

# 3차원 다영역 공간의 소음해석을 위한 파워흐름경계요소법 개발

## Development of Power Flow Boundary Element Method for 3-dimensional Multi-domain Noise Analysis

김종도\*·홍석윤†·송지훈\*\*

Jong-Do Kim, Suk-Yoon Hong and Jee-Hun Song

(2011년 8월 18일 접수 ; 2011년 9월 19일 심사완료)

**Key Words** : PFBEM(파워흐름경계요소법), Multi-domain Problem(다영역 문제), Indirect Method(간접법)

### ABSTRACT

The direct and indirect PFBEM(power flow boundary element method) for the treatment of the 3 dimensional multi-domain problems are proposed to predict the acoustic energy density in medium to high frequency ranges. In the proposed method, the equation is derived in a matrix form by considering coupled relationships of the power flow at the interface of given domains. The proposed method can successfully obtain the analytical solutions for the problems of coupled cubes and the small-scale reverberant chamber. Then the experiment is carried out to obtain STL(sound transmission loss) by using small-scale reverberant chamber and the results are compared with analysis results.

### 1. 서 론

복합 구조물의 진동 소음을 해석하기 위한 방법에는 유한요소법(finite element method, FEM), 경계요소법(boundary element method, BEM), 통계적 에너지해석법(statistical energy method, SEA) 그리고 파워흐름해석법(power flow method, PFA) 등이 있다. 유한요소법과 경계요소법은 상대적으로 낮은 주파수 대역에 사용되는 기법으로 고주파 대역에 적용하기에는 한계가 있다. 이는 주파수가 올라갈수록 필요한 요소의 수가 많아지기 때문인데 최근의 컴퓨터 성능의 향상과 더불어 해석 가능한 주파수가 많이 높아지긴 하였지만 여전히 고주파 대역에서의 사용은 어려운 실정이며 오류 누적 등의 문제도 아직 남아있다. 고주파 대역에 적합한 방법으로

알려져 있는 통계적에너지해석법은 대상 구조물을 몇 개의 하부 시스템으로 나누어 해석하고 나누어진 각 하부 시스템마다 오직 하나의 에너지 값만을 얻을 수 있다. 그러므로 구조물 내부에서의 에너지 변화나 파워의 흐름에 관한 정보를 얻기가 어려우며 하부 시스템의 모델링 방법에 따라 조금씩 다른 결과를 주는 단점이 있다. 이에 따라 이러한 단점을 보완하면서 중고주파 대역의 해석까지 가능한 파워흐름해석법이 개발되어 지난 10여년간 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근의 연구에서 파워흐름해석법이 유한요소법 및 경계요소법과 같은 수치해석법과 결합되면서 임의의 구조물의 해석이 가능하게 되었고 실제 산업 현장에서 자동차, 선박, 비행기 등 여러 구조물의 해석에 성공적으로 사용되고 있다. 에너지를 변수로 하는 해석법이므로 주파수가 올라가더라도 요소의 수가 주파수에 따라서 증가할 필요가 없으며 별도의 모델링과정 없이 기존의 유한요소모델을 그대로 이용할 수 있다는 큰 장점을 가진다. 또한 인텐시티의 해석이 쉽게 가능하여 파워의 흐름에 대한 정보를 파악하기에 용이하다.

