

# 모형선 캐비테이션 시험을 통한 선체부착 센서를 이용한 추진기소음 모니터링 기술 실험적 연구

## Experimental Study of Propulsion Noise Monitoring Technology using Hull-attached Sensors through Model Ship Cavitation Test

이 석 규<sup>†</sup> · 한 형 석<sup>\*</sup> · 성 우 제<sup>\*\*</sup> · 설 한 신<sup>\*\*\*</sup> · 나 선 근<sup>\*\*\*\*</sup> · 전 관 수<sup>\*\*\*\*</sup>  
Sockkyu Lee<sup>†</sup>, Hyungsuk Han<sup>\*</sup>, Woojae Seong<sup>\*\*</sup>, Hanshin Seol<sup>\*\*\*</sup>,  
Sungeun Na<sup>\*\*\*\*</sup> and Kwansoo Jeon<sup>\*\*\*\*</sup>

(Received May 16, 2023 ; Revised March 20, 2024 ; Accepted March 21, 2024)

**Key Words** : Propeller Noise(추진기 소음), Hull-attached Sensor(선체 부착 센서), Cavitation Inception Speed(공동 발생 속도), Source Localization(음원 위치 추정)

### ABSTRACT

An experimental study was conducted to confirm the CIS monitoring algorithm using the kurtosis value of the DEMON spectrum and cavitation source localization estimation algorithm using the matched field inversion technique with the currently operating battleship model. Hull attachment sensors (acoustic, acceleration) were attached to the model installed in a large cavitation tunnel. The model was tested based on speed/condition, and the measured signals were processed and analyzed using algorithms. The CIS monitoring algorithm was evaluated as predictable within the error range. However, when affected by singing, it was confirmed that it was predictable within the error range when the corresponding frequency band was checked and excluded from the algorithm. The cavitation source localization estimation algorithm estimated similar locations in the process of selecting and analyzing cases that occur intermittently and occur in a single location as much as possible. However, we analyzed that an error in the angular direction occurred because of source localization estimation when the difference between the location of cavitation and location of collapse occurred first owing to cavitation in the hub.

### 1. 서 론

함정에서 발생하는 수중방사소음은 전투시 적함에 식별되는 주요 요소로서 함정의 생존성에 직결된다.

함정의 수중방사소음원은 크게 세 가지로 나눌 수 있으며, 이는 기계류 소음, 유체동력학적 소음, 추진기 소음이다. 기계류 소음은 엔진, 감속기, 발전기 등의 탑재 장비에서 기인한 진동이 선체 외판으로 전달되어 방사하는 소음이다. 유체동력학적 소음은 함정

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, LIG NEX1(co.), Research Engineer  
E-mail : sockkyu.lee@lignex1.com

<sup>\*</sup> Defense Agency for Technology and Quality, Principal Researcher

<sup>\*\*</sup> Seoul National University, Professor

<sup>\*\*\*</sup> Korea Research Institute Ships & Ocean Engineering, Principal Researcher

<sup>\*\*\*\*</sup>LIG NEX1(co.), Researcher

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2022 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Hanshin Seol

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이 운행할 때 유체가 선체를 따라 이동하면서 발생하는 소음이다. 추진기 소음은 추진기가 유체 내에서 회전하면서 발생하는 소음으로 비공동 소음과 공동(cavitation) 소음으로 나눌 수 있다.

공동이란 추진기가 일정속도 이상으로 회전시 추진기면 저압부에서 작은 핵(nucleus)이 성장하여 기포로 변하는 현상을 말하며, 기포가 성장하다가 급격히 붕괴하면서 생성된 공동(cavitation)소음은 함속의 5층~7층에 비례하여 급격히 수중방사소음을 증가시킨다<sup>(1,2)</sup>.

특히, 추진기의 캐비테이션 발생으로 인해 생긴 소음은 추진기의 날개 수, 회전 수 등과 같은 함정 식별 정보를 포함하고 있으며, 급격히 증가하는 캐비테이션 소음이 수중방사소음의 대부분을 차지하므로 적에게 탐지될 가능성이 높아져 생존성을 취약하게 만든다. 그래서 함정의 캐비테이션 발생 속도(CIS, cavitation inception speed)를 함정의 특수성능으로 관리하고 있다.

그러나, 운용중 여러 가지 변수(해상상태, 추진기면 파개비 부착 등)에 의해 알려진 캐비테이션 발생 속도보다 낮은 속도에서 발생하게 된다면, 유사시 피탐의 원인이 될 수 있다. 그러므로 다양한 상황에 대처하기 위해 함정 운용에 있어 상시 캐비테이션 발생 모니터링이 반드시 필요하다.

최근 함 운용 중 캐비테이션 발생을 식별하기 위하여 선체하부에 가속도센서 및 음향센서를 부착하거나 관측창을 설치하여 캐비테이션 발생을 모니터링 하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다<sup>(3,4)</sup>.

선체하부에서 측정한 센서신호를 통해 캐비테이션 발생을 추정하기 위해 주로 DEMON(detection of envelop modulation on noise) 분석을 이용한다. 상시 캐비테이션 발생 모니터링을 위해서는 DEMON 신호의 단순화 및 정량화 처리가 필요하며, DEMON 분석 단순화를 위한 정보엔트로피와 교차엔트로피의 적용 연구<sup>(5)</sup>, DEMON 처리된 신호의 CIS 전/후 데이터 군집을 이용한 마할라노비스 거리 비교 연구<sup>(4)</sup>, 토널 신호 간섭을 제거한 DEMON 처리 기법, DEMON 스펙트럼의 첨도(kurtosis)값을 활용하는 기법 연구<sup>(6)</sup> 등이 함께 이루어지고 있다.

한편, 추진기는 선체의 외부에 노출되어 있기 때문에 추진기에 의한 소음 전파는 근원적으로 차폐가 불가능하여, 설계단계에서 그 소음 수준을 감소시키는 연구가 필수적이다. 그렇기 때문에 함정에서는 캐비테이션 초기 생성 속도(CIS)를 높여 캐비테이션 발생

을 지연시키는 것이 핵심기술이라 할 수 있으며 캐비테이션 초기 생성 속도를 높이기 위해서는 추진기에서 발생하는 캐비테이션과 그 위치를 정확하게 식별하는 연구가 필요하다<sup>(1,7,8)</sup>. 캐비테이션 발생 위치추정은 음향센서의 배열이 필수적이며, 빔형성(beamforming) 방법 등 다양한 음향신호처리 방법이 소개되어 있다. 대표적인 기법으로는 배열에서 음향 신호의 도달 시간차(TDOA, time difference of arrival)를 통한 캐비테이션 위치 추정 방법<sup>(9)</sup>, 자유음장에 대한 그린함수(green function)를 이용하여 음원을 모호화하고<sup>(10)</sup>, 이를 기초한 목적함수의 최소화를 통해 위치 추정한 광대역 주파수에 대한 정합장 역산(matched field inversion) 기법<sup>(11)</sup>, 소수의 청음센서로 하위배열(sub array)을 도입하여, 에일리어싱(aliasing)기준을 부분적으로 만족하는 위치에 하위배열을 배치한 희소배열(sparse array)의 적용을 통해 다수센서가 필요한 빔형성 기법 한계를 극복한 위치추정 기법 연구가 진행되었다<sup>(12)</sup>. 또한 빔형성 방법등에서 다소 낮은 해상도의 한계를 극복하기 위해 희소 신호 복원 기법을 적용한 위치 추정기법들이 연구되고 있으며, 희소 신호 복원 기법 중 하나인 압축센싱(CS, compressive sensing)을 적용하여 날개 끝 보텍스 캐비테이션 소음원 위치 추정 연구와<sup>(13)</sup> 희소베이지안 학습(SBL, sparse Bayesian learning)을 기반으로 날개 끝 보텍스 캐비테이션을 3-D 무격자로 위치추정하는 기법이 연구되었다<sup>(14)</sup>.

또한, 현재 캐비테이션 소음을 감소시키기 위해 대부분의 전투함정 프로펠러에는 PRAIRIE(propeller air induced emitting) 시스템을 갖추고 있으며, 이는 캐비테이션 발생 시 프로펠러 앞날(leading edge)에서 공기를 분출하여 캐비테이션의 급격한 성장 및 붕괴를 지연시켜 소음을 저감하는 시스템이다. PRAIRIE 시스템 사용에 따른 캐비테이션 소음 특성 연구를 통해 소음이 저감되고 있음이 확인되었으며<sup>(15)</sup>, PRAIRIE 공기 구멍으로 공기 자연 누출로 인해 캐비테이션과 유사한 소음 증가현상 연구<sup>(16)</sup>도 진행되었다. 미래에 캐비테이션 발생 위치추정에 따른 공기분사의 실시간 제어가 가능하다면, 캐비테이션 위치추정 기술의 한 가지 발전 방향이 될 수 있겠다.

이 논문에서는 현재 운용하고 있는 실적함(○○함)의 축소모형을 가지고 DEMON 스펙트럼의 첨도(kurtosis)값 등을 활용하는 CIS 모니터링 알고리즘과<sup>(6)</sup> 정합장 역산(matched field inversion)기법을 활용한 캐비테

이션 위치추정 알고리즘의<sup>(11)</sup> 확인 및 실험적 변수에 따른 개선방향과 주의점 등을 확인하고자 하였다. 이를 위해 축소모형을 설계, 제작하여 대형 캐비테이션 터널에서 시험을 수행하였고, 각 알고리즘의 결과를 분석하였다. 또한 CIS 모니터링시 싱잉(singing, 명음) 발생으로 인한 알고리즘 영향성과 개선방향 및 주의점을 확인하였고, 위치추정 분석과정에서는 허브에서 먼저 캐비테이션이 발생함으로 인한 위치추정 오차영향성을 확인하였고, 개선방향 및 주의점을 확인하였다.

