

# Surface Intensity法에 의한 建物内 出入門의 遮音性能 現場測定에 관한 研究

## A Study on the Measurement of Field Transmission Loss through Doors in Buildings Using the Surface Intensity Method.

\* 孫 章 烈 (Sohn, Jang Yeul)  
\*\* 吳 在 應 (Oh, Jae Eung)  
\*\*\* 金 興 植 (Kim, Heung Sik)

### 요 약

Surface Intensity法은 現在 機械分野에서 騒音源과 騒音의 傳達經路把握 및 音響과위를 測定하는 새로운 測定方法으로서 1個의 가속도 帛업과 1個의 마이크로 폰이 同時에 使用된다.

本 研究에서는 이 方法을 利用하여 現場에서 出入門의 遮音性能을 測定하였으며 測定結果, 從來의 現場測定 方法보다 精度가 높은 資料의 提供과 建築構造物의 遮音性能評價에의 應用에 適用될 수 있음이 確認되었다.

### ABSTRACT

The surface intensity method is a relatively new tool which can identify the noise source or path and measure the radiation power. One microphone and one accelerometer are used in this new technique.

In this study, this new technique has been used to measure the field transmission loss through doors.

The results of the experiment indicate that the surface intensity method produces reliable data and can be applied to the transmission loss measurement.

### 1. 序 論

생활수준의 향상과 더불어 날로 증가하는 도로교통소음과 생활환경소음등의 영향으로 인하여 騒音公害問題가 많은 지역 사회내에서 심각히 대두되고 있으며 騒音制御를 위해 경제적이고 적절한 騒音防止 對策이 요구되는 實情이다.

이러한 소음문제를 建築的으로 처리하기 위해서는

現場에서의 建築構造物에 대한 正確한 遮音性能 評價가 先決되어야 한다.

現場에 있어서 建築構造物 遮音性能 測定方法은 ASTM, ISO 등의 기준을 利用하고 있으나 이 方法의 경우에는 주위 陪騒音 및 試驗體 以外的 전달경로를 통한 音(flanking transmission)의 영향으로 그 精密度는 문제가 되고 있다.

最近 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로써 음

---

\* 한양대학교 건축공학과 부교수  
\*\* 한양대학교 기계공학과 조교수  
\*\*\* 한양대학교 대학원 건축공학과 박사과정

향 인텐시티를 直接 구하는 다음 두가지의 測定法에 관한 연구가 활발히 進行되고 있다. 한가지 方法으로는 이미 發表<sup>3,4)</sup>한바 있는 Sound Intensity法(two microphone法)에 의한 遮音性能 測定이 있으며 또 하나의 方法으로는 本 研究에서 確認하고자하는 것으로서, 1個의 마이크로폰과 1個의 가속도 拾音을 사용하여 音의 強度를 구하는 Surface Intensity法이 있다.

本 研究에서는 建築 構造物의 遮音性能 測定에 있어서 Surface Intensity法의 應用可能性과 Sound Intensity法과의 比較·검토를 통한 상호보완 및 각 方法의 우수성을 確認하고자 建物內 遮音 취약부분이라 할 수 있는 出入門에 대하여 遮音性能을 現場에서 測定하였다. 또한 각종 實驗에 의한 測定값과 理論값을 本 研究에서 얻어진 結果와 比較·검토하였다.

II. 理論的 考察

1) Surface Intensity法에 의한 音響인텐시티 測定原理

振動하는 表面을 둘러싸고 있는 空間상의 音場은 Helmholtz 方程式에 의하여 定義<sup>5)</sup>된다.

Surface Intensity는 表面으로 부터 放射되는 音壓과 振動面의 粒子速度의 積으로 나타낼 수 있다.

즉, 단위면적당 단위시간에 통과하는 音의 에너지 다시 말해 音響파워의 흐름을 말한다. 따라서 구조물의 振動과 音과의 관계에 대한 음향학적 모델은 實際의 音場에서 評價되지는 않지만 다만 원거리 音場(far field)에서 放射하는 Sound Intensity와 관계된다. 音響인텐시티( $\vec{I}$ )는 수학적으로 다음과 같이 定義<sup>5,6,7)</sup>한다.

$$\vec{I} = \langle \mathbf{u} \cdot \vec{p} \rangle_t \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $p$ 는 音場의 임의점에서의 音壓,  $\vec{u}$ 는 粒子速度 벡터를 나타내며  $\langle \rangle_t$ 는 時間平均을 의미한다. 2個의 連립데이터( $u, p$ )에 대한 相互相關 함수<sup>6)</sup> (Cross correlation function)  $R_{up}(\tau)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{up}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot p(t+\tau) dt \dots\dots\dots (2)$$

$\tau$ 는 두 데이터 사이의 시간지연(time delay)을 나타내며 만일 粒子速度와 音壓신호사이의 相互相關 함수가  $\tau=0$ 라 하면 式(2)는 式(1)과 동일하게 된다.

$$R_{up}(\tau=0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot p(t) dt = \langle \vec{u} \cdot \vec{p} \rangle_t = \vec{I} \dots\dots\dots (3)$$

