

〈논 문〉 SAE NO. 97370059

복소음향 인텐시티법을 이용한 소음원검출의 시뮬레이션 및 실차응용

Computer Simulation for Noise Source Identification and Application to Vehicle Using Complex Acoustic Intensity Method

오 재 응*, 김 상 현**, 안 지 훈**
J. E. Oh, S. H. Kim, J. H. Ahn

ABSTRACT

Sound intensity distributions and energy flow in the nearfield of dipole source system and flat plate were investigated. First, the effectiveness of complex acoustic intensity was proved by using mathematical and experimental methods in order to indentify noise sources and transmission paths of dipole field which is effected by the presence of neighbouring coherent sources. Next, analytical complex acoustic intensity method was discussed and the characteristics and energy flow of sound induced from the plate are clarified. The velocity of plate obtained from Finite Element Method was used for calculation of complex acoustic intensity in the near field. Finally experimental complex acoustic intensity method was applied to a passenger car. It can be seen that complex acoustic intensity method using both of active and reactive intensity is vital in devising a strategy for the identification and the reduction of vibration and noise.

1. 서 론

음향인텐시티 측정기술은 적절한 마이크로폰의 활용과 신호처리기술을 적용하는 것으로 여러 가지 소음의 측정에 있어서 정밀도와 재생성이 뛰어난 해석방법이다. 또한 음향인텐시티법(Acoustic Intensity Method)을 이용하여 소음의 방사량을 계산하고 기계 각부의 음향파위를 알아낸 후 가장 많은 소음을 방사하는 요소를 찾아내어

소음저감대책을 세울 수 있는 것이다.^{1,2)}

주어진 점의 음향 인텐시티는 음압과 입자 속도의 곱으로 주어지는 복소량으로 나타내며 복소 음향인텐시티는 음장에서 음압과 입자속도 사이의 상호 상관관계를 표현하는 벡터로서 묘사된다.^{3,4)} 실수부인 액티브 인텐시티(Active Intensity)는 음원의 음향방사 혹은 음장을 통한 전파에 대한 정보 즉, 음향에너지의 흐름을 나타내며 음향파위의 크기 및 소음 발생부위의 정확한 위치를 규명하는데 있어서 유용하다. 그러나 서로 상관관계를 갖는 인접한 음원들이 존재하는 경우에는 각각의 음원에 의해 방사된 음을 규명하는

* 정회원, 한양대학교 자동차공학과

** 한양대학교 대학원

데는 어려움이 있다. 반면에 허수부의 리액티브 인텐시티(Reactive Intensity)는 음장에서 저장되는 에너지를 표시하여 정재파를 알 수 있도록 할뿐 아니라 음압 및 입자속도들이 위상차를 갖는 다수의 음원들이 존재하는 음장내의 음의 분포를 규명하는데 유용하다.⁴⁾ 따라서 진동체 부근의 음장을 분석할 경우 리액티브 인텐시티는 음향에너지 흐름의 축적과 진동체 방사원의 위치 규명에 관한 정보를 제공하는 것이다.

본 연구에서는 실험적 방법을 통하여 복소음향 인텐시티(Complex Acoustic Intensity)법을 실제 2음원계에 적용하여 기존의 액티브 인텐시티만의 결과보다 더 정확한 소음원을 규명하였다. 또한 복잡한 구조물이라도 유한요소해석 결과가 얻어질 수 있으며 근접 음장의 음향 특성을 더욱 정확히 규명할 수 있기 때문에 진동하는 평판을 모델로하여, 각 격자점에서의 변위를 유한요소해석(FEM) 결과로부터 얻은 다음 근접 음장에 대한 복소 음향인텐시티를 계산하는 방법을 적용하였다. 또한 실제 구조물에서의 적용을 위한 기초연구로서 복소음향인텐시티법을 승용차의 엔진룸에 적용함으로써 근거리 음장에서의 음향방사 특성의 규명에 그 효용성을 입증하고자 하였다.

2. 진동모드와 방사음 예측이론^{3~5)}

2.1 복소음향인텐시티에 의한 음장해석

앞서 말한바와 같이 임의의 x방향의 음향인텐시티 I_x 는 음압과 입자속도의 곱으로 나타낼 수 있다. 1차원 정현파음장에서 음압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(x, t) = P(x)\cos(\omega t - \phi_p(x)) \quad (1)$$

여기서, $P(x)$ 는 음압의 진폭이며 $\phi_p(x)$ 는 음압의 위상각을 나타낸다.

입자속도 $u(x, t)$ 은 1차원 운동량방정식을 이용하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x, t) = -\frac{1}{\rho} \int \nabla p(x, t) dt$$

$$(\rho: \text{공기밀도}) \quad (2)$$

그리고, 음압 구배 ∇p 는 식 (1)로부터,

$$\nabla p = \nabla P(x)\cos(\omega t - \phi_p(x)) + P(x)\nabla\phi_p(x)\sin(\omega t - \phi_p(x)) \quad (3)$$

가 되고, 입자속도 $u(x, t)$ 는

$$\begin{aligned} u(x, t) &= -\frac{1}{\rho} \int \nabla p(x, t) dt \\ &= \frac{1}{\omega\rho} [P(x)\nabla\phi_p(x)\cos(\omega t - \phi_p(x)) \\ &\quad - \nabla P(x)\sin(\omega t - \phi_p(x))] \end{aligned}$$

이 된다. 따라서, 입자속도는 음압과 동위상의 $P(x)\nabla\phi_p(x)$ 에 비례하는 성분과 음압과 90도 위상차가 나는 $\nabla P(x)$ 에 비례하는 성분으로 이루어져 있는 것을 알 수 있다.

