

## 통계적 에너지 해석법을 이용한 소형 잔향실의 연성손실계수 측정

Calculation of Coupling Loss Factor for Small reverberation cabin  
using Statistical Energy Analysis

°김관주\* · 김운경\*\* · 윤태중\*\* · 김정태\*\*

Kwanju Kim · Woonkyoung Kim · Taejung Yoon · Jungtae Kim

**Key Words :** Statistical Energy Analysis(통계적 에너지 해석법), Reverberation Cabin(잔향실), Modal Density(모드 밀도)  
Damping Loss Factor (내부손실계수), Coupling Loss Factor(연성손실계수), Damped plate(감쇠처리 평판)

### ABSTRACT

The Statistical Energy Analysis is based on the power flow and the energy conservation between sub-systems, which enable the prediction of acoustic and structural vibration behavior in mid-high frequency ranges. This paper discusses the identification of SEA coupling loss factor parameters from experimental measurements of small reverberation chamber sound pressure levels and structural accelerations. As structural subsystems, steel plates with and without damping treatment are considered. Calculated CLFs were verified by both transmission loss values for air-borne CLF case and running SEA commercial software.

As a result, CLFs have shown a good agreement with those computed by software. Acoustical behavior of air-borne noise and structure-borne noise has been examined, which shows reasonable results, too.

### 기호 설명

$\eta_{ii}$  : 내부손실계수

$\eta_{ij}$  : 연성손실계수

$P_i$  : 입력 파워

$E_i$  : 세부 시스템의 에너지

$f$  : 1/3 옥타브 밴드 중심 주파수(Hz)

$A$  : 음의 투과 면적(  $m^2$  )

$V_i$  : 음향 공간의 부피(  $m^3$  )

$A_s$  : 음향 공간의 표면적(  $m^2$  )

$L_i$  : 음향공간의 모서리 둘레 길이( $m$ )

$c$  : 공기의 전파속도 (m/s)

$\rho$  : 공기의 밀도(  $kg/m^3$  )

- 통계적 에너지 해석법은 항공기, 선박, 차량과 같은 복잡한 구조물의 중, 고주파수 대역에서의 음향·진동 특성을 예측하는데 유용하게 사용된다. 통계적 에너지 해석법은 각 세부시스템 간의 파워의 흐름에 기초로 하고 있으며, 실험으로 구해진 물리적 변수들로부터 결과를 예측할 수 있다. 그러나, 통계적 에너지 해석기법을 실지 문제에 적용하여 신뢰 있는 결과를 도출하기 위해서는, 위에서 언급한 물리적 변수들의 실험값 선정, 세부 시스템의 구분 등의 어려움을 동반한다.

본 논문은 저희 학교 연구실에서 보유하고 있는 소형 잔향실을 이용하여 평판 자체의 경우(a bare plate)와 댐핑재를 처리한 경우(a damped plate)를 실험 대상을 하여, SEA 관점에서의 연성손실계수를 계산하였다. 이를 위하여서는 관련 진동·음향 변수 값을 측정하여, 관련 SEA 변수를 계산하고 이를 SEA 지배방정식에 근거하여서 연성손실계수(CLF) 값을 계산하였다. 이 CLF 결과를 음향 투과손실 계산법, 또한 상용 소프트웨어를 이용하여 비교 검증하였다.

\* 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

E-mail : kwanju@hongik.ac.kr

Tel : (02) 320-1643, Fax : (02) 320-1113

\*\* 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

## 2. 본 론

### 2.1 실험장치 구성 및 CLF 계산 흐름 설명

소형 잔향실의 개략도는 Fig. 1에 나타내었으며, 음원실, 수음실, 시편장착 구조물의 세 부분으로 구분된다. 잔향실의 제원을 Table 1에 표시하였다. 이 경우의 SEA 모델은 Fig. 2에 나타내었다. 음원실에서의 speaker에 의한 음향 가진 경우의 SEA 지배 방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

이 식(1)에서 입력음향 파워 [P], 세부 시스템 에너지[E], 모드 밀도  $n_1, n_2, n_3$ , 내부 손실 계수는 실험과 이론 계산식에 의해 구할 수 있다. 연성손실계수들을 살펴보면,

- 구조물과 음향공간의 방사 특성에 의해서  $\eta_{23}=\eta_{21}$ .
- SEA에서의 가역 원리

등을 적용하여서 구하고자 하는 연성손실 계수의 개수를 줄일 수 있다.

