특집
함정 탑재장비 소음진동

# 선박의 추진기 명음 현상 고찰

최 성 희*
(STX조선해양 진동소음연구팀)

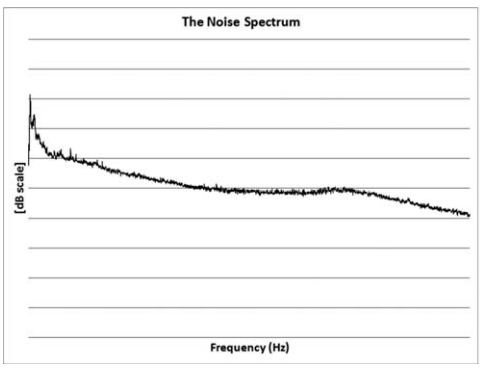
## 1. 머리말

선박 프로펠러 명음 현상은 일반적으로 프로펠러 끝단부의 유동 박리 주파수(vortex shedding frequency)와 프로펠러 날개의 고유진동수가 일치하여 발생하는 공진 현상으로써, 감쇄 음장을 형성하지 않는 경우에 명음으로 나타난다. 선박의 건조 단계에서 명음 현상의 사전 예측은 유동 박리 주파주 해석 및 수중음 전달 효율 계산의 부정확성으로 인해 신뢰도가 떨어지는게 사실이다. 또한 명음에 의한 소음은 선박의 기관실 및 선미부 구역의 주기관을 비롯한 많은 장비 소음으로 인하여 구분하기 쉽지 않다. 이 글에서는 실제 프로펠러 명음 발생 사례를 통하여 이의 특성을 고찰하고 프로펠러 명음 현상의 효율적 규명 방법에 대해 소개하고자 한다.

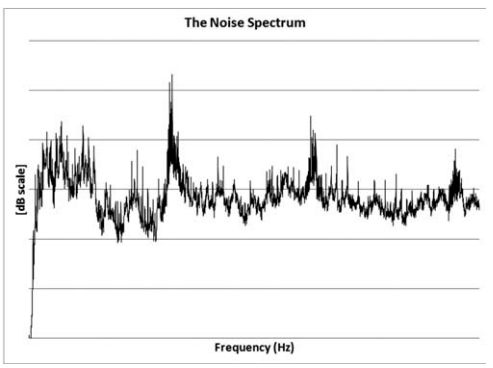
## 2. 선박에서 발생 가능한 이상 소음

명음의 특징을 상세히 설명하기 전에 선미부에서 발생 가능한 주요 소음에 대해 알아보도록 하자.

첫째, 선박 선미부의 가장 일반적인 소음원은 추진기의 회전에 의해 발생하는 변동압력과 공동(cavitation)이 선체 외판 주변에서 붕괴할 때 발생하는 충격에 의한 소음을 들 수 있다. 이러한 소음은 일반적으로 선박 운항 중에 발생하는 소음으로써 그림 1(a)와 같이 광대역 성분을 가



(a) 파도 및 공동에 의한 구조기인 소음



(b) 프로펠러 명음에 의한 소음

그림 1 이상 소음의 주파수 스펙트럼

* E-mail : nextchoi@onestx.com / Tel : (055) 548-7957

지는 것이 특징이다. 둘째, 조타 장비의 유압시스템에 의해 발생하는 소음이다. 이 소음은 주파수 영역에서 단일 피크를 보이며 1 kHz 이상의 고주파 소음이 발생한다. 셋째, 추진기 축과 베어링의 마찰에 의해서 발생하는 이상 소음이다. 이는 축의 회전 속도와 관련된 주파수 성분이 발생하는 측면에서는 명음과 비슷한 특징을 가지나 주로 1 kHz 이상의 고주파 소음이며 부가적으로 베어링의 온도가 급속하게 상승하는 특징이 있다. 마지막으로 추진기 날개에서 발생하는 명음을 들 수 있다. 이는 그림 1(b)와 같이 추진 축의 회전주파수에 의해 모듈레이션 된 신호 형태로 특정 주파수의 피크 성분을 가지고 그 주변에 사이드 밴드 형태의 피크가 발생하는 것이 그 특징이다. 명음 현상에 대해서 이후에 자세히 살펴보도록 하겠다.

