

선미의 불균일 유동장에서 받음각을 고려한 비대칭 전류고정날개 설계

이기승 · 김문찬[†] · 신용진 · 강진구
부산대학교

Design of Asymmetric Pre-swirl Stator for KVLCC2 Considering Angle of Attack in Non-uniform Flow Fields of the Stern

Ki-Seung Lee · Moon-Chan Kim[†] · Yong-Jin Shin · Jin-Gu Kang
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

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.

International Maritime Organization (IMO) regulates an emission of greenhouse gases by creating an Energy Efficiency Design Index (EEDI) to reduce environmental pollution. In propulsion system field, studies are under way on Energy Saving Device (ESD), which can improve propulsion efficiency with the propeller, to reduce the EEDI. Among the studies, the study of Pre-Swirl Stator (PSS) has been actively conducted from long time ago. Recently the variable pitch angle type pre-swirl stator has been studied to improve the propulsion efficiency in non-uniform flow fields of the Stern. However, for traditional design methods, no specific design method has been established on the blade or location of radius. In this study, proper design method is proposed for each blade or location for radius according to hydrodynamic pitch angle.

Keywords : Energy saving device(에너지 저감 장치), Asymmetric pre-swirl stator(비대칭 전류고정날개), CPAS(Constant Pitch Angle type Pre-swirl Stator), VPAS(Variable Pitch Angle type Pre-swirl Stator), Low-speed full ship(저속 비대선), KVLCC2, Potential flow(포텐셜 유동), CFD(전산유체역학), Model Test(모형 시험)

1. 서론

선박의 온실가스 배출에 대한 심각성이 점점 대두됨에 따라 국제해사기구(International Maritime Organization)에서는 온실가스 배출 감소를 위해 EEDI라는 에너지 효율지수를 만들어 규제를 진행하고 있다. EEDI를 감소시키는 방법으로는 대표적으로 재생에너지의 사용, 온실가스 배출이 적은 연료의 사용 그리고 다양한 감축기술의 개발 등이 있다. 그 중 가장 적용이 쉬우면서 큰 효과를 낼 수 있는 방법으로는 선박의 저속 운항이 있다. 실제로 운항 속도를 10%로 감속시킬 때마다 연료의 소모량은 20%까지 절감할 수 있다. 하지만 선박이 무한히 저속운항을 할 수는 없으며, 엔진 자체의 특성상 일정 속도 이하의 저속운항은 엔진에게 부하를 주기도 하고, 오히려 연비 절감의 효과도 감소하게 된다. 따라서 선박의 추진효율을 상승시켜 선박의 연비를 개선시킬 수 있는 다양한 녹색선박기술(green ship technology)에 대한 연구가 활발히 진행

되고 있으며 이러한 기술력은 각 나라와 조선업체의 경쟁력으로 자리 잡고 있다. 이에 본 연구에서는 프로펠러와 함께 추진효율을 높여주는 ESD (Energy Saving Device) 중 대표적인 전류고정날개(Pre-Swirl Stator)에 중점을 두고 연구를 수행하였다.

ESD는 Main-Device인 프로펠러를 중심으로 상류방향의 Pre-Device와 하류방향의 Post-Device로 분류할 수 있다. 전류 고정 날개의 경우, 프로펠러의 전방에 위치하여 프로펠러에 의해 유기되어지는 회전방향의 속도성분과 반대방향의 속도성분을 주어 회전에너지의 손실을 회수하여 추진효율을 상승시키는 ESD이다.

전류고정날개에 대한 연구는 1960년대 Mitsubishi 조선소에서 reaction fin 이라는 이름으로 활발히 연구가 진행되었고, 1980년대에는 VLCC에 적용하여 추진효율을 향상시키기도 하였다. 국내에서는 1990년대 초부터 KRISO를 중심으로 연구가 지속적으로 수행되었다. 특히 기존의 미츠비시 조선소에서 개발된 선박의 좌우현의 날개수가 대칭형인 상태에서 날개수가 서로 다른 비대칭 전류고정날개가 연구 개발 되었다. 현재 저속비대선 뿐만

아니라 컨테이너선까지 다양한 선종에 걸쳐 적용되어지고 있다.

또한, 각 날개의 반경별 피치각이 일정한 형태인 CPAS (Constant Pitch Angle type Pre-swirl Stator)와 더불어 선미에서 선체의 형상에 의해 형성되는 불균일한 유동장에 대해 추진효율을 더욱 향상시키기 위해 반경별 피치각이 다른 VPAS(Variable Pitch Angle type Pre-swirl Stator)에 관한 연구도 수행되어지고 있다. 대표적으로 Lee et al.(2016)은 LNG 선에 대하여 VPAS를 적용하여 모형시험을 통해 8.13%의 전달동력 감소를 보였다. 기존의 설계 방법의 경우 양력면 이론을 기반으로 한 설계 프로그램인 PASTA 프로그램(Lee et al., 1992)을 사용하여 날개의 순환분포를 균일하게 할 수 있도록 반경별 피치각 설계를 수행하였다. 하지만 날개나 반경에 따른 구체적인 설계방법이 정립되지 않아 다른 선박에 적용하는데 있어 어려움이 따르며, 설계자에 따라 설계 결과에 다소 차이가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 선미의 불균일한 유동장에서 각 날개의 반경별 유체역학적 피치각을 고려하여 각 날개나 반경별 위치에 따라 적합한 설계 방법을 제시하고, KVLCC2에 대하여 적용하여 추진효율을 극대화 할 수 있는 VPAS를 설계하는 것을 목표로 하였다. 상용 CFD 해석 프로그램인 Star ccm+를 이용하여 CFD 해석을 수행하였고, 최종적으로 모형시험을 통해 성능을 검증하였다.

2. 비대칭 전류고정날개 설계

일반적으로 비대칭 전류고정날개를 설계하는데 있어 크게 세 단계로 나눌 수 있다. 우선 첫 번째 단계에서는 Bare hull 상태에서의 선형특성 및 반류에 대한 연구를 수행한다. 본 연구에서는 저항시험에 대한 CFD를 해석을 수행한 결과를 기반으로 비대칭 전류고정날개의 초기 설계 방향을 결정하였다. 두 번째 단계에서는 양력면 이론을 기반으로 하는 PSS 설계프로그램인 PASTA를 이용하여 첫 번째 단계에서 수행한 연구 결과들을 토대로 비대칭 전류고정날개를 설계한다. 마지막으로 세 번째 단계에서는 저항시험에 대한 CFD 해석을 통하여 설계된 비대칭 전류고정날개가 설계 목적에 맞는 성능을 가지는지 확인한다. 만약 충분한 성능을 달성하지 못하였다면 후처리(Post-process) 등을 이용한 분석을 통해 원인을 찾은 후, 두 번째 단계로 돌아가 특정 설계 변수에 대해 재설계 과정을 거쳐 위의 과정을 반복하게 된다. 본 연구에서는 두 번째 단계에 반경별 최적받음각을 고려한 설계 방법을 추가하여 VPAS를 설계하였다.

