

내침식페인트 성능 판별에 적합한 새로운 캐비테이션 침식시험기법 개발

백부근^{†*}, 김경열^{*}, 김기섭^{*}, 김태규^{**}, 김경래^{**}, 장영훈^{**}, 이상욱^{**}

한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{*}
대우조선해양주^{**}

Development of New Cavitation Erosion Test Method for Analyzing the Durability of Erosion Resistance Paint

Bu-Geun Paik^{†*}, Kyung-Youl Kim^{*}, Ki-Sup Kim^{*}, Tae-Gyu Kim^{**}, Kyung-Rae Kim^{**},
Young-Hun Jang^{**} and Sang-Uk Lee^{**}

Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI^{*}
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.^{**}

Abstract

The very erosive cavitation is simulated by an inclined propeller dynamometer in the medium-size cavitation tunnel of MOERI. The inclined shaft for propeller makes strong cavitation, which occurs around the root of a propeller blade. The cavitation begins at the leading edge of the propeller and contracted toward the trailing edge through the re-entrant jet action. The cavity focused on the region near the trailing edge collapsed over the blade surface. As the impact pressure by the cavitation collapsing is too strong, it can damage the blade surface in the form of pit. This cavitation impacts created by the collapsing process are similar to the full-scale ones and are different from those by other erosion test methods. The newly developed cavitation erosion test method can be applied to evaluate the materials such as metals, ceramics and coatings in terms of cavitation resistance.

※Keywords: Erosion test(침식 시험), Cavitation collapsing(캐비테이션 붕괴), Inclined propeller dynamometer(경사류 프로펠러 동력계), Coating(도료), Pit(파공)

1. 서론

해상을 항행하는 선박이나 해양에 설치되는 플랜트의 표면에는 해수에 의한 부식이나 부착물(fouling)로부터 선박이나 해양 플랜트를 보호하기 위해서 방식 또는 방오도료 등을 시공한다. 선박의 프로펠러나 타의 경우 빠른 유체 속도와 낮은 압력으로 인해 캐비테이션의 발생을 회피하기 힘든 경우가 많다. 특히 선박용 타에서 침식성이 강한 캐비테이션이 자주 발생하여 캐비테이션 침식으로 인한 손상 사례가 자주 보고되고 있다. 타에서 발생하는 캐비테이션을 방지하기 위하여 타의 형상을 개선하는 방법이 실험적(Kim et al. 2006), 수치해석적(Boo et al. 2003)으로 연구되어 왔으나 근본적인 해결방법은 아직 마련되지 못하고 있다. 따라서 선주의 요구 또는 조선소의 재량에 따라 타의 표면에 특별한 처리를 하여 캐비테이션에 대한 내침식성을 높이기 위한 시도가 계속되고 있는 형편이다. 타에 시공하는 특별한 처리 중 하나는 내침식용 도료를 사용하는 것이다. 도료의 내침식 성능을 파악하기 위해서는 적절한 침식 시험 방법이 구비되어야 한다.

기존 캐비테이션 침식 시험에 많이 사용되어 온 장비는 초음파를 이용한 진동가속시험기(vibratory rig)라고 하는 것이며 ASTM G-32 (<http://www.astm.org/Standards/G32.htm>)란 표준 시험 방법이 정립되어 있다. 이 방법은 진동자의 끝에 시료를 부착시키고 진동자를 주파수 약 20kHz, 진폭 30~40 μ m으로 진동시켜 초음파를 형성하여 인위적으로 침식 효과를 얻을 수 있다(Fig. 1(a)). G-32 방법은 금속이나 세라믹과 같은 경도가 높은 재질에 대해서는 시험결과의 신뢰도가 있으나 내침식재료로 사용되면서 상대적으로 경도가 낮은 특수 페인트에 대한 침식시험에 대해서는 변별력이 낮을 것으로 예상된다. Kim(1999)과 Kim et al.(2003)은 G-32 방법을 이용하여 주철(cast iron), 황동(brass), 스테인레스(STS 316), 듀라터프(DuraTough) 등의 재료에 대한 캐비테이션 침식 거동과 손상특성 등을 조사한 바 있다.