이 논문의 2장에는 모형시험 셋업 및 시험조건을, 3장에서는 음향센서 배열 소개와 CIS 모니터링을 위한 단일 센서위치 선정, 4장에서는 음향/가속도 센서로 CIS 모니터링 알고리즘 확인 과정과 싱잉으로 인한 영향성을, 5장에서는 선정된 배열을 활용하여, 위치추정 알고리즘으로 일반적인 연구결과인 tip 볼텍스가 아닌 허브에서 발생하는 캐비테이션으로 인한 영향성을 실험적으로 고찰하였다.

## 2. 모형시험 셋업 및 시험조건

### 2.1 캐비테이션 초생 모형시험 장치셋업

#### (1) 모형선박 제작 및 설치

모형 선박은 Fig. 1과 같이 대형 캐비테이션터널에

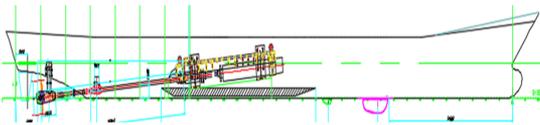


Fig. 1 Drawing of model ship

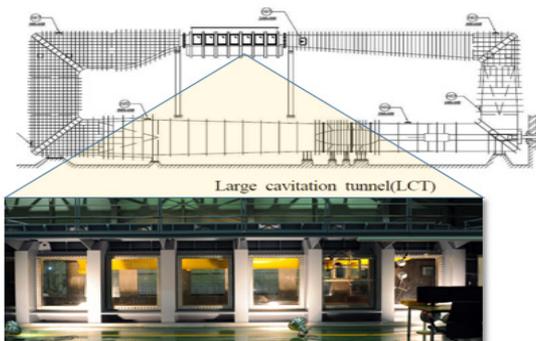


Fig. 2 Model Ship Installation

설치를 위한 나선 형상 및 스트럿, 리더, 축계, 흡수판과 같은 부가물을 설계/제작하였으며, 모형의 축척비는 1/14이다.

모형 선박은 Fig. 2와 같이 KRISO(Korea research institute of ships & ocean engineering)가 보유한 대형 캐비테이션 터널에 설치하였다.

#### (2) 센서 설치

센서는 Fig. 3과 같은 위치(파란색)에 파이프 형태의 음향센서 어댑터를 사용하여 Fig. 4와 같이 모형 추진기 상단 선체 표면에 음향센서를 설치하였으며, Fig. 5와 같이 수밀형 가속도계를 선체 내부 추진기 상단 좌현, 중심, 우현에 하나씩 설치하였다. 이후로 가속도계 (accelerometer)는 acc로, 음향센서(acoustic sensor)는 acc로 표현하겠다. 센서의 사양은 Table 1과 같다.

### 2.2 추진기 캐비테이션 초생 모형시험 조건

#### (1) 시험 조건

CIS 모니터링을 위한 시험 조건은 선박 추진기소

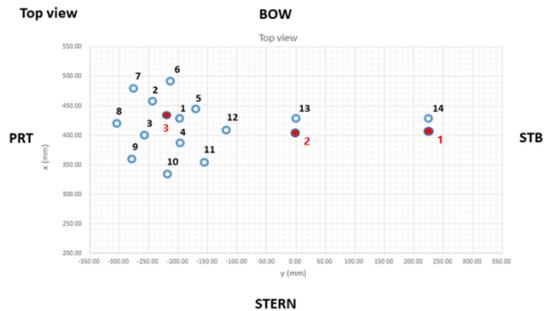


Fig. 3 Acc/Aco sensors position map



Fig. 4 Test setup for model ship of large cavitation tunnel

음 모형시험 기법<sup>(17)</sup>을 참고하여 진행했으며, 다음 3가지의 경우로 진행하였다. 첫째, 둘째 조건과 셋째 조건은 시기의 차이를 가지고 진행하였다.

첫째, 실적함(○○함) 기존 보고서의 운항곡선(ship operation curve)에 따른 2kn 간격으로 증가하는 선속별 조건(Fig. 6, 검은점).

둘째, 운항 곡선 좌우의 전진비 고정 2 조건에서 캐비테이션 수를 0.1 간격씩 감소 시키는 조건(Fig. 6, 빨간점).

셋째, 첫째 시험 조건에서 보간법을 통해 0.5 kn 간격으로 증가하는 선속별 조건(Fig. 7).

부가 설명으로 수조 시험부 압력의 변화는 캐비테이션 수(cavitation number,  $\sigma_A$ ), 프로펠러 회전수의 변화는 전진비(advance coefficient,  $J_A$ )로 무차원화하여, 운항곡선 좌우 전진비 조건에서의 초기 발생 점들을 이은 곡선을, 운항 곡선과 함께 도시함으로써 캐비테이션 초기 발생 속도를 찾을 수 있다. 프로펠러의 전진비와 캐비테이션 수의 정의는 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$J_A = \frac{Va}{nD} \tag{1}$$

$$\sigma_A = \frac{P_o - P_v}{1/2\rho n^2 D^2} \tag{2}$$

$Va$ 는 터널 내부 유속이며,  $D$ 는 직경이며,  $n$ 은 추진기 회전수이다. 그리고,  $P_o$ 는 터널 내부 정압이며,  $P_v$ 는 증기압이며,  $\rho$ 는 유체밀도이다.

CIS 판단의 정확도를 직관적으로 확인하기 위해 선속구간을 세밀화 하였으나, 이로 인해 회전수 제어의 세밀한 변화가 상잉의 증폭을 발생시켰다. 상잉 현상은 일반적으로 프로펠러 끝단부의 유동 박리 주파수(vortex shedding frequency)와 프로펠러 날개의 고유진동수가 일치하여 발생하는 공진 현상으로써, 감쇄 음장을 형성하지 않는 경우에 명음으로 나타나며, 자려진동의 일환으로 볼 수 있다<sup>(18-20)</sup>.

공통시험조건으로 높은 레이놀즈 수에서의 시험을 위하여, 터널 유속은 9 m/s로 고정하였다.

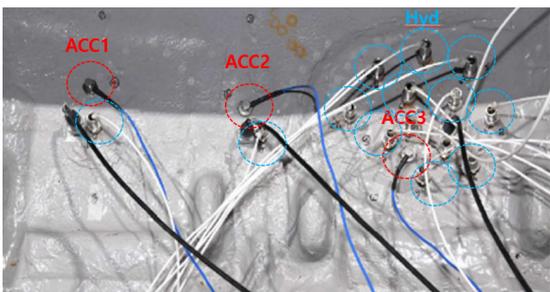


Fig. 5 Installation of sensors inside the hull

Table 1 Sensor specification

	Features
Acoustic sensor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• B&amp;K type 8103 miniature hydrophone</li> <li>- Sensitivity : -211 dB re 1 V/<math>\mu</math>Pa</li> <li>- Max. operating static pressure: 4 MPa(252 dB)</li> <li>- Temperature range : -30°C ~ +80°C</li> <li>- Frequency range : 0.1 Hz ~ 180 kHz</li> <li>- Size : 50 mm(length), 9.5 mm(diameter)</li> </ul>
Accelerometer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PCB Model W352C03 accelerometer (352C03 water resistant option)</li> <li>- Sensitivity : 10 mV/g</li> <li>- Temperature range : -54°C ~ +121°C</li> <li>- Frequency range : 0.5 Hz to 10 kHz</li> <li>- Size : 15.7 mm(length), 11.2 mm(diameter)</li> </ul>

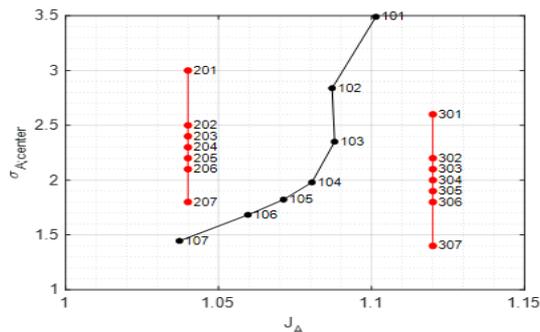


Fig. 6 Test condition 1, 2 for the model ship

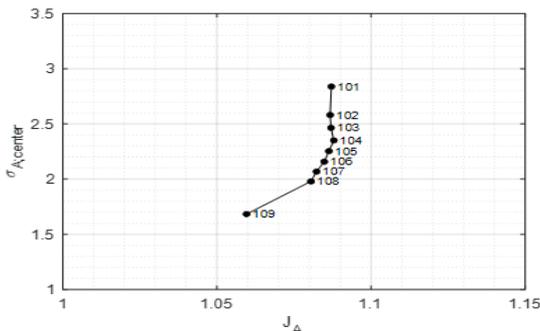


Fig. 7 Test condition 3 for the model ship

위치추정을 위한 시험조건은 캐비테이션 초생 조건에서의 배열 음향센서 측정 데이터를 가지고 진행하였다.

### 3. 음향센서 배열 및 CIS 모니터링 센서위치

#### 3.1 음향센서 배열

##### (1) 나선배열

Fig. 8에 주어진 공간에서 캐비테이션 발생 위치추정을 위한 최적배열은, 주엽의 빔폭을 작게 부엽의 크기를 제한하여 공간 분해능을 높이는, 목적함수 식 (3)을 최소로 하는 최적 설계인자로 구하였다. 이때, 광역 최적화 기법(global optimization method)의 일종인 VFSR(very fast simulated reannealing)을 적용하였다.

$$\Phi(\bar{m}) = -\frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} \left( \frac{f_i \Delta_{HPBW}^i(\bar{m})}{SL_{max}^i(\bar{m})} \right), \quad (3)$$

$$\Delta_{HPBW} = (k_x/k + k_y/k)/2$$

$\Delta_{HPBW}$ (무차원 빔폭) : 주엽 최대크기의 1/2

$k$ (파수, wavenumber) :  $2\pi/\lambda$

$\bar{m}$  : 설계인자로 이뤄진 벡터

$SL_{max}$ (부엽의 최대 크기): 가장 큰 부엽값

$f_i$ (주파수 가중치) :  $i$  번째 주파수

$N_f$  : 관심 주파수 대역내 이산화된 주파수 갯수

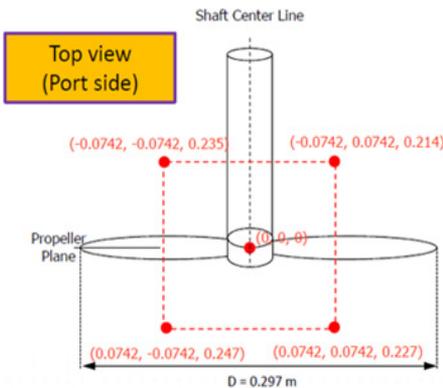


Fig. 8 Sensor installation space

주엽빔폭, 부엽크기를 고려한 센서 개수 대비 배열 성능이 가장 우수한 나선배열의 7개 수량을 선정하였다. 나선배열은 Y형, O형, +형 배열과 달리 Fig. 9 처럼 형상 변경 없이 동일 나선, 각, 호 길이를 바탕으로 배열 확장이 가능하다.