그러나 만일 位相오차나 變환기의 기하학적 배열에 오차가 있다면 시간지연은 반드시 해석과정에서 고려되어야 한다. F.F.T 분석기를 이용하여 相互相關 함수를 결정하기 위해서는 먼저 주파수 영역에서 크로스 스펙트럼을 評價한 후 다시 역 ฟู리에 변환을 하여 시간 영역으로 바꾸도록 한다. 크로스 스펙트럼과 相互相關 함수와의 관계<sup>6)</sup>는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{u,p}(\tau) = \int_0^\infty G_{up}(f) e^{i2\pi f \tau} df = \int_0^\infty [C_{up}(f) - iQ_{up}(f)] e^{i2\pi f \tau} df \dots\dots\dots (4)$$

$G_{up}(t)$ 는 편측 크로스 스펙트럼,  $C_{up}(f)$ 는 Co-spectrum,  $Q_{up}(f)$ 는 Quad-spectrum이다. 속도계와 마이크로폰과의 位相오차와 물리적인 분리에 의해 周波數영역에서 位相의 오차( $\phi$ )는 시간영역에서 시간지연을 발생시키고 다음과 같은 관계<sup>5)</sup>가 성립한다.

$$\phi = 2\pi f \tau \dots\dots\dots (5)$$

式(3), (4), (5)는 실제로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\vec{I} = R_{up}(\tau) = \int_0^\infty [C_{up}(f) - iQ_{up}(f)] e^{i2\pi f \tau} df \dots\dots\dots (6)$$

Euler 定理를 式(6)에 적용하면 상호상관 함수  $R_{up}(\tau)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{I} = R_{up}(\tau) = \int_0^\infty [C_{up}(f) \cos \phi + Q_{up}(f) \sin \phi] df \dots\dots\dots (7)$$

式(7)은 Surface Intensity를 얻기 위해서는 가속도 계 신호를 아날로그로 積分해야 한다. 주파수 영역에서 그 관계식을 알아내면 다음과 같다.

$$U(f) = \frac{-i}{2\pi f} A(f) \dots\dots\dots (8)$$

여기서 크로스 스펙트럼은 式(9)와 같은 유한 퓨리에 변환으로 부터 계산된다.

$$G_{up}(f) = \frac{2}{T} E[U^*(f, T) \cdot P(f, T)] \dots\dots (9)$$

式(7),(8),(9)에 의해서 음향인텐시티( $\vec{I}$ )를 구하며 음압(p)와 가속도(a)를 이용하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$|\vec{I}| = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty [Q_{ap}(f) \cos \phi - C_{ap}(f) \sin \phi] \frac{df}{f} \dots\dots\dots (10)$$

위 식에서 알 수 있듯이 크로스 스펙트럼의 실수부와 허수부의 位相오차가 없다면, 즉  $\phi = 0$ 가 되어 다음과 같이 유도된다.

$$|\vec{I}| = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{f} [Q_{ap}(f)] df \dots\dots\dots (11)$$

$$|\vec{I}(f)| = \frac{1}{2\pi f} [Q_{ap}(f)] \dots\dots\dots (12)$$

만일 위상각이 0이 아닐 경우 오차가 수정되지 않는다면 인텐시티 測定에 영향을 미치게 된다.

本 研究에서는 式(10)을 사용하여 음향인텐시티( $\vec{I}$ )를 구하였다.

2) 음향인텐시티법의 適音測定에의 應用

그림 1과 같이 試驗體面을 몇개의 부분(면적:  $S_i$ )으로 分割하여 試驗體面 근처에서 각부분을 투과하는 音의 強度( $I_i$ )를 測定하면 그부분의 파워 흐름( $I_i \cdot S_i$ )을 알 수 있다.

여기에서 총합( $\sum I_i \cdot S_i$ )을 취하면 試驗體 全面을 투과하는 音響파워 흐름, W는 다음식과 같다.

$$W = \sum_i I_i \cdot S_i$$

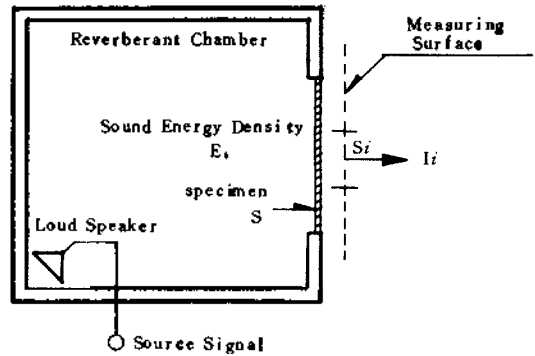


그림 1. 음향인텐시티법에 의한 材料의 T.L. 測定原理

또한 音源室內을 完全 擴散音場으로 가정하면 試驗體 全面을 투과하는 音響파워흐름, W는 다음식으로 表示된다.

$$W = \frac{C \cdot E_s \cdot S \cdot \tau}{4}$$

- 여기서 C : 音速
- $E_s$  : 音源室內의 平均에너지 密度
- $\tau$  : 試驗體의 透過率

따라서 투과손실(T.L.)은 다음식에 의해 求해진다.

$$\begin{aligned} T.L. &= 10 \log \frac{1}{\tau} \\ &= \bar{L}_1 + 10 \log s - 6 - 10 \log (\sum 10^{L_i/10} \cdot S_i) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

- 여기서,  $\tau$  : 試驗體의 透過率
- $\bar{L}_1$  : 音源室內의 平均音壓레벨
- $L_i$  : 面積  $S_i$ 부분에서 放射되는 音響인텐시티레벨
- S : 試驗體의 全面積
- $S_i$  : 試驗體 各부분의 面積

