

원유운반선용 Ring Stator 설계 및 성능 연구

강진구* · 변태영**† · 김문찬***

* 부산대학교 조선해양공학과 박사과정, ** 동의과학대학교 기계계열 교수, *** 부산대학교 조선해양공학과 교수

Design and Performance Analysis of Ring Stator for Crude Oil Carriers

Jin Gu Kang* · Tae Young Byun**† · Moon Chan Kim***

* PhD Candidate, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

** Professor, Division of Mechanical Engineering, Dong-Eui Institute of Technology, Busan 47230, Korea

*** Professor, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요 약 : 전 세계적으로 환경오염 문제로 국제해사기구인 IMO(International Maritime Organization)에서는 이산화탄소 배출량과 관련된 지수인 EEDI(Energy Efficiency Design Index)를 만들어 새로 건조되는 선박들에 대한 규제를 적용하고 있다. 본 연구에서는 158k 원유운반선의 선형과 프로펠러 후류를 분석하여 새로운 형태의 에너지 저감 장치인 ring stator를 제안하였다. 최근의 선박들은 반류가 적은 즉 선미부 유속이 빠른 경향으로 발전되고 있어 덕트가 포함된 ESD(Energy Saving Device)는 저속비대선이라도 컨테이너선처럼 적용하기가 어렵다. 본 연구에서 제안한 ring stator는 이러한 점을 고려하여 새로이 개발된 장치로써 저항 성능 향상 뿐 아니라 저항 성능의 최소화를 목표로 설계를 진행하였다. Star-CCM+의 상용 프로그램을 활용하여 CFD 해석을 통해 설계한 ring stator의 성능을 확인하였고 최종 제시한 설계안에 대해 약 3.4%의 추진 효율 개선 효과가 있음을 확인하였다. 설계된 ring stator에 대한 실험과의 비교 등을 통해 성능 검증 및 보다 정도 높은 최적화에 대한 연구를 추후 수행할 계획이다.

핵심용어 : 에너지 효율 지수, 에너지 저감 장치, 전류고정날개, 추진 시스템, 원유운반선

Abstract : The International Maritime Organization has developed the Energy Efficiency Design Index, an index related to carbon dioxide emissions, to enforce regulations on newly built ships. In this study, a new type of energy-saving device called the ring stator was used for 158k crude oil carriers, whose hull form was developed as a very thin after-body hull to reduce the resistance by delaying separation. The Energy-Saving Device (ESD) particularly involving the duct, is not adapted to the thin-after body hull form-like container ship. This new ring stator was developed considering these characteristics. A parametric study was conducted through Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis using the Star-CCM+ program, and approximately 3.4% improvement in propulsion efficiency was achieved. Further optimization investigations and experimental studies should be conducted in the future.

Key Words : Energy Efficiency Design Index, Energy-saving device, Pre-swirl stator, Propulsion system, Crude oil carriers

1. 서 론

전 세계적으로 지구 온난화 현상에 의한 해수면 상승, 예측하기 힘든 자연재해의 발생 등이 큰 이슈가 되고 있다. 이산화탄소, 황산화물, 질소산화물과 같은 온실가스가 지구 온난화의 주요 원인으로 알려져 있고 이에 국제해사기구

(International Maritime Organization, IMO)에서는 2013년부터 신조되는 선박에 대한 항해 및 관리에 대해 에너지 효율 지표를 제시하여 단계적으로 적용하고 있다. 에너지 효율 지수인 EEDI(Energy Efficiency Design Index for new ships)는 1톤의 화물을 1해상마일 운송할 때 발생하는 이산화탄소 배출량을 나타내며, 2021년 현재는 Phase 2로 20% 감소 기준이 적용되고 있다. 이를 Fig. 1에 도식화하여 나타내었다.

* First Author : wind0980@naver.com, 051-510-2756

† Corresponding Author : bty@dit.ac.kr, 051-860-3155

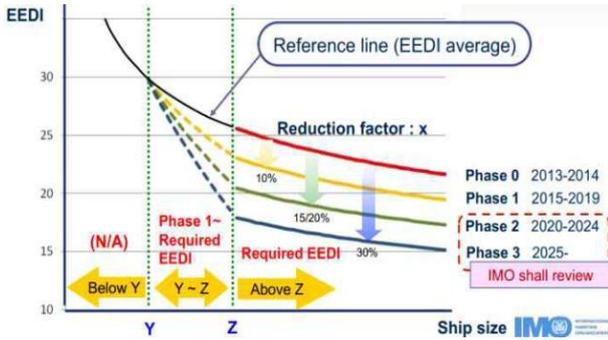


Fig. 1. Phases for reduction factors of EEDI (IMO, 2018 Programme of follow-up actions of the initial IMO strategy to 2023).

