

Original Articles

스케일 변화에 따른 전류고정날개의 영향 수치해석

박선호¹ · 오광호² · 이신형^{3,†} · 구본용⁴ · 이호성⁴

¹한국해양대학교 해양공학과

²넥스트폼

³서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소

⁴American Bureau of Shipping (ABS)

Numerical Study of Pre-swirl Stator for Model and Full Scales

Sunho Park¹, Gwangho Oh², Shin Hyung Rhee^{3,†}, Bon-Yong Koo⁴ and Hoseong Lee⁴

¹Department Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

²NEXTfoam Co., Ltd., Seoul, Korea

³Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering,

Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

⁴American Bureau of Shipping, Busan, Korea

요 약

IMO에서 제시한 EEDI를 만족시키기 위해 에너지 절감 장치에 대한 관심이 증대되었다. 본 논문에서는 전류고정날개를 부착한 KVLCC2를 대상선으로 선정하여 에너지 절감 선박에 대해 연구하였다. 계산 결과의 정도를 검증하기 위해 모형선의 공칭반류를 묘사하여 실험과 비교하였으며, 실선 스케일 계산에서는 격자 민감도에 대해 불확실성 평가를 하였다. 모형선과 실선 스케일 계산결과를 보면 전류고정날개는 추진기로 유입되는 반류의 회전성분을 변화시켜 추력을 도움을 주었다. ITTC에서 제시한 방법을 이용하여 실선의 성능을 예측해 보았으며, 이를 보안하는 방법을 제안하였다.

Abstract – Interests on energy saving devices (ESDs) have been increased with the concern of the energy efficiency design index (EEDI) developed by the international maritime organization (IMO). To study the influence of ESDs, KVLCC2 with energy saving pre-swirl stator (PSS) was selected. To validate the computations, computed nominal wake of the model scale ship was compared with the experimental data, and the numerical uncertainty assessment was done for the full scale ship computations. The PSS changed rotational flow, which was assistant to the propeller thrust for the model and full scale ships. Performances of the full scale ships were predicted by ITTC methods, and new prediction method was proposed.

Keywords: Model and full scale ships(모형선 및 실선 스케일), Energy saving device, ESD(에너지 절감 장치), Pre-swirl stator, PSS(전류 고정 날개)

1. 서 론

국제 해사기구(IMO)는 2013년부터 energy efficiency design index (EEDI)를 의무화하여, 연료절감을 통한 경제성 확보가 여느 때보다 크게 대두되고 있다. 이와 더불어 고전적인 선박형상에 연료효율을 높이기 위한 연료절감장치(energy saving device, ESD)를 부착한 선박에 대한 관심이 고조되고 있다.

다양한 연료절감장치에 관해 다양한 연구가 진행되고 있다. Celik

[2007]은 반류를 균일하게 하기 위해 덕트를 설치하여 자항성능에 대해 CFD 계산을 하였고, 10%의 효율증가를 확인하였다. Hansen *et al.*[2011]과 Kawamura *et al.*[2012]은 추진기 보스 캡 펀(propeller bos cap fin, PBCF)에 대해 모형선 스케일과 실선 스케일에서의 효과에 대해 각각 실험과 CFD 계산을 수행하였다. Lee *et al.*[2013]은 타 펀(rudder fin)에 대한 CFD 계산을 통해 추진기 후류의 회전성분을 비교하였고, 회전성분의 변화와 추진기 효율을 연관 지었다. Choi *et al.*[2013]은 전류고정날개와 전류고정날개에 덕트를 부착한 에너지 절감 장치에 대한 계산을 하였고, ITTC 방법을 이용하여 준추진 효율을 예측하였다. Feng *et al.*[2013]은 선수부에 펀을 부착하여 조

[†]Corresponding author: shr@snu.ac.kr

파저항을 감소시키는 연구를 수행하였다. Shin *et al.*[2013]은 전류 고정터트(pre-swirl duct)에 대해 CFD를 이용해 해석하여 저항, 캐비테이션, 변동압력 관점에서 비교하였다.

본 논문에서는 연료절감장치 중에서 전류고정날개를 선정하여 연료절감장치가 추진효율에 미치는 영향에 대해 원인을 파악하고 모형선 스케일과 실선 스케일에서 다른 점이 있는지를 알아보고자 CFD 해석을 수행하였다.

2. 문제 정의

대상 선형으로 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 개발하고 선형 및 추진기의 제원을 공개한 저속비대선인 KVLCC를 선정하였다. 컨테이너선인 KCS 대신 KVLCC를 선정한 이유는 전류고정날개에 대한 실험결과 컨테이너선 보다는 탱커에서 효과가 더 크게 계측됐기 때문이다(Hollenbach and Reinholtz [2011]). 실험에서는 컨테이너선의 경우 마력 측면에서 5%이내의 효율 개선효과가 있었고, 탱커에서는 8%이내의 효과가 있던 것으로 보고됐다. 계산에 사용된 KVLCC의 제원은 Table 1과 같다. Table 1의 모형제원은 축척비가 1/100으로 KRISO에서 실험한 제원(축척비=1/45.714)과는 차이를 가지고 있다.

