

고속 프로펠러의 캐비테이션 소음 특성

송인행*, 안종우*, 김기섭*, 문일성*

Characteristics of Cavitation Noise on High-Speed Propellers

by

I.-H. Song*, J.-W. Ahn*, K.-S. Kim* and I.-S. Moon*

요 약

고속 프로펠러들의 캐비테이션 소음특성이 KRISO의 캐비테이션 터널에서 실험적으로 연구되었다. 대형 고속선용 프로펠러에 대한 날개단면 및 부하분포의 변화에 대한 일련의 캐비테이션 소음이 계측되었으며, 이런 실험결과로부터 캐비테이션 형태 및 프로펠러 형상에 대한 소음성능이 분석되었다. 이러한 결과는 소음특성이 중요한 고속함정의 추진기 설계에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

Abstract

The cavitation noise of high-speed propellers was experimentally studied in KRISO cavitation tunnel. In this paper, a series of cavitation noise tests were carried out for five propellers with various sections and loading distributions. From the experimental results, the noise characteristics of various cavitation pattern and the noise performance of the propellers were analyzed. These can be used for optimum design for high-speed propellers.

1. 서론

본 논문에서는 수중방사소음 특성이 중요한 고속 프로펠러에 대한 캐비테이션 소음특성을 실험적으로 연구하였으며, 특히 캐비테이션의 발생에

따른 수중소음의 변화에 대하여 체계적으로 조사하였다. 이를 위하여 고속 프로펠러의 형상변화에 대한 체계적인 설계, 모형제작 및 모형시험이 수행되었다.

캐비테이션의 발생 및 소음특성에 영향을 미치

접수일자: 1999년도 5월 25일, 재접수일자 : 1999년도 10월 1일

* 정회원, 한국해양연구소 선박해양공학부소

는 주요 형상요소는 흔히 2차원 날개단면, 반경방향별 부하분포, 코오드 방향 부하분포 등이 알려져 있으며[1, 2], 본 연구에서도 2차원 날개단면, 반경방향 부하분포 및 코오드 방향 부하분포의 변화 등 모두 5 종의 프로펠러가 설계되었다. 기준 프로펠러(KP480)의 단면은 개발단면인 KH54이며, 날개끝 부하를 감소시킨 반경방향 부하분포를 가지고 있다. 5 종의 고속 프로펠러 시리즈에 대한 캐비테이션 초기발생(이후 초생) 특성, 캐비테이션 발생 및 소음계측 시험이 당 연구소의 캐비테이션 터널에서 수행되었다. 시험 결과로부터 소음수준은 캐비테이션이 발생하면 크게 증가되며, 또한 캐비테이션의 발생모습에 따라 크게 차이가 있음을 알 수 있었다. 특히 날개단면에 따라서는 기포 캐비테이션이 발생하며 이 때 소음수준이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있었다. 또한 프로펠러의 부하분포는 캐비테이션 초생에 큰 영향을 미치며, 저소음 추진기의 설계에 유용하게 사용될 수 있는 것으로 나타났다.

2. 고속 프로펠러 시리즈의 설계

캐비테이션 및 소음시험을 수행하기 위하여 대상으로 대형 고속선[3]을 선정하였으며, 고속 및 고부하 특성이 고려될 수 있도록 날개단면 변화 3 종, 반경방향 부하분포 변화 1 종 그리고 코오드 방향 부하분포 변화 1 종 등 총 5 개의 프로펠러 시리즈를 설계하였다. 설계된 프로펠러의 주요제원은 Table 1에 보였으며, 프로펠러 허브비는 0.2, 프로펠러 직경은 0.19149 m이다. 표에서 보듯이 기준 프로펠러의 부하분포는 날개끝의 부하를 감소시킨 형태를 택하였으며, 날개단면은 KH54[4]를 사용하였다. 여기서 KH52는 기존 고속 프로펠러에 많이 사용되는 NACA16 + a=0.8 평균선 단면이며, KH53은 대형 함정인 노브로스스크호 추진기에 사용된 단면이다. 이들 단면변화의 성능을 연구하기 위하여 피치, 코오드 분포, 두께 등 다른 기하학적 형상은 KP480과 동일하게 유지하였다.

