

날개의 형상 변화에 따른 LNG선용 비대칭 전류고정날개 설계

이철민¹·신용진¹·김문찬¹·최정은²·전호환^{1,†}
부산대학교 조선해양공학과¹
부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터²

Design of Asymmetric Pre-swirl Stator for LNG Carrier according to Variation of Stator Shapes

Choel-Min Lee¹·Yong-Jin Shin¹·Moon-Chan Kim¹·Jung-Eun Choi²·Ho-Hwan Chun^{1,†}
Department of Navel Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University¹
Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University²

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.

Recently researchers are conducting a lot of research related to EEDI in order to satisfy IMO resolution MEPC. Especially they are interested in design of energy saving device. This paper is to design the asymmetric pre-swirl stator for 160K LNG carrier in order to reduce energy. Two types of the asymmetric pre-swirl stator are taken into account; constant and variable pitch angle stators. "constant" and "variable" mean state that the pitch of stators change by radius. The dimensions of the stators are initially determined using potential-flow code. The propulsion performances of the stators are predicted using viscous-flow code. The model test is carried out in towing tank in PNU. Prediction of ship performance generally follow ITTC recommended. Ship wake prediction was done by two method, ITTC 1978 and ITTC 1999. Therefore propulsion performances were compared ITTC 1978 with ITTC 1999 methods. Comparison components are delivered power and thrust deduction coefficient of the model. Final pre-swirl stator is selected by comparing experiment and CFD.

Keywords : Asymmetric pre-swirl stator(비대칭 전류고정날개), LNG carrier(LNG선), Potential flow(비점성유동), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학), Model test(모형시험)

1. 서론

EEDI 규제가 점점 강화 되고 현재 일시적으로 유가가 낮게 책 정되어 있지만 장기적으로 보았을 때 유가는 상승 중이고 이에 따 라 선주들이 선박의 에너지 절감에 대해 많은 관심을 가지고 있다.

일반적으로 에너지를 절감하는 방법에는 추진 연료를 LNG로 바꾸는 것과 같은 대체 연료, 선박 및 프로펠러의 최적화 설계, 배출가스 감소장치나 폐열회수, 프로펠러 주위의 유체 흐름을 조 절하는 장치 등이 있다. 또한 선박의 흡수 조절이나 weather routing의 최적화 등의 운항 방법에 의한 에너지 저감 방법이 있 다. 국내 조선소들은 이런 움직임에 빠르게 대응하고 수주 우위 를 잡하기 위해서 비교적 선박에 적용하기 쉽고 그에 비해 성능 도 뛰어난 에너지 저감 장치(ESD, energy saving device)에 대해 많은 연구를 통해 특허와 실선 장착에 노력하고 있다.

에너지 저감 장치는 일반적으로 프로펠러 위치에 따라 pre device와 post device로 분류하게 되고 가끔 둘을 혼합한 장치도 존재 한다. 대표적인 장치로서 덕트, 전류고정날개, CRP(Contra Rotating Propeller)와 rudder bulb 등이 있다.

본 연구에서 연구할 에너지 저감 장치는 비대칭 전류고정날개 로서 전류고정날개를 선박의 우현과 좌현에 동일하지 않은 날개 개수를 배치하는 것이다. 비대칭 전류고정날개를 에너지 저감 장 치로 선택한 이유는 저속 비대선에서 에너지 저감 성능이 좋은 것이 검증되었고 이를 선박 특성이 유사한 중속 비대선인 LNG선 에 적용하여 저속 비대선과 유사한 에너지 저감 효과를 기대하고 자 함이다.

전류고정날개에 대한 연구는 1960년대 Mitsubishi 조선소에서 reaction fin이라는 이름으로 연구를 활발히 진행하였다. 국내에 서는 포텐셜 해석기법을 사용하여 전류고정날개에 대한 연구를

진행해왔다. 대형형 전류고정날개의 성능해석을 위해 한 날개(key blade)에 대한 해석 기법을 발전해서 전체 날개를 동시에 해석하는 비대칭 해석방법을 개발하였고 실험과의 비교를 통해 정확성을 높이는 노력을 기울였다 (Kim, et al., 1993; Lee, et al., 1992; 1994; Kang, et al., 2004). Kang, et al. (2004)은 VLCC에 대해서 비대칭 전류고정날개를 적용하여 설계 속도에서 전달 동력 기준 5.6%의 효율 증가가 나타나는 결과를 보여주었다.

본 연구의 목표는 위에서 언급한 포텐셜 유동 해석 프로그램을 이용하여 전류고정날개의 형태, 몇 가지의 기하학적 형상에 변화를 주어 LNG선에 적합한 비대칭 전류고정날개를 설계 하고 상용 CFD를 사용하여 평가한 뒤, 최종적으로 모형시험을 통해 검증해보는 것이다.

