

고속 프로펠러의 형상변화에 따른 캐비테이션 및 소음 특성

안종우*, 박영하*, 문일성*, 김기섭*

Cavitation and Noise Characteristics of High-Speed Propellers with Geometric Variations

Jong-Woo Ahn*, Young-Ha Park*, Il-Sung Moon* and Ki-Sup Kim*

요 약

고속 프로펠러들의 단면 및 기하학적 형상변화에 대한 캐비테이션 및 소음특성 연구가 새로운 실험장치를 이용하여 KRISO의 캐비테이션 터널에서 실험적으로 연구되었다. 대형 고속선용 프로펠러에 대한 날개단면, 부하분포 및 전개면적비 변화에 대한 일련의 캐비테이션 소음시험이 수행되었으며, 이런 실험결과로부터 캐비테이션 형태 및 프로펠러 형상에 대한 소음성능이 분석되었다. 새로운 실험장치를 이용하여 얻은 소음결과는 실선추정 및 고부하 저소음 추진기 설계에 유용한 자료로 활용될 수 있다.

*Keywords : Cavitation noise(캐비테이션 소음), High-speed propeller(고속프로펠러), Hydrophone Box(소음시험장치), SPL(음압수준)

Abstract

The cavitation noise of high-speed propellers was experimentally studied using new measurement device in KRISO cavitation tunnel. A series of cavitation noise tests were carried out for 6 propellers with various sections, loading distributions, and a different area ratio. From the experimental results, the noise characteristics for various cavitation patterns and the noise performance for a series of propellers were analyzed. These can be used for full-scale prediction study of the noise and optimum design of high-speed propellers.

접수일자: 2000년 8월 29일, 승인일자: 2001년 7월 19일

*정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 (E-mail: ajwprop@kriso.re.kr)

1. 서 언

선박 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션은 추진 효율의 저하와 함께 소음과 진동을 유발시키며, 특히 고속함정 프로펠러에서는 캐비테이션에 의하여 발생된 소음이 자기 위치를 노출하는 역할을 하기 때문에 캐비테이션 및 소음을 감소시키려는 연구는 꾸준히 계속되고 있다.

KRISO 캐비테이션 터널에서는 고속함정용 프로펠러에 대하여 캐비테이션 및 소음연구를 체계적으로 수행한 바 있다(송인행 등 2000-A). 그러나, 이때의 실험장치가 유동장 및 구조적 진동의 영향을 그대로 받을 수 있다는 문제가 발생되어 실험장치의 개선이 요구되었다. 따라서, 본 연구에서는 소음 측정 성능이 개선된 새로운 실험장치인 Hydrophone Box를 이용하여 모형 프로펠러 캐비테이션 소음을 측정하였으며, 실선 추정에 가능성이 있는 결과를 얻을 수 있었다(안종우 등 2000-A).

캐비테이션의 발생 및 소음특성에 영향을 미치는 주요 형상요소는 흔히 2차원 날개단면, 반경방향별 부하분포, 코오드 방향 부하분포 또는 면적비 등이 알려져 있다(Stanier 1992, 1995). 따라서, 본 연구에서는 고속 함정용 프로펠러의 소음연구를 위하여 기준 프로펠러를 결정하고, 2차원 날개단면 연구에서 도출된 날개단면 2 종을 프로펠러에 적용하여 캐비테이션 및 소음 특성의 변화에 관한 연구를 수행하였다. 또한 기준 프로펠러에 대하여 전개면적비의 변화 1개 그리고 하중분포의 변화 2개를 변화시켜 캐비테이션의 초생 및 발생 특성 그리고 소음에 대한 영향에 대하여 실험적으로 연구하였다. 이러한 체계적인 기하학적 변화에 대한 실험적 연구는 장치 고부하 저소음 추진기의 최적설계에 유용한 자료로 사용될 것이다.

선박 프로펠러 및 수중익(hydrofoil) 등에서 발생하는 캐비테이션은 추진 효율의 저하와 함께 소음과 진동을 유발시킨다. 특히 캐비테이션에 의하여 발생한 소음은 높은 난류강도를 갖는 유동 소음에 비해 그 수준이 매우 높기 때문에 전함의 경우 상대방에게 탐지되어 그 위치가 노출되는 위험을 초래한다. 따라서 추진 시스템이나 수중익

및 부가물 등의 설계에는 캐비테이션에 의하여 발생하는 소음을 최소화하여야 한다.

