

# 正常波管을 이용한 複素反射係數의 測定

## Measurement of Complex Sound Pressure Reflection Coefficient Using Standing Wave Tube

徐 相 駿\*, 趙 文 載\*, 金 連 洙\*

(Sang Joon Suh, Moon Jae Jho, Youn Soo Kim)

### 요 약

建築材料의 複素反射係數를 測定하기 爲해 새로운 方法을 提示하였다. 既存의 方法인 正常波管內에서 正常波比를 測定하여 反射係數를 計算할 境遇, 管內에서 音壓의 最大값과 最小값을 精密하게 測定하기 爲해서는 많은 努力을 기울여야 하며 特히 많은 試料을 取扱할 境遇 매우 번거로운 作業이 된다.

本 論文에서는 이러한 短點을 補充하기 爲해 任意의 세 位置에서 音壓과 位相 및 各 測定點까지의 距離를 測定한 後 最小自乘法에 依해 複素反射係數를 決定하는 方法을 考案하였다. 이 方法으로 두께 5cm, 密度 50kg/m<sup>3</sup>인 유리纖維와 두께 1.5cm인 鋼板에 對한 複素反射係數를 測定한 結果와 既存의 方法으로 測定한 結果가 잘 一致하는 것을 實驗으로 確認하였다. 또한 이 方法은 길이 가 짧은 正常波管으로도 低周波의 反射係數를 測定할 수 있는 長點이 있을 뿐만 아니라 컴퓨터와 interface가 可能하기 때문에 特히 많은 試料을 取扱하는 境遇 效果의 使用될 수 있을 것으로 期待된다.

### ABSTRACT

The reflection coefficients of the sound absorbing materials are obtained from the standing wave ratio in the standing wave tube. This method is rather laborious to find the sound pressure maximum and minimum.

We devised new method for determination of the complex reflection coefficients of the materials. The sound pressures and the phases are measured at least three points along the axis of the tube. The complex reflection coefficients are determined from the measured values by least square method. The measured results for the glasswool with thickness of 5cm and density of 50kg/m<sup>3</sup> and the steel plate with thickness of 1.5cm are in good agreement with those of the conventional method. It is possible to measure the complex reflection coefficients at low frequencies with short standing wave tube and to interface with the personal computer which is very useful for the handling of large amount of samples.

### I. 序 論

建築材料의 反射係數는 室內 音響設計를 爲해 必要한 材料의 音響特性이다. 一般의 建築材料의 反射係數 또는 吸音係數를 測定하는 方法에는 殘響室法<sup>(1)</sup>, 正常波管을 利用하는 方法<sup>(2)</sup>, tone burst를 利用하는 方法 등이 있다. 이들 方法 中 에서도

\* 한국표준연구소, 음향연구소

가 일반적으로 사용되는데 이것이 정상파관을 이용하는 것이다. 그러나 이 방법은 많은 試料를取扱하는 境遇, 相當한 時間과 努力을 消耗할 뿐만 아니라 實際 音壓의 最大값과 最小값을 精確하게 測定하는 것이 쉽지 않다. 또한 低周波에서 反射率을 測定하기 爲해서는 正常波管의 길이가 波長의 1/4보다 길어야 한다.

이러한 短點을 補完하기 爲한 方法中의 하나가 Seybert와 Ross<sup>[3]</sup>에 依해 考案되었다. 이들은 正常波管內에 設置된 두 마이크로폰 사이의 transfer function으로 부터 反射係數를 求하였다. 이 方法은 다시 Chung과 Blaser<sup>[4]</sup>에 依해 改善되었으며 最近에는 Fahy<sup>[5]</sup>와 Chu<sup>[6,7]</sup>에 依해 한개의 마이크로폰을 利用하는 方法으로 開發되었다. 이들 方法은 既存의 方法에 比해 時間과 努力을 節約할 수는 있으나 高價의 分析裝備을 使用해야 하며 마이크로폰의 位置를 選定하는데 細心한 注意를 기울여야 할 뿐만 아니라 既存의 方法에 比해 精密度가 높지 않다. [5, 6].

本 論文에서는 比較的 簡單하고도 容易한 方法으로 建築材料의 複素反射係數를 測定하는 方法에 對해 論述하고자 한다. 이 方法에서는 任意的 數點 以上에서 各點의 位置 및 各點에서의 音壓과 位相을 測定한 後 最小自乘法에 依해 試料의 複素反射係數를 決定한다.

