

SUBOFF 모형 후방 난류항적의 수치 시뮬레이션

나영인*, 방형도**, 박종천†***

국방과학연구소 제6기술연구본부 1부*
삼성중공업(주) 해양설계2팀**
부산대학교 조선해양공학과***

Numerical Simulation of Turbulent Wake Behind SUBOFF Model

Young-In Nah*, Hyung-Do Bang** and Jong-Chun Park†***

The 6th R&D Institute-1, Agency for Defense Development*
Offshore Engineering Team 2, Samsung Heavy Industry Co. Ltd.**
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National Univ.***

Abstract

This paper covers the numerical studies performed to investigate the characteristics of turbulent wake generated by a submarine, SUBOFF model. A SUBOFF model assumed as an axial-symmetric body was used to generate wake. The numerical simulation was performed by using a commercial S/W, FLUENT, with the same condition as the experiments by Shin et al.(2009). Mainly the cross-sectional distribution of the time-averaged mean wake and turbulent kinetic energy was compared with the experiments. Both results are agreed well with each other in the propeller wake section, but the agreement between both is not so satisfied in the far wake field. It means that more numerous number of grid points and their concentration should be required in that field.

※Keywords: Turbulent wake(난류항적), Turbulent kinetic energy(난류운동에너지), SUBOFF model(SUBOFF 모형), CFD simulation(CFD 시뮬레이션), Turbulent Intensity(난류강도)

1. 서 론

해양에서 수중운동체의 난류항적은 주위환경에

변화를 일으켜 물리적 탐지의 단서를 제공한다. Fig. 1에 보이는 바와 같이 수면에서는 베르누이 혹(bernoulli hump), 캘빈파 및 내부파(internal wave)에 의한 표면파 변형 등을 통해 수중운동체의 흔적을 확인할 수 있으며, 수중에서는 플랑크톤에 의한 생물학적 발광(bioluminescence), 열

접수일: 2010년 4월 2일, 승인일: 2010년 6월 30일

† 교신저자: jcpark@pnu.edu, 051-510-2480

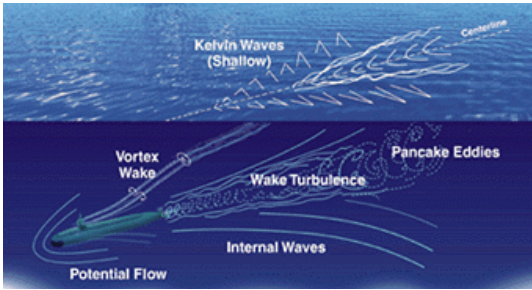


Fig. 1 Hydrodynamic signature of submarine (<http://www.fas.org/nuke/guide/usa/slbm/ssbn-secure.htm>)

흔적, 지자기 왜곡, 난류강도 등의 변화가 일어난다. 수중운동체에 의해 발생하는 난류항적과 이로 인한 난류장 및 내부파의 발생과 탐지에 대한 연구가 선진국을 중심으로 냉전시대 큰 관심을 끌었다. 공개된 문헌에 의하면, 수중운동체의 난류항적에 대한 이론모델에 대한 연구는 Ko(1972), Merritt(1972) 등에 의해 수행된 바 있으며, 실제 수중운동체에 대한 실해역 계측시도가 Heinz-Volker(1997)에 의해 행해진 바 있다. 송무석(1993)은 자유표면 근처에서 상호작용하는 와 특성에 대해 연구하였다. 수중운동체 후류에 존재하는 난류와 이로 인한 내부파 발생과 표면파로의 전달에 대한 연구는 실제적인 수중운동체의 탐지와 직접적으로 연관되어 지속적 연구가 요구된다.

후류 특성을 파악하기 위하여 실험적, 해석적 방법과 더불어 실해역 관측을 통한 연구가 수행될 수 있다. 하지만 수중 운동체의 후류는 난류의 시간적·공간적 확산효과와 프로펠러의 회전효과에 따른 비선형성 유동특성, 그리고 기포의 거동 등이 서로 결합된 극도로 복잡한 유체역학적 특성이 있기 때문에 실선이 아닌 모형선에 대해서조차도 후류특성이 명확히 이해가 되지 않고 있다.

