

반동 전단 구조 인텐서티 측정에 의한 제진재 적용과 그에 따른 에어컨 실외기 구조 방사 소음 저감

Placing Constrained Layer Damping Patches Using Reactive Shearing Structural Intensity in Order to Reduce the Radiated Sound Power of a Air-Conditioner Outdoor Unit

김 규 식* · 강 연 준** · 진 심 원*** · 정 인 화*** · 이 정 우***

Kyu-Sik Kim, Yeon-Jun Kang, Sim-Won Jin, In-Hwa Jung and Jung-Woo Lee

Key Words : Structural Intensity(구조 인텐서티), Reactive Shearing Structural Intensity(반동 전단 구조 인텐서티), Damping Patches (제진재), Outdoor Unit of Air-Conditioner(에어컨 실외기)

ABSTRACT

The use of reactive shearing structural intensity to place small patches of constrained layer damping material in order to achieve the largest reduction in the radiated sound power of Air-conditioner outdoor unit is described. The normal surface velocity of each panel was measured using a laser doppler vibrometer. Experimental results indicated that patches of constrained layer damping material placed over areas of high reactive structural intensity reduced the radiated sound power significantly more than patches of the same area placed over areas of low reactive structural intensity.

1. 서 론

구조물의 진동을 줄이기 위하여 제진재를 구조물 표면 전체에 적용하는 것은 생산 시간과 비용을 높일 뿐 아니라, 임의의 위치에 제진재를 적용하였을 경우 원하지 않는 진동 패턴을 유발시켜 구조 방사 소음을 증가시킬 수 있다.⁽⁷⁾ 따라서 적절한 제진재의 적용위치를 찾는 것은 비용 및 소음, 진동 저감에 있어서 매우 중요한 요소라 할 수 있다.

구조 인텐서티는 제진재의 적절한 적용위치를 찾는 데 있어 최적의 해결책을 제시할 수 있다. 구조 인텐서티에 대한 연구는^(1, 3) 대부분 그 식과 측정 기술에 대해 중점을 두었다. Zhang^(3, 4, 6)은 Pavic과 Romano에 의한 구조 인텐서티 식을 각각 사용하여 두 식의 계산과정과 결과를 비교하였으며, 평판에 리브(rib)를 붙여 평판의 에너지 흐름과 리브의 영향에 대한 연구를 수행하였다. Morikawa⁽⁹⁾는 구

조 인텐서티 계산중 공간 주파수 영역(k-space) 신호 처리 시 발생하는 에러를 평가하고, 이를 줄이기 위한 연구를 수행하였다. Nejade와 Singh⁽¹⁰⁾는 평판의 형상과 구속조건에 따른 구조 인텐서티를 계산하여 비교하였다. 또한, 기어 박스 윗면의 구조 인텐서티 맵과 음향 인텐서티 맵을 서로 비교하여 구조 인텐서티의 에너지 흐름과 음향 인텐서티 크기와의 관계를 연구하였다.

Spalding과 Mann⁽⁸⁾은 반동 전단 구조 인텐서티(reactive shearing structural intensity)가 높은 부분에 제진재를 적용하여 평판의 국부 및 전체 표면의 법선 방향 속도를 변화시킬 수 있음을 보여주었다. 이러한 그들의 연구는 구조 방사 소음을 저감시키는데 있어서 반동 전단 구조 인텐서티를 적용하게 하는 아이디어를 제공하였다.

Kruger 등⁽⁷⁾은 입방체 구조물 한 면의 1번째, 3번째 모드에서의 반동 전단 구조 인텐서티를 계산하여 그 값이 높은 부분에 제진재의 수, 크기, 형상을 변경하며 적용하여 방사 구조 방사 소음을 저감시켰다.

본 논문에서는 에어컨 실외기(outdoor unit of air-conditioner) 외부 패널의 구조 인텐서티를 바탕으로 제진재를 적용하여 구조 방사 소음을 저감하였다.