† 교신저자; 정회원, 서울대학교 조선해양공학  
E-mail : syh@snu.ac.kr

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

\* 정회원, 서울대학교 대학원 조선해양공학과

\*\* 정회원, 전남대학교 조선해양공학과

파워흐름경계요소법의 경우 파워흐름해석법에 경계요소법을 결합한 형태로 주로 실내소음, 실외소음, 그리고 수중방사소음 등의 해석에 사용되고 있다. 하지만 일반 경계요소법과는 달리 연성되어 있는 구조물이나 공간 또는 매질에서 사용하기에 어려움을 가지고 있는데 이는 두 도메인(domain) 사이의 파워투과반사계수를 이용한 연성행렬(joint matrix)을 사용한 방법으로 해결된 바 있다<sup>(1-3)</sup>. 파워흐름경계요소법은 경계요소법과 마찬가지로 직접법(direct method)과 간접법(indirect method)으로 구분되는데 지금까지의 파워흐름경계요소법의 다영역 해석은 직접법에 대해서만 연구가 이루어져 왔다. 직접법에 의한 방법은 발산정리(divergence theorem)에 의해 닫힌 형태의 도메인에 대해서만 해석이 가능하며 직접법의 형태로 정리가 되지 않는 구면과 형태의 그린함수를 해로 가지는 파워흐름해석법 지배방정식에는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 최근 개발된 음향파워흐름해석법<sup>(4)</sup>의 해 역시 구면파의 형태이며 실외, 방사소음 등의 해석에 주로 사용되어 온 해의 형태<sup>(5)</sup>도 구면파의 형태이므로 간접법에만 적용 가능하여 직접법에 의한 다영역 해석은 그 사용이 제한적이었다고 말할 수 있다.

이 연구에서는 3차원 다영역의 해석을 위한 파워흐름경계요소법을 개발하였으며 직접법뿐만 아니라 간접법에 의한 해석도 가능하도록 하였다. 파워투과반사계수를 이용한 연성 행렬을 통해 두 영역의 접하는 부분에서 발생하는 에너지 교환을 정의하였으며 실제 해석 및 비교를 수행하였다. 또한 간이잔향실(small-scale reverberant chamber)을 이용한 전달손실 실험 결과와 파워흐름경계요소법의 해석 결과를 비교하여 기법의 유효성을 검토하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 3차원 파워흐름경계요소법

#### (1) 평면파 지배방정식

평면파 가정에 의한 파워흐름해석법의 에너지 지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\nabla^2 e - k^2 e = \bar{\pi}_m \quad (1)$$

여기서  $e$ 는 에너지 밀도이고  $k = \eta\omega/c_g$ , 그리고

$\bar{\pi}_m = -(\eta\omega/c_g^2)\pi_m$ 이다.  $\eta$ 는 에너지감쇠계수,  $\omega$ 는 가진주파수,  $c_g$ 는 군속도, 그리고  $\pi_m$ 는 입력파위를 의미한다. 그리고 인텐시티와 에너지의 관계는 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{q} = \nabla e \quad (2)$$

여기서  $\bar{q} = -(\eta\omega/c_g^2)q$ 이고  $q$ 는 인텐시티를 나타낸다. 식(2)에서,  $e$ 는  $\bar{q}$ 의 포텐셜함수라고 할 수 있고 3차원 구면좌표계에서의 에너지 지배방정식 기본 해는 식(3)의 기본해로 구할 수 있다.

$$\frac{d^2 G(r)}{dr^2} + \frac{(n-1)}{r} \frac{dG(r)}{dr} - k^2 G(r) = \delta(r) \quad (3)$$

$G(r)$ 은 식(1)의 기본해를 의미하고  $\delta(r)$ 은 Dirac delta,  $r$ 은 소스점에서 관찰점까지의 거리를 의미한다. 이 식에서의 기본 해는 다음 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$G(r) = -\frac{1}{4\pi r} \exp(-kr) \quad (4)$$

#### (2) 구면파 지배방정식

구면파에 의한 에너지 지배 방정식은 식(5)와 같으며 이는 원거리장(far field) 가정과 손실계수가 아주 작다는 가정에 얻어진 것이다<sup>(6)</sup>.

$$\nabla \cdot \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 e) \vec{r} \right\} - k^2 e = \bar{\pi}_m \quad (5)$$

이때 사용되는 에너지 전달관계식은 식(6)과 같다.

$$\bar{q} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 e) \vec{r} \quad (6)$$

여기서  $\vec{r}$ 은 소스점에서 관찰지점까지의 단위위치벡터를 의미한다. 위의 지배방정식의 기본해는 다음 식(7)을 만족하며 식(8)과 같은 형태로 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 G) \vec{r} \right\} - k^2 G = \delta(r) \quad (7)$$

$$G(r) = \frac{1}{4\pi c_g r^2} e^{-kr} \quad (8)$$

(3) 직접법(direct PFBEM)

