# 자유 음장에서 빔형성 방법을 이용한 음향 임피던스 측정

## Measurement of the acoustic impedance by using beamforming method in a free-field

선종천*·신창우*·백순권**·강연준†

**Jong Cheon Sun, Chang Woo Shin and Yeon June Kang**

**Key Words :** acoustic impedance (음향 임피던스), beamforming (빔형성), adaptive nulling method (적응 영화 방법).

ABSTRACT

In this paper, a beamforming technique is introduced to measure the acoustic impedance at both normal and oblique incidence in a free field. The acoustic impedance is obtained by separating incident and reflected signals using the adaptive nulling method which is one of the various beamforming algorithms. To obtain better results, pressure vector commonly used in array signal processing is replaced with the transfer function vector between each microphone and the white Gaussian noise is suppressed by a wavelet shrinkage technique. The experiments conducted in a semi-anechoic room show that the proposed method is efficient and accurate in measuring the acoustic impedance of sound absorbing materials under a free field condition.

## 1. 서 론

내장재 및 각종 흡음재료의 음향 임피던스를 측정하는 것은 특히 실내 음장 해석과 같은 분야에서 매우 중요하다. 지금까지의 대부분의 연구에서는 내장재를 이루를 재료에 대한 개별적인 흡음률 및 음향 임피던스 값을 측정하여 실내 음장을 해석하는 방법이 주를 이루었으나 실제 내장재를 이루는 부품들은 여러 재료들이 섞여 있어 측정에 한계가 있을 수밖에 없다. 그러므로 좀 더 정확한 실내 음장 해석을 위해서는 내장재의 원형을 그대로 유지한 채 음향 임피던스 값을 측정 하는 것이 중요하다.

재료의 음향 임피던스를 측정하기 위해서 다양한 방법들이 사용된다. 가장 대표적인 방법인 임피던스 튜브 방법은 시편의 크기 및 형상이 제한되어 있어 다양한 형상들의 시편에 대해서는 측정할 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 자유음장 조건에서 음향 임피던스를 측정하기 위한 여러 노력이 이루어졌다. Tamura[4,5]는 공간 변환(Spatial transform)을 이용하여 시편의 반사계수를 측정할 수 있는 방법을 제안하였으나 공간 변환을 하기 위해서는 넓은 범위의 많은 측정점을 필요로 한다. Allard[2,3]는 마이크로폰 2 개를 이용하여 측정한 음압으로부터 속도 및 평균 음압을 계산하여 음향 임피던스를 계산할 수 있는 방법을 제안하였으며 이후 그의 방법은 다양한 논문들에서 더욱 발전 되었다. 이와는 별도로 2003 년 주형준 등[1]은 빔형성 방법을 사용하여 반사계수 값 측정을 시도하였다. 그는 시편에 수직한 방향으로 설치한 마이크로폰 어레이를 사용하여 입사파와 반사파를 분리함으로써 반사계수를 측정하였다.

본 논문에서는 빔형성 방법을 개선하여 자유음장 상태에서 음향 임피던스를 안정적으로 측정할 수 있도록 하였다. 측정 결과의 정확성을 향상시키기 위해서 각 마이크로폰에서 측정한 음압 값으로 이루어진 음압 벡터 대신 전달함수로 이루어진 벡터를 사용하였으며 여기에 웨이블렛을 적용함으로써 잡음을 제거하였다. 시편의 유한한 크기를 고려하여 어레이와 표면간의 거리가 최대한 가깝도록 실험을 구성하였다. 또 이로 인해서 발생하는 마이크로폰간 위상 오차 증가를 튜브방법을 사용하여 보정하여 저 주파수에서 측정의 정확성을 향상시켰다. 반 무향실에서 이루어진 실험에서 얻은 값을 임피던스 튜브 실험값 및 이론값과 비교함으로써 제안한 방법을 검증하였다.

