

# 소스공개 라이브러리를 활용한 조선 및 해양 산업용 CFD 코드 개발

박선호<sup>1</sup>·이신형<sup>2,†</sup>

서울대학교 대학원 조선해양공학과<sup>1</sup>

서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소<sup>2</sup>

## CFD Code Development Using Open Source Libraries for Shipbuilding and Marine Engineering Industries

Sunho Park<sup>1</sup>·Shin Hyung Rhee<sup>2,†</sup>

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea<sup>1</sup>

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea<sup>2</sup>

### Abstract

The present study explored the possibilities of the applications of open source libraries to shipbuilding and marine engineering industries. A computational fluid dynamics (CFD) code, termed SNUFOAM, was developed and tested for turbulent flow around a ship, free surface flow around a hull, cavitating flow, and vortex shedding dynamics around a cylinder. The results using the developed CFD codes were compared against existing experimental data and solution of commercial CFD codes. SNUFOAM showed the nearly same results as commercial CFD codes and proved to be an alternative to commercial CFD codes for shipbuilding and marine engineering industries.

**Keywords** : Open source(소스공개), Ship resistance(선박 저항), Free surface(자유수면), Cavitation(공동현상), Vortex shedding(와류 흘림), CFD(전산유체역학)

## 1. 서 론

전산유체역학의 발달로 조선 및 해양 산업에서 전산유체역학을 이용한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 전산유체역학을 이용한 연구는 과거 포텐셜 유동을 기반으로 한 연구가 지배적이었으나 최근 들어 상용 소프트웨어인 WAVIS, SHIPFLOW, FLUENT, STAR-CCM+, CFX 등을 이용하여 활발하게 진행되고 있다. 조선 산업에서는 선박의 저항, 자항성능 계산뿐만 아니라 조종, 내항성능에 대한 연구도 진행되고 있으며 선체주위의 자유수면 움직임, 추진기에서 발생하는 공동현상에 대한 해석도 이루어지고 있다. 해양산업에서는 와류 흘림(vortex shedding) 및 선체와 선체간의 상호간섭 등 다양한 연구가 진행되고 있다. 그러나 이러한 연구는 상용 소프트웨어를 이용하고 있어서 구입비용뿐만 아니라 매년 유지보수 비용, 그리고 최근에는 병렬컴퓨터 이용을 위한 병렬라이선스 임대비용까지 많은 비용이 들어가고 있다. 이로 인해 비용이 소모되지 않는 무료의 소스공개 라이브러리인 OpenFOAM에 대한 관심이 증대되고 있다.

OpenFOAM에서는 연속체 역학과 관련된 다양한 라이브러리의 소스를 제공하고 있다. 일반 공중 사용 허가서(GNU general public license, GNU GPL)를 사용하기 때문에 누구나 무료로 다운로드 받아 사용할 수 있다.

국내에는 소스공개 라이브러리를 이용하여 조선 및 해양산업에 응용한 사례가 아직 보고되고 있지 않은 반면에 해외에서는 다양한 사례들이 보고되고 있다. 미 해군에서는 공개된 라이브러리에 새로운 라이브러리를 추가하여 NavyFOAM을 개발하여 사용하고 있으며, 유럽에서는 슬로싱 문제를 해결하기 위해 EU-Project를 신설하여 새로운 라이브러리를 개발하고 있다. 공개된 라이브러리를 수정없이 계산을 하는 사례도 있으나 대부분 목적에 맞게 새로운 라이브러리를 개발하여 사용하고 있다.

이에 본 연구에서는 소스공개 라이브러리를 이용하여 조선 및 해양산업에서 관심 있는 문제를 해석하여 소스공개 라이브러리를 이용한 결과가 상용 소프트웨어와 비교해 어느 정도의 결과를 내는지 검토하였다. 또한, 조선 및 해양 산업에 활용하기 위하여 목적에 맞는 특성화된 라이브러리를 개발하였고, 이를 이용하여 CFD 코드(SNUFOAM)를 개발하였다.

## 2. CFD 코드 개발

### 2.1 선박 저항 계산용 CFD 코드 개발

소스공개 라이브러리를 이용하여 조선 산업에서 가장 기본적인 문제인 선박의 저항 문제에 대해 검토하였다(Park, et al., 2011a). 선형이 공개된 KCS에 대해 자유수면을 고려하지 않은 이중모형(double body)을 고려하였다.

