

실선관측에 의한 가변추진기의 캐비테이션 초생속도 향상에 관한 연구

임용수[†] · 조관준¹ · 연제길²

(Received July 1, 2014 ; Revised August 28, 2014 ; Accepted October 14, 2014)

A study on the improvement of cavitation inception speed for controllable pitch propeller in the actual warship

Yong-Su Lim[†] · Kwan-Jun Jo¹ · Je-Gil Yeun²

요약: 추진기에서 캐비테이션이 발생되면 효율이 저하되고 진동과 소음이 발생한다. 소음은 캐비테이션이 처음으로 발생하는 시점부터 크게 증가되므로 캐비테이션 초생속도(CIS)를 가능한 높이는 것이 중요하다. 본 논문에서는 가변추진기의 캐비테이션 초기발생 현상을 확인하기 위하여 처음으로 캐비테이션 실선관측을 수행하였다. 관측 결과 가변추진에서 캐비테이션 초기발생은 볼트 캐비테이션으로 확인되어 볼트부위를 개선한 새로운 형상의 가변추진기를 제안하였다. 개선된 가변추진기에서는 볼트 캐비테이션이 전혀 발생되지 않았으며, CIS는 개선 전 가변추진기 보다 약 4.5 노트 향상된 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 향후 저소음 가변추진기 개발과 CIS 성능 향상에 매우 유용한 자료로 활용될 것이다.

주제어: 가변추진기, 캐비테이션 초생속도, 볼트 캐비테이션, 진동과 소음

Abstract: If cavitation occurs in propeller, it generates vibration and noise accordingly which results in low efficiency of propeller. It's important to increase cavitation inception speed(CIS) since the noise of cavitation increases significantly from the beginning of cavitation. This paper describes the result of actual observation and measurement onboard ship with controllable pitch propeller(CPP), so as to verify the first occurrence phenomenon of cavitation. The research suggests new type of controllable pitch propeller with improved CIS at the bolt as it started with bolt cavitation as result of observation. It's not found bolt cavitation on the CPP proposed in this paper, furthermore its CIS is increased approximately by 4.5 knots than the existing CPP. The result of the research can be used for development of low-noise CPP and improving performance of CIS.

Keywords: Controllable pitch propeller, Cavitation inception speed, Bolt cavitation, Vibration and noise

1. 서론

최근 선박이 대형화, 고속화 되면서 소음문제에 대한 관심도 점차 높아지고 있다. 추진기에서 캐비테이션이 발생되면 추진 효율의 저하와 함께 진동과 소음이 발생한다. 추진기에서 캐비테이션이 처음으로 발생하는 속도를 캐비테이션 초생속도(cavitation inception speed, CIS)라 하며, 추진기 소음은 CIS 이후부터 크게 증가하게 된다[1]-[3]. Figure 1은 추진기에서 CIS 이후의 소음수준 변화이다. 수중으로 방사되는 소음은 상대방에게 자신의 위치를 노출시키게 되므로 함정의 경우 생존성에 치명적일뿐만 아니라 음탐기 등 수중장비 운용에도 많은 지장을 초래할 수 있다. 따라서 함정에서는 추진기의 CIS를 높이는 것이 매우 중요하다. CIS를 높이기 위해서는 추진기에서 캐비테이션이 발생하

는 현상과 위치를 정확하게 식별해야 한다.

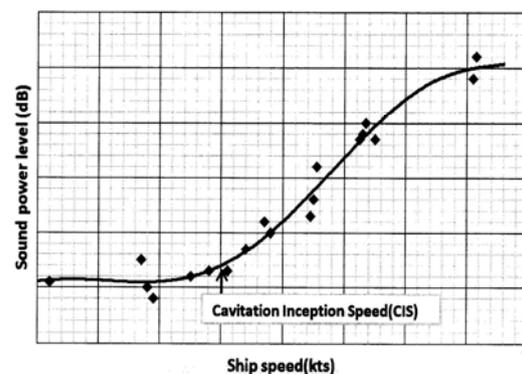


Figure 1: Variation of sound power level after CIS [4].

