

자기 변형 패치를 이용한 비자성 배관의 비접촉 종진동 모달 테스트링

Non-contact Longitudinal Modal Testing of a Non-ferromagnetic Pipe Using Magnetostrictive Patches

박 찬 일* · 한 순 우** · 김 윤 영†

Chan Il Park, Soon Woo Han and Yoon Young Kim

(2007년 9월 12일 접수 ; 2008년 2월 5일 심사완료)

Key Words : Non-contact Modal Testing(비접촉 모달 테스트링), Longitudinal Vibration(종진동), Magnetostrictive Patch(자기 변형 패치)

ABSTRACT

Non-contact modal testing for longitudinal modes of a pipe is discussed in this work. The suggested method can generate and measure longitudinal vibrations without mechanical contact by using the coupling phenomenon between deformation and magnetic field, known as the magnetostrictive effect. This effect has been used to generate and measure ultrasonic waves, but seldom used to deal with audible vibrations. In this investigation, the validity of the developed method in a typical vibration frequency range is checked with an Inconel pipe being used in nuclear power plants.

1. 서 론

종진동은 길이가 긴 보 또는 배관이 길이 방향의 힘을 받을 때 나타나는 진동 양상으로서 많은 산업적, 과학적 관심의 대상이다. 종진동에 대해서는 균일 단면 보 혹은 불균일 단면 보의 이론적 종진동 해에 대해서 많은 연구가 이루어져 있으나⁽¹⁻⁴⁾, 실험적인 접근은 활발하지 않다. 이는 보 또는 배관 구조물의 특성상 종진동을 발생 또는 측정하거나 임의의 가진점/측정점을 설정하여 모달 테스트링을 수행하는 것이 용이하지 않기 때문이다. 또한 고온 배관, 또는 단열 배관 같이 압전 소자 형식의 변환기 또는 스트레인 게이지 등의 전통적인 접촉식 센서를 사용하기 어려운 경우에는 실험적인 접근은 더 어렵게 된다⁽⁵⁾.

이 연구에서는 보 또는 배관에서 비접촉으로 종진동을 발생시키고 측정하여 종진동모드에 대한 모달 테스트링을 수행하는 방법을 제시하고자 한다. 이 연구에서는 자기 변형 효과(magnetostrictive effect)를 이용하여 종진동을 발생시키고 측정하였다. 자기 변형 효과는 자성체의 기계적 변형과 자기장의 연성 효과를 의미한다. 자성체에 자기장을 인가하면 자성체가 기계적 변형을 일으키며, 그 반대로 자성체의 기계적 변형은 주변 자기장의 변화를 유도한다. 따라서 측정 대상과 물리적으로 접촉하지 않고도 탄성파 또는 진동을 발생시키고 측정할 수 있다.

측정 대상이 자성체에 국한된다는 점은 그 동안 자기 변형 현상의 단점으로 많이 지적되어 왔다. 그러나 최근에 자기 변형성이 큰 니켈 등을 이용함으로써 비자성체에도 자기 변형 효과를 이용하는 연구가 활발히 이루어지고 있다⁽⁶⁻⁹⁾. 이 연구에서도 비자성 배관을 대상으로 하여 자기 변형 패치를 이용하여 종진동을 발생시키고 측정하였다.

이 논문에서는 우선 자기 변형 현상을 이용하여

† 교신저자 : 정희원, 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
E-mail : yykim@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7130, Fax : (02)872-5431

* 정희원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

** 한국철도기술연구원

종진동을 발생시키고 측정하는 원리에 대해 간략히 설명하였다. 이를 바탕으로 비자성체 배관에서 비접촉으로 종진동을 발생시키고 측정하는 실험을 수행하여 제안한 방식의 타당성을 검증하였다. 여기에서 나아가 배관의 종진동모드에 대한 모달 테스트를 수행하여 종진동의 고유진동수와 모드 형상을 실험적으로 측정하였다.

