



하이브리드 난류 모델을 이용한 전류고정덕트 후류의 고정도 수치 해석

강민재¹·정재환²·조석규²·허재욱³·김상현³·이상봉^{1,†}
동아대학교 조선해양플랜트공학과¹
선박해양플랜트연구소²
현대중공업 선박해양연구소³

Computational Simulations of Turbulent Wake Behind a Pre-Swirl Duct Using a Hybrid Turbulence Model with High Fidelity

Min Jae Kang¹·Jae Hwan Jung²·Seok Kyu Cho²·Jea-Wook Hur³·Sanghyeon Kim³·Sang Bong Lee^{1,†}
Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University¹
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering²
Ship Performance Research Department, Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries³

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.

A hybrid turbulence model has developed by combining a sub-grid scale model using dynamic k equation in LES with $k-\omega$ SST model of RANS equation. To ascertain potential applicability of the hybrid turbulence model, fully developed turbulent channel flows at $Re_\tau = 180$ have been simulated of which computational domain has a top wall with coarse cells and a bottom wall with fine cells. The streamwise mean velocity and turbulent intensity profiles showed a good agreement with DNS data when using the hybrid model rather than using a single model in $k-\omega$ SST or dynamic k equation models. Computational simulations of turbulent flows around KVLC2 with a pre-swirl duct have been mainly performed using the hybrid turbulence model. Compared to the results obtained from RANS simulation with $k-\omega$ SST model as well as LES with dynamic k equation SGS model, turbulent wakes of the duct in the present simulation using the hybrid turbulence model were very similar to that of LES. Also, the resistances acting on hull, rudder and duct in hybrid turbulence model were similar to those in RANS simulation whereas the viscous forces acting on the hull in LES had a significant error due to coarse cells inappropriate to the sub-grid scale model.

Keywords : Hybrid turbulence model(하이브리드 난류 모델), Pre-swirl duct(선미 덕트), OpenFOAM(오픈폼)

1. 서론

최근 들어 신조 선박 건조 시, 선박 배출 온실 가스 감축과 연료 소모 감소를 통한 경제성 개선 등을 목적으로 선미에 전류 고정덕트(pre-swirl duct)를 설치하는 경우가 많다. 이러한 에너지 절감 장치는 프로펠러의 전류에 설치된 덕트를 통해 추진기로 유입되는 유동의 속도와 각도를 변경시킴으로써 프로펠러의 추진 효율을 향상시키는 원리에 기반하고 있다. 따라서 덕트의 형상을 최적화함과 동시에 프로펠러에 유입되는 흐름을 보다 정밀하게 제어하기 위해 덕트 내부 혹은 외부에 고정형 날개를 설치하기도 한다.

대표적인 사례로, LNG 운반선에서 비대칭 전류고정날개의 형상 변화에 대해 수치 해석 및 모형 시험을 통한 저항 성능을 추정하고, 실선에서의 성능 변화를 추정한 연구 결과가 발표되었다(Lee et al., 2016). 또한 벌크 운반선에 설치한 덕트에 대해 직경, 코드 길이, 상하부 경사각을 설계 변수로 설정하고, 고정날개에 대해 코드직경비, 캠버코드비, 두께직경비, 피치각을 설계 변수로 설정하여 형상 최적화를 통해 7% 이상 추진 효율을 개선하기도 하였다(Yoo et al., 2019). 공개된 선형인 KVLC2에 대해 KP458 프로펠러의 전류에 4개의 비대칭 전류 고정날개를 설치하여 저항 성능에 대한 수치 해석과 모형 시험을 통해 전달마력의 감소를 확인한 연구 결과도 보고된 바 있다

(Lee et al., 2019). 이러한 전류고정덕트에 대해 수치해석 기반으로 최적 설계를 찾고, 캐비테이션 성능까지 관측함으로써 전류고정덕트가 저항 및 자항 성능 뿐만 아니라 프로펠러의 캐비테이션 성능에 영향을 미칠 수 있음을 밝혔다 (Shin et al., 2013b).

이상의 연구에서 밝혀진 바와 같이 전류고정덕트나 날개에 대한 최적 설계 인자를 도출함으로써 프로펠러의 추진효율을 개선할 수 있으므로, 최근 각 조선소에서는 전류고정덕트를 설치한 선박을 많이 건조하고 있다. 그러나 덕트나 날개의 받음각에 따라 부가물 후류에서 발생하는 난류 교란으로 인해 프로펠러에서 국소적인 캐비테이션이 발생할 가능성에 대한 우려도 여전히 상존한다. 이러한 이유로 Shin et al. (2013a)은 대형원유운반선에 서로 다른 전류고정덕트를 설치하였을 때 캐비테이션 성능을 관찰하기 위해 공동터널에서 모형 시험을 수행하였다. 다양한 형상의 전류고정덕트와 날개를 설계하는 단계에서는 이러한 모형시험을 상시적으로 수행할 수 없으므로 현업에서는 수치해석을 통해 선형, 부가물, 프로펠러의 성능을 평가하고 설계 개선안을 도출하고 있다. 앞서 소개한 기존의 연구 결과들에서도 모형 시험으로 검증하기 이전에 수치해석을 통해 부가물의 형상을 최적화하는 과정을 거쳤다. 대개의 경우 효율적인 수치해석 수행을 위해 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 기반의 난류 모델을 사용하되, 필요한 경우 덕트 주변 및 후류에 격자를 밀집시키는 방식으로 덕트 후류의 수치 정확도를 높이고자 하였다. RANS 계열의 난류 모델은 평균 유속 분포, 프로펠러의 추진 효율 등과 같이 시간 평균된 물리량을 효율적으로 예측할 수 있는 장점을 갖고 있으나, 일점(one point) 기반의 난류 모델이 갖는 태생적 특성으로 인해 격자를 밀집시키더라도 유동의 시공간 변동량에 대한 정밀도 향상에는 한계가 있다. 즉 격자가 조밀할수록 난류점성(turbulent viscosity)항의 크기는 작아져야 하고, 콜모고로프 길이 척도를 만족하는 격자 조밀도에서는 난류점성항이 이론적으로 0이 되는 것이 바람직한 난류 모델의 거동이다. 그러나 RANS 계열의 모델은 일점 기반의 난류에너지, 난류에너지 소산율 혹은 주파수를 사용하여 난류점성항을 모델링하고 있으므로 격자가 조밀해지더라도 난류점성항이 0이 아닌 값으로 수렴하는 특성을 지닌다. 이러한 특성으로 인해 난류 유동의 시공간 변동 특성을 정밀하게 예측하기 어렵다. 반면 대형 와 모사(Large Eddy Simulation, LES)는 격자 크기를 반영한 필터링을 통해 아격자(sub-grid scale) 모델을 도출하므로 격자가 조밀해짐에 따라 모델항의 크기가 감소하는 장점이 있다. 그러나 지나치게 성긴 격자나 낮은 차분 정확도를 적용하는 경우 아격자 모델이 비물리적 거동을 보이기 때문에 유동장의 비등방적 특성을 고려하여 격자 밀집도와 차분 정확도를 결정해야 한다. 만일 매우 성긴 격자계에서 LES를 수행하는 경우 평균 속도장이나 선체 저항 등과 같은 물리량 등에서 발생하는 오차가 RANS 계열의 난류 모델보다 더 커질 수 있다.

