



CFD를 이용한 비틀림 방향타 날개 끝 캐비테이션 성능 개선 연구

박일룡^{1,†} · 김제인² · 백부근³ · 안종우³
동의대학교 조선해양공학과¹
동의대학교 조선해양유체성능평가 연구소²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소³

Numerical Study on the Improvement of the Tip Cavitation Performance of a Twisted Rudder Using CFD

Il-Ryong Park^{1,†} · Je-In Kim² · Bu-Geun Paik³ · Jong-Woo Ahn³
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dong-Eui University¹
Marine hydrodynamic performance Research Center, Dong-Eui University²
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering³

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 paper presents the geometry modifications in rudder tip and the results of numerical simulations to improve the low speed cavitation inception performance of a twisted rudder developed by KRISO. First, to validate the RANS-based CFD method used to analyse rudder performances, the numerical results were compared with the experimental data for a flat rudder obtained from KRISO LCT tests. The present numerical results showed good agreement with the measured rudder forces, cavitation occurrence and rudder surface pressures. The KRISO twisted rudder was superior to the flat rudder in cavitation performance over the entire angle of attack at high speed condition. However, the cavitation inception angle at low speeds was lower than that of the conventional flat rudder. Two improved tip geometries were designed and the numerical analysis showed that the cavitation inception angle was improved for both modified rudders.

Keywords : Twisted rudder(비틀림 방향타), Flat rudder(평판 방향타), Cavitation performance(캐비테이션 성능), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학), Tip cavitation(날개 끝 캐비테이션)

1. 서론

선박의 추진기와 함께 방향타에서 발생하는 캐비테이션(cavitation)이 수중방사소음과 선체 진동의 주요 원인이 될 수 있으며, 심각한 타 표면 침식을 유발하는 것으로 알려져 있다. 방향타 캐비테이션에 관련된 연구를 살펴보면 다음과 같다. 혼타(horn-type rudder) 표면의 입력과 캐비테이션 예측을 위한 포텐셜유동 기반의 수치해석 방법 연구가 Han et al. (2001)에 의해 수행된 바 있다. Song et al. (2004)은 혼타 간극에서의 캐비테이션 현상을 점성유동 해석법인 CFD(computational fluid dynamics) 기법을 사용하여 분석하였다. Kim et al. (2006)은 포텐셜유동 해석법으로 초대형 컨테이너선의 방향타 캐비테이션을 예측하고 모형시험을 통해 검증한 바 있다. Paik et al. (2006)은

혼타의 간극 유동 캐비테이션을 모형시험을 통해 분석하였으며, 이후 Paik et al. (2008)은 캐비테이션 발생의 중요 원인인 혼타 간극 유동 가시화에 대한 연구를 수행하였다. Park and Lee (2010)는 혼타에서 발생하는 캐비테이션 감소를 위한 방향타 형상 변화에 관한 연구를 수행하였다. CFD를 이용한 프로펠러와 방향타의 상호작용 유동 해석을 통한 타 캐비테이션 성능 분석 연구가 Choi et al. (2010)에 의해 수행되었다. Paik et al. (2012)은 PIV(particle image velocimetry)를 사용한 모형시험을 통해 혼타 가동부 캐비테이션 발생에 관련된 연구를 수행하였다. Ahn et al. (2012)은 전가동 방향타(full spade rudder)에서 발생하는 캐비테이션에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

Shen et al. (1997)은 미 해군 함정을 대상으로 평판 방향타의 유입각 분포를 측정하고 이를 각 스펠(span) 위치의 타 단면들의

비틀림 각으로 적용하여 비틀림 방향타를 개발하였다. 이때, 비틀림 방향타의 타력의 변화 및 캐비테이션 성능을 이론 및 실험적 방법으로 검증한 바 있다. Ahn et al. (2021)은 기존 함정의 평판타 성능 개선을 목적으로 개발된 비틀림 방향타의 타력과 캐비테이션 성능을 대형캐비테이션터널(LCT) 성능시험을 통해 분석하였다. Paik et al. (2022)은 LCT에 적용한 3차원 PIV를 이용하여 방향타 유입각을 계측하고 이를 이용한 비틀림 방향타 설계법을 연구하였다. 이어서, 캐비테이션 성능시험을 통해 개발된 비틀림 방향타의 우수성을 검증한 바 있다.

본 논문에서는 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 개발 중인 비틀림 방향타의 캐비테이션 성능 개선을 위한 수치해석 연구 결과를 소개하고 있다. 전 타각에 걸쳐 비틀림 방향타의 캐비테이션 성능은 평판 방향타보다 우수한 것으로 판명되고 있다 (Shen et al., 1997; Ahn et al., 2021). 다만, 저속 운항 구간에서 기존 평판 방향타 대비 비틀림 방향타의 캐비테이션 초생(inception) 성능 검증과 개선 연구에 대한 필요성이 검토되었다. 본 연구에서는 방향타 캐비테이션 해석을 위해 RANS(Reynolds averaged Navier–Stokes)방정식 기반의 CFD 해석법을 사용하였으며, 함정 선체–프로펠러–방향타의 상호작용 유동을 해석하였다. 먼저, CFD를 이용한 수치해석 결과의 검증을 위해 KRISO의 LCT에서 수행된 평판 방향타의 성능시험 결과와 비교하여 소개하였다. 이후, 본 논문에서는 KRISO 비틀림 방향타의 저속 캐비테이션 성능 해석과 함께 날개 끝 형상 변화를 통한 캐비테이션 초생 성능을 개선한 결과를 보여준다.

2. 수치해석 방법

프로펠러와 방향타를 포함한 선체 주위 유동은 비압축성 난류 유동(incompressible turbulent flow)으로 가정하였다. 유동의 지배방정식으로 연속방정식(continuity equation)과 RANS(Reynolds averaged Navier–Stokes) 방정식을 사용하였으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (2)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도(density), \bar{u}_i 는 시간 평균된 유속(fluid velocity) 성분, x_i 는 공간좌표계, \bar{p} 는 시간 평균된 압력(pressure), μ 는 동점성 계수(dynamic viscosity) 그리고 $\overline{\rho u_i u_j}$ 는 Reynolds 응력 성분을 나타낸다.

