

타원형 날개에 대한 공동소음 예측 연구

정승진* · 홍석윤** · 송지훈**** · 권현웅**** · 박일룡***** · 설한신***** · 김민재*****

*, ** 서울대학교 조선해양공학과, *** 전남대학교 조선해양공학전공,

**** 거제대학교 조선해양공학과, ***** 동의대학교 조선해양공학과,

***** 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소, ***** 국방과학연구소

Study on Cavitation Noise Predictions for an Elliptic Wing

Seung-Jin Jeong* · Suk-Yoon Hong** · Jee-Hun Song**** · Hyun-Wung Kwon**** ·

Han-Shin Seol***** · Il-Ryong Park***** · Min-Jae Kim*****

*, ** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

*** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

**** Department of Shipbuilding and Marine Engineering, Koje College, Koje 53325, Korea

***** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Donggeui University, Busan 47227, Korea

***** Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, 34103, Korea

***** Naval System R&D Institute, Agency for Defense Development, Changwon, 51678, Korea

요 약 : 수중에서 빠른 속도로 운동하는 물체 주변에서 감압이 발생하며, 이로 인해 공동 핵이 팽창함으로써 캐비테이션이 발생한다. 캐비테이션이 발생하게 되면 소음 및 진동이 증가하며, 추진기의 경우 추진 성능이 저해되는 악영향을 초래하기 때문에 이에 대한 예측이 필요하다. 본 연구에서는, 캐비테이션 발생으로 인한 공동소음의 해석절차를 정립하고, 타원형 날개에 적용하였다. 먼저 전산유체역학 해석을 수행하여, 날개 형상 주위 유동장 정보를 도출하였다. 공동 핵 밀도 함수를 활용하여, 핵의 초기 반경 별로 개수를 계산하였고 이들을 압력 강하가 큰 날개 끝 전류에 랜덤하게 배치하였다. 이후 공동소음 해석을 위해 각각의 핵에 대하여 Lagrangian 관점에서 버블 다이내믹스를 활용하였고, 계산된 공동의 거동으로부터 소음해석을 수행하였다. 공동소음은 광대역 소음의 특성을 가지는 것을 확인하였으며, 최종적으로 선박해양플랜트연구소(KRISO)의 대형캐비테이션터널(LCT)에서 수행된 실험 측정결과와의 비교를 통해 검증이 수행되었다.

핵심용어 : 캐비테이션, 수중방사소음, 버블 다이내믹스, 날개 끝 볼텍스 캐비테이션, 타원형 날개

Abstract : *Depressurization occurs around underwater objects moving at high speeds. This causes cavitation nuclei to expand, resulting in cavitation. Cavitation is accompanied by an increase in noise and vibration at the site, particularly in the case of thrusters, and this has a detrimental effect on propulsion performance. Therefore, predicting cavitation is necessary. In this study, an analytical method for cavitation noise is developed and applied to an elliptic wing. First, computational fluid dynamics are performed to obtain information about the flow fields around the wing. Then, through the cavitation nuclei density function, number of cavitation nuclei is calculated using the initial radius of the nuclei and nuclei are randomly placed in the upstream with large pressure drop around the wing tip. Bubble dynamics are then applied to each nucleus using a Lagrangian approach for noise analysis and to determine cavitation behavior. Cavitation noise is identified as having the characteristics of broadband noise. Verification of analytical method is performed by comparing experimental results derived from the large cavitation tunnel at the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering.*

Key Words : *Cavitation, Underwater radiated noise, Bubble dynamics, Tip vortex cavitation, Elliptic wing*

* First Author : seungjin5229@snu.ac.kr, 02-880-7331

† Corresponding Author : jhs@jnu.ac.kr, 061-659-7156

1. 서론

캐비테이션은 수중에서 국부압력이 유체의 수증기압보다 낮아지면 공동 핵이 폭발적으로 팽창하는 현상을 의미한다. 빠른 속도로 운동하는 추진기의 경우 감압면의 압력이 낮아짐으로써 캐비테이션이 발생하게 된다. 캐비테이션이 발생하면 소음 및 진동의 증가, 추진 성능의 저하 및 추진기 부식과 같은 유해한 현상들을 동반하기 때문에, 이에 대한 예측이 필수적이다.

추진기의 소음의 종류는 크게 공동소음, 비공동소음, 명음소음으로 구분된다. 이 중 광대역소음에 지배적으로 작용하는 소음원은 공동소음이다. 유입류의 속도가 증가함에 따라 물속에 기체 상태로 존재하는 공동 핵의 주위 압력이 임계점 이하로 강하하여 캐비테이션 현상이 발생하며, 그 후에 주위 압력이 회복되어 임계점보다 커지게 되면 버블이 급격히 붕괴하여 매우 강한 압력 펄스로 인해 공동소음이 발생한다.