후류에 존재하는 난류에 있어 대표적인 변수는 선속과 선체 길이이며, 주위 해양에 존재하는 난류의 변수로는 국소적인 해양난류를 들 수 있다. 후류의 유속은 길이 방향의 성분이 가장 크며, 깊이와 폭 방향은 길이방향 속도성분의 대략 10% 정도에 해당한다(Reed et al., 1990). 난류 운동에 미치는 선박의 종류와는 무관한 것으로 알려져 있

으며, 이에 대한 감소율은 Benilov et al.(2001)의 난류 감소에 대한 관계식으로부터 $x^{-4/5}$ 를 따른다. 단 x 는 물체의 프로펠러 단면에서 후방으로의 거리를 나타낸다. 신명수 등(2009)은 부가물이 없는 SUBOFF 모형에 대해 회류수조 내에서 추진기를 장착하지 않은 상태와 장착한 상태에서 모형 후방에서의 난류항적에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 수중운동체의 항적특성을 살펴보기 위하여 SUBOFF 모형에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하고, 항적 시뮬레이션을 통한 난류강도, 발생면적 및 생존시간을 신명수 등(2009)의 실험값과 비교하였다.

2. 수치 시뮬레이션 조건

2.1 SUBOFF 모형

본 논문에서 사용된 모형은 Fig. 2에 보이는 바와 같이 각종 부가물과 추진기를 장착하지 않은 SUBOFF 잠수체이다. 모형의 재원은 신명수 등(2009)과 동일하며, 길이는 1.406m, 폭은 0.254m

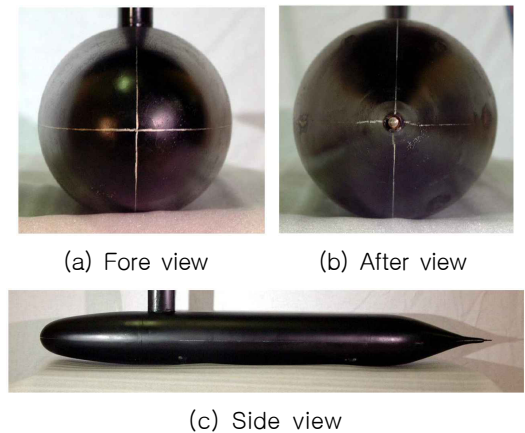


Fig. 2 Photographs of SUBOFF model

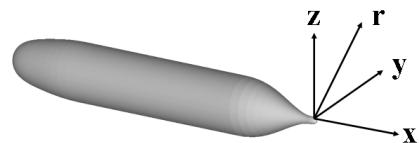


Fig. 3 Definition of coordinate system

이며 축대칭이다. Fig. 3에는 본 연구에서 사용한 무차원화된 좌표계를 나타내었다.

2.2 시뮬레이션 조건

Reynolds 상사를 통해 실험과 동일한 조건의 난류유동을 해석하였다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 O-H 형상의 격자계를 사용하였으며, 격자는 상용 S/W인 GridGen을 이용하여 형성하였다. 격자수는 $3.7 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^6$ 개를 사용하여 수렴성 테스트를 통해 최적의 격자수를 선정하였다. 벽면에 수직한 최소 격자간격은 1.0×10^{-4} 이고 이는 $y^+ = 50 \sim 100$ 에 해당된다. 또한 난류항적의 생존 영역과 생존 시간을 확인하기 위하여 선체 후방에 보다 많은 격자를 분포시켰다. 유동장 시뮬레이션에는 상용프로그램인 Fluent를 이용하였으며, SUBOFF 모형이 수직중앙면과 수평면에 대하여 각각 대칭이므로 이중모형 계산에 관한 경계조건을 주었다. 시간 간격은 5×10^{-4} 로 설정하였으며 초기 조건으로 전 영역에 $(U_0, 0, 0)$ 의 속도를 분포시켰다. 유입구에서 일정 유속과 동시에 10%의

난류량이 유입되고 모형의 벽면과 마찰로 인해 경계층이 발달하며 난류유동의 특성이 재현된다.

