



함정의 평판형 방향타 캐비테이션 침식에 대한 모형 시험 연구

백부근^{1,†} · 안종우¹ · 박영하¹ · 송재열² · 고윤호²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
충남대학교 메카트로닉스공학과²

Study on the Model Tests of Cavitation Erosion Occurring in Navy Ship's Flat-Type Rudder

Bu-Geun Paik^{1,†} · Jong-Woo Ahn¹ · Young-Ha Park¹ · So-Won Jeong¹ · Jae-Yeol Song² · Yoon-Ho Ko²
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering¹
Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University²

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 the present study, a method of performing cavitation erosion test directly on the anodized surface of the rudder model is proposed, not applying ink or paint on its surface. An image processing technique is newly developed to quantitatively evaluate the erosion damages on the rudder model surface after erosion test. The preprocessing saturation image, image smoothing, adaptive hysteresis thresholding and eroded area detection algorithms are in the image processing program. The rudder cavitation erosion tests are conducted in the rudder deflection angle range of 0° to -4° , which is used to maintain a straight course at the highest speed of the targeted navy ship. In the case of the conventional flat-type full-spade rudder currently being used in the target ship, surface erosion can occur on the model rudder surface in the above rudder deflection angle range. The bubble type of cavitation occurs on rudder surface, which is estimated to be the main reason of erosion damage on the rudder surface.

Keywords : Cavitation erosion(캐비테이션 침식), Rudder(방향타), Image processing technique(영상처리 기법), Rudder deflection angle(방향타 타각), Cavitation tunnel(캐비테이션 터널)

1. 서 론

선박이 빠른 속도로 운항할 경우 선박의 프로펠러나 방향타 표면에 발생하는 캐비테이션(cavitation)에 의해 표면 침식이 발생할 가능성이 커진다. 선박의 표면에 구름(cloud)성 캐비테이션이나 기포(bubble)성 캐비테이션이 형성될 경우 강한 캐비테이션 붕괴압에 의해 표면 침식이 나타날 수 있다. 실선의 프로펠러나 방향타에 캐비테이션 침식이 발생하면 침식 표면에 대한 유지 보수 또는 교체까지도 고려해야 하기 때문에 캐비테이션 침식을 사전에 예측할 수 있는 모형시험법이 유용하게 활용될 수 있다. 일반적인 캐비테이션 터널에서는 터널 내 유속이나 압력을 적절히 가변하여 추진기 날개 표면 위 캐비테이션 발생 및 패턴(pattern)을 관찰하고 변동압력(pressure fluctuation force)을 계

측하는 등 선박 추진기 캐비테이션 관련하여 기본적인 성능 시험을 수행하고 있다. 그러나 일반적 캐비테이션 터널에서는 실선(full-scale ship)과 동일한 캐비테이션 수를 유지하더라도 레이놀즈(Reynolds) 수가 실선 척도에 비해 상대적으로 낮기 때문에 강한 캐비테이션 붕괴를 모사하는 것이 어려워 (Keller, 2001) 모형 침식시험을 수행하는 것이 쉽지 않다.

이러한 이유로 인해 스웨덴 SSPA의 캐비테이션 터널에서는 비교적 강도가 약한 캐비테이션 발생 조건에서도 캐비테이션 침식 가능성을 조사할 수 있는 모형 페인트침식시험 기법을 개발하였고 많은 연구에 활용되고 있다 (Pfitsch et al., 2009; Aktas et al., 2020). 국내 캐비테이션 터널에서도 SSPA의 페인트 침식시험 기법과 유사하게 페인트를 이용한 모형 침식시험을 시도하고 있다.