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4657-7265>): 2nd Busan Team, Defense Agency for Technology and Quality, 1000, Bangeojinsunwhando-ro, Dong-gu, Ulsan, 682-792, Korean, Email : ysulim@naver.com, Tel 052-202-0981

² 2nd Busan Team, Defense Agency for Technology and Quality, E-mail: jkj@dtaq.re.kr, Tel: 052-202-0068

³ Defense Acquisition Program Administration E-mail: yjgal@hanmail.net, Tel: 02-2079-5563

본 연구에서는 함정용 추진기로 많이 사용되는 가변피치 프로펠러(controllable pitch propeller, CPP)(이하 ‘가변추진기’)에서 캐비테이션이 발생하는 현상을 직접 관찰하기 위하여 함정에서 처음으로 캐비테이션 실선관측을 수행하였다. 또한 실선관측 결과를 바탕으로 가변추진기의 캐비테이션 발생을 줄이고 CIS 높이기 위한 방안을 제시하였다.

2. 추진기의 캐비테이션과 소음

2.1 캐비테이션

캐비테이션은 수중에서 고속으로 움직이는 물체 주위의 압력이 증기압 이하로 떨어져서 액체가 기체로 바뀌는 현상이다. 추진기에서 캐비테이션 발생과 관련된 변수로 압력계수(C_p)와 캐비테이션 수(σ_R)는 식 (1), (2)와 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{P_v - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_R^2} \quad (1)$$

$$\sigma_R = \frac{P_\infty - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_R^2} \quad (2)$$

여기서, P_v 는 기준점에서 유체정압, P_∞ 는 증기압 ρ 는 유체밀도, V_R 은 기준속도이다. 추진기 표면에서의 압력분포가 캐비테이션 수 보다 크면 캐비테이션이 발생하므로 이를 표현하면 식 (3)과 같이 된다.

$$-C_p > \sigma_R \quad (3)$$

캐비테이션은 발생 위치, 형태 등에 따라 여러 가지로 분류할 수 있으며, 추진기에서 캐비테이션 초기발생은 대부분 날개 끝에서 발생하는 보오텍스(vortex) 캐비테이션으로 알려져 있다[5].

2.2 소음

캐비테이션에 의해 발생하는 소음은 필연적으로 수중방사소음(underwater radiated noise, URN)을 유발하게 된다. 수중에서 소음수준의 차이에 따른 음파 전달거리의 변화를 관계식으로 살펴보면 다음과 같다.

- 음파 전달 손실량(transmission loss, TL)

$$TL = n \log\left(\frac{R}{R_0}\right) + \alpha R \quad (4)$$

여기서, n 은 확산손실로 “ $10 \leq n \leq 20$ ” 범위에 존재, R 은 임의거리, R_0 는 기준거리(1m), α 는 손실계수이다.

- 소나방정식

$$SE = SL - TL - AN + AG - RD \quad (5)$$

여기서, SE 는 신호초과비, SL 은 소음원 레벨, AN 은 주변 소음, AG 은 신호이득, RD 은 방향성 신호를 나타낸다.

식 (4), (5)로부터 소음수준과 음파 전달거리의 변화에 따른 비율 관계식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{R}{R_0} = 10^{(SL_2 - SL_1)/n} \quad (6)$$

여기서, SL_1 은 기준소음 레벨, SL_2 는 변화된 소음레벨이다.

Table 1은 추진기에서 CIS 이후에 CIS 변화량에 따른 소음수준 감소량과 피탐거리 변화율을 보여준다. Table 1에 따르면 CIS가 1 노트 증가할 때 마다 소음수준은 2 dB 비율로 감소하는 것을 알 수 있다. 만일 어떤 기준에서 CIS가 3 노트 증가되면 소음수준은 6 dB 정도 감소효과가 있으며, 피탐거리는 기존 피탐거리에 비하여 60 % 정도 감소하게 될 것이다.

