



# LCT에서 방향타 동력계를 이용한 평판 및 비틀림 방향타 특성의 실험적 연구

안중우<sup>†</sup>·백부근·박영하·설한신  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

## Experimental Study of the Flat & Twisted Rudder Characteristics Using Rudder Dynamometer in LCT

Jong-Woo Ahn<sup>†</sup>·Bu-Geun Paik·Young-Ha Park·Han-Shin Seol  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

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.

In order to investigate force and cavitation characteristics for the flat & twisted rudders in the Large Cavitation Tunnel (LCT), the rudder dynamometer was designed and manufactured. The measuring capacities of lift, drag and moment are  $\pm 1000$  N,  $\pm 2000$  N, and  $\pm 150$  N-m, respectively. The present dynamometer uses the actuator with a harmonic drive to control the rudder angle without backlash. As the target ship is a military ship with twin shaft, each dynamometer was installed above the port & starboard rudders. After the installation of the model ship with all appendages, the model test composed of rudder force measurement and cavitation observation was conducted for the existing flat rudder & the designed twisted rudder. While the flat rudder showed the big difference of lift & moment between port & starboard, the twisted rudder presented a similar trend. The cavitation of the twisted rudder showed better characteristics than that of the flat rudder. Another set of model tests were conducted to investigate rudder performance by the change of the design propeller. There was little difference in rudder performance for the design propellers with slight geometric change. Through the model test, the characteristics of the flat & twisted rudders were grasped. On the basis of the present study, it is thought that the rudder with better performance would be developed.

**Keywords** : Rudder dynamometer(방향타 동력계), Rudder force(타력), Rudder cavitation(방향타 캐비테이션), Twisted rudder(비틀림 방향타), Large Cavitation Tunnel(LCT, 대형캐비테이션터널)

## 1. 서론

함정용 방향타는 프로펠러 하류에 위치함에 따라 선체와 프로펠러 외에 경사축 및 각종 부가물(strut, sleeve, barrel 등) 등의 상호작용으로 인하여 복잡한 불균일 유동장에서 작동하게 된다. 국내에서 건조된 기존 함정들은 대부분 평판타를 사용하고 있으며 이와 같은 기존 평판타는 선체 및 프로펠러 등의 하류 특성을 고려하지 않고 설계되었기 때문에 상대적으로 캐비테이션 발생량이 증가하게 된다. 그로 인하여 수중방사소음과 선체 진동이 유발됨으로서 피탐율 증가를 초래했으며, 그 생존성(survivability)을 위협받게 된다. 또한 좌우현 타력(양력 및 모우멘트)의 불균형을 유발하여 타각별 하중을 증가시키는 원인

이 되기도 한다. 일반적으로 함정 방향타에 발생하는 캐비테이션은 매우 불안정하게 발생됨에 따라 (Paik et al., 2021a) 타 표면에 침식을 유발하며, 심한 경우에는 타에 구멍이 나는 등 조타 성능 저하를 초래할 수 있다. 또한 손상된 방향타 유지 보수시 함정 수리로 인한 작전 투입 차질이 발생하기도 한다. 이와 같은 기존 평판타에서 발생하는 문제들을 해결하고자 미 해군 등은 비틀림타를 개발하여 다양한 실험적 연구를 수행한 바 있다 (Shen et al., 1997). 본 연구에서는 방향타에서 발생하는 타력 및 캐비테이션 실험을 정도 높게 수행하고자 타각 조절시 백래시(backlash)가 발생하지 않는 방향타 동력계를 설계·제작하였다 (Kim et al., 2013).

대형캐비테이션터널(LCT)에서 수행되는 방향타 성능시험은

기존 함정을 대상으로 시험부에 모형선과 모든 부가물이 설치된 상태에서 수행된다. 방향타 동력계는 캘리브레이션을 수행하여 성능을 검증한 후 방향타 상부에 설치되었다. 좌우현 프로펠러가 바깥쪽(outward)로 회전함에 따라 방향타에 유입되는 비대칭 유동이 존재하므로 동력계는 좌우현 모두 설치하였다.

기존 함정에서 사용 중인 기존 평판타 및 성능 개선을 위하여 설계된 비틀림타 대상으로 양력, 항력 및 모우먼트로 구성되는 타력 및 타각 변화에 따른 캐비테이션 관찰 시험을 수행하여 성능을 비교 검토하였다. 또한 설계 프로펠러 변경에 따른 방향타 성능 변경 정도를 파악하고자 기존 평판타를 대상으로 성능 시험을 수행하여, 타력 및 캐비테이션 성능을 비교 검토하였다.

## 2. 함정용 방향타 동력계

방향타 동력계는 LCT에서 타각을 조절하면서 방향타에서 발생하는 양력(Lift), 항력(Drag) 및 타두재(Rudder stock)로 전달되는 모우먼트(Moment)를 계측하는 장비이다. 또한 타각을 변경하면서 수행되는 타 캐비테이션 관찰 시험 및 캐비테이션 초기발생 타각 조사에도 활용된다. LCT에서 함정용 방향타 성능시험은 Fig. 1과 같이 모형선과 모든 부가물이 설치된 상태에서 수행된다. 방향타 동력계는 방향타 상부에 Fig. 2와 같이 설치되는데, 타각 변화에 따라 방향타에 유입되는 비대칭 유동이 존재함에 따라 좌우현 모두 설치하였다.

방향타 하중 계측 및 캐비테이션 관찰 시험은 프로펠러 작동 조건에서 수행되는데, 일반적으로 함정 프로펠러 캐비테이션 관찰 및 캐비테이션 초기발생 선속(CIS) 시험은 약 9.0 m/s 유속에서 수행된다. 따라서, 예인수조에서 사용하는 방향타 동력계 보다는 계측 용량이 매우 크다. 또한 수중에 설치됨으로서 방수가 필수적으로 요구된다. LCT 시험부 절대압력은 0.1~3.0bar 범위에서 변화될 수 있는데, 이와같은 압력 변화에 따른 방수 특성이 고려되어야 한다 (Ahn et al., 2015). LCT용 함정용 방향타의 계측 용량 및 사양은 Table 1과 같다. 타각을 정밀하게 제어하기 위하여 백래시(backlash)가 없는 감속비 81:1인 하모닉드라이버가 내장된 액츄에이터(actuator)를 사용하였다.