#### 3.2 CIS 모니터링용 센서 위치

##### (1) CIS 모니터링용 센서 위치

배열을 활용해 CIS 모니터링을 위한 센서 위치를 실험적으로 확인하고자 한다. 직관적으로 추진기에서 발생하는 변동압력은 추진기 직상부에서 가장 잘 나타낼 것으로 예측되며, 배열센서의 CIS 판단 결과를 통해 이를 확인 할 수 있었다. CIS 모니터링 알고리즘은 4가지 판정기준으로 DEMON spectrum의 kurtosis 기준치, 최소소음, 캐비테이션 최대발생소음, SR(shift rate)/BR(blade rate) 기준치 등으로 판단하며, 관련 설명은 4장에서 추가 언급하였다.

여기서는 첫 번째 실험 조건으로 진행하였고, Table 2는 캐비테이션 발생 선속에서의 결과들이다.

결과의 반복성을 확인하기 위하여, 시간(s)별 1초 저장 데이터로 판단한 10개의 케이스를 확인하였다. 추진기에 비교적 가까운 4번 센서 결과는 배열 센서 결과와 유사한 반면, 비교적 멀리 위치한 7번 센서는 결과에 차이를 보이고 있음을 알 수 있었고, 직관적인 예측대로 추진기 직상부에서 계속

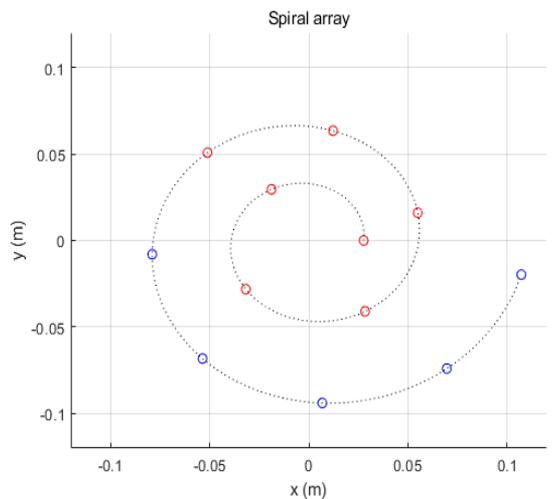


Fig. 9 Spiral array extension

한 결과를 CIS 모니터링에 활용하는 것이 합리적인 임을 알 수 있었다.

### 4. CIS 모니터링 확인 및 결과 분석

#### 4.1 추진기 CIS 모니터링 알고리즘

##### (1) CIS 모니터링 알고리즘

CIS 모니터링 알고리즘은 Fig. 10과 같이 진행된다.

자함의 캐비테이션 발생을 모니터링하는 목적은 작전 중 함정의 알려진 CIS 이전에 발생하는 캐비테이션을 감지하여 적함에 피 탐지될 수중방사소음을 관리하는 것이다. 따라서 캐비테이션이 충분히 발달된 상태에서 캐비테이션이 발생했는지 판단하는 것은 무의미하기 때문에, Fig. 10처럼 소음레벨 상한선 기준(La\_cav)을 넘는 크기의 신호는 캐비테이션이 발생한 것으로 판단하도록 하였다. 마찬가지로 소나식으로부터 적합 작전반경과 소나 배열이득 및 음향투과 손실등을 고려한 피탐 되지 않을 일정 값 이하의 소음레벨 하한선 기준(Lp\_min)보다 작은 신호는 신호 특징 분석 등의 별도 신호처리 없이 캐비테이션이 발생하지 않은 것으로 판단하도록 하였다.

상한선(Lp\_cav)과 하한선(Lp\_min) 사이 신호는 DEMON spectrum의 SR(shaft rate)/BR(blade rate) 값 및 kurtosis 값을 통해 캐비테이션 유무를 판단하도록 하였다.

Table 2 Cavitation judgment results

Time [s]	Sensor 7	Sensor 4	All sensors
0 ~ 1	Cavitation	Cavitation	Cavitation
1 ~ 2	No cavi	No cavi	No cavi
2 ~ 3	Cavitation	Cavitation	Cavitation
3 ~ 4	No cavi	Cavitation	Cavitation
4 ~ 5	No cavi	No cavi	Cavitation
5 ~ 6	No cavi	Cavitation	Cavitation
6 ~ 7	Cavitation	Cavitation	Cavitation
7 ~ 8	No cavi	Cavitation	Cavitation
8 ~ 9	No cavi	Cavitation	Cavitation
9 ~ 10	Cavitation	Cavitation	Cavitation

### 4.2 추진기 CIS 모니터링 결과 확인

(1) 가속도센서를 이용한 CIS 모니터링 결과  
먼저 Fig. 6의 첫째 조건 2 kn 증가하는 조건과, 둘째 조건 전진비 고정하고 캐비테이션수를 감소시키는 조건으로 시험을 진행하였다.

각 시험조건이 맞추어지면 모형선체에 부착해 놓은 가속도 센서로부터 신호를 데이터 수집장치(B&K사의 3053-B-12/0)를 통해 60초간 계측하여 가속도 신호의 1/1 옥타브 스펙트럼 및 DEMON 스펙트럼을 가지고 캐비테이션 발생 여부를 모니터링 하였다.

Fig. 11과 Fig. 12는 첫째 조건에 대해 60초간 계측한 좌/우 가속도 신호의 1/1 옥타브 평균 스펙트럼이다. 104 조건에서 105 조건으로 변경 시 2 kHz 이상 주파수 대역에서 가속도 레벨이 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서 105 조건에서는 이미 캐비테이션이 충분히 진행된 것으로 판단되었으며 캐비테이션 발생 속도는 105 조건 미만임을 예측할 수 있었다.

캐비테이션 발생 여부를 모니터링하기 위해 Fig. 13 ~ Fig. 20과 같이 0.5초 간격으로 1/1 옥타브밴드의 4 kHz ~ 8 kHz의 가속도레벨과 DEMON 스펙트럼의

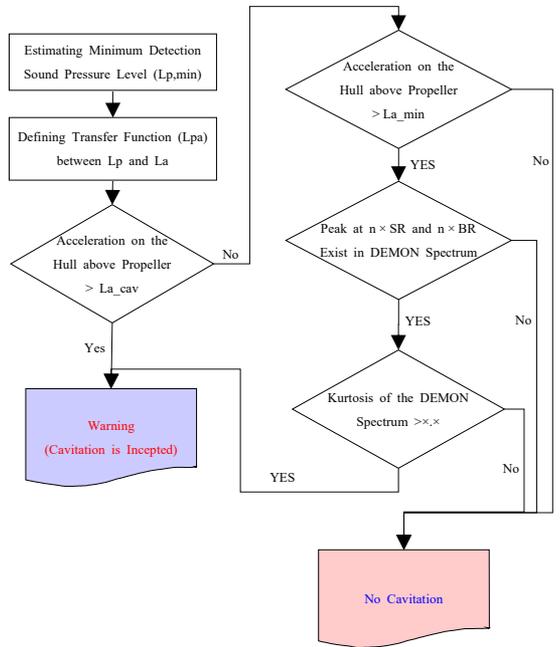


Fig. 10 CIS monitoring algorithm

첨도 및 회전주파수/블레이드 통과주파수(SR/BR)에서의 가속도 레벨을 계측하고 이를 캐비테이션 발생 모니터링 알고리즘을 가지고 캐비테이션 발생 여부를 평가 하였다.

Acc1(우현)과 Acc2(좌현)을 동시 고려했을 때 103 조건 ~ 104 조건에서 캐비테이션이 발생한 것으로 추정이 되었다.

