



함정용 방향타에서 발생하는 구름(cloud) 캐비테이션의 주파수 특성에 대한 실험적 연구

백부근^{1,†} · 안중우¹ · 정홍석¹ · 설한신¹ · 송재열² · 고윤희²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
충남대학교 메카트로닉스공학과²

An Experimental Study on the Frequency Characteristics of Cloud Cavitation on Naval Ship Rudder

Bu-Geun Paik^{1,†} · Jong-Woo Ahn¹ · Hongseok Jeong¹ · Hanshin Seol¹ · Jae-Yeol Song² · Yoon-Ho Ko²
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering¹
Department of Mechatronics Engineering²

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 this study, the amount and frequency characteristics of cloud cavitation formed on a navy ship rudder were investigated through cavitation image processing technique and cavitation noise analysis. A high-speed camera with high time resolution was used to observe the cavitation on a full-spade rudder. The deflection angle range of the full-spade rudder was set to 8 to 15 degrees so that cloud cavitation was generated on the rudder surface. For images taken at 10⁴ fps (frame per second), reference values for detecting cavitation were defined and detected in Red, Green, Blue and Hue, Saturation, Lightness color spaces to quantitatively analyze the amount of cavitation. Intrinsic frequency characteristics of cloud cavitation were detected from the time series data of the amount of cavitation. The frequency characteristics of cloud cavitation obtained by using the image processing technique were found to be the same through the analysis of the noise signal measured by the hydrophone installed on the hull above the rudder, and its peak value was in the frequency band of 30~60Hz.

Keywords : Rudder cavitation(방향타 캐비테이션), Image analysis(영상 분석), High-speed camera(고속카메라), cavitation noise(캐비테이션 소음), Frequency characteristics(주파수 특성), Navy ship(함정)

1. 서론

선박의 조종성능에 영향을 주는 방향타는 타력의 효율을 증가시키기 위해 프로펠러 뒤에 일반적으로 놓이게 된다. 특히 함정용 방향타는 선체, 경사축, 축 스트럿(strut) 및 프로펠러 작동 등에 따라 유체역학적으로 복잡한 영향을 받는다. 최근들어 국내 함정의 대형화 및 소요마력 증가 추세에 따라 프로펠러 및 타에 유입되는 유속이 크게 증가되어 높은 유체 하중을 견딜 수 있는 타의 형상을 필요로 하게 되었다. 함정의 경우 전가동타(full-spade rudder)를, 일반 상선은 전가동타와 혼-타(semi-spade rudder, Fig. 1)를 주로 적용하고 있다. 타에서 발생하는 캐비테이션(cavitation)은 타 표면을 따라 이동하는 유체가

국부적으로 물의 증기압 이하로 압력이 낮아져 기체가 발생하게 되는 것을 의미한다. 캐비테이션은 주위 환경에 따라 다양한 형태로 나타나는데 캐비테이션의 강한 붕괴 시 타 표면에 심각한 침식(erosion)을 일으킨다. 전가동타는 타가 일체형으로 되어 있기에 혼-타에서 자주 발생하는 간극(gap) 캐비테이션의 가능성이 대폭 감소하여 타의 유지 보수 비용이 적게 드는 장점이 있다. 그러나 대형화 되고 고속화되어 가는 함들의 경우 프로펠러 날개 위 캐비테이션뿐 만 아니라 프로펠러 후방 고속 유동 안에서 동작하는 타의 표면에도 심각한 캐비테이션이 발생할 가능성이 크다. Fig. 2는 함정의 전가동타에 발생한 침식 현상을 보여주고 있다. 타의 캐비테이션은 방향타의 표면을 심각하게 침식하여 타의 유지 보수 비용을 크게 증가시키게 되고 함의 운용 일정에도 영향을 주게 된다. 더욱 심각한 문제는 타에서 발생하는



Fig. 1 Semi-spade rudder for commercial ship



Fig. 2 Example of cavitation erosion in a full-spade rudder

캐비테이션이 심각한 진동 또는 소음을 유발하여 대잠 작전 등에 치명적인 약점을 노출시킬 수도 있다. 또한 방향타에서 발생하는 캐비테이션 자체가 함 자체의 저항을 의미하는 항력(drag) 증가 원인이 되기도 하기 때문에 방향타의 캐비테이션 성능을 향상시킬 수 있는 방향타 설계 연구는 매우 중요하게 여겨진다.

선체의 형상 및 스트럿 등의 부가물(appendage)로 인해 균일하지 않은 선체 반류(hull wake)가 프로펠러에 유입되기도 한다. 이러한 비균일(non-uniform) 선체 반류는 비정상(unsteady) 프로펠러 후류 형성에 기여하여 방향타 캐비테이션에 영향을 미치게 된다. 또한 함속 및 방향타의 타각 변화에 따라 타에 유입되는 프로펠러 후방 유동의 특성뿐 아니라 타 캐비테이션이 크게 영향을 받는다. 즉, 타에 영향을 주는 유동은 매우 복잡하기 때문에 이에 대한 연구가 절실하게 필요하다.