EEDI 감소를 위해 선형 개선, 친환경 연료의 사용 등 다양한 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 기존 운항중인 선박에도 쉽게 적용할 수 있는 에너지저감 장치를 활용한 복합 추진 시스템을 통해 추진효율을 향상시켜 EEDI를 감소시키는 방안이 있다. 선박의 에너지저감 장치는 프로펠러를 기준으로 한 설치 위치에 따라 Pre-device, Main-device, Post-device로 분류할 수 있다. 대표적으로 Pre-device에는 전류고정날개(Pre Swirl Stator, PSS), 전류고정덕트(Mewis Duct)가 있고 Main-device에는 Kappel Propeller, Post-device에는 비대칭 타 등이 있다.

전류고정날개의 경우, 프로펠러에 유입되는 접선방향 유동을 제어함으로써 회전에너지의 손실을 최소화하는 방향으로 추진 효율을 증대시키는 원리로 1900년대 초부터 특허들이 나왔던 장치이고 1980년대 들어서 일본의 미쓰비시 조선소에서 건조한 VLCC에 처음 적용되었다. 국내에서는 1990년대부터 선박해양플랜트연구소(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO)를 중심으로 연구가 시작되었고(Lee et al., 1992; Kim et al., 1993; Lee et al., 1994) 대우조선해양과 부산대에서는 기존의 좌우현 날개수가 대칭형인 형태에서 좌현 3개, 우현 1개의 좌우현 날개수가 서로 다른 비대칭형에 대한 연구를 진행하였다(Kang et al., 2004). Mewis Duct는 독일의 BMS(Becker Marine System)에서 개발하였으며 덕트와 전류고정날개를 결합한 형태로 전류고정날개의 효과에 더해 덕트에 의한 추력 및 프로펠러 유입 속도를 균일화하여 후류가 곧게 퍼져 추진시스템이 더 높은 추력을 낼 수 있게 한다. 그 효과는 시운전에서 어느 정도 증명되어 널리 활용되고 있다(Mewis and Guiard, 2011).

각각의 에너지 저감 장치는 선박의 후류를 고려하여 설계를 진행함으로써 추진 효율 향상을 극대화한다. 최근에는 선형의 최적화와 운항 속도의 고속화로 저속 비대선의 경우에도 저항을 극소화하기 위해 선미 형상을 매우 날씬하게

하여 반류 계수가 작아지므로 이를 고려한 에너지 저감 장치의 개발이 필요하다. 이러한 특성을 고려하지 않고 기존의 에너지 저감 장치를 그대로 적용할 경우, 축방향 속도가 커서 과도한 저항이나 혹은 캐비테이션 문제까지 발생할 수 있다. 특히 덕트나 전류고정덕트와 같은 에너지저감장치는 컨테이너선에 적용하기가 어렵듯이 저속비대선이라 할지라도 날씬한 선형에 적용하기 쉽지 않다. 본 연구에서는 최대한 간결하게 설계된 ring stator를 적용하고자한다. 158k 원유 운반선의 선체 주위 유동을 분석하여 이에 최적화된 에너지저감 장치를 설계하고 성능 평가를 진행하였다. 포텐셜 해석을 통해 새로운 형태의 Pre-device인 Ring Stator를 설계하여 모형시험과 CFD를 이용하여 저항 성능 및 자항 성능 해석을 수행하였다.

2. 수치 해석 기법

2.1 포텐셜 해석

본 연구에서는 전류고정날개의 설계를 위해 in-house 코드로 개발된 보오텍스 기반 포텐셜 해석프로그램 PASTA (Pre-swirl Asymmetric Stator Analysis system)을 사용하였다. 위 프로그램은 불균일류 중에서 프로펠러와 비대칭형 최적 고정날개 해석용 프로그램으로 본 연구에서 최적 설계를 위해 사용하였다(Kim et al., 2004; Lee et al., 1992).

통상적으로 프로펠러의 경우 각 반경 별 유입류의 받음각이 거의 이상 받음각으로 설계되어지기 때문에 성능 해석을 수행함에 있어서 이상유체 가정 하에 양력면 이론을 적용하고 항력은 국소 저항계수를 도입하여 해석을 수행하였다. 하지만 전류고정날개의 경우 프로펠러의 회전속도를 상쇄시키기 위해 많은 양의 부하를 감당하고 통상 이상 받음각을 훨씬 초과한 상태에서 운항하게 된다. 따라서 프로펠러 설계에 적용되는 항력 계수 C_D 로는 정확한 항력 추정이 어렵고 아래의 항력 계수식을 사용하여 전류고정날개 설계에 이용하였다(Kim et al., 1993).

$$C_D = 2C_f \left[1 + \frac{t}{c} + 100 \left(\frac{t}{c} \right)^4 \right] (1 + \Delta C_L^2) + \frac{C_L^2}{\pi A} \quad (1)$$

여기서 C_f 는 평판의 저항계수로서 레이놀즈 수(Rn)에 따라 변화되어지며 ΔC_L 은 전체 양력에서 이상 받음각의 양력을 뺀 값이며 마지막 항은 3차원 효과를 고려한 항으로 A는 날개의 가로세로비(Asspect Ratio)를 나타낸다. 여기서, c는 날개의 2차원단면 코드 길이, t는 두께를 나타낸다. 식(1)을 사용하여 C_D 를 결정하게 되면 두께, 캠버, 및 코드 분포의 변화에 따른 효율 비교가 가능하므로 전류고정날개의 형상에

다른 추진 효율 변화를 추정할 수 있게 된다.