우선 소스공개 라이브러리를 이용한 Weller, et al. (1998)의 코드를 이용하여 선박의 저항문제에 적용해 보았다. Weller, et al. (1998)의 코드에서는 난류를 해석하기 위하여 realizable  $k-\epsilon$  모델(Shih, et al., 1995)과 벽함수(Pope, 2000)를 적용하였다. 계산한 결과는 이미 선박 계산에서 정도를 입증한 상용소프트웨어인 FLUENT의 결과와 비교하였다(Choi, et al., 2009; Seo, et al., 2010). Fig. 1은 Weller, et al. (1998)의 코드와 FLUENT를 이용하여 KCS 이중모형에 대해 계산한 결과를 나타낸다. 소스공개 라이브러리를 이용한 결과에서 압력은 FLUENT와 동일한 분포를 나타내었으나 선수 표면의 난류에너지와 난류소산율은 결과가 다른 것을 알 수 있다. FLUENT의 결과가 맞다고 단정하기는 어려우나 선박계산에서 이미 정도를 입증하였고 FLUENT를 대체하는 코드를 개발하는 목적도 있기 때문에 FLUENT의 결과가 맞다는 가정 하에 연구를 진행하였다. 특히 선수에서 난류의 생성과 소멸이 늦게 발생하는 것을 알 수 있는데 난류 에너지 생성항(Production of turbulent kinetic energy)에서 잘못된 계산을 하는 것을 확인하였고 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 조선산업에 특성화된 라이브러리의 필요성이 제시되었으며 본 논문에서는 이를 개발하였다. 소스공개 라이브러리에서 기본적으로 사용하는 난류에너지 생성항은 다음과 같다(Pope, 2000).

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

여기서,  $\tau_w$ 는 벽면에서의 전단응력,  $\kappa$ 는 표면의 거칠기,  $y$ 는 벽면에서 셀 중심까지의 거리를 나타낸다.  $C_\mu$ 는 0.09를 사용하였다. 이번 연구에서는 FLUENT와 동일한 결과를 얻기 위하여 Craft, et al. (2002)에서 사용한 난류 에너지 생성항을 사용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

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

위의 식에 log layer에서 난류의 생성과 소멸은 동일하다는 가정(equilibrium state)으로부터 유도된 표면의 마찰속도 ( $u_\tau = k^{1/2} C_\mu^{1/4}$ )를 대입하면 기존의 식 (1)로 유도되는 것을 알 수 있다.

난류에너지 생성항을 계산하는 식을 (2)와 같이 변경하여 특성

화된 라이브러리를 개발하였고, 이를 이용하여 SNUFOAM을 개발하였다. 계산한 결과는 Fig. 2와 같다. FLUENT와 동일하게 선수부터 난류가 발달하고 소산되는 결과를 얻었다. Fig. 3은 추진기면에서의 반류분포를 나타낸다. 실선 원은 추진기의 크기를 나타낸다. 추진기 허브위치에서는 저속구간의 값이 다소 차이를 보이거나 전체적으로 거의 동일한 결과를 얻었다. 또한, 저항 측면에서도 SNUFOAM과 FLUENT에서 각각 35.21N과 35.49N로 거의 동일한 결과를 얻었다.

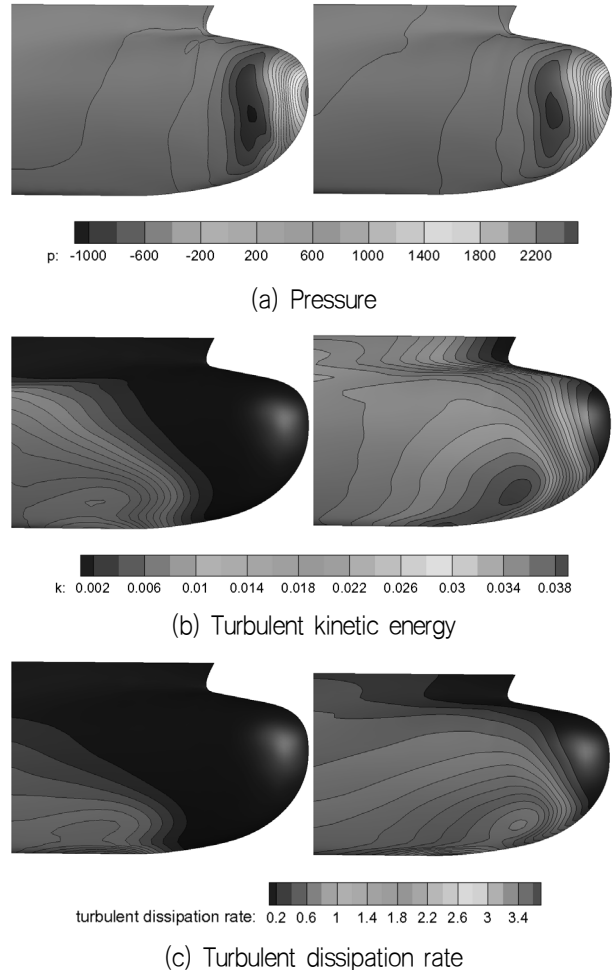
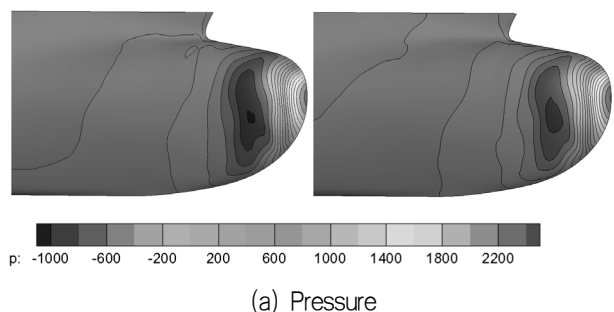


