

KVLCC2의 자향성능 개선을 위한 Post-Device 최적화 연구

김현웅·김문찬[†]·강진구·윤택근
부산대학교 조선해양공학과

Study on Optimization of Post-Device for Self-Propulsion Performance Improvement of KVLCC2

Hyeon-Ung Kim·Moon-Chan Kim[†]·Jin-Gu Kang·Taek-Geun Youn
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.

According to the increase of concern for environmental problems, the energy saving becomes an important issue because it is one of the most effective methods of decreasing CO₂ which is major environmental problem. In the present study, the post device after propeller related with rudder has been focussed. Recently the full-spade twisted rudder has been frequently used not only to increase the efficiency but also to remove the cavitation risk on leading edge. In addition to that the rudder bulb is also applied to the rudder to increase the propulsion efficiency as well as to minimize the cavitation erosion risk around twisting part. The parametric study has been conducted for investigating the optimum configuration of twisting rudder with bulb by CFD. The present optimization has been applied to the KVLCC2 full-body ship. The verification of the computed results is also expected to be conducted by the comparison with experimental results in the near future.

Keywords : Energy saving device(에너지 저감 장치), Rudder(타), Rudder bulb(러더 벌브), Twisted rudder(비틀림 타), KVLCC2, CFD(전산 유체 역학)

1. 서 론

최근 환경오염에 대한 문제가 지속되는 가운데 국제해사기구인 IMO(International Maritime Organization)에서는 EEDI(Energy efficiency design index)라는 지표를 제시하여 선박이 내는 이산화탄소 배출의 규제를 강화하고 있다. 단계적인 규제 강화에 따라 점차 EEDI 규제를 만족하지 못하는 선박들이 증가하고 있고 규제 만족을 위해 친환경적이고 고효율 추진 선박의 개발이 요구되고 있다. 추진효율을 향상시키는 대표적인 방법으로 ESD(Energy Saving Device) 적용이 있으며 ESD는 선조 선박 뿐 아니라 기존 선박에 부착하여 에너지 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다. ESD는 장치의 부착 위치에 따라 Fig. 1과 같이 Main-Device인 프로펠러를 기준으로 상류에 위치한 Pre-Device, 하류에 위치한 Post-Device로 분류할 수 있다 (Carlton, 1994).

본 연구는 Post-Device인 twisted rudder에 관한 연구로 타의 기하학적 변화에 따른 성능의 변화를 확인하였다. 일반적으로 프로펠러는 한 방향으로 회전하기 때문에 타로 유입되는 유동의 상·하부 유입각도가 반대가 된다. 따라서 유입각도를 고려하여 타 주변의 유동을 최적화시킴으로써 추진효율을 상승시킬 수 있다. 또한 부가적인 침수표면적의 변화가 적어 저항증가의 우려를 피할 수 있다. Kim et al. (2009)은 유전알고리즘을 이용하여 12,000TEU 컨테이너선에 대해 캐비테이션 성능향상을 위해 비대칭 타의 최적설계 연구를 진행하였고, 결과적으로 비틀림 각 7~8도에서 최적점을 찾은 결과를 확인할 수 있다. Cha (2016)는 KCS용 비틀림 타의 비틀림 각에 따른 자향성능을 비교하여 성능 개선 및 최적 비틀림 각을 확인하였다. 하지만 일반적인 비틀림 타의 경우 타의 상하부 비틀림 각이 반대로 적용되기 때문에 상하부 사이 간극으로 인해 불안정한 캐비테이션에 의한 침식이 발생할 수 있다. 이러한 침식문제를 해결하기

