

고용량 경사류용 동력계를 이용한 프로펠러 단독시험 특성의 실험적 연구

안중우[†] · 김기섭 · 박영하
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Experimental Study of the POW Characteristics using High-capacity Inclined-shaft Dynamometer

Jong-Woo Ahn[†] · Ki-Sup Kim · Young-Ha Park
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 Propeller Open Water (POW) characteristics for the high-speed propeller in Large Cavitation Tunnel (LCT), the high-capacity inclined-shaft dynamometer was designed and manufactured. Its measuring capacities of thrust and torque are $\pm 2200\text{N}$ and $\pm 120\text{N}\cdot\text{m}$, respectively. The driving motor is directly connected to the propeller shaft. Inclined angle of the propeller shaft can be adjusted up to $\pm 10^\circ$. As the pressure inside LCT can be adjusted in the range of 0.1~3.0bar, we can carry out the POW test at high Reynolds number (above 1.0×10^6) without propeller cavitation and the cavitation test in uniform flow. After the new dynamometer setup in LCT, the Reynolds number variation test and propeller open-water test were conducted at the inclined angle of 0° and 6° . The present POW results of the new dynamometer are compared with those of the existing high-capacity dynamometer in LCT and of the dynamometer in the towing-tank. Through systematic model tests and comparison with their results, the performance of the new inclined-shaft dynamometer was verified. It is thought the POW test for the high-speed propeller should be better conducted at high Reynolds number.

Keywords : High-capacity inclined-shaft dynamometer(고용량 경사류용 동력계), POW(프로펠러 단독시험), Uniform flow(균일류), Reynolds number effect(레이놀즈 효과), Large Cavitation Tunnel(LCT, 대형캐비테이션터널)

1. 서론

최근 함정 및 수중운동체 프로펠러의 경우 정도 높은 캐비테이션 재현 및 CIS(Cavitation Inception Speed) 성능 검증을 위하여 모형 프로펠러의 직경이 증가하는 추세이다. 특히 함정 CIS가 중요한 설계 사양으로 대두됨으로서 프로펠러 날개마다 캐비테이션이 처음 발생하는 조건이 거의 동일하려면 모형의 제작 정도가 우수하여야 하는 바, 모형 프로펠러를 되도록 크게 제작하는 것이 유리하다. 고하중이 요구되는 고속의 함정 프로펠러를 대직경(약 280mm)으로 제작하면서 예인수조에서 사용하는 프로펠러 단독시험 동력계 계측 용량이 문제가 될 수 있다. 이와 같은 계측 용량의 한계를 극복하여 높은 회전수에서 프로펠러 단독시험(POW)을 수행하고자 대형캐비테이션터널(LCT)용 단독

시험 동력계를 설계·제작하였다.

함정 프로펠러가 경사각을 가지고 설치됨에 따라 LCT에 설치할 새로운 동력계를 축 경사각 조절기능을 갖도록 설계하였다. 기존에 LCT에서 프로펠러 단독시험을 수행할 수 있는 고용량 시험장치를 제작한 바 있는데(Ahn et al., 2014), 시험부 상부 덮개를 설치할 수 없는 단점이 있었다. 프로펠러 회전수가 높아지면 프로펠러 캐비테이션이 발생하게 되는데, 기존의 동력계를 설치하는 경우에는 LCT 내부 압력을 조절할 수 없어 동력계의 용량을 충분히 사용할 수 없었다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 새로운 고용량 경사류용 동력계는 프로펠러 캐비테이션 발생시 LCT 내부 압력을 높여서 캐비테이션을 제거할 수 있도록 설계·제작하였다. 또한, LCT 내부압력 조절에 따라 균일류 중 경사각 변화에 따른 캐비테이션 관찰시험도 가능하다(Ahn et al., 2018).

함정 프로펠러를 대상으로 본 연구에서 개발된 새 동력계를 이용하여 단독시험을 수행하였다. 기존에 캐비테이션터널에서 경사류 프로펠러 캐비테이션에 의한 날개 변동력을 계측하거나 (Albrecht & Suhrbier, 1975), 캐비테이션 및 소음 특성 연구를 수행한 바 있다 (Aktas et al. 2016). 또한 경사류에서 프로펠러 후류 유동 특성을 분석한 연구 등이 수행된 바 있으나(Felli & Falchi, 2018), 대형캐비테이션 터널에서 예인수조 수준에 프로펠러 단독시험을 수행한 적은 없었다. 우선 레이놀즈 수의 효과를 확인하기 위해 프로펠러 회전수를 저회전부터 고회전까지 단계적으로 변화시키면서 추력 및 토오크와 같은 물리량 변화를 조사하였다. 물리량 변화가 안정된 영역에서 프로펠러 단독시험을 수행하였으며, 예인수조 동력계 및 LCT 기존 동력계에서 계측된 결과와 비교하였다. 또한 측정각각 6°에서 단독시험을 수행하여 0°의 결과와도 비교를 수행하였다.

2. 고용량 경사류용 동력계

고용량 경사류용 동력계는 LCT에서 측정각각을 조절하여 고속 프로펠러의 단독시험(POW)을 수행할 수 있는 장비이다. 캐비테이션 시험을 위한 함정 프로펠러의 직경이 상선 프로펠러보다 더 커지면서 더욱 큰 용량의 동력계가 요구된다. 함정 프로펠러의 캐비테이션 시험을 수행해온 경험을 바탕으로 경사류용 동력계의 계측 용량을 Table 1과 같이 결정하였다. Table 1에는 설계사양도 표시하였는데, 축 경사각 조절범위는 설치 한계로 ±10.0° 정도이다. 당 연구소가 보유한 프로펠러 단독시험 동력계는 Table 2에 보인 것과 같이 예인수조용 1개, LCT용 2개인데, LCT용 동력계 2종의 용량이 예인수조용보다 매우 큰 것을 알 수 있다. LCT용 동력계 2종의 계측 용량 차이는 크지 않다. 기존(Existing) 동력계는 LCT 내부 압력을 조절할 수 없는 단점이 있었다.

