

중형 컨테이너선의 연료절감형 비틀림 타 개발

전호환¹·차경정¹·이인원¹·최정은^{2†}
부산대학교 조선해양공학과¹
부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터²

Development of Twisted Rudder to Reduce Fuel Oil Consumption for Medium Size Container Ship

Ho-Hwan Chun¹·Kyung-Jung Cha¹·Inwon Lee¹·Jung-Eun Choi^{2†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University¹
Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University²

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.

Twisted rudder, twisted rudder with bulb, and twisted rudder with bulb and fin have been developed computationally for 3,000 TEU container ship through parametric study. The objective function is to minimize delivered power in model scale. Design variables are twisted angle, rudder bulb diameter and fin angle. The governing equation is Reynolds averaged Navier-Stokes equations in an unsteady turbulent flow and the Reynolds stress model applied for the turbulent closure. A double body model is used for the treatment of free-surface. The calculation was carried out in towing and self-propulsion conditions at design speed. The sliding mesh technique was employed to simulate the flow around the propeller. Form factor is obtained from the towing computation. Self-propulsion point is obtained from the self-propelled computations at two propeller rotating speeds. The delivered power due to the designed twisted rudder, twisted rudder with bulb, and twisted rudder with bulb and fin are reduced by 1.1%, 1.6%, and 2.0%, respectively.

Keywords : Twisted rudder(비대칭 타), Rudder bulb(타 벌브), Rudder fin(타 핀), KRISO Container Ship(KCS), CFD(전산유체역학)

1. 서론

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)가 진행한 제 3차 온실가스 연구 결과에 따르면 세계 해상운송의 이산화탄소 배출량은 지구촌 전체 배출량의 3.1%를 차지한다(IMO, 2014). 그리고 선박의 이산화탄소 배출량에 대하여 아무런 규제가 없을 경우 2050년에 이 비중이 12~18%까지 늘어날 수 있다. 따라서 국제해사기구는 선박 배출 온실가스 감축 방안으로 에너지 효율 설계 지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 제안하였다. 선박 배출 온실가스 규제가 현실화되면서 조선업계의 친환경 기술 연구 및 개발의 중요도가 높아지고 있다. 친환경 선박은 연료 절감 등의 기술을 개발하여 온실가스 배출량을 감소한 것으로 이의 일부는 추진효율이 향상되는 다양한 에너지 절감 장치(Energy-Saving Devices, ESD)를 여러 종류의 선박에 부착한다(Shin et al., 2013; Kim et al., 2014; Kim et al., 2015; Hai-long et al., 2016; Wu et al., 2016).

향해하는 선박의 에너지 손실을 개선하기 위한 에너지 절감 장치는 에너지 손실을 줄이는 장치와 손실된 에너지를 회수하는 장치가 있다. 이러한 에너지 절감 장치는 장착 위치에 따라서 세 그룹으로 분류할 수 있다(Kim et al., 2015). 하나는 프로펠러 앞에 위치하여 프로펠러 면으로 들어오는 유입류를 개선하는 그룹이다. 다른 하나는 프로펠러 주위에 위치하는 그룹이며, 마지막은 프로펠러 뒤에 위치하여 프로펠러의 후류를 이용하는 그룹이다.

프로펠러는 타에 유입되는 유동을 회전 및 가속시킨다. 따라서 선체와 프로펠러, 그리고 타에 대한 유체역학적 상호작용을 개선하기 위한 연구가 많이 수행되고 있다. 본 연구에서는 프로펠러 회전에 의한 에너지 손실을 회수하는 벌브와 핀을 부착한 비대칭 타(이후 비대칭 타 시스템이라 칭함)를 설계하였다. 비대칭 타는 프로펠러 후류의 회전류가 타에 유입되는 각도를 고려하여 타의 전반부 형상을 유입류에 맞추어 정렬함으로써 타 주위의 유동을 원활하게 하는 장치이다(Kim et al., 2009; Lee

et al., 2012). 이것은 불필요한 저항을 줄여 추가적인 추력을 발생시키며 선박의 추진성능을 개선시킨다 (Choi et al., 2010). 또한 비대칭 타에 벌브와 핀을 부착하여 추가적으로 효율을 향상시킨다 (Kim et al., 2014; Wu et al., 2016; Hai-long et al., 2016).

본 연구는 설계속도에서 예인과 자항 조건의 수치계산 결과를 이용하여 자항점에서 최소 전달마력을 가지는 비대칭 타 시스템을 설계한다. 단계적으로 최적 형상을 구하는 파라메트릭 스테디를 통하여 최적의 결과를 선택하였다. 2장에서는 대상 선박에 대하여 설명하였고, 3장에서는 유한체적법에 근거한 수치 해석 방법 그리고 4장에서는 속도 성능 추정 기법에 관하여 설명한다. 마지막으로 5장에서는 수치해석 결과 및 분석을 통해서 비대칭 타의 설계 개념과 설계 그리고 속도성능 평가결과를 정리하였다.

2. 대상 선박

대상 선박은 KRISO에서 설계한 3,600 TEU급 KRISO Container Ship(KCS)이다. 축척비는 2005년 Tokyo에서 개최된 CFD Workshop에서 선정된 모형시험과 동일한 31.60이고 (Hino, 2005) 설계속도는 24.0 knots이다. 대상 프로펠러는 KCS 전용 프로펠러인 KP505로 날개 수는 5개이고 우회전 프로펠러이다. 대상 타는 고정부와 가동부로 이루어져 있으며 좌우 대칭인 혼 타이다.

대상 선박, 프로펠러, 타의 주요 요목은 Table 1에 정리하였으며 대상 선박의 정면선도(body plans)와 측면에서 본 선수미 선행의 그림을 Fig. 1에 도시하였다.