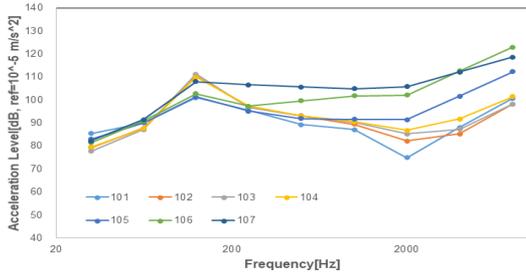


Fig. 11 1/1 octave average spectrum(acc1)

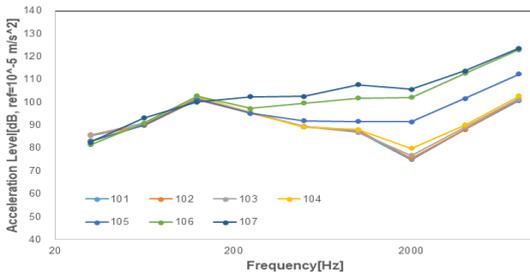


Fig. 12 1/1 octave average spectrum(acc3)

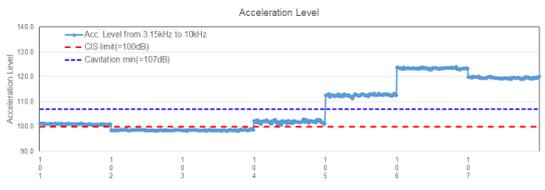


Fig. 13 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz)(acc1)

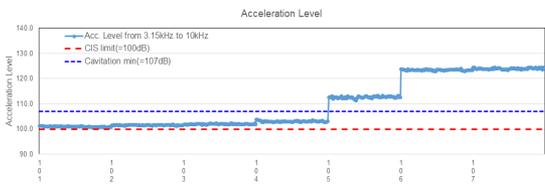


Fig. 14 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz)(acc3)

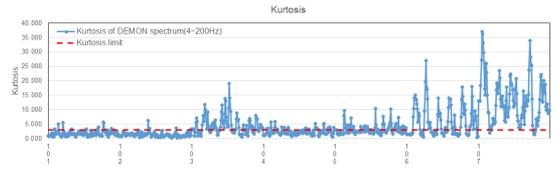


Fig. 15 DEMON spectrum kurtosis(acc1)

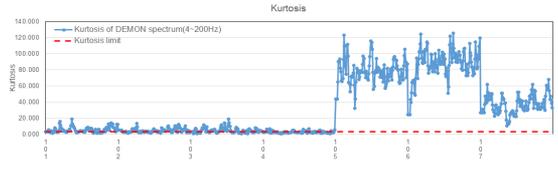


Fig. 16 DEMON spectrum kurtosis(acc3)

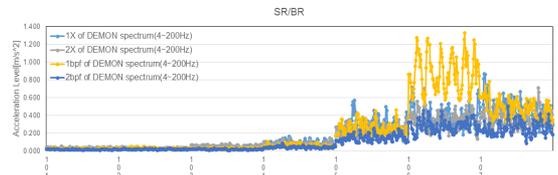


Fig. 17 SR/BR level(acc1)

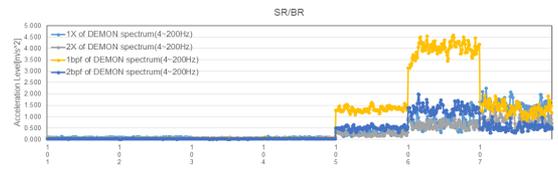


Fig. 18 SR/BR level(acc3)



Fig. 19 Cavitation monitoring result(acc1)

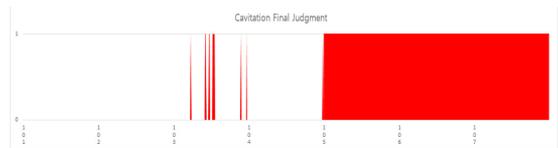


Fig. 20 Cavitation monitoring result(acc3)

Fig. 21 ~ Fig. 24는 둘째 조건에 대해 60초간 계속한 좌/우 가속도 신호의 1/1 옥타브 평균 스펙트럼이다.

전진비 1.04에서는 좌우현 모두 206 조건에서 2 kHz 이상 가속도레벨이 점차 증가함을 알 수 있으며 207 조건에서는 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 따

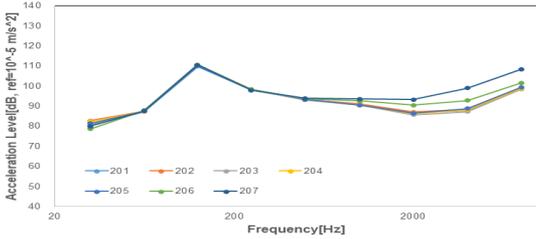


Fig. 21 1/1 octave average spectrum(acc1)

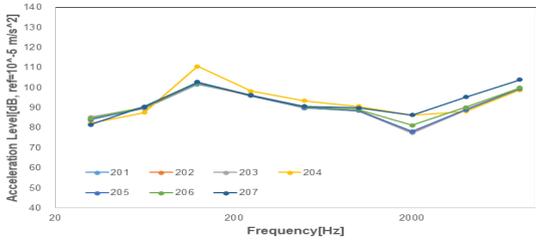


Fig. 22 1/1 octave average spectrum(acc3)

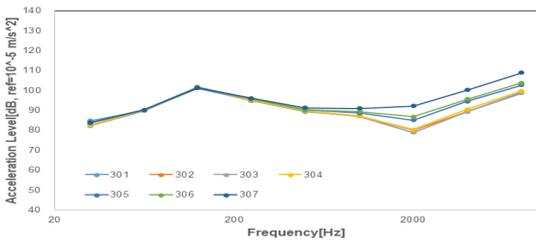


Fig. 23 1/1 octave average spectrum(acc1)

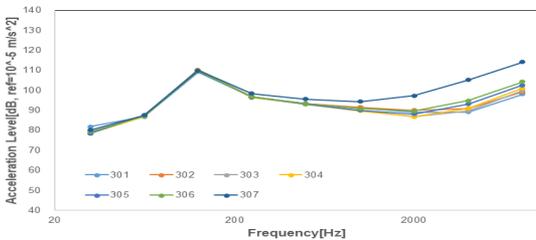


Fig. 24 1/1 octave average spectrum(acc3)

라서 207 조건에서는 이미 캐비테이션이 충분히 진전된 것으로 판단되었으며 캐비테이션 발생 속도는 206 조건임을 예측할 수 있었다.

전진비 1.12에서는 좌우현 모두 305 조건에서 2 kHz 이상 가속도레벨이 점차 증가함을 알 수 있으며 307 조건에서는 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 307 조건에서는 이미 캐비테이션이 충분히 진전된 것으로 판단되었으며 캐비테이션 발생 속도는 305 조건임을 예측할 수 있었다.

전진비 1.04 조건(201 조건 ~ 207 조건)에 대한 캐비테이션 발생 여부를 모니터링하기 위해 Fig. 25 ~ Fig. 32와 같이 0.5초 간격으로 1/1 옥타브밴드의 4 kHz ~ 8 kHz의 가속도레벨과 DEMON 스펙트럼의 침도 및 회전주파수/블레이드 통과주파수(SR/BR)에서의 가속

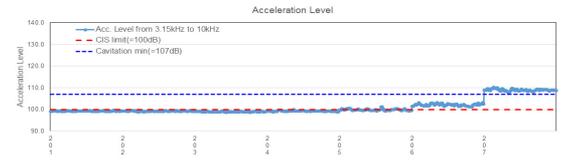


Fig. 25 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz)(acc1)

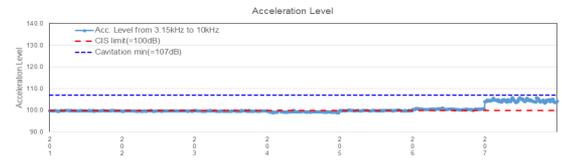


Fig. 26 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz)(acc3)

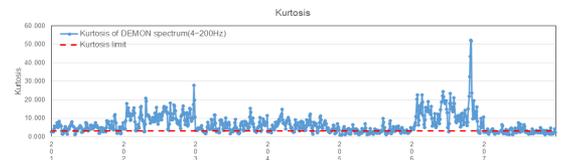


Fig. 27 DEMON spectrum kurtosis(acc1)

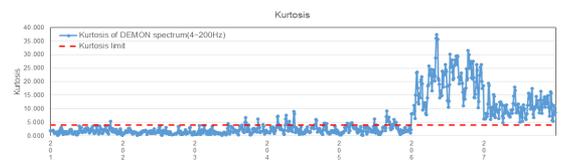


Fig. 28 DEMON spectrum kurtosis(acc3)

도 레벨을 계측하고 이를 캐비테이션 발생 모니터링 알고리즘을 가지고 캐비테이션 발생 여부를 평가 하였다.

Acc1(우현)과 Acc2(좌현)을 동시 고려했을 때 205 조건~206 조건에서 캐비테이션이 발생한 것으로 추정이 되었다.

전진비 1.12 조건(301 조건~307 조건)에 대한 캐비테이션 발생 여부를 모니터링하기 위해 Fig. 33 ~ Fig. 40과 같이 0.5초 간격으로 1/1 옥타브밴드의 4 kHz~8 kHz의 가속도레벨과 DEMON 스펙트럼의 첨도 및 회진주파수/블레이드 통과주파수(SR/BR)에서의 가속도 레벨을 계측하고 이를 캐비테이션 발생 모니터링 알고리즘을 가지고 캐비테이션 발생 여부를 평가하였다.

Acc1(우현)과 Acc2(좌현)을 동시 고려했을 때 305 조건에서 캐비테이션이 발생한 것으로 추정이 되었다.

