



DES법을 이용한 SUBOFF 잠수함 모델 주위 유동 수치해석 연구

서성부·박일룡[†]
동의대학교 조선해양공학과

Numerical Simulation of the Flow Around the SUBOFF Submarine Model Using a DES Method

Sung-Bu Suh·Il-Ryong Park[†]
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dong-Eui University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this study, the numerical investigation of the flow around the SUBOFF submarine model is performed by using the Detached Eddy Simulation (DES) method which is developed based on the SST $k-\omega$ turbulence model. At the DES analysis level, complex vortical flows around the submarine model are caused mainly by the vortices due to the appendages and their interactions with the flows from the hull boundary layer and other appendages. The complexity and scale of the vortical flow obtained from the numerical simulations are highly dependent on the grid. The computed local flow properties of the submarine model are compared with the available experimental data showing a good agreement. The DES analysis more reasonably estimates the physical phenomena inherent in the experimental result in a low radius of the propeller plane where vortical flows smaller than the RANS scale are dominant.

Keywords : Detached Eddy Simulation(DES 시뮬레이션), Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation(RANS 시뮬레이션), SUBOFF submarine model(SUBOFF 잠수함 모델), Wake(반류), Turbulent flow(난류 유동), Vortical flow(와류 유동), Mean flow(평균 유동)

1. 서론

잠수함 개발에서 작전 수행중 기밀성 확보를 위한 다양한 항목 가운데 추진기에서 기인되는 유동 소음을 감소시키고 제어할 수 있는 기술은 매우 중요하다. 잠수함 추진기 소음은 추진기 자체에 의한 원인보다 선체-부가물-추진기의 상호작용의 결과로서 발생하기 때문에 선체와 부가물의 적절한 설계와 함께 이들의 후류로 인한 추진기 유동 소음 변화를 예측하여야 한다. 유동 소음 예측은 추진기 캐비테이션에 의한 소음과 난류유동에 의한 광대역 소음 추정을 포함한다. 소음 예측과 제어기술 개발 단계에서 모형시험과 함께 수치해석 기법과 결과에 대한 신뢰도가 확보된 CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션 간의 긴밀한 상호 보완적인 연구가 중요해지고 있다. 최근 CFD 결과를 바탕으로 한 잠수함

추진기 유동 소음 해석기법 개발에 관한 연구들이 진행되고 있다. 한편으로 잠수함 주위 유동 해석에 적용된 CFD 결과의 정확도를 검증할 모형시험 데이터의 확보도 중요한 사안이다. 그러나, 실제 운영되는 잠수함에 관련된 정보는 매우 제한적이기 때문에 연구 목적으로 개발된 DARPA SUBOFF 잠수함 (Grove et al., 1998)에 대한 모형시험과 수치해석 연구들이 공개되고 있다.

Groves et al. (1989)에 의해 설계된 SUBOFF 잠수함 모델에 대한 예인수조(towing tank) 저항시험과 풍동시험(wind tunnel test)을 통한 선체 주위 국부유동 계측이 Crook (1990)와 Huang et al. (1992)에 의해 각각 수행되었다. 참고로, SUBOFF 모델에 대한 조종 모형시험이 Roddy (1990)의 연구에서 수행되었다. CFD를 이용한 SUBOFF 잠수함 주위 유동 해석에 관한 연구에서 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)

방정식 기반의 수치해석 연구들이 Bull (1996), Toxopeus (2008), Byeon et al. (2018), Sezen et al. (2018), Park et al. (2019) 그리고 Lin & Li (2020)에 의해 수행된 바 있다. 이들의 연구는 RANS법에 의한 저항 및 자항성능 해석과 잠수함 부가물 유무에 따른 선체 주위 국부유동 추정 내용들을 포함한다. 특별히, Park et al. (2019)의 연구는 선박해양플랜트연구소(이후, KRISO) 대형캐비테이션터널(이후, LCT)에서 계측된 저항과 자항성능 그리고 캐비테이션 성능 추정 데이터를 이용하여 수치해석 결과를 검증하였다. RANS 해석보다 작은 스케일의 난류유동을 해석할 수 있지만 많은 계산시간과 노력이 필요한 DES(Detached Eddy Simulation)와 LES(Large Eddy Simulation)법을 SUBOFF 잠수함 유동 해석에 적용하고 그 결과들에 대한 논의가 Alin et al. (2010)에 의해 수행된 바 있다. 여기서, Alin et al. (2010)은 비교적 적은 격자수에서의 DES와 LES 해석법의 적용성을 검토하였다. 이후, DES법을 이용한 대상 잠수함 모형에 대한 유동 해석에 대해 Chase (2012)와 Bushan et al. (2013)이 연구한 바 있다. 조선해양공학분야의 DES나 LES의 연구들이 원형단면과 날개, 비틀림 실린더형 해양구조물, 선박의 난류촉진 장치, 진동하는 라이저(Riser) 문제 등에 대해서 다음의 연구자들에 의해 수행된 바 있다 (Park et al., 2004; Yoon et al., 2004; Jung et al., 2012; Lee et al., 2017; Jung et al., 2019).

본 논문에서는 잠수함 추진기로 유입되는 선체-부가물의 상호작용 유동 해석에 대상 잠수함으로 SUBOFF 모델을 선택하고 SST $k-\omega$ 난류모형의 RANS법과 LES 해석을 접목한 DES법을 적용한 연구 내용을 소개하고 있다. 수치해석 결과에서는 잠수함 선체-부가물의 상호작용 유동으로 인한 프로펠러면 반류(wake) 추정과 실험결과를 통한 검증을 다루고, DES와 RANS 해석 결과의 차이점에 대한 비교 논의를 하였다.

2. 수치해석 방법

본 논문에서는 잠수함 후류의 비정상 유동 해석을 위해 RANS법과 LES법을 접목하는 DES법을 사용하였다. 다음은 두 유동의 지배방정식을 통합한 유동량 방정식을 보여주고 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \hat{v}) + \nabla \cdot (\rho \hat{v} \otimes \hat{v}) = -\nabla \cdot \hat{p} \mathbf{I} + \nabla \cdot (\mathbf{T} + \mathbf{T}_{\text{model}}) + \mathbf{f}_b \quad (1)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도이다. \hat{v} 는 속도벡터로서 RANS 영역에서는 평균속도 \bar{v} 이고, LES 영역에서는 여과속도(filtered velocity) \tilde{v} 가 된다. 압력 \hat{p} 도 지배방정식이 적용될 영역에 따라 상기 유속의 표현을 따른다. \mathbf{T} 는 유동 내부 응력텐서(stress tensor)항을 나타낸다. $\mathbf{T}_{\text{model}}$ 의 경우 RANS 적용 영역에서는 난류와점성(turbulent eddy viscosity)으로 모델링된 \mathbf{T}_{RANS} 로 표시되는 난류응역(Reynolds stress)이며 각각의 지배방정식이 적용되는 영역에 대해서 다음과 같다.

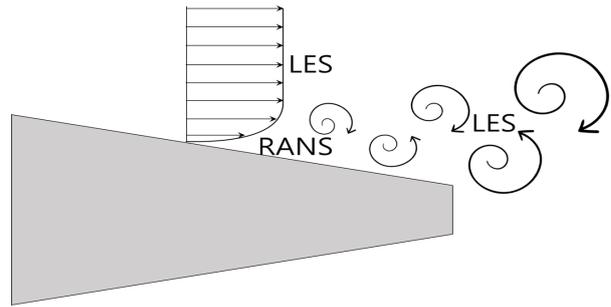


Fig. 1 Conceptual sketch of DES modeling

$$\mathbf{T}_{\text{model}} = f_{\Delta} \left(\frac{\Delta}{l_k} \right) \mathbf{T}_{\text{RANS}} \quad (2)$$

여기서, Δ 는 방정식이 적용되는 지점의 격자요소의 크기이고, l_k 는 난류길이스케일(turbulent length-scale)을 나타낸다. f_{Δ} 는 댐핑함수로서 본 연구에서 사용한 SST $k-\omega$ 난류모형과 LES 모델을 접목하는 DES법에서 정의하는 값이며 보다 상세한 정보는 본 논문이 사용한 범용 유동해석 프로그램 STAR-CCM+ (Siemens, 2018)에서 찾아 볼 수 있다.