## 3. 명음 신호 특성

명음은 추진기 날개 끝단부의 회전에 의한 유동 박리 주파수가 변하며 또한 추진기 날개의 위치에 따라 반류 분포가 달라지기 때문에 날개가 특정 영역을 통과할 때에 발생한다. 명음 신호는 식 (1)과 같이 추진기 회전수의 정수배를 기본 주파수로 하는 모듈레이션 함수와 날개 끝단의 유동 박리 주파수의 캐리어 함수로 나누어 신호를 분석할 수 있다.

$$f(t) = T(t)C(t)$$
$$T(t) : \text{모듈레이션 함수} \quad (1)$$
$$C(t) : \text{캐리어 함수}$$

모듈레이션 함수는 다음과 같이 푸리에 시리즈(Fourier series)로 표현 가능하다.

$$T(t) = \sum_k a_k \cos(\omega_{mk} t)$$
$$\omega_{mk} = \frac{2\pi}{T} k \quad (2)$$
$$T : \text{프로펠러 회전 주기}$$

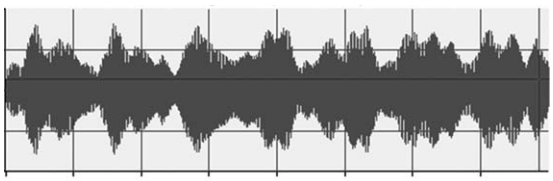
캐리어 함수는 각 고유 모드에서 정현파 함수로 표현할 수 있다.

$$C(t) = b_c \cos(\omega_v t)$$
$$\omega_v = 2\pi f_o \quad (3)$$
$$f_o : \text{프로펠러 고유진동수}$$

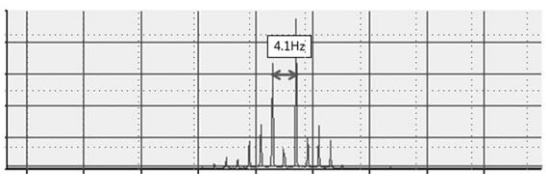
식 (2)~(3)에 의해 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t) = \sum_k a_k \cos(\omega_{mk} t) \cdot b_c \cos(\omega_v t)$$
$$= a_1 b_c \frac{1}{2}\left(\cos\left((\omega_v - \omega_{m1})t\right) + \cos\left((\omega_v + \omega_{m1})t\right)\right) +$$
$$= a_2 b_c \frac{1}{2}\left(\cos\left((\omega_v - \omega_{m2})t\right) + \cos\left((\omega_v + \omega_{m2})t\right)\right)$$
$$\cdots\cdots \quad (4)$$

식 (4)는 추진기의 캐리어 주파수를 중심주파수로 하여 추진기 회전수의 정수배 간격을 가지는 사이드 밴드를 나타내고 있으며 캐리어 주파수는 추진기 날개의 고유진동수, 사이드밴드 피크들은 엔벨롭(envelope) 신호의 푸리에 변환된 결과이다. 또한 식 (4)를 통해 사이드 밴드가 규칙적으로 존재한다는 것을 알 수 있다. 실제 특수목적 조사선에서 발생한 명음의 시간 신호와 이를 주파수 영역으로 변환한 스펙트럼 신호를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)에서 시간 영역의 신