## 2. 빔형성 방법

### 2.1 모델링 및 잡음 제거

Fig. 1 과 같이 시편의 표면에 수직인 방향으로 설치된 마이크로폰 어레이에 평면파가 입사할 경

† 강연준; 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yeonjune@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-1691, Fax : (02) 888-5950

* 서울대학교 기계항공공학부

**현대기아자동차

우 각 마이크로폰에서 측정된 신호는 주파수 도메인에서 다음과 같이 마이크로폰 간 위상 차이 항으로 표현할 수 있다.

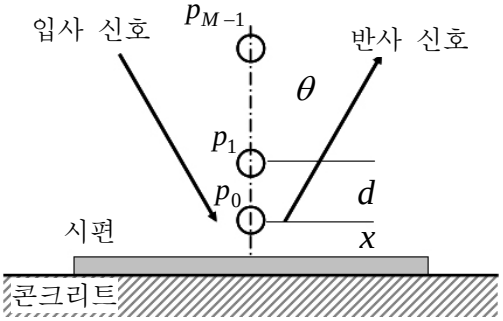



Fig.1 Schematic illustration for beamforming method.

$$\begin{bmatrix} p_0(\omega) \\ p_1(\omega) \\ . \\ p_{M-1}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ e^{-jkd\cos\theta} & e^{jkd\cos\theta} \\ . & . \\ e^{-jkMd\cos\theta} & e^{jkMd\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_i(\omega) \\ s_r(\omega) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0(\omega) \\ n_1(\omega) \\ . \\ n_{M-1}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$s_i(\omega)$, $s_r(\omega)$ 은 입사 및 반사 신호이며, $d$ 는 마이크로폰 사이 거리, $\theta$ 는 입사 및 반사각, $p_m(\omega)$ 은 $m$ 번째 마이크로폰에서 측정한 음압 신호이다. 위 식을 다음과 같이 어레이 신호와 입사 및 반사 신호 사이의 공간 전달함수 개념을 사용하여 표현하면,

$$\mathbf{p}(\omega) = [\mathbf{g}_i \;\; \mathbf{g}_r]\mathbf{s}(\omega) + \mathbf{n}(\omega) \quad (2)$$

$\mathbf{p}(\omega)$ 및 $\mathbf{s}(\omega)$ 는 음압 및 신호 벡터이며 $\mathbf{g}_i$, $\mathbf{g}_r$ 은 입사 및 반사 신호와 관련된 공간 전달함수 벡터로서 식 (1) 우변 행열의 각 컬럼 벡터이다. 편의상 주파수 도메인을 의미하는 기호 $\omega$ 는 이후부터 생략하도록 하겠다.

Fig. 1 과 같은 상황에서 음장이 스피커로부터 발생한 입사 신호와 시편의 표면에서 발생한 반사 신호들로 이루어져 완전 상관 음장을 형성한다면, 각 마이크로폰 사이의 전달함수는 항상 일정한 값을 갖는다. 그러므로 각 마이크로폰 사이의 전달함수를 이용하여 식 (1) 및 (2)를 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H_0 \\ H_1 \\ . \\ H_{M-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ e^{-jkd\cos\theta} & e^{jkd\cos\theta} \\ . & . \\ e^{-jkMd\cos\theta} & e^{jkMd\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_i' \\ s_r' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0/p_0 \\ n_1/p_0 \\ . \\ n_{M-1}/p_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

또는

$$\mathbf{p}' = [\mathbf{g}_i \;\; \mathbf{g}_r]\mathbf{s}' + \mathbf{n}/p_0 \quad (4)$$

$\mathbf{p}'$ 은 전달함수 벡터이며 $s_i', s_r'$ 은 각각 $s_i/p_0$, $s_r/p_0$ 이고 $H_m$ 은 첫 번째 마이크로폰 신호와 m 번째 마이크로폰 신호 사이의 전달함수이다.

$$H_m = \frac{p_m}{p_0} \quad (5)$$

식 (1), (2)와 식 (3), (4)를 비교하면, 음압 벡터와 신호벡터를 구성하는 요소의 값들은 서로 다르지만 각 신호에 대응하는 공간 전달함수 벡터는 동일하다. 또, 식 (3) 및 (4)에서 측정하는 값들은 평균이 가능한 값들로 실제 실험시 잡음 제거 등에 유리하다.