이러한 난류 모델의 특성을 고려할 때, 전류고정덕트 후류에서 발생하는 난류 교란은 RANS 계열의 난류 모델에서 예측하

기 어렵기 때문에 덕트 후류의 고정도 해석을 위해 아격자 모델을 사용한 LES 해석을 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 전류고정덕트 후류의 정밀도 향상을 위해 LES 계열의 아격자 모델을 사용하기 위해서는 덕트 주변뿐만 아니라 상류에 해당하는 선체 주변도 아격자 모델이 의미있게 작동할 수 있을 정도로 충분히 조밀한 격자를 사용해야 한다. 모형선에 해당하는 레이놀즈수($Re=1 \times 10^7$)에서 ITTC-1957의 벽면마찰계수($c_f=0.003$)를 사용하여 모형선 크기에 해당하는 평판의 직접 수치모사(direct numerical simulation, DNS)의 벽단위 격자 기준을 적용할 경우 선체 주위 유동 해석에 천억 개의 수준의 격자수가 필요함을 예상할 수 있다. KCS(KRISO Container Ship)의 설계 속도 24 knot에 대해 축척비 31.6을 적용한 예를 들면, 주 유동 방향 길이 약 7.3 m에 대해 $\Delta x^+ \sim 20$ 를 적용하는 경우 약 31,000개, 횡 방향 길이(폭 $\times 2 \times$ 흘수) 약 1.7 m에 대해 $\Delta z^+ \sim 5$ 를 적용하는 경우 약 29,000개, 벽면 첫 번째 격자 $\Delta y^+ \sim 0.2$ 에서 시작하여 연신을 1.1을 적용하여 선박 길이에 해당하는 계산 영역을 구성하는 경우 약 128개의 격자가 필요하므로 산술적으로 1,140억 개의 격자가 생성됨을 알 수 있다. 이는 모형선에 해당하는 평판에 대한 격자 기준이며, 선수에서 입구까지의 거리와 선미에서 출구까지의 거리에 해당하는 주유동 방향 격자 및 모형선의 곡률에 의한 주유동 방향의 격자 크기 감소를 고려할 때 실제 격자수는 더 많아야 할 것이다. LES의 아격자 모델을 통해 DNS 대비 각 방향으로 4배 정도의 격자 크기를 사용한다면 LES를 수행하는 경우 직관적으로 18억 개의 격자수가 필요함을 예상할 수 있다. 수치 해석의 효율성을 높이기 위해 벽 모델 LES(wall-modeled LES)를 사용하더라도 여전히 수억 개의 격자를 사용해야 하므로, 전류고정덕트 후류에서 발생하는 시공간상 난류 교란을 고정도로 해석하는 것은 매우 어려운 일이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 부가물 후류에서의 난류 교란에 대한 고정도 수치 해석이 어려운 이유는 난류 모델의 고유한 특성에 기인하는 것이며, 각 난류 모델의 장단점이 명확함에도 불구하고 수치 해석을 수행함에 있어 복수의 난류 모델을 적용할 수 없기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 전류고정덕트 후류에서 발생하는 난류 교란을 정밀하면서도 효율적으로 해석하기 위해 RANS 계열 난류 모델과 LES의 아격자 모델을 공간상으로 혼합한 하이브리드 난류 모델(Hybrid Turbulence Model, HTM)의 활용 가능성을 검토하였다. HTM은 RANS 방정식에서 나타나는 레이놀즈 응력과 LES의 운동량 보존 방정식에서 나타나는 아격자 응력이 모두 Boussinesq 가정을 기반으로 모델링되는 원리에 기반하고 있다. 오픈 소스 라이브러리인 OpenFOAM에 HTM 라이브러리를 추가함으로써 전류고정덕트를 설치한 KVLCC2 대상선에 대해 HTM을 적용한 수치 해석을 수행하였다. 선체 주위에서는 RANS 계열의 난류 모델 중에서 $k-\omega$ SST를 적용하였으며, 덕트 주변에서는 LES의 아격자 모델 중에서 동적 난류에너지 방정식(Dynamic K Equation, DKE) 모델을 적용하였다. 이를 통해 선체 저항 및 덕트 후류의 속도 특성에 대해 RANS 계열 난류 모델과 LES의 아격자 모델을 적용한 결과와 비교 검토하였다.

2. 수치 기법

2.1 지배 방정식 및 난류 모델

본 연구의 주요 목적은 RANS 계열 난류 모델과 LES의 아격자 모델이 갖는 장점을 접목한 하이브리드 난류 모델을 통해 전류고정덕트 후류에서 발생하는 난류 교란을 타당하게 예측하는 것이다. 이를 위해 먼저 RANS 계열과 LES의 운동량 지배 방정식을 비교하고자 한다. 아래 식 (1)은 비압축성 유동에 대한 운동량 보존을 위한 Navier-Stokes 방정식이며 난류 모델이 적용되지 않은 형태이다.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (1)$$

여기서, 아래 식 (2)와 같이 속도와 압력을 레이놀즈 평균 성분 (U_i , P)과 변동 성분 (u'_i , p')으로 구분하면 식 (3)과 같이 레이놀즈 응력 ($\overline{\rho u'_i u'_j}$)이 추가된 운동량 보존 방정식을 얻는다.

$$u_i = U_i + u'_i, \quad p = P + p' \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (3)$$

여기서, 레이놀즈 응력에 대해 Boussinesq 가정을 적용하여 식 (4)와 같이 난류점성항(μ_t)과 평균 속도 구배로 표현할 수 있다.

