

# 수중 추진기 소음의 수치적 해석

이수갑\*, 설한신\*, 서정천\*\*, 표상우\*\*, 박광근\*

\*서울대학교 기계항공공학부, \*\* 서울대학교 조선해양공학과

## Numerical Analysis of Underwater Propeller Noise

Soogab Lee\*, Hanshin Seol\*, J-C Suh\*\*, Sangwoo Pyo\*\*, and Kwangkun Park\*

\*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

\*\*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University

[solee@plaza.snu.ac.kr](mailto:solee@plaza.snu.ac.kr), [hsseol7@snu.ac.kr](mailto:hsseol7@snu.ac.kr), [jungsuh@plaza.snu.ac.kr](mailto:jungsuh@plaza.snu.ac.kr),

[pyo@realweb21.com](mailto:pyo@realweb21.com), [pkk78@snu.ac.kr](mailto:pkk78@snu.ac.kr)

### 요약

선박에서 발생하는 소음 가운데 수중 추진기 소음은 가장 우세한 소음이다. 추진기 소음은 소나에 의해 적을 탐지하는 군용 선박에 경우 생존과 직결된 문제가 되며 쾌적함과 정숙성을 요구하는 여객선의 경우에서도 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 중요성과 필요성에 따라, 본 연구에서는 수중 추진기의 비공동 및 공동 소음을 수치적으로 해석하였다. 수중 추진기 소음 해석을 위해 유동 해석이 선행되어야 하며, 이는 포텐셜을 기반으로 한 패널법을 이용하여 해석한다. 소음 해석은 시간 영역 음향상사법을 이용하였으며, 공동 소음은 홀극 음원으로 모사하여 해석하였다. 또한 향후 수중 추진기의 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 해석을 위한 기초 연구로서 Eulerian-Lagrangian 접근법을 이용하여 수중에서의 날개 끝 볼텍스 캐비테이션의 거동과 소음을 예측하였다.

### 1. 서론

선박 내 기계류의 소음 저감 기술 발달에 기인하여 선박에서 발생하는 소음 가운데 수중 추진기의 소음은 가장 크며 더욱 중요한 문제로 부각되었다. 수중 추진기 소음은 피탐성이 생존과 직결되는 군용 선박 및 정숙성을 요구하는 여객선 등에서 특히 중요한 문제로 인식되고 있으며 크게 공동(cavitation)소음, 비공동 소음, 명음 소음으로 나뉜다. 이 가운데 공동 소음은 가장 큰

소음이 되며, 이에 따라 저소음 설계가 필수적인 군용 선박에 있어 매우 중대한 문제가 되고 있다. 또한 비공동 소음은 두께를 가진 프로펠러의 회전 및 그에 따른 표면에서의 압력 변동에 의해 발생하는 소음이며, 공동이 발생하지 않는 상황에서 선박을 운행 할 때 가장 중요한 소음이 된다. 본 연구에서는 앞서 언급한 수중 추진기의 공동 및 비공동 소음과, 향후 수중 추진기 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 거동 및 소음 해석을 위한 기초 연구로서 수중의 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 해석을 수행하였다.

### 2. 이론

#### 2.1 추진기 유동 해석

수중 추진기에 대한 패널 방법은 Kerwin(1997) 등에 의해 정립되었다. 이 방법은 속도 포텐셜에 관한 Green의 제 3정리에 기초를 둔 것이다.

$$2\pi\phi = \int_S \phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} dS + \int_{S_w} \Delta\phi \frac{\partial G}{\partial n} dS \quad (1)$$

여기서 프로펠러 몸체  $S$ 는 블레이드  $S_B$ , 허브  $S_H$ 로 구성되어있으며 후류  $S_w$ 는 블레이드 후류  $S_{BW}$ 를 나타낸다. 프로펠러 표면은 쌍극과 소스를 분포 시킨 쌍곡면 패널로 이산화 한다. 윗 식을 이용하여 표면에서 속도를 구하고 이를 Bernoulli 방정식에 적용시켜 표

면에서의 압력분포를 계산한다. 수중 추진기의 비정상 공동 유동 해석은 공동을 고려할 수 있도록 식(1)을 수정하여 아래와 같이 나타낼 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$2\pi\phi = \int_{S_{WS} \cup S_C} \phi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \phi}{\partial n} dS + \int_{S_W} \Delta \phi \frac{\partial G}{\partial n} dS \quad (2)$$

여기서,  $S_{WS}$  는 블레이드, 허브의 접촉 표면(wetted surface) 이며,  $S_C$  는 공동 표면이다. 식(2)는 접촉 표면에서 비공동 유동과 같은 경계 조건을 주고, 공동 표면에서는 공동 위의 압력이 수증기압과 같도록 하는 동력학적 경계조건과 비침투 조건인 운동학적 경계 조건을 부과하여 해석한다.