본 연구에서는 잉크가 도장된 모형의 표면에서 캐비테이션 패



Fig. 1 Large Cavitation Tunnel (LCT)

터니 달라지는 현상을 방지하기 위하여 잉크로 도장되지 않은 애노다이징(anodizing) 표면을 직접 침식시험에 사용하였다. 부식 방지를 위해 모형 표면에 처리하는 애노다이징 기법은 모형 표면에 수 ~ 수십 nm의 딴플(dimple) 구조를 형성하나 모형 표면 위에서 거시적인 유동 현상에 간섭을 줄 만큼 직접적인 영향을 미치지 않기 때문에 본 연구에서는 애노다이징된 표면을 이용하여 캐비테이션 침식 시험을 수행하였다. 캐비테이션 침식 시험에 사용된 모형은 방향타 모형인데 선정된 해군 대상함의 최고 선속에서 타각(rudder deflection angle)에 따라 방향타에 캐비테이션 침식이 나타나는 지 예측하고자 하였다. 일반 상선에 비해서 해군 전투함의 경우 최고 선속이 높고 프로펠러에서 유기되는 후류의 속도가 커서 방향타에 강한 캐비테이션이 발생한다. Paik et al. (2021)은 본 연구에서 이용한 것과 동일한 해군 함정의 방향타 표면에서 10도 이상의 타각 조건 시 구름성 캐비테이션이 발생함을 보였으며 흘림(shedding) 캐비테이션의 주파수 특성이 나타남을 보인 바 있다. 본 연구에서는 5도 미만의 작은 타각 조건의 방향타 표면에서 캐비테이션에 의해 표면 침식이 발생하는지에 대해서 대형 캐비테이션 터널 시험을 통해 조사하였다. 이 타각 범위는 비교적 낮은 타각으로서 캐비테이션 침식 가능성이 낮다고 생각될 수 있으며 함정의 직진 항해 시 항로 유지를 위해 활용되는 타각 범위 이기에 함의 작전 운용 시 매우 중요하게 고려될 수 있다.

본 연구에서는 대형 캐비테이션 터널(Fig. 1)에서 함정용 평판형 방향타에 대한 캐비테이션 모형 침식 시험을 수행하였다. 또한 애노다이징 처리된 방향타 모형 표면에 Fig. 2와 같이 발생한 미세 손상을 정량적으로 가시화 및 분석하기 위해서 영상 처리 기법(알고리즘)을 개발하였다. 영상 처리 기법에서는 캐비테이션 침식 영역이 두드러지도록 영상 스트레칭을 적용하여 영상을 보정하며 이 보정된 영상에 임계화(thresholding) 기법을 적용하여 캐비테이션 침식영역을 검출하고 영상 레이블링(labeling)을 통해 영상오류(outlier)를 제거하였다. 이렇게 얻어진 최종 영역 분할 결과를 바탕으로 침식 영역의 실제 면적을 평가하였다. 캐비테이션 침식 영역 평가를 수행하기 위한 일련의 과정은 GUI(Graphic User Interface) 프로그램 형태로 구현되었다. 본 연구에서는 개발된 영상 처리 프로그램을 이용하여 대형 캐비테이션 터널에서 타각별로 수행된 모형 방향타 캐비테이션 침식시험 결과를 정량적으로 분석하였다.



Fig. 2 Erosion damage (yellow circle) on the rudder surface



Fig. 3 Constant temperature and humidity room in Large Cavitation Tunnel (LCT) of KRISO