전류 고정날개는 대우조선해양에서 특허로 등록한 전류고정날개로 선정하였다(박재상 외, 2006). 전류고정날개는 우현에는 90° 위치에 1개, 좌현에는 225° , 270° , 315° 에 3개 위치하고 있다. Fig. 1은 선미에서 바라본 전류고정날개와 추진기의 형상을 나타낸다.

Table 1. Principal particulars of KVLCC

	Full scale	Model scale
Scale	1	1/100
Lpp (m)	320	3.2
B (m)	58	0.58
T (m)	20.8	0.208
Displacement (m^3)	312622	0.3126
Propeller diameter (m)	9.86	0.0986

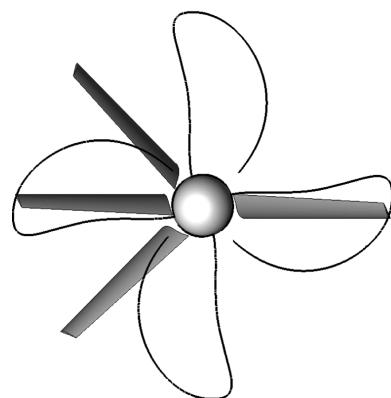


Fig. 1. Pre-swirl stator.

3. 계산 방법

속도와 압력을 계산하기 위해 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식을 고려하였다. 난류를 고려하기 위해 질량 보존 방정식과 운동량 보존 방정식을 시간 평균하였고, 난류모델을 고려하였다. 지배방정식은 Park *et al.*[2013]에 상세히 기술되어 있다. 난류 모델로는 Shih *et al.*[1995]^o에 제안한 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였다.

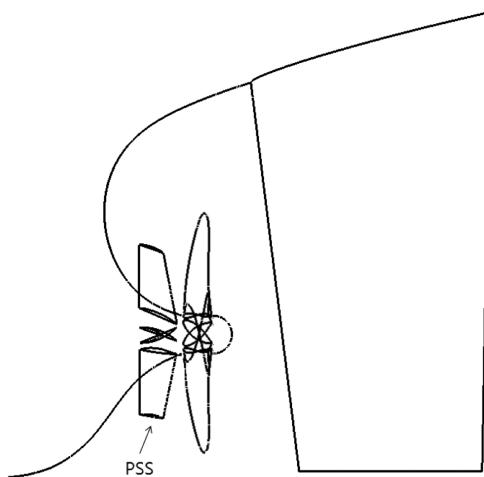
질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 난류모델 방정식을 비압축성 기반 정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성을 SIMPLE 알고리즘을 선택하였다. 대류항은 2차 정도의 차분법으로 차분하였고, 확산항은 2차 중심차분을 사용하였다. 계산 매트릭스의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid(AMG) 방법을 사용하였고, 계산 매트릭스는 Gauss-Seidel 반복 계산법을 이용하였다. 격자 및 계산은 STAR-CCM+를 사용하였다.

4. 계산 결과 및 고찰

4.1 모형선 스케일 계산결과

추진기 회전을 모사하기 위해 선박의 좌·우현을 모두 모델링하였다. 계산영역의 크기는 선수방향으로 1L, 선미 방향으로 3L, 폭방향으로는 1.5L, 바다방향으로는 1L의 크기로 선정하였다. 입구 경계면에는 속도를 Dirichlet 조건으로 설정하였고, 출구 경계면에는 압력을 Neumann 조건으로 설정하였다. 배의 표면에는 no-slip 조건을 설정하였다. 대상선이 저속 비대선으로 조파저항이 크지 않다고 가정하고 slip 조건을 설정하여 계산하였다. 추진기의 회전은 general grid interface(GGI)를 이용하여 고려하였다. 격자는 cut-cell 방법을 이용하여 생성하였다. 전류고정날개가 없는 경우는 2백만개의 격자로 격자계를 구성하였고, 있는 경우는 3.8백만개의 격자로 격자계를 구성하였다. Fig. 2은 전류고정날개가 있는 경우 선미표면의 격자를 보여주고 있다.

전류고정날개가 추진기 앞에 위치하고 있기 때문에 선미반류의



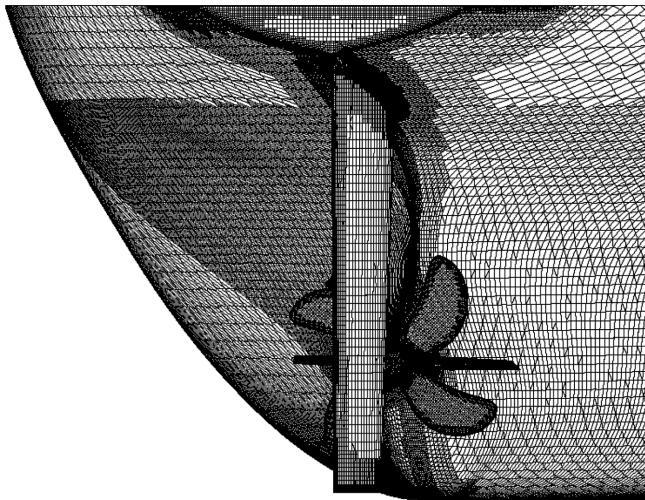


Fig. 2. Surface meshes around stern.

