

기포 캐비테이션의 거동 해석 및 수중의 캐비테이션의 소음 제어

◦강관형, 안종우, 송인행, 김기섭◦

Analysis of bubble cavitation and control of cavitation noise of hydrofoils

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

ABSTRACT

The bubble cavitation and cloud cavitation are the major sources of cavitation-induced sound and vibration. A numerical method which predicts the trajectory and volume change of a cavity is developed, to predict the cavitation noise of a body. It is shown, by using the numerical method, that the cavitation inception and events rate is strongly dependent on the screening effect caused by the pressure gradient around a body, which is confirmed experimentally. Additionally, the effectiveness of a cavitation control method utilizing air injection is investigated experimentally. It is demonstrated that the noise level of the cloud cavitation can be significantly reduced by the air-injection method.

1. 서론

선박의 프로펠러, 수중익 등에서 발생하는 캐비테이션(cavitation)은 추진 효율의 저하는 물론 강한 소음 방사와 선박 구조물의 진동을 유발시킨다. 특히 소음은 승객 및 승무원에게 피로감과 불쾌감을 줄 뿐 아니라 전함의 경우 상대방에게 탐지되어 그 위치가 노출되는 위험을 초래한다. 따라서 추진 시스템이나 수중익, 부가물 등은 캐비테이션 발생이 최소화될 수 있도록 설계되어야 한다.

캐비테이션은 그 형태에 따라서 기포 (bubble) 캐비테이션, sheet 캐비테이션, 보텍스 (vortex) 캐비테이션, 구름 (cloud) 캐비테이션 등으로 분류 된다. 그 중에서 기포 캐비테이션과 구름 캐비테이션은 소음 및 진동의 주요인이 되고 있다. 캐비테이션의 제어를 위해서는 각각의 캐비테이션 형태에 따른 그 거동의 충분한 이해가

필요하다. 한편, 기포 캐비테이션은 비교적 해석적 접근이 가능한 반면 구름 캐비테이션은 해석이 매우 난해하다. 따라서 본 연구에서는 캐비테이션 거동의 가장 기본적인 형태인 기포 캐비테이션 발생 및 거동을 예측할 수 있는 방법을 개발하였으며 아울러 기포 주입을 통하여 구름 캐비테이션에 의한 소음을 제어하는 방법의 유효성을 실험적으로 검토하였다.

주어진 물체 형상에 대한 기포 캐비테이션에 의한 소음을 예측하기 위해서는 캐비테이션 기포의 체적 변화 및 캐비테이션 발생 빈도와 밀접한 관계가 있는 캐비테이션 핵의 궤적을 예측할 수 있어야 한다. 기포의 체적 변화에는 여러 인자가 관련되어 있으나 직접적으로 가장 큰 영향을 미치는 것은 기포 주변의 압력이다. 기포 주변의 압력은 물체 주변의 압력 분포와 기포의 이동 경로에 의해서 결정된다. 결국 기포의 체적변화를 예측하기 위해서는 유동장 및 기포의 이동 등이 동시에 해석되어야 한다. 본 해석에서는 기공률(void fraction)이

*삼성중공업㈜ 조선플랜트연구소

**한국해양연구원 해양시스템안전연구소

작은 경우를 가상하여 기포간의 간섭 효과나 기포에 의한 유동장의 변화는 무시하였다. 기포의 궤적은 Lagrangian tracking 방법을 사용하여 해석하였다. 기포 체적의 변화는 Kirkwood-Bethe 근사 방법하에 모형화 된 방정식을 사용하여 구하였다. 본 해석 방법을 과거 실험적 연구에서 대표적으로 사용되어 온 반구형 (hemispherical) 및 Schiebe 두형체(headform)를 선택하여 우선적으로 적용하였다.