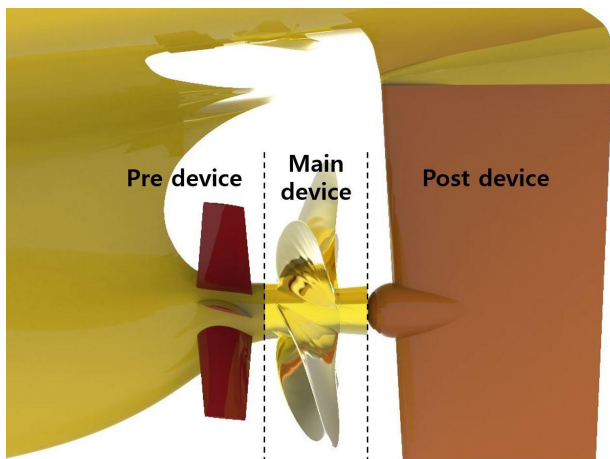


Fig. 1 Zones for the classification of energy-saving devices

위해 간극이 위치하는 곳에 러더벌브를 적용하여 불연속적인 형상으로 인한 침식을 예방할 수 있고 벌브로 인한 자항 성능 개선 효과를 얻을 수 있다. 러더 벌브를 통한 선박의 에너지 효율 개선효과는 Okada et al. (2015)의 연구에서 언급한 것과 같이 Hub vortex감소, 프로펠러로 인한 후류의 수축감소, 선각 효율 향상효과를 얻을 수 있다. Kim et al. (2018)은 KCS에 대하여 벌브형 비틀림 타를 적용하여 벌브 크기, 형상에 대한 사례연구를 진행하였고, 최종적으로 2.05 %의 효율 증가를 CFD를 통해 확인하였다. 본 연구에서는 컨테이너선과 선종이 다른 KVLCC2에 대하여 비틀림 타의 비틀림 각 및 벌브를 최적화 하였다. KVLCC2는 저속비대선의 특성을 가지는 선형으로, 타로 유입되는 유동의 유입각도와 허브 볼텍스의 강도가 KCS와는 차이를 보인다. 따라서 CFD를 통해 타 주변의 유동가시화로 벌브의 크기와 형상에 따른 유동의 변화를 확인하고 최적화를 진행하였다.

2. Post-device 설계

2.1 전타

비대칭 타를 적용하기 전에 KVLCC2의 기존 혼타를 대체 할 전타를 설계하였다. 과거에는 타두재(Rudder Stock)의 용량이 작았기 때문에 전타를 사용하기 어려웠지만, 최근에는 과거대비 타두재의 용량이 증가하여 전타의 사용이 충분히 가능하고 전타 사용 시 혼타의 간극에서 발생하는 캐비테이션에 의한 침식을 회피할 수 있는 장점이 있다. 따라서 기존 혼타와 동일한 타력을 가지도록 타의 형상과 제원을 정하였다. 타의 단면은 기존 혼타와 동일한 NACA 4 digit 단면을 사용하였고, 전타의 설계를 위한 타력계산은 한국선급에서 제시하는 선급규칙을 참조하여 계산을 수행하였다. 기존 혼타의 제원은 Table 1, 혼타와 동일한 타력을 가지는 전타의 제원은 Table 2, 두 타의 형상과 제원의 비교는 Fig. 2와 Table 3과 같다 (Korean Register(KR), 2019).

Table 1 Parameters of horn-type rudder(HR)

Parameter	Value	Note
K_1	1.276	Factor depending on the aspect ratio
K_2	1.10 0.80	Factor depending on the rudder profile
K_3	1.0	Factor depending on the rudder location
Δ	1.827	h^2 / A_t
A	112.99(m ²)	Section area
A_t	136.66(m ²)	Area within the mean height of rudder h
h	15.80(m)	Mean height of rudder
Top. chord	9.80(m)	Chord length of top side
Bot. chord	7.50(m)	Chord length of bottom side
V	15.5(kts)	Design speed
F_R	5.028×10^6	Rudder force

Table 2 Parameters of full-spade rudder(FSR)

Parameter	Value	Note
K_1	1.195	Factor depending on the aspect ratio
K_2	1.10 0.80	Factor depending on the rudder profile
K_3	1.0	Factor depending on the rudder location
Δ	1.585	h^2 / A_t
A	120.63(m ²)	Section area
A_t	120.63(m ²)	Area within the mean height of rudder h
h	13.83(m)	Mean height of rudder
Top. chord	9.73(m)	Chord length of top side
Bot. chord	7.72(m)	Chord length of bottom side
V	15.5(kts)	Design speed
F_R	5.028×10^6	Rudder force

Table 3 Main dimensions of the designed rudder

	Horn-type rudder	Full-spade rudder
A(m ²)	112.99	120.63
A_t (m ²)	136.66	120.63
W.S.Am ² -with skeg	304.96	297.83
Height(m)	15.80	13.83
Δ	1.82	1.58
F_R	5.028×10^6	

