

자유 음장 조건에서 개선된 빔형성 방법을 이용한 흡음재의 수직 입사 표면 임피던스 측정

Measurement of Normal Incidence Surface Impedance of Absorbing Materials Using the Improved Beamforming Method in a Free Field

신 창 우* · 선 종 천* · 강 연 준† · 백 순 권**

Chang Woo Shin, Jong Choen Sun, Yeon June Kang and Soon Kwon Paik

(2007년 12월 4일 접수 ; 2008년 5월 14일 심사완료)

Key Words : Beamforming(빔형성), Spatial Filter Matrix(공간 필터 행렬), Free Field(자유 음장), Surface Impedance(표면 임피던스)

ABSTRACT

An improved beamforming method is proposed to measure the surface impedance of absorbing materials in a free field. It is possible to estimate the surface impedance by decomposing measured signals into incident and reflected signals by using the spatial filter matrix of the beamforming method. Wavelet de-noising techniques which reduce the white Gaussian noise are applied to improve the results. Phase calibration method is also used to improve the results of the measured surface impedance in a low frequency range. The results of the normal incidence experiments that are performed in a semi-anechoic chamber are verified by comparing with those of the standard test method that is presented in ASTM E1050. The proposed method is found to be reliable to measure the surface impedance for frequencies higher than 400 Hz.

기 호 설 명

- A_i, A_r : 공간 행렬 필터
- g_i, g_r : 공간 전달함수 벡터
- R : 반사 계수
- s : 입력신호 벡터
- Z : 표면 임피던스

1. 서 론

철도, 항공기, 자동차와 같은 운송 수단의 발달과 함께 실내 소음 제어에 대한 관심이 높아지면서, 실내 음장 해석의 중요성이 부각되고 있다. 이러한 이유로 실내 음장 해석을 수행할 때 흡음재질이 포함된 구조물의 내장재에 대한 표면 임피던스를 부품이 결합된 상태에서 정확히 측정하는 것이 매우 중요하다.

내장재를 이루는 음향 재료의 특성에 관한 연구는 다양한 방법으로 이루어져 왔으며, 이들 중에서 대표적인 방법으로 마이크로폰 두 개를 사용하여 측정하는 관내법(impedance tube method)이 있다. 그러나 이 방법은 시편의 크기 및 형상의 제한으로 인하여 실제 내장재를 이루는 재질에 적용하는데 있어서 한계가 있다. 그러므로 좀 더 정확한 실내 음장 해석을 하기 위해서는 내장재의 원형을 그대로 유지한

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

* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

** 현대·기아자동차

채 재료의 표면 임피던스 값을 측정 하는 것이 중요하다. 이를 위해 자유 음장 조건에서 표면 임피던스 측정에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. Tamura^(1,2)는 공간 변환(spatial Fourier transform)을 이용하여 시편의 반사계수를 측정할 수 있는 방법을 제안하였으나, 공간 변환을 하기 위해서는 넓은 범위에 대해서 음압 측정이 이루어 져야 하고 많은 측정 점을 필요로 하는 어려움이 있다. Allard는 마이크로 폰 두 개를 이용하여 측정한 음압으로부터 속도 및 평균 음압을 계산하여 표면 임피던스를 계산할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이후 그의 방법은 다양한 논문들에서 더욱 발전 되었다^(3,4). 최근에는 속도 센서와 마이크로폰을 이용하여 표면 임피던스를 측정하는 장치가 개발되어 그에 따른 연구가 진행되고 있다⁽⁵⁾.

이 연구에서는 주형준, 강연준이⁽⁶⁾ 제시한 빔형성 방법으로 임피던스 튜브 내에서 반사계수를 측정한 것을 개선하여 자유 음장 조건에서 흡음재의 표면 임피던스를 측정하였다. 연구에서 사용한 빔형성 방법은 입사 및 반사신호에 따른 공간 필터 행렬을 구하여 반사계수와 표면 임피던스를 계산하는 방법으로 수행하였다. 계산 시간을 단축시키기 위해서 기존의 방법에서 음압 벡터를 측정하여 계산한 반사계수의 평균을 취하는 방법 대신 평균을 취한 전달함수로 이루어진 벡터를 사용하여 표면 임피던스를 계산하였다. 여기에 웨이블릿 잡음제거 방법⁽⁷⁾ 적용함으로써 결과의 정확성을 향상시켰다. 또한 시편과 마이크로폰의 거리, 마이크로폰 사이의 간격 변화에 따라 실험을 수행하여 실험 구성을 최적화 하였으며, 저주파수 대역의 측정을 위해 위상보정방법을 사용하였다. 실험은 반무향실에서 이루어졌으

며 시편으로는 PET와 Glass Wool 흡음재를 사용 하였다. 수직 입사에 대해 개선된 빔형성 방법으로 구한 표면 임피던스와 ASTM E1050⁽⁸⁾에 따른 관내법으로 측정한 결과를 비교하여 신뢰성을 확인 하였다.

2. 개선된 빔형성 방법

표면 임피던스를 측정하기 위해 제안한 빔형성 방법은 입사 및 반사신호를 분리하여 반사계수와 표면 임피던스를 계산하는 과정을 거쳐 이루어진다.

2.1 음장 모델링 및 잡음 제거

빔형성 방법을 이용하기 위해 시편의 표면에 수직인 방향으로 설치된 마이크로폰 배열에 대한 실험구 성도를 Fig. 1에서 보여준다. x 는 첫 번째 마이크로 폰과 시편 사이의 거리, d 는 마이크로폰 사이 거리를 나타낸다. 각각의 마이크로폰에서 측정한 음압 신호를 주파수 영역에서 입사 및 반사파 신호와 마이크로폰 각각의 거리 차이로 생기는 위상차이 항을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

식 (1)에서 $p_{m-1}(\omega)$ 은 m 번째 마이크로폰에서의 음압, j 는 $\sqrt{-1}$, d 는 마이크로폰 사이 거리, k 는 파수(wave number)를 나타낸다. 또한, s_i, s_r 은 각각 첫번째 마이크로폰에서 받은 입사 및 반사 신호이며, $n_{m-1}(\omega)$ 은 m 번째 마이크로폰에서의 백색 잡음(white Gaussian noise)을 나타낸다. 이 연구에서 실험 장치등에 의한 다른 잡음은 고려하지 않았다.