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
E-mail : winvi75@snu.ac.kr
Tel : (02)880-1632, Fax : (02)888-5360

** 서울대학교 기계항공공학부

*** (주)LG 전자 DA연구소

2. 구조 인텐서티 개념

2.1 구조 인텐서티

구조 인텐서티에 대한 식과 그 전개 과정 및 컴퓨터를 사용한 신호 처리 방법, 효과적인 필터링 방법은 다른 여러 논문에서 논의되어 있으므로 본 논문에서는 단지 Pavic의 구조 인텐서티 기본 식만을 언급한다. 평판이 xy 방향으로 놓여 있을 때 x방향에 대한 구조 인텐서티 식은 다음과 같다.

$$I_x = \left\langle D \left[- \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} - (1 - \nu) \times \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} + \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right) \dot{w} \right] \right\rangle_t \quad (1)$$

y 방향에 대한 구조 인텐서티는 다음과 같다.

$$I_y = \left\langle D \left[- \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} - (1 - \nu) \times \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} + \left(\frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right) \dot{w} \right] \right\rangle_t \quad (2)$$

여기서, $D = EH^3/[12(1-\nu^2)]$, h 는 판의 두께, E 는 영율, ν 는 프아송 비, w 는 법선 방향의 변위, $\dot{w} = \partial w / \partial t$ 는 법선 속도, $\langle \rangle_t$ 는 시간 평균을 의미한다.

구조 인텐서티식은 각각의 방향에 대하여 굽힘(bending), 비틀림(twisting), 전단(shearing)의 세 부분으로 나눌 수 있으며 이들 각각은 평판내 전파하는 파형을 나타내는 것이다. x 방향의 구조 인텐서티에 대해 예를 들면 다음과 같다.

$$- \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} \quad (3)$$

식 (3)은 굽힘 파(bending wave)를 나타내는 부분이고,

$$- (1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} \quad (4)$$

식 (4)는 비틀림 파(twisting wave)를 나타내는 부분이며,

$$\left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right) \dot{w} \quad (5)$$

식 (5)는 전단 파(shearing wave)를 나타내는 부분이다.⁽⁶⁾

구조 인텐서티는 복소수로 표시되며 음향 인텐서티와 같이 실수 부분은 능동 구조 인텐서티(active structural intensity), 허수 부분은 반동 구조 인텐서티(reactive structural intensity)라 한다. 여기서 능동 구조 인텐서티는 시간 평균 파워로 직접적으로 에너지의 흐름을 나타낸다. 이에 반해 반동 구조 인텐서티는 물리적으로 명확한 의미를 지니지는 않는다.⁽⁸⁾ 하지만 반동 구조 인텐서티 중 전단 파를 의미하는 반동 전단 구조 인텐서티는 Zhang⁽⁷⁾ 및,

Spalding과 Mann⁽⁸⁾의 연구에 근거할 때, 방사 음압을 줄이기 위한 제진재 적용위치 예측에 최적의 방법을 제시해 준다.

2.2 공간 데이터 처리

식 (1), (2)에서 구조 인텐서티는 법선 방향 속도와 그 공간상 미분에 의해 계산되어 지며 구조 인텐서티 값의 정확성은 공간 미분의 처리과정에 달려있다. 공간 미분의 계산을 위해 측정된 속도 데이터는 공간 푸리에 변환(spatial fourier transform)에 의해 공간 주파수 영역(wave-number domain, k-space)로 변환하여야 한다. 공간 주파수 영역으로 전환된 데이터의 공간 미분은 아래와 같은 단순한 대수 계산식에 의해 수행되어진다.

$$F \left[\frac{\partial^{n+m} \xi}{\partial x^n \partial y^m} \right] = (jk_x)^n (jk_y)^m F[\xi] \quad (6)$$

여기서, $F[\]$ 는 공간 푸리에 변환을 의미하며, k_x , k_y 는 x방향과 y방향의 파동수(wave number)를 의미한다. 측정 데이터에 포함되어 있는 예러는 높은 파동수 영역에서 증폭되므로 데이터의 예러를 줄이기 위한 k-space 상에서의 공간 필터가 필요하다. 또한 측정된 구조물의 법선 속도 데이터를 완곡히 하기 위한 공간 원도함수도 필요하다. Pavic 식에 의한 구조 인텐서티의 계산 과정은 Fig. 1과 같으며 이때 사용되어 지는 식은 (1), (2)이다.