그러나, 제안한 방법의 신호 측정이 자유 음장에서 이루어지므로 임피던스 튜브내에서 측정하는 기존의 방법에 비해 상대적으로 큰 잡음을 포함할 수밖에 없어 단순한 평균만으로는 잡음을 줄이는데 한계가 있다. 본 논문에서는 잡음을 효과적으로 줄이기 위해서 전달함수의 산술적 평균뿐만 아니라 웨이블렛(wavelet)을 적용하였다. 웨이블렛을 적용한 잡음 제거 기술은 이미 여러 논문에서 검증되었고 또 폭넓게 활용되고 있으므로[7,8] 본 논문에서는 자세한 설명을 생략하도록 하겠다. 그러나 3 장의 실험 결과로부터 웨이블렛으로 잡음을 제거한 전달함수를 사용하여 얻은 결과가 그렇지 않은 경우보다 더 안정된 값을 얻음을 확인할 수 있다.

### 2.2 음향 임피던스 계산

식 (3), 또는 (4)를 사용하여 입사 및 반사 신호를 추정하기 위해서 적응영화 방법(Adaptive nulling method)을 적용하였다. 적응 영화 방법은 원하는 방향의 신호를 최대화하고 다른 방향의 신호를 제거하는 빔 조정 벡터를 사용하여 특정 방향으로부터의 신호들을 추정하는 방법이다. 다음 세가지 조건을 만족하는 빔조정 벡터 $\mathbf{a}_i$ 를 고려해보자.

$$\text{maximize} \quad |\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{g}_i| \quad (6)$$

$$\text{subject to} \quad \|\mathbf{a}_i\| = 1 \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{g}_r = 0 \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{a}_i$ 는 입사 신호에 해당하는 공간 벡터 $\mathbf{g}_i$ 와의 내적은 최대값을 갖는 동시에 반사 신호에 해당하는 공간 벡터 $\mathbf{g}_r$ 과의 내적은 “0”의 값을 갖도록 하는 벡터이다. 첫 번째 조건을 만족하는 빔 조정 벡터 $\mathbf{a}_i$ 를 찾기 위해 이 벡터를 다음과 같이 표현할 수 있다고 가정하자.

$$\mathbf{a}_i = \sum_{k=2}^{M} \alpha_k \mathbf{e}_k \tag{9}$$

여기서 $\mathbf{e}_k$ 는 $\mathbf{g}_r\mathbf{g}_r{}^{\mathrm{H}}$ 의 $k$ 번째 고유 벡터이며 $\alpha_k$ 는 임의의 복소 상수이다. $\mathbf{g}_r\mathbf{g}_r{}^{\mathrm{H}}$는 한 개의 고유값(eignevalue)을 가지므로 식 (9)로 표면 되는 $\mathbf{a}_i$ 와 $\mathbf{g}_r$ 은 서로 직교한다. 그러므로 첫번째 조건인 식 (8)을 만족한다. 다음으로 식 (6)에 식 (9)의 $\mathbf{a}_i$ 를 대입해 보도록 하자.

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{g}_i = \sum_{k=2}^{M} (\alpha_k \mathbf{e}_k \cdot \mathbf{g}_i) = \sum_{k=2}^{M} \alpha_k \beta_k = \boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{\beta} \tag{10}$$

$\boldsymbol{\alpha}$ 는 $\alpha_k$ 를 요소로 갖는 벡터이며 $\boldsymbol{\beta}$ 는 $\mathbf{e}_k \cdot \mathbf{g}_i$ 를 요소로 갖는 벡터이다. 위 식은 두 벡터 $\boldsymbol{\alpha}$ 와 $\boldsymbol{\beta}$ 가 서로 평행할 때에 최대값을 가지므로 $\alpha_k$ 를 다음과 같이 정의한다면 식 (6)의 조건을 충족 시킬 수 있다.