$$\overline{\rho u'_i u'_j} = - \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

한편, LES의 경우 식 (1)에 대해 공간 필터링을 적용함으로써 분해 가능(resolved) 성분과 분해 불능(unresolved) 성분으로 구분하면 식 (5)와 (6)에서와 같이 아격자 응력(subgrid-scale stress, τ_{ij})이 추가된 운동량 보존 방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial \rho \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \quad (5)$$

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u'_i u'_j} - \tilde{u}_i \tilde{u}_j \quad (6)$$

여기서 τ_{ij} 에 대해 Boussinesq 가정을 적용하여 식 (7)과 같이 난류점성항(μ_t)과 평균 속도 구배로 표현할 수 있다.

$$\tau_{ij} = - \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

시간에 대해 앙상블 평균(ensemble average)을 적용하는 RANS 기반 모델링과 공간에 대한 필터링을 적용하는 LES 모델링이 취하는 수학적 특성은 상이하지만, Boussinesq 가정을 통해 분해 불가능한 물리량을 난류점성항과 변형속도(strain rate)로 모델링하는 개념은 동일하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 주어진 격자 시스템에서 분해 가능한 물리량(U_i , P 혹은 $\tilde{u}_i$, $\tilde{p}$)을 바탕으로 각 모델의 가중치를 결정함으로써 두 모델을 결합하는 방식을 취하고자 한다.

$$\tau_{ij}^{hybrid} = w_1 \tau_{ij}^{<S} + w_2 \tau_{ij}^{RANS} \quad (8)$$

여기서 τ_{ij}^{hybrid} 는 하이브리드 난류 모델에서의 유효 응력이며, $\tau_{ij}^{<S}$ 와 τ_{ij}^{RANS} 는 각각 LES와 RANS에서의 아격자 응력과 레이놀즈 응력에 대한 모델링항에 해당한다. 또한 w_1 과 w_2 는 각 격자 점에서 각 모델링항에 대한 가중치를 의미하며, $w_1 + w_2 = 1$ 의 관계식을 통해 정규화되어 있는 값이다. 이러한 유효 응력은 아래 식 (9)와 같이 일반화하여 표현할 수 있다.

$$\tau_{ij}^{hybrid} = \sum_{k=1}^N w_k \tau_{ij}^k, \quad \text{where } \sum_{k=1}^N w_k = 1 \quad (9)$$

여기서 N 은 Boussinesq 가정에 기반하여 사용된 총 모델수이며, w_k 는 각 모델의 정규화된 가중치를 의미한다. 가중치는 각 셀에서 난류 모델이 적용되는 영역까지의 거리에 반비례하는 값을 정규화하여 결정하였다.

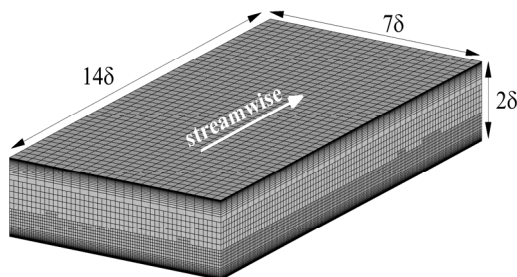
이러한 하이브리드 난류 모델이 유효성과 보존성을 만족하는지 여부에 대해 수학적 분석이 필요하지만, 뉴턴 유체(Newtonian fluid)에 대한 가정처럼 Reynolds 전단응력이 전단 변형율에 선형 비례한다는 전제 조건을 통해 Boussinesq 가정이 성립한다. 난류 모델의 주요한 역할이 Reynolds 전단응력과 전단 변형율 사이의 비례 계수에 해당하는 난류점성항을 계산하는 것임을 감안할 때, 본 연구에서는 Boussinesq 모델에서 얻어진 전단력 역시 선형적으로 확장할 수 있다는 가정에 기반하여 하이브리드 모델을 적용하였다. 이는 향후 연구에서 Reynolds 전단응력의 유효성과 보존성에 대한 이론적 접근과 난류 에너지의 스펙트럼 특성에 기반한 물리적 분석을 통해 검증되어야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 매우 높은 레이놀즈 수를 갖는 조선해양 분야의 유동 특성을 감안할 때, 부가물이나 프로펠러 설계와 같은 현업에서 국소적인 고경도 해석이 가능한 하이브리드 모델의 유용성은 충분히 클 것이다. 따라서 실제 난류 유동에서 하이브리드 난류 모델이 작용하는 결과를 분석함으로써 모델의 실효성을 검증하고자 한다.

2.2 하이브리드 난류 모델의 실효성 검증

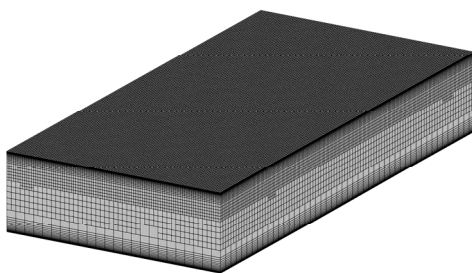
하이브리드 난류 모델의 실효성을 검증하기 위해 가장 단순한 기하학적 형상에 해당하는 채널에서의 완전 발달한 난류 유동 해석을 수행하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 난류 채널의 상하부 양쪽 벽면에 서로 다른 격자계를 구성하였다. $Re_\tau=180$

의 난류 유동에 대해 상부 벽면은 $\Delta x^+ = \Delta z^+ = 100$ 의 격자로 구성하였으며, 하부 벽면은 $\Delta x^+ = \Delta z^+ = 13$ 의 격자로 구성하였다. 여기서 x 와 z 는 각각 주유동(streamwise)과 횡(spanwise) 방향을 의미한다. 벽면 첫 번째 격자 크기는 상하부 벽면 모두 $\Delta y^+_{min} = 1.1$ 가 되도록 설정하였고, 연신율(stretching ratio) 1.15를 적용하여 채널의 절반 높이(δ)의 30%가 되는 지점까지 프리즘 층(prism layer)을 구성하였다. 하부 벽면에서는 프리즘 층부터 채널 절반 높이까지 조밀한 격자계를 구성한 반면, 상부 벽면에서는 프리즘 층을 벗어난 영역에서 성긴 격자계를 구성하였다. 횡방향 경계면에는 주기적 경계 조건을 적용하였으며, 출구 경계면에는 Neumann 경계 조건을 적용하였다. 입구 경계에는 Hwang and Lee (2019)와 동일한 방법으로 난류 채널 유동의 DNS에서 얻어진 속도장을 시간에 따라 순차적으로 부과하였다. 속도 및 압력의 시간 및 공간에 대해 모두 2차 정확도의 차분 기법을 사용하였다. 난류에너지와 난류주파수 등 난류 성분에 대해서는 수치 안정성을 고려하여 1차 정확도의 풍상 차분 기법을 적용하였다. 난류 채널의 격자계는 직교성이 매우 우수하여 난류 성분에 대해 2차 정확도의 차분 기법을 적용하더라도 수치 안정성에 문제가 없으나, 전류고정덕트를 갖는 선체 주위 유동에 대한 해석을 고려하여 난류 채널 유동에 대해서도 1차 정확도의 풍상 차분 기법을 사용하였다.

