

# 탄성파의 선택적 측정을 위한 비접촉 마그네토스트릭션 센서의 개발 및 실험적 검증

## Development and Experimentation of a Non-Contact Magnetostrictive Sensor for the Elastic Wave Mode Selection

°김영규\* · 이호철\*\* · 김윤영\*\*\*

Youngkyu Kim, Hocheol Lee, and Yoon Young Kim

**Key Words** : Magnetostrictor(마그네토스트릭션), Sensor(센서), Elastic wave(탄성파), Mode selection(모드 선택)

### ABSTRACT

Although the magnetostrictive sensors have received much attention in recent years, the investigations on the selection of a desired mode have not been reported. The purpose of this investigation is to present a technique to select a desired mode in a solid ferromagnetic cylinder using a non-contact magnetostrictive sensor. To achieve this goal, we propose new bias magnet configurations to select longitudinal and flexural waves. A few experimental results confirm the validity of the present investigation.

### 1. 서론

마그네토스트릭션(Magnetostriction)이란 강자성 재료가 자기장 아래 놓일 때 기계적인 변형이 발생하는 현상을 말하며 주울 효과(Joule effect) 또는 자왜 현상이라고도 한다.<sup>1)</sup> 또한 이의 역현상(inverse phenomenon)으로서 재료에 응력이 작용할 때 자기적 상태가 변화하는 현상을 역자왜 현상(inverse magnetostrictive effect) 또는 빌라리 효과(Villari effect)라고 하며,<sup>2)</sup> 이 두가지 현상을 통칭해서 마그네토스트릭션 효과 또는 자기-기계 효과(Magneto-mechanical effect)라고 약칭한다.

빌라리 효과를 이용한 센서는 측정하고자하는 대상과 기계적인 접촉 없이 측정물의 변형량을 측정할 수 있다는 장점으로 인해 접촉식 센서의 적용이 불가능한 여러 분야에 응용 가능성을 확보하고 있다. 특히 측정대상이 회전축과 같이 정지해 있지 않고 움직이는 경우에는 회전운동 상태를 유지하면서도 축내부의 탐상이 가능하며,<sup>3)</sup> 대상물의 온도가 높은 경우 및 표면이 열보호재(Thermal insulator)로 덮여

있어 직접 접촉이 불가능한 석유화학 설비의 배관과 같은 경우<sup>4)</sup>에 대한 응용이 연구되고 있다. 또한 Kwun<sup>5)</sup>은 현수교 등의 대형 구조물의 비파괴 검사에 빌라리 효과를 이용한 센서를 응용하고 있다.

본 연구에서는 강자성 재료의 원형봉을 따라 전파되는 탄성파를 빌라리 효과를 이용해서 비접촉으로 감지할 수 있는 센서를 소개하고 센서 주위의 바이어스 자기장의 분포에 따라 원하는 모드의 탄성파를 선택적으로 측정할 수 있는 기법을 개발하고 이의 타당성을 실험을 통해서 검증하였다.

### 2. 이론적 배경 및 작동 원리

자기장  $H$ 가 작용하는 공간에 자성물질이 놓이면 자성 물질 내부의 자기 유도 (Magnetic induction)  $B$ 는 자기장  $H$ 에 의한 항과 자성물질의 자화(Magnetization)  $M$ 에 의한 항의 합으로 나타낼 수 있다.<sup>6)</sup>

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0\mu_r H$$

이때 기계적 변형과 관련된 자기-기계효과인 빌라리 효과와 주울 효과는 다음과 같은 한 쌍의 식으로 표현할 수 있다.<sup>7)</sup>

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

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

여기서  $\epsilon$ 은 변형률,  $\sigma$ 는 재료에 가해지는 응력,  $E^H$ 는 일

\* 서울대학교 대학원  
E-mail : youngkyu@ideallab.snu.ac.kr  
Tel : (02) 880-1688, Fax : (02) 872-5431

\*\* 삼성전기 (주)

