

Eulerian-Lagrangian 기법을 이용한 캐비테이션 거동과 소음의 수치적 해석

설한신, 박광근 이수갑

서울대학교 기계항공공학부 공력소음 및 소음제어 연구실

Numerical analysis of cavitation behavior and noise using Eulerian-Lagrangian method

Hanshin Seol, Kwangkun Park and Soogab Lee

Aeroacoustics & Noise Control Lab.

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

hsseol7@snu.ac.kr, pkk78@snu.ac.kr, solee@plaza.snu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 수중의 버블 캐비테이션과 날개 끝 블텍스 캐비테이션의 거동 및 소음을 Eulerian-Lagrangian 기법을 이용하여 수치적으로 해석하였다. Eulerian-Lagrangian 기법은 캐비테이션 버블이 유동장에 미치는 영향이 거의 없다는 가정하에 유동장과 캐비테이션 거동을 일방으로 연계하여 해석하는 방식이다. 수중의 버블 캐비테이션 해석을 위한 유동장은 비압축성 RANS 방정식을 해석하여 구하고, 날개 끝 블텍스 캐비테이션 유동장은 일반적 CFD 기법의 큰 수치 소산으로 그 특성이 잘 나타나지 않으므로 Scully 불텍스 모델을 이용하여 해석한다. 해석한 유동장 정보를 입력치로 하고 버블의 지배 방정식인 Rayleigh-Plesset 방정식과 Newton의 제2법칙에 근거한 궤적 방정식을 연계하여 캐비테이션의 성장-붕괴와 운동을 예측한다. 계산된 거동 정보를 이용하여 버블 캐비테이션과 날개 끝 블텍스 캐비테이션의 소음을 예측하였다. 본 연구는 수중 운동체에서 발생하는 캐비테이션의 거동과 소음의 특성을 파악하고 그에 따른 대비책을 마련하는 기본 연구로서 활용할 수 있을 것이다.

1. 서 론

수중익 및 수중 프로펠러의 소음은 크게 공동

(cavitation)소음, 비공동 소음, 명음 소음으로 나뉜다. 해수 내에는 캐비테이션으로 성장할 가능성이 있는 공동 핵들이 분포하고 있으며 이들은 각각의 임계압력을 갖고 있다. 수중에서 양력을 받는 물체의 흡입면 또는 날개 끝에서는 압력 강하가 발생하는데 이러한 압력이 공동핵의 임계 압력보다 낮아지면 캐비테이션이 발생하게 된다. 캐비테이션 소음은 앞서 언급한 메카니즘으로 발생한 캐비테이션이 주변 유동장의 교란에 의하여 진동함으로써 생성되는 소음이다.

캐비테이션을 해석하는 방법은 유체와 기체의 이상(two phase)을 체적 분율로 표현하여 CFD 기법(이상, Eulerian-Eulerian 기법)으로 해석하는 방식과 거시적인 방법으로 유동장을 해석하고 캐비테이션 버블이 유동장에 미치는 영향이 거의 없다는 가정 하에 캐비테이션을 Lagrangian 기법으로 해석하는 Eulerian-Lagrangian 해석법이 있다. 그러나 Eulerian-Eulerian 기법은 유동장에서 기체와 액체의 분율과 압력 분포는 구할 수가 있으나 각각의 캐비테이션 버블을 소음원으로 보고 해석할 수 없으므로 소음 해석에 적합한 Eulerian-Lagrangian 기법을 이용하여 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 Eulerian-Lagrangian 기법을 이용하여 수중익에서 발생하는 캐비테이션 가운데 대표적인 형태인 이동하는 버블 캐비테이션 및 가장 쉽게 발생하여

균용 함정이나 수중 무기 체계에서 중요시 되는 날개 끝 볼텍스 캐비테이션의 거동과 소음을 예측하였다. 이러한 연구는 캐비테이션이 발생하는 수중 운동체의 저소음 대책을 수립하는데 기본 기술로서 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

2. 이 론

본 연구의 Eulerian-Lagrangian 기법은 캐비테이션 거동이 유동장에 영향을 미치지 않는다는 가정하에 유동장과 캐비테이션 거동을 일방으로 연계하여 해석하는 방식이다. 이 기법은 유동장을 먼저 해석하고 계산된 유동장에 캐비테이션 핵 분포 자료에 따라 핵을 분포시킨 후 캐비테이션 핵들이 유동에 따라 이동하며 주위 압력에 따라 성장, 붕괴하는 거동을 해석하는 방식이다.