Table 1 Specification of inclined-shaft dynamometer

Type		Underwater
Rated Capacity	Thrust (N)	±2200
	Torque (N-m)	±120
	Revolution (rpm)	±3450
Inclined shaft angle(°)		above ±10.0
Non-Linearity (% of F.S.)		±0.3
Hysteresis (% of F.S.)		±0.3
Repeatability (% of F.S.)		±0.2
Allowable Overload (% of F.S.)		±150

Table 2 Comparison of POW dynamometer capacity

Type	LCT		Towing Tank	
	Existing	Present		
Rated Capacity	Thrust (N)	±2000	±2200	±400
	Torque (N-m)	±100	±120	±15
	Revolution (rpm)	±3000	±3450	±3000

일반적으로 프로펠러 단독시험 동력계는 유선형의 축대칭 몸체로 구성되며 몸체 안에 추력 및 토오크를 계측할 수 있는 부품이 내장되고 수상에 설치된 구동모터의 동력을 전달하기 위하여 베벨기어 등이 설치되어 있다. 예인수조와 LCT에서 사용하 온 프로펠러 단독시험 동력계는 이와같은 구조를 가지고 있다. Fig. 1은 Kempf & Remmers 사의 H41 동력계를 개조한 기존의 POW 동력계를 보여준다. 구동모터가 동력계 상부에 직립으로 배치되어, 시험부 상부에 덮개를 설치할 수 없어서 LCT 내부 압력을 조절할 수 없다. 높은 레이놀즈 수에서 단독시험을 수행하려면 프로펠러 회전수를 높여야 하는데, 이 때 캐비테이션 발생으로 회전수를 높이는 데 한계가 있다. LCT 시험부의 최고 유속은 16.6m/s이고, 내부 절대 압력의 조절 범위가 0.1~3.5 bar 이므로 밀폐만 된다면 시험부 내부 압력을 높여 캐비테이션을 제거할 수 있다 (Ahn et al., 2015). 따라서 LCT의 특성을 이용하여 높은 레이놀즈 수에서 프로펠러 단독시험을 수행하기 위해서 새로운 동력계를 설계·제작할 필요가 있었다.

LCT 시험부 내부의 압력을 조절할 수 있도록 단독시험 동력계를 제작하려면, 시험부 수중에 설치되는 축대칭 몸체에 구동모터를 내장하여 프로펠러 회전축과 직결시키는 구조가 필요하다. 동력계 시스템의 구성이 간단하고 소음 측면에서 유리하지만 구동모터 외부 수중몸체의 직경 및 길이가 증가하는 단점이 있다. 함정용 프로펠러 단독시험을 위한 구동 모터의 용량은 캐비테이션 시험시 사용하는 것과 같은 용량이 요구된다. LCT에서 함정 프로펠러 캐비테이션 시험시 사용하는 구동모터는 45 kW 수중모터이고, 직경은 약 138mm이며, 길이가 약 1,557mm 이다. 직경에 비해 길이가 큰 모터 형상 때문에 동력계 수중몸체를 유선형으로 구성하는데 유리한 점이 있다. Fig. 2는 경사류용 동력계 수중 몸체를 보여준다. 수중몸체 내부에는 우측부터 수중모터, 프로펠러 동력계, 프로펠러 회전축이 직결되어 있으며, 좌측 끝에 프로펠러가 설치된다. 프로펠러 단독시험시 프로펠러에 균일류 유입을 위하여 좌측에서 우측으로 유동이 흐르게 된다. 따라서 수중몸체의 직경이 커지고, 길이가 길어져도 프로펠러 단독시험을 수행하는 데는 문제는 없을 것으로 사료된다. 일반적으로 LCT에서 모형시험시 Solid Blockage를 약 10% 미만으로 보는데(Ahn et al., 2012), Fig. 3에 나타낸 바와 같이 경사류용 동력계 수중몸체를 LCT 시험부에 설치할 경우 Solid Blockage가 약 2.5% 미만이다. 기존에 중형캐비테이션 터널에서 단독시험을 수행한 바 있는데(Kim et al, 2000a), 벽면 효과(wall effect)로 인한 다양한 상관계수가 요구되는 문제가 있었다.

수중몸체는 날개 형상을 가진 스트럿에 연결되어 트렁크 상부의 동력계 고정장치에 조립된다. 동력계 고정장치에는 측정각각 조절 장치가 설치되어 있는데, 스트럿은 이 장치와 연결되어 수중몸체의 경사각을 조절할 수 있다. 내장된 구동모터는 수중 용으로 냉각이 요구되어, 냉각수가 몸체 내부에서 강제 순환되도록 하였다. 구동모터와 프로펠러 동력계 배선 및 냉각수 공급 관로는 스트럿에 가공된 6개의 통로를 통하여 연결된다.

