

자기변형 패치 트랜스듀서를 이용한 비자성 축의 비틀림 모달 테스트 Torsional Modal Testing of a Non-ferromagnetic Shaft by Magnetostrictive Patch Transducers

조 승 현* · 한 순 우* · 박 찬 일** · 김 윤 영†

Seung Hyun Cho, Soon Woo Han, Chan Il Park and Yoon Young Kim

(2006년 6월 20일 접수 ; 2006년 7월 12일 심사완료)

Key Words : Magnetostrictive Transducer(자기변형 트랜스듀서), Magnetostrictive Patch(자기변형 패치), Torsional Vibration(비틀림 진동)

ABSTRACT

Torsional vibration is an important vibration mode when shafts, cylinders and pipes are considered. However, the modal testing of torsional vibrations is not an easy task to carry out because of the lack of proper transducers. This work presents a new torsional vibration transducer based on the magnetostrictive principle and its application to torsional modal testing. The transducer is so designed as to generate/measure only torsional vibrations excluding other vibration modes such as longitudinal and bending vibrations. The transducer is composed of ferromagnetic patches bonded to a test structure, permanent magnets, and a solenoid. Though patches and magnets are bonded to a structure, torsional vibrations are generated and measured wirelessly by a solenoid encircling a test structure. The proposed transducer works even at considerably high frequencies, say, tens of kilohertz. Furthermore, the transducer can be manufactured at a low price. To check the performance of the proposed method, the torsional modal testing on a hollow aluminum shaft was conducted. The results, such as eigenfrequencies, obtained by the proposed transducer agreed favorably with theoretical results.

1. 서 론

현재 다분화된 산업현장의 각 분야에서는 회전 기계의 구동축, 구동용 박판보 및 배관 등 다양한 부품들을 널리 사용하고 있으며, 이들의 진동 특성이 기계의 성능과 안정성에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 특히 비틀림 진동(torsional vibration)의 경우 모터, 구동축(drive shaft), 발전기 등을 비롯

한 모든 회전 기계의 성능과 직접적으로 관련이 있어서, 이들 기계의 설계시에 비틀림 진동의 특성을 파악하는 작업이 필수적이다. 뿐만 아니라 구조용으로 널리 사용되는 원통형 박판보의 경우에도 비틀림 진동 특성의 파악은 매우 중요하다. 또한, 비틀림 진동은 원통형 구조물에 발생하는 결함을 평가하는 경우나 재료의 물성치를 측정할 때에도 널리 응용되고 있다. 따라서, 비틀림 모달 테스트(torsional modal testing)를 통한 비틀림 모달 파라미터의 추출은 원통형 구조물이 포함된 기계의 성능 향상이나 안전성 평가를 위해 필수적으로 요구된다고 할 수 있다.

비틀림 진동은 길이가 긴 축이나 보가 비틀림 모멘트를 받을 때 나타나는 진동 특성으로서, 비틀림 진동의 시험은 통상 중 진동(longitudinal vibration) 및

† 책임저자; 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : yykim@snu.ac.kr

Tel : (02)880-7130, Fax : (02)872-5431

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

** 서울대학교 대학원 기계항공공학부

굽힘 진동(bending vibration)에 비해 까다롭다. 이는 대개 비틀림 진동의 기본 주파수가 굽힘 진동의 기본 주파수에 비해서 훨씬 높기 때문에 굽힘 모드 사이에서 비틀림 진동 모드만을 추출해 내기가 쉽지 않은 까닭이다. 따라서 원통형 구조물의 비틀림 모달 테스트를 위해서는 다른 모드의 변형을 배제하면서 비틀림 모드 변형만을 가진하고 측정하여야 할 필요가 있다. 하지만, 비틀림 모드만을 가진하는 것이 쉽지 않기 때문에 그 중요성에 비해서 실제 비틀림 모달 테스트를 시험적으로 다룬 예는 보고된 바가 많지 않다.