Fig. 1에서 보인 개념도의 설명과 같이 DES법은 경계층(boundary layer)과 비회전 유동(irrotational flow) 영역에 대해 RANS법으로 해석하고 경계층 외부 영역은 LES해석을 적용하는 방법이다. 여기서 RANS법은 일반적인 평균 유동(mean flow)의 비정상 시간 스케일보다 작은 난류의 스케일을 해석할 수 있도록 난류모형이 적절히 수정되어야 한다. LES가 적용되는 영역은 경계층으로부터 수많은 와류가 박리가 되는 영역으로 격자의 의존도가 매우 높기 때문에 유동의 스케일에 맞는 격자를 생성하여 사용하여야 한다. 이러한 DES법 개발과 수치해석적 특성에 관련된 보다 상세한 설명은 Spalart et al. (1997)의 연구에서 얻을 수 있다.

본 논문에서는 수치해석을 위해 범용 프로그램 STAR-CCM+ (Siemens, 2018)을 활용하였다. 지배방정식의 시간적분은 2차 정도의 암시적 방법(implicit method)을 이용하고 공간에 대해서는 상류차분(Upwind Differencing, UD)과 혼합하는 2차 정도의 하이브리드 BCD(hybrid Bounded Central Differencing)를 사용하였다. BCD법의 정확도는 LES 해석에 대한 수치기법들의 영향을 살펴본 Adedoyin et al. (2015)의 연구결과에서 찾아 볼 수 있다. 이들의 연구에서 1차정도 UD법, 2차정도 UD법, 2차정도 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)법, 2차정도 CD법 그리고 본 논문에서 사용한 2차정도 BCD법을 적용하였을 때 BCD법이 개선된 LES 해석 결과를 주는 것을 알 수 있다.

3. 수치해석 결과

3.1 대상 잠수함 모델 및 계산영역

대상 잠수함은 함교와 선미 제어판이 부착되어 있는 SUBOFF

AFF8 모형이며 주요제원은 Table 1에서 볼 수 있다. 여기서, SUBOFF 잠수함 모델 길이는 수중상태에서 LOA=4.356m이고 수상상태에서 LPP =4.261m를 각각 나타낸다. 선박해양플랜트 연구소(이후, KRISO)의 대형캐비테이션널, LCT에서 SUBOFF 잠수함 모델의 선미 추진기 면에서 국부유동을 계측하였으며, 이후 본 수치해석 결과와 비교하였다. Fig. 2는 KRISO LCT 시험부에 설치된 잠수함 선체의 후미부를 보여주고 있다.

Length over all(LOA)	4.356m
Length between perpendiculars(LPP)	4.261m
Longitudinal center of buoyancy(LCB)	0.462 LOA
Maximum hull radius(Rmax)	0.254m
Displacement(∇)	0.718m ³
Wetted surface area(S)	6.338m ²



Fig. 2 SUBOFF model mounted in the LCT

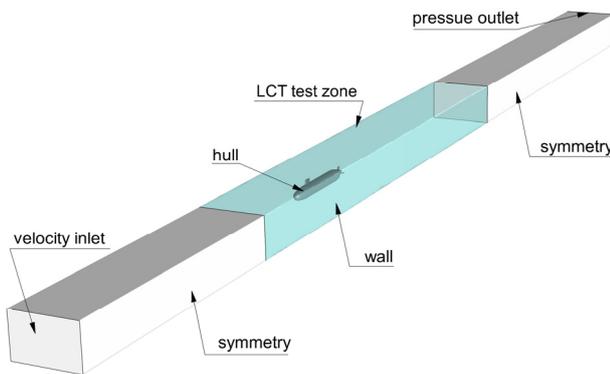


Fig. 3 Computational domin and boundary conditions

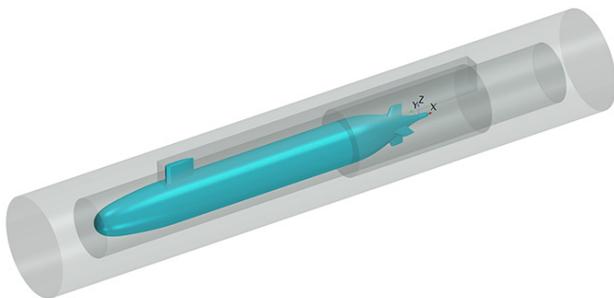


Fig. 4 Volumetric control volumes for grid refinement

본 논문에서는 LCT의 시험부를 계산영역(computational domain)으로 설정하였다. 여기서, 시험부의 길이, 폭 그리고 높이는 12.5m×2.8m×1.8m의 치수를 가진다. 계산영역의 모습과 경계조건은 Fig. 3에서 보여주고 있다. 그림과 같이 계산영역에서 유동의 유입면과 유출면이 실제 시험부보다 각각 선체길이의 2배와 2.5배로 더 먼 곳에 위치하도록 하였다. 계산영역의 상류에 있는 입구는 속도유입 경계(velocity inlet)로 설정하고, 계산영역의 출구는 압력유출 경계(pressure outlet)로 두었다. 잠수함 모형을 포함한 LCT의 시험부는 벽면 경계조건을 사용하고, 시험부 전후로 연장한 영역의 나머지 면들은 대칭 경계면(symmetry plane)으로 설정하였다.

3.2 수치 격자계

Fig. 4는 잠수함 주위 격자계 생성시 격자 집중 영역을 구분하고 각 영역에서의 유동의 특성을 고려하여 격자요소의 크기를 제어하기 위해 사용한 영역 체계를 보여주고 있다. 매우 작은 격자요소가 사용되는 경계층 영역을 제외하고 주로 함교(sail)와 함교에서 발생한 보오텍스가 이동하는 함교 후류의 선체와 선미 제어판을 포함 하는 영역에 조밀한 격자요소가 생성되도록 하였다.

격자계는 STAR-CCM+에서 Trimmer라 불리는 직교격자(Cartesian grid) 기반의 비정렬 격자계 생성법으로 만들었으며, 경계층 유동에 대한 적절한 해상도를 위해 선체 표면 경계층을 포함하는 일정 두께의 영역에 prism layer라 불리는 격자층을 두었다. 본 수치해석은 잠수함 벽면에서 격자의 무차원 거리 $y^+ = 1$ 을 유지하고 격자 의존성 검토를 위해 총 격자수가 17M(백만)인 가장 성긴 G1 격자계, 33.7M개의 G2 격자계 그리고 가장 조밀한 78M개의 G3 격자계에 대한 수치해석을 각각 수행하였다.

Table 2는 G1, G2 그리고 G3 격자계에 대한 주요 정보를 보여주고 있으며, LCT의 벽면에 대해서는 모든 격자계에서 동일하게 총 25개의 prism 격자층을 사용하였다. 표에서 볼 수 있는 최소 격자요소 크기는 경계층 영역 격자요소를 제외한 경계층 밖의 최소 격자요소 크기를 나타낸다. 여기서, G1 격자계는 8×10^{-3} m, G2 격자계는 4×10^{-3} m 그리고 G3 격자계는 2×10^{-3} m의 값을 가진다.

