한국소음진동공학회지 제 7 권 제 4 호, pp. 589~596, 1997.

〈논 문〉

평판 인텐시티 측정을 통한 근접장 음향 인텐시티와 손실 계수 측정법

Measurement of Near Field Sound Intensity and Loss Factor Using Plate Intensity Measurement

김 용 조* · 김 양 한**
Yong-Joe Kim and Yang-Hann Kim

(1996년 11월 8일 접수 ; 1997년 3월 31일 심사완료)

Key Words : Sound Intensity(음향 인텐시티), Structural Intensity(구조 인텐시티), Loss Factor(손실 계수), Strain Gauge Bridge, SGB(스트레인 게이지 브리지)

ABSTRACT

A energy equation for a thin plate and surrounding fluid is derived. The equation essentially determines the relation between internal loss of thin plate, energy of acoustic radiation, and structure intensity. We attempted to use this relation to measure internal loss of thin plate. The significance of this approach is that internal loss at any point of a thin plate can be measured. The quality of this measure is dictated by the accuracy of associated measurement systems such as structure and acoustic intensity measurements. A strain gauge bridge system has been developed to measure structure intensity of thin plate. Its performance is tested by experiments.

1. 서 론

음향계의 에너지 흐름인 음향 인텐시티의 물리적인 의미와 응용에 대하여 많은 연구가 비교적 체계적으로 진행되어온 것은 잘 알려진 사실이다[1]. 진동계의 에너지 흐름인 구조 인텐시티에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 특히 이론적인 해석이 간단하고 많은 응용 예를 가지는 얇은 평판의 경우에 대하여 D. U. Noiseux와 G. Pavic은 구조 인텐시티를 수식적으로 정립하였으며 그 측정 방법을 제시한 바 있다[2,3]. 또한 J. C. Pascal은 제어 체적을 빠져나가는 평판의 단위 면적 당 시간 평균 파워인 구조 인텐시티의 발산(divergence of structural intensity)에 대한 표현식을 유도하였다[4]. E. G. Williams는 유체 부하가 있는 얇은 실린더에서 음향 인텐시티와 구조 인텐시티의 관계를 설명하였으나 이는 내부 손실을 무시할 수 있는 경우로 제한된다[5]. 스트레인 게이지를 이용하여 얇은 평판이나 보의 표면에서 측정된 스트레인은 진동 변위의 공간상의 이차 미분된 물리량이다. 그러므로 변위의 공간상의 고차 미분을 포함하는 물리량을 적은 수의 게이지 배열을 이용하여 측정할 수 있다. G. Pavic은 외력이 없는 지점에서 유체 부하와 구조 감쇠를 무시할 수 있는 경우, 스트레인 게이지의 이러한 특성과 브리지 회로를 이용하여 평판의 가속도를 측정하였다[6].

본 논문에서는 음향 인텐시티, 구조 인텐시티, 그리고 손실 계수로 모델링 된 내부 손실의 관계를 설명하는 평판의 에너지 방정식을 유도하고, 그 응용

*한국과학기술원 기계공학과 소음진동제어연구센터
**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

예로서 평판의 근접장 음향 인텐시티와 손실 계수의 측정 방법을 제안한다. 측정장치에 포함된 스트레인 게이지 브리지의 측정 오차를 해석하기 위해 1차원 평판에 대한 수치 해석적 모의 실험을 수행한다. 그리고 랜덤 오차를 해석하기 위해 외부 잡음을 포함하는 측정 시스템의 모델을 이용한다. 얇은 평판에서 제안된 근접장 음향 인텐시티 측정 방법을 이용하여 측정된 인텐시티 값과 기존의 표면 인텐시티 방법(surface intensity method)을 이용한 측정값을 비교한다. 또한 진동 및 음향 감쇠 패드를 붙힌 얇은 강철판에서 제안된 방법으로 측정된 손실 계수를 보여준다.

제안된 평판의 근접장 음향 인텐시티 측정 방법은 구조 인텐시티와 내부 손실을 측정하기 위해 스트레인 게이지 브리지와 진동 속도 탐촉자를 이용한다. 진동체의 근접장 인텐시티를 측정하기 위해 많이 사용되는 방법인 표면 인텐시티 방법은 진동체 표면에서 진동 속도 탐촉자로부터 얻어진 속도와 음압 탐촉자로부터 얻어진 음압으로부터 인텐시티를 측정한다. 음압 측정에는 주로 마이크로폰이 사용되는데 근접장에서 발생하는 감쇠파나 회절 등으로 인하여 정확한 음압측정이 어렵고 음향계의 유체가 평균 유동을 가지거나 여러 가지 다른 이유들로 인하여 마이크로폰으로 측정이 불가능한 경우도 발생한다. 진동체의 진동 속도를 측정한 후 헬름홀쯔(Helmholtz) 적분방정식을 이용하여 음장을 해석하는 방법은 진동체 전체의 진동 속도를 필요로 하며 음장계의 기하학적 형상과 경계 조건에 따른 그린 함수(Green's function)를 필요로 한다. 제안된 방법은 음압과 그린 함수를 사용하지 않으므로 음장계의 기하학적 형상, 경계조건, 그리고 유동 조건에 상관없이 음향 인텐시티를 측정할 수 있다.