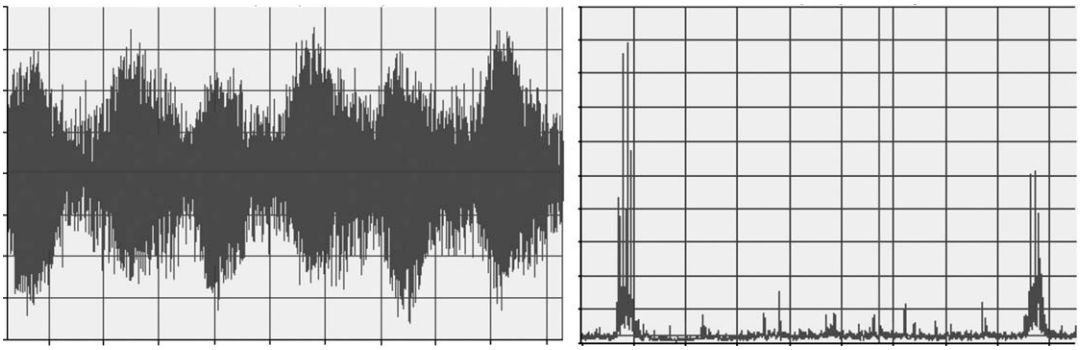


(a) 시간 영역에서의 소음 신호




(b) 주파수 영역에서의 소음 신호

그림 2 명음 신호 특성



(a) 시간 영역에서의 명음 신호 (b) 주파수 영역에서의 명음 신호

그림 3 선박의 명음 계측 결과

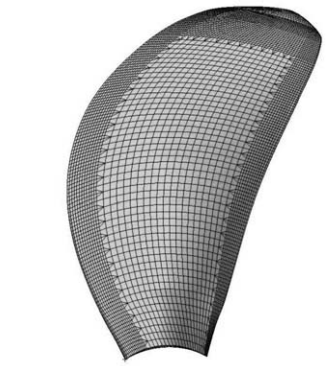
호는 모듈레이션 특성을 잘 보여주고 있으며 그림 2(b)에서는 685 Hz의 캐리어 주파수(추진기 날개의 고유진동수)를 중심주파수로 4.1 Hz 간격을 가지는 주요 피크를 확인할 수 있다.

계측 시의 추진기 축의 회전수는 122 rpm(2.03 Hz)이었으며, 4.1 Hz는 추진 축 회전수의 두 배이다. 이는 발생된 소음이 추진기의 회전주파수와 관련 있음을 의미하며, 더불어 사이드 밴드가 존재하여 계측된 신호가 추진기 명음에 의한 현상임을 확인할 수 있다.

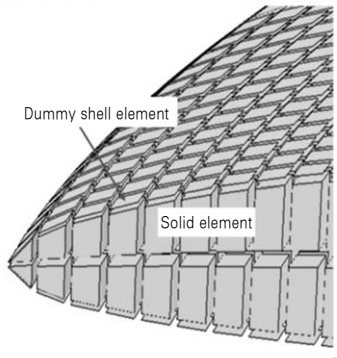
## 4. 명음 현상 확인을 위한 추진기 날개의 고유진동 해석

추진기 날개의 고유진동 해석은 최근 FEM 해석 기법의 발전에 따라 명음 현상 규명에 있어 비교적 정도 있는 결과를 보여 주며 계측된 신호와 유사한 주파수에 굽힘 모드 공진주파수의 존재 여부 확인을 통하여 명음 현상을 검증할 수 있다. 그림 3은 명음 현상이 발생한 실제 선박의 소음 계측 결과이며 명음의 중심주파수는 156.0 Hz에서 나타났다.

그림 4는 추진기 날개의 유한요소 모델링이며 날개 두께를 고려하여 입체요소로 모델링 한 것이다. 또한 추진기 날개의 경우, 유체와 접하게 되어 접수 진동해석이 수반되어야 하는데 입체요소모델에 대해서는 유체의 접수 효과를 고려



