

블레이드 형상변화에 따른 수중 추진기 방사 소음 예측에 관한 연구 Numerical Prediction of Underwater Propeller Noise

설한신†
Hanshin Seol

Key Words : Underwater Propeller (수중추진기), Propeller Noise(추진기 소음), Acoustic Analogy(음향상사).

ABSTRACT

Noise reduction and control is an important problem in the performance of underwater acoustic system and on the habitability of the passenger ship for crew and passenger. Furthermore, sound generated by a propeller is critical in underwater detection and is often related to the survivability of the vessel especially for military purpose. Generally propeller noise is often the dominant noise source of marine vehicle. The flow field is analyzed with potential-based panel method, and then the time dependent pressure and sheet cavity volume data are used as the input for Ffowcs Williams-Hawkings formulation to predict the far-field acoustics. Through this study, the dominant noise source of underwater propeller is analyzed, which will provide a basis for proper noise control strategies.

1. 서론

수중 프로펠러의 소음 문제는 특히 잠수함의 개발 이후로 매우 중요시 되어 왔으며 현재는 고급 여객선등에서 수중 추진기 소음 문제가 대두되고 있다. 또한 프로펠러의 소음은 소음 강도가 크고 프로펠러의 형상, 크기, 블레이드 수에 따라 독특한 음문(音紋)이 존재하여 함정의 식별 자료로 사용되기 때문에 굉장히 중요하다. 저소음 추진기의 대표적인 것이 스쿠 추진기라고 할 수 있다. 스쿠 추진기는 블레이드가 반류장에서 회전할 때 캐비테이션의 발생과 확장, 소멸에 의해 선체 진동의 기진력 및 소음을 발생하게 되는데 추진기에 스쿠를 적용시키면 추진기 날개가 동시에 느린 반류 유동장에 들어가는 것을 피하고 순차적으로 들어가게 함으로써 캐비테이션의 발생을 시차적으로 분산시켜 기진력 및 소음을 감소시키는 원리이다. 이번 연구에서는 스쿠 분포가 다른 세가지 형태의 모델 추진기를 이용하여 스쿠 분포에 따라서 추진기 소음의 변화를 알아 보았다.

본 연구에서는 다양한 스쿠 분포를 가지는 추진기의 비공동 소음과 공동 소음의 주된 소음원인 얇은 층 캐비테이션 소음을 수치적으로 예측하였다.

2. 이론

2.1 추진기 유동 해석

유동장 해석방법은 포텐셜을 바탕으로 한 패널 방법을 이용하여 비정상 유동중에 프로펠러의 공동 유동을 해석하였다. 비정상 유동중의 프로펠러에서 발생하는 얇은 층 캐비테이션과 표면 압력 변동을 해석하기 위하여 Laplace 방정식과 Green의 제 3 정리를 바탕으로 한 적분 방정식을 사용하였다.

패널 방법을 이용한 비정상 프로펠러 해석은 Hsin(1990)등에 의해서 개발되었다. 이 방법은 Discrete time-stepping 알고리즘에 기반을 둔다. 적분 방정식을 매 시간마다 계산하여 시간에 종속적인 항들을 update 하는 것이다.

또한 비정상 공동 유동중의 프로펠러에서 발생하는 얇은 층 캐비테이션과 표면 압력 변동을 해석하기 위하여 위와 같은 적분방정식을 이용하였다. 비정상 유입류 부분 또는 초월 공동 프로펠러를 고려할 때 wetted 표면과 얇은 층 캐비티 표면의 임의의 점 p 와 임의의 시간 t 에서의 교란 포텐셜 $\phi_p(t)$ 는 아래와 같이 나타내어진다.

$$2\pi\phi_p(t) = \int_{S_{wet}(t), S_c(t)} \left[\phi_q(t) \frac{\partial}{\partial n_q(t)} \left(\frac{1}{R(p,q)} \right) - \frac{\partial \phi_q(t)}{\partial n_q} \frac{1}{R(p,q)} \right] dS + \int_{S_w(t)} \Delta \phi_w(t) \frac{\partial}{\partial n_q(t)} \left(\frac{1}{R(p,q)} \right) dS \quad (1)$$

† 설한신; 한국해양연구원 해양시스템안전연구소
E-mail : hsseol@moeri.re.kr
Tel : (042) 868-7695, Fax : (042) 868-7683

여기에서 q 는 적분 영역에 해당하고 $n_q(t)$ 프 로펠러의 wetted 표면의 단위 법선 벡터로 얇은 층 캐비티 표면에서 유체 표면으로 향한다. $R(p; q)$ 는 q 점부터 p 점까지의 거리이며 $\Delta\phi_w(t)$ 는 뒷전 후류면에서의 포텐셜 값의 차이 이다.

