

소산이 고려된 보오텍스 모델과 버블 이론을 이용한 수중익 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 거동 및 소음의 수치적 해석

박광근^{†*}, 설한신^{**}, 이수갑^{*}

서울대학교 기계항공공학부^{*}
한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{**}

Numerical Analysis of Tip Vortex Cavitation Behavior and Noise on Hydrofoil using Dissipation Vortex Model and Bubble Theory

Kwangkun Park^{†*}, Hanshin Seol^{**} and Soogab Lee^{*}

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University^{*}
Maritime and Ocean Engineering Research Institute (MOERI), KORDI^{**}

Abstract

Cavitation is the dominant noise source of the marine vehicle. Of the various types of cavitation, tip vortex cavitation is the first appearance type of marine propeller cavitation and it generates high frequency noise. In this study, tip vortex cavitation behavior and noise are numerically investigated. A numerical scheme using Eulerian flow field computation and Lagrangian particle trace approach is applied to simulate the tip vortex cavitation on the hydrofoil. Vortex flow field is simulated by combined Moore and Saffman's vortex core radius equation and Sculley vortex model. Tip vortex cavitation behavior is analyzed by coupled Rayleigh-Plesset equation and trajectory equation. The cavitation nuclei are distributed and released in the vortex flow result. Vortex cavitation trajectories and radius variations are computed according to nuclei initial size. Noise is analyzed using time dependent cavitation bubble position and radius data. This study may lay the foundation for future work on vortex cavitation study and it will provide a basis for proper underwater propeller noise control strategies.

※Keywords: Tip vortex cavitation(날개 끝 보오텍스 캐비테이션), Vortex modeling(보오텍스 모델링), Rayleigh-plesset equation(레이리-플레셋 방정식)

접수일: 2005년 12월 2일, 승인일: 2006년 2월 15일

†주저자, E-mail: pkk78@snu.ac.kr

Tel: 02-880-7545 (1318)

1. 서론

캐비테이션 현상은 유체장 내에서 국부적인 압력 강하가 발생하여 감소한 압력이 유동에 존재하는 미세한 캐비테이션 핵들의 임계 압력보다 낮아지게 될 때 폭발적으로 기화하는 현상이다. 캐비테이션이 발생하게 되면 일반적으로 유해한 현상을 동반하게 되며, 이러한 대표적인 현상으로 소음의 증가를 들 수 있다. 음파 탐지기인 소나의 개발과 함께 군용선박의 저소음화가 중요한 문제로 대두되고 있으며, 선박에서 발생하는 소음원 중에서 가장 큰 소음을 발생하는 캐비테이션 소음을 줄이는 것이 피탐성을 갖는데 필수 요건임을 인식하게 되었다(설한신 등 2004). 캐비테이션 소음에 대한 연구는 군사적 목적으로 시작되었으나, 근래에는 고급 여객선의 쾌적함과 정숙성을 위해서도 연구가 진행 중이며(설한신 등 2004), 국내에서도 조선 기술의 발달과 함께 캐비테이션 소음에 대한 중요성을 인식하고 그에 대한 연구를 시작하고 있다. 수중 추진기 소음과 관련한 캐비테이션 소음 데이터와 연구 결과는 군사적, 경제적 중요성으로 인해 선진국으로부터의 입수가 매우 어려우므로 자체적인 연구가 필요한 실정이다.

캐비테이션은 여러 형태가 있는데 그 중 날개 끝 보오텍스 캐비테이션은 가장 먼저 발생하여 소음을 발생하므로 저소음 수중익이나 프로펠러 설계 시에 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 발생 시작점이 중요한 설계 인자가 된다. 그 동안 날개 끝 보오텍스 캐비테이션을 줄이기 위해 주로 날개의 형상을 바꾸어 설계를 해 왔다. 이에 반해 이론적 수치적 해석 방법을 개발한다면 캐비테이션 형태에 따른 소음 해석을 실험적 기법에 비해 저비용으로 수행할 수 있을 것이다(안중우 등 2000, 박광근 등 2004). 본 연구에서는 날개 끝 보오텍스 캐비테이션에 대한 수치 해석 기법을 제시하였으며, 이는 앞서 언급한대로 날개 끝 보오텍스 캐비테이션이 캐비테이션 형태 중 가장 먼저 발생하여 높은 소음을 발생시키기 때문에 이를 수치적으로 해석하는 것은 의미 있는 연구가 될 것이며 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 저감 기술 개발에 기초적이고 필수적인 연구라고 판단된다.