마이크로폰 어레이에 입사하는 신호가 오직 하나의 스피커로부터 입사하는 입사파와 시편의 표면에서 발생하는 반사파로 구성된다면 이러한 파들로 구성된 음장은 완전 상관음장으로 각 마이크로폰 사이의 전달함수는 항상 일정한 값을 갖게 된다. 그러므로 각 마이크로폰 사이의 전달함수를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

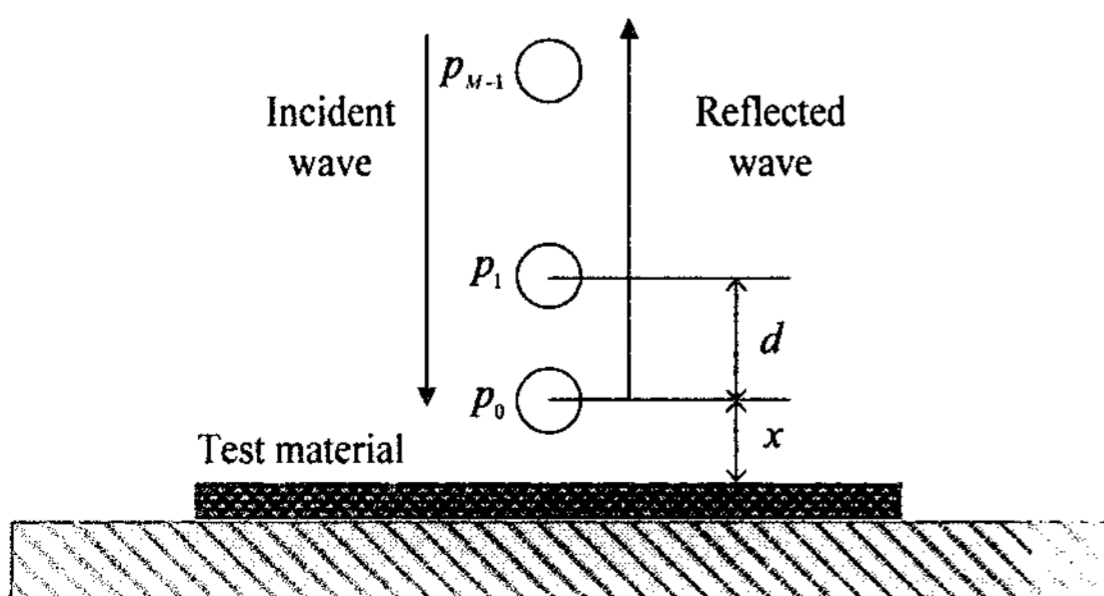


Fig. 1 A schematic diagram of the beamforming method

$$\begin{bmatrix} H_0(\omega) \\ H_1(\omega) \\ \vdots \\ H_{M-1}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ e^{-jkd} & e^{jkd} \\ \vdots & \vdots \\ e^{-jk(M-1)d} & e^{jk(M-1)d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_i/p_0 \\ s_r/p_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_0/p_0 \\ n_1/p_0 \\ \vdots \\ n_{M-1}/p_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)에서 H_{m-1} 은 첫 번째 음압과 m 번째 음압 사이의 전달함수이다.

$$H_{m-1}(\omega) = \frac{p_{m-1}(\omega)}{p_0(\omega)} \quad (3)$$

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

여기에서, \mathbf{p} 는 전달함수 벡터, \mathbf{g}_i 와 \mathbf{g}_r 은 각각 입사파 및 반사파에 대한 방향벡터를 나타내며, \mathbf{s} 는 입력 신호 벡터, \mathbf{n} 은 잡음 벡터를 나타낸다.

일반적으로 자유 음장에서 측정된 음압 벡터에는 임피던스 튜브에 비해 상대적으로 큰 잡음이 포함되어 있으므로 결과의 정확성을 향상시키기 위해서는 이러한 잡음을 효과적으로 줄여주는 것이 중요하다. 기존의 연구⁽⁶⁾에서는 음압을 측정하여 계산한 반사계수의 값을 측정된 횟수만큼 평균하여 반사계수를 구하였으나 이 연구에서는 산술 평균을 취한 전달함수를 사용하여 반사계수 및 표면 임피던스를 계산하여 잡음 제거뿐만 아니라 측정시간을 단축시켰다. 또한 측정된 전달함수에 웨이블릿 잡음제거 방법을 적용하여 잡음을 제거하였다. 웨이블릿 잡음 제거 방법은 측정된 신호에 대해 이산 웨이블릿 변환을 수행하여 웨이블릿 계수를 설정하고, 이러한 계수에 임계치(threshold level)를 적용한다. 이는 설정된 임계치보다 작은 계수는 잡음에 의해 발생한 것으로 간주하며, 임계치보다 큰 계수는 원 신호에 기인하는 원리에 의한 것으로 이 연구에서는 임계치를 5로 설정하였다. 웨이블릿 및 임계치 적용 방법에 관한 내용은 여러 논문⁽⁹⁻¹¹⁾에서 찾아 볼 수 있으므로 이 논문에서는 이에 대한 세부적인 내용은 생략하겠다.

2.2 반사계수 및 표면 임피던스 계산

이 연구에서는 표면 임피던스를 계산하기 위해 다음의 두 가지 조건을 만족하는 공간 필터 행렬 (spatial filter matrix)을 제안하였다.

$$\mathbf{A}_i \mathbf{g}_i = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$\text{Minimize } \|\mathbf{A}_i \mathbf{g}_r - \mathbf{g}_r\| \quad (6)$$

여기에서 \mathbf{A}_i 는 입사신호를 모두 제거하고 반사신호는 거의 투과하는 공간 필터 행렬이다. 입사 공간 전달함수 벡터 \mathbf{g}_i 와의 곱은 영(zero)벡터가 되며, 반사 공간 전달함수 벡터와의 곱과 반사 공간 전달함수 벡터의 차를 최소화 시키는 공간 필터 행렬 \mathbf{A}_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

먼저 반사신호에 대한 공간 전달함수 벡터 \mathbf{g}_i 로 이루어진 행렬 $\mathbf{g}_i \mathbf{g}_i^H$ 의 j 번째 고유벡터를 \mathbf{e}_j 라 하면, \mathbf{e}_j 의 두 번째부터 m 번째까지의 행렬을 \mathbf{Q} 라고 정의한다. 윗첨자 H 는 에르미트 전치(Hermitian transpose)를 나타낸다.