이 方法을 使用하면 比較的 짧은 正常波管을 利用하더라도 低周波에서 複素反射係數를 測定할 수 있을 뿐만 아니라 複素反射係數를 利用하여 試料의 複素 임피던스와 吸音係數를 求할 수 있다.

## II. 複素反射係數의 測定 原理

均一한 斷面積과 단단한 壁으로 이루어진 正常波管의 한쪽 끝이 試料로 막혀있는 境遇, 이 試料에 音波가 入射하면 音響에너지의 一部은 吸收되고 나머지는 反射되어 正常波를 形成한다. 그림 1에서와 같이 試料의 面을 x軸의 源點이라 하고 오른쪽에서 音波가 入射한다고 하면 正常波管內에서의 複素音壓 p(x)는 다음과 같이 주어진다.

$$p(x) = p_i \exp(ikx) + p_r \exp(-ikx) \quad (1)$$

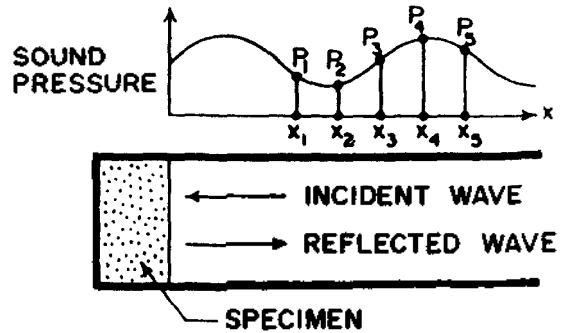


그림 1 正常波管內의 音壓과 測定位置

여기서  $p_i$ 와  $p_r$ 은 複素數로서 各各 入射音壓과 反射音壓을 나타내며  $k = 2\pi/\lambda$ 는 波數,  $\lambda$ 는 波長이다.

萬若 正常波管의 壁이 充分히 단단하지 않거나 粘性과 熱傳導 效果를 無視할 수 없는 境遇, 波數 k는 虛數部를 갖게 되며 이는 距離에 따른 音波의 減衰를 意味한다. 그러나 一般적으로 이 값은 波數 k의 實數部에 比해 매우 작기 때문에<sup>[8]</sup> 여기에서는 無視하기로 한다.

試料의 複素反射係數를 測定하기 爲해서는 正常波管內의 中心軸線上을 따라 몇 개의 位置에서 式(1)로 주어지는 複素音壓과 試料面으로부터 測定點까지의 距離를 測定하여 最小自乘法에 依해  $p_i$ 와  $p_r$ 을 決定한다.

最小自乘法을 爲한 評價値는 다음 式으로 주어진다.

$$E = \sum_{n=1}^N |p_i \exp(ikx_n) + p_r \exp(-ikx_n) - p_n|^2 \quad (2)$$

여기서  $x_1, x_2, \dots, x_N$ 은 試料面으로부터 測定點까지의 距離이며  $p_1, p_2, \dots, p_N$ 은 各點에서의 複素音壓이다.

最小自乘法에 依해 式(2)를  $p_i$ 와  $p_r$ 에 對해 偏微分한 값이 零이 되어야 하므로 이들 關係式에서 複素反射係數 r은 다음과 같이 주어진다.

$$r = \frac{p_r}{p_i} = - \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{vmatrix}} \quad (3)$$

이 식에서各行列의成分은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= b_{21} = N \\
 a_{12} &= b_{12} = \sum p_n \exp(-ikx_n) \\
 a_{21} &= \sum \exp(2ikx_n) \\
 a_{22} &= b_{22} = \sum p_n \exp(ikx_n) \\
 b_{11} &= \sum \exp(-2ikx_n)
 \end{aligned} \tag{4}$$

式(3)과 (4)에서 알 수 있듯이 各點에서의 複素音壓과 試料面으로부터 各測定點까지의 距離를 正確하게 알면 複素反照係數  $r$ 을 求할 수 있다.

