



대형 캐비테이션터널에서 펌프젯 추진기 단독성능 시험 및 해석 기법 연구

안종우[†]·설한신·정홍석·박영하
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Study of the Open-Water Test and Analysis for a Pumpjet Propulsor in LCT

Jong-Woo Ahn[†]·Han-Shin Seol·Hong-Seok Jung·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 study the open-water test and analysis techniques for pumpjet propulsors in the Large Cavitation Tunnel (LCT), at the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, a set of test equipment was designed and manufactured. The pumpjet propulsor is composed of rotor, stator and duct resulting in the strong interaction between the components. A ring-shaped sensor was developed to measure the thrust and torque for duct and stator. The test equipment including the pumpjet is installed on an existing POW dynamometer in the reverse direction. The results from the reverse POW test setup were validated against those from the conventional POW test setup in the Towing Tank (TT) as well as in the LCT. The pumpjet open-water test was conducted at the Reynolds number of around 1.0×10^6 , at which the obtained experimental data became stable in the Reynolds number effect test. The open-water test for the rotor (rotor-only) was conducted to study whether the duct and stator should be considered as a part of the hull or the propulsor. On the basis of the test results, it was shown that the duct and stator could be included in the propulsor. The total thrust, combined thrust of rotor, duct, and stator was used for the pumpjet open-water test analysis. As the whole pumpjet is defined as a propulsor, it is thought that the self-propulsion test and analysis could be conducted in the same way as that of the conventional propeller.

Keywords : Pumpjet propulsor(펌프젯 추진기), Pumpjet open-water test(펌프젯 단독시험), Duct & stator sensor(덕트 및 스테이터 센서), Reverse POW(역방향 단독시험), Large Cavitation Tunnel(LCT, 대형캐비테이션터널)

1. 서 론

최근 잠수함 및 어뢰 등의 국내 개발이 수행되면서 추진장치로서 펌프젯(pumpjet)의 개발이 요구되고 있다. 펌프젯은 덕트, 스테이터 및 로터로 구성되며 스테이터 설치 위치에 따라 Fig. 1과 같이 전류 스테이터(pre-swirl stator)와 후류 스테이터(post-swirl stator) 펌프젯으로 구분될 수 있다. 펌프젯은 스테이터 위치 및 덕트 형상에 따라 특성 차이가 있지만 일반 프로펠러보다 추진 효율, 캐비테이션 및 소음 성능이 향상된다고 알려져 있다. 그러나 이러한 성능 향상도 펌프젯이 최적으로 설계되었을 때 가능하며, 최적 설계를 위하여는 모형시험을 통한 성능 평가가 정교하게 수행되어야 한다. 펌프젯은 앞서 언급한 3가지 장치로 구성된 바 장치 간에 상호 작용도 매우 크게 나타난다, 따라서, 장치별 각각의 성능을 파악할 수 있는 모형시험이

수행되어야 하는 바, 아직까지 적합한 시험 장치 및 기법이 개발되지 않은 상황이다. 일반적으로 추진장치의 성능 평가를 위하여는 추진장치 자체의 단독시험(POW : Propulsor Open-Water)과 모형선에 추진장치를 설치하여 시험하는 자항성능시험이 수행되어야 한다. 프로펠러 추진 잠수함 및 어뢰와 같은 수중운동체 등은 성능 시험기법이 정립되어 있지만 (Ahn et al., 2021) 덕트가 포함된 복합 추진장치의 시험법은 거의 정립되어 있지 않은 상황이다. 일반 프로펠러 추진과 같이 ITTC에서 제시한 표준 성능 추정기법으로 실선 성능을 추정하려면 우선 펌프젯 단독성능 시험이 수행되어야 한다.

수중운동체의 경우 소음 성능이 매우 중요하므로 본 연구에서의 펌프젯은 캐비테이션 및 소음성능이 우수하다고 알려져 있는 전류 스테이터와 감속 덕트 (decelerating duct)를 적용하여 설계하였다 (Renilson, 2015). 전류 스테이터 펌프젯은 덕트와 스테이터가 결합되고 스테이터는 선체에 설치하게 된다.

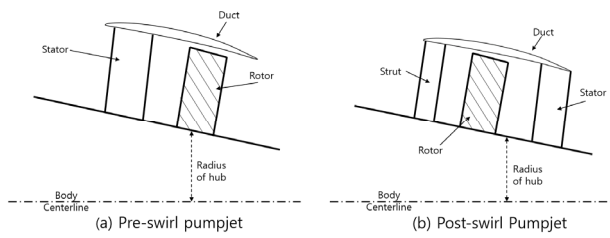


Fig. 1 Configuration of pre-swirl and post-swirl pumpjets

대형캐비테이션터널에서는 추진장치 단독시험을 수행하기 위한 2종 동력계를 보유하고 있다 (Ahn et al., 2019). 이중 H41 동력계는 수중몸체가 작아 Fig. 2와 같이 순방향(Normal)과 역방향(Reverse) 단독시험이 가능하다 (Ahn et al., 2014). 일반적인 단독시험은 프로펠러 상류에서 균일류(uniform flow)가 유입되는 순방향으로 수행되어야 하지만 프로펠러 캡 하류 유동이 중요한 PHVC(Propeller-Hub Vortex Control) 장치 등은 역방향으로 단독시험을 수행하는 것이 유리하다. Park 등은 PHVC 개발을 위한 CFD 해석을 수행하면서 대형캐비테이션터널에서 역방향으로 수행된 단독시험 결과와 비교를 수행하였는데 이때 시험 결과는 PHVC 장착 유무에 따른 성능차이를 보여주었다 (Park et al., 2016). 전류스테이터 펌프젯의 경우 스테이터가 선체에 설치되어야 하는 구조이므로 순방향 설치는 매우 어려운 상황이다. 특히 펌프젯 전체의 성능을 검증하기 위하여 스테이터 및 덕트에 걸리는 추력 및 토크를 계측해야 하는 경우 순방향 설치는 더욱 어렵다. 따라서 역방향으로 설치하면서 스테이터 및 덕트의 추력(항력) 및 토크를 계측할 수 있는 센서를 설계·제작하였다.