2.2 추진기 소음 해석

추진기의 소음을 예측하기 위하여 Farassat 의 적 분 방정식을 이용하였다. Ffowcs Williams 와 Hawkings 는 Lighthill 의 음향 상사법을 이용한 지 배 방정식을 유도하였으며 Farassat 은 Ffowcs Williams-Hawkings 방정식을 이용하여 적분형태의 식을 개발하였다. 이 적분형태의 방정식은 물체의 형상과 움직임을 고려하여 해를 구할 수 있다. $f(\vec{y}, t) = 0$ 이 회전익 표면을 나타내며 그 외부 영역에서 $f > 0$ 가 성립하며 거리가 음원의 위치 변수를 통하여 지연시간 τ 의 함수 관계를 이용하 면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$p'(\vec{x}, t) = p'_T(\vec{x}, t) + p'_L(\vec{x}, t) \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} 4\pi p'_T(\vec{x}, t) &= \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 \dot{v}_n}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS \\ &+ \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 v_n (r \dot{M}_i \hat{r}_i + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \\ 4\pi p'_L(\vec{x}, t) &= \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{l}_i \hat{r}_i}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS \\ &+ \int_{f=0} \left[\frac{l_r - l_i M_i}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS \\ &+ \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{l_r (r \dot{M}_i \hat{r}_i + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \end{aligned}$$

$p'_T(\vec{x}, t)$, $p'_L(\vec{x}, t)$ 는 각각 두께소음과 하중소 음 항을 나타내며, \dot{M}_i 와 \dot{l}_i 는 각각 지연시간에 대한 미분을 나타낸다. 위 식은 복잡한 피적분항 을 가지고 있으나 관찰자 시간에서의 수치적 미분 에 의한 정확도 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 임의의 블레이드 형상과 움직임 그리고 임의 의 하중조건에 대해 모두 적용할 수 있으며 근접 장(near-field)과 원지장(far-field)에 대한 효과를 나 타낼 수 있다.

블레이드 표면의 얇은 층 캐비테이션 소음은 캐비티 체적 총합의 시간 변화에 밀접한 관계가 있으며 하나의 큰 진동 버블처럼 소음을 방사하는 홀극 특성을 가지는 소음원이 된다. 또한 블레이 드와 함께 회전하고 있기에 이러한 소음원의 회전 운동효과도 고려하여야 한다. 따라서 Farassat 의 적분방정식에 이에 대한 소음원 항을 추가 하였다

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

위에서 언급한 지연시간은 아래와 같은 형태로 계산 되어진다.

$$g = \tau - t + \frac{r}{c_0} \quad (4)$$

그러나 r 이 τ 의 함수이기 때문에 닫힌 형태 (closed form)로 계산될 수는 없으며 수치적 반복 계산이 필요하다.

$$c(\tau^* - t) + r = 0 \quad (5)$$

식(5)에서 τ^* 는 지연시간, 음원시간 또는 방사 시간을 의미하여, 주어진 관찰자 시간 t 에 대한 해의 의미로서 위첨자 *를 첨가하였다. 본 논문에서 는 회전익상의 각 음원 지연시간의 결정에 매우 빠른 수렴성을 가지는 Newton 방법이 적용되었다.

소음 계산은 블레이드 표면을 여러 개의 패널 로 나누는 것으로 시작된다. 식 (2)의 적분은 피 적분항의 각 패널의 중심 값을 패널 전체의 값으 로 근사화하여 계산하였다. 패널은 방사 소음에의 기여도가 가장 큰 블레이드 팁 부분에서의 정확도 향상을 위하여 팁 부분에 밀집 시켰으며 시위방향 으로는 곡률변화가 심한 블레이드의 앞전 부분에 밀집되도록 하였다. 또한 Newton 방법을 통하여 지연시간을 계산하였다. 식 (3)은 날개 두께에 의 한 음압과 날개 표면에서의 하중 변화에 의한 음 압 그리고 얇은 층 캐비테이션의 체적변화로 인한 음압을 선형적으로 더하여 전체 음압을 계산하며 이들은 또한 근접장 항들과 원지장 항들로부터 얻 어진다. 모든 패널에 의한 영향을 합하면 음압의 시간에 대한 변화가 얻어진다.

