

파워흐름해석법을 이용한 크루즈선의 진동·소음 연성해석 프로그램 개발

Development of Fully Coupled Power Flow Analysis Program for Vibro-acoustic Coupled Analysis of Cruise Ships

홍석윤† · 한주범* · 권현웅* · 송지훈** · 김노성 ***

Suk-Yoon Hong, Ju-Bum Han, Hyun-Wung Kwon, Jee-Hun Song and Nho-Seong Kim

1. 서론

구조물은 일반적으로 음향공간에 노출되어 있기 때문에, 구조물에서 발생하는 구조진동과 음향공간에서 발생하는 소음은 서로 영향을 준다. 이와 같이 서로 연성되어 있는 구조음향(vibro-acoustic) 문제를 정확하게 풀기 위해서는 다른 차원의 두 공간에 대해 적절한 경계조건을 도입하여야 한다.

중고주파대역에서 기존의 유한요소법과 경계요소법 및 통계적에너지해석법이 가지는 한계를 극복하기 위해 파워흐름해석법(PFA)이 연구되고 있다. 파워흐름해석법에 유한요소법을 적용한 파워흐름유한요소법(Power Flow Finite Element Method, PFFEM)은 구조물의 진동 해석에 유용하며, 파워흐름해석법에 경계요소법을 적용한 파워흐름경계요소법(Power Flow Boundary Element Method, PFBEM)은 구조물의 소음 해석에 효과적으로 쓰일 수 있다.

본 논문에서는 위에서 언급한 파워흐름유한요소법과 파워흐름경계요소법을 기반으로 구조음향모델의 진동에너지와 소음에너지의 연성관계식을 유도하였다. 또한 이를 이용하여 중고주파대역에서 활용할 수 있는 진동·소음 완전 연성프로그램을 개발하였다. 개발한 프로그램의 효용성을 입증하기 위해, 중고주파대역에서 RO-PAX 선에 대한 진동·소음 완전 연성해석을 수행하였다.

2. 파워흐름해석법

2.1 진동·소음 완전 연성해석

† 홍석윤; 서울대학교 조선해양공학과
E-mail : syh@snu.ac.kr

Tel : (02) 880-8757, Fax : (02) 888-9298

* 서울대학교 조선해양공학과

** 전남대학교 조선해양공학과

*** 대우조선해양 진동소음 R&D

Cremer 등(1988)에 의해 유도된 에너지 소산 관계와 Fahy(1985)에 의해 유도된 방사 감쇠계수(radiation loss factor) η_{rad} 를 이용하면 구조물에서 음향공간으로 전달되는 파워투과계수(power transmission coefficient)는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{21} = \frac{2\beta_{21}\sigma_{rad}}{2 + \beta_{21}\sigma_{rad}} \quad (1)$$

여기서 β_{21} 은 특성 임피던스(characteristic impedance)의 비를 나타내며, σ_{rad} 는 방사효율(radiation efficiency)을 의미한다.

한편 Fahy(1985)에 의하면 음향공간에서 구조물로 전달되는 파워투과계수는 식(2)와 같다.

$$\tau_{12} = \beta_{21} \frac{c_o^2 \sigma_{rad}}{c_{ph} fh} \quad (2)$$

여기서 c_{ph} , c_o 는 구조물과 음향공간에서 파의 전달속도를 나타낸다. f 는 가진주파수를 나타내며 h 는 구조물의 두께를 의미한다.

구조물과 음향공간이 에너지손실 없이 연성(lossless joint)되어 있다면, 에너지흐름 보존법칙을 이용하여 두 공간에서의 에너지밀도와 각 공간에서 흘러나오는 인텐시티의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{P_{coupling}\} = \begin{Bmatrix} \vec{I}_1 \cdot \vec{n} \\ \vec{I}_2 \cdot \vec{n} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{21} & -\tau_{12} \\ -\tau_{21} & \tau_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서 \vec{n} 은 경계면에서의 법선벡터를 의미하며, 첨자 1,2는 각각 구조공간과 음향공간을 나타낸다.