Fig. 1 Pressure, turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate on the bow surface (left: Weller, et al., 1998, right: FLUENT)



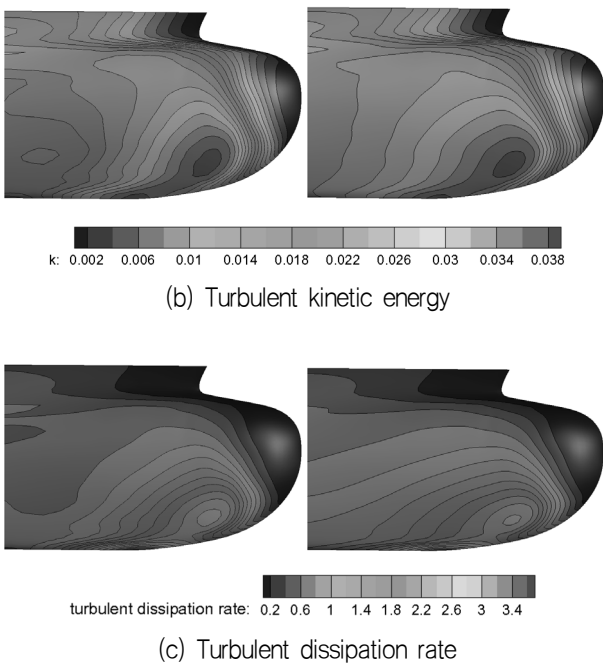


Fig. 2 Pressure, turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate on the bow surface (left: SNUFOAM, right: FLUENT)

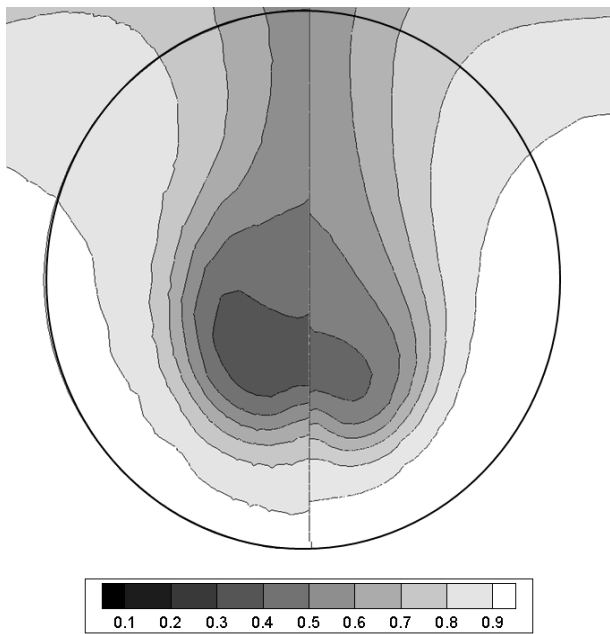


Fig. 3 Wake (left: SNUFOAM, right: FLUENT)

결론적으로 소스공개 라이브러리에서 기본적으로 제공하는 라이브러리를 이용하면 선수에서 난류의 발달이 늦게 진행되기 때문에 이를 해결하기 위해 특성화된 새로운 라이브러리를 추가하여 SNUFOAM을 개발하였고, 개발된 SNUFOAM을 이용하면 선박 저항 계산에의 활용이 가능하다.

## 2.2 자유수면 계산용 CFD 코드 개발

실험결과가 공개되어 있는 Wigley와 KCS 선형에 대해 소스공개 라이브러리를 이용하여 선체주위의 자유수면 분포를 계산하였다. Volume of fluid (VOF) 방법을 채택하여 자유수면을 고려하였다.

소스공개 라이브러리를 이용한 Rusche (2002)의 코드를 이용하여 자유수면 문제에 적용해 보았다. Wigley 선형은 Froude 수 0.289에서 계산하였으며 Journee (1992)의 실험결과와 비교하였다. Fig. 4는 Wigley 선형의 표면에서 발생한 파의 형상을 나타내며, 실험과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Wigley와 같이 간단한 선형에 대해서는 소스공개 라이브러리를 수정없이 이용하여도 계산이 가능한 것을 알 수 있다. 다음으로는 Wigley와 비교해 선형에 곡률이 있어 격자가 공간상에서 휘어지는 KCS에 대해 계산하였다. Froude 수 0.26에서 계산하였고 실험결과와 비교하였다. 소스공개 라이브러리를 수정없이 이용하여 계산하면 Fig. 5, 6과 같이 선미쪽에서 자유수면이 찌그러진 것처럼 계산되는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 7과 같이 선수와 선미 주위에서 파형이 찌그러지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 특성화된 새로운 volume fraction 이송 방정식 라이브러리를 생성하였고, 이를 이용하여 SNUFOAM을 개발하였다. SNUFOAM을 이용한 계산결과를 보면 선수미에서 자유수면이 찌그러지는 것이 없어진 것을 확인할 수 있다.