2. 고속 프로펠러 시리즈의 설계

캐비테이션 및 소음시험을 수행하기 위하여 고속 및 고부하 특성이 고려될 수 있도록 기준프로펠러를 KP480을 중심으로(Fig.1 참조) 날개단면 변화 3 종, 반경방향 부하분포의 변화 1 종 그리고 코오드 방향 부하분포의 변화 1 종 등 총 5개의 프로펠러 시리즈를 설계한 바 있으며(송인행 등 2000-A), 본 연구에서는 날개단면 변화 1 종, 면적비 변화 1종 등 2개의 프로펠러를 추가 설계하였다. 날개단면 변화는 기준 날개 단면인 KH54에서 받음각이 클 경우 캐비테이션이 상대적으로 두껍게 발생함에 따라 개선이 요구되었다. 따라서, 새로이 설계된 단면인 KH58을 이용하여 프로펠러를 제작하였다(송인행 등 2000-B, 안종우 등 2000-B). 면적비 변화는 기준 프로펠러인 KP480 보다 약간 감소된 면적비 1.0의 프로펠러를 설계하였다.

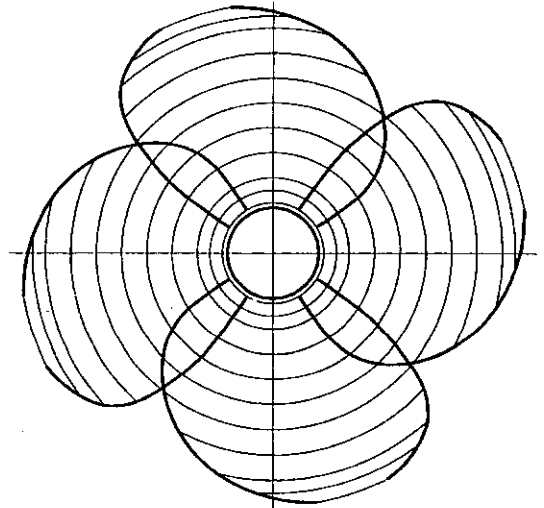


Fig.1 Projected view of the design propeller

본 연구에서는 앞 연구결과(송인행 등 2000-A)와 비교하여 실험장치 및 방법의 변화가 있었다. 따라서 캐비테이션 소음 연구를 위하여

선정한 프로펠러는 송인행 등(2000-A)에서 설계·제작된 5개 프로펠러 중에 KP481을 제외한 4개의 프로펠러와 본 연구에서 설계된 2개의 프로펠러로 총 6개이다. 캐비테이션 소음시험에 사용한 프로펠러의 주요제원은 Table 1에 보였으며, 프로펠러 허브비는 0.2, 프로펠러 직경은 0.19149m 이다. 표에서 보듯이 기존 프로펠러의 부하분포는 날개끝의 부하를 감소시킨 형태를 택하였으며, KH54 단면을 사용하였다.

송인행 등(2000-B)의 연구에서 나타났듯이 KH53(KP482)은 대형 함정인 노브로시스크호 추진기에 사용된 단면이다. KH53의 경우 얇은막(sheet) 캐비테이션의 발생특성은 좋았으나, 작은 받음각에서 기포(Bubble) 캐비테이션이 발생하는 단점을 갖고 있다. KH54(KP480)의 경우 전반적인 소음특성이 좋은 편이지만 높은 받음각에서 얇은막 캐비테이션이 두꺼워지는 단점을 가지고 있다. 송인행 등(2000-B)의 연구에서 CH58로 표현되었던 KH58(KP520)은 KH53과 KH54에서 나타났던 단점들을 보완하기 위하여 캐비테이션 발생두께를 KH53과 비슷하게 유지하면서 기포 캐비테이션이 억제되도록 설계된 단면이다. 이들 단면 변화의 성능을 연구하기 위하여 프로펠러에서는 단면을 제외한 다른 기하형상은 KP480과 동일하게 유지하였다.