제안된 손실 계수 측정 방법은 스트레인 게이지 브리지, 진동 속도 탐촉자, 그리고 음압 탐촉자를 이용한다. 기존의 평판 손실 계수 측정은 음향 방사에 의한 에너지 손실을 고려할 수 없고 진동체 지지 경계 조건에 따른 오차가 발생한다. 그러므로 정확한 손실 계수 측정을 위해 진공 중에서 측정을 수행하여야 하고 이상적인 지지 경계 조건을 만족시키는 경계 조건을 구현하여야 한다. 제안된 방법은 음압 탐촉자와 진동 속도 탐촉자를 이용하여 음향 방사에 의한 에너지 손실을 고려 할 수 있으므로 공기 중에서 손실 계수 측정이 가능하며 측정하고자 하는 위치에서 에너지 평형을 고려하므로 경계 조건과 무관한 측정을 수행할 수 있다.

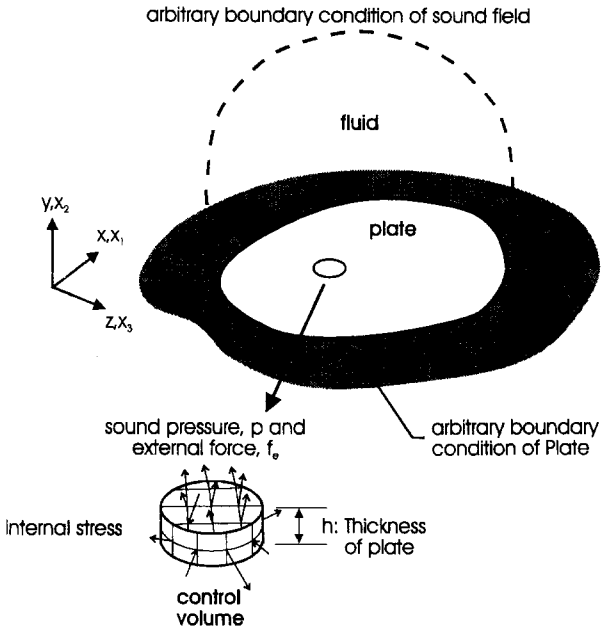

Fig. 1 A fluid-loaded plate.

2. 기본 이론 : 평판의 에너지 방정식

Fig. 1은 임의의 음장 경계 조건과 임의의 지지 경계 조건을 가지며 유체로 둘러싸여 있는 평판을 나타낸다. 열역학 제1법칙으로부터 평판상의 임의의 제어 체적에 대한 에너지 평형은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt}\int_V (e'_\kappa + e'_p + e'_d)\, dV = \int_A \tau_{ij} v_j n_i dA. \qquad (1)$$

여기서, 좌변의 e'_κ, e'_p, e'_d는 각각 단위 부피 당 운동에너지, 위치 에너지, 내부 손실 에너지를 나타내고 d/dt는 시간에 대한 전미분(material derivative)을 나타낸다. 우변의 τ_{ij}는 i면에 작용하는 j방향 응력, v_j는 j방향의 속도, 그리고 n_i는 제어 체적 표면의 바깥쪽 단위 수직 벡터 의 방향 성분을 나타내며, 같은 첨자가 두 번 반복되면 그 첨자에 대하여 1부터 3까지 반복하여 합하는 것을 의미한다. 식 (1)의 좌변은 대류항(convective term)을 무시하였을 때, 레이놀즈의 변환 정리(Reynolds transport theorem)에 의하여 시간에 대한 편미분만을 포함하는 체적적분으로 변환되고, 평판의 두께를 h에 대하여 적분을 수행하면 임임의 평판 표면적에 대한 적분식이 된다. 식 (1) 우변의 τ_{ij}는 제어 체적의 유체 경계면에서 음압 $-p$와 외력 f_e, 측면에서 내부 응

력인 σ_{ij}로 나타난다. 내부 응력에 의한 항은 가우스의 정리(Gauss's theorem)를 이용하여 체적 적분으로 변환되고, 두께 방향에 대하여 적분을 수행하면 임의의 평판 표면적에 대한 적분식으로 표현된다. 그러므로 식 (1)이 임의의 평판 표면적에 대한 적분식으로 표현되고, 이로부터 다음과 같은 에너지 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(e_\kappa+e_p+e_d)=-\nabla\cdot\vec{P}-pv+f_ev. \tag{2}$$

여기서, 좌변의 e_κ, e_p, e_d는 각각 평판의 단위 표면적 당 운동에너지, 위치 에너지, 내부 손실 에너지를 나타낸다. 우변의 $v=v_2=\partial u/\partial t$, u는 진동 변위, $\nabla=\partial/\partial x_1\vec{e}_1+\partial/\partial x_3\vec{e}$, 그리고 평판 표면의 단위 길이 당 에너지 흐름은 $p_i=-\int_{-h/2}^{h/2}\sigma_{ij}v_jdx_2$로 정의되는 구조 인텐시티이며 음의 부호는 제어 체적을 빠져나가는 파워를 양의 인텐시티로 정의함을 의미한다.