III. 測定 方法

測定對象으로는 비교적 暗騒音이 적은 학교 新築 건물중 그림 2와 같이 板狀型材料로 제작된 出入門

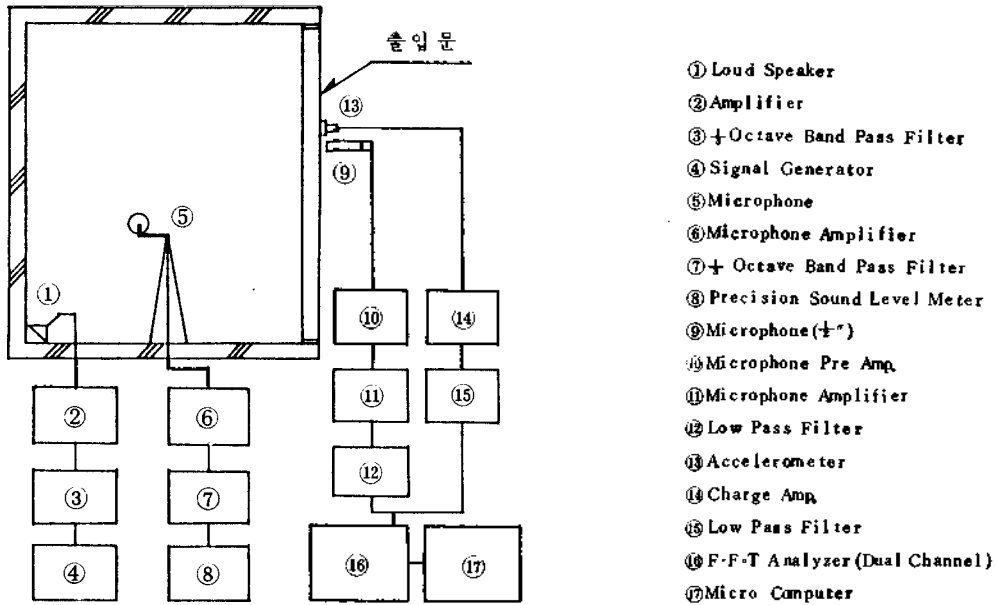


그림 2. Surface Intensity 法에 의한 차음성능 측정장치

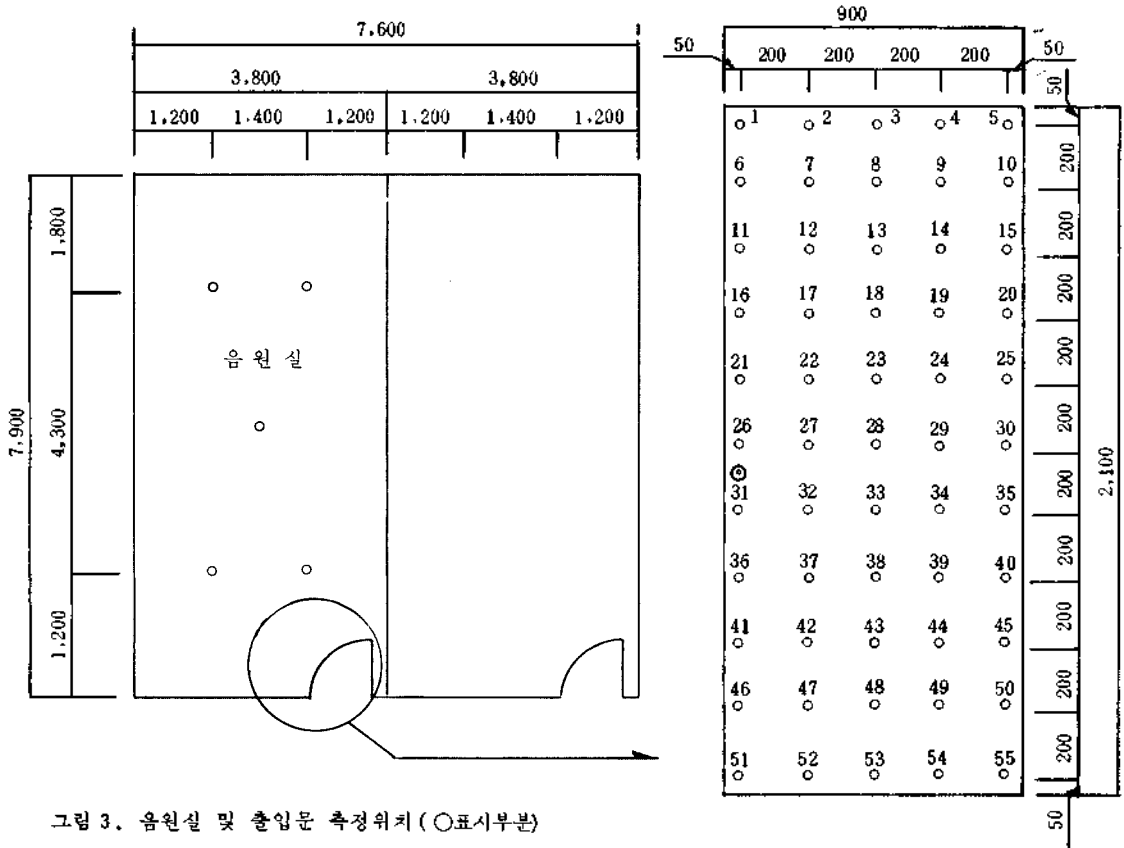


그림 3. 음원실 및 출입문 측정위치 (○표시부분)

(3mm 베니아판+공기층 28mm+3mm 베니아판)을 선택하였다.