지배방정식의 해를 구하기 위해 유한체적법(finite volume method) 수치 이산화법이 사용되었다. 여기서, 지배방정식의 Reynolds응력항은 Realizable $k-\varepsilon$ 난류모형과 벽함수(wall

function)기법으로 해석하였다. 방향타에 발생하는 캐비테이션은 Rayleigh–Plesset방정식을 기반의 Sauer (2000) 모델을 사용하여 해석하였다. 본 논문은 상기 수치해석 수행을 위해 범용 프로그램인 STAR-CCM+ (Siemens, 2018)을 사용하였다.

3. 평판 방향타 성능 수치해석 결과검증

길이 7.067m의 쌍축 추진의 대상선 모형과 NACA단면의 평판 방향타(FR, flat rudder)에 대한 정보는 Table 1에서 볼 수 있다. 방향타의 타력과 표면 압력 계측 그리고 캐비테이션 성능 시험은 KRISO LCT(12.5m×2.4m×1.8m)에서 수행되었다. Table 2는 대상 선박의 주요 선속에서 추정된 실선 자항점에서의 추력계수(thrust coefficient, K_T)와 캐비테이션수(cavitation number, σ_n) 정보를 보여주고 있다. 수치해석은 주어진 선속에서 상기 조건들을 만족시켜 수행되었다. 다음은 추력계수와 캐비테이션수 정의를 나타내며, 이후, 타력 비교에서 나타나는 항력계수(drag coefficient, C_D)와 양력계수(lift coefficient, C_L)와 압력계수(pressure coefficient, C_p)에 대한 정의이다.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D_p^4} \quad (3)$$

$$\sigma_n = \frac{p_T - p_v}{\frac{1}{2} \rho n^2 D_p^2} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \quad (6)$$

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (7)$$

여기서, T 는 추력, p_T 는 캐비테이션터널 압력, p_v 는 증기압(vapour pressure), n 은 프로펠러 회전수, D_p 는 프로펠러 직경, U 는 유속, D 는 항력, L 은 양력, S 는 타의 면적, p 는 압력 그리고 p_∞ 는 교란되지 않은 유동장 상류 압력이다.

Table 1 Principal dimensions of the ship, propeller and rudder models

Ship	Length between perpendiculars	7.067m
	Breath	0.933m
	Draft	0.269m
Propeller	Propeller Diameter	0.28m
	Number of blades	5
	Rotation Direction	Outward
Rudder	Root chord length	0.1967m
	Tip chord length	0.0887m
	Span length	0.2147m

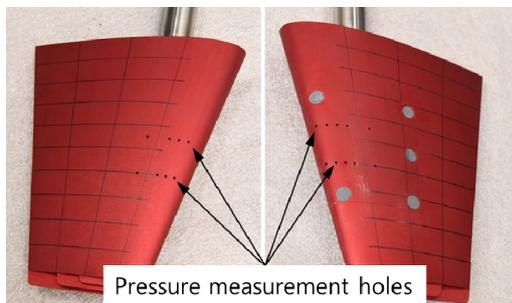
모형시험 방법에 관련된 정보는 Ahn et al. (2021)의 논문에서 얻을 수 있다. Fig. 1(a)는 모형시험을 위해 LCT에 설치된 선체의 모습을 보여주고 있으며, Fig. 1(b)는 평판 방향타의 모습과 방향타 표면 압력 계측 위치를 보여주고 있다.

Table 2 Thrust coefficients and cavitation numbers for given ship speeds

Ship speed (knots)	Thrust coefficient	Cavitation number
15	0.1320	6.3761
18	0.1408	4.2812
22	0.1474	2.7934
30	0.1678	1.2443



(a) stern view



(b) flat rudder with pressure measurement points

Fig. 1 Experimental setup in LCT

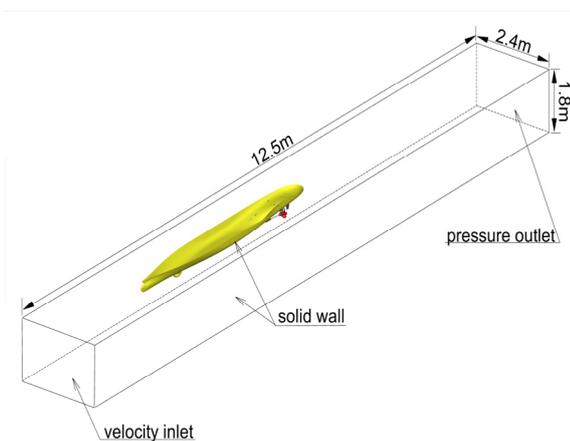


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

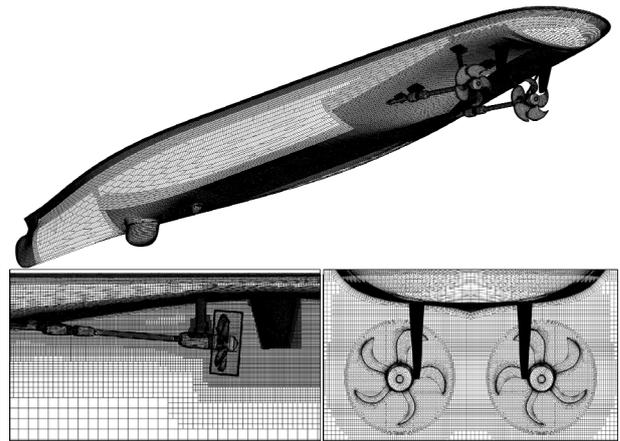
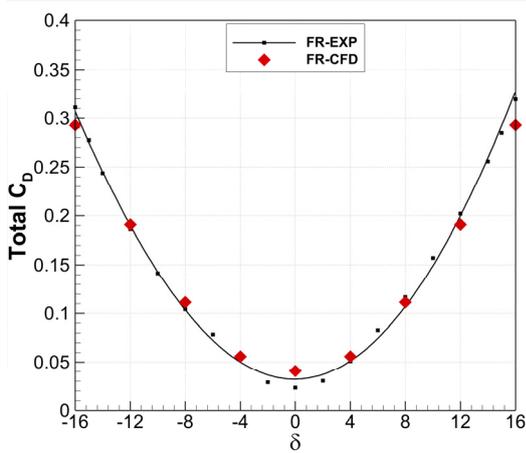