Fig. 5(a)는 가장 성긴 G1 격자계에서 잠수함 선체 길이 방향으로 잠수함의 표면과 그 주위 $y=0$ 인 단면에서 생성된 격자의 분포를 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 마찬가지로 가장 성긴

Table 2 Grid systems

	No. of grid	y^+	No. of prism layer	Minimum grid size
G1	17.0M	1	18 for hull 25 for LCT	8×10^{-3} m
G2	33.7M			4×10^{-3} m
G3	78.0M			2×10^{-3} m

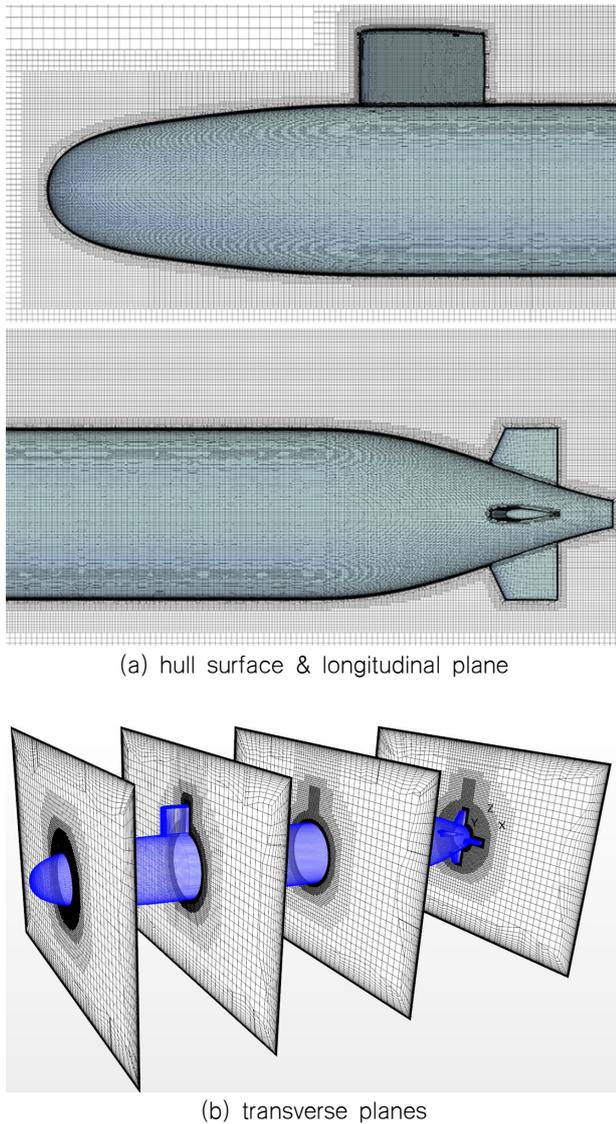


Fig. 5 Grid distributions around the hull

G1 격자계에서 잠수함 선수에서 선미까지 임의의 네 위치에서 LCT 시험부 단면의 벽면 경계층 격자 분포를 포함한 잠수함 선체 주위 격자분포를 보여주고 있다. 표 2에서 설명한 많은 와류가 발생할 수 있는 선체 근방과 함교에서 선미 제어판 영역에 조밀한 격자의 분포를 가지도록 하였다.

3.3 수치해석 조건 및 결과

LCT 모형시험 조건을 따라 잠수함 모형 주위 터널의 유속은 9m/s의 값의 사용하였으며, 이에 대응하는 Reynolds수는 약 3.9×10^7 이다. 수치해석은 SST $k-\omega$ 난류모형 기반의 DES법의 결과와 비교하기 위해 SST $k-\omega$ 난류모형의 RANS 해석도 함께 수행하였으며 RANS 해석은 향후 DES 해석 결과의 시간 평균 유동과 비교하기 위해 정상상태(steady state)조건으로 수행하였다. 수치해석에서 계산 시간 간격은 2×10^{-4} s를 사용하였으며, 전체 계산 시간은 1.5s이다. 여기서, DES의 해석의 초기

수렴의 가속화를 위해 RANS 해를 이용하였다. DES 해석 결과의 시간평균은 0.5s~1.5s 동안 수행하였다. 본 논문에서는 수치해석 결과의 검증을 위해서 먼저, Huang et al. (1992)이 풍동(wind tunnel)시험을 통해 SUBOFF AFF8 모델의 선체 표면에서 계측한 압력 및 마찰계수와 잠수함 프로펠러면에서 계측한 평균 유속 데이터를 활용하였다. 이후, KRISO LCT에서 LDV(Laser Doppler Velocimetry)로 계측한 프로펠러면 반류를 비교하였다.

Fig. 6은 잠수함 선체의 경계층 유동 해석에 사용된 prism 격자층의 벽면에서 계산된 무차원 거리 y^+ 값의 분포를 비교하고 있다. 세 격자 모두 동일한 prism 격자수와 분포를 사용하였기 때문에 DES결과에서 격자간 차이는 크지 않으며, y^+ 값은 대체로 2이하의 분포를 보여주고 있다. 이는 본 연구에서 계획한 $y^+=1$ 의 조건이 비교적 타당하게 잘 만족되었다고 판단할 수 있다. 가장 조밀한 G3 격자계에 대한 Fig. 6(a)의 RANS 결과와 Fig. 6(d)의 DES 결과도 전반적으로 서로 비슷하지만, 함교에서 발생한 말굽형 보오텍스(horseshoe vortex)의 궤적과 선미 제어판으로 이어지는 경사진 영역 이전 선체의 평행부가 끝단부에서 RANS와 DES의 결과가 약간의 차이를 보이고 있다. 또한 선미 제어판 사이에서 프로펠러면으로 들어가는 지점에서 DES의 y^+ 의 값이 RANS의 결과보다 작아진 영역을 볼 수 있다.

Fig. 7은 선체 주위에 발생한 와류 구조를 물리량 $\lambda-2$ 로 가시화하여 비교하고 있다. 먼저, RANS와 DES 시뮬레이션 결과들에서 일반적으로 잠수함 선체에서 발생하는 유동의 특징을 볼 수 있다. 먼저, 함교와 선체가 접하는 지점에서 발생하는 말굽형 보오텍스와 함교의 끝단(tip) 보오텍스 그리고 선미 제어판과 선체 접합부에서 발생하는 말굽형 보오텍스와 끝단 보오텍스들을 발견할 수 있다. 가장 조밀한 G3 격자계에 대한 RANS 해석의 결과는 격자의 조밀함과 관계없이 지배방정식의 정의대로

