

비금속 배관에서의 원격 2축 굽힘 진동 측정을 위한 동박 패치형 자기 센서의 제안

Proposition of copper – foil magnetic sensor for the two-axis remote measurement of bending vibration of a non-metallic cylinder

김진기*·한순우**·김윤영†

Jin Ki Kim, Soon Woo Han and Yoon Young Kim

Key Words : Two orthogonal axis(2 축), Simultaneous measurement(동시 측정), Bending vibration(굽힘 진동), Non contact(비접촉), Non-metallic pipe(비금속 배관)

ABSTRACT

This paper suggests a non-contact sensor for measuring bending vibration of a non-metallic cylinder in two orthogonal directions simultaneously. Recent research shows that a solenoid can pick up bending vibrations of a nonmetallic cylinder based on the reversed Lorentz force mechanism if an electrical conductive patch is attached to the cylinder. In this work, pairs of specially designed patches are used to make two independent paths for the current induced by bending vibrations, which enables the measurement of bending vibrations along two orthogonal directions simultaneously. The working performance of the developed sensor was verified by using two accelerometers.

1. 서론

단면에 비해 길이가 긴 배관 또는 보, 회전축 등에는 다른 진동 모드에 비해 굽힘 진동이 잘 발생한다. 이러한 굽힘 진동을 비접촉으로 측정해야 하는 경우에는 도플러식 레이저 속도계, 와전류식 변위 센서 등을 사용하고 있으며^(1,2), 자기 변형 현상을 이용한 비접촉식 진동 센서 또한 제안되어 있다.^(3,4)

최근 Han and Kim⁽⁵⁾은 비대칭 자기장 구조와 솔레노이드를 사용하여 비자성 금속 배관의 굽힘 진동을 측정하는 방식을 제안한 바 있다.⁽⁶⁻⁷⁾ 이러한 원리를 확장하면 비금속 배관의 굽힘 진동 또한 비접촉으로 측정하는 것이 가능하다. 이는 비금속 배관에 동박(copper foil) 등의 전기전도체를 감아서 유도 전류의 폐회로를 형성함으로써 가능하다.

본 연구에서는 이 원리를 확장하여 비금속 배관의 굽힘 진동을 직교하는 2 축에서 동시에 측정하는 방식을 제안하고자 한다. 대부분의 배관은 축방향에 직교하는 단면에서 임의의 방향으로 진동하게 되며 이 경우 단면상의 직교하는 두 축에서 동시에 진동을 측정하면 이 배관의 진동 양상을 보다 정확히 알 수 있다. 근접센서(Proximity sensor)⁽⁸⁾ 등을 사용하여 회전하는 축 중심의 회전 궤적(orbit)을 측정하여 축의 상태 감시에 사용하는 것이 그 좋은 예이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 제안하는 센서의 원리가 되는 Han 등의 연구 결과를 간략히 설명하였다. 이를 확장하여 두 축에서 동시에 측정하는 원리를 설명한 후 실험을 통해 제안한 센서의 타당성을 검증하였다.

2. 제안하는 센서의 측정 원리

2.1 동박을 이용한 비금속 배관의 비접촉 측정 원리

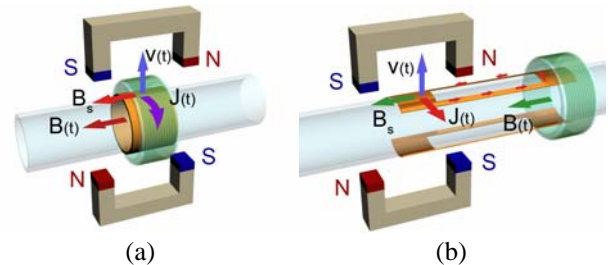


Fig.1 (a) Illustration of the working principle of the sensor suggested by Han and Kim at acrylic pipe⁽⁷⁾, (b) Illustration of the working principle-remote sensing- of the suggested sensor.