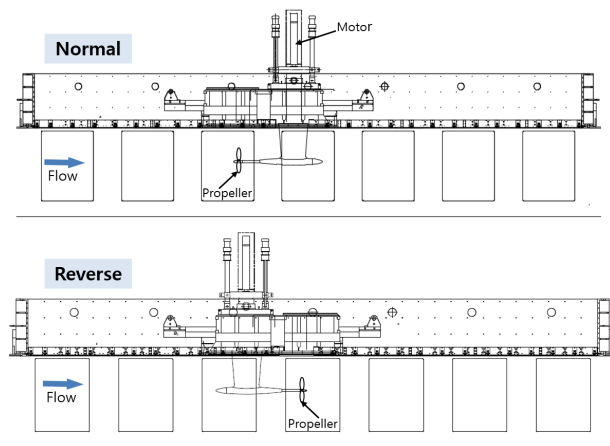


Fig. 2 H41 dynamometer installation in LCT

전류 스테이터 펌프젯을 대상으로 본 연구에서 개발된 덕트 및 스테이터 추력 및 토크를 계측할 수 있는 센서와 기존 H41 동력계를 이용하여 단독시험을 수행하였으며 추진 장치별 상호 작용에 의한 특성을 파악하였다. Yu 등은 로터 날개끝 간격 (tip clearance) 및 스테이터 입사각도 변화에 따른 단독성능 및 변동압력을 수치적으로 해석하면서 검증을 위하여 전류스테이터 펌프젯 단독성능 시험을 수행한 바 있다 (Yu et al., 2019,

2020). Li 등도 전류 스테이터 펌프젯을 대상으로 펌프젯 후류에 생성되는 보오텍스 유동을 다양한 수치적 방법으로 해석하면서 검증을 위하여 단독시험을 수행한 바 있다 (Li et al., 2020). 기존 연구에 의하면 펌프젯 단독성능시험은 수치해석 기법 검증을 위하여 수행되었다. 본 연구에서는 수치해석 기법 개발뿐만 아니라, 자항성능 해석 및 실선성능 예측을 위한 자료로도 활용하기 위하여 역방향 단독시험의 타당성을 검토하였으며, 추력 및 토크 등의 물리량이 안정된 레이놀즈 수에서 시험을 수행하였다. 레이놀즈 수 효과은 유속 및 로터 회전수를 변화시키면서 추력 및 토크 등의 물리량 변화를 조사하였다. 펌프젯과 로터만의 2가지 단독성능시험을 수행하여 특성을 비교하였으며, 덕트 및 스테이터가 선체 또는 추진장치로 간주하여 하는지를 조사하였다.

2. 펌프젯 단독시험 장치

펌프젯 단독성능 시험을 위하여 H41동력계를 순방향으로 설치될 경우 덕트의 안정적 고정을 위한 추가적인 스트럿이 2개 이상 설치되어야 한다. 이런 스트럿 등이 대형캐비테이션터널 벽면 등에 고정되어야 하므로 덕트 센터링 설치에 문제가 발생할 수 있으며, 덕트 외부에 유동을 변화시켜 성능 자체를 변화시킬 수 있다. 가장 큰 문제는 덕트에서 발생하는 추력 및 토크를 계측하기 어려운 문제가 발생한다. 로터의 경우 덕트와의 날개끝 간극(tip clearance)이 0.5~0.7 mm를 유지하면서 고속으로 회전하여야 하므로 덕트의 약간의 진동도 허용되지 않는다. 앞서 언급된 여러 가지 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 3과 같이 H41 동력계를 역방향으로 설치하여 펌프젯 단독시험 장치를 구성하고 성능시험법을 개발하였다. 역방향 설치가 되면서 다른 부가물 없이 덕트 및 스테이터를 H41 회전축케이스에 안정적으로 설치하였으며, 스테이터 허브에 수베어링 설치를 통하여