한편, 공기 주입이 캐비테이션 특성 제어 측면에서 매우 긍정적인 효과가 있다는 것은 잘 알려져 있으나 대부분 진동하지 않거나 gust가 없는 수중익 또는 두형체에 대하여 연구가 수행되어 왔다. 일부 함정의 경우에는 프로펠러 캐비테이션 제어를 위하여 실제로 공기 주입 방법이 적용되고 있으나 제어 특성은 잘 알려져 있지 않고 현상 규명도 불충분한 상태이다. Fig.1은 현재 프로펠러에 적용되고 있는 공기 주입 방법의 한 형태를 보여주고 있다. 허브 근처에서의 공기 주입은 주로 캐비테이션에 의한 날개 표면의 침식을 줄이기 위한 것이고, 날개 끝 부분으로의 공기 주입은 날개 끝 보오텍스 캐비테이션으로 인한 소음을 감소시키기 위한 것이다.

선박 프로펠러는 선미에 위치하므로 선체 반류의 영향을 강하게 받게 된다. 이와 같은 효과는 캐비테이션 터널에서 수중익을 강제로 요동 시킴으로써 부분적으로 모사할 수 있다. 이러한 모사 방법은 여러 선행 연구에서 이용되어 왔다[1,2]. 본 연구에서는 이러한 효과를 모사할 수 있는 장치를 설계 제작하여 캐비테이션의 비정상(unsteady) 효과까지 고려하여 공기 주입으로 인한 캐비테이션 소음 제어 효과에 대하여 실험적으로 검토하여 보았다.

2. 기포 캐비테이션의 거동 해석

주어진 유동장하에서의 캐비테이션 기포의 궤적은 아래의 방정식을 통하여 해석될 수 있다[3].

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

위에서 \mathbf{u}_d 는 기포의 속도 벡터, \mathbf{u} 는 유속 벡터, $\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_d - \mathbf{u}$, ρ_a 는 기포의 밀도, ρ 는 물의 밀도, $\mathbf{g} = (0, -g)$ 는 중력 가속도, R 은 기포의 반경, C_D 는 저항 계수, C_A 는 부가 질량 계수이다.

기포의 반경(R)은 Kirkwood-Bethe 근사 가정하에 유도된 아래의 방정식을 통해 구해진다[4].

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

위에서 $V = dR/dt$, C 와 H 는 각각 기포 벽면에서의 음파의 전달 속도와 엔탈피이다. 식 (1), (2)의 해석을 위해서는 유동장의 유속 벡터와 압력 분포를 알 수 있어야 한다. 본 연구에서는 유동장은 포텐셜 유동 가정하에 패널법을 통하여 해석되었다. 식 (1), (2)는 미지수 R 에 의하여 상호 연성 되어 있으므로 앞서 얻어진 유동장 해석 결과를 이용하여 동시에 해석되어 진다.

캐비테이션 기포에 의하여 발생되는 소음은 기포의 체적 변화를 이용하여 예측될 수 있다. 즉, 비압축성 가정하에 기포로부터 충분히 떨어진 거리 (r)에서의 음압(p_a)은 기포의 체적(∇)과 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$p_a(r, t) = \frac{\rho}{4\pi r} \frac{d^2 \nabla(t)}{dt^2} = \frac{\rho(2R\dot{R}^2 + R^2\ddot{R})}{r} \quad (3)$$

수치 해석 결과의 검증을 위하여 캐비테이션 터널에서 실험을 수행하였다. 실험은 현대중공업 캐비테이션 터널에서 수행되었다. 사용된 관측부의 단면적은 600mm×600mm이다. 본 연구에서는 캐비테이션 실험 관련하여 대표적으로 사용되는 반구형 두형과 Schiebe 두형체가 사용되었으며 두형체의 반경(h)은 80mm이다. 유속(U)과 캐비테이션 수(σ)는 각각 7.0m/s ~ 9.0m/s, 0.35 ~ 0.7 사이에서 변화되었다. 여기서 캐비테이션 수는 $2(p_a - p_v)/(\rho U^2)$ 로 정의되며 p_a 는 캐비테이션 터널 중앙선의 정압을 나타내고 p_v 는 물의 증기압을 나타낸다.

Figs. 2, 3은 유속이 9.0m/이고 캐비테이션 수가 0.5인 경우의 각각의 두형체에 대하여 해석된 기포의 궤적을 나타낸다. 그림에서 (x_0, y_0)는 기포 핵의 출발점을 나타내며 x 축은 유동 방향을 나타내고, y 축은 x 축에 대한 연직 상방을 나타내고, R_0 는 기포 핵의 초기 반경,

$C_p=2(p-p_v)/(\rho U^2)$ 는 압력 계수, p 는 압력을 나타낸다.