Table 1 Basic geometric data

	No of Blade	A_E/A_C	P_M/D	$P_{0.95R}/P_M$	Section
KP480	4	1.15	1.300	0.834	KH54
KP482	"	"	1.300	0.834	KH53
KP483	"	"	1.280	1.0	KH54
KP484	"	"	1.268	0.830	KH54
KP520	"	"	1.300	0.834	KH58
KP523	"	1.00	1.300	0.834	KH54

또한 프로펠러의 부하분포의 변화에 대한 프로펠러의 성능을 새로운 실험장치에서 조사하기 위하여 Fig.2와 Fig.3에 나타난 것과 같이 일정피치를 사용하여 날개끝 하중이 증가하는 프로펠러(KP483)와 KP480에 비하여 전반적으로 피치를

감소시키고 캠버를 15% 증가시킨 KP484 프로펠러도 본 연구에서 포함시켰다. 그리고, 전개면적비의 영향을 보기 위하여 피치, 캠버, 코오드분포, 단면형상 등을 KP480과 동일하게 유지시키면서 전개면적비(A_E/A_0)를 1.0으로 감소시킨 KP523 프로펠러도 설계하였다. 이들 프로펠러들은 양력면 이론에 의하여 추정된 설계 전진비에서의 추력이 동일하도록 하였다. 최대 스큐는 캐비테이션 초생 및 캐비테이션의 거동 측면에서 유리하도록 18.3° 로 선정하였다.

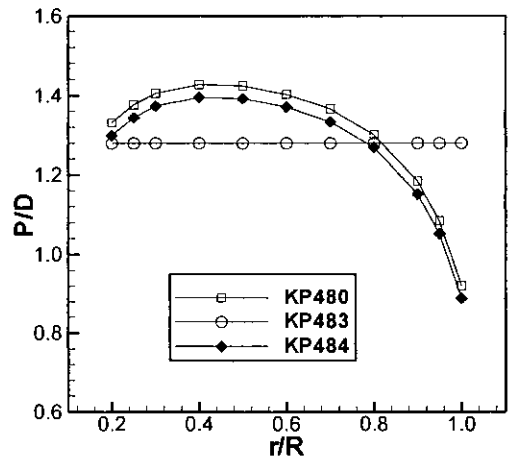


Fig.2 Pitch distribution

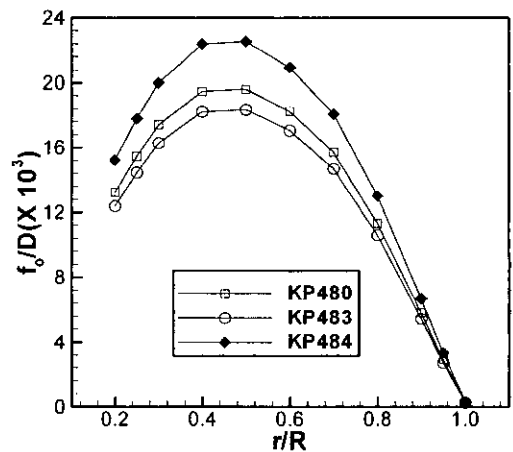


Fig.3 Camber distribution

Table 2 Predicted condition for noise test

Propeller	V_s	22 kts	28 kts	30 kts	32 kts
KP480 (standard KH54)	K_T	0.2465	0.2722	0.2923	0.3013
	η_o	0.647	0.626	0.607	0.599
	$\sigma_{n0.7R}$	2.181	1.217	0.950	0.790
KP482 (KH53)	K_T	0.2409	0.2668	0.2872	0.2963
	η_o	0.639	0.620	0.603	0.595
	$\sigma_{n0.7R}$	2.126	1.190	0.9315	0.7755
KP483 (Const. Pitch)	K_T	0.2387	0.2656	0.2867	0.2961
	η_o	0.676	0.653	0.633	0.624
	$\sigma_{n0.7R}$	2.185	1.218	0.950	0.789
KP484 (Pitch reduced)	K_T	0.2470	0.2724	0.2922	0.3011
	η_o	0.650	0.629	0.610	0.602
	$\sigma_{n0.7R}$	2.185	1.218	0.950	0.789
KP520 (KH58)	K_T	0.2445	0.2698	0.2897	0.2986
	η_o	0.648	0.626	0.608	0.599
	$\sigma_{n0.7R}$	2.165	1.207	0.941	0.7825
KP523 (A_E/A_o = 1.00)	K_T	0.2456	0.2708	0.2903	0.2991
	η_o	0.662	0.638	0.618	0.609
	$\sigma_{n0.7R}$	2.181	1.213	0.945	0.785