고정날개의 변수를 조절하면 각 고정날개의 반경 별 순환 세기(Γ)가 달라지고 Γ 는 날개에 걸리는 부하를 표현하기 때문에 이를 통해 그 성능을 비교할 수 있다(Shin et al., 2016). PASTA 프로그램은 Γ 를 이에 상응하는 등가입사각(Equivalent Angle of Attack)으로 표현하여 직관적인 분석이 가능하도록 하였다. 등가받음각의 개념은 아래와 같다. 아래 수식에서 V_S 는 선박의 운항 속도, u 는 날개로 유입되는 유체의 유속, c 는 2차원 단면의 코드 길이, R 은 고정 날개의 반경을 나타낸다.

$$\alpha_E = \sin^{-1}\left(\frac{C_L}{2\pi}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{2G}{\left(\frac{u}{V_S}\right)\left(\frac{c}{R}\right)}\right) \quad (2)$$

$$G = \frac{\Gamma}{2\pi R V_S} \quad (3)$$

2.2 CFD 해석

CFD 해석에 적용된 좌표계는 유동 방향이 양(+)의 x축이고 선박의 우현이 양의 y축이며 중력의 반대방향이 양의 z축으로 하는 좌표계이다. CFD 해석에는 상용 프로그램인 Star CCM+ V. 9.04를 사용하였다. 본 연구에서는 비정상상태(Unsteady), 비압축성(Incompressible), 점성(Viscous) 유동을 고려한 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes equation) 방정식을 사용하였고, 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (5)$$

여기서 U 는 속도, p 는 압력, t 는 시간, ρ 는 밀도, μ 는 점성 계수, $-\overline{\rho u_i u_j}$ 는 레이놀즈 응력(Reynolds stress)을 나타낸다.

난류모델은 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고, 속도-압력 연성을 위해 SIMPLE(Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations consistent) 알고리즘을 사용하였다. 프로펠러 주위 유동해석 기법으로는 Star CCM+에서 제공하는 Sliding Interface Moving Mesh 기법을 활용하였다. 자유수면 해석에는 VOF (Volume Of Fluid) 기법을 사용하였다. VOF법은 격자 내 밀도가 서로 다른 두 유체의 체적 비율을 통해 두 유체의 경계인 자유수면의 위치를 추적하는 방법이다.

Fig. 2는 해석을 위한 격자계의 크기와 경계조건이다. 격자 영역의 상하좌우는 Symmetry로 설정하였고 총 격자수는 약 350만개이며, y^+ 는 3~24로 격자를 구성하였다.

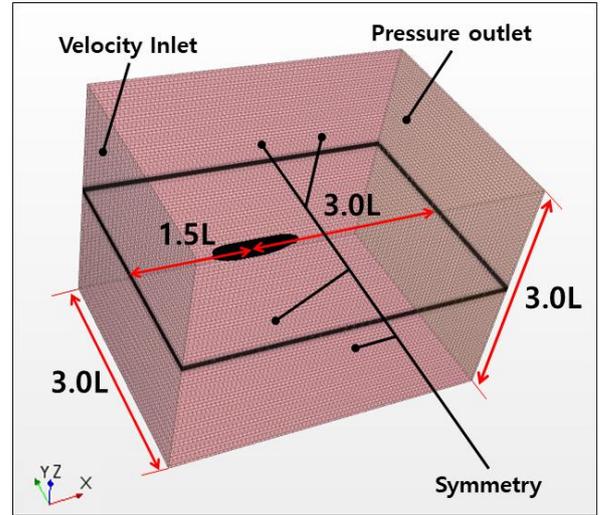


Fig. 2. Domain and boundary condition of numerical analysis.