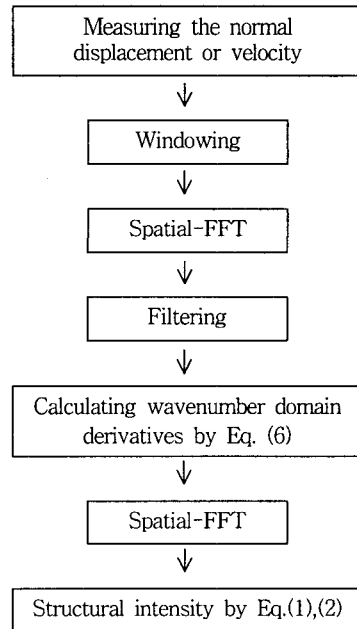


Fig. 1 Procedure to calculate structural intensity from Pavic's formulation

3. 실험

Fig. 2와 같이 에어컨 실외기 각 면의 구조 인텐서티를 계산하기 위하여 표면의 법선 방향 속도를 측정하는 실험 장치를 구성하였다. 실외기는 철재 프레임에 피아노선을 이용하여 매단 뒤, 실외기 바닥 패널의 압축기가 놓이는 부분에 20cm 가진봉을 연결하고, MB Modal 50A 가진기를 사용하여 가진하였다. 가진 점의 위치는 바닥 패널 좌측에서 250mm, 150mm 지점이다. 가진봉과 바닥 패널 사이에 PCB 208C02 힘 변환기를 사용하여 기준 신호(reference signal)를 받아 들였으며, 폴리텍사의 레이저 스캐닝 바이브로미터 PSV 300을 이용하여 실외기 표면의 법선 속도를 측정하였다. 제진재 부착 전과 부착 후의 방사 음압의 측정에는 B&K 1/2" 4189 마이크로 폰을 사용하였으며, 진동 측정과 동시에 이루어 졌다. 방사 음압 측정 위치는 실외기 앞면 중앙의 1m 떨어진 지점이다. 각 패널의 속도 및 음압 측정을 위하여 랜덤 신호 및 단일 신호를 사용하여 가진하였다. 제진재는 (주)LG 전자 측에서 제시한 부틸 테이프(butyle tape)을 사용하였다.

속도 측정은 바닥 패널, 윗 패널, 앞 패널, 뒤 패널, 우측 패널의 5면을 측정하였으며 이때 측정 점의 개수는 각각 555(37×15)점, 855(45×19)점, 555(15×37)점, 429(11×39)점, 243(37×15)점이다. 측정점 사이의 간격은 x, y 방향에 대하여 바닥 패널이 22mm, 20mm, 윗 패널이 17.2mm, 14.5mm, 앞 패널이 18mm, 14mm, 뒤 패널이 17mm, 14mm, 우측 패널이 20mm, 16mm이다.

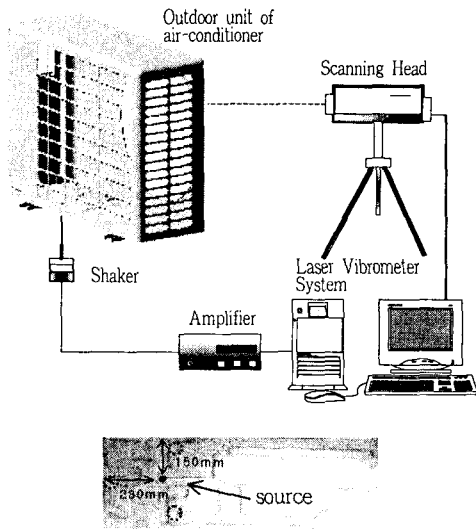


Fig. 2 Experimental set-up and location of excitation

4. 실험결과 및 고찰

실외기 외부패널 중 바닥 패널의 경우 그 포밍 형상으로 인해 평판에 기초한 구조 인텐서티 식을 적용하기에 어려움이 있다. 이에 본 논문에서는 Fig. 3과 같은 포밍 형상이 있는 바닥 패널을 평판으로 가정하여 구조 인텐서티를 계산하였다. 바닥 패널의 240Hz에서 구조 인텐서티 벡터 선도를 살펴본 결과 가진 소스의 위치에서 에너지가 흘러나감을 Fig. 3을 통해 확인 할 수 있다. 이는 평판의 능동 구조 인텐서티 벡터 선도에 대한 Zhang⁽⁶⁾의 논문을 고려할 때 바닥 패널을 평판으로 가정한 것에 대해 어느 정도의 신뢰성을 준다고 간주한다.