2. 이론

2.1 유동장 해석

캐비테이션 거동을 해석하는 방식에는 크게 유동장과 캐비테이션이 서로 일방으로 연계되어 있는 Eulerian-Lagrangian 해석 방식과 유동장과 캐비테이션이 서로 영향을 미치는 Eulerian-Eulerian 해석 방식이 있다. 단순히 캐비테이션에 의한 물체의 성능에 관심이 있을 경우 후자의 방법인 Eulerian-Eulerian 해석법을 사용하나 본 연구에서와 같이 캐비테이션의 거동과 소음 예측을 위해서는 소음원의 거동에 관한 정보가 필요하고 그에 따라 Eulerian-Lagrangian 해석 방식이 타당하다.

구체적으로 Eulerian-Lagrangian 접근법은 유동장을 먼저 해석하고 계산된 유동장에 공동핵을 분포시켜 캐비테이션 핵이 유동장에 영향을 미치지 않고 핵이 받는 부력, 압력 구배, 항력, 부가 질량의 변화를 고려하여 운동을 예측하며 이러한 캐비테이션 핵의 이동과 연계된 Rayleigh-Plesset 방정식을 해석함으로써 수축과 팽창의 거동을 해석하는 방법이다(설한신 등 2004).

본 연구에서는 날개 끝 보오텍스 유동장을 대상으로 하기 때문에 이에 대한 유동장 해석이 선행되어야 한다. 날개 끝 보오텍스는 일반적인 CFD 기법으로는 수치적인 소산에 의해 그 현상이 잘 묘사되지 않고 보오텍스 코어를 잡아내기 위해서는 매우 많은 격자수와 계산 시간을 요구하게 된다. 따라서 본 연구에서는 보오텍스 모델링 기법을 사용하였다.

여러 가지 보오텍스 모델 중 본 연구에서는 다음과 같은 Sculley(1975) 보오텍스 모델을 사용하였다.

$$V_t = \frac{\Gamma_\infty}{2\pi} \frac{r}{r^2 + a_c^2} \tag{1}$$

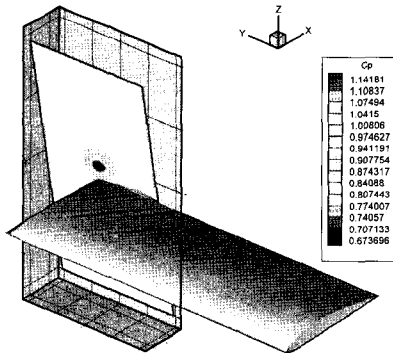
여기서 Γ_∞ 는 유동장의 순환(circulation), a_c 는 보오텍스 코어 반경, r 은 line 보오텍스에서의 수직 거리를 나타낸다. Sculley 보오텍스 모델은 보오텍스 코어 반경이 일정한 모델이므로, 실제 하류 방향에 따라 코어 반경이 커지며 강도가 약해지는 실제 현상에 좀 더 가깝게 묘사하기 위하여

다음과 같은 Moore and Saffman(1973)의 보오텍스 코어 반경 예측식을 접목하였다.

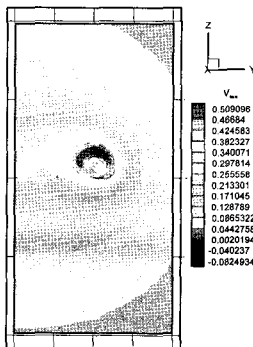
$$\frac{a_c \text{Re}_c^{1/2}}{c} = 2.92 \left(\frac{x}{c}\right)^{1/2} \quad (2)$$

윗 식에서 Re_c 는 수중익의 코드 길이를 특성 길이로 한 레이놀즈 수이고 x 는 하류 방향 거리, c 는 코드 길이이다.