비압축성 난류 유동장을 풀기위한 지배방정식은 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 연속 방정식으로, 난류모델로는 Realizable $k-\epsilon$ model, standard $k-\epsilon$ model, Reynolds Stress model을 사용하여 비교한 뒤 적절한 난류 모델을 선정하였다. 지배방정식의 수치 해법으로 대류항은 QUICK 스킴, 확산항은 중심차분스킴을, 그리고 압력해법으로는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 시간 적분에는 2차 정확도의 음해법을 사용하였다.

계산 속도 향상을 위해 병렬처리 기법이 도입되었으며, 병렬화 방법으로 다블록을 하나의 CPU에 할당하는 방식인 영역분할법을 이용하였다. 이 때, 각 블록의 경계면에서 유동에 관한 정보교환은 MPI(Message Passing Interface)를 이용하였다.

3. 수치 시뮬레이션 결과 및 토론

3.1 격자 수렴성 테스트

시뮬레이션의 타당성 검증과 효율적인 격자수 선정을 위해 격자의 수렴성 테스트를 수행하였다. 테스트를 위하여 3.7×10^5 , 7.5×10^5 , 1.1×10^6 의 세 종류의 격자가 사용되었으며, 프로펠러가 없는 SUBOFF 모형 표면의 압력분포에 관한 실험결과(Huang et al, 1992)와 비교하였다. 레이놀드 수는 1.4×10^7 이며, 난류모델로는 Realizable $k-\epsilon$ model이 사용되었다.

Fig. 5에는 $C_p = 2p/\rho U_\infty^2$ 로 정의되는 압력계수의 흐름방향인 x -방향 분포를 나타낸다. 단, 본 비교에서 SUBOFF 모형의 선수 및 선미는 $x = -0.5 \sim 0.5$ 에 위치한다. Huang et al.(1992)은 공동수조의 차폐효과(Blockage effect)가 존재함을 언급하였으며, □로 표시된 실험을 통해 직접적으로 얻어진 결과와 ○로 표시된 공동수조의 측면효과를 고려하여 수정된 결과를 동시에 표시하였다. 전체적으로 계산된 압력 계수의 분포는 실험결과와 잘 일치하며, 특히 선체후방의 압력분포는 실험과 거의 일치함을 알 수 있다. 격자의 수렴성에 있어서도 세 종류의 격자수의 차이는 상대오차가