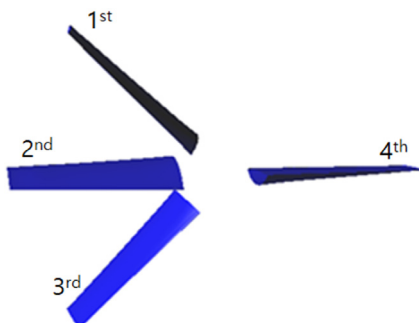


Fig. 1 3D shape of CPAS

연구의 기준이 되는 제원으로는 Lee et al.(2017) 연구에서 KVLCC2에 대하여 설계된 CPAS의 제원을 이용하였다. 형상과 무차원화된 제원은 각각 Fig. 1, Table 1과 같다. 이 연구에서는 날개에서 중요한 설계 변수인 코드길기와 캠버의 비 (f_0/C)를 변화시켜가며 KVLCC2에 대한 성능 연구를 수행함으로써 KVLCC2에 적합한 CPAS의 제원과 피치각을 결정 하였다.

Table 1 Dimension of CPAS

r/R	Chord/Diameter	Camber/Chord	Thickness/Diameter
0.2	0.186	0.081	0.037
0.25	0.183	0.078	0.035
0.3	0.180	0.074	0.033
0.4	0.173	0.068	0.03
0.5	0.167	0.060	0.026
0.6	0.161	0.051	0.023
0.7	0.154	0.043	0.019
0.8	0.149	0.033	0.016
0.9	0.143	0.024	0.012
0.95	0.140	0.018	0.011
1	0.137	0.012	0.009

2.1 대상 선박 및 프로펠러

본 연구의 대상 선박은 KVLCC2이며 프로펠러는 KP458이다. KVLCC2는 저속 비대선으로서 비교적 방형계수가 크고 점성저항의 영향을 크게 받는다. 또한 모형시험 결과가 공개되어 있어 많은 선행연구들에 사용되었기 때문에 CFD 해석을 통한 연구에서 이러한 선행연구들과의 비교를 통해 본 연구의 신뢰성을 확보할 수 있을 것이라 판단하였다. 또한, 비대칭 전류고정날개 설계와 CFD 해석을 수행하는데 있어 49.3의 축적비를 사용하였다. 대상선박과 프로펠러의 자세한 형상과 주요 제원은 Fig. 2와 Table 2에 나타내었다.



Fig. 2 3D shapes of model ship and propeller

Table 2 Main dimension of KVLC2

Parameter	Real ship	Model ship
Length PP (m)	320.0	6.491
Length WL (m)	325.5	6.602
Breadth (m)	58.0	1.177
Depth (m)	30.0	0.609
Design draught (m)	20.8	0.422
C_B	0.8098	0.8098
Design speed (knots)	15.5	2.208
Prop. Diameter (m)	9.86	0.2
Scale ratio	49.3	

2.2 수치해석 방법을 이용한 저항 성능 및 반류 연구

2.2.1 해석 방법

저항시험에 대한 CFD 해석을 수행하기 위해 상용프로그램인 Star ccm+를 사용하였다. 이를 통해 Bare hull 상태의 저항 값과 공칭 반류 분포를 얻을 수 있었으며, 공개된 실험값과의 비교를 통해 그 정도를 확인하였다.

지배방정식은 연속방정식과 비압축성의 Navier-Stokes 식을 시간 평균하여 얻어지는 RANS 방정식이며, 난류 모델의 경우 Realizable $k-\epsilon$ model을 사용하였다. 압력과 속도는 SIMPLE (Semi-implicit method for pressure linked equations consistent) 알고리즘에 의해 연성이 되도록 하였다.

또한 VOF(Volume of Fluid) 기법을 사용하여 자유수면 유동에 대하여 해석을 수행하였으며, DFBI를 통해 실제 모형시험에 서와 동일하게 Pitch와 Heave 운동을 자유롭게 해줌으로써 해석 결과의 정도를 높여주었다.

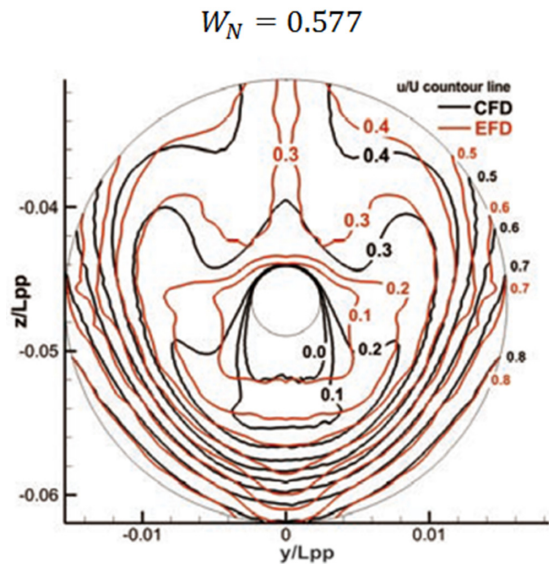
Table 3 Domain Size and Boundary conditions

Domain size	-2.5L<X<3.0L -2.5L<Y<2.5L -1.6L<Z<0.5L
Top	Velocity inlet
Bottom	Velocity inlet
Inlet	Velocity inlet
Outlet	Pressure outlet
Side	Symmetry plane

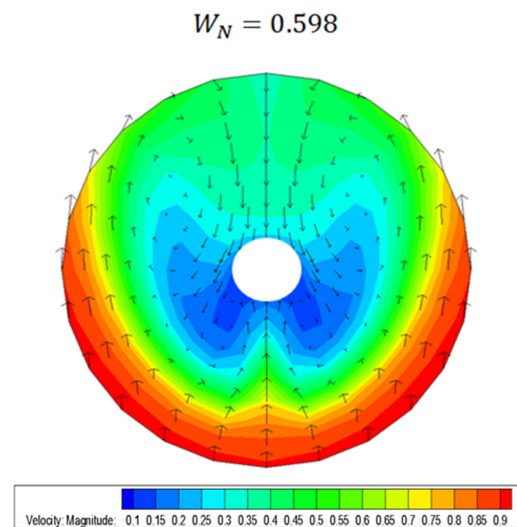
격자계의 경우 Star ccm+에서 제공하는 자동 격장 생성 방법을 사용하였다. $y+$ 는 80으로 적용하였으며 선체를 포함하고 있는 Domain 영역에는 Trimmer mesh를 사용하였고, 전체 격자수는 약 300만개로 구성하여 계산을 수행하였다. 또한, Domain 영역의 크기는 Guedes Soares & Santos (2016)의 연구를 참고하여 설정하였으며, 경계 조건과 함께 Table 3에 정리하였다.