音源室은 室内 마감材料가 反射性材料 (천정: 無孔나 무라이트, 벽면: 시멘트 블럭 180mm + 양면모르타르 20mm+페인트칠 3회, 바닥: 인조석 깔기)로서 殘響室에 가깝고 (잔향시간: 5.2초, 500Hz기준) 受音空間은 壁外 (field)이다.

測定點은 音源室의 경우, 벽면 및 바닥으로부터의 주위 反射音의 영향을 줄이기 위하여 각각 1.2m, 1.5m 떨어진 5점을 선정하였다. 受音側에 있어서는 그림 3과 같이 55점(가로×세로: 5×11)으로 분할하여 측정하였다.

Surface Intensity 법에 의한 차음성능 측정장치는 그림 2와 같다. 마이크로폰과 가속도 픽업의 배열<sup>5)</sup>은 그림 4와 같이 1/2" 마이크로폰과 7.0mm 가속도 픽업을 사용하였으며 마이크로폰은 측정 대상면으로부터 5mm, 가속도 픽업으로부터 10mm의 간격을 유지하도록 하였다.

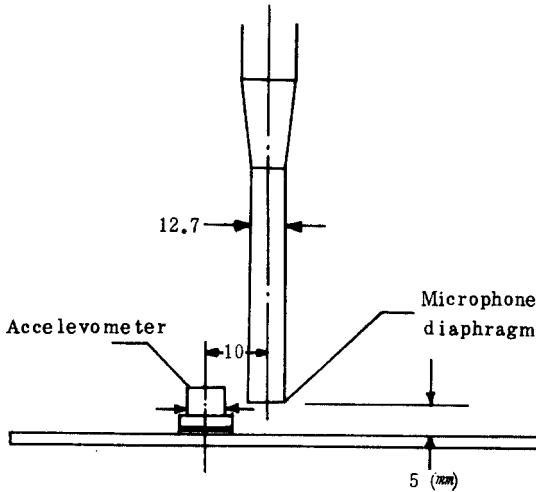


그림 4. Accelerometer와 Microphone의 배치

또한, 마이크로폰과 가속도 픽업에 의해서 얻어진 音壓과 가속도(振動)를 2 Channel F.F.T. 분석기에 연결하여 스펙트럼 密度函數와 시간지연을 구하고 이를 마이크로 컴퓨터에 入力시켜 1/1 옥타아브 대역별 音響強度와 遮音性能 結果值를 얻었다.

音源은 음원발생기 (signal generator)에서 발생

한 白色雜音 (white noise)을 사용하였으며 音源室의 확성기 方向은 室内音場을 가능한 확산音場으로 하고 각 부분별 音壓分布가 均一하도록 그림 2와 같이 모서리 부분에 설치하였다.

測定은 주위 暗騒音 (전주과수: 20 dB(A))이 적은 야간에 실시하였으며 窓門과 출입문 주위는 틈새에 의한 透過音의 영향을 줄이기 위하여 고무 패킹으로 처리 하였다.

#### IV. 測定結果 및 考察

##### 1) 位相差에 의한 오차보정

Surface Intensity 법에 의한 音響인텐시티測定오차는 변환기에서의 位相差와 Co-spectrum/Quad-spectrum에 의한 位相差에서 발생하는 오차가 크게 작용한다. 그림 5는 교정되지 않은 位相差에 의한 인텐시티 測定오차를  $C_{pa}/Q_{pa}$ 의 값과 位相差 ( $\phi$ )를 요소로 하여 나타낸 것이다.

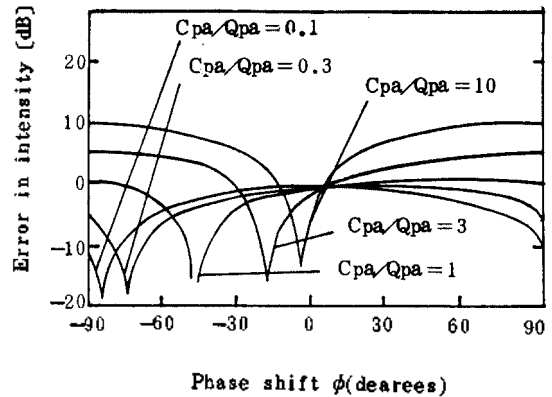


그림 5. 교정되지 않은 位相差에 의한 인텐시티 測定오차

本 研究에서는 이러한 오차를 방지하기 위하여 Mc Gray와 Crocker가 제안<sup>5)</sup>한 式 (14)를 이용하여 1/1 옥타아브 中心周波數別로 位相오차에 대한 보정을 다음과 같이 하였다.

$$\text{位相오차} = 10 \log \{ \cos \phi + (C_{pa}/Q_{pa}) \sin \phi \} \quad \text{[dB]} \quad \dots \dots \dots (14)$$

〈表 1〉 位相差에 의한 오차보정값

주파수 구분 [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
$C_{pa} Q_{pa}$	-0.720	-0.240	-0.030	-0.060	0.150	0.020
位相差 [ $\phi$ ]	0.012	0.023	0.046	0.092	0.185	0.037
보정값 [dB]	-0.0007	-0.004	-0.0001	-0.0004	0.0020	0.0001

여기서 보정값이 거의 0에 가까운 값으로써 변환기의 位相差에 의한 오차가 거의 나타나지 않는 것은 本 測定의 結果 分析時 計算과정에서 位相差 ( $\phi = 2\pi fr$ )에 대한 고려가 되었기 때문으로 사료된다.