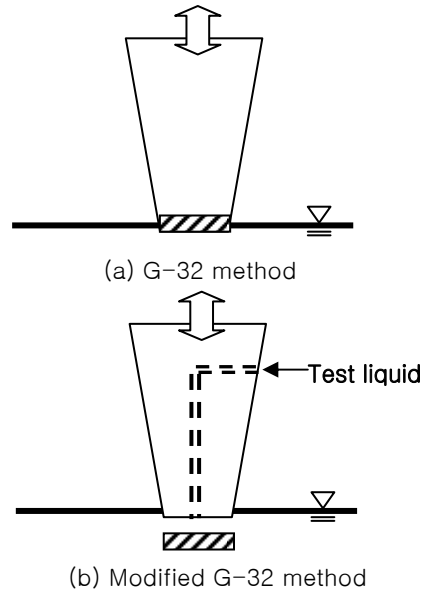


Fig. 1 Sketch of ASTM G-32 methods

폴리머(polymer) 또는 고무(elastomer)와 같이 경도가 낮은 재질에 대해서도 신뢰성 높은 캐비테이션 침식 시험을 수행하기 위해서 수정된 ASTM G-32 방법이 제안되었는데, 이 방법에서는 진동자의 끝에 시료를 붙이지 않고 진동자로부터 일정한 거리에 시료를 위치시킨 후 진동자에 진동 및 액체를 인가하여 캐비테이션을 발생시킨다(Fig. 1(b)). 비록 폴리머 계열과 같은 낮은 경도의 시편에 대해서 ASTM G-32 방법과 수정된 ASTM G-32 방법에 의해 얻어진 캐비테이션 침식 시험 결과가 서로 상이하게 나타났으나 고무 계열의 시편에 대해서는 서로 유사한 침식 손상 결과가 나타나 시험결과에 대한 신뢰성을 얻지 못하고 있다. 또한 G-32 방법에서 사용하는 캐비테이션 거동 특성은 실제 선박용 타에서 발생하는 캐비테이션 거동 특성과 다를 것으로 예상된다.

진동가속시험기 외에도 지금까지 캐비테이션 내침식 성능을 조사하기 위해서 캐비테이션 제트, 액체 제트, 회전 디스크 등의 여러 가지 방법들이 사용되었는데 5시간 내지 20시간 정도의 장시간 동안 캐비테이션을 시편에 인가시켜야 하는 단점을 가지고 있다. 진동가속시험기도 10시간 내외의 시험시간을 필요로 한다. 이러한 방법들은

캐비테이션을 발생시켜도 그 강도가 약하여 침식 결과를 얻기 위해 많은 시간을 필요로 하는 것으로 사료된다. 또한 캐비테이션 충격력을 이용하는 경우에 침식을 발생시키기 위해 많은 시간을 소모해야 하고 캐비테이션의 붕괴(collapsing)를 이용한다 할지라도 캐비테이션이 표면 바로 위에서 붕괴되지 않거나 붕괴압의 크기가 작아 침식 파공을 얻는데 많은 시간을 필요로 하였다.

따라서 경도가 작은 특수 페인트 등에 대하여 비교적 짧은 시간 내에 침식 변별력을 얻을 수 있도록 강한 캐비테이션 붕괴압을 발생시킬 수 있는 시험기법의 개발이 필요하다. 아울러서 실제 환경 조건에서 발생하는 캐비테이션과 성질이 유사한 강력한 캐비테이션 붕괴를 생성시켜 침식 효과를 평가하는 효율적인 캐비테이션 시험 방법의 개발이 필요한 실정이다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서는 상기와 같은 캐비테이션 침식 시험의 문제점을 해결하기 위해 경사류 프로펠러 동력계 및 모형 프로펠러를 이용하여 매우 침식성이 강한 캐비테이션을 발생, 붕괴시켜서 모형 프로펠러에 부착 또는 도포된 시편에 캐비테이션 침식을 일으키고 그 침식 정도를 평가할 수 있는 시험 방법을 개발하였다.

캐비테이션 침식 시험은 해양연구원 해양시스템안전연구소 내에 있는 캐비테이션 터널

(cavitation tunnel)에서 수행되었다. 터널의 시험부 제원은 $0.6^L \times 0.6^W \times 2.6^H \text{ m}^3$ 이며 최대 유속은 12 m/s, 터널내 압력은 0.1 Kg/cm^2 에서 2.0 Kg/cm^2 까지 변화가 가능하다. Fig. 2는 중형 캐비테이션 터널 내에 설치된 경사류 프로펠러 동력계(H41)와 모형 프로펠러를 나타낸다. 경사류 프로펠러 동력계란 프로펠러 동력계의 축(shaft)에 경사를 주어 경사축을 갖는 프로펠러를 회전시키거나 추력 또는 토크를 계측하는 동력계를 의미한다. 고속선이나 공기 부양선 등과 같이 프로펠러 축이 수평하지 않은 선박의 경우 프로펠러 축을 외부로 경사지게 설치하게 된다. 이러한 축에 프로펠러가 달려 회전하게 되면 일반적인 수평축의 경우와는 다른 선미반류가 경사진 프로펠러로 유입되어 캐비테이션, 추력, 토크 등이 다르게 나타난다.

