



# 아지무스 추진기 캐비테이션 시험 장치 개발 및 캐비테이션 성능 연구

안중우<sup>1,†</sup> · 설한신<sup>1</sup> · 정홍석<sup>1</sup> · 박영하<sup>1</sup> · 김상환<sup>1</sup> · 한정일<sup>2</sup>  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소<sup>1</sup>  
HD현대미포(주)<sup>2</sup>

## Azimuth Thruster Cavitation Test Apparatus Development and Cavitation Performance Study

Jongwoo Ahn<sup>1,†</sup> · Hanshin Seol<sup>1</sup> · Hongseok Jeong<sup>1</sup> · Youngha Park<sup>1</sup> · Sanghwan Kim<sup>1</sup> · Jungil Han<sup>2</sup>  
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering<sup>1</sup>  
HD HYUNDAI MIPO CO., Ltd.<sup>2</sup>

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 cavitation performance for the azimuth thruster in Large Cavitation Tunnel (LCT), the cavitation test apparatus was designed and manufactured. Generally the model scale is determined by the pod dynamometer with about 70mm diameter. Recently as ships with azimuth thruster have become bigger, the problem of the model ship installation was occurred. The model ship with pod dynamometer couldn't be installed in the LCT test section. The cavitation test apparatus and technique which can conduct the cavitation test without pod dynamometer were developed. The cavitation tests were conducted in torque identity method instead of thrust identity method. The target ship with azimuth thruster is 18K LNG bunkering vessel. As the full-scale ship test was conducted, the model cavitation tests were conducted at the same operating conditions. The fluctuating pressure levels of the full-scale ship were compared to those of the model tests. Another model cavitation test was conducted in the foreign institute and the cavitation observation results were compared to those of LCT. Through the comparison with the existing results, it is thought that the cavitation test for the azimuth thruster can be conducted in torque identity method.

**Keywords** : Azimuth Thruster(아지무스 추진기), Cavitation Test(캐비테이션 시험), Torque Identity Method(토크 일치법), Large Cavitation Tunnel(LCT, 대형캐비테이션터널)

## 1. 서론

크루즈 여객선 또는 LNG 해상 급유를 위한 bunkering vessel 등은 자체적으로 항구에 입출항 또는 타 선박에 근접 접근을 위하여 정밀한 조종성을 요구한다. 이와 같은 요건을 충족하는 추진장치가 아지무스 추진기이다. 아지무스 추진기는 360도 전방 위 회전이 가능하므로 방향타를 이용하여 조종을 수행하는 기존 프로펠러 추진장치보다 조종성이 매우 우수하다. 아지무스 추진기는 덕트, 프로펠러 및 포드로 구성되며 프로펠러를 회전시키기 위하여 포드 내부에 베벨기어가 설치된다. 선내 엔진의 동력을 전달하기 위하여 추진기 상부 선내에 추가적인 베벨기어가 설치된다. 대형캐비테이션터널(LCT)에서 수행되는 캐비테이션 시험

을 위한 모형장치도 2개의 베벨기어를 이용하여 모형선 상부에 설치된 구동모터의 동력을 전달한다.

아지무스 추진기 추진성능시험은 메인수조에서 수행되는데, 선속별 프로펠러 추력 및 토크를 측정하여야 한다. 또한 덕트 추력 및 아지무스 추진기 자체에 걸리는 전체추력(unit force)이 측정되어야 한다 (ITTC, 2017). 프로펠러 추력 및 토크 측정은 포드 내부에 내장될 수 있는 포드동력계를 이용하여 수행된다. 포드 동력계 직경은 약 70mm로 포드 내부에 설치됨에 따라 모형선 축적비 결정에 기준이 된다. 포드 동력계 내부는 베벨기어와 추력 및 토크를 측정할 수 있는 스트레인 게이지가 설치된다.

아지무스 추진기 캐비테이션 시험기법 개발을 위하여 선정된 대상선은 18K LNG bunkering vessel이다. 최근 bunkering vessel

등의 대형화 추세에 따라 모형선 크기도 증가하고 있어 LCT 시험부 설치에 문제가 발생하고 있다. 대상선의 경우 포드동력계가 설치되면 축적비 약 12.0이 요구되는데, LCT 시험부에 설치하려면 축적비 16.0이 요구되었다. 따라서 포드동력계를 사용할 수 없으며 아지무스 추진기의 포드 자체를 기어박스로 사용할 수 밖에 없었다. 따라서, 예인수조 추진시험 또는 실선시험으로부터 도출된 운항조건에 따라 캐비테이션 시험을 수행할 수 있는 새로운 시험 기법이 요구되었다.

일반 프로펠러 추진의 경우 캐비테이션 시험법은 추력일치법(thrust identity)으로 수행된다. 즉 운항조건에서 도출된 추력계수를 일치시키고, 실선 캐비테이션수를 맞추어 캐비테이션 시험을 수행한다. 아지무스 추진기 프로펠러의 추력 및 토오크를 측정할 수 없어 모형선 상부에 설치된 토오크센서를 이용하여 캐비테이션 시험을 수행할 수 있는 방법을 개발하였다. 동력 전달용 축계를 통하여 전달된 프로펠러 토오크를 측정하여 예인수조 추진시험으로부터 도출된 토오크계수를 일치시키는 토오크일치법(torque identity)으로 캐비테이션 시험을 수행하였다. 즉 저항시험 및 실선시험 전 결과로부터 도출된 전달마력(delivered power) 및 프로펠러 회전수를 이용하여 토오크계수를 구하였으며, 도출된 토오크 계수에 맞추어 캐비테이션 시험을 수행하는 것이다.

대상선의 실선시험이 ballast 흘수에서 수행됨에 따라 모형선도 LCT 시험부에 ballast 흘수를 고려하여 설치된다. Ballast 흘수에서의 캐비테이션 시험은 실선 속도 시운전이 모형시험에 앞서 미리 수행됨에 따라 3종의 실선 운항조건에서 수행된다. 모형시험에서 캐비테이션 관찰 및 변동압력 측정이 수행되었으며, 추후 동일 조건에서 실선 변동압력 시험이 수행됨에 따라 결과를 비교하였다. Design 조건에서의 캐비테이션 시험은 외국 시험기관에서 저항시험 및 캐비테이션 시험이 수행됨에 따라 동일 시험 조건에서 캐비테이션 시험을 수행하였다. 캐비테이션 발생량 및 거동을 외국 시험기관에서 수행한 결과와 비교하였다.

