

# Wavy 형상 적용에 따른 대 각도에서의 러더 성능에 대한 수치해석 연구

태현준·신용진·김범준·김문찬†  
부산대학교 조선해양공학과

## A Numerical Performance Study on Rudder with Wavy Configuration at High Angles of Attack

Hyun June Tae·Young Jin Shin·Beom Jun Kim·Moon-Chan Kim†  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University

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.

This study deals with numerically comparing performance according to rudder shape called 'Twisted rudder and Wavy twisted rudder'. In comparison with conventional rudder, rudder with wavy shape has showed a better performance at high angles of attack( $35^\circ \sim 40^\circ$ ) due to delaying stall. But most of study concerned with wavy shape had been performed in uniform flow condition. In order to identify the characteristics behind a rotating propeller, the present study numerically carries out an analysis of resistance and self-propulsion for KCS with twisted rudder and wavy twisted rudder. The turbulence closure model, Realizable  $k-\epsilon$ , is employed to simulate three-dimensional unsteady incompressible viscous turbulent and separation flow around the rudder. The simulation of self-propulsion analysis is performed in two step, because of finding optimization case of wavy shape. The first step presents there are little difference between twisted rudder and case of H\_0.65 wavy twisted rudder in delivered power. So two kind of rudders are employed from first step to compare lift-to-drag ratio and torque at high angles of attack. Consequently, the wavy twisted rudder is presented as a possible way of delaying stall, allowing a rudder to have a better performance containing superior lift-to-drag ratio and torque than twisted rudder at high angles of attack. Also, as we indicate the flow visualization, check the quantity of separation flow around the rudder.

**Keywords** : EEDI(선박제조연비지수), Full spade rudder(전 가동타), Twisted rudder(상하 비대칭 타), Wavy twisted rudder(파형 비대칭 타), CFD(전산유체역학)

## 1. 서론

최근 선박의 추돌사고 및 좌초로 인한 인명피해, 해양오염이 심각해짐에 따라 대형선박의 조종성능 향상에 대한 국제적 관심과 중요성이 증대되고 있다. 또한 국제해사기구(IMO)가 이산화탄소 총량 규제 제도인 '선박제조연비지수'(EEDI)채택을 의무화함에 따라 친환경 선박에 대한 요구가 늘어가고 있다. 이에 따라 국내외 연구 기관 및 대학, 기업체에서는 성능이 우수한 타를 연구, 개발을 하였고, 또한 현재 진행 형이기도 하다.

선박의 타는 프로펠러와 함께 선박의 추진 시스템을 구성하는 중요한 요소 중에 하나이다. 그 중 전 가동타(Full Spade Rudder, FSR)는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 세미 스페이드 타

(semi spade rudder)의 rudder horn에서 간극 문제를 해결하여 캐비테이션 성능을 개선시킨 형태라고 할 수 있다.

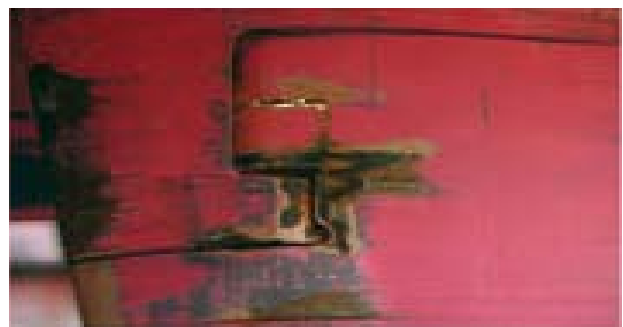


Fig. 1 Typical erosion profile of semi-spade rudder

본 연구는(Full Spade Rudder, FSR)중, 보다 효과적인 상하 비대칭 타(Twisted Rudder, TR)를 설계하여 기준 타로 선정하였다. twisted rudder는 프로펠러에서 빠져나오는 유체의 유입 방향을 고려하여 타의 상부와 하부를 비틀어 단면을 배치함으로써 캐비테이션 성능이 우수해지는 것 외에도 프로펠러 후류에 의한 양력으로 추력을 발생시킨다. twisted rudder의 원리에 대한 대략적인 개념은 Fig. 2에 나타내었다.