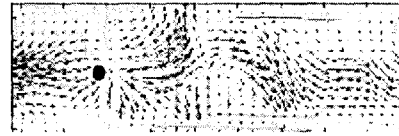


Fig. 3 Structural intensity vector plot of base panel at 240Hz (● : Excitator point)

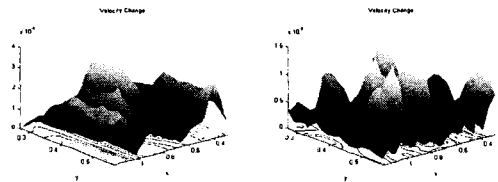
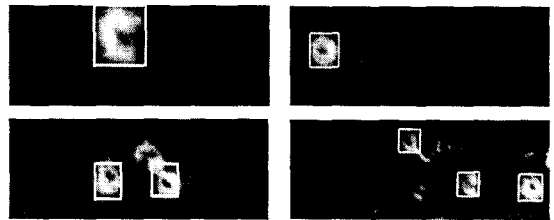
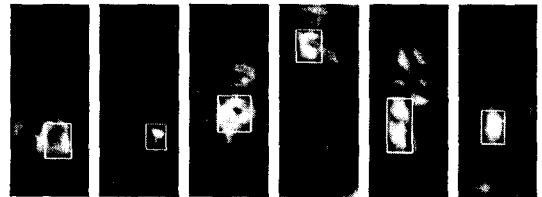


Fig. 4 Measured velocity of the base panel (left : 240Hz, right : 746Hz)



(a) base panel (b) top panel
Fig. 5 Reactive shearing structural intensity of base and top panels (top : 240Hz, bottom : 746Hz)



(a) base panel (b) top panel (c) rear panel
Fig. 6 Reactive shearing structural intensity of front and rear panel (left:240Hz, right:746Hz)

운전중인 실외기의 진동 및 음압 피크치 중 운전 환경(냉방, 난방)이나 측정 위치(전방, 후방)에 관계없이 피크값을 보이는 240Hz와 746Hz를 관심 주파수로 선정하여 구조 인텐서티 맵을 그려보았다. 관심 주파수 240Hz 및 746Hz에서 바닥 패널의 속도 분포는 Fig. 4와 같으며, Fig. 1의 계산 과정에 의해, 속도 데이터를 이용하여 반동 전단 구조 인텐서티 맵을 Fig. 5 ~ Fig. 6 과 같이 도출하였다.

각각 패널에 대한 반동 전단 구조 인텐서티가 가장 높은 부분은 Fig. 5 ~ Fig. 6 의 흰색 사각형 박스로 나타낸 부분이며 이곳에 제진재를 적용한 뒤 단일 신호(sine signal)로 가진하여 방사 되는 음압을 측정하였다. 그 결과 관심 주파수 240Hz인 경우 위 패널에 제진재를 적용하였을 때 13.6dB의 방사 소음 저감으로 그 효과가 가장 컸으며, 관심 주파수 746Hz인 경우 바닥 패널에 제진재를 적용하였을 때 16.4dB의 방사 소음 저감으로 그 효과가 가장 컸다. 각각 패널에 대한 제진재 적용 전·후의 방사 소음 저감 레벨과 저감 정도를 Table. 1에 정리하였다.

임의의 위치에 제진재를 적용하였을 경우 방사 소음 저감 효과는 구조 인텐서티에 의한 제진재 적용위치에 제진재를 적용했을 때 보다 그 효과가 좋지 않거나, 방사 소음이 커짐도 확인할 수 있었다.