2. 종진동의 발생 및 측정 원리

서론에서 언급한 바와 같이 자성체에 자기장을 인가할 경우, 자성체는 자기장이 인가된 방향으로 변형한다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 길이 L 인 자성체에 길이 방향의 자기장 H 를 가하면, 자성체의 길이는 ΔL 만큼 증가하게 되며, 이것이 자기 변형 현상을 이용한 종진동 발생의 원리가 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

$$\varepsilon^* = \frac{\sigma}{E} + qH \quad (1)$$

여기서 ε^* 는 자기 변형 효과가 포함된 변형률(strain)을 의미하며, σ 는 응력(stress), E 는 탄성계수, q 는 자기 변형 계수, H 는 자기장의 강도(magnetic field intensity)를 의미한다. 이에 따르면 예응력(pre-stress)이 걸려 있지 않은 상태에서 재료의 변형률은 외부에서 인가되는 자기장의 강도에 비례한다고 가정할 수 있다. 반대로 자성체에 응력이 전파하는 경우에는 이로 인해 자성체 주변의 자속 밀도(magnetic flux density) B 가 변화하는데 통상 이를 역(inverse) 자기 변형 현상이라고 부르며

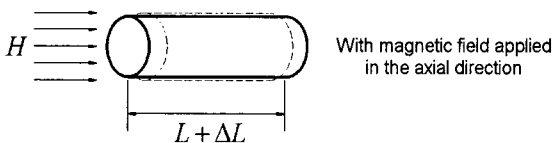
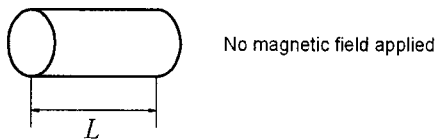


Fig. 1 Schematics for the generation of longitudinal vibrations using magnetostrictive effect

종진동 측정의 원리가 된다(식 (2) 참조).

$$B = \mu H + q' \dot{\sigma} \quad (2)$$

여기서 μ 는 공기의 투자율(permeability), q' 는 역 자기 변형 계수이다.

자기 변형 현상에 의해 변화한 자속 밀도를 솔레노이드로 감지할 경우, 솔레노이드에는 다음과 같이 표현되는 유도 기전력이 발생한다⁽¹¹⁾.

$$V(z, t) = -N \frac{d}{dt} \int_A B dA \quad (3)$$

여기서 N 은 솔레노이드의 권선 수, A 는 솔레노이드 내부 단면적을 의미한다.

식 (2)에서의 μ 와 q' 은 계수이며 H 는 정자기장 이므로 시간에 관계없이 일정하다고 가정하면 식 (3)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} V(z, t) &= -N \frac{d}{dt} \int_A (\mu H + q' \dot{\sigma}) dA = -N \frac{d}{dt} \int_A q' \dot{\sigma} dA \\ &= -N \frac{d}{dt} \int_A E q' \varepsilon dA = -N E q' \frac{d}{dt} \int_A \frac{dw}{dz} dA \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ε 은 종진동에 의한 변형률을 의미한다. 또한 축 방향의 좌표를 z , z 방향의 변위를 w 라고 놓았다. 식 (4)에 따르면 자기 변형 현상에 의해 측정되는 종방향 진동은 종방향 변형률의 시간 미분값에 비례하게 된다.

자기 변형 효과를 비자성체에서 구현하고자 하는 경우에는 자기 변형 패치를 비자성체에 부착시켜야 한다. 이 연구에서는 Hiperco 50HS[®]를 자기 변형 패치로 채택하였는데, 이는 기존의 연구에서 많이 사용되는 니켈에 비해 2배 이상의 자기 변형성을 갖고 있어서⁽¹²⁾ 큰 자기 변형 신호의 발생 및 측정에 유리하다.

3. 실험을 통한 종진동의 발생 및 측정

앞 절에서 제안한 원리를 바탕으로, 이 절에서는 직선형 배관에서 종진동을 발생시키고 측정할 결과를 제시한다. 실험에 사용된 배관은 비자성체인 인

코넬로서 내열성, 내부식성이 우수하여 발전소의 열교환기에 사용된다. 여기에서는 외경 20 mm, 두께 1.5 mm, 길이 1000 mm의 직선 배관이 사용되었다. 배관의 양단을 탄성줄로 지지하여 양단 자유단 상태를 구현하였다.