수중 프로펠러에서는 날개 끝 볼텍스 캐비테이션, 얇은 층 캐비테이션, 허브 캐비테이션과 같은 다양한 형태의 캐비테이션이 동시에 발생하며, 형태에 따라 주파수 대역 및 소음의 특성이 다르게 나타나기 때문에 공동소음은 해석보다 실험적 방법으로 많이 연구되어 왔다(Higuchi et al., 1989). 캐비테이션 터널실험을 통해 프로펠러에서 발생하는 소음 특성 연구가 많이 수행되고 있으며, 프로펠러가 설치된 모형선을 이용하여 대형 캐비테이션 터널에서 다양한 캐비테이션의 발생 경향과 공동의 거동을 실험적으로 관찰하고, 캐비테이션의 초기 발생속도(Cavitation Inception Speed; CIS)에 대한 성능을 추정하고 있다(Keller, 2001). 그러나 실선 운용 시의 여러 가지 불확실한 요소와 모형시험의 부정확성 등으로 인해 해석적 방법이 필요한 실정이다.

Rayleigh는 액체 유동에 존재하는 구 형태의 공동 붕괴를 처음으로 모델링하였으며(Rayleigh, 1917), Plesset이 이를 보완하여 캐비테이션 해석에 활용되는 Rayleigh-Plesset 방정식을 개발하였다(Plesset, 1949). Rayleigh-Plesset 방정식은 공동 반경에 대한 지배방정식으로, 공동소음의 원인이 되는 공동 체적 변화를 구현할 수 있다. 또한 Lagrangian 관점의 해석을 통해 미세한 공동 핵들로부터 발생하는 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 거동 해석에 적합하다. Kubota는 버블 다이내믹스를 활용하여 공동의 거동에 대하여 해석하였으며, Hsiao와 Park는 여러 캐비테이션의 형태 중 날개 끝 볼텍스 캐비테이션의 거동에 대하여 해석하였다(Kubota et al., 1992; Hsiao et al., 2003; Park et al., 2009). 날개 끝 볼텍스 캐비테이션의 초생 및 소음은 공동 핵의 분포 정도에 따라 크게 영향을 받는 것이 실험적으로 확인되었다(Keller, 2001). 이로 인해 유체

내에 존재하는 공동 핵의 개수를 측정하는 실험들이 수행되었다(O'Hern et al., 1988; Kamiirisa, 2001).

본 논문에서는 타원형 날개 형상으로부터 발생하는 공동소음의 특성분석 및 해석 절차를 정립하였다. 먼저, 버블 다이내믹스를 이용한 공동소음 해석절차에 필요한 유동장의 정보는 날개 형상에 대한 전산유체역학 해석결과와 볼텍스 모델링을 통한 후류 해석결과로부터 추정하였다. 공동 해석에 필요한 공동 핵은 밀도 함수를 도출하여, 이를 바탕으로 날개 형상 주위에 랜덤하게 배치함으로써 모사하였다. 공동 핵들의 거동을 Lagrangian 관점에서 계산 및 분석하고, 이로부터 발생하는 공동소음의 특성을 확인하여 실험 계측결과와 비교하였다.

2. 배경이론

2.1 Rankine 볼텍스 모델

날개 끝 볼텍스 캐비테이션의 해석을 위하여 유동장의 해석이 선행되어야 한다. 유동장의 해석은 전산유체역학을 통해 수행하는 것이 일반적이다. 하지만, 수치 점성 소산으로 인하여 유동해석을 통해 날개 뒤 하류의 볼텍스를 잡아내는 것은 까다로우며, 이를 구현하기 위해선 많은 격자 수와 계산 시간이 필요하기 때문에 비효율적인 방법이다. 이에 캐비테이션 연구자들은 볼텍스 유동장을 구현하기 위해 볼텍스 모델을 이용하고 있다(Green, 2012).

본 연구에서는 날개 하류 볼텍스 유동장을 얻기 위하여 Rankine 볼텍스 모델을 사용하였다. Rankine 볼텍스 모델은 아래와 같이 표현된다. 식(1)은 코어 주변부의 압력, 식(2)는 속도분포를 의미한다. 날개 끝 볼텍스는 후류로 전달되며 점성 소산에 의해 코어 반경이 증가하고, 그 세기도 약화된다. 이를 모사하기 위해 Moore와 Saffman이 개발한 식(3)의 볼텍스 코어 변화식을 적용하였다(Moore and Saffman, 1973).

$$p(r) = \begin{cases} p_{\infty} - \frac{\rho \Gamma^2}{4\pi^2 a_c^2} + \frac{\rho \Gamma^2}{8\pi^2 a_c^4} & (\text{for } r \leq a_c) \\ p_{\infty} - \frac{\rho \Gamma^2}{8\pi^2 r^2} & (\text{for } r \geq a_c) \end{cases} \quad (1)$$

$$V_{\theta}(r) = \begin{cases} \frac{\Gamma}{2\pi a_c^2} r & (\text{for } r \leq a_c) \\ \frac{\Gamma}{2\pi r} & (\text{for } r \geq a_c) \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta a_c}{c} = 2.92 \left(\frac{x}{c} \right)^{0.5} \frac{1}{Re_c} \quad (3)$$

여기서, Γ 은 순환(Circulation), a_c 는 볼텍스 코어의 반경, c 는 코드 길이(chord length), x 는 하류 방향 거리, 그리고 Re_c 는 코드 길이에 대한 레이놀즈 수를 의미한다.

