM_v01(left) and FLUENT
(right) around the bow using low aspect ratio mesh

알 수 있었다.

상대적으로 작은 세장비로 이루어진 격자에 대해 SNUFOAM_v01과 FLUENT를 이용하여 계산하였다. Fig. 7은 선수에서의 압력, 난류 운동에너지, 난류 소산율 분포를 보여준다. SNUFOAM_v01의 결과를 FLUENT의 결과와 비교해 보면 압력은 거의 동일하게 계산된 반면 난류 에너지와 소산율 분포는 차이가 있는 것을 알 수 있다. SNUFOAM_v01에서는 선수부분에서 난류 에너지와 소산율이 거의 0에 가까운 값을 나타내었다. FLUENT의 계산결과에서는 난류가 선수에서부터 빠르게 발달한 반면 SNUFOAM_v01에서는 난류가 발달하기까지 좀 더 긴 거리를 필요로 하는 것으로 추측된다.

소스공개 라이브러리에 포함되어 있는 난류에너지 방정식 중에서 난류에너지 생성항(Production of turbulent kinetic energy)은 식 (2)와 같다[18].

$$G_k = \tau_w \frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\kappa y} \quad (2)$$

Fig. 8 Comparison of SNUFOAM_v02(left) and FLUENT(right) around the bow

여기서, τ_w 는 벽면에서의 전단응력, κ 는 표면의 거칠기, y 는 벽면에서 격자 중심까지의 거리를 나타낸다. C_μ 는 0.09를 사용하였다. 위 식은 log layer에서 난류의 생성과 소멸이 균형을 이룬다고 가정(equilibrium state)으로부터 유도되었다.

FLUENT와 동일한 결과를 얻기 위하여 Craft et al. [18]에서 사용한 난류 에너지 생성항을 사용하였다. 새롭게 추가되는 난류 에너지 생성항은 다음과 같이 표현된다[19].

$$G_k = \tau_w \frac{\tau_w / \rho}{\kappa y C_\mu^{1/4} k^{1/2}} \quad (3)$$

난류 에너지 생성항을 식 (3)으로 변경하여 특성화된 라이브러리를 개발하였다. 개발된 라이브러리를 이용하여 CFD 코드(SNUFOAM_v02)를 개발하였다. Log layer에서 난류의 생성과 소멸이 균형을 이룬다는 가정으로부터 유도된 표면의 마찰도($u_\tau = k^{1/2} C_\mu^{1/4}$)를 식 (3)에 대입하면 식 (2)가 유도되는 것

Fig. 9 Comparison of SNUFOAM_v02(left) and FLUENT(right) around the stern

을 알 수 있다.

개발된 SNUFOAM_v02를 이용하여 계산한 결과는 Fig. 8과 같다. SNUFOAM_v02 계산결과와 FLUENT의 계산결과가 동일한 것을 알 수 있다. 난류 에너지 생성항을 식 (3)으로 변경하기 전의 계산결과가 Fig. 7과 같이 나온 이유는 선수에서는 난류의 소멸보다는 생성이 큰 것이 일반적이므로 SNUFOAM_v02에 사용된 난류 에너지 생성항은 log layer에서는 난류의 생성과 소멸이 같다는 가정으로부터 출발하였기 때문에 난류가 상대적으로 늦게 발달한 것으로 추정된다. 반면, 개발된 SNUFOAM_v02에서는 선수에서부터 난류의 생성이 소멸보다 크게 계산되어 Fig. 8과 같은 결과가 나온 것으로 추정된다. 또한, 수치적으로 τ_w 의 계산을 위해서는 속도구배를 계산하여야 하는데 식 (2)에서는 한번 계산하는 반면 식 (3)에서는 두 번 계산함으로써 수치적으로 속도구배가 급격히 변화하는 선박의 선수에서 민감하게 작용했을 것으로도 추정된다.

Fig. 9는 선미에서의 압력과 난류에너지, 소산율 분포를 보

여주고 있다. SNUFOAM_v02의 결과와 FLUENT의 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 소스공개 라이브러리를 이용하여 CFD 코드 (SNUFOAM)을 개발하여, KCS의 저항을 계산하였다. 소스공개 라이브러리의 격자 민감도에 대해 검토하였고, 검토결과 skewness보다는 세장비에 더 민감한 것을 확인하였다. SNUFOAM_v01과 상용소프트웨어인 FLUENT로 KCS를 계산한 결과 선수 표면에서 난류 분포가 다른 것을 확인할 수 있었다. SNUFOAM_v01에서 사용하고 있던 난류에너지 생성항을 변경하여 새로운 SNUFOAM_v02를 개발하였으며, 개발된 SNUFOAM_v02를 이용한 결과 FLUENT와 동일한 난류 분포가 나타나는 것을 확인하였다.