3. 대상선 분석 및 계산 검증

3.1 대상선 및 프로펠러

본 연구의 대상선은 158k 원유운반선이고 프로펠러는 KP888이다. 설계속도는 15.7knots, 축척비는 32.8로 모형 및 실선의 대표 체원은 Table 1과 같고 형상은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1. Main dimension of target ship

	Length (m)	Breadth (m)	Draft (m)
Full	264	48	16
Model	8.05	1.46	0.49

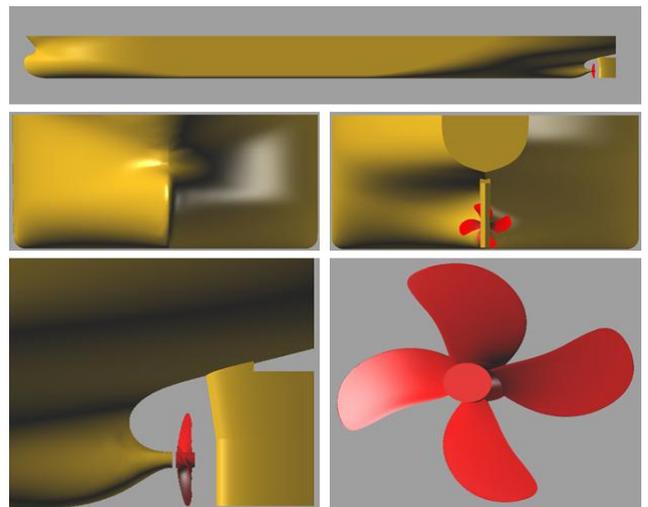


Fig. 3. Configurations of target hull and propeller.

3.2 계산 검증 및 대상선 반류 분석

대상선의 나선 상태에서의 저항시험은 14knots부터 17knots 까지 5개의 속도, 저항시험의 경우 설계 속도인 15.7knots에 대해서 KRISO 예인수조에서 수행되었다. 계산은 ESD가 없는 상태(나선 상태)에서 CFD 해석을 수행하였고 모형시험과의 저항 차이는 Table 2에 그리고 프로펠러 면에서의 공칭반류의 비교는 Fig. 4에 나타내었다.

Table 2. Comparison of resistance between EFD and CFD

VS (knots)	D _{EFD} (N)	D _{CFD} (N)	Diff. (%)
14	49.93	49.95	0.04
15	56.81	57.06	0.44
15.7	62.09	62.38	0.47
16	64.47	64.68	0.33
17	72.70	72.93	0.32

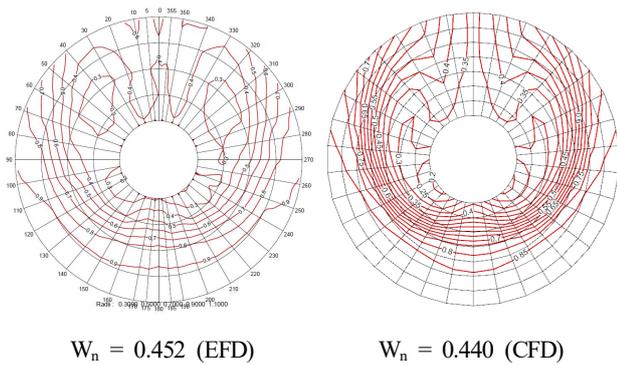


Fig. 4. Comparison of nominal wake between EFD and CFD.

나선 상태의 저항은 시험(EFD)과 계산(CFD)의 차이가 모든 속도에서 0.5% 이하로 매우 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 반류 분포 또한 훅 형태(Hook shape)를 포함하여 전반적으로 유사한 것을 확인하였다.

Fig. 5는 대상선의 반류 특성을 설명하기 위한 것으로 대상선인 158k 원유운반선을 포함하여 KCS(Kriso Container Ship)와 176k 산적화물선(Bulk Carrier)의 공칭반류를 나타내었다. 대상선의 경우 산적화물선과 마찬가지로 저속선에 해당하는 선종이지만 공칭반류는 산적화물선에 비해 상당히 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 반류분포 형태 자체는 산적화물선과 유사하지만 고속 구간이 넓어 공칭반류계수는 컨테이너선과 산적화물선의 중간 정도의 값을 가진다. 이러한 반류분포 결과는 원유운반선의 특성 상 중앙평행부가 길고 선미로 갈수록 급격하게 선체가 훅쪽해지므로 훅 형태가 나타나지만, 저항을 줄이기 위해 특히 선미 선형을 최적화하였기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

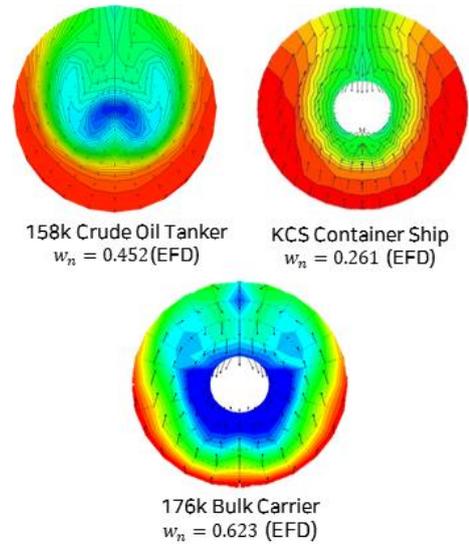


Fig. 5. Comparison of nominal wake by ship types.