하이브리드 난류 모델을 구성하기 위해 RANS 계열의 $k-\omega$ SST 난류 모델과 LES의 DKE 아격자 모델을 혼합하였으며, 상부 벽면에서는 $k-\omega$ SST 모델의 가중치가 10이 되고 하부 벽면에서는 DKE 아격자 모델의 가중치가 1이 되도록 설정하였다. 그리고 중간에 존재하는 셀의 경우 상하부 벽면까지의 거리에 반비례하는 값을 정규화하여 각 셀에서의 가중치를 결정하였다.



(a) top wall using RANS model



(b) bottom wall using LES mode

Fig. 1 Computational domain and grid system of turbulent channel flows, (a) top wall with coarse cells and (b) bottom wall with fine cells

상부 벽면에서 주유동 방향의 평균 속도 분포를 비교하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 각 그림에서 하이브리드 난류 모델뿐만 아니라 $k-\omega$ SST 난류 모델과 DKE 아격자 모델을 사용한 결과도 같이 비교하였다. 상부 벽면의 경우 성긴 격자로 인해 벽면 난류 구조에 대한 모사가 불가능하므로 난류 강도는 비교하지 않았다. 그림에서 보듯이 $k-\omega$ SST 난류 모델과 하이브리드 모델은 기존 DNS 결과 (Kim et al., 1987)와 잘 일치하는 반면, DKE 아격자 모델의 경우 벽면 마찰 속도가 25% 이상 작게 예측되었다. 이는 벽면 전단 응력을 작게 추정하였음을 의미하며, 이로 인해 벽면에 작용하는 저항값이 낮게 예측될 것임을 예상할 수 있다. 벽면 근처의 난류 유동의 경우 층류와 달리 주유동 방향 와와 같은 비등방성 응집 구조에 의해 벽면에서의 전단 응력이 증가하는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 이러한 응집 구조의 크기를 모사할 수 없을 정도로 성긴 격자를 사용하는 경우 유동이 층류화 되는 등의 비물리적 현상이 발생한다. 즉, 서론에서 언급한 바와 같이 LES 아격자 모델의 경우 비등방성 대형 와 구조를 모사할 수 있을 정도의 조밀한 격자에서 유효하게 작동하기 때문에 상부 벽면에서와 같이 매우 성긴 격자에서는 RANS 계열의 난류 모델보다 더 큰 오차가 발생할 수 있다. 그림에서 보듯이 DKE의 난류에너지에 대해 2차 정확도의 풍상 차분 기법을 적용하더라도 격자 크기에 의한 오차는 1차 정확도와 유사하다.

하부 벽면에서는 주유동 방향의 평균 속도 분포와 각 방향의 난류 강도를 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. $k-\omega$ SST 난류 모델의 경우 정상 상태의 거동을 보이므로 난류 강도를 나타내지 않았다. Fig. 3(a)에서 보듯이 충분히 조밀한 격자를 사용하는 경우 $k-\omega$ SST 난류 모델과 DKE 아격자 모델, 하이브리드 난류 모델 모두 기존 연구 결과와 잘 일치하는 평균 속도 분포를 보여준다. $k-\omega$ SST 난류 모델에서 다소 높은 벽면 마찰 속도를 보이고 있으나, 입구 유동에서 비정상 난류 속도장이 유입되고 있으며 난류에너지에 대해 1차 정확도의 풍상 차분 기법을 적용하였음을 고려할 때 타당한 결과로 볼 수 있다. 난류 강도의 경우 LES의 DKE 아격자 모델과 하이브리드 모델 모두 기존 연구 결과와 매우 잘 일치한다. 이상의 결과를 종합해 볼 때, 공간 가중치에 기반하여 RANS 계열의 $k-\omega$ SST 난류 모델과 LES의 DKE 아격자 모델을 혼합한 하이브리드 모델이 물리적으로 타당하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

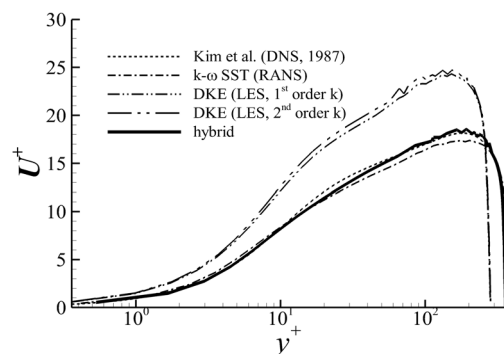


Fig. 2 Comparison of streamwise mean velocity profiles near the top wall

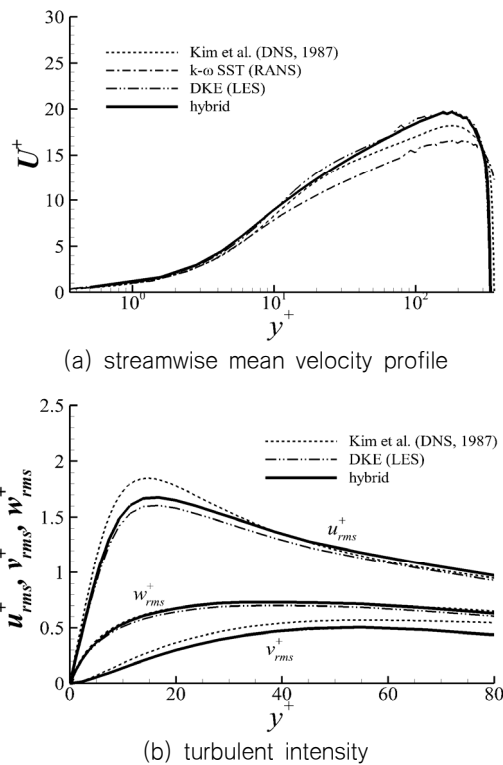


Fig. 3 Comparison of streamwise mean velocity profiles and turbulent intensity near the bottom wall