$$\alpha_k = \beta_k = \mathbf{e}_k \cdot \mathbf{g}_i \tag{11}$$

마지막으로 식 (7),(9) 그리고 식 (11)로부터 빔 조정 벡터는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{a}_i = \frac{\sum_{k=2}^{M} (\mathbf{e}_k \cdot \mathbf{g}_i)\mathbf{e}_k}{\left\| \sum_{k=2}^{M} (\mathbf{e}_k \cdot \mathbf{g}_i)\mathbf{e}_k \right\|} \tag{12}$$

식 (6)~(8)의 특성을 갖는 빔 조정 벡터 $\mathbf{a}_i$ 와 식 (4)의 음압 벡터와의 내적을 취하면,

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{p}' = \mathbf{a}_i \cdot [\mathbf{g}_i\ \mathbf{g}_r]\mathbf{s}' = (\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{g}_i)(s_i / p_0) = c_i s_i / p_0 \tag{13}$$

여기서 상수 $c_i$는 $\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{g}_i$이다. 위 식으로부터 입사 신호는 다음과 같이 계산된다.

$$s_i' = s_i / p_0 = (\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{p}') / (\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{g}_i) \tag{14}$$

반사 신호는 식 (6)~(14)의 과정을 반복 수행한 후 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$s_r' = s_r / p_0 = (\mathbf{a}_r \cdot \mathbf{p}') / (\mathbf{a}_r \cdot \mathbf{g}_r) \tag{15}$$

$\mathbf{a}_r$ 은 식 (6)~(8)의 조건에서 $\mathbf{g}_i$ 을 $\mathbf{g}_r$ 로 바꾼 후 위 과정을 반복하여 계산한 빔 조정 벡터이다. 식 (14) 및 (15)로부터 반사계수는 다음과 같이 계산한다.

$$R = \frac{s_r}{s_i} e^{-jk2x\cos\theta} = \frac{s_r'}{s_i'} e^{-jk2x\cos\theta} \tag{16}$$

여기서 $x$ 는 시편과 첫 번째 마이크로폰 사이의 거리이다. 식 (16)에서 지수 함수 항은 시편과 마이크로폰의 거리 차이로 인해 발생하는 위상 차이를 보정해주는 항이다. 마지막으로 시편의 음향 임피던스 값은 다음과 같다.

$$Z = \frac{1+R}{1-R} \tag{17}$$

## 3. 음향 임피던스 측정

### 3.1 위상 오차 보정

음향 임피던스 측정 과정에서 마이크로폰 어레이는 샘플의 표면과 최대한 가까운 거리에 설치하여 측정하여야 한다. 측정하고자 하는 시편이 무한한 크기가 아니므로 표면에서 멀어질수록 평면파 조건을 충족하지 않을 수도 있기 때문이다. 그러므로 시편과 마이크로폰 사이의 거리는 물론이고 각 마이크로폰 사이의 거리도 가능한 짧게 하여 측정하는 것이 유리하다. 그러나 이럴 경우 특히, 1000Hz 이하의 저 주파수 대역에서 각 마이크로폰 사이의 거리가 파장의 길이에 비해 상대적으로 매우 짧아 진다. 식 (1),(3)에서 보는 것처럼 빔형성 방법은 각 마이크로폰 사이의 위상 차의 정확성이 매우 중요하나 이럴 경우 위상에서의 작은 절대 오차는 큰 상대 위상 오차를 유발하게 된다. 그러므로 각 마이크로폰 사이의 상대 위상 오차를 보정해 주는 과정이 저 주파수 대역의 정확성 향상을 위해서 매우 중요하다.

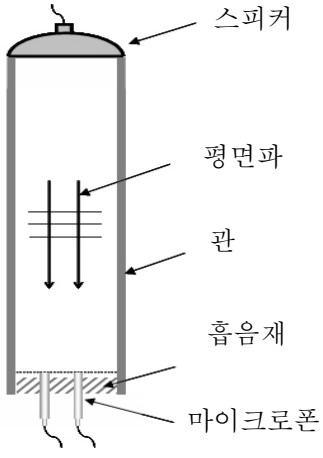



Fig. 2 Experimental setup for relative phase calibration.