보오텍스 모델을 사용함에 있어 초기 보오텍스 코어 반경 및 유동장의 순환, 초기 접선속도 (tangential velocity) 등의 정보가 필요하다. 이를 위해 3 차원 수중익 주위 유동에 대한 Navier-Stokes 방정식을 해석하였으며, 해석된 수중익 뒷 날에서의 날개 끝 보오텍스의 압력 분포와 접선속도 분포는 Fig. 1 에 보였다.



(a) Pressure distribution at trailing edge



(b) Tangential velocity at trailing edge

Fig. 1 Vortex flow at trailing edge

2.2 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 거동 및 소음

2.2.1 캐비테이션 거동 해석

수중에서 버블이 성장, 붕괴하는 메커니즘은 물 속에 존재하는 공동핵(Cavitation Nuclei)에 작용하는 압력이 수증기압보다 작아지게 되면 팽창하고 작용하는 압력이 다시 커지면 수축하는 것으로 볼 수 있다. 이에 대한 모델링으로 버블 표면에서의 힘의 평형과 속도 포텐셜을 이용하여 식 (3)과 같은 버블 표면에서의 속도에 관한 방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{R}R + \frac{3}{2}(\dot{R})^2 = \frac{P(R) - P(r,t)}{\rho_0} \quad (3)$$

식(3)에서 $r \gg R$ 이고 $P(r,t)$ 는 버블의 운동을 결정하는 driving pressure 로서 정압과 시간에 따라 진동하는 압력의 합으로 다음 식(4)와 같이 표시된다.

$$P(r,t) = P_0 + p(r,t) \quad (4)$$

평형상태에서의 버블 내부의 가스 압력과 반경과의 관계를 이용하여 버블 반지름으로 표현된 식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식(5)을 얻을 수 있다.

$$\ddot{R}R + \frac{3}{2}(\dot{R})^2 = \frac{1}{\rho} \left(p_v + p_g - p - \frac{2S}{R} - \frac{4\mu}{R} \dot{R} \right) + \frac{(U - U_b)^2}{4} \quad (5)$$

식(3)은 버블의 성장-붕괴를 묘사할 수 있는 Rayleigh-Plesset 방정식이다. 이러한 방식으로 유도한 버블의 지배방정식인 식(5)는 이제 비선형 상미분 방정식으로 표현된다.

유동장 내에서 운동하는 버블의 궤적에 따라 매 순간 외부에서 작용하는 압력을 구할 수 있다. 이러한 버블이 움직이는 궤적을 구하기 위하여 뉴턴의 제 2 법칙에 근거한 다음과 같은 식을 이용하였다(Shen 등 2001).

$$\begin{aligned} \rho_b V_b \frac{d\bar{U}_b}{dt} &= V_b(\rho_b - \rho)g - V_b \nabla p + \\ &\frac{1}{2} \rho A_b C_D (\bar{U} - \bar{U}_b) |\bar{U} - \bar{U}_b| + \\ &\frac{1}{2} \rho V_b \left(\frac{d\bar{U}}{dt} - \frac{d\bar{U}_b}{dt} \right) + \\ &6 A_b \sqrt{\frac{\rho \mu}{\pi}} \int_0^{\left(\frac{d\bar{U}}{d\tau} - \frac{d\bar{U}_b}{d\tau} \right)} \sqrt{t - \tau} d\tau \end{aligned} \quad (6)$$

이 식은 유동장에서 중력을 받고 있는 구형 입자의 운동을 나타낸 식이다.

2.2.2 캐비테이션 소음 해석

본 연구에서는 캐비테이션을 구형으로 가정하여 소음 해석을 수행하였다. 실제 날개 끝 보오텍스 캐비테이션은 완전 구형이 아니고 찌그러지는 거동을 보이거나 소음 측면에서 볼 때 이러한 변형은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있어 구형 모델 가정은 타당하다고 할 수 있다. 따라서 캐비테이션 버블은 단극 소음원으로 볼 수 있으며, 멀리 떨어진 관찰자 위치에서 음압은 다음과 같은 식으로 나타내어진다(Blake1986).