3. 결과 및 검토

본 계산에서 사용하는 대상선은 KVLCC2이며, 캐비테이션 터널에서 수행하는 시험 조건을 고려하여 축척비 1/40의 모형 선에 대해 7.974 m/s의 유속 조건을 부과하였다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 선미에 전류고정덕트를 설치하여 수치 해석을 수행하였다. 전류고정덕트의 단면 형상은 NACA0008이며, 주요 치수는 Fig. 4(b)~(d)에 나타났다. 덕트의 입구 및 출구 폭은 각각 0.143 m, 0.156 m이며, 덕트의 길이(L_{duct})는 0.0625 m이다. 코드 길이가 0.064 m이므로 주유동 방향으로의 덕트 팽창 각도는 약 6도이다. 덕트는 원주 방향으로 90도가 되도록 설계하였으며, 덕트 내외부에 추가적인 고정날개는 설계하지 않았다.

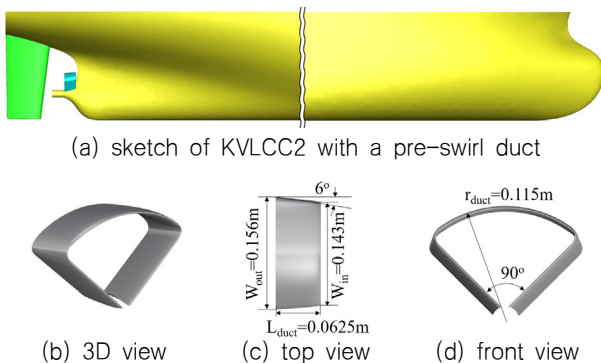


Fig. 4 Sketch of KVLCC2 and main dimensions of a pre-swirl duct

트리머와 프리즘 층을 이용한 총 격자수는 2,228만개이며, 선체 표면에 51.5만개, 러더 표면에 1.6만개, 덕트 표면에 17.7만개의 표면 격자를 분포시켰다. 선체 표면 격자의 크기는 최대 약 $x^+ \sim 1500$ 으로써 선체 주위 유동에 대해 LES의 아격자 모델 적용은 불가능하므로 $k-\omega$ SST 난류 모델의 가중치를 높였다. 반면 덕트 표면 격자의 크기는 최대 약 $x^+ \sim 50$ 으로써 LES를 수행할 수 있는 수준의 격자 조밀도에 해당하므로 덕트 주변에서는 DKE 아격자 모델이 지배적으로 작용하도록 구성하였다. 프리즘 층은 선체 및 러더에서 첫 번째 격자 크기 $y^+ \sim 14.5$ 로부터 연신을 1.3을 사용하여 총 10개의 층을 생성하였으므로 벽면 첫 번째 격자에 대해 Spalding 식에 기반한 벽함수를 적용하였다. 덕트에서는 첫 번째 격자 크기 $y^+ \sim 1.7$ 로부터 연신을 1.2를 사용하여 총 15개의 프리즘 층을 생성하였으며, 첫 번째 격자 크기를 고려하여 벽함수 없이 벽면 마찰력을 직접 계산하였다. 난류 채널 유동과 마찬가지로 속도 및 압력의 시간 및 공간에 대해 모두 2차 정확도의 차분 기법을 사용하였으며, 난류에너지와 난류주파수 등 난류 성분에 대해서는 수치 안정성을 고려하여 1차 정확도의 풍상 차분 기법을 적용하였다.

하이브리드 난류 모델을 적용하기 위한 가중치 분포를 Fig. 6에 나타냈다. 덕트와 타에 대해서는 DKE 모델을 적용하였으며, 선체 표면 및 계산 영역의 경계면에 대해서는 $k-\omega$ SST를 적용하였다. 따라서 각 셀에서 각 모델이 적용되는 경계까지의 거리에 역수를 이용하여 가중치를 함수화하였으며, 각 셀에서 얻어진 모든 가중치의 합으로 정규화하였다. 따라서 DKE 모델의 가중치를 나타낸 Fig. 6에서 가중치가 1에 가까울수록 LES의 아격자 모델의 영향이 커지고 0에 가까울수록 $k-\omega$ SST 난류 모델이 지배적으로 작용한다. 예상할 수 있듯이 격자가 밀집된 덕트 주변에서는 DKE 아격자 모델이 지배적으로 작용하고, 선체 주변과 계산 영역의 경계면에 가까운 위치에서는 $k-\omega$ SST 난류 모델의 영향이 지배적이다. 그림 (b)에 덕트 형상의 끝 부분에서 $0.43L_{duct}$ 만큼 떨어진 후류에서의 가중치 분포를 나타내었으며, 덕트가 설치된 상반면에서는 DKE 아격자 모델이 지배적으로 작용하는 덕트 하반면에서는 $k-\omega$ SST 난류 모델이 지배적이다.

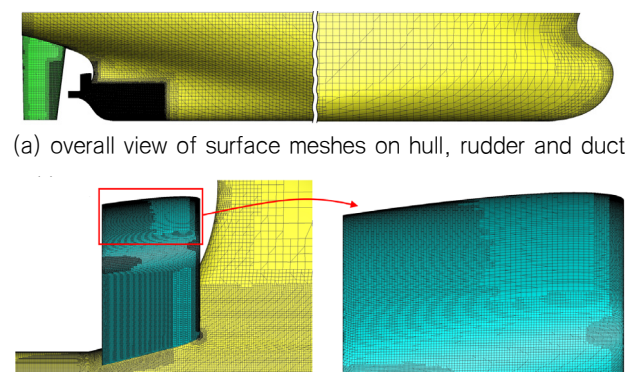
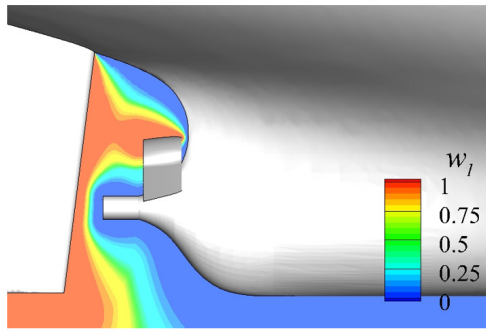
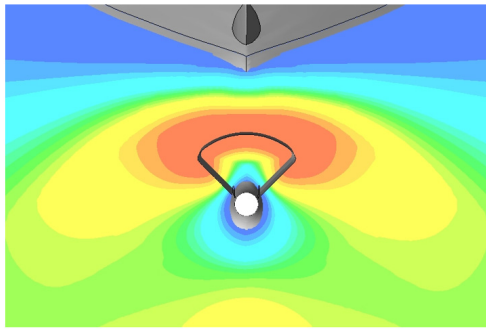