LCT 시험부에 측정각각이 0°와 6°로 설치된 경사류용 동력계

는 Fig. 3에서 볼 수 있다. 수중몸체와 연결 스트럿은 시험부에 설치되며, 동력계 고정장치 및 축경사각 조절장치는 시험부 상부 트렁크에 설치된다. 시험부 상부와 트렁크 경계면에는 15mm 두께의 PE 판재를 설치하여 유동 교란의 문제가 없도록 하였다. 각도조절은 스트럿을 고정한 조절장치의 막대나사 높이를 조절하여 몸체 전체의 각도를 조절하는데, 각도조절 후 안전을 위하여 2개의 각도 고정장치가 설치되어 있다. 장치 설치 및 축경사가 조절이 종료되어 트렁크 상부 덮개를 설치하면 시험부의 내부 입력을 조절하면서 프로펠러 단독시험을 수행할 수 있다. Fig. 4는 시험부에 설치된 수중몸체 및 연결 스트럿의 사진을 보여주며, 시험부 상부에 설치된 PE 판재도 함께 나타내었다.

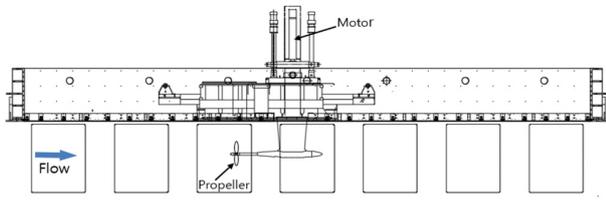


Fig. 1 The existing POW dynamometer installed in LCT

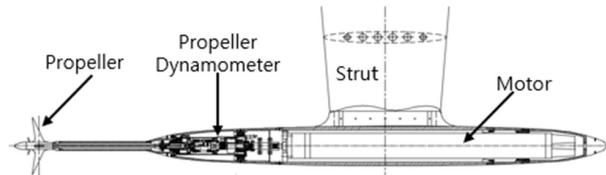


Fig. 2 Submerged body of inclined-shaft dynamometer

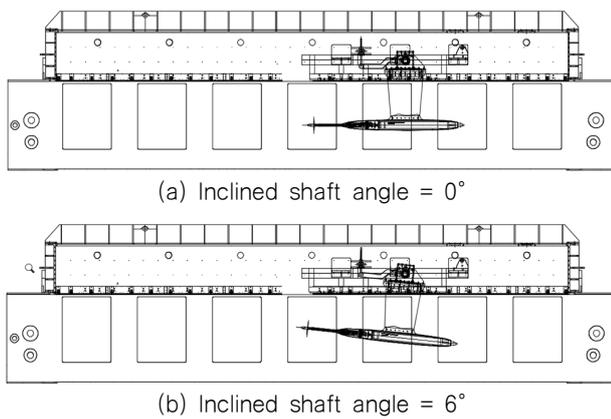


Fig. 3 Inclined-shaft dynamometer installed in LCT

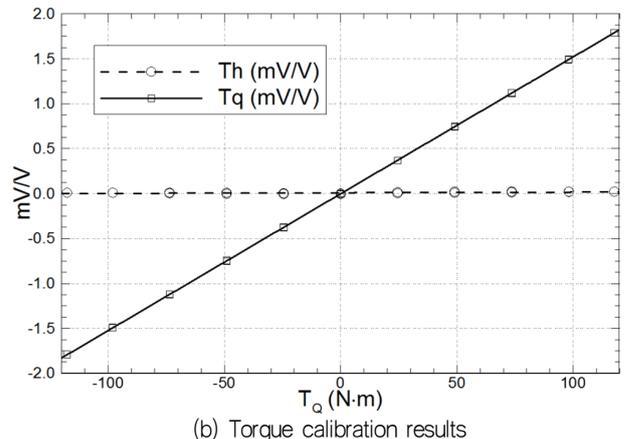
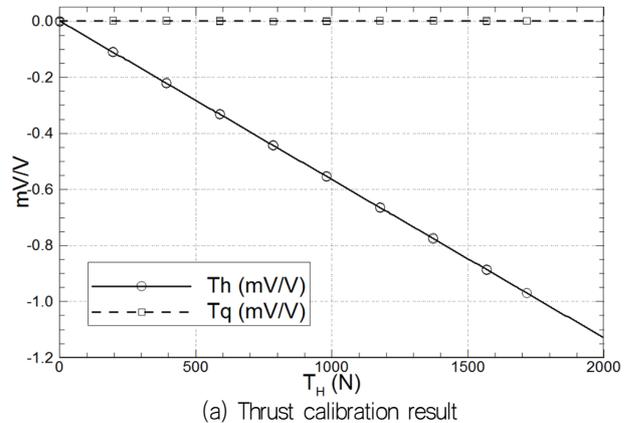
경사류용 동력계의 조립에 앞서, 수중몸체 안에 내장된 일반 프로펠러 동력계 성능 검증을 위하여 Fig. 5와 같이 동력계 캘리브레이션을 수행하였다. 예인수조와 LCT에서 사용해온 기존의 단독시험 동력계와 달리, 새로운 경사류용 동력계는 추력과 토크의 계측을 위한 별도의 프로펠러 동력계를 제작하여 내장하였다. 형상 및 용량은 합정 프로펠러의 캐비테이션 시험 시 사용되는 프로펠러 동력계와 동일하다. 이와 같이 동력계 및 구동모터를 별도로 구입하여 내장형으로 구성하면서 유지보수에 유리한



Fig. 4 Submerged body & strut for inclined-shaft dynamometer



(a) Thrust (b) Torque
Fig. 5 Calibration of propeller dynamometer



(a) Thrust calibration result (b) Torque calibration results
Fig. 6 Calibration results for propeller dynamometer

점이 있다. Fig. 6(a)는 추력(T_H) 캘리브레이션 결과를 보여준다. 하중에 대한 계측신호의 선형성(linearity), 반복성(repeatability) 등이 매우 좋은 것으로 나타났다. 또한 추력 캘리브레이션 시 토오크에 반응신호가 거의 없어 추력과 토오크 간에 간섭은 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 6(b)는 토오크(T_Q) 캘리브레이션 결과를 보여준다. 추력과 같이 계측신호의 선형성(linearity), 반복성(repeatability) 등이 매우 좋으며, 추력에 반응신호가 거의 없는 것으로 나타났다. 프로펠러 동력계의 우수한 계측 특성을 확인한 다음 경사류용 프로펠러 단독시험 장치를 조립하였다.