본 연구에서는 이러한 경사류 프로펠러 동력계를 이용하여 강력한 캐비테이션을 발생시켰다. 프로펠러 축이 경사각을 갖게 되면 0° 에서 180° 회전각 구간의 프로펠러 날개가 받는 상대 수류의 크기가 커지고 받음각이 커져 날개의 흡입면 뿌리 근처에 강한 캐비테이션이 발생하게 된다. Fig. 3은 축경사 프로펠러에서 날개의 회전 방향 위치 각도에 따라 프로펠러 날개에 유입되는 속도 벡터의 변화를 보여준다. 축 경사각도는 프로펠러에 유입되는 축방향 속도성분과 회전방향 속도성분 $V_a \sin \lambda \sin \phi$ 을 발생시킨다. 회전방향 속도성분은 날개 위치각도 변화에 대응하여 $-V_a \sin \lambda$ 에서 $V_a \sin \lambda$ 까지 변화시킨다. 그리고

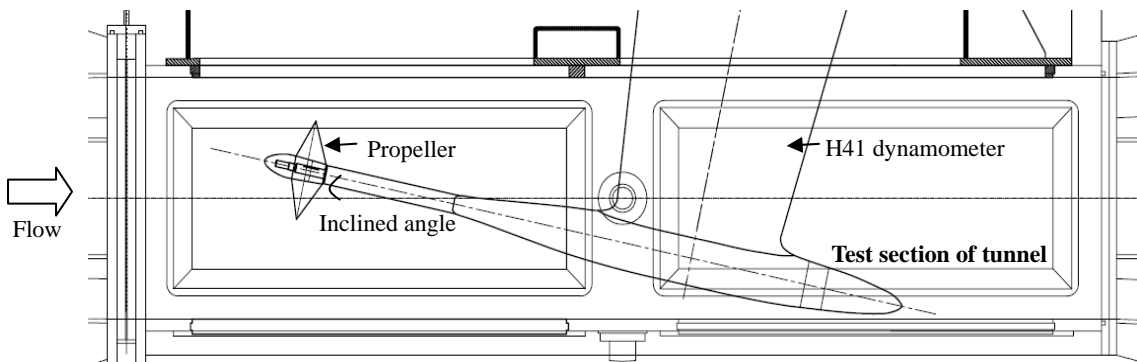


Fig. 2 Medium-size cavitation tunnel and the inclined propeller

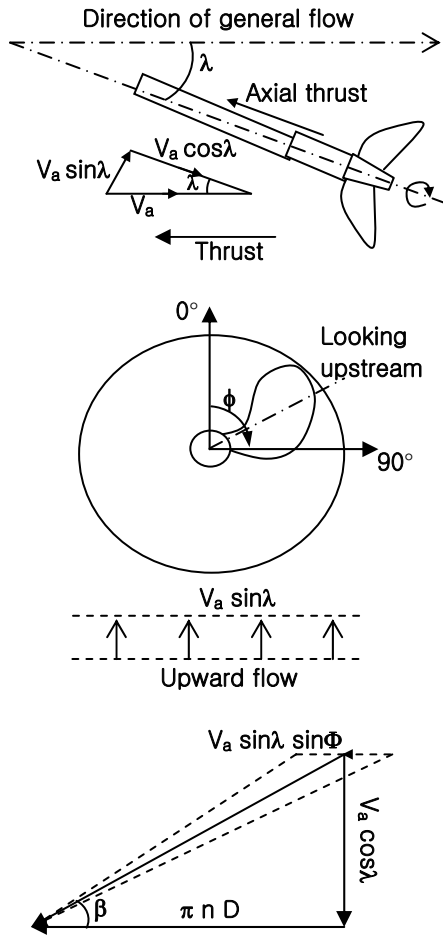


Fig. 3 Velocity vector on propeller blade with inclined shaft

반경방향 속도성분을 $V_a \sin \lambda \cos \phi$ 만큼 발생시켜 날개 위치각도 ϕ 의 변화에 따라 $-V_a \sin \lambda$ 에서 $V_a \sin \lambda$ 까지 변화한다.