Fig. 3 Numerical grid distributions around the full appended ship model

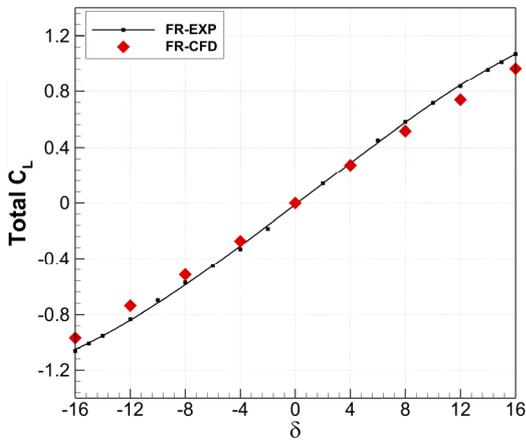
Fig. 2는 수치해석에서 모형선을 포함한 LCT를 모사한 계산영역과 경계조건을 설명하고 있다. 캐비테이션 터널의 상류 경계면은 유속 유입(velocity inlet) 조건, 하류 경계면은 압력 유출(pressure outlet) 조건 그리고 터널의 벽면과 선체 표면은 고체면(solid wall) 조건을 적용하였다. 여기서, 프로펠러의 회전 효과는 직접해석법인 sliding mesh법을 이용하여 구현하였다. Fig. 3은 선미 선체, 부가물, 프로펠러 그리고 방향타 주위 수치 격자 분포를 보여주고 있다. 수치해석에 사용된 총 격자수는 약 11.0M(백만)개로 프로펠러의 회전 영역은 약 4.0M개, 그 외 고정 영역은 7.0M개의 격자수를 사용하였다. 프로펠러의 회전 영역은 다면체(polyhedron) 격자 요소가 사용되고, 나머지 영역은 육면체(hexahedron) 격자 요소가 사용되었다. 경계층 영역 벽면의 무차원 격자 거리 y^+ 는 선체에서 약 70의 값을 가지고, 프로펠러는 약 40 그리고 타는 약 30의 값을 가지도록 하였다. 캐비테이션 터널 격자의 경우, 이보다 큰 약 150의 y^+ 값을 갖도록 하였다.

Fig. 4는 모형시험에 계측한 좌현과 우현 방향타의 항력계수(drag coefficient)와 양력계수(lift coefficient)를 수치해석 결과와 각각 비교하고 있다. 타력 계측은 최대 선속 30knots 조건을 대상으로 하여 캐비테이션 터널 유속 9m/s에서 계측되었으며, 타 캐비테이션의 영향이 고려되었다. 수치해석 결과는 모든 타각 조건에서 만족스러운 일치성을 보여주고 있다. 다만, 캐비테이션 발생량이 증가하기 시작하는 타각(δ) -8° 이후 계측 결과와의 차이가 상대적으로 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 높은 타각에서 비정상(unsteady) 특성이 강한 구름 캐비테이션(cloud cavitation)이 발생하지만, 시간 평균적 특성을 가진 RANS 해석의 캐비테이션 차이 때문에 타력에 영향을 준 것으로 볼 수 있다. 체적분률(volume fraction) 0.2의 등가면(iso-surface)으로 표현된 수치해석 결과는 부피가 가장 큰 시점에서 모형시험의 임의의 시간 캐비테이션 관찰 결과와 비교하고 있으며, 정성적인 측면에서 방향타에서 발생하는 캐비테이션의 특성을 비교적 타당하게 잘 보여주고 있다.

Fig. 6은 선속 18knots와 타각 -16° 조건에서 계측한 평판 방향타 표면의 압력 계수를 수치해석 결과와 비교하고 있다. 압력



(a) total drag coefficient



(b) total lift coefficient

Fig. 4 Rudder forces of the flat rudder



(a) $\delta = 0^\circ$

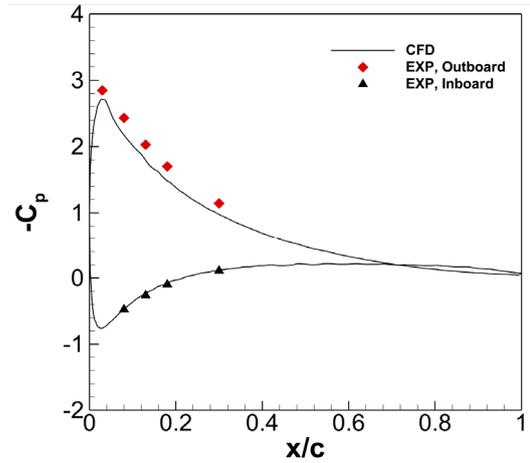


(b) $\delta = -8^\circ$

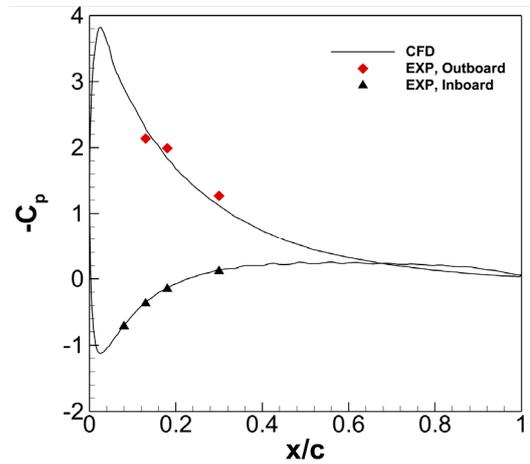


(c) $\delta = -16^\circ$

Fig. 5 Cavitation occurrence on the flat rudder



(a) $z/s = 0.45$



(b) $z/s = 0.6$

Fig. 6 Pressure coefficient distribution on the flat rudder

계측 위치는 방향타 스패ん길이(s)로 무차원화한 높이 방향(z) 0.45와 0.6의 두 위치이다. 압력 계측 시험은 캐비테이션이 없는 상태에서 타 표면 압력 분포 변화 관찰을 목적으로 하며, 수치해석은 캐비테이션 발생이 없는 조건에서 수행되었다. 그러나, 본 속도 조건의 타각에서 방향타의 전연(leading edge) 부근에 약간의 간헐적 캐비테이션이 발생하는 것이 관찰되었다. 캐비테이션 기포의 영향을 받는 $z/s=0.6$ 의 전연 근처 세 압력센서 위치에서 측정된 모형시험 압력 값의 불확실성이 크다는 것이 확인되어, 해당 값들은 비교에서 제외하였다. 본 연구의 수치해석 결과는 계측된 압력 분포와 좋은 일치를 보여주고 있으며, 이는 선체-부가물-추진기-방향타 간의 상호작용 유동을 수치해석에서도 타당하게 예측한 것을 말해준다.

