大 韓 造 船 學 會 論 文 集
第 37卷 第 4號 2000年 11月

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 37, No. 4, pp. 40-47 November 2000

수중익의 캐비테이션 소음 계측 및 캐비티 기포 거동 해석

안종우*, 강관형**, 송인행*, 김경열*

Measurement of Cavitation Noise of a Hydrofoil and Prediction of Cavity Bubble Behavior

Jong-Woo Ahn*, Kwan-Hyoung Kang**, In-Haeng Song* and Kyung-Youl Kim*

요 약

수중익의 캐비테이션 소음이 캐비테이션 터널에서 측정되었다. 캐비테이션이 초기 발생하면 소음수준이 급격히 증가되며, 기포간에 상호간섭이 나타나지 않는 캐비테이션 수까지 증가된다. 그러나 캐비테이션 수가 더욱 감소하여 기포간에 상호간섭이 나타나면, 오히려 소음수준이 감소되는 것으로 나타났다. 기포의 궤적과 체적의 변화는 각각 Lagrangian 추적법 및 Kirkwood-Bethe 가정하에 모형화된 방정식을 사용하여 해석하였다. 기포 체적변화의 수치계산 결과는 실험 결과와 비교적 일치되는 것으로 나타났다.

Abstract

The cavitation noise of a hydrofoil is measured in a cavitation tunnel. It is exhibited that the noise level sharply increases with the inception of cavitation and increase with the decrease of the cavitation number until a moderate cavitation number. Below the cavitation number, the trend is reversed, which may be resulted from the interference effect between cavities. The trajectory of bubble is predicted by using the Lagrangian method. Meanwhile the size of the bubble is predicted based on the Kirkwood-Bethe approximation. The predicted results for the bubble size are compared with the experimental results. It is shown that the numerical method predicts the time history of cavities fairly well.

접수일자: 1999년 5월 25일, 승인일자: 2000년 8월 21일

* 정회원, 한국해양연구소 선박해양공학분소 (E-mail: ajwprop@kriso.re.kr)
** 정회원, 삼성중공업 (주) 조선플랜트연구센터

1. 서 론

선박 프로펠러 및 수중익(hydrofoil) 등에서 발생되는 캐비테이션은 추진 효율의 저하와 함께 소음과 진동을 유발시킨다. 특히 캐비테이션에 의하여 발생한 소음은 높은 난류강도를 갖는 유동소음에 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 발생되는 소음을 최소화하여야 한다.

선박 프로펠러의 경우 다양한 형태의 캐비테이션을 피할 수 없기 때문에 캐비테이션 형태에 따른 소음 특성을 실험적으로 파악한 후 이를 기반으로 소음예측을 위한 해석적 방법이 개발되어야 한다. 대부분의 캐비테이션은 기포들의 군집체이며, 캐비테이션 소음은 이러한 기포의 체적변화에 의해 발생된다. 또한 소음은 캐비테이션 발생 빈도에 비례하므로, 캐비테이션 소음을 예측하기 위해서는 캐비테이션 기포의 체적변화 및 캐비테이션 발생 빈도와 밀접한 관계가 있는 공동핵의 궤적을 예측할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 여러 가지 형태의 캐비테이션 중에서 기포 (bubble) 캐비테이션의 특성을 파악하기 위하여 이차원 유동에서 기포 캐비테이션이 용이하게 발생될 수 있는 수중익을 제작하였다. 받음각 및 캐비테이션 수를 변화시키면서 캐비테이션 거동에 대한 소음특성과 시간신호의 계측 및 사진촬영을 수행하였다. 사진은 캐비테이션의 비정상(unsteady) 거동을 파악하기 위하여 동일한 조건에서 각각 5장씩 촬영하였다.

