한국소음진동공학회 2012년 추계학술대회논문집, pp. 562~567

대형 선박용 프로펠러의 비공동소음 예측

Non-Cavitation Noise from Large Scale Marine Propeller

유기완† · 김봉기* · 유용주**

Ki-Wahn Ryu, Bong-Ki Kim and Yong-Joo Yoo

Key Words : Propeller(추진기), Panel Method(패널방법), Acoustic Analogy(음향상사), Non-cavitation Noise (비공동소음), Thickness Noise(두께소음), Loading Noise(하중소음), Directivity Pattern(방향성)

ABSTRACT

Noises from the large scale marine propeller are calculated numerically on non-cavitation condition. The hydrodynamic analysis are carried out by potential based panel method with time marching free wake approach. The distribution of hyrodynamic loads on the propeller surface and noise signals are obtained using the unsteady Bernoulli's equation and the Farasssat formula respectively. It turns out that the noise signal shows strong peak at the blade passage frequency. Noise signals and directivity patterns for both the thickness and the loading noise are compared with each other. The directivity pattern for the loading noise shows minor lobe at the backward side of the rotating disc plane.

1. 서 론

선박용 프로펠러에서 발생되는 소음의 종류에는 크게 공동소음 (cavitation noise)과 비공동소음 (non-cavitation noise)으로 나뉜다. 이러한 소음은 선박 내부의 환경개선 측면과 선박 외부로 전달되는 소음 영향의 최소화 측면에서 많은 연구가 이루어져 왔다. 공동소음은 프로펠러 표면을 따라 이동하는 물의 입자가 임계압 이하 지점에서 기포화되었다가 이 기포 알갱이가 표면 압력이 회복되는 지점으로 이동되면 급격히 소멸되면서 프로펠러 표면의 침식을 불러옴과 동시에 매우 지배적인 소음원으로 알려져 있다. 비공동소음은 프로펠러 주위에 공동이 존재하지 않는 경우의 소음이며, 프로펠러의 회전에 따른 이산소음과 광역소음으로 구성된다. 이외에도 명음 현상이라는 것이 있는데, 이는 프로펠러 후단의 와류에 의한 압력변동 주파수와 프로펠러 구조물의 국부적인 고유진동수가 일치할 때 발생하는 공명현상이다. 명음은 프로펠러 후단의 형상을 모따기 등의 변형을 통해 제거할 수도 있지만 이러한 처방이 전혀 무효한 경우도 존재하는 수중 프로펠러만의 특이 현상이다 [1].

본 연구에서는 비공동 소음원 중에서 프로펠러에 의한 이산주파수 소음 해석에 초점을 맞추었다. 특히 저속 항진하는 선박이나 몰수체에서는 이러한 비공동 이산소음이 주된 소음원으로 작용하므로 특별한 경우에 주관심사가 되어 국내외에서 많은 인력과 예산이 투입되고 있는 분야이기도 하다 [2, 3].

프로펠러의 이산 소음 특성은 블레이드 통과주파수 (blade passage frequency, BPF)와 그 하모닉으로 구성되는 강한 주기성이 특징이다. Gutin [4]은 이러한 주기성을 감안하여 프로펠러 소음을 주파수 영역 (frequency domain)에서 해석하였으며, 완성된 대수형태의 소음 예측식을 얻어내었다. 그러나 때로는 유동변수의 적용성에 의해 시간영역 (time domain)에서 해석이 편리한 경우도 발생하게 된다. 이는 자유 유동장에서의 Lighthill 방정식

† 교신저자; 정회원, 전북대학교
E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr
Tel :063-270-4286, Fax : 063-270-2472
* 한국기계연구원
** 현대중공업(주)

[5]으로부터 물체의 이동 효과를 반영한 형태로 발전하였으며, 현재 소음해석을 위해 가장 널리 알려진 식은 Farassat [6]에 의해 Ffowcs Williams - Hawkings 방정식 [7]의 공간 미분항을 시간 미분항만으로 다루기 편하게 변환한 식이다.