경계요소법의 직접법을 평면파의 에너지 지배방정식에 적용할 수 있다. 직접법은 도메인이 닫힌 형태인 경우에 적용이 가능하므로 주로 실내 소음의 해석에 사용되고 있다. 이때 식 (1)의 입력과위가 0 이라고 가정하면 에너지 지배방정식은 식 (9)와 같이 변형된다.

$$\nabla^2 e - k^2 e = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (9)$$

여기서  $\Omega$ 은 관심 영역을 의미하고 경계조건은 아래 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$e = \hat{e} \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (10a)$$

$$\bar{q}_n = \frac{\partial e}{\partial n} = \hat{q}_n \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (10b)$$

여기서  $\Gamma_1$ 와  $\Gamma_2$ 는 경계의 일부를 의미하고 전체 경계면은  $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ 와 같이 나타낼 수 있다.  $n$ 은 경계면의 바깥방향 법선벡터를 의미하고  $\hat{e}$ 와  $\hat{q}_n$ 은 경계면에서의 값들이다. 만약  $e$ 와  $\bar{q}_n$ 가  $\tilde{e}$ 와  $\tilde{q}_n$ 의 근사값을 각각 가진다고 가정하면 관심영역과 경계에서의 오차함수(error function)는 다음 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \nabla^2 \tilde{e} - k^2 \tilde{e} \neq 0 \quad \text{in } \Omega \quad (11a)$$

$$\varepsilon_1 = \tilde{e} - \hat{e} \neq 0 \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (11b)$$

$$\varepsilon_2 = \tilde{q}_n - \hat{q}_n \neq 0 \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (11c)$$

여기서  $\varepsilon, \varepsilon_1$  그리고  $\varepsilon_2$ 는 오차함수들이다. 이러한 에러들을 최소화하기 위하여 가중함수  $w$ 를 이용하면 다음 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{\Omega} \varepsilon w d\Omega = \int_{\Gamma_2} \varepsilon_2 w d\Gamma - \int_{\Gamma_1} \varepsilon_1 \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma \quad (12)$$

식 (11)을 식 (12)에 대입하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 \tilde{e} - k^2 \tilde{e}) w d\Omega = \int_{\Gamma_2} (\tilde{q}_n - \hat{q}_n) w d\Gamma - \int_{\Gamma_1} (\tilde{e} - \hat{e}) \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma \quad (13)$$

식 (14)로 표현되는 Green's second identity를 이용하면 식 (13)은 식 (15)와 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$\int_{\Omega} (w \nabla^2 \tilde{e} - \tilde{e} \nabla^2 w) d\Omega = \int_{\Gamma} (w \nabla \tilde{e} - \tilde{e} \nabla w) \cdot n d\Gamma \quad (14)$$

$$\int_{\Omega} \tilde{e} (\nabla^2 w - k^2 w) d\Omega = - \int_{\Gamma_2} \hat{q}_n w d\Gamma - \int_{\Gamma_1} \tilde{q}_n w d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \tilde{e} \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Gamma_1} \hat{e} \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma \quad (15)$$

경계요소법에서는 가중함수  $w$ 로 기본해인  $G$ 가 사용된다. 만약 입력과위가 존재하고 경계조건으로  $\Gamma = \Gamma_2$ 가 사용된다면 관찰점  $\xi$ 에서의 에너지밀도는 식 (15)로부터 다음 식 (16)과 같이 구할 수 있다.

$$c(\xi) \tilde{e}(\xi) - \int_S \tilde{e}(\mathbf{x}) \frac{\partial G(|\mathbf{x} - \xi|)}{\partial n(\mathbf{x})} dS(\mathbf{x}) - \int_S \hat{q}_n(\mathbf{x}) G(|\mathbf{x} - \xi|) dS(\mathbf{x}) + \int_V \bar{\pi}_m(\mathbf{z}) G(|\mathbf{z} - \xi|) dV(\mathbf{z}) \quad (16)$$

여기서 사용된 기본해는 식 (4)의 기본해이다.  $\mathbf{x}$ 는 경계면  $S$  위의 점이고  $\mathbf{z}$ 는 3차원 도메인  $V$  내의 입력과위 위치, 그리고  $c(\xi)$ 는 특이점적분에 의해 생기는 항으로  $\beta/4\pi$ 의 값을 가지며  $\beta$ 는 관찰지점  $\xi$ 에서의 solid angle을 의미한다.

