

부분 프로펠러 날개 모형을 이용한 높은 레이놀즈 수에서의 공동시험

최길환^{†*}, 장봉준*, 조대승^{**}

현대중공업 선박해양연구소*
부산대학교 조선해양공학과^{**}

Cavitation Test at High Reynolds Number Using a Partial Propeller Blade Model

Gil-Hwan Choi^{†*}, Bong-Jun Chang* and Dae-Seung Cho^{**}

Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.*
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University^{**}

Abstract

As the scale factor of model propellers utilized in cavitation test is about 40, it is difficult to find out practical countermeasures against the small area erosions on the blade tip region throughout model erosion tests. In this study, a partial propeller blade model was used for the observation of cavitation pattern for the eroded propeller. A partial propeller blade model was manufactured from 0.7R to tip with expanded profile and with adjustable device of angle of attack. Reynold's number of a partial propeller blade model is 7 times larger than that of a model propeller. Also, anti-singing edge and application of countermeasures to partial propeller blade model which produced in large scale can be more practical than a model propeller. For the observation of cavitation at high Reynold's number, high speed cavitation tunnel was used. To find out the most severe erosive blade position during a revolution, cavitation observation tests were carried out at 5 blade angle positions.

※Keywords: Partial propeller blade model(부분 프로펠러 날개 모형), Cavitation erosion(공동침식), Cavitation test(공동시험), Blade tip(날개 끝)

접수일: 2009년 7월 3일, 승인일: 2009년 10월 29일

†교신저자: ghchoi@hhi.co.kr, 052-202-9090

1. 서 언

프로펠러에서 발생하는 침식은 주로 날개면에서 발생하는 공동현상에 의한 것으로 발생 위치는 날개 흡입면 안쪽, 날개 끝, 날개 뒷날에 명음 방지를 위한 형상이 적용된 부분(anti-singing edge), 날개 뿌리 부분 그리고 날개 압력면 앞날 부위로 구분할 수 있다. 또한 프로펠러의 침식 정도는 별다른 조치가 필요 없는 오렌지 껍질과 같이 오돌도돌 한 형태(orange peel)부터 날개면에 구멍이 뚫려 즉각적인 조치가 필요한 경우까지 있다.

실선 프로펠러에서 응력이 집중되지 않는 날개 끝, anti-singing edge 부 그리고 흡입면 날개표면에 오렌지 껍질 형태로 침식현상이 발생하는 경우에는 선박의 정기 점검 시 발생부위를 그라인더로 갈아내거나 날개 앞날이나 뒷날을 수정하여 더 이상 침식이 발생하지 않도록 한다. 그러나, 프로펠러 역회전 시 응력이 집중되는 $0.5 \sim 0.7R$ (R : 프로펠러 반경) 부위의 날개 뒷날이나 날개면 안쪽 그리고 날개 뿌리 근처에 침식이 발생하는 경우는 선박의 운항 시 날개의 절손, 선속의 저하 그리고 과도한 진동 및 소음을 발생시키므로 즉각적인 조치가 필요하다.

프로펠러 면에 침식을 유발하는 공동현상은 얇은층 공동현상(sheet cavitation)이 커지다가 일정 길이를 초과하는 경우 맹렬하게 요동하게 되고, 이것이 주기성을 가지는 유해한 구름형 공동현상(cloud cavitation)으로 발전되는 것으로 시험을 통하여 규명되었다 (Yamaguchi 2006). 그러나 선체 뒤에서 작동되는 프로펠러 날개단면의 경우, 균일류보다 복잡한 공동특성을 가지는 것으로 추정되지만 이에 대한 정확한 현상에 대한 이해가 아직 이루어지지 않고 있다 (Junglewitz 2003). 다만, 선체의 영향으로 인한 반류 중에서 작동하는 프로펠러에서 각 날개단면이 주기적 회전 중에 특정 받음각 (α)과 캐비테이션 수 (σ)에서 구름형 공동현상을 발생시키고, 이로 인하여 프로펠러 면에 침식과 소음을 유발시키는 것으로 파악되고 있다 (Arndt 2002). 이때 단면의 종류에 따라 구름형 공동현상이 발생하는 받음각이 달라지는 것이 2

차원 단면시험 (Song et al. 2000) 으로 증명되었다.