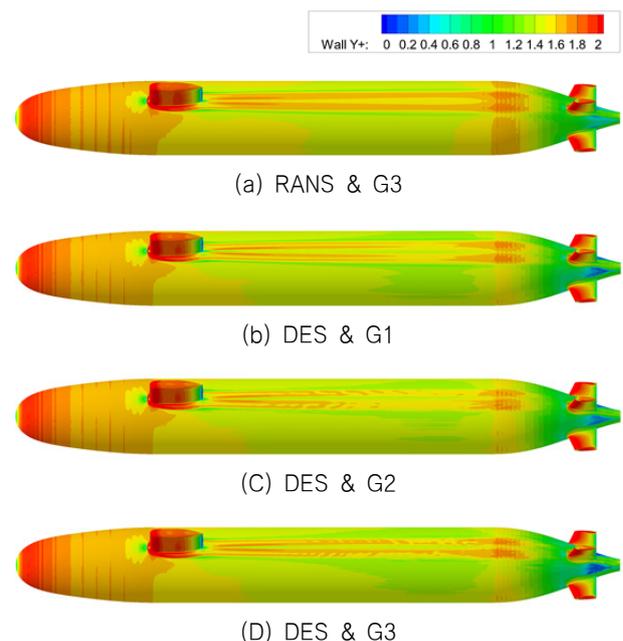


Fig. 6 Non-dimensional distance(y^+) distribution

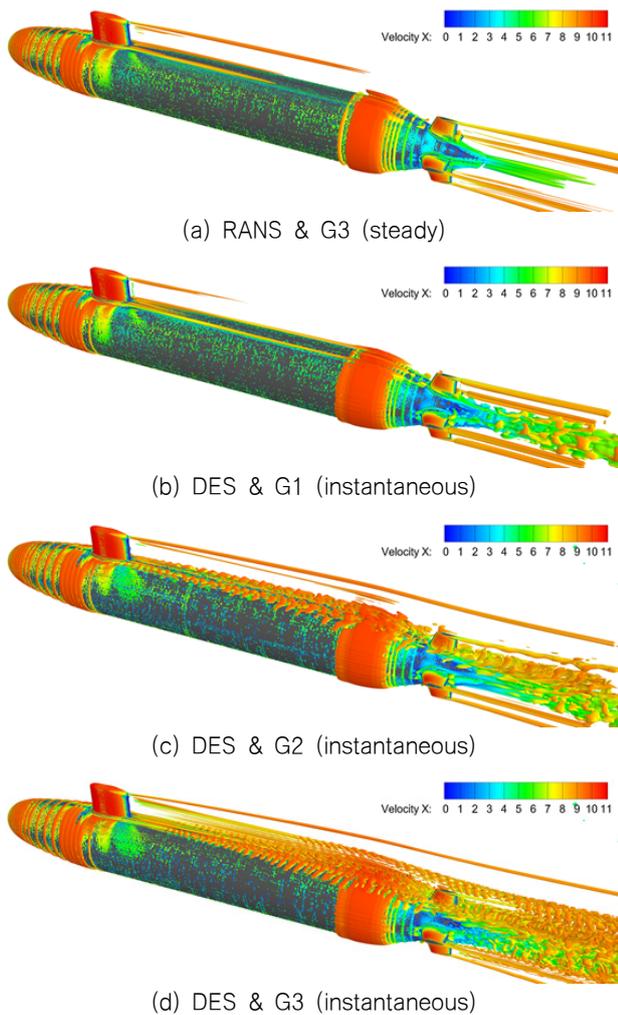


Fig. 7 Vortical structures around the hull contoured by x velocity

유동들이 시간평균되어 정상상태(steady state)로 나타나고 있어, 선체 부가물 후류의 복잡성이 거의 없는 것을 볼 수 있다. DES 해석의 경우 격자수의 증가에 따라 함교와 제어판에서 교란된 유동으로 인한 복잡한 와류구조가 발달하는 것을 알 수 있다. 그러나 격자요소의 크기가 크고 격자수가 충분하지 않은 G1 격자계의 경우 프로펠러면 후류를 제외하고 RANS 해석 결과와 다소 유사하게 나타나고 있다. 함교의 끝단 보오텍스의 경우 DES 해석에서 격자 해상도의 증가에 따라 유동장의 하류 먼 곳까지 수치감쇠 없이 흘러가는 현상을 보여주고 있다. 함교에서 발생한 말굽형 보오텍스는 함교 후방의 선체 경계층과의 상호작용으로 복잡한 와류를 생성하고 있고, 선미로 갈수록 그 폭이 다소 증가하여 선미 제어판으로 유입되고 있다. 이러한 함교의 영향으로 인한 복잡한 후류는 선미 제어판에서 발생한 보오텍스들과의 상호작용으로 잠수함 후류의 유동을 더욱 복잡하게 발달시키는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 선미 영역을 확대한 그림으로 같은 조밀한 격자계에 대한 RANS 해석과 DES 해석 결과를 비교하고 있다. 앞서, 설명한 바와 같이 LES보다 더 큰 난류 스케일을 해석하는

RANS 결과에서는 함교에서 선미 제어판으로 유입된 작은 규모의 와류 유동으로 인한 복잡한 상호작용을 볼 수 없다. 선미 제어판 상류의 복잡한 유동의 영향은 주로 위쪽 타(upper rudder)에서 나타나는 것을 알 수 있다. 결과적으로 상류에서 발달되는 이러한 난류유동의 영향은 프로펠러면에서 유속을 감소시키는 원인이 되며, 추진기 소음해석 관점에서 RANS 해석으로 해상할 수 없는 음역대의 유동소음을 DES 해석으로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 선체의 저항계수를 세 가지 격자계에 대한 DES 해석과 KRISO LCT 계측결과와 비교하고 있다. 함께 비교한 G3 격자계에 대한 RANS 결과를 포함해서 수치해석 결과들의 모형 시험 대비 오차는 약 4.4% ~ 4.8%의 범위를 가졌다. 앞서 설명한 바와 같이 DES 해석의 초기 해에 대한 수렴의 가속화를 위해 RANS해를 이용하였으며, 약 0.5s 이후 저항값이 수렴하는 것을 볼 수 있다.

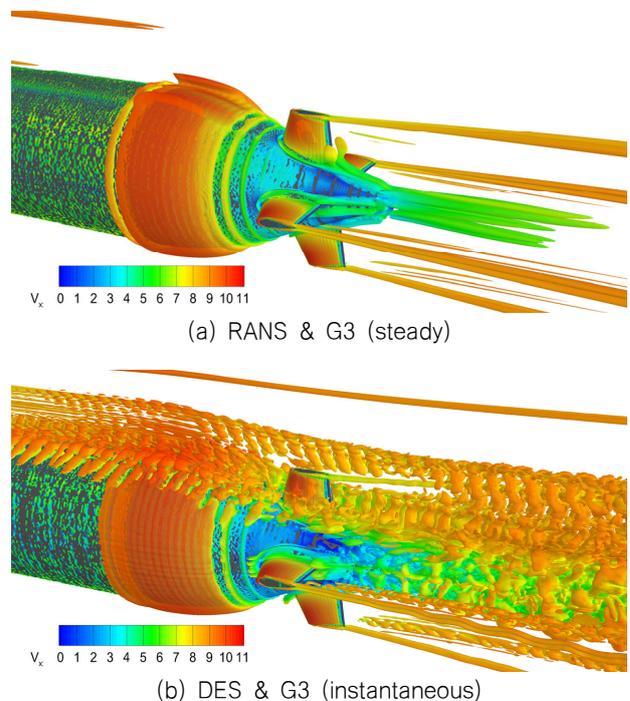


Fig. 8 Vortical structures around the stern contoured by x velocity

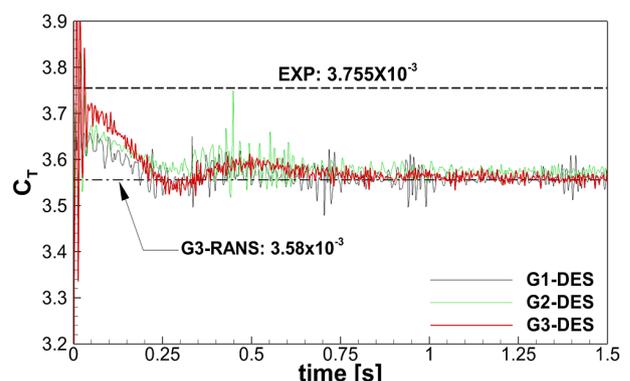


Fig. 9 Convergence of the resistance coefficient

Fig. 10(a)는 DES로 해석한 선체 표면 전체의 압력분포를 보여주고 있으며, Fig. 10(b)와 (c)에서는 선미 영역에서 RANS와 DES 해석 결과의 선체 표면 압력분포를 비교하고 있다. 압력분포에서는 두 수치해석 결과의 차이가 크지 않음을 볼 수 있다. 다만, 앞서 선미 제어판 사이의 y^+ 분포와 와류분포의 차이를 발견할 수 있었는데, 압력의 경우 DES 결과에서 미소하지만 제어판 사이에서 증가된 영역을 볼 수 있다.