2.2.2 해석 결과

CFD 해석 결과의 신뢰성 확보를 위해 초기설계단계에서 본 연구의 저항시험에 대한 해석 결과를 KRISO에서 수행되었던 모형시험의 결과 값을 Table 4를 통해 비교하였다. 그 결과 모형시험과 약 1.5%의 차이를 보였다. 또한, Fig. 3에서는 본 연구의 공칭 반류에 관한 연구 결과를 CFD와 실험을 통해 얻어진 선행 연구의 공칭 반류와 비교하였을 때, 공칭반류의 평균 값뿐만 아니라 Bilge vortex를 포함한 전체적인 반류 분포 형상이 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 CFD 해석에 의한 수치적 결과와 격자계 구성 등이 충분한 신뢰성을 확보하였다고 판단하였고, 이러한 결과들과 해석조건을 바탕으로 하여 비대칭 전류고정날개의 설계와 저항시험에 대한 CFD 해석을 수행하였다.



(a) Results of CFD and EFD (Win et al., 2016)



(b) A result of CFD (PNU)

Fig. 3 A comparison of distributions of nominal wake for CFD and EFD

Table 4 A comparison of results of resistance test for CFD and EFD

	Fr	λ	C_{TM} ($\times 10^{-3}$)	Diff(%)
KRISO (EFD)	0.141	58.0	4.056	0.0
PNU (CFD)	0.141	49.3	3.996	1.48

2.3 반경별 받음각을 고려한 설계

일반적으로 CPAS를 설계할 때는 각 날개가 받는 하중이 균일해지도록 하여 설계를 수행한다. 하지만 Fig. 3에서와 같은 선미의 불균일한 반류 분포에 의해 각 날개의 반경별 위치에 따라 유체역학적 피치 각이 다르게 형성된다. 따라서 모든 반경에서 동일한 피치 각으로 설계된 CPAS의 경우 불필요한 저항을 야기할 뿐만 아니라 효율적인 Swirl을 만들어 내지 못하게 된다. 이에 대한 분석을 위해 본 연구에서는 연구의 기준으로 선정하였던 CPAS에 대하여 날개의 반경별 위치에 따라 설계된 고정 피치각에서 날개의 반경별 위치에서 형성되는 유체역학적 피치각을 빼주어 계산한 반경별 받음각 분포를 Fig. 4에 나타내었다.

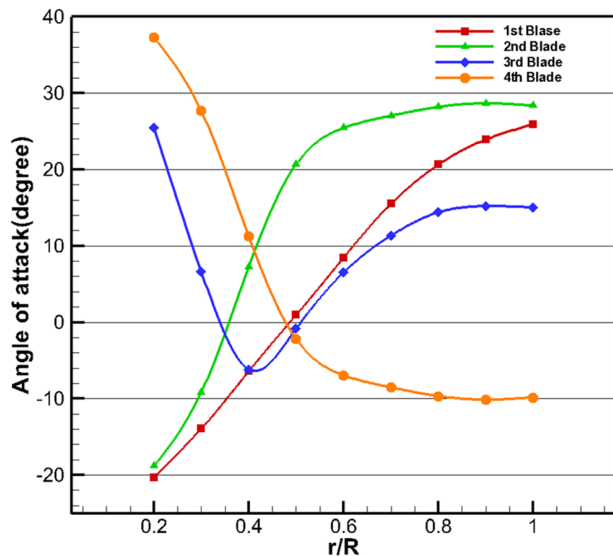


Fig. 4 Distribution of angle of attack according to radius of each blade

Fig. 4에서 받음각이 10° 이상으로 크게 형성되는 반경 위치의 경우 프로펠러의 회전방향과 같은 방향으로의 유동이 형성되는 부분이기 때문에 Fig. 5와 같이 프로펠러의 회전방향과 반대방향으로 최대한 swirl을 만들어주어야 하는 부분이다. 하지만 동일한 하중 조건에서 코드와 캠버의 비(f_0/C)의 감소에 의해 날개의 받음각이 과도하게 커질 경우 유동이 날개의 표면을 따라 충분히 흐르지 못하고 박리(separation)가 발생할 수 있다. 그로인해 Swirl을 효율적으로 만들어내지 못함에 따라 효율이 감소할 수 있다. 반대로 코드와 캠버의 비(f_0/C)가 너무 커질

경우 설계 피치각이 너무 작아져 효율이 감소하거나, 캠버 대비 코드가 너무 짧아지면서 유속이 빠른 곳에서는 역시 박리가 일어날 가능성이 있어 성능 측면에서 불리할 수 있다. 따라서 이와 같이 받음각이 크게 형성되는 반경별 위치에 대해서는 유동이 날개표면을 따라 잘 흘러가나갈 수 있도록 코드와 캠버의 비에 따른 성능 연구를 통해 설계되어진 CPAS의 피치 각을 동일하게 적용해주었다.