### III. 複素音壓의 測定

정상파관內에 形成되는 複素音壓  $p(x)$ 는 그림 2

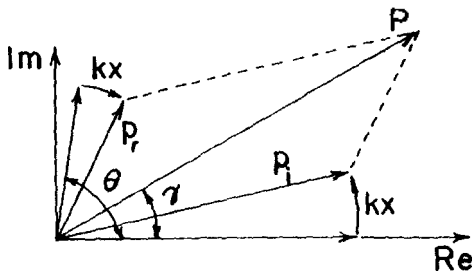


그림 2 複素平面上에서의 音壓과 位相

에서 보듯이 入射音壓과 反照音壓의 벡터 合成으로 주어진다. 그림 2에서  $\theta$ 는 試料의 面에서 音波가 反照될 때 發生되는 位相變化量을 나타내며  $\gamma(x)$ 는 任意의 位置  $x$ 에서 複素音壓  $p(x)$ 가  $x=0$ 일 때의 入射音壓  $p_i$ 와 이루는 角으로서 便宜上 여기에 서는  $p(x)$ 의 絕對位相이라 하자.

式(3)과 (4)를 利用하여 複素反照係數를 求하기 爲해서는 各點에서  $p(x)$ 의 크기와 絕對位相을 測定하여 代入하여야 한다. 그러나 實際 正常波管內에 形成된 音壓은 쉽게 測定할 수 있으나  $x=0$ 에서 入射音壓에 對한 正確한 情報을 알 수 없기 때문에 絕對位相을 直接 測定하기란 쉽지 않다.

波動의 位相은 任意의 基準點에 對해 相對的인 값만을 測定할 수 있기 때문에 正常波의 境遇에도 相對的인 位相만을 測定할 수 있다. 따라서 任意의

基準點에 對해 相對的으로 測定된 正常波의 相對位相을  $\phi$ 라 하고 하면 任意에서 定義한 正常波의 絕對位相  $\gamma = \phi + \alpha$ 라 하면 (5)식과 같다.

$$\gamma = \phi + \alpha \tag{5}$$

여기서  $\alpha$ 를 常數로서 基準點에 따라 다른 값을 갖게 된다.

정상파管內에서 實際 測定 可能한 位相은 相對位相  $\phi$ 이며 常數  $\alpha$ 亦是 直接 測定하기란 쉽지 않다. 그러나 正常波管內의 中心軸線上을 따라 任意의 位置에서 音壓과 相對位相 및 試料面으로부터 各測定點까지의 距離를 알면 計算에 依해 常數  $\alpha$ 를 求할 수 있다.

試料面으로부터 各測定點까지의 距離를  $x_1, x_2, x_3$ 라 하고 各點에서의 音壓과 相對位相을 各各  $p_1, p_2, p_3$ 와  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$ 라 하면 常數  $\alpha$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \arctan \left[ \frac{p_1 \sin(\phi_1 + kx_1) \sin 2k(x_2 - x_3) + \dots}{p_1 \cos(\phi_1 + kx_1) \sin 2k(x_2 - x_3) + \dots} \right. \\
 &\quad \left. \frac{p_2 \sin(\phi_2 + kx_2) \sin 2k(x_3 - x_1) + p_3 \sin(\phi_3 + kx_3)}{p_2 \cos(\phi_2 + kx_2) \sin 2k(x_3 - x_1) + p_3 \cos(\phi_3 + kx_3)} \right. \\
 &\quad \left. \frac{\sin 2k(x_1 - x_2)}{\sin 2k(x_1 - x_2)} \right] \tag{6}
 \end{aligned}$$

이 式은 複雜한 過程과 計算을 通해 얻은 結果로서 其의 誘導過程은 附錄에 주어지 있다.

### IV. 實驗裝置 및 實驗方法

本 研究에 使用된 正常波管은 直徑이 10cm이고, 길이가 1m인 圓筒型 管이다. 이를 利用한 實驗裝置의 概略圖가 그림 3에 주어지 있다.

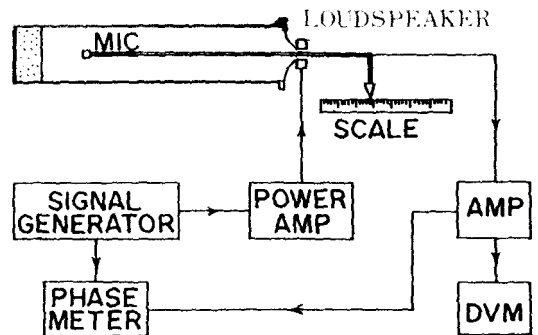


그림 3 音壓과 位相을 測定하기 爲한 實驗裝置의 概略圖.