## 2. 실험시스템 구성 및 설치

Fig. 1은 대형캐비테이션터널 시험부에 설치된 대상선을 보여 준다. 일반 선형에 비하여 선폭이 넓은 특성을 가지고 있으며, 선미 선저에 아지무스 추진기 2개가 장착되어 있다. 아지무스 추진기는 Fig. 2와 같이 프로펠러 및 덕트, 프로펠러를 회전시키는 동력전달장치를 내장하는 포드로 구성된다. 포드 내부에는 동력 전달을 위한 베벨기어가 설치된다.

아지무스 추진기 장착 모형선의 추진성능시험은 예인수조에서 수행된다. 프로펠러 상류에 위치한 포드 내부에 Fig. 3과 같이 포드동력계를 설치하여 선속별 프로펠러 추력 및 토오크를 측정하게 된다. 포드 동력계는 최대 직경은 약 70mm인데, 내부에 베벨기어와 프로펠러 추력 및 토오크를 측정할 수 있는 스트레인 게이지가 설치되며, 측정 토오크를 높이기 위하여 프로펠러 회전수를 감속하는 1:2 베벨 기어가 설치된다. 베벨 기어의 고속회전이 요구되면서 기어박스 내부에 윤활유가 채워짐에 따라 방수도 중요하다. 추진성능 시험시 모형선의 축적비는 일반적으로 포드동력계

를 기준으로 설정된다. 그러나, 최근 bunkering vessel 등의 대형화 추세에 따라 모형선 크기가 증가됨에 따라 예인수조 시험모형이 대형캐비테이션터널에 설치될 수 없는 문제가 발생하였다.

선박해양플랜트연구소 대형캐비테이션터널의 모형선 설치 한계는 길이 10m, 넓이 1.6m 이하이다 (Ahn et al., 2015). 대상선의 경우 Fig. 3과 같은 포드 동력계를 설치할 경우 축적비는 약 12.0이 요구되는데, 이때 모형선 길이는 13.0m 이상, 폭은 2.0m 이상이 요구되어 설치가 불가능하였다. 따라서, 대형캐비



Fig. 1 The model ship installed in LCT



Fig. 2 Azimuth thruster composed of propeller, duct and pod

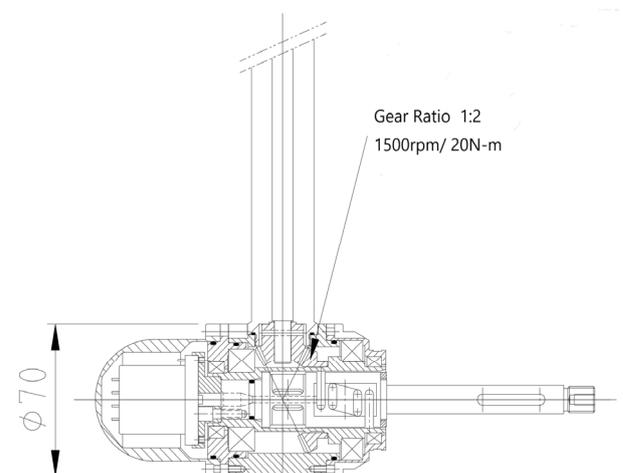


Fig. 3 The pod dynamometer for propulsion test

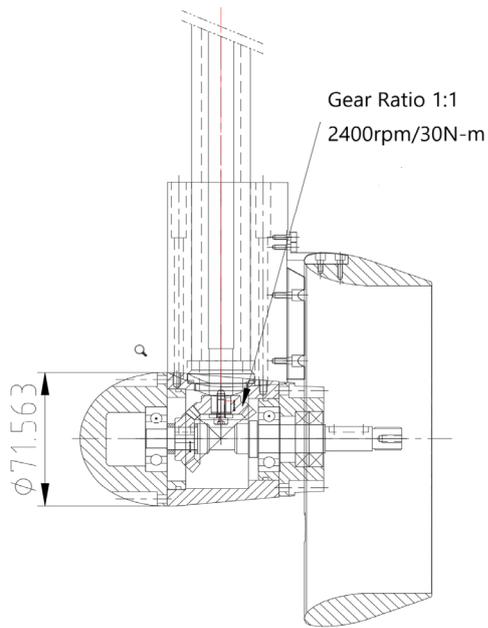


Fig. 4 Model azimuth thruster with a built-in bevel gear

테이션터널용 모형선은 축적비 16.0으로 제작된다. 이때 프로펠러 상류에 위치한 포드의 외경은 70mm 내외였다. 따라서, 대상선 이지무스 추진장치의 포드를 Fig. 4와 같이 기어박스로 사용하게 된다. 캐비테이션 시험 수행을 위하여 고속 회전이 요구됨에 따라 기어비는 1:1로 설정하였으며, 최대회전수 2400RPM, 최대 토크 30N·m 정도의 설계 사양을 가진 베벨기어를 선정하였다. 기어박스 내부에 윤활유가 채워지며 예인수조 모형보다 고속으로 회전하면서, 대형캐비테이션터널 시험부 내부 압력변화(0.1~3.0기압)에 대처하기 위한 방수를 철저히 수행할 필요가 있었다.

대형캐비테이션터널에서 이지무스 추진장치의 캐비테이션 시험을 위한 장치 구성은 Fig. 5에 나타나 있다. 예인수조 시험 장치보다 높은 프로펠러 회전수가 요구되면서 용량이 큰 구동모터가 요구된다. 선정된 구동 모터는 용량이 7.5kW이며, 최대회전수 3,450RPM의 수중모터로 최대직경이 약 95mm, 길이 약 818mm이며 무게는 약 35kg이다. 용량 약 1kW의 구동모터를 사용하는 예인수조는 수직으로 설치되지만, 대형캐비테이션터널에서는 이지무스 추진기 설치각도에 수직하게 모형선 상부에 수평하게 설치하였으며, 동력 전달을 위한 베벨기어가 추가적으로 요구되었다. 구동모터와 기어박스 사이에 설치되는 토크 센서는 Fig. 6과 같으며 방수를 위하여 회전수 측정을 위한 엔코더와 함께 박스에 내장된다.