현재 비틀림 진동을 가진하는 방법으로 모터구동⁽¹⁾, 압전소자 트랜스듀서^(2,3,4), 유압가진기⁽⁵⁾, 와전류 트랜스듀서⁽⁶⁾ 등의 방식이 보고된 바 있다. 이러한 방식들은 모두 각각의 장점들을 지니고 있지만, 설치 장소 및 가진점 설정의 제약, 제한된 출력, 다른 모드의 배제성에 한계 등의 단점 역시 지니고 있다. 비틀림 진동을 측정하는 방법으로는 레이저 각변위계(torsional laser vibrometry), 스트레인게이지 등의 방식이 있다. 최근 비틀림 모달 테스트를 다룬 연구로는 전기모터 가진-레이저 각변위계 측정을 이용한 연구⁽¹⁾와 구조물에 브래킷을 설치한 후 임팩트 해머 가진-가속도계 측정을 이용한 예⁽⁷⁾가 보고된 바 있다.

이 연구에서는 원통형 구조물의 비틀림 모달 테스트를 위해 자기변형(magnetostriction)^(8,9)을 이용한 새로운 트랜스듀서를 제안하고, 이를 이용하여 모달 테스트를 수행하였다. 이 트랜스듀서는 종진동 및 굽힘 진동을 배제한 채 비틀림 변형만을 효율적으로 가진 및 측정할 수 있다. 또한 가진점 및 측정점의 설정이 자유로울 뿐만 아니라, 강자성 패치와 솔레노이드 간에 접촉이 필요치 않으므로 비접촉 모달 테스트가 가능하다는 장점이 있다. 무엇보다도, 수십 kHz의 높은 주파수 영역까지도 모달 파라미터의 추출이 가능하다는 점과 구조가 간단하여 저예산으로 구성이 가능하다는 것도 빼 놓을 수 없는 장점이다.

이 연구에서는 자기변형 트랜스듀서를 양단 자유경계조건을 갖는 알루미늄 중공축에 적용하여 비틀림 모달 테스트를 수행하고 고유진동수 및 고유형상을 추출하였다. 마지막으로 시험으로 얻은 결과를 이론해와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 자기변형 효과

강자성 물체가 자기장 아래 놓일 때 자기장의 방향으로 기계적인 변형이 발생하는 것을 Joule 효과라 하며 역 현상을 Villari 효과라고 한다. 이 두 가지 현상을 통틀어 자기변형 효과라 한다. Joule 효과와 Villari 효과는 다음과 같은 식들로 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E^H} + q^* H \tag{1}$$

$$B = \mu^\sigma H + q\sigma \tag{2}$$

여기서 ϵ 는 변형률, σ 는 재료에 가해지는 응력, E^H 는 일정한 자기장이 걸려있을 때의 탄성계수, H 는 자기장 강도, B 는 자속밀도, μ^σ 는 일정한 응력이 작용할 때의 투자율이며 q^* 와 q 는 각각의 Joule 효과와 Villari 효과를 나타내는 계수이다.

자기변형 효과를 트랜스듀서에 응용하는 경우, 압전(piezoelectric) 효과에 비해 비접촉 가진 및 측정이 가능하고, 저렴한 가격으로 제작이 가능하다. 또한 재료가 압전 소자에 비해서 덜 취약하므로 유도 초음파 분야에서 최근 활발히 응용되고 있다.