Fig.1(a)와 같이 동박을 원주 방향으로 감은 비금속 배관의 상/하부에 자속 밀도(magnetic flux density)가 B_s 인 같은 크기의 자기장이 서로 반대 방향으로 형성되어 있다. 이 배관이 연직 운동을 하게 되면 역 로렌츠 힘 작용⁽⁹⁾에 의해 동박을 따라 배관의 원주 방향으로 전류 밀도 $J(t)$ 가 유도된다. $J(t)$ 에 의해 배관 내부에는 B_s 와는 다른 동적인(dynamic) 자속 밀도 $B(t)$ 가 형성된다. 이에 따라 솔레노이드에 유도 기전력이 발생되고, 이 값은 배관 관의 가속도에 비례한다(식(1) 참조). 따라서 비금속 배관에서 굽힘 진동 신호를 비접촉 방식으로 측정할 수 있다.

동박을 원주방향으로 감는 대신 Fig.1(b)와 같이 가운데가 빈 직사각형 모양의 패치를 가공하여 배관

† 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : yykim@snu.ac.kr

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

* 서울대학교 대학원

** 한국철도기술연구원 선임연구원

$$\begin{aligned}
 V(t) &= -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A [B_s + B(t)] dA \\
 &\sim -\frac{\partial}{\partial t} \int_A [B_s + v(t) \times B_s] dA \quad (1) \\
 &= -B_s \int_A \left(\frac{\partial v(t)}{\partial t} \right) dA
 \end{aligned}$$

의 상/하부에 축 방향으로 부착한 경우를 보자. 이 패치의 한 쪽에 Fig.1(a)와 동일하게 비대칭 자기장을 인가한 상태에서 자기장이 걸린 부분에 상하 방향으로 진동이 발생하면 패치에 유도전류가 발생한다. 이 유도전류는 자기장이 인가된 부분에서 가장 높은 전류 밀도를 갖지만 패치 전체적으로 폐회로를 그리며 흐르게 된다. 따라서 자기장이 인가된 부분의 반대편에 솔레노이드를 설치하면 굽힘 진동 신호를 측정할 수 있게 된다. 따라서 Fig.1(a)와 동일한 원리로, 원래의 측정점에서 떨어진 지점에서도 원격으로 동일한 신호를 얻을 수 있다.

Fig.2 에는 Fig.1(b)의 측정 방식과 본 연구의 측정 방식을 비교하여 보았다. 위 부분의 곡선(점선표기)은 기존의 방식이고, 아래의 곡선(실선 표기)은 새로이 제안한 방식이며 두 경우에 대해 배관의 FRF 를 측정, 비교하였다. 그 결과 두 방식은 크기의 차이는 있지만 동일한 FRF 를 제시함을 알 수 있다. 측정된 신호의 크기에 차이가 있는 이유는 유도 전류의 밀도는 자기장 인가 부분에서 가장 크므로, 제안한 방식에 의해 신호를 원격으로 측정할 경우 전류 밀도가 감소하기 때문이다.

2.2 굽힘 진동의 2 축 동시 측정 원리

2.1 절에서 언급한 바와 같이 직사각형 동박 패치를 사용하면 굽힘 진동을 원격 비접촉으로 측정할 수 있음을 확인하였다. 이러한 패치를 배관의 수직 방향과 수평 방향으로 각각 설치하면 두 방향의 굽힘 진동을 동시에 측정할 수 있으며, 본 연구에서 제안하는 방식의 핵심 사항이다(Fig.3 참조).

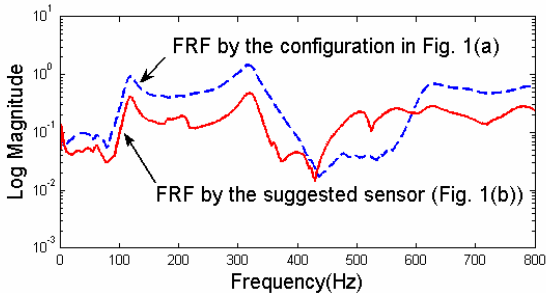


Fig.2 FRF plots in each sensor's configuration

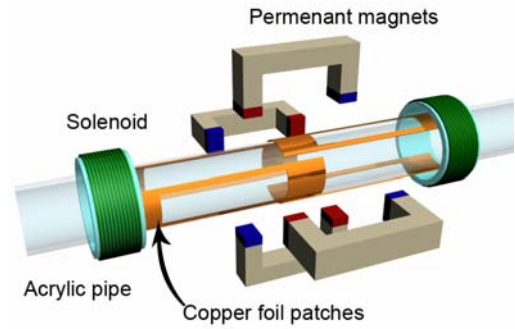


Fig.3 Illustration of the sensor to measure bending vibration in two orthogonal axis.