일반적인 프로펠러 캐비테이션 시험은 추력일치법(thrust identity)으로 수행된다. 이지무스 추진장치의 경우에는 추진시험수행시 프로펠러 및 덕트 각각의 추력과 이지무스 추진장치 전체 추력(unit force)을 계측하여 해석을 수행한다 (ITTC, 2017). 본 연구에서는 추진장치 중 프로펠러 토크만 계측 가능하므로 토크 일치법(torque identity)으로 캐비테이션 시험이 수행되어야 한다. 실선 및 모형 저항시험으로부터 얻은 실선 전달동력 및

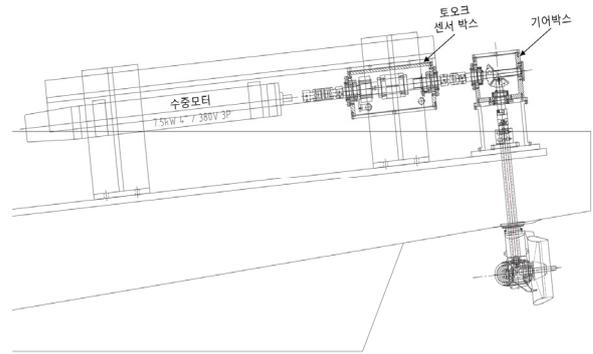


Fig. 5 Arrangement for cavitation test of the azimuth thruster



Fig. 6 Torque sensor including encoder

Table 1 Specification of torque sensor

Type		Underwater
Rated capacity	Torque (N·m)	±30
	Revolution (RPM)	±3000
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

회전수를 이용하여 실선 토크를 구하고 토크계수를 계산하여 동일 토크계수에서 캐비테이션 시험을 수행한다.

토크 센서의 측정 용량은 Table 1에 나타난 것과 같이 ±30.0N·m이며, 최대 회전수는 ±3000RPM이다. 토크 센서의 성능을 검증하기 위하여 Fig. 7에서 보여지는 것과 같이 캘리브레이션이 수행된다. Fig. 8은 캘리브레이션 결과를 보여주는데, 하중에 대한 계측신호의 선형성(linearity), 반복성(repeatability) 등이 매우 좋은 것으로 나타났다. 토크 센서의 우수한 계측 특성을 확인한 후 시험 장치를 조립하였다.

구동모터와 토크센서는 고속회전으로 인한 진동 등의 발생을 최소화 하기 위하여 Fig. 9와 같은 강력한 알루미늄 구조물에 고정된다. 고정 구조물은 토크센서 후미에 기어박스와 연결이 되어야 하므로 설치 높이 및 각도를 조절할 필요가 있다. 따라서, 고정구조물은 Fig. 10과 같이 높이 및 각도 조절이 가능하도록 설계

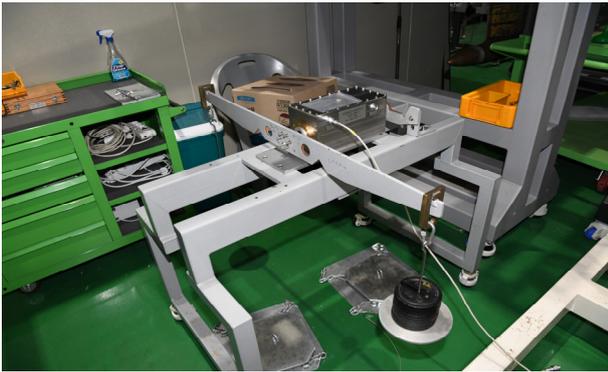


Fig. 7 Calibration of torque sensor

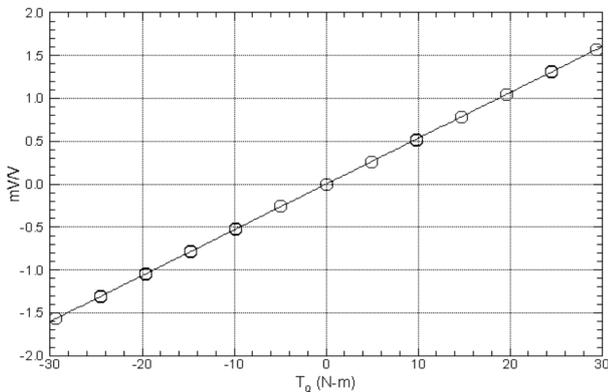


Fig. 8 Calibration results for torque sensor

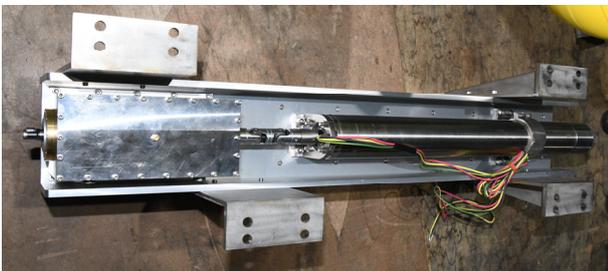


Fig. 9 Installation of drive motor and torque sensor



Fig. 10 Installation structure of drive motor and torque sensor

되었다. 높이 및 각도조절은 구조물 측면 전·후·좌·우에 설치된 4개의 지지판재에 의하여 수행된다. 지지판재의 두께는 약 10mm로 높이조절 가이드를 만들어 위치고정 후 볼트 및 와사를 이용하여 고정하였다 (Kim et al., 2014). Fig. 11은 모형선에 설치 완료된 아지무스 추진기 시험 장치를 보여준다. 모든 시험

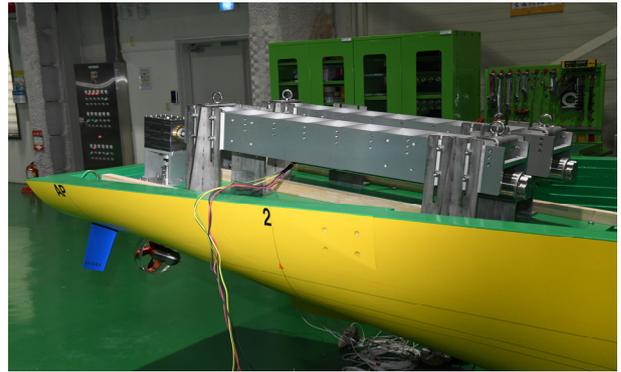


Fig. 11 Installation of model test device for azimuth thruster

장치가 설치된 후 모형선은 구속장치에 고정되어 Fig. 1과 같이 대형캐비테이션터널 시험부에 설치된다 (Ahn et al., 2013).