즉 지배방정식 식(1)을 적용하여서 연성손실계수  $\eta_{12}, \eta_{13}, \eta_{23}$ 를 손계산으로 푼다. 이렇게 계산한 연성손실계수 값중  $\eta_{13}$  값은 공기전달음에 의한 투과손실을 나타내며, 이는 투과율 형태로 표시한 식(2)의 해와 비교해볼 수 있다.<sup>[1]</sup>

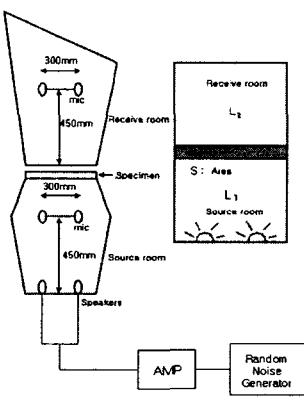


Fig. 1 The schematic figure of the reverberation chamber with experimental set-up

Table 1 The Dimension of reverberation chamber

	Source room	Receiving room
Volume	0.3809 m <sup>3</sup>	0.6067 m <sup>3</sup>
Surface area	2.968 m <sup>2</sup>	4.375 m <sup>2</sup>
Length of edge	8.699 m	10.32 m
Specimen Area	0.7 × 0.6 m <sup>2</sup>	

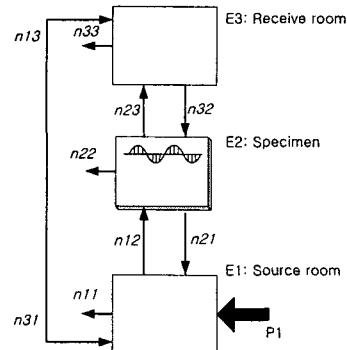


Fig. 2 An SEA model of reverberation Chamber

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} (\eta_{11} + \eta_{12} + \eta_{13}) n_1 & -\eta_{12} n_1 & -\eta_{13} n_1 \\ -\eta_{21} n_2 & (\eta_{22} + \eta_{21} + \eta_{23}) n_2 & -\eta_{23} n_2 \\ -\eta_{31} n_3 & -\eta_{32} n_3 & (\eta_{31} + \eta_{32} + \eta_{33}) n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\eta_{13} = \frac{cA}{4\omega V_1} \langle \tau \rangle \quad (2)$$

### 2.2 소형 잔향실에서의 SEA의 변수계산<sup>[1],[2]</sup>

#### (1) 모드밀도

평판의 모드밀도는 식(3)으로, 음향공간의 모드밀도는 식(4)로 표시되며, 주어진 공간에 대해서 관련 값들을 대입하여서 모드밀도를 계산하였다.

$$n_2 = \frac{\sqrt{3}A}{h c_l} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0.42}{0.0023 \cdot 5182} = 6.1 \times 10^{-2} \text{ (modes/Hz)} \quad (3)$$

$$n_i = \frac{4\pi f^2 V_i}{c^3} + \frac{\pi f A_s}{2 c^2} + \frac{L_i}{8c} \quad (4)$$

#### (2) 음향공간과 구조물의 음향 에너지

잔향실 내에서의 음압을 측정하기 음원실의 회전장치를 이용하여, 4지점에서의 음압을 측정하여 평균하였고, 수음실도 잔향 공간이라는 가정 하에, 한곳에서 측정하여 평균하였다. 음원은 단위 주파수당 크기가 일정한 white noise를 이용하였고, 측정 주파수 범위는 315 Hz~4.0 kHz까지 1/3 유타브 밴드 중심 주파수로 측정하였다. 이렇게 측정된 음압 레벨에 의한 음향 에너지는 식(5)로 표현된다.

$$E = \frac{V}{\rho c^2} \langle p^2 \rangle \quad (5)$$

$$\eta_a = \frac{2.2}{f \cdot RT} \quad (RT : \text{잔향시간}) \quad (7)$$

진동 속도는 Fig. 1의 시편 위에 가속도계를 설치하여, 8곳의 속도 크기를 측정하여 공간 평균, 주파수 평균을 하였다. 진동에 의한 세부시스템의 에너지는 식(6)로 나타난다.

$$E = m \langle v^2 \rangle \quad (6)$$

여기서,  $m$ 과  $v$ 는 투과되는 시편의 질량과 주파수 벤드 내 평판의 속도를 나타낸다.

2.3 mm 두께의 철판 자체와 제진처리 한 경우의 음원실 수음설의 음향 에너지 차이를 Table 2에 나타내었다. 결과 수치에서 볼 수 있듯이 램프 처리된 평판이 램프 처리되지 않은 경우보다 5~7배 큰 에너지 손실을 일으킴을 알 수 있다.