대표적인 연구로서, 솔레노이드와 축방향 자기장을 공급하는 영구자석을 설치하여 강자성 배관에 종유도초음파(longitudinal guided wave)를 발생시킨 연구가 수행된 바 있다⁽¹⁰⁾. 또한, 배관 표면에 다수의 직사각형 자기변형 패치를 부착하여 배관에 비틀림 유도초음파를 발생시킨 연구가 보고된 바 있다.^(11,12)

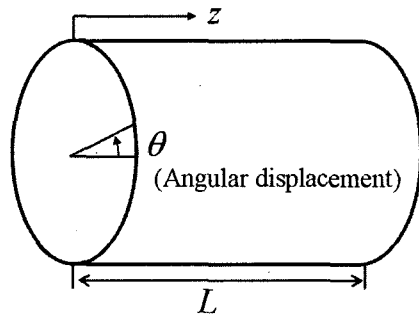


Fig. 1 Coordinate system of a cylindrical beam

자기변형 효과가 액추에이터의 구동 원리로 응용될 때, 코일에 교류 전류가 가해지면 앙페르 법칙(Ampere's law)⁽¹³⁾에 의해 코일 주변에 자기장이 형성되며, Joule 효과에 의해 강자성체에 기계적 응력이 발생하여 대상을 가진다. 반대로 센서의 구동원리로 응용될 때에는, Villari 효과에 의해 강자성 패치의 변형으로부터 자속이 유도되며, 패러데이-렌츠 법칙(Faraday-Lenz law)⁽¹³⁾에 의해 기전력이 발생하여 대상의 변형을 측정할 수 있다.

2.2 원통형 보의 비틀림 진동

일반적으로 원통형 보(Fig. 1)의 비틀림 자유 진동은 다음 미분 방정식으로 표현이 가능하다⁽¹⁴⁾.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[GJ(z) \frac{\partial \theta(z,t)}{\partial z} \right] = I(z) \frac{\partial^2 \theta(z,t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

여기서, G 는 전단계수, J 는 원통형 보 단면의 극 관성모멘트, I 는 보의 단위길이당 질량 극 관성모멘트를 나타낸다.

이 때, 보의 단면이 일정하다고 가정하면, 자유단 경계조건하에서 n 차 모드의 고유진동수는 다음과 같다.

$$f_n = \frac{n\pi}{2L} \sqrt{\frac{GJ}{I}} \quad (4)$$

3. 자기변형 패치 트랜스듀서

강자성체에 바이어스 정적 자기장(bias static magnetic field)과 구동 동적 자기장(exciting dynamic magnetic field)을 서로 수직으로 인가하면 강자성체가 전단 변형을 한다는 사실이 보고된 바가 있다⁽¹⁵⁾. 이 연구에서는 이러한 현상을 이용하여 비자성(non-ferromagnetic) 원통형 구조물에 비틀림 변형을 발생시키고 측정할 수 있는 자기변형 트랜스듀서를 제안하였다.

제안한 자기변형 패치 트랜스듀서⁽¹⁶⁾는 두 개의 강자성체 패치, 바이어스 자기장 발생을 위한 두 개의 영구자석 및 솔레노이드로 구성되며, Fig. 2는 트랜스듀서의 개념도를 보여주고 있다. 먼저 접착제나 테이프 등을 이용하여 강자성 패치를 대상에 붙인

후, 패치에 바이어스 정적 자기장을 공급하기 위하여 영구자석을 각각 패치 사이의 공극에 설치하였다. 이 때 영구자석으로부터 공급된 자기장은 Fig. 2(b)에서처럼 대상의 원주방향으로 패치를 통과하며 흐르게 된다. 그리고 나서 솔레노이드를 통해 패치에 동적 자기장을 축방향으로 걸어주면 강자성 패치가 전단 변형을 하게 되어⁽¹⁵⁾ 대상 보에 비틀림 진동을 유발 시킨다.

반대로 대상이 비틀림 변형을 겪을 때, 부착된 강자성 패치 역시 전단 변형을 한다. 이러한 패치의 전단 변형은 바이어스 정적 자기장과 상호 작용하여 축방향으로 자기장을 유도하고⁽¹⁵⁾, 유도된 축방향 자기장은 솔레노이드에 기전력을 발생시키므로 솔레노이드의 양단에 걸리는 전압차를 측정하여 대상의 비틀림 변형량이 측정 가능하다.