소스공개 라이브러리를 이용하여 선박 저항계산에 적합한 SNUFOAM_v02를 개발하였으며, 개발된 SNUFOAM_v02는 상용 프로그램인 FLUENT와 동일한 결과가 나오는 것을 확인하였다. 산업체 및 연구소에서 개발된 SNUFOAM_v02를 사용하면 상용 소프트웨어를 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 자유수면을 포함한 코드를 개발할 계획이며, 자유수면 계산을 위해 고차의 스킴을 추가로 개발할 계획이다. 또한, 코드의 수렴성을 높이기 위해 세장비가 일정한 값 이상에서 수치오차가 커지지 않는 방안을 모색할 계획이다.

후 기

이 논문은 현대중공업, 중소기업청(0005646520), 교육과학기술부(2011-0020563)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Kim, W.J., Kim, D.H., 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
- [2] Kim, J., Park, I.-R., Kim, K.-S., Van, S.-H., 2005, "RANS simulations for KRISO container ship and VLCC tanker," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.42, No.6, pp.593-600
- [3] 2006, Kim, H.-T., Kim, H.-T., "Research of elements giving effects on the numerical analysis for the LNG carrier," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.43, No.6, pp.656-666
- [4] 2009, Choi, J.-E., Kim, J.-H., Lee, S.-B., Lee, H.-G., 2009, "Computational prediction of speed performance for a ship with vortex generators," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.46, No.2, pp.136-147
- [5] 2009, Choi, J.-E., Lee, J.-H., Choi, B.J., Lee, D.H., "Computational predictions of ship-speed performance," *Journal of Maritime Science and Technology*, Vol.14, No.3, pp.322-333
- [6] 2010, Yang, H., Kim, B.-N., Yoo, J., Kim, W.-J., "Wake comparison between model and full scale ships using CFD," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.47, No.2, pp.150-162
- [7] 2010, Seo, J.H., Seol, D.M., Lee, J.H., Rhee, S.H., "Flexible CFD meshing strategy for prediction of ship resistance and propulsion performance," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol.2, pp.139-145
- [8] 2011, Choi, J.-E., Kim, J.-H., Lee, H.-G., "Computational Study of the Scale Effect on Resistance and Propulsion Performance of VLCC," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.48, No.3, pp.222-232
- [9] 2010, Park, J.K., Kang, K.H., "Review on OpenFOAM - an open source software," *Journal of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Vol.15, No.3, pp.46-53
- [10] 2009, Park, J.K., Hong, J.W., Kang, K.H., "Analysis of electrowetting dynamics with conservative level set method," *Annual Autumn Meeting of the Korean Society of Computational Fluids Engineering, Changnum National University, Daejeon*, 27 November
- [11] 2010, Kim, J., Kim, J., 2010, "Natural convection of triangular melt pool with high rayleigh number," *Annual Autumn Meeting of the Korean Society of Computational Fluids Engineering, POSTECH, Pohang*, 19 November
- [12] 2011, Park, S., Rhee, S.H., "Numerical Analysis of Super-cavitating flow around two-dimensional and axisymmetric bodies," *Journal of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No.1, pp.14-21
- [13] 2011, Park, S., Rhee, S.H., "Numerical investigation of unsteady cavitating flow on a three-dimensional twisted hydrofoil," *Journal of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No.3, pp.37-46
- [14] 2001, Kim, W.J., Van, S.H., Kim, D.H., "Measurement of flows around modern commercial ship models," *Experiments*

- in Fluids*, Vol.31, pp.567-578
- [15] 1995, Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, Z., "A new $k-\varepsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - model development and validation," *Computers & Fluids*, Vol.24, No.3, pp.227-238
- [16] 1979, van Leer, B., "Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme," *Journal of computational Physics*, Vol.32, No.1, pp.101-136
- [17] 1998, Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., Fureby, C., "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques," *Computers in Physics*, Vol.12, No.6, pp.620-631
- [18] 2000, Pope, S.B., "Turbulent flows," *Cambridge University Press*, UK
- [19] 2002, Craft, T.J., Gerasimov, A.V., Iacovides, H., Launder, B.E., "Progress in the generalization of wall-function treatments," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.23, pp.148-160