

## 2차원 날개단면들의 캐비테이션 소음 특성

안종우\*, 송인행\*, 김기섭\*, 김경열\*, 문일성\*

### Characteristics of Cavitation Noise of 2-D Hydrofoils

by

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

#### 요 약

2차원 단면들의 캐비테이션 소음이 캐비테이션 터널에서 측정되었다. 새로운 실험방법이 2차원 단면의 소음측정을 위해 개발되었다. 스패 600mm인 3종의 단면들이 캐비테이션 거동과 소음특성을 조사하기 위하여 설계·제작되었다. 실험 결과로부터 여러 가지 캐비테이션 형태에 대한 소음 특성 및 3종의 단면들의 소음성능을 분석할 수 있었다. 앞으로 저소음 프로펠러 단면이 현재의 실험방법을 이용하여 충분히 개발될 수 있음을 보여준다.

#### Abstract

The cavitation noise of 2-D hydrofoils is measured in a cavitation tunnel. A new experimental method was developed for the noise measurement of a 2-D hydrofoil. Three hydrofoils with the span of 600mm are designed and manufactured to investigate cavitation behavior and noise characteristics. The experimental results show the noise characteristics of various cavitation patterns and the noise performance of the three foils very well. This suggests that low-noise propeller blade section can be developed using the present experimental method.

#### 1. 서 언

선박 프로펠러 및 수중익(hydrofoil) 등에서 발생하는 캐비테이션은 추진 효율의 저하와 함께

소음과 진동을 획기적으로 증가시킨다. 특히 캐비테이션에 의하여 발생한 소음은 높은 난류강도를 갖는 유동 소음에 비해 그 수준이 매우 높기 때문에 전투함의 경우 상대방에게 탐지되어 그 위

접수일자: 1999년 5월 25일. 재접수일자: 1999년 8월 6일

\* 정희원, 한국해양연구소 선박해양공학분소 해양운송시스템연구센터

치가 노출되는 위험을 초래한다. 따라서 현재 세계 각국의 해군에서는 추진기나 수중의 및 부가물 등의 설계시 캐비테이션에 의하여 발생하는 수중 방사소음을 정확히 예측하기 위하여 많은 시설 투자를 하고 있으며[1], 수중방사소음을 최소화하기 위한 연구를 수행하고 있다.

프로펠러 캐비테이션에 의하여 발생하는 소음을 감소시키기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 우선 캐비테이션의 감소 대책 중 주로 실용화되고 있는 것은 고스큐(high skew), 날개끝 부하 감소(tip unloading) 등 3차원 날개의 형상에 관한 것들인데, 실제로 캐비테이션 감소에 관한 성과가 있는 것도 사실이다. 그러나 고속 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션은 상선 프로펠러와 달리 날개 끝 부분에서만 발생하는 것이 아니고 허브 근처를 포함한 거의 전 반경에서 발생할 수 있다[2]. 이런 관점에서 소음감소가 최고의 설계목표가 되는 고속 프로펠러에서는 캐비테이션의 감소대책 중 가장 근본적인 2차원 날개단면의 성능 향상도 함께 고려하여야 한다. 일반적으로 캐비테이션을 억제할 수 있도록 개발된 날개단면에서는 얇은층(sheet) 캐비테이션이 일정부분 억제되나, 소음에 큰 영향을 미치는 구름(cloud) 캐비테이션 및 기포(bubble) 캐비테이션 등이 발생할 가능성이 높다[3, 4]. 따라서 본 연구에서 소음특성 향상에 목적을 둔 2차원 날개단면의 개발을 수행하였다.

저소음 단면의 개발을 위해 기존의 고속 프로펠러에서 주로 사용되는 NACA16+a=0.8 평균선 단면(KH52)과 러시아 항공모함 Novorosysk호에 장착된 프로펠러에 적용된 단면(KH53)을 제작하였으며, 소음감소를 목표로 새로운 단면(KH54)을 설계·제작하였다. 이러한 날개 단면들의 캐비테이션 소음특성을 파악하기 위하여 자체소음을 최소화 한 새로운 실험 장치를 설계·제작하였다. 일련의 실험은 KRISO 캐비테이션 터널에서 수행되며, 날개단면의 받음각 및 캐비테이션 발생량을 변화시키면서 캐비테이션 거동의 관찰과 소음수준 및 시간신호를 계속하였다. 실험결과로부터 캐비테이션 발생거동과 소음수준과의 관

계를 파악할 수 있었으며, 구름 캐비테이션의 발생원인도 패널법으로 예측할 수 있었다.