4. KRISO 비틀림 방향타 성능 해석

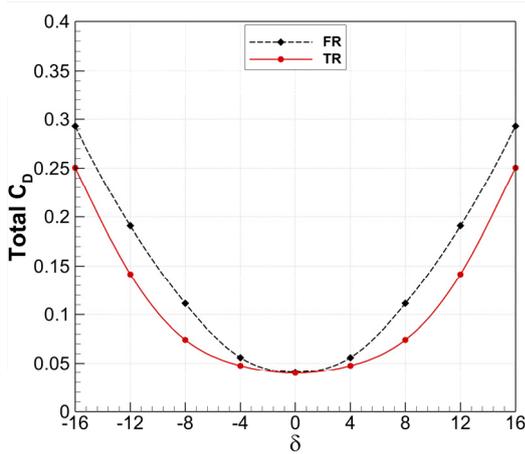
KRISO는 기존 평판 방향타의 성능 개선을 위해 비틀림 방향타(Twisted Rudder, TR)를 설계하였다. 주로 고속에서 캐비테이션

성능 개선을 목표로 평판 방향타에 유입되는 유동 각도를 반영하여 Fig. 7에서 볼 수 있는 비틀림 방향타를 개발하였다. 비틀림 방향타 생성에 대한 자세한 내용은 Paik et al. (2022)의 논문을 참조할 수 있다.

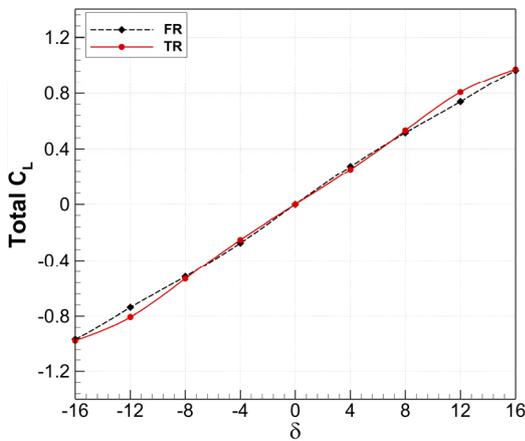
Fig. 8은 고속 선속 30knots 조건 좌현과 우현의 KRISO 비틀림 방향타 전체가 가지는 항력과 양력에 대해 기존 평판 방향타의



Fig. 7 KRISO twisted rudder



(a) total drag coefficient



(b) total lift coefficient

Fig. 8 Rudder force coefficients of the flat and twisted rudders

값과 각각 비교하고 있다. KRISO 비틀림 방향타의 경우 전 타각에서 항력이 평판 방향타보다 감소하는 특징을 가지고 있다. 높은 타각에서 약간 비선형적 특징을 가지나, 비틀림 방향타의 양력계수는 평판 방향타와 유사한 성능을 보여주고 있다.

Fig. 9는 선속 30knots와 타각 0°, -4°, -8°, -12° 그리고 -16° 조건에서 해석한 방향타 캐비테이션 결과를 비교하고 있다.