프로펠러가 상류를 보면서 오른쪽으로 돌 때 날개 위치각이 90° 일 때만큼 회전속도 성분이 증가하여 최대 입사각을 갖게 되며 흡입면에 캐비테이션 발생량이 최대가 된다. 또한 날개각도가 270° 일 때 회전각도가 $-V_a \sin \lambda$ 만큼 추가되어 입사각이 최소가 되며 압력면에 캐비테이션 발생량이 최대가 된다. 축 경사에 의한 회전방향속도 성분이 프로펠러 날개의 유동입사각에 미치는 변화량은 날개 안쪽

반경(inner radius)에서 크며 날개 바깥 반경(outer radius)일수록 적어서 프로펠러 날개의 뿌리부(root)에서 그 영향이 최대로 나타난다. 경사축 각도가 어느 정도 크면 프로펠러 날개에 유입각이 음과 양으로 변화하여 매 회전마다 날개의 흡입면과 압력면에 캐비테이션이 발생하게 된다. 따라서 날개의 허브와 뿌리 근처에서 발생한 캐비테이션은 대부분 날개면을 따라 성장, 발생 및 붕괴 과정을 반복하며 표면침식 발생을 용이하게 한다(19th ITTC report, Kim et al. 1999).

실험에 사용된 프로펠러는 공기부양선을 위해 설계되었던 것이며 모형의 제원은 Fig. 4와 같다.

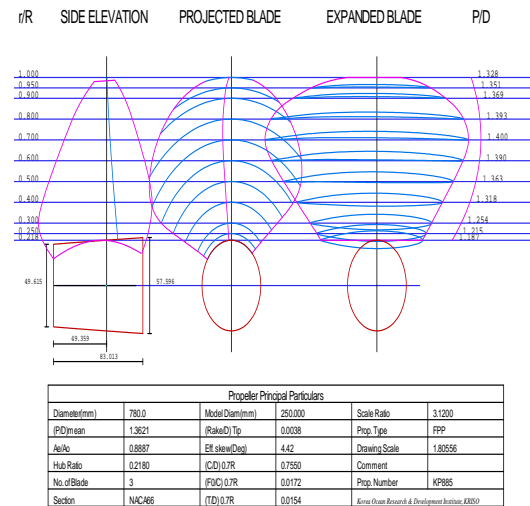


Fig. 4 Particulars of propeller model



Fig. 5 Equipment for 3-D surface profile measurements

프로펠러 모형은 1/3.12로 축소되어 제작되었으며 3개의 날개, 250mm의 직경을 갖는다. 프로펠러의 전개면적비는 0.8887이고 0.7R 위치에서 피치(pitch)비는 1.4001이다.

터널 내 유속, 캐비테이션 수, 축 경사각 등을 조절하여 경사류 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션을 변화시킬 수 있다. 이 때 매우 침식성이 강한 캐비테이션이 프로펠러 날개 위에서 붕괴하므로 일반 캠코더(camcorder)와 같이 낮은 시간 분해능(resolution)으로는 자세히 관찰하기가 어렵다. 본 연구에서는 높은 시간 분해능을 갖는 고속카메라(Photron, FASTCAM APX-RS)를 사용하여 빠르게 변화하고 붕괴하는 캐비테이션을 관찰하였다. 또한 필요에 따라 초당 프레임수(fps:frame per second)를 12000 ~ 20000fps까지 변화시켜가며 촬영하여 캐비테이션의 거동 및 형상에 대하여 관찰하였으며 캐비테이션 붕괴의 재현이 동일하게 이루어지는지를 확인하였다. 사용한 CCD 카메라의 해상도는 512 x 512 pixels이었고 관측면의 크기는 약 10 x 10 cm²이었다.

캐비테이션 침식 시험 전후의 도막 표면을 측정(scanning)하기 위해서 Fig. 5와 같이 3차원 표면 윤곽(profile) 계측기(ATOS)를 이용하였다. ATOS의 측정 방식은 비 접촉광학 방식이며 관측면의 크기를 수 mm에서 수 m까지 확장할 수 있다. 시스템의 정밀도(공간분해능)는 2 μ m이며 자유곡률이 복잡한 물체 측정에 용이하므로 프로펠러 위의 표면 윤곽 계측에 효율적이다.

캐비테이션 침식 실험에 사용된 자유흐름 속도는 8m/s이고 프로펠러 회전수는 28 rps(revolution per second)이었다. 프로펠러 축의 경사각은 10°에서 12°까지 변화시켰고 터널 내 압력과 해수의 증기압, 밀도에 따른 캐비테이션 수를 약 0.9로 고정하였다. 가장 침식성이 강한 캐비테이션이 프로펠러의 뿌리(root) 근처에 발생하도록 하였고 날개의 뒷날(trailing edge) 근처에서 붕괴되지 않도록 상기 시험 조건을 세심하게 조정하였다. 더욱 강도가 높은 캐비테이션 붕괴를 얻기 위해서는 캐비테이션 수를 크게 낮추면 되지만 캐비테이션의 붕괴가

프로펠러 날개의 뒷날 너머 하류에서 일어나므로 본 시험에 적합하지 않다.