방향타 주위 유동 및 캐비테이션에 대한 연구는 주로 상선용 혼타 또는 전가동타에 대해 연구가 진행되어 왔다. Han et al. (2001)은 프로펠러가 작동하는 상태에서 혼타에서 나타나는 압력분포와 캐비테이션을 예측하기 위한 수치해석 기법을 연구하였으며 캐비테이션 터널 실험을 통하여 수치해석 결과를 비교하였다. Natarajan (2003)은 프로펠러와 상선용 방향타의 상호작용을 고려하고 방향타에서 형성되는 시트(sheet) 캐비테이션을 예측하기 위한 수치해석 기법을 연구하였다. Boo et al. (2003)은 상용 코드인 Fluent를 이용하여 혼타의 간극유동을 해석하고 이를 제어하기 위한 수치적 기법을 연구하였다. Song et al. (2004)은 2차원 타 형상의 변화에 대한 압력분포 변화 및 캐비테이션 특성을 실험적으로 확인하였고 Fluent를 사용하여 간극이 있는 혼타의 캐비테이션 특성을 조사하였다. Kim et al. (2006)과 Paik et al. (2006)은 10도 이하의 타각을 갖는 혼타에서 간극 캐비테이션 성능을 실험적으로 연구하였다. Choi et al. (2007)과 Park et al. (2018)은 상용 수치해석 코드를 이용하여 NACA66 단면 주위의 캐비테이션 유동 특성을 연구하였다. Paik et al. (2008)은 타각이 $\pm 6^\circ$ 일 때 혼타의 간극 캐비테이션에 영향을 주는 간극 유동을 가시화하여 정량적으로 평가하였다. Choi et al. (2010)은 전가동타 및 비대칭타의 유체동역학적 특성과 속도성을 조사하기 위하여 RANS 방정식을 이용하였는데 프로펠러와 방향타의 상호작용을 고려하여 방향타의 캐비테이션 성능을 분석하였다. Kim et al. (2018)은 KCS(KRISO Container Ship)에 최적화된 벌브형 비대칭타를 설계하였고 설계 속도에서 수치해석 기법을 이용하여 저항 및 자항 성능 특성을 조사하였다. Ahn et al. (2012)은 대형 컨테이너를 위한 방향타들에 대해서 실험적, 수치적 접근을 시도하였는데 전가동타 표면에서 발생하는 캐비테이션 현상에 대해서 관찰하여 비대칭타의 비틀림 각도 설계에 대한 기초 자료를 마련하였다. Paik et al. (2012)은 프로펠러 회전류에서 작동하는 혼타 유입류의 받음각을 PIV(Particle Image Velocimetry)로 측정하고 분석하여 가동부에 대한 캐비테이션 발생 가능성에 대하여 고찰하였다. Jeong et al. (2013)은 프로펠러 회전류에서 작동하는 방향타의 받음각 특성을 수치적으로 연구하였는데 타각이 $\pm 6^\circ$ 일 때 받음각 변화에 따른 전가동타 표면 압력분포를 계산하였다. 이와 같이 혼타 또는 전가동타에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 왔으나 방향타 캐비테이션에 대한 연구는 심도 있게 진행되지 못하였다. 방향타의 타각이 10도 이상 증가하게 되면 방향타의 표면에 형성된 시트스 캐비테이션이 구름성으로 발전하게 되어 매우 큰 소음뿐만 아니라 캐비테이션 붕괴에 따른 침식 가능성이 높아지게 된다. 방향타 캐비테이션 소음이나 침식을 제어할 수 있는 기법을 방향타 설계에 반영하기 위해서는 타 표면에서 발생하는 구름 캐비테이션에 대한 특성을 이해하고 연구하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 타각의 크기가 8° 이상 15° 까지 증가할 경우 방향타 표면에서 발생하는 캐비테이션에 대하여 영상 처리 기법을 이용하여 정량적으로 분석하여 캐비테이션 발생량뿐만 아니라 구름 캐비테이션의 주파수 특성을 조사하였다. 또한 캐비테이션 소음을 측정하여 구름 캐비테이션의 주파수 특성과 영상 분석을 통해 얻은 결과에 대한 유사성을 검토하였다.

2. 실험 방법 및 장치

본 연구에서 실시된 방향타 모형 실험은 대형 캐비테이션 터널(LCT: Large Cavitation Tunnel)에서 수행되었으며, 각종 계측치들은 전산화된 자료취득장치에 의해서 얻어졌다. 터널의 시험부 제원은 (길이 × 폭 × 높이 : 12.5m × 2.8m × 1.8m) 이었다. 시험부에서 최대 유속은 16.5m/s이고 시험부 내부 압력은 0.02 기압(Kg/cm²)에서 3.5 기압(절대압 기준)까지 변화가 가능하다. Fig. 3은 실험이 수행된 대형 캐비테이션 터널의 상부와 함께 시험부를 나타낸다.

본 모형시험에 사용된 대상선은 함정으로써 경사된 쌍축과 스트럿, 프로펠러, 방향타 등의 주요 부가물을 가지고 있다. Fig. 4는 방향타를 가진 대상선이 대형 캐비테이션 터널 시험부에 설치된 모습을 보여준다. 본 연구에서는 대상선의 방향타로서 평판형 전가동타를 사용하였다. 본 연구에서는 전가동타의 명칭을 FR이라고 하였으며 그 제원을 Table 1에 나타내었다.

대상선의 선미 선체와 맞닿는 전가동타 부위를 bottom이라 지칭하고 bottom 아래 방향으로 스펠(span) 끝에 위치한 부위를 tip이라 지칭하였다. 좌현(port side) 전가동타를 관찰 대상으로 선정하였는데 타의 회전각(rudder deflection angle), 즉 타각(δ)에 대한 정의를 Fig. 5에 나타내었다. 타를 위에서 보았을 때 시계방향으로 회전할 때 + 타각, 반시계방향으로 회전할 때 - 타각이라고 정의하였다.