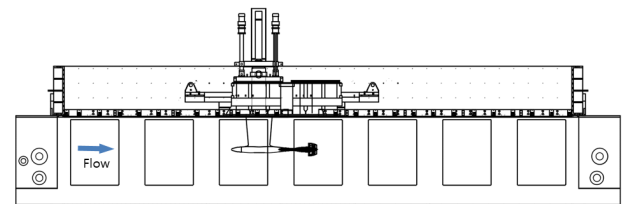


Fig. 3 Pumpjet open-water test setup installed in LCT

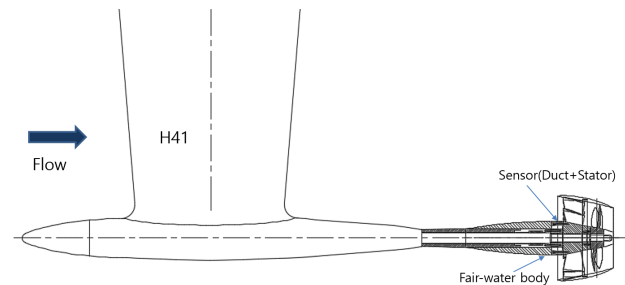


Fig. 4 Pumpjet installed on H41 dynamometer



Fig. 5 The photograph of the H41 dynamometer

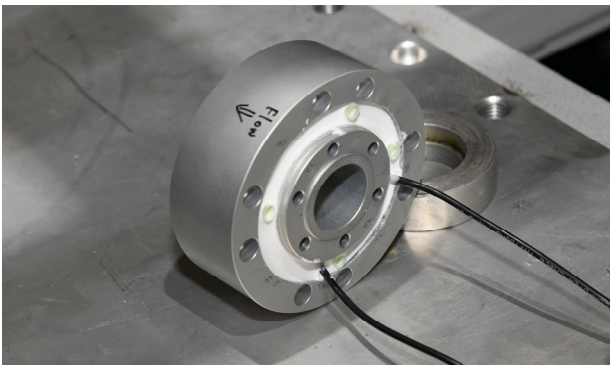
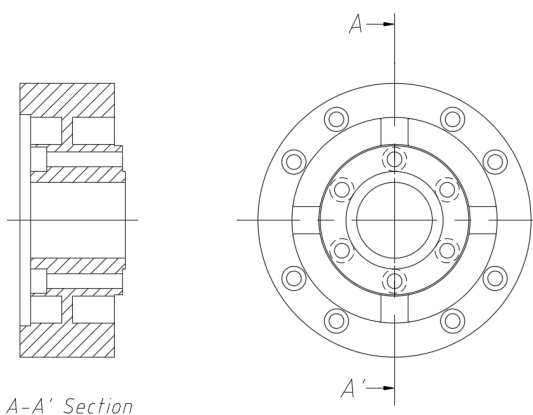


Fig. 6 Sensor for duct and stator measurement

Table 1 Specification of duct and stator sensor

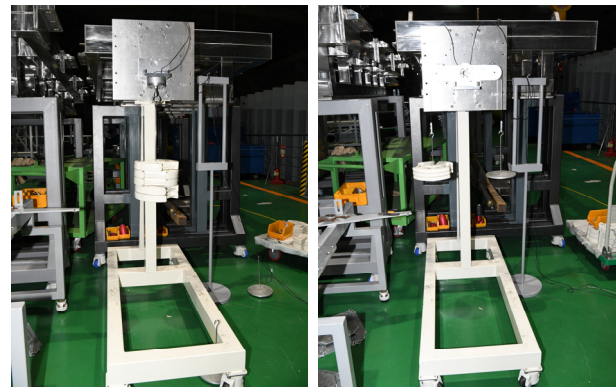
Type		Underwater
Rated capacity	Thrust (N)	± 500
	Torque (N-m)	± 30
Non-linearity (% of F.S.)		± 0.3
Hysteresis (% of F.S.)		± 0.3
Repeatability (% of F.S.)		± 0.2
Allowable overload (% of F.S.)		± 150



A-A' Section

Fig. 7 The inside of duct and stator sensor

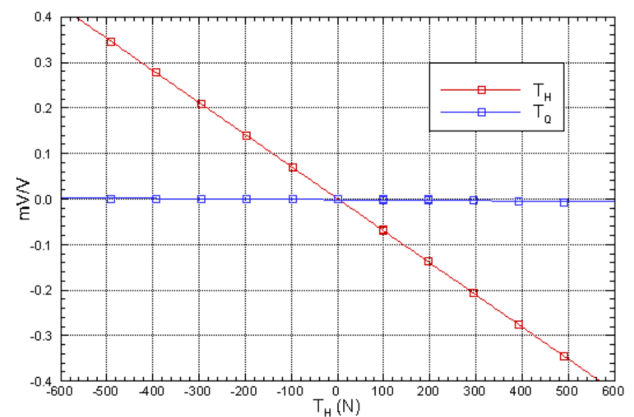
로터가 덕트와의 날개끝 간극을 유지하면서 고속으로 회전할 수 있도록 하였다. 로터 상류에 위치한 스테이터에 덕트가 고정되어 있는 점에 착안하여 덕트와 스테이터 추력 및 토크를 계측할 수 있는 동력계를 개발하였으며, 이를 스테이터 허브와



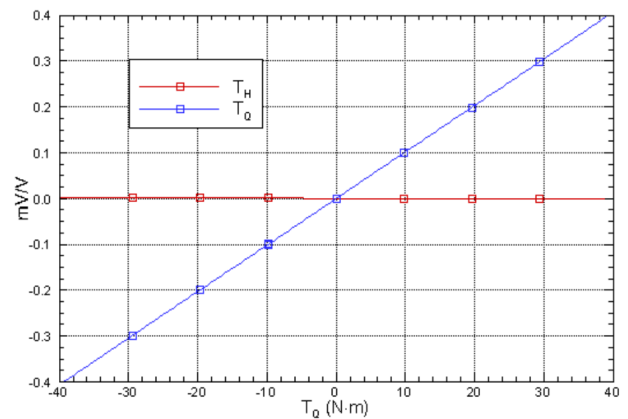
(a) Thrust calibration

(b) Torque calibration

Fig. 8 Calibration for duct and stator sensor



(a) Thrust



(b) Torque

Fig. 9 Calibration results for duct and stator sensor

연결하였다. 로터의 추력 및 토크는 H41 동력계에서 계측된다. Fig. 4는 H41에 설치된 펌프켓을 보여주며, Fig. 5는 관련 사진을 보여준다. 원활한 유동장을 형성하기 위하여 스테이터 허브 크기에 따른 Fair-water body가 스테이터 상류에 H41 동력계 회전축 외부 케이싱에 설치된다. Fig. 6는 덕트 및 스테이터 추력 및 토크를 계측하기 위한 센서이며, Fair-water body와 스테이터 허브 사이에 설치하였다. 덕트는 스테이터 날개끝에 나사로 고정되므로 스테이터 부분의 덕트는 알루미늄으로 제작하였으며, 로터 부분의 덕트는 캐비테이션 관찰을 위하여

투명 아크릴로 제작하였다. 두 재질로 제작된 덕트는 나사산을 만들어 조립하였다.