이 연구에서는 강자성체 패치로서 Carpenter사의 Hiperco50HS⁽¹⁷⁾를 2개의 36 mm × 19 mm의 직사각형 형상으로 가공하여 사용하였다. 영구자석으로는 3 mm × 3 mm × 20 mm의 네오디뮴 자석을 사용하였고, 솔레노이드는 직경 0.3 mm의 에나멜선을 100회 감아 사용하였다.

제안한 자기변형 패치 트랜스듀서를 비틀림 가진

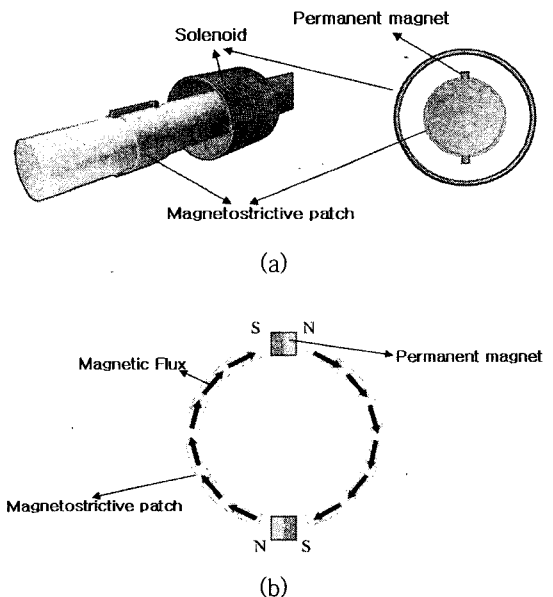


Fig. 2 Magnetostrictive patch transducer for torsional vibrations; (a) schematic diagram, (b) the flow of magnetic flux

기로 적용하는 경우, 앙페르 법칙에 따르면 강자성 패치에 걸리는 자기장의 세기(H)는 솔레노이드에 흐르는 전류(i_e)에 크기에 비례한다.

$$H(t) \propto i_e(t) \quad (5)$$

이때 자기변형에 의해 강자성체에 발생하는 전단응력이 인가된 자기장의 세기에 비례한다고 가정하면, 트랜스듀서에 의해서 대상에 발생하는 가진 비틀림 모멘트(m_i)는 솔레노이드 입력전류의 크기에 비례하므로 다음과 같은 관계로 표현할 수 있다.

$$m_i(z, t) \propto i_e(t) \quad (6)$$

반대로, 센서로 사용되는 경우에는, 강자성 패치가 겪는 전단변형률($\partial\theta/\partial z$)과 이로 인해 축방향으로 유도되는 자속밀도(B)가 비례한다고 가정할 수 있다.

$$B(t) \propto \frac{\partial}{\partial z} \theta(z, t) \quad (7)$$

이 때 패러데이-렌츠 법칙에 따라 솔레노이드 양단에 걸리는 전압차(v_s)를 계산하면, 다음과 같이 대상의 각변위의 함수로 표현이 가능하다.

$$v_s(t) \propto \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial z} \theta(z, t) \quad (8)$$

4. 비틀림 진동 시험

앞서 제안한 자기변형 패치 트랜스듀서(Fig. 2)를 양단 자유 경계조건을 갖는 알루미늄 재질의 중공축(외경 25 mm, 두께 1 mm, 길이 1 m)의 비틀림 모달 테스트에 적용하였다. 식 (4)를 이용하면 축의 비틀림 기본 고유진동수는 $f_1=1554$ Hz로 계산된다. 또한 각변위의 비틀림 모드 형상은 아래 식과 같이 표현이 가능하다.

$$\theta_n(z) = \cos\left(\frac{n\pi}{L} z\right) \quad (9)$$

비틀림 진동의 가진, 및 측정을 위해 Fig. 3(a)와 같이 두 개의 트랜스듀서를 각각 축에 가진/수신용

으로 설치하였다. 식 (6,8)에 따라서 가진 비틀림 모멘트의 측정을 위해 가진 트랜스듀서에서 입력 전류를, 수신 전단변형률의 측정을 위해 수신 트랜스듀서에 출력 전압을 계측하였다. Fig. 4는 측정된 가진부 입력 전류(i_e) 신호와 수신부 출력 전압(v_s) 신호의 한 예를 보여준다.