Fig. 3 Large cavitation tunnel of KRISO

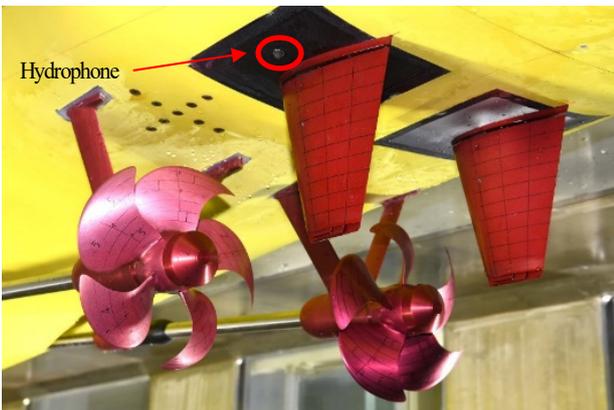


Fig. 4 Model ship with full-spade rudders

Table 1 Particulars of the rudder FR

Rudder type	Full-spade
Balance ratio	0.226
Aspect ratio	1.5
Taper ratio	0.45
Section type	NACA

본 연구에서는 아래와 같은 시험 조건으로 전가동타 모형에 대한 캐비테이션 실험을 수행하였다.

- 추진기/전가동타 : 각각 1중
- 터널 시험부 유입 주유동 방향 속도 $V = 9.0 \text{ m/s}$
- 프로펠러 초당 회전수 : 30.8 (날개 수 5)
- 전가동타 타각 : $-8^\circ, -12^\circ, -15^\circ$
- 선박 모형길이에 기초한 레이놀즈 수 $Re_L = 6.3 \times 10^7$
- 캐비테이션 수 $\sigma_v = 1.25$
- 터널 시험부 내 압력 $P_0 = 0.55 \text{ bar}$
- 터널 내 청수의 밀도 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

전가동타에서 발생하는 캐비테이션은 시험부 유속, 시험부 정적 압력 변화에 따른 캐비테이션 수에 의존하는데 캐비테이션 수의 정의는 아래와 같다.

$$\sigma_v = (P_0 - P_v) / (0.5\rho V^2) \quad (1)$$

식 (1)에서 P_0 는 터널 시험부 내 정압(static pressure), P_v 는 터널 용수(fresh water)의 증기압(vapor pressure), ρ 는 터널 용수의 밀도를 각각 의미한다.

타 유입 유속이 증가하고 타각이 증가함에 따라 전가동타 표면에서는 매우 격렬한 캐비테이션이 비정상적(unsteady)으로 발생하므로 고속카메라를 사용하여 높은 시간 분해능(time resolution)으로 캐비테이션을 가시화할 필요가 있다. 본 연구에서는 Photron사의 SA-X2 카메라(20mm pixel sensor size, 12 bit dynamic range)를 사용하여 타 표면의 캐비테이션을 촬영하였는데 1024 x 1024 pixels의 공간 분해능으로 초당 10000 프레임의 영상을 획득하였다. 또한 관측면의 크기는 약 30 x 30 cm²이었다. 조명은 국내의

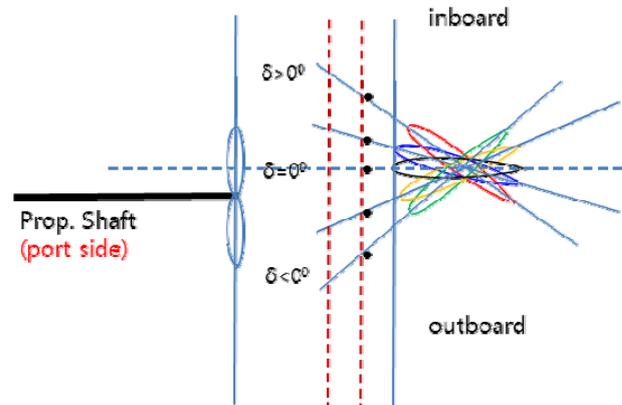


Fig. 5 Definition of rudder deflection angle

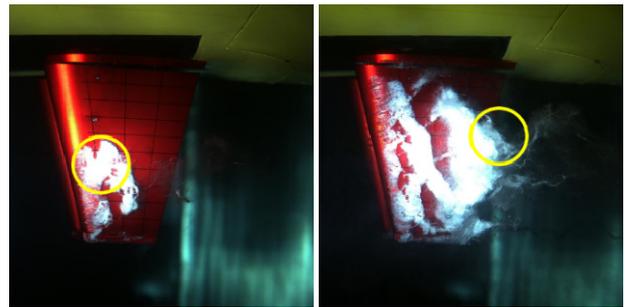
Optical System사의 SPL1K(XEON 1kW) 램프 4개를 사용하였고 방향타 및 캐비테이션을 균일하게 조사하도록 배치하였다.

본 연구에서는 전가동타 표면에서 발생하는 캐비테이션 소음을 계측하기 위하여 타가 설치된 위치와 가까운 선미 선체에 수중청음기(B&K, Type 8103)를 Fig. 4와 같이 설치하였다. 계측된 데이터는 B&K type 2692-A 신호증폭기와 B&K type 3052 데이터 수집 장치를 통해 기록되었으며, 샘플링 주파수는 204.8 kHz로 설정되었다. 이 샘플링 주파수는 최대 분석 주파수 102.4 kHz를 가능하게 한다.