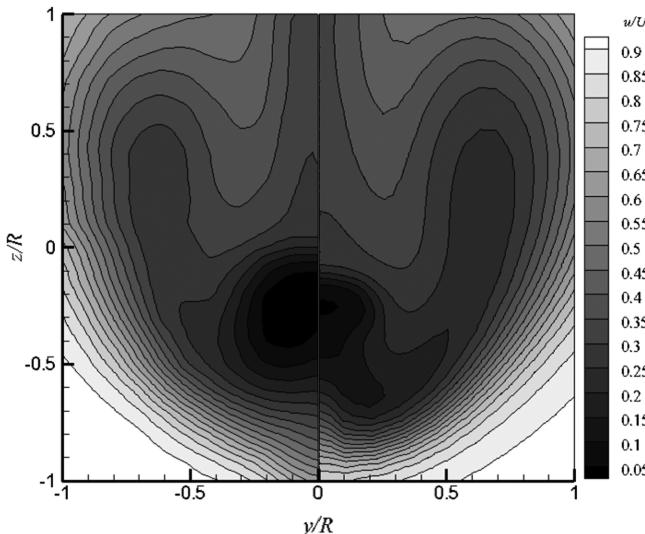


Fig. 3. Nominal wake (left: measurement by SNUTT (Seo *et al.*, 2013), right: present).

재현은 매우 중요하다. 이에 공칭반류를 재현하여 실험과 비교하였다. Fig. 3은 추진기를 모델링하지 않고 서울대학교 예인수조에서 계측한 공칭반류와 계산한 공칭반류의 속도 및 벡터분포를 나타낸다. 공칭 반류의 계산에는 격자수 및 계산조건을 변경하면서 실험과 유사한 결과가 나오는 조건을 찾았으며, 찾은 조건은 향후의 계산에 적용하였다. 저속비대선의 특징인 hook wake가 계산에서도 실험과 유사하게 계산된 것을 확인할 수 있다. 벡터분포에서는 양쪽 날개 끝에서 유동이 올라가고 안쪽으로 회전하는 분포를 나타내고 있는데 계산에서도 실험과 유사하게 계산된 것을 확인할 수 있다. 계산에서도 실험과 유사하게 추진기면에서의 물리적인 특성이 잘 포착되었기 때문에 전류고정날개와 추진기를 고려한 계산을 진행하였다.

추진기를 고려한 계산은 자항점에서 이루어졌다. 자항점을 찾기 위해 추진기 회전수를 변경하면서 계산하였으며, 선체와 타의 저항이 예인력과 추력을 더한 값과 같아지는 위치에서 자항점의 회전수를 설정하였다. 전류고정날개가 없는 경우 자항점의 회전수는 519 rpm으로 계산되었고, 전류고정날개가 있는 경우 자항점의 회전수는 517 rpm으로 계산되었다. 전류고정날개에 의해 자항점의 회전수가 줄어든 것으로 판단된다.

Fig. 4는 추진기 날개가 0° 의 위치에 있을 때 추진기 압력면에서의 압력계수($C_p = P/0.5\rho U^2$)분포를 나타낸다. Fig. 4(a)는 전류고정날개가 없는 경우이고 Fig. 4(b)는 전류고정날개가 있는 경우이다. 전류고정날개가 있는 경우 없는 경우와 비교해 압력의 최대값은 $C_p=3$ 으로 유사하나 전체적인 분포가 조금 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 추진기 날개가 0° 의 위치에 있을 때 추진기 흡입면에서의 압력계수분포를 나타낸다. Fig. 5(a)는 전류고정날개가 없는 경우이고 Fig. 5(b)는 전류고정날개가 있는 경우이다. 압력면에서와 유사하게 전류고정날개가 있는 경우 없는 경우와 비교해 압력의 최소값은 각각 -4.1과 -4.2로 약 5%의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이, 전류고정날개로 인해 압력면과 흡입면의 압력분포가 전체적으로 각각 높아지고 낮아졌기 때문에 추진기에서 발생하는 추력이 증가할 것으로 예상된다. 흡입면에서 압력이 낮아진 것은 추력에 기