순간 음향인텐시티는 음압과 입자속도의 곱으로 구할 수 있으므로 (1)식과 (4)식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I(x, t) &= p(x, t) \cdot u(x, t) \quad (5) \\ &= \frac{1}{\omega\rho} [P(x)\cos(\omega t - \phi_p(x))] \cdot \\ &\quad [P(x)\nabla\phi_p(x)\cos(\omega t - \phi_p(x)) \\ &\quad - \nabla P(x)\sin(\omega t - \phi_p(x))] \\ &= \frac{1}{\omega\rho} [P^2(x)\nabla\phi_p(x)\cos^2(\omega t - \phi_p(x)) \\ &\quad - \nabla P(x)\sin(\omega t - \phi_p(x))\cos(\omega t \\ &\quad - \phi_p(x))] \\ &= \frac{1}{2\omega\rho} [P^2(x)\nabla\phi_p(x)\{1 \\ &\quad + \cos 2(\omega t - \phi_p(x))\} \\ &\quad - \frac{1}{2}\nabla P^2(x)\sin(\omega t - \phi_p(x))] \\ &= I_a(x, t) + I_r(x, t) \end{aligned}$$

제 1항의 $I_a(x, t)$ 는 입자속도중에서 음압과 동위상의 성분과 음압의 곱에 대응하는 순간 인텐시티를 나타내며, 이것의 시간평균을 액티브인

텐시티라 한다. 제2항의 $I_s(x, t)$ 는 입자속도중에서 음압과 90도 위상차가 나는 성분과 음압의 곱에 대응하는 순간 인텐시티를 나타내며, 이것의 시간평균은 영이 된다. 이 순간 인텐시티의 진폭을 리액티브 인텐시티라 한다. 이를 성분별로 다시 나타내면 다음과 같다.

$$I_s(x, t) = \frac{1}{2\omega\rho} [P^2(x) \nabla \phi_s(x) \{1 + \cos 2(\omega t - \phi_s(x))\}]$$

$$I_r(x, t) = -\frac{1}{4\omega\rho} \nabla P^2(x) \sin 2(\omega t - \phi_s(x)) \quad (6)$$

식 (5)에 나타난 것과 같이 액티브 인텐시티는 위상의 구배에 비례하며, 리액티브 인텐시티는 음압의 2승의 구배에 비례한다. 그러나, 리액티브 인텐시티는 시간평균이 영이며, 순간적으로 음장내를 왕복하는 에너지의 진폭을 나타내므로, 이는 에너지의 흐름을 나타내는 것이 아니라, 음향 에너지의 축적을 나타낸다.

2.2 점음원 배열로 가정된 평면 방사이론

반구의 음장에서 점음원으로부터 반경 r 만큼 떨어진 거리에 대한 음압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(r, t) = \frac{j\omega\rho q_0}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (7)$$

여기서, k 는 파수이고 q_0 는 음의 강도(Source Strength)이다. 만약 점음원을 여러개 갖는다면, 전체 음압기여는 각 음원들을 이용하여 얻을 수 있다. 각 점에서, 첫번째 음원으로부터는 거리 r_1 , 두번째 음원으로부터는 거리 r_2 만큼 떨어지고 n 번째 음원으로부터는 거리 r_n 만큼 떨어졌다면,

$$p = \frac{j\omega\rho q_0}{2\pi r} \left[\frac{q_1}{r_1} e^{-jkr_1} + \frac{q_2}{r_2} e^{-jkr_2} + \dots + \frac{q_n}{r_n} e^{-jkr_n} \dots \right] = \frac{j\omega\rho q_0}{2\pi r} \sum \frac{q_n}{r_n} e^{-jkr_n} \quad (8)$$

이로부터 연속적인 속도분포를 갖는 평면표면으로부터의 방사를 결정하는 것이 용이하다.

만약 강도 $dq_s(s) = v(s)ds$ 와 같은 점음원인 속도 $v(s)$ 를 갖는 면적요소 ds 를 모두 고려하고 전체방사면 S 의 모든 면적요소를 합한다면,

$$p = \frac{j\omega\rho}{2\pi} \int_s \frac{v(s)e^{-jkr}}{r} ds \quad (9)$$

특히, 이 식을 Lord Rayleigh의 식이라 한다.

Fig.1에서 나타낸 2음원계(dipole)의 경우 크기는 같으나 반대의 극성을 갖고 근접한 위치에 존재하는 두 개의 단극음원(Monopole)로 가정할 수 있다. 이 경우 음원간의 거리는 발생주파수의 파장에 비해 상대적으로 작아서 서로 간섭이 발생되도록 하여야 하며 이러한 음장에서의 음압은

$$p(r, r_2, t) = [i\omega\rho Q/4\pi] [(1/r_1)\exp(ikr_1) - (1/r_2)\exp(ikr_2)] \exp(i\omega t) \quad (10)$$

으로 표현할 수 있다. $p = P \exp(i\phi_p) \exp(i\omega t)$, 입자속도 $u = U \exp(i\phi_u) \exp(i\omega t)$ 임을 고려하면

$$I = \frac{1}{2} \text{Re}\{PU^*\} \quad (11)$$

$$Q = \frac{1}{2} \text{Im}\{PU^*\}$$

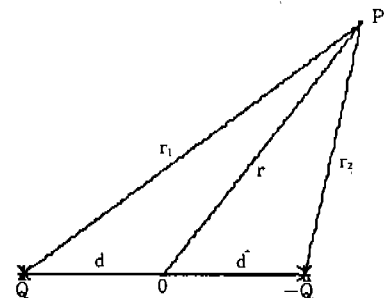


Fig.1 Ideal Dipole Source System

으로 나타낼 수 있으므로 복소음향인텐시티의 반경방향성분(Radial Component)과 접선방향성분(Tangential Component)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$C_r = \frac{1}{2}(PU_r) = I_r + iQ_r$$

$$C_\theta = \frac{1}{2}(PU_\theta) = I_\theta + iQ_\theta \quad (12)$$

음압은

$$P = (P_{1r} + P_{2r}) + i(P_{1\theta} + P_{2\theta}) \quad (13)$$

이며 여기서

$$P_{1r} = (\omega\rho_0 Q \sin(kr_1)) / (4\pi r_1)$$

$$P_{2r} = -(\omega\rho_0 Q \sin(kr_2)) / (4\pi r_2)$$

$$P_{1\theta} = (\omega\rho_0 Q \cos(kr_1)) / (4\pi r_1)$$

$$P_{2\theta} = -(\omega\rho_0 Q \cos(kr_2)) / (4\pi r_2)$$

이다. 한편 반경방향의 입자속도는

$$U_r = U_{rr} + iU_{r\theta} \quad (14)$$

여기서

$$U_{rr} = (1/\omega\rho_0) \{ (P_{1r} + kP_{1r}) / (1/r_1) (\tau + d\cos\theta) + (P_{2r}/r_2 + kP_{2r}) / (1/r_2) (\tau - d\cos\theta) \}$$

$$U_{r\theta} = (1/\omega\rho_0) \{ (-P_{1r} + kP_{1r}) / (1/r_1) (\tau + d\cos\theta) + (-P_{2r}/r_2 + kP_{2r}) / (1/r_2) (\tau - d\cos\theta) \}$$