실선 프로펠러의 공동침식 가능성을 평가하기 위해 가장 많이 사용하는 방법은 모형 프로펠러를 이용한 공동관측 시험이다. 프로펠러 날개의 위치를 변화시키며 발생하는 공동현상의 범위와 거동을 눈으로 확인하고 스케치와 사진 또는 고속카메라로 기록한다. 침식 발생이 우려되는 경우에는 공동현상이 발생하는 면에 페인트나 연한 금속 재질을 프로펠러 표면에 입혀 공동에 의한 표면침식 현상을 평가하고 있다. 그러나 이러한 방법들로 침식 시험을 수행하는 기관들의 시험법에 대한 신뢰도가 평균 60%로 조사되어 (ITTC 2005) 모형 프로펠러를 이용한 실선 프로펠러의 공동 침식의 예측이 매우 어렵다는 것을 보여주고 있다.

실선과 모형 프로펠러의 공동특성 차이는 반류 분포, 축척효과와 더불어 레이놀즈 수의 지배를 받는 프로펠러 앞날에서의 층류 유동박리에도 기인한다. 이를 극복하기 위하여 Kuiper (1981)는 날개 앞날에 거칠기 효과를 주어서 천이구간이 날개 앞쪽으로 이동하는 것을 시험적으로 보여주었고, Jung et al. (2004)은 프로펠러 앞날의 거칠기 변화가 프로펠러 캐비테이션 및 변동압력 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 그리고 Kim et al. (2000)은 레이놀즈 수가 증가함에 따라 공동현상이 안정화 되고, 실선의 공동현상과 유사해지는 것을 보였다.

그러나 위에서 언급된 공동침식 평가방법들은 공동침식 부위가 비교적 큰 경우에는 적합하나 침식부위가 anti-singing edge 나 날개 끝과 같이 곡률의 변화가 심하고 면적이 작은 곳인 경우는, 모형 프로펠러에서 침식부위를 실선 프로펠러와 동일한 형상으로 제작하기 어렵고, 육안이나 고속카메라로 국부적인 유해한 공동현상의 관측이 어렵고, 페인트나 금속재질을 표면에 입히는 경우 그 두께에 의한 영향이 존재하기 때문에 적합하지 않다. 모형 프로펠러 축척이 40 이고 실선의 anti-singing edge 부 길이가 30 mm 인 경우 모형 프로펠러의 anti-singing edge 부는 0.75 mm 가 되어 anti-singing edge 부의 제작 및 이 부위에서의

공동현상 관측이 어렵게 된다.

본 연구에서는 일반 상선 프로펠러 날개 끝 부위의 국부침식이 발생하는 날개각도와 공동현상을 관측하고자, 반경방향의 반류성분이 프로펠러 날개 끝 부위에서 상대적으로 작고 (Fig. 1), 날개 끝 부위의 유동이 축 방향 및 접선 방향의 반류성분과 프로펠러 형상에 지배를 받는다는 가정하에 기존 모형 프로펠러와 비교하여 축척비가 5.97 배 큰 부분 프로펠러 날개 모형을 제작하였다. 제작된 부분 프로펠러 날개 모형은 반경 0.7R 부터 날개 끝까지이다. 또한, 이를 이용하여 기존 모형 프로펠러 대비 7 배 높은 레이놀즈 수에서 공동관측 시험들을 수행하였다.

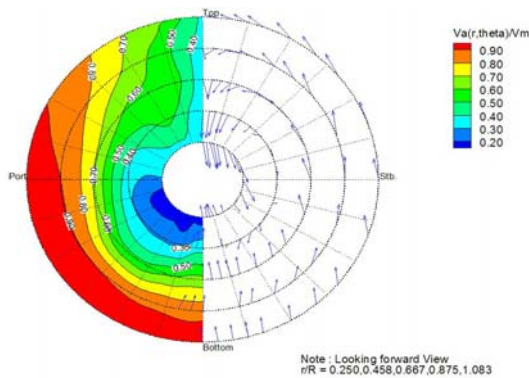


Fig. 1 Axial velocity contour and radial/tangential velocity vector plot of the subject ship

시험 대상 프로펠러의 국부침식 현상 평가를 위하여 날개각도와 캐비테이션 수의 조합에 따른 6 개의 공동조건에서 공동관측 시험 수행 결과를 제시하였다.