Fig. 1 The model ship installed in LCT

Table 1 Specification of rudder force dynamometer

Type		Underwater
Rated Capacity	Fx (N)	± 1000
	Fy (N)	± 2000
	MZ (N-m)	± 150
Measuring angle range (°)		± 45.0
Harmonic driving actuator (N-m)		± 395 (Max.)
Angle control accuracy(°)		± 0.01
Angular speed range(°/sec)		0~± 40
Non-linearity (% of F.S.)		± 0.5
Hysteresis (% of F.S.)		± 0.5
Repeatability (% of F.S.)		± 0.2
Allowable overload (% of F.S.)		± 150



Fig. 2 Rudder dynamometers installed on the model ship



Fig. 3 Calibration device for X-Force(Drag) & Y-force(Lift)

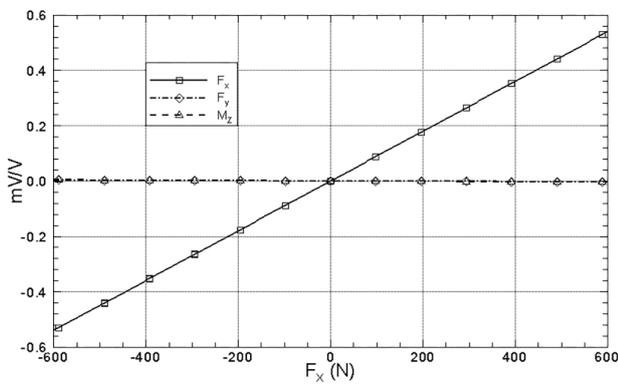


Fig. 4 Calibration device for Z-moment

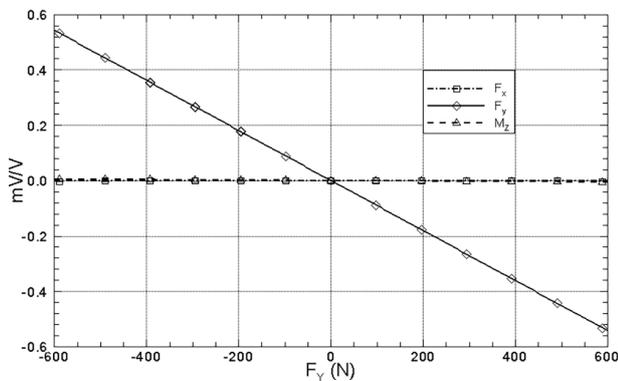
위임기어 등이 채용된 감속기어를 사용하는 경우 백래시로 기준타각(0°)를 수시로 맞추어 주어야 하는 불편함이 있었으나, 하모닉드라이버를 채용한 현재의 방향타 동력계는 최초 설정한 기준타각을 유지하고 있었다. 타각은 0.01° 간격으로 조정될 수 있다. 타각조정 속도는 40°/sec 까지 설정할 수 있으나, 현재의 방향타 시험에서는 0.5°/sec로 조정하였다. 타각조정 속도가 큰 이유는 현재의 방향타가 제어핀 등에 강제동요시험이 가능하도록 설계되었기 때문이다 (Ahn et al., 2013a).

방향타 동력계는 함정 모형선에 설치되기 전에 성능 검증을 위하여 Fig. 3과 4에서 보여지는 것과 동력계 캘리브레이션을 수행하였다. Fig. 3은  $F_x$ (drag)와  $F_y$ (lift) 캘리브레이션을 위한 설치 상태를 보여주며, Fig. 4는  $M_z$ (Z-moment) 캘리브레이션을

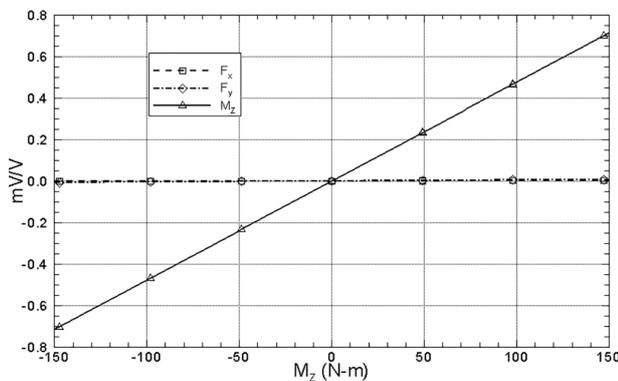
위한 설치상태를 보여준다.  $F_x$ (drag) 캘리브레이션은 종방향에 설치된 2개의 받침대 각각에 무게를 이는 분동을 올려 놓으면 와이어를 통하여 동력계에 힘이 전달되면서 도출된 전기적 신호를 얻을 수 있다.  $F_y$ (lift) 캘리브레이션은 횡방향에 설치된 2개의 받침대를 이용하여 수행된다.  $M_z$ 는 타두재에 강성비를 설치하고 좌우에 부착된 4개의 폴리 및 받침대를 이용하여 캘리브레이션을 수행하게 된다 (Ahn et al., 2013b). 캘리브레이션은 좌우현 동력계 모두 수행하였는데, Fig. 5와 Fig. 6에서 캘리브레이션 결과를 볼 수 있다. 좌우현 동력계의 캘리브레이션 결과는 차이가 있지만 계측신호의 선형성(linearity), 반복성(repeatability) 등이 매우 좋은 것으로 나타났다. 또한  $F_x$  캘리브레이션시  $F_y$  및  $M_z$ 에 반응신호가 거의 없어 하중 및 모우먼트 간에



(a)  $F_x$ (Drag) calibration results

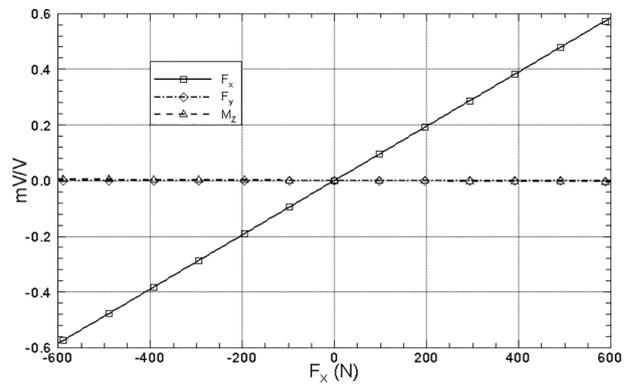


(b)  $F_y$ (Lift) calibration results

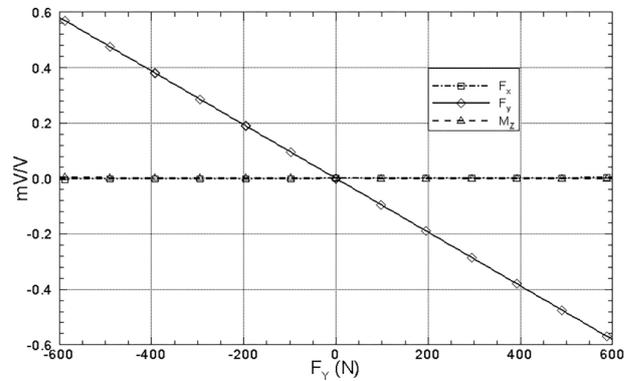


(c)  $M_z$ (Moment) calibration results

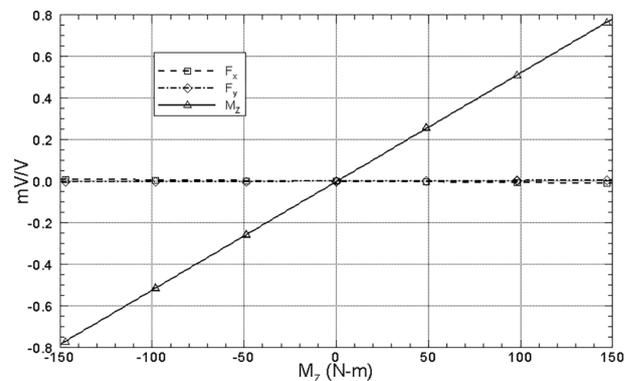
Fig. 5 Calibration results for starboard dynamometer