본 논문에서는 위상 오차를 보정하기 위해서 Fig. 2 와 같은 튜브 방법을 사용하였다. 관의 한 쪽 끝에 스피커를 설치하여 평면파를 발생시키고, 반대편 끝의 동일한 선상에 실험에 사용될 마이크로폰들을 설치한 후 각 마이크로폰 사이의 전달함수를 측정하였다. 튜브 내에서의 모드가 발생하는 것을 방지하기 위하여 튜브의 끝은 흡음재로 처리하였다. 튜브 내에서 첫번째와 $m$ 번째 마이크로폰

사이의 전달함수를 $H_m^{cal}$ 라고 하면 보정된 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H_m = H_m^{mea} / H_m^{cal} \quad (18)$$

여기서 $H_m^{mea}$ 는 실제 임피던스 실험에서 측정한 첫번째와 $m$ 번째 신호 사이의 전달함수이다. 본 논문에서는 보정을 위해서 사용한 튜브(직경 10cm)의 한계로 인해 1000Hz 이하에서만 위 식을 적용하여 위상을 보정하였으며 그 이상의 대역에서는 이러한 보정 과정을 적용하지 않았다.

### 3.2 음향 임피던스 측정

Fig. 3 는 수직 입사에 대해서 표면 임피던스를 측정하기 위한 실험 구성이다. 반 무향실에서 이루어진 실험에서 가로 세로 각각 1m 인 Glass Wool 시편을 콘크리트 바닥에 놓고 지상으로부터 수직으로 약 2 m 높이에 스피커를 설치하여 50~8000 Hz 대역에서 랜덤 신호로 가진 하였다. 마이크로폰 어레이는 B&K Type 4935 마이크로폰 3 개로 구성하였으며 시편의 중앙 표면에서 수직인 방향으로 설치하였다. 데이터 수집 장치는 LMS SCADAS III 를 사용하였다. 시편에서부터 첫 번째 마이크로폰까지의 거리는 0.7cm 였고 각 마이크로폰 사이 거리는 1.3 cm 였다. 전달함수는 1500 번 평균을 취하여 구하였으며, 모든 측정 결과는 300Hz 부터 6400Hz 까지 128Hz 간격으로 데이터를 추출하여 표시하였다.

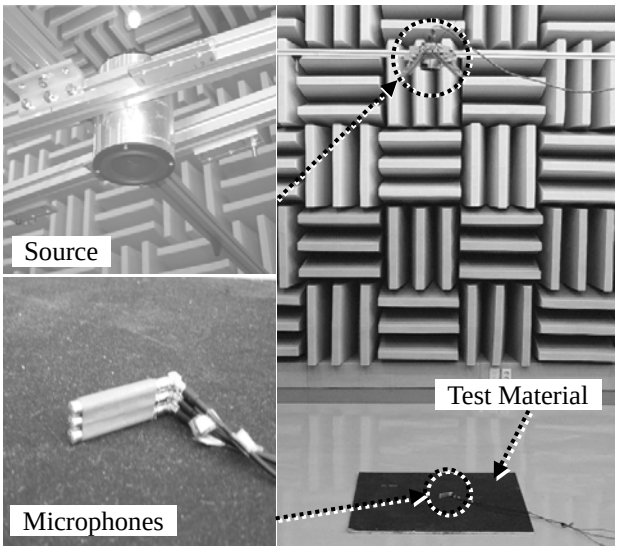
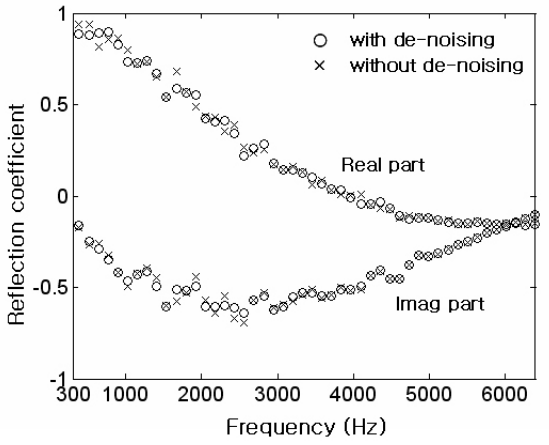
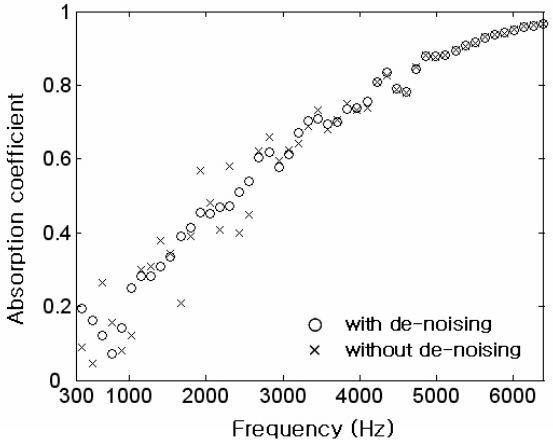