기포의 궤적은 유동장의 해석 결과를 이용하여 Lagrangian 추적법을 적용하여 구하였고 체적의 변화는 Kirkwood-Bethe 가정하에 모형화된 방정식을 사용하여 해석하였다. 기포 체적 변화의 해석에서는 기공율(void fraction)이 작은 경우를 가정하여 기포간의 간섭 효과나 기포에 의한 유동장의 변화는 무시하였다. 해석된 결과는 사진촬영에서 관찰된 결과와 비교하였다.

2. 기포 거동 해석

주어진 유동장에서의 공동기포의 궤적은 다음의 방정식을 통하여 구해진다[1]

$$\rho_a \frac{d\,\boldsymbol{u}_d}{dt} = -\frac{3\rho\, C_D}{8R}\,|\boldsymbol{u}_r|\,\boldsymbol{u}_r + (\rho_a - \rho)\,\boldsymbol{g} - \rho\, C_A \frac{d\boldsymbol{u}_r}{dt} + \rho \frac{D\,\boldsymbol{u}}{Dt}, \tag{1}$$

위에서 u_d 는 기포의 속도 벡터, u는 유속 벡터, $u_r = u_d - u$, ρ_a는 기포의 밀도, ρ는 물의 밀도, $g = (0, -g)$는 중력 가속도 벡터, $R(=D/2)$은 기포의 반경, C_D는 기포의 항력 계수, C_A는 기포의 부가질량 계수이다.

시간에 따른 기포 반경의 변화 R(t)는 Kirkwood-Bethe 가정하에 다음의 방정식을 해석함으로써 구할 수 있다[2].

$$R\frac{d^2R}{dt^2}\left(1-\frac{V}{C}\right) + \frac{3}{2}\left(1-\frac{V}{3C}\right)\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \left(1+\frac{V}{C}\right)H - \frac{V}{C}\left(1-\frac{V}{C}\right)R\frac{dH}{dR} = 0 \tag{2}$$

위에서 V = dR/dt, C와 H는 각각 기포 표면에서의 음파의 전파속도와 엔탈피이다.

위의 식 (1), (2)를 해석하기 위해서는 유동장의 속도 벡터와 동압이 주어져야 한다. 유동장은 포텐셜 유동을 가정하여 패널법을 이용하여 해석하였다. 식 (1), (2)는 미지수 R(t)에 의하여 상호 연계되어 있다. 따라서 두 방정식은 유동장의 해석을 통하여 얻어진 유속 벡터와 동압을 이용하여 동시에 해석된다.

3. 실험장치 및 방법

이차원 수중익의 기포 캐비테이션 관찰 및 소음계측 실험은 KRISO의 캐비테이션 터널 제 1 계측부(600㎜×600㎜)에서 수행되었다. 터널은 청수(fresh water)로 채워져 있고 실험시 수중의 공기 함유량은 45%이하로 유지되었다. 이차원 유동의 재현 및 정확한 소음 측정을 위하여 캐비테이션 터널 안에는 수중익 만이 설치되도록 스팬을 600㎜로 제작하였다. 기존의 실험방법은 실험장

치 자체에서 발생되는 소음이 너무 커서 수중익에서 발생되는 소음을 계측하기 어려웠다[3].

Fig.1 Shape of 2-D Hydrofoil (KH55)

본 연구에서 사용된 수중익은 기포 캐비테이션의 특성을 쉽게 파악할 수 있도록 KRISO에서 개발된 일련번호 KH55의 수중익으로 코오드는 150㎜이다(Fig.1 참조). 소음특성 시험을 위하여 수중익은 Fig.2와 같은 방식으로 캐비테이션 터널에 설치되었으며, 각도 조절장치를 별도로 부착하여 받음각을 조절하였다[4]. 소음 계측을 위한 수중 청음기(hydrophone)는 크기가 소형이면서 감도가 좋은 B&K Type 8103를 사용하였다. 수중 청음기는 종형 축대칭체 내부에 장착되었고 이 축대칭체는 벽면에 부착되어 설치되었다.