Fig. 11은 잠수함 선체와 $y=0$ 위치의 종단면이 만나 생성되는 잠수함 선체의 윤곽선(profile)을 따라 측정된 선체 표면의 압력분포와 수치해석 결과들을 비교하고 있다. 유동의 방향과 평행한 잠수함 선체에서는 압력의 절대값 크기가 작으며 잠수함 선수의 정체점(stagnation point)과 함교 그리고 선미 제어판의 타 표면에서의 정체점과 그 주위로 압력의 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 한편, 수치해석 결과는 격자계 및 RANS와 DES 해석간 차이가 거의 미소한 것을 알 수 있다 (Bhushan et al., 2013). 한편, Huang et al. (1992)의 풍동시험의 Reynolds수는 1.2×10^7 으로 본 수치해석의 3.9×10^7 와 차이가 있다. Reynolds수 1.33×10^7 에서 3.98×10^7 까지 비교한 Lin and Li (2020)의 결과에서 압력계수의 본 수치해석과 같이 Reynolds수 변화에 따른 변화가 거의 미소하고 마찰계수의 경우 Reynolds수 증가에 따라 약간 감소하는 경향을 보이지만 여전히 실험결과와 만족스러운 일치를 보여주고 있어, 대상 잠수함에 대한 수치해석 결과의 검증에는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

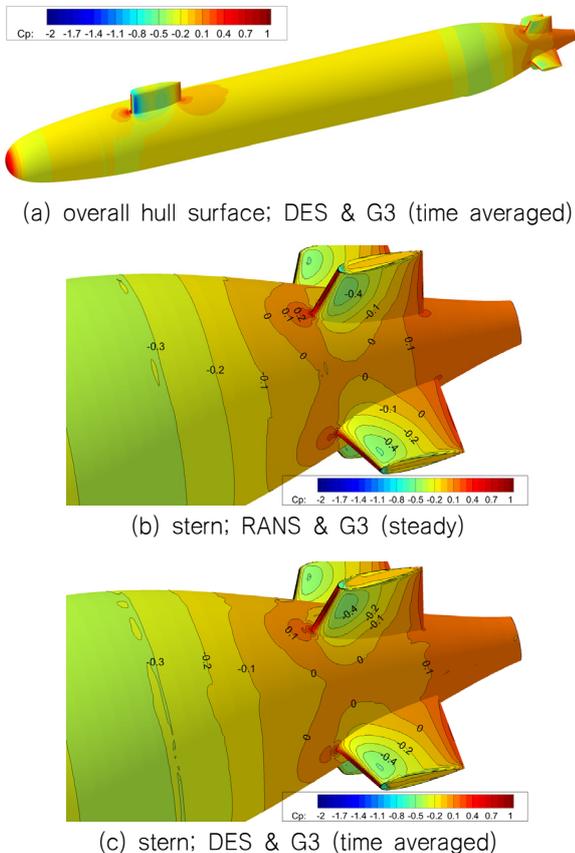


Fig. 10 Pressure coefficient on the hull surface

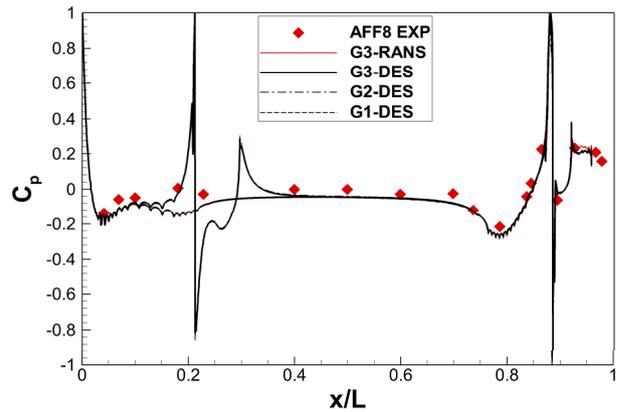


Fig. 11 Comparison of pressure coefficient

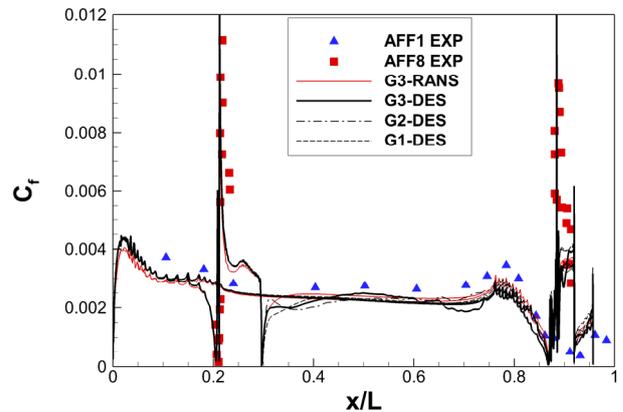


Fig. 12 Comparison of friction coefficient

Fig. 12은 Fig. 11과 같은 잠수함 상하 선체 윤곽선을 따라 계측한 마찰계수와 수치해석 결과들을 비교하고 있다. 실험결과와 비교하여 함교와 제어판이 없는 AFF1 모델에 대해 측정된 값과 AFF8 모델의 함교와 선미 부가물에서 측정된 값을 함께 비교하고 있다. 앞서 격자 및 RANS와 DES 해석간 유동의 차이가 있어 선체 주위로 유속의 차이가 만드는 마찰계수들의 차이를 볼 수 있다. 다만, 실험결과와의 비교에서는 압력계수의 비교와 마찬가지로 대체로 모두 적절한 일치를 보여주고 있다. 함교와 선미의 타 위치에서 보이는 높고 낮은 마찰계수 값의 변화는 함교와 선체가 접하는 영역 유동과 함교의 전연(leading edge)에서 만들어지는 유동의 정체점 그리고 함교의 캡(cap)에서 유속의 빠른 증가의 원인들의 결과이다. 선미 타의 경우도 함교에 대응되는 비슷한 위치들에서 나타나는 유사한 유동의 특성으로 나타난 결과이다.

Fig. 13은 RANS와 DES 해석에서 계산한 함교 주위에 생성된 말굽형 보오텍스의 구조를 비교하고 있다. DES 해석의 유동의 비정상 특성은 함교의 후류에서 잘 나타나고 있으며, 특히 말굽형 보오텍스가 경계층에서 발달하는 헤어핀 보오텍스(hairpin vortex)와 상호작용하여 변형되는 모습을 볼 수 있다.

Fig. 14는 Fig. 12의 결과에서 함교 전연 근방의 마찰계수 분포를 확대한 그림과 RANS와 DES 해석간 함교와 함교 주위 표면 마찰계수 분포를 비교하고 있다. 그림에 표시한, Fig. 12에서

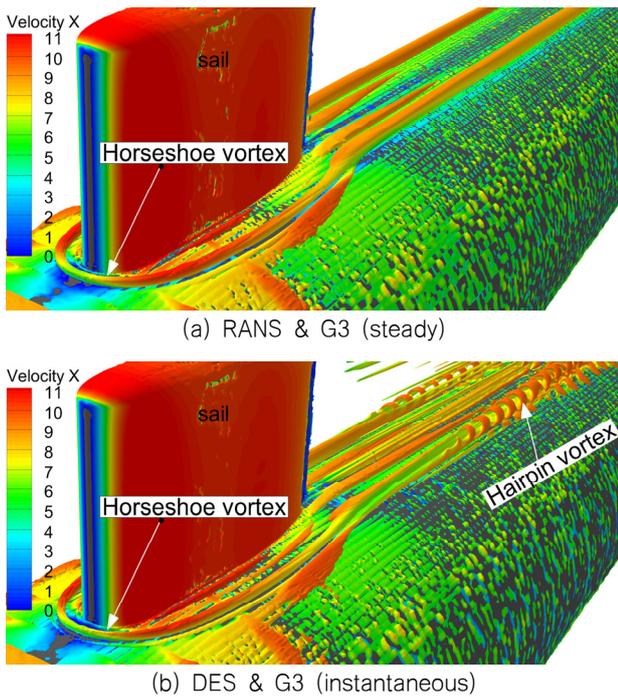


Fig. 13 Vortical structure around the sail

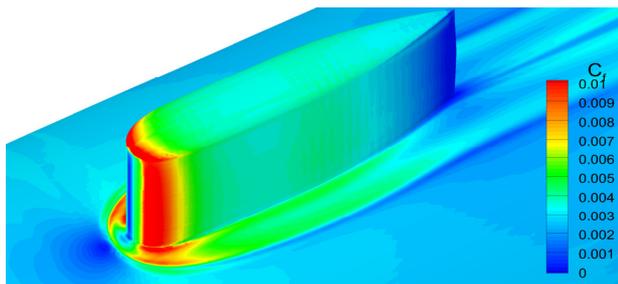
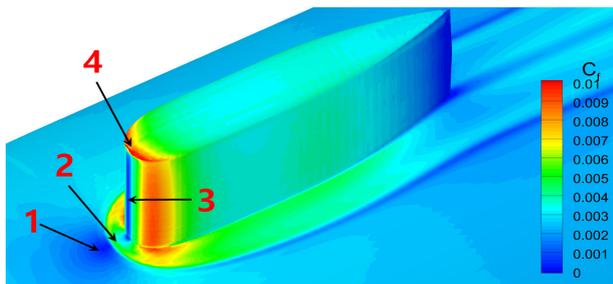
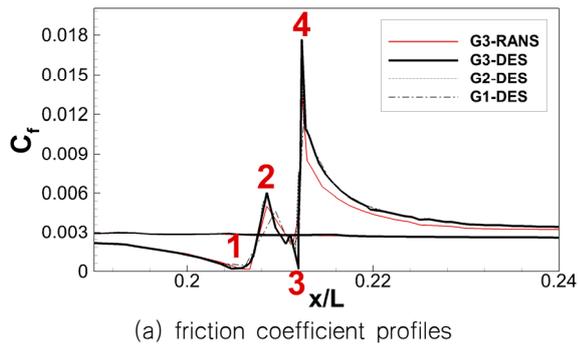