Fig. 5 Mesh structures on the surface of hull, rudder and pre-swirl duct



(a) side view of weighting coefficient for DKE model

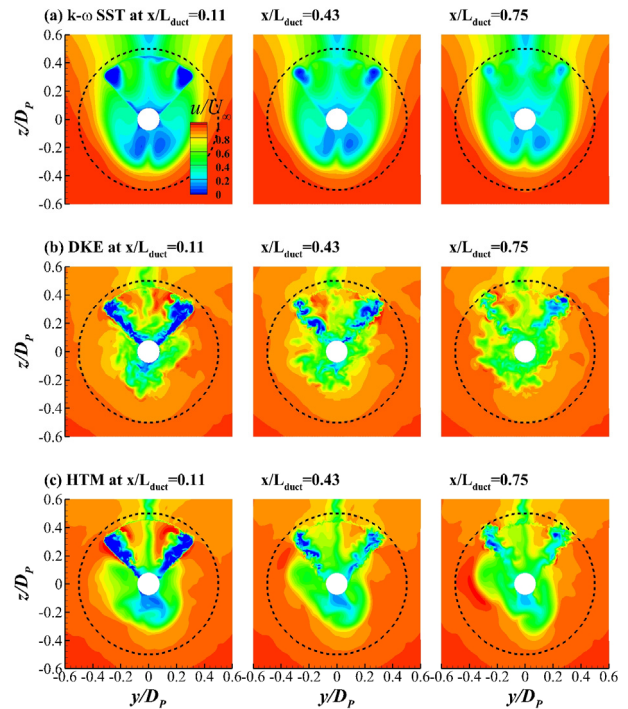


(b) rear view of weighting coefficient for DKE model

Fig. 6 Spatial distribution of weighting coefficient for DKE subgrid-scale model

난류 모델 혹은 DKE 아격자 모델을 적용하여 해석한 결과와 비교하였다. 그림에서 D_p 는 KVLCC2에서 사용하는 KP458 프로펠러의 직경을 의미하며, 프로펠러에 해당하는 영역을 각 그림에서 점선으로 표시하였다. 유속은 입구 유동 속도(U_0)로 무차원화하여 표시하였다.

그림에서 (a)는 $k-\omega$ SST 난류 모델만을 사용하였을 때의 결과인데, 순간 속도 분포를 추출하였음에도 불구하고 RANS 난류 모델이 갖는 특성으로 인해 모든 후류 위치에서 정상 상태와 같은 속도 분포 특성을 보여주므로 시간에 따른 속도 변동을 관찰하는 것이 불가능하다. 반면 DKE 아격자 모델을 사용하는 (b)에서는 복잡한 양상의 주유동 방향 속도 분포를 보인다. 이는 덕트에서 박리된 전단 유동에 다양한 응집 구조가 발달해 있으며, LES 해석을 통해 이러한 응집 구조가 모사되었음을 의미한다. 이러한 응집 구조와 난류 교란은 덕트 후류의 순간 유동장에서 빠르거나 느린 속도가 발생할 수 있음을 의미한다. 좀 더 구체적으로 살펴보면, $0.11L_{duct}$ 위치에서 $k-\omega$ SST 난류 모델의 경우 $-0.14 < u/U_0 < 1.07$ 의 범위에서 속도 분포가 존재하는 반면, DKE 아격자 모델에서는 $-0.5 < u/U_0 < 1.13$ 의 속도 분포를 보여준다. $0.43L_{duct}$, $0.75L_{duct}$ 의 위치에서 $k-\omega$ SST 난류 모델의 경우 $-0.013 < u/U_0 < 1.06$, $0.01 < u/U_0 < 1.06$, DKE 아격자 모델의 경우 $-0.3 < u/U_0 < 1.18$, $-0.21 < u/U_0 < 1.06$ 의 속도 분포를 각각 보여준다. 임의의 순간에 대한 속도 분포임에도 불구하고, $k-\omega$ SST 난류 모델보다 DKE 아격자 모델의 속도 변동폭이 크다. 그림 (a)에서 얻어진 순간 속도 분포는 정상 상태에 준하는 특성을 보이므로 $k-\omega$ SST 난류 모델에서 얻을 수 있는 덕트 후류의 유속


 Fig. 7 Comparison of instantaneous streamwise velocity when using $k-\omega$ SST, DKE sub-grid scale and hybrid turbulence models, respectively

범위는 관찰 시간에 상관없이 거의 일정할 것으로 예상되는 반면, 그림 (b)의 순간 유동장을 추출하는 시간이 임의로 선정된 시간이므로 DKE 아격자 모델에 대한 순간 유동장을 지속적으로 관찰하는 경우 속도 변동폭이 증가할 가능성이 매우 높다. 하이브리드 난류 모델을 적용한 결과인 그림 (c)의 경우, 덕트가 설치된 상반면의 유속 분포는 $k-\omega$ SST 난류 모델보다 DKE 아격자 모델과 정성적으로 유사한 특성을 보여준다. 반면 하반면에서는 $k-\omega$ SST 난류 모델의 가중치가 증가함에 따라 난류 모델에 의한 등방화로 인해 응집 구조가 확산되어 나타난다. 임의의 순간에 관찰하는 순간 유속 분포이므로 통계적 유사성을 정량적으로 비교할 수는 없으나, 정성적 비교를 위해 각 후류 위치($0.11L_{duct}$, $0.43L_{duct}$, $0.75L_{duct}$)에서 하이브리드 난류 모델을 적용하여 얻어진 주유동 방향의 유속 범위를 살펴보면, 각각 $-0.74 < u/U_0 < 1.28$, $-0.18 < u/U_0 < 1.06$, $-0.08 < u/U_0 < 1.08$ 과 같다. 프로펠러의 하반면에서 발생하는 와의 경우 $k-\omega$ SST 모델에서 2차원 응집 구조가 강하게 나타나는 반면, DKE 모델에서는 아격자 모델에 의한 확산 및 에너지 캐스케이드로 인해 난류 구조가 3차원화 및 소형화되는 것을 확인할 수 있다. 하이브리드 난류 모델을 적용한 경우 프로펠러 하반면에서 모델 가중치가 0.2~0.7 정도의 분포를 갖게 되어 $k-\omega$ SST 모델과 DKE 아격자 모델의 중간 정도에 해당하는 속도 분포를 보여준다.

