

3 차원 날개의 캐비테이션 소음 계측시험

이승재^{†*}, 서종수*, 한재문*

(주)삼성중공업 조선해양연구소*, 대덕선박연구센터**

Experimental Study on the Cavitation Noise of a Hydrofoil

Seung-jae Lee^{†*}, Jongsoo Seo* and Jaemoon Han*

Samsung Heavy Industries Co., Ltd.* , Marine Research Institute**

Abstract

In order to investigate the noise characteristics of the different cavitation, noise measurements were carried out in a large cavitation tunnel of the Samsung Ship Model Basin(SSMB). The noise measurements for a 3-dimensional hydrofoil were carried out at the angle of attack of 12° and 16° according to the decrease in cavitation number. It is exhibited that sound pressure level(SPL) increased sharply with cavitation inception. The frequency of the noise induced by sheet cavitation was higher than that of tip vortex cavitation in the phase of cavitation inception. Within the range of the high frequency, in the case of fully developed cavitation, sheet cavitation noise was significantly increased in sound pressure level compared with tip vortex cavitation noise. In this study, the noise characteristics of the different cavitation types were considered experimentally and would be utilized as a basis for the analysis of propeller cavitation noise.

※Keywords: Hydrofoil(수중익), Cavitation noise(공동소음), Cavitation tunnel(공동수조), Sound pressure level(음압레벨), Acoustic chamber(음향챔버)

1. 서론

운항 중인 선박에서 발생하는 수중방사소음은 프로펠러 소음, 선박 내 기계류에 의한 소음, 선프로펠러 소음, 선박 내 기계류에 의한 소음, 선박

이 진행하면서 발생하는 wave breaking 에 의한 소음으로 크게 나눌 수 있다. 선박 내부의 기계류나 배관 등을 통한 소음은 유체의 흐름이나 진동에 의해 발생되며, 운항 속도에는 그다지 영향을 받지 않는다. 기계류에 의한 소음은 흡음 장치를 이용하여 외부로의 전파를 상당히 차단할 수 있다. 반면, 프로펠러에서 유기된 캐비테이션 소음 등과 같이 외부 유체의 흐름에 의해 유발되는 소음은

접수일: 2006년 11월 27일, 승인일: 2007년 2월 23일
†교신저자: sj2005.lee@samsung.com, 042-865-4750

선박 운항 속도에 비례하여 급속히 증가하게 되며, 소음원이 선박 외부에 노출되어 있기 때문에 수중 방사소음의 전파를 근원적으로 차폐하기가 불가능하다. 특히 선박 내 기계류 소음에 대한 저감 기술 발달로 인하여 선박에서 발생하는 소음 가운데 프로펠러의 의해 유기되는 수중소음이 더욱 중요한 문제로 부각되었다(설한신 등 2004).

프로펠러에 의해 발생하는 소음은 크게 공동소음(cavitation noise), 비공동소음(non-cavitation noise), 명음소음(singing noise)으로 나누어 진다. 일반적으로 세가지 소음원 중에 공동소음이 가장 큰 강도를 가지며, 운항 중인 선박에서 프로펠러 캐비테이션의 발생은 피할 수 없다. 따라서 공동소음은 선박의 수중방사소음 관점에서 매우 중요하다(Ross 1976).

프로펠러에서는 다양한 형태의 캐비테이션이 동시에 발생하며, 캐비테이션의 복합적인 작용으로 인하여 공동소음은 넓은 주파수 대역에서 나타난다. 이러한 이유 때문에 프로펠러 수중방사소음에 대한 원인의 규명이나 해석에는 많은 한계를 갖고 있다.

본 시험은 프로펠러 캐비테이션 소음을 분석하기 위한 기초연구로서, 캐비테이션 형태에 따른 소음 특성을 파악하는 것이 목적이다. 시험대상은 특정 캐비테이션의 발생이 용이한 3 차원 수중익으로 하였다. 받음각 및 캐비테이션 수를 변화시키면서 특정 캐비테이션이 발생하도록 하였으며, 이에 따른 캐비테이션 소음을 예측하였다.

2. 시험 장비 및 방법

현재 삼성중공업에서는 대형 공동수조 (SCAT, Samsung CAvitation Tunnel)을 1997년부터 운용하면서 다양한 수중방사소음에 관한 연구를 수행하고 있다.