2. 프로펠러 날개 침식 사례

Table 1 에 나타난 제원을 갖는 실선에 장착된 프로펠러 날개 끝에서 Fig. 2 에 보인 바와 같은 침식 현상이 발생하였다. 침식부위의 위치는 프로펠러 반경 0.97R 의 날개 뒷날이며 크기는 110 mm x 90 mm 이다. 가장 많은 침식이 발생된 날개의 (Fig. 2) 침식 깊이는 anti-singing edge 부위

가 8 mm, 날개면은 3 mm 이었다. 다른 날개의 경우는 anti-singing edge 부위가 3 ~ 7 mm, 날개면은 0 ~ 2 mm 였다. Anti-singing edge 부위 침식은 5 개 날개 모두에서 나타났고, 날개면 침식은 4 개 날개에서 나타났다. 조사 결과를 바탕으로 추론하면 침식은 anti-singing edge 에서 발생하기 시작하여 시간의 경과에 따라 점차적으로 날개 뒷날 면까지 확대된 것으로 판단된다. 대상 프로펠러의 운항기간은 31 개월이었다.



Fig. 2 Blade tip erosion on the propeller of the subject ship

Table 1 Main particulars of propeller attached to the subject ship

Propeller diameter	8.6 m
Number of blades	5
(P/D) _{mean}	0.9100
Expanded area ratio	0.6100
Delivered power	23,000 kW
Rotational speed	83.0 RPM

3. 부분 프로펠러 날개 모형

대상선 프로펠러 날개 끝에서 발생한 침식 현상의 원인을 파악하고자 독일 HSVA 가 보유한 대형 공동수조(large cavitation tunnel)에서 부분 프로펠러 날개 모형을 이용한 공동시험을 수행하였다. 시험을 수행한 공동수조는 단면 직경 0.75 m, 관측부 길이가 2.25 m 이며 최대유속은 19.5 m/sec 이다.

부분 프로펠러 날개 모형의 축척은 HSVA 공동 수조에서 시험 가능한 최대 크기에 해당하는 5.97로 하였다. 부분 프로펠러 날개 모형은 프로펠러 0.7R 부터 날개 끝까지 전개된 형태로 제작되어 총 길이 620 mm, 높이 255 mm 그리고 폭 65 mm 이다. 실선 프로펠러 : 모형 프로펠러 : 부분 프로펠러 날개 모형의 축척비는 1.0 : 1/35.8 : 1/5.97 이다. 제작된 부분 프로펠러 날개 모형의 형상과 상세 제원은 Fig. 3 와 Table 2 에 각각 나타내었다.

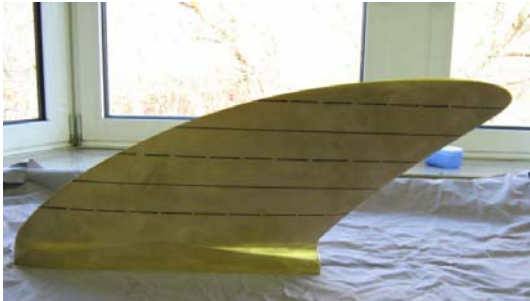


Fig. 3 The partial propeller blade model

Table 2 Propeller geometry data of the subject ship

Position	P/D	C/D	Skew (deg.)	r/D	t/D
0.700R	0.9259	0.2759	3.46	-0.0185	0.0148
0.800R	0.9246	0.2754	10.09	-0.0229	0.0106
0.850R	0.9209	0.2664	14.10	-0.0234	0.0087
0.900R	0.9082	0.2488	18.57	-0.0210	0.0068
0.950R	0.8645	0.2135	23.51	-0.0141	0.0048
0.975R	0.8244	0.1659	26.15	-0.0084	0.0038
0.996R	0.7796	0.0704	28.45	-0.0016	0.0030
1.000R	0.7698	0.0000	28.90	0.0000	0.0029

(Note) D: Propeller diameter, P : Propeller pitch
C : Chord length, r : rake, t : thickness

부분 프로펠러 날개 모형은 고속 공동수조의 균일류에서 실선 프로펠러와 같은 받음각을 갖도록 피치 분포 조정된 전개된 형상(expanded view)으로 제작된 것이다. 이때, 부분 프로펠러 날개 모형의 받음각은 Fig. 4 와 식 (1)과 같이 정의하였다.

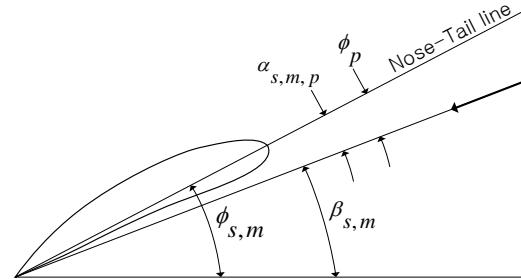


Fig. 4 Blade velocity diagram

$$\alpha_s = \phi_s - \beta_s = \alpha_m = \phi_m - \beta_m = \phi_p = \alpha_p \quad (1)$$

여기서, α 는 프로펠러 받음각, ϕ 는 프로펠러 피치각, β 는 유기속도를 포함한 유체의 유입각이고, 아래 첨자 s, m, p 는 각각 실선, 모형 프로펠러 그리고 부분 프로펠러 날개 모형을 나타낸다. 부분 프로펠러 날개 모형의 경우 균일류가 유입되기 때문에 부분 프로펠러 날개 모형의 피치각은 프로펠러 받음각과 일치하도록 제작되었다.