구조음향모델의 진동·소음연성 해석은 진동 및 소음해석부분과 연성부분으로 이루어진다. 파워흐름유한요소법을 이용하여 진동해석의 강성행렬을 구성할 수 있으며, 파워흐름경계요소법을 통해 소음해석의 강성행렬을 구할 수 있다. 이를 진동·소음 연성 부분과 함께 행렬식으로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{e}_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} + \{P_{coupling}\} = \begin{Bmatrix} F_1 + Q_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서 K_1, K_2 는 각각 진동 및 소음해석의 강성행렬을 의미하며, \hat{e}_1 은 파워흐름유한요소법을 통해 구할 수 있는 진동에너지 밀도를 의미를 나타내며, ϕ_2 는 파워흐름경계요소법을 통해 구할 수 있는 음향인텐시티를 나타낸다. 식(4)를 이용하여 서로 연성되어 있는 구조음향모델의 진동 및 소음 에너지 밀도를 구할 수 있다.

3. 진동·소음 완전 연성해석 프로그램

진동·소음 완전 연성해석 프로그램은 구조물을 모델링(modeling)하는 부분과 음향공간을 모델링하는 부분, 파워흐름해석을 수행할 수 있도록 모델의 정보를 변환하는 부분과 모델링의 정보를 바탕으로 해석을 수행하는 부분으로 구성된다. 기존의 상용유한요소 프로그램인 나스트란(NASTRAN)의 벌크 파일(bulk file)로부터 구조 유한요소모델 및 음향 경계요소모델을 생성한다. 프로그램의 흐름도는 Fig.1 과 같다.

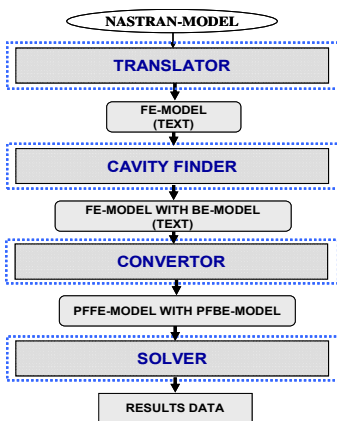


Fig.1 진동·소음 완전 연성해석 프로그램의 흐름도

4. 해석 결과

RO-PAX 선의 구조 진동원으로는 엔진을 고려했

으며, 소음원으로는 상부구조물을 고려했다. Fig.2-3는 가진 주파수가 1000Hz 일 때의 진동·소음 완전 연성해석 결과를 나타내며, Fig.2는 진동에너지 밀도의 분포를 보여준다. 가진부위에서 진동에너지 값이 가장 크며 가진부위에서 멀어질수록 진동에너지 값이 감소함을 알 수 있다. Fig.3은 소음에너지 밀도의 분포를 나타낸다. 진동에너지와 마찬가지로 가진원에서 멀어질수록 소음에너지 값이 감소함을 확인할 수 있다.

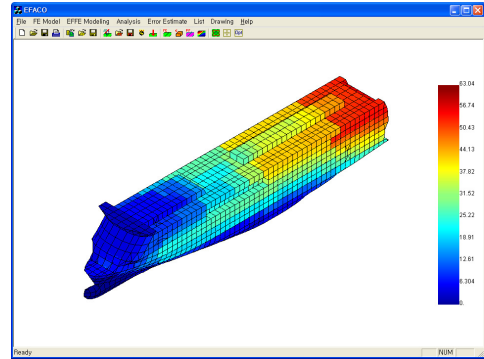


Fig.2 Vibration energy density distribution at 1000Hz

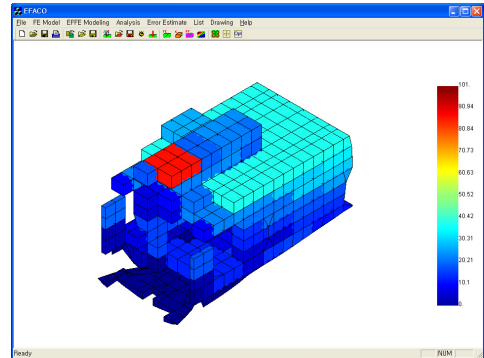


Fig.3 Noise energy density distribution at 1000Hz

5. 결론

본 논문에서는 서로 연성되어 있는 구조음향 모델에 적절한 경계조건을 도입하여 진동·소음 완전 연성 관계식을 유도하였다. 이를 바탕으로 파워흐름해석법을 기반으로 한 진동·소음 완전 연성해석 프로그램을 개발하였다.

본 개발 프로그램을 사용하여 RO-PAX 선에 진동원이 작용할 경우와 소음원이 있는 경우에 대하여 진동·소음 완전연성해석을 수행하였다. 이를 통하여 파워흐름해석법이 중고주파대역에서 선박의 진동·소음 완전 연성해석기법으로서 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.