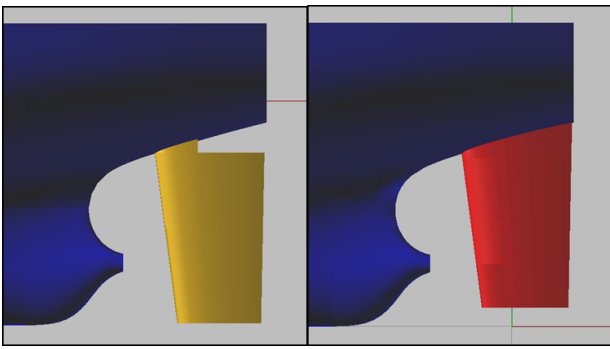


Fig. 2 Comparison of side view between semi-spade rudder and full spade rudder

2.2 비틀림 타

비틀림 타는 서론에 소개한바와 같이 프로펠러의 회전으로 인해 타로 유입되는 유동이 일정각도를 가지고 유입되고, 프로펠러 축을 중심으로 상하가 반대되는 각도로 들어오게 된다. 따라서 프로펠러의 후류에 맞게 러더 주변의 유동 흐름을 최적화시킬 수 있는 타의 비틀림 각이 존재할 수 있다. 본 연구는 KVLCC2에 최적화된 비틀림 타를 설계하기 위해서 위에서 설계한 전타를 이용하여 프로펠러 중심축을 기준으로 비틀림 각을 적용하였다. 비틀림 각은 초기값으로 Heo (2017)과 Kim et al. (2018)를 참고하여 초기 비틀림 각 5도를 기준으로 하였다. 그리고 비틀림 각에 따른 사례연구를 위해 5도~10도까지 1도 간격으로 비틀림 각을 모델링하였다. 5도 이상으로 비틀림 각을 적용한 이유는 KCS 대비 KVLCC2가 선속이 느리기 때문에 타로 유입되는 프로펠러 후류의 유입각도가 고속선보다 클 것으로 추정되어 5도 이상의 비틀림 각이 필요할 것으로 판단하였다. 그리고 비틀림 각을 10도까지 적용하는 이유는 10도 이상의 과도한 비틀림 각은 타의 저항 증가와 대각도 상태 및 간극에서 캐비테이션 문제가 높아지기 때문에 최대 비틀림 각을 10도로 정하였다. 비틀림 각을 적용시키는 방법으로는 Fig. 3과 같이 선체의 길이방향으로 타 단면의 최대두께를 가지는 위치 (Leading edge에서 단면 길이의 30 %가 되는 지점)에서

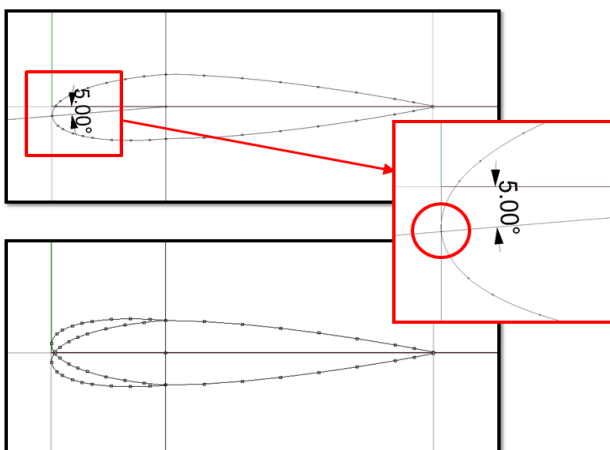


Fig. 3 Twisted angle of upper and lower rudder(5°)

비틀림 각을 적용시켜 주었다. 단, 이러한 변화는 각도가 클수록 최대두께지점 근처에서 국부적으로 불연속을 야기시킬 수 있지만, 순정화 작업으로 인한 성능차이가 발생하는 변수를 배제하기 위해 순정화를 거치지 않고 모델링을 하였다.