2. 실험 방법 및 장치

선박해양플랜트연구소가 보유하고 있는 대형 캐비테이션 터널(Large Cavitation Tunnel : LCT)에서는 페인트를 이용한 침식 시험 기법을 개발하여 캐비테이션 침식 시험을 시도한 바 있다. 스텐실(stencil) 잉크를 도포한 프로펠러를 일정한 온도와 습도 조건에서 건조시키기 위해 Fig. 3과 같은 항온항습실을 제작하여 이용하였고 Fig. 4와 같은 프로펠러 건조 장치를 항온항습실 내부에 설치하여 도장된 프로펠러를 건조시키는 작업을 수행하였다. 잉크가 도장되고 건조된 모형 프로펠러(Fig. 5)에 대해 대형 캐비테이션 터널에서 일정 시간 동안 침식 시험을 수행하였는데 일관되고 동일한 잉크 시공 및 건조 작업 매뉴얼에 따라 전처리 작업을 수행하였음에도 일관되지 못한 침식 시험 결과가 도출되었다. 일관되지 못한 침식 시험 결과는 잉크 시공 시 작업자의 일관되지 못한 도장 방법에 기인한다고 사료된다. 또한 도막의 두께로 인하여 도료를 도장하지 않은 날개 위에서 나타나는 유체 유동과 상이한 현상이 잉크나 페인트와 같은 도료로 도장된 프로펠러 날개 위에서 발생하여 부하분포가 다르게 형성되거나 유체력이 변화될 수 있다. 따라서 모형 표면 위 캐비테이션 패턴이 변화하게 되어 종국에는 일관되지 않은 페인트 침식 시험 결과가 도출된다 (Kim et al., 2014).

본 연구에서는 잉크가 도장된 방향타 모형 표면 위 캐비테이션 패턴이 달라지는 현상을 방지하기 위하여 애노다이징 처리된 방

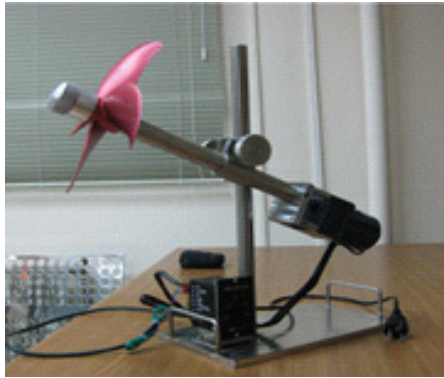


Fig. 4 Drying device for a painted propeller



Fig. 5 Painted propeller blade with stencil ink

항타 모형 표면에 대한 캐비테이션 침식 시험을 수행하였다. 해당 시험에서 캐비테이션 영상은 캠코더나 고속카메라(SA-X2, Photron)를 이용하여 취득하였고 실험 후 스틸 카메라를 이용하여 방향타 표면 영상을 획득하였다. 캐비테이션 터널의 시험부 제원은 길이×폭×높이 : 12.5m×2.8m×1.8m이었다. 시험부에서 최대 유속은 16.5m/s이고 시험부 내부 압력은 0.02 기압(Kgf/cm²)에서 3.5 기압(절대압 기준)까지 변화가 가능하다. Fig. 6은 실험이 수행된 대형 캐비테이션 터널의 시험부와 함께 대상선과 프로펠러 및 방향타를 보여준다.

본 모형시험에 사용된 대상선은 함정으로써 경시된 쌍축과 스트럿, 프로펠러, 방향타 등의 주요 부가물을 가지고 있다. 대상선의 방향타로서 평판형(flat-type) 전가동타(full-spade rudder)를 사용하였다. 해당 방향타의 제원을 Table 1에 나타내었다.



Fig. 6 Model ship with full-spade rudders in LCT

Table 1 Particulars of the rudder

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

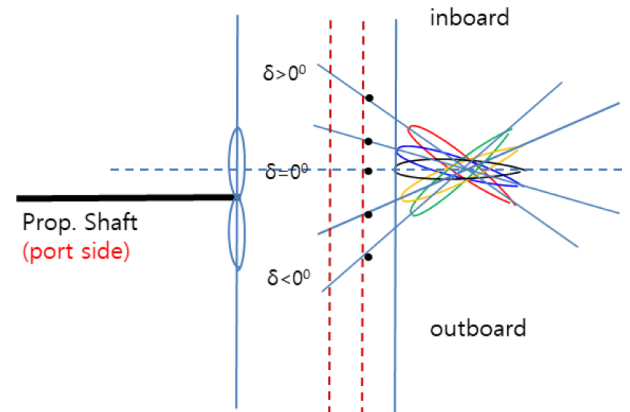


Fig. 7 Definition of rudder deflection angle on port side(top view)

대상선의 선미 선체와 맞닿는 방향타 부위를 bottom이라 지칭하고 bottom 아래 방향으로 스패ن(span) 끝에 위치한 부위를 tip이라 지칭하였다. 좌현(port side) 방향타를 관찰 대상으로 선정하였는데 타각(d)에 대한 정의를 Fig. 7에 나타내었다. 타를 위에서 보았을 때 시계방향으로 회전하면 + 타각, 반시계방향으로 회전하면 - 타각이라고 정의하였다.