### 2. 실험장치 및 방법

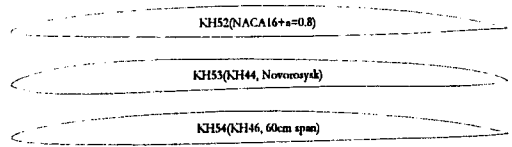


Fig.1 Section profile of the hydrofoils

Fig.1에서 보여지는 날개단면들의 캐비테이션 관찰 및 소음 계측 실험은 KRISO 캐비테이션 터널 제 1 계측부(600 mm×600 mm)에서 수행되었다. 터널은 청수(fresh water)로 채워져있고 실험시 수중의 공기 함유량은 45%이하로 유지되었다. 또한 2차원 유동의 재현 및 소음원을 최소화하기 위하여 캐비테이션 터널 안에는 날개단면만이 설치되도록 스펠(span)을 600 mm로 제작하였다. 높은 유속에서도 시험할 수 있도록 Fig.2에 나타난 것과 같이 양쪽에서 지지할 수 있게 설계하였으며, 벽면과의 간격도 최소화하여 불필요한 소음원을 제거할 수 있도록 하였다. 기존의 2차원 단면의 실험은 주로 추진 효율과 관련하여 양력 및 항력의 계측이 주목적이었다. 그러므로 6분력계를 이용하여 성능을 검증하기 위하여 날개의 스펠을 대략 250mm로 제작하고 2차원 유동을 구현하기 위하여 터널 내부에 중간판을 설치하였다. 그러나, 이 중간판이 큰 소음원으로 작용하여 날개단면에서 발생하는 소음수준보다 높게 발생되어 소음실험을 수행할 수 없었다[2].

본 연구에서는 단면변화에 따른 캐비테이션 소음특성을 파악하기 위하여 날개들은 코오드 300 mm로 제작되었다. 소음특성 시험을 위하여 날개단면은 Fig.2와 같은 방식으로 캐비테이션 터널에 설치되었으며, 받음각 조절장치를 별도로 부착하여 받음각을 조절하였다. 소음 계측을 위한 수중 청음기(hydrophone)는 크기가 소형이면서 감도가 좋은 B&K Type 8103를 사용하였다.

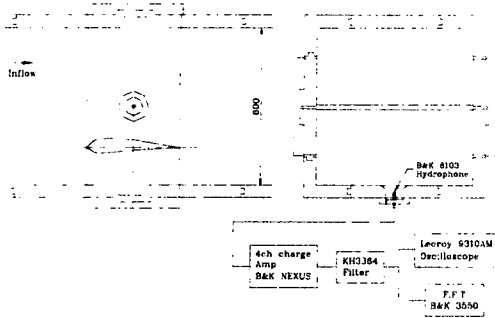


Fig. 2 Experimental set-up

수중 청음기는 중형 축대칭체 내부에 장착되었고 이 축대칭체는 하부 관측창 벽면에 부착되어 설치되었다. 청음기를 이용하여 계측된 신호는 전하형(charge type) 증폭기에서 증폭되고, 이 신호 성분중 500Hz 이하의 저주파수 성분을 KH3364 필터를 사용하여 제거되었다. 필터를 거친 신호는 100 kHz까지 분석될 수 있는 B&K사의 FFT 분석기 (Type 3550)에서 1/3-octave band로 해석을 수행하였다. 또한 KH3364 필터로부터 디지털 오실로스코프 LeCroy 9310AM로 신호선을 연결하여 시간 신호도 동시에 기록하였다.