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부 교수

정한 자기장이 걸려있을 때의 탄성 계수(Elastic modulus), 그리고  $\mu^0$ 는 일정한 응력이 작용할 때의 투자율이다. 식 (1)과 (2)의  $q$ 와  $q^*$ 는 각각 빌라리 효과와 주울 효과를 나타내는 계수로 그 정의는 다음과 같다.

$$q = \left. \frac{dB}{d\sigma} \right|_H, \quad q^* = \left. \frac{d\epsilon}{dH} \right|_\sigma$$

탄성파에 의해서 야기되는 자기장의 변화는 전자기 유도 법칙(Faraday-Lenz law)에 의해서 솔레노이드의 양단에 발생하는 전압  $V(t)$ 을 통해서 측정할 수 있다.

$$V(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

여기서  $\Phi$ 는 솔레노이드 센서를 통과하는 총 자속의 양을 나타내며  $N$ 은 코일의 감은 횟수를 나타낸다.

공기의 투자율은 대상체의 재료인 철의 투자율보다 매우 작으므로 솔레노이드 센서의 내부 단면적 중에서 공기가 차지하는 부분을 무시하면 총자속  $\Phi$ 는 대상체의 자기유도  $B$ 를 대상체의 단면적  $A$ 에 대해 적분한 것과 같으며 이때 식 (3)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$V(t) = -N \frac{d}{dt} \int_A B \cdot dA \quad (4)$$

바이어스 자기장  $H$ , 투자율  $\mu^0$ , 빌라리 효과를 나타내는 계수  $q$ 가 시간에 대해서 일정하다고 가정하면 식 (2)를 식(4)에 대입하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$V(t) = -qN \frac{d}{dt} \int_A \sigma \cdot dA \quad (5)$$

한편, 대상체 내부에 축방향의 변위를 갖는 탄성파가 전파될 때, 티모센코 보이론<sup>8)</sup>에 따라 축방향의 변위를 식 (6)과 같이 가정할 수 있다.

$$u(x, y, t) = u_0(x, t) - y\theta(x, t) \quad (6)$$

이때  $u_0(x, t)$ 는 축방향의 평균변위이며  $y$ 는 축의 중립면으로부터의 수직 거리,  $\theta(x, y)$ 는 단면의 회전각이다. 대상체가 선형탄성체(linear elastic material)라고 가정하면 축방향의 응력은 다음과 같다.

$$\sigma(x, y, t) = E \frac{\partial u}{\partial x} = E \left( \frac{\partial u_0}{\partial x} - y \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (7)$$

대상체의 자기유도  $B$ 의 축방향 성분의 분포를 축의 중립면으로부터의 거리  $y$ 에 대해 테일러 전개를 하면 빌라리 효과 계수  $q$ 는 식 (8)과 같다.

$$q(x, y) = kB(y) = c_0(x) + c_1(x)y + \dots \quad (8)$$

식 (8)에서  $k$ 는 비례상수이며  $c_0$ 와  $c_1$ 들은 테일러 계수이다. 식 (7)과 (8)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 식 (9)와 같다.<sup>9)10)</sup>

$$V(x, t) \approx N \left[ -c_0(x) \frac{\partial P(x, t)}{\partial t} + c_1(x) \frac{\partial M(x, t)}{\partial t} \right] \quad (9)$$

여기서  $P$ 는 축방향 힘,  $M$ 은 굽힘 모멘트를 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(x, t) = EA \frac{\partial u_0(x, t)}{\partial x}$$

$$M(x, t) = EI \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x}$$

식 (8)에서 빌라리 효과 계수  $q$ 는 대상체 내부의 자기유도  $B$ 의 분포에 의존하며, 식 (9)와 같이 자기장의 분포에 따라 종파와 굽힘파를 선택적으로 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 3. 센서 및 실험장치

본 연구에서는 그림 1과 같이 원형봉의 둘레를 감싸는 솔레노이드 형태의 센서를 구성하여 축방향으로 진행되는 탄성파를 검출할 수 있도록 하였다. 본 연구는 대표적인 강자성 재료인 철을 주성분으로 하는 원형봉을 대상으로 탄성파의 전파를 실험하였다. 실험에서 측정 대상으로 사용된 철봉은 직경 10mm, 길이 2.2m의 원형봉으로서 표면 열처리 가공이 된 연마봉을 사용하였다.