2.1 Eulerian Flow Field

수중익의 흡입면에서 발생하는 이동하는 버블 캐비테이션 예측을 위한 Eulerian 유동장을 해석한다. 이를 위해 아래와 같은 2차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 계산한다.

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (1)$$

또한, 난류 모델은 k- ω SST를 사용한다.

날개 끝 볼텍스 캐비테이션 해석을 위한 유동장은 식 (2)의 Sculley 볼텍스 모델을 이용한다.

$$V_i = \frac{\Gamma_\infty}{2\pi} \frac{r}{r^2 + a_c^2} \quad (2)$$

여기서 Γ_∞ 는 유동장의 circulation, a_c 는 볼텍스 코어 반경, r 은 line 볼텍스에서 수직 거리를 나타낸다. Sculley 볼텍스 모델은 볼텍스 코어 반경이 일정한 모델이므로, 하류 방향에 따라 코어 반경이 커지며 소산(decay)되는 실제 현상에 좀 더 가깝게 모사하기 위하여 Moore와 Saffman의 볼텍스 코어 반경 예측식을 접

목하였다.

$$\frac{a_c \text{Re}_c^{1/2}}{c} = 2.92 \left(\frac{x}{c} \right)^{1/2} \quad (3)$$

윗 식에서 Re_c 는 레이놀즈 수이고 x 는 하류 방향 거리, c 는 코드 길이이다. 볼텍스 모델을 사용함에 있어 초기 볼텍스 코어 반경 및 circulation, 초기 tangential velocity 등의 근거가 필요하며, 이러한 값들은 3차원 RANS Eq. 으로 해석한 유동장으로 계산하였다.

2.2 Cavitation Behavior and Noise

2.2.1 캐비테이션 성장-붕괴 방정식

수중에서 버블이 성장, 붕괴하는 메커니즘은 물속에 존재하는 공동핵(Cavitation Nuclei)이 주위의 압력 변화에 따라 팽창, 수축하는 것이라 볼 수 있다. 이를 모델링하기 위하여 버블 표면에서의 힘의 평형과 속도 포텐셜을 이용하고 버블 내부와 외부의 압력 평형 관계를 이용하면 다음과 같은 식(4)를 얻을 수 있다.

$$\dot{R}R + \frac{3}{2}R^2 = \frac{1}{\rho} \left(p_v + p_s - p - \frac{2S}{R} - \frac{4\mu}{R} \dot{R} \right) + \frac{(\bar{U} - \bar{U}_b)^2}{4} \quad (4)$$

식(4)는 버블의 성장-붕괴를 모사할 수 있는 수정된 Rayleigh-Plesset 방정식이다. 수정된 Rayleigh-Plesset 방정식은 이계 비선형 상미분 방정식으로 표현되며 이를 두개의 연계된 일계 상미분 방정식으로 나누어 수치적으로 계산한다.

2.2.2 캐비테이션 운동 방정식

유동장 내에서 운동하는 버블의 궤적에 따라 매 순간 캐비테이션 버블의 표면에 작용하는 압력과 속도를 구할 수 있다. 이러한 버블이 움직이는 궤적을 구하기 위하여 뉴턴의 제2 법칙에 근거한 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$\begin{aligned}
\rho_b V_b \frac{d\bar{U}_b}{dt} &= V_b(\rho_b - \rho)\bar{g} - V_b \nabla p \\
&+ \frac{1}{2} \rho A_b C_D (\bar{U} - \bar{U}_b) |\bar{U} - \bar{U}_b| \\
&+ \frac{1}{2} \rho V_b \left(\frac{d\bar{U}}{dt} - \frac{d\bar{U}_b}{dt} \right) \\
&+ 6A_b \sqrt{\frac{\rho \mu}{\pi}} \int_0^1 \left(\frac{d\bar{U}}{d\tau} - \frac{d\bar{U}_b}{d\tau} \right) \frac{d\tau}{\sqrt{1-\tau}}
\end{aligned} \quad (5)$$

이 식은 유동장에서 중력을 받고 있는 반경 R인 구형 입자의 운동을 나타낸 식으로서 부력과 압력 구배, 항력, 부가 질량 등의 외한 힘의 평형을 나타낸다.