Table 1 Principal dimensions of the ship, propeller and rudder

| Ship (KCS) | | Full scale |
|----------------------------------|-----------|-----------------------|
| Length between perpendiculars | L_{PP} | 230.0 m |
| Breadth | B | 32.2 m |
| Draft at FP and AP | T | 10.8 m |
| Displacement volume | ∇ | 52,030 m ³ |
| Wetted surface w/o rudder | S | 9,530 m ² |
| Design speed | V_S | 24.0 knots |
| Propeller (KP505) | | |
| Diameter | D_P | 7.9 m |
| No. of blade | Z | 5 |
| Expanded area ratio | A_E/A_0 | 0.8 |
| Pitch-diameter ratio at $0.7R_P$ | P/D_P | 0.997 |
| Rudder | | |
| Section shape | | NACA0018 |
| Wetted surface | S_R | 115.0 m ² |
| Rudder height | b | 9.90 m |
| Mean chord length | c_m | 5.50 m |
| Mean thickness | t_m | 0.99 m |

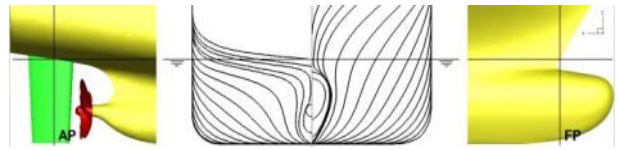


Fig. 1 Body plans and side view of the KCS

Fig. 2는 타의 형상과 설계 변수들을 나타낸 그림이다. 설계 변수는 타의 상·하부 비틀림 각도(θ_{RU} , θ_{RL})와 타 벌브 직경(D_{RB}) 및 핀 각도(δ_{FIN}) 이다.

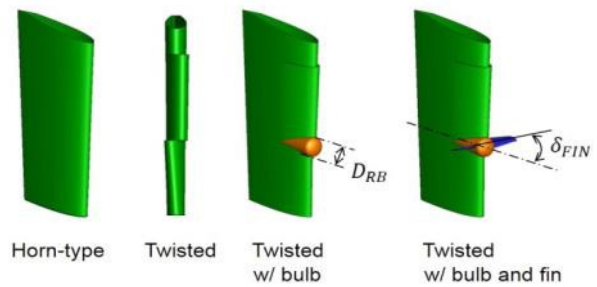


Fig. 2 View of rudders and design variables

3. 수치해석 방법

본 계산을 위하여 적용된 좌표계는 Fig. 3과 같이 선체 고정 좌표계로서 유동 방향이 양(+)의 x축, 선박의 우현이 양의 y축이며 연직 상방향을 양의 z축으로 하고 선박의 중심면과 자유 표면이 만나는 점을 원점으로 하는 우수좌표계이다. 비틀림 타 설계의 편리를 위하여 프로펠러 중심을 원점으로 하는 국부좌표계(x_p, y_p, z_p)를 고려하였다.

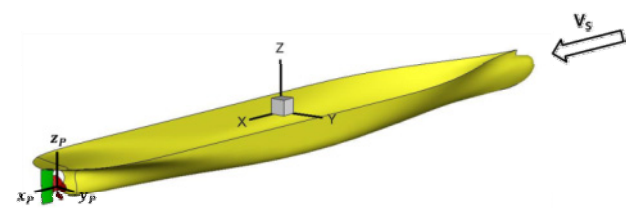


Fig. 3 Coordinate system

3.1 지배방정식

비압축성 난류유동의 지배방정식은 연속방정식과 Reynolds averaged Navier-Stokes식이며 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial c_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_\lambda \frac{\partial U_i}{\partial c_\lambda} = \frac{\partial p}{\partial c_i} + \frac{\partial}{\partial c_\lambda} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial c_\lambda} - \overline{\rho u_i u_\lambda} \right) \quad (2)$$

여기서 $U_i = (U, V, W)$ 는 $x_i = (x, y, z)$ 방향의 유속이다. p , ρ , μ , $-\rho u_i u_\lambda$ 는 정압, 유체밀도, 유체점성, Reynolds stress를 나타낸다.

난류 모형은 선체 주위 유동의 정확한 추정에 적합하다고 알려져 있는 Reynolds stress 난류 모형을 사용하였다 (Choi et al., 2010). 자유표면은 이중모형유동 근사를 사용하여 대칭면으로 처리하였다. 그리고 계산의 효율성을 고려하여 물체 표면에는 표준 벽함수를 적용하였다. 유동해석은 Fluent v17.0을 사용하였다.

3.2 수치해석 기법

계산 영역은 유한개의 작은 격자로 서로 겹치는 영역이 없도록 만들어 채우고 지배방정식은 이산화 과정을 거쳐 대수방정식으로 변환된다. 공간이산화 처리는 유한체적법을 사용하였다. 대류항은 QUICK scheme, 확산항은 중앙차분법을 사용하였으며 속도-압력 연성은 SIMPLEC algorithm을 적용하였다.

3.3 계산 조건

본 연구의 수치해석은 실선의 설계속도에 대응되는 모형선 속도($V_M=2.196$ m/s)에서 예인 및 자항 조건에 대하여 수행하였다. 프루드 수(F_N)는 0.26이다. 프루드 수는 설계속도와 L_{pp} 로 무차원화하였다.

계산 영역과 적용한 경계 조건을 Fig. 4에 나타내었다. 계산 영역은 $-1.5 < x/L_{pp} < 2.0$, $-1.0 < y/L_{pp} < 1.0$, $-1.0 < z/L_{pp} < 0.0$ 이다.

유입경계면에는 입구속도조건을 적용하였다. 정수면과 바깥 경계면에는 대칭조건을 적용하였다. 출구경계면에는 연속방정식을 이용하여 속도와 압력을 구하는 출구유량 조건을 적용하였다.

예인 및 자항 계산에서 안정적인 해를 구하기 위하여 U , V , W , k , ϵ , p , Reynolds stress 항들은 완화계수(under-relaxation factor) 0.2를 사용하였다. 수렴 판정은 연속방정식, U , V , W , k , ϵ , p , Reynolds stress 항들의 잔차(residual)값이 1.0×10^{-5} 이하가 되면 수렴된 것으로 판정하였다.

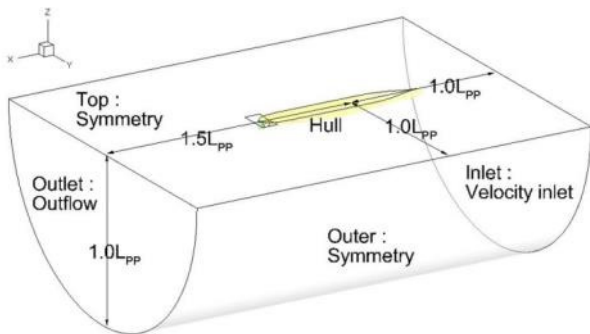


Fig. 4 Computational domain and boundary conditions

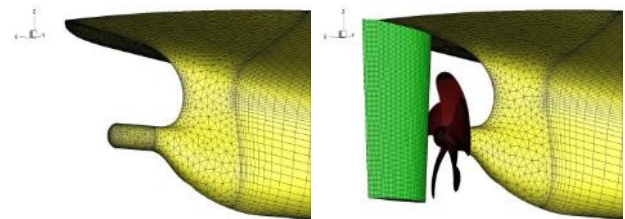
비대칭 타 시스템 설계에는 프로펠러 단독상태의 유동 모사는

MRF(Moving Reference Frame)기법을 사용하여 수렴 해를 얻고, 그것을 초기값으로 하여 최종 유동해석에는 sliding mesh 기법으로 회전하는 프로펠러 주위 유동을 모사하였다. Sliding mesh 기법은 추진기와 회전 영역을 구성하는 격자를 직접 회전시키는 방법으로 프로펠러 후류를 정확하게 구현할 수 있다. 따라서 비대칭 타 시스템 설계에는 sliding mesh 기법을 사용하였으며, sub-iteration 수 45로 프로펠러는 1°씩 4바퀴 회전하였다.