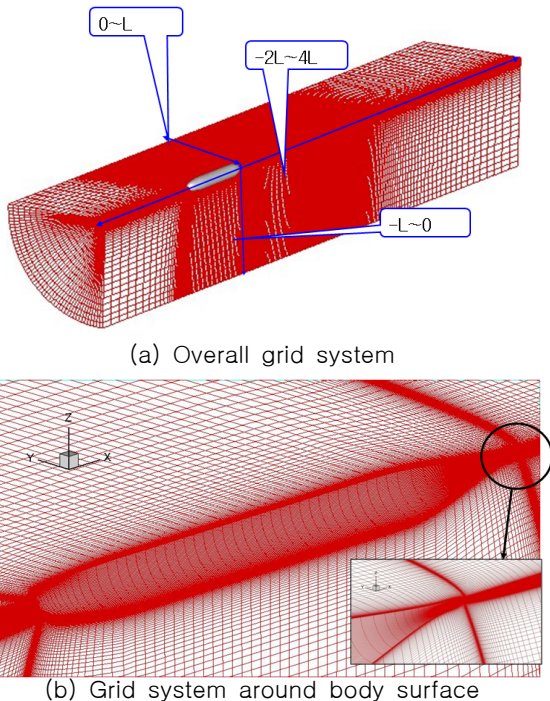


Fig. 4 Grid system around SUBOFF model

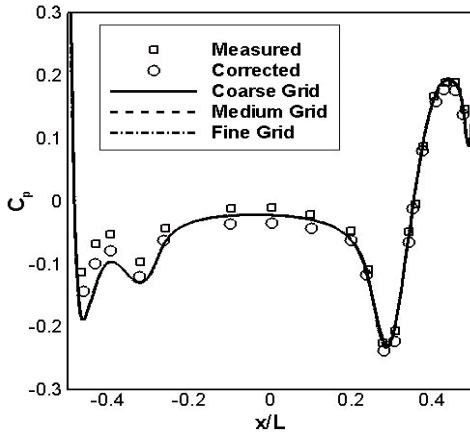


Fig. 5 Grid convergence tests

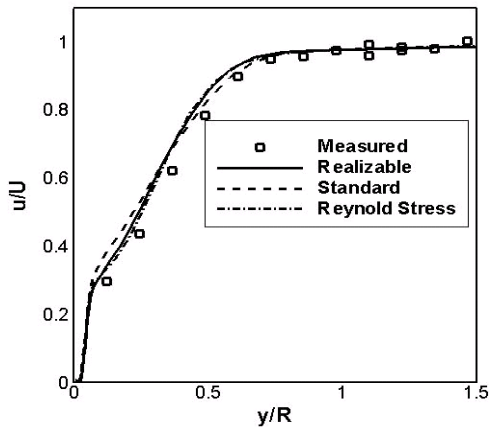


Fig. 6 Turbulence model tests ($k-\epsilon$ model)

0.1% 미만으로 미소하며, 중간단계의 격자부터 수렴된다는 것을 알 수 있다. 이로부터 본 계산에 사용된 격자수와 계산조건이 적절함을 확인할 수 있다. 이후 중간단계의 격자를 이용하였다.

3.2 난류 모델 테스트

다음으로 적절한 난류모델을 선정하기 위하여 수치 실험을 수행하였다. 사용된 난류 모델은 Realizable $k-\epsilon$ model, standard $k-\epsilon$ model, Reynolds Stress model의 세 종류이다. 계산 조건은 신명수 등(2009)와 동일하다.

Fig. 6은 SUBOFF 모형 후방의 $x=0.0$ 에서 신명수 등(2009)이 예측한 평균 속도 분포를 나타낸

다. Realizable $k-\epsilon$ model과 Reynolds Stress model이 Standard $k-\epsilon$ model에 비해 실험결과에 보다 근접함을 알 수 있다. 이 후 본 연구에서는 계산의 정확도와 효율을 고려하여 Realizable $k-\epsilon$ model을 이용하기로 한다.

3.3 병렬 계산의 속도비 테스트

병렬계산을 위해 본 연구에서 사용된 병렬알고리즘의 속도 향상비를 확인하기 위하여 SUBOFF 모형 주위의 유동 해석을 수행하였다. 단 상대적인 비교를 위해 0.3초까지의 계산만을 수행하였다. Fig. 7에는 격자수 9.2×10^5 와 1.8×10^6 에 대하여 이상적인 속도 향상비와의 비교를 나타내었다. 결과적으로 프로세서의 수가 증가하면서 이상적인 속도 향상비에 비하여 성능이 저하되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 단일 프로그램을 병렬화하여 고성능의 계산 속도를 얻기 위해 다수의 영역으로 분할하는 과정에서 각 프로세서에 할당되는 개수가 늘어날수록 계산량은 줄어들게 된다. 그러나 영역 경계가 늘어남에 따라 교환되는 메시지 양이 증가하고 이에 기인하여 속도저하가 발생한다. Fig. 8은 격자수가 $2.1 \times 10^5 \sim 1.8 \times 10^6$ 인 범위 내에서 프로세서의 개수에 따른 실제 계산시간의 비교를 나타낸다. 전반적으로 주어진 격자수의 범위 내에서 가장 효율적인 프로세서의 개수는 6~8개가 가장 경제적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 후 8개의 프로세서를 사용하여 계산을 수행하기로 한다.

3.4 SUBOFF 후방의 평균 유속 분포

Fig. 9는 SUBOFF 모형 주위의 유선을 나타낸다. 유동이 선체표면을 따라 흐르고 표면에서 발달되는 경계층으로 인해 선미부근에서 유속의 감소가 일어나고 있다.