3. 단독시험 및 운항상태 추정

상기 프로펠러 6 종에 대하여 KRISO의 예인수조에서 프로펠러 단독시험을 수행하였으며, Table 2에 나타난 시험 조건은 기존 프로펠러를 가지고 수행한 저항추진시험 결과(강국진 등 1998)를 사용하여 추정하였다. 여기서 K_T 는 추력계수이며, $\sigma_{n0.7R}$ 은 프로펠러 중심에서 상방 0.7R 위치에서의 캐비테이션 수이다. 예측된 프로펠러 단독성능은 양력면 이론에 의하여 추정된 단독특성과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 한편 일정피치를 갖는 KP483은 날개단면은 동일하나 피치를 감소시킨 KP480보다 설계 운항점(22 knots, 20% 해상여유 포함)에서 약 4.5% 단독효율(η_o)이 증가하였으며, KH53 단면을 사용한 KP482는 KP480에 비하여 단독효율(η_o)이 약 1.2% 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 설계된 KP520은 비슷한

단독효율(η_o)을 보여주었으며, 전개면적비가 감소된 KP523의 경우 2.3%의 단독효율(η_o)이 증가하는 것으로 나타났다. 나머지 프로펠러들은 거의 유사한 단독특성을 보이고 있다.

이렇게 추정된 각 시험조건에서 반류가 없는 프로펠러 단독상태(Open-Water)에서 캐비테이션 및 소음 특성시험이 수행되었다.

4. 실험장치 및 실험방법

고부하 프로펠러 시리즈의 캐비테이션 초생시험 및 관찰 그리고 소음계측은 KRISO의 캐비테이션 터널 제 1 계측부(600 mm×600mm)에서 수행되었다. 소음시험시 터널 내부의 수중의 공기 함유량은 앞 연구(송인행 등 2000-A)의 실험조건과 동일하게 45% 이하로 유지하였다.

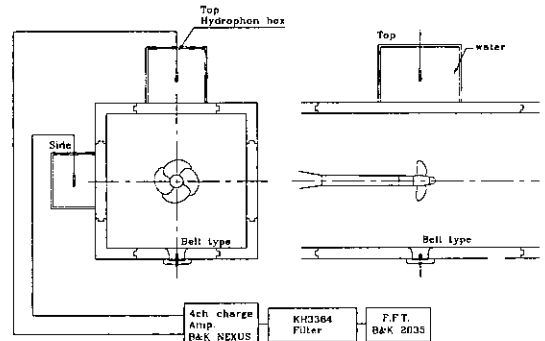


Fig.4 Experimental set-up

수중청음기(B&K Type 8103)의 설치방법은 앞 연구(송인행 등 2000-A)에서 사용한 바 있는 하부 관측창에 설치되어 있는 종형 축대청체(Bell Type) 형태를 지양하고 상부 관측창(Top)과 측면 관측창(Side)에 부착되어있는 Hydrophone Box들에 수중청음기를 설치하여 사용하였다(Fig.4 참조). 계측된 신호는 전하형(charge type) 증폭기에서 증폭되고, 이 신호성분중 500Hz 이하의 저주파수 성분을 KH3364 필터에서 제거되었다. 필터를 거친 신호는 2 channel을 100 kHz까지 분석할 수 있는 B&K사의 FFT 분석기(Type 3550)에서 1/3-octave band로 해석되었다. 본 연구에서의 실험은 2가지

방향에서 추진되었는데, 송인행 등(2000-A)의 연구와 같이 프로펠러 회전수를 40rps로 유지시키면서 터널 내부압력을 조절하여 캐비테이션 수를 조절하는 방법과 터널 내부압력을 일정하게 유지시키면서 프로펠러 회전수를 조절하여 캐비테이션 수를 조절하는 방법이다. 두가지 실험방법 모두 캐비테이션 거동에 대한 소음특성 변화를 일관성 있게 보여주었다. 본 연구에서는 후자의 실험방법이 실선의 추진방법과 비슷하다고 생각되기 때문에 후자의 결과만을 언급하려 한다.