$$p'(t) = \frac{\rho_0 \ddot{V}_b(t-r/c)}{4\pi r} \quad (7)$$

버블의 체적은 $V_b = 4/3\pi R^3$ 이고 이의 2차 미분은 $V_b'' = 4\pi R(2R' + RR'')$ 으로 나타내어질 수 있으므로 음압은 아래 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$p'(r,t) = \rho \left[\frac{R}{r} (2R'^2 + RR'') (t - \frac{r}{c}) \right] \quad (8)$$

2.3 캐비테이션 핵 분포

액체 속에는 캐비테이션으로 성장 할 수 있는 미세한 기포 입자들이 존재하게 된다. 이러한 캐비테이션 핵은 액체의 종류 마다 다르고, 같은 액체라도 액체 속에 녹아 있는 기체의 양이나 오염도에 따라 크게 달라지게 된다. 그러므로 캐비테이션의 거동과 소음의 예측을 위해서는 유체의 캐비테이션 핵 분포에 대한 정보를 알아야만 한다. 국내에서는 캐비테이션 소음 실험이 이제 부분적

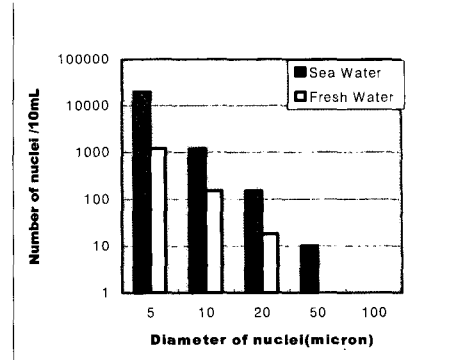


Fig. 2 Nuclei distribution of seawater and fresh water(Kamiirisa 2001)

으로 행해지는 단계에 있으므로 캐비테이션 핵에 대한 이해가 부족하고 자료도 전무한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 초기에 캐비테이션 핵 분포를 위해 Kamiirisa(2001)의 실험 데이터 Fig. 2 를 근거로 하였으며, 이는 전형적인 해수와 담수에서의 핵 분포를 나타낸다. 또한 핵을 분포 함에 있어 Fig. 2 에 나타난 수밀도(number density)에 따라 각 반경의 핵들이 등 간격으로 분포한다고 가정하였다.

3. 해석 결과 및 분석

해석을 위하여 15°C 해수 데이터를 사용하였으며, 자유류의 속도는 10m/s, 받음각 10°, 수증기압은 2340Pa, 밀도는 1026 Kg/m³ 이다. 그리고 수중익의 단면은 Clark Y를 사용하였으며 코드 길이(c)는 20 cm이고 캐비테이션 수(σ)는 1.05 이다.

날개 끝 보오텍스 유동장은 Sculley 보오텍스 모델에 Moore 와 Saffman 의 보오텍스 코어 변화 예측식을 접목하여 계산된 유동장을 사용하였으며 일방으로 연계된 미시적 해석법으로 캐비테이션의 궤적과 반경 변화를 구하였다.

거시적 해석을 통한 날개 끝 보오텍스 유동장의 하류 방향에 따른 압력을 Fig.3 에 나타내었다.