덕트 및 스테이터의 추력 및 토오크를 계측하기 위한 센서의 용량 및 특성은 Table 1에 나타나 있다. 계측 용량 결정은 기존 프로펠러 자항시험 계측 결과를 기반으로 결정되었다 (Ahn et al., 2021). 센서의 형상은 Fig. 6에 나타나 있으며, 내부 구조도는 Fig. 7에 나타나 있다. 센서 안쪽 나사부는 Fair-water body와 연결되고, 비깅쪽 나사부는 스테이터 허브와 연결된다. 추력 및 토오크 계측을 위한 스트레인 게이지 설치는 나사부들 사이에 위치한 4개의 기둥에 설치된다. 덕트 및 스테이터 센서의 성능 검증을 위하여 Fig. 8에서 보여지는 것과 같이 캘리브레이션을 수행하였다. 캘리브레이션은 추력(항력) 및 토오크로 나누어 수행된다. Fig. 9(a)는 추력(T_H) 캘리브레이션 결과를 보여주고 있다. 하중에 대한 계측신호의 선형성(linearity), 반복성(repeatability) 등이 매우 좋은 것으로 나타났다. 또한 추력 캘리브레이션시 토오크에 반응신호가 거의 없어 추력 및 토오크 간에 간섭은 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 9(b)는 토오크(T_Q) 캘리브레이션 결과를 보여주고 있다. 추력과 같이 계측신호의 선형성(linearity), 반복성(repeatability) 등이 매우 좋으며, 추력에 반응신호가 거의 없는 것으로 나타났다. 덕트 및 스테이터 센서의 우수한 계측특성을 확인한 후 펌프젯 단독시험 장치를 조립하였다.

3. 역방향 단독성능 시험의 타당성 검토

대형캐비테이션터널(LCT)에서 H41 동력계를 이용한 역방향 단독시험의 타당성 검증을 위하여 기존에 예인수조에서 단독성능 시험을 수행했던 프로펠러를 대상으로 H41 동력계에서 단독성능시험을 수행하였다. Fig. 10은 대형캐비테이션터널에 순방향(normal)과 역방향(reverse)으로 설치된 일반 프로펠러를 보여준다. 각각의 설치에 대하여 단독시험을 수행하였으며, 그 결과는 예인수조(TT-normal) 결과와 함께 Fig. 11에 나타나 있다. 순방향으로 수행된 예인수조 단독시험 결과는 대형캐비테이션터널 순방향과 일치한다. 역방향 시험결과는 순방향 시험 결과와 비교해서 추력계수에서 차이를 보여주며, 토오크 차이는 크지 않아 추력 감소로 인한 단독효율 감소가 크게 나타난다.

일반적으로 선박에 프로펠러가 장착되는 경우 허브 보오텍스(Vortex)가 캡(cap) 끝단에서 생성됨으로써 추력 감소가 발생한다. 앞서 언급된 PHVC는 캡 위치에 설치되어 허브보오텍스를 약화시켜 추력을 증가시킬 수 있는 장치인데, 단독시험 결과 추력이 1.3~2.2% 증가하였다 (Park et al., 2016). 순방향 프로펠러 단독시험의 경우 프로펠러 캡이 없이 회전축에 설치됨으로 허브보오텍스가 생성되지 않는다. 따라서, 역방향 설치보다 추력이 증가되는 것은 당연한 현상일 수 있다. 역방향으로 설치됨으로서 동력계 몸체 및 스트럿으로 인한 반류(wake)의 영향만 고려하면 유속 감소로 동일 전진계수에서 추력이 증가할 것으로 사료된다. 토오크는 약간 증가하는 경향이 있지만 반류 영향은

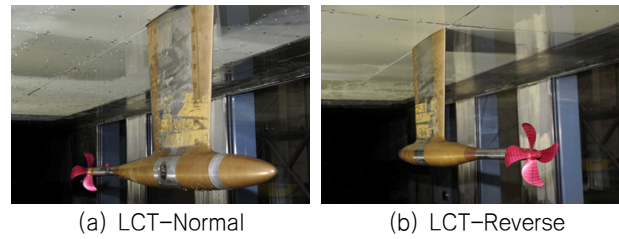


Fig. 10 POW test for the conventional propeller in LCT

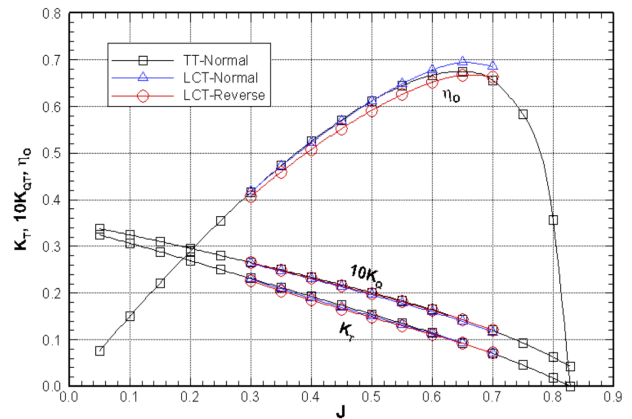


Fig. 11 Comparison of LCT and TT POW results

크게 나타나지 않는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 반류 특성 파악이 어려워 추후 CFD 계산을 통하여 반류 등의 영향을 조사해 보고자 한다. 전진계수(J) 0.5에서 역방향 추력은 순방향에 비하여 약 2% 감소하는데, PHVC 설치 유무에 따른 증감과 유사한 수준이다, 따라서, 역방향 설치도 비교적 타당한 결과를 도출하는 것으로 사료된다. 펌프젯의 경우 스테이터에 의한 후류 회전 유동 감소 효과가 있어 설계 관점에서는 역방향 실험이 성능 비교 차원에서 타당한 결과를 도출할 수도 있을 것으로 사료된다.