Table 1에서 P_M 은 평균피치, 그리고 D 는 프

Table 1 Geometric data of the propellers

	No of Blade	A_E/A_0	P_M/D	$P_{0.95R}/P_M$	Section
KP480	4	1.15	1.300	0.834	KH54
KP481	"	"	1.300	0.834	KH52
KP482	"	"	1.300	0.834	KH53
KP483	"	"	1.280	1.0	KH54
KP484	"	"	1.268	0.830	KH54

로펠러의 직경이다. 프로펠러의 부하분포의 변화에 대한 성능을 조사하기 위하여 일정피치를 사용한 프로펠러(KP483), 그리고 앞날 근처의 부하를 감소시키기 위하여 KH480에 비하여 캠버를 15% 증가시킨 KP484 프로펠러도 함께 설계되었다. 이들 프로펠러들은 양력면 이론에 의하여 추정된 설계전진비에서 추력이 동일하도록 하였다. Fig.1에는 기준 프로펠러인 KP480에 대한 투영도가 보여져 있다. 최대 스쿠는 캐비테이션 초생 및 캐비테이션의 거동 측면에서 유리하도록 18.3° 로 선정하였다.

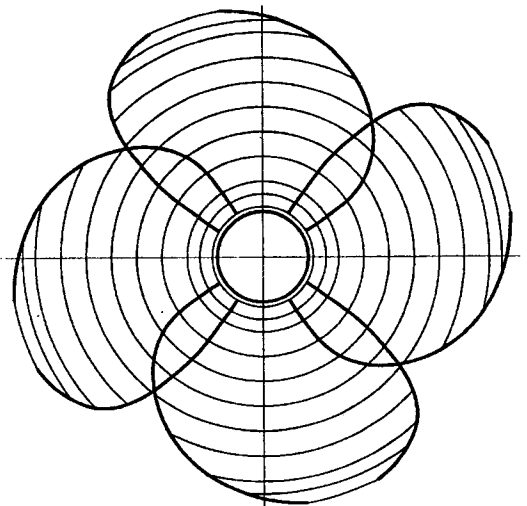


Fig.1 Projected view of the design propeller

3. 단독시험 및 운항상태 추정

상기 프로펠러 5종에 대하여 KRISO의 예인수

조에서 프로펠러 단독시험을 수행하였으며, Table 2에 나타난 시험 조건은 기존 프로펠러를 가지고 수행한 자항추진시험 결과[3]를 사용하여 추정하였다. 제측된 프로펠러 단독성능은 양력면 이론에 의하여 추정된 단독특성과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 한편 일정피치를 갖는 KP483은 날개단면은 동일하나 피치를 감소시킨 KP480 보다 설계 운항점(22 knots, 20% 해상여유 포함)에서 약4.5% 단독효율이 증가하였으며, KH53 단면을 사용한 KP482는 KP480에 비하여 단독효율이 약 1.2% 감소하는 것으로 나타났다.

이렇게 추정된 시험조건에서 캐비테이션 및 소음특성시험이 수행되었다. 한편 여기서는 황동망을 사용하는 반류중의 캐비테이션 시험을 지양하고 프로펠러 단독(open-water) 상태에서 수행되었다. 그 이유는 황동망의 반류는 고속 유동에서 높은 배경소음을 수반하기 때문이며, 황동망을 배제하고 모조선을 사용하여 반류를 재현하는 방법도 있으나, 이에 대해서는 다음 연구에서 수행할 예정이다. 따라서 본 연구에서는 상대적인 평가만을 목적으로 하였다.

Table 2 Predicted condition for noise test

Propeller	V_S	22	28	30	32
		knots	knots	knots	knots
KP480 (standa rd KH54)	K_T	0.2465	0.2722	0.2923	0.3013
	η_o	0.647	0.626	0.607	0.599
	$\sigma_{0.1R}$	2.181	1.217	0.950	0.790
KP481 (KH52)	K_T	0.2439	0.2695	0.2896	0.2987
	η_o	0.648	0.627	0.608	0.600
	$\sigma_{0.1R}$	2.157	1.205	0.941	0.783
KP482 (KH53)	K_T	0.2409	0.2668	0.2872	0.2963
	η_o	0.639	0.620	0.603	0.595
	$\sigma_{0.1R}$	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
	$\sigma_{0.1R}$	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
	$\sigma_{0.1R}$	2.185	1.218	0.950	0.789