수중청음기를 이용하여 계측된 신호는 전하형(charge type) 증폭기에서 증폭되고, 이 신호에서 500Hz 이하의 저주파수 성분을 Krohn-Hite사의 KH3364 필터를 사용하여 제거되었다. 필터를 거친 신호는 100㎑까지 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.[5]

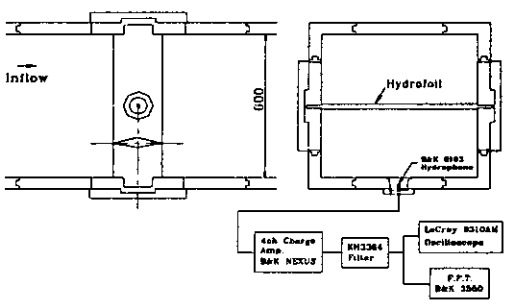

Fig.2 Experimental setup

실험시 유속은 8.0㎧로 고정되었고, 이때의 레이놀즈 수는 코오드를 기준으로 0.89×10^6이다. 수중익의 받음각은 0°, 2°, 4°로 변화시켰으며, 각각의 받음각에서 캐비테이션 초기발생 조건을 관찰하고, 초기발생 조건으로부터 캐비테이션 수를 0.05 간격으로 조절하면서 소음을 계측하고 캐비테이션 현상을 카메라로 촬영하였다. 사진은 동일 조건에서 캐비테이션 거동의 변화를 관찰하고자 각각의 조건에서 5장씩 촬영되었다.

4. 결과 및 토의

Fig.3은 받음각 0°, 2°, 4° 인 경우에 소음계측 결과이다. 각각의 받음각에서 캐비테이션 수의 변화와 함께 계측된 소음수준은 1/3-octave band 스펙트럼의 음압 형태로 그 차이를 보여준다. 수직축은 기준 음압(P_{ref})이 1μPa인 1/3-octave band 음압수준(SPL: Sound Pressure Level)을 나타내며, 수평축은 1/3-octave band의 중심주파수를 나타낸다. Fig.4는 같은 조건에서 촬영된 수중익 상에서의 캐비테이션 양상을 보여주고 있다. 받음각이 커짐에 따라 기포 캐비테이션의 시작점이 앞날쪽으로 이동됨을 볼 수 있다.

Fig.3에서 볼 수 있듯이 캐비테이션이 발생되지 않는 조건에서의 소음 수준은 받음각의 변화에 따라 큰 차이를 볼 수 없다. 캐비테이션이 초기 발생한 조건(σ_n=0.55 at α=0° , σ_n=0.65 at α=2° , σ_n=0.86 at α=4°)에서는 10㎑를 중심으로 소음수준이 30~40dB정도 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 캐비테이션의 초기 발생은 육안 관찰을 기준으로 하였으나, 기포 캐비테이션의 경우 초기발생시 청각에 의해서도 식별이 가능할 정도로 순간적인 소음증가를 느낄 수 있었다. 초기발생 조건으로부터 캐비테이션 수를 0.05 간격으로 조절하면서 계측된 소음수준은 사진촬영 결과와 함께 분석될 수 있다. 받음각 0° 에서 캐비테이션 수 0.4까지 소음수준이 증가됨을 알 수 있다. 그러나 캐비테이션수 0.35에서는 캐비테이션 양이 증가했음에도 불구하고 소음수준은 10㎑