앞서 언급한바와 같이 저항을 최소화하는 경향은 최근 대부분의 조선소에서 이러한 선형의 실선 성능이 우수함에 따른 경향이며 저속비대선의 공칭반류가 앞에서 보인바와 같이 과거 0.6 근처에서 0.4 근처를 거쳐 최근에는 컨테이너선과 비슷한 0.3 근처까지 작아지고 있다. 이러한 이유로 ESD의 적용도 여기에 맞추어 달라져야하며 본 연구에서 그러한 추세를 반영한 전류고정덕트의 개념을 제시하고자한다.

나선 상태에서의 EFD와 CFD의 저항시험 결과 비교는 Table 3에 나타내었다. CFD의 경우, 모형시험에서의 저항점 470.4 rpm에 최대한 일치하도록 격자계를 바꾸어가며 반복 수행하였고 그 때의 추력과 토크의 차이를 비교하였다. 그 결과 토크는 거의 차이가 없었고 추력에서는 약 3% 정도의 차이를 보였다. 실험오차나 수치해석적인 오차를 고려해보았을 때 신뢰성이 있는 결과라고 판단된다.

Table 3. Comparison of self-propulsion analysis results between EFD and CFD

	EFD	CFD	Diff. (%)
Self-propulsion RPM	470.4	471.9	0.3
Thrust (N)	40.4	41.7	3.1
Torque (N·m)	1.29	1.29	0.0

4. Ring stator 설계

본 연구에서는 선형 연구에서 컨테이너선을 대상으로 개발하였던 우수한 성능의 전류고정날개 형상(Shin et al., 2016)

을 기준으로 하여 날개 끝에 덕트와 유사한 환형 구조(ring)를 적용하였다. 초기 전류고정날개의 형상은 Fig. 6에 나타내었다. 환형 구조의 설계는 부산대학교에서 연구한 Song et al.(2015)의 덕트 설계 방법과 동일한 방법을 적용하였으며 사용한 환형 구조의 단면은 Fig. 7의 NSMB Nozzle 19A 단면이다. 3.2절에서 확인하였듯이 대상선인 158k 원유운반선은 선종의 측면에서는 176k 산적 화물선과 동일한 저속비대선에 해당하지만 반류의 속도 분포는 고속선인 컨테이너선과 유사하다. 본 연구에서는 이러한 특성을 반영하여 기존과는 다르게 적용되는 환형 구조의 코드 길이 및 두께를 최소화하여 부가물에 의한 저항 발생을 줄이고 고정날개의 끝에서 발생할 가능성이 큰 와류를 억제할 목적으로 환형 구조를 적용하였다. 환형 구조의 코드 길이는 전류고정날개의 날개 끝의 코드 길이와 동일하게 하여 전류고정날개와 환형 구조가 매끄럽게 연결되도록 설계하였다. 환형 구조의 배치각의 경우, 각 사례 별로 CFD를 통해 확인한 유체 유입각을 고려하여 조정해주었다. 이는 Fig. 8에 나타내었다.

Ring stator는 전류고정날개를 환형 구조로 감싸는 형상이고 이를 통해 전류고정날개의 회전에너지 회수 효과 및 환형 구조로 인한 날개 끝 와류 감소 효과를 동시에 얻을 수 있다. 또한 환형 구조의 형상이 고정날개의 강도를 증가시키는 역할을 한다. 초기 전류고정날개와 덕트를 기준으로 표준 case를 설계하고 변수들을 수정해가며 사례연구를 진행하였다.

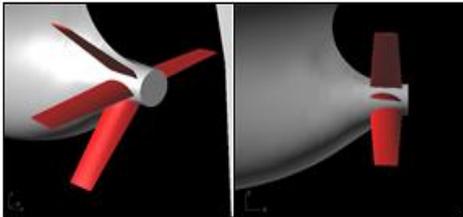


Fig. 6. Designed asymmetry pre-swirl stator for 158k crude oil tanker.

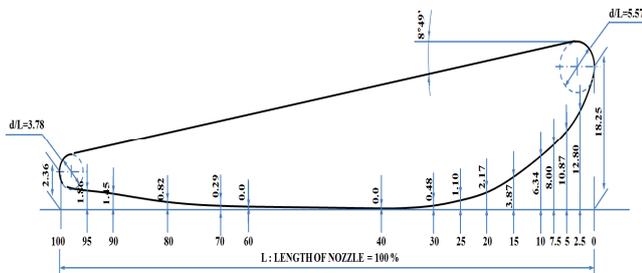


Fig. 7. NSMB Nozzle 19A.