5. 캐비테이션 소음 시험 결과

5.1 캐비테이션 초생특성

캐비테이션 초생은 대부분의 경우 날개면에 부착되지 않은 날개끝 보오텍스 캐비테이션이 먼저 발생하는 것이 관찰되었으나, 여기서는 날개면에서 캐비테이션이 발생하는 것을 기준으로 하였다.

Fig. 5에는 프로펠러 시리즈 6 중에 대한 캐비테이션 초생 특성이 비교되어있다. 단면변화에 대하여는 송인행 등(2000-A)의 연구와 같이 캐비테이션 초생특성에는 날개단면이 큰 영향을 미치지 못하고 있는 것으로 보인다. 그러나 부하분포의 변화는 캐비테이션 초생에 큰 영향을 미쳐, KP483에서는 날개끝 부분에 캐비테이션이 조기에 발생하고 있으며, KP484에서는 캐비테이션 초생이 상당히 지연되고 있음을 알 수 있다. 면적이 감소된 KP523에서는 전진계수(J_s) 0.8에서 1.0사이에 캐비테이션 발생하는 캐비테이션 수($\sigma_{n0.7R}$)가 약간 높아졌을 뿐 기준 프로펠러와 큰 차이는 보이지 않는다.

5.2 선속별 캐비테이션 소음특성

소음특성시험은 Fig.4에 나타난 것과 같이 터널 상부 관측창 및 측면 관측창 Hydrophone Box 모두에서 수행되었다. 실험장치에 따른 측정결과에는 약간의 차이가 있었지만, 벽면효과 수정 후에 거의 동일한 결과를 보여주므로(안중우 등 2000-A), 본 논문에서는 측면 Hydrophone Box에서 측정된 결과에 벽면효과 수정을 수행

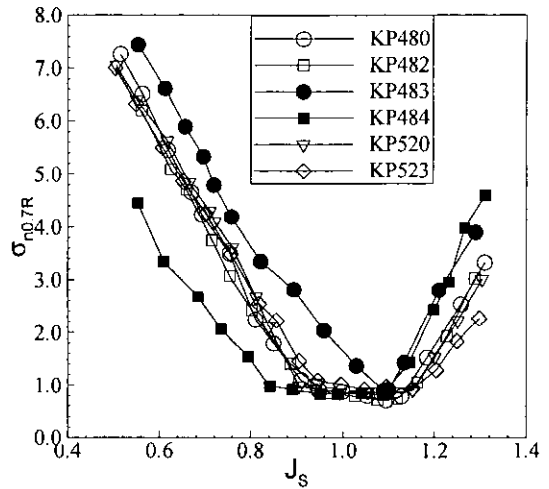


Fig.5 Comparison of cavitation inception

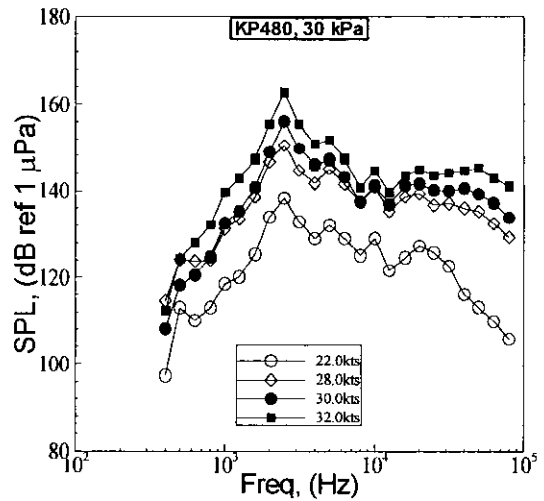


Fig.6 Sound pressure level(SPL) of KP480

한 결과에 대하여 고찰하고자 한다.