2.3 러더벌브 및 프로펠러 캡

프로펠러 중심의 후류에서는 프로펠러 허브로부터 강한 보오텍스가 발생하게 되고 이는 타 주변의 유동을 복잡하게 만들며 회전에너지 손실을 야기한다. 이를 개선시키기 위해 발산형 캡과 러더벌브를 사용할 수 있다. 두 장치는 허브 쪽 후류의 수축과 보오텍스를 감소시키고 타 주변의 유동을 단순화시켜 자항 성능을 개선시킬 수 있다. 또한 비틀림 타와 동시에 적용될 경우 비틀림 각이 적용될 때 발생하는 상하부 불연속 현상을 커버할 수 있는 장점이 있다. 두 장치의 설계를 위한 설계변수 선정으로는 발산형 캡의 경우 캡의 길이와 발산 각을 주요 변수로 두고, 러더벌브의 경우 Mewis and Deichmann (2013)와 Shin et al. (2012)의 연구를 참고하여 벌브의 형상과 벌브 크기를 주요 변수로 두었다. 이외에 러더벌브와 발산형 캡 사이의 간극이 성능에 영향을 미칠 수 있다. 간극의 경우 Kim et al. (2018)의 연구에 따르면 KCS를 통해 간극에 대한 자항성능을 비교했을 때 간극이 작을수록 자항성능이 좋은 것을 확인할 수 있다. 하지만 실선에서 간극이 50 mm 이하일 경우 설치와 운항 시 문제가 생길 수 있기 때문에 간극을 50 mm로 고정하였다. 단, 발산형 캡 설계 시 캡과 러더벌브 간에 간섭이 생기지 않도록 Fig. 4와 같이 타의 회전중심에서 간극을 고려한 반경을 가지는 구를 이용하여 후류 방향 단면을 형상화 하였다. Fig. 5는 러더벌브 및 캡의 주요 변수를 나타내는 정의이다. D는 러더벌브의 직경, H는 캡과 허브가 맞닿는 부분의 직경, θ 는 캡의 발산 각도이다. 러더벌브 직경과 캡 발산각의 경우 발산형 캡의 발산 각도에 따라 캡의 후류가 변하여 러더벌브를 타고 흐르게 된다. 따라서 러더벌브의 직경은 캡의 발산 각도와 일치하는 직경을 가질 수 있도록 설계하였다. 러더벌브 형상은 선종과 프로펠러 특성에 따라 허브 보오텍스의 강도가 달라지고 유동특성에 적합한 벌브 형상을 찾아야 하기 때문에 구형 벌브와 캡에 평행한 평형 벌브로 나누어 설계를 하였다. 러더벌브와 캡의 변수에 따른 경우의 수는 Fig. 6와 같이 발산 각 3가지와 벌브 형상 2가지로 총 6가지를 설계하였다.

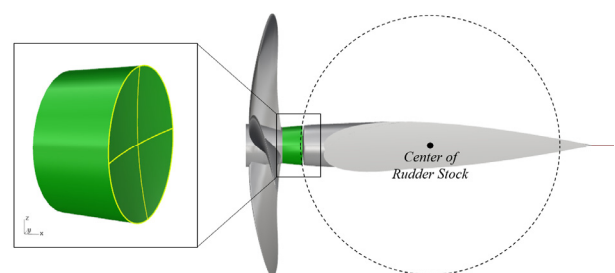


Fig. 4 Afterward surface of divergent cap

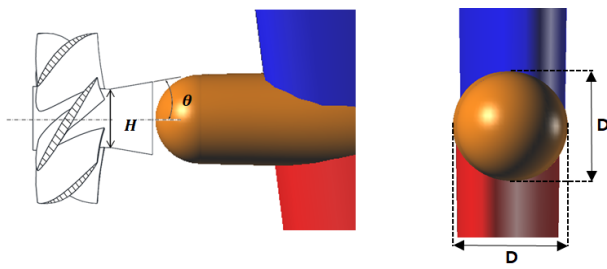


Fig. 5 Definition of design variables for a rudder bulb and a cap

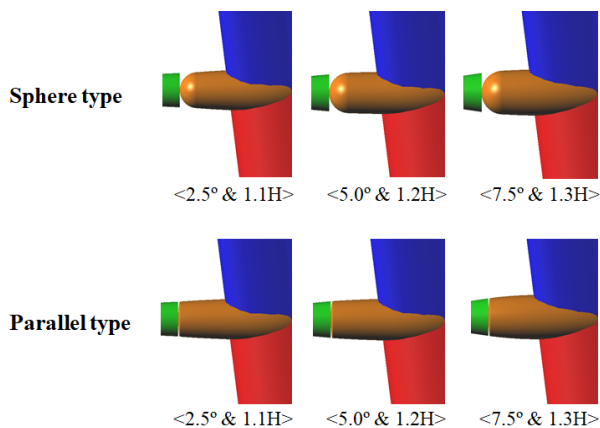


Fig. 6 Variation of design parameter according to the bulb type - sphere type and parallel type

3. 수치해석 기법

설계한 Post device의 성능을 확인하기 위해 CFD를 이용하여 자항성능을 확인하였다. CFD 해석을 위해 STAR-CCM+ (v11.02)를 사용하였고 자항성능 비교 기준은 모형 크기에서 선박의 전달동력($2\pi n_m Q_m$) 감소로 비교하였다.