부분 프로펠러 날개 모형의 각 반경위치에서 받음각(피치각)들은 만재흡수에서 예인수조에서 측정된 12시 위치 (날개각도 0°) 공칭반류에 포텐셜 코드로 계산된 유기속도를 고려하여 결정하였다. 유기속도 계산은 양력면 이론을 이용한 비정상 유동해석 (Kerwin and Lee 1978)기법을 기반으로 Texas-MIT 콘소시움에서 개발한 MPUF3A (Kinnas and Fine 2006)를 이용하였다. 각 반경 위치에서의 받음각(피치각)은 Table 3 에 나타내었다.

Table 3 Pitch angles of a partial propeller blade model

Position	Pitch angle, ϕ_p (deg)
0.700R	14.49
0.800R	12.63
0.900R	10.94
0.950R	9.72
0.975R	8.82
1.000R	7.71

4. 부분 프로펠러 날개 모형을 이용한 공동시험

부분 프로펠러 날개 모형을 이용한 공동시험은 기존의 모형 프로펠러를 이용한 공동시험에 비하여 모형이 6 배 크기 때문에 날개 끝에서의 곡률과 anti-singing edge 등의 재현이 가능하다. 또한, 레이놀즈 수가 기존 모형프로펠러 (1.08×10^6) 보다 약 7 배 (7.62×10^6) 크고 실선 프로펠러의 레이놀즈 수 (5.29×10^7) 보다 7 배 작기 때문에 실선 프로펠러의 공동현상에 근접한 관측이 가능하다. 그러나, 날개각도 (φ) 별로 부분 프로펠러 날개 모형의 받음각을 각각 조정하면서 공동현상을 관측하여야 하여 많은 시간과 노력이 소요된다. 날개각도 (φ) 에 대한 정의는 Fig. 5 에 나타내었다.

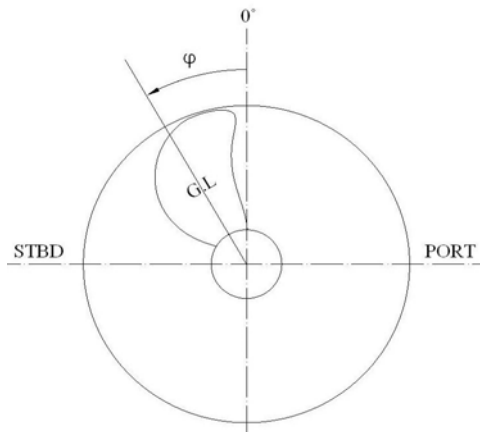


Fig. 5 Definition of propeller rotation and blade angle

부분 프로펠러 날개 모형을 이용하여 공동시험을 실시할 때 날개각도 (φ) 에 따른 받음각의 조정은 부분 프로펠러 날개 모형 전체를 움직여서 Table 4 에 표시된 0.95R 에서의 받음각(피치각)을 가지도록 맞추었다. 0.95R 을 기준으로 선택한 이유는 실선 프로펠러에서 침식발생 위치(0.97R)와 가깝기 때문이다.

공동시험 조건은 대상선의 만재율수와 밸러스트 유회수의 반류분포 비교와 실선의 운항자료를 바탕으로 만재율수 상태에서 공동현상을 관측하기로

결정하였다.

프로펠러 날개각도 (φ) 별로 공동시험을 실시하기 위하여, 만재율수 상태에 대하여 날개각도에 따른 캐비테이션 수 (σ_v) 는 3 차원 반류성분과 공동수조의 유속을 기준으로 식 (2)을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_v = \frac{P_0 - P_v}{0.5\rho_s \left[(x\pi ND + V_t)^2 + V_a^2 \right]} = \frac{P_0 - P_v}{0.5\rho_m V_0^2} \quad (2)$$

여기서, P_0 는 계산하고자 하는 위치에서의 정압이고, P_v 는 물의 증기압, x 는 원하는 반경위치, N 은 프로펠러 회전수, D 는 프로펠러 직경, V_t 는 접선방향 반류성분, V_a 는 축 방향 반류성분, ρ_s 과 ρ_m 은 실선과 모형에서의 물의 밀도 그리고 V_0 는 공동수조의 유속으로서 18.0 m/sec 로 하였다.

