

# 비자성 배관의 비접촉 굽힘 진동 측정을 위한 자기 센서의 개발

## A new magnetic sensor for the non-contact measurement of bending vibrations of non-ferromagnetic pipes

한순우\*·김윤영†

Soon Woo Han and Yoon Young Kim

**Key Words :** Bending vibration(굽힘 진동), Anti-symmetric magnetic field(비대칭 자기장), Non-ferromagnetic pipe(비자성 배관)

### ABSTRACT

This investigation suggests a new non-contact type sensor that can measure flexural vibrations of a non-ferromagnetic pipe. The sensor works on the reversed Lorentz force mechanism; however, anti-symmetric bias magnetic field suggested in this work should be applied to measure bending vibration of a non-ferromagnetic pipe. The importance of the suggested magnetic field is verified by a series of experiments. The sensor is applied to the bending vibration measurement and modal testing of an aluminum pipe and shows satisfactory working performance compared to others.

### 1. 서론

굽힘 진동은 단면에 비해 길이가 긴 배관 및 축에서 많이 발생한다.<sup>(1-3)</sup> 많은 경우, 배관의 굽힘 진동은 가속도계, 스트레인 게이지 등의 센서를 이용하여 측정하고 있다. 그러나, 고온 배관, 단열 배관, 지중 매설 배관 등 기존의 접촉식 센서를 이용하여 굽힘 진동을 측정하기가 곤란한 경우가 있다.

본 논문에서는 기존의 접촉식 센서를 이용하여 굽힘 진동을 측정하기 곤란한 경우에 대해 적용 가능한 새로운 형식의 비접촉식 굽힘 진동 측정 센서를 소개하고자 한다.<sup>(4,5)</sup> 비접촉으로 굽힘 진동을 측정할 수 있는 센서는 이미 레이저 변위계, 와전류식 변위 센서 등이 상용화되어 있다.<sup>(6,7)</sup> 또한 최근 자기 변형(magnetostrictive) 현상을 이용한 비접촉식 센서에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다.<sup>(8-10)</sup> 그러나 레이저 변위계는 단열재 등으로 둘러 쌓이거나 표면이 거친 배관에는 적용하기 곤란하다. 또한 와전류식 센서 또는 자기 변형 센서 등은 측정 대상이 자성체(ferromagnetic)이어야 한다는 단점이 있다. 본 논문의 센서(이하 자기 센서)는 비자성체 배관의 굽힘 진동을 비접촉으로 측정할 뿐 아니라 측정 대상의 사용 환경에 관계

없이 적용 가능하다는 장점이 있다.

뒤에서 자세히 기술하겠지만, 자기 센서는 특정한 형태의 자기장을 공간 상에 형성하고, 솔레노이드를 이용하여 비자성 전도체의 굽힘 진동을 측정할 수 있다.

### 2. 자기 센서의 측정 원리 및 검증

#### 2.1 측정 원리

자기 센서의 측정 원리를 Fig. 1 에 개념도로 나타내었다. 여기에서 비자성 배관의 반경으로의 수직 방향을  $x$  축, 수평 방향을  $y$  축, 배관의 축 방향을  $z$  축으로 설정하였다. 배관의 상/하부에는 크기가 같은 자속 밀도  $B$  가 서로 반대 방향으로 형성되어 있다고 가정한다. 배관의 반경을  $r$  이라 할 때,  $x = \pm r$  인 배관의 상/하부에 있는 입자를 각각  $P, P'$  라고 하자. 배관이 굽힘 진동을 할 경우 배관의 단면 상/하부는 같은 방향의 변위를 갖게 되므로 두 입자  $P$  와  $P'$  또한 같은 방향으로 운동하게 된다. 그림에서와 같이 순간적으로 두 입자가 모두 윗방향으로의 속도  $v$  를 갖는다면, 식(1)로 표현되는 역 로렌츠 힘 작용(reversed Lorentz force mechanism)<sup>(11)</sup>에 의해 상/하부 모두에서 시계 방향으로의 전류 밀도  $J$  가 유도된다.