2) 인텐시티 測定에 의한 遮音性能

本 研究에서는 同一 測定對象物 (建物內 出入門)에 대하여 大韓 建築學會誌<sup>2)</sup>(vol 29, No.124, 1985)에 게재된 크로스 스펙트럼法 (Sound Intensity 法, two-microphone 法)에 의한 結果와 또 하나의 音響 인텐시티 測定方法인 Surface Intensity 法에 의한 結果를 종래의 現場測定法과 理論計算值 (質量의 法則)와 비교하였으며 그 結果는 그림 6, 7과 같다.

그림 6에서 알 수 있듯이 實驗室法 (殘響室-殘響室法)과 Surface Intensity 法에 의한 現場測定 結果를 비교한 경우에는 1/1 옥타브 전주파수 범위 에 걸쳐 1~4 dB의 差로서 遮音性能 測定 精密度 에 있어서 좋은 結果를 보이고 있다.

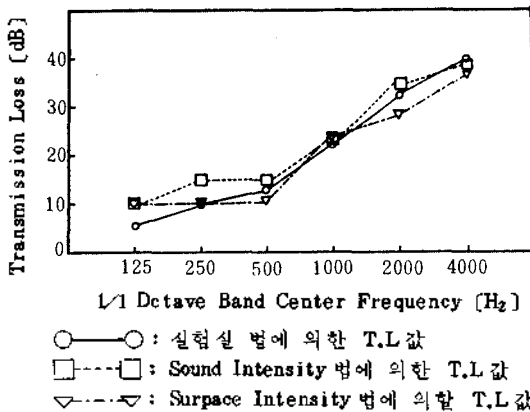


그림 6. Surface Intensity 법과 Sound Intensity 법 및 실험실법에 의한 出入門의 遮音性能 (T.L.) 결과치 비교

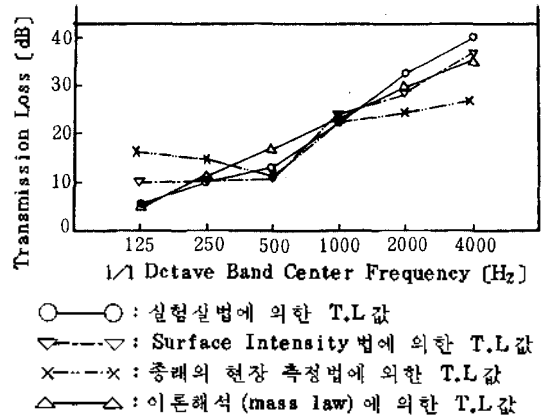


그림 7. Surface Intensity 법과 종래의 現場測定法, 實驗室法, 理論解析 (mass law)에 의한 出入門의 遮音性能 (T.L.) 結果值比較

또한 Sound Intensity 法과 Surface Intensity 法에 의한 結果值는 125 Hz (4 dB 差), 2000 Hz (7 dB 差)를 除外하고는 거의 비슷함을 나타내고 있으며 特定 周波數 (250 Hz)의 경우에는 Sound Intensity 法 보다 測定 精密度가 높음을 알 수 있다. 이는 理論式의 전개과정에서 나타나듯이 Sound Intensity 法에 있어서는 2개의 마이크로폰에 의해 얻어진 音壓을 粒子速度로 변환하는 과정에서 유한차분오차 (finite seperation error)가 발생하는 반면에 Surface Intensity 法의 경우에는 이에 의한 오차가 현저히 줄어들기 때문에 사료된다. 또한 125 Hz의 低周波와 2000~4000 Hz의 高周波부근에서 實驗室法과 Surface Intensity 法의 結果值가 4 dB 정도의 差가 발생하는 것은 現場測定에 있어서의 문제점, 즉 音源室 및 受音室의 확산音場의 不均一함과 flanking transmission, 주위 騒音 등의 영향을 받기 때문으로 고려된다.

測定에 使用한 白色雜音의 音源에 대한 협대역 (narrow band) 별 주파수 応答特性은 그림 8과 같으며 그림 9는 測定點 1 (出入門 모서리부분)에서의 振動과 音壓의 협대역별 주파수 応答特性으로 354 Hz, 705 Hz, 1080 Hz에서 많은 音이 透過되어 나오고 있음을 알 수 있다. 이를 1/1 옥타브 대역별로 변환하여 보다 알기쉽게 표시한 것이 그림 10이다. 그림 11은 測定點 28 (出入門, 中央部分)에서의 振動과 音壓의 협대역별 주파수 応答特性으로 音壓에