본 시험은 당사가 보유하고 있는 두 개의 시험 부중에서 소형시험부에서 수행되었다. Fig.1은 길이 6.0m, 폭 1.2m, 높이 1.2m의 재원을 갖는 소형시험부의 전경이다. 설계 최대 유속은 28.0m/s이며, 0.4bar에서 최대 2.0bar까지 압력 조절이

가능하다.

2.1 시험 모형

3 차원 수중익 모형은 기준 코오드 304.8mm이며, 스펠 304.8mm이다. 단면은 NACA66 + a=0.8 평균선 분포를 가졌으며, 최대 두께비(T/C)는 10%, 그리고 최대 캠버비(f/C)는 2.5%이다. Effective aspect ratio($2\Lambda = 2(h^2/S)$)는 2.546이다. 여기서, h 는 스펠이고, S 는 투영면적이다.

Fig. 2는 제작된 3 차원 수중익 모형을 보여준다. 3 차원 수중익은 알루미늄 304 계열의 재질로 당사의 5축 NC M/M으로 정밀 가공되었고, 부식 방지를 위해 표면을 Anodizing 하였다.

2.2 수중소음 예측 시스템

공동소음 예측은 B&K8103 하이드로폰을 사용하였다. B&K8103은 Flush 형태가 아니므로, 유동이 있는 수조 내부에 노출되어 있으면, 유동의 흐



Fig. 1 Samsung cavitation tunnel (SCAT)

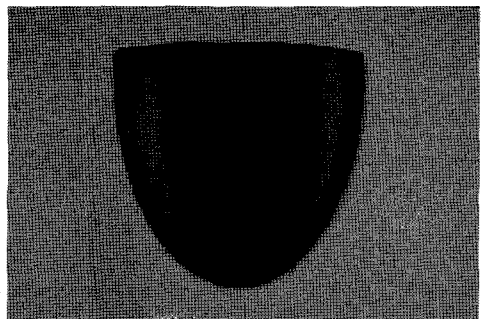


Fig. 2 Hydrofoil : NACA66

름을 방해되어 소음이 발생하게 된다. 이와 같은 현상을 최소화하기 위하여 소형 음향챔버를 사용하였다. 음향 챔버는 공동수조 내부가 평면을 유지하기 위해서 유동과 하이드로폰 사이에 아크릴창이 위치하는 구조를 갖는다. 다른 매질 (본 수조에서는 아크릴)로 인한 음향손실이 최소화하기 위해 물과 음향학적 임피던스가 유사한 재질인 아크릴을 이용하였다(서종수 등 2004).

Fig. 3 와 같이 소형 음향 챔버에는 8 개의 하이드로폰을 설치된다. 각각의 하이드로폰에서 계측된 음압레벨의 차이는 크지 않으며, 본 논문의 결과는 음향챔버 중앙에 설치된 하이드로폰에서 계측된 것이다. Fig. 4 는 공동수조에 설치된 3 차원 수중익과 음향챔버의 모습이다.

앰프는 B&K 2692 (NEXUS)를 사용하였으며, 신호해석은 Nicolet 사의 compass 신호분석기를 이용하였다. 넓은 주파수 영역에서의 분석을 위하여 측정주파수 구간을 20kHz 까지 설정하였으며, 주파수 간격은 $\Delta f=11.7\text{Hz}$ 이다.

3. 결과 및 토의

캐비테이션 양상에 따른 소음 특성 변화를 살펴보기 위하여 3 차원 수중익을 이용하여 다양한 캐비테이션의 발생을 시도하였으나, 시험된 수중익에서는 sheet 캐비테이션과 tip vortex 캐비테이션만 발생하였다.

시험은 유속 8m/s 에서 3 차원 수중익의 받음각을 각각 12 도와 16 도로 고정된 상태에서 캐비테이션 수를 5.55 에서 2.39 까지 낮추면서 수행하였다. 캐비테이션 양상은 CCD 카메라를 이용하여 촬영하였고, 동시에 소음계측을 수행하였다. 계측된 소음결과는 기준음압이 $1\mu\text{Pa}$ 인 1/3-octave band 음압레벨로 나타내었다. x 축은 1/3-octave band 의 중심주파수이다.