Wigley와 같이 간단한 선형의 계산은 소스공개 라이브러리를 수정없이 이용하여도 가능하나 실제 곡률변화가 심한 선박에 대해서는 소스공개 라이브러리에서 제공하는 라이브러리는 한계가 있는 것을 확인하였다. 이를 해결하기 위해 volume fraction 이송 방정식을 변경하여 목적에 맞는 특성화된 라이브러리를 개발하였다. SNUFOAM을 이용하면 선체 주위에 발생하는 자유수면 변화를 추정할 수 있다.

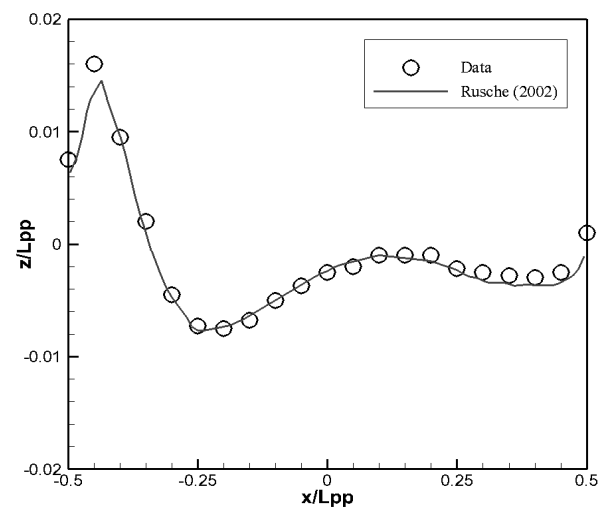


Fig. 4 Hull wave profile of Wigley

### 2.3 공동현상 계산용 CFD 코드 개발

공동현상을 계산하기 위해 상변화를 압력과 밀도의 함수로 나타내는 barotropic 관계 모델과 액체상과 기체상을 모두 계산하는 이상 균질 모델(Merkle, et al., 1998; Kunz, et al., 1999; Schnerr & Sauer, 2001; Singhal, et al., 2002; Shin, et al., 2004)을 포함하는 라이브러리를 개발하였다. 개발된 라이브러리와 소스공개 라이브러리를 이용하여 SNUFOAM을 개발하였다.

개발된 SNUFOAM을 이용하여 삼각형 형상의 캐비테이터(cavitator)에서 발생하는 초공동현상(super-cavitation)에 대해 계산을 하였다(Park & Rhee, 2011a; Park & Rhee, 2011b; Park, et al., 2011b). Fig. 8은 캐비테이터 뒤에서 발생하는 기포의 궤적과 유선을 나타낸다. 캐비테이터의 길이보다 긴 초공동이 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 캐비테이터의 형상과 캐비테이션 수에 따른 공동의 길이를 Newman이 유도한 해석해(Newman, 1977)와 Ahn, et al.(2010)의 포텐셜 유동 계산 결과와 비교하였다. 캐비테이션 수가 큰 영역에서는 점성 계산 결과가 약간 작게 계산되었고, 캐비테이션 수가 작은 영역에서는 해석해와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 개발된 SNUFOAM이 공동의 길이를 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다.

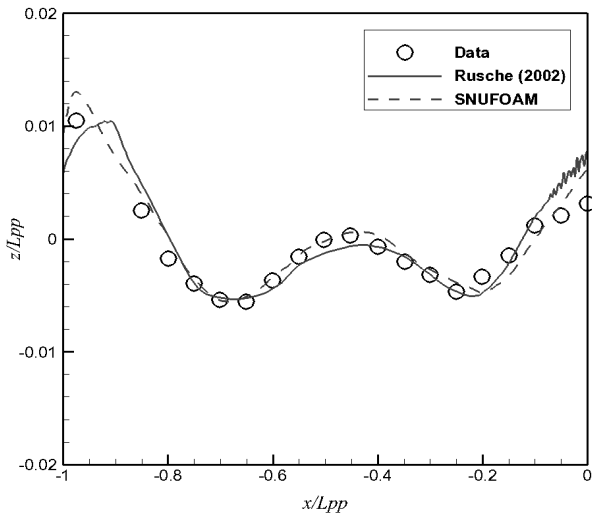


Fig. 5 Hull wave profile of KCS



(a) Rusche (2002)