正常波管的 한쪽 끝은 試料로 막았으며 다른 한쪽 끝은 正常波管 內에 音壓을 加해주시기 爲한 스피커(7 in, 6 W, 4 ohm)가 附着되어 있다. 信號發生器(B&K 2010)에서 發生된 一定한 周波數를 갖는 信號를 과워 增幅器(B&K 2706)로 增幅시킨 後 스피커로 入力시킨다. 이때 管內의 最大音壓은 約 90 dB가 되도록 하였다.

正常波管內에는 마이크로폰에 連結된 直徑 0.5cm인 探針管(probe tube)이 있어 이를 利用하여 一定한 位置에서 音壓과 相對位相을 測定한다. 마이크로폰으로부터 나온 信號는 一經 增幅器를 거쳐 電壓計(Keithley 195A)와 位相計(B&K 2971)로 보내진다. 電壓計에 指示된 電壓은 音壓에 比例하는 量이므로 이를 音壓으로 看做한다. 한편 位相計에 入力되는 基準信號는 信號發生器에서 發生되는 信號로서 이를 基準으로 各 位置에서의 相對位相을 測定하여 式(15)와 (16)을 利用하여 絕對位相을 求한다.

Ⅲ節에서도 言及하였듯이 이 方法에서는 最小한 세 點에서 音壓과 位相을 測定하면 된다. 그러나本 研究에서는 測定값의 信賴度를 높이기 爲해 다섯點에서 音壓과 位相을 測定하였다. 이때 各 點사이의

間隔은 各各 5 cm, 6 cm, 7 cm, 8 cm가 되도록 하였다. 이들 다섯개의 測定點은 試料面 또는 스피커로부터 最大한 멀리 떨어진 正常波管의 中心部에 오도록 하여 管內에서 發生될 수 있는 音壓의 不均一으로 因한 誤差를 最小化하였다.

本 研究에 使用된 試料는 比較的 反射係數가 작은 두께 5 cm, 密度 50 kg/m<sup>3</sup>인 유리纖維와 反射係數가 큰 두께 1.5 cm인 鋼鉄板으로서 各各에 對해 既存의 方法과 새로운 方法으로 反射係數를 測定하여 比較하였다.

## V. 實驗結果 및 論議

表 1과 2는 各各 두께 5 cm, 密度 50 kg/m<sup>3</sup>인 유리纖維와 두께 1.5 cm인 鋼鉄板의 反射係數를 既存의 正常波比를 測定하여 計算한 結果와 本 論文에서 提示한 方法으로 測定한 結果를 보여준다. 既存의 方法으로는 1 m 길이의 平常波管을 利用할 境遇 100 Hz 以下부터는 正常波의 最大音壓과 最小音壓을 測定할 수 없기 때문에 이에 對한 反射率의 測

표 1 유리纖維의 反射係數와 位相값.

周波數 [Hz]	SWR Method		Curve Fitting Method			
	反射係數	位相(rad)	反射係數	標準偏差	位相(rad)	標準偏差
50	-	-	0.878	0.001	-0.289	0.002
80	-	-	0.874	0.002	-0.292	0.005
100	-	-	0.862	0.006	-0.298	0.006
200	0.854	-0.324	0.855	0.001	-0.384	0.002
300	0.818	-0.618	0.814	0.005	-0.613	0.009
400	0.749	-0.773	0.739	0.011	-0.783	0.005
500	0.534	-1.046	0.551	0.002	-1.025	0.004
600	0.416	-0.737	0.419	0.001	-0.725	0.002
700	0.403	-0.671	0.405	0.002	-0.670	0.008
800	0.378	-0.651	0.389	0.002	-0.623	0.004
900	0.385	-0.580	0.387	0.001	-0.565	0.006
1k	0.385	-0.555	0.383	0.001	-0.572	0.003

표 2 鋼鉄板의 反射係數와 位相값.