Fig.3 Experimental setup for measuring the acoustic impedance at normal incidence

Fig. 4 는 수직 입사에 대해서 동일한 측정 신호로부터 웨이블렛을 사용하여 잡음을 제거한 후 음향 임피던스를 계산한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 비교 결과이다. 그림서 보는 것처럼 웨이블렛을 사용하여 얻은 쪽이 그렇지 않은 경우보다 훨씬 더 안정된 결과를 얻었음을 보여준다. 특히 이러한 경향은 흠음률 비교 그래프에서 더욱 명확해 진다.



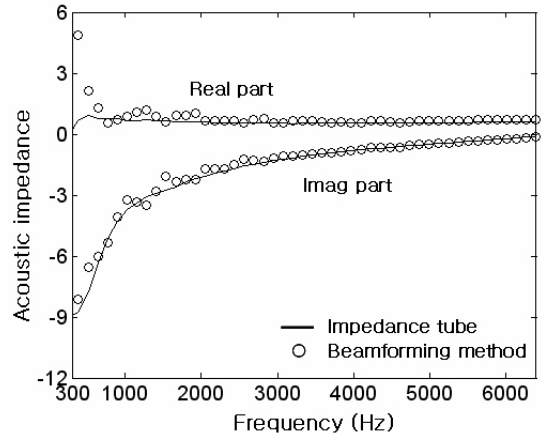

(a) Reflection coefficient



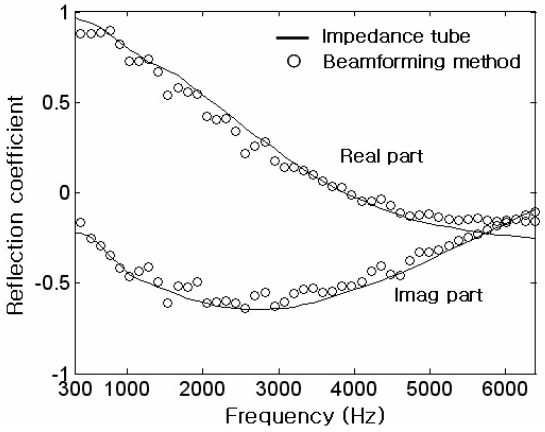

(b) Absorption coefficient

Fig. 4 Comparison of the measured results by beamforming method with and without de-noising.

Fig. 5 은 동일한 샘플에 대해서 빔형성 방법으로 얻은 데이터와 임피던스 튜브 방법으로 얻은 데이터를 비교한 결과이다. 이후 빔형성 방법을 사용하여 얻은 결과는 모두 웨이블렛을 적용하여 잡음을 제거한 후 계산한 결과이다. 두 방법으로부터 얻은 결과는 약 400 Hz 이상에서는 거의 차이가 없다. 400 Hz 이하에서 차이를 보이는 것은 앞장에서 설명한 것처럼 각 마이크로폰 사이의 거리가 파장의 길이에 비해 매우 짧기 때문이다. 400Hz 이하의 저 주파수 영역에서 의미 있는 값을 얻기 위해서는 좀더 조심스럽고 세밀한 위상 보정 절차가 필요할 것으로 판단된다.