베르누이-오일러 평판(Bernoulli-Euler plate)의 경우, 순간 구조 인텐시티(instantaneous structural intensity)는 다음과 같이 표현된다[2,3].

$$P_1=-D\left[\left(\frac{\partial^2u}{\partial x_1^2}+v\frac{\partial^2u}{\partial x_3^2}\right)\frac{\partial^2u}{\partial x_1\partial t}+(1-v)\times\frac{\partial^2u}{\partial x_1\partial x_3}\frac{\partial^2u}{\partial x_3\partial t}-\frac{\partial}{\partial x_1}\left(\frac{\partial^2u}{\partial x_1^2}+\frac{\partial^2u}{\partial x_3^2}\right)\frac{\partial u}{\partial t}\right]. \tag{3-1}$$

$$P=-D\left[\left(\frac{\partial^2u}{\partial x_3^2}+v\frac{\partial^2u}{\partial x_1^2}\right)\frac{\partial^2u}{\partial x_3\partial t}+(1-v)\times\frac{\partial^2u}{\partial x_1\partial x_3}\frac{\partial^2u}{\partial x_1\partial t}-\frac{\partial}{\partial x_3}\left(\frac{\partial^2u}{\partial x_1^2}+\frac{\partial^2u}{\partial x_3^2}\right)\frac{\partial u}{\partial t}\right]. \tag{3-2}$$

여기서, v는 포아송의 비(Poisson's ratio)이고 D는 굽힘 강성 계수이다. 구조 인텐시티의 각각 항들은 굽힘력, 비틂력, 그리고 전단력에 의한 에너지 흐름을 나타낸다. 손실 계수(η)로 내부 손실을 모델링한다면, 에너지 방정식 (2)에 운동 에너지, 위치 에너지, 그리고 식 (3)의 구조 인텐시티를 대입하고 u, p, f_2, D대신에 각각 $\bar{u}e^{i\omega t}$, $\bar{p}e^{i\omega t}$, $\bar{f}e^{i\omega t}$, $D(1-i\eta)$를 대입한 후, 시간에 대하여 평균을 취하면 다음과 같은 주파수 영역의 에너지 방정식을 얻는다.

$$\frac{D\eta}{2}\mathrm{Im}[(\nabla^2\nabla^2\bar{u})\,\bar{v}^*]=-\frac{D}{2}\mathrm{Re}[(\nabla^2\nabla^2\bar{u})\,\bar{v}^*]-\frac{1}{2}\mathrm{Re}[\bar{p}\,\bar{v}^*]+\frac{1}{2}\mathrm{Re}[\bar{f}_e\bar{v}^*] \tag{4}$$

여기서, $\bar{v}^*$는 $\bar{v}$의 공액복소수이다. 좌변은 손실 계수로 모델링 된 내부 손실이고 우변의 각각의 항들은 구조 인텐시티의 발산, 근접장 음향 인텐시티, 그리고 외력에 의한 시간 평균 파워를 나타낸다.

랜덤 진동(random vibration)의 경우, 외력이 없는 지점에서 식 (4)에 앙상블 평균(ensemble average)을 취하고 근접장 음향 인텐시티에 대한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{2}\mathrm{Re}[S_{vp}]=-\frac{D}{2}\mathrm{Re}[S_{v\xi}]-\frac{D\eta}{2}\mathrm{Im}[S_{v\xi}] \tag{5}$$

여기서, $\xi=\nabla상D\nabla^2u$이고 S_{ij}는 신호 i와 j의 상호 스펙트럼(cross-spectrum)이다. 유사하게 식 (4)로부터 손실 계수의 표현식을 얻을 수 있다.

$$\eta=-\frac{\mathrm{Re}[S_{v\xi}]}{\mathrm{Im}[S_{v\xi}]}-\frac{\mathrm{Re}[S_{vp}]}{D\mathrm{Im}[S_{v\xi}]} \tag{6}$$

식 (5)의 내부 손실 항이 미치는 영향을 평가하기 위하여 다음과 같은 지수를 정의한다.

$$\lambda_1=\left|\frac{\mathrm{Im}[S_{v\xi}]}{\mathrm{Re}[S_{v\xi}]}\right| \tag{7}$$

이는 평판 표면에서 측정 가능한 물리량으로 근사적으로 음향 방사 파워에 대한 내부 손실 파워의 크기를 손실 계수로 나눈 값이다. 이 예측되는 손실 계수의 역수에 비하여 매우 작을 때는 음향 방사 파워에 비하여 내부 손실 파워가 매우 작게 되어 식 (5)의 우변의 마지막 항을 무시할 수 있게 된다. 식 (6)의 음향 인텐시티와 관계된 우변 마지막 항의 영향을 평가하기 위해 다음과 같은 지수를 정의한다.

$$\lambda_2=\left|\frac{D\mathrm{Im}[S_{v\xi}]}{\mathrm{Re}[S_{vp}]}\right| \tag{8}$$

이 지수가 예측되는 손실 계수의 역수에 비하여 매우 큰 경우에는 식 (6)의 우변 마지막 항을 무시하여도 비교적 정확한 손실 계수를 측정할 수 있게 된다.