실험시 유속은 레이놀즈 수에 따른 영향을 피하기 위하여 8.0 %로 고정하였으며 이때의 레이놀즈 수는 코오드를 기준으로  $1.78 \times 10^6$ 이다. 수중익의 받음각은  $-4^\circ$  부터  $5^\circ$  까지  $1^\circ$  간격으로 변화시켰으며, 각각의 받음각에서 캐비테이션 초기 발생 조건을 관찰하고, 초생 조건으로부터 캐비테이션 발생 길이를 5%, 10%, 25% 와 50%로 변화시키면서 소음을 계측하였다. 캐비테이션 거동은 전 받음각에서 관찰되었다.

### 3. 결과 및 토의

캐비테이션 수의 변화와 함께 계측된 소음수준은 1/3-octave band 스펙트럼의 음압 형태로 그 차이를 보여준다. 수직축은 기준 음압(Pref)이  $1 \mu\text{Pa}$ 인 1/3-octave band 음압수준(SPL: Sound Pressure Level)을 나타내며, 수평축은 1/3-octave band의 중심주파수를 나타낸다.

Fig.3은 받음각  $1^\circ$  와  $2^\circ$  에서 캐비테이션 발생량에 따라 계측된 3종의 날개단면들의 소음 수준을 보여준다. 전반적으로 KH54 단면의 소음특성이 KH52와 KH53 단면에 비해 우수한 것을 볼 수 있다. 캐비테이션이 발생하지 않는 경우에 대한 소음은 각 실험조건에서 실선으로 나타난다. 캐비테이션이 조금이라도 발생하면 소음은 크게 증가하는 현상이 나타났지만, 여기서는 상대적 비교를 위하여 캐비테이션 초기발생 조건은 육안으로 식별가능한 경우를 기준으로 정하였다. 캐비테이션이 초기발생한 경우 고주파에서 20~40dB 정도의 소음 증가가 나타난다. 받음각  $1^\circ$  에서 KH54 단면에서 4가닥 정도의 줄(streak) 캐비테이션이 발생한 반면 KH52와 KH53의 경우는 초기발생부터 기포 캐비테이션이 발생되어 소음이 급격히 증가되는 현상을 보여준다. 받음각  $2^\circ$  의 경우에 KH54는 얇은층 캐비테이션이 전체 스펙에 걸쳐 발생되었다. 반면에 KH53의 경우 5~6 가닥의 캐비테이션이 앞날부터 발생되고 그 양이 10%를 넘어가게 되면 기포 캐비테이션이 발생되면서 소음수준이 점차로 증가되는 현상이 나타난다.

일반적으로 2차원 단면의 받음각  $-1^\circ \sim 1^\circ$  범위에서는 기포 캐비테이션이 발생되며, 받음각  $3^\circ$  이상에서는 얇은 층 캐비테이션이 발생된다. 받음각  $2^\circ$  의 경우 기포 캐비테이션과 얇은층 캐비테이션의 혼합된 형태가 나타날 수 있다. KH52단면은 이러한 특성을 가장 잘 보여주는데, 발생량 25%부터 약간의 기포 캐비테이션이 발생되면서 90%까지 순간적으로 증가되는 현상을 보여준다. 이러한 캐비테이션의 특성으로 인하여 KH52 단면의 소음수준은 KH53과 KH54의 중간적인 특성을 보여준다. KH54 단면은 받음각  $1^\circ$  에서도 기포 캐비테이션이 억제되는 특성을 보여주고 있다. 반면에 KH53 단면은 기포 캐비테이션의 발생범위가  $-2^\circ \sim 2^\circ$  로 매우 넓은 범위에 걸쳐 발생하는 것으로 나타났다. 이는 KH53의 최대 날개두께가 0.3 코오드에 위치하고 있으며 최대 두께 부근에서 급격하게 형상이 변화하기 때문에 상대적으로 기포 캐비테이션의 발생 가능성이 높기 때문인 것으로 추정된다.