2.2 공동 지배방정식

공동 표면에 작용하는 압력으로 인한 공동 크기의 변화량은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{p - p_\infty}{\rho_L} \quad (4)$$

R 은 공동의 반경, \dot{R} 과 \ddot{R} 은 각각 R 의 시간에 대한 1차, 2차 미분 값들이며, p 는 공동 표면에서의 압력, p_∞ 는 정수압을 의미한다. 공동의 표면압력은 증기압, 가스압력과 표면장력을 고려하여 다음과 같이 계산된다.

$$p = p_v + p_g - \frac{2S}{R} \quad (5)$$

따라서 식(4)에 이를 대입하여 Rayleigh-Plesset 방정식을 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$\ddot{R}R + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho_L} \left(p_v + p_g - p_\infty - \frac{2S}{R} \right) \quad (6)$$

위 식에 공동 가스압력에 대하여 이상기체 방정식을 사용하고, 물과 공동의 미끄러짐 항을 추가하면, 식(7)과 같은 modified Rayleigh-Plesset 방정식을 구할 수 있다(Park et al., 2009).

$$\begin{aligned} \ddot{R}R + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \\ = \frac{1}{\rho_L} \left(p_v + p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - p - \frac{2S}{R} - \frac{4\mu}{R} \dot{R} \right) + \frac{(\vec{U} - \vec{U}_b)^2}{4} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 p_v 는 증기압력, p_{g0} 는 초기 가스압력, R_0 는 초기 반경, γ 는 폴리트로픽 지수, p 는 외부압력, S 는 표면장력, μ 는 점성계수, \vec{U} 는 유동의 속도, \vec{U}_b 는 공동의 이동속도를 의미한다.

다상유동에서의 입자들을 모사하는 많은 연구들이 있었으며, 본 연구에선 뉴턴 제 2법칙에 근거한 Maxey와 Riley의 식을 사용하였다(Maxey and Riley, 1983). 유동장 내에서 성장 및 운동하는 공동의 궤적을 아래의 공동 이동 방정식을 통해 Lagrangian 관점에서 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_b V_b \frac{d\vec{U}_b}{dt} = V_b(\rho_b - \rho_L)\vec{g} - V_b \nabla p \\ + \frac{1}{2} \rho_L A_b C_D (\vec{U} - \vec{U}_b) |\vec{U} - \vec{U}_b| + \frac{1}{2} \rho_L V_b \left(\frac{d\vec{U}}{dt} - \frac{d\vec{U}_b}{dt} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_b} (1 + 0.197 Re_b^{0.63} + 2.6 \times 10^{-4} Re_b^{1.38}) \quad (9)$$

$$Re_b = \frac{2R |\vec{U} - \vec{U}_b|}{\nu} \quad (10)$$

V_b 는 공동의 체적, A_b 는 공동의 투영면적을 의미한다. C_D 는 Haberman과 Morton의 항력 계수 경험식을 사용하였으며 (Haberman and Morton, 1953), Re_b 는 공동 반경에 대한 레이놀즈 수를 의미한다. 위 식은 공동이 유동장 내에서 받는 힘들의 평형 식으로서, 좌변은 공동이 받는 전체 힘을 의미하고, 우변 첫 번째 항은 공동이 받는 부력, 두 번째 항은 유동장의 압력 구배에 의한 힘, 세 번째 항은 유동에 의한 항력, 네 번째 항은 부가 질량을 의미한다.

2.3 공동소음

본 연구에서는 각각의 공동에 대해 단극(monopole) 소음원으로 가정하였다. 단일 공동에 의해 발생하는 소음은 다음 식과 같이 표현된다.

$$p_a'(t) = \frac{\rho_L}{4\pi r} \frac{d^2 V_b}{dt^2} = \rho_L \frac{R}{r} (2\dot{R}^2 + R\ddot{R}) \quad (11)$$

여기서, r 은 수음점까지의 거리를 의미한다.

2.4 공동 핵

액체 속에는 캐비테이션으로 성장하는 공동 핵(cavitation nuclei)이 존재한다. 날개 끝 볼텍스 캐비테이션은 공동 핵의 크기와 개수에 크게 영향을 받기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 1의 Kamiirisa의 분포도를 참조하여 추정식을 식(12)와 같이 도출하였다(Kamiirisa, 2001).