### 3. 캐비테이션 모형시험

대상선의 실선시험이 ballast 조건에서 수행됨에 따라 대형캐비테이션 터널에서의 캐비테이션 시험은 Fig. 12와 같이 ballast 흘수선에 따라 설치된 모형선에서 수행된다. 모형선에 표기된 ballast 흘수선과 시험부 상부의 흘수판에 맞추어 Fig. 1과 같이 설치하게 된다. 시험부 상부에 설치된 흘수판의 경계층의 영향을 피하기 위하여 설치된 흘수선은 일반적으로 70mm 추가하여 설치되지만 (Kim et al., 2013), 설치상의 문제로 추가 흘수선을 100mm 추가하여 설치하였다.

실선 속도시운전 결과로부터 제공된 실선 운항조건은 3조건이다. 최대동력추진(MPP, Max. Power Propulsion)의 25%, 67,35%, 85% 조건에서 실선시험이 수행될 예정이었으며, 이때의 선속, 아지무스 추진기의 회전수 및 제동동력( $P_B$ , Brake Power)이 제시되었다. 전달동력( $P_D$ , Delivered Power)은 제동동력의 95%로 조선소에서 제시하였는데, 베벨기어 2개를 통하여 추진기로 동력이 전달됨으로서 기존 프로펠러 추진보다 전달 손실이 크게 나타났다. 전달동력과 추진기 회전수로부터 추진기에 걸리는 토크를 구할 수 있으며, 토크 계수( $10K_Q$ )를 계산할 수 있다. 추진기상부 0.7R 위치에서의 캐비테이션 수( $\sigma_{0.7R}$ )는 추진기 회전수, 직경 및 축 물수깊이(shaft submergence)를



Fig. 12 Ballast draft line marked on the model ship

Table 2 Model test conditions (ballast draft)

Power	25% MPP	67.35% MPP	85% MPP
VM(m/s)	5.8	5.8	5.8
Model rps	43.09	43.71	44.35
PT(kPa)	129.68	73.63	66.62
10KQ	0.4498	0.4576	0.4643
$\sigma_{0.7R}$	4.94	2.58	2.24

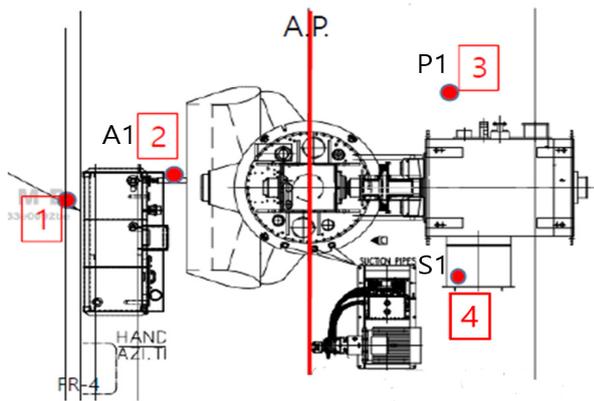


Fig. 13 Position of pressure fluctuation sensors

이용하여 계산할 수 있다.

실선시험이 3개의 조건에서 수행됨에 따라 대형캐비테이션 터널에서의 모형시험도 3개의 조건에서 수행된다. 모형시험 조건은 Table 2에 나타나 있다. 대형캐비테이션터널 시험부 유속( $V_M$ )은 5.8m/s로 고정했으며, 이때의 추진기 회전수는 베벨기어의 설계 회전수 2400RPM (40rps) 초과한 상태이다. 모형선 반류가 유속에 따라 변화가 적은 안정적 분포를 가지려면 대형캐비테이션터널 시험부 유속이 약 6.0m/s 이상이 되어야 하지만 (Kim et al., 2010), 추진기 회전수가 너무 높아져 시험부 유속을 5.8m/s로 고정하였다. Fig. 5에 보여지는 토오크센서는 추진기 토오크를 주로 측정하지만, 2개의 베벨기어와 축계를 거쳐서 계측이 되므로 프로펠러 허브만 설치된 상태에서 발생하는 추가적인 토오크를 수정하여야 한다. 토오크 수정 값은 약 7.0%가 요구되었다. 실선에서는 조선소에서 제시한 축계 손실이 약 5.0%인데, 모형시험도 유사한 토오크 수정 값이 나타났다.

추진장치의 캐비테이션 관찰 및 변동압력 계측은 Table 2의 ballast 시험조건에서 수행하였다. 실선과 모형선의 변동압력 비교를 위하여 실선 기준으로 좌현 추진기 쪽에 변동압력 센서 위치를 결정하였으며, 이는 Fig. 13에 나타나 있다. 추진기 직상방은 실선 설치에 문제가 있어 전방과 후방에 센서를 배치하였다. 1, 2번 센서의 경우 실선 시험시 센서가 공기 중에 노출되면서 계측이 이루어지지 않아 결과에서 제외하였다. 2번, 3번 및 4번을 각각 A1, P1, S1 위치로 명명하였으며, 모형시험에서도 동일한 위치에서 변동압력을 계측하였다.