각각 측정된 가진 입력 전류(i_e)를 '입력', 수신 출력 전압(v_s)을 '출력'으로 하여 주파수 응답함수(frequency response function, FRF)를 구하면, 이 때의 주파수 응답함수는 식 (6,8)에 따라 비틀림 모멘트에 대한 비틀림 변형률($\partial\theta/\partial z$)의 관계를 표현하게 된다.

$$FRF = \frac{V_s(\omega)}{I_s(\omega)} \propto j\omega \frac{\frac{\partial}{\partial z} \Theta(\omega)}{M_i(\omega)} \quad (10)$$

Fig. 5는 식 (10)에 따라서 시험 대상 축을 Pt.9에서 가진, Pt.14에서 수신한 신호를 이용하여 주파수 응답 함수를 구한 결과이다. 계산된 주파수 응답 함수

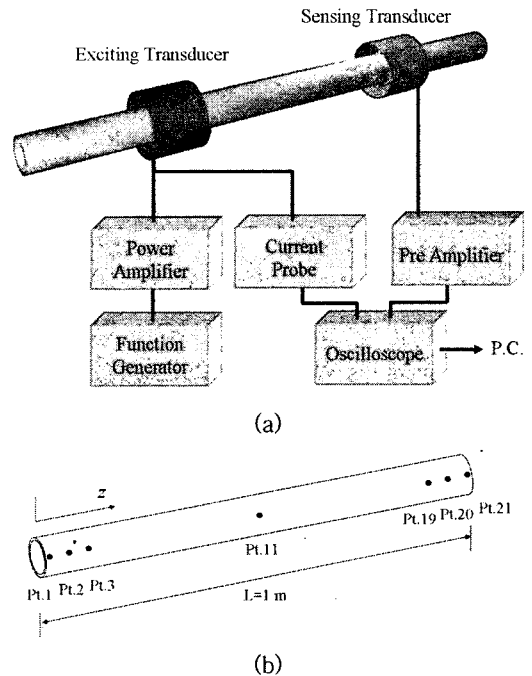


Fig. 3 (a) Experimental setup for torsional modal testing using the present magnetostrictive transducers. (b) Exciting and sensing points on the shaft

수는 피크가 매우 뚜렷한 전형적인 모달 테스트링의 주파수 응답함수의 양상을 보임을 확인할 수 있다. 동일한 방식으로 가진점을 Pt.14에 고정된 상태에서 수신점을 이동해 가면서(Fig. 3(b) 참조) 각각의 경우에 대하여 주파수 응답 함수를 구하였다. 이렇게 얻은 주파수 응답 함수를 이용하여 피크추출(peak picking)법⁽¹⁸⁾으로 고유주파수와 모드 형상을 추출한 결과를 각각 Table 1 및 Fig. 6에 나타냈다.

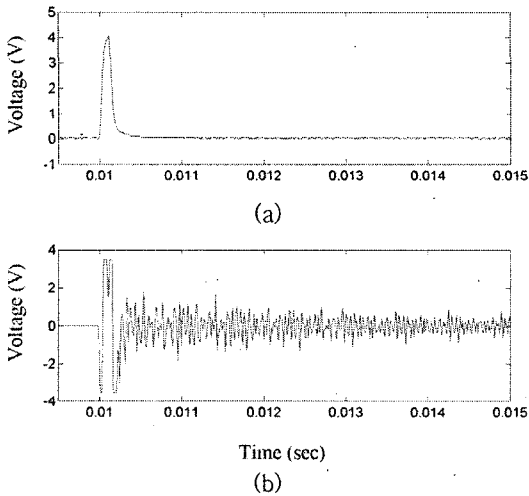


Fig. 4 The measured time domain signal when excited at Pt.6 and sensed at Pt.14. (a) The input signal for torsional excitation to the shaft which is measured with the current probe at the exciting solenoid. (b) The output signal for torsional measurement which is measured at the sensing solenoid