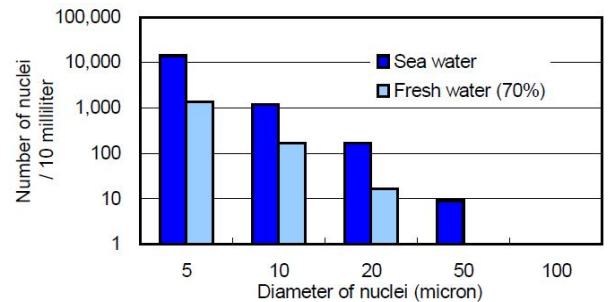


Fig. 1. Cavitation nuclei density.

$$\log_{10}N = A - 3\log_{10}(2R_0) \quad (12)$$

여기서, N 은 10 ml 당 핵의 개수를 의미한다. A 는 상수로서 해수에서는 6, 청수에서는 5를 대입하며, R_0 은 핵의 초기 반지름을 의미한다.

3. 공동의 거동 및 소음해석

3.1 해석 절차

날개 끝 볼텍스 캐비테이션 소음해석 절차는 Fig. 2와 같다. 날개 형상에 대하여 Table 1의 조건에서 전산유체해석이 진행된 이후, 후류부를 Rankine 볼텍스 모델을 통해 모사한다. 이후 날개 끝 주위에 공동 핵을 배치하고, 각각의 핵들에 대한 버블 다이내믹스 해석을 수행하여, 최종적으로 공동에서 발생한 각각의 소음을 합산하는 과정을 거친다.

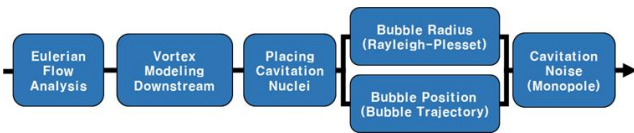


Fig. 2. Analytical procedure for bubble dynamics.

3.2 타원형 날개에 대한 전산유체역학 해석

날개 끝 볼텍스 캐비테이션을 예측하기 위해서는 공동 핵에 작용하는 후류 유동장 정보를 필요로 한다. 이에, 타원형 날개 형상에 대한 전산유체역학 해석을 수행하였다. Fig. 3과 같은 타원형 날개에 대하여 Table 1의 조건에서 유동해석을 수행하였으며, 날개 형상은 날개 끝을 기준으로 원점으로부터 연직 상방 1.3m에 위치시켰다. 좌표계는 오른손 좌표계를 기준으로 하였다. 유동해석은 유한체적법(Finite Volume Method; FVM)을 사용하는 유동해석 소프트웨어인 STAR-CCM+을 이용하여 수행하였다. RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 지배방정식으로 하였고, 난류 모델은 RSM(Reynolds Stress Model)을 사용하였으며, 속도-압력 연성은 SIM-PLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 방법을 이용하였다. 경계조건은 유동장의 상류에 속도 경계조건 (Velocity inlet), 하류에 (Pressure outlet) 조건을 적용하였다. 터널 벽면과 날개 형상 모두 wall 조건을 설정하였으며, 벽면과 첫 번째 셀 간의 거리를 의미하는 무차원수 y^+ 는 1로 설정하였다. 전체 도메인의 총 격자 수는 40M개이다.

해석결과 $Y=0$ 단면에서의 압력분포는 Fig. 4와 같다. 하지만 상용프로그램을 이용한 유체역학 해석의 경우 수치 점성 소산으로 인해 후류의 구현이 쉽지 않기 때문에, 해당 영역에 대해 Rankine 볼텍스 모델을 적용하였다. 날개 끝에서의 순환, 볼텍스 반경을 식(1)~(3)에 활용하였다.

Table 1. Flow conditions

Analysis Conditions	
Flow velocity	9 m/s
Angle of attack	8°
Ambient pressure	53.78 kPa
Cavitation number	1.2

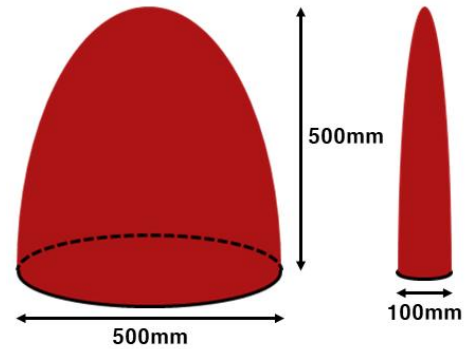


Fig. 3. Specification of elliptic wing (NACA-16020).