Fig. 5 과 Fig. 6 은 각각 받음각 12 도와 16 도에서 촬영된 캐비테이션 양상이다. 받음각 12 도와 16 도 시험조건은 시험장비의 한도 내에서 sheet 캐비테이션과 tip vortex 캐비테이션의 양상이 가장 명확하게 구별되는 조건이었다.

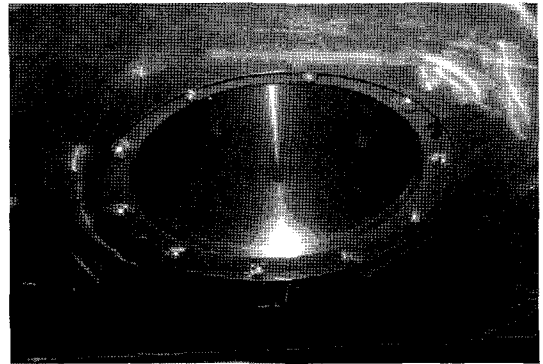


Fig. 3 Acoustic chamber

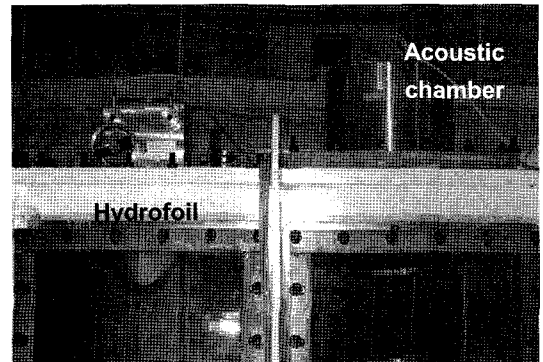


Fig. 4 Hydrofoil and acoustic chamber installed in SCAT

Fig. 5 에서와 같이, 받음각 12 도에서는 캐비테이션 수가 낮아짐에 따라 수중익 날개 끝에서 tip vortex 캐비테이션이 발생하였다. 육안 관측에 의하면, 캐비테이션 수 4.92 에서 tip vortex 캐비테이션이 발생하기 시작하였다. 캐비테이션 수가 3.65 로 낮아지면서 수중익 날개 끝에서 sheet 캐비테이션이 발생하기 시작하였고, 캐비테이션 수가 2.39 로 더욱 낮아지면 sheet 캐비테이션이 수중익 앞날을 따라 전체적으로 발생하였다.

Fig. 6 에서와 같이 받음각 16 도의 경우는 캐비테이션 수 5.55 에서 수중익 앞날에 sheet 캐비테이션이 발생하기 시작하였다. sheet 캐비테이션은 캐비테이션 수가 감소함에 따라 점차 성장하였으며, 캐비테이션 수 3.02 부터 sheet 캐비테이션의 break-up 현상이 관찰되었다. 캐비테이션 수 2.39

에서는 이러한 현상이 더욱 심화되어 cloud 캐비테이션 형태로 후류로 강하게 떨어져 나갔다.

Fig. 7 에서 기호●로 나타낸 것은 유속 8m/s, 받음각 0도에서 예측된 소음이다. 이 때의 캐비테이션 수는 3.65 이다. 받음각 0도에서는 캐비테이션 수 2.39 까지 캐비테이션이 발생하지 않았으며, 캐비테이션 수에 따라 예측된 소음의 음압레벨 차이는 없었으며, 수중익이 설치되지 않은 상태에서의 배경소음과 비교하였을 때도 음압레벨의 차이는 없었다. 받음각 0도에서 예측된 음압레벨을 배경소음으로 정의하여 캐비테이션 소음 결과와 비교하였다. 각각의 받음각에 대해 캐비테이션이 전혀 발생되지 않는 충분히 높은 캐비테이션 수에서 3 차원 수중익에 의한 유동 소음을 예측하여 캐비테이션 소음과 비교해야 하지만 공동수조 최대 압력 조절 범위를 벗어나기 때문에 수행이 어려웠다.