4. 실험장치 및 실험방법

고부하 프로펠러 시리즈의 캐비테이션 초생시험 및 관찰 그리고 소음계측 실험은 선박해양공학연구소의 캐비테이션 터널 제 1 계측부(600 mm×600 mm)에서 수행되었다. 터널 내부의 실험시 수중의 공기 함유량은 45% 이하로 유지되었다. 보통 상선 프로펠러 실험시 양호한 모형선-실선 상관관계를 위하여 수중의 공기 함유량은 50~60% 정도로 유지하나, 이와 같이 높은 공기함유량은 갑압시 기포로 바뀔 수 있으며, 이러한 기포는 소음계측시 또 다른 배경소음원으로 작용하기 때문이다[5].

본 연구에서는 캐비테이션 및 소음특성을 평가하기 위하여 모형 프로펠러의 동력계는 J25를 사용하였으며, 수중청음기(B&K Type 8103)는 하부 관측창에 설치되어있는 중형 축대칭체 내부에 장착되었다(Fig.2 참조). 제측된 신호는 전하형(charge type) 증폭기에서 증폭되고, 이 신호성분중 500Hz 이하의 저주파수 성분을 KH3364 필터를 사용하여 제거하였다. 필터를 거친 신호는 100kHz까지 분석될 수 있는 B&K사의 FFT 분석기(Type 3550)에서 1/3-octave band로 해석이 수행되었다. 또한 KH3364 필터로부터 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310AM)로 신호선을 연결하여 시간 신호도 동시에 기록하였다. 한편 실험시 프로펠러 회전수는 동력계의 배경소음을 일관성 있게 유지하기 위하여 40rps로 고정되었다.

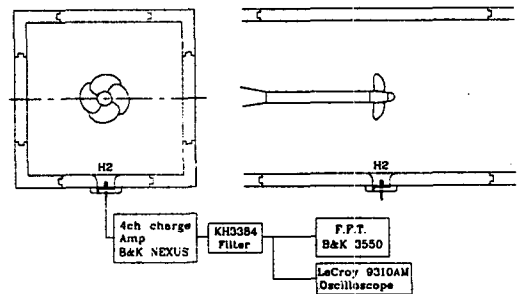


Fig.2 Experimental set-up

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. KP480 프로펠러에 대한 캐비테이션 초생시험 결과는 Fig.3에 보였으며, 프로펠러의 운항상태를 속도별(22, 24, 26, 28, 30 및 32 knots)로 표시하였다.

Fig.4에는 프로펠러 시리즈 5 종에 대한 캐비테이션 초생 특성이 비교되어있다. 단면변화에 대한 영향은 2차원 날개단면시험의 결과에서와는

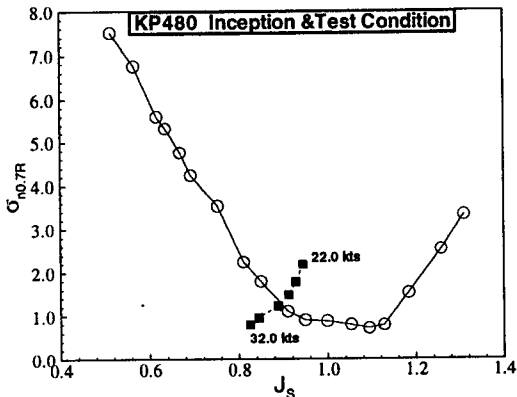


Fig.3 Operating point for the KP480 propeller

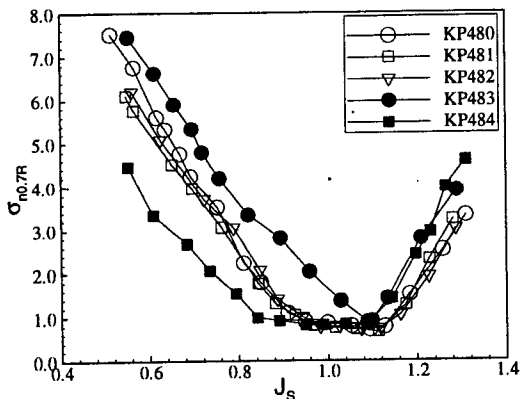


Fig.4 Comparison of cavitation inception

달리 3차원 효과, 날개끝 보오텍스 등의 영향으로 인하여 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, 앞날 부근의 부하를 감소시킨 KP484에서는 캐비테이션 초생이 상당히 지연되고 있음을 알 수 있다.