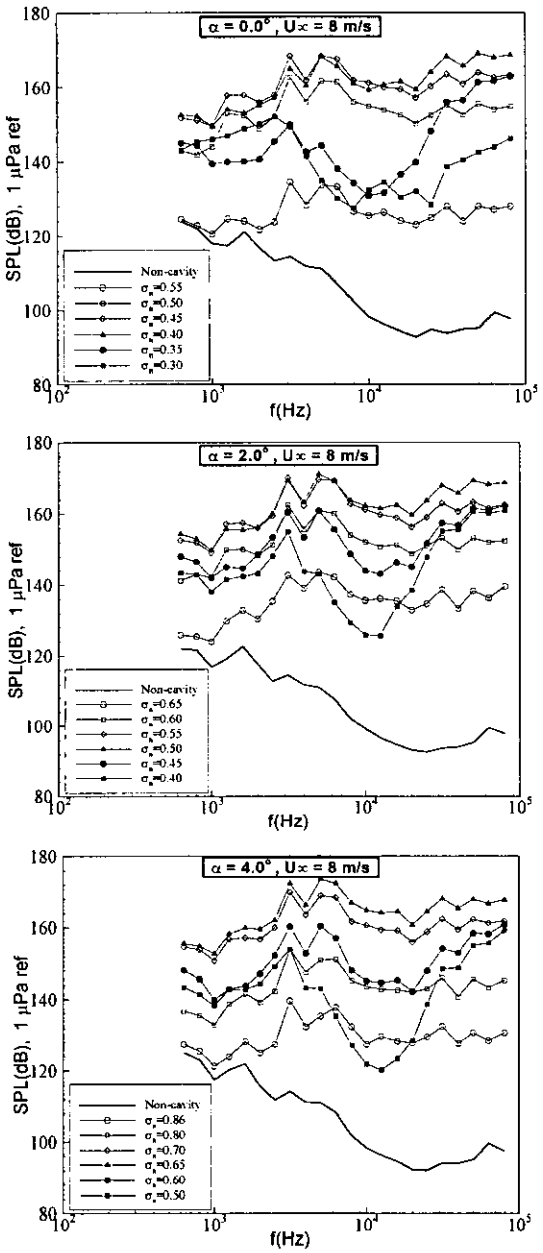

Fig.3 1/3 Octave band spectra (KH55)

를 중심으로 감소됨을 볼 수 있다. 이와같은 현상은 2° 와 4° 에서도 나타나는데, 사진촬영에서 나타난 한가지 공통점은 캐비테이션 수가 감소하면서 기포의 수와 크기가 증가하더라도 기포 상호간에 접촉이 없는 정도까지는 소음 수준이 증가한다. 그러나, 하지만 기포의 수가 더욱 많아져서 (캐비테이션수가 감소되어) 기포들 사이에 상호간섭이 발생되면 소음수준은 낮아지게 된다[6].

대신 구름 캐비테이션(cloud cavitation)의 발생으로 30㎑이상에서 소음수준은 증가되는 현상이 나타난다. 캐비테이션 수가 더욱 감소하여 수중익 뒤쪽으로 캐비테이션이 발달되면(σ_n=0.35, α=0°) 30㎑이상의 고주파에서도 소음수준은 감소되는 현상이 나타난다.

받음각이 2° , 캐비테이션수가 0.45인 경우에는 Fig.4에 나타난 것과 같이 캐비테이션 양의 차이가 매우 큰 사진촬영 결과를 볼 수 있다. 이는 받음각 2° 와 4° 에서 구름 캐비테이션이 발생할 경우 캐비테이션 양의 주기성에 기인되는 현상으로 수중익 뒤쪽으로 캐비테이션이 완전히 발달할 때까지 나타난다. 구름 캐비테이션의 주기성을 정확하게 계측하기 위해서는 적어도 초당 1000 프레임 이상을 촬영할 수 있는 고속 카메라를 이용하여야 한다. 앞으로 캐비테이션 현상을 정확히 관찰하기 위해서는 이와 같은 장비가 활용되어야 할 것으로 사료된다. 캐비테이션 수 0.40에서도 비슷한 현상이 나타났으며 소음수준의 계측결과도 비슷한 경향을 보여준다.