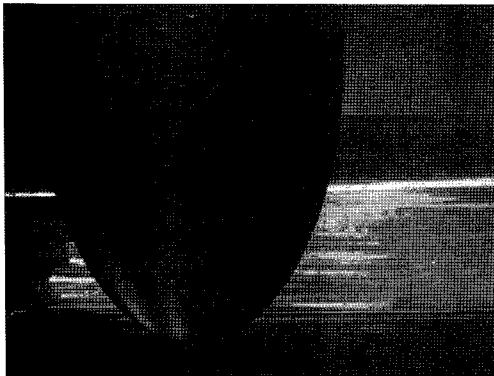
Fig. 7 은 육안으로 관측된 캐비테이션 초생시점에서 예측된 소음 스펙트럼을 배경소음과 비교한 것이다. Tip vortex 캐비테이션 초생은 받음각 12도의 캐비테이션 수 4.92 이며, sheet 캐비테이션은 받음각 16도의 캐비테이션 수 5.55 에서 발생하기 시작하였다. 캐비테이션 초생으로 인해 315Hz 이상 의 주파수 영역에서 음압레벨이 크게 증가하였다. Fig. 7 에서 기호■로 표시된 것과 같이, tip vortex 캐비테이션 발생으로 315Hz~1.6kHz 주파수 영역에서 음압레벨이 크게 증가되었으며, 630Hz 에서는 배경소음에 비해 약 25dB 증가하였다. 기호▲로 표시한 sheet 캐비테이션 소음은 1.6kHz 이상에서 음압레벨을 약 20dB 증가시켰으며, 같은 영역에서 tip vortex 캐비테이션에 의한 음압레벨 증가는 5~9dB 였다.

Fig. 8 은 받음각 12도에서 캐비테이션 수를 5.55, 4.92, 4.29 로 낮추면서 예측된 소음 스펙트럼이다. 315Hz 에서 1.6kHz 주파수 영역에서는 배경소음에 비해 최소 10dB 이상 음압레벨이 증가하였으며, 캐비테이션 수 감소에 따른 음압레벨 변화가 현격하였다. 1.6kHz 이상에서는 캐비테이션 수 감소에 따른 음압레벨의 차이는 1dB 이내로 작았다. 캐비테이션에 의해 유기된 음압레벨은 캐비테이션 수 5.55 의 경우에 최대 음압레벨

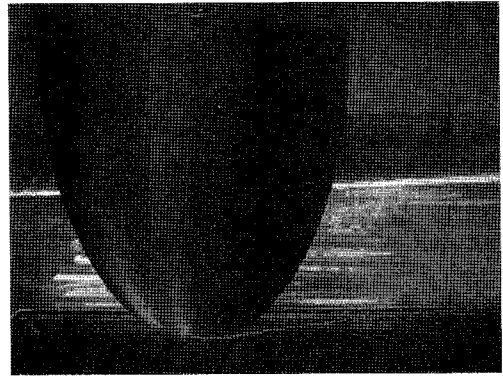
126dB 이며, 캐비테이션 수 4.92 와 4.29 에서는 각각 136dB 와 141dB 였다. 이 때, 최대 음압레벨을 갖는 주파수는 각각 1kHz, 630Hz, 500Hz 이며, 캐비테이션 수가 감소됨에 따라 최대 음압레벨을 갖는 주파수가 낮아졌다. 캐비테이션 수의 감소에 따라 tip vortex 캐비테이션이 점차 성장하게 되며, 이로 인해 발생하는 음압레벨의 최대값이 나타나는 주파수가 낮아지는 것으로 판단된다. 캐비테이션은 캐비티 핵(cavity nuclei)이 주변 환경요인에 의해 성장한 작은 기포들의 집합체이다. 작은 기포들은 서로 합쳐지기(merging)도 하며 두 개의 더 작은 기포로 나누어 지기(splitting)도 하면서, 성장하고 붕괴하게 된다. 캐비테이션 소음의 주파수는 기포의 붕괴시간(collapse time)에 관련되며, 기포의 크기에 반비례하게 된다(Ross 1976., Brennen 1995). 최대 음압레벨이 나타나는 주파수는 대응되는 크기의 기포가 가장 많이 존재하는 것을 의미한다. 캐비테이션의 성장은 집합체를 이루고 있는 작은 기포가 성장하는 최대 크기의 증가를 의미하기 때문에 캐비테이션 성장에 따라 발생하는 소음의 주파수는 낮아지게 된다(안중우 등 2000, 서중수 등 2004).