결국, 본 시험법의 핵심은 경사류 프로펠러를 이용하여 매우 강력한 캐비테이션 붕괴를 일으켜 짧은 시간 안에 침식 결과를 얻어내고 프로펠러 날개 위 원하는 위치에 캐비테이션 붕괴를 적절하게 일으킬 수 있는가 하는 것이다. 본 연구에서는 이러한 시험법의 핵심들을 만족시키고 실제 적용 가능성을 알아보기 위하여 특정 도료를 프로펠러에 도포한 후 캐비테이션 침식 성능을 조사하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 6에 실험에 사용된 프로펠러 모형의 표면 위에서 발생하는 캐비테이션 패턴의 변화를 촬영한 그림들을 나타내었다. (a)와 (b)는 캐비테이션의 발생 및 성장과정, (c)와 (d)는 캐비테이션의 붕괴과정, (e)와 (f)는 캐비테이션의 소멸과정을 보여준다. (a)는 프로펠러 날개의 흡입면에서 형성된 캐비테이션이 넓은 영역에 걸쳐 나타나고 있다. 프로펠러가 회전함에 따라 흡입면의 뒷날부터 유체의 압력이 점차 높아지게 되고 그림 (b)에서 보는 바와 같이 날개의 앞날을 향해 이동하는 재진입 제트(re-entrant jet)가 캐비테이션 덩어리의 하단부에서 발생하게 된다.

재진입 제트에 의해 캐비테이션의 크기는 점차 수축하게 되고 종국에는 그림 (d)와 같이 특정 위치에서 캐비테이션이 붕괴된다. 캐비테이션의 붕괴는 기체 상태에서 액체 상태로 급격하게 상(phase) 변화가 일어나는 것을 의미하는데, 이때 캐비테이션 기포 주위의 유체가 마이크로(micro) 제트(jet) 형태로 캐비테이션 기포 안으로 유입되고 종국에는 벽면(여기서는 모형 프로펠러 표면)에 강한 충격압을 주게 된다. 이러한 마이크로 제트에 의한 충격압은 수 MPa 내지 100 MPa에 이르는 것으로 알려져 있으며, 벽면에 파공과 같은 강한 침식을 일으킬 수 있다. 그림 (e)와 (f)는 캐비테이션의 붕괴 후 위에서 언급한 마이크로 제트와 반대 방향의 제트(counter jet)가 발생하면서 폭발하는 모습을 나타낸다.