전류고정날개의 형상에 따른 전달동력 효율을 비교하기 위해 고정날개의 반경별로 피치각을 동일하게 주는 방법과 변화를 주는 방법을 나누어 설계하였다. 포텐셜유동 코드를 사용하여 PSS의 고정날개 형상을 결정하였고 모형시험을 하기 전에 상용 CFD tool을 사용하여 평가해보았다. 결정된 고정날개들과 모형선을 제작하여 전류고정날개의 형상에 따른 추진 성능을 모형시험을 통해 판단하였다. 실선 성능 예측을 위해 ITTC 1978 해석 방법을 사용하였다. ITTC 1999에서 포텐셜 영향이 큰 전류고정날개에 맞게 수정된 실선 반류 추정방법이 존재하기 때문에 두 해석 방법에 대해서 각각 수행하였고 두 결과를 비교하였다.

2. 설계 이론

2.1 비대칭 전류고정날개의 개념

프로펠러 전방에 설치된 비대칭 전류고정날개는 프로펠러 회전방향의 반대 방향으로 유동을 흐르게 하여 프로펠러 면으로 유입되는 유입류를 조정하는 장치이다. 또한 프로펠러 전방에 위치하게 되어 반류가 증가하는 이득도 볼 수 있다. 전류고정날개는 좌현에 3개 우현에 1개로 배치한다. 이렇게 좌우를 비대칭으로 배치하는 이유는 선미부분 선저에서 윗 방향으로 유동이 흐르고 프로펠러는 일반적으로 시계방향으로 회전하기 때문에, 좌현에서는 유속 벡터가 일치하여 가속이 되고 우현에서는 반대가 되어 감속하게 된다. 따라서 좌현이 더욱 큰 접선 속도가 생성됨으로 우현에 비해 상대적으로 많은 고정날개를 장착하게 된다.

2.2 양력면 이론 설계 방법

전류고정날개의 설계 제원을 결정하기 위해 CFD를 사용하기에는 고정날개의 설계변수가 많은데, 이런 변수들의 변화에 따라 CFD를 수행하기 위해서는 격자의 재생성과 해석의 반복 작업에 많은 시간을 소비하게 된다. 그러나 포텐셜유동 프로그램의 경우 고정날개의 제원만 입력하면 자동으로 격자를 생성하여 해석하기 때문에 수 십 가지의 경우를 빠르게 해석할 수 있다. 따라서 전류고정날개의 설계를 통한 제원 결정은 포텐셜유동 해석 프로그램인 PASTA (Lee, et al., 1992)를 이용하였다.

양력면 이론을 바탕으로 구성된 PASTA는 모형시험을 통해 획

득한 반류데이터를 이용하여 전류고정날개와 회전하는 프로펠러 간의 상호영향을 분석하는 프로그램이다. 프로펠러와 전류고정날개는 비점성, 비압축성인 무한 영역의 유체 중에서 있다고 가정한다. 또한 두 대상 모두 허브효과는 매우 작아 무시하고 캐비테이션은 발생하지 않는다고 가정한다. 양력면 이론에 의한 해석기법을 전류고정날개와 프로펠러 모두에 적용하고 상호 유기속도는 프로펠러 면과 전류고정날개 면의 원주방향의 시간 평균값(circumferentially time-averaged value)으로 근사하여 계산한다. 또한 전류고정날개가 좌우 대형형이 아닌 비대칭이기 때문에 프로펠러의 문제해석과 동일하게 한 날개(key blade)만의 문제로 풀 수 없으므로 전체 날개에 대해 해석을 진행한다.

PASTA의 전체적인 프로세스는 다음과 같다.

우선 나선의 반류분포를 모형시험을 통해 계측한다. 계측된 프로펠러 면에서의 유입류를 이용하여 프로펠러 해석을 진행한다. 프로펠러 형상에 분포되어있는 각 특이점에서 유기속도와 Γ (circulation)의 분포를 계산한다. 그 후 프로펠러에 의한 유기속도를 고정날개 면에 대해서 계산하게 되고 이것을 고정날개의 해석에 사용하게 된다. 고정날개도 프로펠러와 마찬가지로 고정날개 면의 유입류를 이용하여 유기속도와 Γ 를 구하게 되고 이 값을 이용하여 프로펠러 면에 대한 유기속도를 계산한다. 그러면 기존의 나선의 반류시험을 통해 얻어진 프로펠러 면의 유입속도는 고정날개의 계산결과에 따라 바뀌게 되고 이를 이용하여 다시 프로펠러를 재해석하게 된다. 이를 반복적으로 계산하여 프로펠러의 추력 값이 수렴 할 때 까지 반복한다.

고정날개를 설계하기위하여 변수들을 조절하게 되면 각각의 고정날개의 반경별 r 의 분포가 달라진다. r 는 세기로서 날개에 걸리는 부하를 간접적으로 표현하기 때문에 이 값을 가지고 성능을 비교하게 된다.