周波數 (Hz)	SWR Method		Curve Fitting Method			
	反射係數	位相 (rad)	反射係數	標準偏差	位相 (rad)	標準偏差
50	-	-	0.989	0.001	0.010	0.003
80	-	-	0.986	0.001	0.023	0.002
100	-	-	0.984	0.003	0.036	0.001
200	0.980	0.055	0.982	0.001	0.052	0.004
300	0.982	0.075	0.981	0.006	0.074	0.002
400	0.982	0.099	0.981	0.001	0.100	0.001
500	0.981	0.109	0.982	0.002	0.104	0.007
600	0.982	0.112	0.980	0.002	0.118	0.002
700	0.982	0.168	0.980	0.001	0.155	0.002
800	0.981	0.187	0.981	0.001	0.178	0.003
900	0.983	0.209	0.982	0.001	0.198	0.004
1k	0.982	0.201	0.981	0.003	0.186	0.004

定은 不可能하였다. 그러나 새로운 方法에서는 同  
한 길이의 正常波管을 利用하더라도 100Hz 以下  
에서 反射係數를 測定할 수 있을 뿐만 아니라 理論  
적으로서는 매우 낮은 周波數에서의 反射係數도 測定  
할 수 있다. 하지만 低周波에서는 外部로부터의 雜  
音에 依해 正確한 正常波의 測定이 不可能하기 때  
문에 많은 誤差를 誘發할 수 있다.

IV節에서도 밝혔듯이 本 研究에서는 測定값의 信  
賴度를 높이기 爲해 다섯 點에서의 音壓과 位相을  
測定하였다. 그러나 本 論文에서 提示한 方法은 세  
點에 對한 情報만 있으면 複素反射係數를 計算할

수 있기 때문에 다섯 點으로 부터 順序를 考慮한 세  
點의 組合은 모두 10個이므로 한 周波數當 10個의  
反射係數를 測定한 結果가 된다. 따라서 이들 10個  
의 測定값에 對한 標準偏差를 求할 수 있다. 表 1  
과 2에 주어진 標準偏差는 10個의 測定값에 對한  
信賴度 50%의 標準偏差를 나타낸다. 그림 4와 5는  
表 1과 2에 주어진 反射係數와 位相 中 本 論文에  
서 提示한 方法으로 測定한 結果를 그래프 上에 나  
타낸 것이다.

試料의 反射係數 또는 吸音係數에 對한 標準基準  
物(standard reference material)이 없기 때문에 既  
存의 方法과 本 論文에서 提示한 方法 中 어떤 方  
法이 正確하다고 말하기는 어렵다. 그러나 表 1과

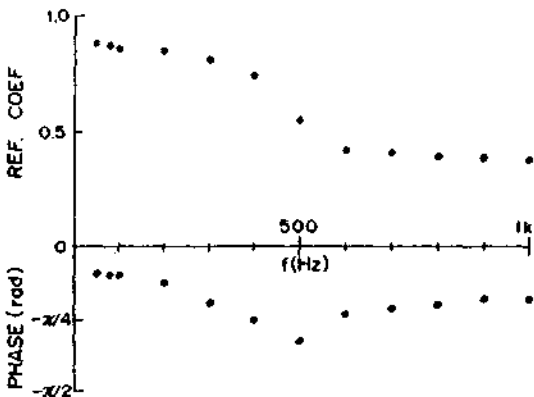


그림 4 유리纖維의 反射係數와 位相.

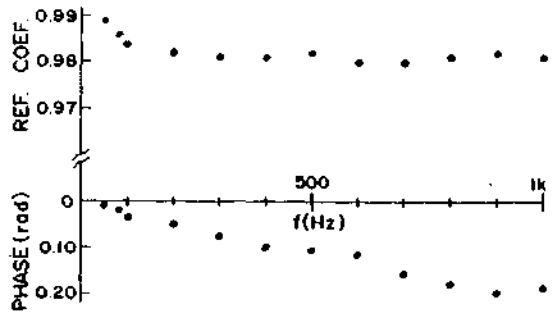


그림 5 鋼鉄板의 反射係數와 位相.

2)에 주어질 두가지 試料에 對한 標準偏差로 부터, 本 論文에서 提示한 方法으로도 反射係數를 正確히 測定할 수 있음을 알 수 있다.

또한 既存의 方法은 마이크로폰을 連續적으로 移動하여 音壓의 最大값과 最小값을 測定하여야 하기 때문에 컴퓨터와의 interface에 의한 自動 測定을 爲해서는 많은 어려움이 있다. 그러나 本 論文에서 提示한 方法은 적어도 세 點 以上에서 音壓과 相對位相 및 測定點까지의 距離만 알면 되기 때문에 컴퓨터와의 interface에 의한 自動測定이 可能하다. 따라서 이 方法은 특히 많은 試料에 對한 反射係數를 測定할 境遇 效果의으로 利用될 수 있을 뿐만 아니라 짧은 正常波管을 利用하더라도 低周波에서의 反射係數를 測定할 수 있는 長點이 있다.