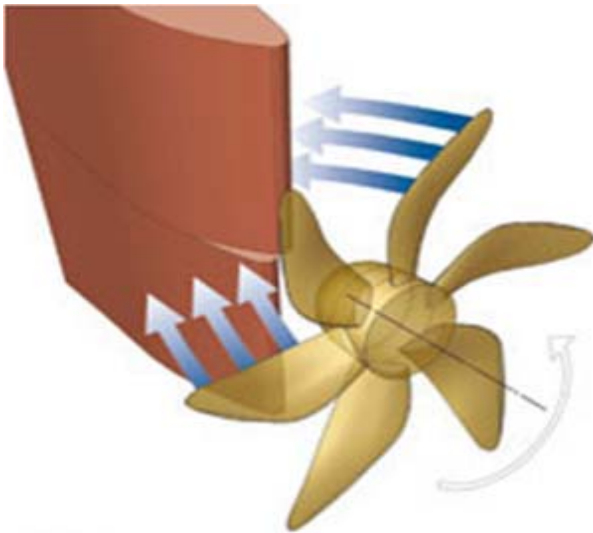


Fig. 2 Concept of the twisted rudder

Kim, et al. (2009)에서 대형컨테이너선용 TR에 대한 연구를 진행한 바 있다. 그러나 상하 비대칭 타의 상부면과 하부면이 만나는 불연속면에서 캐비테이션과 같은 간극문제와 타각이 대각도인 상태에서 실속현상(stall)이 발생하는 단점을 갖고 있다. 비교 대상이 되는 파형 상하 비대칭 타(Wavy Twisted Rudder, WTR)는 마찬가지로 프로펠러 후류를 고려한 비대칭의 개념과 홀딩고래의 지느러미 형상이 적용된 생체 모방 형 기술이다. 이미 Anh & Yoon (2009), Yoon, et al. (2011)와 Lee, et al. (2010)에서 파형에 대한 연구를 진행한 바 있고 실속(stall)을 지연시킴으로써 양력을 발생시키는 것을 확인하였다. 그러나 이는 모두 균일류(uniform flow)조건에서 진행된 연구이다.

본 연구에서는 복잡한 유동의 형태를 갖고 있는 프로펠러 후류에 놓인 TR와 WTR를 타각을 대각도(35°, 40°)로 회전시킴으로써 port & starboard side 각각에 대한 방향타의 성능에 대한 연구를 수행함으로써 twisted rudder와 비교하여 wavy twisted rudder의 우수성을 확인하고자 하였다.

## 2. 대상선 및 타 설계

### 2.1 대상선

대상선은 3,600TEU KRISO Container Ship(KCS)로써  $L_{pp}=230\text{ m}$ ,  $L_{wl}=232.50$ ,  $B=32.20\text{ m}$ ,  $D=19.0\text{ m}$ ,  $T=10.8$  이

다. 수조크기를 고려하여 프로펠러 직경에 맞춰 scale을 39.5 결정하였다. 실선과 모형선에 대한 제원은 아래 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Principal particulars of object ship

	Real ship	Model ship
$L_{PP}$ (m)	230.00	5.82
$L_{WL}$ (m)	232.50	5.89
Breadth (m)	32.20	0.82
Depth (m)	19.0	0.48
Design draft(m)	10.8	0.27
$C_B$	0.651	0.651
Design Speed(knots)	24.00	3.82
Scale ratio	39.5	

### 2.2 비대칭 타의(Twisted rudder) 단면 정의

Fig. 3에서와 같이 NACA0018 단면에 대해 maximum thickness point(Max. Thickness point)를 기준으로 상부는 좌현으로 5°, 하부는 우현으로 5°만큼 비틀림 각을 형성하였다. Flow angle을 고려하였으나 그럴 경우 너무 큰 각도로 twist angle이 형성되기 때문에 러더 전문 제작업체에서 일반적으로 4° ~ 7° 사이의 twist angle을 고려한다. 본 연구에서는 방향타 단면의 매끄러운 설계를 위해서 Ahn, et al. (2012)의 논문을 참고하여 대형 컨테이너선에 적용되는 러더에서 가장 일반적으로 사용되는 prototype 5°로 설정하였다.

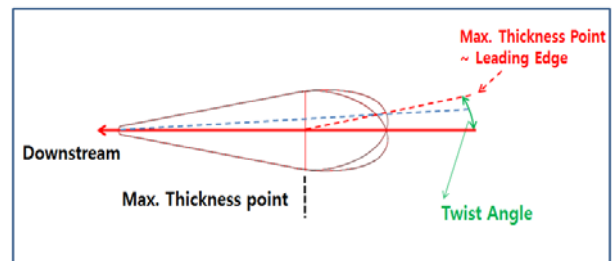


Fig. 3 Definition of rudder section

### 2.3 파형 비대칭 타(Wavy twisted rudder) 형상 정의

파형 비대칭 타는 비대칭 타와 마찬가지로 프로펠러 샤프트를 기준으로 상부는 좌현 하부는 우현으로 twist 되어있다. 그러나 차이점은 불연속이 되는 부분을 앞에서 보았을 때 tangent 함수 형태와 같이 이어주면서 불연속이 발생하는 문제를 보완하였다. 여기에 파형 형상을 구현할 수 있는 수학적 수식을 이용해서 leading edge의 chord 길이를 변화시켜주면서 파형 형상을 구현