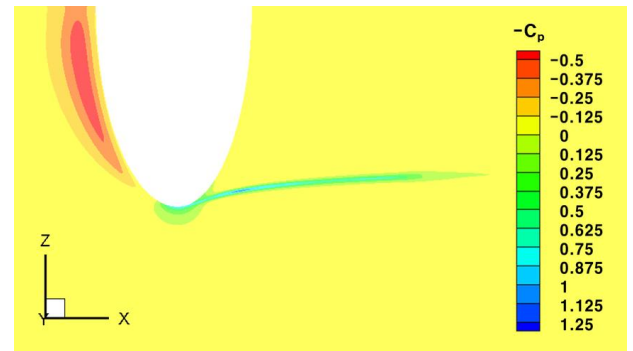


Fig. 4. Pressure contour of CFD result.

3.3 볼텍스 모델링

볼텍스 모델링을 표현하는 식 (1)과 식 (2)는 볼텍스 중심으로부터 거리에 대한 식으로서, 볼텍스 중심의 좌표와 볼텍스 반경의 설정이 필요하다. 유동해석 결과로부터 날개 후류부의 유동 방향에 수직인 단면들에 대한 압력의 최소점들을 각 단면의 볼텍스 중심으로 설정하였다. 또한, 날개 끝 지점에서 원주 방향의 속도가 최고인 지점까지의 거리를 계산하여 초기 볼텍스 반경으로 설정하였다. 식 (2)를 활용한 $X=0.01$ 단면에서의 속도분포는 Fig. 5와 같으며, Fig. 6과 같이 시계방향으로 회전하는 볼텍스 유동을 구현하였다.

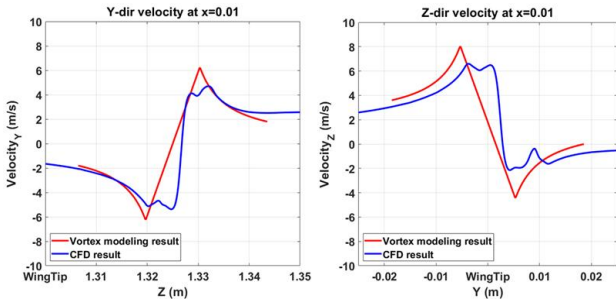


Fig. 5. Comparisons of CFD and vortex model.

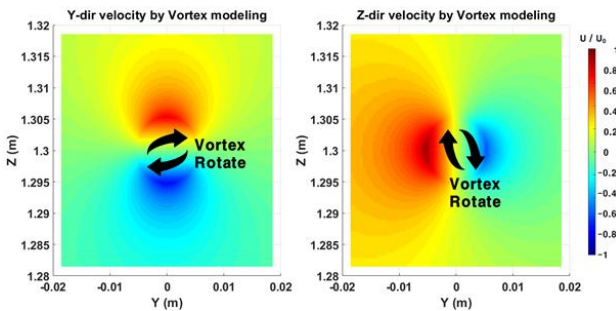


Fig. 6. Velocity contour by vortex modelling.

3.4 공동 핵의 배치

실제와 동일한 캐비테이션 현상을 구현하기 위해선 모든 크기의 공동 핵들을 전체 도메인에 분포하여 해석을 수행해야 하지만, 계산 비용을 고려하여 핵의 반경을 $20\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$ 로, 계산 영역은 날개 끝 주변으로 한정하였다. 핵들을 타원형 날개의 끝에서 상류의 $U_0 \times \Delta t$ 길이의 영역에 Fig. 7과 같이 직육면체 형태로 랜덤하게 분포시켰다(U_0 : 유입류 속도, Δt : 해석시간). 핵의 개수는 식(12)로부터 계산된 10ml 당 개수에 비례하여 정해지며, 반경 $20\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$ 인 핵의 개수는 Table 2와 같다. 유동장 내에 배치된 각각의 핵들에 대하여 Lagrangian 관점에서 해석하였다.

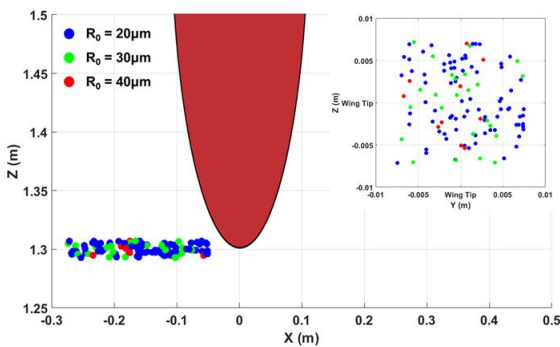


Fig. 7. Distribution of cavitation nuclei.