(a)  $F_x$ (Drag) calibration results



(b)  $F_y$ (Lift) calibration results



(c)  $M_z$ (Moment) calibration results

Fig. 6 Calibration results for port dynamometer

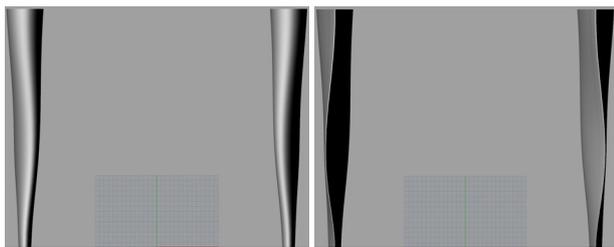
간섭은 거의 없는 것으로 나타났다.  $F_y$  및  $M_z$  캘리브레이션 시에도 다른 하중 및 모우멘트 간섭이 거의 없는 것으로 나타났다. 방향타 동력계의 우수한 계측특성에 확인한 후 Fig. 2와 같이 함정 모형선에 설치하였다.

### 3. 평판 및 비틀림 방향타 성능 시험

개발된 방향타 동력계를 이용하여 대상선의 기존 평판타 및 비틀림 방향타의 성능시험을 수행하였다. 대상선은 함정으로 2중 스트럿으로 지지된 경사된 쌍축을 갖는 축계가 구성된다. 방향타의 Bottom은 선체와 맞닿는 부분이며, Tip은 Bottom 아래 방향으로 Span 끝에 위치한다. 기존 평판타의 Bottom 과 Tip은 NACA 단면으로 형성된다. 비틀림 타는 기존 평판타를 기반으로 프로펠러 후류 유동장 특성을 고려하여 span 방향으로 비틀림 각을 분포하였다, 방향타로 유입되는 유동 입사각은 Fig. 1과 같이 모형선 및 부가물이 모두 포함된 상태에서 CFD 해석으로 구할 수 있다 (Paik et al., 2021b). Fig. 7은 설계된 비틀림타의 앞날(L.E.)과 뒷날(T.E.) 형상을 보여준다. 양현의 프로펠러가 바깥쪽(outward)으로 회전함에 따라 앞날은 중앙 쪽으로 비틀림 각이 분포되어 있으며, 뒷날은 바깥쪽으로 비틀림 각이 분포된 것을 볼 수 있다. 비틀림 각은 Span을 따라 각 단면에 코드 중심선을 기준으로 앞날과 뒷날에 동일하게 분포하였다.

방향타 성능시험은 LCT 시험부에 Fig. 1과 같이 모형선 및 부가물이 모두 설치된 상태에서 수행되었다. Fig. 8은 모형선에 설치된 기존 평판타 및 비틀림타를 보여준다. 성능시험 항목은 타각( $\delta_r$ ) 변화에 따른 항력, 양력, 모멘트로 구성되는 타력 계측과 캐비테이션 발생 거동 등이었다. 타각의 정의는 Fig. 9에 나타나 있는데, 타를 위에서 바라보았을 때 시계방향으로 회전하면 + 타각, 반시계방향으로 회전할 때를 - 타각이라고 정의한다. 타각의 정의는 좌우현 모두 동일하다.

방향타 성능시험 조건은 대상선의 최고 선속인 29.0 knots이며, 타각의 계측 범위는  $\pm 16^\circ$ 이다. 방향타의 성능시험은 LCT 시험부에서 수행되었으며, 시험부 유속은 약 9.0 m/s 이다. Fig. 10은 평판타 및 비틀림타의 양력(L) 및 항력(D) 계측 결과를 보여준다. Fig. 11은 모우멘트(M) 계측 결과를 보여준다, 양력 계수( $C_L$ ), 항력계수( $C_D$ ) 및 모우멘트계수( $C_M$ )의 정의는 다음과 같다.



(a) L.E. (b) T.E.

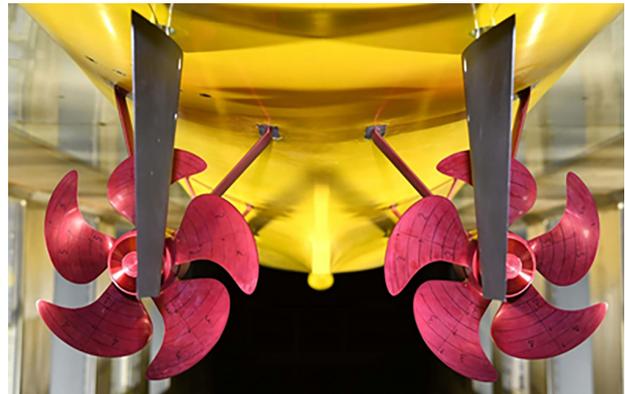
Fig. 7 L.E. & T.E for the twisted rudder

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho S U^2} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{D}{0.5\rho S U^2} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M}{0.5\rho S U^2 l} \quad (3)$$

여기서, S는 방향타의 투영 면적, U는 선속, l은 Span 중앙 단면의 코오드 길이이다.