4. 레이놀즈 수 영향 검토

축척비가 20.0 이상되는 모형 펌프젯 단독시험을 수행할 경우 덕트 내부에서 로터가 작동함에 따라 덕트에 의한 점성유동 영향을 받아 실선 추정에 문제가 발생할 수 있다. 이런 문제를 해결하려면 높은 레이놀즈 수에서 단독시험이 수행되어야 한다. 펌프젯의 경우 추진장치(덕트, 스테이터, 로터) 간의 상호작용이 커서 로터의 추력 및 토오크가 일반 프로펠러에 비해 매우 증가될 수 있다.

단독시험은 Fig. 12에 펌프젯 자체와 Fig. 13의 로터만(rotor-only)을 설치한 상태 2가지가 수행된다. 2가지 방법으로 수행된 이유는 펌프젯 장치에서 덕트 및 스테이터를 선체에 포함시킬 것인지 아니면 추진기로 고려해서 해석해야 하는지를 검토하기 위함이다. 단독성능 시험에 앞서 레이놀즈수(Rn) 변화에 대한 영향을 검증하였다. 일반적인 프로펠러의 경우 예인수조에서 $Rn \geq 5 \times 10^5$ 의 영역에서 시험을 수행하면 안정된 계측치를 보여준다고 알려져 있다. 그러나, Kim 등 (Kim et al., 2000)이 예인수조에서 계열(series) 프로펠러를 대상으로 레이

놀즈수(Rn) 변화에 대한 영향 평가를 수행해 본 결과, 평균 피치비 1.1인 프로펠러의 경우에는 $Rn \approx 5 \times 10^5$ 근처에서 안정된 계측치를 주지 못하고 추력 및 토크가 계속 증가하는 경향을 보였다. 평균피치비가 1.3646인 기존 함정 프로펠러의 경우 $Rn \approx 1.0 \times 10^6$ 부터 안정적인 계측 값을 얻을 수 있었다 (Ahn et. al, 2019). 단독성능 시험이 수행된 펌프젯의 기본 제원은 Table 2에 나타나 있다. 펌프젯의 경우 덕트 내부에서 로터가 작동되며, 평균피치비도 1.0 이상이므로 레이놀즈수(Rn) 영향이 클 것으로 사료된다.

Fig. 14는 전진계수(J) 0.6에서 수행된 펌프젯의 레이놀즈수(Rn) 변화에 대한 영향을 평가한 결과를 보여준다. 로터 추력계수(K_{Tr})는 레이놀즈 수 변화에 따라 거의 차이가 없는 결과를 보여준다. 로터 토크 계수(K_{Qr})는 $Rn \approx 0.6 \times 10^6$ 까지 급격히 감소하다가 $Rn \approx 0.8 \times 10^6$ 부터 안정적인 값을 보여준다. 덕트 및



Fig. 12 Set-up for pump-jet open-water test



Fig. 13 Set-up for rotor-only open-water test (Rotor-only)

Table 2 Principal particulars of model pumpjet

Item		
Diameter, D (mm)	Rotor	210.0
	Stator	248.2
Rotor	Mean pitch, (P/D) _{mean}	1.0254
	Chord at 0.7R, $C_{0.7R}$ (mm)	62.328
	Expanded area ratio, (AE/AO)	0.8794
No. of blades	Rotor	7
	Stator	11

스테이터 추력계수(K_{Tds})는 로터 추력계수와 마찬가지로 레이놀즈 수 변화에 따라 거의 차이가 없는 결과를 보여준다. 덕트 및 스테이터 토크 계수(K_{Qds})는 추력계수와 마찬가지로 레이놀즈 수 변화에 따라 거의 차이를 보여주지 않았으나 $Rn \approx 1.25 \times 10^6$ 에서 급하게 감소하는 경향을 보여준다. 이는 동력계 토크 용량(30.0N-m)을 초과한 토크가 도출됨에 따라 나타난 현상이라 사료된다. 추진장치 요소별 추력 및 토크 계수가 $Rn \approx 0.8 \times 10^6$ 이상에서 안정적인 결과를 도출함으로서 단독시험은 $Rn \approx 1.0 \times 10^6$ 근처에서 수행된다. 이때 로터 회전수는 27.8RPS 이다. 레이놀즈수, 전진계수, 로터, 덕트 및 스테이터 추력계수 및 토크계수와 로터 단독효율(η_{Or})은 다음과 같다.

$$Rn = \frac{C_{0.7R} \sqrt{(0.7\pi n D_r)^2 + V_\infty^2}}{\nu}$$

$$J = \frac{V_\infty}{n D_r}, \quad K_{Tr} = \frac{T_r}{\rho n^2 D_r^4}, \quad K_{Qr} = \frac{Q_r}{\rho n^2 D_r^5}$$

$$K_{Tds} = \frac{T_{ds}}{\rho n^2 D_r^4}, \quad K_{Qds} = \frac{Q_{ds}}{\rho n^2 D_r^5}, \quad \eta_{Or} = \frac{J}{2\pi} \frac{K_{Tr}}{K_{Qr}}$$

여기서 V_∞ 는 유입속도, n 은 로터 회전수, D_r 은 로터 직경, $C_{0.7R}$ 는 0.7R에서의 로터 코드길이, ν 는 동점성계수, ρ 는 청수의 밀도, T_r 은 로터 추력, Q_r 은 로터 토크, T_{ds} 는 덕트 및 스테이터 추력, Q_{ds} 는 덕트 및 스테이터 토크이다.