하였다. 앞서 언급하였듯이, 흑등고래의 지느러미 형상을 모사한 생체 모방 형 기술을 전 가동 타에 접목하여 파형 비대칭 타라는 새로운 형태의 방향타를 제시하였다. 기본적인 파형 형상은 삼각 함수 중 하나인 sine의 형태를 이용하였으며 전체 각도에 대한 정의와 대략적인 파형 형상 구현에 대한 수식은 아래 Fig. 4에 나타내었다. 파형 형상은 sine 함수를 이용해서 모사를 하였고 그에 따라서 필요한 각의 범위를 설정하기 위해 sine함수의 한 주기인  $360^\circ$ 에 구현하고자 하는 파 개수를 곱함으로써 정의 할 수 있다. 그리고 이 각을 sine함수에 적용해서  $f_c(constant)$  라는 상수 값을 각 section별로 구하게 된다. 여기서  $H_{wavy}$ 는 0~1까지의 범위를 갖는 파고의 최대, 최소를 결정짓는 상수라고 할 수 있다. 결국 이렇게 정해진 section별  $f_c$  값을 통해 기존의 chord length( $C_{lorinth}$ )에 곱함으로써 최종 파형 형상을 갖는  $C_{lnth}$ 를 결정할 수 있다. TR과 WTR의 최종 모델링 형상은 Fig. 5에 제시 하였다.

$$C_{lnth} = C_{lorinth} \times f_c \tag{1}$$

$$f_c = 0.95 + 0.05\sin(\alpha) \times H_{wavy} \tag{2}$$

$$\alpha = 360^\circ \times Num_{wavy} \left( \frac{n_{max} - n}{n_{max}} \right) + 90^\circ \tag{3}$$

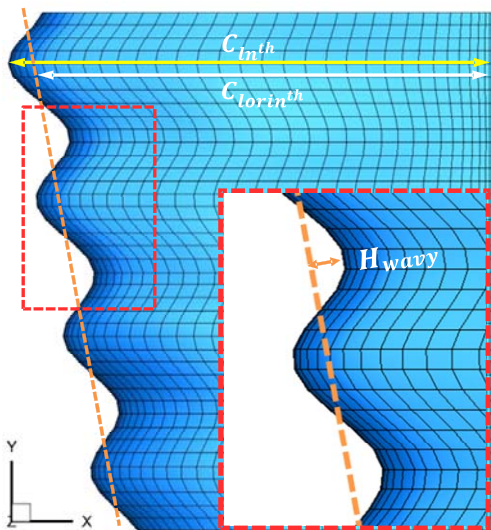


Fig. 4 Mathematical definition of wavy pattern along a rudder leading edge

### 2.4 파형 비대칭 타 Case study

Twisted rudder 의 기본 제원을 바탕으로 wavy twisted rudder 를 설계하고 타의 앞날 파형 형상변화에 대하여 case study를 진행하여 twisted rudder와 wavy twisted rudder 사이의 비교뿐만 아니라 파형 형상 자체에 의한 효과도 고려하여 설계하였다. 기

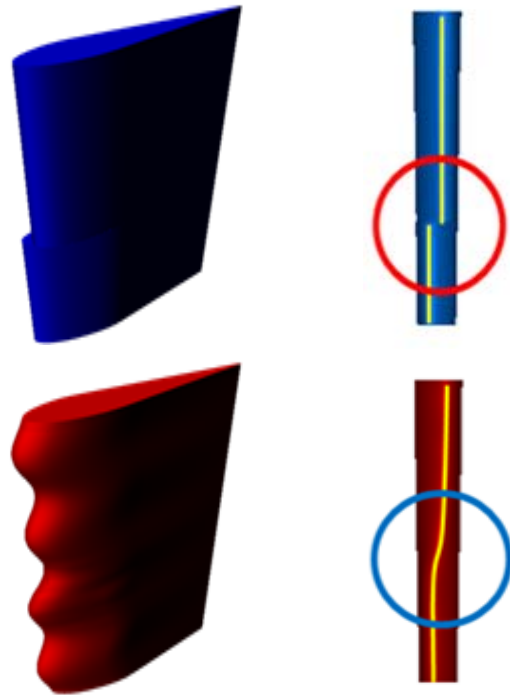


Fig. 5 Twisted rudder & wavy twisted rudder

본 제원은 Table 2에 보는 바와 같고 각각의 경우에 대한 파형 형상은 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 0.35H,0.5H,0.65H의 의미는 파형의 높이 정도에 따른 종류의 구분을 짓기 위해서 표기한 것이다.