기포 핵이 물체에 접근하면서 물체 주변의 압력 구배(pressure gradient)에 의해 작용되는 힘에 의하여 기포는 유선(streamline)과는 분리되는 경향을 보이게 된다. 이러한 현상을 통상 스크린 효과(screening effect)라 하며 체적이 큰 기포가 보다 크게 영향을 받게 된다. 수치 해석 결과 유속 자체는 기포의 궤적에 별로 영향을 주지 않는다. 한편, 압력 구배의 절대치가 물체의 크기에 반비례하므로 물체의 크기가 작을 수록 유선으로부터의 기포 궤적의 분리 현상은 심해진다. 한편, 기포 핵의 초기 크기는 캐비테이션 기포의 최대 크기에는 별로 영향을 주지 않는다. Schiebe 두형체는 물체 주변에서 압력 구배가 반구형 두형체에 비하여 보다 커서 스크린 효과도 더 크게 나타났다. 이러한 결과를 통하여 캐비테이션 소음 예측시에는 스크린 효과가 반드시 고려되어야 한다는 것을 알 수 있으며 본 수치 해석 방법은 이러한 예측에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

Fig. 4는 크기가 다른 반구형 두형체에 대하여 캐비테이션 기포의 반경의 변화를 보여주고 있다. 이를 통하여 기포의 체적 변화가 아래와 같은 특성 길이와 특성 시간에 대하여 상사 법칙을 잘 만족한다는 것을 알 수 있다.

$$L = 0.2U\tau\sqrt{-\sigma - C_{p,\min}}, \quad \tau = \frac{h}{U},$$

위에서 $C_{p,\min}$ 는 최저 압력 계수를 나타낸다. 한편, 점성의 효과를 무시할 수 있다는 전제하에서 소음 스펙트럼(S) 역시 위와 같은 특성 스케일을 이용하면 $\bar{S}(f\tau) = S(f) \cdot [r\tau^2 / (\rho L^3)]^2$ 와 같이 스케일 될 수 있다는 것을 쉽게 증명할 수 있다[5]. 여기서 \bar{S} 는 무차원화된 소음 스펙트럼이며 f 는 주파수이다.

Figs. 5와 6에는 각각의 두형체에 대하여 $U = 9.0\text{m/s}$ 일 때의 캐비테이션 형상을 보여주고 있다. 그림을 통하여 Schiebe 두형의 경우가 캐비테이션 기포의 수가 적음을 알 수 있는데 이것은 주로 스크린 효과에 의한 것으로 판단된다. 별도로 각각의 두형 주변의 압력장을 비교해 본 결과 Schiebe 두형의 경우 저압이 나타나는 영역 역시 좁게 나타남을 알 수 있었다.

Table 1에는 반구형 두형체에 대하여 $\sigma = 0.5$ 경우의 실험 결과를 수치 해석 결과와 비교한 것이다. 표에서

x_i, x_m, x_c 는 각각 캐비테이션 초생 위치, 최대 크기로 성장된 위치, 급격 수축(collapse)되는 위치를 나타낸다. 최대 크기(R_{\max})는 기포가 타원체로 가정된 후 사진으로부터 얻어진 장축과 단축의 길이로부터 타원체의 체적을 구하고 이와 동일한 체적의 구형의 반경을 구한 것이다. 초생 위치에 대해서는 다소 오차가 있으나 이것은 데이터 해석시의 분해능의 한계 때문이다. 한편, 최대 크기 형성 위치나 급격 수축되는 위치는 수치 해석과 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 본 해석 방법을 별도로 수중익에 대하여 적용하여 본 바 기포의 거동 및 크기를 매우 잘 예측할 수 있음을 입증할 수 있었다[6].

