

# PFBEM을 이용한 자동차 실내외 다영역 공간의 소음해석

## Car Interior and Exterior Multi-domain Noise Analysis using Power Flow Boundary Element Method

김종도†·홍석윤\*·이호원\*\*, 권현웅\*\*

Jong-Do Kim, Suk-Yun Hong, Ho-Won Lee, Hyun-Wung Kwon

**Key Words** : Power Flow Analysis(파워흐름해석), Power Flow Boundary Element Method(파워흐름경계요소법), Multi-Domain Problem(다영역문제)

### ABSTRACT

Multi-domain noise analysis method using Power Flow Boundary Element Method(PFBEM) has been developed successfully. Some applications are introduced. several examples. PFBEM is a numerical analysis method formulated by applying Boundary Element Method(BEM) to Power Flow Analysis(PFA). PFBEM is very powerful in predicting noise level in medium-to-high frequency ranges. However there are restrictions in analyzing the coupled structures and multi-media. In this paper, an analysis method for multi-domain acoustic problems in the diverse acoustic fields is suggested. And the developed method is applied to the car interior and exterior multi-domain noise analysis.

### 1. 서론

복합구조물의 고주파 대역의 소음진동 해석을 하기 위하여 주로 사용되고 있는 방법 중 하나로 통계적에너지해석법(statistical energy analysis, SEA)이 있지만, 이는 대상구조물을 몇 개의 하부 시스템으로 나누어 해석하고 나누어진 각각의 하부 시스템마다 오직 하나의 평균된 에너지 값만을 얻을 수 있으므로 구조물 내부에서의 에너지 변화나 파워의 흐름에 대한 정보를 얻기 어려운 단점을 가지고 있다. 그러한 단점을 보완하고 중고주파수 대역까지 해석이 가능하도록 하기위해 파워흐름해석법이 개발되어 사용되고 있다.

최근들어 파워흐름해석기법은 유한요소기법이나 수치해석기법과 결합하여 여러 구조물의 해석에 성공적으로 사용되고 있다. 유한요소기법(FEM)을 적용한 파워흐름유한요소법(PFFEM)은 다양한 복합구조물에 적용되어 구조물의 진동 해석에 사용되고 있으며 경계요소기법(BEM)을 적용한 파워흐름경계요소법(PFBEM)은 구조물의 소음/진동 해석에 주로 사용되고 있다. 하지만 파워흐름경계요소법은 일반 경계요소법과는 달리 연성된 구조물이나 매질에서 사용하기

에 상당한 어려움을 가지고 있다.

이번 연구에서는 이러한 파워흐름경계요소법을 연성된 구조물이나 매질에서 사용할 수 있는 다영역 해석방법을 개발하였고 그것을 1D 연성보와 2D 연성 평판에 대하여 적용하여 타당성을 검증하였으며, 2D 자동차 모델에 대한 다영역 소음 해석을 수행해 보았다.

### 2. 이론

#### 2.1 1차원 다영역 문제

##### (1) 1차원 파워흐름경계요소법

파워흐름경계요소법에서 직접적인 기법의 1차원 경계적분식은 식(1)과 같다.

$$\alpha(\xi) = \left[ \alpha(x) \frac{\partial G}{\partial x} - \tilde{\chi}(x) G \right]_0^L + \int_0^L \frac{\pi_{\infty}(z)}{\pi_{\infty}(z)} G dz \quad (1)$$

여기서  $\xi$  는 영역 내부의 관찰점이고  $x$  는 경계 상의 소스점을 나타내며  $z$  는 영역 내부에 존재하는 입력 파워의 위치를 가리킨다. 그리고 식 (1)을 활용하면 변형된 인텐시티  $\bar{I}$  는 식 (1)로 표현되는 에너지 밀도를  $\xi$  에 관해 미분함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

† 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 대학원  
E-mail : doya82@snu.ac.kr  
Tel: (02)880-7331

\* 서울대학교 공과대학 조선해양공학과

\*\* 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 대학원

$$\bar{K}(\xi) = \left[ \alpha(x) \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial \xi} - \tilde{K}(x) \frac{\partial G}{\partial \xi} \right]_0^L + \int_0^L \bar{\pi}_\infty(z) \frac{\partial G}{\partial \xi} dz \quad (2)$$

여기서  $\bar{\pi}_{in}$  과  $\bar{I}$  는 변형된 입력파워와 인텐시티이다.