## 2.2 시간 영역 음향 상사법

자배 방정식은 Ffowcs Williams 와 Hawkings에 의해 제시된 음향 상사 방정식이다<sup>[3]</sup>.

$$p'(\vec{x}, t) = p'_T(\vec{x}, t) + p'_L(\vec{x}, t) \quad (3)$$

$$4\pi p'_T(\vec{x}, t) = \int_{f=0} \left[ \frac{\rho_0 \dot{v}_n}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS$$

$$+ \int_{f=0} \left[ \frac{\rho_0 v_n (r \dot{M}_r \hat{r}_i + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2 (1-M_r)^3} \right]_{ret} dS$$

$$4\pi p'_L(\vec{x}, t) = \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[ \frac{\dot{i}_i \hat{r}_i}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS$$

$$+ \int_{f=0} \left[ \frac{l_r - l_i M_i}{r^2 (1-M_r)^2} \right]_{ret} dS$$

$$+ \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[ \frac{l_r (r \dot{M}_r \hat{r}_i + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2 (1-M_r)^3} \right]_{ret} dS$$

여기서,  $p'_T(\vec{x}, t)$ ,  $p'_L(\vec{x}, t)$  는 각각 두께소음과 하중 소음 항을 나타내며,  $\dot{M}_i$  와  $\dot{i}_i$  는 각각 지연시간에 대한 미분을 나타낸다. 위 식은 또한 임의의 블레이드 형상과 움직임 그리고 임의의 하중조건에 대해 모두 적용할 수 있으며 근접장(near-field)과 원지장(far-field)에 대한 효과를 나타낼 수 있다.

공동 소음은 블레이드 표면에 붙어서 회전하며 하나의 큰 진동 버블처럼 소음을 방사하는 홀극 특성을 지

닌 강력한 소음원이 된다. 이에 의한 음압은 거리에 반비례하고 공동 체적의 2차 시간 변화율에 비례하며 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$p'(\vec{x}, t) = \frac{Q(\tau^*)}{4\pi r |1-M_r|} \quad (4)$$

## 2.3 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 거동 및 소음 해석

수중의 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 거동 및 소음 해석을 위해, 캐비테이션 거동이 유동장에 영향을 미치지 않는다는 가정하에 유동장과 캐비테이션 거동을 일방으로 연계하여 해석하는 방식인 Eulerian-Lagrangian 기법을 사용하였다.

수중에서 공동의 성장과 붕괴를 모델링하기 위하여 수정된 Rayleigh-Plesset 방정식을 이용한다.

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

식(5)는 두개의 연계된 일계 상미분 방정식으로 나누어 수치적으로 계산한다. 버블이 움직이는 궤적을 구하기 위하여 뉴턴의 제 2법칙에 근거한 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$\rho_b V_b \frac{d\bar{U}_b}{dt} = V_b (\rho_b - \rho) \bar{g} - V_b \nabla p$$

$$+ \frac{1}{2} \rho A_b C_D (\bar{U} - \bar{U}_b) \bar{U} - \bar{U}_b \{$$

$$+ \frac{1}{2} \rho V_b \left( \frac{d\bar{U}}{dt} - \frac{d\bar{U}_b}{dt} \right)$$

$$+ 6A_b \sqrt{\frac{\rho \mu}{\pi}} \int_0^t \left( \frac{d\bar{U}}{d\tau} - \frac{d\bar{U}_b}{d\tau} \right) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}$$

캐비테이션 버블은 홀극 소음원으로 볼 수 있으며, 멀리 떨어진 관찰자 위치에서의 음압은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

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

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 추진기 소음해석

포텐셜을 기반으로한 패널법으로 구해진 블레이드 표면 압력분포 값들을 이용하여 DTMB4119 모델 추진기의 소음 해석을 수행하였다.