5.2 선속별 캐비테이션 소음특성

기준 프로펠러인 KP480에 대한 소음시험 결과는 Fig.5에 보였다.

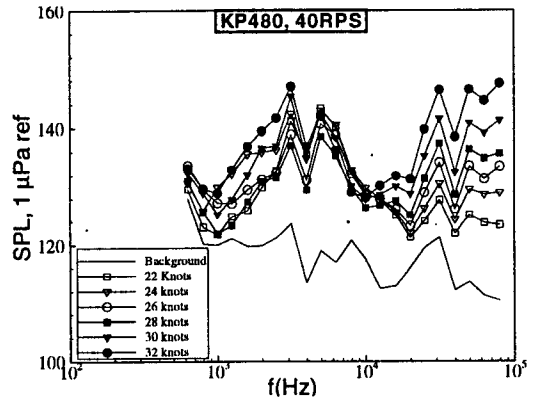


Fig.5 1/3-octave band spectra (KP480)

소음은 선속별로 정리되었으며, 프로펠러의 허브만이 회전하는 상태에서 측정된 동력계 배경소음은 심볼이 없는 실선으로 나타난다. 캐비테이션 시험 및 소음시험은 Fig.3에 나타난 6개의 시험 조건에서 수행되었다. 선속이 증가하면서 소음수준은 점차 상승하는 것을 알 수 있는데, 32 knots에서 최고수준을 유지하고 있다. 즉, 대체로 3 kHz 이하에서는 최대 약 10 dB, 그리고 특히 20 kHz 근처에서는 최대 약 20 dB 정도의 소음이 상승한다. 이의 가장 큰 원인은 캐비테이션 관찰 결과에서 날개끝 보오텍스 캐비테이션으로 파악되었다. 이러한 경향은 대체로 2차원날개 단면의 소음시험 결과와도 잘 일치한다(4). 한편 날개끝 보오텍스 캐비테이션은 초생상태(24 knots에 해당)에서는