### (2) 1차원 다영역 문제에서의 행렬식

1차원 다영역 문제를 고려하기 위해 두 개의 연성된 보를 고려할 수 있다. 여기서 각 영역에서 경계적분식을 적용하면 다음 식(3),(4),(5),(6)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (1+F_m(0,0))e_{m0}(0) - F_m(L_1,0)e_{mL}(L_1) \\ = G_m(0,0)q_{m0}(0) - G_m(L_1,0)q_{mL}(L_1) + \pi_m \alpha(z_1,0) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_m(0,L_1)e_{m0}(0) + (1-F_m(L_1,L_1))e_{mL}(L_1) \\ = G_m(0,L_1)q_{m0}(0) - G_m(L_1,L_1)q_{mL}(L_1) + \pi_m \alpha(z_1,L_1) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} (1+F_m(0,0))e_{m2}(0) - F_m(L_2,0)e_{m2}(L_2) \\ = G_m(0,0)q_{m2}(0) - G_m(L_2,0)q_{m2}(L_2) + \pi_m \alpha(z_2,0) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_m(0,L_2)e_{m2}(0) + (1-F_m(L_2,L_2))e_{m2}(L_2) \\ = G_m(0,L_2)q_{m2}(0) - G_m(L_2,L_2)q_{m2}(L_2) + \pi_m \alpha(z_2,L_2) \end{aligned} \quad (6)$$

이것을 행렬식으로 간단히 나타내면 식(7)과 같이 표현할 수 있는데 이는 보에 존재하는 횡파와 종파의 모든 파형이 고려된 형태이며 각 파형에 대해 식(3),(4),(5),(6)을 반복적으로 사용하여 얻은 행렬식이다.

$$\begin{bmatrix} [F_f^i] & 0 \\ 0 & [F_l^i] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{e_{fi}\} \\ \{e_{li}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [G_f^i] & 0 \\ 0 & [G_l^i] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q_{fi}\} \\ \{q_{li}\} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [G_f^i] & 0 \\ 0 & [G_l^i] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\pi_{fi}\} \\ \{\pi_{li}\} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서 아래첨자  $f$ 와  $l$ 은 각각 횡파(flexural wave)와 종파(longitudinal wave)를 의미한다.

### (3) 1차원 다영역 문제에서의 연성관계

종파와 횡파를 모두 고려한 경우의 연성관계는 연성된 부분에서 각 요소가 만나는 면에서의 에너지 흐름을 통해 나타낼 수 있다.

$$\{q_m\} = [J_m] \{e_m\} \quad (8)$$

$$[J] = [I - P][I + P]^{-1} [C] \quad (9)$$

$$[P] = \begin{bmatrix} \gamma_{ff1} & \tau_{ff1} & \gamma_{fl1} & \tau_{fl1} \\ \tau_{ff2} & \gamma_{ff2} & \tau_{fl2} & \gamma_{fl2} \\ \gamma_{fl1} & \tau_{fl1} & \gamma_{ll1} & \tau_{ll1} \\ \tau_{fl2} & \gamma_{fl2} & \tau_{ll2} & \gamma_{ll2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{g1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{g2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{g1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{g2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서  $\gamma_{mnij}$ 와  $\tau_{mnij}$ 는  $i$  번째 보에서 입사하는  $m$ 파형의 파에 기인한  $j$  번째 보의  $n$ 파형 파에 대한 파워투과계수와 파워반사계수를 의미한다.

## 2.2 2차원 다영역 문제

2차원 다영역문제에 대한 경계적분식은 식(12)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} c(\vec{\xi})\alpha(\vec{\xi}) - \int_{\Gamma} \alpha(\vec{x}) \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma(\vec{x}) \\ = - \int_{\Gamma} \bar{K}(\vec{x}) G d\Gamma(\vec{x}) + \int_{\Omega} \bar{\pi}_\infty(\vec{z}) G d\Omega(\vec{z}) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $c(\vec{\xi}) = \alpha/2\pi$  로서  $\alpha$  는  $\vec{\xi}$  에서의 내각(internal angle)을 의미한다. 이것을 1차원에서의 마찬가지로 방법으로 행렬식을 만들면 식(13)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} [F_f^i] & 0 & 0 \\ 0 & [F_l^i] & 0 \\ 0 & 0 & [F_s^i] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{e_{fi}\} \\ \{e_{li}\} \\ \{e_{si}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [G_f^i] & 0 & 0 \\ 0 & [G_l^i] & 0 \\ 0 & 0 & [G_s^i] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q_{fi}\} \\ \{q_{li}\} \\ \{q_{si}\} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [G_f^i] & 0 & 0 \\ 0 & [G_l^i] & 0 \\ 0 & 0 & [G_s^i] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\pi_{fi}\} \\ \{\pi_{li}\} \\ \{\pi_{si}\} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

연성부에서 인텐시티와 에너지의 관계는 1차원에서의 식(8)과 식(9)와 동일하며 모든 파형을 고려했을 때 파워계수 행렬과 군속도행렬은 식(14),(15)와 같다.