3. 고하중 프로펠러 단독시험

레이놀즈수(Rn) 변화가 프로펠러 단독시험에 미치는 영향은 이미 연구된 바 있는데(Kim et al., 2000a), 예인수조에서 $Rn \geq 5 \times 10^5$ 의 영역에서 시험을 수행하면 안정된 계측치를 보여준다고 언급한 바 있다. 이 연구에서 사용된 모형 프로펠러의 평균 피치비는 0.935 이하였다. 이전에 ITTC는 2×10^5 이상에서 수행하는 것을 권고하기도 하였다. 추후 Kim 등(2000b)이 예인수조에서 계열(series) 프로펠러를 대상으로 레이놀즈수(Rn) 변화에 대한 영향을 수행해 본 결과, 평균 피치비 1.1인 프로펠러의 경우에는 $Rn \approx 5 \times 10^5$ 근처에서 안정된 계측치를 주지 못하고 추력 및 토오크가 계속 증가하는 경향을 보였다. 피치가 이보다 큰 프로펠러의 경우는 예인수조의 프로펠러 단독시험 동력계 용량 한계로 충분한 조사를 수행하지 못하였다. 본 연구에서 프로펠러 단독시험 대상으로 선정한 프로펠러는 함정용 프로펠러로서 Table 3과 같은 제원을 가지고 있다. 평균피치비가 1.3646으로 일반 상선 프로펠러에 비해 큰 값을 가지고 있다. 모형 프로펠러 직경(D)도 일반 상선 프로펠러 기준 직경(약 250mm)보다 크게 제작됨으로서 안정적 영역에서 단독시험을 수행하기 위해서는 고용량 동력계가 요구된다.

시험 대상인 고속 프로펠러의 단독시험을 수행하기 전에 Rn 변화에 대한 물리량 변화를 조사하였다. 측정사각(β) 0° 와 6° 에 대하여 조사를 수행하였는데, 설치 상태는 Fig. 3과 Fig. 4에 보인 것과 같다. 함정 프로펠러의 축 경사각은 $3^\circ \sim 5^\circ$ 이나, 균일류 중 프로펠러 단독특성의 변화를 조사하기 위하여 6° 로 선정하였다. 대상 프로펠러의 운항 전진계수(J) 범위가 $1.13 \leq J \leq 1.19$ 이고 순항 조건에서 $J \approx 1.17$ 이므로 순항 조건에서 Rn 효과를 조사하였다. 여기서, Rn 은 0.7R에서의 코오드를 기준으로 산정된다. 일정한 전진계수에서 프로펠러 회전수를 3.1~32.2RPS, LCT 시험부 유속을 1.0~10.0m/s로 변화시키면서 일정한 전진계수에서 프로펠러의 추력 및 토오크를 계측하였다(Fig. 7). 이때, Rn 의 범위는 $0.22 \times 10^6 \sim 2.24 \times 10^6$ 이며, 프로펠러 단독효율(η_o)은 전진계수, 추력 및 토오크 값을 가지고 계산된다. 시험부 벽면효과를 고려하기 위하여 유속분포 계측결과를 기반으로 프로펠러 면에서 유속증가를 0.5% 고려하였다. Fig. 7은 모형 프로펠러의 실험 후 허브수정(Hub correction)을 수행한 값이다. 단독효율의 경우 $Rn \approx 0.8 \times 10^6$ 까지 급격히 증가하다가 $Rn \approx 1.0 \times 10^6$ 부터 안정된 값을 보여준다. 앞서 언급한 연구에서 Rn

$\geq 0.5 \times 10^6$ 영역에서 안정적인 값을 갖는다는 것이 본 연구에서 선정한 고속 프로펠러에서는 더 이상 타당하지 않음을 알 수 있다. Fig. 7에는 예인수조와 LCT에서 서로 다른 3종의 단독시험 동력계를 이용하여 수행한 POW 시험의 프로펠러 회전수를 표기해 놓았다. 예인수조에서 수행한 단독시험은 물리량이 불안정한 영역에서 수행되는 것으로 나타나 토오크가 약간 크게 계측될 가능성이 있다. 측정사각 변화에 따른 프로펠러 단독성능의 특성을 살펴보면, $Rn \geq 0.6 \times 10^6$ 영역에서 측정사각이 6° 에서의 추력 및 토오크가 0° 의 경우보다 약간 증가하였으며, 효율도 증가하는 것으로 나타났다.