(a) Flat rudder



(b) Twisted rudder

Fig. 8 Rudders installed in LCT

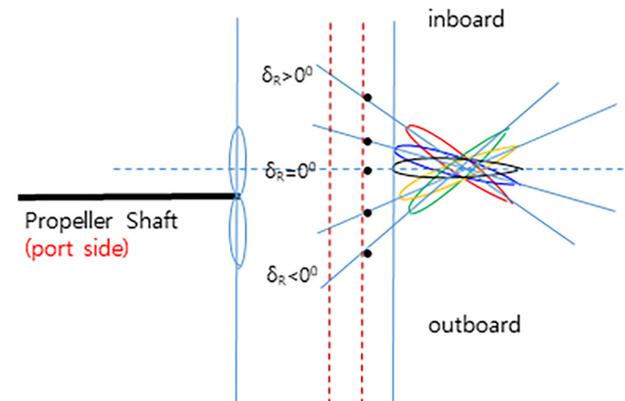


Fig. 9 Definition of rudders deflection angle

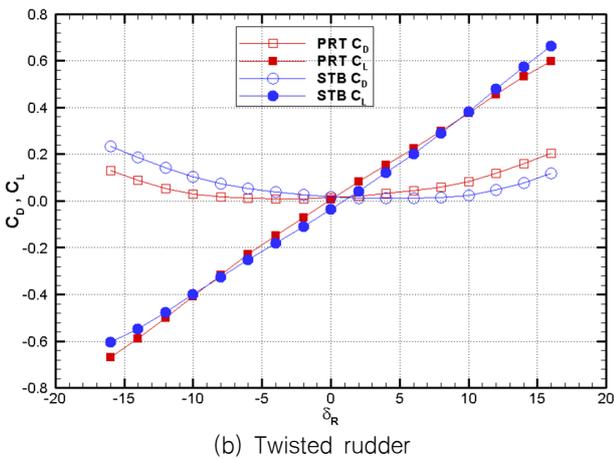
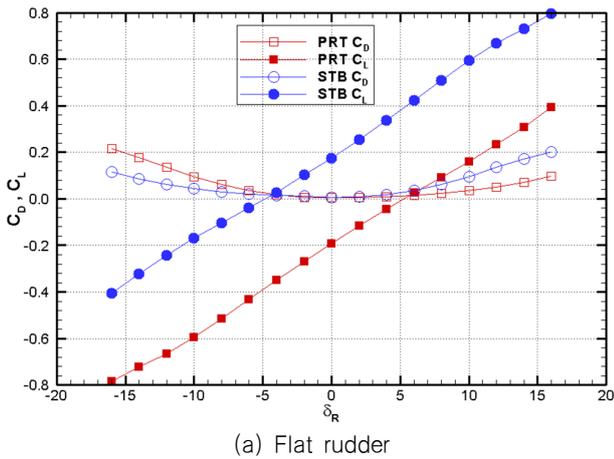


Fig. 10 Drag & lift measured in LCT

양력은 좌현에서 우현으로 작용하는 하중을 +로 정의한다. 평판타의 경우 좌현 및 우현 양력의 차이가 나타나고 있다. 이는 좌우현 프로펠러가 바깥쪽(outward)으로 회전함으로서 방향타 유입 유동 각도가 좌우현 각각 바깥쪽으로 향하기 때문에 나타나는 현상이다. 즉 유입유동으로 평판타 타각 0°에서 우현(STB)타의 경우 + 방향의 타각이 나타나는 것과 같은 효과가 나타나며, 좌현(PRT)타의 경우 - 방향의 타각이 나타나는 것과 같은 효과가 나타난다. 따라서, 평판타 0°에서 우현은 + 방향의 양력이 나타나며, 좌현은 - 방향의 양력이 나타난다. 평판타의 경우 타각 0°에서 나타난 양력의 차이가 실험 수행 영역인 ±16°까지 유지된다. 항력의 경우에는 타각 0°에 최소치가 나타나며, ± 타각이 증가할수록 항력도 증가된다. + 타각에서는 우현타 항력이 좌현보다 더 크게 나타나며, - 타각에서는 좌현 방향타 항력이 더욱 크게 나타난다. 평판타의 경우 ± 양력이 증가하면 항력도 증가하는 유사한 경향을 보여준다. 비틀림타의 경우에는 유입유동에 맞추어 Span 위치별 유입각을 고려한 비틀림 설계가 됨으로서 좌우현 타의 양력이 유사하게 나타났다. 따라서 유입유동의 CFD 계산 결과 및 비틀림각의 분포 설계 정도가 양호함을 알 수 있다. 비틀림타 항력의 경우에는 평판타와 경향이 다르게 나타났다. + 타각에서는 우현타의 항력이 좌현보다 크게 나타났으며, - 타각에서는 좌현타의 항력이 우현보다

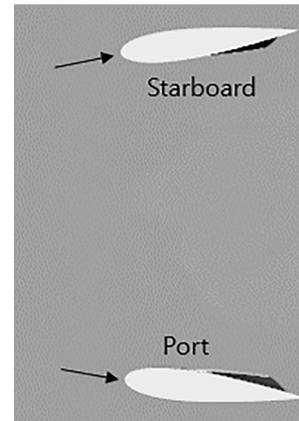
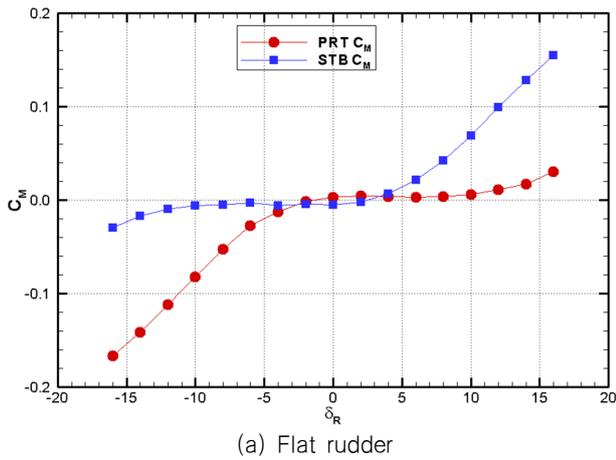


Fig. 11 Twisted section at 0.5 span

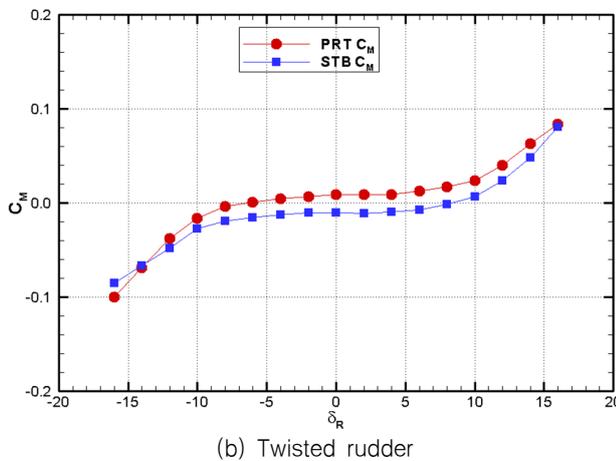
크게 나타났다. 비틀림타의 코오드 방향을 따르는 비틀림각 분포에 따라 나타난 현상이라 사료된다. Fig. 11은 비틀림타 0.5 Span에서의 단면 분포를 보여준다. + 타각에서는 우현타가 축방향 유동과 형성되는 각도가 적어지는 반면에 좌현타의 각도가 증가된다. 따라서 + 타각에서는 좌현타의 항력이 증가되는 현상이 나타나고, - 타각에서는 반대로 우현타의 항력이 증가하는 현상이 나타나는 것으로 사료된다. 평판타에서도 유입 유동 입사각이 존재하지만 타각 0°에서 항력이 가장 작게 나타나는 것과 유사한 현상이라 사료된다. 비틀림타의 양력의 경우 좌우현 평판타 각각에서 발생하는 ± 최대 양력이 감소하면서 좌우현 양력이 타각 전체 영역에서 유사해지는 특성을 보여준다. 비틀림타 양력의 최대값은 감소했지만 좌우현 양력의 합(총양력)은 평판타와 거의 유사하다. 높은 타각에서는 비틀림타의 총양력이 평판타보다 약간 크게 나타나기도 한다.