Fig.5은 받음각 2°에서 캐비테이션 수의 변화에 따른 시간신호 계측결과를 보여준다. 캐비테이션 수 0.60에서는 기포가 가끔씩 발생되었는데, 이와같은 현상이 시간신호에서도 잘 나타나 있다. 캐비테이션 수 0.50에서는 기포 상호간에 접촉이 없으면서 약간의 구름 캐비테이션도 발생되어 전반적인 음압이 높고 고주파의 극값(peak value)들도 볼 수 있다. 캐비테이션 수 0.45에서는 기포 상호간에 접촉이 나타나면서 전반적인 소음수준이 떨어졌지만, 고주파의 극값이 남아있는 시간신호를 볼 수 있다. 캐비테이션 수 0.40에서는 기포의 수가 더욱 많아져 기포 상호간에 간섭이 심해지면 전반적인 소음수준은 낮아지지만 주기적으로 발생하는 구름 캐비테이션에 의하여 고주파의 음압성분이 가끔씩 나타난다. 그러나, 캐비테이션 수가 더욱 낮아져 구름 캐비테이션이 나타나지 않는 조건이 되면 고주파의 극값은 나타나지 않는다

(a) $\alpha = 0^{\circ}$ (b) $\alpha = 2^{\circ}$ (c) $\alpha = 4^{\circ}$

Fig.4 Cavitation behavior

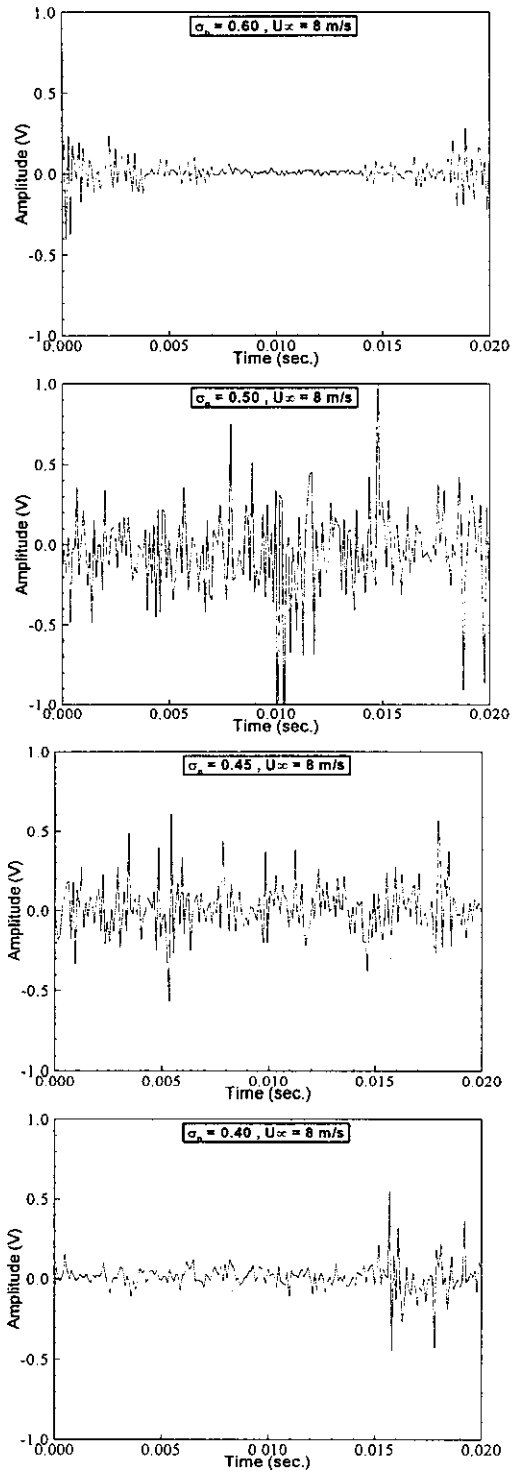

Fig.5 Sound pressure fluctuation ($\alpha = 2°$)

기포의 궤적 및 체적 계산은 Table 1의 조건에서 수행하였다. Table 1에서 $(x_o/c, y_o/c)$는 코오드 길이로 무차원화 된 기포의 초기 출발 위치이고, R_o는 초기 기포핵의 크기이다.