Figs. 10~13은 SUBOFF 모형 후방의 네 단면($x=0.0, 0.5, 1.0, 2.0$)에서 반경 방향으로의 속도 분포를 신명수 등(2009)의 실험결과(EFD)와 비교하여 나타낸다. 프로펠러 단면인 $x=0.0$ 의 모형 중심에서 유속의 감소가 가장 현저하며 반경 방향과 물체 후방으로 갈수록 유속이 점차 회복되는 것을 알 수 있다. 반경 방향으로의 속도분포는 선체후

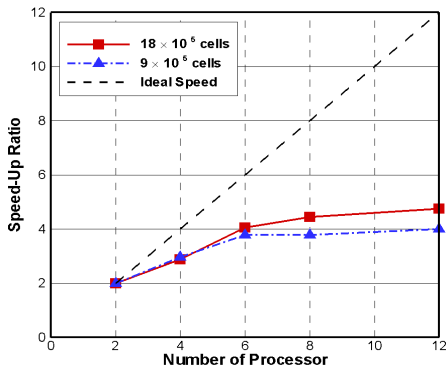


Fig. 7 Speed-up ratio

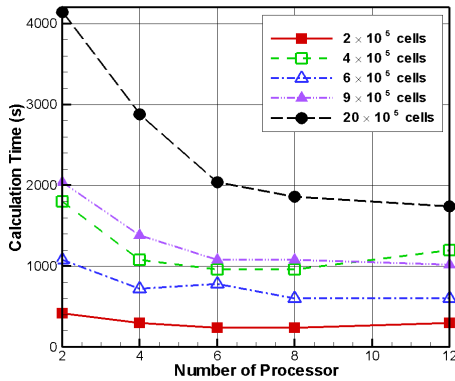


Fig. 8 Comparison of calculation time for using different numbers of grid

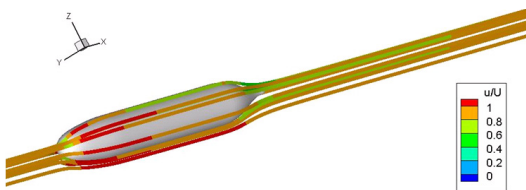


Fig. 9 Streamlines around a SUBOFF model

방으로 갈수록 넓어지는 것을 알 수 있다. 유속의 손실 영역은 물체의 표면에서 발달되는 난류 경계층의 영향에 기인한 것이며 난류 후류의 생존 영역과도 관련이 있다.

Fig. 14는 모형 후방에서 평균 유속에 관한 등치면(iso-surface)을 나타낸다. 난류확산으로 정의되는 항적의 영역을 확인할 수 있으며, 난류후류가 선체후방으로 3~4L에 걸쳐 분포하는 것을 알

수 있다. 전체적으로 시뮬레이션 결과는 항적의 크기와 영역에서 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 단, 후방에서의 해상도를 높이기 위해서는 보다 조밀한 격자를 사용할 필요가 있다.