수중익 뒷전에 핵을 분포시키고 핵들을 추적하며 그 거동을 계산한다. 이 때 핵 분포는 유동이 받음각 10°로 흘러 날개 뒷날 윗쪽의 핵들이 캐비

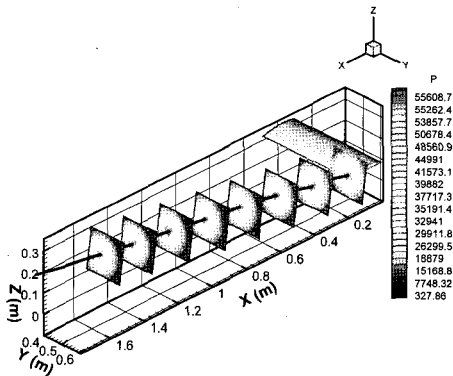


Fig. 3 Tip vortex flow field

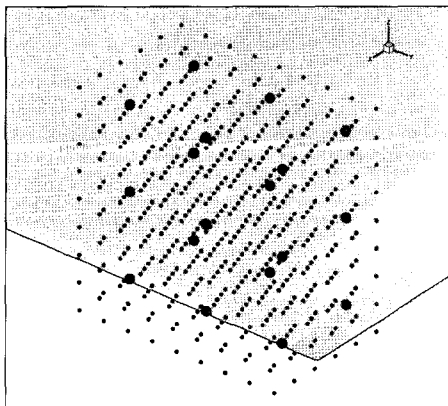


Fig. 4 Initial distribution of cavitation nuclei

테이션으로 성장하게 되므로 Kamiirisa 의 핵 분포 자료에 따라 Fig. 4 와 같이 분포시킨다. 또한 반경 5 μm 이하의 작은 핵들은 캐비테이션화 시키는 임계압력이 매우 낮아 본 연구의 유동 조건에서는 캐비테이션 버블로 성장하기 매우 어렵기 때문에 일부 케이스에 대해 검증한 후 수치 계산의 효율성을 위하여 본 연구에서는 배제하였다.(설한신 등, 2004) 날개 끝 보오텍스는 하류 방향으로 갈수록 코어부의 압력이 증가하며 소산되는 경향을 나타낸다.

Fig. 5 는 캐비테이션 버블들의 궤적을 나타낸 것으로서 수중의 뒷전 부근에서 저압 영역이 넓으

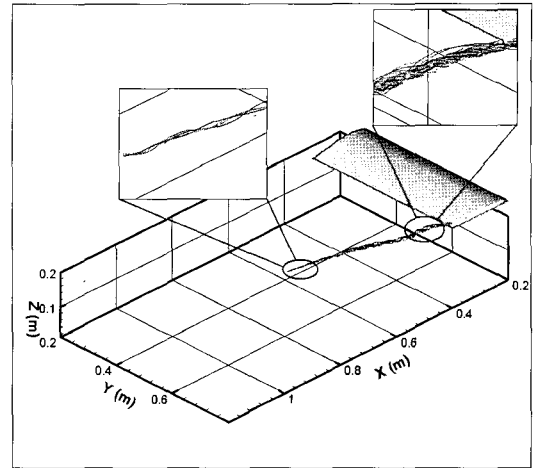


Fig. 5 Cavitating nuclei trajectories

므로 하류에 비하여 많은 수의 핵들이 캐비테이션 버블로 성장하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6 는 캐비테이션 버블들 중에서 6 개 버블의 궤적을 나타내며, Fig.7 은 추출된 6 개 버블의 반경 변화를 나타낸다. Fig. 6 의 날개 끝 부분을 확대한 그림에서 실선은 보오텍스 코어 축이며, 초기 위치가 축으로부터 거리가 먼 핵일수록 큰 숫자를 부여하였다.

Fig. 7 로 부터 초기 위치가 축으로부터 상대적으로 먼 핵일 수록 좀 더 하류에서 캐비테이션 버블로 성장하는 경향을 볼 수 있다. 이는 보오텍스 코어 축에 가까이 분포한 핵들은 코어부의 저압영역에서 바로 캐비테이션으로 성장하고 코어 축에서 멀리 분포한 핵들은 보오텍스 유동에 따라 흐르다가 하류에서 보오텍스 코어부의 낮은 압력에 의해 capture 되며 캐비테이션 버블로 성장하기 때문이다. 이로부터 실제 날개 끝 보오텍스 캐비테이션은 캐비테이션으로 성장한 버블들이 중첩되어 나타나는 현상으로 판단할 수 있다.

날개 끝 보오텍스 캐비테이션은 Fig. 8 에서 보듯이 다양한 형태의 반경 변화 거동을 보인다. 이것은 일반적인 유동과는 달리 날개 끝 보오텍스에 의해 버블이 받는 압력 구배가 매우 크고 날개 끝 보오텍스가 복잡한 유동 양상을 띠기 때문이다.