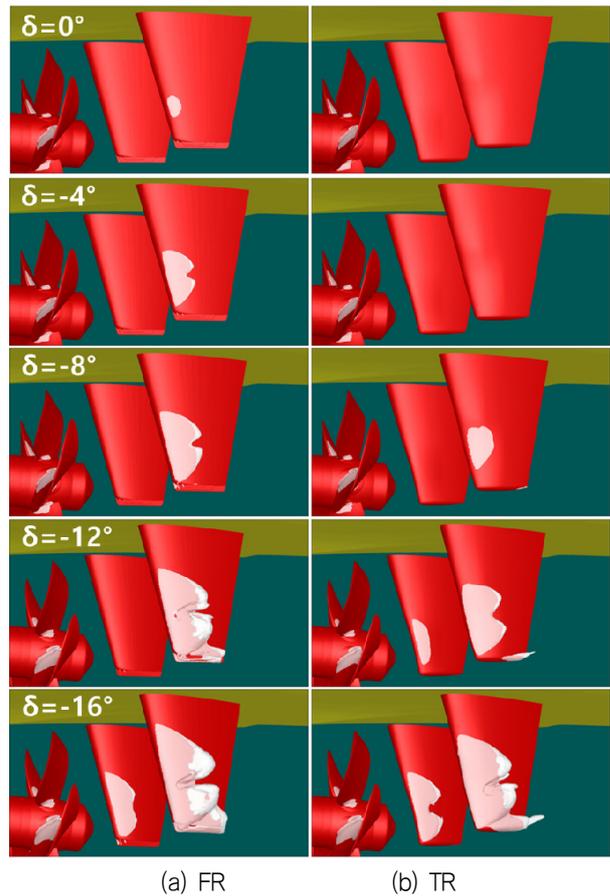


Fig. 9 Cavitation occurrences on the flat and twisted rudders

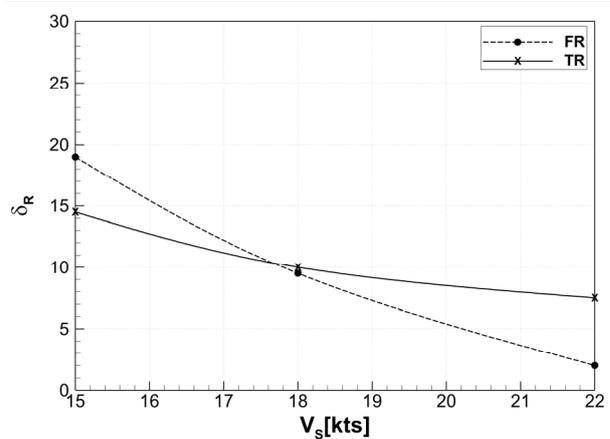


Fig. 10 Cavitation inception rudder angles of the flat and twisted rudders

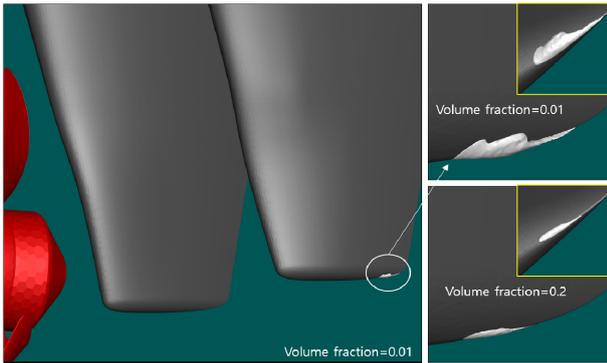


Fig. 11 Cavitation occurrence on the twisted rudder at a speed of 15 knots

KRISO 비틀림 방향타의 경우 타각 -8° 까지 캐비테이션 발생량이 많이 감소하였다. 타각 -12° 조건에서 비틀림타의 우현 안쪽면에서 캐비테이션이 먼저 발생하는 특징을 볼 수 있다. 그러나 좌현과 우현 방향타 전체 캐비테이션 발생량을 부피로 비교했을 때 평판 방향타보다 약 66.7% 감소하였다. 여기서, 캐비테이션 부피 계산은 체적분률 0.2 조건에서 수행되었다. 타각 -16° 조건에서는 평판 및 비틀림 방향타 모두 많은 캐비테이션이 발생하고 있지만, 비틀림 방향타의 캐비테이션 발생량이 평판 방향타보다 약 36.2% 감소하였다.

Fig. 10은 15, 18 그리고 22 knots 선속에서 방향타의 캐비테이션 초생 각도를 비교하고 있다. 앞서 KRISO 비틀림 방향타의 타력과 캐비테이션 성능이 평판 방향타보다 우수한 결과를 확인하였으나, 그림의 결과와 같이 낮은 선속에서 캐비테이션 초생 속도 성능이 기존 평판 방향타보다 낮았다. Fig. 11은 선속 15 knots에서 타각 -19° 에서 비틀림 방향타에 발생한 캐비테이션 모습을 나타내고 있다. 이 타각은 15 knots 선속에서 기존 평판 방향타의 캐비테이션 초생 각도이며, 체적분률 0.2와 0.01에서 각각 캐비테이션 형상을 보여주고 있다. 본 수치해석에서는 타각 0.5° 간격으로 캐비테이션 초생 관찰 해석을 수행하였다. 이때, 초생 조건에서 타에서 발생하는 캐비테이션의 부피는 매우 작으므로, 작은 체적분률 0.01로 관찰하여 캐비테이션 발생 유무를 결정하였다. 15 knots 속도에서 KRISO 비틀림 방향타의 캐비테이션 초생각도는 평판 방향타 -19° 보다 낮은 -14.5° 였다. 그림과 같이 낮은 선속에서 방향타의 캐비테이션 초생은 날개 끝(tip)에서 발생하는 캐비테이션과 관련 있으며, 본 연구에서 비틀림 방향타의 전체적인 성능은 유지하며, 낮은 선속에서 캐비테이션 초생 성능 개선을 위해 날개 끝 형상 변화를 수행하였다.

5. 방향타 날개 끝 형상 개선

Fig. 12(a)와 같이 개발된 비틀림 방향타의 날개 끝은 평면부가 없이 전연에서 후연(trailing edge)까지 라운드(round) 처리하고 후연쪽 날개의 끝은 좁으며 약간 위쪽 방향(z방향)으로 부드럽게 둘러진 형상을 가지고 있다. 다양한 형상 개선 시도를 통해 두 가지 형상 개선 안을 얻을 수 있었으며 형상의 특징은 다음과 같다.

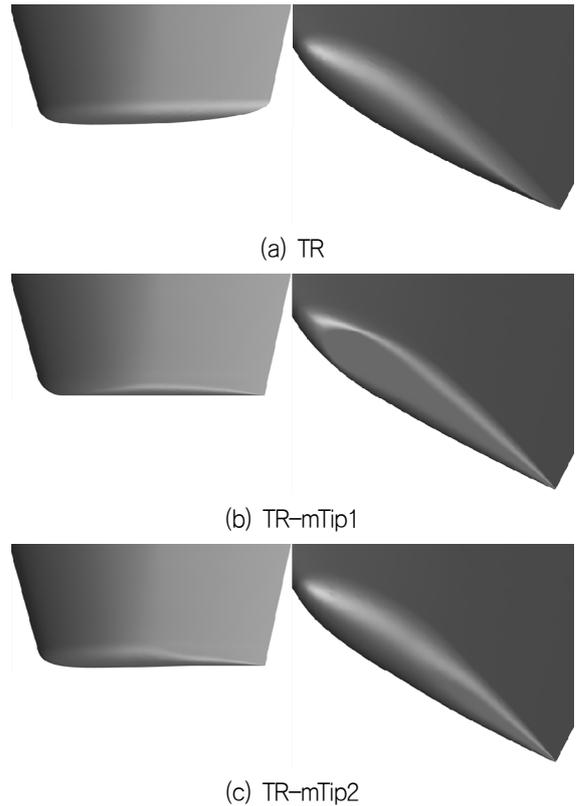


Fig. 12 Rudder tip shapes

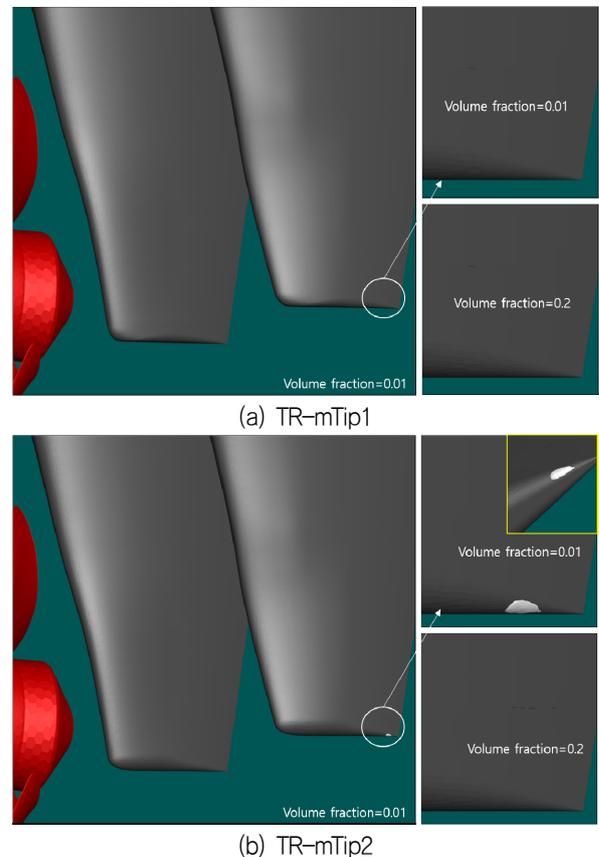


Fig. 13 Cavitation occurrences on the modified twisted rudders at a speed of 15 knots