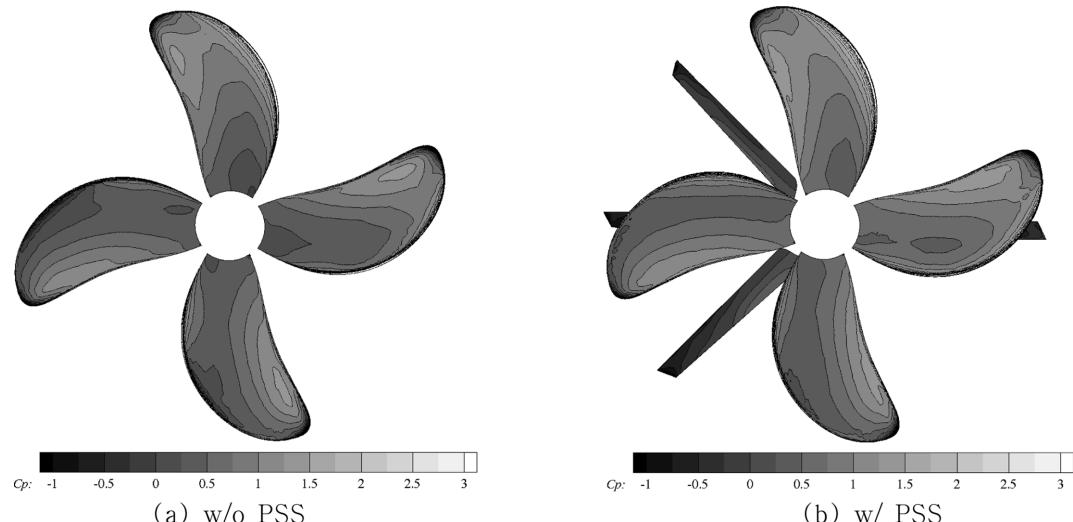


Fig. 4. Pressure coefficient contours on pressure side of blade.

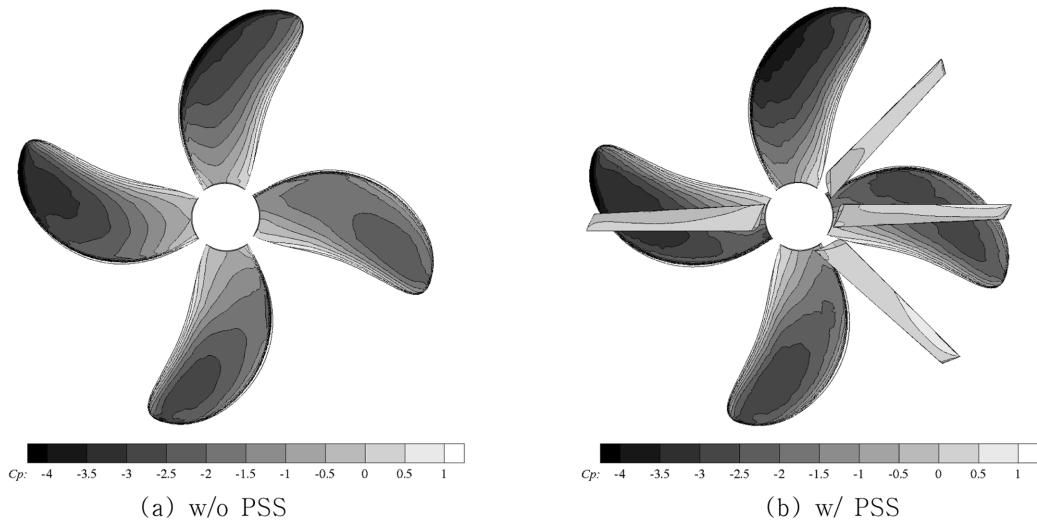


Fig. 5. Pressure coefficient contours on suction side of blade.

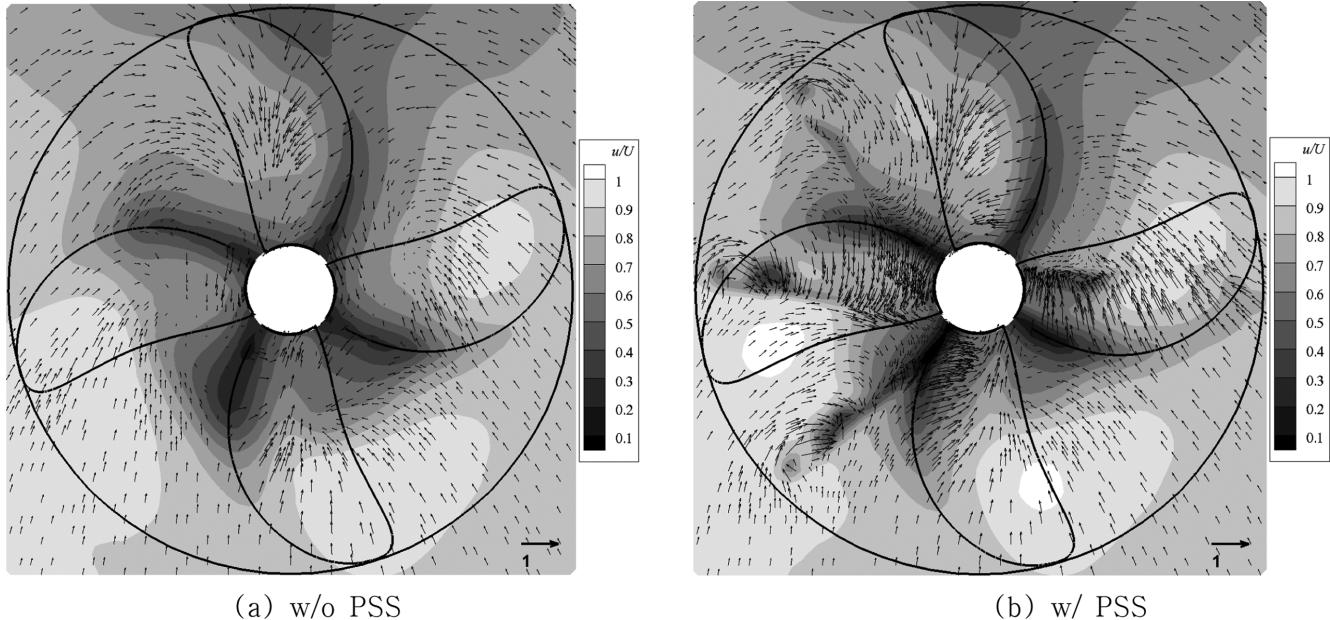


Fig. 6. Nondimensionalized x -velocity contours and y - and z -velocity vectors at $x/L_{pp}=0.0027$.