이고 접선방향의 입자속도는

$$U_\theta = U_{\theta r} + iU_{\theta\theta} \quad (15)$$

여기서

$$U_{\theta r} = (1/\omega\rho_0) \{ (P_{1r} + kP_{1r}) (-d\sin\theta/r_1) + (P_{2r}/r_2 + kP_{2r}) (d\sin\theta/r_2) \}$$

$$U_{\theta\theta} = (1/\omega\rho_0) \{ (-P_{1r} + kP_{1r}) (-d\sin\theta/r_1) + (-P_{2r}/r_2 + kP_{2r}) (d\sin\theta/r_2) \}$$

즉, 쌍극음원계(Dipole System)의 경우 복소음향인텐시티는 두개의 단극시스템에 대한 성분과 두 소음원 사이의 접선방향의 간섭성분을 포함한 것이 된다.

2.3 평판의 진동모드와 근거리 음장에서 음향인텐시티 패턴

Kirchhoff의 평판이론에 의하여 외력 F가 작용하는 평판의 운동방정식은 다음식으로 쓸 수 있다.

$$D\nabla^2 w(x, y, t) + \rho h \frac{\partial^2 w(x, y, t)}{\partial t^2} = F(x, y, t) \quad (16)$$

여기서 D는 굽힘강성, ρ 는 단위면적당 밀도, h는 평판의 두께를 나타낸다.

힘F가 평판의 임의의 점 (ξ, η)에 작용하여 평판이 진동하는 경우에 행진동변위 w는 공간함수와 조화시간함수의 곱, 즉

$$w(x, y, t) = w(x, y) e^{i\omega t} \text{로 나타낼 수 있으며}$$

$$w(x, y) = \frac{F}{\rho h} \sum_n \frac{W_{mn}(x, y) W_{mn}(\xi, \eta)}{(\omega_{mn}^2 - \omega^2)} \quad (17)$$

이다.

진동평판의 고유모우드 W_{mn} 과 고유진동수 ω_{mn} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_{mn}(x, y) = \frac{2}{\sqrt{ab}} \sin \frac{m\pi}{a} x \cos \frac{n\pi}{b} y \quad (18)$$

$$\omega_{mn} = \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \left(\frac{m^2 \pi^2}{a^2} + \frac{n^2 \pi^2}{b^2} \right) \quad (19)$$

평판을 미소요소 Δs_i 로 분할하여 각각의 요소가 피스톤 운동을 한다고 가정하면 미소요소가 발생하는 매질 체적속도 Q_i 는 다음식으로 나타낸다.

$$Q_i = j\omega w(x_i, y_i) \Delta s_i \exp[j\omega t] = 2\pi q_i \exp[j\omega t] \quad (20)$$

단, $w(x_i, y_i)$ 는 평판위의 임의점에서의 변위를 말한다.

그리고 임의점 (x, y, z) 에 대한 속도 포텐셜 ϕ_i 는 매질 체적 속도를 이용하여 다음과 같이 기술된다.

$$\phi_i = \frac{q_i \exp[j(\omega t - kr_i)]}{r_i} \quad (21)$$

단 r_i 및 k 는 임의점 (x, y, z) 와 미소요소 Δs_i 사이의 거리 및 주파수를 의미하며, 다음과 같이 정의된다.

$$q_i = j\omega w(x_i, y_i) \Delta s_i / 2\pi$$

$$r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z^2} \quad (22)$$

$$k = \frac{\omega}{c}$$

여기서, c 는 대기중의 음속을 표시한다.

미소요소 Δs_i 의 임의의 점 (x, y, z) 에 미치는 음압 p_i 및 입자속도 u_{ix} 는 속도 포텐셜 ϕ_i 를 이용하여 다음과 같이 표시된다.

$$p_i = \rho \frac{\partial \phi_i}{\partial t}$$

$$= j\omega \rho q_i \frac{\exp[j(\omega t - kr_i)]}{r_i} \quad (23)$$

$$u_{ix} = -\frac{\partial \phi_i}{\partial x}$$

$$= q_i (x-x_i) r_i^{-2} (r_i^{-1} + jk) \times \exp[j(\omega t - kr_i)] \quad (24)$$

여기서 p 는 대기밀도, u_{ix} 는 입자속도 u_i 의 x 성분을 의미하며, y 및 z 성분도 같은 방법으로 구할 수 있다.

공간의 임의의 점 (x, y, z) 에 대한 복소 음향 인텐시티 I_c 는 이 점에 대한 음압과 입자속도를 이용하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_c = \frac{1}{2} p u^*$$

$$= I + jR \quad (25)$$

단, I 는 액티브 인텐시티(통상 이것을 음향인텐시티라고 부른다.), R 은 리액티브 인텐시티, *은 공액복소수를 의미한다. 이들의 인텐시티 성분 중에서 방사파위에 기여하는 것은 액티브 인텐시티 I 이고, r_i 만큼 떨어진 임의의 점에서의 액티브 인텐시티의 x, y, z 성분을 구하면 다음과 같다.

$$I_x = \text{Re} \left[\frac{j\omega \rho}{2} \left(\sum_i \exp[-jkr_i] \frac{1}{r_i} \times \sum_i q_i^* (x-x_i) \frac{(1-jkr_i)}{r_i^3} \exp[jkr_i] \right) \right] \quad (26)$$

$$I_y = \text{Re} \left[\frac{j\omega \rho}{2} \left(\sum_i \exp[-jkr_i] \frac{1}{r_i} \times \sum_i q_i^* (y-y_i) \frac{(1-jkr_i)}{r_i^3} \exp[jkr_i] \right) \right] \quad (27)$$

$$I_z = \text{Re} \left[\frac{j\omega \rho}{2} \left(\sum_i \exp[-jkr_i] \frac{1}{r_i} \times \sum_i q_i^* (z-z_i) \frac{(1-jkr_i)}{r_i^3} \exp[jkr_i] \right) \right] \quad (28)$$

식 (26), (27), (28)은 미소요소 전체의 기여를 합성한 액티브 인텐시티를 나타낸다.