Fig. 14 Friction coefficient distribution around the sail

볼 수 있는 말굽형 보오텍스가 생성되는 함교 전연에서 조금 떨어진 상류의 선체 표면 1위치에서 낮은 값을 보여주고 있으며, 전연과 가까운 2위치로 접근하면서 마찰계수 값이 다소 증가하다 함교의 전연 정체점 3위치에서 값이 영으로 떨어지고 있다. 이후 함교의 캡이 시작되는 4위치에서 마찰계수의 값이 크게 증가하고 있다. 앞서, Fig. 11에서 비교한 실험결과에서도 함교 전연의 정체점을 지난 캡의 위치에서 마찰계수가 크게 증가하는 경향을 볼 수 있다. 난류모형간 비교에서는 함교의 마찰계수가 큰 영역에서 DES의 결과가 RANS의 결과보다 더 큰 값을 보여주고 있다. 이와 비슷한 경향을 Bhushan et al. (2013)의 결과에서도 볼 수 있다.

Fig 15는 선미 영역의 $y=0$ 에 위치한 선체 주위 종단면 내에서 x -방향 순간 유속 분포를 격자계 및 RANS와 DES 해석간 차이를 비교하고 있다. 함교 후류의 영향을 받는 선미의 위쪽 방향 타가 부착된 선체의 경사진 영역으로 유입되는 유속이 대체로

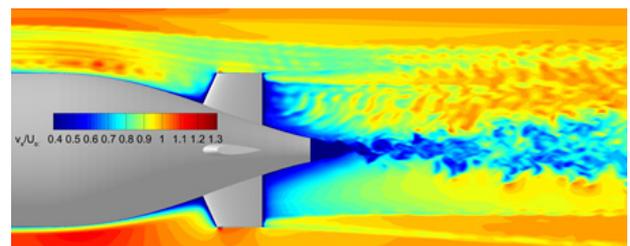
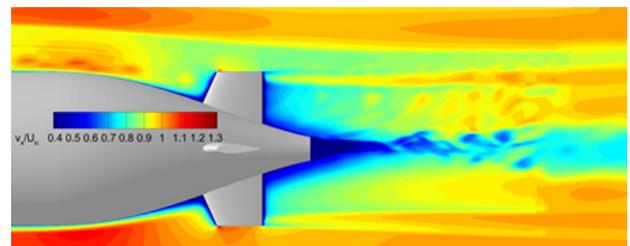
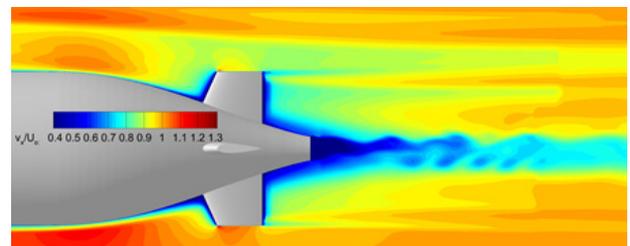
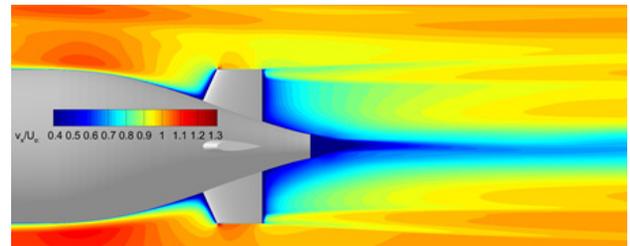


Fig. 15 x -velocity distribution on the longitudinal plane

잠수함 바닥(keel) 쪽보다 느려진 것을 볼 수 있다. 격자수의 증가에 따라 작은 스케일의 유동의 진동이 더 명확하게 해석되고 있으며 잠수함의 후류에서 부가물들에서 유기된 유동들의 상호작용이 복잡하게 나타나고 있다.

Fig. 16은 Fig. 15에서 설명한 $y=0$ 의 종단면 내 x 방향 프로펠러 위치에서 12시 방향으로 허브 반경 r_0 에서 반경 증가에 따른 x 방향 평균 유속 분포를 풍동시험 (Huang et al., 1992)에서

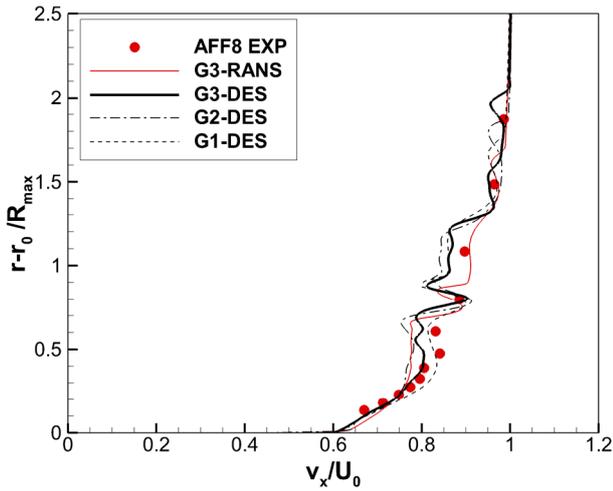


Fig. 16 Comparison of time averaged streamwise velocity

계측한 결과와 수치해석 결과들을 비교하고 있다. 그림에서 R_{max} 는 잠수함 동체의 반경이다. 그림에서 무차원 반경, $r-r_0/R_{max}=1$ 위치는 선미 위쪽 타의 끝단 위치이고 무차원 반경 2는 함교의 높이 방향 끝단 위치이다. 본 연구에서 프로펠러의 반경 $R_p=0.131m$ 이며, 이때 그림에서 프로펠러 반경의 끝단 위치는 무차원 반경 값 약 0.36이다. 속도 분포는 반경별 부가물 위치에 따라 이들의 후류 영향을 반영하고 있다. 선체의 경계층과 함교 및 선미 위쪽 타의 후류 영향이 복합적으로 나타나는 낮은 무차원 반경 영역에서 유속의 감소가 크다. 모든 수치해석 결과는 대체로 실험결과와 비슷한 경향을 보여주고 있으며, 가장 조밀한 격자 G3에 대한 DES의 결과의 경우 무차원 반경 0.5~0.7 그리고 1.1 위치 근방의 실험값을 제외하고 만족스러운 일치를 보여주고 있다.