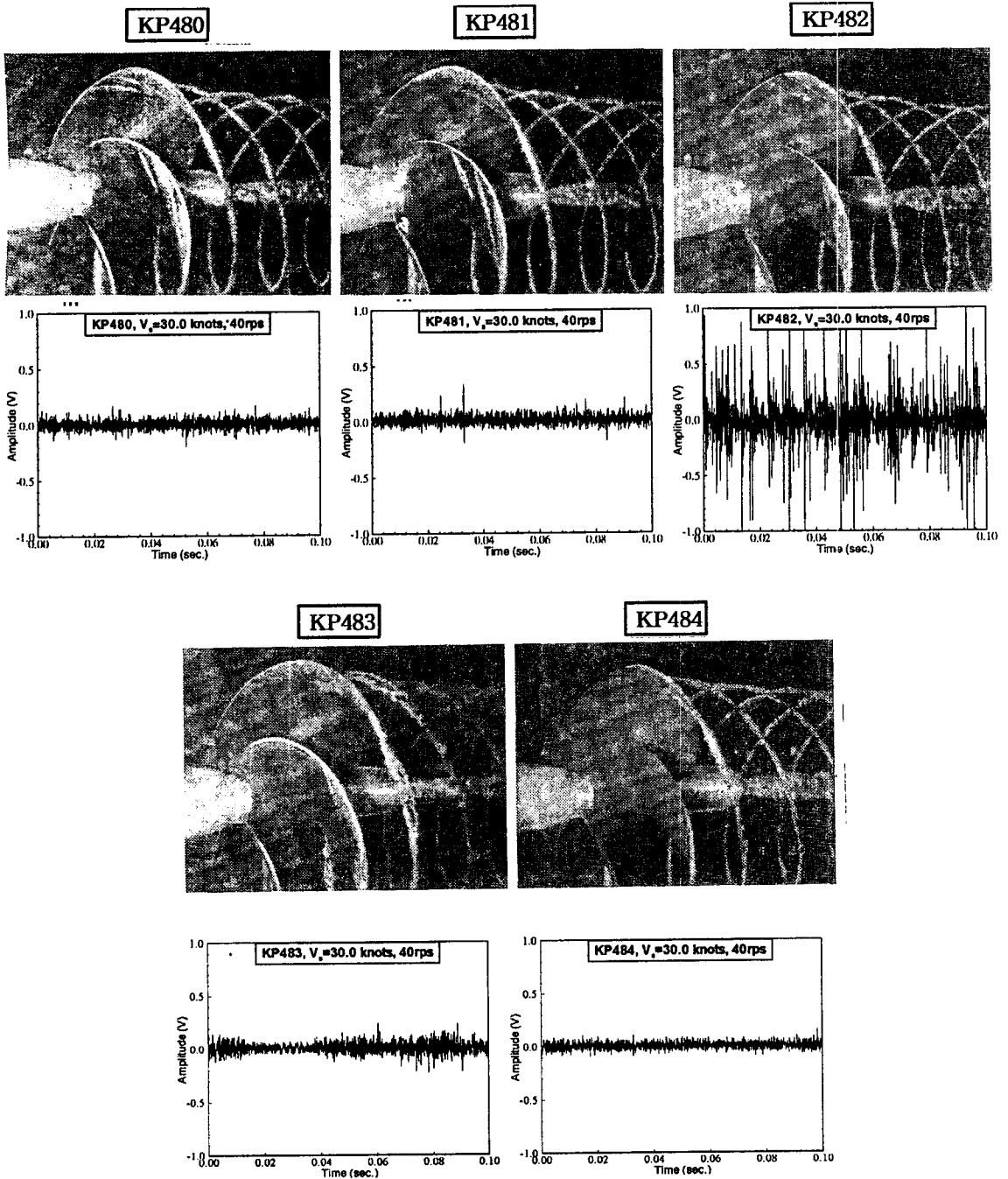


Fig.6 Cavitation pattern and sound pressure fluctuation for the design propellers ($V_s=30$ knots)

3 kHz 이하의 저주파영역에서, 그리고 보다 안정적으로 발생하였을 때(26, 28 knots)에서는 20 kHz 이상의 고주파수에서 소음 수준에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

5.3 2차원 날개단면 및 부하분포의 영향

프로펠러 날개단면의 변화는 KP480, KP481 및 KP482에서 볼 수 있으며, 캐비테이션이 발생하지 않는 상태에서 소음에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 캐비테이션 초생 및 소음특성에 큰 차이를 주는 2차원 날개단면의 실험결과[4]와는 다른 것으로, 프로펠러 두께에 대한 코오드 비가 작아서 날개단면의 차이가 잘 나타나지 않은 것으로 보인다.

KP482에서는 30 knots에서 기포 캐비테이션이 발생되어 소음수준이 약 5~15dB 상승하고 있다. KP480은 KP481에 비하여 고주파(8kHz 이상)에서 약간 작은 소음 경향을 보여만, 저주파에서는 거의 차이가 나타나지 않는다.(Fig.6, Fig.7). 프로펠러의 부하분포의 변화는 캐비테이션 및 소음특성에 영향을 미치고 있으며, 날개끝 부분의 부하를 감소하지 않은 일정피치의 KP483에서는 강력한 날개끝 보오텍스 캐비테이션이 발생되어 기준 프로펠러인 KP480에 비하여 전 주파수의 영역에서 소음이 증가하고 있다(Fig.6).

또한 앞날 부근의 부하를 감소시킨 KP484는 KP480에 비하여 전 주파수의 영역에서 소음이 감소하고 있음을 알 수 있다(Fig.6). 그러나 이들 프로펠러 간의 소음수준의 차이는 크지는 않으며, 최대 10 dB로 나타났다.

그러나 캐비테이션이 발생하지 않는 경우에는 소음수준의 차이가 거의 없음도 함께 밝혀져 현재로서는 프로펠러의 형상의 차이에 대한 소음수준의 차이는 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

날개끝 보오텍스 캐비테이션은 날개끝 보오텍스의 세기와 관련되기 때문에 기존의 이론으로는 반경방향 부하분포가 같으면 같은 전진비에서 같은 캐비테이션이 발생하는 것으로 추정되어 왔으나, 여기서는 이와는 달리 앞날 부하의 감소도 날개끝 보오텍스 캐비테이션의 발생 지연에 기여하는 것

으로 관찰되었다.