그림에서 보듯이, 양 방향의 진동 신호를 동시에 측정하기 위해 솔레노이드를 두 개 설치하여야 한다. 이 때 각 솔레노이드 별로 측정되는 신호 간의 간섭을 최소화하기 위해서 솔레노이드 간의 간격을 넓혀서 설치하는 것이 필요하며, 이를 위해 신호의 원격 측정이 가능하도록 앞에서와 같이 직사각형 패치를 사용한 것이다.

3. 제안한 방식의 검증 및 실험

앞 절에서 제안한 원리를 바탕으로, 본 절에서는 2 축 자기 센서를 이용하여 실험한 결과를 제시하였다. 이를 위한 실험의 구성은 Fig.4 와 같다.

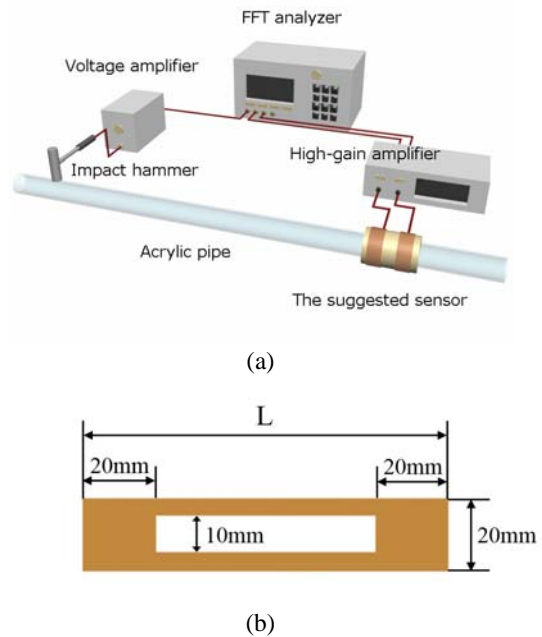


Fig.4 (a) Schematic illustration of the experiment setting for modal testing using the suggested sensor, (b) The shape of copper foil patches.

외경 30mm, 두께 3mm, 길이는 750mm인 아크릴 배관에 제안한 센서를 배치하였고, 배관의 양단은 자유단 상태로 지지하였다. 본 실험에서 사용한 동박 패치는 L=150mm인 직사각형의 가운데에 또 다른 직사각형 구멍이 나 있는 형태이다. 여기에서 동박 패치는 유도된 전류가 솔레노이드의 위치까지 흘러 돌아올 수 있도록 만들어주는 것이 중요하다. 가운데에 구멍을 내어 놓은 것이 그러한 이유에서이다. 센서의 솔레노이드는 내경 40mm, 외경 47mm인 PVC배관에 직경 0.3mm의 에나멜선을 90 회 감아 제작하였다. 센서에 쓰인 영구 자석은 Nd-Fe-B 자석으로서 10mm×20mm×3mm의 크기를 갖는다. 모달 테스트⁽¹⁰⁾를 수행하는 경우에는 임팩트 해머 PCB 086C40을 이용하여 가진 하였고, 가진 신호는 PCB 482A16을 이용하여 증폭되었다. 제안한 센서를 통해 측정된 응답 신호는 SRS사의 SR560을 이용하여 증폭되었다. 주파수 분석기 Agilent 35670A를 이용하여 가진 신호와 응답 신호를 주파수 분석하였으며, 모달 파라미터 추출은 모드 해석 전용 프로그램인 STAR MODAL을 통해 이루어졌다.

3.1 센서의 각도에 따른 신호의 변화

앞 절까지의 결과는 가진 방향에 일치하도록 센서를 배치하여 측정할 값이었다. 본 절에서는 이제까지의 실험과 달리 가진 각도를 다르게 하여 제안한 센서를 이용하여 측정된 결과를 제시하였다. 이로써 제안한 센서로 2 축 진동 측정이 가능함을 보이고자 한다.