Fig. 9 는 여러 캐비테이션 버블들 가운데 임의의 한 버블의 시간에 대한 반경 변화와 그 버블이

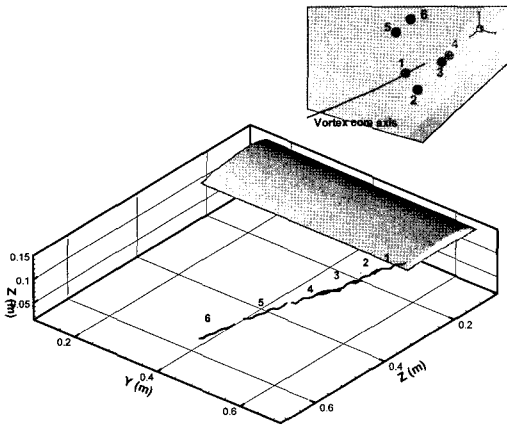


Fig. 6 Selected nuclei trajectories

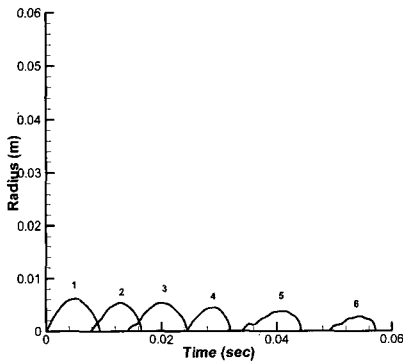


Fig. 7 Selected nuclei radius variations

유동장으로부터 받는 압력의 관계를 나타낸 것이다. 캐비테이션 핵이 받는 압력이 수증기압보다 작아지게 되면, 캐비테이션으로 성장하게 되며 캐비테이션 버블이 보오텍스 코어 축으로부터 멀어져 작용하는 압력이 증가하게 되면 수축하게 된다. 다시 캐비테이션 버블이 보오텍스 코어에 접근하며, 압력이 수증기압보다 작아지게 되면서 팽창하는 거동을 보인다. Fig. 10 은 같은 캐비테이션 버블의 반경 변화와 음압을 나타낸 그림으로써 시간에 따른 반경 변화에 변곡점이 많으므로 음압도 그에 따라 진동하는 결과를 야기한다.

Fig. 11 은 버블들의 반경 변화 그래프로써 각각의 곡선은 캐비테이션 버블의 반경 변화이며,

앞서 언급한대로 전형적인 거동을 보이는 버블과 팽창과 수축을 반복하는 거동을 보이는 버블 등 복잡한 양상으로 거동을 하고 있다. 또한 뒷전으로부터 하류로 30 cm 정도 이동한 0.03 초 이후에는 보오텍스에 capture 되는 핵들의 개수가 적어져 캐비테이션으로 성장하는 버블의 개수도 줄어들게 된다.

Fig. 12 는 관찰자 위치(10c, 10c, 0) 에서의 시간에 따른 음압을 나타낸다. Fig.11 의 0.005 초에서 0.01 초 사이 많은 버블들이 붕괴하고 이것이