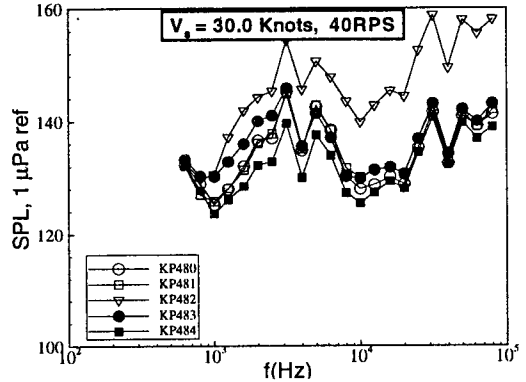


Fig.7 Comparison of the design propellers

5.4 평가 및 고찰

본 연구에서 측정된 소음의 시간신호와 50개의 측정자료에 앙상블 평균을 취한 결과 등을 관찰해 볼 때 소음신호의 결과는 stationary한 성질을 보여주었으며, 또한 프로펠러 소음특성은 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션의 패턴에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다[4].

그 중에서도 가장 영향이 큰 것은 기포 캐비테이션이며, 그 크기도 중요한 역할을 하고 있는 것으로 나타났다. 또한 압력면 캐비테이션도 운항상태에 따라서는 소음에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig.8, Fig.9). 다음으로 영향을 미치는 것은 날개끝 보오텍스 캐비테이션의 붕괴현상(bursting)을 들 수 있다[7,8]. 이러한 붕괴는 얇은층 캐비티가 날개끝 보오텍스 캐비티에 흡수, 병합되었을 때 발생하는 것으로 관찰되었다. 다음으로 날개끝 캐비테이션의 프로펠러 면에서의 불안정한 고착상태(attachment) 또는 날개끝 보오텍스 캐비테이션의 초기발생시 등도 소음특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 줄 캐비테이션 또는 얇은층 캐비테이션은 다른 캐비테이션에 비하여 작은 크기를 소음을 유발시키는 것으로 나타났으나, 줄 캐비테이션은 날개끝 보오텍스의 직경을 증대시켜 조속한 붕괴현상을 유발하는 것으로 관찰되었다.

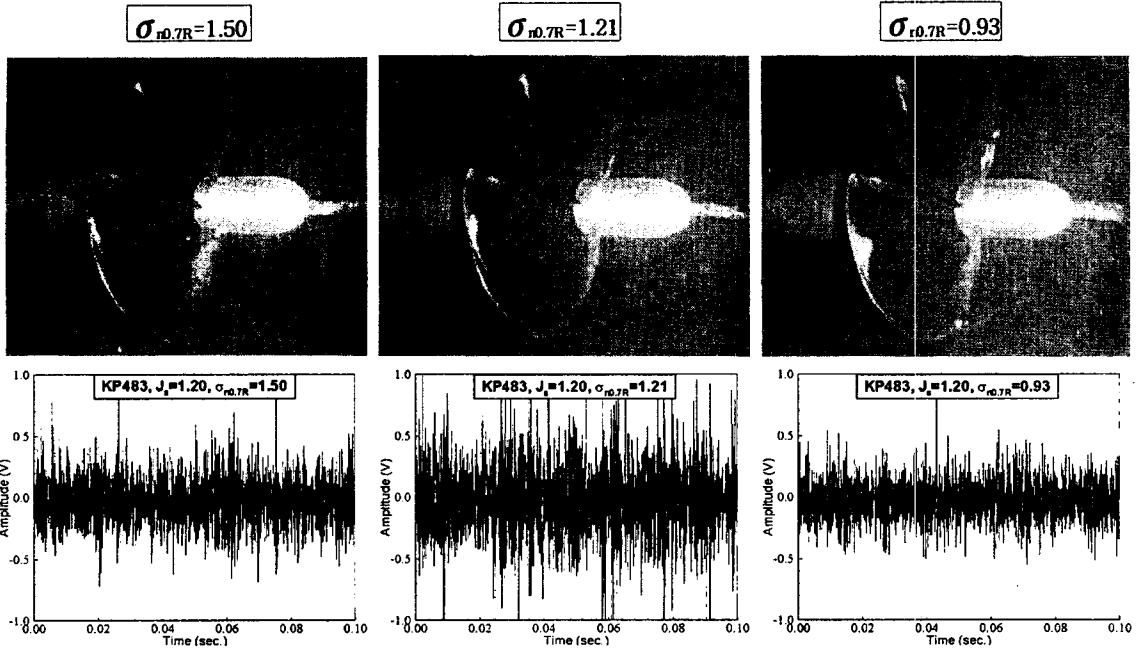


Fig.8 Face cavitation pattern and sound pressure fluctuation (KP483)