(b) SNUFOAM

Fig. 6 Volume fraction contours around the stern

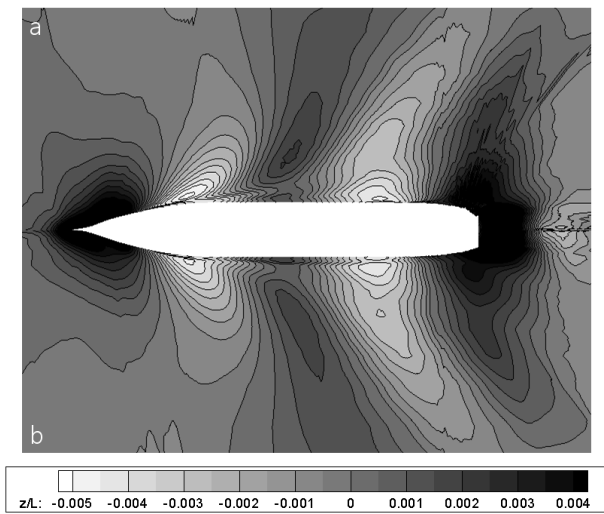


Fig. 7 Wave pattern around the hull ((a) Rusche (2002); (b) SNUFOAM)

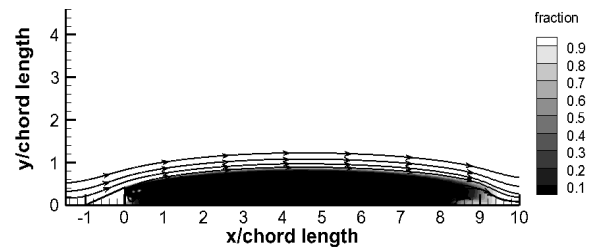


Fig. 8 Cavitation fully developed region

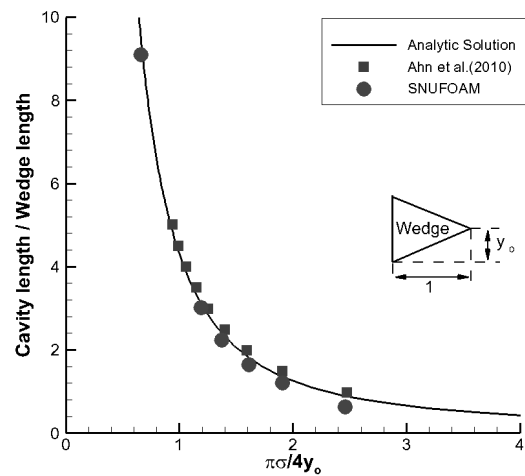


Fig. 9 Comparison of cavity lengths for analytic, potential code and SNUFOAM

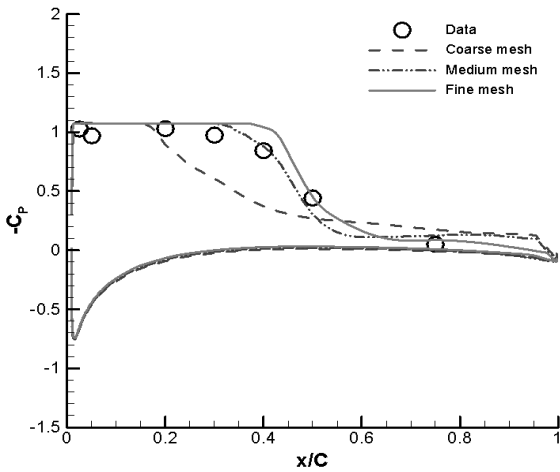


Fig. 10 Pressure coefficient distributions at the mid-span section of the foil in cavitating flow (coarse mesh: 0.5 millions, medium mesh: 14 millions, fine mesh: 40 millions)

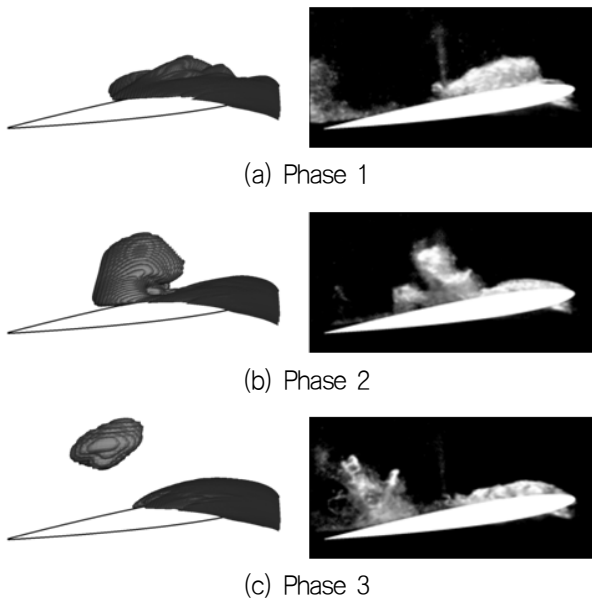


Fig. 11 Cavity shedding cycle – view from the side of the mid-span plane (left: SNUFOAM, right: data)