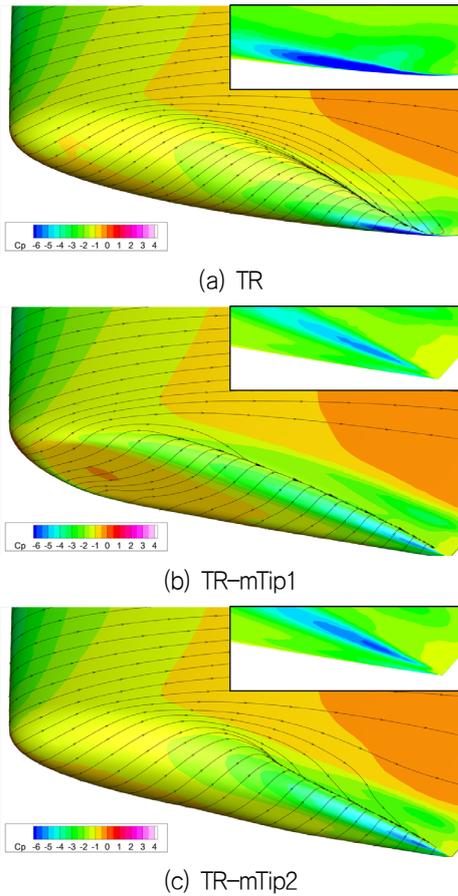


Fig. 14 Pressure coefficients and limiting streamlines on the three twisted rudders

첫 번째 개선 형상(이후, TR-mTip1)은 Fig. 12(b)와 같이 방향타 날개 끝을 전연에서 후연까지 평면 형태로 가져가고 모서리 부분은 작은 반경으로 라운드 처리하였다. 후연이 들린 형태에서 전연과 같은 높이로 낮추었으며, 날개 끝 후연 영역에서 발생하는 캐비테이션 초생을 감소시키고자 하였다. Fig. 12(c)의 두 번째 개선 형상(이후, TR-mTip2)은 방향타 날개 끝 전연에서 코드 길이 중간까지는 본래 비틀림타 방향타의 날개 끝 형상을 가지도록 하고, 이후 후연까지는 첫 번째 개선 형상의 평편부와 부드럽게 이어지도록 하였다. 이는 방향타 날개 끝 전연과 후연에서 발생하는 캐비테이션 모두를 감소시키려는 목적으로 제안되었다. 한편, z방향으로 약간 들린 후연의 날개 끝을 내림으로 인해 두 형상 개선 타들은 TR 방향타 대비 타의 면적이 약간 증가하였다.

Fig. 13은 15knots 선속에서 기존 평판 방향타의 캐비테이션 초생 타각 -19° 조건에서 계산한 두 가지 개선 형상에서 발생하는 캐비테이션을 비교하고 있다. 두 가지 개선 형상 모두 체적분률 0.2의 값에서 캐비테이션이 보이지 않았지만, TR-mTip2는 체적분률 0.01에서 캐비테이션이 발견되므로 이 각도를 초생 타각으로 결정되었다.

Fig. 14는 비틀림 방향타 날개 끝 영역에서 표면 압력분포와 한계유선(limiting streamlines)을 비교하고 있다. 대체로 형상 개선 전 방향타의 경우 날개 끝 유동이 전연에서 후연까지 매우 부드럽게 흘러가도록 설계되었으나, 후연에 가까운 날개 끝 영역에서 유속이 빨라지면서 압력이 다른 두 방향타보다 낮은 것을 볼 수 있다. TR-mTip1은 날개 끝 평편부에서 압력이 높고 작은 반경의 라운드 처리한 가장자리로 유동이 넘어가면서 압력이 다소

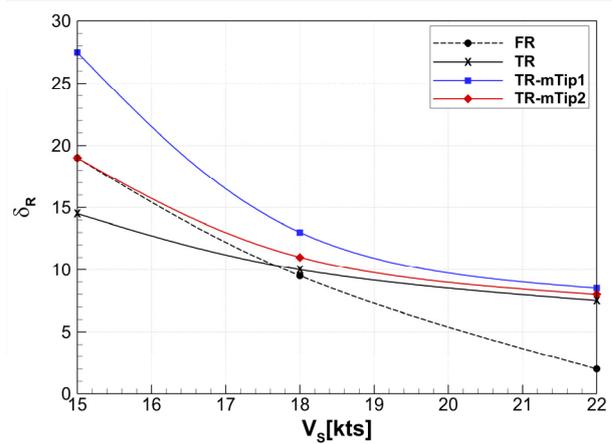
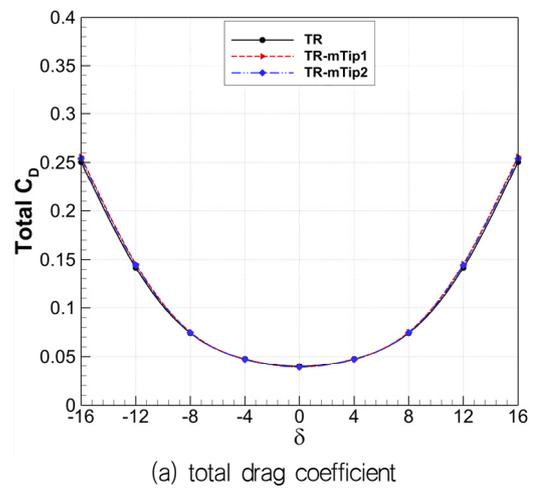
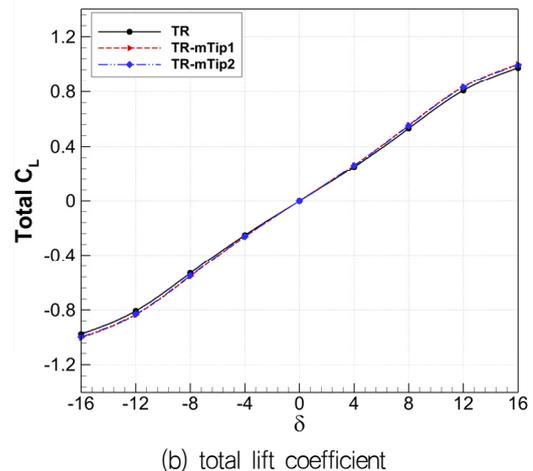