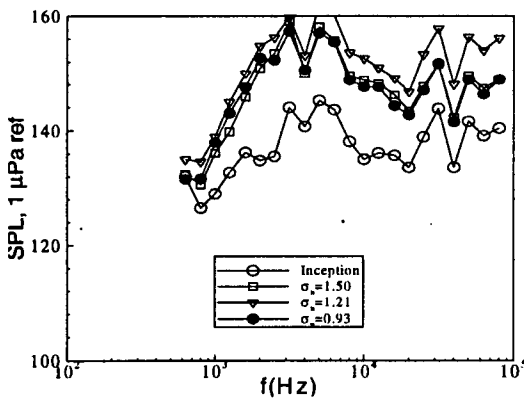


Fig.9 SPL for the face cavitation (KP483)

6. 결론

본 연구결과 프로펠러 날개단면의 소음특성은 기포 캐비테이션의 발생유무에 크게 영향을 받는 것으로 분석되었으며, 개발단면인 KH54은 KH52에 비하여 소음수준이 다소 낮은 것으로 밝혀졌다(4). 그러나 2차원 날개단면시험의 결과에서와는 달리 코오드에 대한 날개두께비가 작다는

점 그리고 프로펠러 날개끝 보오텍스의 영향이 큰 점 등으로 인하여 날개단면의 형상은 소음특성에 큰 영향을 미치지 못하고 있는 것으로 분석되었다. 그러나 부하분포의 변화는 캐비테이션 초생에 큰 영향을 미쳐, 최적부하분포를 갖는 KP483은 대상선을 기준으로 하여 선속이 약 5 knots가 빠르며, 앞날 부근의 부하를 감소시킨 KP484에서는 약 3 knots가 지연되고 있음이 밝혀졌다. 따라서 고부하 프로펠러의 날개단면 설계에서는 기포 캐비테이션의 발생유무가 중요한 성능평가의 기준이 되어야 할 것이다.

또한 캐비테이션 및 변동압력의 감소방법으로 잘 알려진 날개끝 부하분포 및 앞날 부근의 부하 감소는 본 연구에서도 캐비테이션 소음수준을 감소시키는데 중요한 역할을 하고 있음이 밝혀졌다.

본 연구에서는 캐비테이션 및 소음의 계측은 선체반류가 없는 단독상태에서 수행되어 주로 정성적인 성능평가를 수행하였으나, 다음 연구에서 3차원 선체반류를 재현하여 정량적인 성능평가도 함께 수행하려 한다.

후 기

본 연구는 '98년도 과학기술부에서 수행한 기관
고유사업 연구 결과의 일부이다.

참 고 문 헌

[1] M. J. Stanier, "Propeller Blade Sections with improved Cavitation Inception Speed", Proc. of the Institution of Mechanical Engineers - Cavitation, 1992

[2] M. J. Stanier, "The Effect of Radial Circulation Distribution on Propeller Cavitation", PROPCAV '95, 1995.

[3] 강국진 등, "대형 고속 화물선의 선형개발", 대한조선학회 '98 춘계 학술대회논문집, 1998.

[4] 안중우, 송인행 외, "고부하 저소음 프로펠러 개발(II)", 한국기체연구원 보고서, 보고서 번호 UCNV056-2137·D, 1998.

[5] Tamura, K. , Kato, H. , et. al., "Effects of flow velocity and air content in water on various types of cavitation noise", FED Vol. 176, Bubble Noise and Cavitation Erosion in Fluid Systems, ASME, 1993.

[6] 笹島孝夫, "Measurements of propeller Noise in Cavitation Tunnel", 三菱重工技報, Vol. 19, 1982.

[7] Higuchi, H., Arndt, R. E., Rogers, M. F., "Characteristics of the Tip Vortex Cavitation Noise", J. of Fluids Engineering, Vol. 111, 1989.

[8] Oshima, A., Sasajima, T., Chiba, N., "Study on Propeller Tip Vortex Bursting and its Effect on Pressure Fluctuation on Ship Hull", Int'l Symposium on Cavitation, Sendai, 1986.