Γ 를 상대적으로 비교하기위해 고정날개의 반경(R)과 설계속도(V_s)를 이용하여 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$G = \frac{\Gamma}{2\pi R V_s} \quad (1)$$

그리고 Γ 를 이에 상응하는 등가 받음각($\alpha_{equiv.}$, equivalent angle of attack)으로 표현하여 조금 더 직관적인 분석이 가능하도록 하였다. Kutta-Joukowski 정리에 따르면 순환유동에서 양력은 다음과 같이 식 (2)로 표현하며 이를 이용하여 양력계수를 식 (3)과 같이 Γ 에 관한 식으로 나타내었다.

$$L = \rho V \Gamma \quad (2)$$

$$C_L = 2\pi \sin \alpha_{equiv.} = \frac{\Gamma}{0.5cV} \quad (3)$$

여기서 L, C_L, c, V 은 각각 2차원 단면에 대한 양력과 양력계수, 2차원 단면의 코드 그리고 유입속도를 나타낸다.

식 (3)을 $\alpha_{equiv.}$ 에 대한 식으로 변환하고, 식 (1)을 대입하여 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha_{equiv.} = \sin^{-1}\left(\frac{C_L}{2\pi}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{2G}{\left(\frac{V}{V_s}\right)\left(\frac{c}{R}\right)}\right) \quad (4)$$

위의 식을 통해 각 고정날개의 반경별 단면에 걸리는 Γ , 즉 간접적인 부하량을 유입류에 대한 반음각으로 표현하여 나타낼 수 있다.

3. 수치해석 방법

수치해석을 통하여 부가물의 전달동력 감소를 상대 비교를 하기 위해 CFD 상용 프로그램인 Fluent v15를 사용하여 비대칭 전류고정날개를 부착한 선박의 전달동력 감소 효과를 추정하였다. 모형선과 고정날개의 축적비와 제원은 모형시험과 동일하게 사용하였다. 비대칭 전류고정날개가 조파저항에 영향을 미치지 않는다고 가정하고 이중모형을 사용하였다.

3.1 지배방정식

지배방정식은 연속방정식과 비압축성의 Navier-Stokes 식을 시간 평균하여 얻어지는 RANS 방정식을 사용하고 다음의 식으로 표현한다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_l \frac{\partial U_i}{\partial x_l} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_l} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_l} - \overline{\rho u_i u_l} \right) \quad (6)$$

여기서 $U_i = (U, V, W)$ 로서 $x_i = (x, y, z)$ 의 방향에 대한 평균유속이다. $p, \rho, \mu, \overline{u_i u_l}$ 는 순서대로 압력, 밀도, 점성계수, Reynolds stress를 나타낸다.

3.2 난류 모형

전류고정날개와 프로펠러 주위의 유동은 나선(bare hull)의 유동 보다 더 복잡하다. 복잡한 난류유동을 조금 더 정확히 유추하기 위해서 Reynolds stress 난류모형을 사용하였고 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{D\overline{u_i u_j}}{Dt} = D_{ij} + G_{ij} + \frac{2}{3} \delta_{ij} \epsilon + PS \quad (7)$$

$\delta_{ij}, D_{ij}, G_{ij}, PS$ 는 각각 순서대로 Kronecker delta, 확산항, 생성항, pressure strain 항으로 나타낸다.

3.3 수치해석기법

공간 이산화는 cell-center finite volume method를 사용하였다. 속도-압력 연성은 SIMPLEC(Semi-implicit Method for Pressure-linked Equations Consistent) algorithm을 적용 하였다. 대류항은 QUICK(Quadratic Upwind Interpolation for Convection Kinematics) scheme을 사용 하였고, 확산항은 central difference scheme을 사용하였다. 프로펠러 회전유동 모사는 MRF(Moving Reference Frame)를 사용하였고 프로펠러 후류를 관찰하기 위해 sliding mesh 기법을 사용하였다. 해석은 unsteady상태이고 Δt 는 프로펠러가 2°회전에 걸리는 시간 (0.00058 s ~ 0.00067 s)으로 설정하였다.

3.4 격자 생성 및 경계 조건

저항 특성 추정을 위해서는 고정날개와 타가 부착되지 않은 이중 모형 나선의 예인조건에서 계산을 수행하였다. 자항 조건에서는 고정날개, 타 그리고 프로펠러가 부착된 이중 모형선에 대해 계산을 수행하였다.

이중모형을 사용하기 때문에 대상선의 흘수 아래에 대해서만 격자를 생성하였다. 전체적으로 정렬 격자와 비 정렬 격자가 혼합된 hybrid grid 격자를 구성하였다. 선미와 프로펠러 주위 부분을 비정렬 격자를 사용하고 나머지는 정렬격자로 구성하였다.