인할 수도 있지만 캐비테이션이 발생한다면 더 넓은 영역에 발생할 것으로 예상된다.

Fig. 6은 추진기 날개가 0° 의 위치에 있을 때 $x/L=0.0027$ 면에서 입구경계면에서의 속도로 무차원화된 x 방향 속도분포(u_x/U) 및 면에 투영된 벡터분포(u_y/U , u_z/U)를 나타내고 있다. Fig. 6(a)은 전류고정 날개가 없는 경우를 나타낸다. $x/L=0.0027$ 면이 추진기 바로 앞에 위치하고 있어 추진기의 루트(root)의 전연(leading edge)에서는 속도가 느려지는 것을 알 수 있다. 벡터분포를 보면 좌현과 우현에서 위쪽으로 올라가고 추진기 날개 0° 를 근방에서 추진기 허브 방향으로 꺾이는 것을 알 수 있다. 추진기의 회전방향이 시계방향이므로 추진기 우현에서는 유동이 영각을 가지고 추진기에 유입되고 좌현에서는 유동이 추진기의 회전방향과 같은 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)

와 같이 전류고정날개가 있는 경우에는 속도분포와 벡터분포가 변화되는 것을 알 수 있다. 전류고정날개가 없는 경우와 비교해보면, 속도분포가 전체적으로는 유사하게 계산되었다. 다만 전류고정날개로 인해 전류고정날개가 위치하고 있는 90° , 225° , 270° , 315° 에서는 속도가 낮아지고, 추진기 날개의 전연부와 만나는 부근에서는 속도가 더욱 낮아지는 것을 알 수 있다. 벡터분포를 보면 많이 달라진 것을 확인할 수 있다. 우현의 벡터분포는 전류고정날개가 없는 경우와 유사하게 90° 근방에서는 위로 올라가고 0° 근방에서는 하브쪽으로 꺾이는 분포를 보이고 있다. 반면, 좌현의 벡터분포의 경우 위쪽으로 올라가는 유동들이 추진기 날개의 스펜과 수직한 방향으로 변화되어 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 전류 고정날개로 인해 위로 올라가는 유동의 방향이 변경된 것을 확인할 수 있다. 변화된 속도벡

Table 2. Uncertainty assessment for full scale computations for thrust

	Coarse	Medium	Fine	p/RE
Thrust	2547316	2575967	2587750	2.87/2592816
ϵ		-28651	-11783	
GCI			0.244	

터의 방향은 추진기 날개에 영각을 가지고 유입되어 추진기의 효율이 조금 더 증가될 것으로 예상된다. 전류고정날개가 90° , 225° , 270° , 315° 에 위치함으로 인해 전류고정날개의 끝 부분에서 발생된 보오텍스가 추진기에 유입되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 회전하는 보오텍스 유동은 추진기로부터 야기되는 변동압력분포에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

4.2 실선 스케일 계산결과

모형선 스케일 계산과 동일하게 계산영역의 크기와 경계조건을 설정하였다. 실선 스케일 계산에 대해서는 검증할만한 자료가 없기 때문에 계산결과에 대해 불확실성 해석을 수행하였다. 격자 수 3.8백만, 7백만, 14백만에 대해 추진기에 작용하는 추력에 대해 Table 2와 같이 불확실성 해석을 하였다. 해석결과 RE 기준으로 1%이내의 오차를 보이는 것으로 계산되었다. 해석결과로부터 실선 스케일 계산 결과가 수치적으로 충분히 수렴된 결과임을 알 수 있다.

추진기를 고려한 계산은 자항점에서 이루어졌다. 모형시험과 동일하게 자항점을 찾기 위해 추진기 회전수를 변경하면서 계산하였으며, 선체와 타의 저항이 추력과 같아지는 위치에서 자항점의 회전수를 선정하였다. 전류고정날개가 없는 경우 자항점의 회전수는 71.5 rpm으로 계산되었고, 전류고정날개가 있는 경우 자항점의 회전수는 68.4 rpm으로 계산되었다. 모형선 스케일 계산과 마찬가지로 전류고정날개에 의해 자항점의 회전수가 줄어든 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 추진기 날개가 0° 의 위치에 있을 때 실선 스케일 계산에