Fig.2는 본 연구의 진동평판에 대한 시뮬레이션에 사용된 좌표계를 나타낸 것이다.

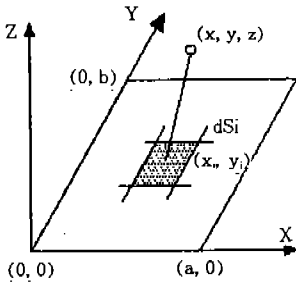


Fig.2 Coordinate System for Computer Simulation

3.2 음원계의 음향방사특성

3.1 2음원계에 대한 복소음향인텐시티의 수치해석 및 측정방법

본 연구에서는 서로 반대의 위상을 가진 2 음원계에서의 액티브인텐시티와 리액티브인텐시티를 비교해 보기 위해 2개의 스피커에서 370Hz의 정현파로 가진한 경우에 대하여 수치해석 및 실험을 수행하였으며 음압의 크기는 하나의 음압(그림에서 좌측음원)이 다른음압의 2배가 되도록 하였고 각각 서로 반대위상을 가진 신호가 입력되도록 하여 간섭음장을 형성하였다. 수치계산을 위해서는 식 (13)~식 (15)를 이용하여 압력과 입자속도를 구하고 식 (12)에서 복소음향인텐시티의 액티브성분과 리액티브성분을 계산하였다.

2음원계의 음원은 각각 점음원으로 간주되기 위해 $ka < 1$ (a : 음원의 반경)이 되도록 음원의 크기(Size)를 결정하였으며 두 음원간의 거리도 발생주파수의 파장에 비해 훨씬 작아서 두 음원간에 발생음이 서로 간섭을 일으킬 수 있는 거리로 설정하였다. 본 연구에서는 각각의 음원을 직경을 2cm로 하였으며 음원간의 거리를 20cm로 설정하였다.

복소인텐시티의 측정은 스피커에 평행한 면은 35개(7×5)의 측정점을, 수직인 면은 28개(7×4)의 측정점을 수행하였다. 복소 음향 인텐시티 측정에는 대향형으로 배치한 인텐시티 프로우브에 저주파용인 50mm 스페이서(Spacer)를 사용

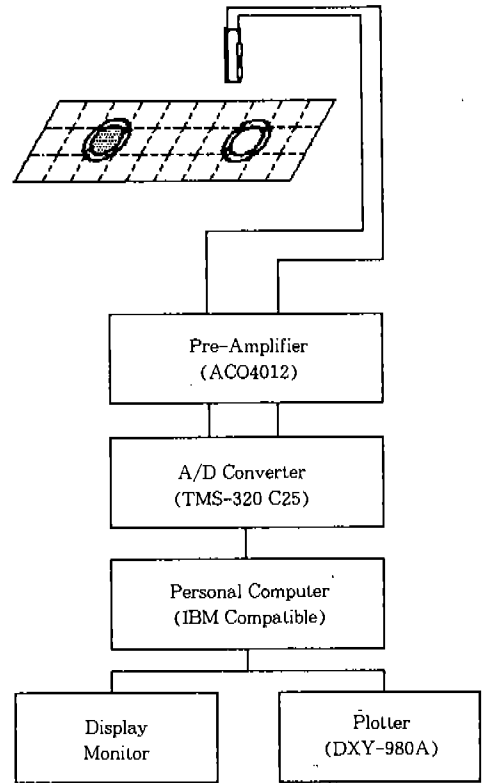


Fig.3 Experimental Setup for Complex Acoustic Intensity Measurement

하였다. 2개의 마이크로폰에서 나온 음압신호는 프리앰프(Aco 4012)를 통해 증폭하였으며 음압신호는 A/D변환기(TMS-320C25)에서 샘플링하여 컴퓨터로 전송하였다. 컴퓨터에서는 FFT 프로그램을 이용하여 각각의 마이크로폰의 음압테이타의 스펙트럼을 구하고 음향인텐시티 프로그램을 이용하여 계산하였다. Fig.3에서는 2음원계에 대한 복소음향인텐시티 측정을 위한 실험장치도를 보여주고 있다.

3.2 실험결과 및 고찰

Fig.4는 실험에서 구한 두 음원에 의한 복소음향 인텐시티성분을 스피커의 수평면에 대하여 2차원 등고선도로 나타낸것이다. 그림에서 점선은 부(-)의 인텐시티값을 나타내며 실선은 정(+)의 인텐시티값을 나타낸다. 액티브 인텐시