Table 1 Calculation condition for bubble behaviors

α (deg.)	σ_n	$(x_o/c, y_o/c)$	R_o (mm)
0	0.45	(-1, 0.001)	0.125
2	0.50	(-1, -0.045)	0.125
4	0.65	(-1, -0.080)	0.125

Fig.6은 위의 각각의 조건에 대하여 앞서의 식 (1), (2)를 해석하여 얻어진 기포의 궤적과 체적을 나타내고 있다. 먼저 기포핵의 궤적을 살펴보면 기포핵이 수중익의 앞날에 접근하면서 점차로 유선으로부터 벗어나 수중익으로부터 밀려나다가 앞날 부분을 지나서는 다시 수중익으로 끌려오는 양상을 공통적으로 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 물체 전부에 형성된 압력 구배에 의한 것으로서 "screening effect" 라 명명된다. 기존의 해석 결과에 의하면 기포핵의 크기가 클수록 물체로부터 밀려나는 정도가 크다[7].

각각의 그림에는 실험시 획득된 사진을 확대하여 얻어진 기포의 크기와 수치해석에 의한 결과가 서로 비교되어 있다. 본 실험에서는 실험 장치의 한계로 기포의 삼차원적 형상을 얻을 수 없었고 평면상의 형상만을 얻을 수가 있었다. 기포의 크기는 기포를 반구형으로 가정한 후, 컴퓨터의 그래픽상에서 기포의 형상에 가장 닮은 원의 직경을 구함으로써 얻어졌다. 기포의 평면상의 직경을 이와 같은 방식으로 구하는데 발생 가능한 오차 한도는 1.5mm인 것으로 추정된다.

기포는 그 궤적에 따라서 크기가 달라질 수 있다. 사진들에서 나타나는 바와 같이 동일한 위치에서도 다른 크기의 기포가 존재한다. 기포의 크기의 변화에 대한 수치해석 결과의 신뢰도를 올바르게 평가하기 위해서는 하나의 기포가 일정한 위치에서부터 성장하는 과정에 대한 데이터가 요구

된다. 그러나 이것이 불가능한 경우는 사진상에 나타난 결과를 바탕으로 임의의 위치에서의 최대 크기는 유추가 가능하다. 즉, Fig.6에서와 같이 기포의 크기를 수평 방향의 위치에 따라서 나타내면 기포의 크기의 envelope가 형성되는데 이를 통하여 그 지점에서의 기포의 최대 크기의 추정치를 구할 수가 있다.

Fig.6에서는 앞서 Table 1에 표기한 조건에 대하여 계산된 캐비테이션 기포의 크기를 실험치와 비교하였다. 전반적으로 받음각이 0° , 2° 인 경우에 있어서 기포의 크기가 비교적 작은 경우에 대해서는 수치 해석 결과가 실제 크기의 변화를 어느 정도 신빙성 있게 예측하고 있다고 판단된다. 한편, 기포 캐비테이션에 의해 유발되는 소음은 주로 단일극 형태이므로 소음 수준 및 스펙트럼은 기포의 체적의 변화와 직결되어 있다. 앞서 검증한 바와 같이 기포 체적의 변화 양상은 현재의 수치 해석 방법을 이용하여 예측이 가능하다. 그러므로 본 해석법은 향후 기포 캐비테이션에 의하여 발생되는 소음의 수준 및 스펙트럼을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 소음 수준은 캐비테이션 발생과 함께 급격히 증가하며, 캐비테이션 수의 감소와 함께 기포 상호간에 접촉이 없는 정도까지는 증가하나 발생된 기포의 수가 증가하면서 기포 상호간에 접촉되는 경향이 높아지면 기포간의 간섭 효과에 의하여 소음이 10㎑를 중심으로 감소하는 경향을 나타낸다.
2) 구름 캐비테이션의 경우 30㎑이상의 고주파에서 높은 소음 수준을 보여 주지만, 캐비테이션 수가 더욱 감소되어 구름 캐비테이션이 사라지면 고주파의 소음도 감소된다.
3) 수치해석 결과와 실험 결과를 비교하여 본 바, 본 수치해법이 기포의 체적의 변화를 비교적 잘 예측한다는 것을 입증하였다.