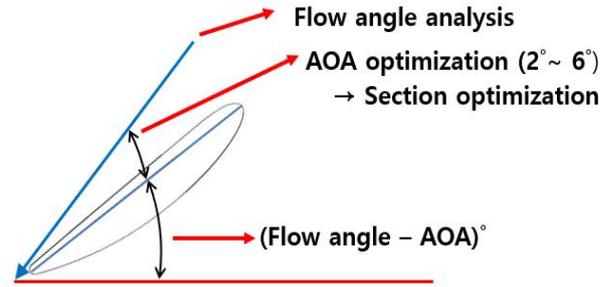


Fig. 8. Explanation of determination of angle of attack of ring.

4.1 표준 case

일반적인 저속비대선의 전류고정날개는 충분한 효과를 위해 직경을 프로펠러와 동일하게 설계하지만 대상선의 경우, 비교적 빠른 반류 분포를 가지기 때문에 날개 끝 와류로 인해 프로펠러 손상 및 과도한 부하 방지를 위해 프로펠러 직경의 50%를 표준 case로 결정하였다. 추가적으로 같은 이유로 shin et al.(2016)에서 컨테이너선을 대상으로 효율이 가장 우수했던 전류고정날개를 기준으로 경량화를 위해 코드와 두께를 10% 작게 설계하였다. 전류고정날개의 부착 위치는 선행연구 선수쪽으로 0.5R 떨어진 곳에 위치시켰다. 고정날개의 피치각은 기존 부산대학교의 경험적인 ESD 연구결과를 토대로 등가입사각이 14°가 되도록 결정하였다(Kim et al., 2004). 표준 case의 전류고정날개 제원은 Table 4와 같고 형상은 타 case들과 함께 Fig. 9에 나타내었다. 각 날개의 피치각도는 Table 5와 같다. 이 때의 날개 위치 기준은 프로펠러의 face를 바라볼 때 중력의 반대 방향이 0°이고 좌현 쪽으로 회전하는 각이 양의 각도이다.

Table 4. Geometry of ring stator according to radius

r/R	c/D	f/t	t/D
0.20	0.1771	-0.4088	0.0368
0.25	0.1741	-0.4052	0.0351
0.30	0.1711	-0.4013	0.0333
0.40	0.1652	-0.3919	0.0299
0.50	0.1593	-0.3801	0.0264
0.60	0.1534	-0.3648	0.0229
0.70	0.1474	-0.3439	0.0194
0.80	0.1416	-0.3142	0.0160
0.90	0.1356	-0.2676	0.0125
0.95	0.1327	-0.2331	0.0107
1.00	0.1297	-0.1853	0.0090

Table 5. Pitch angles of standard pre-swirl stator

No. blade	Position (°)	Angle (°)
1st blade	45	2
2nd blade	90	8
3rd blade	135	3
4th blade	270	2

4.2 Case study

4.1에서 설계한 표준 case를 case 1, 직경 변화를 case 2, 코드 변화를 case 3, 날개 수 변화를 case 4로 하여 모형에서의 나선 대비 전달마력을 확인하고 case 5에서 각각의 효과들을 종합한 결과를 확인하였다. 다음으로 case 6, 7, 8에서는 다른 설계 변수들을 가장 효율이 좋은 case 5로 고정하고 기준 등가입사각을 변화시켜가며 피치각을 조정하여 성능을 확인하였다. 각 case에 대한 설명을 Table 6에 나타내었고 각 case의 ring stator 형상을 Fig. 9에 나타내었다. Case 6, 7, 8의 경우, 날개 피치각에 약간의 차이가 있고 형상 자체는 동일하여 그림에서는 제외하였다. 각 그림에서 빨강색이 case 1의 ring stator를 나타낸다. Case 별 효율은 4.3에 정리하였다.

Table 6. Cases of ring stator design

No. case	Ring stator
Bare Hull	-
Case 1	Standard case
Case 2	Diameter effect
Case 3	Chord effect
Case 4	Number of blade effect
Case 5	Combine (case 3+4)
Case 6	Pitch angle effect (Eq. angle 12)
Case 7	Pitch angle effect (Eq. angle 15)
Case 8	Pitch angle effect (Eq. angle 16)

Case 2에서는 표준 case와 비교하여 직경 차이에 따른 효율 변화를 확인하기 위해 직경을 70% 증가시켰다. 코드와 두께 또한 전류고정날개 형상 자체에는 영향이 없도록 표준 case 대비 20% 증가시켰다. 일반적인 저속비대선과 비교하여 프로펠러면에서의 고속 구간이 넓다보니 직경이 커지면서 얻는 자항 성능 개선보다 부가물이 커짐에 따른 저항 증가가 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