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

- 추진기/방향타 : 각각 1종
- 터널 시험부 유입 주유동 방향 속도 V : 9.0 m/s
- 프로펠러 초당 회전수 (rps) : 31.8 (날개 수 5)
- 방향타 타각 : 0°, -2°, -4°
- 선박 모형길이에 기초한 레이놀즈 수 Re_L : 6.3×10^7
- V 에 기초한 캐비테이션 수 α_v : 1.25
- 캐비테이션 침식 실험 시간 : 2시간
- 터널 시험부 내 압력 P_0 : 0.56 bar
- 터널 내 청수의 밀도 ρ : 1000 kg/m³

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

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

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.

LCT에서 수행한 모형 침식 시험 후 캐비테이션에 의한 침식 영역을 분석하기 위해 방향타를 촬영한 영상을 분석하였는데 캐비테이션에 의해 침식이 일어난 방향타는 Fig. 5와 같이 방향타 표면에 침식으로 인한 자국이 남지만 방향타의 촬영 환경이나 침식의 깊이에 따라 방향타 촬영 영상에서 침식 손상의 식별이 육안으로는 힘들어질 수도 있다. RGB(Red, Green, Blue) 색상공간에서는 조명에 따라 침식영역 검출이 난해할 수 있기에 본 연구에서는 방향타의 HSV(Hue:색상, Saturation:채도, Value:명도) 색상 공간에서 침식영역을 검출하고자 하였다.

방향타 표면의 캐비테이션 침식 영역은 영상 스트레칭(stretching) 기법을 통해 방향타 표면의 침식 영역을 선명하게 할 수 있다. HSV 채널(channel) 중 채도 채널에서 침식이 발생한 영역의 값이 높게 나타나는 것을 확인하였고 채도 채널에 대한 스트레칭 기법을 통해 침식 영역이 더 뚜렷하게 가시화 되는 결과를 얻을 수 있었다. 스트레칭 기법을 적용하기 위해 방향타가 아닌 배경 영역의 채도 값을 0으로 하고 방향타 영역에서 채도 채널의 최대값과 최소값을 찾아 방향타 영역의 채도 값을 0~255로 선형적으로 스트레칭하였다. 이 과정은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$S'_{xy} = \frac{255}{S_{max} - S_{min}} (S_{xy} - S_{min}) \quad (2)$$

여기서 S_{max} 는 채도의 최대값, S_{min} 은 채도의 최소값, S_{xy} 는 (x,y) 좌표의 채도 값이다. Fig. 8은 캐비테이션에 의해 침식이 발생한 방향타 영상을 나타낸다. 방향타 영상을 HSV 색상 공간으로 변환하여 채도 채널에 대해 스트레칭 기법을 적용한 후 최종적으로 HSV 채널 모두를 합친다. 이렇게 처리된 영상을 최초 원본 영상과 비교하였다. 방향타의 채도 값이 0~255로 스트레칭되어 전체적으로 채도가 낮아지는 경향이 있으나, 높은 채도 값을 가지고 있던 침식 영역은 스트레칭 적용 후에도 높은 값을 유지하므로 상대적으로 명확해지는 경향을 보이기 때문에 침식 영역을 검출하여 정량적으로 분석하는 데 유리함을 확인할 수 있다.