3 차원 수중익의 tip vortex 캐비테이션의 초생은 캐비테이션 4.92 였다. 하지만 Fig. 7 의 결과에서 캐비테이션 수 5.55 인 경우를 보면, 1kHz 에서 음압레벨이 배경소음에 비해 16dB 이상 높았으며, 이미 캐비테이션이 발생되었음을 의미한다. tip vortex 캐비테이션의 초생은 이외의 캐비테이션보다 관찰자의 주관에 따라 다르게 판단될 수 있다. 캐비테이션 수 5.55 의 경우에는 수중익에서 약 1m 떨어진 후류에서 tip vortex 캐비테이션이 발생하였으나, 이 때를 캐비테이션 초생으로 볼 것인가에 대한 의견은 분분하다. 따라서 소음관점에서 tip vortex 캐비테이션의 초생을 판단하는 기준을 정립하는 것이 필요하다.

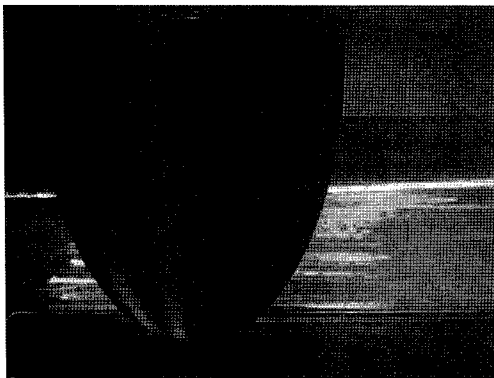
Fig. 9 는 받음각 12도에서 캐비테이션 수를 3.65, 3.02, 2.39 로 낮추면서 예측된 결과이다. Fig. 8 의 결과와 비교하면, 1.6kHz 이상에서 음압레벨이 10dB 이상 증가하였다. 최대 음압레벨은 모두 중심주파수 315Hz 에서 나타났다. 하지만