Table 1: Variation of avoided detection distance, sound power level according to CIS [4].

Variation of CIS (increase)	0 knot (basic)	0.5 knots	1.0 knot	1.5 knots	2.0 knots	2.5 knots	3.0 knots
Variation of sound power level (decrease)	0 dB (basic)	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	5 dB	6 dB
Variation of avoid detection distance	100 % (basic)	85 %	74 %	63 %	54 %	47 %	40 %

3. 가변추진기의 캐비테이션 실선 관측

추진기는 설계단계에서 모형시험을 통하여 실선에서의 캐비테이션 발생 가능성과 CIS를 예측한다. 모형시험에서 예측된 캐비테이션 현상은 대부분 실선에서 그대로 나타난다고 볼 수 있다[6]. 그러나 캐비테이션 터널에서 모형시험의 부정확성과 실 해역에서 운용되는 여러 가지 불확실한 요소로 인해 모형시험을 통해 예측된 CIS가 실선에서는 만족되지 못하는 경우가 있다[2]. 실선에서는 수중청음기를 사용하여 수중방사소음을 측정한 후 여러 해석방법을 통해 캐비테이션 발생 여부는 판단할 수 있으나, 캐비테이션의 종류와 위치는 식별하지 못하고 있다[2].

3.1 캐비테이션 실선 관측시스템

3.1.1 가변추진기 사양

Figure 2의 (a)처럼 가변추진기는 고정피치프로펠러(fixed pitch propeller, FPP)와 다르게 블레이드가 허브에 볼트로

고정되어 있으며, 유압장치로 피치를 자유자재로 조절할 수 있다. 그러므로 가변추진기는 축을 역회전 시키지 않고도 선박을 전·후진으로 조종이 가능하여 신속한 기동성이 요구되는 고속함정에 많이 쓰이고 있다. 본 캐비테이션 실선관측에 사용된 가변추진기의 개략적인 제원은 Table 2와 같으며 형상은 Figure 2와 같다.

Table 2: Specification of CPP

Item	Specification
Number of blades	5
Diameter of propeller	4,200 mm
Hub-diameter ratio	0.286
Expanded area ratio	0.765

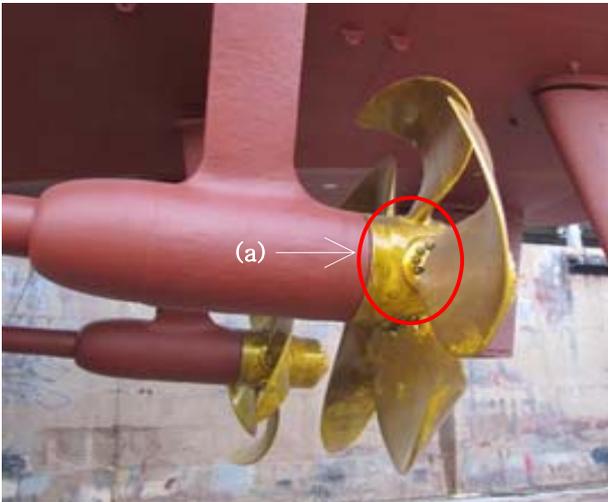


Figure 2: Configuration of CPP

3.1.2 캐비테이션 실선관측 방법

가변추진기의 캐비테이션 실선관측 방법은 스트로보스코프(stroboscope) 방법을 사용하였다. 이러한 방법은 캐비테이션 관측 장비를 선체 내부에 설치하므로 장비 설치가 용이하고 선체 외부에는 설치되는 장비가 없기 때문에 관측 시에 계측장비에 의한 물리적인 간섭이 전혀 없다는 장점이 있다[1]. 스트로보스코프 방법의 기본 개념은 Figure 3과 같다.