3. 스트레인 게이지 브리지를 이용한 측정 방법

2절에서 유도한 식들은 진동 변위의 공간상의 4차 미분을 포함하여 비교적 측정이 어려운 물리량인 $\xi=\nabla^2\nabla^2u$를 포함한다. 그러나 얇은 평판 표면상의 스트레인이 진동 변위의 이차 미분으로 표현되므로 스트레인 게이지를 이용하면 ξ를 비교적 적은 수의 스트레인 게이지로 측정할 수 있다. 또한 스트레인 게이지 브리지를 이용하면 에 비례하는 하나의 출력

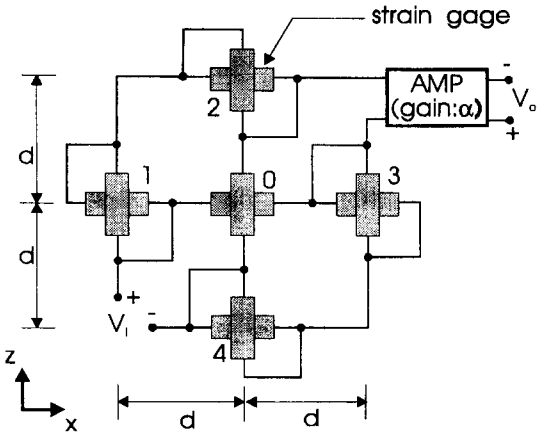

Fig. 2 A strain gauge bridge[6].

을 가지도록 전기 회로를 구성할 수 있다[6]. Fig. 2는 ξ를 측정하기 위한 스트레인 게이지 브리지를 보여준다. 얇은 평판 표면에서 스트레인은 다음과 같이 진동 변위의 공간상의 2차 미분으로 표현된다.

$$\varepsilon_{ij}=\frac{h}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x_j^2}\bigg|_i \tag{9}$$

여기서, i은 스트레인이고 첫번째 아래 첨자는 스트레인 게이지의 위치를 두 번째 아래 첨자는 방향을 나타낸다. 스트레인 게이지의 저항값은 스트레인 게이지의 스트레인과 다음과 같은 관계를 가진다.

$$R_{ij}=R_{ij}^0(1+K_{ij}\varepsilon_{ij}) \tag{10}$$

여기서, R^0은 게이지 저항(gauge resistance)이고 K는 게이지 계수(gauge factor)이며, 같은 첨자는 반복합을 의미하지 않는다. 스트레인 게이지 브리지의 입력 전압과 출력 전압은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$V_o=\frac{\left(\frac{R_{2x}R_{2z}}{R_{2x}R_{2z}}+\frac{R_{3x}R_{3z}}{R_{3x}+R_{3z}}\right)\left(\frac{R_{1x}R_{1z}}{R_{1x}+R_{1z}}+\frac{R_{3x}R_{4z}}{R_{4x}+R_{4z}}\right)-R_{0x}R_{0z}}{\left(\frac{R_{2x}R_{2z}}{R_{2x}+R_{2z}}+\frac{R_{3x}R_{3z}}{R_{3x}+R_{3z}}+R_{oz}\right)\left(\frac{R_{1x}R_{1z}}{R_{1x}+R_{1z}}+\frac{R_{4x}R_{4z}}{R_{4x}+R_{4z}}+R_{ox}\right)} \tag{11}$$

여기서, α는 스트레인 게이지 브리지 출력단에 연결된 증폭기의 게인이다. 스트레인 게이지 브리지를 구성하는 모든 스트레인 게이지들이 같은 게이지 저항과 같은 게이지 계수를 가진다면, 스트레인에 의한 스트레인 게이지의 저항값 변화가 매우 작으므로, 유한차분화에 의한 근사화에 의하여 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\xi=\nabla^2\nabla^2 u=-\frac{32}{hd^2\alpha K V_i}V_o \tag{12}$$

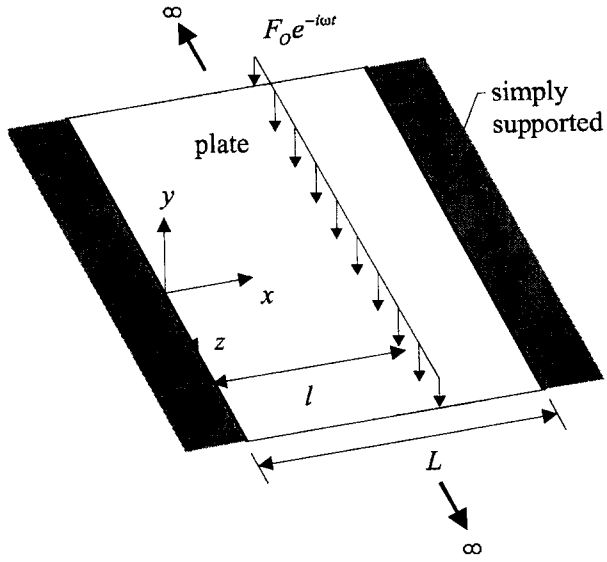

Fig. 3 1-D plate which is simply supported.

식 (5)와 (7)은 평판 표면에서 스트레인 게이지 브리지를 이용하여 측정한 ξ와 진동 속도 탐촉자를 이용하여 측정한 v로부터 근접장 음향 인텐시티를 측정하는 방법을 설명한다. 식 (6)과 (8)은 평판 표면에서 스트레인 게이지 브리지를 이용하여 측정한 ξ, 진동 속도 탐촉자를 이용하여 측정한 v, 그리고 음압 탐촉자를 이용하여 측정한 p로부터 손실 계수를 측정하는 방법을 설명한다.