3.4 격자 생성

격자 구조는 O-H type의 다중블록으로 정렬 격자와 비정렬 격자를 모두 포함하는 하이브리드 격자 시스템을 사용하였다.

속도성능 추정결과에 미치는 격자의 영향을 최소화하기 위하여 예인 조건과 자항 조건 계산에 차이를 피할 수 없는 영역을 제외한 가능한 모든 유동영역에 동일한 격자 시스템을 유지하였다. 피치 못할 두 조건의 차이는 프로펠러 블록과 타의 유무이다. Fig. 5는 예인과 자항 조건에서 선체표면의 격자 분포를 나타내는 그림이다.



(a) Towing condition (b) Self-propelled condition
Fig. 5 View of hybrid grid system at the stern

Table 2에는 예인 및 자항 조건에서의 격자 수와 프로펠러 회전 블록의 격자 수를 정리하였다. 자항 조건에서의 괄호 안은 프로펠러 회전 블록을 나타낸다. y^+ 는 선체 표면으로부터 첫 번째 격자 높이를 벽 좌표계로 표시한 값의 평균값을 나타낸다.

Table 2 Number of cells

| Condition | Towing | Self-propulsion (Propeller rotating block) |
|-------------|-----------|---|
| Hexahedron | 1,678,400 | 1,678,400 (38,189) |
| Tetrahedron | 445,677 | 1,646,524 (724,045) |
| Total | 2,124,077 | 3,324,924 (724,045) |
| y^+ | 120 | 120 (120) |

4. 속도성능 추정방법

4.1 점성저항 추정

예인 조건에서 이중모형에 대한 점성유동계산을 통하여 모형선의 점성저항(R_M)을 구하고, 이로부터 점성저항계수(C_M)를 구한다. 아래 첨자 M은 모형선을 나타낸다.

형상계수(1+k, form factor)는 다음 식으로 구할 수 있다고 가정한다 (Choi et al., 2010).

$$(1 + k) = \frac{C_{VM}}{C_{FM}} \quad (3)$$

여기서 C_{FM} 은 ITTC-1957 모형선-실선 상관식에서 구한 모형선의 마찰저항계수이다.

표면마찰보정(Skin Friction Correction, SFC)은 식 (4)를 사용하여 구할 수 있다. 아래 첨자 S는 실선을 나타낸다.

$$SFC = \frac{1}{2} \rho_M V_M^2 S_M (1 + k) (C_{FM} - C_{FS}) \quad (4)$$

4.2 저항요소 추정

본 연구에서는 타와 에너지 절감 장치에 기인한 형상계수의 변화는 고려하지 않았고 침수표면적의 증가만을 고려하였다 (Kim et al., 2015). 저항점은 2개의 프로펠러 회전속도(n_M)에 대한 저항 계산 결과로부터 내삽법을 이용하여 구한다. 즉, 저항점에서는 식 (4)로 표현되는 SFC와 식 (5)로 표현되는 예인력(Towing Force, TF)과 같다.

$$TF = R_{VM}^{SP} - T_M \quad (5)$$

여기서 R_{VM}^{SP} 과 T_M 은 저항 조건에서의 모형선 저항과 프로펠러 추력이다. R_{VM}^{SP} 은 모형시험 결과를 해석할 경우와 같이 타와 에너지 절감 장치를 포함한 저항 조건에서의 저항이다.

전달동력(PD_M , delivered power)과 추력감소계수(t , thrust deduction fraction)는 다음의 식으로 표현된다.

$$PD_M = 2\pi n_M Q_M \quad (6)$$

$$t = \frac{R_{VM}^{SP} - R_{VM}}{T_M} \quad (7)$$

여기서 Q_M 은 저항 조건에서 프로펠러 토크이다.

5. 결과 및 분석

5.1 비대칭 타 시스템 설계 개념

비대칭 타 시스템 설계를 위해 대상 선박의 기존 타를 부착한 상태에서 프로펠러 후류의 타 주위 유동 정보가 필요하다.

Fig. 6는 혼 타를 부착한 비정상 상태의 저항 조건에서 프로펠러 주위 유동이 충분히 발달한 후 프로펠러 면에서부터 타 뒤 지점까지의 후류이다. 축방향 속도 contour로부터 우현이 좌현에 비해 더 많이 가속되어 전반적인 유동의 흐름이 좌우 비대칭인 것을 알 수 있다.

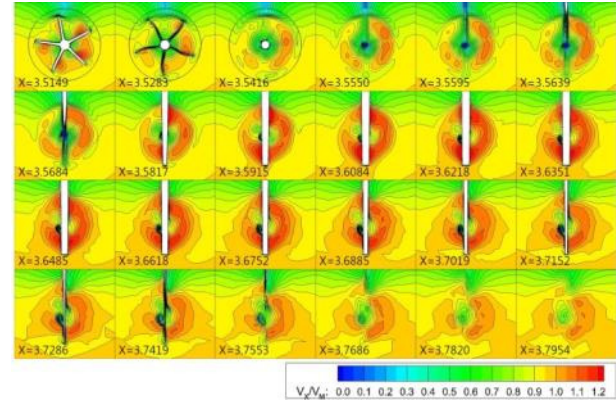


Fig. 6 Contours of axial velocity from propeller plane to rudder behind plane

프로펠러와 혼 타의 중간 지점(control line)에서 축방향 속도와 유동 유입 각도를 Fig. 7에 도시하였다. 그래프에서 V_x , R_p 는 축방향 속도, 프로펠러 반지름이다. 유동은 프로펠러의 회전에 의하여 프로펠러 중심을 기준으로 상부(upper side)와 하부(lower side)의 유입 방향이 반대인 것을 확인하였다. 축방향 속도는 프로펠러의 주요 효과 지점인 $z_p=0.5R_p \sim 0.7R_p$ 에서 가장 크게 나타난다. 유동은 상부에서 상대적으로 일정한 크기로 유입되며 하부는 프로펠러 중심으로부터 멀어질수록 유입 각도가 줄어드는 것을 알 수 있다.