Table 1 Hybrid grid system

Condition	Structured	Unstructured	Total
Towing	abt.	abt. 1,300,000	abt. 3,060,000
Self-propulsion	1,760,000	abt. 1,850,000	abt. 3,610,000

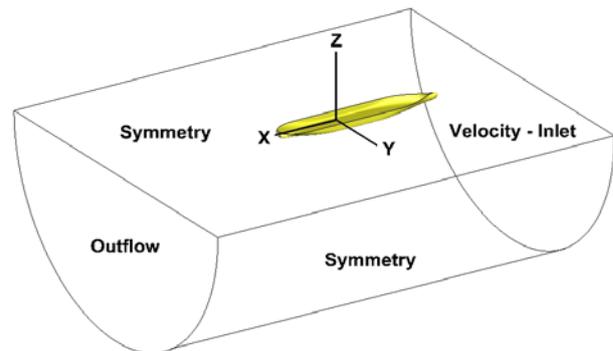


Fig. 1 Coordinate system, computational domain and boundary conditions

위의 그림은 좌표계와 계산 영역, 경계조건 그리고 프로펠러 주위의 유동장 격자를 나타내었다. 선박의 midship을 원점으로 하였다. 계산 영역은 원점을 기준으로 선수 방향으로 1 Lpp, 선미방향으로 1.5 Lpp, 깊이와 폭은 1 Lpp 이다.

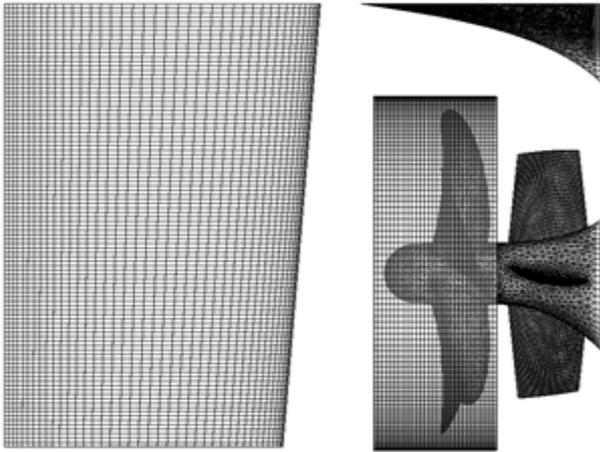


Fig. 2 View of grid generation around propeller

3.5 CFD 결과에 대한 전달동력 평가 방법

CFD 해석 결과를 비교하기 위해 모형시험 해석방법과 동일하게 하는 것이 필요하다. 또한 차후 모형시험 결과와 비교하기 위해서는 필요한 과정이다. 기존의 ITTC 1978 방법을 바탕으로 CFD 해석 상태에 맞게 식을 구성하였다. 이는 Choi, et al. (2009)이 제시한 해석법을 참고하였다.

$$C_{VM} = \frac{R_{VM}}{0.5\rho_M S_M V_M^2} \quad (8)$$

$$1+k = \frac{C_{VM}}{C_{FM}} \quad (9)$$

여기서 R_{VM} 은 이종모형에서 구한 선체에 작용하는 저항이다. C_{FM} 은 마찰저항계수로써 ITTC-1957 line을 이용하여 구하였다.

2개의 프로펠러 회전속도에 대한 수치해석 결과를 이용하여 자항점(self-propulsion point)에서 $R_{VM}^{SP}, T_M, Q_M, n_M$ 의 값을 구하였다. 단, 고정날개의 부착 여부에 따라 예인력(TF) 값에 침수표면적을 고려하여 사용하였다. 성능을 비교하기 위해서 모형선의 전달동력(PD_M)과 추력감소계수(t)를 목적함수로 하였고 다음의 식을 통해 구한다.

$$TF = R_{VM}^{SP} - T_M \quad (10)$$

$$PD_M = 2\pi n_M Q_M \quad (11)$$

$$t = \frac{R_{VM}^{SP} - R_{VM}}{T_M} \quad (12)$$

4. 모형시험

모형선과 프로펠러는 STX 조선해양(주)에서 제공한 프로펠러

를 사용하였다. 축적비와 제원은 CFD 해석과 동일하다. 모형시험은 bare hull, with constant pitch angle stator(이하 CPAS), with variable pitch angle stator(이하 VPAS)에 대해 진행하였다. 동일한 프로펠러를 사용하기 때문에 POW는 한번 수행하였다. 저항시험은 bare hull에서만 수행하였고, 저항시험은 각 조건별로 실시하였다. 반류 측정은 bare hull에서만 진행하였다. 모형선과 프로펠러의 제원은 다음과 같다.

Table 2 Main dimension of model ship

	model ship
scale ratio	48.3
Lpp [m]	5.756
B [m]	0.952
T [m]	0.24

실선확장에 대한 해석법은 ITTC 1978, ITTC 1999 방법을 사용한다. 두 방법은 실선의 반류추정에서 차이가 나며 각각의 실선 반류 추정식은 다음과 같다.

$$W_{TS} = (t + 0.04) + (W_{TM} - t - 0.04) \frac{(1+k)C_{FS} + \Delta C_F}{(1+k)C_{FM}} \quad (13)$$

$$W_{TS}^{PSS} = (t + 0.04) + (W_{TM} - t - 0.04) \frac{(1+k)C_{FS} + \Delta C_F}{(1+k)C_{FM}} + (W_{TM}^{PSS} - W_{TM}) \quad (14)$$

위의 식을 보면 ITTC 1999 방법은 기존의 ITTC 1978 방법에서 모형선의 유효반류 계수의 차이만큼을 더해 주는 것을 확인할 수 있다. 이는 전류고정날개에 의해 변하게 되는 반류는 포텐셜의 영향이 지배적이기 때문이라고 가정하게 되고, 전류고정날개를 장착한 후 유효반류의 변화량을 실선으로 그대로 가져오게 되기 때문이다.