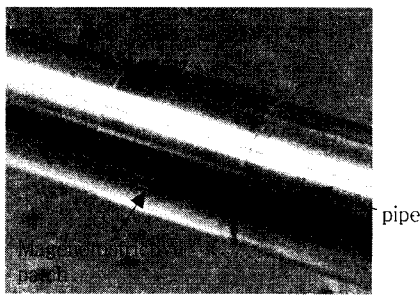
3.1 실험 장치의 구성

제한한 방식에 의해 종진동을 발생시키기 위해 우선 Fig. 2(a)와 같이 진동 발생부와 측정부에 폭 18 mm, 두께 0.2 mm의 Hipercó 50HS 패치를 원주 방향으로 감았다. 이 경우, 패치와 배관 각각의 변형이 서로에게 최대한 전달되도록 밀착시키는 것이 매우

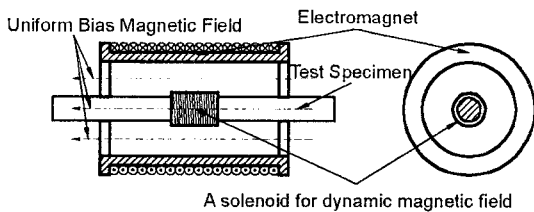
중요하다. 패치를 감은 후, Fig. 2(b)와 같이 진동 발생부 및 측정부 모두에 솔레노이드를 설치하였다. 내부 솔레노이드는 내경 26 mm, 권선수 64회이며, 외부 솔레노이드는 내경 40 mm, 권선수 1000회이다. 진동 발생부는 배관의 끝 단에서 400 mm 떨어진 지점에, 진동 측정부는 끝 단에서 750 mm 떨어진 지점에 각각 설치하였다. 외부의 솔레노이드는 전자석으로서, 정전압 공급 장치에 연결되어 내부에 축 방향의 정자기장을 형성해 준다. 이로 인해 패치는 축 방향으로 예변형되어 자기 변형 효과를 최대화시키게 된다. 또한 축 방향의 정자기장으로 인해 다른 진동모드를 배제하고 종진동만을 측정 또는 발생시킬 수 있는 장점이 있다⁽¹³⁾.

전자석과 축 사이에 설치되어 있는 또 다른 솔레노이드는 패치에 동자기장을 공급하여 진동을 발생시킨다. 진동 측정부의 솔레노이드는 패치의 기계적 변형이 유발시킨 자기장의 변화를 감지하게 된다. 진동 발생부의 솔레노이드는 파워 앰프 LVC 5050에 연결되어 있으며, 이 파워 앰프는 함수 발생기로부터 입력된 기준 신호를 증폭시켜 솔레노이드에 공급한다. 진동 측정부의 솔레노이드가 감지한 신호는 전압 증폭기 SRS SR560에서 증폭되어 오실로스코프 Lecroy LT354M에 입력된다.

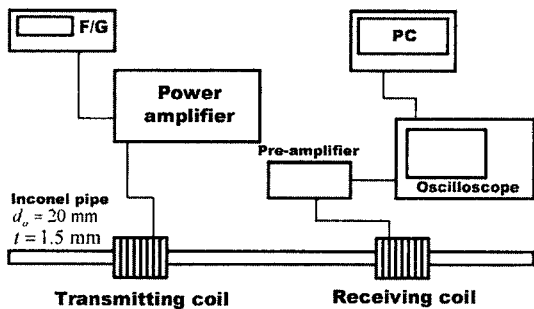
또한 진동 발생부의 솔레노이드에 공급되는 전류 신호는 전류 탐촉자(probe)를 이용하여 오실로스코프에 입력된다. 오실로스코프는 100 ks/s의 속도로 신호를 샘플링하여 저장하며, PC에서 주파수 응답 함수 및 모달 파라미터를 추출하게 된다.