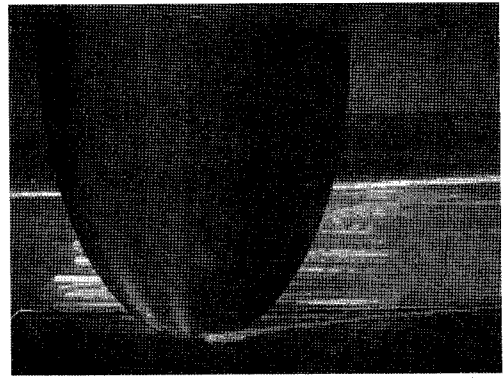
(a) $\sigma = 5.55$



(d) $\sigma = 3.65$



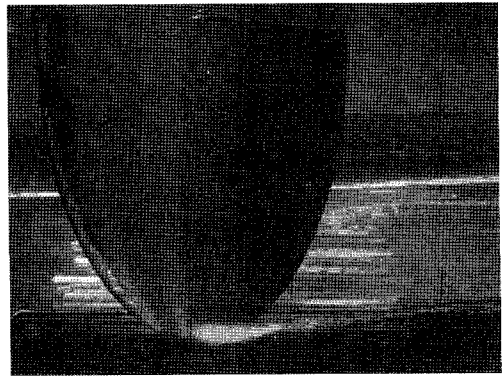
(b) $\sigma = 4.92$



(e) $\sigma = 3.02$

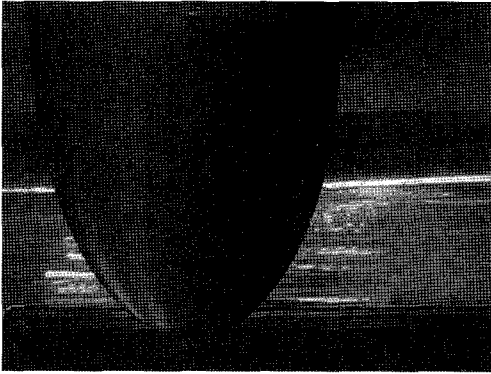
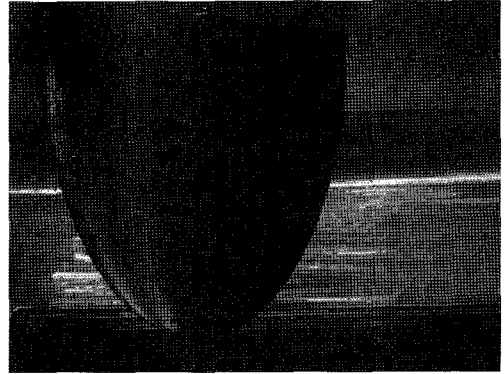
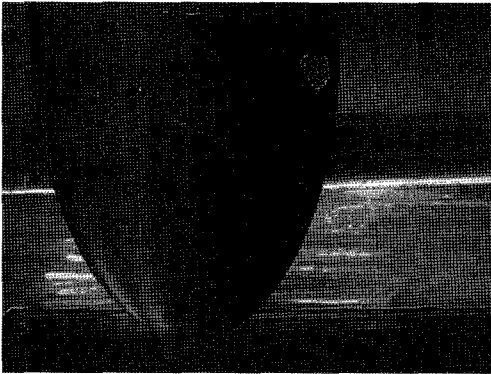
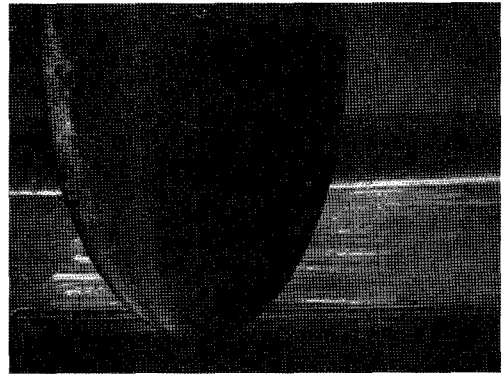
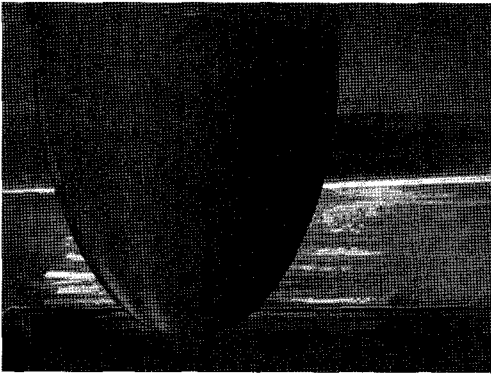
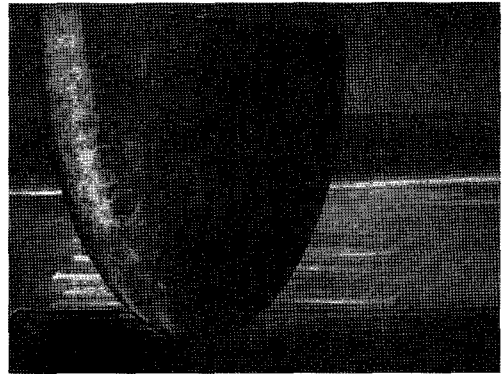


(c) $\sigma = 4.29$



(f) $\sigma = 2.39$

Fig. 5 Cavitation behavior : $V_T=8\text{m/s}$, angle of attack= 12°

(a) $\sigma = 5.55$ (d) $\sigma = 3.65$ (b) $\sigma = 4.92$ (e) $\sigma = 3.02$ (c) $\sigma = 4.29$ (f) $\sigma = 2.39$ Fig. 6 Cavitation behavior : $V_T=8\text{m/s}$, angle of attack= 16°

315Hz 주파수의 소음은 배경소음에서도 동일하게 나타나며, 공동수조 크기에 의한 효과로서 반향에 의한 한계로 보여진다. 공동수조 반향특성에 대한 체계적인 조사가 앞으로 진행되어야 할것이다.