3.1 대상선 제원

본 연구의 대상선은 KVLCC2(KRISO Very Large Crude Carrier)이며 추후 수행할 모형시험 수조인 부산대학교 예인수조의 크기에 맞추어 모형 프로펠러의 직경이 170 mm가 되도록 축척비 58로

Table 4 Main dimensions of KVLCC2

Parameter	Real ship	Model ship
LPP (m)	320.00	5.5172
LWL (m)	325.50	5.6120
Breadth (m)	58.00	1.0000
Depth (m)	30.00	0.5172
Design draft (m)	20.80	0.3586
CB	0.8098	
Design speed	15.5 knots	1.047 m/s
Scale ratio	58	

축소하였다. KVLCC2는 여러 연구기관에서 수행한 선행 연구들이 많기 때문에 KVLCC2의 ESD와 관련된 연구들의 활용도가 높을 것이라고 판단하였다. 선박의 주요 제원은 Table 4와 같다.

3.2 해석 방법

자항해석을 위한 CFD 해석의 지배방정식은 연속방정식과 비압축성의 Navier-Stokes 식을 시간에 대해서 평균을 한 RANS 방정식을 사용하였으며, 난류 모델은 Realizable k-ε 모델을 사용하였다. 속도와 압력의 연성은 SIMPLE(Semi-implicit method for pressure linked equations consistent) 알고리즘 방법을 사용하였다. 프로펠러 회전은 sliding moving mesh 기법을 사용하여 한 time step에 프로펠러가 약 6°가 회전하도록 설정하였다. 해석시 항주자세 변화는 고려하지 않았다. 격자계의 생성은 Star-CCM+에서 제공하는 자동격자 생성 방법을 사용하여 선체를 포함한 도메인에는 Trimmer 격자를 이용하고 프로펠러를 포함한 회전영역은 프로펠러 격자생성에 적합한 Polyhedral 격자를 사용하였다. 경계층 격자 구성 시 y+값은 100으로 설정하였으며 총 격자수는 약 4,200,000개로 Fig. 7과 같이 구성하였다. CFD를 통해 시간에 따른 추력, 토크, 항력을 확인 하면 특정 값으로 수렴하지 않고 주기를 가지고 진동하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 자항해석 결과를 확인하여 마지막 3 주기를 평균한 값으로 성능해석을 하였다.

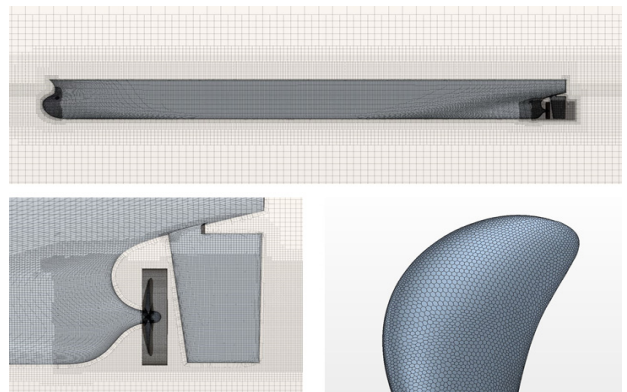


Fig. 7 Grid generation for the computation with full spade rudder

3.3 수치해석 검증

위의 격자조건을 따르는 저항, 자항해석 결과로 성능해석을 하여 부산대학교에서 수행한 KVLCC2의 모형시험결과와 비교하였다. 비교 기준은 기존 혼타를 부착한 경우에 모형선의 전저항계수와 자항상태에서의 추력, 토크, 전달동력의 차이를 확인하였다. 해석 결과는 Table 5와 같이 저항의 경우 1.51 %의 차이를 보였고, 자항해석의 경우 전달동력에서 최대 3.6 %의 차이를 보인 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구를 위한 수치해석 조건이 신뢰성을 확보하였다고 판단하였고, 위의 격자구성과 해석조건을 바탕으로 CFD해석을 수행하였다.