본 연구에서는 Farassat의 공식을 이용하여 주어진 선박용 프로펠러의 소음 방사 특성을 시간 영역에서 해석하기로 한다. 시간 영역에서 얻어진 소음 신호는 주파수 분석을 통해 BPF 특성을 파악하며, 프로펠러 주변으로 방사되는 음의 지향성을 얻어낸다. 소음해석을 위해 필요한 프로펠러 표면의 하중분포는 포텐셜 기저 패널 방법 (potential based panel method)과 자유후류 방법 (free wake method)을 이용하기로 한다.

2. 유동장 및 소음장 해석

2.1 유동장 해석

비압축성 비점성 비회전 흐름을 만족하는 포텐셜 유동장의 지배방정식은 Laplace 방정식으로 나타낼 수 있으며, 속도 포텐셜을 ϕ라 할 때 다음과 같다.

$$\nabla^2\phi = 0 \tag{1}$$

이 식의 포텐셜 값 $\phi = \phi(\vec{x}, t)$는 정상유동 또는 비정상 유동을 만족하는 값이다.

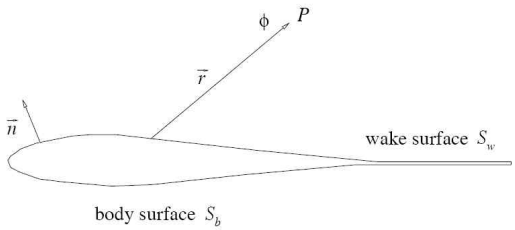


Fig. 1. Nomenclature used to define the potential flow problem

Laplace 방정식은 편미분방정식으로 이 방정식의 해를 구하는 방법은 여러 가지가 있으며, 그 중에서 Green의 상반정리를 이용하여 해를 구할 수 있다. 이 방법으로부터 Fig. 1과 같이 물체 표면의 한 지점에서 거리 r만큼 떨어진 위치 P에서의 유동은 다음 식으로 나타낼 수 있다 [8].

$$\int_{S_b} \mu \frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{1}{r}\right) dS + \int_{S_w} \mu_w \frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{1}{r}\right) dS - \int_{S_b} \sigma \frac{1}{r} dS = 2\pi\mu_p \tag{2}$$

여기서 σ는 용출 (source)의 세기이고, μ는 중첩 (doublet)의 세기로서 물체 표면상의 중첩 값, μ_p는 물체 표면상의 점 P에서의 $r \to 0$으로 수렴하였을 때의 μ의 값, μ_w는 후류의 중첩 세기이고, r은 물체 표면의 한 점에서 유동장내 임의의 점 P까지의 거리를 의미한다. Fig. 1에서 S_b는 블레이드 표면을 나타내고, S_w는 후류 면을 나타낸다. 식 (2)는 S_b로 둘러싸인 체적 내부의 포텐셜 ϕ_i가 원거리 자유흐름의 포텐셜 ϕ_∞와 같다는 Dirichlet 경계조건 (boundary condition)이 적용된 식이며, 용출의 세기는 물체표면에 수직으로 유기되는 속도 값을 사용한다 [8]. 식 (2)를 풀기 위해서 물체 표면 S_b를 유한한 개수의 패널로 차분화한 후 아래와 같이 대수 행렬식으로 바꾸어 패널 조절점(control point)에서의 중첩의 세기를 결정하게 된다 [9, 10].