서의 추진기 압력면에서의 압력계수분포를 나타낸다. Fig. 7(a)는 전류고정날개가 없는 경우이고 Fig. 7(b)는 전류고정날개가 있는 경우이다. 모형선 스케일 계산결과와 비교하면 전체적인 분포는 유사하나 압력의 최대값이 상승하였고, 최대값을 가지는 전연부가 넓어진 것을 확인할 수 있다. 전류고정날개가 있는 경우 없는 경우와 비교해 보면 모형선 스케일에서의 변화와 유사하게 압력의 최대값은 $C_p=3$ 으로 유사하나 전체적인 분포가 조금 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 추진기 날개가 0° 의 위치에 있을 때 실선 스케일 계산에서의 추진기 흡입면에서의 압력계수분포를 나타낸다. Fig. 8(a)는 전류고정날개가 없는 경우이고 Fig. 8(b)는 전류고정날개가 있는 경우이다. 모형선 스케일 계산결과와 비교하면 압력의 최소값은 -5.9로 유사하나 전연의 낮은 부분이 넓어진 것을 확인할 수 있다. 모형선 스케일에서의 변화와 유사하게 전류고정날개가 있는 경우 없는 경우와 비교해 압력의 최소값은 거의 유사하나 전체적인 분포가 조금 낮은 것을 확인할 수 있다. 이와 같이, 전류고정날개로 인해 압력면과 흡입면의 압력분포가 전체적으로 각각 높아지고 낮아졌기 때문에 추진기에서 발생하는 추력이 모형시험과 동일하게 증가할 것으로 예상된다. 흡입면에서 압력이 낮아지고 영역이 넓어진 것은 추력에 기인할 수도 있지만 캐비테이션이 발생한다면 더 넓은 영역에 발생할 것으로 예상된다. 또한, 모형선 스케일보다 실선 스케일에서 압력이 낮은 영역이 많은 것으로부터 실선의 캐비테이션 추정을 위해서는 실선의 반류분포가 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 추진기 날개가 0° 의 위치에 있을 때 $x/L=0.0027$ 면에서 무차원화된 x방향 속도분포 및 면에 투영된 벡터분포를 나타내고 있다. Fig. 9(a)는 전류고정날개가 없는 경우를 나타낸다. 전류고정날개가 없는 경우에 대해 모형선 스케일 결과와 비교해 보면 빠른 속도영역이 넓어진 것을 확인할 수 있다. 이는 Re 수가 증가할수록 경계층의 두께가 상대적으로 줄어들기 때문에 빠른 속도영역이 넓어진 것으로 추정된다. 특히 u_x/U 가 1보다 큰 영역이 넓어진 것을 알 수

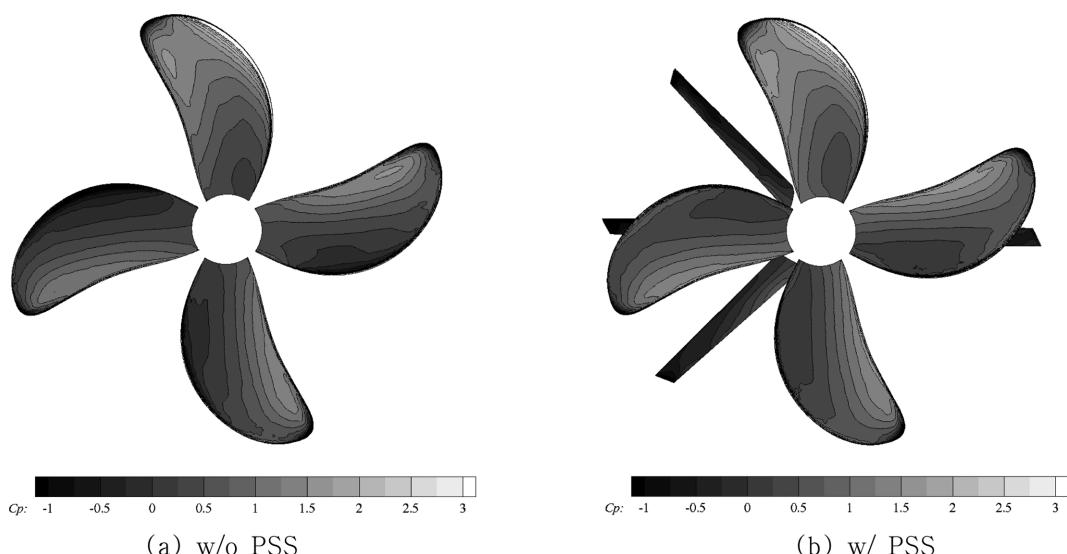


Fig. 7. Pressure coefficient contours on pressure side of blade (full scale ship).