Table 2 Dimensions of twisted rudder & wavy twisted rudder

Top chord(mm)	150.1
Bottom chord(mm)	124.4
Mean chord(mm)	137.2
Span(mm)	250.6
Aspect ratio	1.82

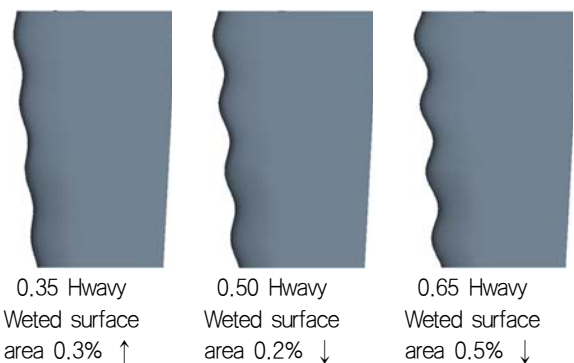


Fig. 6 Rudder shape according to wavy height

Twisted rudder와 비교하여 각 case에 대한 침수표면적의 차이는 0.3%, -0.2%, -0.5%로 무시할 수 있을 정도의 차이라고 판단하였다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 수치해석 기법

본 연구에서는 STAR CCM+ (Ver. 9.04)을 이용하여 수치 해석을 진행하였다. 3차원 비정상 비압축성 난류유동의 지배방정식인 연속방정식과 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS)식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{연속방정식})$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}\vec{V}) = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \sigma_{ij} \quad (\text{운동방정식})$$

여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $t$ 는 시간,  $u_i$ 는 유속,  $p$ 는 압력,  $\mu$ 는 유체 점성계수,  $g_i$ 는 중력 가속도이다.  $\rho \overline{u_i' u_j'}$ 는 레이놀즈 응력(reynolds stress) 항이 된다. 난류모형은 추가로 풀어야 할 난류관련 방정식의 숫자에 따라 영-방정식(zero-equation), 1-방정식(one-equation), 2-방정식(two-equation) 모형 등으로 구분할 수 있다. 공학적으로 가장 많이 사용되는 대표적인 난류모형으로는  $k-\epsilon$  모형이 있고, 본 연구에서는 역 압력구배에 의한 경계층 박리 유동에 향상된 성능을 보여주는 난류모델인 Realizable  $k-\epsilon$ 을 사용하였다. 또한 자항성능 수치해석 시 프로펠러 회전방법으로는 직접 회전시키는 sliding mesh를 적용하였다.

#### 3.2 해석영역 및 경계조건

본 연구에서 사용한 해석영역 및 경계조건은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 선수에서 선미로 유동이 흐르는 방향을 +x, 좌현을 +y, 중력반대 방향을 +z로 하는 직교 좌표계를 사용하였다. 경계조건으로 선수부의 inlet 과 +z 방향의 top, -z 방향의 bottom에는 velocity inlet을 설정하였고 유동이 빠져나가는 +x, downstream방향의 outlet 에는 pressure outlet으로 설정하였다. Domain 크기는 모형선의  $L_{pp}$ 에 대해서 정의를 한 것이다.

#### 3.3 격자계 구성

본 연구에서는 선체표면 및 공간격자의 생성은 STAR-CCM+에서 제공하는 방식으로 trimmed mesh와 prism layer를 사용하였다. 저항 및 자항성능 수치해석에 고려된 격자수는 각각 약 240만개, 430만개이며, 구성은 Fig. 8과 같다. 표면에 위치하는 격자점의 첫 번째 위치는  $y^+ = 100$ 에 해당하는 위치를 고려하

였다. Prism layer(경계층격자) 같은 경우 선체 주변에서 전단력이 중요하게 작용하므로 6개의 층을 나눠 벽함수(wall function)를 적용 하였다. 자유수면을 고려하기 위해서 VOF(Volume of Fluid) 방법을 사용했고 격자 또한 조밀하게 형성하여 두 가지 상(phase)가 만나는 부분에서 유동을 보다 정확히 계산 하고자 하였다.