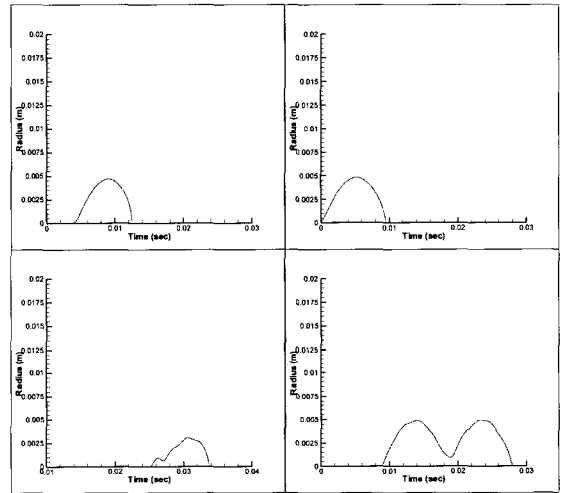


Fig. 8 Radius variations of tip vortex cavitation

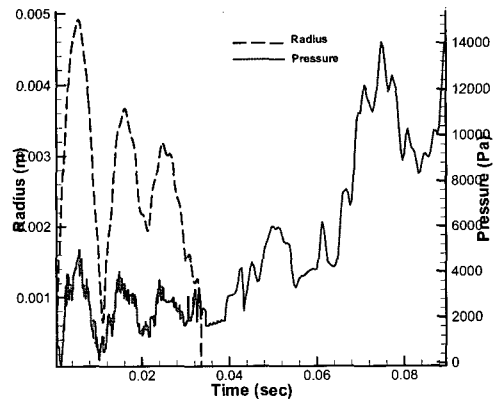


Fig. 9 Radius variation and encounter pressure on the bubble

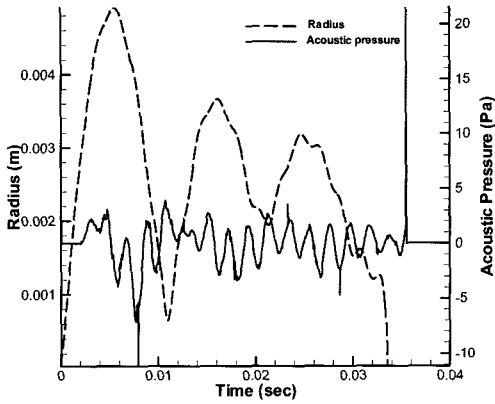


Fig. 10 Radius variation and acoustic pressure

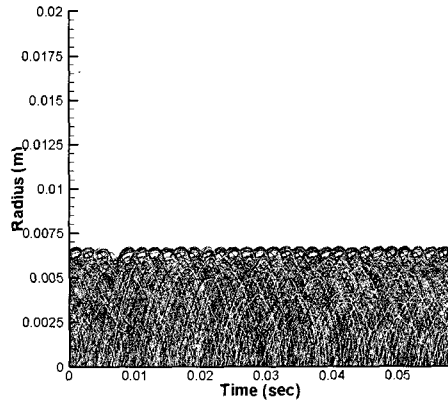


Fig. 13 Radius variations

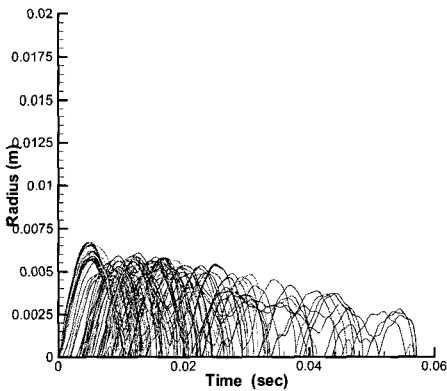


Fig. 11 Radius variations

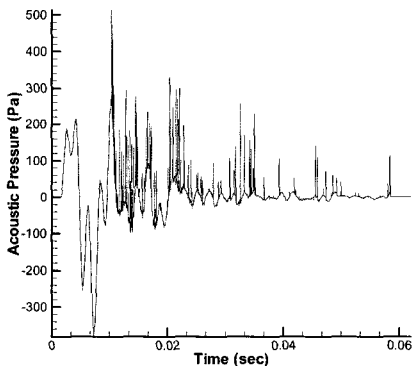


Fig. 12 Acoustic pressure

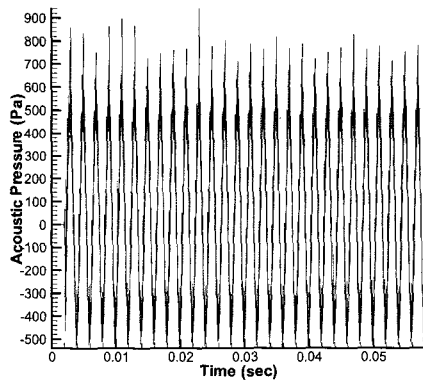


Fig. 14 Acoustic pressure

Fig. 12 에서 0.01 초 부근의 피크를 야기한다. 또한 Fig. 11 의 0.005 초 이전에는 붕괴하는 버블이 거의 없고 성장하거나 작게 팽창, 수축하는 거동이 Fig. 12 에서 0.01 초 이전의 주기성을 갖는 음압을 만든다.

그리고 0.01 초 이후의 버블의 붕괴들은 산발적인 소음의 피크를 발생시킨다. 이는 홀극 특성을 가지는 캐비테이션 버블의 음압이 체적변화의 시간에 대한 2 차 변화율에 비례하기 때문이다. 실제의 날개 끝 보오텍스 현상에서는 캐비테이션 핵들은 유동장 전체에 분포하며 보오텍스 유동장으로 유입된다. 그러므로 전체 핵을 고려하기 위해서는 무수히 많은 핵을 유동장에 분포 시켜야 하는데 이는 계산 시간과 데이터 저장 공간의 한

계에 따라 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 앞서 계산한 시간에 따른 반경 변화 데이터를 유속에 근거하여 중첩함으로써 이러한 실제 현상을 고려하였다. 새로 계산된 반경 변화를 Fig. 13 에 나타내었으며, 캐비테이션이 이미 발생한 상태에서 시간에 대한 반경의 변화를 보여준다. 또한 Fig. 13 의 거동 결과를 이용하여 시간에 대한 음압을 Fig. 14 에 나타내었다.