##### 3.1.1 비공동 추진기 소음 해석

Fig.1 은 비공동 상황에서 소음원에 따른 소음의 방향성과 세기를 나타낸다. 두께 소음은 회전익이 지나가면서 주위 유동의 체적을 변화시키는 홀극 음원항으로 프로펠러 회전면에서 체적변화가 가장 심하므로 회전면 방향으로 주된 소음이 전파됨을 볼 수 있고 하중소음은 프로펠러 표면의 압력 변화에 의해서 생기는 이중극 음원항의 소음이므로 프로펠러 추력과 항력이 주된 원인이 된다. 따라서 하중소음은 추력과 항력 방향인 프로펠러 회전면에 수직인 방향으로 전파됨을 알 수 있다. 추진기 중심에서 블레이드 반경의 10배 되는 위치에서의 비정상 두께소음과 하중소음의 음압수준을 3차원 contour 그래프와 함께 나타내었다. 그래프에서 나타나듯이 원거리에서 두께소음은 전체 소음레벨에 거의 영향을 미치지 못해 하중소음이 지배적임을 알 수 있다.

##### 3.1.2 공동 추진기 소음 해석

계산된 유동해석 결과를 이용하여 블레이드 표면 압력 변동에 의해 발생하는 비공동 소음과 블레이드 표면의 얇은 층 공동의 체적 변화에 의해 발생하는 공동 소음을 수치적으로 해석하였다. Fig.2에 얇은 층 공동에 의해 발생하는 소음레벨과 방향성을 나타내었다. 일반적으로 공동 소음은 홀극 소음원의 특성을 가진다고 알려져 있기에 소음이 방향성 없이 전방향으로 전파하나, 얇은 층 공동의 경우 프로펠러 블레이드에 부착되어 회전하고 있기에 이러한 회전의 효과로 블레이드 회전면 방향으로 조금 더 큰 소음이 전파하였다. 공동이 발생한 조건과 비공동 조건에서 블레이드 표면의 압력변화에 의해 생기는 하중소음을 비교하여 공동의 발생이 하중소음에 미치는 영향을 해석하였다. Fig.3에서 보듯이 블레이드 표면의 압력 변동에 의한 하중소음은 공동이 발생하였을 때 보다 비공동 상태일 때 더 큼을 볼 수 있다. 이는 공동이 잘 발생하는 블레이드 끝 부분 패널의 압력 계수 변화를 나타낸 Fig.4에서 그 원인을 알

수 있다. 얇은 층 공동이 발생하는 경우 공동 발생 영역에서는 압력이 어느 정도 이하로 떨어지지 못하기 때문에 상대적으로 비공동 상태일 때 보다 시간에 따른 표면 압력 변동이 작게 되며, 이러한 현상을 야기한다. 그러나 프로펠러 전체 소음(공동 소음+하중소음)은 공동이 발생하였을 경우가 비공동 상태일 경우보다 높음을 Fig.5를 통해 알 수 있다.

#### 3.2 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 해석

Eulerian-Lagrangian 기법을 사용하여 캐비테이션 버블의 궤적과 반경 변화를 구하였다. 캐비테이션이 발생할 수 있는 부분에 대하여 유체 내에 포함되어 있는 공동 핵 분포 자료를 토대로 핵을 분포시킨다. 이러한 방법으로 분포된 핵 가운데 캐비테이션으로 성장한 버블들의 궤적을 Fig.6(a)에 나타내었다. 또한 각 캐비테이션 버블들의 반경 변화를 Fig.6(b)에 나타내었으며, 버블의 반경이 선행 연구를 통해 해석한 버블 캐비테이션의 거동과 비슷한 경우와, 시간에 따라 크기가 진동하는 경우를 볼 수 있다. 이는 날개 끝 볼텍스 유동의 압력 구배가 매우 크기 때문이며 이는 버블 캐비테이션과는 다른 특징이다. 캐비테이션으로 성장한 핵 중에 몇 개만을 추적한 궤적을 Fig.7(a)에, 각 버블에 대응하는 반경 변화를 Fig.7(b)에 각각 나타내었다. 그래프에서 나타나듯 날개 끝 볼텍스 캐비테이션은, 유동장에 존재하는 공동 핵들이 압력이 낮은 날개 끝 볼텍스의 중심부로 capture되며 캐비테이션으로 성장한 버블들의 중첩임을 알 수 있다. Fig.8은 연속적으로 유동장에 유입되는 공동핵을 고려한 소음해석 결과이다. 캐비테이션 소음이 체적의 2차 시간 변화율에 비례하므로 체적이 급격히 변하는 붕괴 단계에서 대부분의 소음을 방사함을 알 수 있다.