응용분야가 다양한 날개에 대해 공동현상을 계산하였다. 발생된 공동의 모양이 변화하지 않고 일정한 모양으로 유지되는 공동에 대해서는 타 전산유체역학 프로그램에서도 계산이 상대적으로 용이하기 때문에 공동이 시간에 따라 변화하는 3차원 비틀어진 날개 주위에서 발생하는 공동에 대해 계산을 하였다(Park & Rhee, 2011c). 날개의 단면은 NACA009로 이루어져 있으며 스펀의 중앙을 기준으로 받음각이 변화하는 형상으로 설계되어 있다. 스펀중앙은 받음각 9°, 스펀 양쪽 끝은 받음각 -2°로 이루어져 있다. Fig. 10은 공동이 발생할 때 스펀중앙에서의 시간 평균한 압력 분포를 나타낸다. Medium 격자 이상에서 실험과 잘 일

치하는 것을 확인하였다. Fig. 11은 공동이 떨어져 나가는 주기에 대해 측면에서 바라본 공동의 형상을 나타낸다. 실험과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 공동이 시간에 따라 변화하는 계산은 요구되는 계산용량이 크고 발산하기 쉬운 것이 일반적인데 개발된 SNUFOAM은 공동 계산에 맞게 최적화되어 계산이 빠르고 다양한 공동 모델을 통해 문제에 적합한 공동 모델을 선택할 수 있기 때문에 일반 상용 소프트웨어와 비교해 장점을 가지고 있다.

## 2.4 와류 흘림 계산용 CFD 코드 개발

해양의 파이프라인에서 자주 발생하는 와류 흘림(vortex induced vibration)에 대해 계산하였다. 유동장에서의 와도(vorticity)와 실린더에 작용하는 힘과 모멘트를 출력하기 위해 특성화된 라이브러리를 개발하였고, 개발된 라이브러리와 소스공개 라이브러리를 이용하여 SNUFOAM을 개발하였다. 층류, 천이, 난류 영역이 포함되도록 Reynolds 수 0.631, 1.26, 2.52, 3.15, 5.06,  $7.67 \times 10^5$ 에서 계산하였다(Song, et al., 2011; ITTC Ocean Engineering Committee, 2011). Reynolds 수의 범위는 천이 영역에 대한 CFD 계산 결과를 검토하기 위해 ITTC에서 선정하였다. Fig. 12는 Reynolds 수  $3.15 \times 10^5$ 에서 와도가 실린더로부터 후류로 떨어져 나가는 궤적을 보여주고 있다.

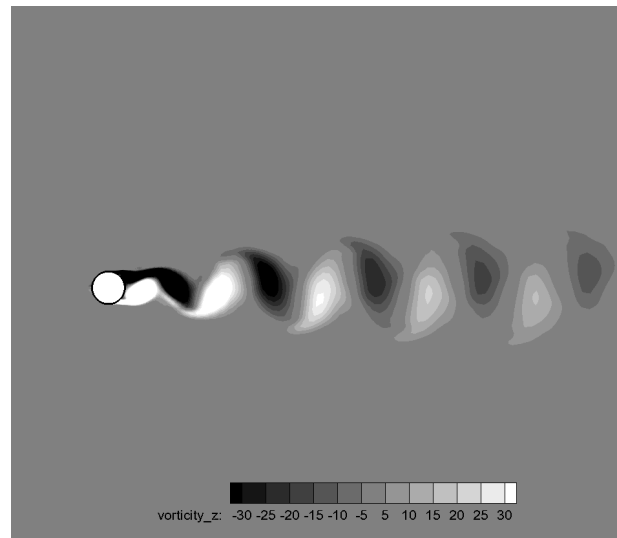


Fig. 12 Vorticity contours with the Reynolds number of  $3.15 \times 10^5$

Fig. 13, 14, 15는 실린더에 작용하는 저항계수, 양력계수, Strouhal 수에 대해 SNUFOAM의 계산결과를 FLUENT의 계산결과, MARIN의 실험결과와 비교하였다. FLUENT의 계산결과는 ITTC benchmark 연구에 참여한 타 기관의 결과를 나타낸다(ITTC Ocean Engineering Committee, 2011). 저항계수의 경우 실험에서는 층류에서 난류로 유동이 변하면서 저항이 급격히 감소하는 것이 관찰되었으나 계산에서는 층류, 천이, 난류영역을 정확히 포착하지 못하였다.