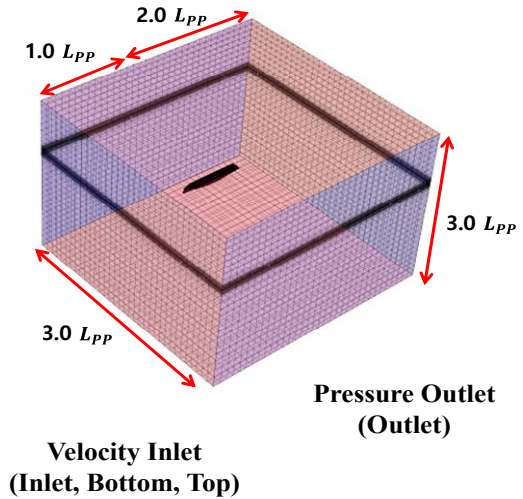


Fig. 7 Computational domain and boundary condition

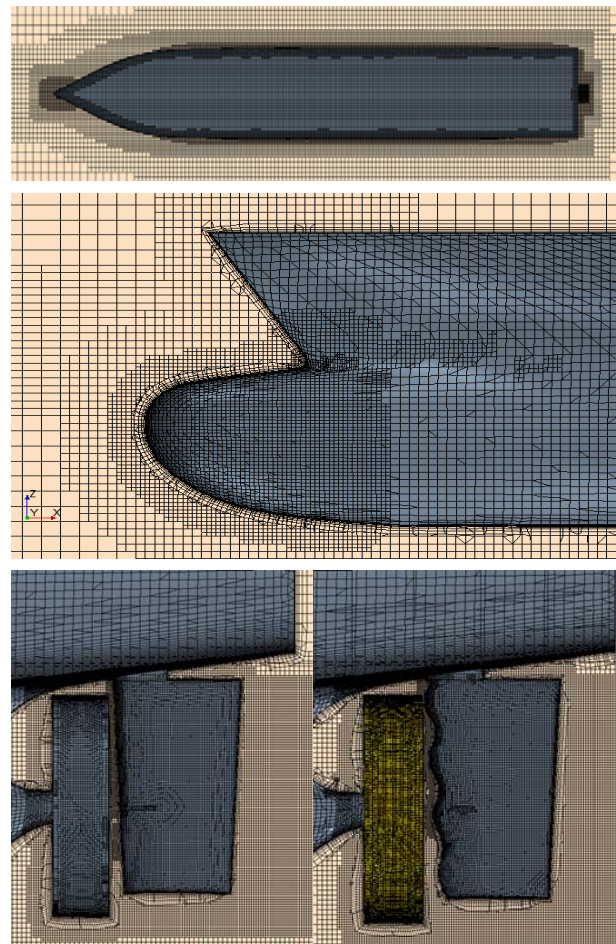






Fig. 8 Numerical grid system for calculations

## 4. 수치해석 결과

### 4.1 저항해석 결과

비틀림 타와 3종의 WTR 장착 시 각각의 선체저항 수치해석 결과는 Table 3에서 보는 바와 같으며 비틀림 타 기준으로 0.35H, 0.5H, 0.65H의 경우에 선체저항이 각각 0.03%, 0.04%, 0.07% 증가한다. 그러나 그 차이가 거의 무시할 수 있을 정도의 수치라고 판단하였다.

Table 3 Results of resistance analysis

Type				
Res(N)	42.443	42.460	42.461	42.475
Variation of Resistance(%)	0.0	0.03	0.04	0.07

### 4.2 자항성능 수치해석 결과

본 연구에서는 타각 0° 일 때 모형선의 자항점과 전달동력(Delivered power)값을 이용해서 twisted rudder와 비교하여 가장 우수한 경우에 대해서 타각을 Port & Starboard 방향으로 35°, 40° 회전시켜가며 타의 앞날 파형 변화에 따른 성능을 확인코자 했다.

#### 4.2.1 자항성능 수치해석 결과 ( 타각 0° )

타각이 0° 일 때 동일 선속인 24knot에서 각 type의 자항점 RPM에서 twisted rudder와 비교하여 각각의 경우에 대해서 전달동력( $P_D$ )의 차이를 Table 4에 제시 하였다. 0.35H일 때 -1.32%, 0.5H일 때 -2.11%, 0.65H일 때 -0.21%로 세 가지 경우 모두 twisted rudder보다 전달동력( $P_D$ ) 증가를 보인다. 그러나 본 연구는 타각 0° 일 때 twisted rudder와 wavy twisted rudder의 효율 비교가 아닌, case 0.65H와 같이 타각0° 에서 효율차이가 거의 나지 않을 경우 wavy twisted rudder가 타각이 대 각도로 회전된 상태에서 나타나는 장점들이 있고 이러한 것들을 유동이 복잡한 프로펠러후류에 놓여있는 자항상태일 때 확인을 해보는 것이 목적이므로 이 결과를 바탕으로 TR과 최적 WTR에 대해서 타력 수치해석 계산을 수행하였다.

#### 4.2.2 자항성능 수치해석 결과 ( 타각 35°, 40° )

기존 twisted rudder와 wavy twisted rudder 0.65H 두 가지 형태에 대해서 twisted rudder 는 651.99rpm, wavy twisted

Table 4 Result of self-propulsion point at rudder angle 0°

Type	TR	WTR 0.35H	WTR 0.5H	WTR 0.65H
RPM	651.99	653.86	654.21	651.96
Thrust (N)	34.39	34.91	35.24	34.59
Torque (N-m)	1.179	1.19	1.20	1.182
$P_D$	769.10	779.29	785.26	770.78
Variation of $P_D$ (%)	0.0	1.3	2.2	0.2

rudder는 651.96rpm 으로 4.2.1의 결과를 이용해서 회전수를 결정하고 동일한 선속에서 타각을 Port & Starboard 방향으로 35°, 40° 회전시켜 두 가지 방향타에 걸리는 양항비와 토크 값을 계산하였다. 양항비는 타 전반에 걸쳐서 발생하는 양력과 항력의 비를 나타내며, 타의 회전중심은 Fig. 9 에서 보는바와 같이 실제로 rudder stock이 들어가는 위치를 가장 일반적으로 적용되는 최대 두께 지점에 설정하여 좌표축에서 발생하는 모멘트 값을 계산하였다.