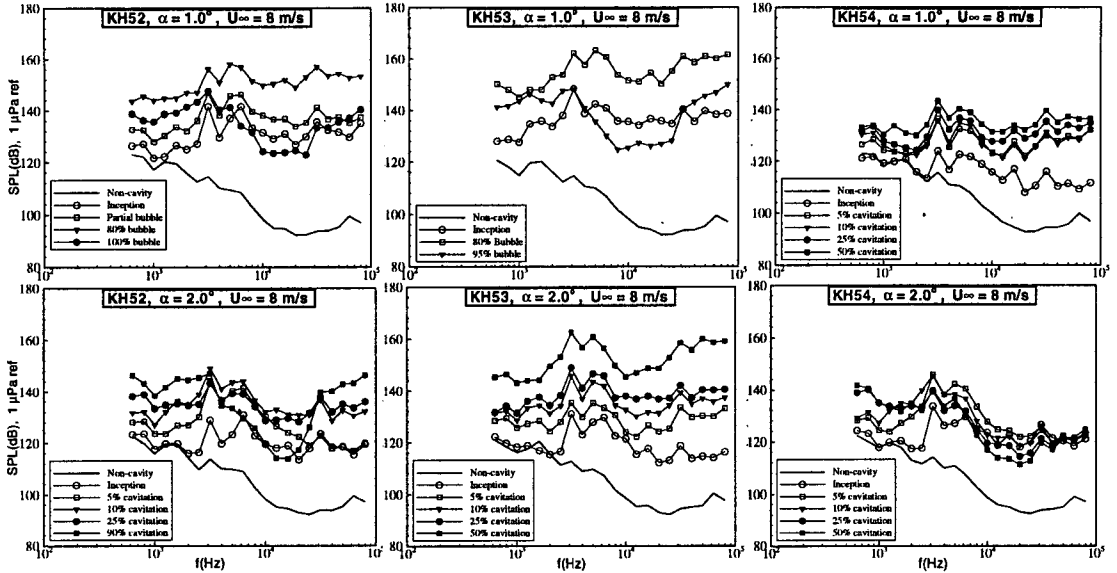


Fig.3 1/3-octave band spectra ( $\alpha = 1^\circ$  &  $2^\circ$ )

이상에서 보듯이  $1^\circ$  와  $2^\circ$  의 받음각에서는 KH54가 다른 두 개의 단면에 비해 소음특성이 우수한 것으로 나타났으며, 이의 원인으로는 기포 캐비테이션이 잘 발생하지 않는 것과 앞날 근처의 챔버분포가  $a=0.8$  평균선 분포에 비하여 비교적 완만한 때문으로 파악된다.

$3^\circ$  이상의 받음각에서는 캐비테이션 초기발생부터 모든 날개단면에서 스펙을 따라 얇은층 캐비테이션이 발생하였다.  $3^\circ$  이상의 받음각에서는 대체로  $2^\circ$  에서의 얇은층 캐비테이션에 의한 소음특성과 유사하나 각 날개단면에 대한 경향이 달라졌으며, 소음수준도 받음각이 커지면서 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 모든 날개에서 초기발생시 고주파에서 소음수준이 증가되는 현상이 나타났으나 10kHz를 중심으로 대체로 5% 캐비테이션에서 가장 높은 소음이 계속되었다.

Fig.4는  $3^\circ$  이상의 받음각에서는 10%와 25% 캐비테이션이 발생된 경우의 소음수준의 비교를 보여준다. KH53 단면은 캐비테이션 초생시를 제외하면 거의 전 범위에 걸쳐 다른 단면에 비하여 약 5~10 dB 정도 낮은 등 특히 고주파에서 좋은 소음특성을 보여준다. 그러나  $2^\circ$  에서 좋은 소

음특성을 보여주었던 KH54는 전주파수 범위에서 KH53보다 높은 소음수준을 보여준다. 한편 KH54의 소음성능은 대부분의 경우 KH52에 비하여 큰 차이는 없으나 약간 우수한 것으로 나타났다.

Fig.5와 Fig.6은 받음각  $4^\circ$  에서 KH52와 KH53에서 발생된 캐비테이션 발생 특성에 관한 사진촬영과 시간신호(Time signal) 계측결과를 보여준다. 10% 캐비테이션에서 살펴보면 KH52의 경우 구름 캐비테이션과 비슷하게 캐비테이션의 조각들이 뒤쪽으로 떨어져 나가는 현상을 볼 수 있지만, KH53의 경우는 얇은층 캐비테이션만이 10%까지 발생된 것을 볼 수 있다. 이에 대한 시간신호의 진폭은 약 4배 이상의 차이를 보이고 있는데, 이를 소음수준으로 환산하면 Fig.4에 보인 평균 약 15dB의 차이와 잘 일치하고 있다. 5% 캐비테이션의 경우에도 10% 캐비테이션 발생의 경우와 비슷한 경향이 나타난다. 보여준다. 25% 캐비테이션의 발생시 KH52는 매우 큰 캐비테이션 조각이 25% 코오드 부근에서 떨어져 나가는 것이 확실하게 보이고 있다. 특히 떨어져 나간 조각의 형상이 25% 코오드 부근에 그대로