제진재를 적용하여 방사 음압 저감에 효과가 높은 240Hz에서의 위 패널과 746Hz에서의 바닥 패널의 위치에 제진재를 동시에 적용하여 각각의 주파수 성분에 대한 방사 소음 저감의 효과를 Fig. 12에 나타내었다. 그 결과 240Hz 성분에서의 경우 방사 소음이 9.8dB 줄었으며, 746Hz 성분에서는 방사 소음이 15dB 줄어들었음을 확인 할 수 있다.

Table. 1 Reduction of sound pressure level

		Sound pressure level	
		240Hz	746Hz
No damping patch		67.1dB	58.4dB
Applied damping patches	base	62.8dB(-4.3dB)	42.0dB(-16.4dB)
	top	53.5dB(-13.6dB)	55.6dB(-2.8dB)
	front	60.7dB(-6.4dB)	56.9dB(-1.5dB)
	ringt	63.2dB(-3.9dB)	56.8dB(-1.6dB)
	rear	64.4dB(-2.7dB)	56.5dB(-1.9dB)

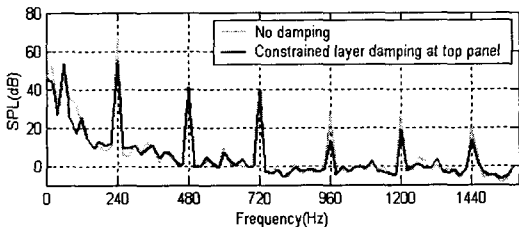


Fig. 7 Reduction of sound pressure lever of constrained layer damping at top panel, 240Hz

이는 240Hz 및 746Hz에서 방사 소음 저감이 가장 두드러진 위 패널과, 바닥 패널에 각각 제진재를 적용하여 방사 음압을 측정하였을 경우의 방사 소음 저감 정도 13.6dB, 16.4dB에 비해 3.8dB 및 1.4dB 차이를 보이며 그 효과가 낮아 졌음을 알 수 있다. 이는 각각의 관심 주파수에서 바닥 및 위 패널의 제진재 적용위치가 다르므로 각각의 주파수에서 임의의 위치에 제진재를 적용한 것으로 간주 할 수 있다. 그로 인해 방사 음압의 저감 효과가 떨어졌다고 할 수 있다.

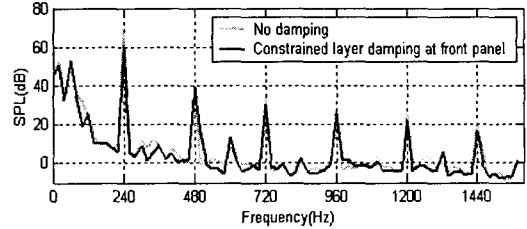


Fig. 8 Reduction of sound pressure lever of constrained layer damping at front panel, 240Hz

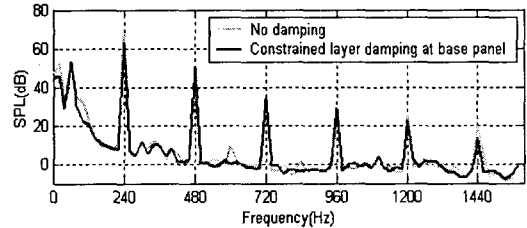


Fig. 9 Reduction of Sound pressure lever of constrained layer damping at base panel, 240Hz

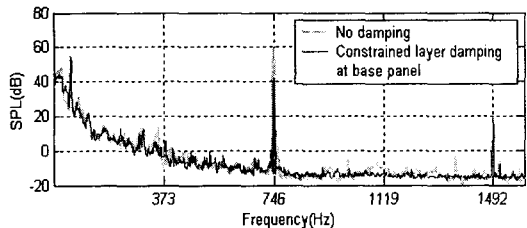


Fig. 10 Reduction of Sound pressure lever of constrained layer damping at base panel, 746Hz