(4) 간접법(indirect PFBEM)

경계요소법의 간접적인 기법에서는 해석하고자 하는 유한한 크기의 실제 시스템을 무한 영역 내에 끼워 넣고 무한영역과 시스템 사이의 경계에 가상 소스(fictitious source)가 분포한다고 가정한다. 3차원 영역 문제에 대한 간접적인 기법 역시 유한한 크기의 실제 시스템을 무한 영역으로 확장하고 경계면 상에 가상 소스가 분포되어 있다고 가정한다. 에너지밀도와 인텐시티의 경계면에 대한 수직 방향 성분은 다음 식 (17), (18)과 같이 표현된다.

$$\tilde{e}(\mathbf{x}) = \int_S \Phi(\xi) G(|\mathbf{x} - \xi|) dS(\xi) + \int_V \bar{\pi}_m(\mathbf{z}) G(|\mathbf{x} - \mathbf{z}|) d\Omega(\mathbf{z}) \quad (17)$$

$$\tilde{q}_n(\mathbf{x}) = \int_s \Phi(\xi) \frac{\partial G(|\mathbf{x}-\xi|)}{\partial n(\mathbf{x})} d\Gamma(\xi) + \int_V \bar{\pi}_m(\mathbf{z}) \frac{\partial G(|\mathbf{x}-\mathbf{z}|)}{\partial n(\mathbf{x})} dV(\mathbf{z}) \quad (18)$$

3차원 기본해  $G$ 는 식 (4) 또는 (8)의 형태를 가지며  $\Phi(\xi)$ 는 경계면에서의 가상소스를 의미한다. 그리고 간접법 역시 직접법과 마찬가지로 특이점 적분이 발생하며 Cauchy Principal Value를 이용하여 계산을 수행한다.

### 2.2. 다영역 해석

지금까지 파워흐름경계요소법에 대한 연구는 오직 한 개의 균일한 영역에 대해서만 전적으로 다루었다. 그러나 실제 상황에서는 많은 경우 관심영역은 몇 개의 인접한 공간으로 구성되어 있다. 3차원 음향 공간이라고 생각하면 Fig. 1(a)와 같이 내부 매질이 서로 다른 음향공간이 맞닿아 있는 경우와 Fig. 1(b)에서 보는 것과 같이 격벽으로 나누어진 여러 음향공간이 존재하는 경우로 나누어 생각할 수 있다.

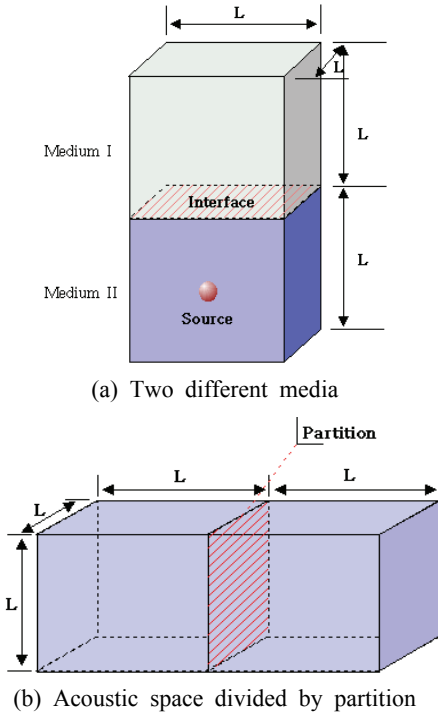


Fig. 1 Domains for 3D multi-domain problem

이 연구에서는 각각의 경우 한쪽 음향 공간에만 음원이 존재한다고 가정한다. 또한 3차원 공간은 보나 평판과 달리 하나의 곡형면을 고려하므로 상대적으로 간단하게 유도할 수 있다.