2. 측정 오차

4.1 유한 차분 근사화와 전달 함수 부정합에 의한 오차

유한 차분 근사화 오차와 전달 함수 부정합 오차를 해석하기 위해 유체 부하가 없는 1차원 평판의 거동이 스트레인 게이지 브리지를 통하여 어떻게 측정되는지 모의 실험을 통하여 설명한다. Fig. 3은 1차원 평판을 나타낸다. 평판의 거동은 다음과 같이 굽힘파와 감쇠파의 선형 조합으로 표현된다.

$$\begin{aligned} u(x)&=A^{ikx}+A_-e^{-ikx}+B_+e^{kx}\\ &\quad +B_-e^{-kx},\quad 0\le x\le l\\ u(x)&=C_+e^{ikx}+C_-e^{-ikx}+D_+e^{kx}\\ &\quad +D_-e^{-kx},\quad l\le x\le L \end{aligned} \tag{13}$$

각각의 계수는 단순 지지된 $x=0$과 $x=L$에서 변위와 굽힘력이 0이라는 조건과 $x=l$에서 변위, 회전변위, 그리고 굽힘력이 연속이고 전단력이 만큼 변화한다는 조건으로부터 계산되고 파수 κ는 내부 손실

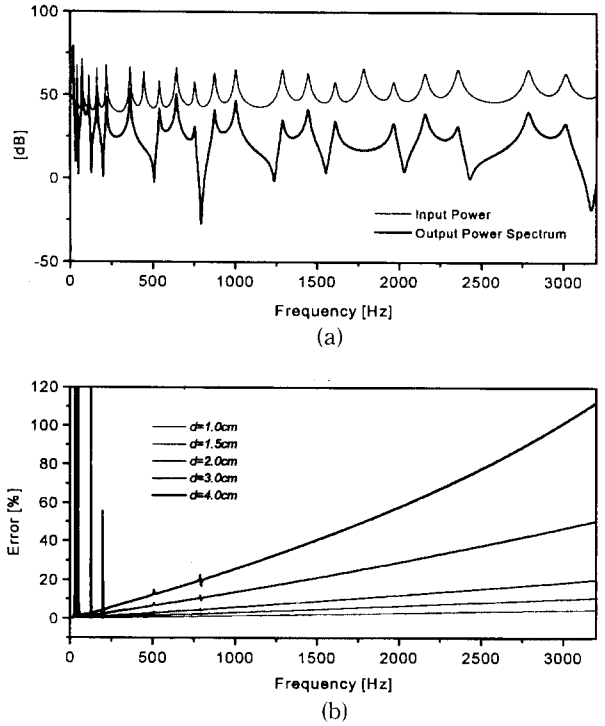

Fig. 4 Steel plate: $h=1.2$mm, $L=0.8$m, $l=0.5$m, $\eta=0.01$, Position of strain gauge bridge: (0.24. 0.0) (a) Input power and output power spectrum (b) Finite difference approximation error with respect to gauge distance(d)

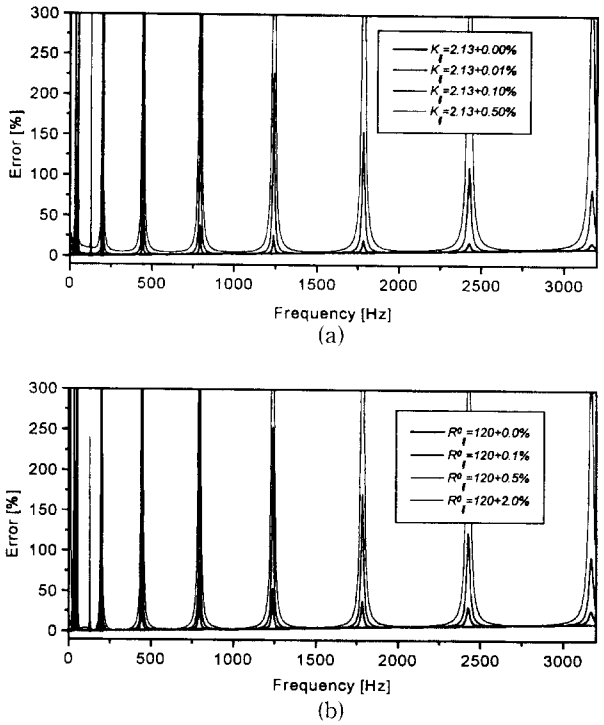

Fig. 5 Errors of loss factor measurement due to the mismatch of the transfer functions of each strain gauge (a) Error due to the different gauge factor (b) Error due to the different gauge resistance

을 고려한 평판의 운동 방정식에 식 (13)을 대입하여 구할 수 있다. 식 (13)의 결과를 식 (9)에서부터 식 (12)에 대입하여 스트레인 게이지 브리지를 사용한 측정 오차를 모의 실험하였다. 다음 결과들은 손실 계수 측정을 모의 실험한 결과들로서 유체부하가 없으므로 식 (6)의 마지막 항을 무시하였다. Fig. 4는 외력으로부터 입력되는 파워, 스트레인 게이지 브리지의 위치에서 진동 속도의 파워 스펙트럼, 그리고 유한 차분화 근사화에 의해 발생하는 오차를 보여준다. 유한 차분화 오차는 게이지 간격이 커질수록 고주파수 영역에서 크게 나타나며 저주파수 영역에서는 측정 위치가 절점인 주파수에서 오차가 크게 나타난다. 저주파수 영역의 절점 주파수에서 오차가 크게 나타나는 이유는 절점인 측정점을 대칭점하여 변위가 대칭적으로 나타나며, 같은 게이지 간격에서 파장이 긴 저주파수 영역에서의 대칭성이 보다 크게 나타나기 때문이다. Fig. 5는 스트레인 게이지 브리지를 구성하는 스트레인 게이지의 게이지 저항과 게이지 계수의 부정합에 의한 측정 오차를 나타낸다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 측정점의 위치가