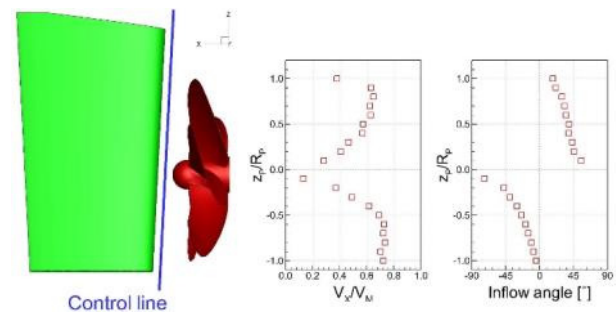


Fig. 7 Velocity and inflow angle of horn-type rudder

Fig. 8은 혼 타 표면의 압력분포와 유선(streamline)을 나타낸 그림이다.

$z_p=0.7R_p$ 와 $0.7R_p$ 에서 타 단면 표면의 압력 분포를 Fig. 9에 도시하였다. c(chord line)는 시위선(혹은 단면 길이)이며 c_p 는 압력계수로 아래 식 (8)로 구할 수 있다.

$$c_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho_M V_M^2} \quad (8)$$

여기서 p 는 타 표면의 정압, p_0 는 대기압이다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 프로펠러의 회전에 의해 타 상·하부에 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)이 좌현과 우현에서 반대로 나타난다. 두 그림의 타 표면 압력 차이를 통하여 타에 양력이 발생함을 알 수 있다.

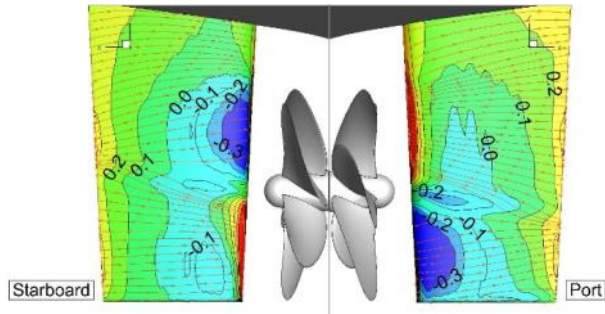
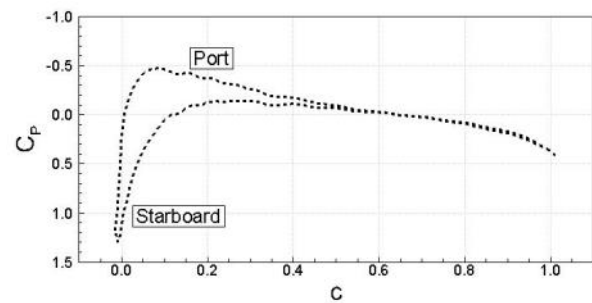
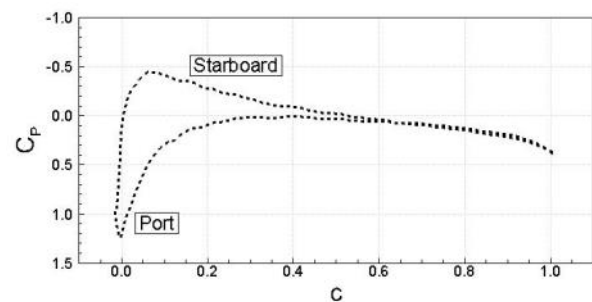


Fig. 8 Pressure contour and streamlines on the surface of rudder



(a) Pressure coefficient along $z_p = -0.7R_p$



(b) Pressure coefficient along $z_p = 0.7R_p$

Fig. 9 Pressure distribution of horn-type rudder

5.2 비대칭 타 시스템 설계

비대칭 타 시스템에서 타의 형상은 불필요한 저항을 줄여 추가적인 추력을 발생시키며 선박의 속도성능을 향상시킨다.

비대칭 타는 비대칭 후류를 개선하기 위해 유동의 유입 각도(inflow angle)를 고려하여 타의 받음각(flow angle of attack)을 줄여주는 방향으로 상·하부가 반대로 비틀린 형태이다. Fig. 10에 타의 상부와 하부 단면에서 유동 흐름과 각도의 정의를 나타내었다. 여기서 α , β , ϕ_{RU} , ϕ_{RL} 는 유입 각도, 타의 받음각, 타의 상부 비틀림 각도, 타의 하부 비틀림 각도이다. 유동 유입

각도가 상대적으로 일정한 상부는 일정한 크기의 비틀림 각도를 가지고, 프로펠러 중심으로부터 멀어질수록 유입 각도가 줄어드는 하부는 선형적으로 크기가 줄어드는 비틀림 각도를 가진다. 비틀림 시작점은 타의 최대 두께이며 비틀림 방향에 따라 각도는 Fig. 11과 같이 양의 부호와 음의 부호로 나타내었다.

비틀림 각도는 타의 받음각을 고려하여 결정하였다. 상·하부 비틀림 각도가 과도하게 증가한 경우 저항이 커지고 전달동력이 개선되지 않았다. 따라서 이후에는 프로펠러 주요 효과 지점의 타의 받음각을 고려하여 비틀림 각도를 결정하였다.



Fig. 10 Definitions of inflow angle, flow angle of attack and twisted angle

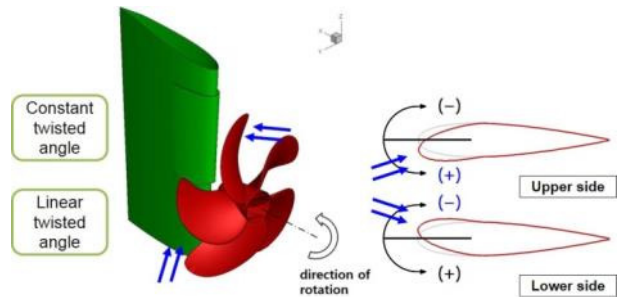


Fig. 11 Signature for twisted angle

타 벌브는 상부와 하부가 반대로 비틀림으로 인한 타의 불연속 지점을 이어주고 허브 보오텍스를 감소시킨다(Kim et al., 2014). 본 연구에서는 프로펠러 형상 변화를 고려하지 않았고 벌브의 길이는 타 최대 두께까지 일정하게 유지하였다. 또한 대상 선박의 프로펠러와 타 간격이 좁기 때문에 벌브와 프로펠러 캡 사이 간격은 고정하였다. 실제 변수인 벌브 직경은 프로펠러 허브 직경(D_{HUB})과의 비율로 크기를 결정하였다. 직경 비율 0.8 이하는 타의 불연속 형상을 모두 포함하지 못하므로 계산에서 제외하였다.