#### (1) 3차원 다영역 문제에서의 연성관계

하나의 곡형면을 고려한다고 가정하면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 두 공간 사이의 공통 경계면에서 에너지흐름(net energy flow)은 식 (19), (20)과 같이 표현할 수 있고 이를 행렬식으로 표현하면 식 (21)과 같다.

$$q_1 = q_1^+ - q_1^- \quad (19)$$

$$q_2 = q_2^+ - q_2^- \quad (20)$$

$$\{q\} = \{q^+\} - \{q^-\} \quad (21)$$

또한 공통 경계면 상에서의 에너지밀도도 양의 방향과 음의 방향으로 흐르는 에너지밀도의 향으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_1 = e_1^+ + e_1^- \quad (22)$$

$$e_2 = e_2^+ + e_2^- \quad (23)$$

$$\{e\} = \{e^+\} + \{e^-\} \quad (24)$$

여기서  $q^+$ 와  $q^-$ 는 각각 경계면쪽으로 흐르는 에너지 흐름과 경계면에서 멀어지는 에너지 흐름을 의미하고 다음 식 (25), (26)과 같이 표현되고 이를 행렬식으로 표현하면 식 (27), (28)과 같다.

$$q_i^+ = c_{gi} e_i^+ \quad (25)$$

$$q_i^- = c_{gi} e_i^- \quad (26)$$

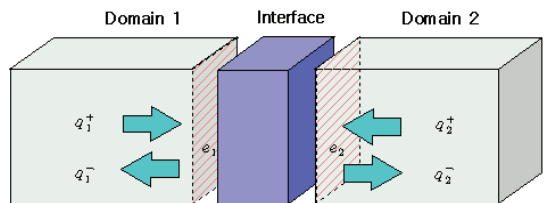


Fig. 2 Energy flow on the interface between two acoustic spaces

$$\{q^+\} = [C]\{e^+\} \quad (27)$$

$$\{q^-\} = [C]\{e^-\} \quad (28)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{g1} & 0 \\ 0 & c_{g2} \end{bmatrix} \quad (29)$$

그리고 공통 경계면에서의 에너지 반사와 투과를 고려해주면 다음 식 (30), (31)의 관계가 형성되고 행렬식으로 표현하면 식 (32)과 같다.

$$q_1^- = \gamma_{11}q_1^+ + \tau_{21}q_2^+ \quad (30)$$

$$q_2^- = \tau_{12}q_1^+ + \gamma_{22}q_2^+ \quad (31)$$

$$\{q^-\} = [P]\{q^+\} \quad (32)$$

$$[P] = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \tau_{21} \\ \tau_{12} & \gamma_{22} \end{bmatrix} \quad (33)$$

여기서  $\gamma$ 와  $\tau$ 는 파워 반사계수와 투과계수로 일반적인 음향학 관련 식으로 구할 수 있는 계수들이다<sup>7)</sup>. 최종적으로 위의 관계들을 이용하면 다음과 같은 연성관계식을 얻을 수 있다. 여기서 행렬  $I$ 는 항등 행렬을 의미한다.

$$\{q\} = [J]\{e\} \quad (34)$$

$$[J] = [I - P][I + P]^{-1}[C] \quad (35)$$

### (2) 직접법

파워흐름경계요소법의 직접법에 의한 방법을 서로 맞닿아 있는 두 개의 도메인에 적용하였을 때 이를 행렬식으로 나타내면 식 (36)과 같이 나타낼 수 있다. 이 행렬식에 연성관계식을 이용하여 계산을 수행하면 다영역해석이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} [F_1] & 0 \\ 0 & [F_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [G_1] & 0 \\ 0 & [G_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [G_1^\Omega] & 0 \\ 0 & [G_2^\Omega] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{Bmatrix} \quad (36)$$

위의 식에서  $[G]$ 와  $[F]$ 는 각각 에너지와 인텐시티의 그린함수 적분항을 통해 얻어지는 행렬식을

의미한다.