## VI. 結 論

建築材料의 複素反射係數를 測定하기 爲한 새로운 方法을 提示하였다. 이 方法으로 두께 5cm, 密度 50kg/m<sup>2</sup>인 유리纖維의 두께 1.5cm인 鋼鉄 板의 反射係數를 測定한 結果와 既存의 正常波比를 測定하여 計算한 結果가 잘 一致하는 것을 實驗으로 確認하였다.

既存의 方法에서는 正常波管의 길이에 依해 測定 가능한 最低 周波數가 決定된다. 그러나 새로운 方法에서는 正常波管의 길이가 짧아도 低周波에서의 複素反射係數를 測定할 수 있다. 또한 既存의 方法은 컴퓨터와의 interface에 依한 反射係數 測定の 自動化를 爲해서는 많은 어려움이 있으나 本 論文에서 提示한 方法은 컴퓨터와 interface를 시켜 反射係數의 自動測定이 可能하기 때문에 많은 試料에 對한 複素反射係數의 測定이 可能하다.

### [附 錄]

本文(III章 參照)에 使用된 記號를 利用하여 式(1)을 다시 表現하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P \exp i(\gamma - kx) = P_i + P_r \exp i(\theta - 2kx) \quad (附 1)$$

여기서  $P, P_i, P_r$ 은 實數이다.

三角函數를 使用하면 式(附 1)은 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P \cos(\gamma - kx) = P_i + P_r \cos(\theta - 2kx) \quad (附 2)$$

$$P \sin(\gamma - kx) = P_r \sin(\theta - 2kx) \quad (附 3)$$

式(附 3)으로부터 다음 式을 얻을 수 있다.

$$P_r = \frac{P \sin(\gamma - kx)}{\sin \theta \cos 2kx - \cos \theta \sin 2kx} \quad (附 4)$$

萬若 試料面으로 부터  $x_1, x_2, x_3$  만큼 떨어진 位置에서 音壓과 絕對位相을 各各  $P_1, P_2, P_3$  와  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  라고 하면 다음과 같은 式을 얻을 수 있다.

$$\frac{P_1 \sin(\gamma_1 - kx_1)}{\sin \theta \cos 2kx_1 - \cos \theta \sin 2kx_1} = \frac{P_2 \sin(\gamma_2 - kx_2)}{\sin \theta \cos 2kx_2 - \cos \theta \sin 2kx_2} \quad (附 5)$$

$$\frac{P_1 \sin(\gamma_1 - kx_1)}{\sin \theta \cos 2kx_1 - \cos \theta \sin 2kx_1} = \frac{P_3 \sin(\gamma_3 - kx_3)}{\sin \theta \cos 2kx_3 - \cos \theta \sin 2kx_3} \quad (附 6)$$

式(附 5)와 (附 6)을  $\sin$ 과  $\cos$ 에 對해 整理한後 比를 取하면 다음 式이 주어진다.

$$\tan \theta = \frac{P_1 \sin(\gamma_1 - kx_1) \sin 2kx_2 - P_2 \sin(\gamma_2 - kx_2) \sin 2kx_1}{P_1 \sin(\gamma_1 - kx_1) \cos 2kx_2 - P_2 \sin(\gamma_2 - kx_2) \sin 2kx_1} \quad (附 7)$$

$$\tan \theta = \frac{P_1 \sin(\gamma_1 - kx_1) \sin 2kx_3 - P_3 \sin(\gamma_3 - kx_3) \sin 2kx_1}{P_1 \sin(\gamma_1 - kx_1) \cos 2kx_3 - P_3 \sin(\gamma_3 - kx_3) \sin 2kx_1} \quad (附 8)$$

式(附 7)과 (附 8)을 갈게 놓은後 整理하면 다음과 같은 結果를 얻을 수 있다.

$$P_1 \sin(\gamma_1 - kx_1) \sin 2k(x_2 - x_3) + P_2 \sin(\gamma_2 - kx_2) \cdot \sin 2k(x_3 - x_1) + P_3 \sin(\gamma_3 - kx_3) \sin 2k(x_1 - x_2) = 0 \quad (附 9)$$