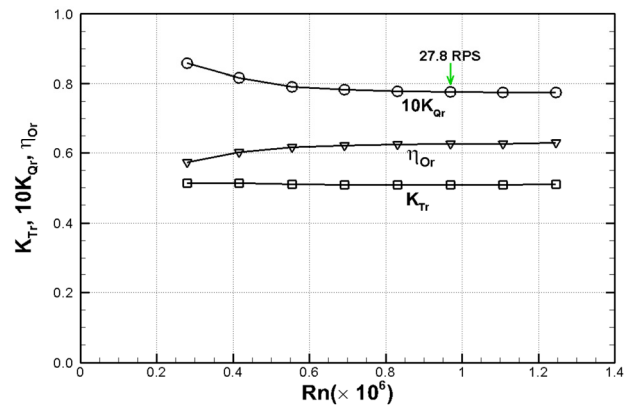


Fig. 14 Rn-variation for PJ-Rotor at J=0.6

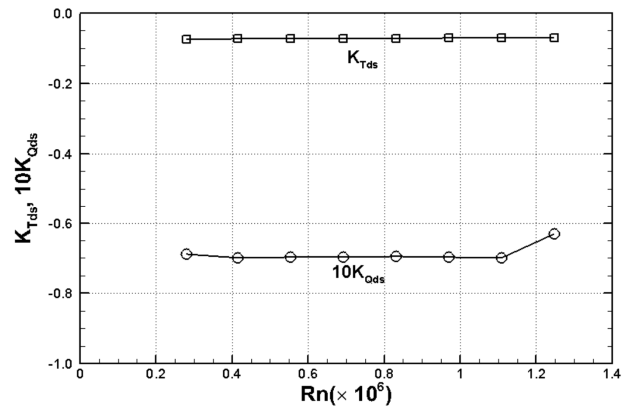


Fig. 15 Rn-variation for duct and stator at J=0.6

펌프젯 단독시험이 수행되는 로터 회전수 27.8RPS에서 로터와 덕트 및 스테이터 추력 및 토오크 계측 자료를 이용하여 불확실성 해석을 Choi et al. (1994)이 제시한 방법에 따라 수행하였다. H41 동력계에서 계측된 로터의 추력 및 토오크의 불확도(Uncertainty)는 0.053 % 및 0.0571%이다. 덕트 및 스테이터 센서에서 계측된 추력 및 토오크의 불확도(Uncertainty)는 0.344 % 및 0.057%이다. H41 동력계 및 센서의 장비 특성은 매우 우수한 것으로 판단된다.

5. 단독성능 시험

펌프젯 단독성능 시험은 $Rn \approx 1.0 \times 10^6$ 근처 및 전진계수 0.2~1.2 범위에서 수행되었으며, 로터 회전수는 27.8RPS로 고정하였다. Fig. 16은 펌프젯 추진장치에 포함된 로터(PJ-Rotor)와 로터만 설치된 상태(Rotor-only)의 단독시험의 결과 비교를 보여준다, PJ-Rotor의 경우 덕트 및 스테이터와의 상호 작용으로 추력 및 토오크가 Rotor-only보다 매우 증가하였음을 알 수 있다. 로터 단독효율도 매우 증가하여 전진계수 1.0에서 0.97이상이며, 그 이상의 전진계수에서는 1.0 이상으로 나타나 물리적으로 타당하지 않은 결과를 도출한다. 이는 덕트 및 스테이터와의 상호 작용으로 나타난 현상이다. 따라서, 덕트 및 스테이터 추력(항력) 및 토오크도 증가하게 되는데, 펌프젯 단독시험 상태에서 도출된 덕트 및 스테이터 추력 및 토오크는 Fig. 17에서 보여진다. 덕트 및 스테이터는 전진계수 0.4 미만에서 약간의 추력이 발생하지만 0.4 이상에서는 항력(Drag)이 발생하면서 전진계수 증가와 함께 점차 증가한다. 토오크는 로터와 반대 방향으로 작용하는 것으로 나타났으며 전진계수 증가와 함께 증가한다. 덕트 및 스테이터의 토오크를 계측한 이유는 로터와의 토오크 균형(Torque Balance)을 조사하기 위함이다. 단독시험 상태에서는 토오크 균형은 이루어지지 않았다.

Fig. 16과 Fig. 17의 결과로 미루어 덕트 및 스테이터를 선체의 일부로 포함해서 해석하기는 매우 어려움을 알 수 있다. 펌프젯 자체를 추진기로 보면 로터, 덕트 및 스테이터에서 발생한 추력 및 항력을 모두 합산한 추력이 실제로 선체를 추진할 것으로 사료된다. 펌프젯 단독 성능 해석시 추력의 경우 로터, 덕트 및 스테이터에서 발생한 추력 및 항력을 모두 합산한 값을 사용하고, 토오크의 경우는 로터 토오크를 그대로 사용하는 것이 타당하리라 사료된다. 엔진마력에 영향을 주는 토오크는 로터에서 발생하는 토오크이고, 선체에 설치되는 덕트 및 스테이터에서 발생하는 토오크는 직접적으로 추진효율에 영향을 주지는 않는다. Yu와 Li등도 펌프젯 자체를 추진장치로 보고 총추력으로 펌프젯 성능을 해석한 바 있다(Yu et al., 2019; Li et al., 2020). 펌프젯 자체를 추진기로 보고 합산한 추력계수(K_T) 토오크계수(K_Q) 및 단독효율(η_o)은 다음과 같다.

$$K_T = K_{Tr} + K_{Tds}, \quad K_Q = K_{Qr}, \quad \eta_o = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q}$$