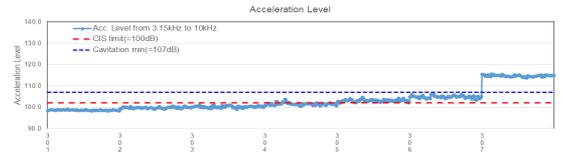


Fig. 33 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz)(acc1)

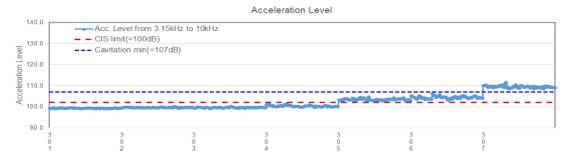


Fig. 34 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz)(acc3)

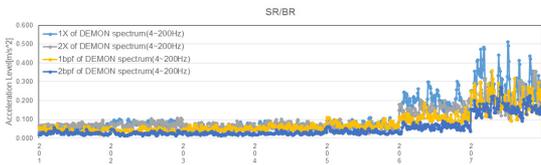


Fig. 29 SR/BR level(acc1)

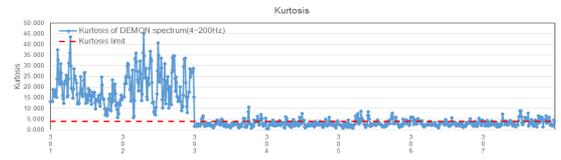


Fig. 35 DEMON spectrum kurtosis(acc1)

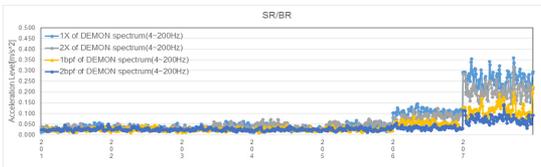


Fig. 30 SR/BR level(acc3)

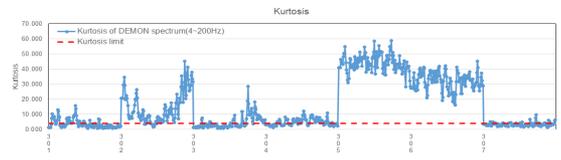


Fig. 36 DEMON spectrum kurtosis(acc3)

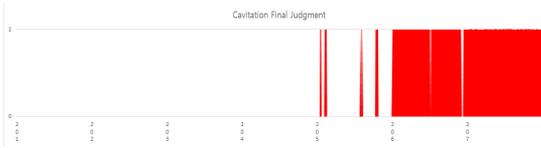


Fig. 31 Cavitation monitoring result(acc1)

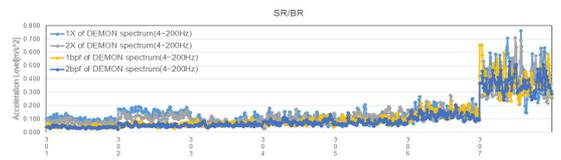


Fig. 37 SR/BR level(acc1)



Fig. 32 Cavitation monitoring result(acc3)

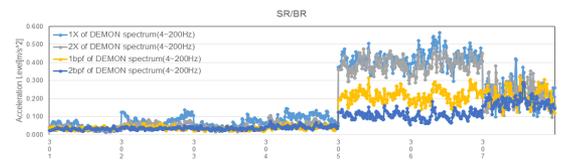


Fig. 38 SR/BR level(acc3)

(2) 음향센서를 이용한 CIS 모니터링 결과

음향센서도 먼저 Fig. 6의 첫째 조건 2 kn 증가하는 조건과, 둘째 조건인 전진비를 고정하고 캐비테이션 수를 감소시키는 조건으로 시험을 진행하였다.

각 시험조건이 맞추어지면 모형선체에 부착해 놓은 음향센서(하이드로폰)로부터의 계측 음압 신호를 데이터 수집장치(B&K사의 3053-B-12/0)를 통해 60초간 계측하여 1/1 옥타브 음압레벨에서 4 kHz ~ 8 kHz overall 소음과 DEMON 스펙트럼에서의 SR, BR의 크기 및 침도를 분석하여, 캐비테이션 발생 여부를 모니터링 하였다.

Fig. 41 ~ Fig. 44는 둘째 조건에 대해 60초간 계측한 좌/우 음향 신호의 1/1 옥타브 평균 스펙트럼이다.

1/1 옥타브 음압레벨의 경우, 201 조건 ~ 207 조건에서는 206 조건에서, 301 조건 ~ 307 조건에서는 305 조건에서 캐비테이션이 명확히 발생한 것으로 추정되었다.

음향센서로 캐비테이션 발생 여부를 모니터링하기 위해 Fig. 45 ~ Fig. 52와 같이 0.5초 간격으로 1/1 옥타브밴드의 4 kHz ~ 8 kHz의 음압레벨과 회전주파수/블레이드 통과주파수(SR/BR)에서의 가속도 레벨을 계측하고 이를 캐비테이션 발생 모니터링 알고리즘을 가지고 캐비테이션 발생 여부를 평가 하였다. 다만, 센서특성의 차이로 DEMON 스펙트럼의 침도는 참고사항으로 이용하였다. 여기서는 첫째 조건만 언급하겠다.

우현과 좌현을 동시 고려했을 때 104 조건 ~ 105 조건에서 캐비테이션이 발생한 것으로 추정이 되었다.

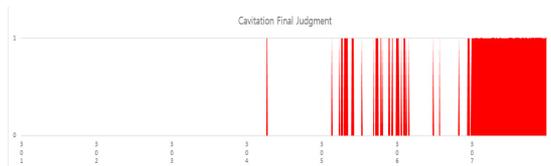


Fig. 39 Cavitation monitoring result(acc1)

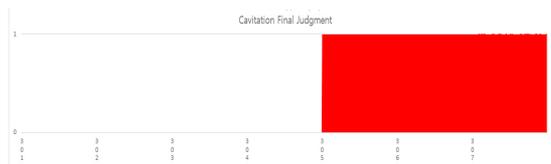


Fig. 40 Cavitation monitoring result(acc3)

4.3 CIS 모니터링 결과 비교

(1) 캐비테이션 초생 영상 판정

영상판정을 위해 Fig. 6의 첫째 조건 2 kn 간격과 들

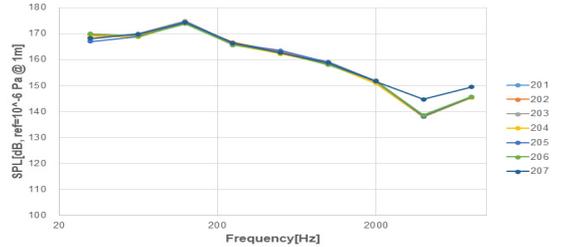


Fig. 41 1/1 octave average spectrum(stbd)

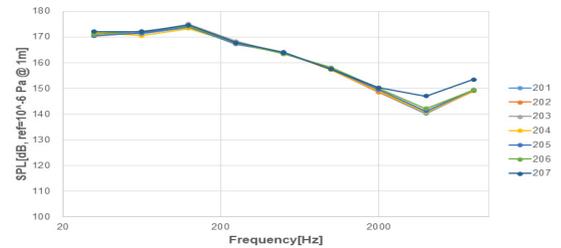


Fig. 42 1/1 octave average spectrum(port)

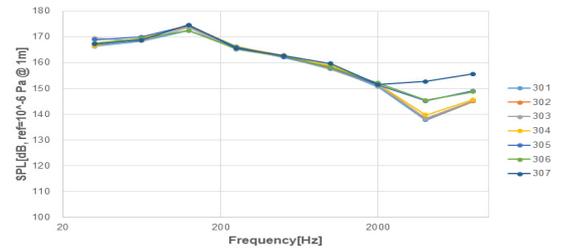


Fig. 43 1/1 octave average spectrum(stbd)

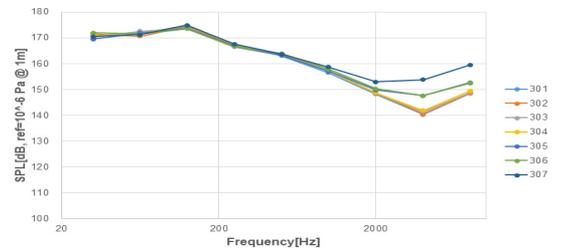


Fig. 44 1/1 octave average spectrum(port)

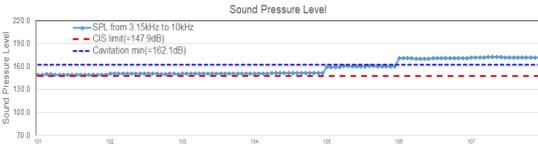


Fig. 45 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz)(port)

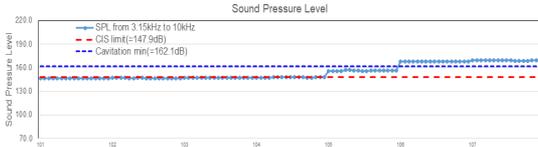


Fig. 46 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz)(stbd)

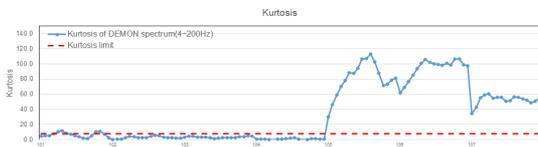


Fig. 47 DEMON spectrum kurtosis(port)

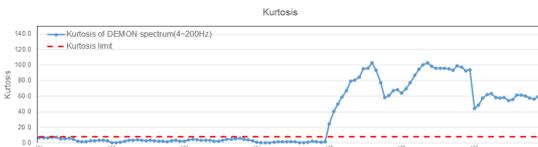


Fig. 48 DEMON spectrum kurtosis(stbd)

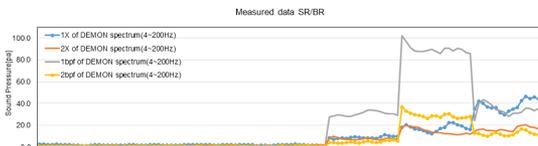


Fig. 49 SR/BR level(port)

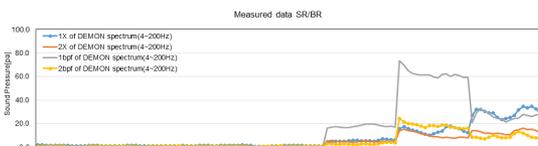


Fig. 50 SR/BR level(stbd)

제 조건 고정 전진비와 캐비테이션수의 미세 조정으로 계측시험과 영상촬영을 동시에 진행하였고, Fig. 53과 같이 고속 카메라 영상분석을 통해  $J_A = 1.04$ ,  $\sigma_{A,center} = 2.2$ (205조건)와  $J_A = 1.12$ ,  $\sigma_{A,center} = 2.0$ (304조건)에서 캐비테이션 초생을 판정하였으며, 선속별 조건에서는 빨간 두 점을 연결하여 교차되는 Fig. 54의 xx kn 선속조건에서 캐비테이션 초생 조건을 예상할 수 있었다.

(2) 센서 신호처리 판정과 결과 비교

4.2절의 모형시험 결과로부터 선체 부착 가속도센서 및 음향센서로 추정된 캐비테이션 발생 속도는 Fig. 55와 Fig. 56에서와 같이 각각 xx kn, xx kn 정도로 추정되며 이 조건에서의 캐비테이션 수 및 전진비는 Table 3과 같음을 알 수 있었다. 선체 부착 음향센서로 예측한 값이 가속도 센서로 예측한 캐비테이션 발생 조건보다는 약간 높게 평가되었으나 1 kn 오차 범위내로 예측 가능한 것으로 평가 되었다.