캐비테이션을 관측하기 위한 관측장은 선박의 좌우현에 설치하는 것이 바람직하나 시간과 비용측면을 고려하여 우현 측에만 설치하였다. 실선관측 장소는 동해남부해역에서 실시하였으며 파고는 1.0~2.0 m 였다. 선박의 속도는 저속에서 최대속도까지 일정한 간격으로 변화시켜 가면서 관측하였으며, 캐비테이션 발생 현상은 2대의 CCD 카메라를 사용하여 촬영하였다.

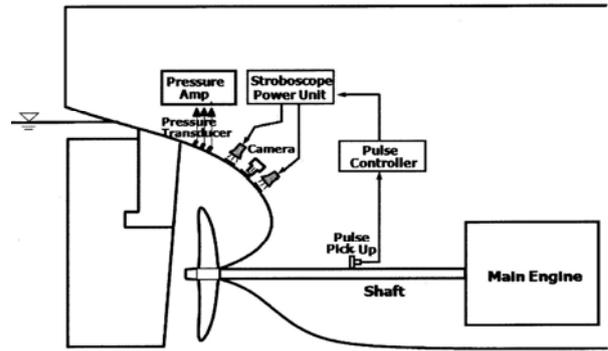


Figure 3: Basic concepts of stroboscope method

3.2 가변추진기의 캐비테이션 실선관측 결과

관측 결과 가변추진기에서 최초로 발생한 캐비테이션은 볼트 캐비테이션(bolt cavitation)으로 확인되었다. 볼트 캐비테이션은 블레이드 압력면의 제일 앞쪽 고정 볼트 헤드 부위에서 발생되었으며, CIS는 모형시험에서 예측된 값보다 낮은 약 14 노트로 관측되었다. Figure 4의 (a)는 가변추진기의 압력면에서 볼트 캐비테이션이 처음으로 발생하는 현상을 촬영한 사진이다. 캐비테이션은 짧은 순간에 생성, 성장, 수축, 붕괴 과정을 반복[7]하기 때문에 정지된 사진으로는 관독에 어려움이 있어 더 높은 함속도에서 촬영한 사진을 함께 나타내었다.

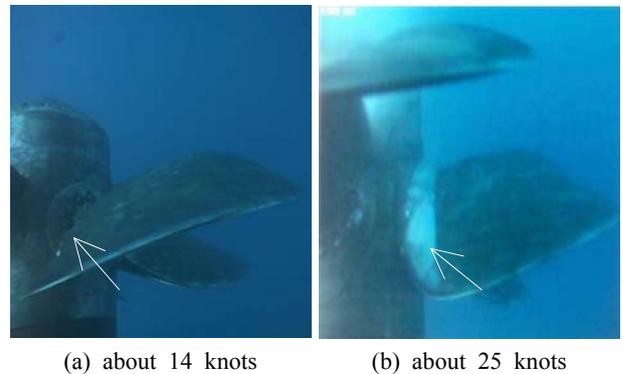


Figure 4: Bolt cavitation inception speed on the pressure side

가변추진기에서 볼트 캐비테이션이 발생하는 원인은 볼트 헤드가 유동장으로 돌출되어 있기 때문이다. 볼트 헤드는 정 6각형으로 날카로운 모서리가 많아 표면에서 압력저하에 의해 발생하는 다른 캐비테이션 보다 격렬하게 발생할 가능성이 높다. 그러나 모형시험에서 볼트와 캐비테이션 발생과의 연관성을 확인하지 못한 것은 가변추진기 모형의 크기가 작아 볼트 형상을 모형에 반영하지 못하였기 때문으로 판단된다.