### 4. 결론

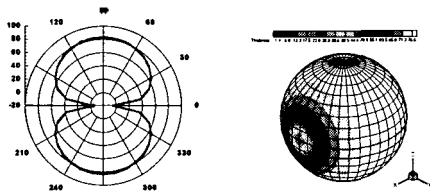
수치해석 기법을 사용하여 수중 추진기의 공동 및 비공동 소음 해석과, 수중익 날개 끝 볼텍스 캐비테이션 거동 및 소음 해석을 수행하였다. 이는 향후 공동 소음 저감 대책의 기본 연구로서 활용될 수 있을 것이다.

## 후 기

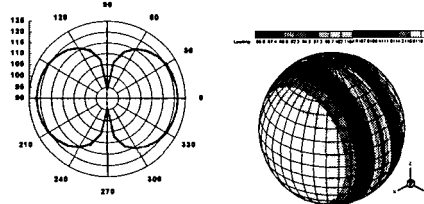
본 연구는 국방과학연구소 수중음향특화연구센터의 '수중 추진기 소음 해석 연구 (UA-41)' 의 일부로 수행 되었으며 도움을 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. H.Seol, B.Jung, J.-C. Suh, and S. Lee, "Prediction of Non-cavitating Underwater Propeller Noise", JSV, Vol.257, No.1, pp.131-156, 2002.
2. Ching-Yeh Hsin, "Development and Analysis of Panel Methods for Propellers in Unsteady Flow", Ph.D Thesis, MIT, 1990
3. J.E.Ffwoes Williams and D.L.Hawkings, "Sound Generated by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion", Philosophical Transactions of the Royal Society, A264, 1969



(a) Thickness noise



(b) Loading noise  
Fig.1 Noise directivity

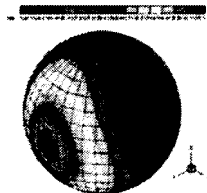


Fig.2 Sheet cavitation noise directivity

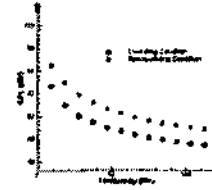


Fig.3 Comparison of loading noise

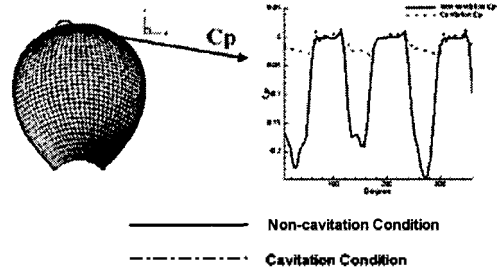


Fig.4 Comparison of Cp variation

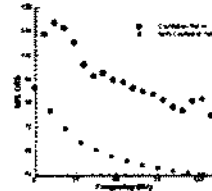
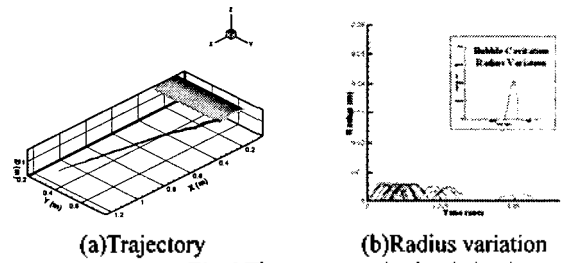
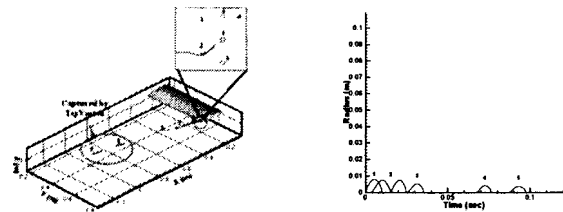


Fig.5 Comparison of overall noise



(a)Trajectory (b)Radius variation  
Fig.6 Tip vortex cavitation behavior



(a)Trajectory (b)Radius variation  
Fig.7 Captured by tip vortex

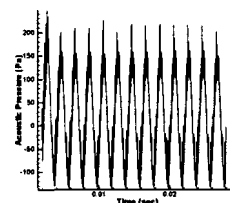


Fig.8 Acoustic pressure