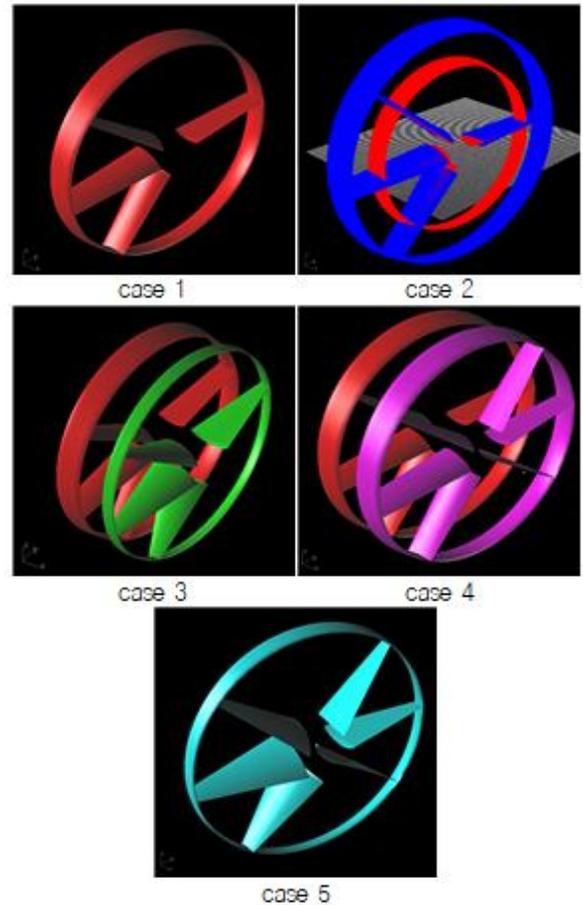


Fig. 9. Configurations of parametric design of ring stator.

Case 3에서는 case 2의 결과를 바탕으로 환형 구조물 주변의 항력을 줄여주는 것이 효율 측면에서 큰 이점이 있을 것이라 보고 날개 끝의 코드 길이를 프로펠러 직경의 3%로 설계하였다. 이로 인해 감소하는 구조적 안정성을 고려하여 허브 쪽의 코드길이는 표준 case 대비 3% 크게 설계하였다.

Case 4의 경우, 날개 수 차이에 따른 비교를 위해 날개 수 4개의 비대칭형에서 6개의 대칭형을 적용하여 그 결과를 확인하였다.

Case 5는 앞의 case들의 결과를 확인한 후, 표준 case 대비 개선이 있었던 case 3과 case 4를 혼합하여 그 결과를 확인하였다.

Case 6, 7, 8은 다른 설계변수들을 조정하여 가장 효율이 좋았던 case 5를 대상으로 2.1에서 설명한 등가입사각을 12, 15, 16으로 조정하여 그 성능을 확인하였다. 등가입사각이 날개의 양력을 간접적으로 표현하므로 피치각의 변화를 통해 그 값을 조절할 수 있다. 각 case의 날개 별 피치각의 차이는 Table 7에 나타내었다.

Table 7. Pitch angles of case 6, 7, 8

No. blade	Case 6	Case 7	Case 8
1st blade	7	15	17
2nd blade	17	25	27
3rd blade	11	20	22
4th blade	8	16	18
5th blade	2	9	11
6th blade	4	11	13

4.3 수치해석 결과

Table 8은 나선과 비교하여 각 case들의 모형 전달마력을 비교하였다. 그리고 전달마력의 경우, 상대적인 비교를 위해 nQ로 나타내었다. case 1과 case 2를 비교해보면 직경을 키울 경우, 부가물의 저항이 과도해져 추진 효율 측면에서는 약 1% 향상에서 0.5% 향상으로 오히려 손해를 보는 것을 확인할 수 있다. 같은 원리로 case 3의 코드 길이 변화로 ring의 저항 감소가 추진 효율 측면에서 유리한 것을 확인할 수 있다. 날개 수 6개에 case 3의 코드 길이를 적용한 case 5에서 전달마력 측면에서 약 2%의 추진효율 향상 결과를 확인할 수 있다. 최종적으로 case 5에서 등가입사각을 15°에 맞춰 피치각을 조정된 case 7에서 3.4%의 효율 향상을 보였다. Case 8과 같이 피치각이 너무 과도하면 얻는 저항 효과에 비해 저항이 너무 커져 추진 효율 측면에서는 오히려 손해를 보는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Fig. 10에 그래프로 나타내었다.