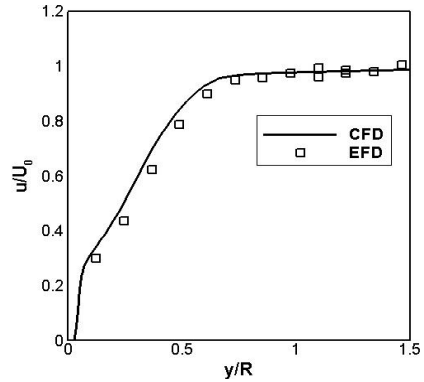


Fig. 10 Mean velocity profile at $x=0.0$

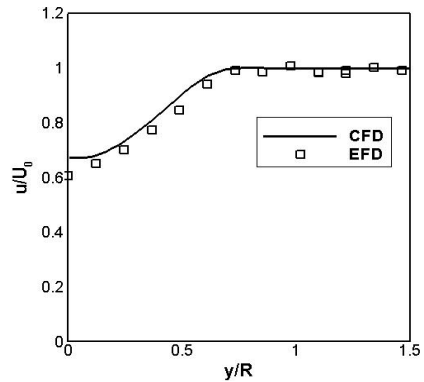


Fig. 11 Mean velocity profile at $x=0.5$

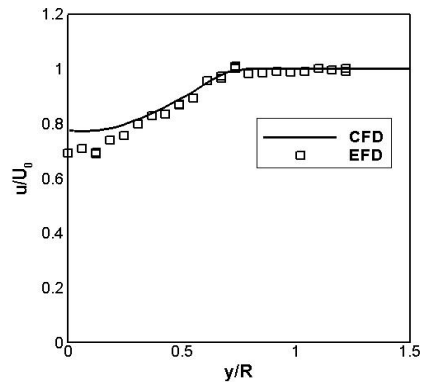


Fig. 12 Mean velocity profile at $x=1.0$

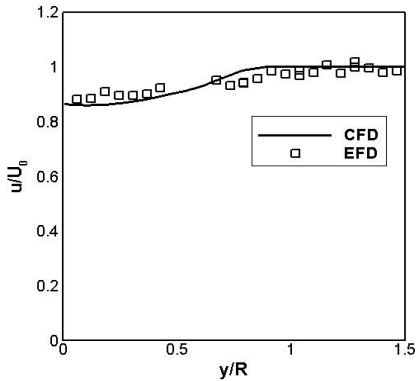


Fig. 13 Mean velocity profile at $x=2.0$

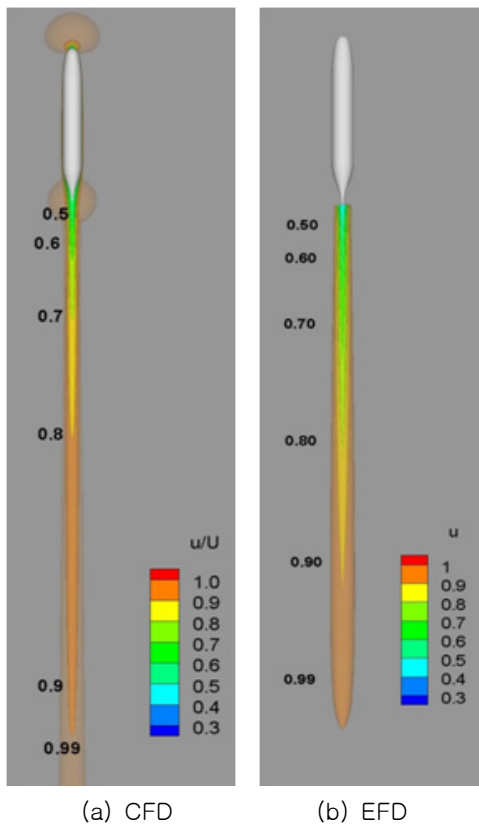


Fig. 14 Iso-surface of mean velocity behind SUBOFF model

3.5 SUBOFF 후방의 난류 강도 분포

신명수 등(2009)의 실험에서는 축방향 속도의 섭동값인 $\overline{u'^2}$ 이 측정되었다. 수직 Reynolds의 응

력성분인 $\overline{u'^2}$ 을 통하여 난류섭동의 집중도를 알 수 있다. Reynolds 응력은 종종 다음과 같이 유입 속도 U_0 에 대한 상대값으로 나타내어진다.

$$\hat{u} = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_0} \tag{1}$$

단, \hat{u} 은 방향의 상대적 강도를 나타낸다. 축방향(Streamwise)의 강도는 일반적으로 표면에서 0.10(10%)를 넘는다.

만약 세 성분의 법선 Reynolds 응력을 합한 뒤 1/2을 곱하게 되면 다음과 같이 기호 k 로 표현되는 난류에너지 성분을 얻게 된다.

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \tag{2}$$

이것은 단위질량당 속도섭동에 관한 운동에너지를 나타낸다. 지금까지 대부분의 난류모델은 난류에너지에서 각각의 법선 Reynolds 응력성분을 명확히 구분해 내지 못한다. 따라서 k 의 값만이 난류모델에서 주어진다. 따라서 속도섭동이 세 방향에 대하여 등방적이라 가정하여, 즉, $\overline{u'^2} \approx \overline{v'^2} \approx \overline{w'^2}$, 난류에너지에 관한 백분율로써 난류강도를 다음 식과 같이 정의한다.

$$T' \equiv 100 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{k}{U_0^2}} \tag{3}$$

시뮬레이션에서는 난류에너지, k 가 측정되며, 이 결과는 백분율로 주어진 난류강도 식 (3)을 이용하여 재계산되어 실험결과와 비교된다.