Table 5 Comparison of results between CFD and EFD

	모형시험	CFD	Diff(%)
$C_{TM} \times 10^{-3}$	4.107	4.045	1.5
T(N)	14.462	14.144	2.2
Q(N-m)	0.280	0.271	3.2
$2\pi nQ(W)$	16.420	15.821	3.6

4. 수치해석 결과

4.1 전타와 비틀림 타

1차적으로 설계한 전타를 기존의 혼타와 자항성능측면의 결과를 비교하였다. 타의 변형에 따라 혼과 스케그를 포함한 침수 표면적의 변화로 저항성능의 차이가 있을 수 있으나 선체의 전체 침수표면적을 기준으로 비교했을 때 그 차이가 적을 것이라고 판단하였다. 따라서 자항상태에서의 항력과 추진성능을 비교하였을 때 전타의 경우 기존 혼타 대비 모형선의 전달동력이 -0.47 % 감소한 것을 Table 6에서 확인할 수 있었다. 기존 혼타의 경우 Fig. 8과 같이 타 상부의 유선을 확인했을 때 국부적으로 정체류가 발생하는 것을 확인할 수 있었지만, 전타의 경우 빈 공간에 스케그를 채워줌으로써 유동이 정체되는 것을 해결해주고 항력도 소폭 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 다음으로 전타에 비틀림 각을 적용시킨 비틀림 타의 성능변화를 확인했을 때 비틀림 각이 8°인 경우 전달동력 감소가 가장 컸고, 결과는 Table 7과 같다. 비틀림 각에 따른 변화는 Fig. 9와 같이 Starboard side와 Port side의 압력분포를 보면 최저압력이 분포하는 위치가 이동하는 것을 볼 수 있다. 그리고 비틀림 각이 커짐에 따라 최저압력 분포가 타의 Trailing edge방향으로 이동하게 되고, 비틀림 각이 8°가 되었을 때 최저압력이 타 단면의 최대두께 지점 근처에 분포하는 것을 확인할 수 있었다.

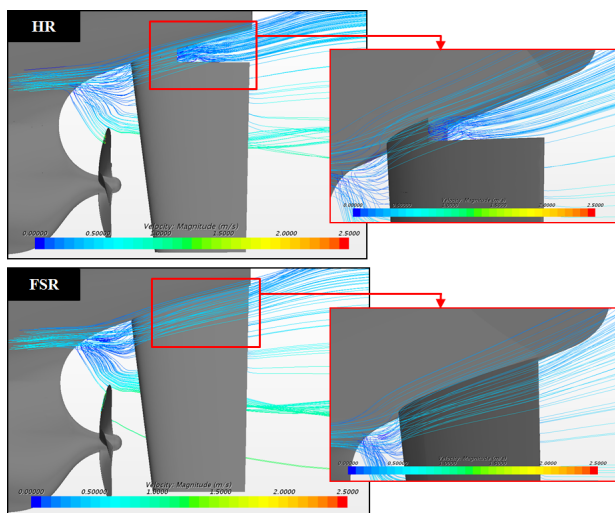


Fig. 8 Comparison of stream-lines around upper location of rudder (HR and FSR)

Table 6 Comparison of propulsion performance between horn-type rudder(HR) and full-spade rudder (FSR)

	RPM	D(N)	T(N)	100Q(N-m)	$2\pi nQ(W)$	Diff(%)
HR	557.4	21.90	14.14	27.10	15.82	-
FSR	557.0	21.85	14.10	27.00	15.75	-0.47

Table 7 Comparison of propulsion performance of twisted rudder according to the variation of twisting angle

	RPM	100Q(N-m)	$2\pi nQ$	
			(W)	Diff. with HR(%)
HR	557.4	27.10	15.82	-
FSR	557.0	27.00	15.75	-0.47
TR 5°	556.9	26.98	15.73	-0.56
TR 6°	557.0	26.96	15.73	-0.61
TR 7°	556.7	26.95	15.71	-0.70
TR 8°	556.6	26.93	15.70	-0.80
TR 9°	556.7	26.93	15.70	-0.79
TR 10°	556.7	26.95	15.71	-0.74