캐비테이션 영상 처리에 대한 연구는 고속카메라를 사용하여 얻은 영상들로부터 캐비테이션의 발생량을 검출하기 위해 수행되었다. 본 연구에서는 방향타 캐비테이션 영상 자료에서 발생하는 캐비테이션을 검출하기 위해 촬영된 캐비테이션 영상을 두가지 종류로 구분하여 각각의 캐비테이션 영상이 어떤 특징을 가지는지 확인하였다. 첫번째 종류는 채도(saturation)가 낮고 밝은 밝기를 가지는 캐비테이션의 일반적인 특징을 가지고 있다. 이 영상은 캐비테이션 분포의 대부분을 차지하며 두께가 두꺼운 것이 특징이다. 캐비테이션이 강하게 형성되면 캐비테이션에서 반사되는 빛의 양이 더 많아지므로 유속이 높고 타각이 큰 영역에서 획득한 영상 자료에서 보다 잘 관찰된다. Fig. 6(a)를 보면 이 캐비테이션은 대체로 영상의 다른 부분에 비해 밝기(lightness)가 높으며 색상(hue)을 띠지 않는 회색조(gray scale)의 특징을 가지고 있어 채도가 낮다. 채도가 낮다는 것은 본연의 주도하는 색이 없다는 것을 의미한다.

첫번째 종류의 캐비테이션 영상 특징을 만족하는 화소를 검출하기 위해서 색상(hue)이 없는 회색조(gray scale)에 밝기(lightness)가 높고 채도(saturation)가 낮은 범위를 구별할 수 있도록 기준 값을 설정하였다. 이 기준을 사용하는 경우 색상(hue)이 검출 과정에 끼치는 영향은 없으며 전체 화소 중 높은 값의 밝기 범위를 가지는 동시에 낮은 값의 채도 범위를 가지는 화소들을 캐비테이션이라 간주하고 검출하게 된다.

두번째 종류는 방향타 표면 위에서 형성된 캐비테이션이 고압영역의 하류로 이동함에 따라 유체로 변화하는 지점에 존재하여 캐비테이션의 밝은 흰색 색상이 감소하게 된다. 이 캐비테이션은 캐비테이션의 가장자리에서 주로 발생하여 대체적으로 기체의 분포가 낮다. 본 실험 환경에서는 유동이 타의 앞날(leading edge)에서 뒷날(trailing edge)로 이동함에 따라 캐비테이션 덩어리의 가장자리에 대부분 분포하고 있다. 이렇게 발생하는 캐비테이션은 두께가 얇아 조명 환경이 어두울수록 반사되는 빛의 양이 적어 밝은 흰색 색상이 감소하게 된다. Fig. 6(b)를 보면 이 캐비테이션 영상은 에메랄드와 같은 파란색의 색상(hue)을 가진다. 대체적으로 기체의 분포가 낮기 때문에 밝기(lightness)가 약간 어둡다. 이 캐비테이션도 회색조를 다소 띠기 때문에 첫 번째 종류의 캐비테이션 영상과 유사하게 채도(saturation)가 낮다. 또한 에메랄드와 파란색 계열을 띄는 색상(hue) 범위 내의 화소를 검출하여 해당 캐비테이션을 인식하도록 하였다. 한편 이런 조건에서 발생하는 캐비테이션은 대체적으로 캐비테이션의 두께가 얇아 상대적으로 밝기가 낮기 때문에



(a) 1st case (b) 2nd case
Fig. 6 Typical example of the 1st and 2nd cases in cavitation image on the rudder surface

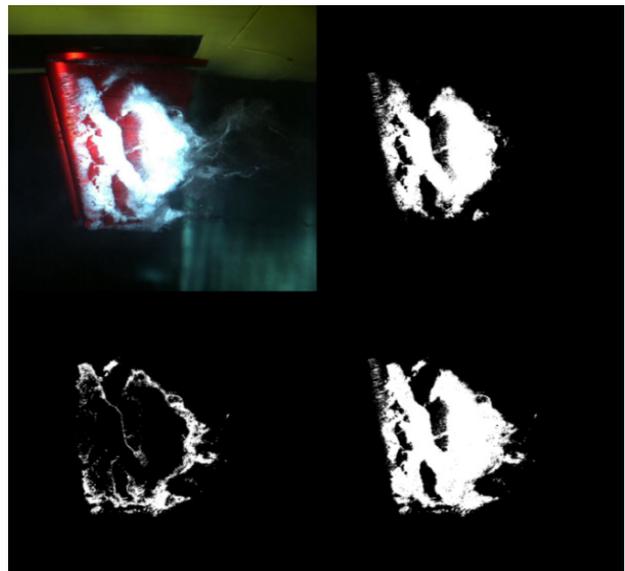


Fig. 7 Rudder cavitation image (upper left : original image, upper right:extracted by 1st criteria, lower left:extracted by 2nd criteria, lower right:combined and extracted by both criteria)

일반적인 캐비테이션의 기준값보다는 낮은 밝기 범위를 이용하게 된다. 채도의 경우 회색조인 캐비테이션의 특징에 따라 첫번째 기준에서와 같이 낮은 채도 범위를 이용하게 된다.