$$J(t) = v(t) \times B \quad (1)$$

이로 인해 배관의 단면에 전류 폐회로가 형성된다

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

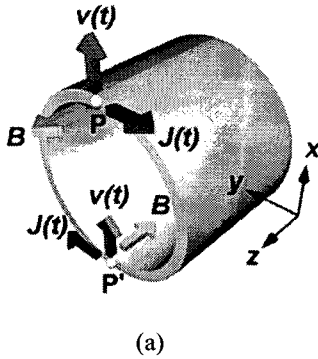


Fig. 1 Illustrations of the working principle of the suggested sensor

이러한 전류 폐회로는 그 내부에 z 방향의 자기장을 발생시키므로 배관의 외곽에 솔레노이드를 감아 놓으면 패러데이-렌츠(Faraday-Lentz) 법칙에 의해 솔레노이드에 유도 기전력이 형성된다. 이에 따라 배관의 굽힘 진동을 측정할 수 있게 되며 이것이 본 연구의 자기 센서의 원리이다. 이 구성에서는 자기장과 전도체 변위의 상호 작용에 의해 신호를 측정하므로, 굽힘 진동의 비접촉 측정이 가능하다.

역 로렌츠 힘 작용을 이용한 탄성과 내지는 진동 신호의 측정엔 전자기 음향 변환기(Electro-Magnetic-Acoustic Transducer: EMAT)의 기본 작동 원리이다. 그러나 기존의 연구 결과에서는 종(longitudinal) 탄성과 또는 비틀림(torsional) 탄성과의 발생 및 측정을 위한 EMAT<sup>(12-14)</sup>가 주로 제시되었으며, 굽힘 진동의 측정을 위한 구성은 아직 보고된 바 없다.

## 2.2 측정 원리의 검증

비자성인 알루미늄 배관의 굽힘 진동을 자기 센서를 이용하여 측정함으로써 측정 원리를 검증하였다. 배관의 양단을 고무줄을 이용하여 자유단 상태에 가깝게 지지하고 배관에 닿지 않도록 센서를 설치하였다(Fig. 2(a) 참조). 사용된 배관은 외경 25 mm, 두께 1.5 mm 이고 길이는 1000 mm 이다. 솔레노이드는 내경 38 mm, 외경 44 mm, 길이 40 mm 의 아크릴 배관의 중앙에 직경 0.3 mm 의 에 나멜선을 64 회 감아서 제작하였다. 센서의 내경이 38mm 이므로 배관이 정지한 경우, 배관과 센서 내면은 평균 6.5 mm 의 간격을 유지한다. 센서를 거치한 상태에서 직경 8 mm 의 강구(steel ball)을 배관 상부 200 mm 높이에서 배관에 자유 낙하시켜 배관에 굽힘 진동을 발생시켰다.

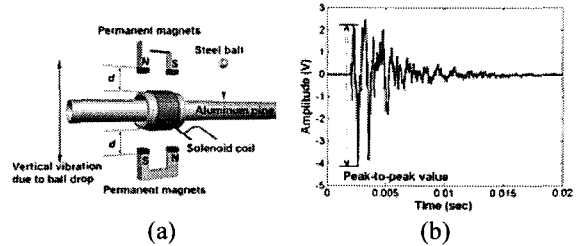


Fig. 2 Ball dropping test with anti-symmetric magnet field (a) Experimental scheme, (b) Voltage output of the solenoid – Bending vibrations can be measured.