4. 가변추진기의 CIS 성능 개선

4.1 가변추진기 개선안

가변추진기에서 캐비테이션의 발생을 줄이고 CIS를 높이기 위하여 **Figure 2**의 (a)부위의 블레이드 고정 볼트 형상을 개선하였다. **Figure 5**의 (a), (b)는 개선 전 가변추진기와 개선 후 가변추진기의 블레이드 고정 볼트 부위의 형상이다. 개선 전 가변추진기는 고정 볼트 헤드가 블레이드 플랜지 표면으로 돌출된 형태이며, 개선 후 가변추진기는 고정 볼트 헤드를 표면에 돌출되지 않도록 매립형으로 설계하고 표면은 매끈하게 유선형으로 처리하였다.

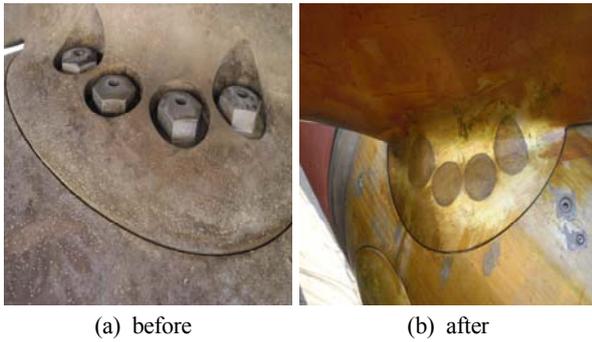


Figure 5: Configuration of blade bolt(before and after improvement)

4.2 개선된 가변추진기의 캐비테이션 실선 관측 결과

개선된 가변추진기에 대한 캐비테이션 실선관측 절차와 방법은 기존 관측 방법과 동일하게 수행하였다. 관측 결과 개선된 가변추진기에서 캐비테이션 초기발생은 압력면의 날개뿌리 앞날 부위에서 발생되었으며, CIS는 모형시험에서 예측된 값에 근사한 약 18.5 노트로 확인되었다.

Figure 6의 (a)는 개선된 가변추진기의 압력면 날개뿌리 앞날 부위에서 캐비테이션이 처음으로 발생하는 현상을 촬영한 것이며, 캐비테이션 현상을 좀 더 쉽게 관측하기 위하

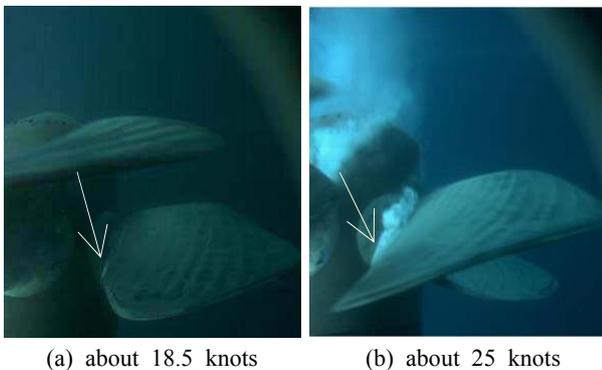


Figure 6: Cavitation inception speed on the pressure side leading edge

여 더 높은 함속도에서 촬영한 사진을 함께 나타내었다.

개선된 가변추진기는 볼트 헤드를 표면에 돌출되지 않게 설계하고 표면은 매끄럽게 유선형으로 처리하였기 때문에 어느 운항속도에서도 볼트 캐비테이션은 관측되지 않았다.

4.3 결과 고찰

실선관측 결과 가변추진기에서 캐비테이션 초기발생은 압력면의 블레이드 고정 볼트 헤드 부위에서 발생하는 볼트 캐비테이션이라는 사실을 확인하였다. 그러나 볼트 부위의 형상을 개선한 가변추진기에서 캐비테이션 초기발생은 압력면의 날개뿌리 앞날 부위에서 처음으로 관측 되었으며, 볼트 캐비테이션은 전혀 발생되지 않았다. **Table 3**은 개선 전 가변추진기와 개선 후 가변추진기에 대한 캐비테이션 실선관측 결과를 정리한 것이다.