4.4 추진기 CIS 모니터링과 심잉 영향성

(1) 심잉 발생과 CIS 모니터링 결과 고찰

Fig. 7의 셋째 조건인 0.5 kn이 증가하는 조건으로 시험을 진행하였다. 앞에서 언급했듯이, CIS 판단의 정확도를 직관적으로 확인하기 위해 선속구간을 세밀화 하였으나, 이로 인해 회전수 제어의 세밀한 변화가 심잉의 증폭을 발생시켰다. Fig. 57과 Fig. 58은 첫째, 둘째 조건일때와 셋째 조건일때의 7 kHz부근의 가속도 스펙트럼을 비교하였다. 10 dB ~ 25 dB가 증폭되고 있음을 알 수 있었다. 7 kHz 근방에서 프로펠러 심잉(singing)이 발생하여 프로펠러 심잉 소음이 회

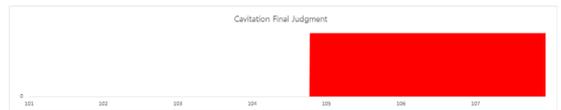


Fig. 51 Cavitation monitoring result(port)

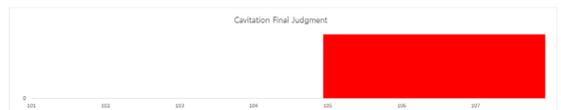


Fig. 52 Cavitation monitoring result(stbd)

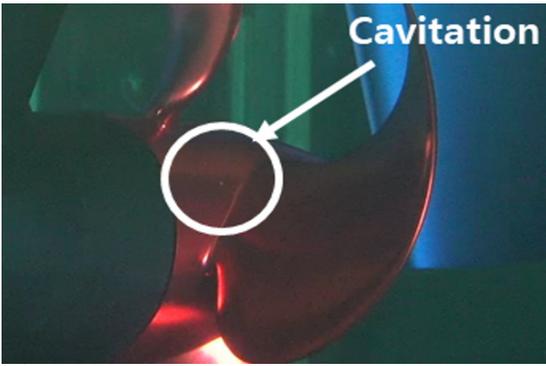


Fig. 53 Cavitation occurrence judgment

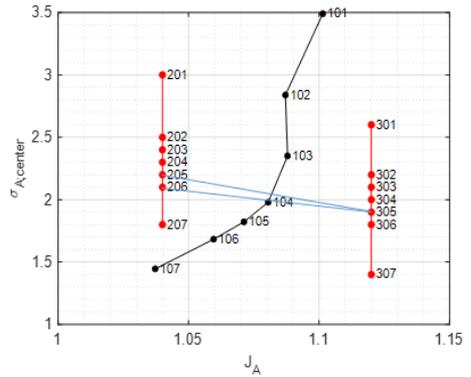


Fig. 55 Results of cavitation occurrence analysis(acc)

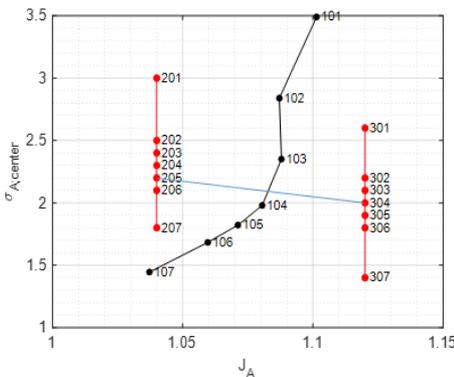


Fig. 54 Results of cavitation occurrence analysis(video)

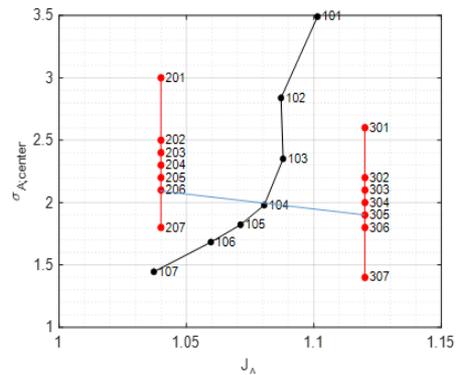


Fig. 56 Results of cavitation occurrence analysis(aco)

전주과수 및 블레이드 통과주과수에 동조됨에 따라 DEMON 스펙트럼에 SR, BR 성분이 전 시험조건에서 발생하여 DEMON 분석으로 CIS 평가가 불가능하였다. 이는 싱잉으로 인해 1/1 옥타브 8 kHz 대역 소음 레벨이 매우 커져서 음압레벨로 CIS 평가가 불가능함을 알 수 있었다.

따라서 DEMON 분석을 위한 bandpass filter를  $6.4\text{ kHz} \pm 3.2\text{ kHz}$ 에서  $4.0\text{ kHz} \pm 1.6\text{ kHz}$ 로 변경하고, 가속도 레벨 평가도 1/1 옥타브 밴드의 4 kHz ~ 8 kHz overall값 대신 4 kHz 밴드 레벨로 평가하였다. Fig. 59 ~ Fig. 64는 각각 1/1 옥타브밴드 4 kHz 중심 주과수에서의 밴드 레벨, DEMON 스펙트럼의 침도 및 DEMON 스펙트럼의 SR, BR 레벨을 보여주고 있다.

Fig. 65와 Fig. 66은 수정한 캐비테이션 발생 모니터링 알고리즘을 가지고 캐비테이션 발생 여부를 평가한 결과이다.

우현과 좌현을 동시 고려했을 때 셋째 조건 Fig. 7의

Table 3 Compare of cavitation occurrence condition

Category	Cavitation occurrence condition (acc)		Cavitation occurrence condition (aco)		Cavitation occurrence condition (video)	
	2.15	1.9	2.1	1.9	2.2	2.0
Cavitation number	2.15	1.9	2.1	1.9	2.2	2.0
Advance coefficient	1.04	1.12	1.04	1.12	1.04	1.12
Inception speed	xx		xx		xx	
Error [kn]	0.4		0.6		reference	

107 조건에서 캐비테이션이 발생한 것으로 추정이 되었다. 이는 첫째 조건 Fig. 6의 103 조건에서 104 조건으로 3/4지점에 해당하며, 1 kn 오차 범위내로 예측 가능한 것으로 평가 되었다.

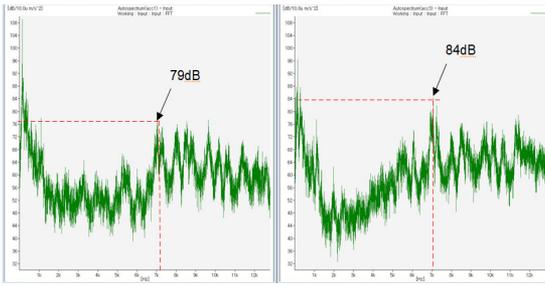


Fig. 57 Test condition 1, 2 acc spectrum(acc1, acc3)

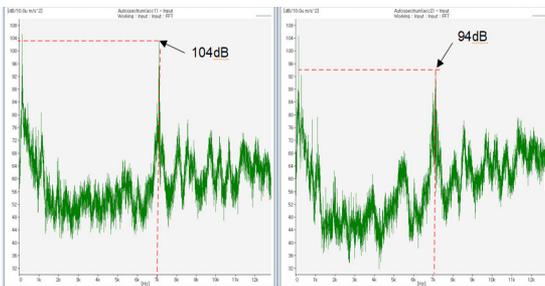


Fig. 58 Test condition 3 acc spectrum(acc1, acc3)

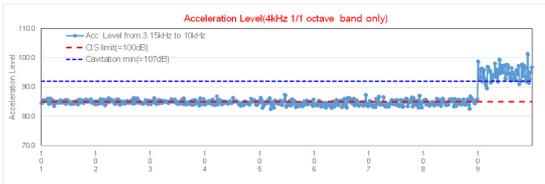


Fig. 59 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz) stbd

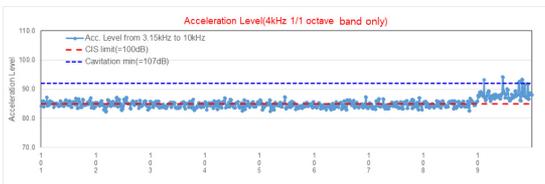


Fig. 60 1/1 octave level(4 kHz ~ 8 kHz) port

## 5. 캐비테이션 위치추정 확인 및 결과 분석

### 5.1 추진기 캐비테이션 위치추정 알고리즘

#### (1) 캐비테이션 위치추정 알고리즘

위치추정 알고리즘은 Fig. 67과 같이 각 배열 센서로부터 시간 데이터를 수집하고, 관심 주파수를 필터

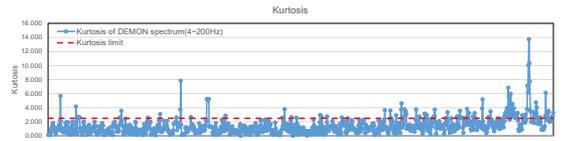


Fig. 61 DEMON spectrum kurtosis stbd

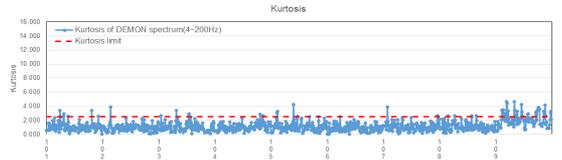


Fig. 62 DEMON spectrum kurtosis port

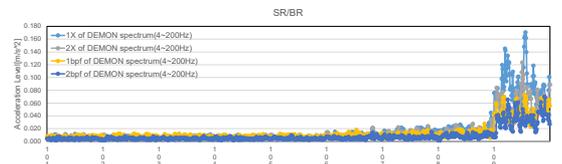


Fig. 63 SR/BR level(stbd)



Fig. 64 SR/BR level(port)

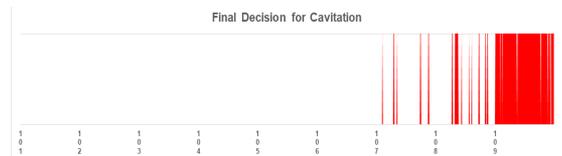


Fig. 65 Cavitation monitoring result(stbd)

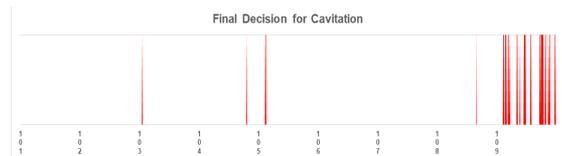


Fig. 66 Cavitation monitoring result(port)

링하고, 복제 음장을 계산할 범위를 선정 및 생성하고, 음선(ray) 모델을 기반으로 직접 입사파를 통한 음파 전달 모델링으로 복제음장 계산을 수행한다.