기준 프로펠러인 KP480에 대한 선속별 소음수준은 Fig.6에 보여진다. 캐비테이션 수의 변화와 함께 측정된 소음수준은 1/3-octave band 스펙트럼의 음압 형태로 그 차이를 보여준다. 수직축은 기준 음압(P_{ref})이 $1\mu Pa$ 인 1/3-octave band 음압수준(SPL: Sound Pressure Level)을 나타내며, 수평축은 1/3-octave band의 중심주파수를 나타낸다. 주파수에 따른 스펙트럼 형태는

일반적으로 캐비테이션이 발생한 프로펠러의 소음 스펙트럼과 비슷한 형태로 나타나 소음의 실선성능 추정이 가능하리라 생각된다(안종우 등 2000-A). 실험 방법은 터널 내부 압력을 30kPa로 유지시키면서 프로펠러 회전수를 변화시켜 캐비테이션 수(선속)를 조절하는 방식으로 실험을 수행하였다. 선속이 증가하면서 소음수준이 전 주파수에 걸쳐 점차 상승하는 것을 알 수 있다. 32.0 kts에서는 캐비테이션 두께가 두꺼워지면서 2.5kHz를 중심으로 평균 5dB 정도의 소음증가를 볼 수 있다. 고주파 쪽에서는 날개면에 발생한 얇은막(Sheet) 캐비테이션이 다른 형태의 캐비테이션으로 발전하지 않아 소음수준이 크게 증가되지 않는다.

5.3 날개단면, 부하분포 및 면적비의 영향

프로펠러에서 날개단면의 변화는 KP480, KP482 및 KP520에서 볼 수 있으며, 캐비테이션이 발생하지 않는 상태인 22.0kts에서는 소음에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 캐비테이션이 발생하는 30.0kts에서 KP482의 경우 기포 캐비테이션이 발생되어 소음수준이 약 5~15dB 상승하고 있다. KP520은 30.0kts에서 KP480에 비하여 10kHz를 중심으로 소음성능이 약간 향상되지만(Fig.7, Fig.10 참조), 32.0kts에서 기포 캐비테이션이 발생되어 10kHz 이상의 고주파대에서 소음수준이 10dB이상 증가되었다.

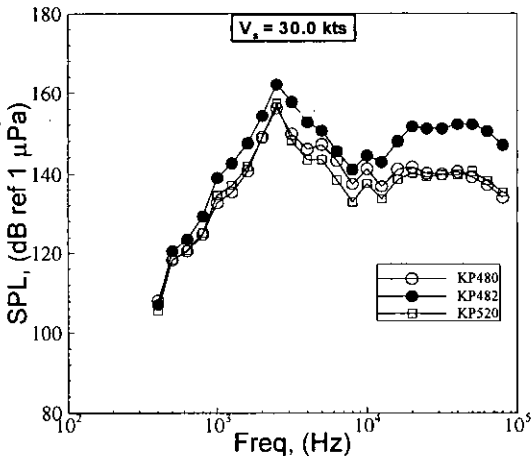


Fig.7 SPL of the propellers with different blade section

프로펠러의 부하분포 및 면적비에 대한 소음특성은 22.0kts에서 KP483과 KP523을 제외하고는 거의 비슷한 소음성능을 보여준다(Fig.8 참조). KP483의 경우 날개면에 날개끝 보오텍스 캐비테이션이 발생됨에 따라 1.0kHz 미만의 저주파 영역에서 최대 15dB까지 소음이 증가된다. 날개면 적비가 감소된 KP523의 경우 다른 프로펠러와 같이 캐비테이션이 발생하지 않았지만 2.5kHz를 중심으로 약간의 소음이 증가되었다.

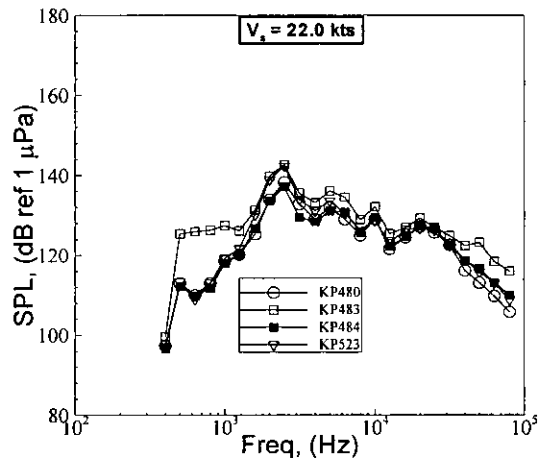


Fig.8 SPL of the propellers with different loading distribution and expanded area (Vs=22.0 kts)