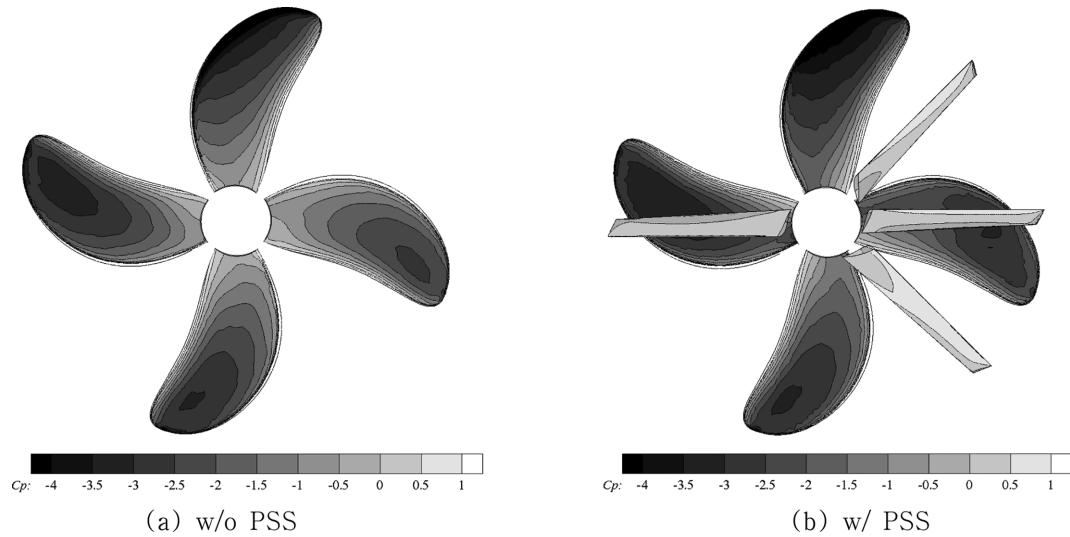


Fig. 8. Pressure coefficient contours on suction side of blade (full scale ship).

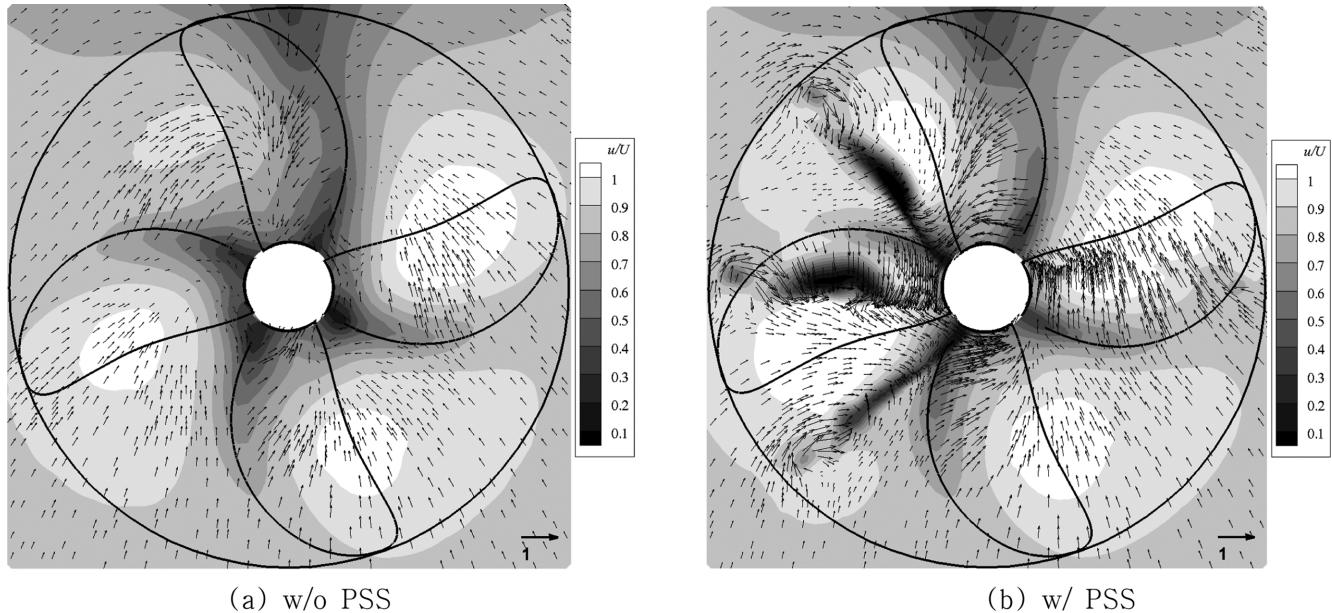


Fig. 9. Nondimensionalized x -velocity contours and y - and z -velocity vectors at $x/L_{pp}=0.0027$ (full scale ship).

있다. 모형선 스케일 결과와 비슷하게 $x/L=0.0027$ 면이 추진기 바로 앞에 위치하고 있어 추진기 루트의 전연에서 속도가 느려지는 것을 알 수 있다. 벡터분포를 보면 좌현과 우현에서 위쪽으로 올라가고 추진기 날개 0° 를 근방에서 추진기 헤브 방향으로 꺾이는 것을 알 수 있다. 모형선 스케일 계산결과와 유사하게 추진기의 회전방향이 시계방향이므로 추진기 우현에서는 유동이 영각을 가지고 추진기에 유입되고 좌현에서는 유동이 추진기의 회전방향과 같은 것을 확인 할 수 있다. Fig. 9(b)는 전류고정날개가 있을 때의 결과를 나타낸다. 전류고정날개로 인해 전류고정날개가 없는 경우보다 추진기에 유입 되는 속도분포가 더 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 다만 전류고정 날개로 인해 전류고정날개가 위치하고 있는 $90^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ 에 서는 속도가 낮아지고, 추진기 날개의 전연부와 만나는 부근에서는