이렇게 구분된 특징을 기반으로 캐비테이션을 검출하는데 있어 유리하다고 판단되는 HSL(Hue, Saturation, Lightness) 색상 공간을 선정하고 각각의 검출 기준을 설정하였다. 이러한 기준 값의 범위를 설정하기 위해 캐비테이션이 빈번하게 관찰되는 영상열의 특정 좌표들의 HSL 변화와 분포를 분석하는 방법을 이용하였다. 구체적으로 첫번째와 두번째 종류의 캐비테이션을 검출하기 위한 기준값의 범위는 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 설정되었다.

$$\begin{aligned} 0 \leq H \leq 255 \\ 0 \leq S \leq 140 \\ 180 \leq L \leq 255 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} 135 \leq H \leq 200 \\ 0 \leq S \leq 140 \\ 90 \leq L \leq 180 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 H, L, S는 0에서 255의 범위를 가지는 색상, 밝기, 채도를 의미한다. 설정된 기준을 사용하여 영상에서 특정 화소 값이 하나의 기준을 만족시킨다면 해당 화소를 캐비테이션이라 간주하여 캐비테이션을 추출하였다(Fig. 7). 본 연구에서는 앞서 정의한 기준을 이용하여 캐비테이션을 검출할 수 있는 프로그램을 구현하고 다양한 실험 영상에 대하여 캐비테이션의 발생량을 측정하였다. 프로그램은 방향타 캐비테이션에 대한 고속카메라 영상을 불러와 프레임별로 캐비테이션을 검출하여 입력 영상, 캐비테이션으로 검출된 영역을 표시하는 흑백 영상, 지금까지의 프레임에서 검출된 캐비테이션의 분포도에 대한 결과를 출력할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 8은 대형캐비테이션터널에서 일반 캠코더를 이용하여 타각 변화에 따라 얻은 전가동타 캐비테이션 영상들이다. 전가동타의 타각 증가에 따라 캐비테이션 발생량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 캐비테이션 관점에서 전가동타의 성능을 개선하기 위해서는 타 표면에서 발생하는 캐비테이션의 양을 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 특히 -8° 이상의 타각에서는 캐비테이션의 형태가 시트성에서 구름성으로 바뀌면서 캐비테이션 덩어리들이 격렬하게 떨어져 나가는 현상이 증가한다. 빠르게 거동하는 캐비테이션을 일반 캠코더로 관찰하게 되면 실제 캐비테이션 현상이 아니라 카메라의 긴 노출 시간에 따라 다소 과장된 캐비테이션 발생량을 관찰할 수밖에 없다. 따라서 정확한 캐비테이션 거동을 살피고 정량적으로 캐비테이션 발생량을 평가하기 위해서는 높은 시간 분해능을 갖는 고속카메라를 이용하는 것이 필수적임을 알 수 있다.

Fig. 9는 고속카메라를 이용하여 관찰한 전가동타의 캐비테이션 영상들을 보인다. 본 연구에서 캐비테이션 발생량 평가를 위해 목표로 삼은 전가동타의 회전 타각은 -8° , -12° , -15° 이었다. 타각 -8° 에서 타의 앞날에서 형성된 시트성 캐비테이션이

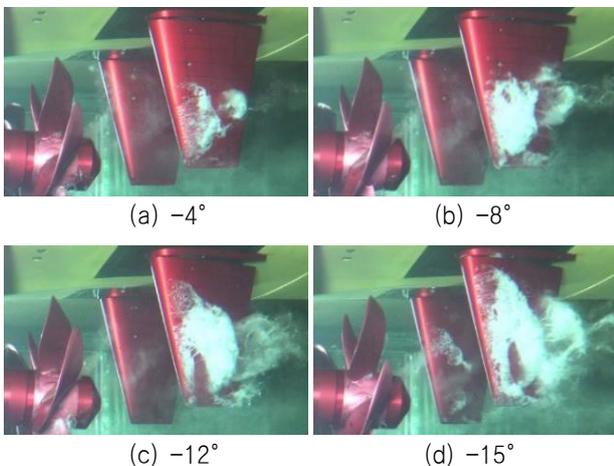


Fig. 8 Photos of rudder cavitation with the variation of rudder deflection angle

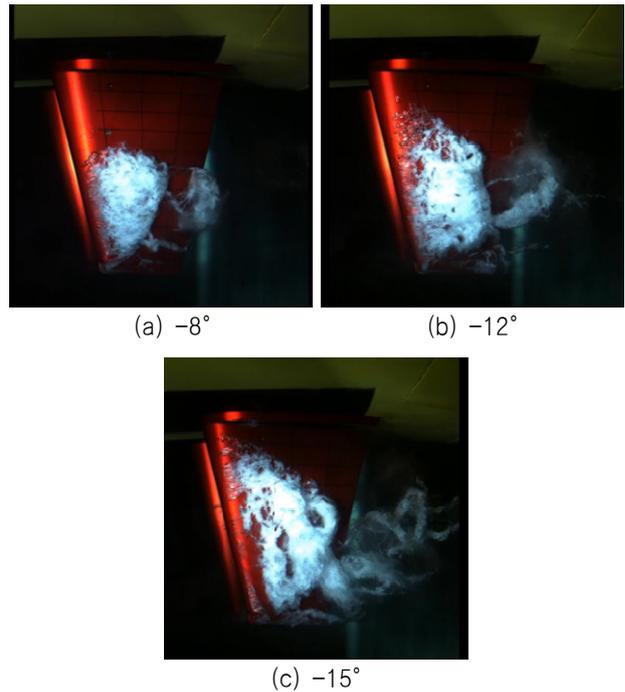


Fig. 9 Instantaneous cavitation images captured by high-speed camera

강화되면서 구름 캐비테이션으로 발전한다. 이 캐비테이션은 전가동타의 뒷날로 이동하면서 고압 영역을 만나 주(main) 캐비테이션 덩어리로부터 떨어져 나가며 붕괴하였다. 타각이 -12° 가 되면 구름 캐비테이션이 떨어져 나가는 형태가 더 활성화 되었고 청각을 통해 캐비테이션 붕괴에 의한 소음이 증가함을 확인하였다. 타각이 -15° 가 되면 매우 격렬하지만 주기성을 갖는 구름 캐비테이션이 발생하며 청각적 소음은 더욱 증가하였다.