모형선의 운동은 heave와 pitch를 자유로 두고 실험하였다.

저항해석에서 형상계수(1+k)는 Prohaska가 제안한 방법을 사용하였다. 이 때 $0.1 < Fn < 0.2$ 의 값을 사용하여 추정하였다.

실선의 성능을 추정하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다. 전류고정날개를 rudder나 bilge keel과 같은 부가물로서 생각함으로써 부가물 부착 상태에 대한 저항시험은 하지 않았다. 해석에는 bare hull의 형상계수와 저항시험 값을 이용하고 고정날개의 면적을 고려하여 해석을 진행하였다. 면적증가에 따른 저항증가 외에 전류고정날개에 대한 또 다른 효과는 반류계수나 추력감소계수로 보상 및 영향을 고려한다고 판단하기로 한다.

5. 비대칭 전류고정날개 설계 및 결과

전류고정날개의 설계 변수는 고정날개의 수, 고정날개의 각

날개 배치각, 각 날개의 반경 별로 피치각, 레이크, 스큐, 코드, 캠버, 두께가 있고 프로펠러와의 전후 간격, 직경이다.

전류고정날개와 프로펠러의 전후 간격 변화에 따른 전달동력 감소에 관한 연구와 직경에 따른 성능 연구는 Lee, et al. (1994)가 300K VLCC에 대해 공동수조에서 단독특성시험을 통한 검증한 자료를 바탕으로 결정하였다. 이 논문을 살펴보면 설계속도 주변에서 전후 간격을 0.5R을 기준으로 미세한 간격변화를 주더라도 전달동력의 변화는 거의 없는 것으로 나타났고 고정날개 직경의 경우 1.0D를 기준으로 작거나 커지면 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 간격과 직경의 변화를 매우 크게 가져가게 되면 영향이 미비하거나 저항의 증가와 캐비테이션 발생 및 가속의 측면에서 불이익이 발생 할 가능성이 있기 때문에 다른 변화는 고려하지 않았다. 따라서 설계변수를 줄이기 위하여 참고논문을 바탕으로 프로펠러 전후 간격을 0.5R, 고정날개의 직경을 1.0D로 결정하였다. 이때 R, D는 각각 프로펠러의 반경과 직경이다.

스큐와 레이크는 전류고정날개가 회전하는 장치가 아니기 때문에 선체와의 간격, 진동, 하중분포 등에 대한 고려를 하지 않아도 되고 제작에도 어려움이 있다. 따라서 이 값들은 0으로 결정하였다.

코드와 캠버, 두께는 Kim, et al. (1993)이 사용한 전류고정날개 제원을 바탕으로 전체적으로 코드와 캠버 값은 증가하고 두께는 감소하도록 결정하였다. 이는 대상선이 VLCC보다 선속이 빠른 것을 감안하여 결정한 값이다.

최종적인 설계변수인 피치각의 경우 반경별로 동일하게 주는 방법과 반경별로 변화를 주는 방법이 있다. 반경별로 피치각의 변화를 주면 각 반경마다 다르게 들어오는 유입류에 대처하여 설계할 수 있고, 혹여 발생할 수 있는 Tip vortex의 발생을 억제할 수 있을 것이란 개념을 가지게 되었다. 따라서 두 가지 방법인 CPAS와 VPAS에 대하여 각각 설계를 진행하였다.

앞서 설명하였듯이 전류고정날개를 설계하기 위해서 나선의 반류시험 자료가 필요하기 때문에 나선에 대해 모형시험을 우선적으로 시행하였고 그 반류 값을 이용하여 설계를 진행하였다.

전류고정날개의 설계를 위한 설계 변수를 피치각으로 결정하고 α_{equiv} 로 평가하였다. α_{equiv} 의 최저값은 -12 ~ -14사이에 위치하도록 설계 하였다. 이는 많은 모형시험과 이론 성능 검증을 통한 경험적 제한치이다. α_{equiv} 의 값이 음수로 표시된 이유는 프로펠러의 회전방향이 시계방향(clockwise) 기준을 양으로 기하학적 형상을 결정하기 때문에 이와 반대로 설계된 전류고정날개에 대해서는 음수로 정의되기 때문이다.

VPAS의 경우는 CPAS와는 다르게 각 고정날개의 반경 별 피치각의 분포를 다르게 할 수 있기 때문에 α_{equiv} 가 넓은 포물선의 형태가 되도록 설계 하였다.

두 형태 모두 α_{equiv} 분포의 변곡점이 0.6r/R에 가깝도록 설계를 진행하지만 과도한 기하학적 피치각이 커지게 되면 유입류의 변화에 따라 실속이 발생할 수 있기 때문에 무리한 피치각의 변화는 주지 않았다. 그리고 VPAS의 경우는 반경별 피치각의 변화가 2차원 곡선 형태가 되도록 설계 하였다.