Fig. 12는 타 핀에 추력이 발생하는 기전(mechanism)을 도시한 그림이다. 여기서 V_t 는 프로펠러 중심축을 기준으로 한 접선방향 속도(tangential velocity)이다. 핀은 Fig. 12에 나타낸 바와 같이 좌현 핀의 흡입 면을 연직 상방으로, 우현 핀의 흡입 면을 연직 하방으로 배치하여 추가적인 추력을 발생시킨다. 핀 각도는 유동의 유입 각도를 고려하여 결정하였으며 Fig. 12에 나타낸 것과 같이 프로펠러 축 중심과 시위선이 이루는 각도로 정의하였다. 또한 좌현과 우현 핀의 방향이 반대이므로 양의 부호와 음의 부호로 표현하였다.

핀의 앞날(leading edge)을 타의 앞날 선에 맞추었으며 핀의 날개 단면은 NACA 66을 사용하였다. 코드 길이(또는 시위 길이)는 벌브 직경과 동일하게 하였다. 스펠 길이(또는 폭)는 Fig. 13와 같이 타의 중심에서 유체의 회전을 고려하여 좌현 핀은 프로펠러 반지름의 60%, 우현 핀은 프로펠러 반지름의 40%로 하였다.

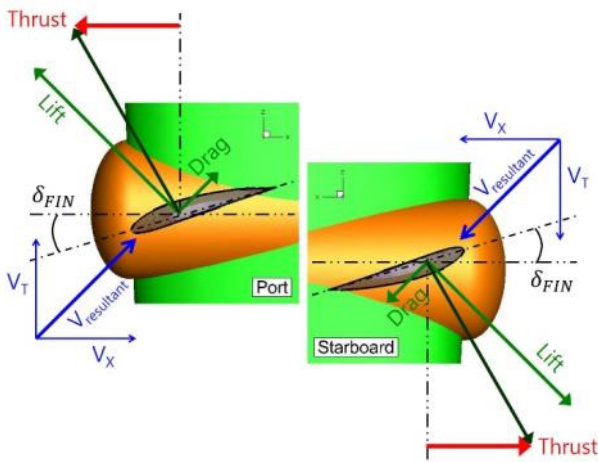


Fig. 12 Additional thrust generation of rudder fin

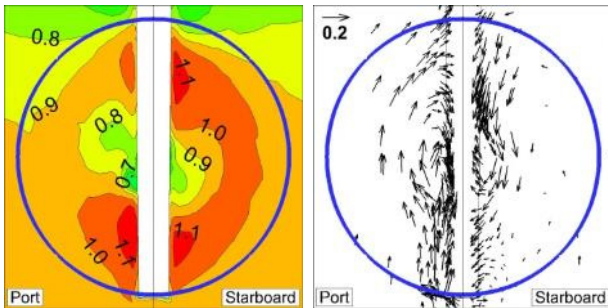


Fig. 13 Axial velocity contours and velocity vectors on the plane of rudder center

설계 변수를 순차적으로 바꾸어 최적의 설계 변수를 구하는 파라메트릭 설계를 수행하였으며 설계는 $\varnothing_R \rightarrow D_{RB} \rightarrow \delta_{FIN}$ 순서로 진행하였다. 수치해석 결과는 Table 3에 나타내었고 최적의 설계 변수들은 굵은 글씨로 표시하였다. 여기서 RR은 비대칭 타의 부착에 따른 전달동력 감소비를 백분율로 나타낸 것이며 다음과 같이 표현된다.

$$RR = \frac{PD_M^{Twisted} - PD_M^{Hom}}{PD_M^{Hom}} \times 100 [\%] \quad (9)$$

Table 3의 수치해석 결과에서 비대칭 타 시스템은 상부 비틀림 각도 5.2°, 하부 비틀림 각도 -5.0°, 벌브 직경과 프로펠러 허브 직경 비율 0.9(프로펠러 직경의 14% 크기) 그리고 핀 각도 $\pm 13.5^\circ$ 일 때를 최적 형상으로 결정하였다. 비대칭 타의 경우 혼 타 보다 회전수 감소(0.3%), 저항 감소(0.7%), 추력 감소(1.3%)와 토크 감소(0.9%)로 인하여 추력감소계수가 6.2% 감소하고 전달동력이 1.1% 감소하였다. 타 벌브를 부착한 비대칭 타의 경우 타 벌브를 부착하지 않은 비대칭 타 보다 저항 감소(0.5%)와 추력감소(0.9%)가 적어 추력감소계수가 4.5% 감소하나 토크 감소(1.2%)가 커서 전달동력이 1.6% 감소하였다. 타 핀과 벌브를 부착한 비대칭 타의 경우 타 벌브를 부착한 비대칭 타보다 저항감소(0.6%)와 추력감소(1.6%)가 있으나 추

력감소계수의 변화는 없고 회전수 감소(0.5%)와 토크 감소(1.6%)로 인하여 전달동력이 2.0% 감소하였다. 또한 타 핀과 벌브를 부착하였을 때 저항 및 프로펠러에서 발생하는 추력과 토크의 감소를 통하여 타 벌브를 부착한 경우보다 추가적인 추력이 발생하였음을 알 수 있다. 최종적으로 비대칭 타 시스템을 모두 부착하였을 때 기존 타와 비교하여 회전수, 저항, 토크가 줄어들어 추력감소계수가 4.7% 감소하고 전달동력이 2.0% 개선되었다.