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{e}_2 \ \mathbf{e}_3 \ \cdots \ \mathbf{e}_M] \quad (7)$$

식(7)의 행렬 \mathbf{Q} 는 $\mathbf{g}_i \mathbf{g}_i^H$ 의 0의 고유치에 대응하는 고유벡터로 구성된 행렬이므로 \mathbf{g}_i 와는 직교성을 갖게 된다. 공간 필터 행렬 \mathbf{A}_i 를 행렬 \mathbf{Q} 와 부가행렬 \mathbf{W} 의 곱으로 정의하면

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{W} \mathbf{Q}^H, \quad (8)$$

여기에서, 부가행렬 \mathbf{W} 는 $m \times (m-1)$ 행렬이며, 다음과 같이 첫 번째 조건인 식(5)를 만족하게 된다.

$$\mathbf{W} \mathbf{Q}^H \mathbf{g}_i = \mathbf{0} \quad (9)$$

두 번째 조건을 만족하는 공간 필터 행렬을 구하기 위해 식(9)를 식(6)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \|\mathbf{W} \mathbf{Q}^H \mathbf{g}_r - \mathbf{g}_r\| \\ & = \text{Minimize } \|\mathbf{W} \hat{\mathbf{g}}_r - \mathbf{g}_r\| \end{aligned} \quad (10)$$

여기에서 $\hat{\mathbf{g}}_r = \mathbf{Q}^H \mathbf{g}_r$ 이다. 식(10)을 최소자승법 (least square)으로 계산하여 의사역행렬(pseudo inverse)을 취하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{W} = \mathbf{g}_r \hat{\mathbf{g}}_r^H (\hat{\mathbf{g}}_r \hat{\mathbf{g}}_r^H)^+ \quad (11)$$

따라서 식 (8)과 식 (11)로부터 공간 필터 행렬 A_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_i = \hat{g}_r \hat{g}_r^H (\hat{g}_i \hat{g}_i^H)^+ Q^H \quad (12)$$

식 (12)의 공간 필터 행렬 A_i 와 식 (4)의 음압 전달함수 벡터와의 곱을 취하면, 다음과 같다.

$$A_i \mathbf{p} = A_i [\hat{g}_i \hat{g}_r] \begin{bmatrix} s_i \\ s_r \end{bmatrix} = A_i \hat{g}_r s_r \quad (13)$$

식 (13)에서 공간 필터 행렬 A_i 는 입사신호에 대한 공간 전달함수 \hat{g}_i 와의 곱은 영이 되므로 입사신호 s_i 항은 사라지고, 반사신호 s_r 항만 남는다. 따라서 공간 필터 행렬 A_i 와 음압 전달함수 벡터 \mathbf{p} 의 곱은 A_i 와 \hat{g}_r 의 곱에 반사신호 s_r 을 곱한 결과와 같다. 식 (13)의 우항에서 반사신호를 제외한 나머지 항의 의사역행렬을 취하여 반사신호를 계산할 수 있다. 입사신호를 계산하는 과정도 반사신호를 계산하는 과정과 동일하다. 식 (5)에서 식 (13)의 과정을 반복하여 반사신호는 모두 제거하고 입사신호를 거의 투과하는 공간 필터 행렬 A_i 를 구할 수 있다. 반복되는 과정으로 의사역행렬을 이용하면 입사신호를 알아낼 수 있다. 이러한 과정을 통해 알아낸 입사신호와 반사신호의 비로 반사계수를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R = \frac{s_r}{s_i} e^{-jk2x \cos \theta} \quad (14)$$

식 (14)에서 지수 함수로 표현된 위상 보정 항은 시편과 마이크로폰의 거리 차이 때문에 발생하는 위상 차이를 보정해주는 인자로서 x 는 시편과 첫 번째 마이크로폰 사이의 거리를 나타낸다. 이와 같은 과정을 거쳐 반사계수를 구함으로써 시편의 표면 임피던스 Z 를 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$Z = \frac{1+R}{1-R} \quad (15)$$

3. 수직입사 표면임피던스 측정

표면 임피던스를 측정하기 위해 사용한 시편은

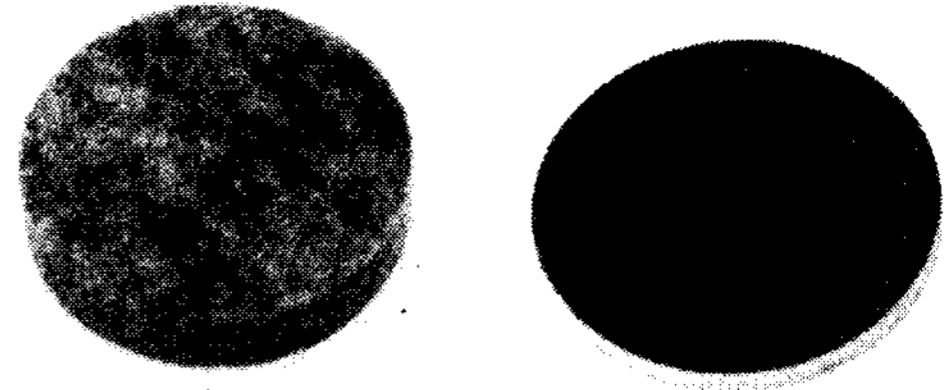


Fig. 2 Picture of sample(PET, glass wool)