Fig. 10은 -8° , -12° , -15° 타각에서 고속카메라로 취득한 실험 영상으로부터 추출한 캐비테이션 영상을 나타낸다. 영상 처리 시 앞서 언급한 두 가지 캐비테이션 영역에 대해 해석 후 캐비테이션 발생량 정보를 획득하였다. Fig. 11은 총 1000장의 캐비테이션 영상으로부터 얻은 캐비테이션 분포도를 나타낸다. 캐비테이션 분포도의 경우 총 0.1초 동안의 캐비테이션 영상들로부터 얻은 발생량 분포를 고려하여 누적된 캐비테이션 분포를 나타내었다. 빨간색으로 표시된 부분은 재생된 이미지들 중에서 90~100%의 영상들에서 캐비테이션이 발생한 영역을 의미하고 보라색은 5~10%의 영상들에서 캐비테이션이 발생하였음을 의미한다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 캐비테이션 관찰 시간 동안 타각이 커질수록 캐비테이션 발생 영역이 증가함을 확인할 수 있으며 캐비테이션이 자주 발생하는 영역도 점차 그 영역이 확대되는 것을 확인 가능하다.

Fig. 12는 0.1초 동안 고속카메라로 계측된 1000장의 캐비테이션 이미지들을 이용하여 얻은 캐비테이션 발생량의 시계열 자료를 보인다. 해당 그림에서 δ 는 회전 타각을 의미한다. 타각이 증가함에 따라 캐비테이션 발생량이 증가하는 것을 알 수 있다. 타 표면에서 발생하는 캐비테이션은 시간에 따라 변화하는 비정상적 거동을 보이기 때문에 캐비테이션 발생량의 평균

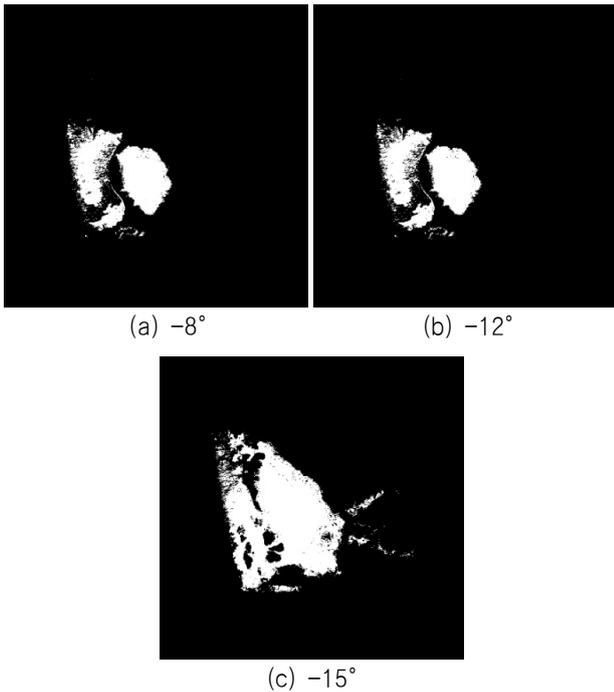


Fig. 10 Cavity images extracted by image processing technique

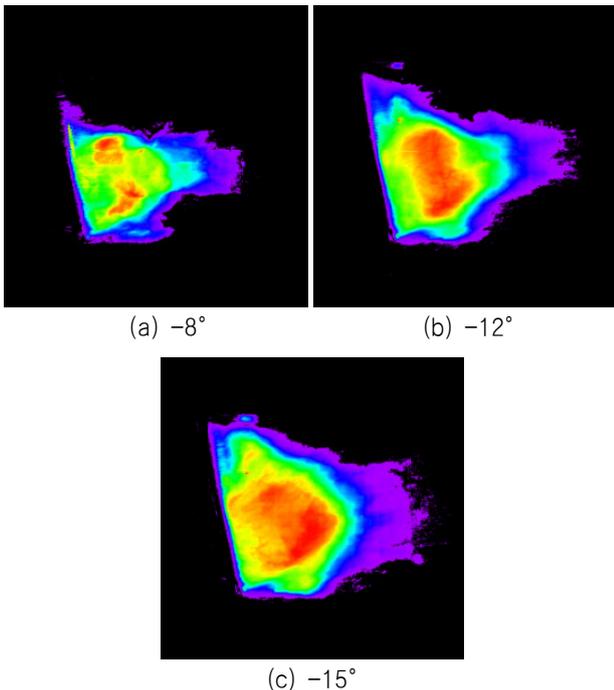


Fig. 11 Cavity concentration images during 0.1 seconds (red:high, violet:low)

또는 최대값으로써 해당 타각에서의 캐비테이션 발생량을 평가하는 것이 바람직하다. Table 2에 세 개의 타각에서 얻은 캐비테이션 발생량의 평균치 및 최대치를 pixel로 나타내었다. 이와 같이 캐비테이션 발생량을 정량화하게 되면 추후 전가동타의 보완이나 개선 설계 시 캐비테이션 성능 측면에서 참고할 수 있는 중요한 자료를 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