$$[P] = \begin{bmatrix} \gamma_{ff1} & \tau_{ff1} & \gamma_{fl1} & \tau_{fl1} & \gamma_{fs1} & \tau_{fs1} \\ \tau_{ff2} & \gamma_{ff2} & \tau_{fl2} & \gamma_{fl2} & \tau_{fs2} & \gamma_{fs2} \\ \gamma_{fl1} & \tau_{fl1} & \gamma_{ll1} & \tau_{ll1} & \gamma_{ls1} & \tau_{ls1} \\ \tau_{fl2} & \gamma_{fl2} & \tau_{ll2} & \gamma_{ll2} & \tau_{ls2} & \gamma_{ls2} \\ \gamma_{fs1} & \tau_{fs1} & \gamma_{ls1} & \tau_{ls1} & \gamma_{ss1} & \tau_{ss1} \\ \tau_{fs2} & \gamma_{fs2} & \tau_{ls2} & \gamma_{ls2} & \tau_{ss2} & \gamma_{ss2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} c_{g1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{g2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_{g1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{g2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{gs1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{gs2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서  $\tau_{mnij}$ 는 영역  $i$ 에서의  $m$ 파형 입사파에 기인한 영역  $j$ 에서의  $n$ 파형 파워투과계수이고,  $\gamma_{mni}$ 는 영역  $i$ 에서의  $m$ 파형 입사파에 기인한 영역  $i$ 에서의  $n$ 파형 파워반사계수를 의미한다

### 3. 수치적 검증 및 적용

#### 3.1 수치적 검증

파워흐름경계요소법의 다영역 문제에 대한 기법의 검증을 위하여 1차원 연성보와 2차원 연성 평판을 이용하였다. 1차원 문제에 사용된 연성 보로 각각의 보 두 개 모두 탄성계수(E)가  $2 \times 10^{11} N/m^2$ , 밀도가  $7800 kg/m^3$ 인 스틸을 선택하였다. 길이와 폭, 두께는 각각  $L = 1m$ ,  $d = h = 15mm$ 이며, 첫 번째 보의 중심인  $x_0 = 0.5m$  위치에 횡방향으로 조화 점가진(point excitation)하였다.

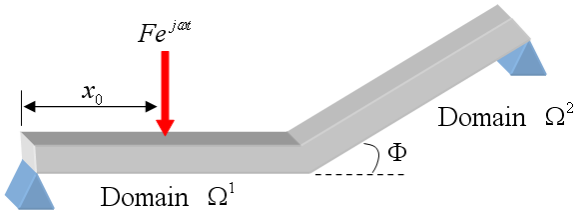
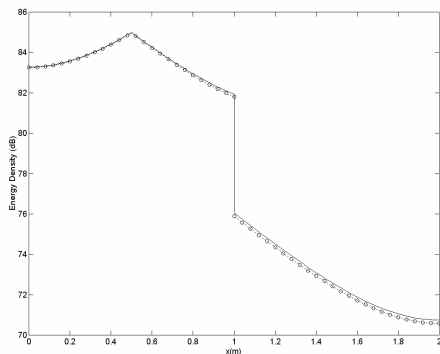
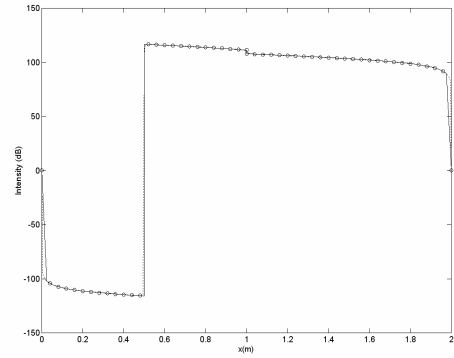


Fig. 1. One dimensional beam model for multi-domain analysis



(a) flexural energy density



(b) flexural intensity

Fig. 2. Comparison of PFA and PFBEM solutions for Fig. 1. Structure (— PFA ; ..... PFBEM)

2차원 문제에 사용된 연성 평판으로는 탄성계수(E)가  $7.1 \times 10^{10} N/m^2$ , 밀도가  $2700 kg/m^3$ 인 정사각형 알루미늄 평판을 선택 하였다. 길이와 두께가 각각  $L = 1m$ ,  $h = 10mm$ 이며 두 평판은 보강재로 연성된 형태이며 Fig.3.과 같다. 보강재는 폭  $5mm$  두께  $20mm$ 의 알루미늄 보를 이용하였으며 첫 번째 평판의 중앙부에 횡방향 조화 점가진을 하였다.