본 논문에서 제안하는 측정 방식의 핵심은 자기장의 존재 및 분포 형태이다. 이를 위해 Fig. 2(a)에 나타난 것처럼 센서의 상/하부에 각각 한 쌍의 영구 자석을 서로 반대의 극성을 갖도록 배치하였다. 이 경우 앞 절에서 언급한 바대로 배관의 상/하부에 크기는 같고 서로 반대 방향으로 향하는 자속 밀도가 분포하게 된다. 이렇게 자기장을 부가하면 Fig. 2(b)에 나타난 것처럼 배관의 굽힘 진동을 측정할 수 있다. 이 때 사용한 영구 자석은 Nd-Fe-B 자석으로서 10 mm × 20 mm × 3 mm 의 크기를 갖는다.

Fig. 2(a)에 예시된 것과 다른 자속 밀도 분포 하에서는 굽힘 진동을 측정하기 어렵다. 예를 들어 상/하부에서 같은 방향을 향하는 자속 밀도를 갖도록 자석을 재배치 한 후, 굽힘 진동을 측정해보면, 크기가 매우 미약하고 의미를 알 수 없는 신호가 측정된다. 이는 굽힘 진동을 측정하기 위해서는 본 연구에서 제안하는 자석의 배치가 필수적임을 입증하는 것이다.

## 3. 자기 센서를 이용한 비자성 배관의

### 비접촉 모달 테스트

본 절에서는 제안한 센서를 이용하여 비자성 배관의 모달 테스트를 수행한 결과를 제시하였다. 이를 위한 실험 구성을 Fig. 3(a)에 나타내었다. 앞 절에서 사용한 알루미늄 배관을 그대로 사용하였고, 양단 자유단 상태로 배관을 지지하였다. 모달 테스트를 위해 임팩트 해머 PCB 086C40 을 이용하여 배관을 가진하고, 제안된 센서를 이용하여 응답 신호를 측정하였다. 측정된 응답 신호는 SRS사의 SR 560 을 이용하여 증폭하였다. 가진 신호와 응답 신호는 주파수 분석기 Agilent 35670A 를 이용하여 주파수 분석하였으며, 모드 해석 전용 프로그램인 STAR MODAL 을 이용하여 모달 파라미터를 추출하였다.

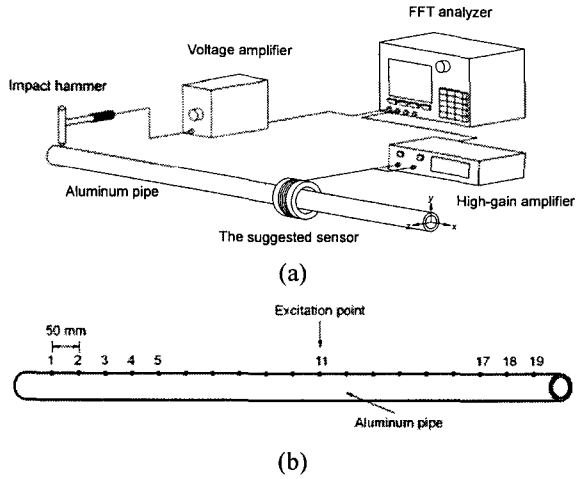


Fig. 3 Schematic diagrams for the modal testing using the suggested sensor (a) Experimental setup, (b) Excitation and measurement points

우선 피복재가 없는 배관에 적용하여 제한한 센서가 모달 테스트에 적용 가능한지 검토하였다. 이후, 같은 배관을 피복재로 둘러 쌓고 모달 테스트를 수행하여 제한한 센서의 비접촉 측정 능력을 검토하였다.

### 3.1 피복되지 않은 배관에 대한 모달 테스트

모달 테스트를 위해 배관의 축 방향으로 50 mm 간격으로 총 19 개소의 측정점을 설정하였다(Fig. 2(b) 참조). 그림에 나타난 11 번 지점에 가진점을 고정하고, 1 번부터 측정점을 옮겨 가면서 주파수 응답 함수를 측정하였다. Fig. 4(a)에는 1, 7, 15 번 지점에서 측정한 주파수 응답 함수를 나타내었다.