Table 2 Difference of acoustic energy between source room and receive room

$f$ (Hz) Specimen	315	400	500	630	800	1000
bare plate	8.9e-7	2.4e-7	2.5e-7	6.1e-7	3.7e-7	1.0e-6
Damped plate	1.3e-7	3.8e-8	6.5e-8	8.7e-8	6.7e-8	2.8e-7
$f$ (Hz) Specimen	1250	1600	2000	2500	3150	4000
bare plate	1.1e-6	1.3e-6	9.9e-7	9.4e-7	6.5e-7	4.3e-7
Damped plate	1.1e-7	1.3e-7	1.2e-7	1.1e-7	9.1e-8	6.1e-8

### 2.3 세부 시스템에서의 내부 손실 계수

내부 손실 계수를 구하기 위해서 진동의 경우는 파워 반감 대역법을, 음향의 경우는 잔향시간 측정법을 이용하였다. 평판 구조물의 내부손실계수를 구하기 위해, 임의로 선정한 위치에서 가속도 데이터를 측정하여 내부손실 계수 값을 공간 평균하였다. 평판의 내부손실계수에 대한 실험 개략은 Fig. 3과 같다. 평판의 계원은 Table 3에 표시되어 있다. Fig. 4에서는 음향공간의 내부손실계수 값을 나타내었으며, 음원실, 수음실 거의 비슷한 값을 나타낸다. Fig. 5에는 평판의 내부손실계수값을 나타내었으며, 감쇠처리된 평판의 내부 손실 계수가 큰 것을 볼 수 있다.

• 평판의 내부손실계수 측정 : 파워 반감대역법

$$\eta_a = -\frac{\Delta f}{f_n} \quad (8)$$

여기서,  $\Delta f$ 는 파워가 3dB 감소되는 대역을,  $f_n$ 은 공간 주파수를 나타낸다.

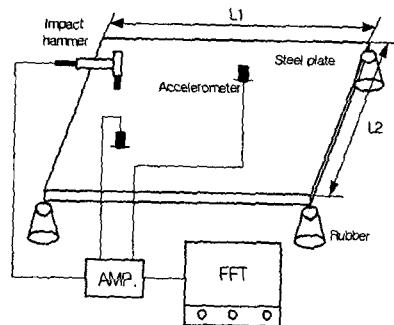


Fig. 3 Experimental set-up of impact hammer test

Table 3 Material property of steel plate

Material	Bare plate	damping treated
Area	width( $L_1$ ) × length( $L_2$ ) : 0.8 × 0.77 m <sup>2</sup>	
Thickness	2.3 mm	
Density	17.94 kg/m <sup>2</sup>	7.535 kg/m <sup>2</sup>

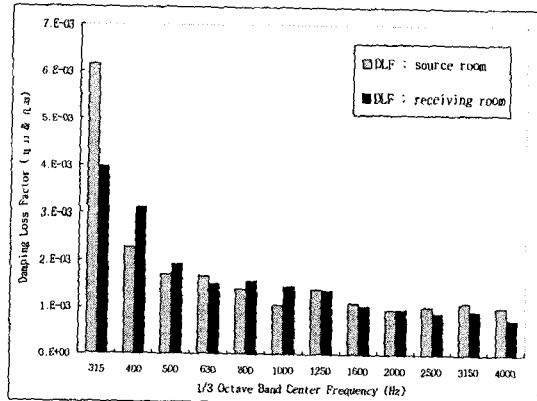


Fig. 4 Damping loss factor values of source room and receive room :  $\eta_H$  &  $\eta_S$

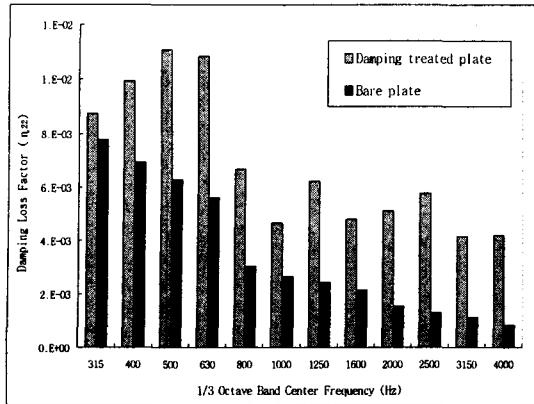


Fig. 5 Damping loss factor values for bare plate and damped plate cases :  $\eta_{12}$

## 2.2 손 계산에 의한 연성 손실 계수

$\eta_{12}$ 와  $\eta_{23}$ 는 음향공간-구조물 사이의 연성손실계수로 저주파 대역에서 고주파 대역으로 갈수록 연성 손실 계수가 낮아짐을 볼 수 있다. 이는, 공간에서 구조물, 혹은 구조물에서 공간으로 전파되는 음의 투과가 저주파 일 때, 크게 일어남을 알 수 있게 한다. 즉, 낮은 주파수 대역에서 고체 전달음의 역할이 크게 증대됨을 확인할 수 있다.