채도 채널의 스트레칭을 통해 수행한 전처리(preprocessing) 이후에는 Fig. 9와 같은 흐름도를 따라 침식 영역을 검출하게 된다. 캐비테이션 침식 영역을 강건하게 검출하기 위해 영상 이진화 기법을 수행하여 이진영상을 생성한다. 이진영상은 침식 영역을 1로, 침식이 아닌 영역을 0으로 표기한 형태이다. Fig. 10에 이진영상을 나타내었다. 본 연구에서는 영상 평활화(smoothing)



Fig. 8 Effect of stretched image (left : before stretching, right:after stretching)

를 통해 침식이 아닌 영역을 대표하는 채도값을 결정하고 이를 기저값으로 설정하였다. 이러한 기저값을 이용하여 히스테리시스 임계화(hysteresis thresholding) 기법을 수행하였다. 히스테리시스 임계화는 기저값을 증감시켜 얻은 2개의 임계값을 사용하여 주변의 분류 결과에 따라 자신의 분류 결과가 달라질 수 있게 하는 임계값 기법이다.

이때 평활화 과정에 의해 얻어진 기준값이 화소 위치에 따라 다르므로 위치에 따라 서로 다른 임계값이 사용되기 때문에 적응적(adaptive)으로 영상을 평가하는 것이라고 할 수 있다. 히스테리시스 임계화 과정을 효율적으로 수행하고 미세한 잡음(noise)의 영향을 줄이기 위해 이진화 영상에 레이블링(labeling)을 수행하였다. 이때 1의 값을 갖는 화소들의 영역의 넓이를 계산하여 그 넓이가 기준치보다 낮다면 잡음 영역이라 판단하여 이진영상에서 제거한다. Fig. 11과 12에 GUI 프로그램 상에서 최종적으로 검출된 침식 영역의 예를 나타내었다.

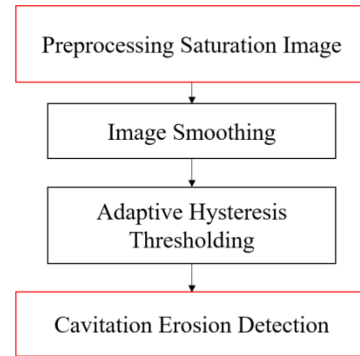


Fig. 9 Flow chart for detection of cavitation erosion region

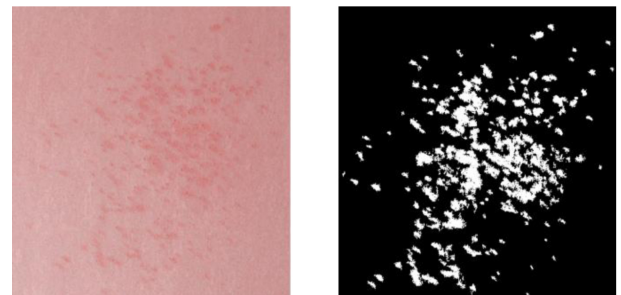


Fig. 10 Image comparison (left:user selected region, right: binary image of erosion region)

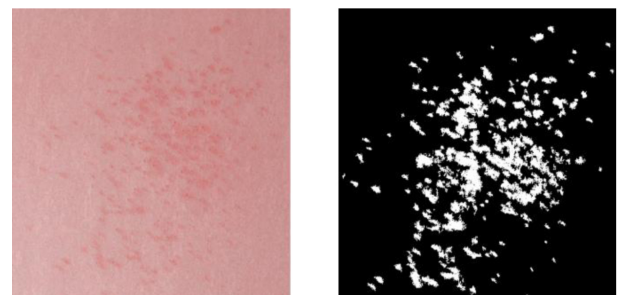


Fig. 11 Image comparison (left:user selected region, right: detected erosion region)