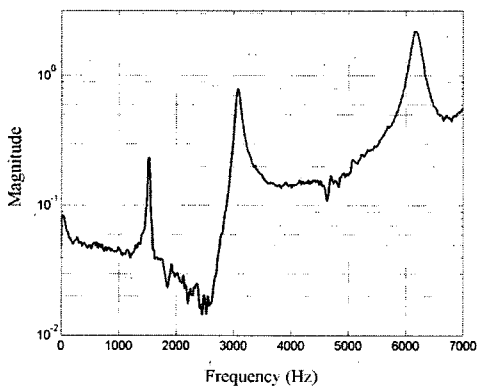


Fig. 5 The frequency response function when excited at Pt.6 and sensed at Pt.14

Table 1에서 이 실험을 통하여 추출한 고유주파수의 값과 식 (4)에서 얻은 이론값을 비교하였다. 또한 Fig. 6은 실험적으로 얻은 모드 형상을 계산한 모드 형상의 이론해와 비교한 것이다. 이때, n 차 모드에서 측정된 전단변형율의 이론적 모드 형상은 식 (8)와 식 (9)로부터 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$v_n(z) = \sin\left(\frac{n\pi}{L}z\right) \quad (11)$$

Table 1과 Fig. 6의 결과를 통해서 이 연구에서 제안한 방식으로 추출한 비틀림 모달 파라미터가 이론해와 잘 일치함을 알 수 있다. 이상의 결과를

Table 1 The torsional natural frequencies theoretically calculated and experimentally acquired with the present magnetostrictive patch transducers

	Theoretical results (Hz)	Experimental results (Hz)	Error
1 st	1554	1536	1.2 %
2 nd	3108	3077	1.0 %
3 rd	4662	4654	0.2 %
4 th	6216	6120	1.5 %
5 th	7770	7750	0.3 %

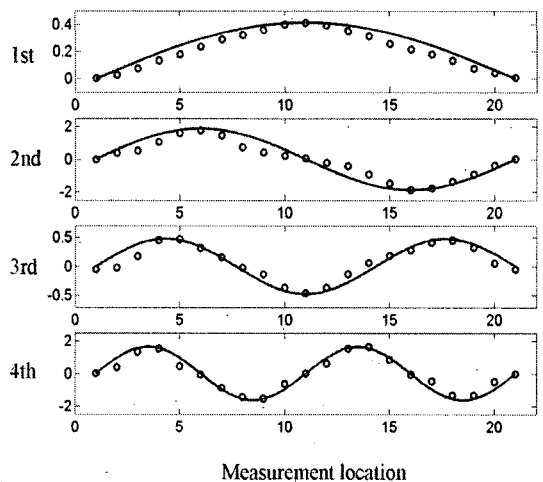


Fig. 6 The torsional mode shapes circles: experimentally acquired with the present magnetostrictive transducer, solid lines: theoretically calculated