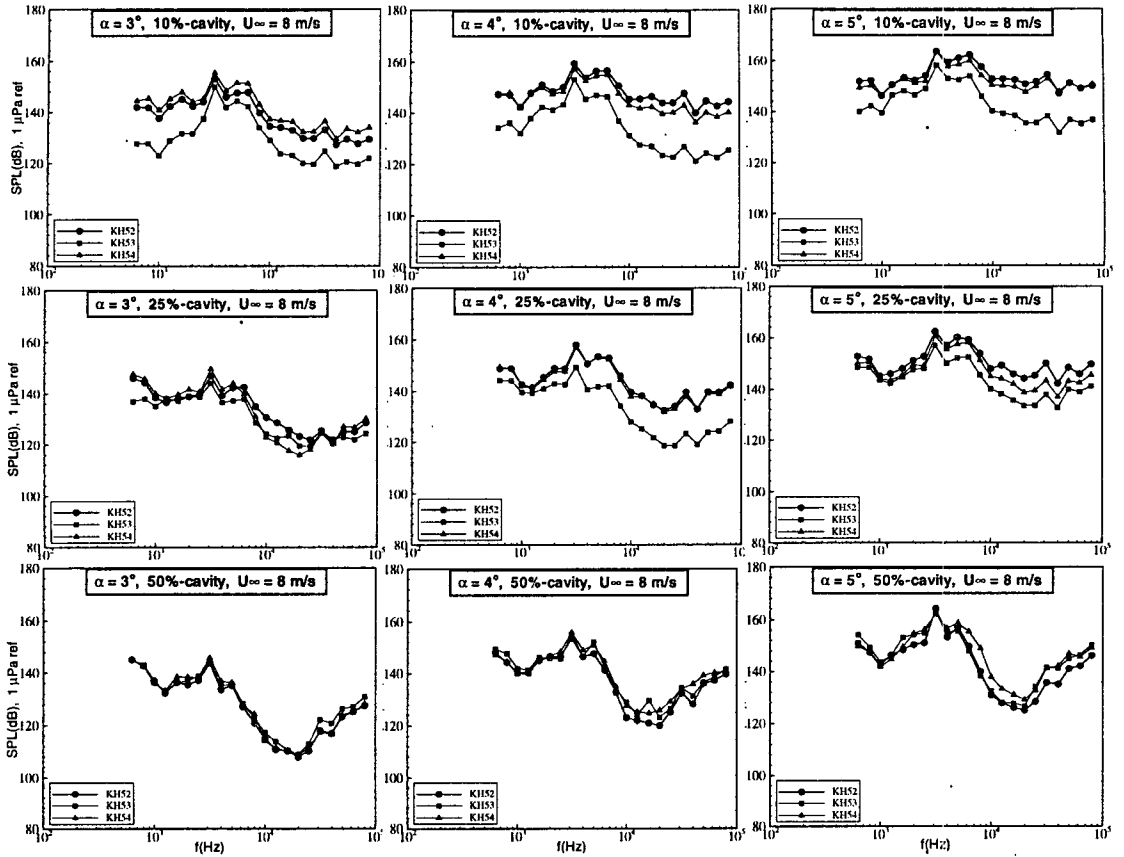


Fig.4 Comparison of 1/3-octave band spectra ( $\alpha = 3^\circ \sim 5^\circ$ )