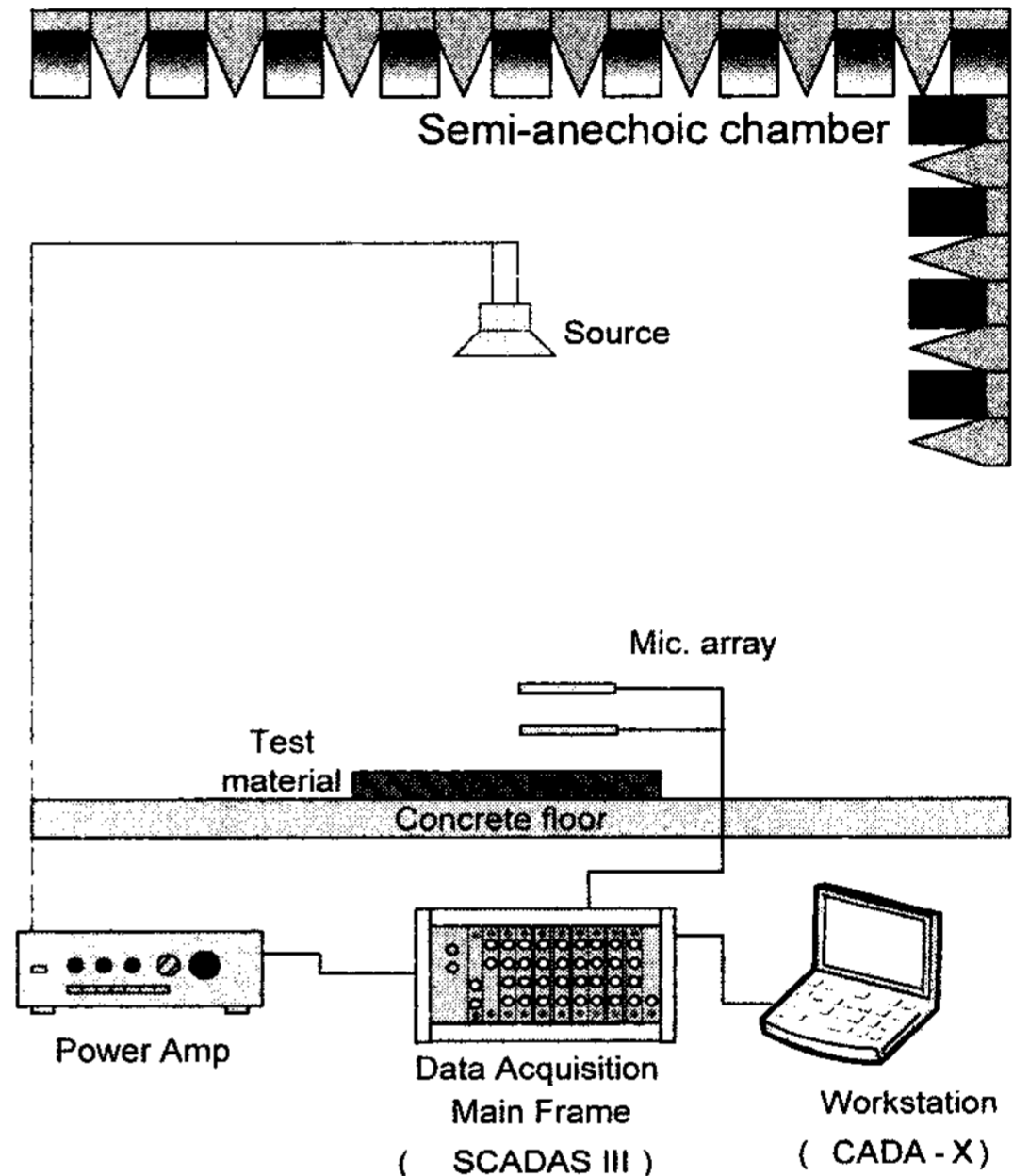


Fig. 3 Experimental setup in a semi-anechoic chamber

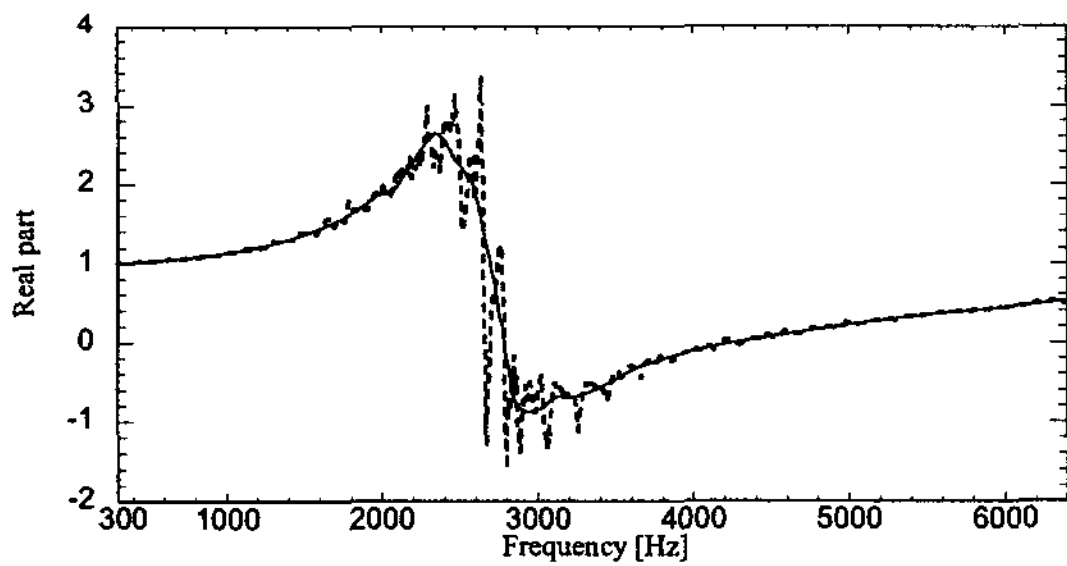
차량용 내장재로 사용되는 PET시편과 glass wool 시편을 사용하였다. PET시편의 두께는 20 mm이며 glass wool시편의 두께는 10 mm로, 크기는 1 m×1 m를 사용하였다. 반무향실에서 수직입사 표면 임피던스 측정을 위한 실험 구성은 Fig. 3과 같다. 반무향실의 콘크리트 바닥에 시편을 놓고, 지상으로부터 약 2m 높이에 스피커를 설치하여 음압을 발생시켰다. 스피커는 랜덤 신호로 가진하였으며 수직 방향으로 마이크로폰에 입사되도록 설치하였다. 실험 구성시 음원은 점음원으로 가정하였고, 수직 입사의 경우 시편의 전면적에서 표면 임피던스는 일정하다고 가정하였다. 마이크로폰 배열은 B&K type 4942 1/2인치 마이크로폰2개를 시편의 표면에서 수직인 방향으로 설치하였으며, 데이터 수집 장치는 LMS SCADAS III를 사용하였다. 측정은 8 Hz 간격으로

이루어졌으며, 평균 횡수는 2000번이다.

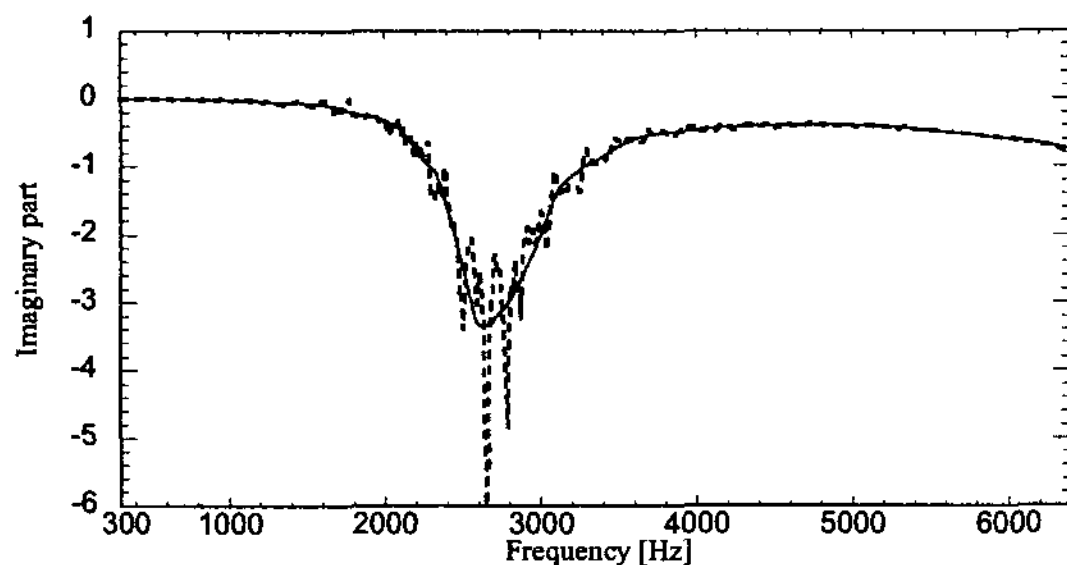
우선 측정된 전달함수를 산술 평균한 결과를 웨이블릿 잡음제거 기술을 적용하기 전과 적용한 후를 비교하였다. Fig. 4는 실험으로 측정된 전달함수의 실수부와 허수부를 잡음제거를 하지 않은 전달함수와 비교한 그래프로, 웨이블릿 잡음제거 방법을 적용하였을 때 안정된 데이터를 얻는 것을 볼 수 있다.