Bartlett 프로세서<sup>(21)</sup>로 적용된 광대역 정합장 프로세서를 이용하여 유사도가 높을수록 목적함수 식 (4)의 값이 0이 되도록 정의하여 유사도 계산을 통해 위치추정을 진행하였다.

$$E = 1 - \frac{1}{N_f} \sum_{f_i=1}^{N_f} \frac{R^+(f_i) \hat{C}(f_i) R(f_i)}{\|R(f_i)\|^2} \quad (4)$$

둘째 조건인 전진비와 캐비테이션 조건별 추진기 소음 계측 실험 시 측정된 음향 데이터를 바탕으로 프로펠러 캐비테이션 위치 추정 알고리즘을 검증하였다.

(2) 모형시험 배경 소음 및 관심 주파수 선정

Fig. 68과 Fig. 69는 선속별 추진기 소음 1/3옥타브 파워스펙트럼 일부 센서의 계측 결과와 107 조건에서 프로펠러를 제거한 배경소음 결과를 같이 도시하였다.

선속이 빨라짐에 따라 캐비테이션이 발달하며 순차적으로 파워스펙트럼 밀도의 증가를 보이는 20 kHz ~ 70 kHz 대역을 캐비테이션 위치 추정을 위한 주파수 대역으로 선정하였다. 캐비테이션 발생 예

상되는 104 조건 이상의 선정대역에서는 배경소음보다 10 dB 이상임을 확인하였다.

5.2 캐비테이션 위치추정 결과 확인

(1) 캐비테이션 위치추정 알고리즘 확인 결과

7개의 나선배열 음향센서(Table 1)로 측정된 data를 사용하여 캐비테이션 발생 위치를 추정한 결과를 Fig. 70과 Fig. 71의 우측에 도시하였다. 가로축은 모형선의 횡방향, 세로축은 수심 방향을 나타내며 좌표축 중심은 프로펠러축을 기준으로 하였고 프로펠러 직경과 같은 크기의 원을 그려 비교하기 쉽게 하였다. 영상 데이터와 비교하기 용이한 캐비테이션이 간

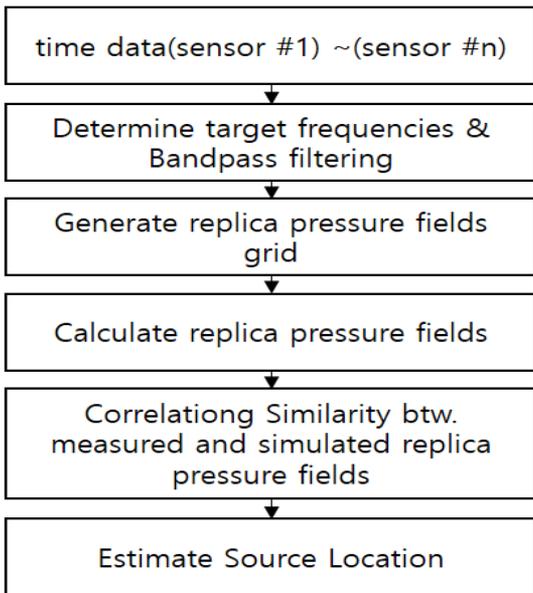


Fig. 67 Cavitation location estimation algorithm

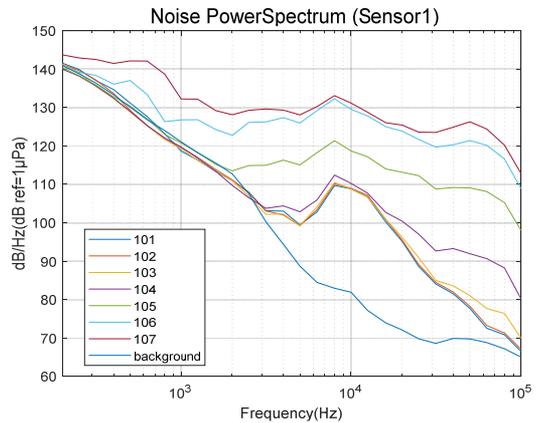


Fig. 68 Propeller noise power spectrum by ship speed (sensor 1)

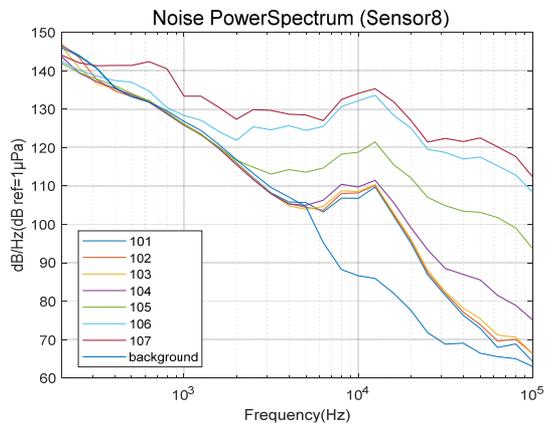


Fig. 69 Propeller noise power spectrum by ship speed (sensor 8)

혈적으로 발생하고 최대한 단일 위치에서 발생하는 케이스를 선정( $J_A = 1.04, \sigma_A = 2.1$ ,  $J_A = 1.12, \sigma_A = 2.0$ )하였다. 좌측 고속카메라 영상 데이터를 보면  $J_A = 1.04, \sigma_A = 2.1$  케이스는 프로펠러 하류 방면에서 관측시 90도 부근에서,  $J_A = 1.12, \sigma_A = 2.0$  케이스는 0도 부근에서 캐비테이션이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

다만, 몇몇 경우 음향 데이터를 통해 추정한 결과가 영상 데이터 결과와 다른 경우가 존재하였다. 예를 들어 Fig. 72와 같이  $J_A = 1.04, \sigma_A = 2.1$  케

이스의 경우, 좌측 영상으로는 90도 부근에서 캐비테이션이 관측된 반면 우측 알고리즘 결과는 다른 각도를 추정하기도 했다.

(2) 캐비테이션 위치추정 결과 고찰

캐비테이션의 위치를 추정하고, 이를 시각적인 관측 결과와 비교할 때에는 다음과 같은 이유들로 오차가 발생할 수 있다.

첫 번째는 육안으로 관측하기 어려울 정도로 작은 캐비테이션에 의해 소음이 발생했을 경우, 음향신호를 통한 추정 결과와 육안 관측 결과가 상이할 수 있기 때문이다.

두 번째는 캐비테이션에 의한 소음은 캐비테이션이 발생하고 발달하는 과정이 아니라 캐비테이션이 붕괴하면서 발생하는 것이기 때문에, 시각적으로 관측한 캐비테이션 위치와 실제 캐비테이션 소음 발생 위치가 다를 수 있기 때문이다.

음향신호 peak 등을 통해 ‘캐비테이션이 발생한 것으로 보이는 음향신호 데이터’ 및 ‘대응되는 시각의 영상 데이터’를 대조하여 둘 모두 관측됐을 때를 기준으로 캐비테이션 위치 추정 결과를 확인하면, 육안으로 관측하기 어려울 정도로 작은 캐비테이션에 의한 영향은 줄일 수 있다. 반면 시각적으로는 위치를 추정할 때는 캐비테이션이 발생하고 발달한 위치를 추정하게 되고, 음향신호를 바탕으로 위치를 추정하는 것은 캐비테이션이 붕괴하면서 소음이 발생하는 위치를 추정하기 때문에 각도 방향의 오차는 발생할 수 밖에 없다.

현재까지 캐비테이션 위치 추정 연구 중 많은 경우, 일반적으로 실선의 캐비테이션 초생 단계에서는 tip vortex cavitation(TVC)이 먼저 발생한다는 사실을 바탕으로 캐비테이션 초생 단계의 TVC의 위치를 추정하였다<sup>(1,11,13,14)</sup>.

TVC의 경우 Fig. 73과 같이 일반적으로 프로펠러 상반부에서 발생하며, 발생 후 빠르게 붕괴되기 때문에 발생 위치와 붕괴 위치가 거의 동일하며 시각적 추정 결과와 음향 신호 바탕 추정 결과의 비교가 용이하다.