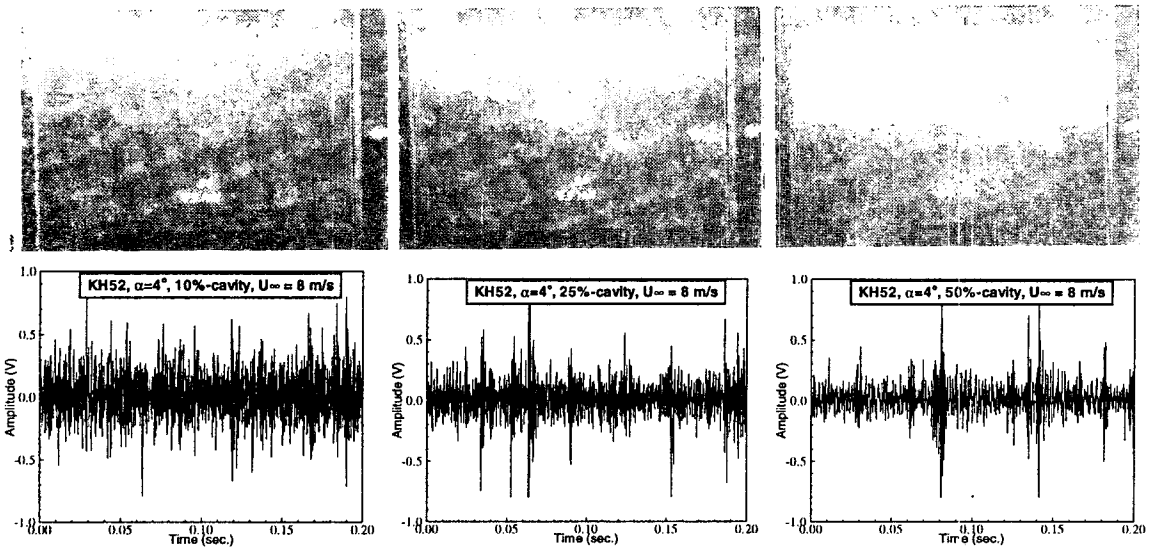


Fig.5 Cavitation behavior and sound pressure fluctuation (KH52,  $\alpha = 4^\circ$ )

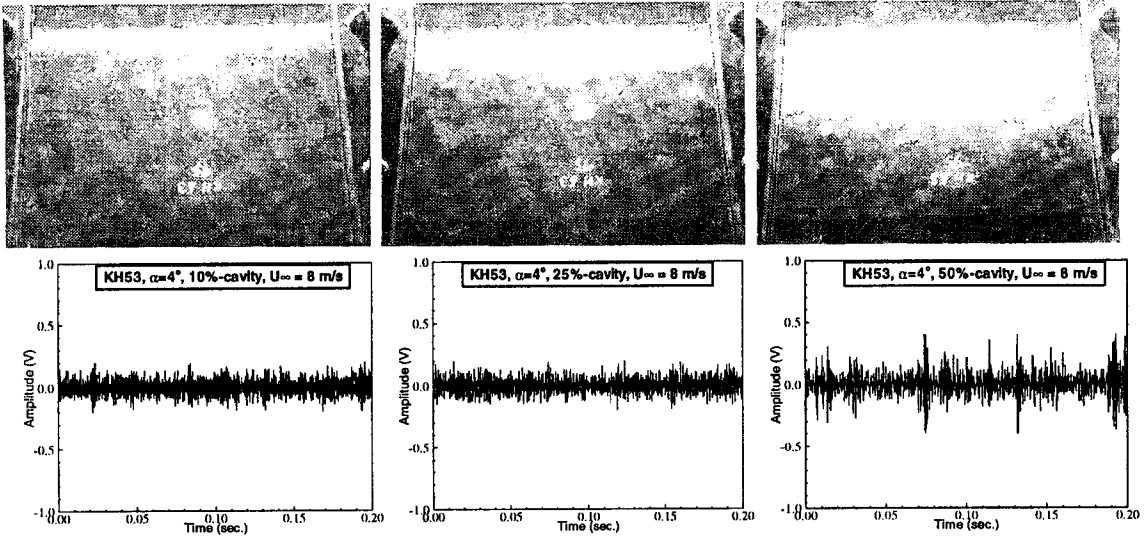


Fig.6 Cavitation behavior and sound pressure fluctuation (KH53,  $\alpha = 4^\circ$ )