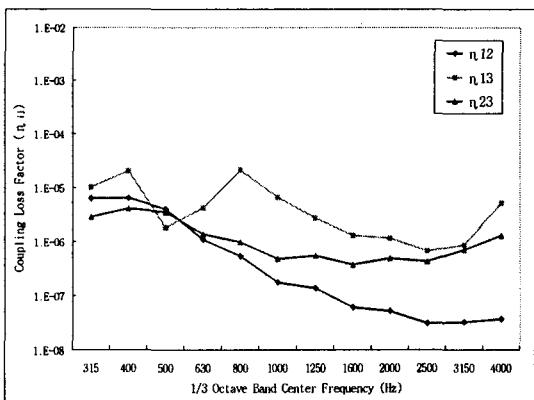


Fig. 6 A comparison of CLF between acoustic space and structure : bare plate

## 3. 검증을 위한 전산 해석

SEA 지배 방정식과 실험을 이용하여 구한 연성손실계수를 AutoSEA2의 입력 값으로 대입하여, CLF 값의 검증을 수행하였다. 측정시와 동일한 입력파워를 주었을 때, 수음실

의 음압레벨과 구조물의 가진 속도에 대한 해석값과 측정값을 비교하여보았다. 또한 세부 시스템간의 고체 전달음과 공기 전달음의 영향력을 계산하여 보았다.

### 3.1 실험과 해석 비교

실험과 계산에 의해 구한 연성손실계수 값을 상용해석 프로그램에 적용하여, 수음실의 음압레벨과 평판의 진동 속도를 계산하여 기존의 실험값과 비교하였다. 떨링 처리되지 않았을 경우 결과 그래프는 Fig. 7과 Fig. 8이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 떨링 처리되지 않았을 경우에는 실험치와 해석치가 매우 일치하고 있다.

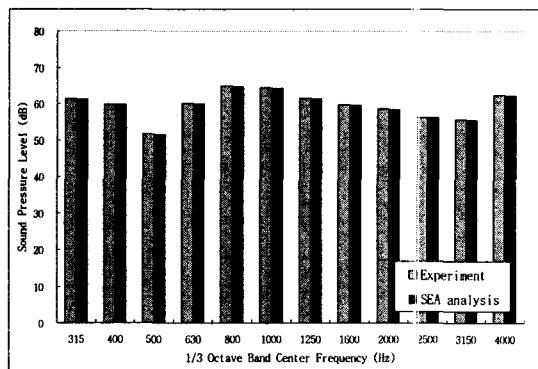


Fig. 7 A comparison of receiving room SPL between SEA analysis and experiment : bare plate

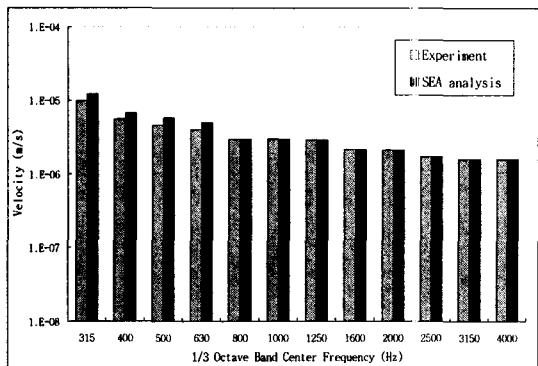


Fig. 8 A comparison of velocity of the bare plate between SEA analysis and experiment : bare plate

감쇠처리된 경우도 저주파 대역에서 수음실의 음압레벨이 2~3dB 차이가 나고 있으나, 고주파 영역으로 갈수록, 일치하는 경향을 보이고 있다.