(a) 유한요소 모델




(b) 유한요소 부분 모델

그림 4 고유진동 해석을 위한 프로펠러 날개의 유한요소 모델

하는 것이 어렵기 때문에 날개의 고유진동수에 영향을 주지 않도록 박막의 가상 평판 요소를 생성한 후 MSC. NASTRAN의 가상 부가수질량법

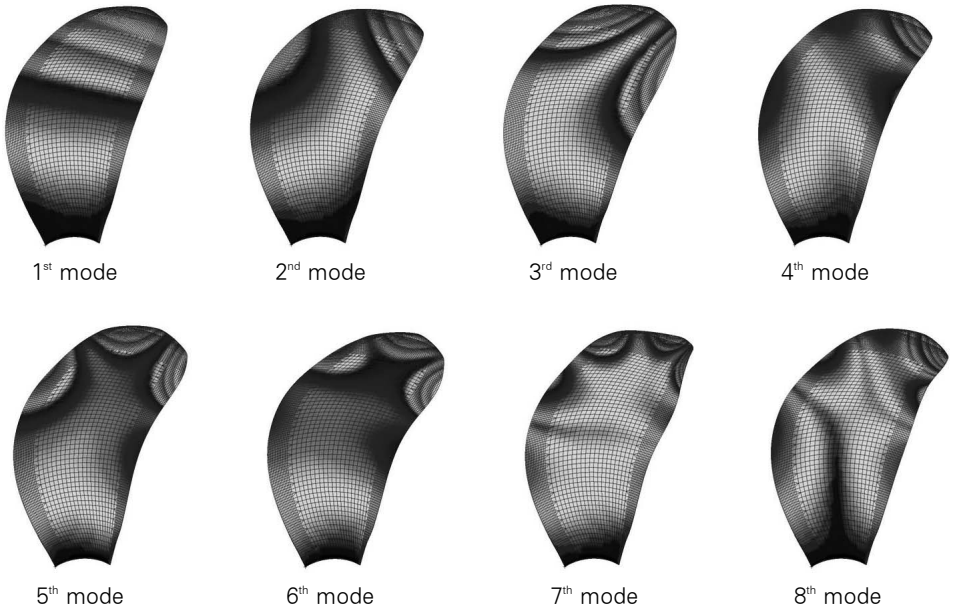



그림 5 프로펠러 날개의 고유모드 형상

표 1 프로펠러 날개의 고유진동 해석 결과

| 모드 | 주파수 | 모드 | 주파수 |
|---|---|---|---|
| 1 | 17.2 | 5 | 106.4 |
| 2 | 43.4 | 6 | 132.3 |
| 3 | 61.8 | 7 | **154.8** |
| 4 | 88.2 | 8 | 186.9 |

을 사용하여 유체의 접수 효과를 고려하였다.

명음의 경우 날개 끝단부에서의 국부적인 공진 현상이기 때문에 가장자리로 갈수록 유한요소의 크기를 작게 분할하여야 한다. 그림 5는 추진기 날개의 접수 고유진동 해석 결과이며 각 주파수 별 모드형상을 나타내었다. 표 1에서 날개 끝단 국부 7차 모드인 154.8 Hz 주파수가 실제 명음 중심주파수인 156.0 Hz 과 유사하여 선미 이상 소음의 원인이 추진기 명음 임을 검증하였다.

## 5. 맺음말

이 글에서는 명음 신호에 대해 수학적으로 나타내었으며 실제 발생한 명음 현상에 대한 계측 자료를 바탕으로 명음 신호의 특성을 알아보았다. 명음 신호는 시간 영역에서 모듈레이션 특성을 가지고 있으며, 주파수 영역에서 추진 축의 회전주파수 정수배인 중심주파수를 기준으로 여러 사이드 밴드를 가진다. 또한 유한요소 해석을 통해 추진기 날개의 고유진동수를 정도 높게 예측할 수 있어 실제 명음이 발생한 경우 유한요소 해석을 통해 명음임을 확신할 수 있다. 그러나 여전히 추진기 날개의 유동 박리 주파수의 정도 높은 예측이 어렵기 때문에 명음을 고려한 추진기 설계가 어려우며 유동 박리 주파수 예측에 대한 심회 연구가 요구된다. KSNVE