Table 1 Check of validity of numerical method

	Experiment	Numerical
x_i / h	0.72	0.65
x_c / h	1.48	1.47
x_m / h	1.22	1.20
R_{\max} / h	0.063	0.087

3. 공기 주입을 통한 캐비테이션 소음 제어

실험은 해양연구소 캐비테이션 터널에서 수행되었다. 사용된 관측부의 단면적은 $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ 이다. 실험에는 NACA0012 수중익이 사용되었고 수중익의 스패ן(span)은 관측부의 단면 보다 약간 짧은 598mm 이다. 수중익의 피칭운동은 4kw 용량의 모터의 등속 회전운동을 four-bar linkage mechanism을 통하여 각운동으로 변환 시킴으로써 구현되었다. 이러한 방식은 직접 모터를 수중익 회전축에 연결하는 방식에 비하여 구조가 다소 복잡해지는 반면 상대적으로 작은 용량의 모터를 사용할 수 있고 또한 구동시 진동이 적은 장점이 있다.

공기는 우선 수중익의 회전축에 십어진 4mm 외경의 튜브를 통하여 수중익 내부로 공급된다. 그리고 수중익 내부의 유로를 통하여 수중익 표면에 내어진 16개의 구멍으로 공급되었다. 공기 주입구는 앞날로부터 수중익 코드의 40% 지점에 설치되었다. 공기는 가능한 한 수중익 상에 균일한 유량이 공급될 수 있도록 고려하여 설계하였다. 공기는 흡입면(suction side)에 주입되었다.

실험은 아래 Table 2와 같은 조건하에서 수행되었다. Table 2에서 c 는 수중익 코드, l_c 는 캐비티의 길이를 각

각 의미한다. 수중익의 평균 받음각, 즉 정지 상태에서의 받음각($\bar{\alpha}$)은 5.5°로 고정하였고 이 상태에서 각각 $\Delta\alpha$ 가 최대, 최소 각도 변화 범위 $\pm 1.0^\circ, \pm 3.5^\circ$ 인 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 각각의 경우에 대하여 공기를 주입한 경우와 주입하지 않은 경우의 캐비티의 거동을 관찰하였고 또한 이 때의 소음 수준을 계측하였다. 소음 수준은 B&K 8103 하이드로폰, B&K NEXUS 앰프를 사용하여 계측하였고, KROHN-HITE 사의 KH-3364 필터를 이용하여 500Hz 이상의 주파수에 대해서만 데이터를 획득하였다. 신호의 취득 및 해석은 B&K 3550 파형 분석기를 사용하였다.

Table 2 Cavitation numbers (σ) for experiment

$f \backslash l/c$	0.2	0.4	0.6
1.5Hz	1.72	1.45	1.11
3.0Hz	1.72	1.45	1.11

Fig. 7은 $\alpha_o = 1.0^\circ, f = 3.0\text{Hz}, \sigma = 1.11$ 인 경우에 대하여 공기를 주입하지 않은 경우와 주입한 경우의 사진을 각각 보여주고 있다. 사진은 비디오 카메라로 촬영된 영상을 통하여 얻어진 것이고 각각 'Minimum angle of attack'과 'Maximum angle of attack'은 대략적인 최저, 최고 받음각을 나타낸다. Fig. 7b의 최저 받음각에서 볼 수 있는 바와 같이 공기는 모든 공기 주입구에 대하여 비교적 균일한 양이 공급됨을 확인할 수 있었다.

한편, Fig. 8과 9는 Fig. 7과 동일한 조건에 대하여 캐비테이션 수가 각각 1.45, 1.11인 경우를 보여주고 있다. 받음각이 최대인 경우에 대하여 공기를 주입하지 않은 경우와 주입한 경우의 캐비테이션 기포들의 거동을 비교해 보면 공기 기포에 의하여 전반적으로 캐비테이션 발생 면적이 약간씩 감소하게 됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 기포의 주입에 의하여 수중익 주변의 압력이 전반적으로 증가되기 때문인 것으로 생각된다. 캐비테이션 기포층의 면적이 가장 작은 Fig. 9의 경우는 나머지 경우에 비하여 주입된 공기 기포층의 흐름이 주변 유동에 의하여 상대적으로 적게 교란 받음을 알 수 있다. 이 결과를 통하여 캐비테이션 기포층과 공기층과의 상호 작용이 캐비티의 면적이 작은 경우 별로 크지 않았다는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 10은 앞서의 세 경우에 대한 소음 측정 결과를 도시하고 있다. 2kHz 미만의 주파수 범위에 대해서는