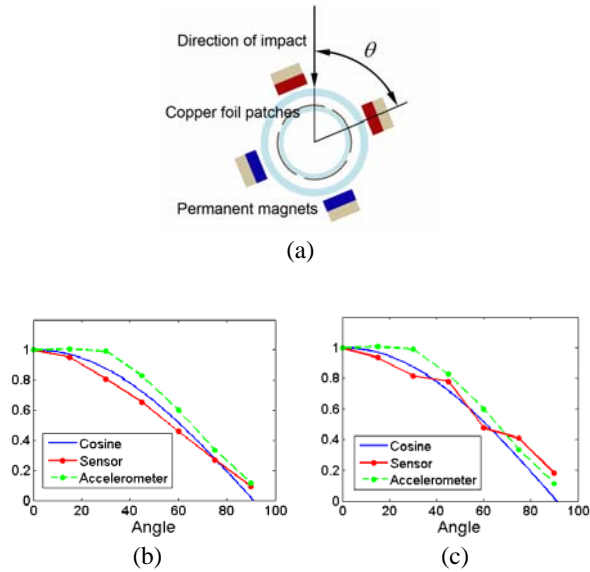


Fig.5 (a) Schematic diagram for the measurement of vibration in arbitrary direction, (b) Normalized sensitivity of the suggested sensor(L=150mm patch) for varying excitation angles measured in x-direction, (c) y-direction.

제안한 센서와 L=150mm 인 동박 패치를 부착한 아크릴 배관의 위치를 15 도씩 변경시켜 가면서 배관상의 동일한 위치(9 번 측정점)에 임팩트 해머로 가진하여 굽힘 진동 신호를 발생시켰다(Fig.5(a) 참조). 이 신호를 매 각도마다 측정하여 FRF를 구하고, 고유진동수마다 고유 벡터의 크기를 측정하여 비교하였다.

Fig.5(b)와 (c)는 각도를 돌려가면서 굽힘 진동을 양쪽에서 동시에 측정했을 때의 결과를 나타낸다. 측정되는 양방향의 신호는 편의상 x, y-방향로 표기하였다. 본 센서를 이용하여 얻은 결과 곡선(실선 표기)은 가속도계에 의한 결과(점선 표기)과 비슷한 정도로 cosine 곡선에 근접함을 볼 수 있다.

패치의 길이가 그보다 짧아질 경우에는 두 솔레노이드에서 측정된 신호 간에 간섭이 발생하여 x,y 방향 각각의 신호가 완벽하게 분리되지 않았다.

3.2 절에서 보인 것과 같이 길이가 길어짐에 따라 센서의 세기는 줄어들지만 수직, 수평 방향의 굽힘 진동 신호가 분리되어 측정됨을 위 그림을 통해 확인하였다.

3.2 2 축 진동 측정 시 가속도계와의 비교를 통한 검증

모달 테스트를 위해 아크릴 배관을 50mm 간격으로 총 14 개의 지점을 설정하였다. 측정점을 6 번 지점으로 고정을 하고 가진점을 옮겨가면서 주파수 응답함수를 구하였다. 제안한 센서의 측정값을 검증하기 위해 동일한 지점에 가속도계(B&K 사의 4393)를 부착하고, 가진점을 옮겨가면서 같은 실험을 반복하였다.

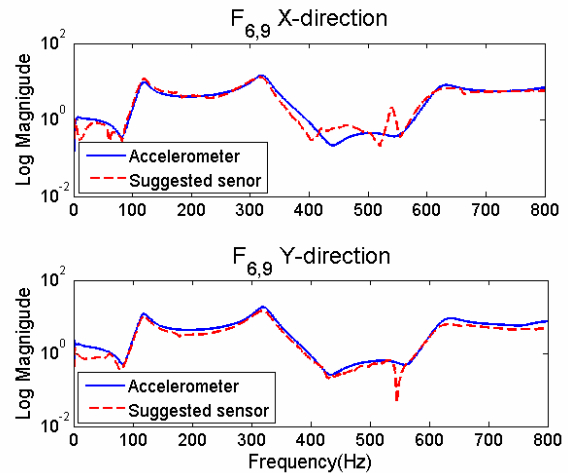


Fig. 6 Comparison of FRF's measured by the suggested sensor and an accelerometer at $\theta = 45^\circ$.