Table 3 Principal particulars of model propeller

Item	
Diameter, D (mm)	272.7
Mean pitch, (P/D)mean	1.3646
Chord at 0.7R, C0.7R (mm)	115.9
Expanded area ratio, (AE/AO)	0.7649
No. of blades	5

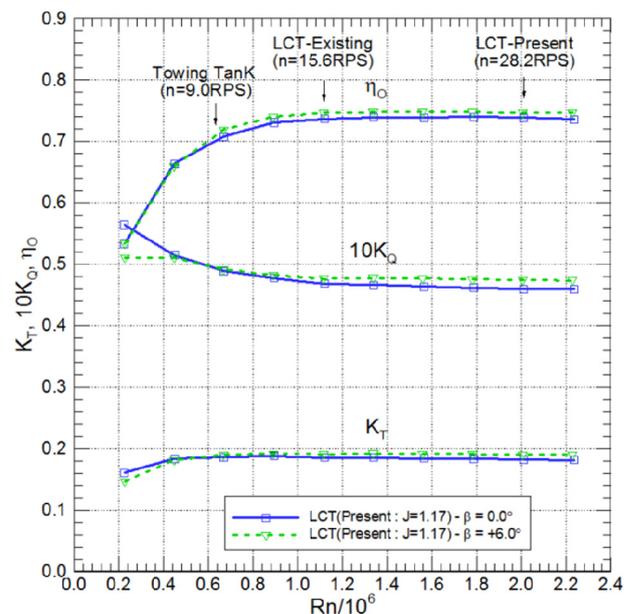


Fig. 7 Rn variation at $J = 1.17$ (model test)

모형시험 단계에서는 Rn 에 따라 계측된 추력 및 토오크 값에 차이가 나타난다. Fig. 8은, ITTC 1978 방법에 따라서 Fig. 7의 모형시험 결과를 확장하여 추정한, 실선 프로펠러 추력 및 토오크 계수와 단독효율을 보여준다. 실선 확장 후에는 거의 일정한 값이 도출될 것으로 예상되었으나, 상대적 차이가 조금 줄었을 뿐, 모형시험의 경향을 그대로 보여주고 있다. 따라서 Rn 변화에 따른 추력 및 토오크 계수 변화가 거의 일정한 영역에서 단독시험을 수행하고 이를 이용하여 실선프로펠러 추력 및 토오크 계수를 구해야만 타당한 결과를 얻을 수 있다고 사료된다. LCT에서 2종의 단독시험 동력계를 사용하여 $Rn \geq 1.0 \times 10^6$ 영역에서 계측한 결과는 상당히 유사하다. 그러나 예인수조에서 낮은

프로펠러 회전수로 수행한 $Rn \approx 0.62 \times 10^6$ 조건에서는 토오크가 증가하여 실선 프로펠러 효율이 약 2% 정도 작게 추정되었다. 예인수조에서 수행한 프로펠러 단독시험의 효율이 LCT에서 수행한 효율보다 일관되게 낮게 추정될 것으로 사료된다. 함정 프로펠러의 개발시 최종프로펠러가 확정되기 전까지 기존 자항시험 결과에 프로펠러 단독시험 결과만 변경하여 운항조건을 도출한다. 단독시험 결과에 따라 운항조건이 변경되므로 성능해석시 고려할 필요가 있다.

대상 함정 프로펠러의 단독시험을 본 연구에서 개발한 고용량 경사류용 동력계를 이용하여 수행하였다. Fig. 3과 같은 설치상태로 축경사각(β) 0° 와 6° 에서 모형시험이 수행되었는데, 프로펠러 회전수는 28.2RPS로 고정하였다. 프로펠러 회전수가

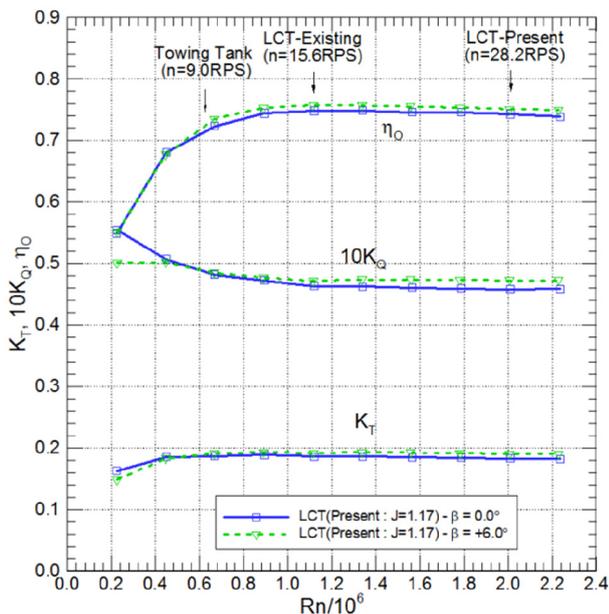


Fig. 8 Rn variation at J = 1.17 (full-scale)

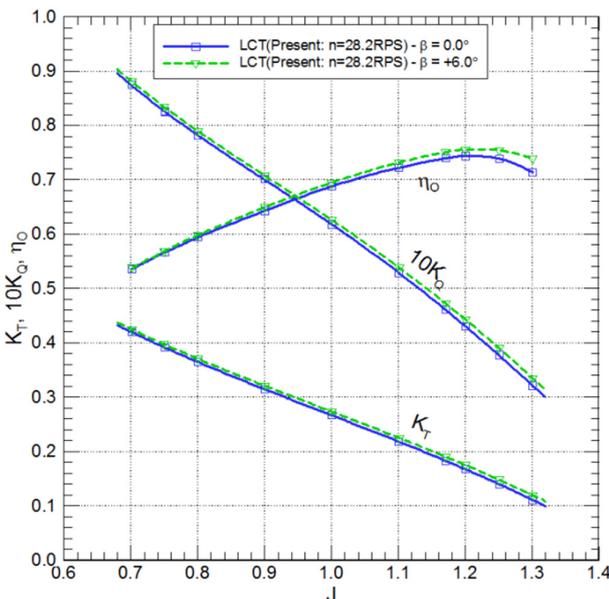


Fig. 9 Model POW results (present dynamometer)