음압 변화는 푸리에 변환을 통해 각 하모닉에 대한 음압수준(Sound Pressure Level)의 단위를 가 진 음향 스펙트럼으로 변환된다. 각각의 하모닉에 대한 푸리에 계수는 다음과 같은 식으로 나타낸다

$$a_n(\bar{x}) = \frac{2}{T} \int_0^T p'(\bar{x}, t) \cos(\omega_n t) dt$$

$$b_n(\bar{x}) = \frac{2}{T} \int_0^T p'(\bar{x}, t) \sin(\omega_n t) dt \quad (6)$$

계산에 의한 결과는 $p'(\bar{x}, t)$ 에 대한 불연속적 값들을 나타내므로 윗식들은 수치적으로 적분하여야 한다. 수치 적분은 Simpson 적분법을 이용하였으며 이는 Fast Fourier Transform 에 비해 정확한 결과를 가져온다. n 번째 하모닉에 대한 음압수준은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$SPL_n = 10 \log_{10} \frac{a_n^2(\bar{x}) + b_n^2(\bar{x})}{P_{ref}^2} \quad (7)$$

여기서 P_{ref} 는 기준음압으로 수중인 경우 $1.0 \mu Pa$ 을 사용하였다. 그리고 전 음압수준(Overall Sound Pressure Level)은 다음과 같이 계산하였다.

$$L = 10 \log_{10} \left(\sum_i 10^{L_i/10} \right) \quad (8)$$

3. 수치해석 결과와 분석

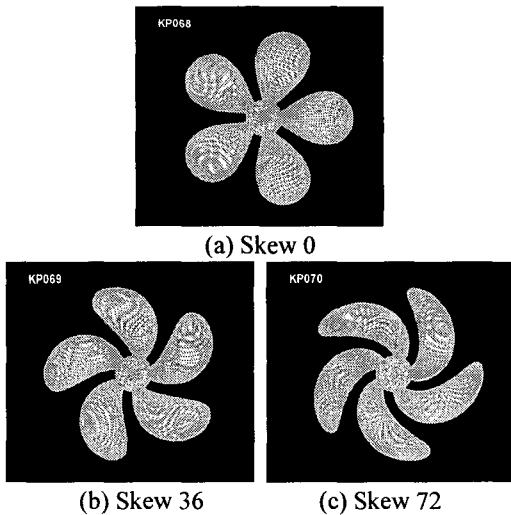


Fig.1 Propeller models

포텐셜을 기반으로한 패널방법으로 구해진 블레이드 표면 압력분포 수치와 얇은 층 캐비티 체적 변화 값을 이용하여 앞서 언급한 수치적 방법으로 소음을 예측하였다.

비균일 유입류 상태에서 각 모델의 비공동 소음과 공동 소음을 예측하였으며 소음레벨이 미치는 영향을 분석하였다. 소음 해석 결과는 다양한 관찰자 위치에서의 시간에 대한 음압의 변화와 음향 스펙트럼, 이러한 결과를 바탕으로 각 소음원에 대한 방향성과 음압 수준을 나타내었다.

KP068, KP069, KP070 추진기 모델을 이용하였으며 이 모델들은 각각 스쿼 0, 36, 72 를 가진다. Fig.1 은 추진기 형상과 유동 해석과 소음 예측에 필요한 패널 분포를 보여준다.

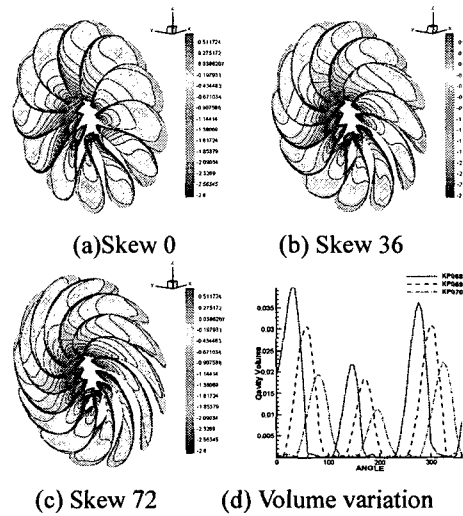


Fig. 2 Results of flow analysis (Cp distribution & Cavity volume variation)

각 블레이드를 span 방향으로 40 개, chord 방향으로 80 개의 패널로 나누었으며 유동해석 결과인 블레이드 표면 압력 변화와 캐비티 전체 체적의 변화를 Fig.2 에 나타내었다.