시편에서부터 첫 번째 마이크로폰까지의 거리와 각 마이크로폰 사이 간격변화가 측정의 정확성에 미치는 영향을 확인하였다. 또한 제안한 방법으로 구한 표면 임피던스 결과의 정확성을 검증하기 위하여 동일한 재질에 대해 ASTM E1050⁽⁹⁾에서 제시한 두 개의 마이크로폰을 이용한 관내법을 사용하였다. 측정용 튜브는 B&K type 4206 임피던스 튜브를 사용하였다.

먼저, 첫 번째 마이크로폰과 시편과의 거리 변화에 따른 적정 위치를 찾기 위해 1/2인치 마이크로폰의 중심과 시편의 최소거리인 6 mm 간격부터 10 mm씩 변화를 주면서 측정하였다. 이때 마이크로폰 사이 간격은 13 mm로 유지하였다. 시편과 첫 번째 마이크로폰의 간격이 멀어질수록 관내법으로 측정된



(a) Real part



(b) Imaginary part

Fig. 4 Comparison of the transfer function with (—) and without (---) wavelet de-noising for PET sample

결과와 차이가 나는 것을 Fig. 5에서와 같이 확인할 수 있다. 다음으로 마이크로폰 사이 간격의 적정 위치를 확인하기 위해 마이크로폰 간격의 최소 거리인 13 mm에서 5 mm씩 간격의 변화를 주면서 측정하였다. 즉, 마이크로폰 간격을 13, 18, 23 mm로 변화를 주었고, 시편과 첫 번째 마이크로폰 간격은 Fig. 5의 결과에서 가장 정확한 결과를 보인 6 mm 간격으로 하였다. 마이크로폰 사이의 간격이 멀어질수록 관내법으로 측정된 결과와 차이가 나는 것을

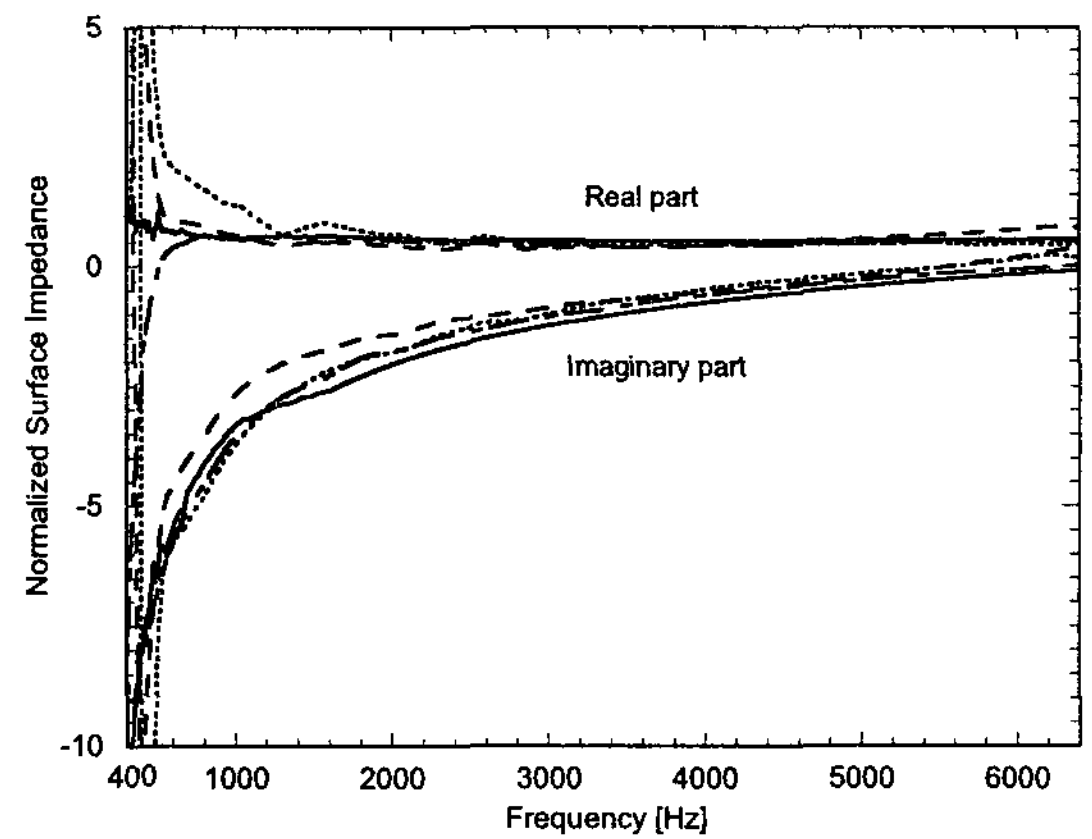


Fig. 5 Comparison of the surface impedance due to a change of distance between the sample and first microphone for PET sample.