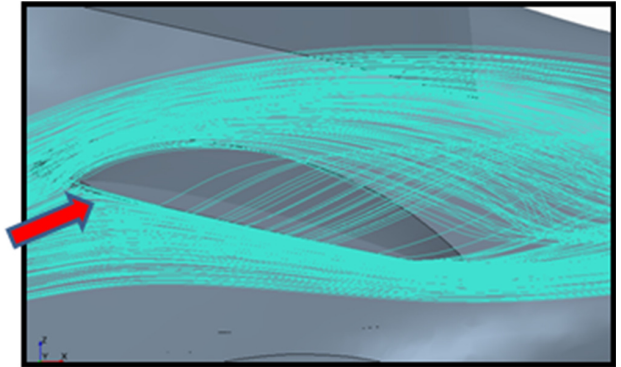


Fig. 5 Stream line at the tip of 2nd blade

반대로 Fig. 6에서와 같이 받음각이 (-)로 형성되어 유동이 흡입면으로 들어오는 부분의 경우, 선체 형상으로 인해 프로펠러의 회전방향과 반대되는 방향의 유동이 충분히 형성되는 부분이지만 전류고정날개로 인해 오히려 유동이 방해받게 되어 Swirl이 감소하고 불필요한 저항이 증가할 것으로 예상할 수 있다. 따라서 해당되는 위치에서 유동의 유체역학적 피치각을 고려하여 적절한 받음각을 가질 수 있도록 설계하였다. 하지만 이렇게 설계가 적용될 경우, Hub 쪽과 Tip쪽에서의 설계 피치각의 차이가 크게 날 것이라는 것을 Fig. 4를 통해 예상할 수 있고, 너무 과도한 피치각의 차이는 제작상의 문제를 야기할 수 있다. 따라서 적정 받음각에 대한 연구를 위해 받음각의 범위를 2~4°, -1~1°, -4~ -6°의 3가지 case로 나누어 설계를 수행하였고, 차례대로 case 1, case 2, case 3라 칭하였다. 단, 4번 날개의 경우 받음각이 3~4°가 되도록 설계를 하여도 HUB와 Tip에서의 피치각 차이가 크지 않아 모든 case에서 동일하게 적용해주었다.

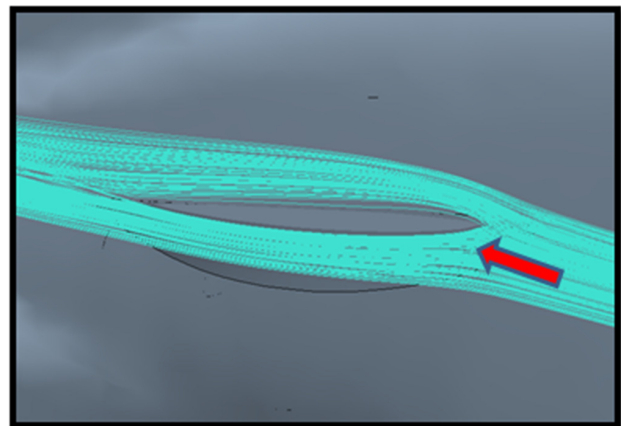


Fig. 6 Stream line at the tip of 4th blade

설계된 각 case의 형상은 각각 Fig. 7 ~ Fig. 9과 같다. 그림에 점선 원으로 표시된 부분을 보면 Fig. 7에서 Fig. 9로 갈수록 받음각이 작아짐에 따라 허브 쪽의 피치각이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 각 case의 날개별 설계 피치각 분포와 받음각 분포를 각각 Fig. 10 ~ Fig. 13, Fig. 14 ~ Fig. 17에 나타내었다. 이 중 Fig. 16에서 3번 날개에 대한 받음각 분포를 보면 0.2R~0.3R 부근에서 받음각이 상당히 크게 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 위치의 경우 선체의 형상으로 인해 유속이 선속을 기준으로 약 0.1V인 매우 저속구간으로써 전류고정날개의 성능에 큰 영향을 주지 않을 것이라 가정하여 이 위치에서의 받음각 분포는 고려하지 않고, 전체적으로 각 날개의 피치각 분포 경향이 일관성이 있도록 설계를 수행하였다.

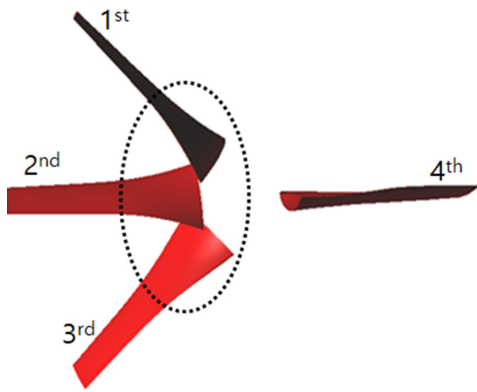


Fig. 7 3D shape of VPAS(case 1)

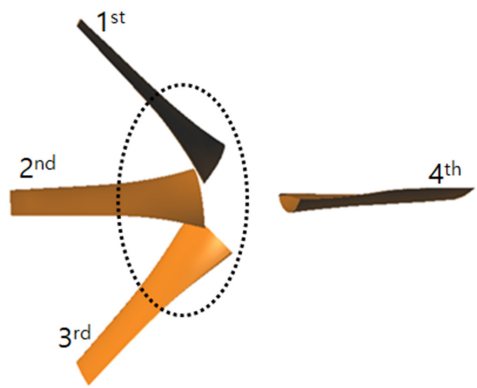


Fig. 8 3D shape of VPAS(case 2)

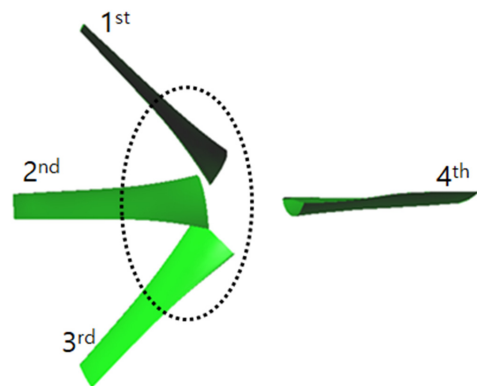


Fig. 9 3D shape of VPAS(case 3)