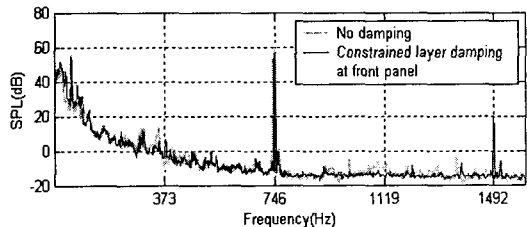
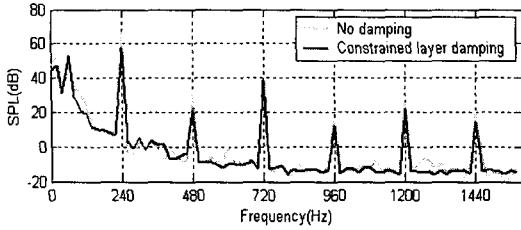
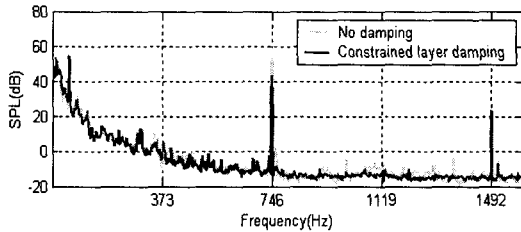


Fig. 11 Reduction of Sound pressure lever of constrained layer damping at front panel, 746Hz



(a) Reduction of sound pressure level at 240Hz



(b) Reduction of sound pressure level at 746Hz

Fig. 12 Reduction of sound pressure level of constrained layer damping at top and base panels

5. 결 론

에어컨 실외기 외부패널의 범선 방향 속도 데이터를 이용하여 구조 인텐서티를 계산한 뒤 반동 전단 구조 인텐서티 값이 가장 높은 부분에 제진재를 적용하였을 경우 방사 음압이 최고 16.4dB 저감하는 것을 확인 할 수 있었다. 이에 반동 전단 구조 인텐서티는 제진재 적용 위치를 예측하기 위한 좋은 해결책이라 사료되어진다. 또한 평판이 아닌 실외기의 바닥 패널을 평판으로 가정된 뒤 구조 인텐서티를 계산하여 제진재를 적용한 결과 관심 주파수 240Hz 및 746Hz에서 4.3dB, 16.4dB의 방사 음압 저감 효과를 보였다. 따라서 평판 가정에 의한 구조 인텐서티 계산에 큰 무리가 없다고 생각된다. 하지만 이에 대한 더 많은 연구와 실험이 필요하다.

후 기

본 연구는 (주)LG 전자와 서울대학교 마이크로 열 시스템 센터 (μ -ERC)의 지원으로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) G. Pavic, 1976, "Measurement of Structural Borne Wave Intensity, Part I :Formulation of the Methods," J. Sound Vib. 49(2). 221-230.
- (2) D. U. Noiseux, 1970, "Measurement of Power Flow in uniform beams and plates," J. Acoust. Soc. Am. 47, 238-247.
- (3) Y. Zhang and J. Adin Mann III, 1996, "Measuring the structural intensity and force distribution in plates," J. Acoust. Soc. Am. 99(1), 345-353.
- (4) Y. Zhang and J. Adin Mann III, 1996, "Examples of using structural intensity and the force distribution to study vibrating plates," J. Acoust. Soc. Am. 99(1), 354-361.
- (5) E. G. Williams, H. D. Dardy, and R. G. Fink, "A Technique for measurement of Structure-borne intensity in plates," J. Acoust. Soc. Am. 76. 2061-2068.
- (6) Y. Zhang, 1993, "An Experimental Model for Structural Intensity and Source Location," Ph.D. dissertation, Iowa State University.
- (7) D. H. Kruger, J. Adin Mann III, and T. Wiegandt, 1997, "Placing Constrained Layer Damping Patches Using Reactive Shearing Structural Intensity Measurements," J. Acoust. Soc. Am. 101(4) 2075-2082.
- (8) A. B. Spalding and J. A. Mann III, 1995, "Placing Small Constrained Layer Damping Patches on a Plate to Attain Global or Local Velocity Changes," J. Acoust. Soc. Am. 97(6), 3617-3624.
- (9) R. Morikawa and S. Ueha, 1996, "Error Evaluation of the Structural Intensity Measured with a Scanning Laser Doppler Vibrometer and a K-space Signal Processing," J. Acoust. Soc. Am. 99(5), 2913-2921.
- (10) A. Nejade and R. Singh, 2002, "Flexural Intensity Measurement on Finite Plates Using Modal Spectrum Ideal Filtering," J. Sound Vib. 256(1), 33-63.