현대선박해양연구소(HMRI) 중형 공동수조에서 모형 프로펠러와 반류망(wake screen)을 이용하여 수행된 공동현상 관측 결과는 Fig. 6 에 나타내었다. 공동시험은 만재율수 상태에서 추력계수 K_T 와 캐비테이션 수 σ_v 를 일치하여 수행되었다. 이 때 캐비테이션 수는 프로펠러 축 중심 위로 0.7R 지점에 맞추었다.

시험결과, 날개 각 340° 부터 30°까지는 매우 안정된 얇은 막 공동현상이 관측되었고 날개 각 40°부터 60°에서는 실선 프로펠러에서 침식이 발생한 부위(0.97R)에 강한 팁 보오텍스 캐비테이션이 발생하였다. 또한 공동수조에서 페인트를 이용한 공동침식을 시험을 실시하였으나 침식을 발생시키는 공동현상이 발견되지 않았고 페인트를 도포한 부위에서도 어떠한 침식의 징후를 발견하지 못하였다.

Table 4 와 같이 부분 프로펠러 날개 모형을 이용한 공동현상 관측시험은 모형 프로펠러를 이용한 공동시험에서 팁 보오텍스가 크게 관측된 위치 (40°, 50°, 60°)와 대응되는 받음각($\alpha_{0.95r/R}$) 2.0°(날개각도 43°), 1.5°(날개각도 50°) 그리고 1.0°(날개각도 60°)에서 수행되었다. 모형 프로펠러에서는 캐

Table 4 Test conditions of a partial propeller blade model

No.	φ [deg]	$\alpha_{0.7R}$	$\alpha_{0.95R}$	σ_v
1	43°	6.8	2.0	0.3749 (at 0.70R)
2	43°	6.8	2.0	0.2028 (at 0.95R)
3	50°	6.3	1.5	0.2052 (at 0.95R)
4	60°	5.8	1.0	0.2134 (at 0.95R)
5	75°	5.3	0.5	0.2231 (at 0.95R)
6	90°	4.8	0.0	0.2374 (at 0.95R)

φ : 날개각도 (0°가 연직상방위치)

비테이션 수를 프로펠러 축 중심 위로 0.7R 에 맞추었으나, 부분 프로펠러 날개 모형의 경우는 실선에서 침식이 발생한 위치(0.97R)에 근접한 0.95R 에 맞추어서 공동현상 관측시험을 하였다. 상기 3 개의 조건에서 공동관측 결과, 심각한 공동현상을 관측하지 못하여 날개 각도 75°(받음각 0.5°)를 추가하였으며 이때 anti-singing edge 부에서의 박리로 인한 공동현상과 더불어 안개형 공동현상 (misty cavitation)이 0.97R 날개 뒷날 면에 발생하여 압력면 날개 뒷날로 간헐적으로 넘어 오는 것이 관측되었다. 그리고 90°(받음각 0.0°)에 대하여도 공동현상 관측시험을 수행하였다. 또한 페인트를 이용한 침식시험을 날개각도 75°와 90°에 대하여 수행하였으나 침식이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 침식이 31 개월 동안에 지속적으로 발생한 경우로 기존의 모형 프로펠러의 침식시험 기법으로는 예측에 한계가 있음을 알 수 있었다. 각 시험조건에 대한 날개각도, 받음각 그리고 캐비테이션 수를 Table 4 에 나타내었다. 캐비테이션 수 계산시 날개각도에 따라 커지는 접선 및 축 방향의 반류성분(Fig. 1)이 포함되어 No. 2~6의 캐비테이션 수들의 차이가 작게 계산되었다.