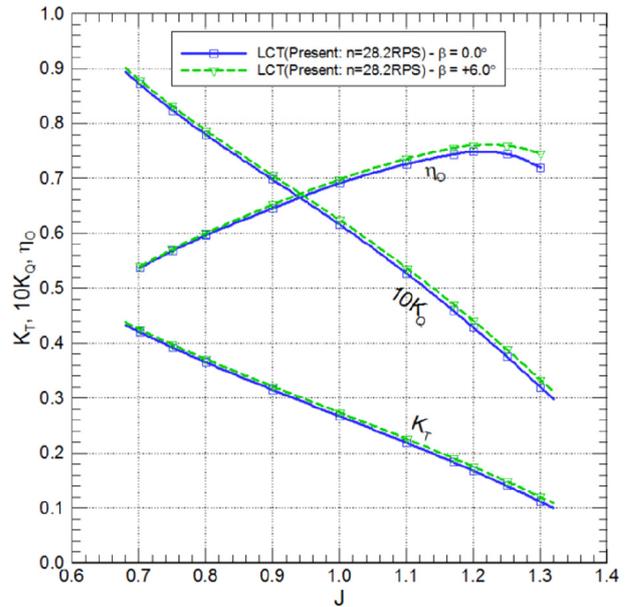


Fig. 10 Full-scale POW results (present dynamometer)

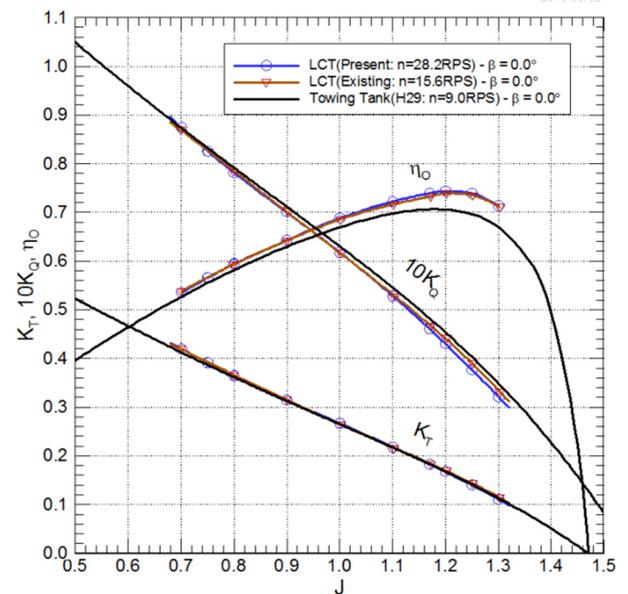


Fig. 11 Comparison of model POW results

높아짐에 따라 프로펠러 캐비테이션이 발생하므로 LCT 시험부 입력을 조절하여 캐비테이션이 발생하지 않는 상태에서 모형시험을 수행하였다. 이 때 축 중심에서 프로펠러 회전수로 계산된 캐비테이션 수($\sigma_{n,center}$)는 3.2~4.4 였다, 모형시험 결과는 Fig. 9에 보였다. 축경사각 6° 에서의 추력 및 토오크가 전 영역에서 0° 보다 크게 나타났으며, 단독효율도 같은 경향을 보여준다. 모형시험 결과를 실선으로 확장한 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 실선 확장 후, 추력계수는 거의 변하지 않으나, 표면 마찰 감소로 토오크계수가 약간 감소함으로써 실선 프로펠러의 단독효율은 모형보다 약 0.5% 정도 증가한다. 축경사각 6° 일 때, 단독효율은 운항 전진계수(J) 범위($1.13 \leq J \leq 1.19$)에서 0° 에서보다 약 1% 정도 증가하는데, 그 원인은 프로펠러 유효 전진계수의 차이 때문으로 사료된다. 그러나, 성능 차이가 나타남으로써 축경

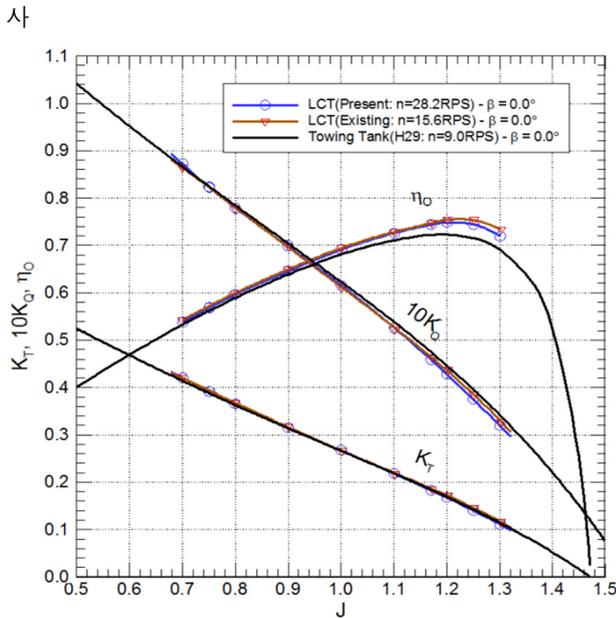


Fig. 12 Comparison of full-scale POW results

프로펠러의 성능해석시 동일한 축경사에서 수행한 프로펠러 단독시험 결과를 활용하는 방안을 고려할 필요가 있다.