Table 3: Result of observation in the actual warship (before and after improvement)

knots	Before improvement		After improvement	
	Pressure side blade	Pressure side bolt	Pressure side blade	Pressure side bolt
25	○	○	○	×
20	○	○	○	×
19	○	○	○	×
18.5	×	○	○	×
18	×	○	×	×
17	×	○	×	×
16	×	○	×	×
15	×	○	×	×
14	×	○	×	×
13	×	×	×	×

× : No cavitation ○ : Cavitation

개선된 가변추진기의 CIS는 18.5 노트로 개선 전 가변추진기의 CIS 14 노트 보다 약 4.5 노트 더 높게 관측되어 약 32 % 성능이 향상된 것을 확인하였다. 이러한 결과는 가변추진기 상방 선체에 부착한 Hydrophone 센서 신호에서 분석된 소음수준과 수중방사소음 측정결과 음향신호와 비교 검증을 수행하여 상호 일치성을 확인하였다. 또한 CIS 성능 향상에 따른 소음수준은 **Table 1**에 따라 약 9 dB 감소효과가 예상되며, 소음수준 감소에 따른 음파 전달거리는 식 (6)에 따라 약 75 % 감소될 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구는 가변추진기에서 캐비테이션 초기발생 현상을 확인하기 위하여 함정에서 처음으로 캐비테이션 실선관측을 수행하였다. 관측 결과 캐비테이션 초기발생은 볼트 캐비테이션으로 확인되었으며, 볼트 부위의 형상을 매립형으

로 개선한 가변추진기에서는 볼트 캐비테이션이 전혀 발생되지 않았다. 개선된 가변추진기의 CIS는 개선 전 보다 약 4.5 노트 높게 관측되어 약 32 % 성능이 향상 되었으며, 이에 따라 소음수준 감소효과와 함께 피탐거리가 개선 전 보다 약 75 % 감소될 것으로 기대된다.

본 연구 결과는 저소음 가변추진기 개발과 CIS 성능 향상에 많은 기대와 시사점을 던져 주고 있으며, 향후 신조함 건조 시 캐비테이션 실선관측 시험은 지속적으로 실시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 방위사업청이 지원한 000 가변추진기 실선 캐비테이션 관측시험 기술용역 결과의 일부이다.

References

- [1] Y. I. Jeon, S. I. Park, W. C. Seok, and J. C. Seo, "A study on the observation method of propeller cavitation," Proceeding of the annual autumn meeting, The society of naval architects of Korea, Mokpo, pp. 388-393, 2011 (in Korean).
- [2] P. H. Lee, B. K. Ahn, C. S. Lee, and J. H. Lee, "An experimental study on noise characteristics of propeller cavitation inception," Journal of the society of naval architects of Korea, vol. 48, no. 1, pp. 1-7, 2011.
- [3] C. S. Lee, J. C. Seo, B. S. Hyeon, M. C. Kim, S. B. Seo, and I. S. Mun, "Marine propulsion and propeller design," Seoul, Korea : Munundang, pp. 237-239, 2012 (in Korean).
- [4] K. S. Kim, "Naval ship propeller cavitation occurrence characteristics and cavitation functional qualification test performed by MOERI LCT," Proceeding of the 16th Naval Ship Technology & Weapon System Seminar, p. 195, 2013.
- [5] I. H. Song, J. W. Ahn, K. S. Kim, and I. S. Moon, "Characteristics of cavitation noise on high speed propellers," Journal of the society of naval architects of Korea, vol. 37, no. 2, p. 25, 2000.
- [6] Y. S. Na, "A study on the improvement of cavitation inception speed for naval propellers," Ph.D. Dissertation, Department of naval architecture and ocean engineering, Chungnam National University, Korea, pp. 58-62, 2005.
- [7] J. T. Lee, "Performance analysis method of propeller cavitation," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 31, no. 4, pp. 11-12, 1994 (in Korean).