만약 인텐시티가 0인 경계조건을 사용하였을 경우 식 (36)은 식 (37)과 같이 변형할 수 있고 경계에서의 에너지를 구하면 그것을 이용하여 원하는 지점에서의 에너지를 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} [F_1] & 0 \\ 0 & [F_2] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [G_1] & 0 \\ 0 & [G_2] \end{bmatrix} [J] \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [G_1^\Omega] & 0 \\ 0 & [G_2^\Omega] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{Bmatrix} \quad (37)$$

### (3) 간접법

간접법을 적용할 경우 식 (17)은 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [G_1] & 0 \\ 0 & [G_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [G_1^\Omega] & 0 \\ 0 & [G_2^\Omega] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{Bmatrix} \quad (38)$$

$$\begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [F_1] & 0 \\ 0 & [F_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [F_1^\Omega] & 0 \\ 0 & [F_2^\Omega] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{Bmatrix} \quad (39)$$

위 식 (38)과 연성관계식을 이용하여 두 도메인의 접하는 부분에서의 인텐시티 경계조건을 식 (40)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix}_{\text{interface}} = [J] \begin{Bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{Bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} [G_1] & 0 \\ 0 & [G_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} + [J] \begin{bmatrix} [G_1^\Omega] & 0 \\ 0 & [G_2^\Omega] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{Bmatrix} \quad (40)$$

식 (39)에 위의 식 (40)를 대입하면 식 (41)과 같다. 이를 통해 각 관심영역의 경계면에 분포하는 가상소스를 계산할 수 있고 이를 식 (38)에 대입하여 원하는 관찰지점에서의 에너지 값을 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} [F_1] & 0 \\ 0 & [F_2] \end{bmatrix} - [J] \begin{bmatrix} [G_1] & 0 \\ 0 & [G_2] \end{bmatrix} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix}_n - \left( \begin{bmatrix} [F_1^\Omega] & 0 \\ 0 & [F_2^\Omega] \end{bmatrix} - [J] \begin{bmatrix} [G_1^\Omega] & 0 \\ 0 & [G_2^\Omega] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{Bmatrix} \quad (41)$$

### 3. 해석 결과

#### 3.1. 연성된 정육면체 음향공간

파워흐름경계요소법의 다영역 해석법을 적용하기 위하여 Fig. 3과 같이 각 변이 3 m이고 0.6 mm 철판을 경계로 하는 두 음향공간을 모델링 하여 해석을 수행하였다. 두 영역의 공통 경계를 제외한 나머지 경계면에서의 인텐시티는 모두 0으로 두고 계산하였다.

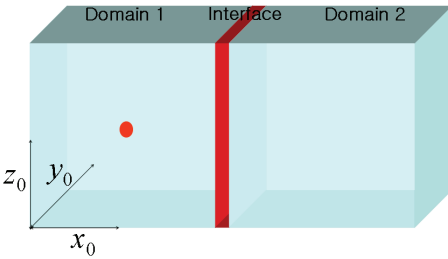


Fig. 3 Coupled room model for 3D multi-domain analysis

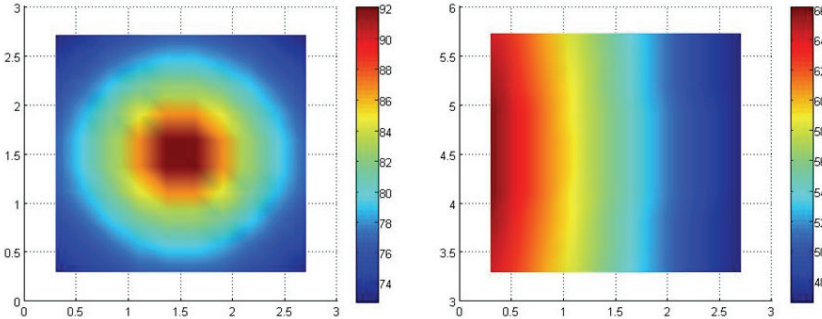
직접법과 간접법의 결과 비교를 위하여 두 방법 모두 적용해 보았으며 기본해는 식 (4)의 것을 이용하였다. 결과는 Fig. 4와 같고 음향공간의 한가운데 면을 관찰지점으로 잡았다.