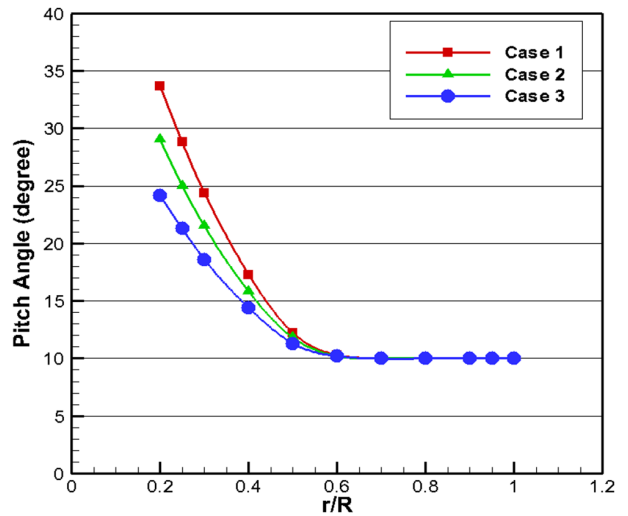


Fig. 10 Distribution of pitch angle according to radius of 1st blade

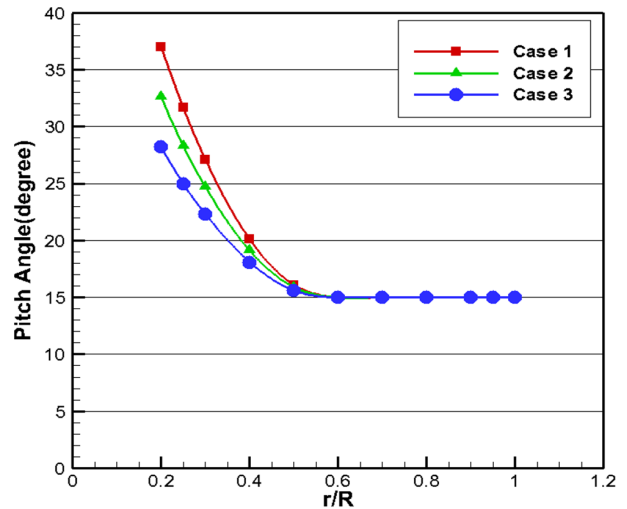


Fig. 11 Distribution of pitch angle according to radius of 2nd blade

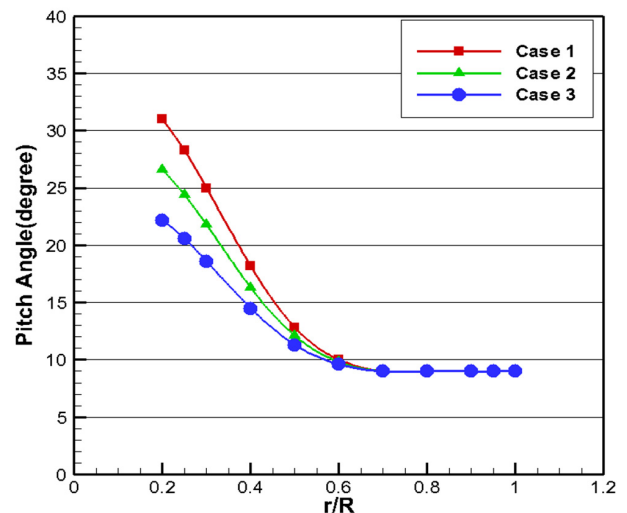


Fig. 12 Distribution of pitch angle according to radius of 3rd blade

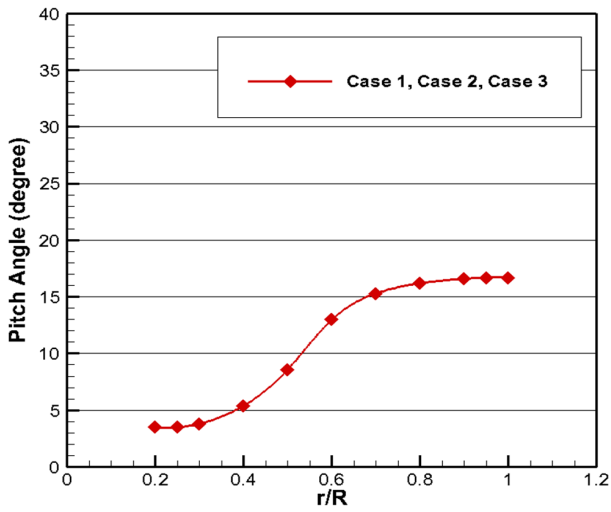


Fig. 13 Distribution of pitch angle according to radius of 4th blade

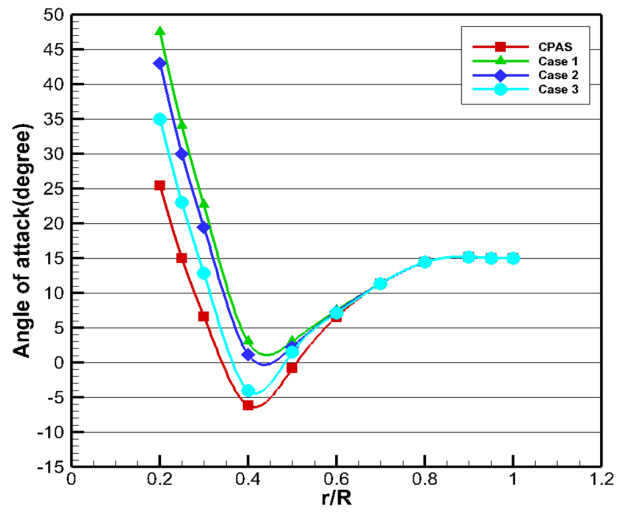


Fig. 16 Distribution of Angle of attack according to radius of 3rd blade

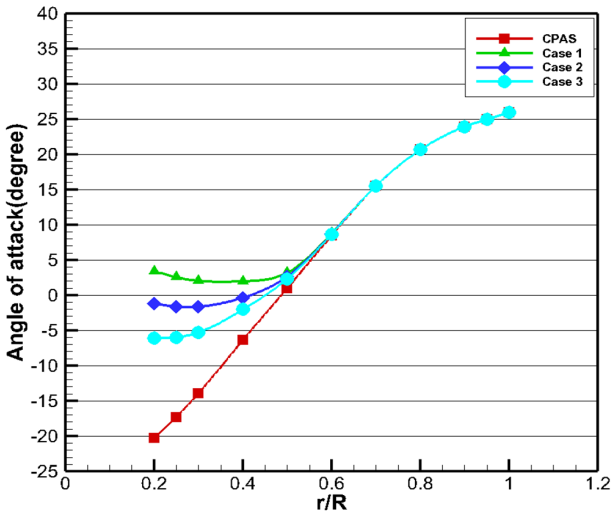


Fig. 14 Distribution of Angle of attack according to radius of 1st blade

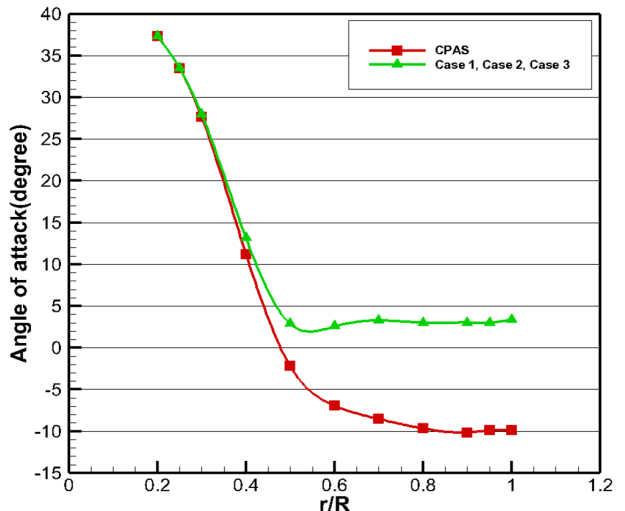


Fig. 17 Distribution of Angle of attack according to radius of 4th blade

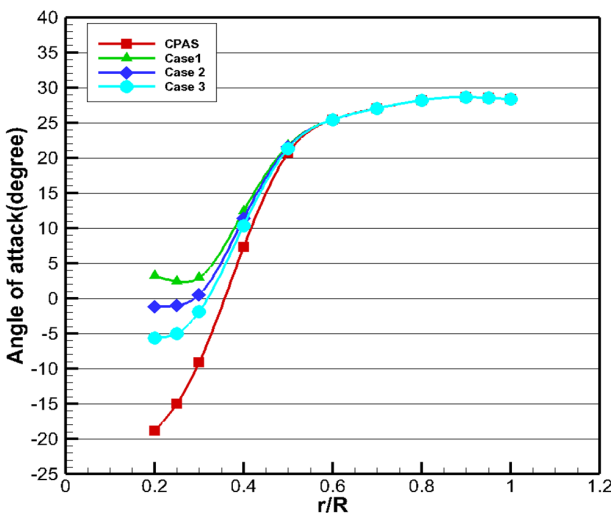


Fig. 15 Distribution of Angle of attack according to radius of 2nd blade

2.4 수치해석 방법을 이용한 저항 성능 연구

2.4.1 해석 방법

설계된 비대칭 전류고정날개를 부착함에 따른 상대적인 전달 동력 감소량을 비교하기 위하여 상용프로그램인 Star ccm+를 사용하여 저항시험에 대한 CFD 해석을 수행하였다. 고정된 유동장인 Domain 영역의 전체적인 격자계 구성은 trimmer mesh를 이용하여 저항시험에 대한 CFD 해석에서와 동일하게 구성해 주었다. Rotating 영역에서는 프로펠러의 회전 방법으로 Sliding interface moving mesh 기법을 적용하였고, 복잡한 형상과 수치계산의 정확도를 고려하여 회전하는 프로펠러의 주위에는 Polyhedral 격자로 구성하는 hybrid 격자법을 적용하였다.(Park et al., 2016) 최종적으로 전체 격자수를 약 410만개로 구성하여 계산을 수행하였다.

2.4.2 해석 결과