예인수조 및 LCT 2종의 프로펠러 단독시험 동력계를 이용하여 수행한 대상 함정 프로펠러에 대한 모형시험 결과 비교는 Fig. 11에 나타나 있다. 추력계수는 유사하지만 토크 계수의 차이가 단독효율의 차이를 유발한다. 예인수조의 단독시험은 Fig. 7에서 보여주었듯이 낮은 Rn 에서 수행되어, 토크계수 및 단독효율이 전 영역에 걸쳐서 LCT의 결과와 확실한 차이를 보여준다. 반면 LCT에서 수행된 기존(Existing) 및 본 연구에서 활용한 경사류용 동력계(Present)의 실험 결과는 높은 전진계수 영역에서만 약간의 차이를 보여준다. Fig. 7에서 프로펠러 회전 수 차이에 의한 물리량의 차이가 거의 나타나지 않았듯이 두 시험장치에서 계측된 추력 및 토크 계수는 큰 차이를 보이지 않는다. 각각의 모형시험 결과를 실선 프로펠러의 값으로 확장하여 추정된 결과는 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 예인수조와 LCT 2종의 차이는 모형시험에서의 차이보다 조금 줄어든 것으로 나타난다. 모형시험의 단독효율은 3% 이상 차이가 났지만 실선 프로펠러의 단독효율은 약 2.5% 정도의 차이가 난다. 실선 확장 후, LCT 2종의 단독 효율 차이는 0.4% 이내로. 동력계 장비에 상관없이 $Rn \geq 1.0 \times 10^6$ 영역에서 실험한 경우의 단독시험 결과는 거의 차이가 없음을 보여준다. 이에 반해, 토크계수가 급격히 변화하는 영역인 $Rn = 0.62 \times 10^6$ 조건에서 수행된 예인수조 단독시험은 실선 확장 후에도 단독효율이 여전히 작게 추정되는 결과를 보여준다.

전진계수 1.17에서 계측된 추력 및 토크 자료를 이용하여 불확실성 해석을 Choi et al.(1994)이 제시한 방법에 따라 수행하였다. 추력계수와 토크 계수의 불확도(Uncertainty)는 기존 동력계에서 0.42%와 0.38%로 나타났으며, 경사류용 동력계에서는 0.46%와 0.38%로 나타났다. 장비의 특성은 우수한 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 경사류용 프로펠러 단독시험 동력계를 이용하여 높은 Rn 에서 수행한 모형시험과 기존의 동력계를 이용한 모형시험 결과는 실선 확장 후에 거의 차이를 보이지 않았다. 캐비테이션의 발생을 막을 수 없어서 높은 Rn 영역에서 프로펠러 단독시험을 수행할 수 없는 것이 기존 동력계의 문제인데, $Rn \geq 1.0 \times 10^6$ 영역에서 프로펠러 단독시험을 수행할 수 있다면 실선성능 추정에 문제가 없다고 사료된다.

4. 균일류 중 프로펠러 캐비테이션 시험

본 연구에서 개발한 경사류용 동력계의 차별화된 특성은 균일류 중에서 축경사 프로펠러의 캐비테이션 시험이 가능하다는 것이다. Fig. 13은 축경사각(β) 0° 와 6° 에서 관찰된 캐비테이션을 보여준다. 시험조건은 압력면에서 캐비테이션이 생길 수 있는 조건을 선택하였으며, 이때 추력계수(K_T)는 0.1058, 축 중심에서의 캐비테이션 수 ($\sigma_{A,center}$)는 0.92이다. 축경사각 0° 에서는 압력면과 흡입면에 root 캐비테이션이 주로 발생하는 특이한 현상이 나타난다. 일반적으로 함정 프로펠러가 경사된 축에 설치되어 유입하는 상방유동(upward flow)으로 인해서 root 캐비테이션이 발생하는 것으로 알려져 있었는데, 발생 요인의 하나가 함정 프로펠러 root 부분의 형상이라고 사료된다. 축경사각 6° 에서는 압력면과 흡입면의 root 캐비테이션이 0° 에서보다 증가했으며, 입력면 앞날 캐비테이션과 tip vortex 캐비테이션이 확실하게 발생한 것을 볼 수 있다. 균일류 중에서 캐비테이션 시험을 수행할 수 있다는 것은 프로펠러 성능해석 기법을 개발하는데 중요한 역할을 할 수 있다. 또 구동모터를 직결함으로써 기존 동력계들이 채용하고 있는 베벨기어에 의한 배경소음을 제거할 수 있어서 균일류 중 소음 시험에도 활용이 가능하리라 사료된다.

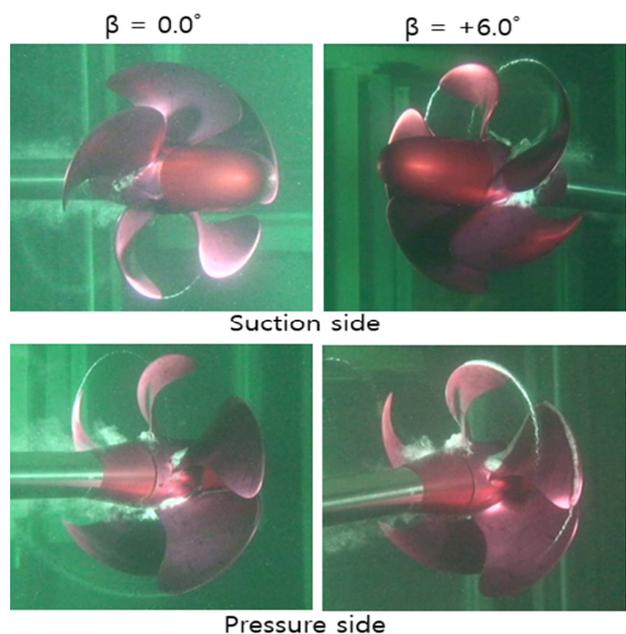


Fig. 13 Cavitation observation at uniform flow.