평판타 및 비틀림타의 모우먼트 특성은 Fig. 12에 나타난다. 평판타의 경우 양의 타각이 증가할수록 우현타 모우먼트가 급격히 증가하고 있으며, 좌현타는 증가량이 작다. 또한, 음의 타각이 증가할수록 좌현타 모우먼트가 급격히 증가하고 있으며, 우현타는 증가량이 작다. 좌우현 평판타 모우먼트 특성은 타각 0°를 중심으로 면대칭 특성을 보여주는데, 이는 양력의 특성이 반영된 결과라고 사료된다. 즉 양의 타각에서 우현타의 양력이 증가됨으로서 모우먼트도 증가하는 현상을 보여주며, 음의 타각에서는 좌현타의 양력이 증가되면서 모우먼트도 증가되는 현상이 나타나고 있다. 비틀림타의 경우에는 양력이 거의 유사하게 도출되면서 모우먼트도 거의 유사한 값을 보여주고 있다. 평판타에 비하여 타각별 양력의 최대값이 감소하면서 모우먼트도 감소하는 현상을 보여준다. ±16° 타각에서는 좌우현 비틀림타의 모우먼트가 평판타에 비해 40% 이상 감소한 것으로 나타났다. 타의 모우먼트가 감소하는 것은 타두재 및 타각 제어 장치 등에 설계 및 선정에 유리한 점이 있다.

캐비테이션이 발생하지 않는 타각 0°에서 계측된 힘 및 모우먼트 자료를 이용하여 불확실성 해석을 Choi et al. (1994)이 제시한 방법에 따라 수행하였다. 방향타 동력계에서 계측된 양력, 항력 및 모우먼트의 불확도(Uncertainty)는 0.092 %, 0.565 % 및 1.871 %이다. 장비의 특성은 비교적 우수한 것으로 판단된다.



(a) Flat rudder

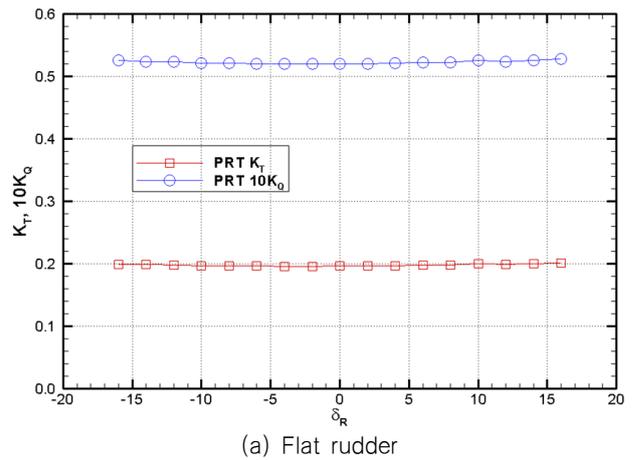


(b) Twisted rudder

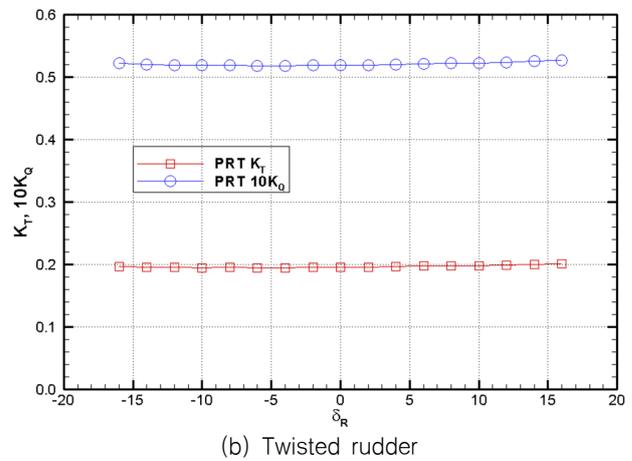
Fig. 12 Moment measured in LCT

Fig. 13은 평판타 및 비틀림타의 타각 변화에 따른 프로펠러에 추력 및 토크 변화를 보여준다.  $\pm 16^\circ$ 까지 타각이 변화했음에도 프로펠러 추력 및 토크는 평판타 및 비틀림타 모두 거의 변화가 없다. 또한 평판타 및 비틀림타 설치에 따른 프로펠러 추력 및 토크도 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 모형선이 고정 설치된 LCT 실험 시 방향타 타각의 변화가 프로펠러에 미치는 영향이 거의 없음을 의미한다.

Fig. 14는 타각  $\pm 16^\circ$  까지  $4^\circ$  간격으로 관찰된 평판타 및 비틀림타의 캐비테이션 발생량의 비교를 보여준다. 방향타에 발생한 캐비테이션 거동은 매우 빠르게 변동하므로 캐비테이션 양을 정량적으로 평가하기는 매우 어렵다. Fig. 14는 30 fps(frame per second)로 촬영되는 캠코더를 이용하여 얻은 영상 중에서 되도록 캐비테이션이 최대로 발생하는 영상을 캡처(capture)하여 얻은 영상이다. 최근 Paik et al. (2021a) 등은 고속카메라로 촬영한 영상을 분석하여 캐비테이션 발생량의 정량적 분석을 수행한 바 있다. 이때 촬영 속도는 10000 fps(frame per second) 인데, 1/10초 동안에도 캐비테이션 발생량 변동이 심하게 나타나고 있어 캠코더로 촬영된 영상을 이용해서 발생량을 정량적으로 평가하는 것은 거의 불가능함을 알 수 있다. 현재의 캐비테이션 발생량은 타각별로 캡처된 영상을 이용하여 정성적 평가만을 수행한다.



(a) Flat rudder



(b) Twisted rudder

Fig. 13 Propeller thrust & torque characteristics with rudder angle changes

Fig. 14의 평판타의 경우 - 타각에서는 좌현타 바깥쪽(outboard)에서, + 타각에서는 우현타 바깥쪽에서 캐비테이션이 주로 발생한다. 타각  $0^\circ$ 에서는 캐비테이션이 발생하지 않았으며 타각  $\pm 4^\circ$ 에서는 50% 스패 아래쪽 앞날로부터 상당량의 sheet 캐비테이션이 발생된 것을 볼 수 있다. 캐비테이션 하류쪽 끝단에서 약간의 구름 캐비테이션이 발생되고 있다. 타각  $\pm 8^\circ$ 에서는 sheet 캐비테이션이 증가하며, 구름캐비테이션도 더욱 강력해 지는 것으로 나타났다. 타각  $\pm 12^\circ$ 에서는 타각  $\pm 8^\circ$ 보다 sheet 캐비테이션과 구름캐비테이션이 더욱 증가되었으며, - 타각에서는 우현타 안쪽(Inboard)면 앞날 Tip 근처에, + 타각에서는 좌현타 안쪽(Inboard)면 앞날 Tip 근처에서 약간의 캐비테이션이 발생하고 있다. 타각  $\pm 16^\circ$ 에서는 타각  $\pm 12^\circ$ 보다 sheet 및 구름 캐비테이션이 더욱 증가되었으며, - 타각에서는 우현타 안쪽(Inboard)면 앞날 Tip 근처에, + 타각에서는 좌현타 안쪽(Inboard)면 앞날 Tip 근처에서 캐비테이션도 더욱 증가했음을 알 수 있다.