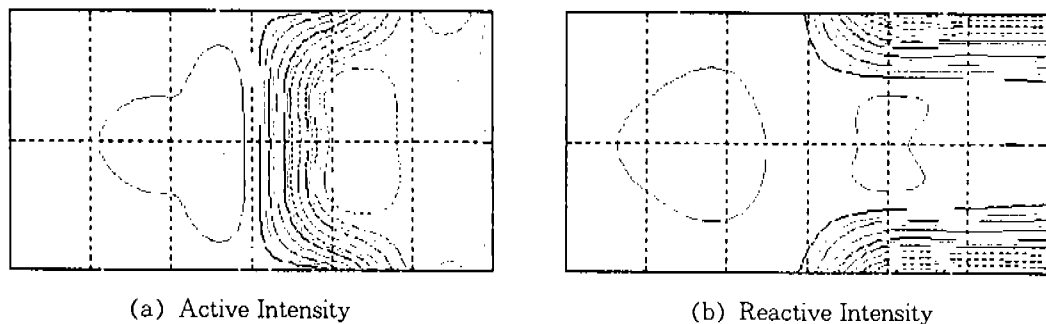


Fig.4 Contour Plots of complex Acoustic Intensity of Dipole System

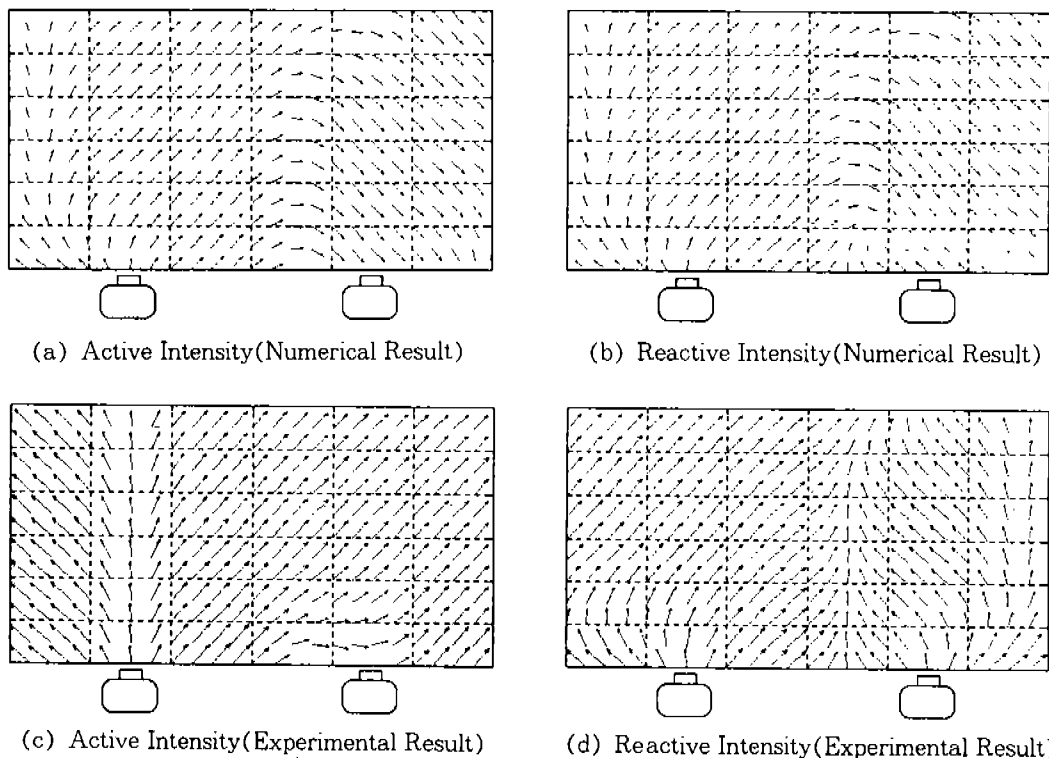


Fig.5 Vector Flows of Complex Acoustic Intensity of Dipole System

티의 등고선도를 보면 우측의 음원근처에서 음의 방향이 음원 쪽으로 향하여 부(-)의 인텐시티를 볼 수 있다. 이러한 경우 액티브 인텐시티만으로는 두음원 사이의 상쇄(Cancellation)가 일어나 음의 크기가 작은 오른쪽의 음원은 나타나지 않게 된다. 동일한 조건에서의 리액티브인텐

시티의 등고선도를 보면 두개의 음원에서 모두 양의 인텐시티성분을 보이고 있으므로 액티브인텐시티에 비해 더욱 정확히 음원을 파악할 수 있다. 액티브인텐시티와 리액티브인텐시티의 경우 모두 마찬가지로 두 음원을 파악할 수 있으나 리액티브인텐시티가 음의 에너지량을 나타낸다는

것에 주목한다면 리액티브인텐시티를 병행한 방법을 통하여 더욱 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있다고 할 수 있다. Fig.5는 스피커로부터 방사되는 음의 복소음향인텐시티를 스피커에 수직면에 대하여 벡터선도로 보여주고 있다. 수치해석 및 실험결과를 보면 각각의 음원에 의해 생성된 음장은 주변의 음원들에 의해 서로 큰 영향을 받는것을 알 수 있다. 액티브인텐시티의 벡터들을 보면, 더 강한 음원에서 방사된 음에 의해 약한 음원 부근에서는 싱크(Sink)현상을 볼 수 있다.

그러나, 리액티브인텐시티의 벡터선도를 보면, 두 개의 소음원을 정확히 판별할 수 있으며 액티브성분보다는 소음원의 위치를 더욱 정확하게 알 수 있다. 수치해석결과와 실험결과 사이에는 벡터방향에 있어서 다소 차이는 있지만 액티브성분과 리액티브성분은 소음원의 판별에 큰 차이를 보이고 있다. 이미 설명한 바와 같이 리액티브인텐시티는 에너지의 축적을 의미하는 성분이므로 실제 음의 흐름은 아니지만, 에너지의 존재를 확인할 수 있는 중요한 인자이다. 또한 근접음장에서 더욱 민감한 변화를 보여주는 성분이므로 에너지원을 파악하기에는 더욱 유효한 성분이라 하겠다.

4. 진동평판의 근접음장에 대한 복소 음향 인텐시티 해석

본 절에서는 진동하는 평판의 각 진동 모드에 의해 발생하는 근접음장에 대한 복소 음향인텐시티를 해석적으로 구하고 평판의 진동모드와 비교 고찰하였다. 해석에 사용된 평판은 $180\text{cm} \times 90\text{cm} \times 0.9\text{cm}$ (너비 \times 높이 \times 두께)이며 Fig.6에 해석모델을 나타내었다. 대상 평판모델은 4단 단순지지 모델로 설정하고 평판의 대각선 방향의 2점(A : $x=20\text{cm}$, $y=70\text{cm}$, B : $x=160\text{cm}$, $y=20\text{cm}$)를 180° 도의 위상차로 가진하였으며 해석상의 가진력은 3N 으로 하였다.

복소음향인텐시티의 계산을 위해서는 유한요소해석을 통하여 평판의 각 고유모드에 대한 표면절점에서의 평판수직방향의 진동속도를 얻었다. 해석에서 관심주파수는 400Hz 미만으로 하고

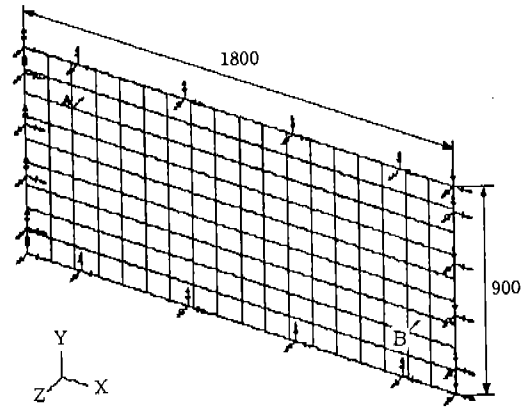


Fig.6 Finite Element Model of Palte

이에 대한 과장의 $1/6$ 이내의 거리에서 두개의 마이크로폰이 위치하는 것으로 간주하여 측정점을 선정하였다. 진동하는 평판으로부터 임의의 위치만큼 떨어진 관측점에서 평판의 방사 음압을 예측하는 Rayleigh 식을 사용하여 각 절점의 진동 속도로부터 평판표면에서 5cm 만큼 떨어진 위치에서 음압을 계산하였다. 이 음압으로부터 각 측정점에 대한 복소 음향 인텐시티를 식 (6)을 이용하여 계산하고 진동평판에 의해 발생하는 근접 음장의 음향 특성을 규명하였다.