공기를 주입한 경우와 주입하지 않은 경우가 크게 차이가 나지는 않지만 그 이상의 주파수 범위에 대해서는 소음이 상당히 감소한다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 관찰자의 청각을 통해서도 확연히 감지할 수 있었다. 그림들에서 볼 수 있는 바와 같이 20kHz 이상의 주파수 범위에서 소음 수준이 커지는 것은 구름형 캐비테이션 발생시 나타나는 일반적인 특징이다.

4. 결론

- 1) 개발된 해석법은 캐비테이션이 발생하는 영역으로 유입되는 캐비테이션 핵의 개수의 예측에 유용하게 사용될 수 있다는 것을 실험을 통하여 입증하였다.
- 2) 물체 주위에서의 캐비테이션 핵의 거동은 스크린 효과에 의하여 그 크기에 따라서 크게 달라지며 크기가 큰 기포는 물체로부터 멀어지려는 경향이 있다
- 3) 주입된 공기와 구름 캐비테이션과의 상호 작용에 의하여 약 2kHz 이상의 주파수 영역의 소음이 크게 감소하였다.

References

- [1] Reisman, G.E., *Dynamics, Acoustic and Control of Cloud Cavitation on Hydrofoils*, Ph.D. Thesis, Caltech, 1997.
- [2] Franc, J.P., and Michel, J.M., "Unsteady attached cavitation on an oscillating hydrofoil," *J. Fluid. Mech.*, vol. 193, pp. 171-189, 1988.
- [3] 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, pp. 50-55, 1998.
- [4] Knapp, R.T., Daily, J.W., and Hammit, F. G., *Cavitation*, McGraw-Hill, 1970.
- [5] 이정목, 강관형, "캐비테이션 소음의 예측법과 모형 시험 방법 개발," 현대중공업 선박해양연구소 연구 보고서, AFERC-CRPCML-98-03, 89p.
- [6] Ahn, J. -W., Kang, K. H., Song, I. -H., and Kim, K. -Y. "Measurement of cavitation noise of a hydrofoil and prediction of cavity bubble behavior," *J. of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 37, pp. 40-47, 2000.