(a) Acoustic impedance




(b) Reflection coefficient

Fig. 5 Comparison of the results with impedance tube and beamforming methods at normal incidence.

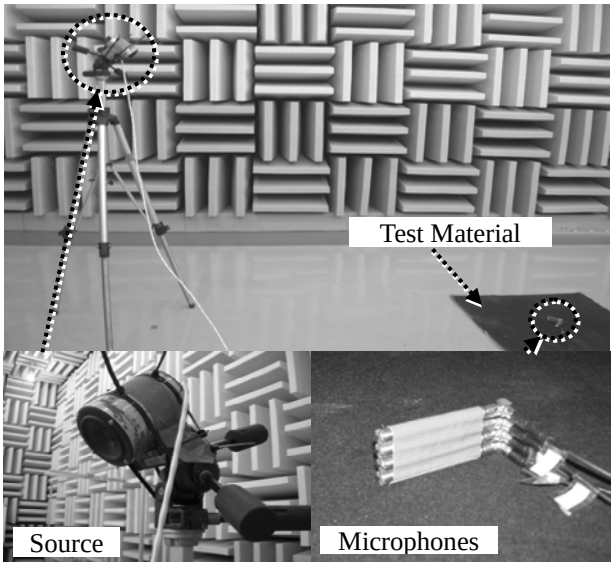
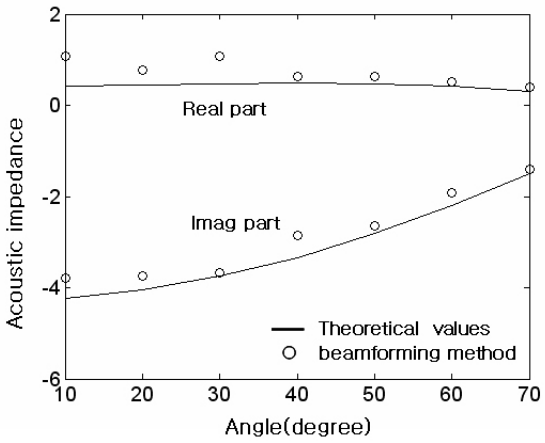
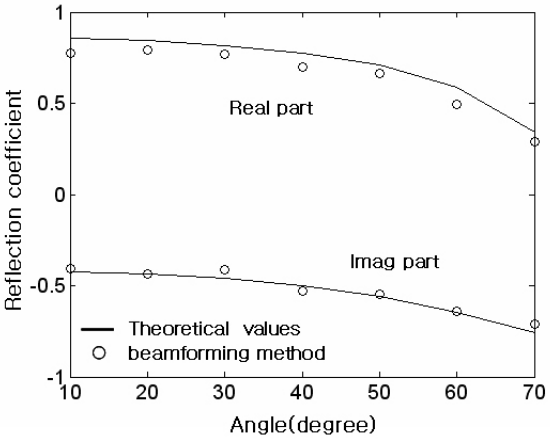



Fig. 6 Experimental setup for measuring the acoustic impedance at oblique incidence.

다음은 경사 입사의 경우에 대해서 제안한 방법을 검증하였다. Fig. 6 은 경사 입사에 대한 음향 임피던스 측정 실험 장면이다. 수직 입사 실험의 경우와 모든 과정은 동일하나 스피커의 방향 및 위치는 음압 신호가 마이크로폰 어레이에 경사 입사가 가능하도록 그림과 같이 설치 하였다. 측정은 1000 Hz 에서 10°간격으로 10°~70°까지 이루어졌다. 제안한 방법으로 얻은 값들을 검증하기 위해서 동일한 샘플에 대하여 이론식을 사용하여 Table I 의 물성치로부터 음향 임피던스 및 반사계수를 추정하였다.[9] 경사 입사 실험 결과는 Fig. 7 에 표시되어 있다. 그림에서 보는 것처럼 빔형성 방법으로 얻은 결과값이 이론식으로 구한 값과 잘 일치함을 볼 수 있다.