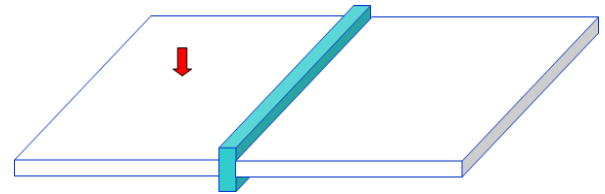
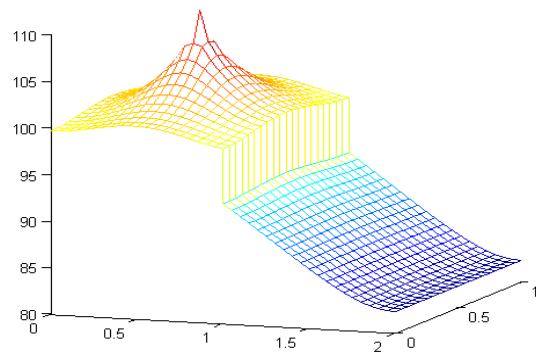
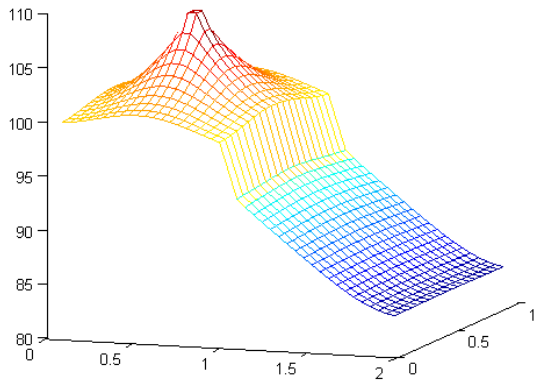


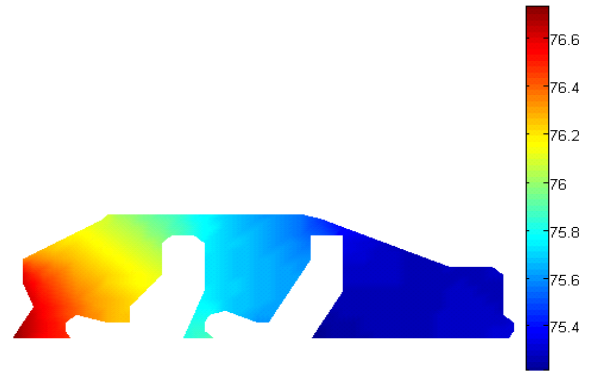
Fig. 3. Stiffened plates



(a) energy density (PFA)



(b) energy density (PFEBM)



(b) interior field

Fig. 4. Comparison of PFA and PFEBM solutions for Fig.3. Structure

### 3.2 자동차 실내외 다영역 공간의 소음해석

2차원 자동차 모델을 이용하여 엔진소음에 의한 자동차 실내와 실외에서의 다영역 소음해석을 PFEBM을 이용하여 수행하였다. 사용된 자동차 모델은 Fig. 5와 같고, 해석 도메인은 엔진룸, 실내 공간, 차 실외 영역 등 3가지로 모델링하였다.



Fig. 5. 2-D car model



(c) exterior field

Fig. 6. Car interior and exterior multi-domain noise analysis

Fig.6은 소스의 진동수가 1000Hz일 때 해석한 결과들이며 엔진 소음에 의한 에너지가 연성부분을 통해 실내와 실외로 전달되어 나가는 것을 확인할 수 있다. 본 해석 결과에서 보여지는 실내소음과 방사소음의 양상 및 수치결과로부터 본 다영역 해석 프로그램의 실용성을 확인할 수 있었다.



(a) noise analysis of the three domains

### 4. 결론

본 연구에서는 기존의 파워흐름경계요소법을 다영역 문제로 확장시켰으며, 연성보와 연성평판의 해석결과를 PFA의 결과와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다. 그리고 2차원 자동차 모델에 대해서 적용해 봄으로써 다양한 구조물과 매질에 대해 적용이 가능함을 확인하였다. 본 연구에서 새로이 개발된 파워흐름 경계요소법의 다영역 해석방법은 앞으로 소음진동 해석을 위해 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이호원, "중고주파 소음해석을 위한 음향파워흐름경계요소 모델 및 해석시스템 개발", 공학박사학위논문, 서울대학교, 2006
- (2) 서성훈, "다차원 구조부재 연성구조물의 중고주파 진동해석을 위한 파워흐름유한요소법 개발", 공학박사학위논문, 서울대학교, 2005
- (3) 박도현, "연성된 평판 및 상자구조물의 진동 파워흐름 해석", 공학석사학위논문, 서울대학교, 1999
- (4) Cho, P. E., "Energy Flow Analysis of Coupled Structures", Ph.D. Dissertation, Purdue University, 1993
- (5) Lawrence E.Kinsler, Austin R.Frey, Alan B. Coppens, James V.Sanders, " Fundamentals of Acoustics", 2000