Table 1 Comparison of natural frequencies measured by the suggested sensor and an accelerometer

Mode	Suggested sensor	Accelerometer	Error
1	119.15 Hz	119.40 Hz	0.21 %
2	318.46 Hz	320.00 Hz	0.48 %
3	631.58 Hz	630.10 Hz	0.23 %

Fig.6 은 $\theta = 45^\circ$ 의 각도로 가진 했을 때, 가속도계와 제안한 자기 센서 각각을 이용하여 동시에 x, y - 방향의 가속도를 측정 한 후 얻은 주파수 응답함수를 비교한 그래프이다. 아크릴 배관의 9 번 지점에서 가진하고 6 번 지점에서 측정 한 주파수 응답함수를 나타내었다. 제안한 센서를 이용한 경우 반공진점에서 약간의 잡음(noise)이 추가되는 것을 제외하고 공진점을 비롯한 기타 다른 주파수영역에서는 거의 일치하는 것을 그래프에서 볼 수 있다. 공진점 부근의 결과가 같게 나타나는 것 역시 Fig.6 을 통해 볼 수 있다.

Table 1 에서는 위의 두 센서를 이용하여 얻은 고유 진동수를 비교하였다. 여기에서 가속도계와 제안한 센서로 각각 측정 한 값의 오차가 모두 0.5%보다 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이상의 실험 결과를 볼 때, 본 연구에서 제안한 센서를 이용하여 비금속 배관의 비접촉 모달 테스트를 성공적으로 수행할 수 있음이 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 비금속 배관에서의 굽힘 진동을 비접촉 방식으로 측정할 수 있는 새로운 2 축 자기 센서를 제안하였다. 동박 패치를 이용하여 굽힘 진동의 원격 측정이 가능한 방법을 보였고, 이를 바탕으로 수직, 수평 방향의 진동을 동시에 측정할 수 있었다. 제안한 센서는 역 로렌츠 힘 작용을 바탕으로 작동하며 도선 역할을 하는 동박 패치에 흐르는 유도된 전류를 솔레노이드로 측정한다. 본 센서를 이용하여 비금속 배관의 굽힘 진동 모달 테스트를 수행함으로써 가속도 센서로서의 성능을 확인하였다. 또한 본 센서의 측정 각도를 달리하며 실험을 한 결과를 일반 가속도계와 비교함으로써 동시에 수평, 수직 방향의 굽힘 진동을 측정할 수 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 사업 (과제번호: 2007-019)의 지원을 받은 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Rothberg, S.J and Bell, J., 2004, On the application of laser vibrometry to translational and rotational vibration measurements on rotating shafts, *Measurement* 35, pp201-210.
- (2) Areny, R.P and Webster, J.G., 2001, *Sensors and Signal Conditioning*, Wiley-Inter Science, New York.
- (3) 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.
- (4) Jiles, D. C., 1995, Theory of the magnetomechanical effect, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 28, pp. 1537~1546.
- (5) Han, S. W. and Kim, Y. Y., 2006, Magnetic sensor for the noncontact measurement of flexural vibrations of a nonferromagnetic metallic hollow cylinder, *Rev. Sci. Instrum.*, 77, 1.
- (6) 한순우, 2005, 비접촉 굽힘 진동 측정을 위한 자기 센서의 개발 및 응용, 서울대학교 박사 학위 논문.
- (7) Han, S. W., Bang, Y. B. and Kim, Y. Y., 2006, Metal foil method for noncontact measurement of lateral vibrations of a nonmetallic cylinder by a solenoid. *Appl. Phys. Lett.* 89.141905.
- (8) Johnson, D., 2007, Proximity sensors, *Control Engineering*, 54, 7, pp. 92~97.
- (9) Hirao, M, and Ogi, H., 2003, *EMATS for Science and Industry*, Kluwer Academic Pub., Dordrecht.
- (10) Ewins, D.J., 2000, *Modal Testing*, 2nd ed., *Research Studies*, Baldock, pp. 422-437.