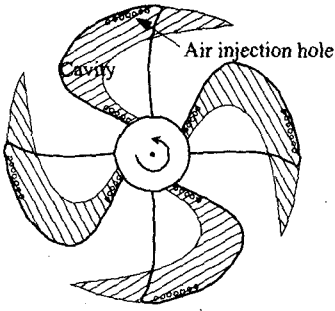


Fig. 1 Control of propeller cavitation by air injection

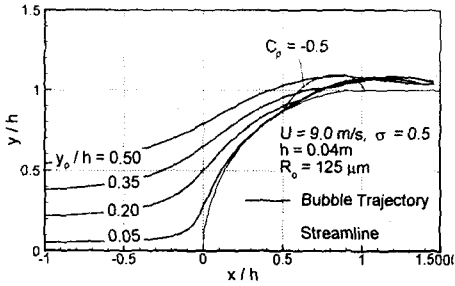


Fig. 2 Trajectory of bubble: hemispherical headform

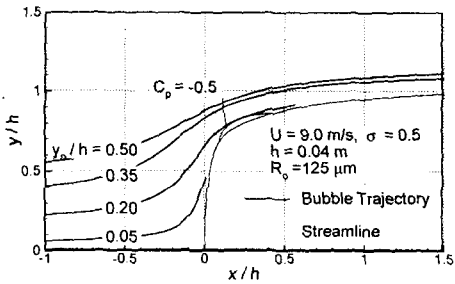


Fig. 3 Trajectory of bubble: Schiebe headform

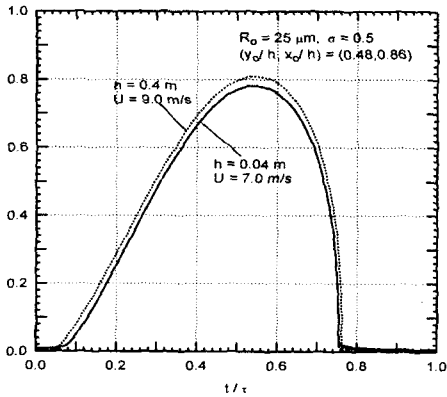
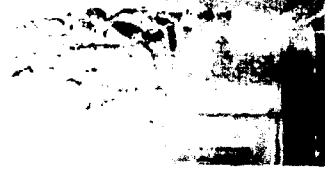


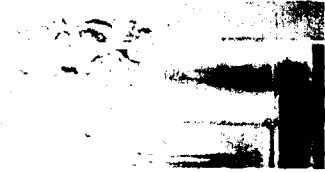
Fig. 4 Scaling of bubble radius



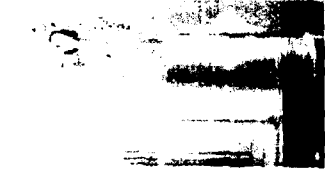
(a) $\sigma = 0.35$



(b) $\sigma = 0.40$

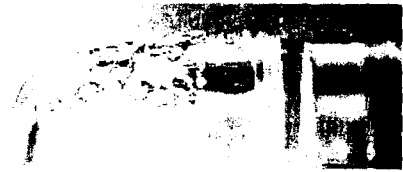


(c) $\sigma = 0.45$



(d) $\sigma = 0.50$

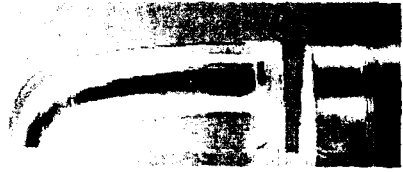
Fig. 5 Cavitation on hemispherical headform: $U = 9.0\text{m/s}$



(a) $\sigma = 0.35$

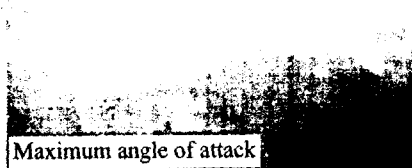
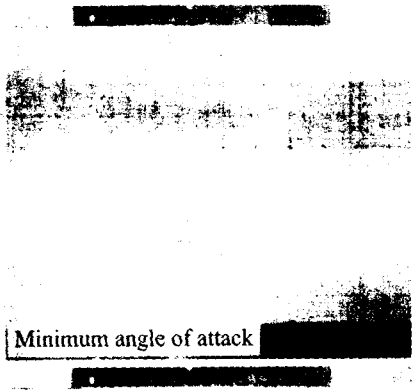


(b) $\sigma = 0.40$



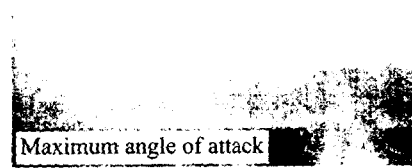
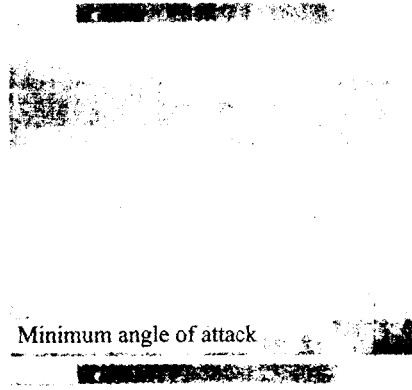
(c) $\sigma = 0.45$

Fig. 6 Cavitation on Schiebe headform: $U = 9.0\text{m/s}$



(a) no air injection

Fig. 7 Photographs of cavitation and air bubble: $\bar{\alpha} = 5.5^\circ$, $\Delta\alpha = \pm 1.0^\circ$, $f = 3.0\text{Hz}$, $\sigma = 1.11$