—, Impedance tube; —, 6 mm; - · -, 16 mm; · · ·, 26 mm

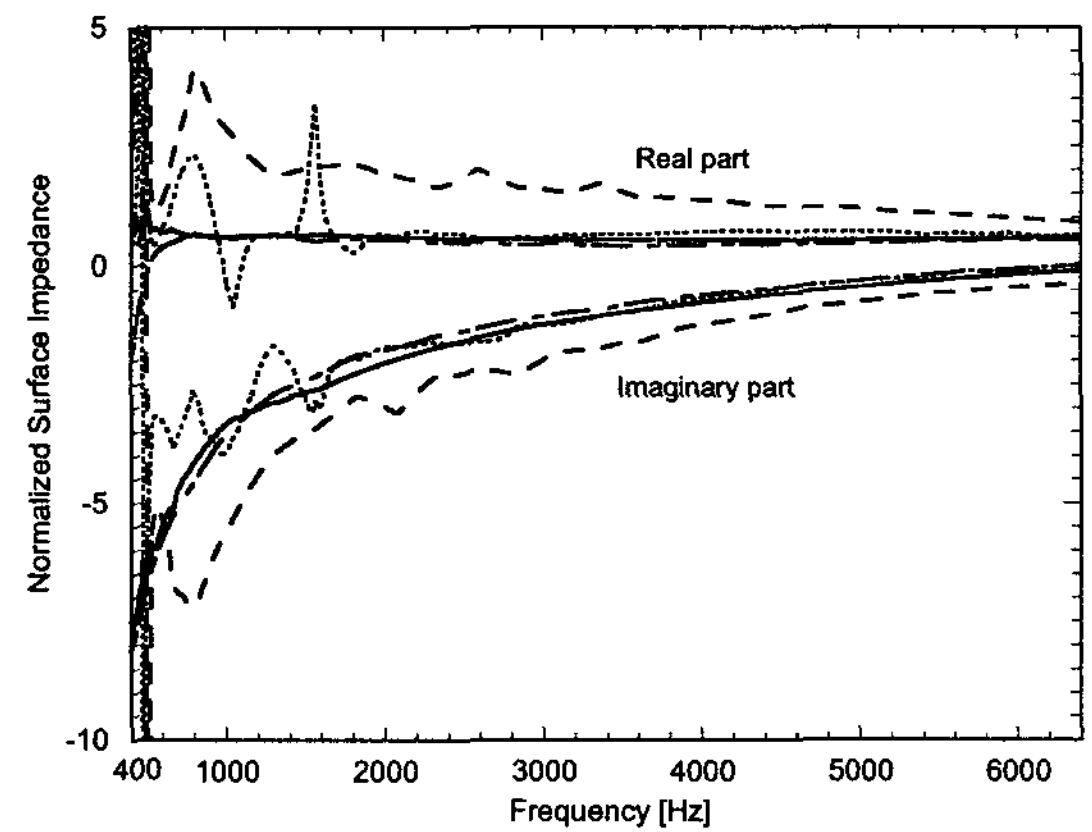


Fig. 6 Comparison of the surface impedance due to a change of distance between two microphones for PET sample.

—, Impedance tube; —, 13 mm; · · ·, 18 mm; - · -, 23 mm.

Fig. 6에서 확인할 수 있다. 이처럼 Fig. 5와 Fig. 6의 결과에서 첫 번째 마이크로폰과 시편의 거리는 6 mm, 마이크로폰 사이 간격은 13 mm일 때 관내법으로 측정한 결과와 가장 잘 일치하였다. 따라서 측정 시 시편에서부터 첫 번째 마이크로폰까지의 거리는 6 mm, 각 마이크로폰 사이의 거리는 13 mm를 유지하였으며, 측정 최대 주파수인 6400 Hz의 파장을 고려하였을 때 마이크로폰 사이 간격은 적합하였다. 특히, 시편과 매우 가까운 거리에 마이크로폰을 설치해야 하는 이유는 시편에서 마이크로폰의 거리가 멀어지면 시편의 유한한 크기로 인해 시편 모서리에서의 음압이 마이크로폰에 영향을 끼치기 때문이다⁽³⁾.

저주파수 대역에서 마이크로폰 사이의 상대적인 위상 오차는 결과값에 큰 영향을 미친다. 이는 Fig. 5~6에서 700 Hz 이하의 주파수 대역에서 정확성이 크게 저하되는 것으로부터 확인할 수 있다. 자유 음장 조건에서 이루어진 대부분의 실험은 측정된 음압 값의 정확성에 매우 민감하게 작용하므로 상대적인 위상 보정이 필요하다. 이 연구에서는 저주파수 대역의 위상 보정을 위해 Allard의 논문에서 제시한 위상 보정 방법을 사용하였다⁽⁴⁾. 이 방법은 단단한 면의 동일한 축에 마이크로폰을 두고 랜덤 신호로 가진 시켰을 때 측정한 전달함수로 실제 실험에서 측정한 전달함수를 나누어주는 방법이다. 위상 보정을 위한 실험 구성도는 Fig. 7과 같다. 위상 보정을 거쳐 얻어진 전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