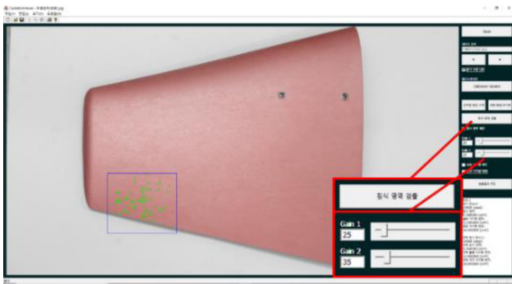
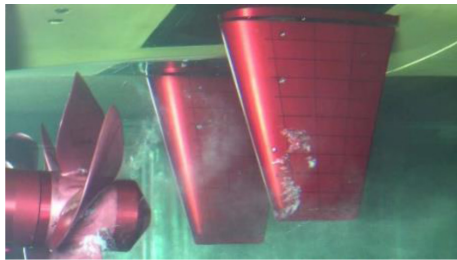


Fig. 12 Cavitation erosion region extracted by using GUI program

3. 실험 결과 및 고찰

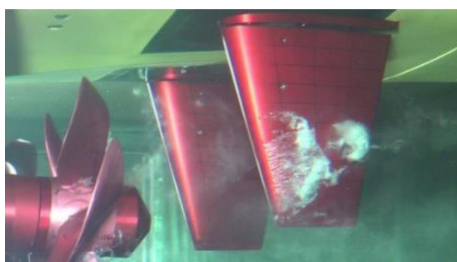
Fig. 13은 대형 캐비테이션 터널에서 캐비테이션 침식 시험 중에 캠코더로 촬영한 방향타 캐비테이션 관찰 자료이다. 타각 0도에서도 좌현(port) 방향타의 바깥(outboard) 표면에 캐비테이션이 발생한 것을 확인할 수 있으며 타각이 증가함에 따라 캐비테이션의 양이 증가함을 알 수 있다. 또한 Fig. 14에 고속카메라 (1000 fps, SA-X2, Photron)로 촬영한 방향타 캐비테이션 영상을 나타내었다. 대부분의 영상에서 sheet성 또는 기포성 캐비테이션이 발생한 것으로 보인다. 대형 캐비테이션 터널의 경우 고



(a) $\delta = 0^\circ$



(b) $\delta = -2^\circ$



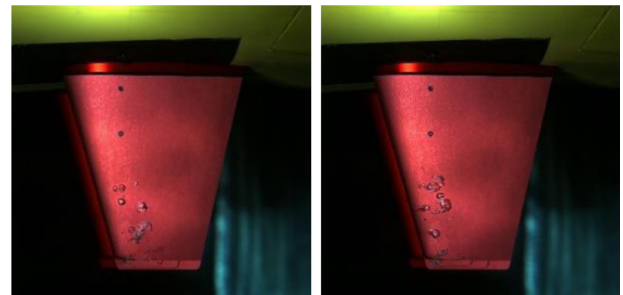
(c) $\delta = -4^\circ$

Fig. 13 Observation of cavitation occurred on the rudder surface at maximum ship speed

속카메라에서 시험부 내 모형까지의 거리가 상당하고 조명이 다소 약하여 캐비테이션 거동을 자세히 살피는 데 한계가 있다. 이러한 환경조건에서 빠르고 불안정하게 변화하는 캐비테이션을 관찰하기 위하여 비교적 낮은 1000 fps로 고속카메라를 운용하여 캐비테이션 영상을 취득하였다. 비록 비교적 낮은 시간분해능으로 관찰하였지만 Fig. 14에서 보는 바와 같이 기포성 캐비테이션이 자주 발생함을 인지하게 되었다.

방향타 캐비테이션 침식 시험을 위하여 각 타각에서 별도의 방향타를 제작하고 대상선에 설치하여 2시간 동안 동일한 시험 조건에서 침식 시험을 수행하였다. 각 타각에서 시험을 종료한 후 방향타를 꺼내어 표면을 촬영한 결과를 Fig. 15에 나타내었다.