Table 3 Results of the propulsion parameters during parametric design of the twisted rudder with bulb and fin

(a) Horn-type

| n_M [rps] | R_{VM}^{SP} [N] | T_M [N] | Q_M [N·m] | t | PD_M [W] | RR [%] |
|-------------|-------------------|-----------|-------------|-------|------------|--------|
| 8.400 | 82.63 | 44.58 | 1.992 | 0.179 | 105.14 | 0.0 |

(b) Twisted rudder

| \varnothing_{RU} [deg] | \varnothing_{RL} [deg] | n_M [rps] | R_{VM}^{SP} [N] | T_M [N] | Q_M [N·m] | t | PD_M [W] | RR [%] |
|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| 28.9 | -31.9 | 8.430 | 83.59 | 45.10 | 2.016 | 0.198 | 106.78 | 1.6 |
| 24.9 | -27.9 | 8.428 | 83.13 | 44.83 | 2.014 | 0.189 | 106.65 | 1.4 |
| 20.9 | -23.9 | 8.427 | 82.84 | 44.79 | 2.011 | 0.183 | 106.48 | 1.3 |
| 20.9 | -18.0 | 8.422 | 82.60 | 44.55 | 2.003 | 0.178 | 105.97 | 0.8 |
| 10.4 | -10.0 | 8.384 | 82.08 | 44.04 | 1.979 | 0.169 | 104.25 | -0.8 |
| 5.2 | -5.0 | 8.378 | 82.04 | 43.99 | 1.975 | 0.168 | 103.95 | -1.1 |
| 2.6 | -2.5 | 8.376 | 82.19 | 44.14 | 1.974 | 0.171 | 103.88 | -1.2 |
| 3.9 | -3.8 | 8.384 | 82.19 | 44.15 | 1.975 | 0.171 | 104.02 | -1.1 |
| 4.6 | -4.4 | 8.379 | 82.14 | 44.10 | 1.977 | 0.170 | 104.07 | -1.0 |
| 3.3 | -3.1 | 8.381 | 82.12 | 44.07 | 1.975 | 0.170 | 104.01 | -1.1 |

(c) Twisted rudder with bulb

| D_{RB}/D_{HUB} | n_M [rps] | R_{VM}^{SP} [N] | T_M [N] | Q_M [N·m] | t | PD_M [W] | RR [%] |
|------------------|--------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| 0.9 | 8.371 | 82.21 | 44.16 | 1.968 | 0.171 | 103.49 | -1.6 |
| 1.0 | 8.379 | 82.39 | 44.34 | 1.973 | 0.175 | 103.87 | -1.2 |
| 1.1 | 8.379 | 82.60 | 44.56 | 1.977 | 0.179 | 104.05 | -1.0 |
| 1.2 | 8.377 | 82.63 | 44.59 | 1.975 | 0.179 | 103.97 | -1.1 |
| 1.3 | 8.371 | 82.78 | 44.74 | 1.974 | 0.182 | 103.81 | -1.3 |
| 1.4 | 8.374 | 82.93 | 44.88 | 1.975 | 0.184 | 103.93 | -1.1 |

(d) Twisted rudder with bulb and fin

| n_M [rps] | δ_{FIN} [deg] | R_{VM}^{SP} [N] | T_M [N] | Q_M [N·m] | t | PD_M [W] | RR [%] |
|------------------------------|----------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| ± 11.5 | 8.361 | 82.17 | 44.12 | 1.963 | 0.170 | 103.11 | -1.9 |
| ± 12.5 | 8.362 | 82.16 | 44.12 | 1.963 | 0.170 | 103.15 | -1.9 |
| ± 13.5 | 8.362 | 82.17 | 44.13 | 1.961 | 0.171 | 103.04 | -2.0 |
| ± 14.5 | 8.364 | 82.13 | 44.09 | 1.964 | 0.170 | 103.23 | -1.8 |
| ± 15.5 | 8.365 | 82.26 | 44.21 | 1.967 | 0.172 | 103.36 | -1.7 |
| ± 16.5 | 8.361 | 82.34 | 44.30 | 1.965 | 0.174 | 103.25 | -1.8 |
| ± 17.5 | 8.367 | 82.22 | 44.17 | 1.968 | 0.171 | 103.45 | -1.6 |

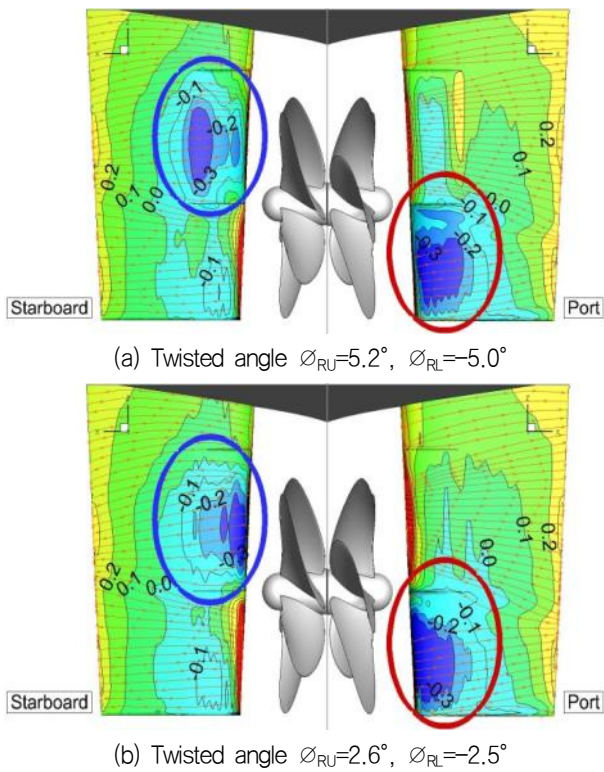


Fig. 14 Pressure contour and streamlines on the surface of twisted rudders

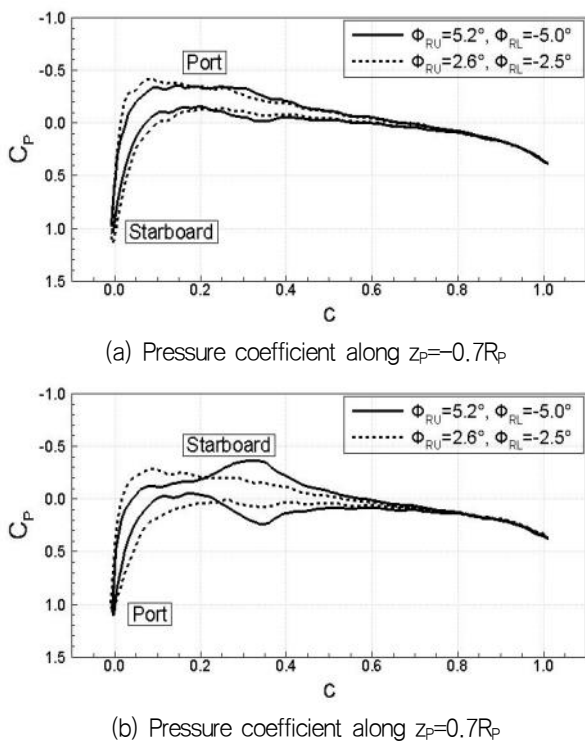


Fig. 15 Pressure distribution of twisted rudders

Fig. 14는 전달동력이 가장 낮은 순으로 뽑은 두 가지 비대칭 타에 대한 표면의 압력분포와 유선을 비교한 그림이다. Fig. 15는 두 비대칭 타의 $-0.7R_p$ 와 $0.7R_p$ 에서 타 단면 주변의 압력