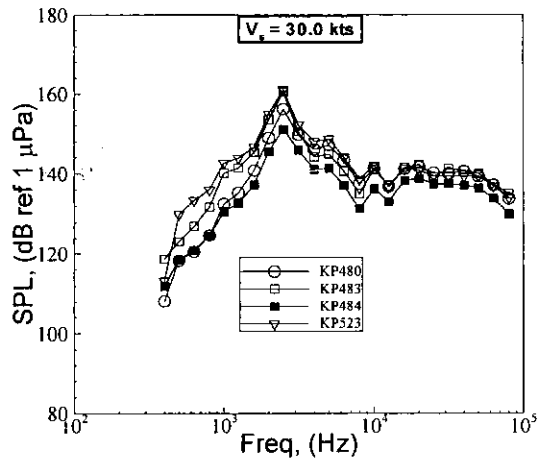


Fig.9 SPL of the propellers with different loading distribution and expanded area (Vs=30 kts)

Fig.9는 선속 30.0kts에서 부하분포 및 면적비에 대한 소음특성의 변화를 보여준다. 전반적으로 피치를 감소시킨 KP484는 전체적으로 기준 프로펠러인 KP480에 비하여 캐비테이션의 발생량 및 소음수준이 함께 감소하고 있는 것으로 나타났다. 날개끝 부분의 부하를 감소하지 않은 KP483에서는 캐비테이션 초생속도가 빨라짐에 따라 캐비테이션 발생 두께가 두꺼워져 날개끝 보오텍스 캐비테이션이 산란된 상태로 나타난다. KP523에서는 면적비가 감소됨에 따라 캐비테이션 발생 두께가 두꺼워져 날개끝 보오텍스 캐비테이션이 역시 산란된 상태로 나타난다. 그 외에 프로펠러들은 명확한 날개끝 보오텍스 캐비테이션이 발생된다(Fig.10 참조). 캐비테이션 발생두께가 두꺼워지는 KP483과 KP523의 경우 2.5kHz 미만의 저주파 영역에서 소음수준이 증가하는 것으로 나타났다. 고주파 영역에서는 기준 프로펠러인 KP480과 거의 차이가 나타나지 않는 것으로 나타났다. 이렇게 저주파수에서 소음이 증가하는 것은 두꺼워진 날개끝 보오텍스 캐비테이션이 산란되었기 때문으로 보인다. 이는 캐비테이션이 두꺼워지는 경우 선체에 작용하는 변동압력 수준이

증가하는 것으로 알려져 있는데, 저주파 영역에서 이와같은 현상이 잘 나타나고 있다.

6. 결론

새로운 실험장치인 Hydrophone Box를 이용하여 고부하 프로펠러 시리즈에 캐비테이션 소음 성능을 추정하여 보았다. 캐비테이션 초기발생 및 소음시험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 프로펠러에 발생한 기포 캐비테이션은 소음수준을 매우 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서, 저소음 프로펠러 설계시 기포 캐비테이션의 발생유무에 세심한 주의를 기울여야 할 것이다.
- 2) 캐비테이션의 발생두께가 두꺼워지는 KP483과 KP523의 경우 날개끝 보오텍스 캐비테이션이 산란되어 저주파에서 소음특성이 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) KP483의 경우 순항속도인 22kts에서도 캐비테이션이 발생되어 저주파에서 최대 15dB까지 증가되는 것으로 나타났다. 소음의 측면에서 날개끝 부하 감소가 매우 중요함을 알 수 있다.