Fig. 14는 ballast 흡수에서 Table 2에 나타난 각 조건별 및 각도별 캐비테이션 관찰 결과를 나타낸다. 각도는 프로펠러 기준선(generating line)이 연직 상방을 향할 때를 0°로 정의하며, 회전 방향으로 증가된다. 25% MPP 조건에서는 캐비테이션이 발생하지 않았다. 67.35% 및 85% MPP 조건에서는 프로펠러 반경 0.95R 이상의 위치에서 얇은 sheet 캐비테이션 및 tip 보오텍스 캐비테이션이 발생하였다. 또한 압력면에서 캐비테이션이 간헐적으로 강하게 나타났다. 2개의 조건에서 흡입면 캐비테이션 발생량은 큰 차이가 나지 않는데, 85% MPP 조건에서 불안정(unstable) 캐비테이션 빈도가 낮아졌으며, 80도 관찰 결과를 보면 캐비테이션이 약간 증가한 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 각 시험 조건에서 계측한 변동압력을 실선 RPM 조건을 반영하여 실선 확장한 결과이다. 모형시험에서 캐비테이션이 작게 발생하고 덕트에 의한 감쇠로 전반적으로 변동압력 값이 0.3 kPa 이하로 낮게 나타났다. 변동압력의 다른 성분에 비해 5차 날개통과주파수(Blade Passage Frequency, BPF) 성분이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 모형시험 시 프로펠러 구동 시스템인 기어의 회전주파수 성분으로 판단된다. 모형시험에 활용된 기어는 20개 잇수를 가지고 있어, 프로펠러 날개 수 4의 5배에 해당된다. 이것이 선체를 통해 센서로 전달되어 5차 BPF에서 진폭이 증가된 것으로 판단된다. 앞으로 모형시험시 기어 선정에 신중을 기할 필요가 있다. 85% MPP 조건에서 변동압력이 67.35%보다 유사하거나 약간 감소한 것처럼 나타났는데, 이는 매우 불안정하게 발생한 압력면 캐비테이션이 원인이라 사료된다. 67.35% 조건에서 압력면 캐비테이션이 좀 더 불안정하게 발생하였다. 기존 연구에서도 압력면 캐비테이션이 불안정하게 발생하는 경우 전 주파수 영역에서 음압수준(SPL)이 증가하는 것으로 나타난 바 있다 (Song et al., 2000).

Design 흡수는 해외기관에서 자항추진 및 캐비테이션 시험이 수행되었기 때문에 비교를 위하여 수행되었다. Fig. 12와 동일한 ballast 설치상태에서 design 시험조건 만 변경하여 캐비테이션 시험이 수행되었다. Design 조건에서의 흡수는 선수 및 선미가 동일한데, ballast 흡수에서는 선미 trim이 존재함으로써 캐비테이션이 증가될 가능성이 있다. Table 3은 해외기관에서 수행한 자항시험 결과를 기반으로 도출된 캐비테이션 시험조건이다. 이때 운항조건은 SPP(Sevice Power Propulsion)이다.

Design 흡수 SPP 운항조건에서 수행된 캐비테이션 발생 관찰 결과는 Fig. 16에 나타나 있다. 전반적으로 ballast 흡수 85% MPP 운항조건과 유사한 경향을 보여주지만 약간 캐비테이션 발생량이 증가한 것으로 보인다. Ballast 흡수 85% MPP 운항조건과 비교해서 토오크계수는 약 8.6% 증가하지만, 캐비테이션수는 약 6.6% 감소하면서 캐비테이션 발생량에 큰 차이를 보이지 않은 것으로 사료된다. 토오크 계수가 증가된 조건에서 작동하면서 압력면 캐비테이션은 발생하지 않았다. Fig. 17은 design 조건에서의 실선 확장한 변동압력 결과를 보여준다. A1 센서가 수중에 위치됨에 따라 그 결과도 포함하였다. 변동압력은 ballast 흡수 67.35% MPP 조건보다 감소된 결과가 나타났다. Design 조건에서 압력면 캐비테이션이 발생하지 않으면서 나타난 현상이라 사료된다. A1의 경우 프로펠러 가까이 설치됨에 따라 변동압력이 P1, S1보다 증가될 것으로 예상되었는데 1차 성분에서 증가된 결과를 보여준다.

Table 3 Model test condition (design draft)