반면, 이 연구에서 진행한 모형시험은 실선과 모형선의 환경 차이로 인해 TVC가 아닌 root cavitation이 주로 관측되었다. Root cavitation의 경우 반경 방향의 움직임은 드물지만, 즉 프로펠러 root 쪽에서 발생하여 tip쪽으로 이동하지는 않지만 각도방향을 따

J=1.04, sigma=2.1

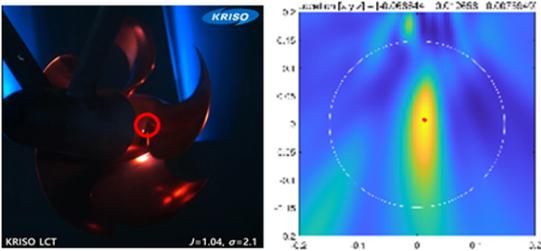


Fig. 70 Cavitation location estimation

J=1.12, sigma=2.0

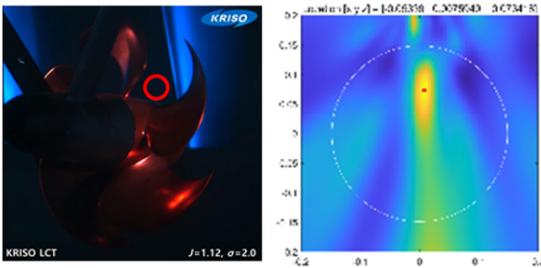


Fig. 71 Cavitation location estimation

J=1.04, sigma=2.1

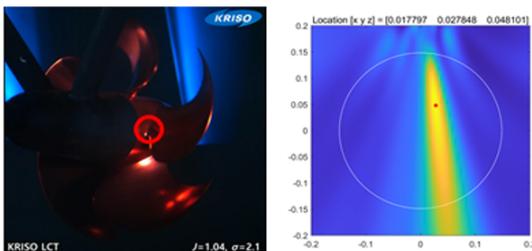


Fig. 72 Cavitation location estimation

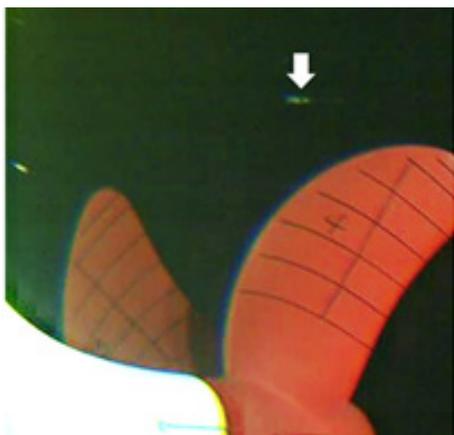


Fig. 73 Tip vortex cavitation

측 가능한 것으로 평가되었다. 다만, 싱잉 발생으로 인해 영향을 받을 시에는 해당 주파수 대역을 확인하여 알고리즘에서 제외하였을 때, 1 kn 오차 범위내 예측 가능한 것을 확인할 수 있었다.

캐비테이션 위치추정 알고리즘은 간헐적으로 발생하고 최대한 단일 위치에서 발생하는 케이스를 선정하고 분석하는 과정에서는 유사한 위치를 추정하나, 실선과는 달리 축소 모형에서의 보텍스 유동의 점성 효과로 인해 허브에서 먼저 캐비테이션이 발생함으로 캐비테이션 발생 위치와 봉괴 위치의 차이가 발생하고, 위치 추정 결과 각도 방향의 오차가 발생함을 알 수 있었다.

향후 CIS 모니터링 알고리즘의 경우는 추가적인 실선시험을 통해 알고리즘 개선연구를 진행할 예정이며, 캐비테이션 위치추정 알고리즘의 경우는 동시에 여러 캐비테이션 위치를 추정할 수 있는 압축센싱, 희소 베이지안 학습 알고리즘 등의 적용을 위한 추가 연구가 진행될 예정이다.

## 후 기

이 연구는 방위사업청과 국방신속획득기술연구원의 지원(사업명: 선체 부착 센서를 이용한 함정추진기 CIS 모니터링 기술, 계약번호: UC200001D)하에 진행되었습니다.

## References

- (1) Seol, H. and Kim, S.-Y., 2018, Study on the Analysis of Model Propeller Tip Vortex Cavitation Inception, Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 37, No. 6, pp. 387~395.
- (2) Han, H., Jeon, S., Lee, C. and Kim, Y., 2019, Study for Estimation of Propeller Cavitation Sound using Underwater Radiated Sound from the Hull Estimating with Hull Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 6, pp. 705~713.
- (3) Ahn, J., Paik, B.-G., Seol, H.-S., Park, Y. H., Kim, G. D. et al., 2016, Comparative Study of Full-scale Propeller Cavitation Test and LCT Model Test for MR Tanker, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 53, No. 3, pp. 171~179.
- (4) Kim, S.-Y., Lee, H.-C., Choi, J. Y. and Oh, J.-S.,



Fig. 74 Root cavitation occurrence and collapse

라 발달하다가 붕괴하므로 발생 위치와 붕괴 위치의 각도 방향 차이가 크다. Fig. 74는 하나의 예시를 가져온 것인데, 발생은 약 0°에서 했으나 붕괴한 위치는 80°~90°에 가깝다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 현재 운용하고 있는 실적함(○○함)의 축소모형을 가지고 DEMON 스펙트럼의 첨도(kurtosis) 값 등을 활용하는 CIS 모니터링 알고리즘과 정합장역산(matched field inversion)기법을 활용한 캐비테이션 위치추정 알고리즘을 확인하기 위한 실험적 연구를 수행하였다.

축소모형에 음향/가속도센서를 부착하고, 대형캐비테이션 터널에 설치하여 선속별, 조건별 모형시험을 수행하며 계측된 신호를 알고리즘으로 처리하고 분석하였다.

CIS 모니터링 알고리즘은 1 kn 오차 범위내로 예

2017, Study on the Analysis of Cavitation Inception Speed using Hull Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 27, No. 5, pp. 602~607.

(5) Kim, Y., Han, H., Jeon, S., Lee, C., Lee, D. N., and Lee, S.-K., 2021, Study on Simplification Method of DEMON Analysis and Quantified Evaluation Indicator for CIS Judgement using Cross Entropy, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 432~441.

(6) Han, H., Jeon, S., Lee, C., Lee, D. N., Kim, Y. and Lee, S.-K., 2021, Study for Monitoring of the Sound Pressure Level and Cavitation Inception Speed of the Propeller using the Acceleration Signal on the Hull, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 398~407.

(7) Seol, H. S., 2022, The Reduction Technology of Ship Radiated Noise, Journal of KSNVE, Vol. 32, No. 1, pp. 14~18.

(8) Kim, K. S., 2013, Naval Ship Propeller Cavitation Occurrence Characteristics and Cavitation Functional Qualification Test Performed by MOERI LCT, Proceedings of the 16th Naval Ship Technology & Weapon System Seminar, p. 195.

(9) Chang, N. A. and Dowling, D. R., 2009, Ray-based Acoustic Localization of Cavitation in a Highly Reverberant Environment, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 125, No. 5, pp. 3088~3100.

(10) Pierce, A. D., 2019, Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, 3rd Edition, Springer, Cham, Switzerland.

(11) Kim, D., Seong, W., Choo, Y. and Lee, J., 2015, Localization of Incipient Tip Vortex Cavitation using Ray based Matched Field Inversion Method, Journal of Sound and Vibration, Vol. 354, pp. 34~46.

(12) Foeth, E. J. and Bosschers, J., 2016, Localization and Source-strength Estimation of Propeller Cavitation Noise using Hull-mounted Pressure Transducers, 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, CA, United States.

(13) Choo, Y. and Seong, W., 2016, Compressive Spherical Beamforming for Localization of Incipient Tip Vortex Cavitation, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 140, No. 6, pp. 4085~4090.

(14) Park, M. and Choo, Y., 2022, Three-dimensional Off-grid Localization of Incipient Tip Vortex Cavitation using Bayesian Inference, Ocean Engineering, Vol. 261, p. 112124.

(15) Moon, Y., Lee, H.-C., Kang, S.-H. and Kim, S.-Y., 2022, Study on Cavitation Noise Characteristics according to the Use of Propeller Air Injection System, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 30~36.

(16) Moon, Y. S., Lee, H.-C., Choi, J.-Y., Kim, S.-Y., 2022, A Study on Underwater Radiated Noise Characteristics of Naval Vessel with PRAIRIE according to Air Leakage Condition, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 32, No. 3, pp. 268~273.

(17) Seol, H. S., 2021, Model Ship Test Method for Propeller Noise Analysis, Journal of KSNVE, Vol. 31, No. 5, pp. 29~34.

(18) Joo, W. H., Kim, D. H., Bae, J. G., 2000, A Study on the Identification and Countermeasure of Singing Phenomenon in Ships, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 797~803

(19) Ahn, B.-K., Lee, J. H., Rhee, W., Choi, J. S., 2010, Theoretical and Experimental Study on Airfoil Singing, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 115~121.

(20) Choi, S. H., 2013, A Study on the Propulsion Singing Phenomenon of a Ship, Journal of KSNVE, Vol. 23, No. 2, pp. 16~19.

(21) Baggeroer, A. B., Kuperman, W. A., Schmidt, H., 1988, Matched Field Processing: Source Localization in Correlated Noise as an Optimum Parameter Estimation Problem, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 83, No. 2, pp. 571~587.



**Sockkyu Lee** received his B.S. and M.S. degrees from Pusan University in 1995 and 1997. He is a research engineer at Mechanical Engineering R&D Lab, LIG Nex1. His research interests are design and analysis about military equipment endured at vibration, shock and noise environments.



**Hyungsuk Han** received a B.S. in Production and Mechanical Engineering from Pusan National University in 1996. He then went on to receive his M.S. and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University in 1998 and 2007, respectively. Dr. Han is currently a Principal Researcher at Defense Agency for Technology and Quality, Daejeon, Korea.



**Woojae Seong** received the B.S. and M.S. degrees in naval architecture and ocean engineering from Seoul National University in 1982 and 1984, respectively and the Ph.D. degree in ocean engineering from the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, in 1991. He is currently a professor with the Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University. His current research interests include acoustic

modeling for propagation and reverberation, underwater signal processing with emphasis on compressed sensing, and machine learning for acoustic signals.



**Hanshin Seol** received his B.S. in Aerospace Engineering from Pusan National University in 1998. He received his M.S. and Ph.D. degrees in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University in 2001 and 2005. He is now a principal researcher and the head of the 'Naval Ship Engineering Research Center' at Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering in Daejeon, Korea. He is current research interests include hydroacoustics, propeller noise and development of propeller noise reduction technology.