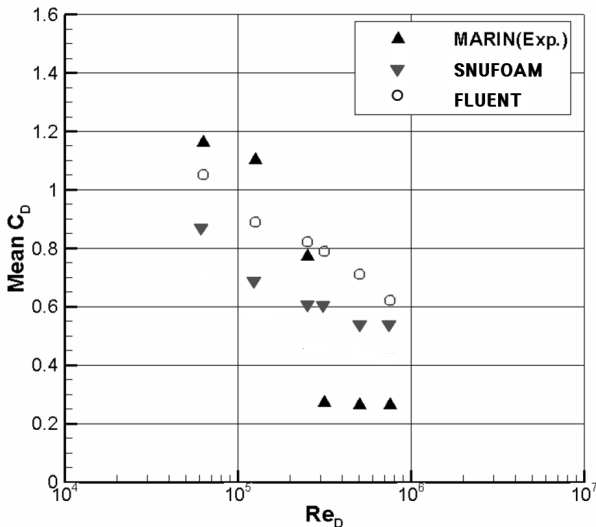


Fig. 13 Mean drag coefficient (ITTC ocean engineering committee, 2011)

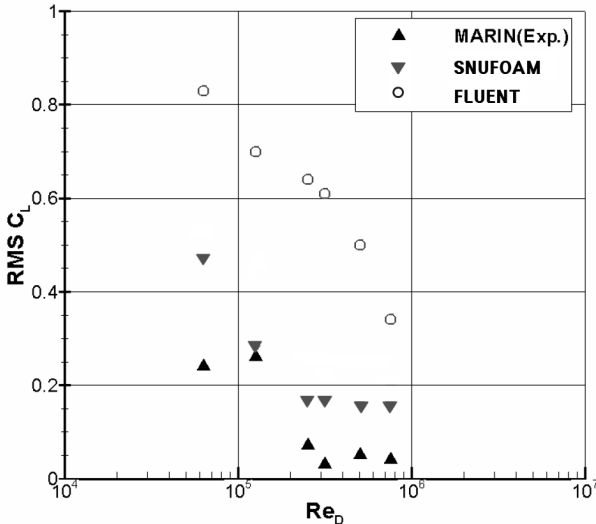


Fig. 14 RMS lift coefficient (ITTC ocean engineering committee, 2011)

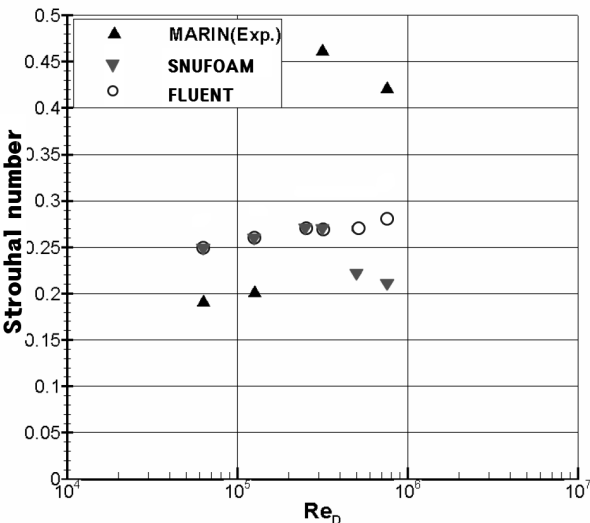


Fig. 15 Strouhal number (ITTC ocean engineering committee, 2011)

양력계수도 유동이 난류영역으로 바뀔수록 양력계수가 감소하는 경향은 일치하였으나 실험과는 차이가 있었다. Strouhal 수는 실험 결과의 범위에서 계산되었는데 이는 Zdravkovich (1997)의 실험결과인 0.2~0.5의 범위에 모두 포함되는 결과인 것을 확인할 수 있다. 실험과 계산이 다른 이유는 계산이 2차원 RANS 기반이고 난류모델을 사용했기 때문으로 추정된다. FLUENT의 계산 결과와의 차이는 사용된 격자와 선택된 스킴의 차이로 추정되며 전체적인 경향은 유사한 것을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 소스가 공개된 전산유체역학을 위한 라이브러리를 이용하여 CFD 코드인 SNUFOAM을 개발하였고, 이를 선박의 저항, 선체주위 자유수면 변화, 공동현상, 실린더 주위에서 발생하는 와류 흘림 문제에 대해 해석하였다. 저항 계산에서는 선수에서의 난류값 계산을 위하여 목적에 맞는 특성화된 라이브러리를 개발하였으며, 이를 이용하여 SNUFOAM을 개발하였고 정도가 높은 결과를 얻을 수 있었다. 자유수면 계산에서는 KCS와 같이 선수미 벌브 및 곡률이 있는 선체에 대해서는 volume fraction 이송 방정식을 변경하여 특성화된 라이브러리를 개발하였고, 이를 이용한 계산결과 선미에서 해의 구겨짐 없이 실험과 비교해 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 공동현상 계산에서는 다양한 공동 모델을 포함하는 라이브러리를 개발하여 초공동과 구름형 공동에 대해 계산하였고 실험과 잘 일치하는 결과를 얻었다. 실린더 주위의 와류 흘림 문제에 대해서는 유동장의 와도와 결과물의 힘과 모멘트 계산을 위한 라이브러리를 개발하였고, 이를 이용하여 SNUFOAM을 개발하였다.