각 난류 모델에서 얻어진 덕트 후류에서의 난류 응집 구조의 공간 특성을 시각화하기 위해 λ_2 방법을 적용하여 와 구조를 추출하여 Fig. 8에 나타내었다. $k-\omega$ SST 난류 모델에서는 덕트 모서리 부분에서 대형 와가 발생하는 것으로 관찰되지만, λ_2 값에서

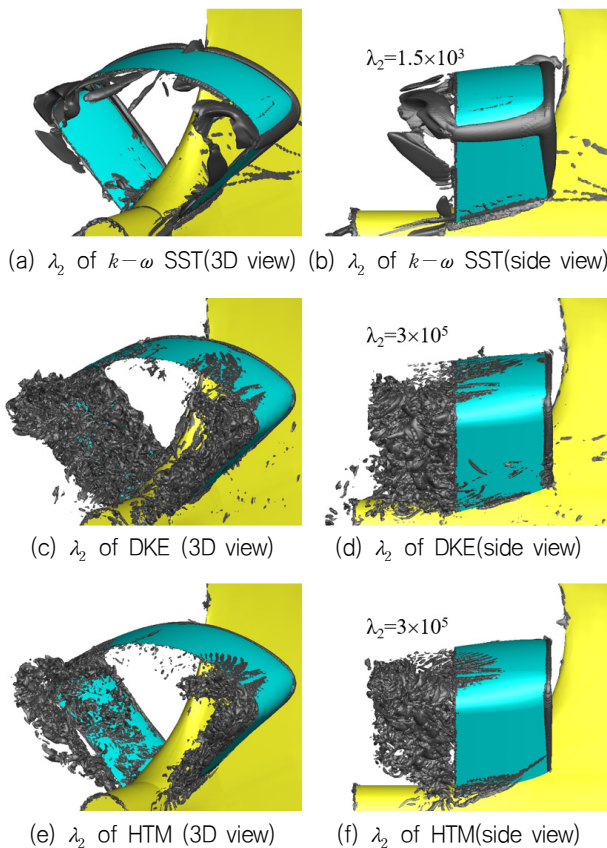


Fig. 8 Spatial description of λ_2 iso-contours for $k-\omega$ SST, DKE, and hybrid turbulence models, respectively

보듯이 DKE 아격자 모델에 비해 와의 강도가 매우 약하다. 반면 그림 (c)~(f)에서와 같이 DKE 아격자 모델과 하이브리드 난류 모델의 경우 덕트 모서리와 꼬리부분(trailing edge)에서 작지만 강한 와 구조가 발생하고 덕트 후류까지 응집되어 흘러가는 특성을 잘 보여준다. 다만 HTM의 경우 선체 표면 근처에서 $k-\omega$ SST 난류 모델의 가중치가 증가함에 따라 DKE 아격자 모델에 비해 덕트 하단 부분과 선체 주위에서 와 구조가 약하게 나타난다. 만일 프로펠러가 회전하고 있는 상태라면 이러한 덕트 후류의 강한 와 구조가 프로펠러의 흡입면과 상호 작용할 것임을 유추할 수 있다. 이상에서와 같이 덕트 후류의 난류 특성으로부터, 하이브리드 난류 모델이 RANS 계열의 난류 모델보다 고정도 해석이 가능하다는 것은 명확히 확인하였다.

하이브리드 난류 모델이 LES에 비해 갖는 장점은 격자가 조밀하지 못한 선체 주위 유동 특성에서 확인할 수 있다. 앞서 채널 내 난류 유동에서 살펴본 바와 같이 매우 성긴 격자에서 DKE 아격자 모델을 사용하여 LES를 수행하는 경우 벽면에 작용하는 마찰력에서 매우 큰 오차가 발생할 수 있다. 본 연구에서 수행한 KVLCC2 선체 주위 유동에서도 동일한 경향성을 보여준다. 이를 보다 면밀하게 분석하기 위해 각 난류 모델을 사용하였을 때 선체와 러더에 작용하는 저항과 덕트에 작용하는 저항을 Table 1에 정리하였다. 각 저항은 압력 저항 계수(c_p)와 마찰 저항 계수(c_v)로 구분하였으며, 입구 유속과 침수면적을 이용하여 무차원화하였다.

Table 1. Resistances acting on hull, rudder and duct when using $k-\omega$ SST, dynamic k equation and hybrid turbulence models, respectively.

model	coef. ($\times 10^3$)	hull+rudder	duct
$k-\omega$ SST	cP	14.86	-13.77
	cV	2.83	0.0029
DKE	cP	13.88	-13.72
	cV	0.34	0.0023
HTM	cP	14.58	-13.75
	cV	2.83	0.0020