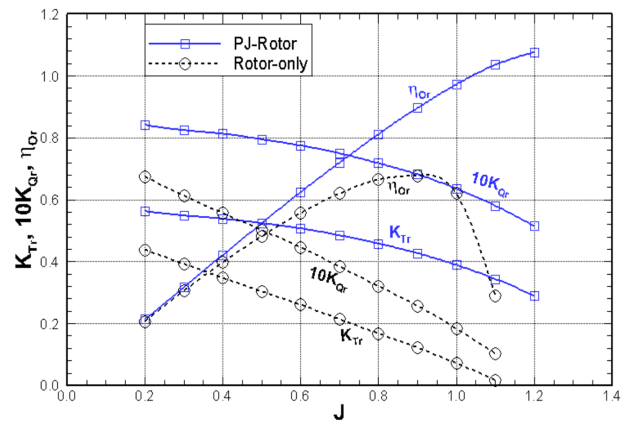


Fig. 16 POW comparison between PJ-Rotor and Rotor-only

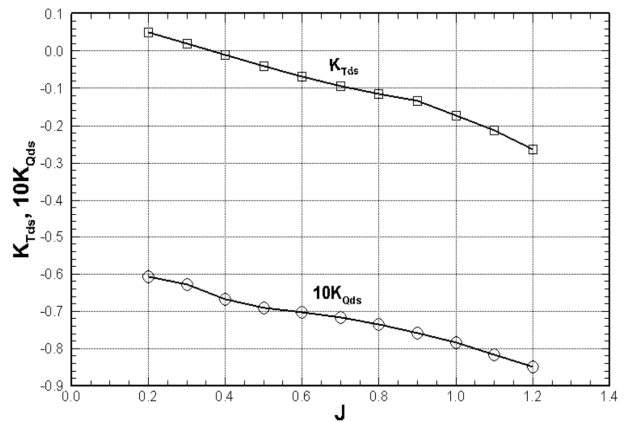


Fig. 17 Thrust(Drag) and torque of duct and stator

Fig. 18은 펌프젯 자체를 추진장치로 간주하여 추진장치별 추력을 합산한 경우(PJ-Total)와 로터만 설치된 상태(rotor-only)의 단독시험 결과 비교를 보여준다, PJ-Total의 추력은 덕트 및 스테이터에서 발생한 추력(항력)을 합산하여도 Rotor-only보다 증가된 것으로 나타난다. 그러나 로터에서 발생한 토오크를 그대로 사용하면서 효율이 매우 감소하게 되며, 일부 구간에서는 Rotor-only 보다는도 단독효율이 더 낮아진다. 단독효율은 자항추진성능 해석 시 추진효율에 직접적으로 반영되므로 추후 설계 개선시 효율 증가를 고려하여야 한다. 덕트 및 스테이터를 선체로 간주하고 Rotor-only 단독시험 결과를 이용하는 경우 추력 및 토오크가 실제보다 작은 값을 사용하는 오류를 범할 수 있다. PJ-Rotor를 사용하는 경우에는 단독효율이 너무 커서 물리적으로 맞지 않는 결과가 도출될 수 있다. 따라서, 추후 펌프젯 자항 추진 및 실선 성능 해석시 본 연구에서 도출된 PJ-Total 단독시험 결과를 활용하고자 한다.

Fig. 19는 Fig. 18의 PJ-total 모형시험 결과를 확장하여 추정된, 실선 펌프젯 추력 및 토오크 계수와 단독효율을 보여준다. 대상 수중운동체의 축적비는 24.00이며, 로터는 ITTC 1978 방법(Kim et al., 2009)에 따라서 실선성능을 추정하였다. 덕트 및 스테이터의 추력은 모형값을 그대로 사용하였다. 덕트 및 스테이터 추력은 Fig. 15와 같이 레이놀즈 수 변화에 따라 거의 차이가

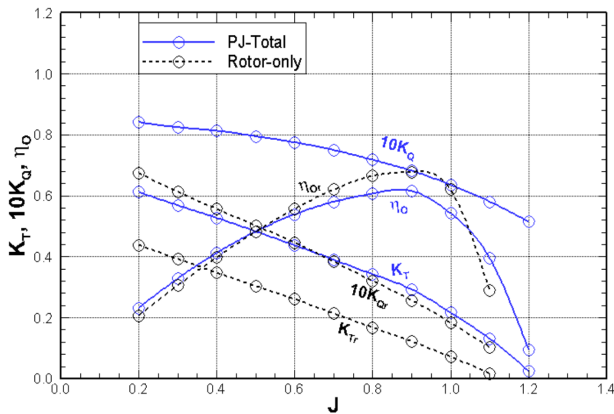


Fig. 18 POW comparison between PJ-Total and Rotor-only

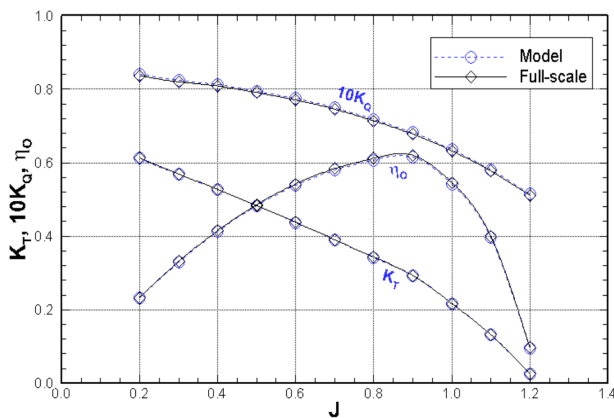


Fig. 19 Full-scale POW for PJ-Total

나지 않는다. 로터 추력도 Fig. 14와 같이 레이놀즈 수 변화에 따라 거의 변화가 없어 Fig. 19에서 추력도 모형과 거의 차이가 나타나지 않는다. 실선확장 시 토오크가 약간 감소함으로써 단독효율이 0.5% 이하로 증가하는 경향을 보여준다.