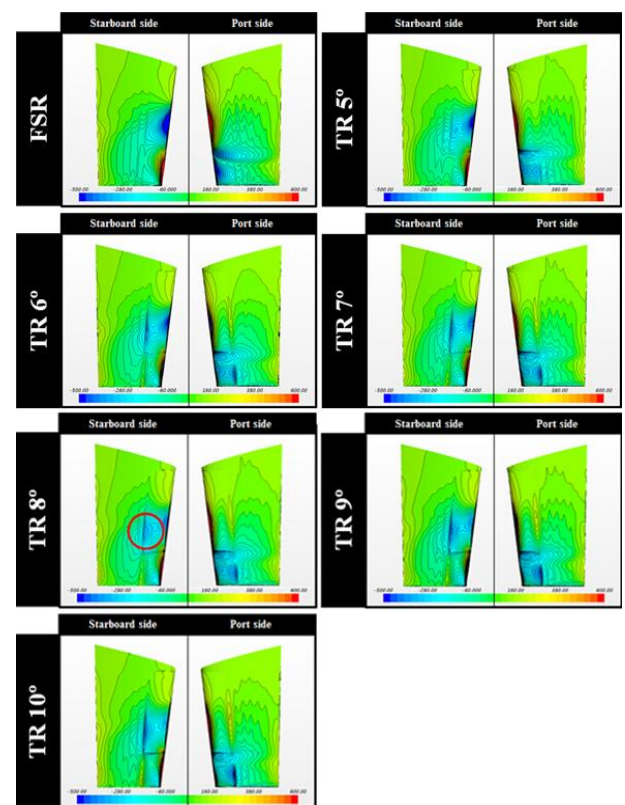


Fig. 9 Comparison of pressure distributions on each side of a rudder

4.2 러더벌브 및 발산형 캡

위의 비틀림 타 러더벌브와 발산형 캡을 적용하였을 경우 기존 혼타대비 전달동력의 변화는 Table 8과 같이 비교하여 성능 개선을 확인하였다. 기존 구형 캡의 경우 프로펠러 후류에서 강한 허브 보오텍스가 발생하여 타를 지나는 동안 회전류가 남아 있게 된다. 러더벌브와 발산형 캡을 적용시킨 경우 Fig. 10처럼 발산형 캡으로 인해 구형 캡 끝으로 모아졌던 허브 볼텍스가 발산되어 러더벌브의 표면을 따라 흐르는 후류로 바뀌게 된다. 이러한 영향으로 허브 보오텍스로 인한 손실을 줄이고 타 주변의 유동을 최적화 시키는 효과로 인해 자항성능이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 구형 벌브와 평형 벌브의 차이로는 구형 벌브의 경우 벌브와 캡 사이의 공간에서 구속되는 와류가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이는 일반적인 구형벌브에서 나타나는 현상이지만 자항성능 측면에서 나쁜 영향을 줄 수 있고 KVLCC2선에서는 결과적으로 평형 벌브대비 낮은 전달동력 감소를 보였다. 최종적으로 평형 벌브 1.2H의 경우일 때 가장 큰 전달동력 감소(-1.50%)를 보였다.

Table 8 Comparison of propulsion performance of twisted rudder according to the H parameter

	RPM	100Q (N-m)	2 π nQ	
			(W)	Diff. with HR(%)
HR	557.4	27.10	15.82	-
TR 8°	556.6	26.93	15.70	-0.80
Sphere 2.5°	555.7	27.01	15.72	-0.66
Sphere 5.0°	555.4	26.86	15.62	-1.25
Sphere 7.5°	555.5	26.86	15.62	-1.26
Parallel 2.5°	555.6	26.85	15.62	-1.26
Parallel 5.0°	555.2	26.80	15.58	-1.50
Parallel 7.5°	554.1	26.88	15.60	-1.43

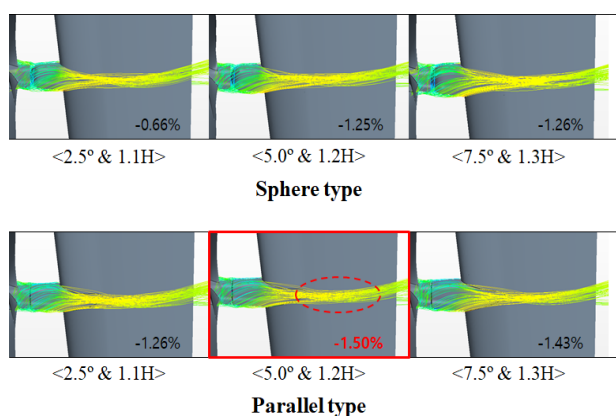


Fig. 10 Comparison of streamlines around cap region according to the parameter H and the type of cap

5. 결 론

본 연구에서는 KVLCC2에 대해서 기존 혼타에 대한 문제를 분석하고 자항성능 개선을 위해 비틀림 각과 러더벌브 및 발산형 캡을 적용시켰다.

전타 설계 시 기존 혼타와 동일한 타력성능을 가질 수 있도록 설계하기 위해 한국선급에서 제시하는 타력계산 방법을 이용하여 동일한 타력이 되도록 제원을 정하였다. 그리고 수면 하부의 침수표면적을 동일하게 하기 위해 전타 적용으로 인해 변화되는 면적만큼 타 상부를 스케그로 채워줌으로써 동일하게 맞춰주었다. 이에 따라 기존 혼타의 상부에서 발생했던 구속와류로 저항이 줄어들고 결과적으로 자항상태에서의 전달동력이 감소한 것을 확인할 수 있었다.