자기 센서를 이용하여 측정한 주파수 응답 함수를 검증하기 위해, 동일한 지점에서 가속도계를 이용하여 주파수 응답 함수를 측정하였다. Fig. 4(b)에는 가속도계를 이용하여 측정한 주파수 응답 함수와 자기 센서를 이용하여 측정한 주파수 응답 함수 양자를 비교하였다. 그 결과, 자기 센서를 이용한 경우 약간의 잡음(noise)이 추가되는 것 외에는 문제없이 주파수 응답 함수를 측정할 수 있다.

표 1 에는 두 가지 센서를 이용하여 추출한 고유 진동수를 비교하였다. 자기 센서를 이용하여 측정한 고유 진동수가 약간씩 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 자기 센서가 비접촉으로 신호를 측정할 수 있음에 기인한다고 판단된다. 실험에 사용한 가속도계는 B&K 사의 4393 으로 소형이지만, 접촉식 센서의 특성상 불가피하게 측정 대상에 질량을 추가하여 고유 진동수가 본래보다 미량

이나마 낮게 측정된다. 그러나 자기 센서는 측정 대상에 접촉하지 않으므로 이러한 질량 부과 효과를 주지 않아, 원래의 고유 진동수에 더 가까운 고유 진동수를 추출해 낼 수 있다고 판단된다.

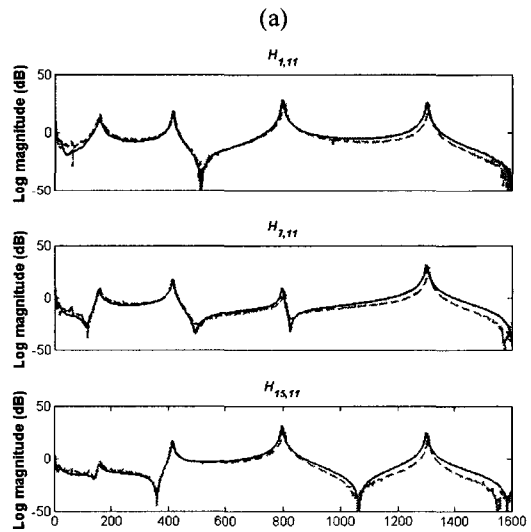
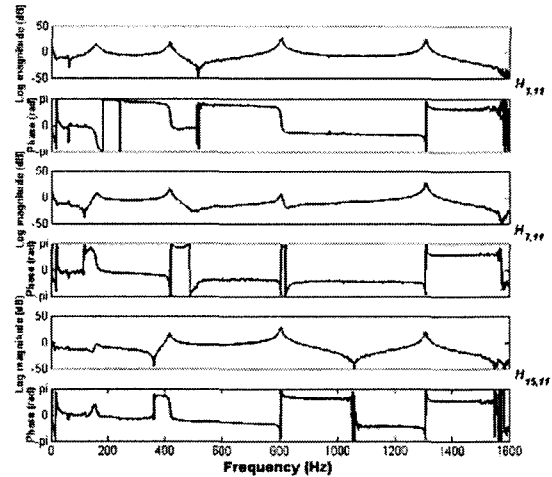


Fig. 4 (a) FRFs of non-insulated pipe measured by the suggested sensor, (b) Comparison of FRFs measured by an accelerometer (solid lines) and by the suggested sensor (dotted lines)

Table I. Comparison of natural frequencies measured by an accelerometer and the suggested sensor

Mode	By accelerometer	By magnetic sensor
1	155.5	156.9
2	414.4	415.4
3	796.8	802.7
4	1299.2	1306.4

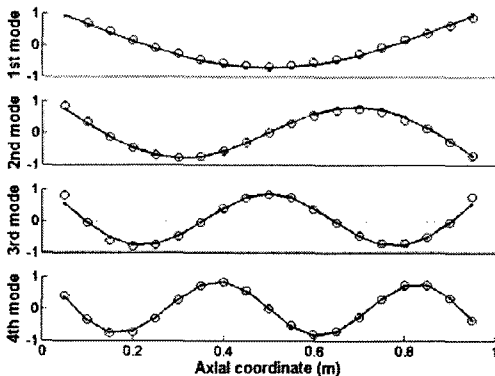


Fig. 5 Mode shapes by the experiments using the suggested sensor (hollow circles) and by the theory (lines with dots)