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{N_S} \mu_k C_{jk} - 2\pi\mu_j + \sum_{k=1}^{N_w} \mu_w C_{jk} + \sum_{k=1}^{N_S} \sigma_k B_{jk} = 0 \tag{3}$$

위 식에서 하첨자 j, k는 조절점을 나타내며, C_{jk}와 B_{jk}는 각각 중첩과 용출에 의한 영향계수 행렬, N_S, N_w는 물체 표면상의 패널과 후류상의 패널 개수를 각각 나타낸다. 식 (3)에서 미지수는 μ_j이고, 후류의 세기 μ_w와 용출의 세기 σ_k는 아래와 같다.

$$\mu_w = \mu_u - \mu_l \tag{4}$$

$$\sigma_k = (\vec{V}_0 + \vec{\Omega} \times \vec{r} - \vec{V}_w)_k \cdot \vec{n}_k, \tag{5}$$

하첨자 u, l은 로터 뒷전에서 상하면 패널을 표시하고, 첨자 k는 조절점을 나타낸다. $\vec{V}_0$, $\vec{\Omega}$, $\vec{V}_w$는 프로펠러의 이동속도, 회전각속도, 후류에 의해서

조절점에 유도되는 속도를 각각 나타낸다. $k-$조절점에서의 패널 표면을 따라 흐르는 유속 $\vec{Q}_k=(q_l,q_m,q_n)$는 표면에 접선 방향이며, 여기서 패널 조절점의 단위 국부 좌표계를 $\vec{l},\vec{m},\vec{n}$이라 하면 각 조절점에서의 속도 성분은 다음과 같다.

$$q_l=\frac{\partial\mu}{\partial l},\ q_m=\frac{\partial\mu}{\partial m},\ q_n=\sigma \tag{6}$$

$k-$조절점에서의 압력 계수는 비정상 Bernoulli 방정식으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$c_{p_k}=1-\frac{Q_k^2}{v_{ref}^2}-\frac{2}{v_{ref}^2}\frac{\partial\phi_k}{\partial t} \tag{7}$$

여기서 v_{ref}는 블레이드 팁 속도로 하였다.

유동해석을 하기 위해서는 후류의 형상을 계산하는 자유후류 방법이나 후류의 형상을 지정하는 경험후류 방법이 있다. 경험후류 방법은 자유후류 방법에 비해서 계산속도가 빠른 장점이 있으나, 실험 자료에 바탕을 둔 것이므로 실험 조건을 벗어난 경우에는 적용의 한계가 있다. 특히 선박용 프로펠러에 대해서는 후류 형상을 수식으로 재현할 자료가 없어서 본 연구에서는 자유후류 방법을 사용하였다. 이 기법은 후류를 이루는 격자점의 이동속도를 구하여 다음 시간에서 새로운 위치를 찾아주는 순차적 시간 적분법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 시간적분 방법으로 4차의 Runge-Kutta방법을 사용하였다.

2.2 소음장 해석

Farassat의 공식 1A [7]는 두께소음과 하중소음을 다루기에 편리한 수식으로 나타낸다. 먼저 두께소음은 다음과 같이 표현된다.

$$4\pi p'_T(\vec{x},t)=\int_{f=0}\left[\frac{\rho_0c_0\dot{M}_n}{r(1-M_r)^2}\right]dS+\int_{f=0}\left[\frac{\rho_0c_0M_n(r\dot{M}_i\hat{r}_i+c_0M_r-c_0M^2)}{r^2(1-M_r)^3}\right]dS \tag{8}$$

여기서 적분은 $f=0$인 물체 표면 S에 대해 수행한다. c_0와 ρ_0는 유체의 음속과 밀도, $M_i=v_i/c_0$는 물체의 국부 이동 마하 수, $M_r=M_i\hat{r}_i$은 상대 마하 수, $M_n=v_in_i/c_0$이다. $M=\sqrt{M_iM_i}$는 음원의 이동 마하수, $\hat{r}_i=\vec{r}/r$는 거리 벡터에 대한 단위벡터, $r=\sqrt{r_ir_i}$는 음원과 관찰자까지의 거리이다. v_i,n_i는 물체의 국부 이동속도와 수직 단위벡터를 각각 표시하며, 괄호 [ ] 기호는 지연시간 $\tau=t-r/c_0$을 고려한 연산을 의미한다. 두 번째로 하중소음은 다음과 같다 [7, 10].