Table 2. Number of nuclei

Initial Radius	$20\ \mu\text{m}$	$30\ \mu\text{m}$	$40\ \mu\text{m}$
number	80	24	10

3.5 공동소음 해석

Figs. 8~10은 각각의 공동 핵에 대한 버블 다이내믹스 해석 수행결과이다. 해석은 유동해석이 완료된 1초 이후부터 수행하였다. Fig. 8은 해석을 수행한 모든 공동의 시간에 대한 반경 변화를 나타낸다. 2계 상미분 방정식인 Rayleigh-Plesset 방정식은 4th Runge-Kutta 기법을 활용하여 계산하였으며, 날개 끝을 지남에 따라 압력 강하로 인한 공동의 팽창 및 붕괴를 확인할 수 있다. 공동 핵이 지나는 압력 영역에 따라 캐비테이션 발생 여부의 차이가 존재하며, 발생하지 않은 경우 팽창과 붕괴가 나타나지 않으며 미세하게 진동하는 것으로 나타난다. 식(8)에 의한 캐비테이션의 궤적은 Figs. 9~10과 같이 나타난다. Fig. 6에서 나타나는 날개 끝 볼텍스의 회전 유동 특성과 동일하게 시계방향으로 나선형으로 회전하며 이동하는 것을 Fig. 10에서 확인할 수 있다. Fig. 11은 공동의 붕괴로 인한 공동소음을 나타낸다. 공동의 붕괴 시점과 동일하게 피크(peak) 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

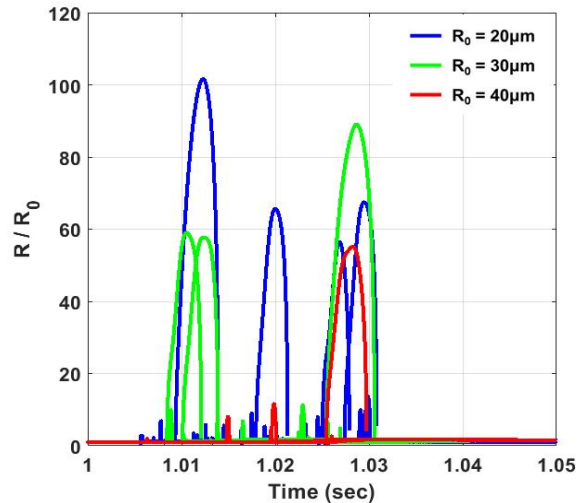


Fig. 8. Bubble radius variation normalized by initial radius.

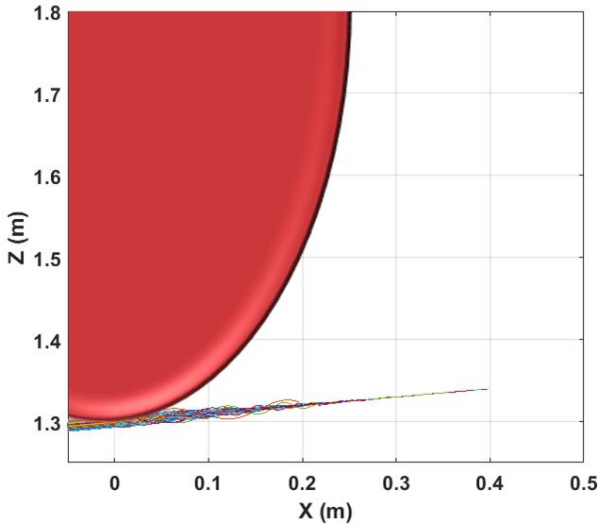


Fig. 9. Bubble trajectory.

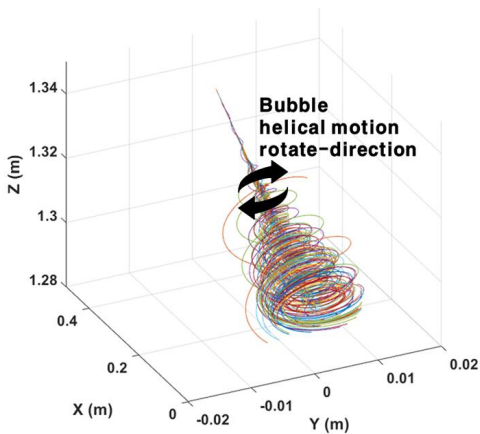


Fig. 10. Helical motion of bubble.

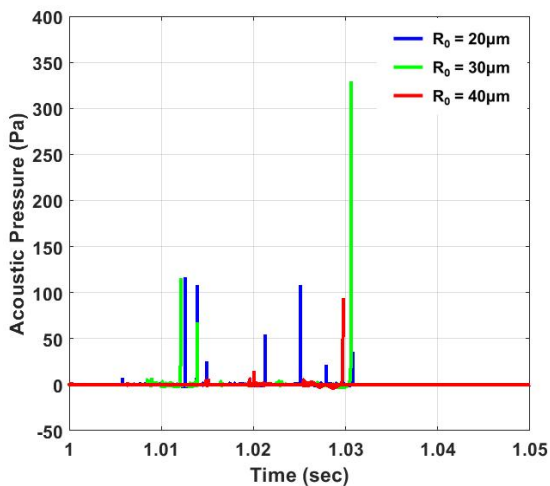


Fig. 11. Cavitation noise in time domain.