2.2.3 캐비테이션 소음 해석

본 연구에서는 캐비테이션을 구형으로 가정하여 소음 해석을 수행하였다. 버블 캐비테이션의 경우 실제로 구형이므로 구형 모델은 타당하며 날개 끝 볼텍스 캐비테이션은 완전 구형이 아니고 찌그러지는 거동을 보이나 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.

$$p'(t) = \frac{\rho_0 \dot{V}_b(t-r/c)}{4\pi r} \quad (6)$$

구형 버블의 체적을 반경에 대해 계산하여 식(6)을 변형하면 아래 식(7)과 같이 표현된다.

$$p'(r,t) = \rho \left[\frac{R}{r} (2R^2 + RR'') \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] \quad (7)$$

3. 결과 및 검토

3.1 수중익 버블 캐비테이션 해석

Navier-Stokes 방정식으로 계산된 유동장과 일방으로 연계된 미시적 해석법을 이용하여 버블의 궤적과 반경 변화를 계산하였다. Eulerian 유동장 해석 결과와 미시적 해석을 위한 공동핵 반경에 따른 핵의 분포 및 구해진 버블의 궤적을 그림 1에 나타내었다. 또한 물체 주위를 이동해 가는 버블의 반경 변화를 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 실제 유동에서 공동핵이 연속적으로 유

동장으로 들어와 캐비테이션으로 성장하는 것을 고려하여 계산한 결과이다. 그림 2에서 버블이 성장-붕괴하는 전형적인 모습을 볼 수 있으며 버블이 붕괴시에 체적 변화율이 크므로 대부분의 소음을 방사함을 예상할 수 있다.

버블의 궤적과 운동을 비교해 보면 물체 표면에 가까이 움직이는 버블일수록 충분히 팽창할 수 있는 저압영역을 지나는 시간이 길어져 큰 반경을 가지는 반면 물체에서 멀리 떨어질수록 버블이 팽창할 수 있는 시간이 적어 크게 팽창하지 못하고 곧 수축됨을 확인할 수 있다. 실린더에 비해 수중익 형상일 경우 압력이 더 크게 떨어지기 때문에 캐비테이션으로 발달하는 핵의 개수가 더 많음을 알 수 있다. 그림 3은 위와 같은 과정을 통해 해석한 버블 반경 변화와 위치 데이터를 이용하여 시간영역에서 음압의 변화를 나타낸 결과이다. 캐비테이션 버블의 붕괴시에 음압의 피크치가 나타남을 볼 수 있으며 수중익에서의 경우의 공동핵이 캐비테이션으로 더 많이 성장하며 이에 따라 음압의 피크가 많이 발생하였다.

3.2 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 해석

날개 끝 볼텍스 캐비테이션의 해석을 위해 Sculley 볼텍스 모델에 Moore와 Saffman의 볼텍스 코어 반경 변화 예측식을 접목하여 계산된 유동장을 사용, 미시적 해석법으로 궤적과 반경 변화를 구하였다. 공동핵을 유동장에 분포시킬 때 computing power가 부족하고 계산 시간이 굉장히 증가하므로 캐비테이션이 발생할 수 있는 부분에 대하여 유체 내에 포함되어 있는 공동 핵 분포 자료를 토대로 핵을 분포시킨다. 이러한 방법으로 분포된 핵이 이동하는 궤적을 그림 4에 나타내었다. 또한 볼텍스 유동장내에서 이동해 가는 버블의 반경 변화를 그림 5에 나타내었다. 그림 5는 유동장에 연속적으로 들어오는 공동핵을 고려한 결과이다. 선행 연구를 통해 버블이 붕괴시에 부피의 변화율이 크므로 대부분 소음을 방사함을 확인하였다. 그림 6은 이러한 방식으로 해석한 버블 반경 변화를 이용하여 시간영역에서 음압의 변화를 나타낸 결과이며 유추한 대로 붕괴 말기에 주로 소음을 방사함을 알 수 있다.