$$4\pi p'_L(\vec{x},t)=\frac{1}{c_0}\int_{f=0}\left[\frac{\dot{l}_i\hat{r}_i}{r(1-M_r)^2}\right]dS+\int_{f=0}\left[\frac{l_r-l_iM_i}{r^2(1-M_r)^2}\right]dS+\frac{1}{c_0}\int_{f=0}\left[\frac{l_r(r\dot{M}_i\hat{r}_i+c_0M_r-c_0M^2)}{r^2(1-M_r)^3}\right]dS \tag{9}$$

여기서 l_i는 단위면적당 유체에 가해지는 힘이다.

3. 결과 및 토의

소음 해석의 검증을 위해 Fig. 2에서 Gallman [11]이 팁 마하수 0.8인 1/7축소형 UH-1H 헬리콥터 로터 모형에 대해 수행한 두께소음 결과와 비교하였다. 본 비교를 통해 소음 예측 프로그램의 정확도를 확인하였다.

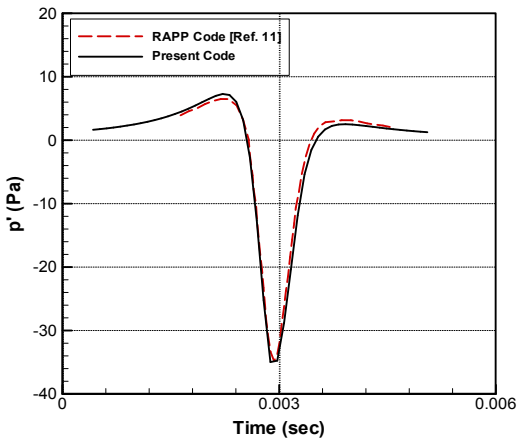


Fig. 2 Comparison of acoustic pressure signals for 1/7-scaled UH-1H rotor

Table 1 Operating condition of the marine propeller

Number of blade, *b*	5
Diameter, *D* [m]	3.20
Rotating speed [rpm]	185
Sea speed [kt]	11

본 해석을 위해 사용된 선박용 프로펠러의 운전 조건을 Table 1에 나타내었다. 5엽 프로펠러이며, 프로펠러를 향한 해수유속은 11 노트로 정하였다.