해석주파수는 10000 Hz이고 매질은 공기이며 손실계수는 0.01로 계산하였다. 결과에서 보는 바와 같이 두 방법의 결과가 아주 유사하며 에너지의 흐름이 음원이 있는 공간에서 연성된 공간으로 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

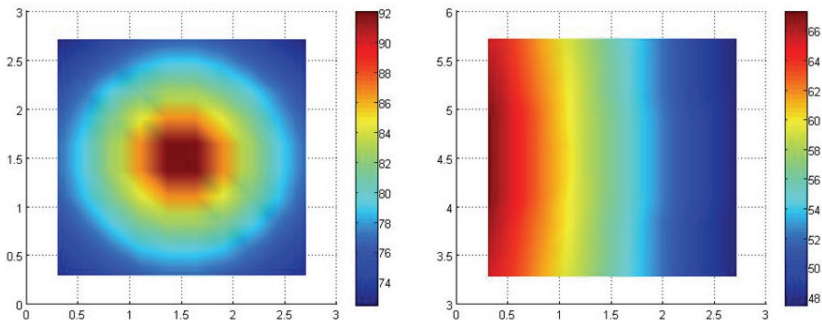
#### 3.2. 간이잔향실

실험에 사용된 간이잔향실은 Fig. 5와 같다. 오른쪽의 소음실(source room)과 왼쪽의 수음실(receiving room)으로 이루어져 있으며 가운데의 공통경계면을 통해 소음이 전달되는 구조를 가지고 있다. 두 공간 사이의 면은 0.6 mm의 철판으로 실험 및 해석을 수행하였다.

해석을 위해 파워흐름해석법의 간접법을 사용하였고 구면파 형태의 기본해 중 식 (42)와 같은 근접장을 고려한 형태<sup>(4)</sup>를 사용하였다.



(a) Direct method



(b) Indirect method

Fig. 4 Acoustic energy density of rooms

$$G(r) = \frac{1}{4\pi c_g r^2} e^{-\eta kr} \frac{2k^2 r^2}{1+2k^2 r^2} \quad (42)$$

소음실 내의 스피커를 이용하여 잔향음장을 형성하고 수음실의 마이크를 360° 회전시키면서 60° 간격으로 6개의 음압을 측정하여 평균하였다. 같은 방법으로 측정된 소음실의 음압과 수음실의 음압을 비교하여 STL을 구하였으며 해석 또한 실험에서 사용된 마이크의 위치와 같은 지점을 관찰점으로 하여 음압을 계산하였다. 관심주파수는 160 Hz부터 5000 Hz까지 1/3 옥타브밴드를 이용하였다.

STL의 계산은 위의 식 (43)과 같이 수행하였다.

$$STL(dB) = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \left( \frac{S}{A} \right) \quad (43)$$

여기서  $L_1$ 과  $L_2$ 는 두 공간의 평균된 음압을 의미하고  $S$ 는 공통 경계면의 넓이,  $A$ 는 수음실의 흡음면적을 나타낸다. Fig. 6의 그래프를 살펴보면 파워흐름 경계요소법의 다영역 해석법 중 간접법에 의한 해석이 잘 이루어졌음을 알 수 있고 실제 실험 결과와도 상당히 일치하는 값을 주는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 연성된 3차원 공간의 소음해석을 위해 파워흐름경계요소법의 직접법과 간접법을 활용한 방법을 제안하였다. 파워흐름해석법에서는 두 영역이 연성된 면에서 에너지의 불연속이 발생하는 특징이 있어 경계면에서의 에너지 흐름을 정의해주는 연성행렬의 도입이 필요한데, 이는 파워투과반사계수와 균속도 행렬을 이용해 구하였다. 해석 결과를 보면 두 해석법의 결과가 서로 매우 유사함을 확인할 수 있어 두 방법 모두 해석하고자 하는 문제에 맞춰 유용하게 활용 가능함을 알 수 있다. 그리고 간이잔향실을 이용한 실험결과와의 비교를 통해 파워흐름경계요소법 다영역해석기법의 신뢰성을 확인하였다. 또한 위의 기법들은 임의의 모델에 대해서도 해석이 가능하고 주파수에 따른 요소 수에 제한이 없으므로 향후 여러 산업 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 공통경계면에서의 에너지 흐름을 정의하는 파워투과반사계수에 대한 연구가 다양한 재질 및 구조에 대해 지속적으로 이루어진다면 이 연구에서 개발된 파워흐름경계요소법의 다영역 문제 해석기법은 중고주파 대역의 소음해석에 아주 효과적인 방법이 될 것이다.