속도가 더욱 낮아지는 것을 알 수 있다. 벡터분포를 보면 모형선 스케일 결과와 유사하게 변화된 것을 알 수 있다. 우현의 벡터분포는 전류고정날개가 없는 경우와 유사하게 90° 근방에서는 위로 올라가고 0° 근방에서는 헤브쪽으로 꺾이는 분포를 보이고 있다. 반면, 좌현의 벡터분포의 경우 위쪽으로 올라가는 유동들이 추진기 날개의 스팬과 수직한 방향으로 변화되어 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 모형선 스케일 계산결과와 동일하게 전류 고정날개로 인해 위로 올라 가는 유동의 방향이 변경된 것을 확인할 수 있다. 변화된 속도벡터의 방향은 추진기 날개에 영각을 가지고 유입되어 추진기의 효율이 조금 더 증가될 것으로 예상된다. 전류고정날개가 $90^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ 에 위치함으로 인해 전류고정날개의 끝 부분에서 발생된 보오 텍스가 추진기에 유입되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 회전하

는 보오텍스 유동과 전류고정날개 후류로 인한 낮은 속도분포는 추진기로부터 야기되는 변동압력분포에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 예상된다.

5. 결 론

전류고정날개의 효과에 대해 알아보기 위하여 전류고정날개를 추진기 앞에 위치시키고 모형선 스케일과 실선 스케일에서 계산하였다. 모형선 스케일 계산의 정확도를 검증하기 위해 공청빈류를 모사하였고 실험과 비교하였다. 실선 스케일 계산에서의 정확도를 검토하기 위해 격자에 대한 수렴도를 검토하였고, 계산결과 수치적으로 충분히 수렴된 결과를 얻을 수 있었다.

모형선 스케일 계산과 실선 스케일에서 전류고정날개에 대한 계산결과 전류고정날개가 추진기에 유입되는 유동의 크기를 증가시키고 회전방향을 바꾸었다. 비판 회전방향은 추진기에 영작을 가지고 유입되어 추진 효율을 증가시키는 역할을 하였다. 전류고정날개의 끝에서 발생하는 보오텍스 유동과 전류고정날개의 경계층으로 인한 저속의 속도 분포가 관찰되었다. 이로 인한 캐비테이션 및 선체 진동에 대한 영향은 본 논문의 내용에서 다루지 않았다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 “산학협력 선도대학(LINC) 육성사업”과 “일반연구자사업(2013R1A1A2012597)”의 연구결과입니다.

References

- [1] Celik, F., 2007, “A numerical study for effectiveness of a wake equalizing duct”, Ocean Engineering, Vol. 34, pp. 2138-2145.
- [2] Choi, J.-E., Kim, J.-H., Choi, B.J., Lee, S.B., Chung, S.H., Seo, H.W., 2014, “Development of energy-saving devices for a hull slow-speed ship through improving propulsion performance”, 12th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Changwon, Korea, October 20-25.
- [3] Feng, P., Ma, N., Gu, X., 2013, “Hydrodynamic analysis and design investigation of a ship with wave devouring hydrofoils for energy efficient propulsion”, 12th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Changwon, Korea, October 20-25.
- [4] Hansen, H.R., Dinham-Peren, T., Nojiri, T., 2011, “Model and full scale evaluation of a propeller boss cap fins device fitted to an aframax tanker”, 2nd International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, June 15-17.
- [5] Hollenbach, U., Reinholtz, O., 2011, “Hydrodynamic trends in optimizing propulsion”, 2nd International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, June 15-17.
- [6] Kawamura, T., Ouchi, K., Nojiri, T., 2012, “Model and full scale CFD analysis of propeller boss cap fins (PBCF)”, Journal of Marine Science and Technology, 17, pp. 469-480.
- [7] Lee, S.-K., Yu, K., Tseng, R.K.-C., 2014, “Propeller performance of a containership fitted with energy-safing rudder fin in a seaway”, 12th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Changwon, Korea, October 20-25.
- [8] Park, S., Park, S.W., Rhee, S.H., Lee, S.B., Choi, J.-E., Kang, S.H., 2013, “Investigation on the wall function implementation for the prediction of ship resistance”, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 5, pp. 33-46.
- [9] Park, J.S., Choi, Y.B., Kim, S.P., Kim, I.P., Hwang, Y.S., Park, J.J., Kim, Y.S., “Installation structure of pre-swirl stator for low-speed vessel”, Registered number of Korea patent: 10-2006-0108472.
- [10] Shin, H.J., Lee, K.H., Han, M.R., Lee, C.Y., Shin, S.C., 2013, “Pre-swirl duct of fuel oil saving device design and analysis for ship”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 50, No. 3, pp. 145-152.
- [11] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, Z., 1995, “A new k-e eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - model development and validation”, Computers & Fluids, Vol. 24, No. 3, pp. 227-238.
- [12] Seo, J.H., Seol, D.M., Lim, T.G., Park, S.T., Han, B.W., Rhee, S.H., 2013, “A stereo PIV measurement of a model ship wake in a towing tank with uncertainty assessment”, 10th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Delft, TheNetherlands, July 2-4.

Received 15 May 2014

Revised 19 August 2014

Accepted 19 August 2014