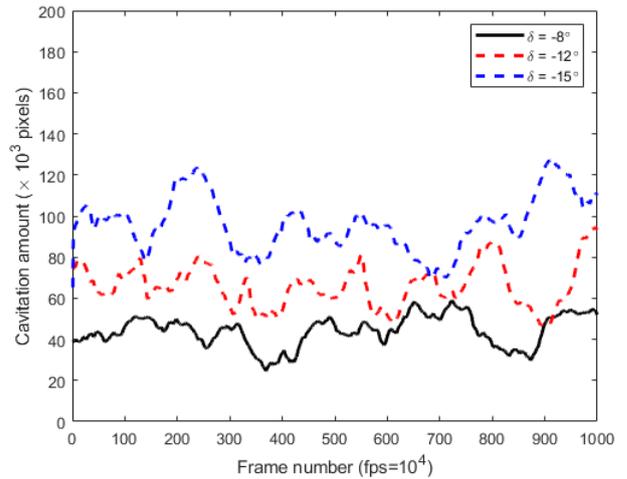


Fig. 12 Time history of cavitation amount on the rudder

Table 2. Quantitative estimation of cavitation amount

	Angle (°)	Cavity amount (10 ³ pixel)
Mean	-8	44.1
	-12	66.0
	-15	96.3
Max.	-8	58.8
	-12	94.5
	-15	127.1

Fig. 12를 보면 캐비테이션 발생량에 대한 데이터가 시간에 따라 변동하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 변동하는 캐비테이션 발생량의 주파수 특성을 조사하기 위하여 캐비테이션 발생량의 시계열 자료를 주파수 도메인(domain)에서 분석하여 살펴 보았다(Fig. 13). 타각 -8°와 -12°에서는 주파수 특성이 명확히 보이지 않으나 -15° 타각에서는 20~70 Hz 사이에서 주파수 특성이 나타남을 알 수 있다. -15°와 같이 큰 타각에서는 타 표면에서 구름 캐비테이션이 발생하여 떨어져나가는 (shedding) 현상이 지배적으로 나타나기 때문에 shedding 주파수 특성이 명확히 나타나는 것으로 추정된다. Fig. 13을 보면 타각 -15°에서 20~70 Hz 주파수 대역에서 2개의 피크가 나타남을 볼 수 있는데 본 연구에서 적용한 실험 방법의 한계로 인해 주파수 분해능 ~9.8 Hz가 다소 낮은 것으로 판단된다. 이 주파수 분해능을 높이기 위하여 추후 후속 연구 시 고속카메라 촬영을 위한 초당 프레임 수, 촬영 시간 등에 대한 면밀한 조사를 수행할 예정이다

Fig. 14는 수중청음기를 이용하여 측정한 소음 데이터를 주파수 영역에서 도시한 결과이다. 캐비테이션의 무작위성 (randomness)을 고려하여 1분간 측정을 수행하였으며, 측정된 데이터를 Welch의 전력 밀도 추정 방법 (Welch, 1967)을 사용하여 전력 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density, PSD)로 변환하였다. 도시된 결과는 1 Hz 간격으로, 각 주파수에서의 소음 레벨(Sound Pressure Level, SPL)과 대응된다고 볼 수 있다. 프로펠러 BPF(Blade Passage Frequency) 소음이 150 Hz, 300 Hz