4. 결론

본 연구를 통해 Eulerian-Lagrangian 접근법을 이용하여 여러 캐비테이션 형태 중 가장 먼저 발생하는 날개 끝 보오텍스 캐비테이션의 거동과 소음을 예측하였다. 본 연구에서는 날개 끝 보오텍스 유동을 모사하기 위해 일반적으로 수치적 소산이 발생하여 보오텍스 유동 모사가 쉽지 않은 CFD 기법을 쓰지 않고 Sculley 보오텍스 모델과 Moore 와 Saffman 의 보오텍스 코어 반경 변화 예측식을 접목한 모델을 사용하였으며, 캐비테이션 거동 및 소음을 해석하기 위하여 캐비테이션 버블 거동의 지배 방정식인 Rayleigh-Plesset 방정식과 캐비테이션 소음을 해석하는 중요한 이론인 버블 소음 이론을 사용하였다.

날개 끝 보오텍스 캐비테이션은 유동의 큰 압력 구배 및 회전으로 인해 일반적인 버블 캐비테이션 보다 좀 더 복잡한 거동과 소음 양상을 나타내고 있음을 확인하였으며, 실제 날개 끝 보오텍스 캐비테이션의 발생 메커니즘에 대해 고찰하였다.

이상과 같이 수치적 기법을 이용한 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 소음 및 거동 해석은, 향후 실제 실험 결과 데이터와의 정성적인 분석과 소음에 영향을 주는 여러 가지 요인들의 효과를 예측할 수 있기 때문에 중요하다고 할 수 있다. 또한 날개 끝 보오텍스 유동을 소산없이 잘 해석할 수 있는 전산유체역학 기법 또는 모델링이 개발된다면 본 연구의 방법을 이용하여 추진기 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 거동 및 소음을 예측할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구는 피탐성이 요구되는 군용 선박의 추진기와 핀(fin) 및 정숙성이 필요한 여객선 등의 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 소음

저감 대책의 기본 연구로서 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 수중음향 특화연구센터의 ‘수중 추진기 소음 해석 연구(UA-41)’의 일부로 수행되었으며 도움을 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 박광근, 설한신, 이수갑, 2004, “수중익 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 거동 및 소음의 수치적 해석,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 791-796.
- 설한신, 이수갑, 표상우, 서정천, 2004, “수중 프로펠러의 소음 예측에 관한 연구(Part 1. 비공동 소음),” 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 2 호, pp. 21-32.
- 설한신, 이수갑, 표상우, 서정천, 2004, “수중 프로펠러의 소음 예측에 관한 연구(Part 2. 공동 소음),” 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 2 호, pp. 33-46.
- 안중우, 강관형, 송인행, 김경렬, 2000, “수중익의 캐비테이션 소음 계측 및 캐비티 기포 거동 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 37 권, 제 4 호, pp. 40-47.
- Blake, W.K., 1986, *Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration*, Academic Press Inc.
- Kamiirisa, H., 2001, “The Effect of Water Quality Characteristics on Cavitation Noise,” CAV 2001, SessionA2.004
- Moore, D.W. and Saffman, P.G., 1973, “Axial Flow in Laminar Trailing Vortices,” *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol. 333, pp. 491-508.
- Sculley, M.P., 1975, *Computational of Helicopter Rotor Wake Geometry and Its Influence on Rotor Harmonic Loads*, ASRL TR-178-1, MIT.

- Shen, Y., Chahine, G., Hsiao, C.T. and Jessup, S., 2001, " Effects of Model Size and Free Stream Nuclei on Tip Vortex Cavitation Inception Scaling," CAV2001, SessionA1.004



< 박 광 근 >



< 설 한 신 >



< 이 수 갑 >