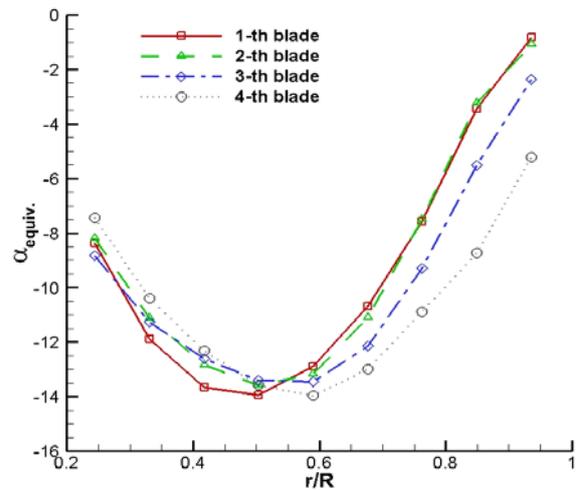


Fig. 3 Radial distribution of equivalent angle of attack of CPAS

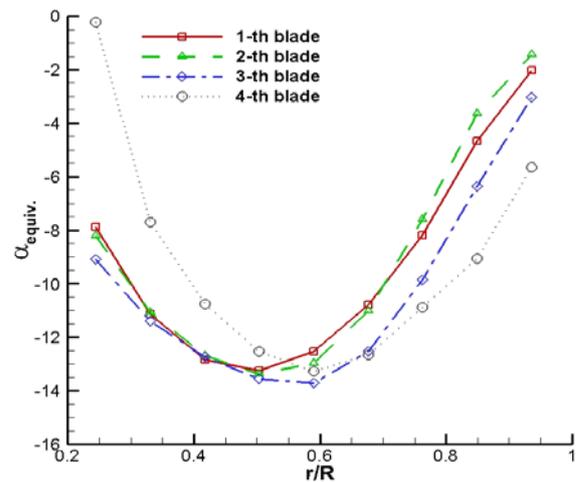


Fig. 4 Radial distribution of equivalent angle of attack of VPAS

피치각이 결정되면서 전류고정날개에 대한 모든 제원이 결정되었다. 이를 바탕으로 전류고정날개를 3D 모델링을 하여 CFD 해석을 통해 전달동력을 추정하였다. 해석 조건은 설계속도에서 계산하였고 Rn 은 9.035×10^6 이다.

나선의 저항시험 결과와 CFD해석 결과를 비교하였다.

Table 3 Comparison of resistance coefficient

	CFM	CVM	CTM
Exp.	3.054	3.794	4.108
CFD		3.784	

다음은 프로펠러 면에 대한 반류 분포를 비교하였다.

Bare hull상태의 공칭반류 값은 모형시험이 0.507이고 CFD해석은 0.600이다. 정량적인 차이는 0.75(18.3%)이다. 반류의 분포를 살펴보면 CFD가 모형시험에서 관측된 bilge vortex가 잘 묘사된 것을 확인 할 수 있다.

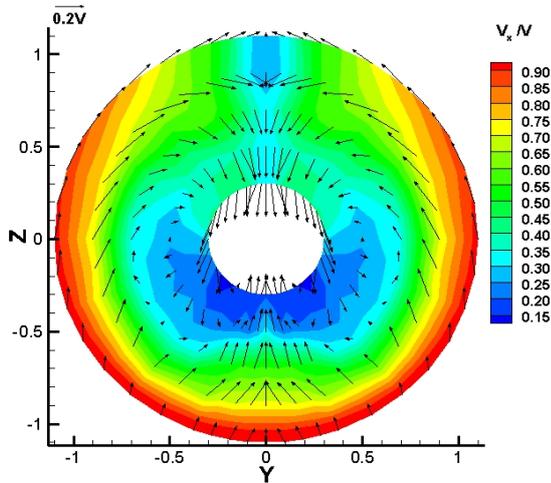


Fig. 5 Wake on propeller plane (Exp.)

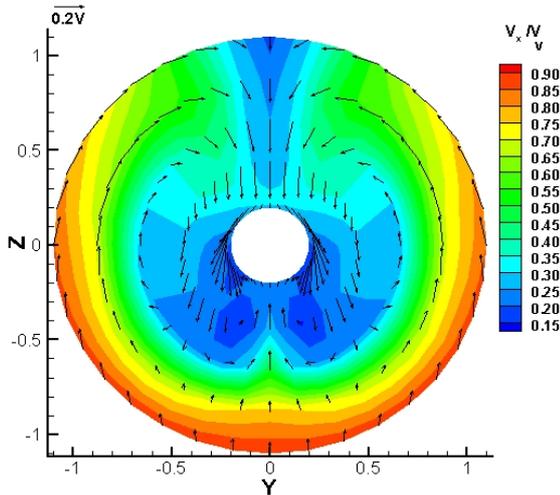


Fig. 6 Wake on propeller plane (CFD)

다음은 CFD해석을 통해 3가지의 상태(bare hull, with CPAS, with VPAS)에 대하여 자항 해석을 통한 결과를 비교해보았다. 이때 사용한 FD는 bare hull의 모형시험 결과를 사용하였다.