Figs. 15~18은 SUBOFF 모형 후방의 네 단면($x=0.0, 0.5, 1.0, 2.0$)에서 반경 방향으로의 난류강도를 신명수 등(2009)의 실험결과(EFD)와 비교하여 나타낸다. 프로펠러 단면($x=0.0$)에서 최대값을 가지는 난류강도는 물체로부터 멀어질수록 점차 줄어드는 반면 분포영역은 넓어지는 것을 알 수 있다. Fig. 18으로부터 $x=2.0$ 에서의 난류향적은 폭방향으로 약 $1.5R$ 에 걸쳐 분포하는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과는 실험결과와 비교적

잘 일치하는 것을 알 수 있지만, $x=2.0$ 이후에서는 격자간격이 커짐에 따라 난류강도의 확산 정도가 저하되는 것을 알 수 있다.

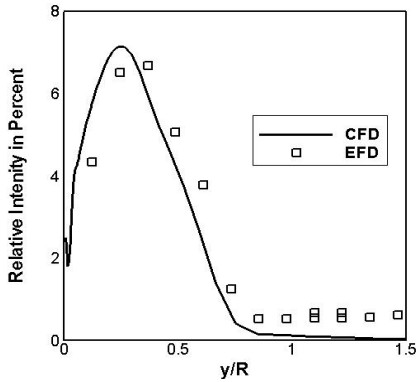


Fig. 15 Turbulent intensity at $x=0.0$

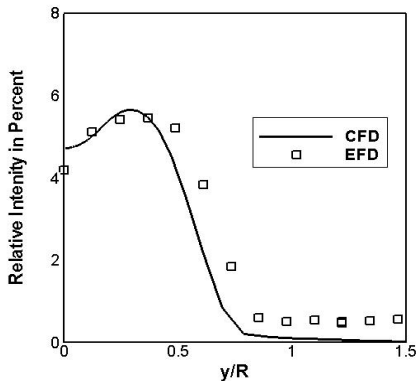


Fig. 16 Turbulent intensity at $x=0.5$

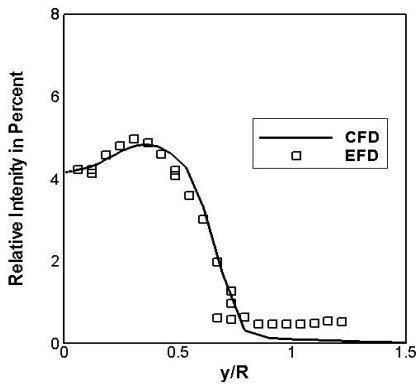


Fig. 17 Turbulent intensity at $x=1.0$

Fig. 19는 식 (3)의 백분율로 표현된 난류강도의 등치면(Iso-surface)을 나타낸다. 여기서 난류 확산으로 정의되는 항적영역을 확인할 수 있다. 난류항적의 영역은 선체후방으로 $3\sim 4L$ 에 걸쳐