Fig. 15 Cavitation inception rudder angles of the three twisted rudders



(a) total drag coefficient



(b) total lift coefficient

Fig. 16 Rudder force coefficients of the three twisted rudders

럽게 흘러가도록 설계되었으나, 후연에 가까운 날개 끝 영역에서 유속이 빨라지면서 압력이 다른 두 방향타보다 낮은 것을 볼 수 있다. TR-mTip1은 날개 끝 평편부에서 압력이 높고 작은 반경의 라운드 처리한 가장자리로 유동이 넘어가면서 압력이 다소

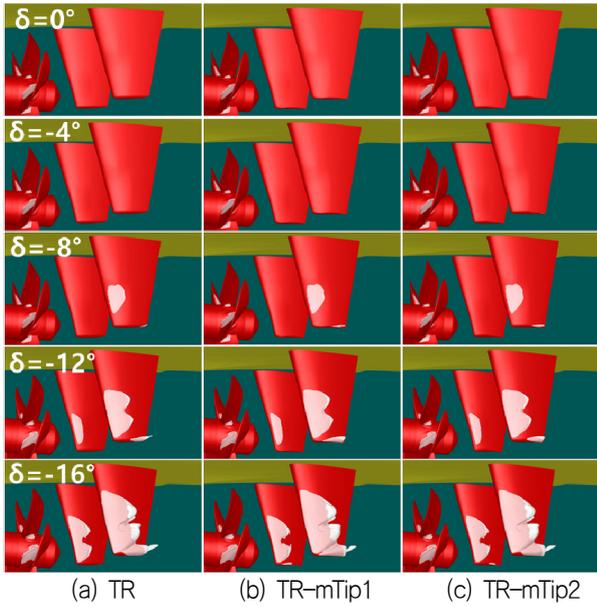


Fig. 17 Cavitation occurrences on the three twisted rudders

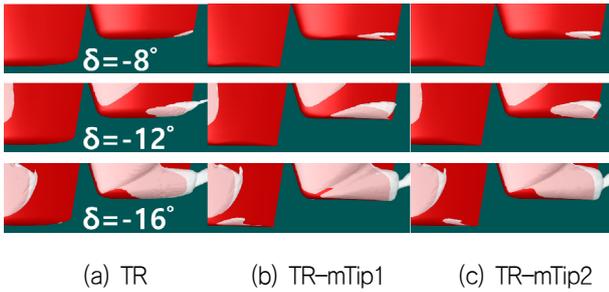


Fig. 18 Close-up view of tip cavitation occurrences on the three twisted rudders

낮아지고 있다. TR-mTip2는 TR 방향타의 특징과 후연 영역에서 TR-mTip1의 유동 특징을 함께 보여주고 있다.

Fig. 15는 개선된 방향타들에 대해 선속 15, 18 그리고 20knots에서 해석된 캐비테이션 초생 각도를 비교하고 있다. Fig. 12(b)와 12(c)에서 소개한 TR-mTip1과 TR-mTip2 방향타 모두 낮은 선속에서 캐비테이션 초생 각도가 개선되었으며, 날개 끝 형상을 평편하게 가져간 TR-mTip1의 개선 정도가 매우 높게 나타났다.

Table 3 Calculated cavitation volumes for the flat and twisted rudders

δ	Volume of cavitation [m ³]			
	FR	TR	TR-mTip1	TR-mTip2
-8°	1.823×10 ⁻⁵	1.373×10 ⁻⁶ (-92.5%)	1.547×10 ⁻⁶ (-91.5%)	1.530×10 ⁻⁶ (-91.6%)
-12°	4.895×10 ⁻⁵	1.630×10 ⁻⁵ (-66.7%)	1.835×10 ⁻⁵ (-62.5%)	1.764×10 ⁻⁵ (-64.0%)
-16°	1.066×10 ⁻⁴	6.804×10 ⁻⁵ (-36.2%)	7.610×10 ⁻⁵ (-28.6%)	7.325×10 ⁻⁵ (-31.3%)

Fig. 16은 날개 끝 형상 개선 전후 방향타의 항력과 양력의 변화를 비교하고 있다. 논문에서 제안하는 두 가지 방향타 날개 끝 형상이 미소한 항력과 양력의 개선을 보이고 있으며, 결론적으로 전체적인 타력의 성능 변화는 없는 것으로 나타났다.

Fig. 17은 선속 30knots와 타각 0°, -4°, -8°, -12° 그리고 -16° 조건에서 해석한 방향타 날개 끝 형상 개선 전후에 따른 캐비테이션 발생 결과를 비교하고 있다. 타각 -4°까지 세 가지 방향타 모두 캐비테이션 발생이 없으며, 타각 -8°에서 날개 끝을 개선한 두 방향타 후연에서 개선 전 TR 방향타보다 캐비테이션 발생이 증가하였다. 타각 -16°에서는 TR-mTip1과 TR-mTip2의 우현 방향타 안쪽 날개 끝 중간에서 TR 방향타와는 달리 캐비테이션 발생이 관찰되었다. Fig. 18을 통해 방향타 날개 끝 영역에서의 캐비테이션 발생 상황을 더 자세히 비교할 수 있다. 대체로 TR-mTip1 방향타 끝의 캐비테이션 발생량이 더 큰 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 14의 방향타 날개 끝 영역 압력 분포 비교를 통해 확인할 수 있다. 높은 선속에서 캐비테이션 발생 가능성이 있는 -4°에서 -2° 사이의 낮은 압력계수 분포가 TR 방향타보다 TR-mTip1과 TR-mTip2 방향타에서 더 넓은 것을 알 수 있다.