Fig. 14의 비틀림타의 경우 타각  $\pm 4^\circ$ 에서는 좌우현타 바깥쪽 면에서는 캐비테이션이 발생하지 않았으며, - 타각에서는 우현타 안쪽에서, + 타각에서는 좌현타 안쪽에서 발생 빈도수가 높은 초기발생 수준의 캐비테이션이 앞날 Tip 근처에서 발생하였다.  $\pm 8^\circ$ 에서는 좌우현타 바깥쪽 면에서 발생빈도가 매우 높은 초기발생 수준의 캐비테이션이 80% 스패 앞날 부근에서 발생했으며,

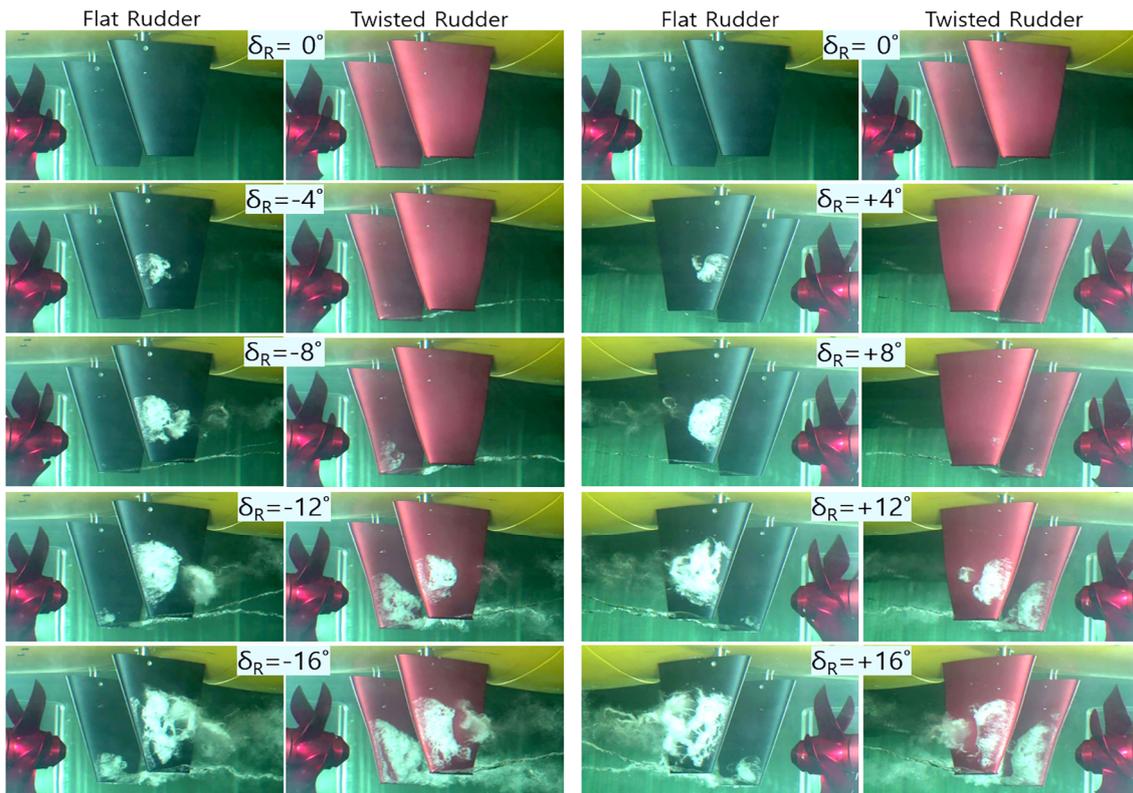


Fig. 14 Comparison of cavitation extent & behavior for flat & twisted rudders

안쪽면에서는 타각  $\pm 4^\circ$  에서보다 증가된 sheet 캐비테이션을 볼 수 있다. 타각  $\pm 12^\circ$  에서는 좌우현타 바깥쪽 면에 50 % 스펠 아래쪽 앞날로부터 상당량의 sheet 캐비테이션이 발생된 것을 볼 수 있다. 캐비테이션 하류쪽 끝단에서 약간의 구름 캐비테이션도 발생되고 있다. 안쪽면에서는 타각  $\pm 8^\circ$  에서보다 증가된 sheet 캐비테이션을 볼 수 있다. 타각  $\pm 16^\circ$  에서는 타각  $\pm 12^\circ$  보다 좌우현타 바깥쪽과 안쪽 모두 sheet 캐비테이션과 구름캐비테이션이 더욱 증가되었음을 볼 수 있다.

캐비테이션 발생량은 비틀림타가 평판타에 비해 확실하게 감소했음을 알 수 있다. 특히  $\pm 8^\circ$  까지는 캐비테이션 발생량이 현저하게 감소되었음을 알 수 있다. 비틀림타 안쪽면에 발생한 캐비테이션이 타각  $\pm 12^\circ$  부터 급격히 증가함에 따라 좌우현 타에 발생한 총 캐비테이션 양이 유사하게 보이기도 하지만 좌우현 비틀림타 각각의 캐비테이션은 평판타 바깥쪽보다 작게 발생한다. 따라서 캐비테이션에 의한 피해는 감소할 것이다. 비틀림타의 경우 바깥쪽보다 안쪽면에서 캐비테이션 먼저 발생하였는데, 재설계시 Tip 근처 입사각 분포를 수정할 필요가 있다. 비틀림 각의 분포를 수정하여 좌우현타 안쪽면 캐비테이션 초기 발생 타각을 높일 경우 현재보다 캐비테이션 성능이 더 우수해질 것이다.

#### 4. 프로펠러 변경에 따른 방향타 특성

함정 방향타 설계는 프로펠러 상세설계 단계에서 동시에 수행된다. 일반적으로 탐색개발 단계에서 프로펠러 설계사양을 결정하기 위하여 제작된 프로펠러를 이용하여 설계된 방향타의 성능검증

을 수행하게 된다. 따라서 최종 실선 프로펠러가 결정되기 전에 방향타 설계 및 성능 검증이 완료된다, 그런데, 최종 프로펠러가 결정되면 방향타의 최종 성능시험을 요구하는 경우가 있어 논란이 되기도 한다. 상세설계 단계에서 프로펠러는 탐색개발 단계에서 설계된 프로펠러의 성능평가 및 제시된 기본 자료를 기반으로 설계되므로 평균적인 기하학적 형상이 크게 변경되지는 않는다. 일반적으로는 캐비테이션 초기발생 선속 (Cavitation Inception Speed, CIS) 성능 향상을 목표로 설계되는 경우가 대부분이다. 따라서, 본 연구에서는 대상선의 기존 프로펠러(DP1)와 CIS 향상 설계 프로펠러(DP2) 2종에 대하여 평판타를 대상으로 타력 및 캐비테이션의 성능 차이를 비교하고자 한다.