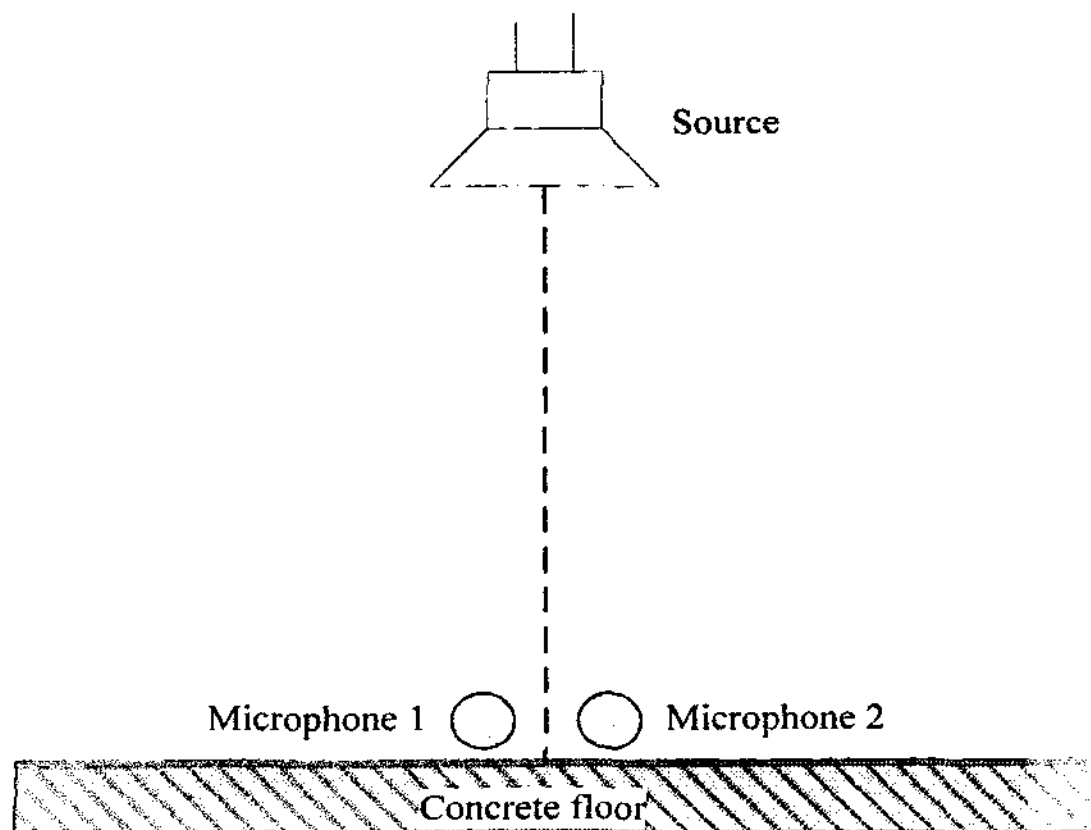


Fig. 7 A schematic diagram of the microphone phase calibration method

$$H(\omega) = H_m^{mea}(\omega) / H_m^{cal}(\omega) \quad (16)$$

식(16)에서 $H_m^{mea}(\omega)$ 는 실제 실험에서 측정한 첫 번째와 M 번째 음압 사이의 전달함수이며 $H_m^{cal}(\omega)$ 은 위상보정을 위해 측정한 전달함수이다. $H_m^{cal}(\omega)$ 의 크기는 1과 같으며 위상은 250 Hz 이상의 주파수 대역에서 0.3도 이내임을 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 600 Hz 이상의 주파수 대역에서 두 마이크로폰의 위상차가 나지 않는 것을 Fig. 8에서 볼 수 있다. 따라서 위상보정 구간을 0~800 Hz 주파수 대역까지 수행하였다.

PET시편에 대하여 실험에서 측정한 전달함수의 잡음제거를 사용하여 계산한 표면 임피던스 결과를 관내법으로 측정한 결과와 비교한 그래프는 Fig. 9(a)와 같다. 또한 glass wool 시편에 대해 적용한 결과도 Fig. 9(b)와 같이 나타내었다.

실험 결과에서 볼 수 있듯이 400 Hz 이상에서 위상 보정을 거쳐 빔형성 방법으로 측정한 결과와 관내법을 이용하여 측정한 결과가 잘 일치하였다. 따라서 400 Hz 이상의 주파수 대역에서 개선된 빔형성 방법으로 자유 음장 조건에서 표면 임피던스 측정이 가능하다.