Bare hull과 CPAS 그리고 각 case의 VPAS가 부착된 선박에 대한 자항시험 CFD 해석을 통해 모형선의 전달동력을 비교해 본 결과, Case 1이 Bare hull 대비 7.82%로 전달동력 감소량이 가장 컸으며 CPAS와 비교하였을 때 3.43%의 전달동력 감소를 확인할 수 있다. 그 결과는 Table. 5와 같다. 결과를 조금 더 자세히 분석해보면 Case 2의 경우 효율이 Case 1과 비교했을 때 0.1% 이내로 성능 차이가 거의 없는 것으로 판단되고, 날개의 받음각이 가장 작았던 Case 3의 경우는 확실히 Case 1과 Case 2에 비하여 효율 측면에서 확실히 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 제작 문제를 고려한다면 날개의 Hub와 Tip에서의 피치각의 차이를 최대한 작게 하는 것이 좋으므로, 최종적으로 효율측면과 제작상의 편의를 종합적으로 고려하여 case 2를 본 연구의 최적 VPAS로 선정하였다.

VPAS를 부착함에 따른 효율 증가의 원인을 분석하기 위해 후처리(Post-Process)를 이용한 유선, 압력 분포 그리고 프로펠러의 후류 방향의 임의의 위치(프로펠러 면을 기준으로 길이 방향 $1/4D_F$ 거리, D_F =프로펠러 직경)에서의 반류 비교를 통하여 분석해 보았다. 우선 유동에 맞게 최적 받음각을 적용하였던 Fig.18의 4번 날개의 Tip 부근에서의 유선과 속도 분포를 비교해 보면, CPAS의 피치각이 유체역학적 피치각보다 작음으로써 발생했던 Swirl 감소 현상이 VPAS에서 없어지는 것으로 판단할 수 있다. 또한, Fig. 19의 4번 날개에서의 압력 분포 비교에서도 나타나듯 날개의 흡입면으로 유동이 들어오면서 발생했던 불균일한 압력 분포가 없어지면서 불필요한 저항 증가 성분이 줄어들 것이라는 점도 예상할 수 있다. 마지막으로 Fig. 20의 프로펠러 후류에서의 반류를 보면 (a)의 Bare hull에서의

Table 5 Results of Self-Propulsion test using the CFD

Case	$n_M(rps)$	$Q_M(N \cdot m)$	$2\pi n_M Q_M(W)$	Diff(%)
Bare.	7.822	0.388	19.045	-
CPAS	7.542	0.384	18.210	-4.39
Case 1	7.418	0.377	17.555	-7.82
Case 2	7.419	0.377	17.567	-7.76
Case 3	7.469	0.381	17.895	-6.04

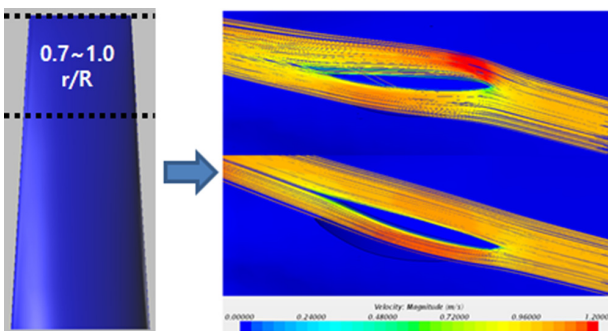


Fig. 18 Stream line and velocity magnitude at tip of 4th blade ($r/R : 0.7\sim 1.0$)