(a) Acoustic impedance




(b) Reflection coefficient

Fig. 7 Comparison of the results with theoretical and beamforming methods for oblique incidence at 1000Hz.

Table I. Properties of the test material.

| | |
|---|---|
| Thickness (mm) | 10 |
| Bulk Modulus ( $kg/m^3$ ) | 81.81 |
| Flow resistivity ( MKS Rayls / $m$) | 48210 |
| Structure Factor ( - ) | 1.05 |
| Porosity ( - ) | 0.88 |
| Viscous characteristic length ( $\mu m$ ) | 46.46 |
| Thermal characteristic length ( $\mu m$ ) | 128.50 |

## 4. 결론

본 논문에서는 자유음장 조건에서 수직 및 경사 입사의 경우에 대하여 시편의 음향 임피던스를 측정하기 위한 향상된 빔형성 방법을 제안하였다. 잡음을 효과적으로 줄이기 위해서 음압 벡터대신 전달 함수 벡터를 사용하였으며 웨이블렛을 이용하여 잡음을 제거하였다. 마이크로폰 간 상대 위상을 보정함으로써 1000Hz 이하의 저 주파수 대역에서 정확한 값을 얻을 수 있도록 하였다. 제안한 방법으로 측정한 값들을 임피던스 튜브 측정값 및 이론식으로 추정한 값들과 비교하여 제안된 방법의 성능을 검증하였다. 특히 수직입사의 경우에 대해서 약 400~6400Hz 까지 측정한 결과값이 임피던스 튜브를 사용하여 얻은 값과 잘 일치함을 보여준다.

## 참고문헌


(1) 주형준, 강연준, 2003, “빔형성 방법을 이용한 경사 반사 계수 측정”, 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권 제 6 호, pp. 438~444.

(2) Jean F. Allard, Benita Sieben, 1985, “Measurements of acoustic impedance in a free field with two microphones and a spectrum analyzer”, J. Acoust. Soc. Am. 77(4), pp. 1617~1618

(3) Y. Champoux, J. Nicolas and J. F. Allard, 1988, “Measurement of acoustic impedance in a free field at low frequencies”, Journal of Sound and Vibration 125(2), pp. 313~323.

(4) Masayuki Tamura, 1985, “Spatial Fourier transform method of measuring reflection coefficients at oblique incidence. I: Theory and numerical examples”, J. Acoust. Soc. Am. 88(5), pp. 2259~2264.

(5) Masayuki Tamura, Jean F. Allard, Denis Lafarge, 1995, “Spatial Fourier-transform method for measuring reflection coefficients at oblique incidence. II: Experimental results”, J. Acoust. Soc. Am. 97(4), pp. 2255~2262.

(6) R. Lanoye, G.. Vemeir, W. Lauriks, 2006, “Measuring the free field acoustic impedance and absorption coefficient of sound absorbing materials with a combined particle velocity-pressure sensor”, J. Acoust. Soc. Am. 119(5), pp. 2826~2831.

(7) Yen-Yu Shih, Jyh-Cheng Chen, Ren-Shyan Liu, 2005, “Development of wavelet de-noising technique for PET images”, Computerized Medical Imaging and Graphics 29, pp. 297~304

(8) Y. Y. Kim, J.-C. Hong, 2001, “Frequency response function estimation via a robust wavelet de-noising method”, Journal of Sound and Vibration 244(4), pp. 635~649.

(9) Yoon Jae Kim, Yeon June Kang, Jung Soo Kim, 2005, “Parameters estimation and performance prediction of acoustical materials”, ICSV12 Proceedings.

(10) Joseph C. Liberti JR, Theodore S. Rappaport, 1999, Smart antennas for wireless communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications, Prentice Hall, Upper Saddle River.

(11) Don H. Johnson, Dan E. Dudgeon, 1993, Array signal processing: concepts and techniques, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.