400 Hz 이하의 주파수 대역에서 정확한 표면 임

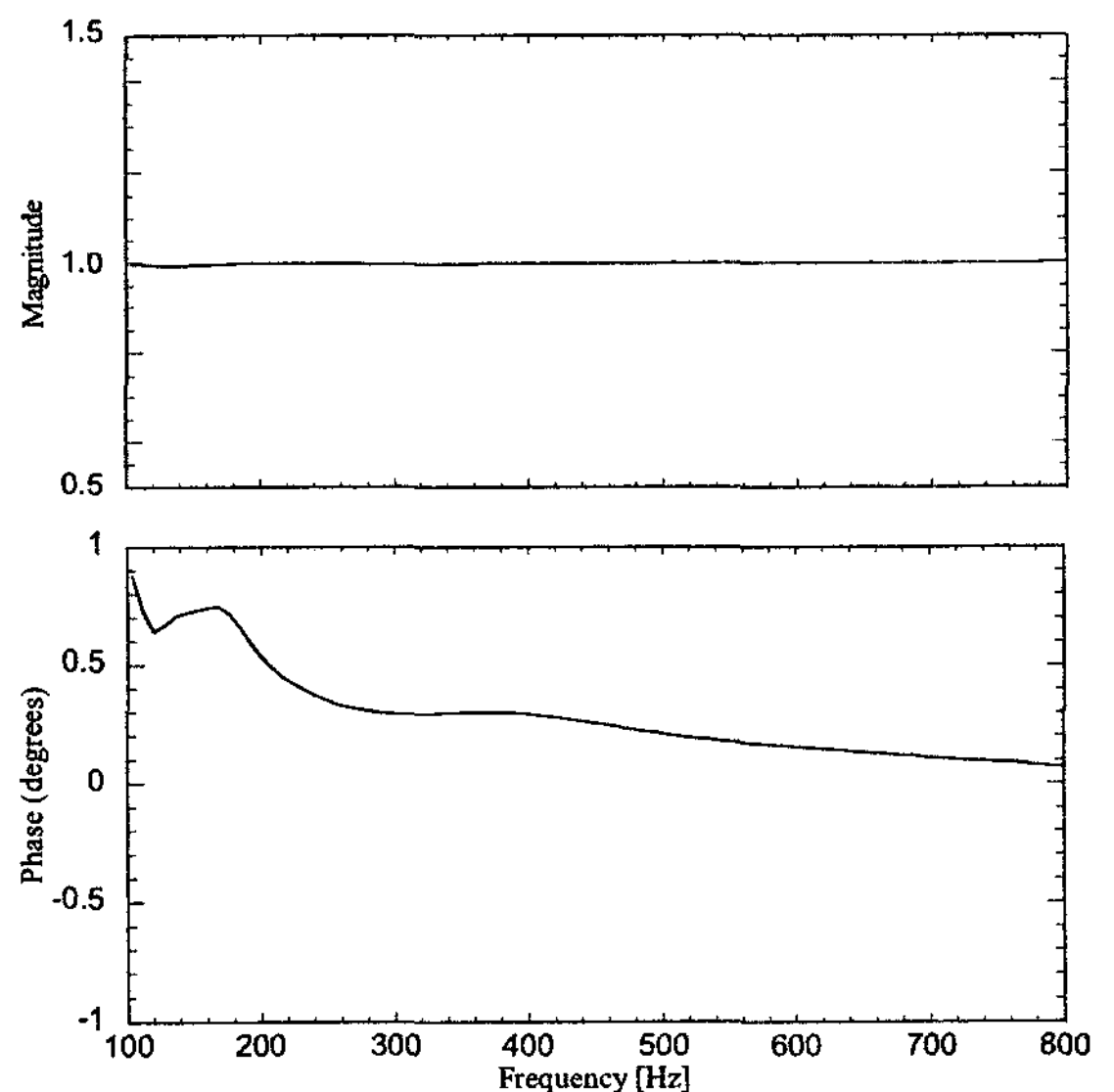


Fig. 8 Amplitude and phase of transfer function H_m^{cal}

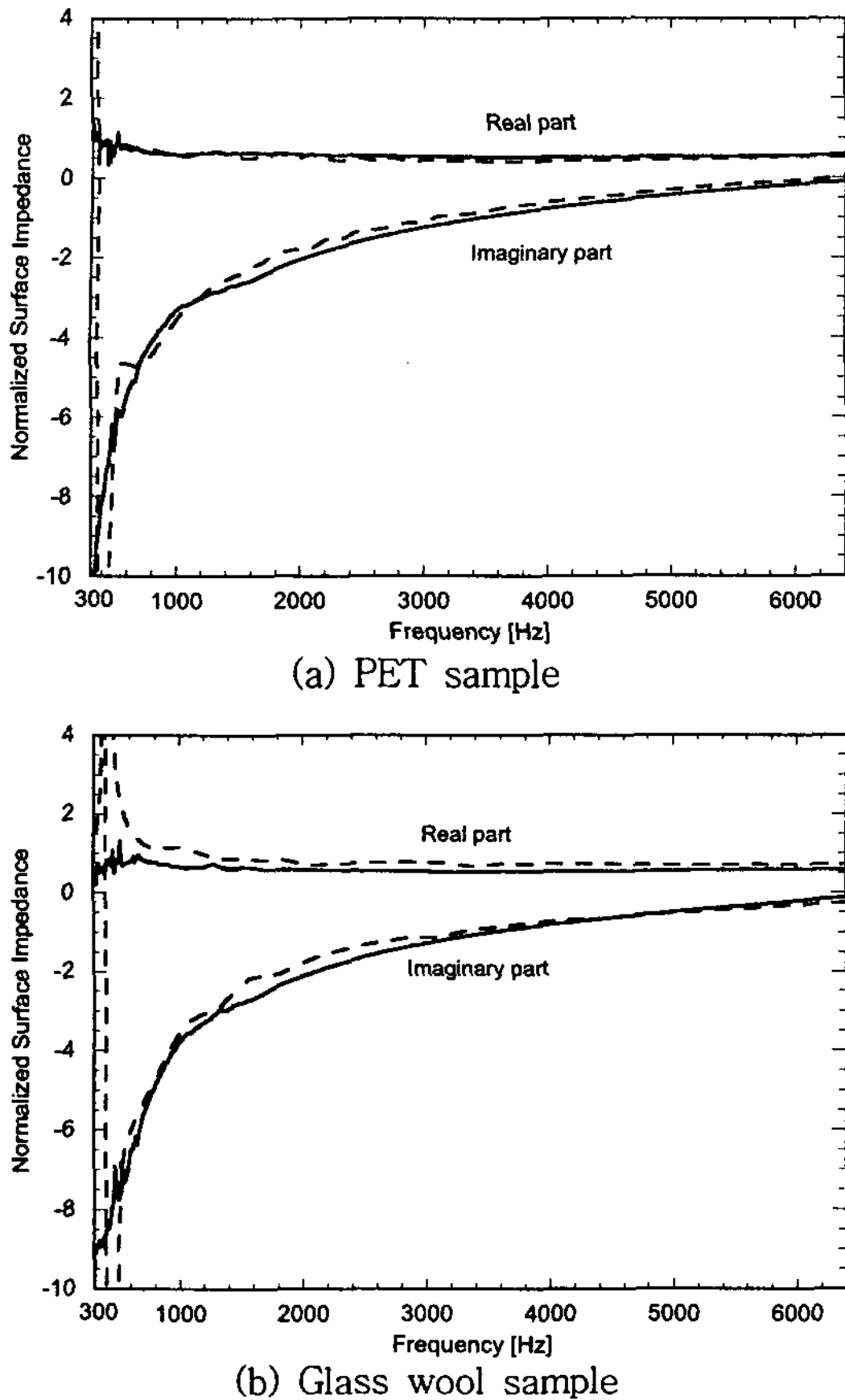


Fig. 9 Comparison of the surface impedance using the improved beamforming method (---) and the two-microphone impedance tube method (—)

피턴스를 측정하기 위해 시편의 표면과 가까운 근접장에 위치한 마이크로폰에 들어오는 감쇠파의 영향과 시편의 크기에 따른 연구가 수행된다면 저주파수 대역에서 정확한 표면 임피던스 측정이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결 론

이 연구에서는 자유 음장 조건에서 빔형성 방법을 사용하여 수직입사에 대한 시편의 표면 임피던스 측정 가능성을 확인하였다. 실험의 최적화를 위해 마이크로폰의 간격과 시편과의 거리 변화에 따른 연구도 수반되었다. 제안한 방법의 신뢰성 검증을 위해 ASTM E1050에 따른 관내법을 이용하였으며, 400 Hz 이상의 주파수 대역에서 측정한 PET시편의 표면

임피던스의 결과가 관내법을 이용하여 측정한 결과와 일치하는 것을 확인하였다.

후 기

이 연구는 서울대학교 정밀기계 연구소와 (주)현대자동차의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Tamura, M., 1985, "Spatial Fourier Transform Method of Measuring Reflection Coefficients at Oblique Incidence. I: Theory and Numerical Examples", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88, No. 5, pp. 2259~2264.
- (2) Tamura, M., Allard, J. F. and Lafarge, D., 1995, "Spatial Fourier-transform Method for Measuring Reflection Coefficients at Oblique Incidence. II: Experimental Results", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97, No. 4, pp. 2255~2262.
- (3) Allard, J. F. and Sieben, B., 1985, "Measurements of Acoustic Impedance in a Free Field with Two Microphones and a Spectrum Analyzer", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 77, No. 4, pp. 1617~1618.
- (4) Champoux, Y., Nicolas, J. and Allard, J. F., 1988, "Measurement of Acoustic Impedance in a Free Field at Low Frequencies", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 125, No. 2, pp. 313~323.
- (5) Van der Eerden, F. J. M., Bree, H.-E., Tjiedeman, H., 1998, "Experiments with a New Acoustic Particle Velocity Sensor in an Impedance Tube", *Sensors and Actuators*, Vol. A69, pp. 126~133.
- (6) Ju, H. J., Kang, Y. J., 2003, "Measurement of Oblique Incidence Reflection Coefficient Using Beamforming Method", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 13, No.6, pp. 438~444.
- (7) Donoho, D. L., 1994, "Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage", *Biometrika*, Vol. 81, pp. 425~455.

(8) ASTM E1050-98, 1998, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System", ASTM International.

(9) Donoho, D. L., 1995, "Nonlinear Solution of Linear Inverse Problems by Wavelet-Vaguelette Decomposition", Applied and Computational Harmonic Analysis, Vol. 2, pp. 101~126.

(10) Kim, Y. Y. and Hong, J.-C., 2001, "Frequency Response Function Estimation Via a Robust Wavelet De-noising Method", Journal of Sound and Vibration, Vol. 244, No. 4, pp. 635~649.

(11) Bakhtazad, A., Palazoglu, A., Romagnoli, J., 2000, "Process Trend Analysis Using Wavelet-based De-noising", Control Engineering Practice 8, pp. 657~663.