Table 3은 Fig. 16의 결과로 계산된 각 방향타의 전체 캐비테이션 부피를 기존 평판 방향타(FR)와 비교하여 감소된 정도를 나타내고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 캐비테이션 부피는 체적분을 0.2를 기준으로 계산하였으며, 비틀림 방향타에서 캐비테이션이 발생하지 않은 타각 0°와 -4°는 제외하였다. 세 타각 조건 모두에서 날개 끝 형상 개선 전 TR 비틀림 방향타가 TR-mTip1과 TR-mTip2보다 캐비테이션 발생량이 가장 감소한 결과를 보여주었다. 즉, 저속 영역에서 캐비테이션 초생 성능을 개선하기 위해 비틀림 방향타의 날개 끝을 개선한 경우 고속 영역에서 약간 불리할 수 있는 것으로 나타났다. 본 수치해석 결과, 저속에서 캐비테이션 초생 성능이 개선되고, 동시에 고속 조건에서 TR 방향타와 유사한 캐비테이션 발생량을 보인 TR-mTip2 방향타가 적절한 설계 개선안으로 평가되었다.

6. 결론

본 논문에서는 KRISO가 개발한 비틀림 방향타의 저속 영역 캐비테이션 초생 성능 향상을 위한 형상 개선방안과 수치해석을 통한 검증에 소개하였다. 먼저, 방향타 성능 해석에 사용된 RANS 기반의 수치해석 방법을 검증하기 위해 KRISO LCT에서 수행된 평판 방향타의 성능시험 결과와 비교하였다. 본 수치해석 결과는 타력, 캐비테이션 발생 그리고 타 표면 압력에 대해 예측된 결과와 타당한 일치를 보여주었다.

KRISO 비틀림 방향타는 고속 조건에서 전 타각에 걸쳐 비틀림 방향타의 캐비테이션 성능이 평판 방향타보다 우수한 것으로 본 논문의 수치해석 결과를 통해서 확인하였다. 다만, 저속 일부 운항 구간 캐비테이션 초생 각도에 대한 수치해석 결과로부터 기존 평판 방향타보다 낮은 타각이 얻어졌다. 이는 방향타의 날개 끝 영역에서 발생하는 캐비테이션과 관련이 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 TR-mTip1과 TR-mTip2라 명명한 두 가지 날개

끝 형상 개선방안을 소개하였으며, 수치해석을 통해 두 개선 방향타 모두 캐비테이션 초생 각도가 개선되었다. 이어서, 개선된 방향타들의 높은 선속에서 타력의 변화와 캐비테이션 발생량의 변화를 검토하였다. 날개 끝 후연 영역의 면적 증가 영향으로 인해 형상 개선 방향타들의 양력이 오히려 약간 증가하였으며, 형상 변화가 타력에 미치는 영향은 미소하였다. 그러나, 캐비테이션 발생량이 개선 전 비틀림타보다 증가하는 경향을 보였다. 최종적으로 저속과 고속 영역 모두의 캐비테이션 성능을 적절하게 만족시키는 TR-mTip2 방향타를 개선안으로 선택하였다. 향후, LCT 성능시험을 통해 본 논문에서 연구한 결과를 검증할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 방위사업청이 지원하는 민군겸용 기술개발사업 19-CM-MU-10 (PNS5060, 3차원 곡면형 비틀림 방향타 기술)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, J.W., Paik, B.G., Park, Y.H. and Seol, H.S., 2021. Experimental study of the flat & twisted rudder characteristics using rudder dynamometer in LCT. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 58(6), pp.391-399.
- Ahn, K.S., Choi, G.H., Son, D.I. and Rhee, K.P., 2012. Hydrodynamic characteristics of X-Twisted rudder for large container carriers. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4, pp.322-334.
- Choi, J.E., Kim, J.H., Lee, H.G. and 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.
- Han, J.M., Kong, D.S. and Song, I.H., 2001. Analysis of the cavitating flow around the horn-type rudder in the race of a propeller. *CAV2001, Pasadena*, 20-23 June, CA, USA.
- Kim, S.P., Park, J.J., Kim, Y.S., Jang, Y.H., Choi, Y.B. and Paik, B.G., 2006. An experimental research on gap cavitation erosion of semi-spade rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(5), pp.578-585.
- Paik, B.G., Kim, K.Y., Ahn, J.W., Kim, Y.S., Kim, S.P. and Park, J.J., 2006. Experimental investigation on the gap cavitation of semi-spade rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(4), pp.422-430.
- Paik, B.G., Kim, K.Y., Ahn, J.W., Park, S.H., Heo, J.K. and Yu, B.S., 2008. Cavitation observation and visualization of the gap Flows on a rudder influenced by propeller slipstream and hull wakes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(3), pp.238-246.
- Paik, B.G., Kim, G.D., Kim, K.S., Kim, K.Y. and Suh, S.B., 2012. Measurements of the rudder inflow affecting the rudder cavitation. *Ocean Engineering*, 48, pp.1-9.
- Paik, B.G., Jeong, S.W., Park, Y.H., Ahn, J.W., Park, I.R., and Kim, J.I., 2022. Improvement of rudder cavitation performance using rudder inflow measurements in large cavitation tunnel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10, 266.
- Park, K.R., and Lee, Y.G., 2010, A study on the rudder shapes for the suppression of cavitation around a horn-type rudder, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(4), pp. 553-564.
- Sauer, J., 2000. Instationaer kavitierende stroemungen - ein neues modell, basierend auf front capturing VOF und blasendynamik, Dissertation, Universitaet Karlsruhe.
- Shen, Y.T., Jiang, C.W. and Remmers, K.D., 1997. A twisted rudder for reduced cavitation. *Journal of Ship Research*, 41(4), pp.260-272.
- Siemens, 2018. *STAR-CCM+ 11.04 User Guide*, URL: <https://support.industrysoftware.automation.siemens.com/general/documentation.shtml> [Accessed 1 January 2018].
- Song, I.H., 2004. Cavitation characteristics on various 2-dimensional rudder with gap. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting SNAK*, Sancheong, 20-22 October.



박 일 룡

김 제 인

백 부 근

안 종 우