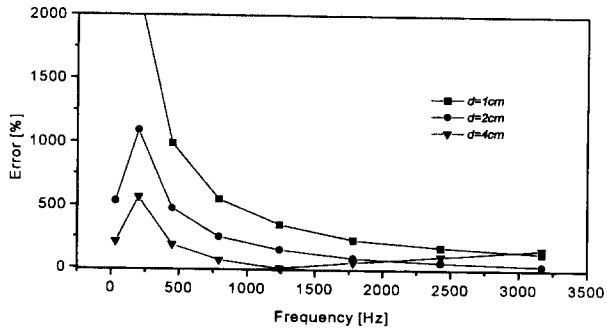

Fig. 6 Errors of loss factor measurement at nodal points with respect to gauge distance (d) when strain gauges have different gauge factro ($K_{if}=2.13+0.1\%$

절점인 주파수에서 오차가 크게 나타나며 게이지 부정합에 의한 오차가 저주파 영역에서 보다 크게 나타남을 보여준다. 같은 게이지 간격일 때, 저주파 영역에서 파장의 길이가 커서 스트레인 게이지간의 보다 더 작은 차이를 측정해야 하므로 스트레인 게이지들의 특성 차이가 저주파 영역에서 큰 오차를 유발함을 생각해 볼 수 있다. Fig. 6은 스트레인 게

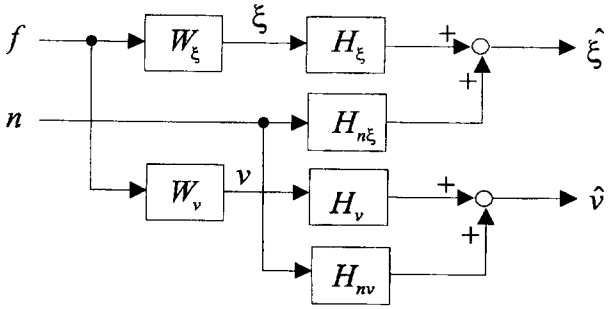

Fig. 7 A model of measuremet system which include extraneous noise, f=excitation force, n=exeraneous noise

이지 브리지를 구성하고 있는 스트레인 게이지들간의 게이지 계수들의 차이가 있을 때, 절점 주파수에서 게이지 간격 변화에 따른 오차를 나타낸다. 게이지 간격을 증가 시켰을 때, 저주파 영역에서 현격한 오차 감소를 보이나 고주파 영역에서는 유한 차분화에 의한 오차를 증가시키는 경향을 보여준다.

4.2 랜덤 오차

바이어스 오차(bias error)가 없다고 가정할 때, 측정해야 하는 스트레인 게이지 브리지 출력신호와 진동 속도신호의 상호 스펙트럼 추정시 발생하는 크기와 위상의 랜덤 오차는 다음과 같이 표현된다[9].

$$e[|\hat{S}_{\xi v}|]=e_m=\frac{1}{|\gamma^2_{\xi v}|\sqrt{n_d}}$$

$$e[\angle\hat{S}_{\xi v}]=e_p=\sqrt{\frac{1-\gamma^2_{\xi v}}{2n_d\gamma^2_{\xi v}}} \tag{14}$$

여기서, $\gamma^2_{\xi v}$은 스트레인 게이지 브리지 출력 신호와 진동 속도 신호의 기여도 함수(coherence function)이고 n_d는 스펙트럼 평균 횟수이다. 이 식들에서 보여지듯이 랜덤 오차를 줄이기 위해 평균 횟수를 증가 시키고 기여도 함수의 값을 1에 가깝게 유지시켜야 함을 알 수 있다. 기여도 함수의 의미를 해석하기 위하여 상호 연관된 외부 잡음을 고려한 측정 시스템을 Fig. 7에 나타내었다. 스트레인 게이지 브리지의 전달 함수(H_ξ)와 속도 탐촉자의 전달 함수(H_v)가 모두 1인 이상적인 탐촉자라면, Fig. 7의 측정 시스템에서 기여도 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma^2_{\xi v}=\frac{1}{\left[1+|H_{n\xi}|^2\frac{S_{nm}}{S_{\xi\xi}}\right]\left[1+|H_{nv}|^2\frac{S_{nn}}{S_{vv}}\right]} \tag{15}$$

그러므로 기여도 함수를 1에 가깝게 하기 위해, 잡음 경로를 차단하거나 신호대 잡음비를 크게 해야 한다.