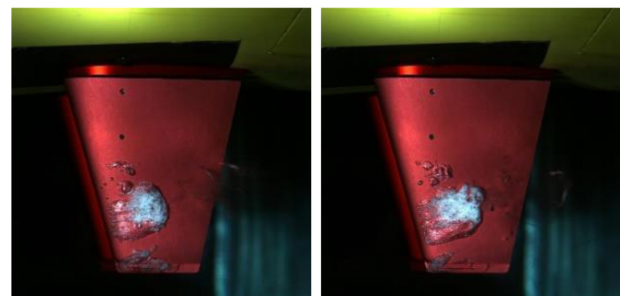
캐비테이션 침식 손상은 선정된 타각 조건에서 모두 발생하였으며 영상에서 보는 바와 같이 다소 진한 채도로 표현되었다. 본 연구에서 개발된 영상 처리 기법을 이용하여 침식으로 손상된 영역을 Fig. 16과 같이 추출하였다. 도출된 침식 영역은 녹색으로 표시되었으며 침식 영역을 포함하는 다각형을 고려했을 경우 타각 0도는 5.9 cm^2 , 타각 -2° 는 48.7 cm^2 , 타각 -4° 는 18.0 cm^2 의 침식 면적값을 정량적으로 도출하였다.



(a) $\delta = 0^\circ$



(b) $\delta = -2^\circ$



(c) $\delta = -4^\circ$

Fig. 14 Rudder cavitation images captured by high speed camera at maximum ship speed

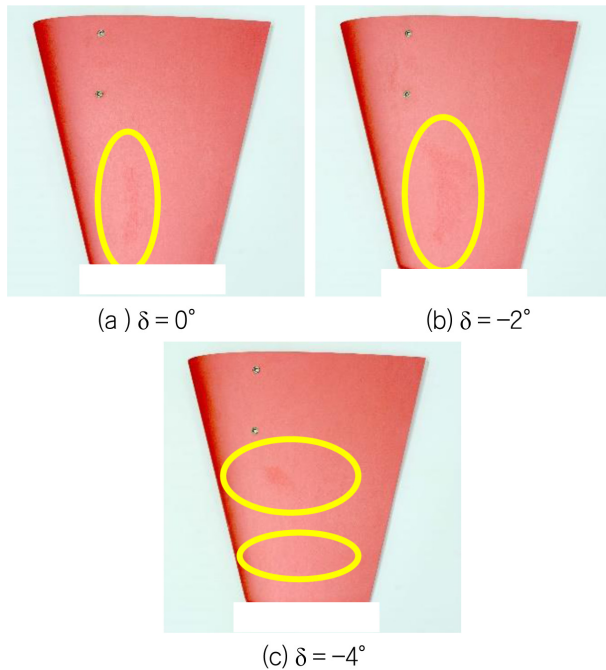


Fig. 15 Eroded rudder surfaces (yellow symbol) after cavitation erosion tests at each rudder deflection angle

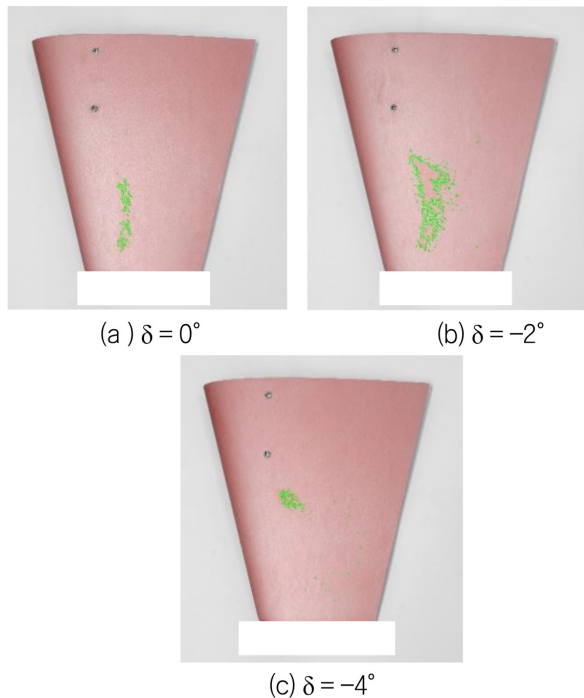


Fig. 16 Eroded regions (green color) extracted by image processing program at each rudder deflection angle