(a) The magnetostrictive patch attached to a pipe



(b) Schematic diagram of solenoids for static magnetic field and dynamic magnetic field

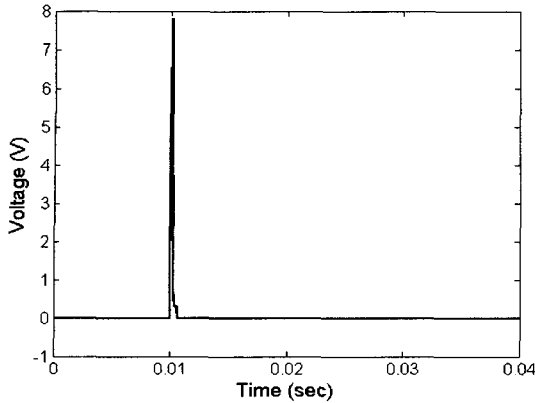


(c) Schematic diagram for the generation and measurement of longitudinal vibrations using the suggested method

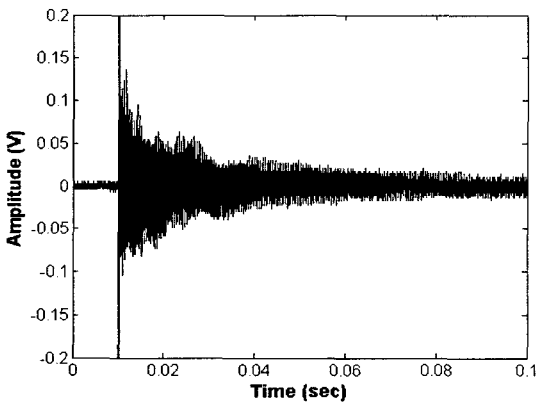
3.2 종진동 신호의 발생 및 측정

진동 신호를 발생시키기 위해 함수 발생기에서 폭 120 μ s의 사각파를 발생시켜 진동 발생부 측 솔레노이드에 입력하였다. Fig. 3(a)에는 전류 탐촉자에서 측정된 입력 파형을 나타내었다. 그림과 같은 사각파가 입력될 경우 발생된 자기 변형 신호는 광대역(wide-band) 주파수 특성을 갖게 된다. 측정부에서 얻은 진동 신호는 Fig. 3(b)에 나와 있다. 이 진동 신호의 선두에 나와 있는 펄스 형태의 신호는 진동 발생부에 입력된 신호에 의해 상호 유도(mutual induction)된 전자기 신호로서 진동 신호가 아니다. 따라서 뒤에 언급할 주파수 응답 함수를 구할 때에는 이 펄스 부분을 제외한 구간에서 계산을 수행하였다.

Fig. 2 Experimental setup for longitudinal vibration test by the proposed transducer



(a) Input signal



(b) Measured vibration signal

Fig. 3 Example of input and output signals measured by the proposed transducer

3.3 종진동모드의 모달 파라미터 추출

제안한 방법에 의해 종진동을 발생시키고 측정할 수 있음을 확인하고, 이를 바탕으로 종진동모드의 모달 테스트를 수행하였다.

(1) 주파수 응답 함수의 계산 및 고유진동수의 추출

측정된 종진동 신호를 이용하여 모달 파라미터를 구하기 위해서는 우선 주파수 응답 함수를 구해야 한다. 주파수 응답 함수의 잡음을 최소화하기 위해 동일한 지점에서 총 5회 신호를 구하여 평균하였다. 이 경우 배관의 양단을 탄성줄로 지지하여 양단 자유단 상태를 구현하였다. 구해진 주파수 응답 함수의 예를 Fig. 4에 보드(Bode) 선도로 0~12000 Hz 구간에 대해 나타내었다. 이 그림에서 고유진동수 성분이 뚜렷하게 구해지는 것을 알 수 있다(원형 점

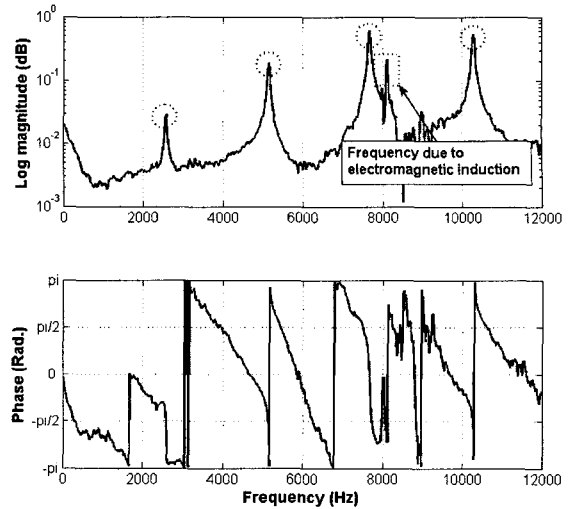


Fig. 4 Frequency response function of a longitudinal vibration measured by the suggested method