5. 결론

함정 등에 채용되는 고속 프로펠러의 단독시험을 높은 Rn 에서 수행하고자 LCT용 경사류용 동력계를 설계제작하였으며, 캘리브레이션을 통한 검증을 수행하여 추력 및 토크 간에 상호 간섭이 없는 우수한 성능을 확인하였다. 프로펠러 동력계 검증 후 구동모터, 프로펠러 축계 등이 유선형 수중몸체 내부에 조립되었으며, 수중몸체는 날개형 스트럿에 연결되어 상부 고정장치에 나사로 체결된다. 측정사각의 조절이 가능한 경사류용 동력계를 LCT 시험부에 설치해서, 측정사각(β) 0°와 6°에서 Rn 효과 조사 실험, 함정 프로펠러 단독시험 및 캐비테이션 시험을 수행하였다.

경사류용 동력계를 이용하여 $Rn > 2.2 \times 10^6$ 영역까지 Rn 효과를 조사한 결과, $Rn \geq 1.0 \times 10^6$ 영역에서 추력 및 토크 계수와 단독효율이 안정적으로 측정되었으며, 예인수조에서 단독시험이 수행된 $Rn \approx 0.62 \times 10^6$ 부근에서는 물리량들이 변화하는 경향을 보여준다. 또한, 모형시험 측정치를 실선으로 확장시켜 추정된 결과도 Rn 변화에 대한 값의 차이가 줄었을 뿐, 모형시험의 경향을 그대로 가지고 있는 것으로 나타났다. 경사류용 동력계를 이용한 프로펠러 단독시험은 측정사각(β) 0°와 6°에 대해 $Rn \geq 2.0 \times 10^6$ 조건에서 수행되었다. 측정사각 차이에 의한 프로펠러 단독시험 결과는 측정사각 6°에서의 단독효율이 0°보다 높게 측정되었다. 함정 프로펠러 등의 단독시험시 측정사각을 적용할 지는 추후에 고려해 볼 사항이라 사료된다.

예인수조와 LCT의 두 동력계에서 수행된 단독시험 결과를 비교해 보면, 경사류용 동력계를 이용하여 수행한 Rn 효과 조사 실험에서 확인된 경향이 그대로 나타났다. LCT에서 2종의 동력계를 이용하여 수행한 단독시험으로부터 추정된 실선 프로펠러 성능은 거의 차이가 없었으나, 예인수조 단독시험을 통한 결과에서는, 실선 프로펠러 단독효율이 운항 조건에서 약 2.5% 정도 작게 나타났다. 따라서, 피치비가 1.0이 넘는 고속 프로펠러에 대해서는 레이놀즈 수 1.0×10^6 이상의 조건에서 단독시험을 수행할 것이 요구된다.

본 연구에서 개발한 경사류용 동력계를 이용해서 균일류 중에서 측정사각을 조절하여 프로펠러 캐비테이션 시험이 수행함으로써 함정 프로펠러의 root 캐비테이션 발생원인을 파악하였다. 균일류 중에서 프로펠러 캐비테이션 시험을 수행할 수 있다는 것은 추후에 프로펠러 성능해석 기법을 개발하는데 중요한 역할을 할 수 있다. 또한, 현재의 경사류용 동력계는 구동모터가 직결됨으로서 동력전달 축계 배경소음이 줄어들 가능성이 높아 프로펠러 소음계측 및 해석을 위한 자료 축적에도 기여를 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부와 방위사업청이 지원하는 민군기술협력사업 민군기술개발과제 '선박용 CPP 캐비테이션 초생선

속 최적 설계기술 개발' 과제(PNS3230)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 the Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), pp.428-434.
- Ahn, J.W., Kim, K.S., Paik, B.G., Kim, G.D. & Seol, H.S., 2018. *Inclined-shaft propeller open-water test equipment that cavitation test is available in uniform flow*, Patent Number 10-1850013.
- Ahn, J.W., Kim, K.S. & Seol, H.S., 2014. *Manufacturing method for propeller open-water test device useable in Large Cavitation Tunnel*, Patent Number 10-1402573.
- Ahn, J.W. et. al., 2012. *Base Technology of Test Estimation for Propeller and Rudder Performance-Stage I*, KRISO Report, Project No 10033669.
- Aktas, B., Atlar, M., Turkmen, S., Korkut, E. & Fitzsimmons, P., 2016. Systematic cavitation tunnel tests of a propeller in uniform and inclined flow conditions as part of a round robin test campaign. *Ocean Engineering*, 120, pp.136-151.
- Albrecht, K. & Suhbier, K.R., 1975. Investigation on the fluctuating blade forces of a cavitating propeller in oblique flow. *International Shipbuilding Progress*, 22 (248), pp.132-147.
- 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.
- Felli, M. & Falchi, M., 2018. Propeller wake evolution mechanisms in oblique flow conditions. *Journal of Fluid Mechanics*, 845, 520-559.
- Kim, K.S., Kim, K.Y. & Ahn, J.W., 2000a. Experimental correlation analysis of propeller open-water characteristics at towing tank and cavitation tunnel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(1), pp.26-39.
- Kim, K.S., Kim, K.Y., Ahn, J.W. & Lee, J.T., 2000b. Effect of Reynolds number, leading edge roughness and air content on the cavitation performance of model propellers. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(1), pp.10-25.



안중우



김기섭



박영하