모형 프로펠러와의 공동현상을 비교하기 위하여 부분 프로펠러 날개 모형의 날개각도 43°(받음각 2.0°)에서 캐비테이션 수를 모형 프로펠러와 동일하게 0.7R 에 맞추어서 공동현상 관측시험을 하였다. 모형 프로펠러인 경우 두꺼운 하얀 포말 형태 캐비테이션(white and foamy sheet cavitation) 이 0.9R 부터 프로펠러 끝까지 발생하였고 강렬한 팁

보오텍스 캐비테이션이 프로펠러 끝에서 발생되었다 (Fig. 6 좌측 위와 Fig. 8). 부분 프로펠러 날개 모형의 경우에도 두꺼운 하얀 포말 형태 캐비테이션이 0.9R 부터 프로펠러 끝까지 발생하였고 투명한 얇은 층 캐비테이션이 0.8R 부터 0.9R 까지 관측되었다. 팁 보오텍스 캐비테이션은 모형 프로펠러 경우보다 강력하게 관측되었다 (Fig. 7 좌측 위와 Fig. 9). 부분 프로펠러 날개 모형인 경우 캐비테이션 수가 동일 반경에서는 일정하고 캐비테이션 수 계산시 접선방향의 반류성분이 포함되었지만 모형 프로펠러의 경우 공동시험 시 반류량을 이용하여 접선방향의 반류가 재현되지 않았고 동일 반경에서도 날개각도에 따라 캐비테이션 수가 달라져서 공동면적이나 공동특성의 직접적인 비교가 어려우나, 관측된 공동의 발생 면적이 유사함은 확인할 수 있었다.

Fig. 7 의 우측 위에 나타난 스케치는 캐비테이션 수를 0.95R 에 맞춘 날개각도 43°(받음각 2.0°)에서 관측된 공동현상이다. Fig. 7 의 좌측 위 캐비테이션 수 0.7R 에서 시험된 결과에 비하여 공동발생 면적과 두께가 증가하였고 부분 프로펠러 날개 모형과 공동수조 바닥면(0.7R)이 만나는 지점에서 발생한 공동현상이 0.8R 의 날개 뒷날까지 이어지는 것으로 관측되었다. Fig. 7 의 좌측 가운 데의 날개각도 50°(받음각 1.5°)는 두꺼운 하얀 포말 형태 캐비테이션이 0.95R 을 중심으로 발생하였고 부분 프로펠러 날개 모형과 공동수조 바닥면(0.7R)이 만나는 지점에서 발생한 공동현상도 관측되었으나 날개각도 43°에 비하여는 많이 약화되었다.

Fig. 7 의 우측 가운데의 날개각도 60°(받음각 1.0°)는 두꺼운 하얀 포말 형태 캐비테이션이 0.975R 을 기준으로 발생하였고 부분 프로펠러 날개 모형과 공동수조 바닥면(0.7R)이 만나는 지점에서 약간의 얇은 층 캐비테이션이 관측되었다.

Fig. 7 의 좌측 아래의 날개각도 75°(받음각 0.5°)는 두꺼운 하얀 포말 형태 캐비테이션이 0.98R 을 기준으로 발생하였고 다른 날개각도와는 다르게 anti-singing edge 부에서의 박리로 인한 공동현상과 더불어 안개형 공동현상이 0.97R 날