Fig. 17은 프로펠러면($x/L_{OA}=0.97$)에서 x 방향 순간 유속과 와도 크기(vorticity magnitude)의 분포에 대해 RANS와 DES 해석간 차이를 비교하고 있다. 프로펠러면 유속 분포에서는 함교에서 발생한 말굽형 및 날개 끝단 보오텍스의 후류와 선미 제어판에서 발생한 같은 종류의 보오텍스들의 영향을 모두 관찰할 수 있다. RANS 해석 결과에서 12시 방향 V형태의 유속 분포는 함교에서 발생한 말굽형 보오텍스의 영향으로 나타났으며, 같은 위치의 DES의 순간 유속분포에서도 선미 위쪽 타 주위 유동과 상호작용하여 복잡한 거동을 보이는 말굽형 보오텍스의 영향을

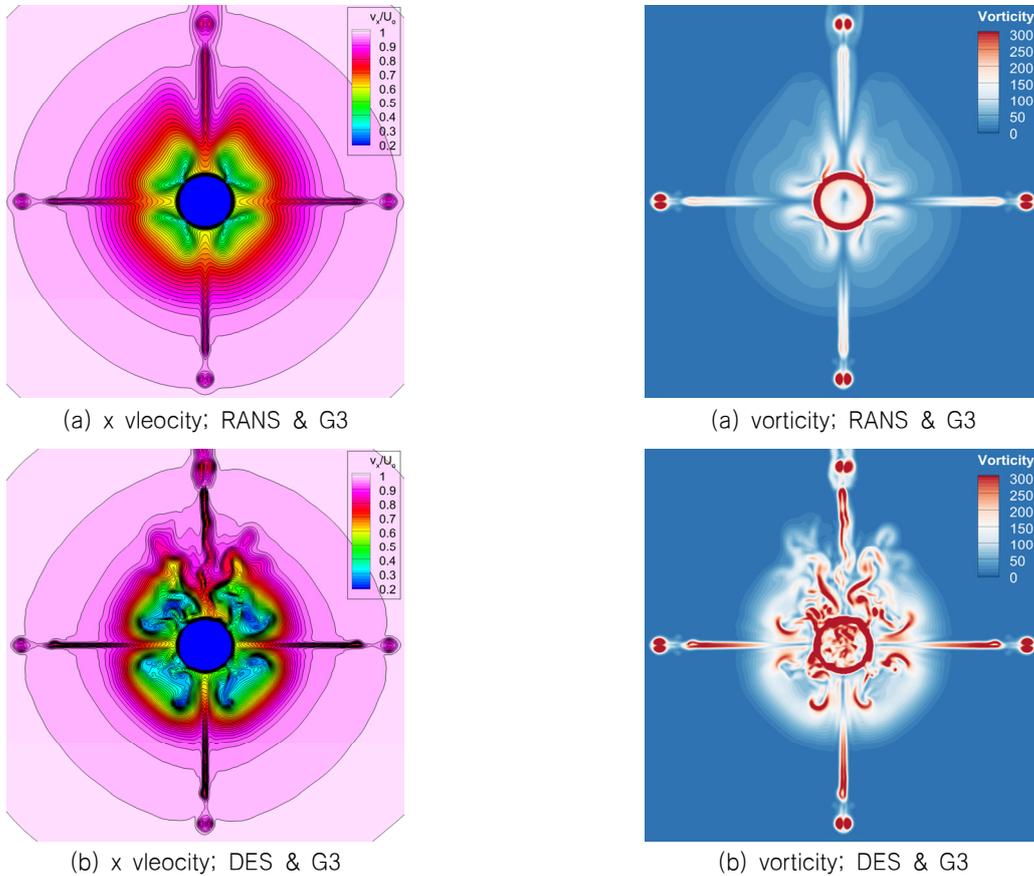
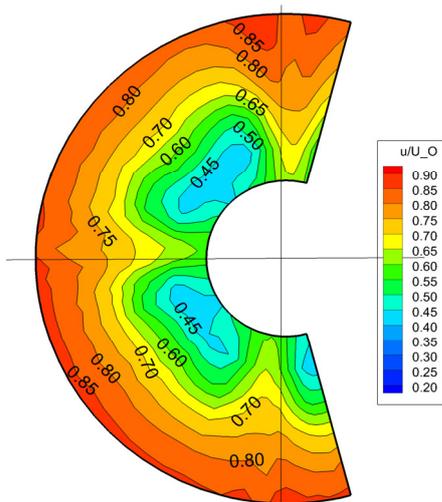
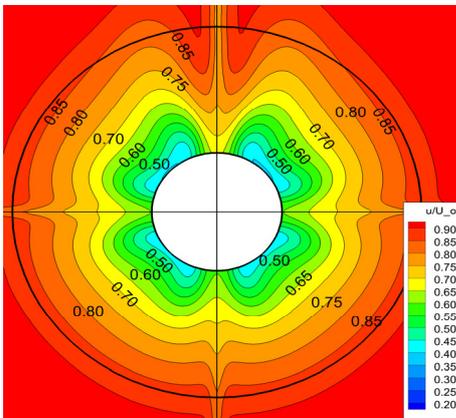


Fig. 17 x -velocity and vorticity magnitude distributions at the propeller plane

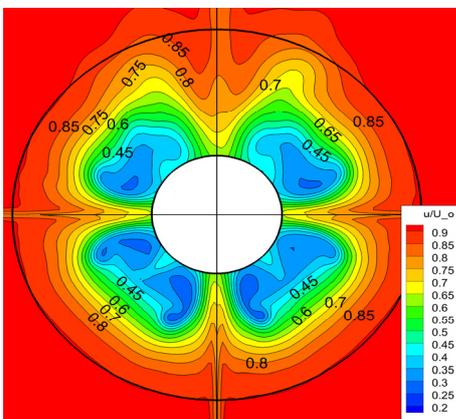
볼 수 있다. 선미 제어판들 사이 영역은 제어판에서 발생한 말굽형 보오텍스와 그들의 경계층과의 복잡한 상호작용으로 유속이 느려졌다. 여기서, DES 해석 결과가 RANS 결과보다 유속 감소의 영역이 약간 큰 것을 볼 수 있다. DES 해석 결과에서 프로펠러면 내 낮은 반경에서 나타나는 이러한 유속 감소가 비교적 큰 결과의 타당성은 이후 LCT에서 계측한 프로펠러면 반류 계측 결과의 비교에서 설명하였다.



(a) LCT EXP.



(b) RANS & G3



(c) DES & G3

Fig. 18 Nominal wake distribution at $x/LOA=0.97$

Fig. 18은 KRISO LCT에서 LDV로 계측한 프로펠러면 반류와 RANS와 DES 해석결과를 비교하고 있다. 실험과 수치해석 결과에서 볼 수 있는 원 윤곽은 프로펠러 반경의 1.1배까지 확장한 프로펠러 영역이다. RANS 해석결과는 반경이 큰 영역에서 실험결과와 좋은 일치를 보여주고 있지만, 낮은 반경에서 계측 반류에서 볼 수 있는 무차원 0.45의 영역이 더 작은 반경으로 축소되어 있는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 실험결과와 만족스러운 일치를 보이는 듯하지만 낮은 반경에서 차이가 있다. DES의 결과는 반경이 큰 무차원 반경 1.1 근방을 살펴볼 때 유속이 실험보다 약간 빠른 것을 알 수 있다. 반면, 실험의 유속 0.45의 영역을 RANS 해석 결과보다 타당하게 추정하고 있다. 다만, 무차원 유속 0.45 영역에 그보다 낮은 유속 분포를 발견할 수 있다. 이러한 낮은 유속 분포로 인해 겉보기 비교에서는 RANS보다 차이가 있어 보인다.

Fig. 19는 무차원 반경 0.3에서 1.1까지 주어진 반경에서 x 방향 유속을 원주방향 평균을 취한 값에 대해 RANS 해석과 DES 해석 결과를 비교하고 있다. Fig. 16에서 설명한 두 수치해석간 반류 추정 특성을 본 그림에서 볼 수 있다. 무차원 반경 0.8이상에서 RANS 해석 결과가 계측 결과와 좋은 일치를 보여주고 있다. 그러나 낮은 반경에서는 RANS로 추정된 반류 속도가 실험보다 큰 것을 알 수 있다. 반면 DES 해석 결과는 반대로 작은 경향을 보여준다. 비슷한 경향을 Bhusan et al. (2013)의 결과에서도 볼 수 있다. 그러나 DES 해석 결과에서 실험과 일치하는 잠수함 반류의 물리적 특성을 발견할 수 있다. 원주 방향으로 평균된 유속의 크기는 반경이 작아지면 함께 감소하지만, 실험에서 무차원 반류 0.5이하에서 오히려 평균된 유속 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 RANS 해석에서는 추정을 못 하고 있으며, DES 해석에서 비슷한 경향을 잘 재현하고 있다. 본 연구에서 사용한 SST $k-\omega$ 모델 기반의 DES법이 모델링 오차등으로 인해 문제에 따라 정량적인 차이를 보일 수 있으나, RANS 해석보다 작은 스케일의 난류유동 상호작용 해석이 가능함에 따라 관련된 물리적 현상을 타당하게 추정할 것으로 판단된다.