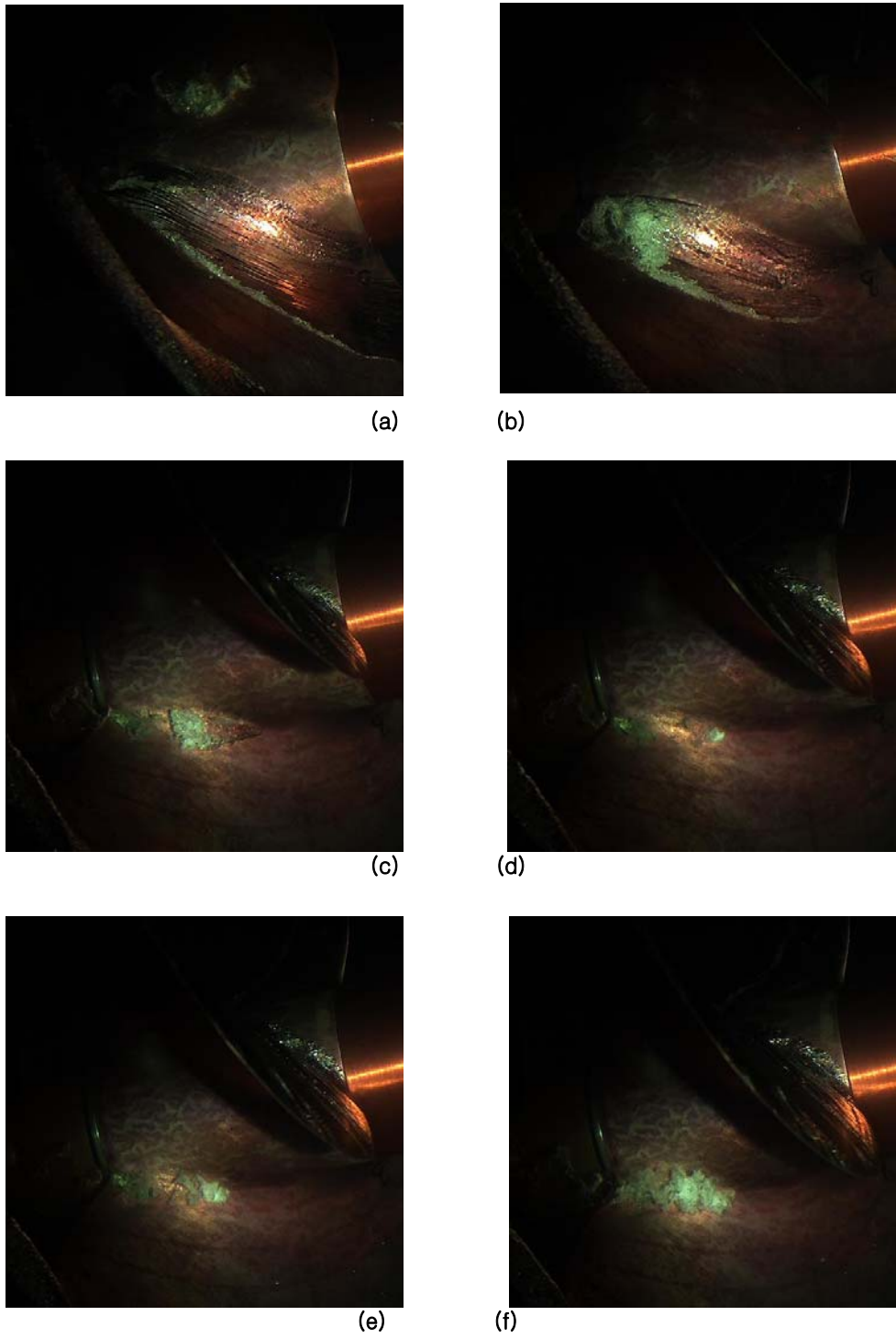


Fig. 6 Photo images on the sequential behaviors of cavitation pattern

발생한 파공의 모습들을 조사해 보면 캐비테이션 붕괴점뿐 만 아니라 붕괴 후 폭발에 의해서도 2차 파공들이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 본 절의 후미에 관련 결과를 나타내었다.

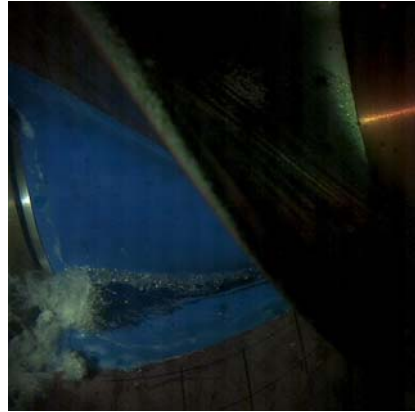
Fig. 7은 에폭시(epoxy) 엘라스토머(elastomer) 계열의 내침식 도료 A를 모형 프로펠러 위에 도포한 사진을 나타낸다. 빨간색으로 표시된 부분이 모형 프로펠러이고 파란색으로 표시된 부분이 도포된 도료 A이다. 캐비테이션의 붕괴가

0.3R 반경 위치 이하에서만 발생하므로 도료를 0.3R 반경 위치까지 도포하였다. 도료 A는 캐비테이션에 대한 내침식 성능이 우수하다고 알려져 있으며 3개의 층(layer)으로 구분하여 시공한다. 3개의 층은 아래에서부터 하도제(primer), 첫 번째 도료 A 층, 두 번째 도료 A 층으로 구성되며 각각 50 μ m, 700 μ m, 750 μ m의 두께를 갖는다. 도료 A는 일반적인 페인트와 달리 주걱 등으로 물체의 표면에 시공하여 육성 고화시킨다.