Table 1 Comparison of natural frequencies by the experiments and by the theory

	1	2	3	4
Exp.	2580	5149	7678	10278
Theo.	2516	5031	7547	10062

선). 8300 Hz 부근에 사각 점선으로 표시된 주파수 성분은 고유진동수가 아니고 입력 신호의 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 길이 120 μs의 사각파를 입력 신호로 주었으므로, 입력 신호의 자기스펙트럼 밀도 함수(auto-spectral density function)는 $f=1/(120 \mu s)=8333 \text{ Hz}$ 에서 최소화된다. 따라서 주파수 응답 함수에는 8333 Hz에서 크게 나타나는 성분이 존재하게 된다.

이런 과정을 통하여 고유진동수를 구할 수 있으며, 이를 식 (5)로 표현되는 배관의 이론적인 종방향 고유진동수⁽¹⁴⁾와 비교하여 Table 1에 정리하여 놓았다. 이때 배관의 탄성 계수는 인코넬 600 배관의 물성치⁽¹⁵⁾를 이용하여 214.4 GPa, 밀도는 8470 kg/m³로 입력하였다.

$$f_i = \frac{i\pi}{2\pi L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (i=1,2,3,\dots) \quad (5)$$

(L : 배관의 길이)

실험을 통해 구한 고유진동수가 이론적인 고유진동수에 매우 유사하므로, 이 연구의 방법이 종방향의 고유진동수를 구하기에 적합함을 알 수 있다.

(2) 종방향 고유모드의 추출

고유모드를 추출하기 위해 배관의 길이 방향으로 50 mm 간격마다 등간격으로 가진점을 설정하고, 끝단에서 300 mm 떨어진 지점에 진동 측정부를 설치하여 신호를 측정하였다. 이 경우 Hiperco 50HS 패치의 부착이 종방향 진동모드에 주는 영향을 최소화하기 위해, 한 지점의 가진이 끝난 후에는 패치를 탈거하고 다음 가진점으로 이동시켜 재부착하는 작업을 반복하였다. 가진점 별로 주파수 응답 함수를 구하고, 피크 추출(peak-picking) 방법을 이용하여, 각 지점마다의 모드 벡터 값을 계산하였다.

통상의 이론적인 종방향의 고유모드는 식 (6)으로 표현된다⁽¹⁶⁾.

$$W(z) = \cos \frac{i\pi z}{L} \quad (i=1,2,3\dots) \quad (6)$$

그러나 2절에서 언급한 바와 같이 자기 변형 효과를 이용하여 얻어진 증진동 신호는 종방향의 변형률에 비례한다. 따라서, 이 경우의 고유모드는 다음 식 (7)과 같이 표현되어야 한다.

$$\tilde{W}(z) = -\frac{i\pi}{L} \sin \frac{i\pi z}{L} \quad (7)$$

Fig. 5에는 제안한 방법을 이용하여 실험적으로 얻은 종방향 모드 형상을, 식 (7)에 의해 구한 이론적인 모드 형상과 정규화하여 비교하여 놓았다. 그림에서 점이 있는 실선은 실험적인 모드 형상을, 원은 이론적인 모드 형상을 나타낸다. 이를 보면 제시한 방법에 의해 구해진 모드 형상 이론적인 모드 형상에 근접하다는 것을 알 수 있다. 그러나 일부 모드에서는 부분적으로 이론적인 모드 형상과 다소의 차이를 보인다.

그 이유는 다음의 두 가지 정도로 생각해 볼 수 있다. 우선 (i) 제안한 방법이 전체적인 모드를 가진 하기에 충분한 에너지를 발생시키지 못할 수 있다는 점과 (ii) 가진점을 이동할 때마다 자기 변형 패치를 탈거하고 새로이 부착하는 과정에서 배관과의 접촉 상태가 달라질 수 있다는 점을 생각해 볼 수 있다. 이러한 점은 추후에 진행할 후속 연구를 통해 개선