VM(m/s)	5.8
Model rps	48.34
PT(kPa)	93.77
10KQ	0.5040
on0.7R	2.75

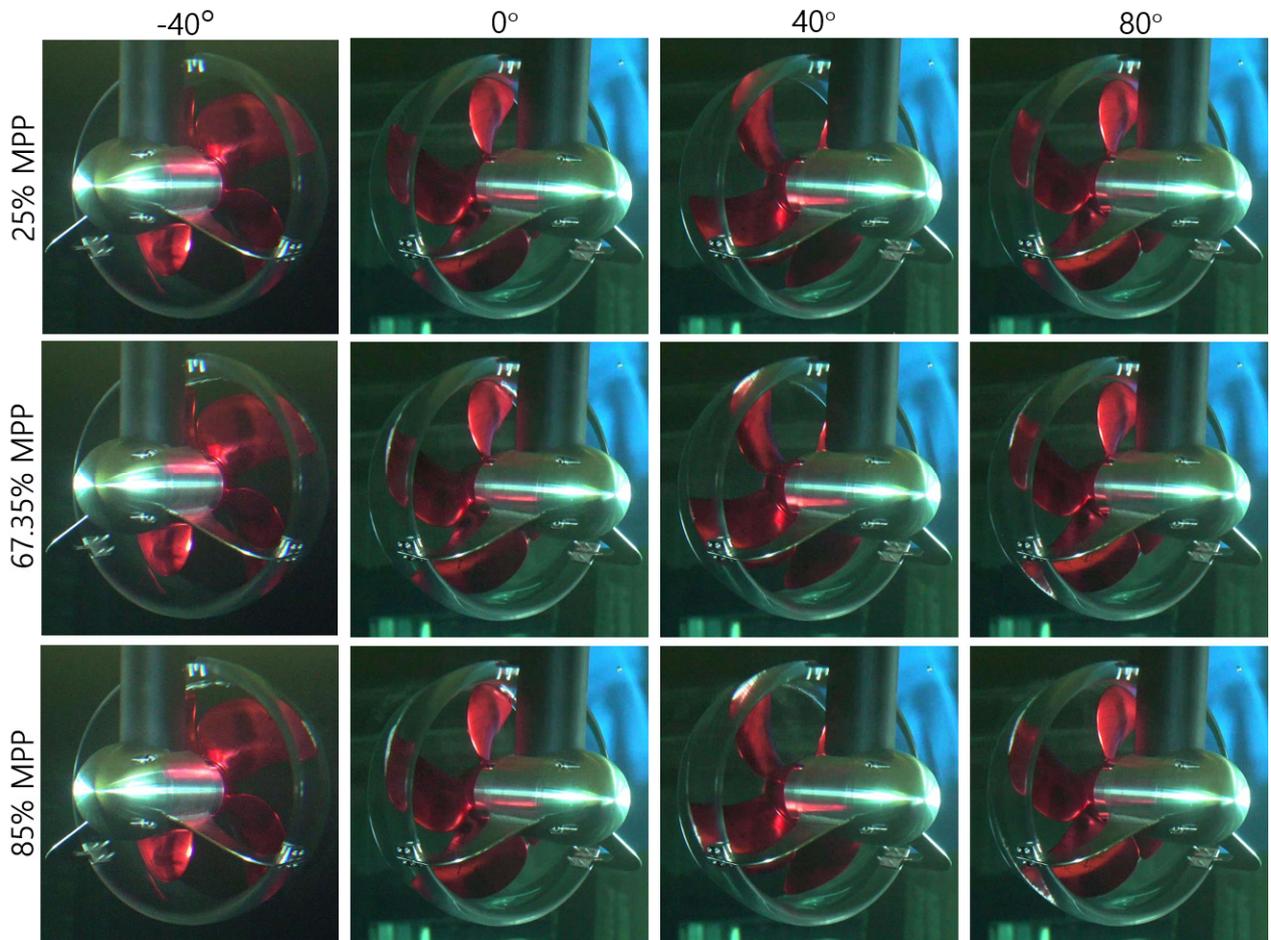


Fig. 14 Cavitation pattern for each load condition at ballast draft

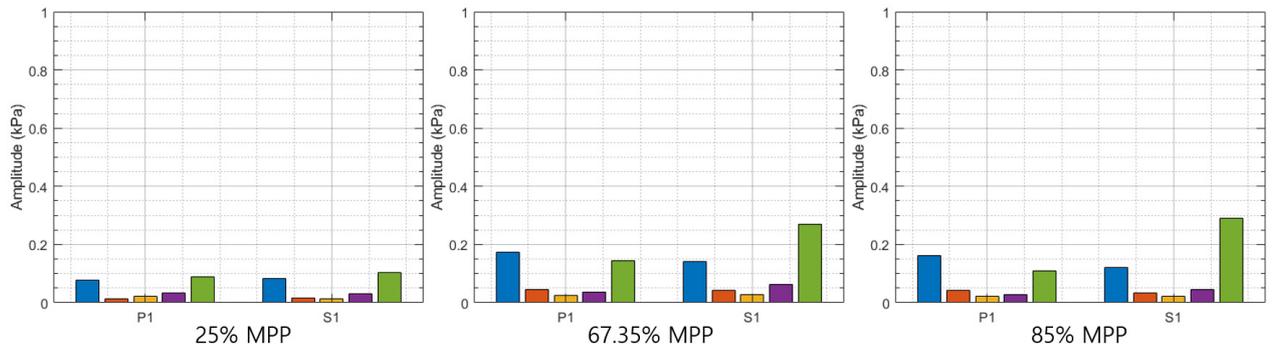


Fig. 15 Predicted full scale pressure fluctuation for each load condition at ballast draft

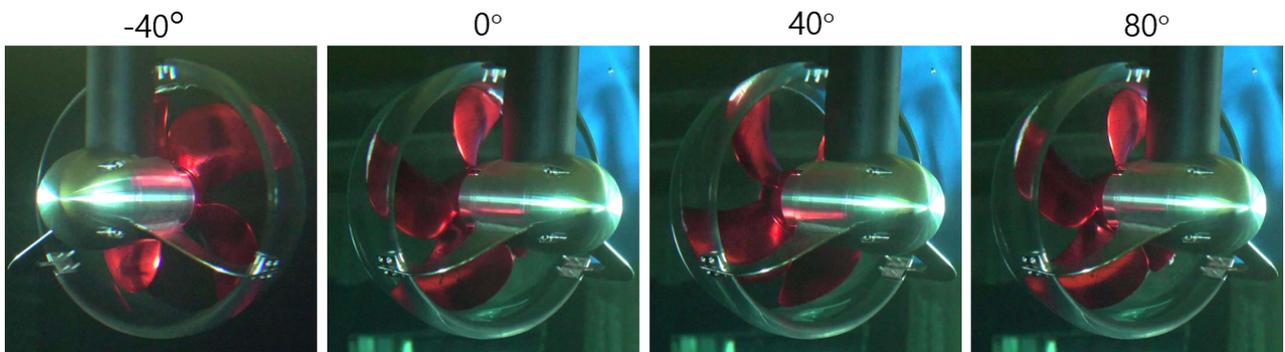


Fig. 16 Cavitation pattern for SPP load condition at design draft

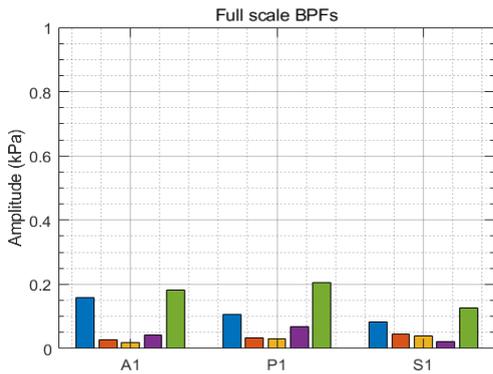


Fig. 17 Predicted full scale pressure fluctuation at design condition

### 4. 실선시험 및 타기관 결과 비교

실선 변동압력 계측을 위해 대상 선박 좌현 추진기 상부 동일한 위치에 압력 센서를 설치하였으며, ballast 흡수 조건에서 변동압력을 계측하였다. Fig. 18은 Table 2의 실선 운항 조건에서 계측된 변동압력 결과를 나타낸 것이다. 25% MPP 조건에서는 유사한 변동압력 결과가 도출되었지만 67.35% MPP 조건부터는

모형시험과 차이가 있었다. 실선의 변동압력도 0.4kPa 이하의 작은 값이 도출되었다. 작은 변동압력의 가장 큰 원인은 덕트가 존재함으로써 캐비테이션에 의한 변동압력을 감소시키는 역할을 한 것으로 사료된다. 덕트 재료의 경우 모형과 실선에 차이가 있는데, 물성에 따른 감쇠 정도 차이가 발생할 수 있다고 사료된다. 추후 덕트가 없는 포드 추진기 변동압력을 계측하여 검증할 필요가 있다. 덕트가 존재하는 이지무스 추진기의 경우 캐비테이션 발생량 및 거동에 문제가 없다면 변동압력 문제는 없으리라 사료된다.