도료 A가 시공된 모형 프로펠러를 준비한 후 경사류 프로펠러 동력계에 모형 프로펠러를 설치하고 앞서 언급한 시험 조건에서 3시간 동안 캐비테이션 침식 시험을 수행하였다. 여러 번의 시행착오를 거쳐 적절한 시험 조건을 정립하였고 도포된 도료에 파공이 충분히 발생할 수 있는 한계치로써 3시간의 캐비테이션 붕괴압 인가 시간을 결정하였다. 3시간 이상 침식 시험을 수행할 경우 프로펠러 모재에 심각한 손상을 일으킬 수 있어 장시간의 구동은 엄격히 제한되었다. Fig. 8은 도료 A가 시공된 프로펠러



Fig. 7 Preparation of model propeller coated with paint A



(a) Cavitation with re-entrant jet



(b) Cavitation collapsing

Fig. 8 Cavitation behaviors on the paint A-coated propeller

날개 위에서 캐비테이션 덩어리 하단의 재진입 제트와 캐비테이션 붕괴가 잘 발생하고 있음을 보인다. 캐비테이션의 붕괴는 도포된 도료의 시공 상태 즉, 거칠기, 균일도, 도료 마감재 처리 등에 민감하게 작용할 수 있으므로 시험 전 프로펠러 위에 도료를 시공할 때 세심한 주의가 필요하다.

캐비테이션 침식 시험 전 프로펠러 표면 위 시공된 도료의 두께를 3차원 표면 측정기를 이용하여 측정하였는데 평균 두께가 1500 μ m이었고 두께의 표준편차는 350 μ m이었다. 침식 시험 시 도료 A는 재료의 특성으로 인하여 침식 면적이 더디게 확장되었으며 최종적으로 각 날개에 1개씩의 파공이 유사한 형태를 가지고 발생하였다. Fig. 8(a)는 첫 번째 날개에 발생한 파공의 모습을 나타낸다. 최대 1.257mm의 파공

깊이가 나타났으며 가장 큰 파공 주위로 캐비테이션 붕괴 후 폭발 현상으로 인해 2 ~ 10 μm 정도의 미세 파공들이 2차적으로 발생하였음을 볼 수 있다. 첫 번째 날개에서 나타난 주된 파공의 면적은 29.39mm²이었다. 각 날개에서 발생한 파공들에 대하여 측정된 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Summary of the erosion damages

Blade No.	Number of Pits	Max. erosion depth(μm)	Erosion area(mm ²)
1	1	1257	29.4
2	1	1382	23.5
3	1	818	37.5

Table 2 Comparison of erosion depths after 3 hours erosion test

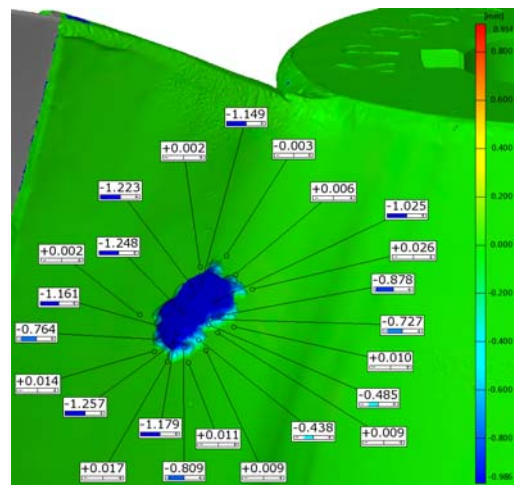
Test type	Erosion depth(μm)
G-32	20
Modified G-32	35
Current method	1149 (mean)

이상과 같이 새로 개발된 캐비테이션 침식 시험 기법을 사용하게 되면 프로펠러 날개 위에 시공되거나 도포된 시편의 캐비테이션에 대한 내침식 성능을 자세하고 정확하게 파악할 수 있게 된다. 특히 비교적 적은 시간 내에 신속하게 침식 결과를 얻을 수 있고 뒷날개 끝에서 적절히 떨어진 위치에 침식을 발생하게 하는 시험 기법의 효율성을 확인하였다.

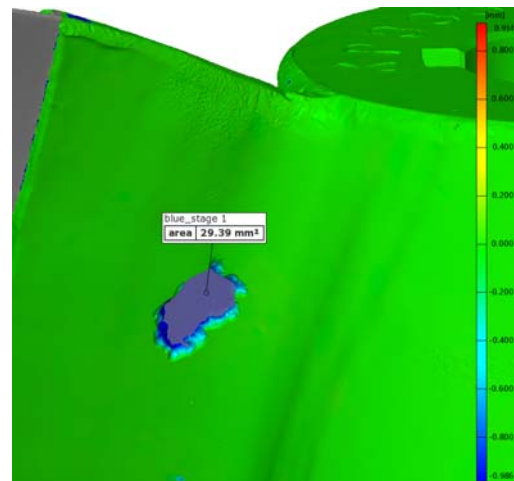
기존에 자주 사용되던 G-32 방법에 의하면 도료 A 시편에 대해 약 3시간 동안 초음파 캐비테이션을 인가하더라도 20 μm 이하의 깊이를 갖는 파공을 얻는다(Table 2). 비록 수정된 G-32 방법을 사용하더라도 유사한 침식 깊이를 얻게 된다. 그러나 실제 선박의 타 등에서 발생하는 캐비테이션 침식은 500 μm ~1500 μm 정도의 내침식 도료층을 손상 시킨 후 타의 본체까지 파공을 형성시킬 정도로 매우 강력하다. 즉, 기존의 G-32 방법으로는 짧은 시간 안에 실제 선박의 타 등에서 발생하는 캐비테이션 붕괴에