분포이다. 실선은 상부 비틀림각 5.2° 와 하부 -5.0° 인 비대칭 타, 점선은 상부 2.6° 와 하부 -2.5° 의 비대칭 타를 나타낸다. 이 두 비대칭 타들의 압력분포는 Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 혼타의 압력 분포에 비해서 좌우현 측 압력 차가 더 작아졌음을 보여주며, 이는 비틀림 타의 단면이 유입류의 방향과 더 잘 맞춰진 것을 의미한다. 이 둘 중 상부 비틀림 각 상부 5.2° 와 하부 -5.0° 인 비대칭 타의 압력 분포가 좀 더 균일하고 타의 최대 두께 위치에서 최저 압력이 발생하므로 비대칭 타의 효과를 보다 더 효과적으로 활용하였다고 판단된다. 따라서 본 연구는 비대칭 타 설계 시 최적의 비틀림 각을 상부 5.2° , 하부 -5.0° 로 결정하였다.

Fig. 16는 혼 타와 각 변수의 최적형상 타들에 대한 유선을 비교하여 보여준다. 비대칭 타 시스템을 모두 부착한 상태(Fig. 16(d))에서 프로펠러와 타 사이의 허브 보오텍스가 줄어든 것을 확인하였다. 또한 타의 측면에서 유동은 꺾임이 줄어들고 부드럽게 흘러가는 것을 볼 수 있다.

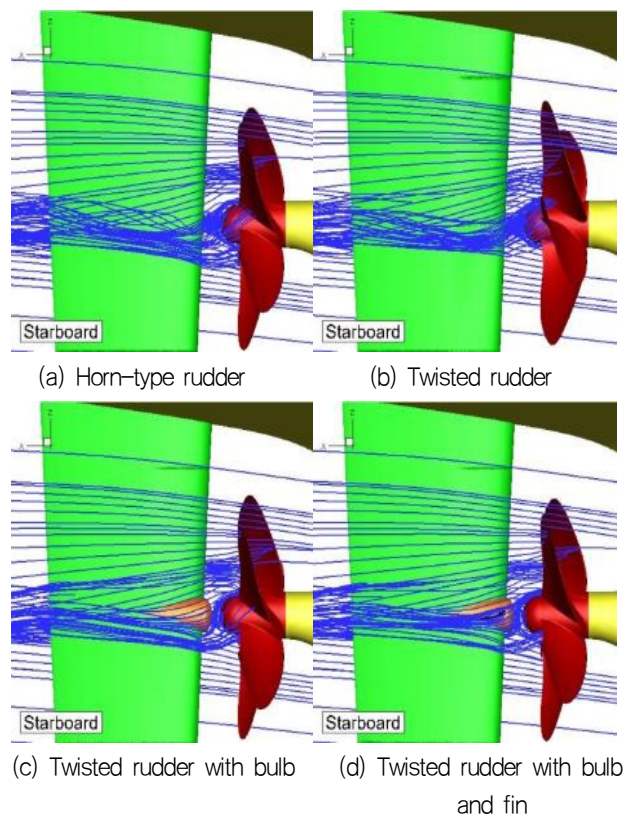


Fig. 16 Streamlines around rudders

Fig. 17은 프로펠러 후류, 특히 허브 보오텍스 유동의 회전이 감소한 것을 정량적으로 확인하기 위하여 단계 별 최적 형상에 대하여 축방향 와도(ω_x , axial vorticity) 분포를 나타낸 그림이다. 위치는 타의 뒷날(trailing edge)으로부터 0.015 m 떨어진 지점($x/L_{pp}=0.52$)이다. 비대칭 타 시스템을 모두 부착한 상태(Fig. 17(d))에서 회전류가 감소하여 허브 보오텍스 와도의 크기가 0에 가까운 것을 확인하였다.

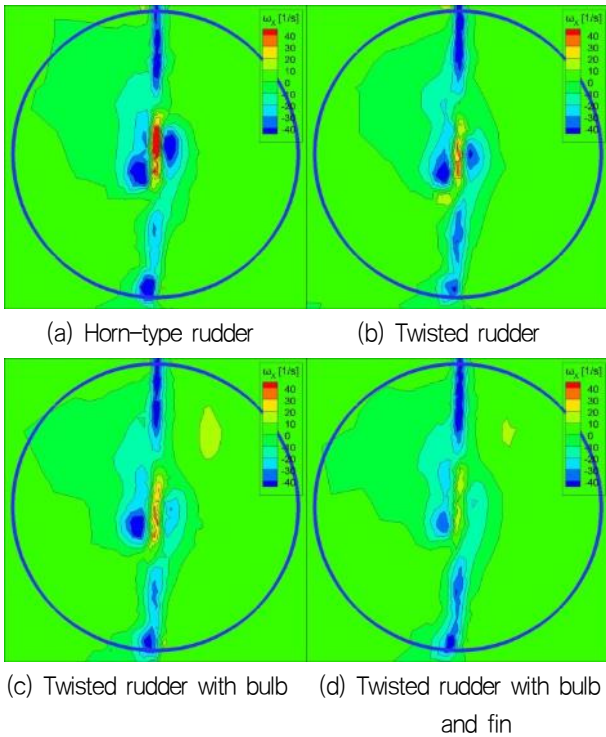


Fig. 17 Axial vorticity contours of various type of rudders at $x/LPP=0.52$

5.3 성능 평가

Table 3에 정리한 여러 가지 비틀림 타 중에서 최적의 타에 대한 선박의 저항 요소들과 전달동력을 ITTC-78 방법을 사용하여 구하여 Table 4에 비교하였다. 형상계수(1+k)는 식 (3)을 이용하여 나선(bare hull)에 대해 구하였다. 따라서 타 형상 변화에 따른 유효동력(effective power)의 변화는 없다. 본 대상선의 경우, $1+k=1.145$, PE(effective power, 유효동력)은 14,449 kW이다. 여기서 w_{TS} , η_H , η_R , η_O , η_D , PD는 유효반류비(effective wake fraction), 선체효율(hull efficiency), 상대회전 효율(relative rotative efficiency), 프로펠러 단독효율(propeller open water efficiency), 준추진효율(propulsive efficiency), 전달동력을 나타낸다. 괄호 안의 숫자는 혼 타를 부착한 선박에 대한 증감 백분율을 나타낸다. 타의 비틀림에 기인한 반류비 감