실선에서도 67.35% MPP 조건의 변동압력이 85% MPP 조건의 변동압력과 비슷하거나 큰 것으로 나타나 모형시험과 유사한 경향을 보여준다. 일반적으로 프로펠러 하중이 증가하면 변동압력이 증가하지만 현재의 추진장치에서는 흡입면에서의 캐비테이션 증가가 크지 않고 발생 거동도 거의 변화가 없어 변동압력에 크게 영향을 주지 않은 것으로 사료된다. 따라서, 모형과 같이 불안정한 압력면 캐비테이션 발생을 예상할 수 있다.

실선 변동압력은 날개통과주파수 4차 성분이 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다. 실선의 기어비는 1차가 21:36, 2차가 12:37로 회전수는 5.286배 감속된다. 실선 기어비에 해당하는 기어물림 주파수(Gear Mesh Frequency, GMF)는 다음과 같이 계산된다.

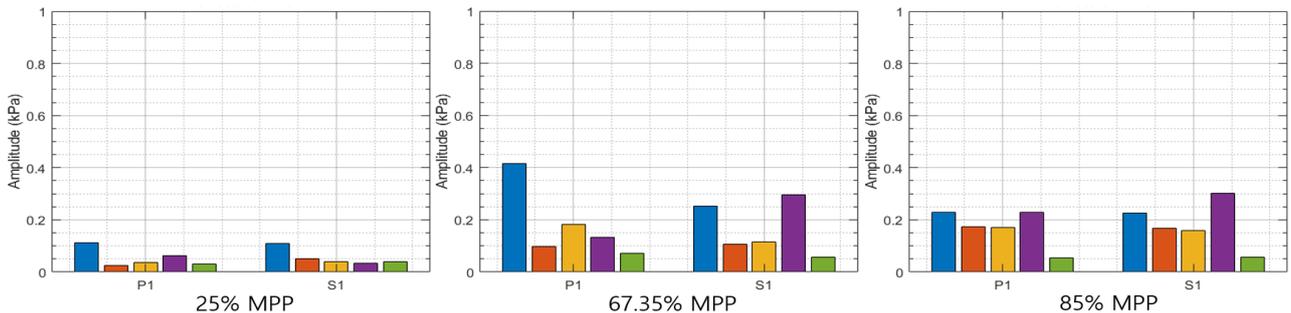


Fig. 18 Measured full scale pressure fluctuation for each load condition at ballast draft

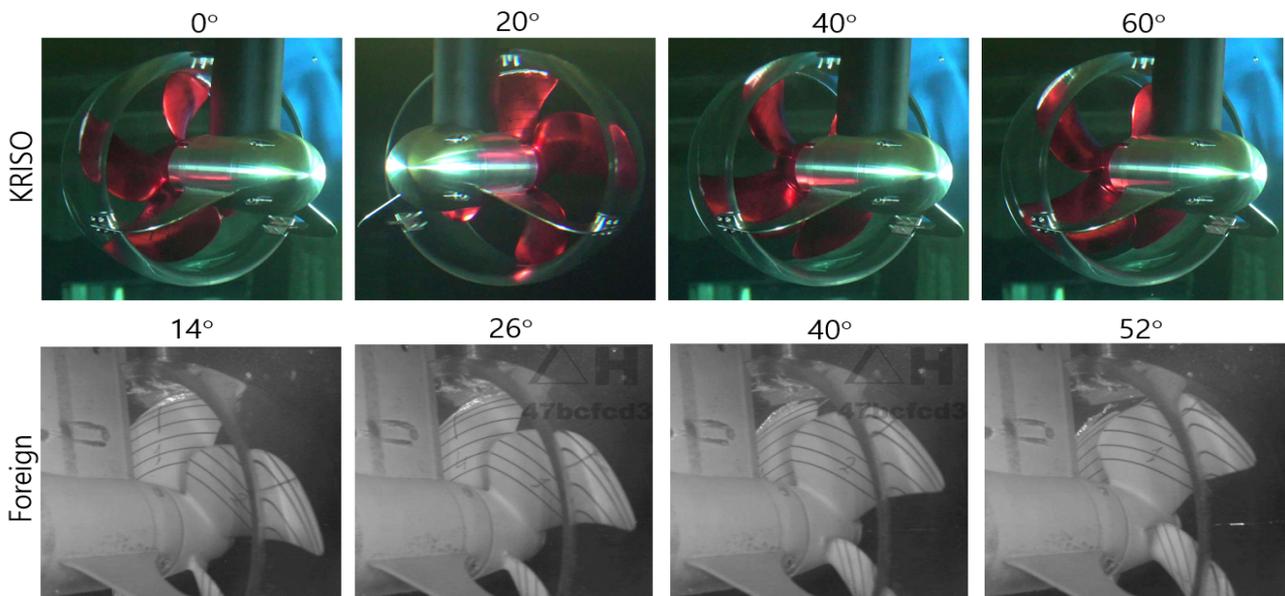


Fig. 19 Comparison between cavitation pattern of KRISO and foreign institute at design draft

$$GMF_j = n_j \frac{N_j}{N_j}$$

여기서  $GMF_j$ 는  $j$ 번째 기어의 기어물림주파수이고,  $n_j$ 는  $j$ 번째 기어의 축 회전수,  $N_j$ 는  $j$ 번째 기어치 개수,  $N_j$ 는  $j$ 번째 기어치 개수이다. 스펙트럼 상에서의 날개통과주파수를 알면 실선의 1차, 2차 기어에 해당하는 기어물림주파수를 알 수 있다. 1차 기어물림 주파수는 67.35% MPP 조건 기준 130Hz, 389Hz로, 4차 날개통과주파수인 56Hz보다 훨씬 높기 때문에 기어의 영향은 아닌 것으로 판단된다. 추후에 동력 전달 기어 장치가 없는 포드 추진장치에서도 유사한 현상이 나타날지 검토할 필요가 있다. 엔진 근처의 선체 진동 계속 결과에서도 해당 성분은 발생하지 않은 것으로 나타나, 전체적인 추진시스템에 의하여 발생한 것으로 사료되며, 정확한 원인 파악을 위해서는 추진기 주변 장비들에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다. 현재의 추진장치에서 4차 날개통과주파수에서의 변동압력이 1~3차보다 증가하는 현상이 나타났지만 수준이 낮아 문제는 없을 것으로 보인다. 그러나, 캐비테이션 발생량이 증가하여 전반적으로 변동압력 수준이 증가될 경우에는 진동 측면에 조사가 필요할 것으로 사료된다.