비틀림 타의 경우 비틀림 각에 따라 자항상태에서 타의 압력 분포가 변화하였고, 타 표면에서의 최저압력이 타의 최대두께 지점에 분포할 때 자항성능이 가장 좋은 것을 확인할 수 있었다. 비틀림 각을 기준으로 KCS에 대한 연구 (Kim et al., 2018)와 비교 했을 때, 대형 상선의 경우 고속선과 저속선의 설계선속의 차이 대비 회전수의 차이가 크지 않으므로 선속이 느린 KVLCC2의 경우 타로 들어오는 유동의 유입각도가 상대적으로 크기 때문에 초기값으로 사용한 KCS용 비틀림 타의 최적 비틀림 각 보다 큰 경향을 가지는 것으로 판단된다. 일반적으로 타에 유입되는 유입 각이 크면 효율에 유리할 수 있으나 본 KVLCC2와 같이 불균일성이 크고 허브에서의 프로펠러 보오텍스가 컨테이너선과 같이 크지 않을 경우 효율증가가 크지 않을 수 있음을 보였다. 추가적인 개선사항으로 타의 상하부로 들어오는 유동의 유입각도가 다를 수 있기 때문에 상하부 비틀림 각을 다르게 줄 수 있도록 비틀림 각에 따른 압력분포의 결과를 확인하여 추가적인 상세설계를 수행할 수 있을 것이라 생각된다.

러더벌브와 발산형 캡의 최적화에서는 설계 변수에 따라 허브 보오텍스의 후류가 바뀌는 것을 확인하며 전달동력을 비교하였다. 최종적으로 비틀림 타의 상하부 간극을 해소함과 동시에 발산형 캡 뒤로 흐르는 유동이 러더벌브를 따라 부드럽게 흐르고 타 주변의 유동이 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 본 연구의 결과와 KCS에 대한 연구 (Kim et al., 2018)의 결과를 비교하면 타와 발산형 캡 설계 파라미터의 최적 결과가 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 추후 타 선형에 동일한 프로세스를 적용하여 3가지 이상의 선종에 대한 엄밀한 비교분석을 통해 선종별 특성과 경향성을 파악하고자 한다.

본 연구에서는 CFD에 의한 비틀림 각과 러더벌브 최적화 과정을 수행하였으나 보다 정도 높은 설계가 이루어지기 위해서는 모형시험에 의한 검증이 수행되어야 할 것이다. 또한 타의 주요 성능 요소인 타력 등의 유체역학적인 성능에 의한 최종적인 조종 성능 및 타 캐비테이션의 성능 비교가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- Carlton, J., 1994. *Marine propellers and propulsion*. Third Edition. Butterworth-Heinemann, Great Britain.
- Cha, K.J., 2016. *Design of twisted rudder with bulb and fin for KCS*. M.S. Pusan National University.
- Heo, D.H., 2017. *Resistance and propulsion performance comparison of semi spade rudder and asymmetric full spade rudder by numerical and experimental method*. M.S. Pusan National University.
- Kim, M.G., Kim, M.C., Shin, Y.J. & Kang, J.K., 2018. Numerical study on optimization of bulb type twisted rudder for KCS. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 32(6), pp.419–426.
- Kim, I.H., Kim, M.C., Lee, J.H., Chun, J.H. & Jung, U.H., 2009. Study on design of a twisted full-spade rudder for a large container ship by the genetic algorithm. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(5), pp.479–487.
- Korean Register(KR), 2019. *Rules and guidance for the classification of steel ships*, Pusan: KR.
- Mewis, F. & Deichmann, F., 2013. Power and cost-savings for container vessels by hydrodynamic energy saving device. *4th International Ship Efficiency Conference*, Hamburg, Germany, September 2013, pp.153–155.
- Okada, Y., Kawasaki, M., Katayama, K., Okazaki, A., Fukuda, K. & Okazaki, M., 2015. The development of "Ultimate rudder" for EEDI. *VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, Rome, Italy, June 2015, pp.605–612.
- Shin, K.W., Lundgren, E. & Nielsen, J.R., 2012. CFD-Based optimization of rudder bulb systems. *World Maritime Technology Conference*, Saint-Petersburg, Russia, 2012.



김 현 웅



김 문 찬



강 진 구



윤 택 근