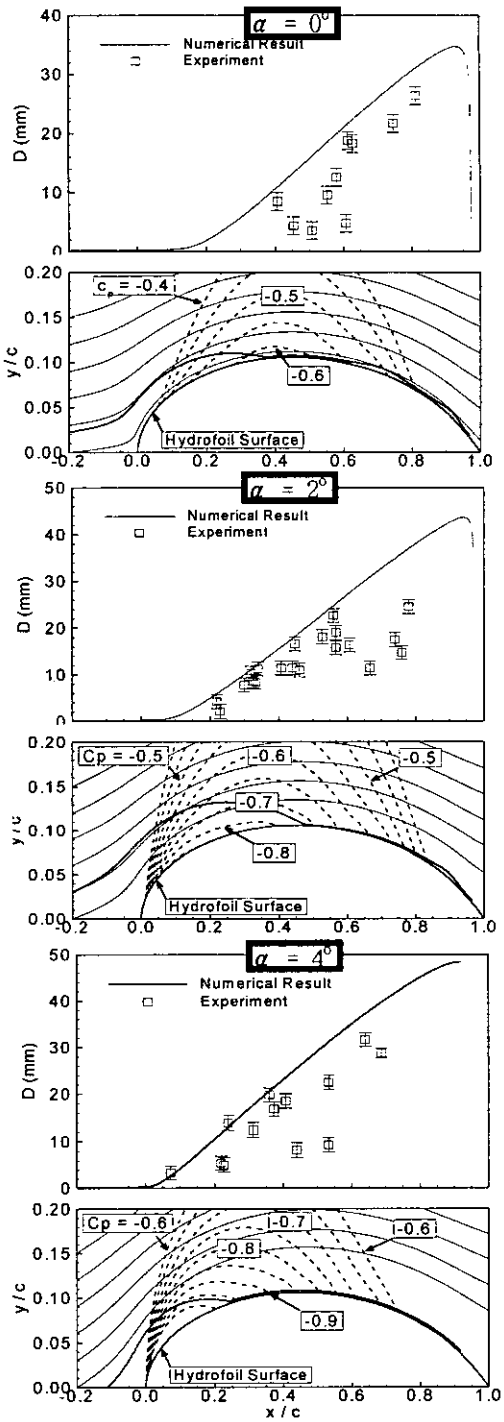

Fig.6 Bubble size and trajectory: thick solid line=trajectory; thin solid line=streamline; dashed line=pressure contour

후 기

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

참 고 문 헌

[1] Lee, C. M., Kang, K. H., and Cho, N. S., "Trapping of Leaked Oil with Tandem Oil-Fences with Lagrangian Analysis of Oil Droplet Motion", J. Offshore Mech. and Arctic Eng., Trans. of the ASME, vol. 120, 1998.

[2] Knapp, R. T., Daily, J. W., and Hammitt, F. G., "Cavitation", McGraw-Hill, 1970.

[3] 안종우, 김은찬 외, "고부하 저소음 프로펠러 개발(I)", 한국기계연구원보고서, 보고서번호 UCN033-2059.D, 1997.

[4] 안종우, 송인행, 김기섭, 김경열, 문일성, "2차원 날개단면들의 캐비테이션 소음 특성", 대한조선학회 논문집 제 37권 제 2호, 2000. 5.

[5] 안종우, 김기섭, 이진태, 김재승, 김상열, "수중소음 계측을 위한 KRISO 캐비테이션 터널의 음향학적 특성", 대한조선학회 논문집 제 37권 제 1호, 2000. 2.

[6] Arakeri, V. and Shanmuganathan, V., "On the Evidence for the Effect of Bubble Interference on Cavitation Noise", J. Fluid Mech., Vol. 159, 1985.

[7] Brennen, C. E., "Cavitation and Bubble Dynamics",Oxford Univ. Press, New York, 1995.

안종우

김경열