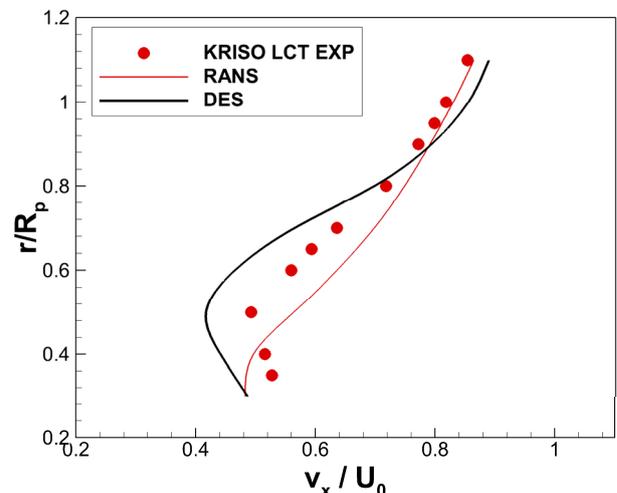


Fig. 19 Comparison of averaged x velocity at $x/LOA=0.97$

4. 결론

본 논문에서는 SUBOFF 잠수함 모델을 대상으로 RANS법의 SST $k-\omega$ 난류모형 기반의 DES법으로 프로펠러면으로 유입되는 선체-부가물의 상호작용 유동을 해석한 결과를 소개하였다.

알려진 모형시험 결과에 대한 검증에서 선체 표면 압력 분포의 경우 RANS법과 DES법의 차이는 미소하였다. 선체 표면 마찰계수의 경우 부가물 주위에서 DES 해석 결과가 RANS 결과보다 약간 큰 값을 보였으며, 이러한 결과는 타 연구자들의 결과와 같은 경향을 가졌다.

DES 해석 수준에서 잠수함 주위에 발생하는 복잡한 와류 유동은 주로 부가물에 기인된 보오텍스와 이들의 선체 경계층 및 다른 부가물에서 발생한 유동들과의 상호작용으로 발생하였다. 수치해석에서 얻은 복잡한 와류 유동의 규모와 그 스케일은 격자에 대해 높은 의존성을 가지는 것을 볼 수 있었다.

잠수함 선체와 부가물의 상호작용 유동으로 인한 유동의 복잡성은 추진기면 반류에 기록되는 것을 볼 수 있었으며 RANS와 DES 해석 결과는 각 수치기법의 모델링 오차를 내포하였다. RANS법은 프로펠러면 큰 반경에서 실험결과와 좋은 일치치를 보였지만 낮은 반경에서 다소 차이를 보였다. DES 해석결과는 반대의 경향을 보였지만, 낮은 반경에서 실험결과가 내포하고 있는 물리적 현상을 타당하게 추정하였다. 이는 정량적인 차이는 있지만, RANS 스케일보다 작고 복잡한 와류 유동이 지배적인 낮은 반경에서 DES 해석 결과의 타당성을 보여주는 결과로 판단된다.

향후, DES해석법을 적용한 자항성능 해석과 잠수함 추진기 소음 해석에 필요한 캐비테이션 현상을 포함한 다양한 조건의 유동 시뮬레이션을 수행할 예정이다.

후 기

본 논문은 2016학년도 동의대학교 연구년 지원과 방위사업청과 국방과학연구소가 지원한 선박해양플랜트연구소 ‘미래잠수함 저소음추진기 특화연구실’ 사업의 지원으로 작성되었습니다.

References

Alin, N. et al., 2010. Current capabilities of DES and LES for submarines at straight course. *Journal of Ship Research*, 54(3), pp.184-196.

Bhushan, S., Alam, M.F., & Walters, D.K., 2013, Evaluation of hybrid RANS/LES models for prediction of flow around surface combatant and Suboff geometries. *Computers & Fluids*, 88, pp.834-849.

Bull, P., 1996. The validation of CFD predictions of nominal wake for the SUBOFF fully appended geometry. 21st *Symposium on Naval Hydrodynamics*, Trondheim, Norway, 24-28 June 1996.

Byeon, C.Y., Kim, J.I., Park, I.R., & Seol, H.S., 2018, Resistance and self-propulsion simulations for the darpa suboff submarine by using RANS method. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 23(3), pp.36-46.

Chase, N., 2012. *Simulations of the DARPA SUBOFF submarine including self-propulsion with the E1619 propeller*. Master of Science Thesis, University of Iowa.

Crook, B., 1990. *Resistance for DARPA SUBOFF as represented by model 5470*. David Taylor Research Center Report DTRC/SHD-1298-07.

Groves, N., Huang, T., & Chang, M., 1989. *Geometric characteristics of DARPA SUBOFF models*. Bethesda, MD : David Taylor Research Center.

Huang, T.T. et al., 1992. Measurements of flows over an axisymmetric body with various appendages in a wind tunnel: the DARPA SUBOFF experimental program. *19th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Seoul, South Korea, 23-28 August.

Jung, J.H., Jeong, K.L., Gill, J.H., & Jung, D., 2019, Large eddy simulation of free motion of marine riser using OpenFOAM. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(5), pp. 387-393.

Jung, J.H. et al., 2012. Large eddy simulation of flow around twisted offshore structure with drag reduction and vortex suppression. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(5), pp.440-446.

Lee, S.B., Park, D.W., & Paik, K.J., 2017. Grid tests for large eddy simulation of transitional flows around turbulence stimulators. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 23(1), pp.112-121.

Lin, Y.H., & Li, X.C., 2020, The investigation of a sliding mesh model for hydrodynamic analysis of a SUBOFF model in turbulent flow fields. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), pp.1-19.

Park, I.R., Kim, J.I., Suh, S.B., & Seol, H.S., 2019, Numerical study on the resistance and self-propulsion of the suboff submarine model in the cavitation tunnel. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 24(3), pp.50-58.

Park, K.S., Koo, B.G., Park, W.G., & Chun, H.H., 2004. Turbulent flow analysis around circular cylinder and airfoil by large eddy simulation with Smagorinsky model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(4), pp.1-8.

Roddy, F., 1990. *Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC model 5470) from captive-model*

- experiments*. David Taylor Research Center Report DTRC/SHD-1298-08.
- Sezen, S., Dogrul, A., Delen, C. & Bal, S., 2018. Investigation of self-propulsion of DARPA SUBOFF by RANS method. *Ocean Engineering*, 150, pp.258-271.
- Siemens, 2018. *STAR-CCM+ 11.04 User Guide*, URL: <https://support.industrysoftware.automation.siemens.com/general/documentation.shtml> [Accessed 1 January 2018].
- Spalart, P.R., Jou, W.H., Strelets, M., & Allmaras, S.R., 1997. Comments on the feasibility of les for wings, and on a hybrid rans/les approach, in *Advances in DNS/LES*, Liu C., Liu Z. (Eds.), *Proceedings of 1st AFOSR International Conference on DNS/LES*, August 4-8, 1997, Ruston, LA (1997), pp. 137-147.
- Toxopeus, S., 2008. Viscous-flow calculations for bare hull DARPA SUBOFF submarine at incidence. *International Shipbuilding Progress*, 55, pp.227-251.
- Yoon, H.S., Koo, B.G., El-sammi, O.A., & Chun, H.H., 2004. Development of numerical tool for the DNS/LES of turbulent flow for frictional drag reduction. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(1), pp.47-54.



서성부



박일룡