소는 2.3%인 반면 추력감소계수 감소는 6.1%로 선체효율이 0.5% 증가하고 준추진효율이 0.6% 증가하여 전달동력이 0.6% 감소하였다. 타 벌브의 효과로 인하여 추력감소계수가 4.5% 감소하고 반류비가 1.2% 감소하여 선체효율이 0.5% 증가하였다. 또한 상대회전효율이 0.3% 증가하여 준추진효율이 1.0% 증가하여 전달동력이 1.0% 감소하였다. 상대회전효율은 프로펠러 토오크와 관련된 저항요소로 Fig. 16과 17에서 보는 바와 같이 대체로 프로펠러 후류의 와도가 약할수록 증가함을 알 수 있다. 타 핀의 효과는 추력감소 계수를 제외한 모든 저항 요소에 나타나며 타 벌브에 기인한 효율개선 효과를 고르게 증대시킨다. 결과적으로 비대칭 타 시스템을 모두 부착한 최적 타에 의해서 준추진효율이 1.4% 증가하여 전달동력이 1.4% 감소하였다.

6. 결론

본 연구는 중형 컨테이너선인 KCS의 유체역학적 특성을 고려하여 비대칭 타 시스템을 수치해석 결과를 이용하여 개발하였다. 수치계산은 설계속도에서 예인과 저항 조건에서 수행하였다. 설계 변수는 타의 비틀림 각도, 벌브 직경 그리고 핀 각도이며 목적 함수는 저항점에서의 최소 전달동력이다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 비대칭 타의 형상은 유동의 유입 각도를 고려하여 결정하여야 한다. 비틀림 각도가 너무 크면 저항이 과도하게 증가하고 선박의 추진성능이 향상되지 않으므로 이를 주의하여야 한다.
- 2) 비대칭 타는 추가적인 추력을 발생시켜 추력감소계수가 감소하여 선체효율을 증가시킨다.
- 3) 타 벌브 직경은 비대칭 타의 상·하부 비틀림 방향에 의한 불연속적인 형상을 모두 포함하는 크기로 하여야 한다.
- 4) 타 벌브는 프로펠러 허브 보호텍스를 감소시키고 유속 분포를 균일하게 하여 상대회전효율을 증가시키고, 유효반류비를 증가시켜 선체효율을 증가시킨다.
- 5) 핀 각도는 타 주위 유동이 부드럽게 흘러가도록 결정하여야 한다.
- 6) 타 벌브에 부착된 핀은 타 벌브의 성능 향상 현상과 유사하고 그 효과를 증가시킨다.
- 7) 향후 실험을 통하여 수치해석 결과를 검증 할 필요가 있다.

Table 4 Self-propulsion factors and delivered power of a ship for horn-type and twisted rudders

| Rudder | t | w_{TS} | η_H | η_R | η_O | η_D | PD (kW) |
|-------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|---------------|
| Horn-type | 0.179(0.0%) | 0.259(0.0%) | 1.108(0.0%) | 1.002(0.0%) | 0.710(0.0%) | 0.788(0.0%) | 18,324(0.0%) |
| Twisted | 0.168(-6.1%) | 0.253(-2.3%) | 1.113(0.5%) | 1.000(-0.2%) | 0.712(0.3%) | 0.793(0.6%) | 18,219(-0.6%) |
| Twisted w/ bulb | 0.171(-4.5%) | 0.255(-1.2%) | 1.113(0.5%) | 1.006(0.4%) | 0.712(0.2%) | 0.797(1.0%) | 18,136(-1.0%) |
| Twisted w/ bulb and fin | 0.171(-4.5%) | 0.256(-1.2%) | 1.114(0.6%) | 1.008(0.6%) | 0.712(0.2%) | 0.799(1.4%) | 18,076(-1.4%) |

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- Choi, J.E., Kim, J.H., Lee, H.G. & Park, D.W., 2010. Hydrodynamic characteristics and speed performance of a full spade and a twisted rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.163–177.
- Choi, J.E., Min, K.S., Kim, J.H., Lee, S.B. & Seo, H.W., 2010. Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results. *Ocean Engineering*, 37, pp.549–566.
- Hai-long, S., Obwogi, E.O. & Yu-min, S., 2016. Scale effects for rudder bulb and rudder thrust fin on propulsive efficiency based on computational fluid dynamics. *Ocean Engineering*, 17, pp.199–209.
- Hino, T. (ed.), 2005. *Proceedings of CFD Workshop Tokyo 2005*, Tokyo, Japan, 9–11, March, 2005.
- International Maritime Organization, 2014. *Third IMO greenhouse gas study 2014*. IMO: Micropress Printers, Suffolk, UK
- 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.
- Kim, J.H., Choi, J.E., Choi, B.J. & Chung, S.H., 2014. Twisted rudder for reducing fuel-oil consumption. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6, pp.715–722.
- Kim, J.H., Choi, J.E., Choi, B.J., Chung, S.H. & Seo, H.W., 2015. Development of energy-saving devices for a rull slow-speed ship through improving propulsion performance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7, pp.390–398.
- Lee, W.J., Kim, M.C., Moon, W.J. & Kang, H.J., 2012. Study on comparison performance of various full-spade rudder for a container ship (KCS). *The 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics-APHydro2012*, Johor, Malaysia, 3–4 September 2012.
- 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*, 50(3), pp.145–152.
- Wu, P.C., Tho, T.Q., Aoyagi, K. & Koike, K., 2016. The EFD and CFD study of the bulbous rudder with asymmetric horizontal fins with different angles of attack in ship and propeller wake field of KVLCC2 tanker. *The 8th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics-APHydro2016*, Hanoi, Vietnam, 20–23 September 2016.