Fig. 8 과 Fig. 9 에서 1.6kHz 이상 고주파수 영역의 스펙트럼을 보면, 캐비테이션 수 3.65 이하에서 계측된 음압레벨과 캐비테이션 수 4.29 이상에서 계측된 것이 구별되는 것을 볼 수 있다. 캐비테이션 수 3.65 부터 수중의 날개 끝에서 Tip vortex 캐비테이션이 sheet 캐비테이션과 함께 관찰되었다. Fig. 5 의 (d)를 보면, 수중익의 날개 끝의 앞날 부분에 sheet 캐비테이션이 발생하였다. 캐비테이션 수 3.65 부터 음압레벨이 크게 증가한 것은 수중익에서 발생하는 캐비테이션 양상의 변화로 인한 것으로 생각된다. Fig.9 에서 캐비테이션 수 3.02 나 2.39 의 결과를 보면, 250Hz 이상에서 음압레벨이 전반적으로 크게 증가되었다. 배경소음과 비교하였을 때 최대 20dB 더 높았다.

Fig. 10 과 Fig. 11 은 받음각 16 도에서 캐비테이션 수에 따라 계측된 소음 스펙트럼이다. Fig.10 를 보면, 캐비테이션 수가 5.55, 4.92, 4.29 로 감소함에 따라 최대 음압레벨의 주파수가 1.6kHz, 1kHz, 630Hz 로 낮아졌다. Tip vortex 캐비테이션의 경우와 같이 캐비테이션 성장 정도에 따라 최대 음압레벨을 갖는 주파수가 점차 낮아졌다.

캐비테이션 수가 5.55, 4.92, 4.29 로 감소함에 따른 최대 음압레벨을 갖는 주파수는 tip vortex 캐비테이션의 경우에는 1kHz, 630Hz, 500Hz 이었고, sheet 캐비테이션의 경우에는 1.6kHz, 1kHz, 630Hz 이었다. 캐비테이션 초생의 경우에는 sheet 캐비테이션에 의해 발생하는 소음이 tip vortex 캐비테이션에 의한 것 보다 높은 주파수의 소음으로 판단할 수도 있으나 캐비테이션의 발달상태에 따라 발생하는 소음 주파수도 변화하기 때문에 캐비테이션 형태에 따라 발생하는 소음의 주파수영역을 정의하는 것은 어렵다.

Fig. 11 은 캐비테이션 수 3.65, 3.02, 2.39 에서 계측된 결과이다. 250Hz 이상에서 음압레벨이 전반적으로 크게 증가되었고, 캐비테이션 수 2.39 의 경우에는 배경소음에 비해 최대 30dB 더 높게

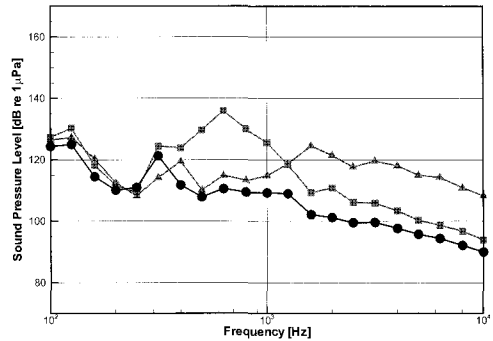


Fig. 7 Cavitation inception noise ($V_T=8\text{m/s}$, \blacksquare : angle of attack= 12° ($\sigma=4.92$), \blacktriangle : angle of attack= 16° ($\sigma=5.55$), \bullet : background noise)

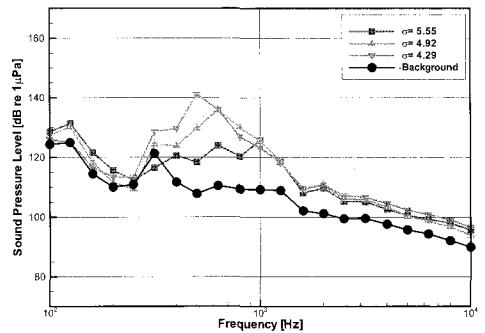


Fig. 8 Cavitation noise according to cavitation number ($V_T=8\text{m/s}$, angle of attack= 12° ; \blacksquare : $\sigma=5.55$, \blacktriangle : $\sigma=4.92$, \blacktriangledown : $\sigma=4.29$, \bullet : background noise)