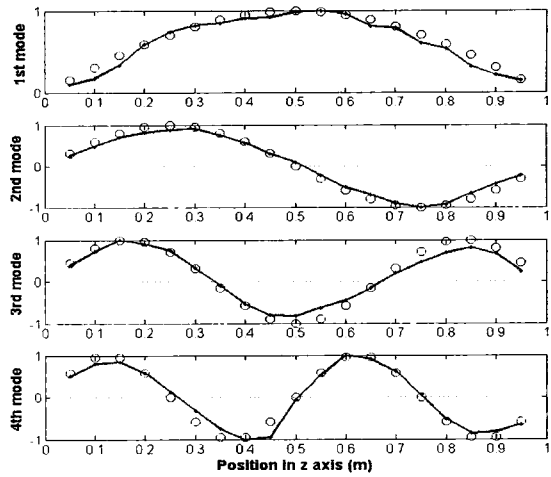


Fig. 5 Mode shapes measured by the suggested method (solid lines with dots) and theoretical mode shapes (hollow circles)

할 수 있으리라 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 비접촉으로 배관에서 증진동을 발생시키고 측정할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 자기 변형 현상을 이용하므로 측정 대상과 접촉하지 않아도 되며, 자기 변형 패치를 부착함으로써 비자성체 배관에도 적용 가능한 장점이 있다. 증진동의 발생 및 측정에 관한 이론적인 배경을 제시하였고, 이를 이용하여 비자성 배관에서 비접촉으로 증진동을 발생시키고 측정할 수 있음을 보였다. 제안한 방법을 이용하여 비자성 배관의 증진동 모달 테스트를 수행하였으며, 이로부터 추출한 고유진동수 및 고유모드가 이론적인 값과 부합함을 확인하였다. 향후 제안한 방법을 이용하여 단일 배관 또는 수중 배관 등의 증진동 특성 파악에 관한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

이 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 사업(과제번호: 2007-019)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Meirovitch, L., 1986, Elements of Vibration Analysis, McGraw-Hill, New York.
- (2) Weaver, W. et al., 1990, Vibration Problems in Engineering, John Wiley & Sons, New York.
- (3) Kumar, B. M. and Sujith, R. I., 1997, "Exact Solutions for the Longitudinal Vibration of Non-uniform Rods", J. Sound and Vibration, Vol. 207, No. 5, pp. 721~729.
- (4) Li, Q. S., 2000, "Free Longitudinal Vibration Analysis of Multi-step Non-uniform Bars Based on Piecewise Analytical Solutions", Engineering Structures 22, pp. 1205~1215.
- (5) Kim, Y. Y., et al., 2003, "Application of Magneto-mechanical Sensor in Modal Testing", J. Sound and Vibration, Vol. 268, No. 4, pp. 799~808.
- (6) Kwun, H., et al., 2002, "Method and Apparatus Generating and Detecting Torsional Wave Inspection of Pipes or Tubes", US Patent No: US 6429650 B1.
- (7) Kim, Y. Y., et al., 2005, "Torsional Wave Experiments with a New Magnetostrictive Transducer Configuration", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 117, No. 6, pp. 3459~3468.
- (8) Cho, S. H., et al., 2005, "Damage Detection in a Plate Using an Orientation-adjustable Magnetostrictive Transducer", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 81~86.
- (9) Cho, S. H., et al., 2007, "High-frequency Torsional Modal Testing of a Long Cylinder by Magnetostriction", Appl. Phys. Lett. 91, 071908.
- (10) Clark, A. E., 1980, Ferromagnetic Material Vol. I, North-Holland, Amsterdam.
- (11) Kim, Y. Y., et al., 2002, "Non-contact Damage Detection of Rotating Shafts by Using the Magnetostrictive Effect", Trans. KSME A, Vol. 26, No. 8, pp. 1599~1607.
- (12) <http://www.carttech.com>
- (13) Kwun, H. and Teller, C. M., 1994, "Magnetostrictive Generation and Detection of Longitudinal, Torsional and Flexural Waves in a Steel Rod", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 96, No. 2, pp. 1202~1204.
- (14) Blevins, R. D., 1995, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Krieger Publishing Co., Malabar.
- (15) <http://www.specialmetals.com>
- (16) Ewins, D. J., 2000, Modal Testing: Theory, Practice and Application, Research Studies Press Ltd., Baldock.