Table II. MAC of the experimental mode shapes and the theoretical ones

		Theoretical mode shapes			
		1	2	3	4
Experimental mode shapes	1	0.99	0	0.05	0
	2	0	0.99	0	0.05
	3	0.04	0	0.98	0
	4	0	0.03	0	0.98

자기 센서를 이용하여 배관의 모드 형상 또한 추출하였다. 이를 Fig. 5에 나타내었는데, 여기에는 양단 자유단 배관의 이론적인 모드 형상도 같이 표시하였다. 이 결과를 보면 자기 센서를 이용하여 구한 모드 형상이 이론적인 모드 형상과 거의 같게 나타나는 것을 알 수 있다. 이를 정량적으로 살펴 보기 위해 실험적인 모드 형상과 이론적인 모드 형상 간의 modal assurance criteria (MAC) 값을 계산하여 표 2에 정리하였다. 잘 알려진 바와 같이 MAC 값이 1에 가까울수록 두 모드 형상이 유사함을 의미한다<sup>(15)</sup>. 표 2에 정리된 바와 같이 자기 센서를 이용하여 구한 모드 형상은 해당되는 차수의 이론적 모드 형상과 동일하며, 다른 모드에는 직교함을 알 수 있다.

이상의 실험 결과로부터, 본 연구의 자기 센서를 이용하여 비자성 배관의 모달 테스트를 성공적으로 수행할 수 있음을 확인하였다. 또한, 기존의 접촉식 센서에 비해 보다 정확한 고유 진동수를 추출할 수 있음을 알 수 있었다.

### 3.2 피복된 배관에 대한 모달 테스트

본 절에서는 자기 센서의 비접촉 측정 능력을 이용하여 피복재로 둘러 쌓인 배관의 모달 테스트를 수행한 결과를 제시하였다. 피복된 배관에서 기존의 접촉식 센서를 이용하기 위해서는 피복재를 벗겨 내야 하며, 피복재의 표면이 거친 경우에는 레이저 변위계 또한 적용하기 힘들다.

본 논문에서는 변형전 두께 5 mm의 단열재를 가진점을 제외한 배관 전면에 감싸서 피복된 배관을 구현하였다. 이 경우에는 1번 지점을 가진점으로 설정하였다. 이 밖의 실험 구성은 3.1절에서 언급된 바와 동일한 상태로 유지하였다.

Fig. 6에 단열재가 있는 경우와 없는 경우의 주파수 응답 함수를 비교하여 놓았으며, 표 3에는 양자의 고유 진동수 및 감쇠비의 변화를 비교하였다. 단열재로 둘러 쌓은 후에는 배관의 고유 진동수는 감소하고, 감쇠비는 증가함을 알 수 있는데 이는 일반적인 예상과 일치되는 것이다. 이로부터 자기 센서를 이용할 경우 피복 배관의 피복을 제거하지 않고도 모달 테스트를 수행할 수 있음을 확인하였다.

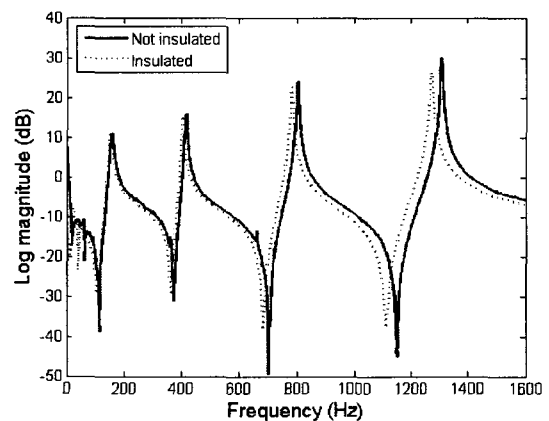


Fig. 6 Comparison of FRFs of the non-insulated pipe(solid line) and the insulated pipe(dotted line)