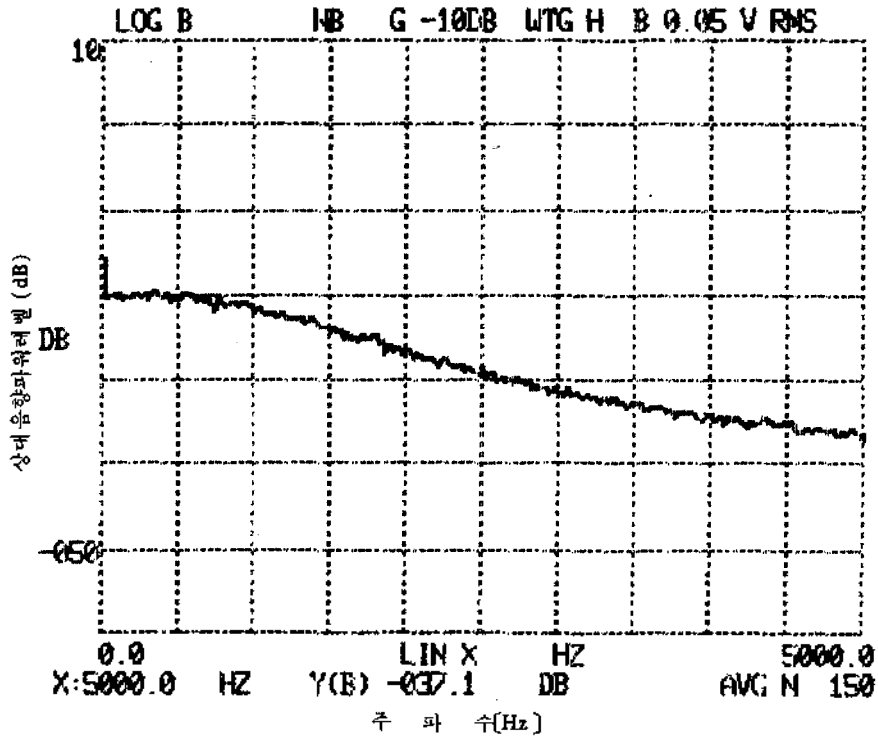


그림 8. 音源(白色雜音)의 주파수 応答特性

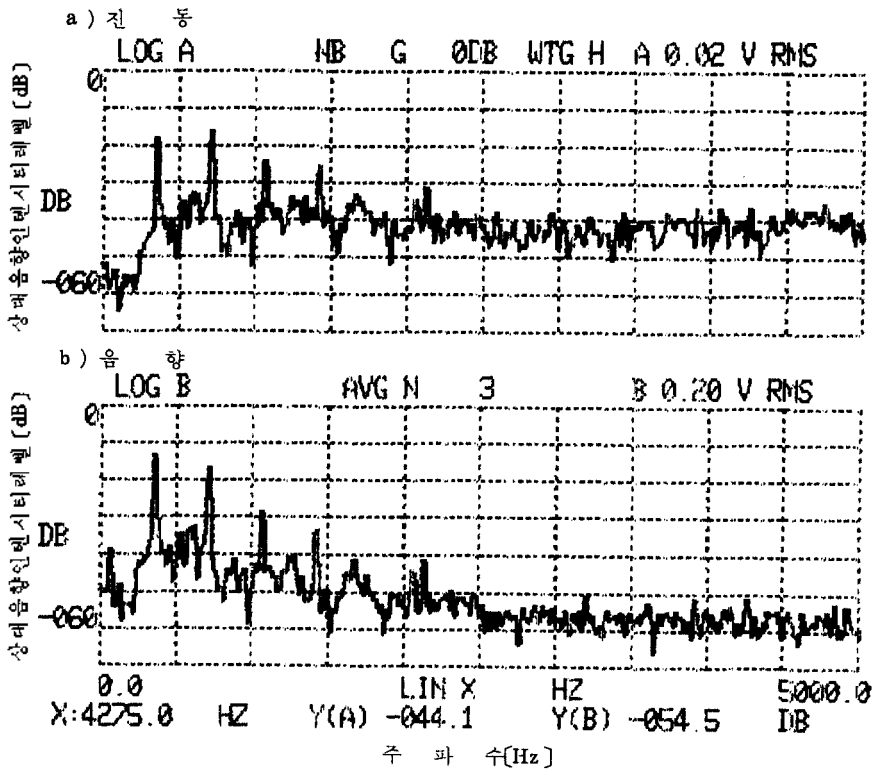


그림 9. 測定點 ①에서의 진동과 音壓의 相對 레벨 주파수 応答特性

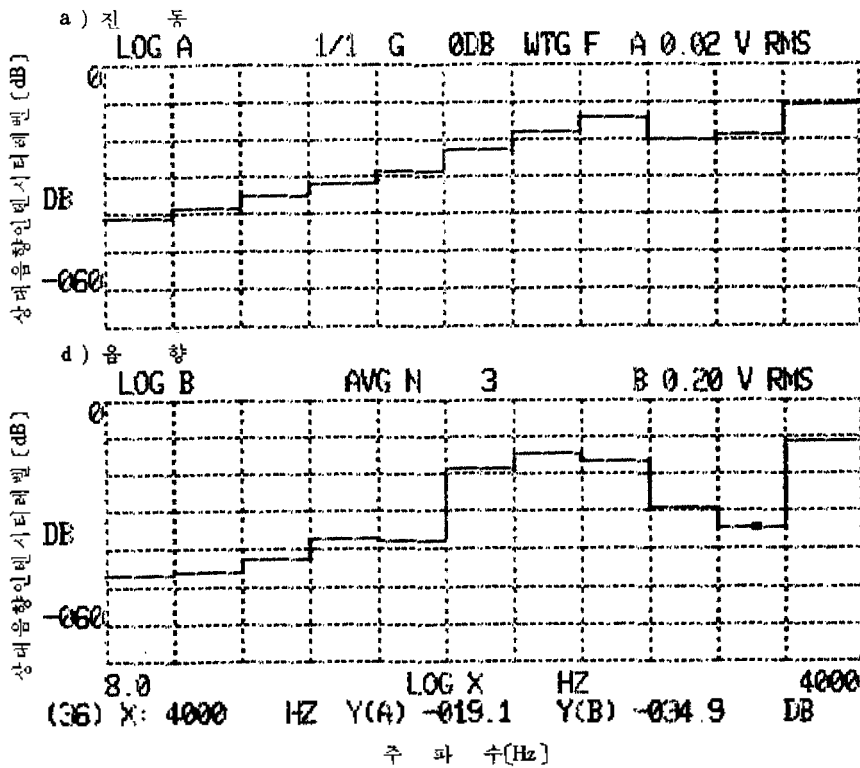


그림 10. 測定點 ①에서의 진동과 음압의 1/1 옥타아브 대역별 주파수 応答特性

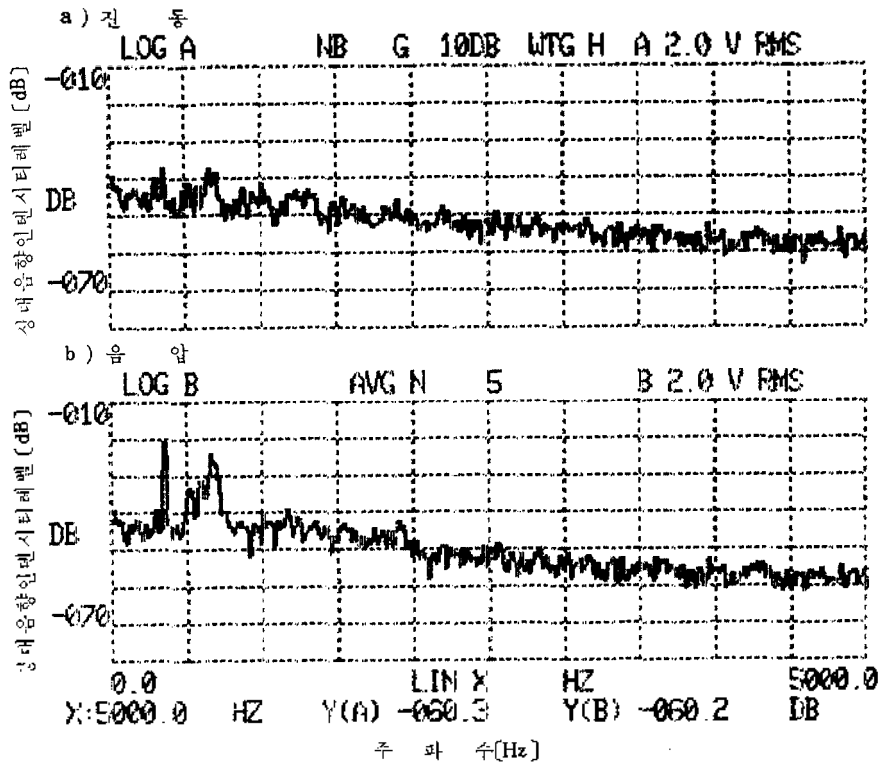