남아있는 것이 잘 보여지고 있다. 반면에 KH53의 경우 구름 캐비테이션이 약간 발생하였지만 캐비테이션 조각이 떨어져 나가는 현상은 거의 발생하지 않고 있다. 이에 따른 시간신호의 진폭도 차이를 보여준다. 캐비테이션 초생시에는 두 날개단면의 시간신호는 거의 비슷한 특성을 보여주고 있는데, KH53의 시간신호를 살펴보면 캐비테이션 초생으로부터 25% 캐비테이션까지 시간신호의 진폭에서 차이가 거의 나타나지 않았다. 이런 점으로 미루어 보아 구름 캐비테이션이 소음수준을 상승시키는 주요 원인을 알 수 있다. 그러나 50%의 캐비테이션이 발생한 경우에는 KH52와 KH53의 캐비테이션 사진촬영 및 시간신호에서 명확한 차이를 볼 수 없으며, 소음수준도 Fig.4에서 보듯이 거의 차이가 없다. KH54의 경우 비디오 촬영결과로부터 KH52와 거의 비슷한 캐비테이션 거동을 볼 수 있었다.

받음각이  $3^\circ$  이상에서는 전술한 바와 같이 KH53의 소음성능이 매우 우수한 것으로 나타났으며, 이와같은 차이는 사진촬영 결과에서 보여진 바와 같이 구름 캐비테이션의 발생이 억제되었기 때문으로 판단된다. 구름 캐비테이션의 발생 원인

을 살펴보기 위하여 패널법[5]을 사용하여 각 받음각에 대한 동일한 캐비테이션 길이에서 캐비테이션 두께를 계산하였다. 캐비테이션이 약 10% 및 25%가 발생할 때에는 KH53 단면이 다른 날개에 비하여 캐비티 두께가 얇다는 것을 계산결과로부터 알 수 있었으며, KH52 및 KH54는 거의 유사한 결과를 보여주었다. 따라서 받음각이  $3^\circ$  이상에서 KH53 단면의 소음수준이 낮은 이유는 캐비티의 두께가 얇기 때문으로 판단되며, 캐비테이션의 두께가 두꺼울 경우에는 얇은층 캐비티가 손쉽게 구름 캐비티로 변화될 수 있으며, 이 때의 소음수준은 급격히 상승할 것으로 추정된다. 구름 캐비테이션이 발생하면 소음은 고주파에서 크게 높아짐은 많은 연구결과에서 밝혀지고 있다[6, 7]. 캐비테이션이 50% 발생하였을 때는 날개단면들의 캐비테이션 두께가 거의 유사하며, 소음수준의 차이도 거의 없다는 것을 알 수 있었다.

2차원 날개에서의 소음수준의 형태(pattern)는 캐비테이션의 발생 유무에 크게 좌우되지만, 캐비테이션이 발생한 이후에도 일정한 패턴을 갖는 것을 볼 수 있다. 얇은층 캐비테이션의 경우

발생면적이 5%가 되면 대체로 소음수준은 최고수준에 이르러 1 kHz 이하에서도 약 20 dB 정도 증가한다. 그러나 캐비테이션이 코오드의 25% 이상 발생하게 되면 10~20 kHz 근처에서는 10 dB~25 dB 정도 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이러한 현상은 캐비테이션의 발생면적이 커지면, 캐비티 간의 간섭이 이루어져 특히 캐비테이션 소음에 영향을 주는 기포의 수축·붕괴 과정이 지연되고 있기 때문으로 보인다[8]. 그러나 80 kHz 근처에서는 5% 캐비티가 발생하였을 경우와 유사한 수준으로 회복된다. 이러한 현상은 얇은 층 캐비테이션이 구름 캐비테이션으로 변화되는 과정으로 설명될 수 있다[9].