Table 4 Comparison of self-propulsion components using CFD

Condition	Bare hull	with CPAS	with VPAS
n_M [rps]	8.66	8.28	8.12
diff. [%]		-4.46	-6.32
T_M [N]	17.42	17.93	18.06
diff. [%]		2.91	3.68
$100Q_M$ [Nm]	47.34	47.24	47.29
diff. [%]		-0.23	-0.12
$2\pi n_M Q_M$ [W]	25.77	24.57	24.12
diff. [%]		-4.67	-6.43
t	0.248	0.272	0.277
diff. [%]		9.52	11.65

전달동력을 보면 전류고정날개를 장착하여 얻어진 효율 증가는 프로펠러 회전속도(n_M) 감소에 의한 효과가 큰 것을 알 수 있다. 두 전류고정날개를 비교해보면 VPAS가 모형선의 전달동력이 작고 CPAS가 추력감소계수가 낮아 서로 저항과 자항의 성분에서 장단점을 가지고 있는 것을 확인하였다. 자유수면을 고려하지 않았기 때문에 CFD 결과를 이용하여 실선의 성능을 예측할 수 없어 추진성능의 우월함을 비교할 수 없었다.

다음은 모형시험을 통해 설계된 비대칭 전류고정날개의 성능을 검증하였다. bare hull과 CPAS 그리고 VPAS를 부착한 상태에서 모두 시험을 진행하였다. 앞에서 언급한 것과 같이 저항시험은 bare hull에서만 진행하였고 자항시험은 모두 진행하였다.

아래의 결과는 두 해석 방법에 따른 결과를 모두 나타내었다. 비교 값은 모형선의 회전수, 추력, 토크와 전달동력이고 해석법에 따라 결과를 나누어 정리하였다.

Table 5 Comparison of ship performance of Experiment results on ITTC (1978)

condition	bare hull	with CPAS	with VPAS
n_M [rps]	9.26	8.9	8.71
diff. [%]		-3.89	-5.94
T_M [N]	20.29	20.77	20.9
diff. [%]		2.37	3.01
$100Q_M$ [Nm]	55.69	54.84	55.07
diff. [%]		-1.53	-1.11
$2\pi n_M Q_M$ [W]	32.384	30.678	30.132
diff. [%]		-5.27	-6.95
t	0.239	0.249	0.26
diff. [%]		4.18	8.79
PD [kW]	27,849	26,991	26,973
diff. [%]		-3.08	-3.15

Table 6 Comparison of ship performance of Experiment results on ITTC (1999)

condition	bare hull	with CPAS	with VPAS
n_M [rps]	9.26	8.90	8.71
diff. [%]		-3.89	-5.94
T_M [N]	20.29	20.77	20.90
diff. [%]		2.37	3.01
$100Q_M$ [Nm]	55.69	54.84	55.07
diff. [%]		-1.53	-1.11
$2\pi n_M Q_M$ [W]	32.384	30.678	30.132
diff. [%]		-5.27	-6.95
t	0.239	0.249	0.260
diff. [%]		4.18	8.79
PD [kW]	27,849	26,189	25,584
diff. [%]		-5.96	-8.13

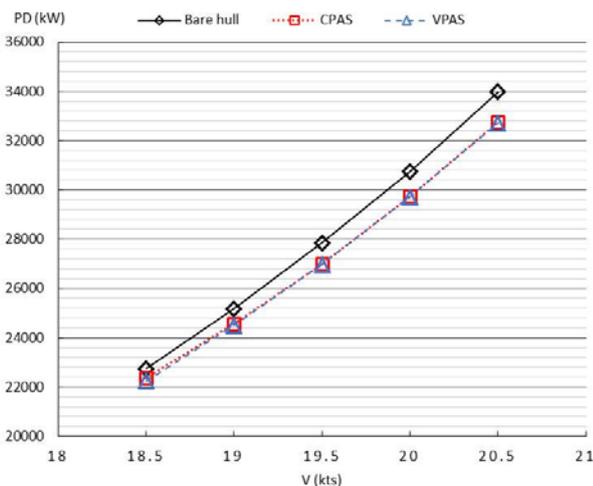


Fig. 7 Comparison of Delivered power on ITTC 1978

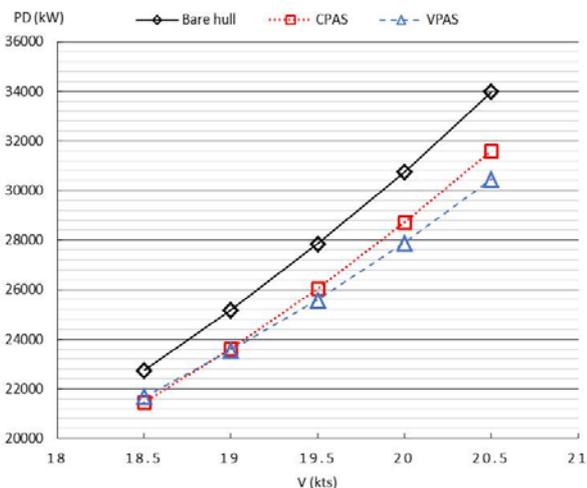


Fig. 8 Comparison of Delivered power on ITTC 1999

6. 결론

전류고정날개 형상을 결정하기 위해 양력면 이론을 이용하여 전류고정날개의 기하학적 형상을 결정하는 설계를 진행하고 CFD를 통하여 전류고정날개 성능을 평가한 뒤 모형시험을 통해 검증하였다.