#### 후 기

이 연구는 BK21의 후원 하에 이루어졌습니다.

#### 참 고 문 헌

(1) Hong, S.-Y., Kwon, H.-W. and Kim, J.-D.,

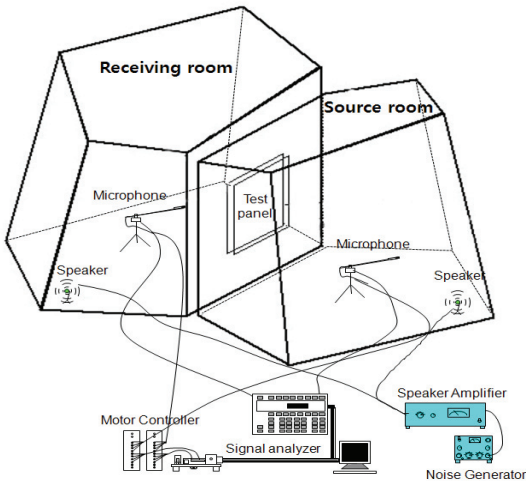


Fig. 5 Schematic of the equipment set-up of the small-scale reverberant chamber

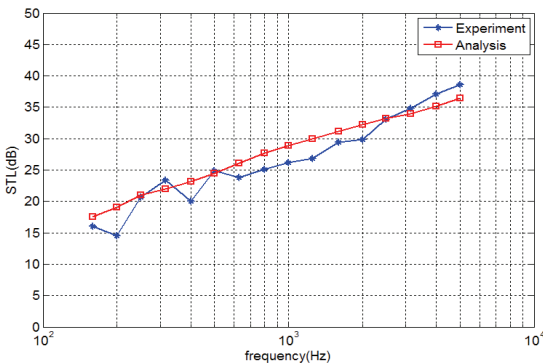


Fig. 6 STL comparison between measurement and PFEBM indirect multi-domain analysis

2007, Car Interior and Exterior Multi-domain Noise Analysis using Energy Flow Analysis(EFA) Software, NASEFAC++, Proceedings of SAE international, 2007-01-2174.

(2) Kim, J.-D., Hong, S.-Y., Lee, H.-W. and Kwon, H.-W., 2007, Car Interior and Exterior Multi-domain Noise Analysis using Power Flow Boundary Element Method, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 489~493.

(3) Kim, J.-D., Hong, S.-Y. and Kwon, H.-W., 2007, Interior and Exterior Multi-domain Noise Analysis using EFBEM, Proceedings of TEAM, pp. 85~92.

(4) Kim, J.-D., Hong, S.-Y., Kwon, H.-W. and Song, J.-H., 2011, Energy Flow Model Considering

Near Field Energy for Predictions of Acoustic Energy in Low Damping Medium, Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, No. 2, pp. 271~286.

(5) Kim, S.-H., Hong, S.-Y., Kwon, H.-W., Song, J.-H. and Lee, S.-J., 2008, Exterior Noise Predictions of Commercial Ships Using Energy Flow Analysis Methods, Proceedings of ICSV 15(15th International Congress on Sound and Vibration), pp. 3051~3058.

(6) Kwon, H.-W., 2004, Development of PFBEM Indirect Method for the Analysis of Radiating Noise Problems, PhD Thesis, Seoul National University.

(7) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 1982, Fundamentals of Acoustics, Wiley, New York.