Table III. Comparison of natural frequencies and damping ratios of the non-insulated pipe (X) and the insulated pipe (O)

	Natural frequencies (Hz)		Damping ratios (%)	
	X	O	X	O
1	156.9	153.6	3.0	3.4
2	415.4	405.2	0.7	0.8
3	802.7	781.5	0.3	0.4
4	1306.4	1270.5	0.2	0.3

#### 4. 결론

본 연구에서는 접촉식 센서, 또는 기존의 비접촉식 센서를 적용하기 어려운 비자성체 구조물의 굽힘 진동을 비접촉으로 측정할 수 있는 새로운 자기 센서를 소개하였다. 제안한 센서는 역 로렌츠 힘 작용을 바탕으로 작동하며 배관과 같은 측정 대상에 비대칭 정적 자기장을 인가한 후, 솔레노이드를 이용하여 대상물의 굽힘 진동을 측정한다. 제안한 센서를 이용하여 비자성 배관의 굽힘 진동 모달 테스트를 수행하였으며, 피복된 배관의 피복재를 제거하지 않고도 모달 테스트를 수행할 수 있음을 입증하였다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 사업(과제번호: R16-2002-00101001-0)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Weaver, W., Timoshenko, S. P. and Young, D. H., 1990, *Vibration Problems in Engineering*, John Wiley & Sons, New York.
- (2) Dimarogonas, A. D. and Paipetis, S. A., 1983, *Analytical Methods in Rotor Dynamics*, Applied Science Pub., London.
- (3) Miles, T. J., Lucas, M., Halliwell, N. A. and Rothberg, S. J., 1999, "Torsional and bending vibration measurement on rotors using laser technology", *J. Sound and Vibration* 226(3), pp. 441~467.
- (4) 한순우, 2005, 비접촉 굽힘 진동 측정을 위한 자기 센서의 개발 및 응용, 서울대학교 박사 학위 논문
- (5) Han, S. W. and Kim, Y. Y., 2006, A new magnetic sensor for the non-contact measurement of flexural vibrations of a non-ferromagnetic pipe, submitted.
- (6) Rothberg, S. J. and Bell, J., 2004, On the application of laser vibrometry to translational and rotational vibration measurements on rotating shafts, *Measurement* 35, pp. 201-210.
- (7) Areny, R. P. and Webster, J. G., 2001, *Sensors and Signal Conditioning*, Wiley-Inter Science, New York.
- (8) 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.* 96(2), pp. 1202~1204.
- (9) Jiles, D. C., 1995, Theory of the magnetomechanical effect, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 28, pp. 1537~1546.
- (10) Cho, S. H., Kim, Y. and Kim, Y. Y., 2003, The optimal design and experimental verification of the bias magnet configuration of a magnetostrictive sensor for bending wave measurement, *Sensors and Actuators, A. Physical* 107(3), pp.225~232.
- (11) Hirao, M. and Ogi, H., 2003, *EMATS for Science and Industry*, Kluwer Academic Pub., Dordrecht.
- (12) Yamasaki, T., Tamai, S. and Hirao, M., 1996, Electromagnetic acoustic transducers for flaw detection in steel

pipes and wires, US-Japan Symposium on Advances in NDT, pp. 117~122.

(13) Yamasaki, T., Tamai, S. and Hirao, M., 1998, Arrayed-coil EMAT for longitudinal waves in steel wire, 1998 IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 782~789.

(14) Johnson, W., 1998, Trapped torsional modes in solid cylinders, *J. Acoust. Soc. Am.* 100, pp. 285~293.

(15) Ewins, D. J., 2000, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd., Baldock.