4. 결론

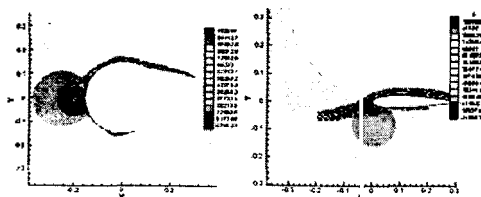
캐비테이션 소음 해석에 적합한 수치해석 기법인 Eulerian-Lagrangian 접근법을 사용하여 수중의 버블 캐비테이션 및 날개 끝 볼텍스 캐비테이션의 거동과 소음을 예측하였다. 캐비테이션 예측 기법의 개발은 실험 결과와의 정성적인 비교, 분석과 캐비테이션 소음에 영향을 미치는 요인들을 예측하는데 사용할 수 있을 것이다. 또한 피탐성이 요구되는 균용 선박과 정속성이 필요한 여객선 등의 캐비테이션 소음 저감 대책의 기본 연구로서 활용될 수 있을 것이다.

후 기

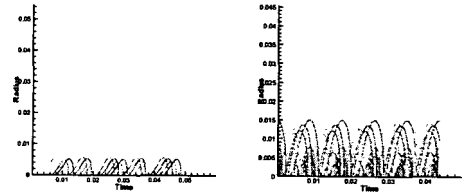
본 연구는 국방과학연구소 수중돌항특화연구센터의 '수중 추진기 소음 해석 연구 (UA-41)' 의 일부로 수행 되었으며 도움을 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

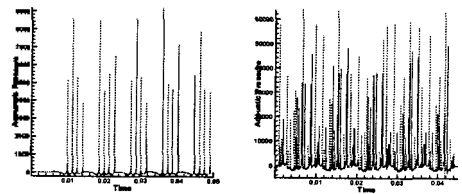
1. 박광근, 설한신, 이수갑, "수중의 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 거동 및 소음의 수치적 해석", 2003년도 한국음향학회 추계학술발표대회 논문집, 제22권 제 2(s)호
2. Christopher Earls Brennen, "Cavitation and Bubble Dynamics", Oxford University Press
3. William K. Blake, "Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration.", Academic Press Inc, 1986
4. Leighton, "The Acoustic Bubble ", Academic Press, 1994
5. Yves Lecoffre, "Cavitation Bubble Trackers", A.A.BALKEMA Publishers, 1999
6. Sheldon I.Green, "Fluid Vortices", Kluwer Academic Publishers, 1995
7. Akira Ogawa, "Vortex Flow", CRC Press, Inc., 1993



(a) Cylinder (b) Hydrofoil
그림 1. Bubble trajectory



(a) Cylinder (b) Hydrofoil
그림 2. Bubble radius variation



(a) Cylinder (b) Hydrofoil
그림 3. Acoustic pressure

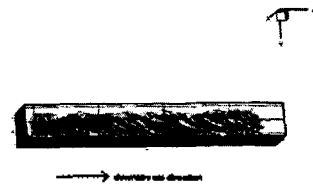


그림 4. Tip Vortex cavitation trajectory

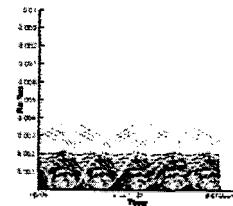


그림 5. Tip vortex cavitation radius variation

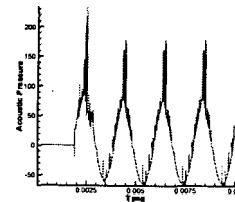


그림 6. Acoustic pressure