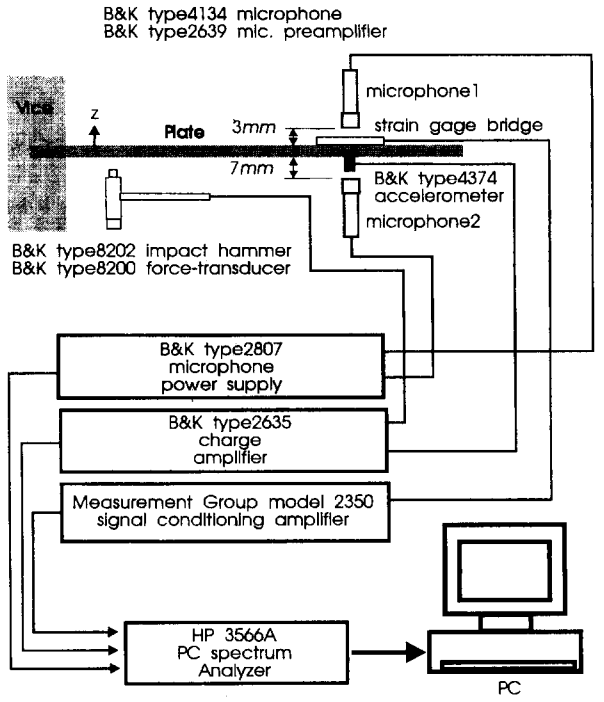

Fig. 8 Experimental setup.

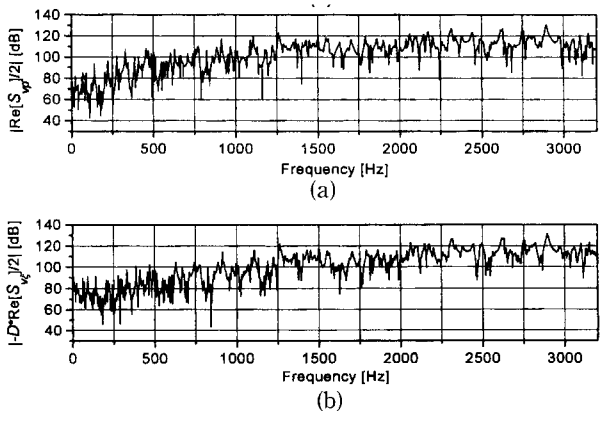

Fig. 9 (a) Near field sound intensity using surface intensity method (b) Near field sound intensity using the suggested method

5. 실험 결과

Fig. 8은 제안된 방법과 표면 인텐시티 방법을 이용한 근접장 음향 인텐시티와 제안된 방법을 이용한 손실 계수의 측정을 위한 실험 장치를 보여준다. 대략 손실 계수가 정도이고 크기가 0.385m×0.55m×12mm인 얇은 강철판에 게이지 간격이 d=1.5cm인

스트레인 게이지 브리지를 사용하였다. 사용된 스트레인 게이지들은 게이지 계수가 2.13±0.1%, 게이지 저항이 120.4±0.4Ω, 그리고 게이지 길이(active gauge length)가 1mm인 일본 KYOWA사의 KFG-1-120-C1이다. 손실 계수 측정은 강철판의 한쪽면에 스웨덴 Antiphon사의 LD13이라는 음향 및 진동 감쇠 패드를 부착하여 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 두 개의 마이크로폰과 한 개의 가속도계를 이용하여 표면 인텐시티 방법으로 측정된 근접장 음향 인텐시티와 내부 손실을 무시하고 스트레인 게이지 브리지와 한 개의 가속도계를 사용하여 측정된 근접장 음향 인텐시티를 나타내었다. Fig. 10은 기여도 함수가 0.98과 0.99이상인 주파수에서 λ_1과 표면 인텐시티 방법으로 측정한 음향 인텐시티를 기준으로 측정된 음향 인텐시티의 절대오차를 나타내었다. Fig. 11은 1κHz에서 2κHz의 주파수 영역에서 기여도 함수 변화에 따른 절대오차와 절대오차의 90% 신뢰구간을 나타내었다. 신뢰구간의 추정은 식 (14)의 랜덤오차가 그 값이 매우 작을 때, 정규분포를 가진다는 사실에 근거한다. 손실 계수가 대략 10^{-3}

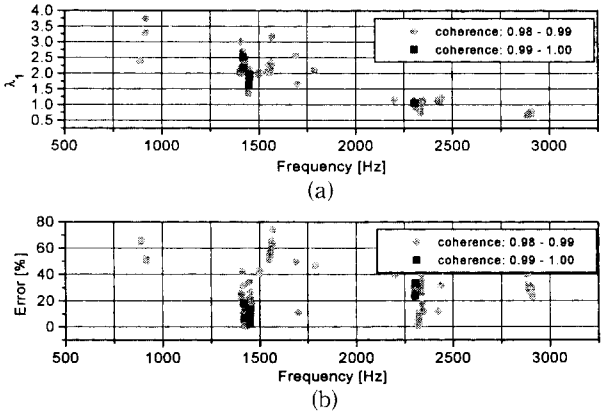

Fig. 10 λ_1 and error

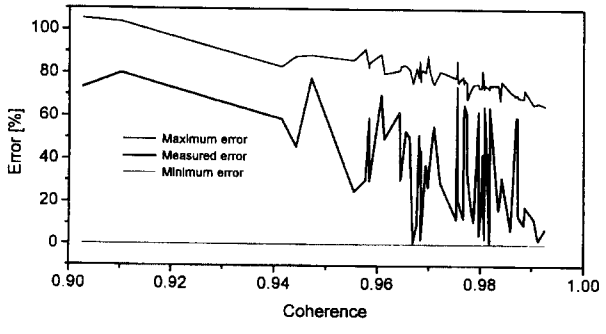

Fig. 11 Measured error of sound intensity and estimated error from equation (14) with 90% confidence, Number of spectrum average: n_d=20.