실험에 사용된 솔레노이드 센서는 지름 0.12mm의 에나멜선을 내경 11mm, 외경 13mm의 아크릴케이스에 50회 감아서 제작하였으며 감은 부분의 폭은 4mm이다. 솔레노이드 센서는 자체 유도용량(Inductance)에 의해 저역 필터(Low-pass filter)의 역할을 하게 되어 주파수 대역에 따라 왜곡이 생길 수 있으나 본 연구에서 관심을 두고 있는 탄성파의 주파수 영역(0~200kHz)은 상대적으로 저주파 영역이므로 이러한 효과를 무시해도 무방하다고 가정하였다.

솔레노이드 센서를 이용하여 원형봉에서 진행되는 탄성파를 측정하기 위한 실험 장치는 그림 2와 같다. 물리적인 충격을 통해 발생된 탄성파는 축방향으로 진행하다가 솔레노이드 센서가 위치한 곳을 통과하면서 역마그네토스트리션 효과에 의해 자기장의 변화를 야기한다. 이 자기장의 변

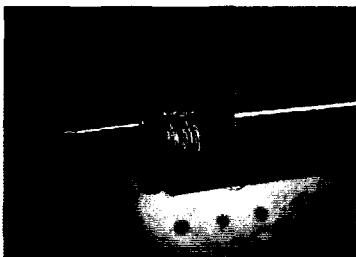


Figure 1 Solenoid-type magnetostrictive sensor

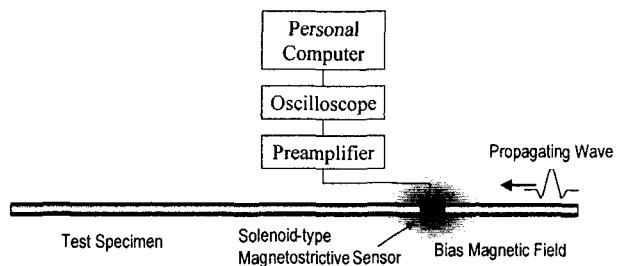


Figure 2 Schematic diagram for the experimental setup

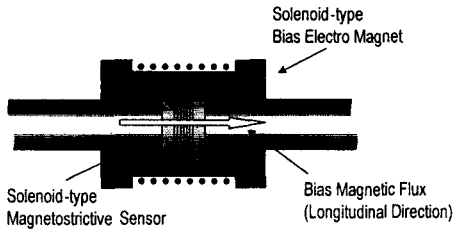


Figure 3 Solenoid sensor encircled by a solenoid-type bias electro magnet

화는 솔레노이드 센서에 기전력을 유도하고 이 신호는 프리 앰프(Preamplifier SR-560)에 의해 증폭되어 오실로스코프(LeCroy 9310M)와 퍼스널 컴퓨터로 전송되어 신호처리과정을 거치게 된다.

#### 4. 실험 및 결과

##### 4.1 종파 및 굽힘파의 개별 측정

###### (1) 종파의 측정

대상체 내부에 전파되는 종파를 측정하기 위해서 원형봉의 축방향과 일치하는 자기장을 솔레노이드 센서 주위에 형성시킬 필요가 있다. 이를 위해 식 (9)의 테일러 계수 중  $c_0$ 를 제외한 나머지 항들을 소거하여 축방향으로 일정한 자기장이 발생되도록 그림 3과 같은 솔레노이드 형태의 바이어스용 전자석을 배치하였다. 이 바이어스용 전자석에 전류를 흘려 0.42kA/m의 크기의 자기장을 발생시키고, 홉킨스바11 실험에서와 같이 원형봉의 끝단에 원형봉의 재질과 지름이 동일하고 질량이 17.4g인 발사체를 2.97m/s의 속도로 충돌시켜 종파를 발생시켰다.