Table 2 Principal particulars of model design propellers

Item	DP1	DP2
Diameter, D (mm)	272.7	272.7
Mean pitch, (P/D) <sub>mean</sub>	1.3646	1.3368
Chord at 0.7R, (C/D) <sub>0.7R</sub>	0.4250	0.4378
Expanded area ratio, (A <sub>E</sub> /A <sub>O</sub> )	0.7649	0.7904

Table 3 Test conditions of model design propellers

Item	DP1	DP2
Thrust coefficient, K <sub>T</sub>	0.1962	0.2007
Cavitation number, $\sigma_{n\_center}$	1.7752	1.8281
Advanced coefficient, J <sub>A</sub>	1.1542	1.1761
Model propeller RPS	29.69	29.24
Flow velocity, m/2	9.03	9.03

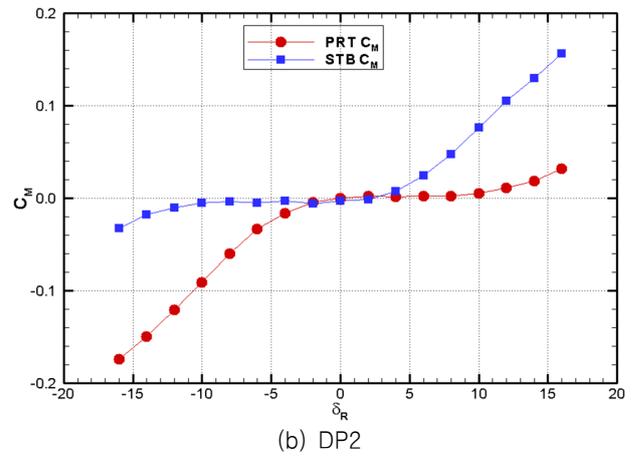
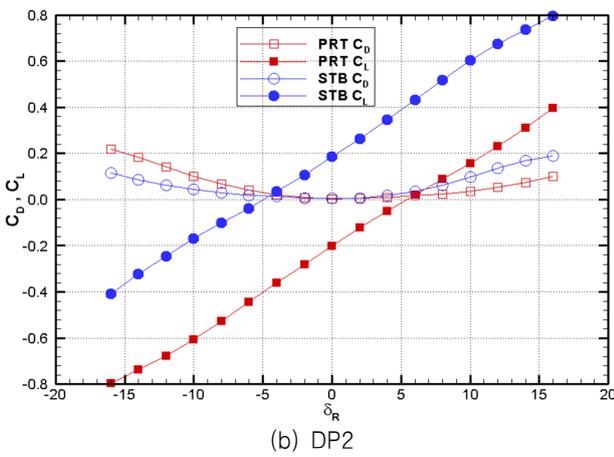
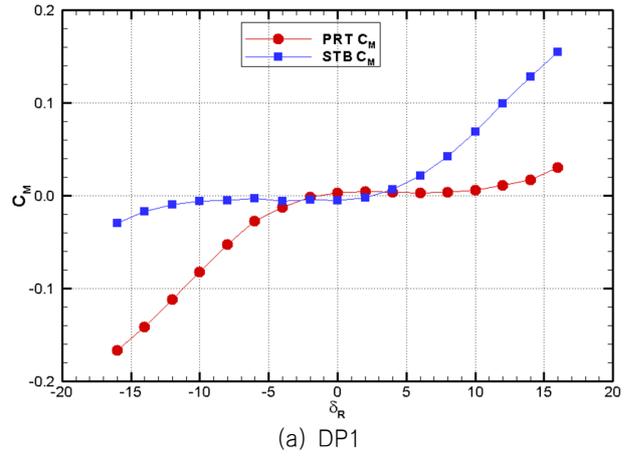
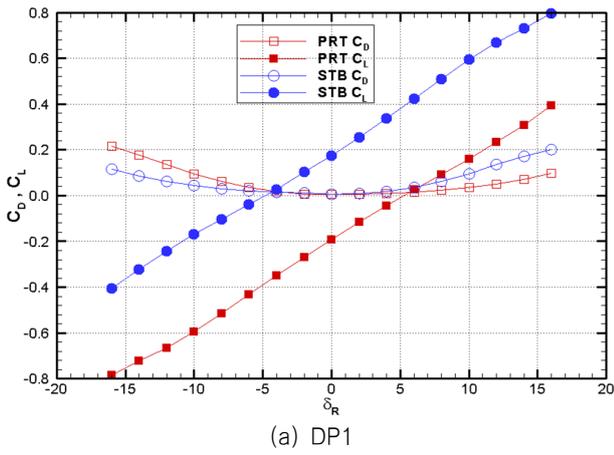