Fig.7에서는 진동평판의 진동모드들과 이에 일치하는 모드에서의 복소음향인텐시티의 등고선도를 보여주고 있다. 이를 살펴보면 평판의 진동모드가 거의 일치하는 인텐시티 등고선도를 볼 수 있다. 그림에 나타난 근접음장의 음향특성은 진동에너지가 음향에너지로 변환되는 영역을 의미하며, 이 영역은 진동이 음으로 전달되는 초기 단계로서 이 전달특성을 경유하여 원거리 음장이 결정된다고 할 수 있다.

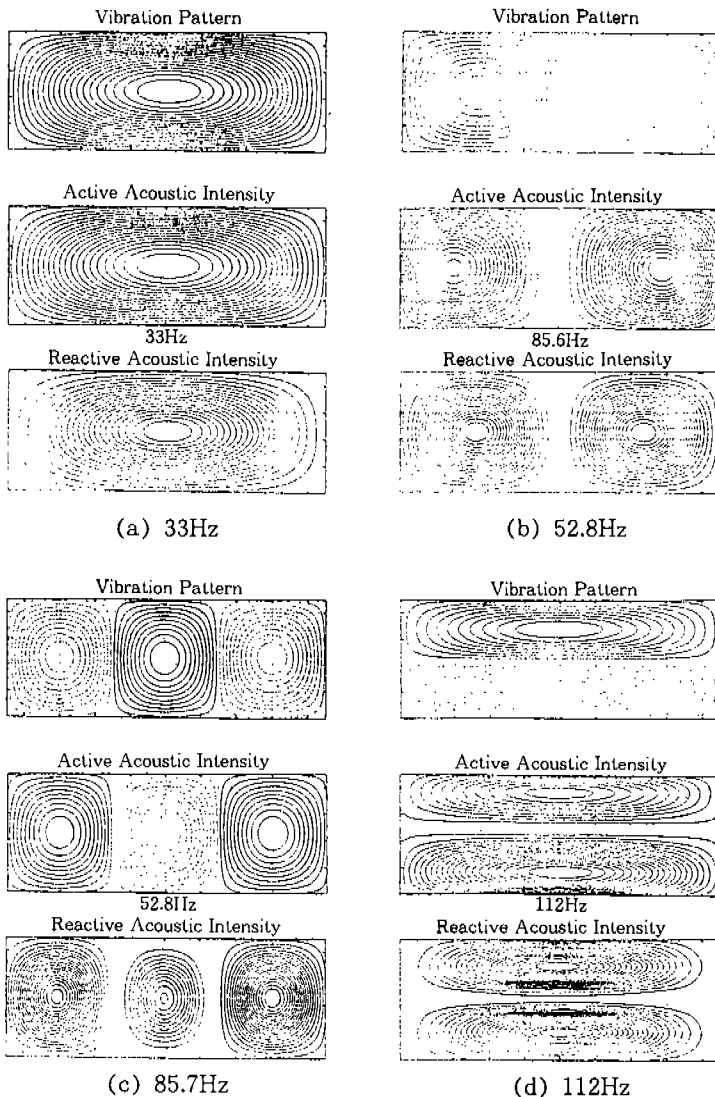
복소음향인텐시티의 리액티브인텐시티의 특징으로는 3장에서 언급한 것과 같이 다수의 소음원이 비교적 가까운 거리에 존재하며 서로 영향을 미치고 있는 경우에 특히 더 큰 효과를 볼 수 있는 것으로 증명되어 있지만, Fig.7에 나타난 진동평판의 경우에도 액티브 인텐시티에 비해 더욱 명확한 소음원을 확인할 수 있었으며 고차모드의 경우에는 좀 더 정확한 소음원의 규명에 도움을 주는 것을 알 수 있다.

또한 해석결과 음향인텐시티 분포도에서 흥미 있는 것은 진동평판의 경우 정, 부의 진동이 이어지고 있으나 액티브 인텐시티의 경우 정, 부의 인텐시티가 상호적으로 나타나지는 않는다는 점이다.

해석에 사용된 두께 9mm의 강판의 경우에 임계주파수는 $f_c=1321\text{Hz}$ 이고 관심대상 주파수인 250Hz미만의 저주파 영역에서는 굽힘파의 파장이 음파의 파장에 비해 매우 작게되며 따라서 음파는 방사하지만 단지 근거리음장만이 존재하게

된다. 구조물에 기계적인 가진동이 있는 경우에 경계조건들이 존재하기 때문에 근거리음장의 음향방사특성은 더욱 두드러진다.

각 진동모드는 x, y 방향에서 절선(Nodal Line (Zero Displacement))을 갖는 2차원 격자로 표현될 수 있으며 각 절선들은 평판을 작은 4각의 진동표면들로 나눈다. 인접한 4각 진동표면들 사이의 매질의 운동은 서로 상호 작용하며 매질이 압축되거나 희박해짐에 따라 음을 생성하게 된다. 본 논문의 관심주파수 영역과 같이 굽힘파의