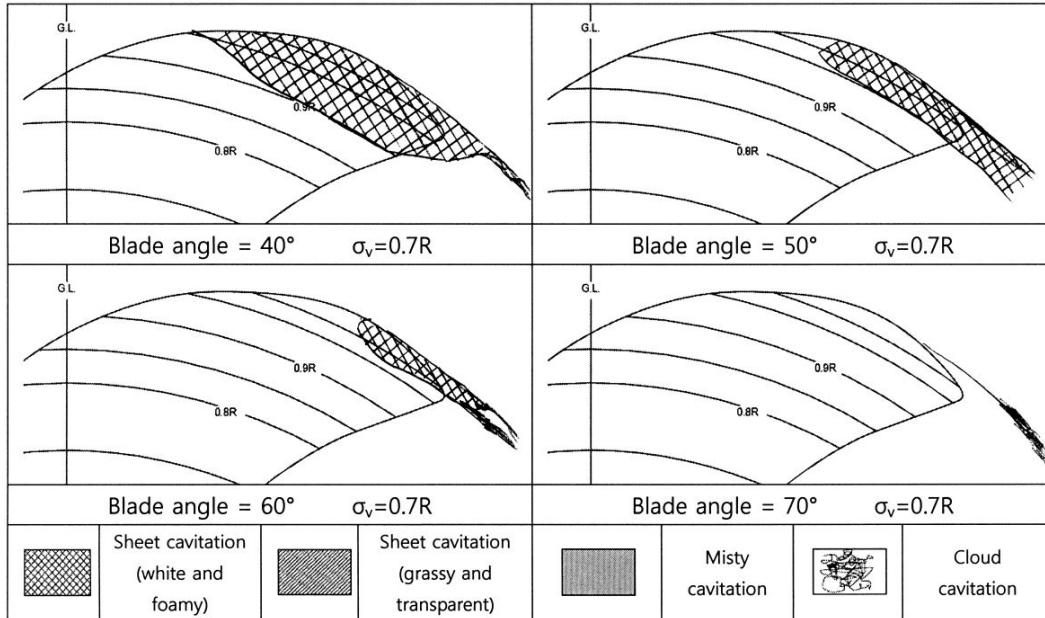


Fig. 6 Sketches of cavitation pattern on the model propeller

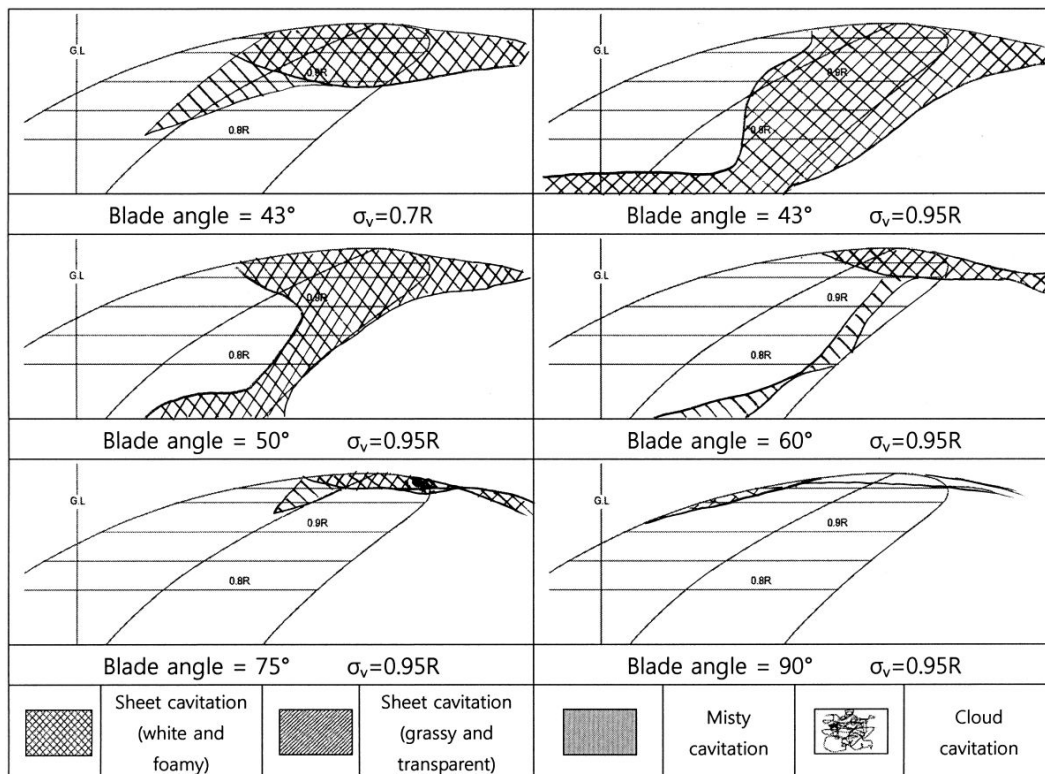


Fig. 7 Sketches of cavitation pattern on the partial propeller blade model

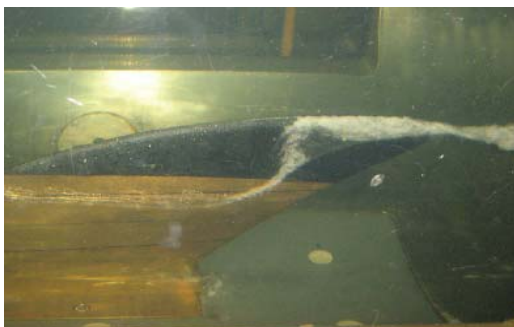
개 뒷날 면에 발생하여 압력면 날개 뒷날로 간헐적으로 넘어오는 것이 관측되었다(Fig. 10의 화살표).