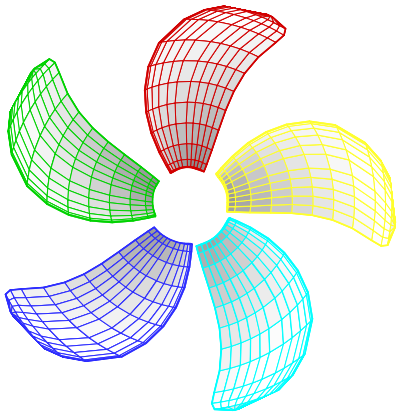


Fig. 3 Plan view of marine propeller

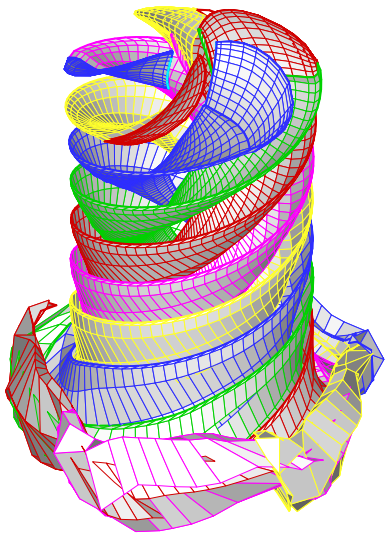


Fig. 4 Wake geometry below marine propeller

Fig. 4는 패널 방법을 이용하여 프로펠러 후류 유동장을 얻어낸 결과를 보여준다. 순차적 시간적분시에 사용한 시간 간격은 0.005 sec이며, 총 120회의 반복 계산을 통해 얻어낸 결과이다. 계산에 사용한 와류 코어의 반경은 프로펠러 반경의 15%로 하였다. 프로펠러 표면의 압력 분포는 Fig. 5에 나타내었다. 그림에 보이는 부분은 프로펠러 표면 중에서 suction side이다. Fig. 6은 프로펠러의 회전면 상에서 허브 중심으로부터 1.5*D* 만큼 떨어진 위치에서 얻어낸 두께소음, 하중소음, 그리고 이 두 소음항을 합한 전체 소음의 시간에 따른 변동량을 나타낸 그림이다. 본 계산을 위해서 해수의 밀도는 1000 kg/m^3, 음속은 1,500 m/s로 가정하였다. 소음 신호는 전형적인 정현파 형태로 나오며 이는 주파수 분석 시에 BPF에서 강한 피크를 보일 것임을 예상할 수 있다.

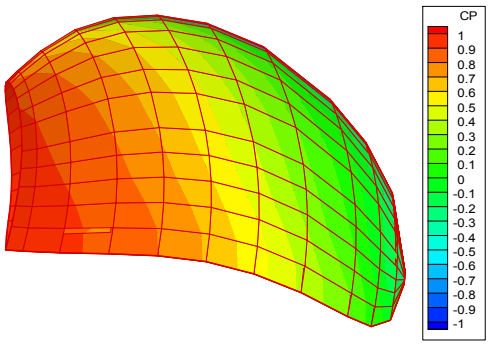


Fig. 5 Cp distribution on the suction side

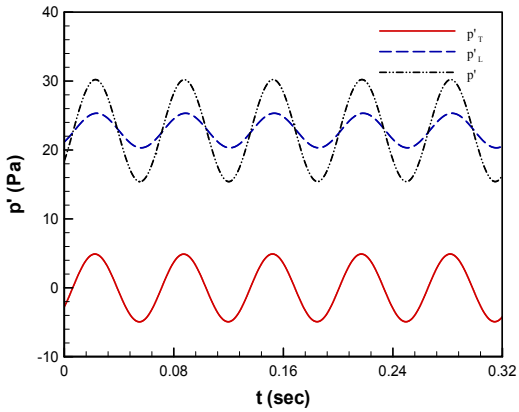


Fig. 6 Time history of flow noise signals

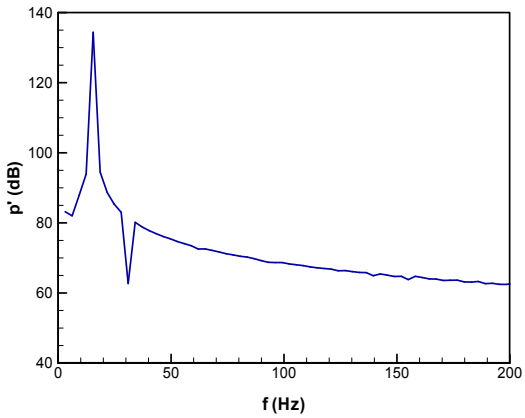
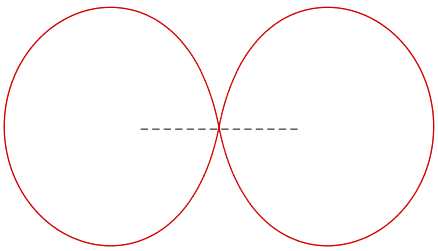
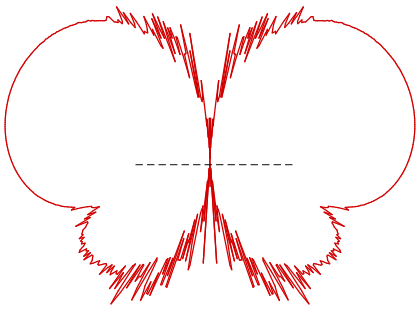