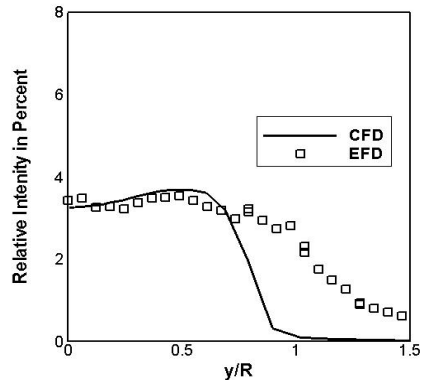


Fig. 18 Turbulent intensity at $x=2.0$

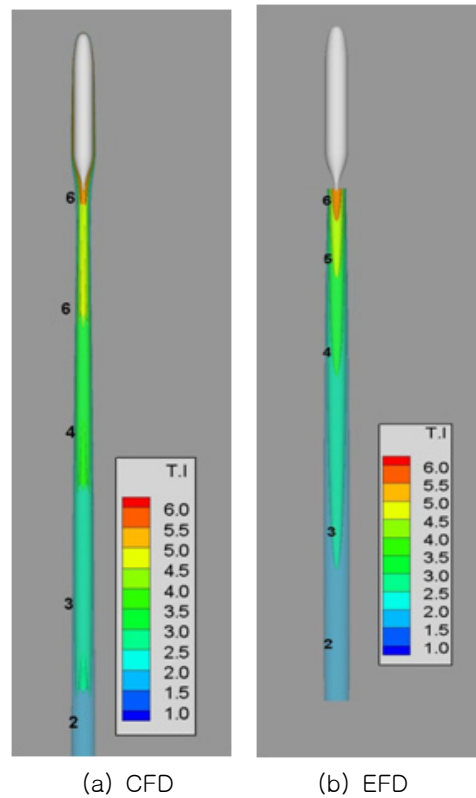


Fig. 19 Iso-surface of turbulent intensity behind SUBOFF model

분포한다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과는 정량적으로 비교적 잘 일치한다. 물체 후단에서 난류강도의 값은 최대가 되며, 반경방향의 분포영역은 물체에서 멀어질수록 점점 넓어진다. 물체로부터 멀어질수록 난류확산을 통해 난류강도의 크기는 줄어들지만 폭방향의 분포영역은 넓어지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 난류에너지 분포를 통한 항적의 탐지가능성을 시사해 준다.

4. 결 론

부가물과 프로펠러의 회전이 고려되지 않은 단순한 SUBOFF 모형 후방의 난류항적에 관한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위해 다양한 격자계에 대한 수렴성 테스트와 함께 적절한 난류모델을 선정하기 위한 비교 계산을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 표면 압력 분포에서 Huang et al.(1992)의 실험결과와 매우 유사한 결과를 얻었으며, 특히 선미부분의 압력변화는 거의 일치하는 경향을 보였다. 난류모델은 비교 결과 Realizable $k-\epsilon$ 모델과 Reynolds 응력 모델이 Standard $k-\epsilon$ 모델에 비해 비교적 신명수 등(2009)의 실험값에 근접한 결과를 보였다.

마지막으로, 난류항적에 관한 시뮬레이션을 통하여 평균유속 분포와 난류강도 분포를 신명수 등(2009)의 실험결과와 비교하였으며, 물체 후방의 프로펠러 단면에서 유속이 최소가 되고 난류강도가 최대가 되는 것을 확인하였다. 물체 후단에서 후방으로 갈수록 유속은 회복되고 난류강도는 줄어들지만 분포영역은 넓어졌다. 이러한 현상은 난류의 전달과 확산에 관한 일련의 과정을 통해 발생되며, 이를 통해 난류항적의 영역이 정의될 수 있다. 본 시뮬레이션을 통해 SUBOFF 모형의 난류항적은 $3\sim 4L$ 정도에 걸쳐 분포한다는 것을 알 수 있었다. 향후 프로펠러의 회전효과를 고려한 난류항적의 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

• Benilov, A., Bang, G., Safray, A., and Tkachenko,

I., 2001, "Ship Wake Detectability in the Ocean Turbulent Environment", the 23rd Symposium on Naval Hydrodynamics, pp.687- 703.

• Heinz-Volker, F., 1997, "Experimental Investigations inside the turbulent wake of a submerged submarine", Proc. of Undersea Defense Technology 1997, pp.414-418.

• Huang, T.T., Liu, H.-L., Groves, N.C., Forlini, T.J., Blanton, J.N. and Growing, S., 1992, "Measurements of Flows over an Axisymmetric Body with Various Appendages (DARPA SUBOFF Experiments)", Proc. of 19th Symp. on Naval Hydrodynamics, Washington, DC, USA.

• Ko, D.R.S. and Alber, I.E., 1972, "Diffusion of a Passive Scaler, Quarterly Technical Report", TRW Report No. 18202-6001-120-00.

• Merritt, G.E., 1972, "Wake Laboratory Experiment, Quarterly Technical Report No. 1.", Cornell Aeronautical Lab.

• Reed, A.M., Beck, R.F., Griffin, O.M., and Peltzer, R.D., 1990, "Hydrodynamics of remotely sensed surface ship wakes", Transactions of SNAME, 99, pp.319-363.

• Shin, M.-S., Moon, I.-S., Nah, Y.-I. and J.-C. Park, 2009, "Measurement of Turbulent Wake behind a SUBOFF Model and Derivation of Experimental Equations", Proc. the Annual Meeting of KAOST, Changwon.

• Song, M., 1993, "Numerical and Experimental Investigation on the Interaction of Subsurface Vortical Flows with a Free Surface", Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 30, No. 2, pp. 76-85.



< 나영인 >



< 방형도 >



< 박종천 >