센서의 위치는 충돌시킨 끝단에서 55cm되는 지점이며 측정된 신호의 파형과 STFT(단시간주파수변환)<sup>12)</sup>을 수행한 스펙트로그램은 그림 4와 같다. 충돌로 발생한 종파가

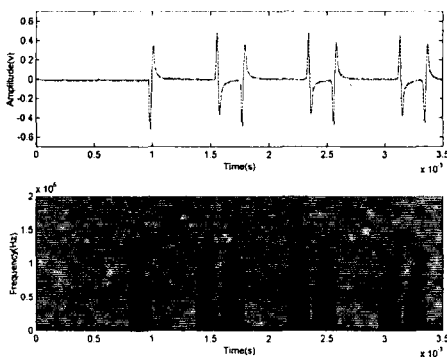


Figure 4 The captured wave signal with the bias field shown in Fig. 3. The time history of the signal and its STFT spectrogram.

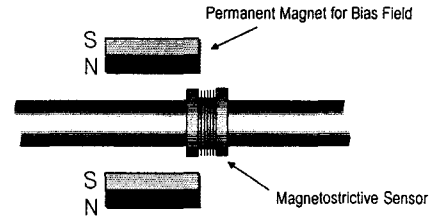


Figure 5 The proposed bias field configuration for flexural wave measurement

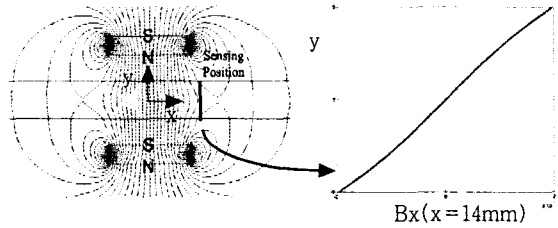


Figure 6 The contour of the magnetic flux lines and its axial component distribution at the sensing position

양쪽의 자유단에서 반사되어 왕복하는 것을 알 수 있고 솔레노이드 센서가 이를 잘 측정하고 있음을 확인할 수 있다.

###### (2) 굽힘파의 측정

굽힘파를 측정하기 위해 식 (9)의 테일러 계수 중  $c_1$ 을 제외한 나머지 항들을 소거하여 축방향의 성분의 크기가 중립면으로부터의 거리와 비례하는 외대칭(anti-symmetric) 형태의 자기장이 발생되도록 그림 5와 같이 한쌍의 영구자석을 배치하였다. 그림 6에서 이와 같은 배치를 통해서 영구자석의 바깥쪽에 자속의 축방향 성분이 거의 선형적으로 분포하는 자기장이 형성됨을 ANSYS<sup>13)</sup>의 유한 요소 해석 결과를 통해 확인할 수 있다.

실험에 사용된 영구자석의 길이는 24mm, 높이는

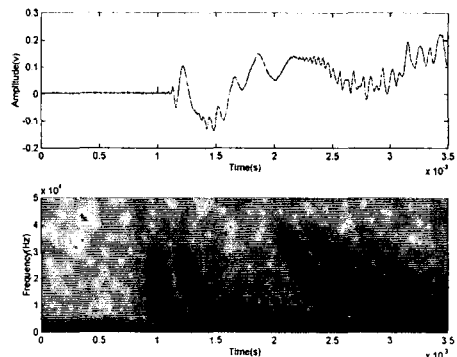


Figure 7 The captured wave signal with the bias field configuration shown in Fig. 5



Figure 8 The eccentric impact of the projectile to generate the longitudinal and flexural waves simultaneously

5mm, 폭은 8mm이며 원형축의 표면에서 7mm만큼 떨어진 부분에 위치시켰다. 영구자석은 표면에서 0.333T의 자속밀도를 갖고 있는 Neodymium 합금 자석이다. 센서의 최적의 위치를 결정하기 위해 ANSYS의 수치해석 결과를 참조하여 자석의 중심으로부터 14mm만큼 떨어진 곳에 센서를 위치시키고 굽힘파를 측정하였다.