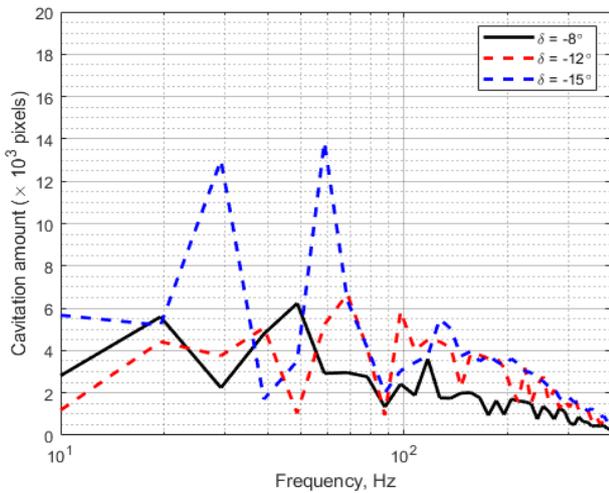


Fig. 13 Frequency characteristics obtained from extracted cavitation images

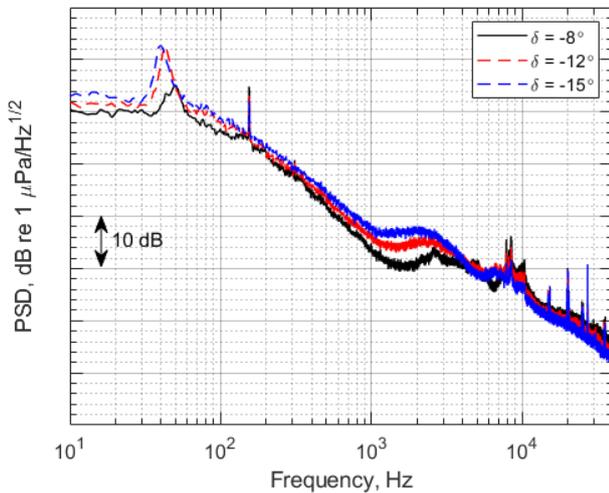


Fig. 14 Result of noise measurements with the variation of rudder deflection

에서 나타났고 8 kHz 근처에서는 프로펠러의 뒷날끝에서 나타나는 명음(singing)에 기인한 소음이 발생하였다. 10 kHz 이상의 주파수 영역에서 나타나는 순음(tonal) 소음들은 전기 잡음(electrical noise)에 기인한 것이다. 300 Hz ~ 5 kHz 대역에서는 방향타 표면에서 나타나는 캐비테이션 발생량이 증가함에 따라 소음이 증가하고 있음을 알 수 있다. 소음 계측 결과에서 30~60 Hz 사이에서 가장 큰 소음 피크가 발생하고 있음을 볼 수 있는데 타각이 증가함에 따라 피크의 크기가 증가하고 더 낮은 주파수 대역으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 캐비테이션 발생량의 시계열 데이터로부터 도출한 주파수 특성은 20~70 Hz 대역에서 나타났으며 -15° 타각에서 두드러진 특성을 보였다. 이 주파수 특성과 소음 계측으로부터 얻은 저주파수(10~100 Hz) 대역 소음 특성은 유사하였다. 즉, -8° 이상의 높은 타각을 갖는 방향타 캐비테이션의 저주파수 소음 특성을 캐비테이션 발생량 시계열 데이터를 통해 추정할 수 있음을 확인할 수 있다. 캐비테이션 발생량 시계열 데이터로부터 방향타 표

면에서 발생하는 구름 캐비테이션 발생량을 정량적으로 획득할 수 있을 뿐만 아니라 구름 캐비테이션 거동의 주파수 특성에 대한 판단 근거를 제공할 수 있기에 추후 캐비테이션 침식 저감형 방향타 설계를 위해 유용하게 활용될 수 있으리라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 캐비테이션 영상 분석 및 소음 분석 기법을 이용하여 함정용 방향타에서 발생하는 캐비테이션의 발생량 및 주파수 특성에 대해 조사하였다. 대형캐비테이션 터널에서 전가동타의 타각 -8° ~ -15° 범위에서 방향타 표면에 형성되는 구름 캐비테이션을 관찰하였다. 고속카메라로 촬영한 영상들에 대해서 영상 처리 기법을 이용하여 캐비테이션 발생량을 정량적으로 분석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 캐비테이션 발생량에 대한 시계열 데이터로부터 방향타 표면 위 구름 캐비테이션의 주파수 특성을 검출하였다. 영상 처리 기법을 이용하여 얻은 구름 캐비테이션의 주파수 특성은 수중청음기를 통해 계측한 소음 신호 분석을 통해서도 유사한 경향으로 나타났으며 20~60 Hz 주파수 대역에서 높은 소음 레벨 값을 갖는다. 높은 시간 분해능을 갖는 캐비테이션 발생량 시계열 데이터는 캐비테이션 발생량의 정량적 분석뿐만 아니라 구름 캐비테이션 거동의 주파수 특성을 분석하는데 효율적으로 활용 가능하다.

후기

본 연구는 방위사업청의 민간기술협력사업 UM19206RD2 (PNS3840)과제와 ‘고효율/저소음 선박을 위한 추진기소음 원천 기술 개발 및 실선적용 연구 (PES3890)’과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

References

- Ahn, K.S., Choi, G.H., Son, D.I., & Rhee, K.P., 2012. Hydrodynamic characteristics of X-Twisted rudder for large container carriers. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4, pp.322-334.
- Boo, K.T., Han, J.M., Song, I.H., & Shin, S.C., 2003. Viscous flow analysis for the rudder section using FLUENT code. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(4), pp.30-36.
- Choi, J.E., Chung, S.H., & Lee, D.H., 2007. Cavitating flow characteristics around a 2-dimensional hydrofoil section. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(2), pp.74-82.
- Choi, J.E., Kim, J.H., Lee, H.G., & Park, D.W., 2010. Hydrodynamic characteristics and speed performance of a full spade and a twisted rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.163-177.

Han, J.M., Kong, D.S., Song, I.H., 2001. Analysis of the cavitating flow around the horn-type rudder in the race of a propeller. *CAV2001*, Pasadena, 20–23 June, CA, USA.

Jung, J.H. et al., 2013. Study on the angle-of-attack characteristics of the rudder in rotating propeller flow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.421–428.

Kim, M.G., Kim, M.C., Shin, Y.J., & Kang, J.G., 2018. Numerical study on optimization of bulb type twisted rudder for KCS. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 32(6), pp.419–426.

Kim, S.P. et al., 2006. An experimental research on gap cavitation erosion of semi-spade rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(5), pp.578–585.

Natarajan, S., 2003. *Computational modeling of rudder cavitation and propeller/rudder interaction*. MS Thesis, University of Texas at Austin.

Paik, B.G., et al., 2006. Experimental investigation on the gap cavitation of semi-spade rudder. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(4), pp.422–430.

Paik, B.G. et al., 2008. Cavitation observation and visualization of the gap Flows on a rudder influenced by propeller slipstream and hull wakes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(3), pp.238–246.

Paik, B.G. et al., 2012. Measurements of the rudder inflow affecting the rudder cavitation. *Ocean Engineering*, 48, pp.1–9.

Park, I.R. et al., 2018. Numerical analysis of tip vortex and cavitation of elliptic hydrofoil. With NACA66₂-415 cross section. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 32(4), pp.244–252.

Song, I.H., 2004. Cavitation characteristics on various 2-dimensional rudder with gap. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting SNAK*, Sancheong, 20–22 October.

Welch, P., 1967. Use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), pp.70–73.