4. 타원형 날개에 대한 공동소음 계측

4.1 실험설비 및 조건

타원형 날개의 공동소음 계측 실험은 선박해양플랜트연구소(KRISO)의 대형 캐비테이션 터널(Large Cavitation Tunnel; LCT)에서 수행되었다. 대형 캐비테이션 터널은 전체 길이 60 m, 높이 22.5 m이며, 시험부의 크기는 길이 12.5 m, 폭 2.8 m, 높이 1.8 m이다. 날개 형상은 Fig. 12와 같이 캐비테이션 터널 시험부의 중앙에 설치되었다. 소음계측장치는 날개 형상으로부터 연직 아래 터널 바닥(해석 좌표계 상 원점)에 위치시켰다.

날개 형상은 길이 500 mm, 높이 500 mm, 두께 100 mm의 크기이다. 캐비테이션 터널의 내부는 청수(fresh water)로 채워졌으며, 캐비테이션 현상을 극대화하기 위하여 터널 내부 압력을 53.78 kPa로 설정하였다. 유속 및 받음각은 유동해석 조건과 동일하게 각각 9 m/s, 8°로 설정하였다.

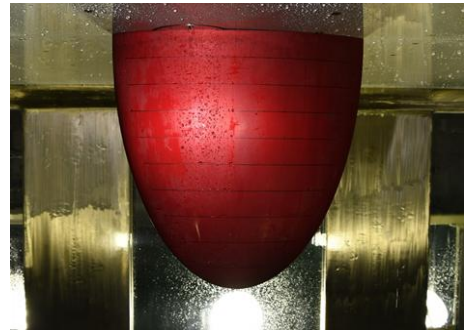


Fig. 12. Test section (NACA-16020, Elliptic wing).

4.2 공동소음 계측실험결과 및 소음해석 검증

Fig. 13은 공동소음 해석결과와 실험결과를 비교한 결과이다. 파란색 실선은 버블 다이내믹스를 이용한 공동소음 해석결과, 빨간색 실선은 동일한 형상에 대한 실험 계측 결과를 의미한다. 실험결과를 살펴보면 공동의 발생으로 인해 광대역 소음(broad band noise)의 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 공동소음의 경우 공동 체적의 2차 미분에 비례하기 때문에, 공동이 급격하게 수축하는 시점에 피크(peak) 소음이 발생하며, 이로 인해 주파수 경향은 광대역으로 나타나게 된다. 실험계측결과와 공동소음 해석결과의 비교 시 주파수 특성과 소음 값의 준위가 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 14를 통해 공동의 이동 경로 또한 수치해석 결과와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

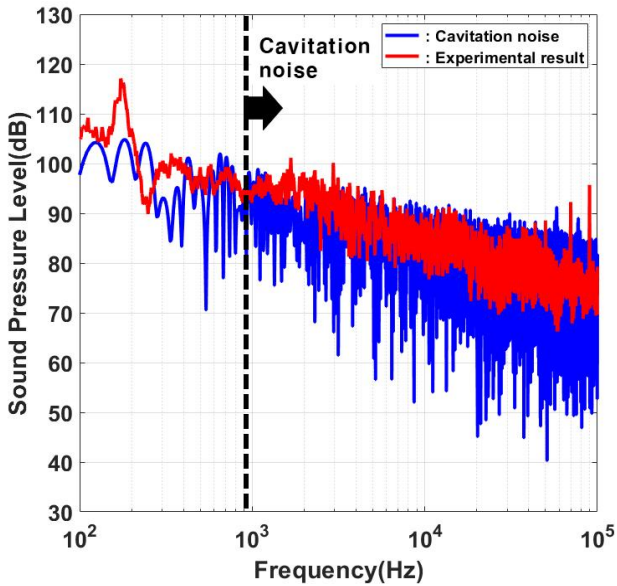


Fig. 13. Comparison of numerical and experimental results for cavitation noise.

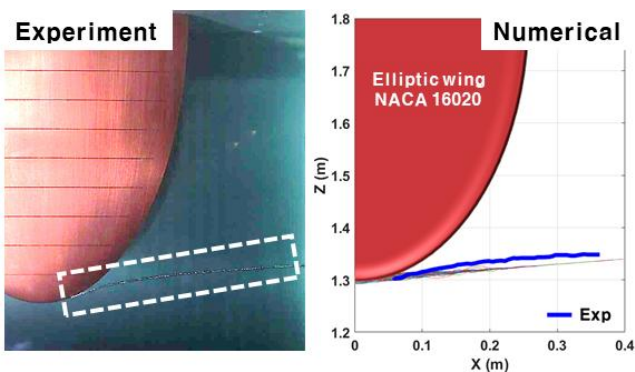


Fig. 14. Comparison of numerical and experimental results for cavitation trajectory.