굽힘파를 발생시키는 장치는 종파의 경우와 동일하며 원형봉의 한 끝단으로부터 22cm되는 위치에서 원형봉과 수직하게 충돌하도록 하였다. 센서의 위치는 충격지점으로부터 33cm, 즉 종파의 측정위치와 동일한 지점이다.

#### 4.2 종파 및 굽힘파의 선택적 측정

실제 상황에 보다 유용하게 응용될 수 있는 가능성을 검토하고 고안된 바이어스 자기장의 타당성을 입증하기 위해서, 종파와 굽힘파가 혼재된 상태의 탄성파를 발생시키고 그 중에서 특정 모드만을 선택적으로 측정할 수 있는지를 확인해 보았다.

종파와 굽힘파를 동시에 발생시키는 방법은 그림 8과 같이 발사체를 원형봉에 편심시켜서 충돌시키는 방법을 사용하였다. 편심충돌로 인한 응력분포는 그림 9와 같으며 이는 중립면에 대해서 대칭인 부분과 비대칭인 부분으로 나눌 수 있다. 대칭인 부분은 종파에 해당하며 식 (9)의 계수  $c_0$ 와  $c_1$ 의 값이  $c_0 \neq 0$ ,  $c_1 = 0$ 인 경우에 대응하며 비대칭인 부분은 굽힘파로서  $c_0 = 0$ ,  $c_1 \neq 0$ 인 경우에 해당한다. 그러므로 바이어스 자기장의 배치를 바꿈에 따라서 종파와 굽힘

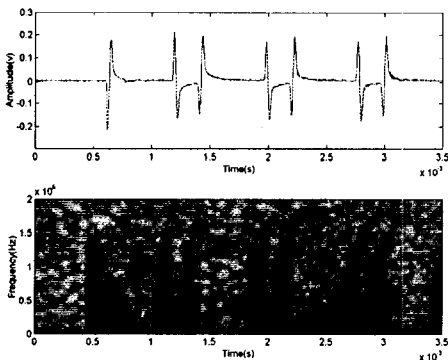


Figure 10 The captured wave signal with the bias configuration shown in Fig. 3. The longitudinal wave signal is dominant and the flexural wave signal is almost rejected.

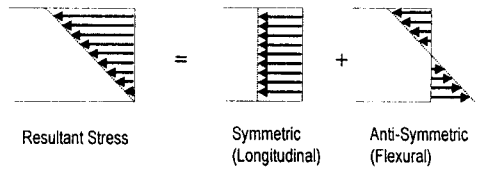


Figure 9 The resultant stress distribution as a sum of two stress fields

파가 혼재된 탄성파에서 원하는 특정 모드만을 측정할 수 있으며 원하지 않는 특정 모드는 거부할 수 있는 것이다.

#### (1) 종파의 선택적 측정

앞서 4.1절의 그림 3과 같은 세기의 축방향으로 일정한 바이어스 자기장을 발생시키고 같은 위치에서 측정하였다. 그림 10은 측정된 신호를 보여주고 있으며 이를 그림 4의 결과와 비교해 보면 거의 유사한 것을 확인할 수 있고 종파와 굽힘파가 동시에 전파되는 상황에서도 종파만 선택적으로 측정된 것임을 알 수 있다.

#### (2) 굽힘파의 선택적 측정

4.1절의 그림 5와 같은 한쌍의 영구자석 배치를 이용해서 굽힘파를 측정하기 위한 바이어스 자기장을 발생시키고 4.1절의 실험과 같은 위치에서 측정하였다.