한편 프로펠러에서의 구름형 캐비티는 얇은층 캐비티가 과다 발생에서 급격히 소멸되는 과정에서 발생하는 것으로 알려져 있으며[3, 4], 얇은층 캐비티는 잠시 불안정한 두꺼운층 캐비티를 거쳐 구름 캐비티로 전이된다. 이 때 하나의 큰 기포에 병합되어 있는 무수히 많은 기포들은 큰 기포의 병합능력이 사라져 개개의 기포로 형성된 기포군으로 바뀌면서 각각의 기포들이 독립적으로 소멸, 붕괴하게 된다. 이때 하나의 기포가 붕괴할 때 전달하는 높은 압력은 다른 기포의 붕괴를 촉진시켜 기포군의 동시 다발적인 붕괴현상을 일으키며, 따라서 이러한 구름 캐비티는 프로펠러 날개면에 심각한 침식현상을 야기시킬 뿐 아니라 소음수준도 최고치에 도달하는 것으로 보고되고 있다[6, 7]. 그러나 2차원 날개단면에서는 3차원 날개 또는 프로펠러에서와는 달리 약 5% 정도의 얇은층 캐비테이션이 발생하였을 때 2차원 캐비티 후류의 불안정한 유동으로 인하여 이미 구름형 캐비티가 발생한 것으로 추정된다.

#### 4. 결 언

3종류의 날개 단면에 대하여 캐비테이션 거동 및 소음특성을 실험적으로 조사하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 고부하 프로펠러용 단면인 KH53은 캐비테

이션 초생성능이 매우 우수하며, 받음각 3° 이상에서 구름 캐비테이션이 거의 발생하지 않는 안정된 얇은층 캐비테이션이 발생되어 우수한 소음특성을 보여주고 있다. 그러나 받음각 2° 까지도 기포 캐비테이션이 발생되므로, 프로펠러에 적용시 기포 캐비테이션의 발생 가능성이 있다.

- 2) 새로 설계된 수중익 KH54는 기하학적 받음각이 작은 경우 (1° 와 2° ) 기포 캐비테이션이 억제되어 우수한 소음특성을 보여준다. 그러나 3° 이상에서 KH52와 같이 구름 캐비테이션이 유발되는 단점이 있다.

- 3) 프로펠러에서는 캐비테이션을 피할 수 없는 경우도 고려하여야 한다. 이때에는 캐비테이션 초기 발생 성능보다는 캐비테이션이 발생된 이후의 거동에 관심을 가져야 한다. 기포 캐비테이션이나 얇은층 캐비테이션이 구름 캐비테이션으로 발전된다면 오히려 소음수준이 크게 증가될 수 있다.

- 4) 1)과 2)의 결과로 미루어 볼 때 KH53 단면의 장점과 KH54 단면의 장점을 잘 살릴 수 있는 단면이 다시 설계되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 '98년도 과학기술처에서 시행한 기관 공유사업 연구 결과의 일부이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Abbot, P. A., Celuzza, S. A. and Etter, R. J. "The acoustic characteristics of the naval surface warfare center's Large Cavitation Tunnel", FED-Vol. 168, Flow Noise Modelling, Measurement and Control, ASME 1993
- [2] 안종우, 김은찬 외, "고부하 저소음 프로펠러 개발(I)", 한국기계연구원 보고서, 보고서번호 UCN033-2059.D, 1997. 12.
- [3] D. Lange, et. als, "On the Mechanism of Cloud Cavitation-Experiment and Modelling", Int'l Symposium on Cavitation, Tokyo in Japan, 1995.

- [4] M. Pham, et. als, "Investigation of Unstable Cloud Cavitation", 3rd International Symposium on Cavitation, Grenoble in France, 1998.
- [5] Lee, C.-S., Kim, Y.-G., Lee, J.-T., "A potential-based panel method for the analysis of a two-dimensional super- or partially cavitating hydrofoils," J. of Ship Research, Vol. 36, No. 2, June, 1992.
- [6] S. Sunnersjoe, "Propeller Noise Prediction", SSPA Highlight 2, 1986.
- [7] Kato, H., "Complex Structure of Sheet-Cloud Cavitation", Third International Conferences on Pumps and Fans, Beijing, 1998.
- [8] Arakeri, V., Shanmuganathan, V., "On the Evidence for the Effect of Bubble Interference on Cavitation Noise", JFM, Vol. 159, 1985.
- [9] 안종우, 강관형, 송인행, 김경열, "수중익의 캐비테이션 소음계측 및 캐비티 기포 거동 해석", 선박해양기술, 제 27호, 1998. 12.