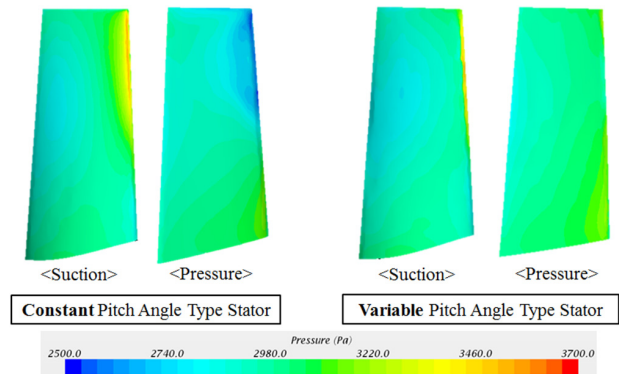


Fig. 19 Pressure distribution of 4th blade

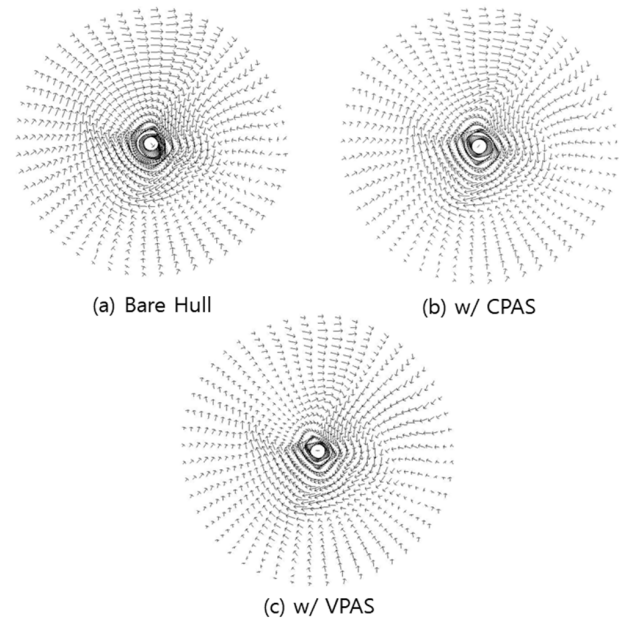


Fig. 20 Wake distribution at plane of downstream of propeller plane

프로펠러 회전방향으로의 강한 유동 성분이 비대칭 전류고정날개 로 인한 회전에너지 회수로 인해 (b), (c) 그림에서와 같이 확연하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, VPAS를 부착하였을 때가 CPAS를 부착하였을 때보다 전체적으로 그 효과가 더 큰 것을 확인할 수 있다.

3. 모형시험

모형시험은 부산대학교 선박예인수조에서 수행되었으며, 모형은 축적비를 58로 하여 제작하였다. 제작된 모형선과 프로펠러의 모습은 Fig. 21, Fig. 22와 같다. 비대칭 전류고정날개의 경우, 연구의 비교 기준이 되었던 CPAS와 본 연구를 통해 설계된 VPAS를 제작하였다. 따라서 시험 case는 총 3가지로 Bare hull과 각각의 비대칭 전류고정날개가 부착된 case로 진행하였다. 제작된 비대칭 전류고정날개의 형상은 Fig. 23과 같다. 모형시험은 저항시험, POW, 자항시험에 대해 수행하였다. 일반

적으로 실선의 성능을 추정하는데 있어서는 ITTC 1978방법을 토대로 2차원 해석법을 적용하였고, C_A 는 0으로 하였고, 비대칭 전류고정날개가 부착된 Case에 대해서는 고정날개의 영향을 고려해주기 위해 ITTC 1999방법을 적용하였다. 위 2가지 해석법은 실선의 반류를 추정하는 데 있어 차이가 있으며 각각의 식은 다음과 같다.

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

$$W_{TS}^{PSS} = (t + 0.04) + (W_{TM} - t - 0.04) \frac{C_{FS} + \Delta C_F}{C_{FM}} + (W_{TM}^{PSS} - W_{TM}) \quad (2)$$

식 (1)의 ITTC 1999방법의 추정식을 보면 식 (2)의 ITTC 1978방법의 추정식에 전류고정날개의 부착에 따른 모형선의 유효반류 계수의 차이만큼을 더해 주는 것을 확인할 수 있다. 이는 전류고정날개에 의해 증가하는 반류를 포텐셜의 영향이 지배적인 Tangential 방향의 유동 성분으로 가정하여 유효반류의 변화량을 실선에 그대로 적용한 것이다. (Lee et al., 2016)



Fig. 21 A picture of model ship



Fig. 22 Pictures of model propeller



Fig. 23 Pictures of model CPAS(left) and VPAS(right)

3.1 모형시험 결과

우선 Fig. 24와 같이 각 시험 case의 저항시험 결과를 그래프로 나타내었다. bare hull 대비 CPAS를 부착하였을 때 EHP

가 약 1.5% 증가하였고, VPAS를 부착하였을 때는 1.0% 증가로 CPAS보다 저항 성능 측면에서 우수한 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설계 과정에서 언급한 것과 같이 최적 받음각을 고려하여 설계를 수행함에 따라 날개로 인한 저항 증가가 줄어든 것으로 사료된다.

자항성능의 경우 Fig. 25의 그래프에서 나타난 것과 같이 설계 속도에서 CPAS를 부착하였을 때 Bare hull 대비 4.8%의 전달동력 감소량을 보였고, VPAS를 부착하였을 때는 7.0%의 전달동력 감소를 보이면서 CPAS와 비교하였을 때도 약 2.2%의 전달동력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 회전수와 토오크의 변화를 통해 분석해보면, Table. 6에서는 Bare Hull 상태의 모형시험을 통해 추정된 실선의 회전수, 토오크, 전달동력 값을 각각 나타내었고, Table 7에서는 CPAS와 VPAS를 부착한 상태의 모형시험을 통해 추정된 실선 성능의 물리량을 Bare hull에 대한 변화량으로 나타내었다. 이를 통해 비대칭 전류고정날개의 효과를 통해 Bare Hull 대비 회전수와 토오크가 모두 감소하였고, 최종적으로 DHP가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 비대칭 전류고정날개가 부착됨에 따라 프로펠러의 받음각이 커지고 유효반류(W_T)가 증가하게 되면서 선각 효율(η_H)이 증가하는 한편, 토오크(Q)는 감소하면서 상대회전효율(η_R)이 증가하여 최종적으로 준 추진 효율(η_D)이 증가하기 때문이다.