통해 자기변형 패치 트랜스듀서와 이를 이용한 비틀림 모달 테스트의 타당성을 검증할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 원통형 구조물에 비틀림 변형을 발생시키고 측정할 수 있는 새로운 트랜스듀서를 제안하고, 이 트랜스듀서를 적용하여 비틀림 모달 테스트를 수행하였다. 제안한 트랜스듀서는 자기변형 현상을 원리로 이용한 것으로서, 기존의 방식으로는 수행하기 까다로운 비틀림 모달 테스트를 비접촉, 저예산으로 수행할 수 있도록 해 준다. 뿐만 아니라 가진/수신점 설정이 자유롭고, 높은 주파수 영역까지 측정이 가능하다는 점 등 기존의 트랜스듀서가 가지고 있는 많은 한계를 극복하였다. 이 연구에서는 제안한 트랜스듀서를 이용하여 알루미늄 중공축에 대한 비틀림 모달 테스트를 수행하여 고유주파수와 모드 형상을 추출하였다. 이렇게 얻은 모달 테스트 결과가 이론해와 매우 일치함을 보임으로서 제안한 방식의 타당성을 검증하였다. 이 연구에서 제안한 비틀림 자기변형 패치 트랜스듀서는 캘리브레이션 (calibration), 정량화 등 아직 개선하여야 할 부분이 많지만 비틀림 진동 가진 및 측정을 위한 획기적인 수단을 제공함으로써, 향후 비틀림 모달 테스트 분야에 새 지평을 열 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 사업(과제번호: 2005-022)의 지원을 받은 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Drew, S. J. and Stone, B. J., 2005, "Torsional Damping Measurement for a Gear Box", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 19, No. 5, pp. 1096 ~ 1106.

(2) Sasida, T. and Kenjo, T., 1993, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Oxford University Press, Oxford.

(3) Kim, J. O. and Kwon, O. S., 2003,

"Vibration Characteristics of Piezoelectric Torsional Transducers", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 264, No. 2, pp. 453 ~ 473.

(4) Kim, J. H., Kim, J. H. and Chung, D. D., 2005, "Research for Stepping Motor Using Piezoelectric Torsional Actuator", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 499 ~ 505.

(5) <http://www.corad.com>

(6) Simpson, H. M. and Pearson, J., 1979, "Simple Apparatus for Measuring the Dynamic Shear Modulus of Cylindrical Specimens", *Reviews in Scientific Instrumentation*, Vol. 50, No. 4, pp. 418 ~ 420.

(7) Zhu, W. D. and Emory, B. H., 2005, "On a Simple Impact Test Method for Accurate Measurement of Material Properties", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 287, pp. 637 ~ 643.

(8) Borzorth, R. M., 1993, *Ferromagnetism*, Piscataway, N. J.: IEEE Press.

(9) Jiles, D. C., 1995, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman & Hall, London.

(10) Kwun, H. and Bartels, K. A., 1995, "Experimental Observation of Wave Dispersion in Cylindrical Shells via Time-frequency Analysis", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97, No. 6, pp. 3905 ~ 3907.

(11) Kim, Y. Y., Park, C. I., Cho, S. H. and Han, S. W., 2005, "Torsional Wave Experiments with a New Magnetostrictive Configuration", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 117, No. 6, pp. 3459 ~ 3468.

(12) Cho, S. H., Park, C. I. and Kim, Y. Y., 2005, "The Effects of the Orientation of the Magnetostrictive Nickel strip on the Torsional Wave Transduction Efficiency in Cylindrical Waveguides", *Applied Physics Letters*, 86, pp. 244101 ~ 244103.

(13) Griffiths, D. J., 1999, "Introduction to Electrodynamics", 3rd edn, Prentice Hall International, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

(14) Meirovitch, L., 1986, "Elements of Vibration Analysis", 2nd ed., McGraw-Hill,

Singapore.

(15) Thompson, R. B., 1978, "Generation of Horizontally Polarized Shear Waves in Ferromagnetic Materials Using Magnetostrictively Coupled Meander-coil Electromagnetic Transducers", Applied Physics Letters, Vol. 34, No. 2, pp. 175 ~ 177.

(16) Kim, Y. Y., Cho, S. H., Han, S. W. and

Park, C. I., 2005, "Apparatus and Method for Generating and Sensing Torsional Vibrations Using Magnetostriction", Patent Pending to Korea, S. N. 10-2005-0111033

(17) [http://www.cartech.com](http://www.carttech.com)

(18) Ewins, D. J., 1984, "Modal Testing: Theory and Practice", Research Studies Press, Letchworth.