(b) air injection

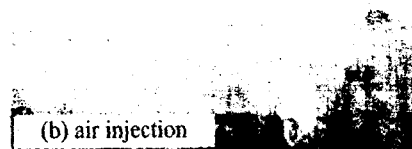
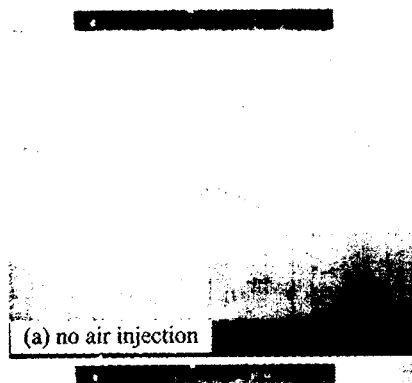


Fig. 8 Photographs of cavitation and air bubble

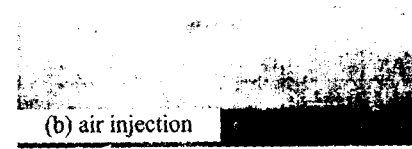
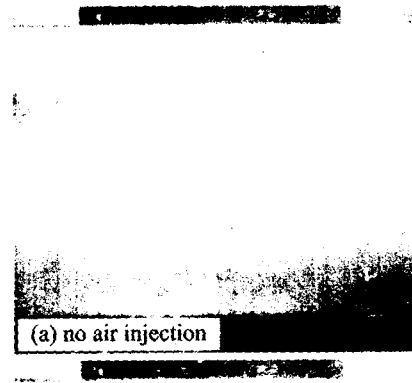
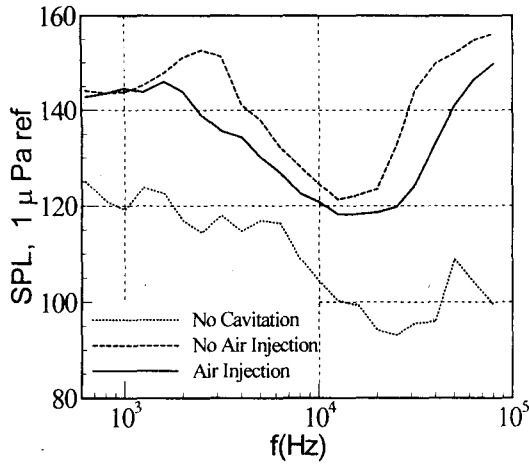
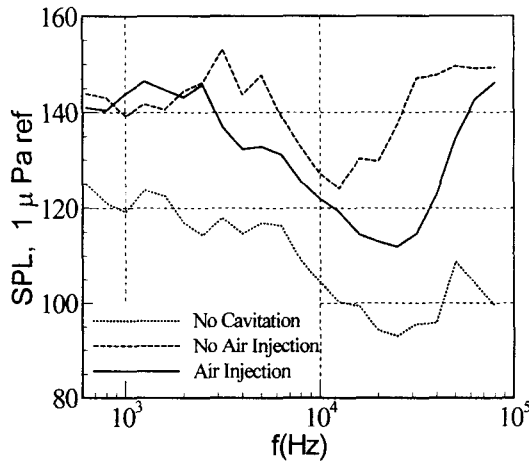


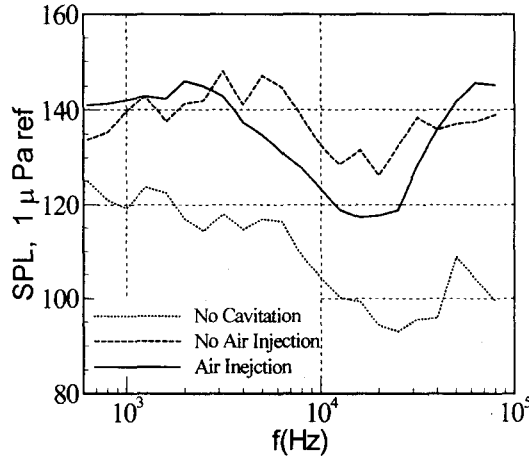
Fig. 9 Photographs of cavitation and air bubble



(a) $\sigma = 1.11$



(b) $\sigma = 1.45$



(c) $\sigma = 1.72$

Fig. 10 Sound pressure level (1/3 Octave Band)