5. 결론

본 연구에서는 타원형 날개 형상에서 발생하는 공동소음의 수준을 예측하기 위한 버블 다이내믹스 해석기법을 검증하였다. 정수압 및 캐비테이션 수가 낮은 상황에 대해 공동소음 예측 및 실험을 수행하였다.

먼저 버블 다이내믹스 해석에 필요한 타원형 날개 주변의 유동장 정보를 획득하기 위해 전산유체역학 해석을 수행하였다. 획득한 유동장에서 후류에 대해 볼텍스 모델을 적용하여 볼텍스 유동장을 재생성하였다. 공동 핵 밀도 함수를 이용하여 핵의 초기 반경 별로 개수를 계산하였으며, 이를 날개 끝 주변에 랜덤하게 배치하였다. 각각의 공동 핵들에

대하여 Lagrangian 관점에서 버블 다이내믹스를 이용하여 공동의 거동을 해석하였으며, 얻어진 값들을 통해 소음 준위를 계산하였다. 또한, 동일한 조건의 대형 캐비테이션터널에서 수행한 실험 측정결과와 소음 준위 및 주파수 경향 측면에서 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

공동 핵이 날개 끝을 지나면서 압력 강하로 인해 그 크기가 서서히 팽창하게 되며, 이후 급격하게 수축하며 피크 소음을 유발한다. 이로 인해 공동소음은 광대역 소음의 주파수 특성을 나타내며, 이는 실험 측정결과에서도 동일한 경향 및 소음 준위를 얻음으로써 공동소음 해석기법의 효용성을 확인하였다.

향후에는 추진기에 대한 공동소음의 특성을 분석하고, 소음 저감방안 및 초생 속도 최적화에 대한 연구가 필요하다. 또한, 추진기에서 발생하는 타 소음원 들에 대한 해석기법이 확보된다면, 추진기 기인 소음에 대한 종합적인 해석이 가능하게 되어, 수중방사소음 예측에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 미래 잠수함 저소음 추진기 특화연구실의 지원으로 수행되었습니다. 또한, 해양시스템공학연구소(RIMSE) 및 연구재단(2016R1D1A1A09918294)의 지원을 받아 수행하였습니다. 서울대학교 공학연구원의 지원에도 감사드립니다.

References

- [1] Green, S. (Ed.) (2012), Fluid vortices (Vol. 30). Springer Science & Business Media.
- [2] Haberman, W. L. and R. K. Morton(1953), An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids (No. DTMB-802). David Taylor Model Basin Washington DC.
- [3] Higuchi, H., R. E. A. Arndt, and M. F. Rogers(1989), Characteristics of tip vortex cavitation noise. Journal of fluids engineering, 111(4), pp. 495-501.
- [4] Hsiao, C. T., G. L. Chahine, and H. L. Liu(2003), Scaling effect on prediction of cavitation inception in a line vortex flow, Journal of fluids engineering, 125(1), pp. 53-60.
- [5] Kamiirisa, H.(2001), The effect of water quality characteristics on cavitation noise. In Fourth International Symposium on Cavitation, California Institute of Technology, Pasadena, CA USA.

- [6] Keller, A. P.(2001), Cavitation Scale Effects - Empirically Found Relations and the Correlation of Cavitation Number and Hydrodynamic Coefficients. CAV 2001. Cal. USA, June.
- [7] Kubota, A., H. Kato, and H. Yamaguchi(1992), A new modelling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section. Journal of fluid Mechanics, 240, pp. 59-96.
- [8] Maxey, M. R. and J. J. Riley(1983), Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow, The Physics of Fluids, 26(4), pp. 883-889.
- [9] Moore, D. W. and P. G. Saffman(1973), Axial flow in laminar trailing vortices. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 333(1595), pp. 491-508.
- [10] O'Hern, T. J., L. d'Agostino, and A. J. Acosta(1988), Comparison of holographic and Coulter Counter measurements of cavitation nuclei in the ocean, J. Fluids Eng, 110(2), pp. 200-207.
- [11] Park, K., H. Seol, W. Choi, and S. Lee(2009), Numerical prediction of tip vortex cavitation behavior and noise considering nuclei size and distribution. Applied Acoustics, 70(5), pp. 674-680.
- [12] Plesset, M. S.(1949), The dynamics of cavitation bubbles. Journal of applied mechanics, 16, pp. 277-282.
- [13] Rayleigh, L.(1917), On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. Philosophical Magazine, Series, 6, pp. 94-98.

Received : 2019. 08. 02.

Revised : 2019. 09. 18.

Accepted : 2019. 10. 28.