正常波의 絕對位相  $\gamma$ 와 相對位相  $\phi$ 는 式(5)와 같

은·關係를 갖고 있으므로 式(附9)에서  $\gamma$ 를 包含한 sine項은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \sin(\gamma - kx) &= \sin(\phi - kx + i\alpha) \\ &= \sin\alpha \cos(\phi - kx) + \cos\alpha \sin(\phi - kx) \end{aligned} \quad (附10)$$

各點에서 測定된 正常波의 相對位相을  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$ 라고 하면 式(附9)와 (附10)으로부터 다음 式을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sin\alpha | P_1 \cos(\phi_1 - kx_1) \sin 2k(x_2 - x_3) + P_2 \cos(\phi_2 - kx_2) \sin 2k(x_3 - x_1) + P_3 \cos(\phi_3 - kx_3) \sin 2k(x_1 - x_2) | \\ = -\cos\alpha | P_1 \sin(\phi_1 - kx_1) \sin 2k(x_2 - x_3) + P_2 \sin(\phi_2 - kx_2) \sin 2k(x_3 - x_1) + P_3 \sin(\phi_3 - kx_3) \sin 2k(x_1 - x_2) | \end{aligned} \quad (附11)$$

式(附11)을 整理하면 다음과 같은 結果가 주어진다.

$$\begin{aligned} \tan\alpha = & \frac{P_1 \sin(\phi_1 - kx_1) \sin 2k(x_2 - x_3) + P_2 \sin(\phi_2 - kx_2) \sin 2k(x_3 - x_1)}{P_1 \cos(\phi_1 - kx_1) \sin 2k(x_2 - x_3) + P_2 \cos(\phi_2 - kx_2) \sin 2k(x_3 - x_1)} \\ & \frac{\sin 2k(x_3 - x_1) + P_3 \sin(\phi_3 - kx_3) \sin 2k(x_1 - x_2)}{\sin 2k(x_3 - x_1) + P_3 \cos(\phi_3 - kx_3) \sin 2k(x_1 - x_2)} \end{aligned} \quad (附12)$$

참 고 문 헌

1. ISO/R 354, "Measurement of Absorption Coefficients in a Reverberation Room," International Organization for Standardization, 1963.
2. ASTM C384-85, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method," American Society for Testing Materials, Philadelphia, PA, 1985.
3. A.F. Seybert and D.F. Ross, "Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-Microphone Random-Excitation Technique", J. Acoust. Soc. Am. 61, pp.1362-1370, 1977.
4. J.Y. Chung and D.A. Blaser, "Transfer Function Method of Measuring In-Duct Acoustic Properties: I. Theory, II. Experiment," J. Acoust. Soc. Am. 68, pp.907-921, 1980.
5. F.J. Fahy, "Rapid Method for the Measurement of Sample Acoustic Impedance in a Standard Wave Tube," J. Sound Vib. 97, pp.168-170, 1984.
6. W.T. Chu, "Transfer Function Technique for Impedance and Absorption Measurements in an Impedance Tube Using a Single Microphone", J. Acoust. Soc. Am. 80 (2), pp.555-560, 1986.
7. W.T. Chu, "Further Experimental Studies on the Transfer-Function Technique for Impedance Tube Measurements," J. Acoust. Soc. Am. 83(6), pp. 2255-2260, 1988.
8. P.M. Morse and K.U. Ingard, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, New York, pp.519-522, 1968.

▲서 상 준



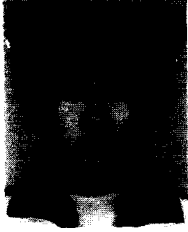
1952년 5월 8일생  
1975년 2월 서강대학교 물리학과 졸업  
1977년 2월 한국과학기술원 물리학과 졸업  
현재 한국표준연구소 음향연구실 실장

▲조 문 재



1957년 1월 1일생  
1979년 2월 아주공과대학 전자공학과 졸업  
1981년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업  
현재 한국표준연구소 음향연구실 선임연구원

▲金 聖 洙



1952년 3월 10일생

1978년 2월 대전 공전 전기  
과 졸업

1978년 4월~현재 한국표준  
연구소 음향연구실근무

1987년 12월 환경관리(소음·  
진동) 기술사 취득