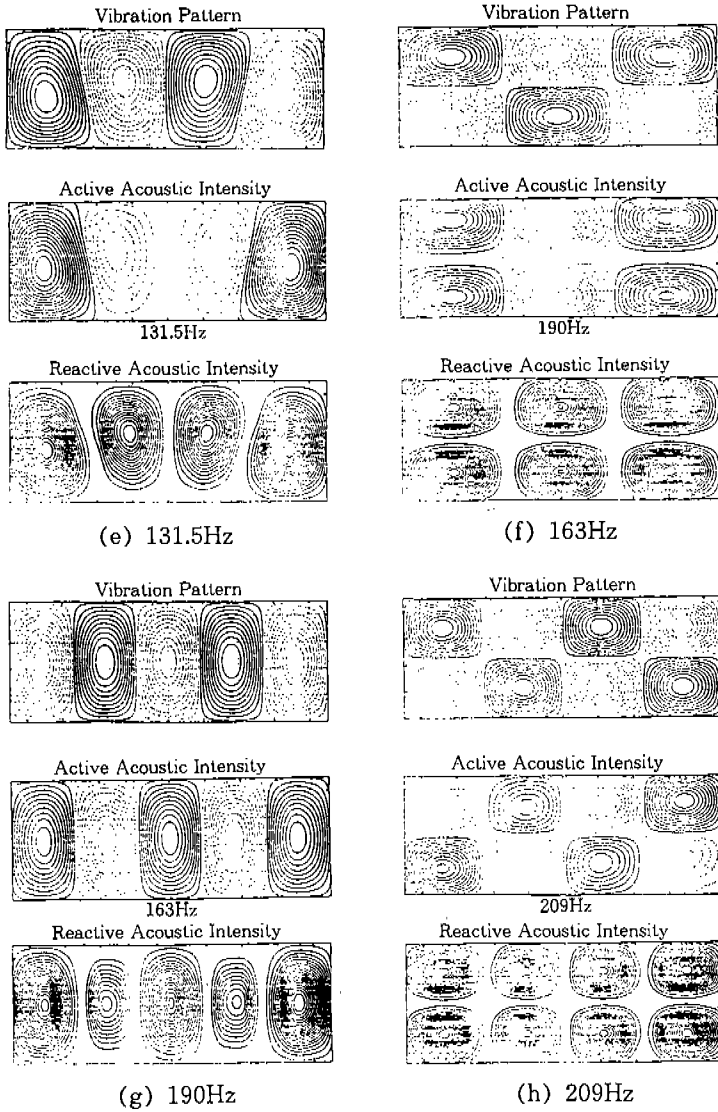


Fig.7 Vibration Patterns and Complex Intensity Patterns of Steel Plate

파장이 음파의 파장보다 작은 경우 인접한 매질들은 다른 위상으로 흔들려서 압축작용에 의해서로 상쇄되는 현상이 발생되며 결국 액티브 인텐시티에서 보이는 바와 같이 평판의 중앙부분에서는 부의 액티브 인텐시티를 보이고 테두리나 코너부분에서 정의 액티브 인텐시티를 나타내게 된다.

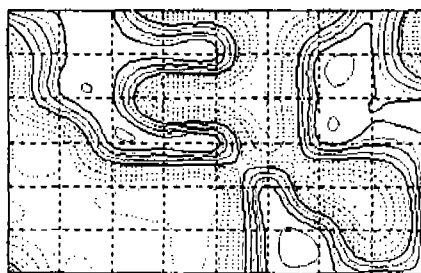
한편 리액티브 인텐시티의 경우를 보면 굽힘파

의 파장이 음파의 파장보다 작은 저주파 영역에서는 근거리 음장내에서 각 소음원의 법선방향으로 큰 값의 리액티브 인텐시티의 분포를 나타내며 이것은 정재파에 의한 음향에너지의 축적을 의미하게 된다. 따라서 근거리 음장에서 더욱 정확히 소음원을 규명할 수 있는 방법으로 제시될 수 있다.

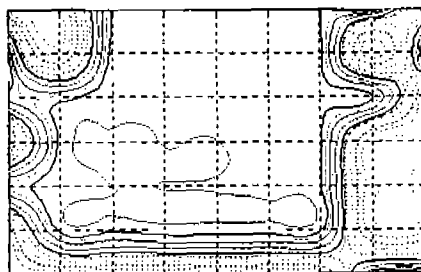
5. 복소음향인텐시티의 실차적용

본 실험에서는 1800cc DOHC 가솔린엔진이 탑재된 승용차량의 엔진룸에서의 음향특성을 측정분석하였다. 엔진룸의 음향방사특성을 관찰하기 위해 엔진룸을 15×15cm의 격자로 나누어 63개(9×7)의 측정점에서 복소음향인텐시티를 측정하였다. 본 실험에서는 약 800rpm의 아이들(Idling)상태와 차실내에서 부밍(Booming)소음을 야기하는 것으로 나타난 1,860rpm를 주목하였다. 복소음향인텐시티 측정에서는 대향형으로 배치된 인텐시티 프로브에 저주파용인 50 mm 스페이서를 사용하였다. Fig.8에서는 실험 차량의 엔진룸 및 측정점을 보여주고 있다.

엔진의 아이들상태에서의 복소음향인텐시티의 측정결과를 Fig.9에서 보여주고 있다. Fig.9(a)에서는 액티브 인텐시티를 Fig.9(b)에서는 리액티브 인텐시티의 등고선도를 보여주고 있다. 액티브 인텐시티의 등고선도를 보면 엔진부분과 벨트 및 흡기메니폴드 부분에서 주로 소음이 발생하여 정(+)의 인텐시티값을 보이며 이 소음은 엔진룸의 각각의 중요부분 사이의 공간에서 상쇄되어 흡음(부(-)의 인텐시티값)되는 것을 볼 수 있다. 이 경우 엔진과 흡기 메니폴드, 흡기구 및 흡기관이 주요 소음원으로서 존재하는 것을 찾을 수 있으나 각 소음원 사이의 공간에서의 소음은 상대적으로 작게 나타나며 결국 상쇄되어 흡음되는 것으로 보인다. 한편 리액티브 인텐시티의 등고선도를 보면 엔진, 흡기관, 벨트 및 흡기메니폴드 등을 주요 소음원으로 하고 주변 공