여기서 면밀히 관찰해야 하는 항목은 각 난류 모델을 사용하였을 때 선체와 러더에 작용하는 마찰 저항이다. 선체, 러더와 덕트에 작용하는 각각의 압력 저항을 계산하는 경우 선체와 덕트의 결합 부분이 떨어지면서 각 파트가 닫힌 체적(closed volume)을 형성할 수 없으므로 정수압과 열린 면(open face)의 방향에 따라 매우 큰 양의 혹은 음의 압력 저항 계수를 얻게 된다. 그러나 마찰력의 경우에는 선체와 덕트의 결합 부분의 열림 혹은 닫힘에 상관없이 침수 면적에 의해 결정되는 부분임에도 불구하고, DKE 아격자 모델을 사용한 LES의 경우 $k-\omega$ SST 모델이나 하이브리드 난류 모델을 적용한 경우에 비해 점성 저항이 12% 수준 밖에 되지 않는다. 점성 저항에서 발생하는 약 88%의 오차는 x^+ 가 1500 정도 되는 선체 주변의 성긴 격자로 인해 LES의 아격자 모델이 비정상 거동을 보임으로써 선체 주위의 벽면 유속 분포가 비물리적으로 예측되었기 때문이다. 반면 하이브리드 모델의 경우 선체에 작용하는 마찰력이 $k-\omega$ SST 모델과 거의 동일하게 나오는데, 이로써 선체 근처에서는 $k-\omega$ SST 모델이 지배적으로 작용함을 추론할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 RANS 방정식의 $k-\omega$ SST 모델과 LES의 DKE 아격자 모델을 결합한 하이브리드 난류 모델을 개발하여 오픈 소스 라이브러리인 OpenFOAM에 적용하였다. 각 셀에서 모델을 적용하고자 하는 영역까지의 거리를 이용하여 각 모델의 가중치를 공간 변수로 구성하였으며, 이를 완전 발달한 난류 채널 유동에 적용함으로써 모델의 실효성을 검증하였다. 성긴 격자로 구성된 벽면 근처에서는 $k-\omega$ SST 모델이, 조밀한 격자로 구성된 벽면 근처에서는 DKE 아격자 모델이 지배적으로 작용한 결과, 하이브리드 난류 모델을 사용하였을 때 주유동 방향의 평균 속도 분포, 벽면 전단 응력 및 난류 강도가 모두 타당하게 계산되었다. 격자가 성긴 경우 LES 해석에서 얻어진 평균 속도장 및 벽면 전단 응력은 비물리적인 분포를 보이는 반면, 하이브리드 난류 모델은 RANS 방정식을 이용한 해석과 유사하게 물리적으로 타당한 평균 속도장 및 벽면 전단 응력을 나타냈다. 반면 격자가 조밀한 벽면 근처에서는 평균 속도장과 벽면 전단 응력, 난류 강도가 LES와 하이브리드 난류 모델에서 기존 DNS 결과와 유사하였다. RANS 계열의 난류 모델이 갖는 태생적 특성으로 인해 조밀한 격자를 사용하더라도 $k-\omega$ SST 모델에서는

난류 강도에 대한 고정도 해석이 불가능함을 다시 한번 확인하였다.

이러한 하이브리드 난류 모델을 전류고정덕트가 설치된 KVLCC2 주위의 난류 유동에 적용하였다. 전류고정덕트 후류에 대한 고정도 해석을 수행하기 위해 덕트 주변에는 아격자 모델을 적용할 수 있는 수준의 조밀한 격자를 구성하였으며, 수치 해석의 효율성을 높이기 위해 선체 주변에는 상대적으로 성긴 격자를 사용하였다. 덕트 주변에서 아격자 모델의 가중치가 1에 가깝고, 선체 주변에서는 $k-\omega$ SST 모델의 가중치가 1에 가깝도록 공간상 가중치 분포를 설정하였다. 이를 통해 하이브리드 난류 모델을 적용하는 경우 덕트 후류의 유속 분포가 DKE 아격자 모델을 적용한 LES와 유사하게 덕트 후류에서 강한 난류 응집 구조가 분포함을 확인하였다. 그러나 $k-\omega$ SST 모델을 사용한 RANS 방정식 해석 결과는 덕트 후류의 난류 응집 구조를 효과적으로 모사하지 못하였다. 이는 전류고정덕트가 캐비테이션 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 수치 해석을 수행하는 경우, 덕트 후류에서 발생하는 난류 응집 구조와 프로펠러 흡입면의 상호 작용을 규명함에 있어 $k-\omega$ SST 모델을 사용한 RANS 방정식 해석에 한계가 있음을 보여주는 결과이다. DKE 아격자 모델을 적용한 LES를 수행하면 덕트 후류에서 발생하는 난류 응집 구조를 효과적으로 모사할 수 있으나, 격자가 성긴 영역에서 나타나는 아격자 모델의 비물리적인 거동이 나타나는 문제가 있다. 본 연구를 통해 개발한 하이브리드 난류 모델은 격자가 조밀한 영역에서는 LES와 유사한 수준의 난류 특성을 관찰할 수 있으며, 격자 성긴 영역에서도 RANS 방정식을 이용한 해석과 유사한 유동 특성을 보여준다.

그러나 본론에서 언급한 바와 같이 RANS 방정식 기반의 레이놀즈 응력 및 아격자 전단 응력의 선형적 결합에 따른 유효성과 보존성의 만족 여부에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 난류 채널 유동이나 난류 경계층 유동과 같이 많은 참고 문헌을 통해 기본적인 난류 특성이 잘 알려져 있는 기본적인 형상에서의 유동 분석을 통해 두 모델의 결합에 따른 난류 에너지의 스펙트럼 특성 역시 추가로 검증되어야 할 것이다. 이러한 추가 연구의 필요성에도 불구하고, 부가물이나 프로펠러를 설계해야 하는 현업에서 국소적인 고정도 해석이 가능한 하이브리드 모델의 유용성은 충분히 클 것으로 판단한다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양구조물 전역거동해석 전산유체역학 핵심기술 개발(2/5, PES3940)”과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2019R1A2C1004682), “OpenFOAM 기반 추진기 공동예측 정도 향상 및 안정성 개선을 위한 수치 기법 개발”을 위한 현대중공업의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

- Hwang, A. and Lee, S.B., 2019. Influence of velocity interpolation at inlet boundary on turbulent channel flows. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 24(2), pp.101–107.
- Kim, J., Moin, P. and Moser, R., 1987. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 177(1), pp.133–166.
- Lee, K.S., Kim, M.C., Shin, Y.J. and Kang, J.G., 2019. Design of asymmetric pre-swirl stator for KVLCC2 considering angle of attack in non-uniform flow fields of the stern. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(4), pp.352–360.
- Lee, C.M., Shin, Y.J., Kim, M.C., Choi, J.E. and Chun, H.H., 2016. Design of asymmetric pre-swirl stator for LNG carrier according to variation of stator shapes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(1), pp.37–44.
- Shin, H.J., Lee, K.H., Han, M.R., Lee, C.Y. and Shin, S.C., 2013a. Pre-swirl duct of fuel oil saving device design and analysis for ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), pp.145–152.
- Shin, H.J., Lee, J.S., Lee, K.H., Han, M.R., Hur, E.B. and Shin, S.C., 2013b. Numerical and experimental investigation of conventional and un-conventional preswirl duct for VLCC. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(3), pp.414–430.
- Yoo, G.Y., Kim, M.C., Shin, Y.J., Shin, I. and Kim, H.W., 2019. Development and CFD analysis of a new type pre-swirl duct for 176k bulk carrier. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(4), pp.373–382.



강민재

정재환

조석규

허재욱



김상현

이상봉