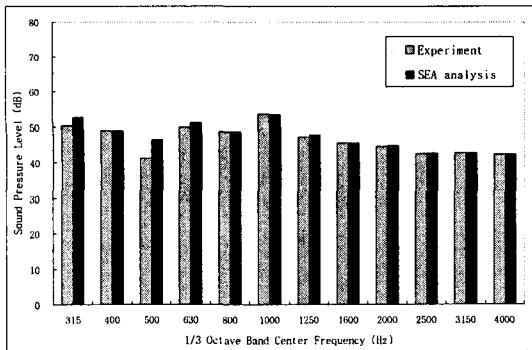


Fig. 9 A comparison of receive room SPL between SEA analysis and experiment : damped plate

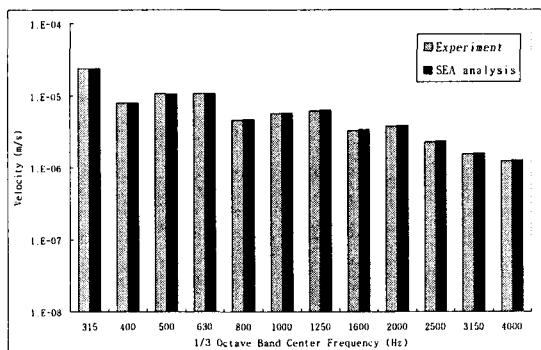


Fig. 10 A comparison of velocity of the damped plate between SEA analysis and experiment : damped plate

### 3.2 공기 전달음과 고체 전달음의 해석

실험과 계산에 의해 구한 각각의 연성손실계수를 각각 개별적으로 고려하여서, 세부 시스템에 작용하는 고체 전달음과 공기 전달음을 해석하여 보았다. 즉, 고체 전달음의 경우는 연성손실계수  $\eta_{12}$ ,  $\eta_{23}$ 를, 공기전달음의 경우는  $\eta_{13}$ 를 입력하여 해석하였다.

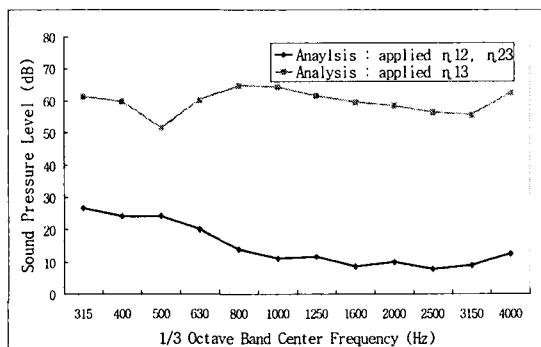


Fig. 11 Separation of SPL value of the receiving room into structure borne and air borne noise

Fig. 11을 살펴보면 고체 전달음의 경우에는 저주파수 영역에서 구조 진동이 크게 작용하고 있으며, 고주파수 영역으로 갈수록 결과에 큰 영향을 주지 못함을 나타낸다.

### 4. 결 론

본 논문은 단순 평판을 이용하여 SEA 지배 방정식과 실험을 통해 구한 연성손실계수를 입력 변수로 하여, 전산 해석을 통해 비교 검증을 수행하였다. 또한 음향 공간과 음향 공간, 음향공간과 구조물에 영향을 주는 연성손실계수를 독립적으로 해석을 수행하여 고체 전달음과 공기 전달음의 에너지 거동을 살펴보았다.

첫째, 지배 방정식과 실험을 통해 구한 연성손실계수를 이용하여 전산 해석을 수행하였을 경우, 저주파 대역에서 3dB 정도의 차이가 생기나 중, 고주파 대역에서는 실험치와 해석치의 차이가 없었다.

둘째, 연성손실계수를 독립적으로 입력하여 고체 전달음과 공기 전달음의 전달되는 에너지량을 실험치와 비교하였다. 두 경우 모두 저주파 대역에서 고주파로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 공기 전달음의 에너지량이 고체 전달음보다 훨씬 다르다는 것을 확인 할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 산업기반 기술 과제인 “자동차 내장용 흡/차음재의 통합 설계기술”의 지원으로 수행된 위탁연구결과의 일부이며, 도와주신 관계자께 감사함을 표시합니다.

### 참 고 문 현

- (1) R. Lyon, 1975, "Statistical energy analysis of dynamical systems : theory and applications", The MIT Press, chap. 14
- (2) B. Cimerman, P. Bremner, Y. Qian, J. Buskirk, 1995, "Incorporating Layered Acoustic Trim Materials in Body Structural-Acoustic Models", SAE Noise & Vibration Conference, pp. 611~616.
- (3) R. H. Lyon, 1986, "Machinery Noise and Diagnostics," Butterworth Publishers, chap. 4
- (4) 김관주, 김정태, 윤태중, 박봉현, 2002, “구조물 연결부의 질량부가 효과 : SEA 실험 및 해석 결과 비교”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 359~364
- (5) "AutoSEA2 User's Guide Rev. 3", Vibro-Acoustic Sciences, Inc.