0도 타각의 경우 스펀 방향을 따라 가늘고 길게 집중적으로 침식 영역이 발생하였으나 -2도와 -4도 타각의 경우 캐비테이션 덩어리가 떨어져 나가면서 붕괴됨에 따라 침식 집중영역 주변에 침식 핏(fit)들이 추가로 발생하여 침식 면적이 증가하였다. 특히 -4도 타각의 경우 캐비테이션 면적이 증가되고 캐비테이

션 흘림(shedding) 및 붕괴 영역이 확장됨에 따라 미세한 침식 핏들이 50% 스펀 위치부터 tip까지 넓게 흩어져 있어 광범위하게 침식 영역이 발생하였음을 확인할 수 있으나 -2도 타각에 비해 침식 핏들의 전체 면적이 크지 않다. Fig. 16과 Fig. 14를 함께 살펴보면 기포성 캐비테이션이 발생하는 위치에서 방향타 표면에 캐비테이션 침식이 주로 발생하였음을 확인할 수 있다. 상기 실험 결과들을 통해 대상함이 현재의 평판형 방향타를 장착하고 최고 선속으로 직진 운항할 경우 방향타 표면에 캐비테이션 침식이 발생할 가능성이 매우 높다는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 대상으로 선정된 0 ~ -4도의 작은 타각에서도 캐비테이션 침식 가능성이 높게 나타났기에 추후 평판형 방향타 또는 날개단면의 캐비테이션 성능 개선이 필요함을 알게 되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 모형에 잉크나 페인트로 도장하지 않은 애노다이징 표면을 직접 침식 시험에 사용하였다. 캐비테이션 침식 시험에 사용된 모형은 해군 대상함의 방향타 모형이며 최고 선속에서 직진항해에 필요한 낮은 타각 범위에서 캐비테이션 침식 시험을 수행하였다. 대형 캐비테이션 터널에서 수행된 모형 캐비테이션 침식 시험 후 침식 영역을 분석하기 위해 영상 처리 기법을 이용하였다. 채널의 스트레칭을 통해 수행하는 전처리 과정, 영상 평활화 과정과 히스테리시스 임계화 기법을 통해 미세한 잡음이나 영상 오류의 영향을 배제한 후 침식 손상 영역을 정량적으로 분석하였다. 모형 침식 시험 결과 대상으로 삼은 모든 타각에서 침식이 발생하여 함정이 최고선속, 직진운항 시에도 캐비테이션 침식을 저감시킬 수 있는 방향타 또는 날개 단면의 개발이 필요함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업 19-CM-MU-10 (PNS4520, 3차원 곡면형 비틀림 방향타 기술) 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Aktas, B., Usta, O. and Atlar, M., 2020. Systematic investigation of coating application methods and soft paints types to detect cavitation erosion on marine propellers. *Applied Ocean Research*, 94, 101868.
- Keller, A.P., 2001. Cavitation scale effects empirically found relations and the correlation of cavitation number and hydrodynamic coefficients. *CAI2001*, Paris, France, 18-22 July.

Kim, K.S. et al., 2014. Base technology of test estimation for propeller and rudder performance (5th year). *KRISO Report*.

Paik, B.G., Ahn, J.W., Jeong, H.S., Seol, H.S., Song, J.Y. and Ko, Y.H., 2021. An experimental study on the frequency characteristics of cloud cavitation on naval ship rudder. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 58(3), pp.167–174.

Pfitsch, W., Gowing, S., Fry, D., Donnelly, M. and Jessup, S., 2009. Development of measurement techniques for studying propeller erosion damage in severe wake fields. *CAV2009*, Ann Arbor, Michigan, USA, 17–22 August.



백 부 근



안 종 우



박 영 하



송 재 열



고 윤희