Table 8. Comparison of delivered horse power

No. case	P _D (nQ)	Diff. (%)
Bare hull	608.99	-
case 1	602.65	-1.04
case 2	606.38	-0.43
case 3	600.65	-1.37
case 4	600.85	-1.34
case 5	598.40	-1.74
case 6	599.21	-1.61
case 7	588.28	-3.40
case 8	599.23	-1.60

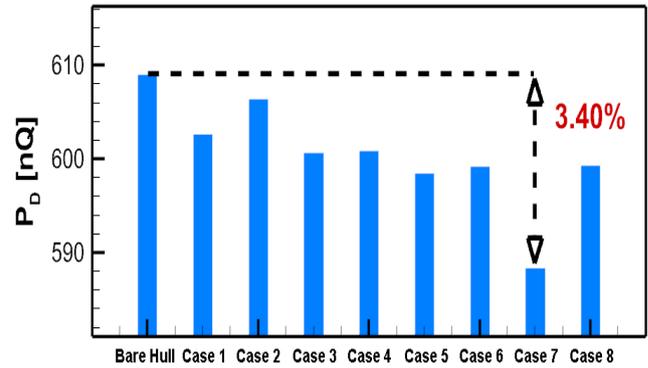


Fig. 10. Difference of delivery horse power.

5. 결론

본 연구에서는 158k 원유운반선을 대상으로 전류고정날개의 날개 끝에 환형 구조를 적용한 새로운 에너지 저감 장치인 ring stator 개발을 진행하였다. 나선 상태의 선박 유동 분석을 위해 모형시험을 수행하였고, CFD 해석을 통해 프로펠러 후류를 분석하여 ring stator를 설계하여 그 성능을 확인하였다.

대상선의 경우, 대상선과 유사한 방형계수를 가진 선형과 비교해보았을 때 선미부가 훨씬 날렵하여 저속구간이 적고 고속구간이 넓게 분포된 컨테이너선과 유사한 반류분포를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 부가물에 의한 과도한 저항 증가를 막기 위해 ring stator의 직경을 작게 가져가는 개념으로 설계를 진행하였고 날개 끝의 코드 길이를 짧게 하여 환형 구조물에 의한 효과는 가져가되 저항을 최소화 시키는 방향으로 설계를 진행하였다.

ring stator의 설계 변수로는 직경, 코드길이, 날개수, 피치각을 선정하여 사례연구를 진행하였고 효율이 우수한 case들을 복합 적용하여 최종적으로 case 7에서 나선 대비 3.4%의 추진 효율 증가를 확인하였다.

위의 추진 효율 측면뿐만 아니라 기존의 에너지 저감 장치와 비교하여 환형 구조로 인한 날개 끝 와류 감소 효과가 커 선박의 진동 및 소음 문제가 줄어들 것으로 판단되고 환형 구조물이 덕트에 비해 차지하는 부피가 작아 가격 경쟁력 측면에서도 유리할 것으로 판단된다. 또한 추후에 ring stator의 부착위치, 날개 끝 와류 감소 효과 확인 등 개선할 여지가 많이 남아있어서 계속해서 추가 연구를 지속하여 모형시험을 통해 ring stator의 최종 성능을 확인할 예정이다.

후 기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2019R1F1A105808013) 및 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원을 받아 수행된 연구임(20005856).

Received : 2021. 02. 15.

Revised : 2021. 03. 17. (1st)

: 2021. 04. 06. (2nd)

Accepted : 2021. 04. 27.

References

- [1] Kang, Y. D., M. C. Kim and H. H. Chun(2004), A Study on the Design of a Biased Asymmetric Pre-swirl Stator Propulsion System, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 3, pp. 13-21.
- [2] Kim, M. C., H. H. Chun and Y. D. Kang(2004), Research on Biased Preswirl Stator as an Efficient Energy-Saving Device, SNAME Transaction.
- [3] Kim, M. C., J. T. Lee, J. C. Suh, and H. C. Kim(1993), A Study on the Asymmetric Preswirl Stator System, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 30, No. 1, pp. 30-44.
- [4] Lee, J. T., M. C. Kim, J. C. Suh, S. H. Kim, and J. K. Choi(1992), Development of a Preswirl Stator-Propeller System for Improvement of Propulsion Efficiency : a Symmetric Stator Propulsion System, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 29, No. 4, pp. 132-145.
- [5] Lee, J. T., M. C. Kim, S. H. Van, K. S. Kim and H. C. Kim(1994), Development of a Preswirl Stator Propulsion System for a 300K VLCC, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 31, No. 1, pp. 1-13.
- [6] Mewis, F. and T. Guiard(2011), Mewis Duct[®] - New Developments, Solutions and Conclusions, Second International Symposium on Marine Propulsors
- [7] Shin, Y. J., M. C. Kim, J. G. Kang and J. H. Lee(2016), Study on Performance of Asymmetric Pre-swirl Stator according to Variations in Dimensions and Blade Tip Shape, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 30, No. 6, pp. 431-439.
- [8] Song, H. J., M. C. Kim, W. J. Lee, and J. H. Kim(2015), Development of the New Energy Saving Device for the Reduction of Fuel of 176k Bulk Carrier, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 52, No. 6, pp. 419-427.