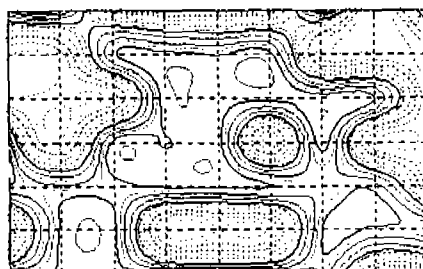


(a) Active Intensity

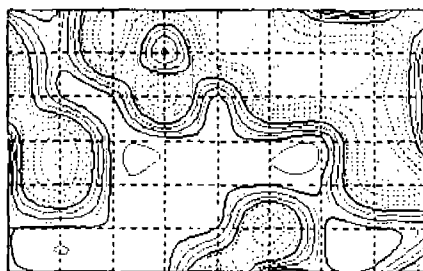


(b) Reactive Intensity

Fig.9 Complex Acoustic Intensity Distribution on Idle Condition



(a) Active Intensity



(b) Reactive Intensity

Fig.10 Complex Acoustic Intensity Distribution on Booming Condition

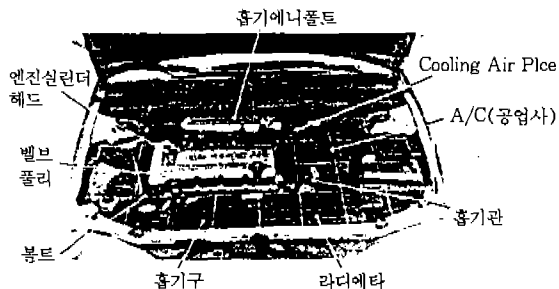


Fig.8 Lay-Out and Measuring Points of Engine Room

간을 통해서도 음이 방사되고 있는 것을 알 수 있으며 벨트 및 엔진 등을 주축으로 큰 에너지가 존재하는 것을 볼 수 있다.

Fig.10의 부밍상태의 엔진룸의 소음특성을 보면 액티브 인텐시티의 등고선도에서는 중요 소음원 부분(엔진, 흡기메니폴드, 벨트, 쿨링팬, 흡기관)등을 중심으로 음이 방사되는 것을 볼 수 있으며 마찬가지로 여러 소음이 모여있는 복잡한 공간에서는 대부분 음이 상쇄되어 버리는 것을 알 수 있다. 리액티브 인텐시티의 등고선도를 보면 엔진, 벨트폴리, 흡기메니폴드를 중심으로 큰 값을 나타내고 있으며 리액티브 인텐시티가 음장에서 음의 에너지의 축적을 의미하므로 부밍상태에서의 엔진룸에서는 벨트소음 및 흡기메니폴드의 소음과 함께 엔진을 주축으로 큰 에너지의 구조적 소음(Structure Born Noise)이 발생하며 이 소음이 차체 및 차실내로 크게 영향을 주고 있는 것으로 추측할 수 있다.

6. 결 론

- 1) 본 연구에서는 복소음향인텐시티의 기초적인 연구로서 서로 반대의 위상을 가진 2음원계를 모델로하여 실험적으로 적용하여 보았으며 대상모델과 같이 음원이 근접하여 서로 상관관계를 갖는 경우 액티브인텐시티는 복잡한 경로를 보여 정확한 방사특성의 규명이 어려웠으나 리액티브인텐시티를 함께 해석하는 복소 음향 인텐시티법을 적용함으로써 소음원을 더욱 정확히 규명할 수 있었다.
- 2) 본 연구에서는 평판의 진동에 의해 발생하는 음의 기초가 되는 근거리 음장의 해석을 위하여 유한요소해석을 수행하여 진동 평판의 진동속도를 구하고 근접음장에 대한 복소 음향 인텐시티의 분포를 계산함으로써 평판의 진동특성과 음향인텐시티 분포특성을 비교하고 근접음장에서의 음향방사특성을 규명할 수 있었다.
- 3) 본 연구에서는 복소음향인텐시티법을 실차에 적용하여 엔진룸에서의 소음원 및 음향

특성을 관찰하였다. 액티브인텐시티를 이용한 소음원의 위치규명뿐 아니라 리액티브인텐시티를 이용하여 음장내의 음향에너지의 분포를 규명함으로써 더욱 정확한 소음원의 특성을 규명할 수 있었다.

후 기

본 연구는 G7 차세대 자동차 안전도 공동기반 기술과제의 연구비 지원을 받아 이루어졌으며, 관계자 여러분께 감사 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. Reinhard T. E. and Crocker M. J., "Source Identification on a Diesel Engine using Acoustic Intensity measurements", Noise Control Engineering, pp. 84~92, 1982.
2. James K. T., "Acoustic Intensity measurements for Small engine", Noise Control Engineering, pp. 56~63, 1982.
3. F. J. Fahy, sound Intensity, Elsevier applied science, 1987.
4. K. B Ginn, "Sound Description Using Complex Sound Intensity Instrumentation", B & K
5. Tanaka, Kikushima, Kuroda, "Active Control of the Structure-Borne Sound", JSME, Vol. 57, No. 537, pp. 94~101, 1991(Japanese)
6. 박동욱, "음향인텐시티법을 이용한 평판형상 변경에 의한 소음원 거동에 관한 연구", 한양대학교 대학원 석사학위논문, 1994.
7. 오재용, "진동평판의 근접음장에 대한 복소 음향인텐시티해석", 제7차 G7차세대자동차 안전도공동기반 기술(저소음진동 차체설계 기술개발)의 개발회의록, 1994.
8. 押野康夫, 橋秀樹, "Complex Acoustic Intensity and it's Application", 自動車技術, Vol. 42, No. 12, pp. 1587~1595, 1988.

9. F. Jacobsen, "Active and Reactive, Coherent and Incoherent Sound Field" *Journal of Sound and vibration*, 130(3), pp. 493~507, 1989.
10. F. Jacobsen, "A Note on Instantaneous and Time-Averaged Active and Reactive Sound Intensity", *Journal of Sound and Vibration*, 147(3), pp. 489~496, 1991.
11. Miguel c. Junger and David Feit, *Sound, Structures, and their Interaction*, pp. 92~149, 1986.
12. Chung J. Y. and Blaser, D. A., "Recent Development in the Measurement of Acoustic Intensity Using the Cross-Spectral method", *SAE Paep*r, 810396, 181.
13. G. M. Oosterhout, P. J. M. Van Der Hoogt and R. M. E. J. Spiering, "Accurate Calculation methods for Natural Frequencies of Plates with Special Attention to The Higher Modes", *Journal of Sound and Vibration*, 183(1), pp. 33~47, 1985.
14. S. G. Oh and R. F. keltie, "Effects of Source Correlation on the Wideband Vibration Level of Plates", *Structural Vibration and Acoustics, DE-Vol. 18-3, ASME*, 1989.
15. M. P. Norton, "Fundamatala of Noise and Vibration Analysis for Engineers", *Cambridge University Press*, 1989.