그림 11은 측정된 결과로서 종파는 거의 나타나지 않고 굽힘파가 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다. 이로써 종파와 굽힘파가 혼재된 탄성파 중에서도 종파는 거부하고 굽힘파만을 선택적으로 측정할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 종파와 굽힘파를 선택적으로 측정할 수 있는 비접촉식 마그네토스트리션 센서를 개발하여 그 작동 원리와 실험결과를 소개하였다. 또한 이 연구를 기초로 센서의 출력을 최대화하기 위한 바이어스 자석의 형상을 최적 설계하는 연구가 진행되고 있다.<sup>14)</sup>

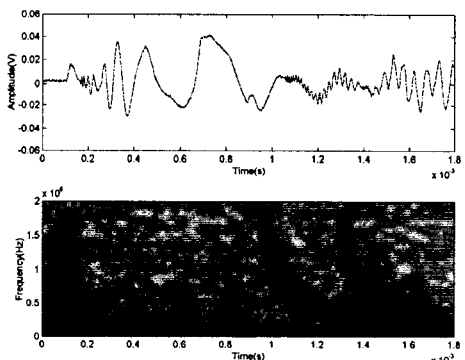


Figure 11 The captured wave signal with the bias configuration shown in Fig. 5. The flexural wave signal is dominant and the longitudinal wave signal is almost rejected.

종파와 굽힘파가 혼재된 상태의 탄성파에서 원하는 모드만을 선택적으로 측정하기 위해서는 바이어스 자기장의 역할이 중요함을 보였고, 종파와 굽힘파를 선택적으로 측정 가능한 바이어스 자기장의 구성을 제안하였다. 관련된 이론적 배경과 수치해석 결과와 아울러 제안된 바이어스 자기장의 타당성을 확인하기 위해 센서를 실제 제작하여 실험을 통해 검증하였다.

본 연구에서 제시된 마그네토스트릭션 센서 기법은 센서와 측정대상물체 간의 기계적 접촉 없이 원하는 모드를 선택적으로 측정할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이며 향후 다양한 분야의 응용이 기대된다.

## 후 기

본 연구는 BK21 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) Joule, J. P., 1847, On the effects of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars. *Phi. Mag.*, III, 30, p. 76.
- 2) Villari, E., 1865, Change of magnetization by tension and by electric current. *Ann. Phys. Chem.*, 126, pp. 87-122.
- 3) 한순우, 김윤영, 이호철, 2001, “자왜 현상을 이용한 회전축 내부의 비접촉 탄성파 측정”, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집 II, pp. 365-370.
- 4) 안봉영, 김영주, 김영길, 이승석, 2000, “배관결함 검출을 위한 자왜형 초음파 센서의 특성”, 비파괴검사학회지, 20(1), pp. 46-53.
- 5) Kwun, H., and Bartels, K. A., 1998, Magnetostrictive sensor technology and its application, *Ultrasonics*, 36, pp. 171-178.
- 6) Jiles, D., 1991, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman & Hall, London.
- 7) Clark, A. E., 1980, Ferromagnetic Materials: Vol. 1., North Holland.
- 8) Weaver, W. J., Timoshenko, S. P., and Young, D. H., 1990, Vibration Problems in Engineering, 7th Ed., John Wiley & Sons Inc.
- 9) Lee, H., and Kim, Y. Y., 2002, Wave selection using a magnetomechanical sensor in a solid cylinder, submitted to *J. of Acous. Soc. Am.*
- 10) 이호철, 2001, “빌라리 효과를 이용한 모드 선택 응력과 센서의 설계와 해석”, 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원 기계항공공학부.
- 11) Bacon, C., 1998, An experimental method for considering dispersion and attenuation in a viscoelastic

hopkinson bar. *Experimental Mechanincs*, 38(4), pp. 242-249

12) Mallat, S., A Wavelet Tour of Signal Processing, 2nd Ed., Academic Press, London.

13) ANSYS/EMAG User Guide, 1993, Swanson Analysis System Inc.

14) 조승현, 김영규, 김윤영, 2002, 마그네토스트릭션 센서 성능 향상을 위한 바이어스 자기장의 위상 최적설계, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집(수록예정)