Fig. 7 Noise signal in frequency domain



(a) Thickness noise pattern



(b) Loading noise pattern

Fig. 8 Directivity pattern (dashed line denotes the propeller rotating plane)

Fig. 7은 두께소음과 하중소음을 합산한 전체 소음에 대해서 주파수 분석을 통해 음압을 데시벨로 나타낸 결과이다. 기준 음압은 10^{-6} Pa을 사용하였다. 가중처리를 하지 않았을 때 음압의 피크는 BPF인 15.4 Hz에서 134 dB를 보이고 있다. Fig. 8은 프로펠러 주위로 퍼져나가는 소음의 방사 형태를 두께소음과 하중소음으로 나누어 나타내었다. 소음의 지향성은 프로펠러 회전 축 방향으로 가장 작은 지향성을 공통적으로 보이고, 하중소음의 지향성은 전체적으로 프로펠러 전진 방향으로 지향성이 좀 더 크게 보이지만 회전축과 가까운 프로펠러 후방 쪽으로 작은 로브 (minor lobe)가 존재하는 특성도 관찰되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 직경이 3.2 m인 대형 선박용 5엽 프로펠러의 비공동 소음에 대한 수치해석을 수행하였다. 유동장은 포텐셜 기저 패널법을 이용하였고, 소음해석을 위해서는 Farassat의 식을 적용하였다. 본 연구를 통해 얻어낸 결과는 다음과 같다.

- 주파수 분석을 통해 BPF에서 강한 피크를 보여주었으며 그 값은 134dB에 이르렀다. 하모닉 성분은 나타나지 않았다.
- 하중소음에서는 프로펠러의 후방으로 작은 로브가 존재하는 특징을 보여주었다. 그러나 전반적으로 프로펠러의 전방으로 전파되는 소음이 후방으로 전파되는 소음에 비해 약간 우세한 편이다.

후 기

본 연구는 2011년 한국기계연구원과 현대중공업의 지원 하에 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) 황원우, 이철원, 이도경, 정태석, 이주호, 2011, 선박 프로펠러 명음 현상에 대한 고찰, 한국소음진동공학회 2011년 춘계학술대회논문집, pp. 471-472.

(2) 설한신, 이수갑, 표상우, 서정천, 2004, 수중 프로펠러의 소음 예측에 관한 연구 (Part 1, 비공동 소음), 대한조선학회 논문집, 제41권, 제2호, pp. 21-32.

(3) 이창섭, 조충호, 1999, 프로펠러의 비정상하중에 의해 발생하는 소음의 이론적 추정, 대한조선학회 논문집, 제36권, 제3호, pp. 29-40.

(4) Gutin, L., 1948, On the Sound Field of a Rotating Airscrew, English Translation NACA TM No. TM1195.

(5) Lighthill, M. J., 1952, On sound generated aerodynamically I. General theory, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 211, pp. 564-587.

(6) Farassat, F., and Succi, G. P., 1983, The prediction of helicopter rotor discrete frequency noise, Vertica, Vol. 7, pp.309-320.

(7) Ffowcs Williams, J. E., and Hawkings, D. L., 1969, Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Vol. 264, pp. 321-342.

(8) Maskew, B., 1981, Prediction of subsonic aerodynamic characteristics: a case for low-order panel methods, J. of Aircraft, Vol. 19, pp.157~163.

(9) 유기완, 나선욱, 이덕주, 1997, 정지 비행 시 로터 후류 모형의 비교 검토, 한국항공우주학회지, 제25권, 제4호, pp. 11-20.

(10) 유기완, 2007, 피치각 변화에 따른 헬리콥터 로터에서의 두께 및 하중소음 방사, 한국항공우주학회지, 제35권, 제10호, pp. 868-874.

(11) Gallman, J. M., 1990, The validation and application of a rotor acoustic prediction computer program, Proceedings of the Army Science Conference, Durham, North California.