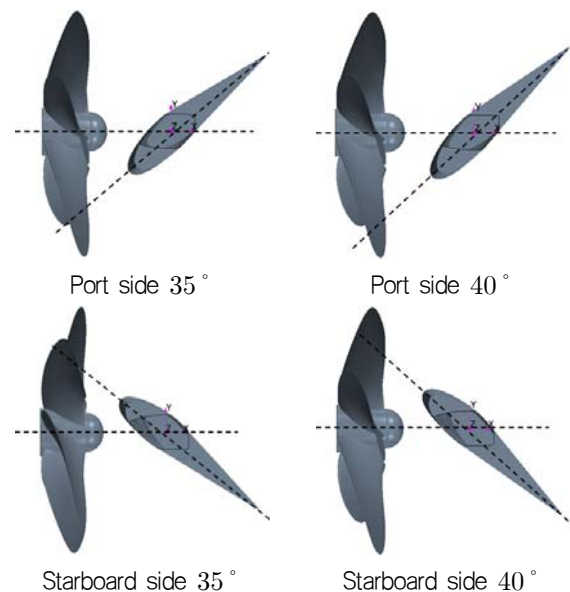


Fig. 9 Definition of rudder angle

그 결과 타각 35° 일 때 wavy twisted rudder의 양항비가 twisted rudder와 비교하였을 때 port side에서는 약 4.2%, starboard side에서는 약 16.7% 우수한 결과를 확인할 수 있었다. Rudder stock이 위치하는 좌표축에서의 토크 값 같은 경우 port side는 약 33.4%, starboard side는 약46.3% 작은 힘이 작용함으로써 twisted rudder와 비교하여 보다 효율적으로 타각을 유지할 수 있음을 확인하였다. 마찬가지로 타각이 40° 인 경우

wavy twisted rudder의 양항비가 twisted rudder와 비교하였을 때 port side에서는 약 4.9%, starboard side에서는 약 20.7%의 차이를 보였으며 토크 값 또한 port side는 약 21.9%, starboard side는 약 33.0% 작은 힘이 작용하는 결과를 관찰하였다. 결과를 보다 명확히 나타내기 위해서 Fig. 10 ~ 13에 막대 그래프를 이용하여 도시하였다.