대상선은 design 흡수에서 추진 및 캐비테이션 시험이 외국의 시험기관에서 수행된 바 있다. Table 3의 운항조건에서 추력 일치법으로 캐비테이션 관찰 시험이 수행되었으며, 본 연구에서 수행된 결과(KRISO)와의 비교는 Fig. 19에 나타나 있다. 전반적인 발생량과 거동 등에서는 차이가 거의 없는 것으로 보인다. 또한 외국 시험기관에서도 압력면 캐비테이션이 발생하지 않았다. Design 흡수의 경우 선수 선미 흡수 깊이가 동일하지만 현재의 연구에서는 ballast 흡수에서 실험이 진행되면서 Fig. 12와 같이 선미 trim 등에 의한 흡수 차이가 발생한다. 흡수 및 선미 trim의 영향으로 본 연구의 캐비테이션 발생 범위가 외국기관보다 증가한 것으로 나타났다. 그러나, 캐비테이션 발생량 및 거동에서 큰 차이가 없는 것으로 나타나 현재의 연구에서 개발된 토오크 일치법으로 캐비테이션 시험을 수행하여도 캐비테이션 발생량 및 거동 관련 현상 파악이 가능할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

대형캐비테이션터널에서 아지무스 추진장치 모형의 캐비테이션 시험기법을 개발하기 위하여 동력전달장치 및 토오크센서를 설계 및 제작하였다. 캐비테이션 시험을 수행하려면 예인수조보다 높은 회전수 및 동력이 요구되므로 7.5kW 수중 모터를 선정하였으며, 약 2400RPM 정도의 동력 전달이 가능한 베벨 기어 시스템을 선정하였다. 그러나, 실제로 실험을 수행하면서 약 2,900RPM까지 회전수가 증가되었다. 축적비 문제로 기존 포드 동력계 사용이 불가하여 추진장치 포드를 기어박스로 사용할 수밖에 없었다. 따라서, 프로펠러 추력 계측이 불가함에 따라 기존 추력일치법 시험기법으로 캐비테이션 시험 수행이 어려워 모형선 상부에 설치된 토오크 센서를 이용한 토오크 일치법으로 캐비테이션 시험을 수행하는 방법을 적용하였다.

캐비테이션 모형시험은 실선시험이 ballast 흡수에서 수행됨에 따라 ballast 흡수를 기준으로 수행되었다. 모형시험은 실선시험이 수행되는 3개의 조건에서 수행되었다. 67.35% MPP 조건부터 흡입면에서는 0.95R 이상의 프로펠러 위치에서 얇은 sheet 및 날개끝 보오텍스 캐비테이션 발생했으며, 매우 작은 수준의 변동압력이 계측되었다. 압력면에서는 매우 불안정한 캐비테이션이 발생하였다. 변동압력은 5차 BPF가 다른 차수보다 높게 나타났는데, 이는 기어 잇수(20개)와 일치하는 주파수이다. 기어 잇수에 따른 변동압력 수준이 증기됨에 따라 앞으로 기어선정시 날개통과주파수와 일치하지 않는 잇수를 고려하는 것도 필요하리라 사료된다. 프로펠러 하중이 높아질수록 변동압력이 증가해야 하지만 본 연구에서는 85% MPP 조건의 변동압력이 67.35% MPP 조건보다 유사하거나 감소하는 현상이 나타났다. 이는 불안정하게 발생하는 압력면 캐비테이션이 원인이라 사료된다. 압력면 캐비테이션이 발생하지 않은 design 조건에서 흡입면 캐비테이션이 ballast 흡수 85% MPP 보다 증가되었음에도 변동압력이 감소된 현상을 보면 압력면 캐비테이션이 변동압력 발생에 영향을 주고 있음을 판단할 수 있다.

Design 흡수에서 대상선의 캐비테이션 시험은 해외 시험시설에서 수행됨에 따라 같은 운항조건에서 캐비테이션 시험이 수행되었다. 본 연구에서의 캐비테이션 발생량 및 거동 등은 해외 기관 결과와 거의 유사하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 토오크 일치법에 의한 시험기법이 타당함을 알 수 있었다.

실선에서 변동압력이 계측된 바, 모형시험과 수준에서는 차이가 있었지만, 조건에 따른 경향은 유사한 부분이 있었다. 실선에서도 85% MPP 변동압력 수준이 67.35% MPP수준과 유사하거나 감소되는 현상이 나타났는데, 아마 모형시험과 같이 압력면 캐비테이션 발생이 원인이라 사료된다. 따라서, 모형시험으로 실선에서 나타날 수 있는 현상 예측이 가능하리라 사료된다. 실선 변동압력은 4차 BPF가 다른 차수에 비해 증가하는 경향을 보여준다. 모형시험에서 5차 BPF 변동압력 수준이 높은 원인은 파악이 되었지만 실선에서의 4차 BPF 수준이 높은 것은 원인 파악이 어려웠다. 추후 원인 파악을 위한 검토가 요구된다.

## 후기

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 ‘IMO 해양환경보호 규제대응을 위한 선박 수중방사소음 모니터링 및 소음저감 기술 개발(PNS4680)’ 및 기관의 주요사업인 “SMR 선박의 추진기 설계 및 추진시스템 개념설계(PES5121)” 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

- Ahn, J.W., Kim G. D., Kim, K.S. and 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., Seol, H.S. and Lee, C.Y., 2013, *Model ship binding device which has means to prevent draft variation of model ship*, Patent number 10-1259279.

28th ITTC, 2017. Procedure for podded propulsion tests and extrapolation. *ITTC Quality System Manual*.

Kim, K.S., Ahn, J.W., Park, Y.H., Kim, G.D., Kim, S.P., Yu, Y.W. and Lee, C.S., 2013, Correlation study on pressure fluctuation measurement at large cavitation tunnel with full-scale data for two container carriers. *12th PRADS*, Changwon, Republic of Korea, 24-27 October 2013.

Kim, K.S., Park, Y.H. and Lee, C.Y., 2014, *Installation structure of drive motor and dynamometer and installation method of drive motor and dynamometer using it*, Patent number 10-1379403.

Song, I.H., Ahn, J.W., Kim, K.S. and Moon I.S., 2000. Characteristics of cavitation noise on high-speed propellers. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 37(2), pp.22-29.



안종우



설한신



정홍석



박영하



김상환



한정일