의한 극심한 침식 손상 효과를 얻을 수 없어 매우 비효율적이라고 할 수 있다. 본 연구에서 제안된 새로운 캐비테이션 침식 방법을 이용하게 되면 3시간 정도의 비교적 짧은 시간 안에 실제 선박의 타 등에서 발생하는 침식력을 재현할 수 있어 매우 효율적이라고 판단된다.

개발된 캐비테이션 침식 기법의 경우 사용되는 시편의 두께나 표면 거칠기 등에 따라서 캐비테이션 붕괴의 양상이 바뀔 수 있으므로 추후



(a) Erosion depth distribution of the first pit



(b) Erosion area of the first pit

Fig. 9 Result of 3-D surface profile measurements after erosion test

시편에 대한 적절한 시공 방법을 제안할 수도 있을 것이다. 무엇보다도 선박 타에 부착될 내침식 도료에 대한 캐비테이션 내침식 특성을 보다 효율적으로 파악할 수 있는 시험기법으로 활용 가능하리라 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 선박의 타 등에서 발생하는 강력한 캐비테이션 붕괴를 적절하게 모사할 수 있는 기법을 개발하였으며 침식에 의해 발생한 파공의 깊이나 넓이 등을 계측하여 분석할 수 있는 캐비테이션 침식 시험 방법을 마련하였다. 실제로 발생하는 것과 유사할 것으로 예상되는 캐비테이션을 생성시키고 이를 필요한 위치에 붕괴시켜 식별 가능한 침식 파공을 얻을 수 있으며, 매우 강한 캐비테이션 붕괴압에 의해 비교적 짧은 시간(3시간) 내에 침식 결과를 얻을 수 있다. 즉, 캐비테이션 침식 시험에 소요되는 시간을 크게 절약하면서 실선 척도에서 발생하는 침식 손상을 재현할 수 있어 매우 효율적인 시험기법이라고 말할 수 있다. 또한 프로펠러 동력계의 경사각이나 캐비테이션 수 등을 조절하여 다양한 내침식 재료나 도료에 대한 캐비테이션 내침식 성능을 조사하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 “선박용 도료에 대한 캐비테이션 침식 시험 (PIS508A)” 및 저진동 고효율 추진기 및 방향타 기술 개발 (PNS132C)”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

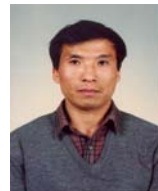
- Boo, K.T., Han, J.M., Song, I.H. and Shin, S.C., 2003, “Viscous Flow Analysis for the Rudder Section Using FLUENT Code,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No. 4, pp. 30-36.
- Kim, K.S., Song, I.H., Park, Y.H., Lee, K.W., Ahn, J.W., Lee, J.T. and Heo, Y.C., 1999, “Study on the Performance Improvement of the Propeller

Cavitation for PKM Navel Vessel,” Proceedings of the Annual Autumn Meeting The Society of Naval Architects of Korea.

- Kim, S.P., Park, J.J., Kim, Y.S., Jang, Y.H., Choi, Y.B. and Paik, B.G., 2006, “An Experimental Research on Gap Entrance Profile for Semi-spade Rudder,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 5, pp. 578-585.
- Kim, Y.H., 1999, “Study on Methods to Minimize Erosion Damages in the Ship Structure, Research Report,” Ocean Industry Research Institute, Korea Maritime University
- Kim, Y.H., Son, Y.J., Uhm, S.H. and Lee, J.J., 2003, “Cavitation-Erosion Characteristics between Polymer Based Composites and Metal under the Various Condition of Fluid,” Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineering A, Vol. 27, No. 3, pp. 363-371.
- 19th ITTC, 1990, Report of Cavitation Committee, Vol. 1 Sept.



< 백 부근 >



< 김 경 울 >



< 김 기 섭 >



< 김 태 규 >



< 김 경 래 >



< 장 영 훈 >



< 이 상 옥 >