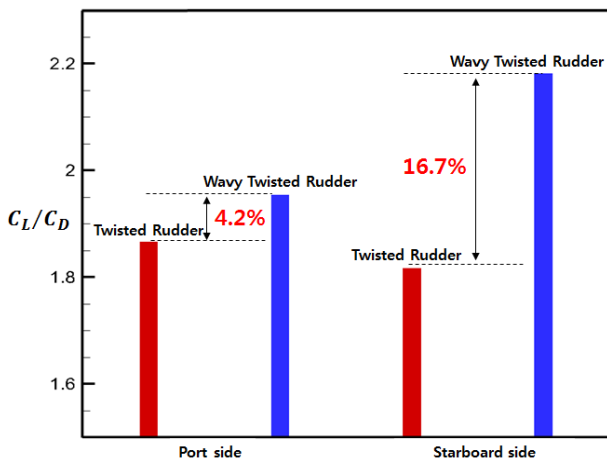


Fig. 10 Comparisons of lift-to-drag ratio for angle 35°

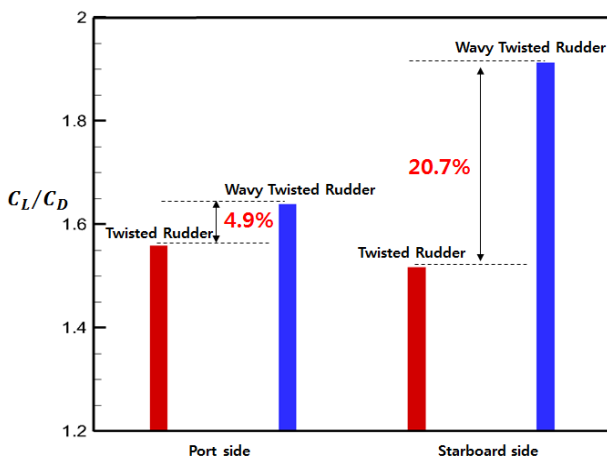


Fig. 11 Comparisons of lift-to-drag ratio for angle 40°

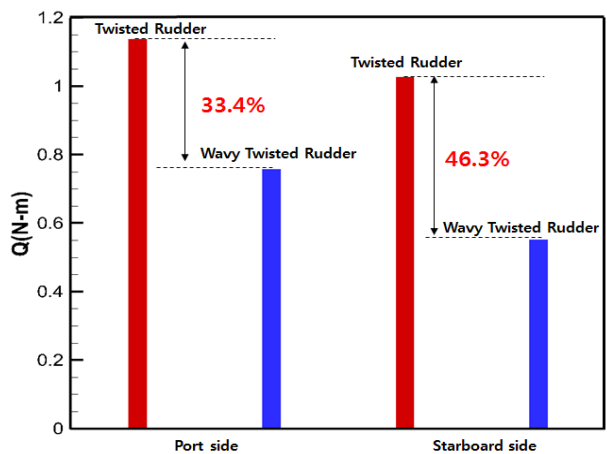


Fig. 12 Comparisons of torque for angle 35°

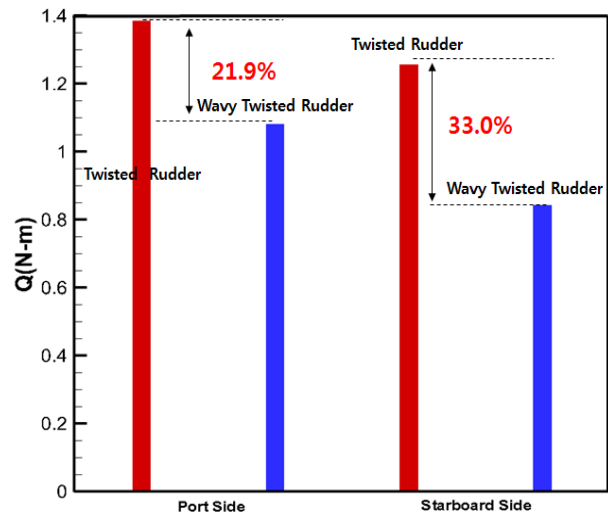


Fig. 13 Comparisons of torque for angle 40°

타각이 대각도일 때 wavy twisted rudder의 장점을 4.2.2에서 수치적으로 확인하였다. 따라서 이러한 결과가 CFD해석상에서 어떠한 유동을 보이며 두 가지 종류의 방향타에서 나타났는가를 확인해보기 위해서 양항비의 차이를 가장 크게 보였던 starboard 40° 일 때 streamline을 top view 와 side view 로 나눠서 확인하였다. Fig. 14의 top view에서 streamline을 보면 모두 박리가 진행되었지만 그 정도가 twisted rudder에서 심하게 발생하는 것을 확인할 수 있고 side view로 이를 더 명확히 확인해보면 twisted rudder는 타 전반에 걸쳐 박리가 진행된 반면 wavy twisted rudder는 propeller hub를 중심으로 국부적인 박리가 일어나므로 두 종류의 방향타에 대한 streamline의 차이를 확인할 수 있다.