Fig. 15 Drag & lift measured using DP1 & DP2

Fig. 17 Moment measured using DP1 & DP2

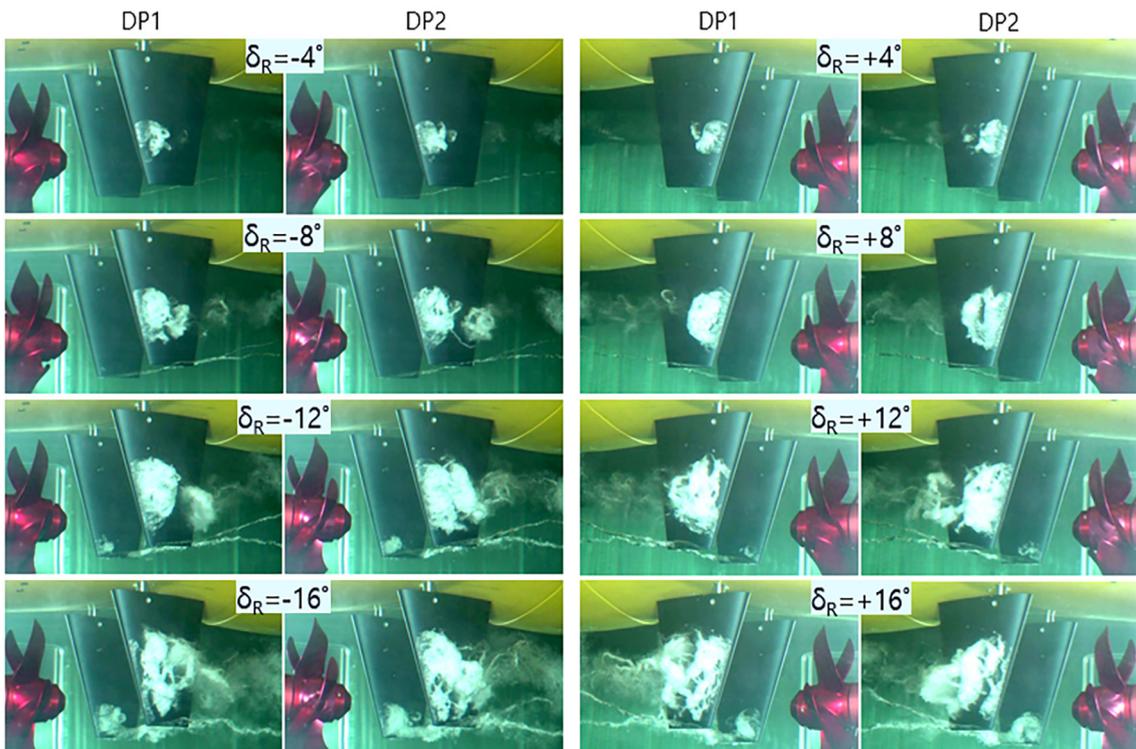


Fig. 16 Comparison of cavitation extent & behavior for flat rudder with DP1 or DP2

Table 2는 2중 프로펠러의 기하학적 특성을 보여준다, DP2가 평균피치가 감소하면서 전개면적비가 증가된 형태를 보여준다, CIS는 DP2가 약 1.0노트 향상되었다. Table 3은 선속 29.0노트 운항조건으로부터 도출된 LCT 시험 조건이다. Fig. 15는 Table 3의 시험조건에서 계측된 평판타의 양력과 항력 계수를 보여주는데, 프로펠러 변경에 따른 차이가 거의 나타나지 않는다. Fig. 16은 DP1과 DP2 프로펠러 하류에 설치된 평판타의 모우먼트 계측 결과를 보여주는데, 0° 부근에 약간의 차이를 제외하고는 거의 차이가 나타나지 않는다. Fig. 17은 프로펠러 변경에 따른 캐비테이션 발생량의 차이를 보여준다. 캡처한 영상에 따라 차이가 발생하는 것처럼 보이지만 대체적으로 유사한 발생량 및 거동을 보여준다. 따라서, CIS 성능 향상 정도의 기하학적 변경 차이로는 방향타 성능에 영향을 거의 주지 않는 것으로 사료된다.

## 5. 결론

항정 등에 적용되는 방향타의 타력 및 캐비테이션 특성을 연구하고자 LCT용 방향타 동력계를 설계·제작하였으며, 동력계 캘리브레이션을 통하여 양력, 항력 및 모우먼트 간에 신호간섭이 없고 신호의 선형성 등이 우수한 동력계를 개발하였다. 방향타 동력계 성능 검증 후 부가물이 모두 설치된 모형선을 LCT 시험부에 설치하여, 기존 평판타 및 새로 설계된 비틀림타의 타력 및 캐비테이션 시험을 수행하였다.

평판타의 경우 타각 0°부터 좌우현에 유사한 크기의 양력이 ± 성분으로 나타나며, 높은 타각까지 이 차이가 거의 유지된다. 이와 같은 양력의 차이로 +타각에서는 우현 방향타의 모우먼트가, -타각에서는 좌현 방향타의 모우먼트가 급격히 증가하는 현상이 나타났다. 유동 유입각을 고려하여 설계된 비틀림의 경우 타각 0°에서 거의 양력이 발생하지 않았으며, 좌우현에 거의 동일한 양력이 발생하였다. 동일한 양력 발생으로 모우먼트도 전 타각에 걸쳐 거의 동일한 크기로 나타났다. 좌우현에 타각별 양력이 감소함으로써 모우먼트도 감소하여 ±16°에서는 평판타보다 약 40% 정도 모우먼트가 감소하였다. 캐비테이션 발생량은 비틀림타가 평판타에 비해 확실하게 감소하였다. 특히 ±8°까지는 캐비테이션 발생량이 현저하게 감소되었음을 알 수 있다. 비틀림타의 경우 바깥쪽보다 안쪽면에서 캐비테이션 먼저 발생하면서 타각이 증가하면서 캐비테이션도 증가한다. Tip 쪽에 비틀림 각의 분포를 수정하여 좌우현타 안쪽면에 캐비테이션 초기 발생 타각을 높일 경우 현재보다 캐비테이션 성능이 우수해질 것으로 사료된다. 앞으로 본 연구에서 개발된 기반 기술을 활용하여 캐비테이션 성능이 향상된 비틀림 방향타를 개발하고자 한다.

본 연구에서는 캐비테이션 초기발생 선속(Cavitation Inception Speed, CIS) 개선 전후의 프로펠러를 이용한 방향타 성능시험을 수행하여 그 차이를 검증하였다. 프로펠러 변경에 의한 양력, 항력 및 모우먼트 차이가 거의 나타나지 않았으며, 캐비테이션 발생량도 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 탐색개발 단계에서 사양을 결정하기 위하여 개발된 프로펠러를 활용하여

방향타를 개발하여도 최종 성능 평가를 수행하는데 문제가 없음을 알 수 있었다. 앞으로, CFD 등을 이용한 연구를 추가로 수행하여 프로펠러 변경에 따른 성능 차이가 거의 없는 원인을 자세히 분석해 보고자 한다.

## 후기

본 연구는 산업통상자원부와 방위사업청이 지원하는 민군기술협력사업 민군기술개발과제 '3차원 곡면형 비틀림 방향타 기술' 과제(PNS3840)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## References

- Ahn, J.W., Kim, G.D., Kim, K.S. & Park, Y.H., 2015. Performance trial-test of the full-scale driving pump for the Large Cavitation Tunnel(LCT). *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), pp.428-434.
- Ahn, J.W., Kim, G.D. & Park, Y.H., 2013b, *A device for calibrating rudder force dynamometer*, Patent Number 10-1304923.
- Ahn, J.W., Kim, K.S., Park, C.S. & Paik B.G., 2013a, *A force dynamometer for artificial shaking test*, Patent Number 10-1347632.
- Choi, G.I., Chun, H.H., Kim, J.S. & Lee, C.M., 1994, Uncertainty analysis for the propeller open water test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 31(1), pp.71-83.
- Kim, K.S., Ahn, J.W., Moon, I.S. & Kim, G.D., 2013. *Submersible rudder force dynamometer*, Patent Number 10-1304931.
- Paik, B.G. et al., 2021a, An experimental study on the frequency characteristics of cloud cavitation occurring in navy ship's rudder. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 58(3), pp.167-174.
- Paik, B.G. et al., 2021b. A study of twist rudder for reduced cavitation for a warship, *2021 Warship technologies and weapon systems seminar*.
- Shen, Y.T., Jiang, C.W., & Remmers, K.D., 1997. A twisted rudder for reduced cavitation. *Journal of Ship Research*, 41(4), pp.260-272.



안 중 우

백 부 근

박 영 하

설 한 신