CFD 해석 결과는 모형의 전달동력과 추력감소계수에서 두 고정날개가 서로의 장단점을 가지고 있었고, 실선 성능 추정을 하지 못하여 우월함을 판단할 수 없었다. 모형시험의 경우 실선 성능 추정을 위해 기본적으로 사용하는 ITTC 1978 방법 외에 전류고정날개에 맞춘 ITTC 1999 방법이 존재하고 이 두 가지 방법으로 실선 성능을 추정하였다. 모형시험과 CFD 결과를 비교하기 위해서, 실선으로 확장하지 않은 모형 시험에서의 결과와 CFD 해석 결과를 비교하였고 회전수, 추력, 토크의 값들에서 모두 유사한 패턴으로 변하는 것을 볼 수 있었다.

모형시험 결과를 이용하여 실선의 성능을 추정하였을 때, 회전수가 약 4~6%의 감소하여 다른 요소들과 비교하여 볼 때 가장

큰 영향을 주게 되고 추력이 약간 증가하며 토크의 변화는 크지 않았다. 실선의 전달동력을 기준으로 두 고정날개의 성능을 비교하였을 때, ITTC 1978 방법으로 해석하였을 때 CPAS가 3.08%, VPAS가 3.15%로 두 값의 차이가 0.07%로 아주 미비한 것으로 보이고 있다. 하지만 ITTC 1999 방법으로 해석하였을 때 CPAS가 5.96%, VPAS가 8.13%로 2.17%의 비교적 큰 차이를 보이는 것으로 나타나고 있다. 최종적으로 반경별로 피치각을 조절하여 전류고정날개를 설계하는 VPAS가 우수한 것으로 생각된다.

VPAS의 경우 프로펠러 회전수가 bare hull 대비 5% 이상의 변화가 생기게 된다. 이렇게 되면 프로펠러를 재설계를 하여야 한다. 기존의 RPM을 맞추기 위해 일반적으로 피치를 조정하게 되고 캐비테이션의 영향 측면에서 이점이 있을 것으로 생각된다. 하지만 본 연구는 에너지 저감을 할 수 있도록 하는 ESD의 성능 향상만을 목적으로 하기 때문에 다른 영향은 고려하지 않았다.

만약 실선에 실제 장착을 목적으로 하게 될 경우는 상호간의 접점을 찾는 것이 필요하다고 생각된다.

아울러 전류고정날개의 우월 성능 비교 시 해석법에 따라 평가되지 않을 수도 있기 때문에 전류고정날개에 맞는 해석법을 이용하여 평가하는 것을 추천한다.

후기

본 논문은 STX 조선해양에서 부산대학교 조선해양 플랜트 글로벌 핵심 연구 센터 (GCRC)로의 산학협력인 "STX 고유 에너지 절감 부가물 개발"의 일환으로서 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. 또한, 이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

References

- Choi, J.E. Kim, J.H. Lee, H.G. Choi, B.J. & Lee, D.H., 2009. Computational Prediction of Ship-speed Performance. *Journal of Maritime Science and Technology*, 14(3), pp.322-333.
- Kang, Y.D. Kim, M.C. & Chun, H.H., 2004. A Study on the Design of a Biased Asymmetric Pre-swirl Stator Propulsion System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(3), pp.13-21.
- ITTC Performance Committee, 1978. Final Report and Recommendations to the 15th ITTC. *Proceedings of the 15th International Towing Tank Conference*.
- ITTC Specialist committee on unconventional propulsion, 1999. Final report and recommendations to the 22nd ITTC. *Proceedings of the 22th International Towing Tank Conference*, Seoul, Korea.
- Kim, M.C. Lee, J.T. Suh, J.C. & Kim, H.C., 1993. A

study on the Asymmetric Preswirl Stator System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 30(1), pp.30-44.

Lee, J.T. Kim, M.C. Suh, J.C. Kim, S.H. & Choi, J.K., 1992. Development of Preswirl Stator-Propeller System for Improvement of Propulsion Efficiency : a Symmetric Stator Propulsion System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(3), pp. 13-21.

Lee, J.T. Kim, M.C. Van, S.H. Kim, K.S. & Kim, H.C., 1994. Development of a Preswirl Stator Propulsion System for a 300K VLCC. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 31(1), pp.1-13.



이철민



신용진



김문찬



최정은



전호환