6. 결론

대형 캐비테이션터널에서 DARPA Suboff 잠수함을 대상으로 프로펠러 추진 수중 물수체의 저항 및 자항시험을 수행한 바 있으며 (Ahn et al., 2021), 캐비테이션 및 소음 시험을 위한 시험 조건을 도출한 바 있다. 동일 대상선에 대한 펌프젯 개발이 요구된 바, 펌프젯 실선성능 해석을 위한 단독성능 및 자항성능 시험이 요구되었다. 펌프젯은 기존 프로펠러와 달리 로터, 덕트 및 스테이터로 구성된 복합추진기로서 장치별 성능 파악이 안 되면 성능해석을 수행할 수 없기 때문에 기존 프로펠러보다 복잡한 실험기법이 요구된다. 본 연구에서는 펌프젯 단독성능시험을 수행하였으며, 타당한 시험 결과를 얻을 수 있었다. 펌프젯의 덕트 및 스테이터의 추력 및 토오크를 계측하기 위한 센서를 설계·제작하였으며, 캘리브레이션을 통한 검증을 수행하여 추력 및 토오크 간에 신호 간섭이 없는 우수한 성능을 확인하였다. 센서 성능 검증 후 대형캐비테이션터널용 단독시험 동력계인

H41에 역방향으로 펌프젯을 설치하는 단독시험 장치를 개발하였다. 펌프젯 단독성능 시험 전에 기존 프로펠러를 이용한 역방향 단독시험의 타당성을 검토하였으며, 레이놀즈수(Rn) 효과 조사시험도 수행하였다.

일반 상선용 프로펠러를 가지고 역방향 단독시험의 타당성을 조사한 바, 순방향 결과에 비해 추력이 감소하는 결과가 도출되었다. H41 동력계 몸체 및 스트럿에 의한 반류가 발생하면 유속 감소에 기인하여 동일 전진계수에서 추력이 약간 증가하는 경향을 보여주지만 오히려 감소하는 경향이 나타났다. 이는 프로펠러 캡 후면에 발생하는 허브 보오텍스로 인한 압력강하로 나타나는 현상으로 반류의 영향보다 크게 나타난다. 허브보오텍스 강도를 감소시켜 추진효율을 높이는 PBCF(Propeller Boss Cap Fin)와 유사한 장치 등이 계속적으로 개발되면서 역방향 단독시험이 요구되기도 하는데, 일반 프로펠러도 역방향 단독시험을 고려해볼 필요가 있다고 사료된다. 본 연구에서의 결과로 볼 때 역방향 단독시험 결과가 순방향과 차이를 유발하지만 오히려 허브보오텍스 영향이 나타나는 타당한 결과를 도출할 수 있었다고 사료된다. H41 몸체 및 스트럿에 의한 반류의 영향은 크지 않다고 사료되지만 추후 CFD 계산을 통하여 반류의 영향 및 허브보오텍스 관련 조사를 수행하고자 한다.

펌프젯 단독시험을 수행하기 전에 수행된 레이놀즈 수 효과 조사 결과 추진장치 요소별 추력 및 토오크 계수가 $Rn \approx 0.8 \times 10^6$ 이상에서 안정적인 결과를 도출함으로써 단독시험은 $Rn \approx 1.0 \times 10^6$ 근처에서 수행된다. 단독시험은 펌프젯 자체와 로터 만설치한 상태 2가지를 수행하였다. 펌프젯의 경우 추진장치별 상호작용이 크게 나타나고 로터 만에 성능과 차이가 크게 나타나는 결과로 미루어 펌프젯 자체를 추진기로 간주하는 것이 타당하다고 사료된다. 펌프젯 자체를 추진기로 간주하는 경우 자항시험 및 결과 해석은 기존 프로펠러와 같은 방법으로 수행이 가능하다. 앞으로 본 연구에서 개발한 덕트 및 스테이터 센서를 활용하여 펌프젯 장착 수중운동체 자항시험을 대형캐비테이션터널에서 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방연구소가 지원한 특화연구실 사업 '미래 잠수함 추진기 소음 모형시험법 개발 및 D/B 구축연구' 과제(PGS4262)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, J.W., Kim, K. S. and Park, Y.H., 2019. Experimental study of the POW characteristics using high-capacity inclined-shaft dynamometer. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 58(2), pp.168–174.

- Ahn, J.W., Seol, H. S., Lee, Y.Y. and Park, Y.H., 2021. Study of the self-propulsion test and analysis for the submerged body in LCT. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 58(2), pp.58–65.
- Ahn, J.W., Kim, K.S. and Seol, H.S., 2014. *Manufacturing method for propeller open-water test device useable in large cavitation tunnel*, Patent Number 10–1402573.
- Choi, G.I., Chun, H.H., Kim, J.S. and 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., Kim, K.Y. and Ahn, J.W., 2000. 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.
- The Ship Hydrodynamics Research Committee, 2009. Ship resistance and propulsion. *The Society of Naval Architects of Korea*.
- Li, H., Huang, Q., Pan, G., and Dong, X., 2020. The transient prediction of a pre-swirl stator pump-jet propulsor and a comparative study of hybrid RANS/LES simulation on the wake vortices. *Ocean Engineering*, 203, pp.1–21.
- Park, H.J., Kim, K.S., Suh, S.B. and Park, I.R., 2016. CFD analysis of marine propeller-hub vortex control device interaction. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(4), pp.266–274.

- Renilson, R., 2015. Submarine hydrodynamics, *Springer Briefs in Applied Sciences and Technology*.
- Yu, H., Zhang, Z., and Hua, H., 2019. Numerical investigation of tip clearance effects on propulsion performance and pressure fluctuation of a pump-jet propulsor. *Ocean Engineering*, 192, pp.1–13.
- Yu, H., Duan, N., Hua, H. and Zhang, Z., 2020. Propulsion performance and unsteady forces of a pump-jet propulsor with different pre-swirl stator parameters. *Applied Ocean Research*, 100, pp.1–20.