그림 11. 測定點 29에서의 진동과 음압의 현대 역분 주파수 応答特性



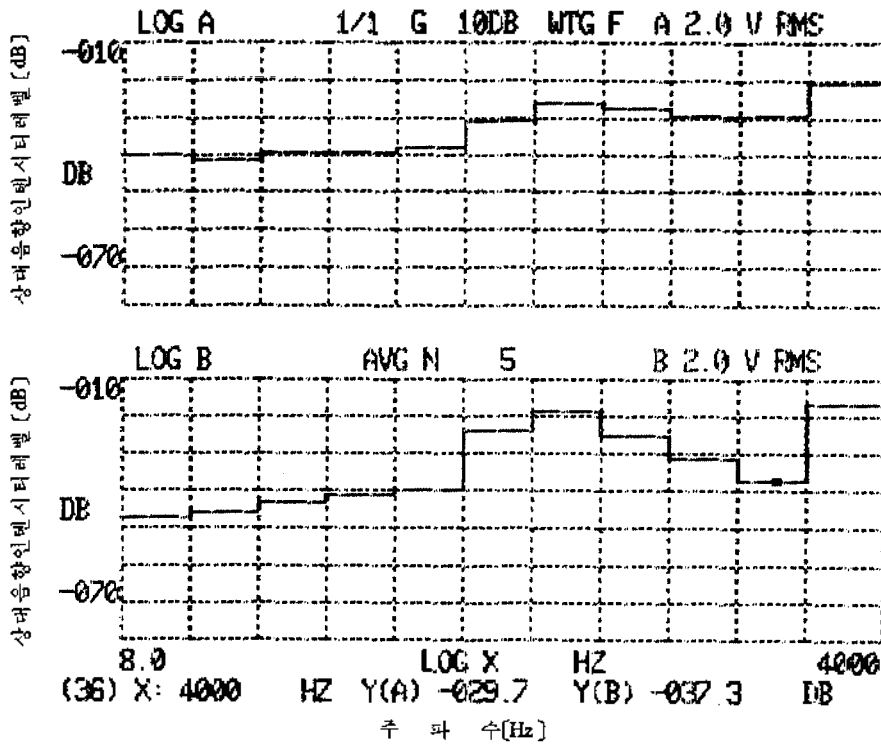


그림 12. 測定點 28에서의 진동과 音圧의 1/1 옥타아브 대역별 주파수 応答特性

있어서는 354 Hz와 705 Hz 부근에서 透過량이 최대로 되고 진동의 경우는 전주파수에 걸쳐 거의 均一함을 나타내고 있다. 그림 12는 이를 1/1옥타아브 대역으로 변환한 것으로서 振動, 音圧이 모두 500 Hz 부근에서 최대임을 나타낸다.