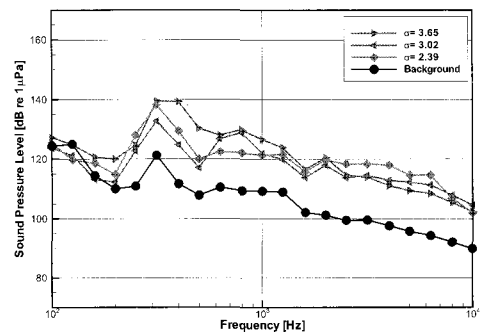


Fig. 9 Cavitation noise according to cavitation number ($V_T=8\text{m/s}$, angle of attack= 12° ; \blacktriangleright : $\sigma=3.65$, \blacktriangleleft : $\sigma=3.02$, \blacklozenge : $\sigma=2.39$, \bullet : background noise)

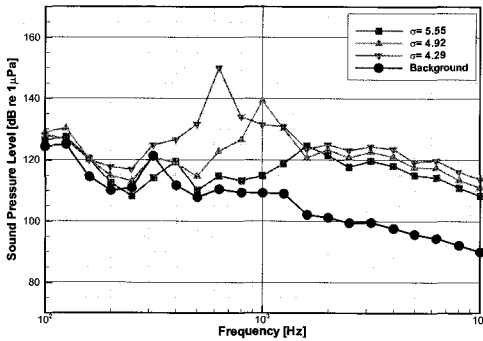


Fig. 10 Cavitation noise according to cavitation number ($V_T=8\text{m/s}$, angle of attack= 16° ; \blacksquare : $\sigma=5.55$, \blacktriangle : $\sigma=4.92$, \blacktriangledown : $\sigma=4.29$, \bullet : background noise)

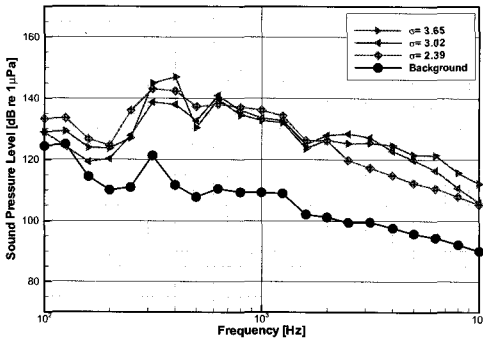


Fig. 11 Cavitation noise according to cavitation number ($V_T=8\text{m/s}$, angle of attack= 16° ; \blacktriangleright : $\sigma=3.65$, \blacktriangleleft : $\sigma=3.02$, \blacklozenge : $\sigma=2.39$, \bullet : background noise)

계측되었다.

4. 결론

캐비테이션 양상에 따른 소음 특성 변화에 대한 시험결과는 향후 프로펠러 캐비테이션 소음에 대한 연구에 유용하게 사용될 것이다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 캐비테이션 발생과 함께 음압레벨이 급격히 증가하였으며, 캐비테이션이 성장함에 따라 캐비테이션 소음의 주파수 특성

이 낮아짐을 확인하였다.

- 2) 캐비테이션 초생 단계에서 발생하는 소음을 비교하면, sheet 캐비테이션에 의해 발생하는 소음이 tip vortex 캐비테이션에 의한 것보다 높은 주파수의 소음이었다. 하지만 캐비테이션 발달 정도에 따라 발생하는 소음의 주파수 특성이 변화되기 때문에 캐비테이션 형태에 따라 유기되는 소음의 주파수영역을 정의하는 것은 어렵다.
- 3) 고주파수 영역(본시험에서는 1.6kHz 이상)의 음압레벨은 tip vortex 캐비테이션보다 sheet 캐비테이션에 의해 더 크게 증가되는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 서중수, 한재문, 이경준, 정재권, 2004, “ 추진기 캐비테이션 유기 수중 음향의 측정 및 분석,” 한국음향학회 학술발표대회, 제 23 권, 제 2(s)호, pp. 443-446.
- 설한신, 이수갑, 표상우, 서정천, 2004, “ 수중 프로펠러의 소음 예측에 관한 연구 (part 2. 공동소음),” 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 2 호, pp. 33-46.
- 안중우, 강관형, 송인행, 김경열, 2000, “ 수중의 캐비테이션 소음 예측 및 캐비티 기포 거동 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 4 호, pp. 40-47.
- Brennen, C.E., 1995, Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University Press, New York.
- Donald Ross, 1976, Mechanics of Underwater Noise, Pergamon press.



< 이 승 재 >



< 서 중 수 >



< 한 재 문 >