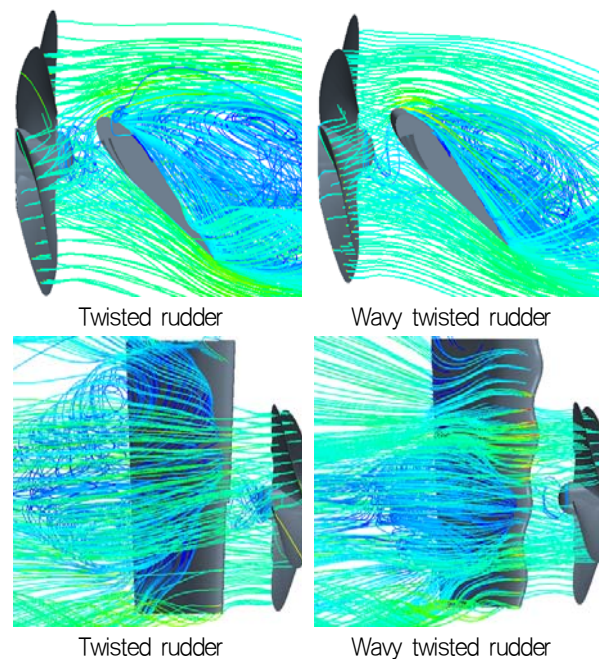


Fig. 14 Streamline for rudder angle 40° at starboard side

## 5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 CFD를 이용하여 균일류 상태에서 보였던 파형 형상의 특징을 프로펠러 후류와 같이 복잡한 형태의 유동을 갖는 위치에 놓였을 때, 저항 및 자항성능 수치해석에 대해 case study를 수행하여 최적 형상에 대해서 타각을 대각도로 회전시켜 가며 twisted rudder와 wavy twisted rudder의 성능 연구를 수행하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 저항해석 시 각 type별 결과 차이는 거의 없었다. 자항성능 수치해석 시 타각 0°에서 전달동력( $P_D$ )으로 효율을 비교하였을 때 twisted rudder와 0.65H wavy twisted rudder의 차이는 -0.21%로 wavy twisted rudder의 효율이 다소 좋지 않은 결과를 보였으나 이는 무시할 수 있는 정도의 차이라고 판단하였다.
- 2) Twisted rudder와 0.65H wavy twisted rudder에 대해 타각을 Port & Starboard side로 35°, 40° 회전시켜가며 각 타에 걸리는 양항비 및 토크를 계산한 결과 좌현과 우현에서 타각 35°일 때 각각 wavy twisted rudder가 약 4.2%, 16.7% 우수한 양항비를 보였고 토크 값 또한 약 33.4%, 46.3% 작은 힘으로 타각을 유지할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 마찬가지로 타각 40°일 때 좌현과 우현 각각 양항비는 약 4.9%, 20.7% 우수한 결과를 보였고 토크 값은 약 21.9%, 33.0% 차이를 보인 것을 확인하였다.
- 3) 35°, 40° 모두 port side에서보다 starboard side에서 양항비의 차이가 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 타의 상부 와 하부를 나누는 기준이 propeller shaft축을 중심으로 나누게 되며 이에 따른 상부는 전체 면적의 62% 하부는 38%로 상부에 의한 양력의 영향이 더 지배적으로 작용하게 되고 비틀림각에 의해서 상부의 면적은 좌현방향으로 틀려있기 때문에 타의 하부보다 stall이 덜 일어나게 되고 이에 따라 우현으로 타가 회전했을 때 상대적으로 WTR의 높은 양항비가 나타나게 된다고 판단하였다. 토오크 값의 경우 타의 형상에 따라 합력 분포가 달라지게 되는데 그 합력점이 stock의 위치로부터 WTR의 경우가 더 짧게 형성되었기 때문에 나타난 결과로 판단하고 있고 토오크 값에 대한 합력점은 추후 실험과의 검증을 통해서 그 규명에 대한 연구가 더 필요하다고 판단된다.
- 4) 앞선 수치해석적인 결과들에 대해 대각도일 때 타에서 일어나는 유동현상을 확인하기 위해 streamline을 도출하여 가시화 해본 결과 twisted rudder에서는 타 전반에 걸쳐 박리가 발생한 반면 wavy twisted rudder의 경우 propeller hub 중심으로 국부적인 박리가 발생하였다.
- 5) wavy twisted rudder의 위와 같은 결과가 나타나는 이유는

sine 파의 형상처럼 골과 마루가 나타나는 파형 형상으로 인해 그 위치에서의 압력과 속도차이로 인해 streamwise 방향으로 vortex가 생성된다. 이로 인해서 유체들은 high momentum을 갖고 경계층 내에서 서로 에너지 교환을 활발하게 이루게 된다. 결국, twisted rudder는 러더 표면을 흐르는 유체가 표면의 마찰력을 이겨낼 수 있는 힘이 없지만, wavy twisted rudder에서의 유동은 표면의 마찰력을 이겨내고 흐를 수 있는 에너지가 계속 공급되기 때문에 박리가 상대적으로 지연되고 그에 따라서 실속(Stall)이 delay되어 보다 높은 양항비와 효율적인 타각 유지가 가능하다고 할 수 있다.

- 6) 따라서 이러한 wavy twisted rudder가 twisted rudder와 비교하여 타각 0°에서 큰 효율 차이가 없으면서, cross section 부에서의 불연속성으로 인한 간극 문제와 대 각도에서 stall delay로 인한 장점이 있으므로 지속적인 optimization research와 항후수조 model test를 통해서 충분한 validation을 한다면 현재 사용하고 있는 고 양력 특수타(high lift device)를 대체 할 수 있을 것이라고 결론을 내릴 수 있다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 조선해양플랜트 글로벌 핵심 연구센터(GCRC)로의 산학연구 및 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 '에너지 저감 및 공동현상 감소를 위한 비대칭형 타의 개발'이라는 과제 명으로 수행되었습니다(No. 2015-017905). 이에 감사드립니다.

## References

- Anh, H.P. & Yoon, H.S., 2009. Effect of waviness on the conventional rudder performance. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK*, 29-30 October 2009, pp.880-886.
- Ahn, K.S. Choi, G.H. Son, D.I. & Rhee K.P., 2012. Hydrodynamic characteristic of X-Twisted rudder for large container carriers. *International Journal Naval Architecture Ocean Engineering*, 4(4), pp.322-334.
- 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.
- Lee, J.H. Kim, M.C. Yoon, H.S. Kwon, K.J. Chun, J.H., 2010. *Development of high lift twisted wavy rudder for a large container ship*. Master's thesis.

Pusan National University, Korea.  
Yoon, H.S. Hung, P.A. Jung, J.H. & Kim, M.C.,  
2011. Effect of the wavy leading edge on  
hydrodynamic characteristics for flow around low  
aspect ratio wing. *Computers & Fluids*, 49  
pp.276–289.