소스공개 라이브러리를 수정없이 이용하여도 계산이 가능한 경우가 많이 있으나 실제 조선 및 해양 산업용 문제에 활용하기 위해서는 목적에 맞는 특성화된 라이브러리의 개발이 필요함을 확인할 수 있었다. 개발된 SNUFOAM을 이용한 결과는 실험 결과 및 상용 소프트웨어와 비교해 우수한 결과를 나타내었다. 현재는 소스공개 라이브러리를 이용한 결과가 상용 소프트웨어의 일부를 대체할 수 있으나 사용자가 필요에 맞게 공개소스를 변경 또는 개발하면 향후 상용 상용소프트웨어를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

### 후기

이 논문은 교육과학기술부(2009-0093129, 2010-0022835, 2011-0020563)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

Ahn, B.K. Lee, C.S. & Kim, H.T., 2010. Experimental and numerical studies on super-cavitating flow of axisymmetric cavitators. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2, pp.39-44.

- Craft, T.J. Gerasimov, A.V. Iacovides, H. & Launder, B.E., 2002. Progress in the generalization of wall-function treatments. *International Journal of Heat and Fluid Flows*, 23(2), pp.148–160.
- Choi, J.-E. Lee, J.-H. Choi, B.J. & Lee, D.H., 2009. Computational predictions of ship-speed performance. *Journal of Maritime Science and Technology*, 14(3), pp. 322–333.
- ITTC Ocean Engineering Committee, 2011. The Ocean Engineering Committee – final report and recommendations to the 26th ITTC. *26th International Towing Tank Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 28 August – 3 September 2011.
- Journee, J.M.J., 1992. Experiments and calculations on four Wigley hullforms, *Report No. 909*, Delft University.
- Kunz, et al., 1999. Multi-Phase CFD Analysis of Natural and Ventilated Cavitation about Submerged Bodies. *3rd ASME/JSME Joints Fluid Engineering Conference*, San Francisco, California, 18–23 July 1999.
- Merkle, C.L. Feng, J. & Buelow, P.E.O., 1998. Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation. *3rd International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, 7–10 April 1998.
- Newman, J.N., 1977. *Marine Hydrodynamics*. The MIT Press: Cambridge (Chap. 5).
- Park, S. & Rhee, S.H., 2011a. Numerical analysis of super-cavitating flow around a two-dimensional cavitator geometry. *46th Cavitation and Multiphase Flow Forum, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference*, Hamamatsu, Japan, 24–29 July 2011.
- Park, S. & Rhee, S.H., 2011b. Numerical Analysis of Super-cavitating flow around two-dimensional and axisymmetric bodies. *Journal of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, 16(1), pp.14–21.
- Park, S. & Rhee, S.H., 2011c. Numerical investigation of unsteady cavitating flow on a three-dimensional twisted hydrofoil. *Journal of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, 16(3), pp.37–46.
- Park, et al., 2011a. Program development for the prediction of the ship resistance using OpenFOAM libraries. *Annual Autumn Meeting of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Yeungnam University, Korea, 18 November 2011.
- Park, S. Rhee, S.H. & Shin, B.R., 2011b. Numerical analysis of cavitating flow with compressibility effects. *Annual Autumn Meeting of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Yeungnam University, Korea, 18 November 2011.
- Pope, S.B., 2000. *Turbulent flows*. 1st Ed. Cambridge University Press: Cambridge.
- Rusche, H., 2002. *Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions*. Ph.D. thesis, Imperial College, UK.
- Schnerr, G.H. & Sauer, J., 2001. Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics. *4th International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, USA*, 27 May – 1 June 2001.
- Seo, J.H. Seol, D.M. Lee, J.H. & Rhee, S.H., 2010. 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.
- Shin, B.R. Yamamoto, S. & Yuan, X., 2004. Application of preconditioning method to gas-liquid two-phase flow computations. *Journal of Fluids Engineering*, 126(4), pp. 605–612.
- Shih, et al., 1995. A new k- $\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation. *Computers & Fluids*, 24(3), pp.227–238.
- Singhal, A.K. Athavale, M.M. Li, H. & Jiang, Y., 2002. Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. *Journal of Fluids Engineering*, 124(3), pp.617–624.
- Song, et al., 2011. Numerical simulation of a stationary cylinder in a cross flow from the benchmach study of ITTC ocean engineering committee. *25th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures*, Incheon, Korea, 26–29 September 2011.
- Weller, H.G. Tabor, G. Jasak, H. & Fureby, C., 1998. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics*, 12(6), pp.620–631.
- Zdravkovich, M.M., 1997. Flow around circular cylinders. *Fundamentals – vol. 1*. Oxford University Press (Chap. 6).