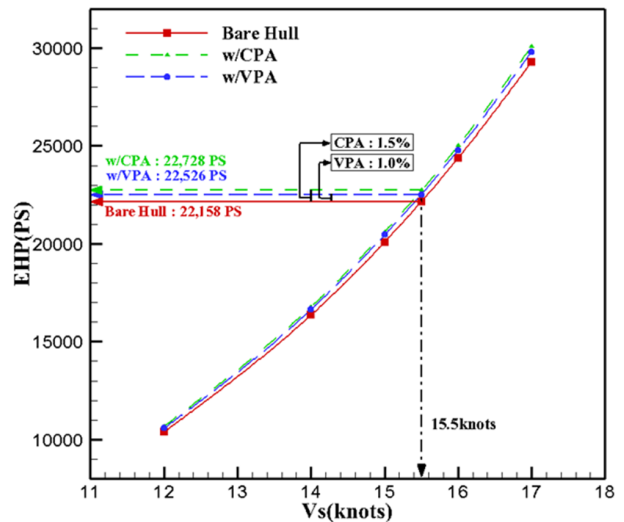


Fig. 24 Results of resistance test

Table. 6 Results of Self-Propulsion test (Bare Hull)

Bare Hull			
Vs (knots)	n (RPS)	Q (N*m)	DHP (PS)
12	0.982	1,990	16,688
14	1.139	2,703	26,302
15	1.222	3,094	32,306
15.5	1.263	3,240	34,956
16	1.309	3,477	38,877
17	1.399	3,930	46,966

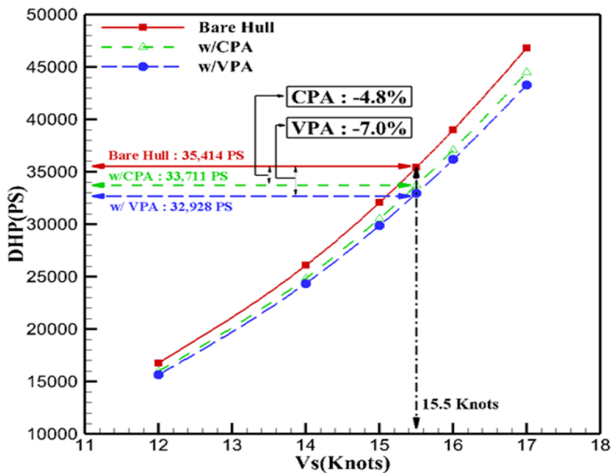


Fig. 25 Results of self-propulsion test

Table. 7 Results of Self-Propulsion test (w/ CPAS & VPAS)

Vs (knots)	w/ CPA vs Bare.			w/ VPA vs Bare.		
	n (%)	Q (%)	DHP (%)	n (%)	Q (%)	DHP (%)
12	-2.59	-2.31	-4.83	-3.47	-3.49	-6.84
14	-2.39	-2.10	-4.44	-3.26	-3.25	-6.40
15	-2.44	-2.36	-4.75	-3.35	-3.59	-6.81
15.5	-2.27	-2.60	-4.82	-3.20	-3.89	-6.96
16	-2.34	-2.84	-5.11	-3.32	-4.34	-7.52
17	-2.41	-2.52	-4.87	-3.44	-4.15	-7.44

4. 결론

본 연구에서는 KVLCC2에 대하여 선행연구에서 코드와 캠버 비에 대한 성능연구를 통해 설계된 CPAS에 대하여 선미의 불균일한 유동장에서의 최적 받음각을 고려한 VPAS의 설계 방법을 제시하고 본 연구의 대상 선박에 대하여 적용하였다.

피치각 분포에 따라 총 3가지 case에 대하여 CFD 해석을 통해 case study를 수행하였고, 저항성능에 대한 정성적인 성능 평가를 할 수 있었다. 최종적으로, 추진 효율 측면과 제작 문제를 종합적으로 고려하여 본 연구의 최적 VPAS를 선정하였다.

성능 검증을 위해 모형시험을 수행하였고, 모형시험 결과를 이용하여 실선의 성능을 추정하였다. 우선 저항 시험에서는 CPAS와 VPAS를 부착하였을 경우, Bare hull 대비 EHP가 각각 1.5%, 1.0% 증가하였고, 저항시험에서는 Bare hull 대비 DHP가 각각 4.8%, 7.0% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 VPAS가 저항 성능과 저항 성능에서 모두 우수한 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시한 VPAS 설계 방법은 크게 2가지 단계로 나눌 수 있으며 아래와 같이 정리하였다.

(1) 비대칭 전류고정날개로 인한 Swirl이 필요한 부분, 즉 선체로 인해 프로펠러의 회전방향과 동일한 방향으로 접선 방향 유동 성분이 있는 반경별 위치의 경우, 유동이 날개 표면을 따

라 잘 흘러나가 Swirl이 충분히 이루어 질 수 있도록 코드와 캠버 비의 성능 연구를 통해 제원과 피치각을 설계한다. 본 연구에서는 선행연구에서 최적으로 설계된 CPAS의 제원과 피치각을 동일하게 적용해 주었다.

(2) 비대칭 전류고정날개로 인한 Swirl이 필요하지 않은 부분, 즉 선체의 형상으로 인해 Swirl이 이미 형성되어 있는 반경별 위치에 대해서는 Swirl은 더 강하게 해주고, 날개로 인한 저항 증가를 최소화 하기 위해 각 유동에 맞게 받음각을 설계한다.

후기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

References

Guedes Soares, & C., Santos T.A., 2016. *Maritime Technology and Engineering 3*. CRC Press, Inc.

Lee, K.S., Kim, M.C., Shin, Y.J., & Kang, J.G., 2017. Study on performance of asymmetric pre-swirl stator for KVLCC2. *Proceeding of the Society of Naval Architects of Korea*. 8-9 19-20 November 2017, Yeosu EXPO.

Lee, C.M., Shin, Y.J., Kim, M.C., Choi, J.E., & 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.

Lee, J.T., Kim, M.C., Suh, J.C., Kim, S.H. & Choi, J.K., 1992. Development of pre-swirl 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.

Park, H.J., Kim, K.S., Suh, S.B., & Park, I.R., 2016. CFD Analysis of marine propeller-hub vortex control device interaction. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(4), pp.266-274.

Win, Y.N., Wu, P.C., Akamatsu, K., Okawa, H., Stern, F., & Toda, Y., 2016. RANS simulation of KVLCC2 using simple body-force propeller model with rudder and without rudder. *Journal of the Japan Associations of Naval Architects and Ocean Engineers*, 23, pp.1-11.