Fig.3 는 캐비테이션이 발생하지 않은 상황에서 비공동 상태에서 주된 소음원이 되는 하중 소음의 방향성과 소음 수준을 나타내었다. Fig. 4 와 Fig. 5 는 캐비테이션 상태에서 소음 레벨과 방향성, 최대 음압치를 비교하여 나타낸 결과이다. 스쿼 크기에 따라서 소음 레벨이 크게 차이 남을 볼 수 있다. 이는 방위각에 따른 캐비티 체적 크기를 나타낸 Fig. 2(d)와 소음원의 세기에 비례하는 체적의 속도 변화율을 나타낸 Fig. 6 에서 그 이유를 찾을 수 있다. 스쿼가 클수록 발생하는 전체 얇은 층 캐비티의 크기가 작아짐을 볼 수 있다. 또한 홀극 특성을 가지는 공동 소음원의 세기는 캐비티의 체적의 속도 변화율에 비례하는데 스쿼가 있는 추진기는 블레이드가 반류 지역에 순차적으로 들어가게 됨으로써 공동 소음원의 세기가 되는 체적 속도 변화율을 감소시킴으로써 소음을 낮출 수 있

다고 볼 수 있다.

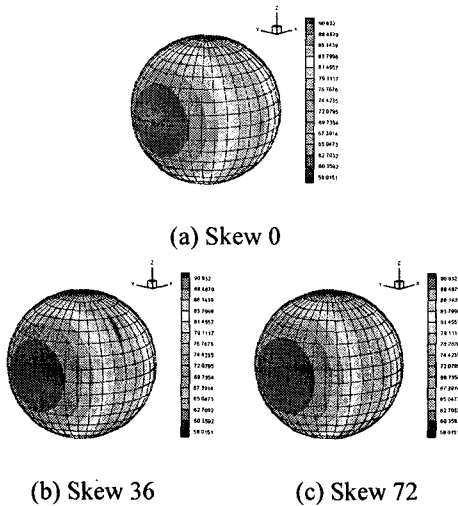


Fig.3 Loading noise SPL & directivity

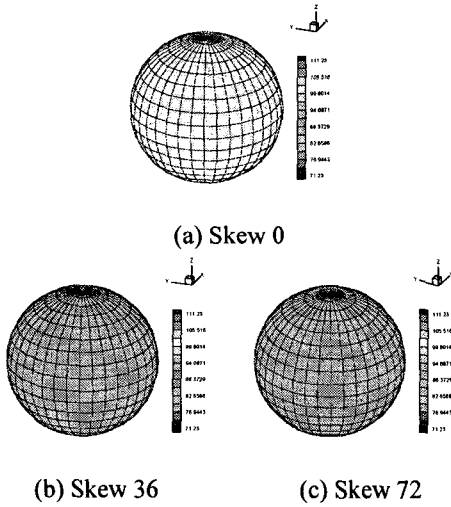


Fig. 4 Sheet cavitation noise SPL & directivity

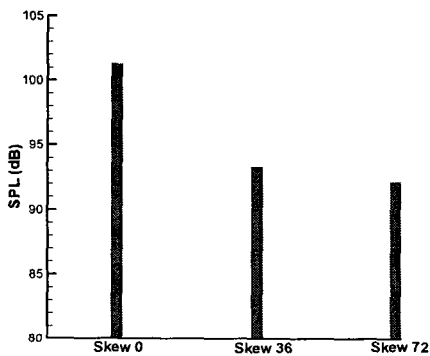


Fig. 5 Comparison of maximum SPL (Cavitation Noise)

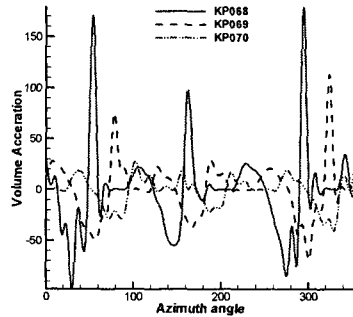


Fig. 6 Comparison of source strength

4. 결론

이상과 같이 수치해석적 기법을 이용하여 스쿠에 따른 수중 추진기의 비공동 및 공동 소음을 분석하여 소음원의 특성을 파악하여 스쿠가 소음에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 기법 및 결과는 향후 적절한 수중 추진기의 소음 제어책을 마련하는 기반으로 활용 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) 설한신, 등, 2004, 수중 프로펠러의 소음 예측에 측에 관한 연구 (Part. 1 비공동 소음)? 대한조선학회 논문집, 제 41 권 제 2 호, pp21~32.
- (2) 설한신, 등, 2004, 수중 프로펠러의 소음 예측에 측에 관한 연구 (Part. 2 공동 소음)? 대한조선학회 논문집, 제 41 권 제 2 호, pp33~46.
- (3) Blake, William K, 1986, Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Academic Press Inc.
- (4) Ffowcs Williams, J.E. and Hawkins D.L, 1969 Sound generated by turbulence and surfaces in arbitrary motion, Philosophical Transactions of Royal Society Series. A 264, no.1151, pp.321-342.