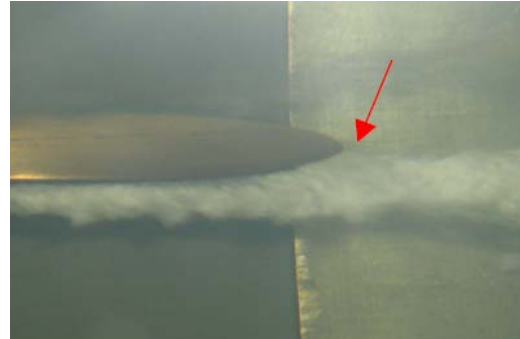
Fig. 8 Cavitation phenomena of model propeller at blade angle 40° and cavitation number 0.7 R



Fig. 9 Cavitation phenomena of large partial blade model at blade angle 43° and cavitation number 0.7 R

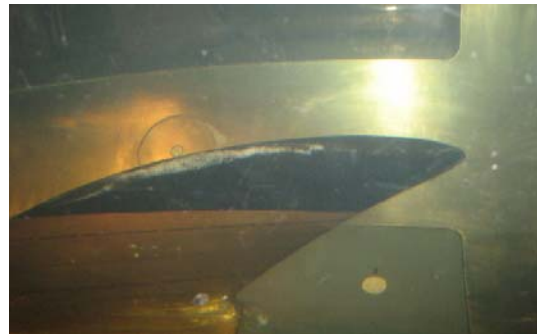


(a) Front view



(b) Top view

Fig. 10 Details of cavitation phenomena at blade angle 75° and cavitation number at 0.95R



(a) Front view



(b) Blade tip detail view

Fig. 11 Details of cavitation phenomena at blade angle 90° and cavitation number at 0.95R

5. 결론

프로펠러 날개 끝 부위의 국부침식에 대한 원인 평가를 위하여 기존의 모형 프로펠러 대비 축척비

가 6 배 큰 프로펠러 반경 0.7R 부터 날개 끝까지의 부분 프로펠러 날개 모형을 제작하였다.

모형 프로펠러의 공동시험 결과를 이용하여 부분 프로펠러 날개 모형의 공동시험 날개 각도들을 결정하였으며, 받음각을 조정하여 6 개의 공동시험 조건에 대하여 모형 프로펠러에 비하여 7 배 높은 레이놀즈 수에서 공동현상 관측시험을 실시하였다. 시험 결과 실선 프로펠러에서 침식이 발생된 0.97R 날개 뒷날의 anti-singing edge 부에서의 박리로 인한 공동현상과 더불어 안개형 공동현상이 날개 뒷날 면에 발생하여 압력면 날개 뒷날로 간헐적으로 넘어오는 것이 관측되어 이것이 침식을 유발시키는 가장 큰 요인으로 판단되었다.

그러나 대상선 한 척의 프로펠러에 대한 부분 프로펠러 날개 모형을 이용한 공동시험만으로 이 시험법에 대한 유용성을 판단하기에는 무리가 있다고 판단되며, 향후 침식 대응방안을 적용한 시험이나 다른 프로펠러에의 적용 등을 통한 지속적인 검증이 요구된다.

참 고 문 헌

- Arndt Roger E.A., 2002, "Cavitation in Vortical Flows", Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 34, pp. 143-175.
- ITTC, 2005, "The Specialist Committee on Cavitation Erosion on Propellers and Appendages on High Powered/High Speed Ships: Final Report and Recommendations to the 24th ITTC," Proc. 24th International Towing Tank Conference, Vol. 2, pp. 509-542.
- Jung J.K., Han J.M., Kim J.H., Seo J.S., 2004, "Effect of Leading Edge Roughness on Cavitation Pattern and Fluctuating Pressure Amplitudes." Proceedings of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp. 523-528.
- Junglewitz, A., 2003, "Cavitation Erosion - Damages and Countermeasures from a Classification Service Providers Point of View," STG Sprechtag Cavitation.

- Kerwin, J.E. and Lee, C.S., 1978, "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting-Surface Theory," Trans. SNAME, Vol. 86, pp. 218-253.
- Kim K.S., Kim K.Y., Ahn J.W., and Lee J.T., 2000, "Effect of Reynolds Number, Leading Edge Roughness and Air Content on the Cavitation Performance of Model Propellers," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 1, pp. 10-25.
- Kinnas, S. and Fine, N., 1994, "A Nonlinear Boundary Element Method for Analysis of Unsteady Propeller Sheet Cavitation," Proceeding 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, pp. 717-737.
- Kuiper, G., 1981, Cavitation Inception on Ship Propeller Models, Report of Netherlands Ship Model Basin. Publ. No. 655.
- Song, I.H., Ahn, J.W., Moon, I.S. and Kim, K.S., 2000, "Influence of the Leading Edge Shape of a 2-Dimensional Hydrofoil on Cavitation Characteristics," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 1, pp. 60-66.
- Yamaguchi H., 2006, "Cloud Cavitation on Foil Sections," International Symposium on Cavitation CAV2006.



< 최길환 > < 장봉준 > < 조대승 >