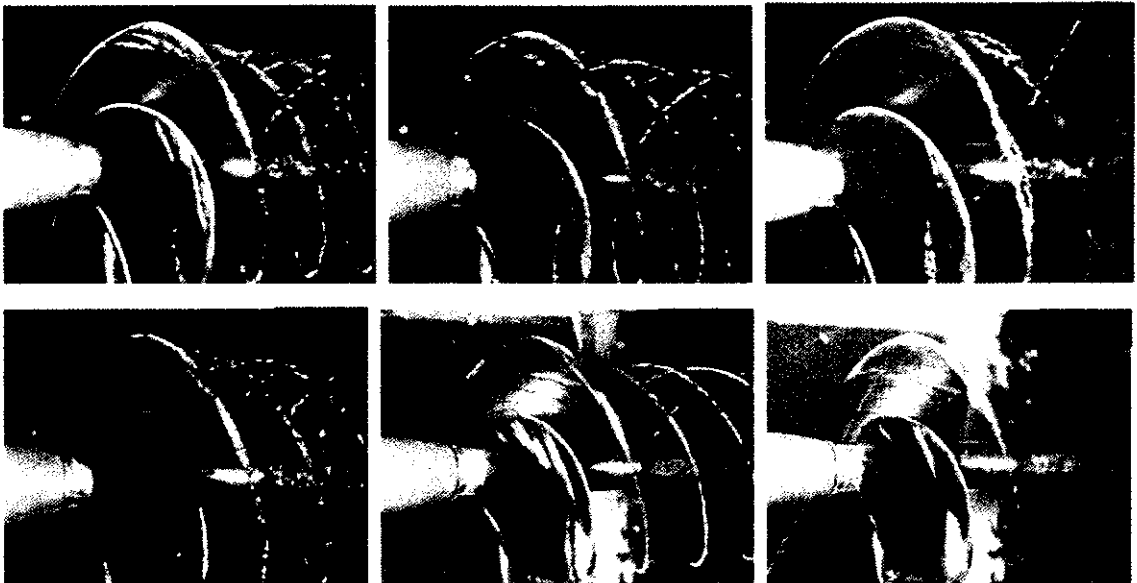


Fig.10 Cavitation pattern for the design propellers (Vs=30 kts)

- 4) 전반적으로 피치를 감소시키고 캠버를 증가시킨 KP484의 경우 캐비테이션 및 소음성능이 향상되었다. 따라서 저소음 프로펠러 설계시 KP484의 기하형상이 주의 깊게 고려되어야 할 것이다.
- 5) KH54 단면과 KH53 단면의 중간적인 성능을 갖는 KH58단면을 적용하여 캐비테이션 초생 성능 및 소음성능을 비교하여 본 결과 30kts 이하에서는 소음성능이 개선되었으나, 32kts 이상에서는 성능이 나빠졌다. 그 원인으로는 32kts에서 0.5~0.6R 부근에서 방울 (Bubble) 캐비테이션이 발생하였기 때문이며, 따라서 두께/코오드 비가 상대적으로 큰 반경에서는 KH54단면을 사용하면 캐비테이션 소음 특성이 개선될 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 '99년도 과학기술부에서 시행한 기관 공유사업 연구 결과의 일부이다.

참 고 문 헌

- 강국진 등, 1998 "대형 고속 화물선의 선형개발", 대한조선학회 '98 춘계 학술대회논문집.
- 송인행, 안종우, 김기섭, 문일성, 2000-A "고속 프로펠러의 캐비테이션 소음특성", 대한조선학회 논문집 제 37권 제 2호.
- 송인행, 안종우, 문일성, 김기섭, 2000-B "2차원 날개단면의 앞날 형상 변화에 따른 캐비테이션 특성 연구", 대한조선학회 논문집 제 37권 제 1호.
- 안종우, 김기섭, 이진태, 문일성, 2000-A "캐비테이션 터널에서의 수중청음기 설치 방법에 따른 유동소음 특성", 대한조선학회 '00 춘계 학술대회 논문집.
- 안종우, 송인행, 김기섭, 문일성, 김경열, 2000-B "2차원 날개단면들의 캐비테이션 소음 특성", 대한조선학회 논문집 제 37권 제 2호.

- Higuchi, H., Arndt, R. E., Rogers, M. F., 1989 "Characteristics of the Tip Vortex Cavitation Noise", J. of Fluids Engineering, Vol. 111.
- Oshima, A., Sasajima, T., Chiba, N., 1986 "Study on Propeller Tip Vortex Bursting and its Effect on Pressure Fluctuation on Ship Hull", Int'l Symposium on Cavitation, Sendai.
- Stanier, M. J., 1992 "Propeller Blade Sections with improved Cavitation Inception Speed", Proc. of the Institution of Mechanical Engineers - Cavitation.
- Stanier, M. J., 1995 "The Effect of Radial Circulation Distribution on Propeller Cavitation", PROPCAV '95.
- 笹島孝夫, 1982 "Measurements of propeller Noise in Cavitation Tunnel", 三菱重工技報, Vol. 19.



< 안 종 우 >



< 박 영 하 >



< 문 일 성 >



< 김 기 섭 >