이와 같이 1/1 옥타아브 대역별로 분석하여 볼 때 500 Hz 주파수 대역에서 많은 물의 音이 透過되어 나오는 現象은 이 주파수 대역이 出入口의 遮音性能이 떨어지는 共鳴周波數임을 나타내고 있다. 또한, 이 結果値는 對한 건축학회지에 이미 발표된 바와 같이 理論計算에 의해 구한 入射音의 각도 30°時의 431 Hz, 45°時의 528 Hz, 60°時의 747 Hz와 거의 유사한 값 (동일 주파수 대역: 500 Hz)을 나타내고 있다.

그림 13은 出入口의 共鳴周波數인 500 Hz에서 各測定點別로 透過되어 나오는 音響인텐시티레벨을 2次元의 등고선으로 표시한 것으로서 測定點 13, 14, 23, 33 부분은 透過량이 많음을 나타내고 있다. 즉, 이 부분은 500 Hz의 주파수에서 다른 부분에 비해 遮音效果가 좋지 않음을 쉽게 把握할 수 있다.

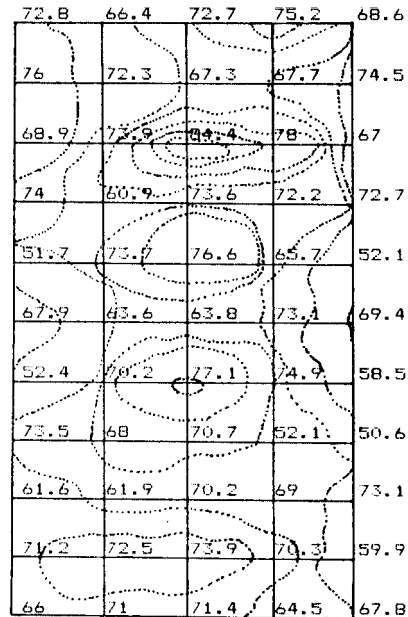


그림 13. 出入口의 共鳴周波數 500 Hz에서의 各測定點別 音響인텐시티레벨 등고선

## V. 結 論

Surface Intensity 法을 利用하여 現場에서의 出入門에 대한 遮音性能을 測定한 結果를 同一條件의 出入門에 대하여 Sound Intensity 法과 종래의 現場測定法 및 實驗室法에 의한 測定 結果値와 비교, 검토한 結論은 다음과 같다.

1) Surface Intensity 法과 Sound Intensity 法에 의해 얻어진 遮音性能 測定 結果는 2000Hz(7 dB 差)를 除外하고는 거의 비슷한 結果値를 얻을 수 있었다.

2) 出入門의 遮音性能에 대해서 Surface Intensity 法에 의해서 얻어진 結果는 實驗室法 및 理論解析에 의한 結果와 유사한 것으로 나타나 종래의 現場測定法에 비하여 보다 精確한 값을 얻을 수 있었다. 또한 構造物의 형상이나 測定計의 제약조건을 고려하여 有效적절히 使用하면 Sound Intensity 法과 함께 遮音性能 測定時 좋은 方法임을 검증하였다.

3) 本 研究의 測定對象 出入門의 共鳴周波數는 理論計算 및 實測 結果, 500Hz(1/1 옥타아브 대역 중심 주파수) 부근으로 判明되었다.

4) 共鳴周波數인 500Hz 에 대하여 각 測定點別로 透過하여 나오는 音響인텐시티량을 同時에 2次元의 登高선으로 나타냄으로써 차음결합부분에 대한 精密評價를 쉽게 할 수 있고, 騒音防止對策 計劃時 적절하고 경제적인 對策을 세우는데 많은 도움을 줄 수 있으리라 사료된다.

本 研究는 앞으로 窓門 및 각종 構造物에 대한 많은 검증이 요구되며 音과 振動과의 關係에 의한 放射效率에 관한 研究가 進行되어야 하리라 여긴다.

끝으로 本 研究에 많은 도움을 주신 국립극장 무대과 김 용국 과장님과 한양대학교 소음, 진동 제어 연구실의 박 준철군, 建築環境工学 및 설비 연구실의 조 창근, 김 하근 군께 감사드립니다.

## 參 考 文 獻

1. 金興植, 吳在庇, 孫章烈: S.I.(Sound Intensity) 法에 의한 壁體의 遮音性能 現場測定에 관한 研究, 大韓建築學會 學術發表 論文集, 第 5 卷, 第 1 号, 1985.
2. 孫章烈, 吳在庇, 金興植: 크로스 스펙트럼 法에 의한 出入門의 遮音性能 現場測定에 관한 研究, 大韓建築學會誌, 第 29 卷, 第 124 号, 1985.
3. 吳在庇 外 4 人: 音響인텐시티법을 이용한 디젤 엔진의 소음원 檢査, 韓國自動車工學會 學術講演抄錄集, 6 月, 1985.
4. M.C. McGray, M.J. Crocker: Surface Intensity Measurements on a Diesel Engine, NASA Technical Memorandum 81807, April, 1980.
5. M.C. McGray, M.J. Crocker: Phase Shift Errors in the Theory and Practice of Surface Intensity Measurements, Journal of Sound and Vibration, 1982.
6. J.S. Bendat, Piersol: Engineering of Correlation and Spectral Analysis, Wiley Interscience, 1980.
7. 橘秀樹, 矢野博夫: 音響인텐시티-測定法의 原理と應用, 騒音制御, vol.8, No.4, 1984.