~10^{-2}이므로 λ_1이 예측되는 손실계수의 역수에 비하여 매우 작아 평판의 내부 손실을 무시할 수 있음을 알 수 있다. 측정된 절대오차가 90% 추정구간에 포함되며 기여도 함수가 0.99이상의 값에서 이하로 나타났다. 그러나 적은 수의 스펙트럼 평균을 취하였기 때문에 90%의 신뢰구간은 기여도 함수가 0.99이상일 때도 매우 크게 나타났다.

Fig. 12는 모든 탐촉자들의 기여도가 이상인 주파수에서 λ_2와 제안된 방법으로 측정된 손실 계수를 보여준다. λ_2로부터 음향 방사에 의한 손실을 무시할 수 없음을 알 수 있다. 또한 주파수가 증가함에 따라 손실 계수도 증가하는 경향을 보여주며 1κHz의 주파수에서 감쇠 계수가 대략 0.2로 감쇠 패드 제작자의 제품 설명서와 일치하는 경향을 보여준다[7].

6. 결 론

얇은 평판에서 음향 인텐시티, 구조 인텐시티, 그리고 손실 계수로 모델링된 내부 손실의 관계를 설명하는 에너지 방정식을 유도하고, 그 응용예로서 스트레인 게이지 브리지를 이용한 근접장 음향 인텐시티와 손실 계수의 측정 방법을 제안하였다. 스트레인 게이지 브리지를 구성하고 있는 스트레인 게이지들의 게이지 저항값과 게이지 계수값의 차이에 의한 오차는 저주파 영역에서, 유한 차분화에 의한 오

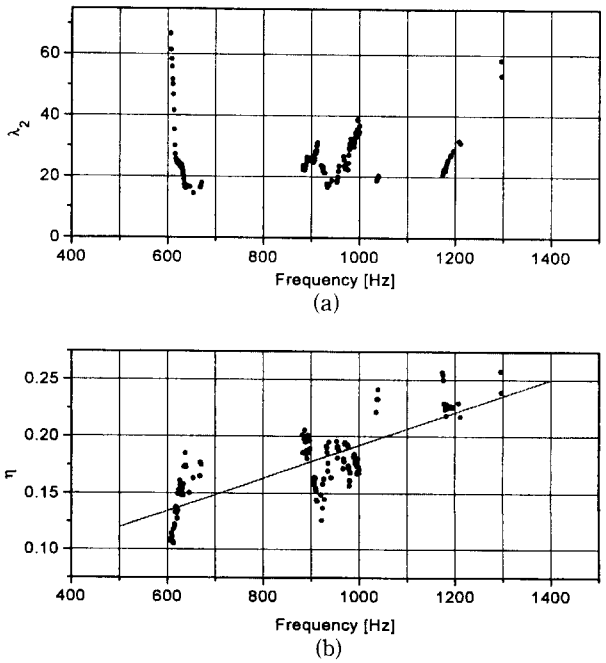

Fig. 12 (a) λ_2 (b) η and linear curve fitting

차는 고주파 영역에서 크게 나타났다. 게이지 저항값과 게이지 계수값의 차이가 존재할 때는 게이지 간격을 크게 하면 저주파 영역에서 측정 오차가 감소하나 고주파 영역에서 유한 차분 근사화에 의한 오차가 증가함을 보였고, 절점 주파수에서는 오차가 매우 커서 측정이 불가능함을 보였다. 또한 랜덤 오차를 줄이기 위해 신호대 잡음비를 크게 하여 기여도 함수가 1의 값을 가지도록 해야 하며 스펙트럼 평균수를 매우 크게해야 함을 보였다. 실험을 통하여 제안된 방법과 표면 인텐시티 방법으로 강철판에서 측정한 근접장 인텐시티가 20%이내의 범위에서 일치함을 보였고 제안된 방법으로 감쇠 패드를 붙힌 강철판에서 측정한 손실 계수가 감쇠 패드 제작자 설명서와 같은 경향을 나타냈다.

참 고 문 헌

(1) F. J. Fahy, 1995, Sound Intensity, 2ed., E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, London.

(2) D. U. Noiseux, 1970, "Measurement of Power Flow in Uniform Beams and Plates," J. Acoust. Soc. Am., 47(1), pp. 238~247.

(3) G. Pavic, 1976, "Measurement of Structure Borne Wave Intensity, Part I: Formulation of The Methods," J. Sound Vib., 49(2), pp. 221~230.

(4) J. C. Pascal, T. Loyau, and J. A. Mann III, 1990, "Structural Intensity from Spatial Fourier Transformation and BAHIM Acoustic Holography Method," Proc. of the 3rd International Congress on Intensity Techniques, Senlis, France, pp. 197~204.

(5) E. G. Williams, 1985, "Structural Intensity in Thin Cylindrical Shells," J. Acoust. Soc. Am., 89(4), pp. 1615~1622.

(6) G. Pavic, 1985, "Measurement of Vibration by Strain Gauges, Part I: Theoretical Basis," J. Sound Vib., 102(2), pp. 153~163.

(7) Antiphon 제품 설명서(SWEDEN), 1991, 한국노비콘 주식회사.

(8) 강성우, 김양한, 1992, "두개의 음향탐촉자을 이용한 소음기의 투과손실 측정과 오차해석," 한국소음진동공학회지, 제2권, 제3호, pp. 181~192