

자기변형 트랜스듀서를 이용한 유도 비틀림파의 발생 및 배관의 이상진단

The Generation of Torsional Waves and the Pipe Diagnosis Using Magnetostrictive Transducers

김 윤 영[†] · 박 찬 일* · 한 순 우* · 조 승 현*

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

(2003년 10월 31일 접수 : 2004년 1월 9일 심사완료)

Key Words : Magnetostriction(자기변형), Guided Torsional Wave(유도 비틀림파), Non-ferromagnetic Material(비자성체)

ABSTRACT

The objective of this investigation is to develop an efficient method to generate and measure torsional waves in non-ferromagnetic waveguides by using magnetostrictive transducers. In existing methods using a nickel strip that is attached circumferentially to the test specimen, large current input to the magnetostrictive transducer often generates undesired wave modes in addition to the desired torsional wave. However, we propose a new method to generate the torsional waves without being accompanied with other undesirable wave modes regardless of the input current magnitude. The specific transducer configuration is suggested and its performance is also checked through a series of experiments.

1. 서 론

자기변형, 즉 마그네토스트릭션(magnetostriction)이란 강자성 재료(ferromagnetic material)가 자기장 아래 놓일 때 기계적인 변형이 발생하는 현상을 말하며 주울 효과(Joule effect)라고도 한다.⁽¹⁾ 이것의 역현상으로 재료에 응력이 작용할 때 재료 내부의 자기적 상태가 변화하는 현상을 역자기변형 현상(inverse magnetostriction effect) 또는 빌라리 효과(Villari effect)라고 한다.⁽²⁾

자기변형 효과를 이용한 트랜스듀서는 측정하고자 하는 대상과 기계적인 접촉 없이 측정물의 변형을 측

정할 수 있기 때문에 접촉식 센서의 적용이 불가능한 여러 분야에 응용되고 있다.⁽³⁾

자기변형 효과를 이용하면 비접촉으로도 탄성 초음파를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라, 전통적인 압전 효과를 이용한 방식에 비해 크기가 큰 초음파를 발생시킬 수 있기 때문에, 이 효과를 이용한 진단기술에 대한 관심이 증가하고 있다.⁽⁴⁾ 봉, 배관과 같은 웨이브가이드에서 발생시킬 수 있는 초음파로는 종파, 횡파, 비틀림파 등이 있는데,⁽⁵⁾ 이 중 비틀림파(torsional wave)의 첫 번째 모드는 분산 현상을 보이지 않기 때문에, 결함 진단을 효과적으로 수행할 수 있는 탄성파의 형태이다.⁽⁶⁾

최근 Kwun⁽⁷⁾은 얇은 니켈 스트립(strip)을 이용하여 유도 비틀림파를 보내고 받을 수 있는 방안을 제안하였다. 이 방식에서는(Fig. 1(a) 참조) 니켈 스트립을 축의 원주 방향으로 부착시킨 후, 영구자석을 이용해 원주 방향으로 자화시킨다. 니켈 스트립이 자

† 책임저자 : 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : yykim@snu.ac.kr

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

* 정희원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

화된 후 축 방향으로 자기장이 걸리도록 코일에 전류를 흘려 니켈 스트립의 기계적 변형을 일으켜 비틀림 초음파를 발생시킨다. 그러나 이 방식은 봉재 둘레 방향으로의 니켈 스트립 예자화(pre-magnetization)량과 축 방향으로의 솔레노이드 내의 자기장의 세기가 적절하지 않으면 비틀림파 이외에 다른 유형의 파가 발생하는 문제점이 있다. 그리고 니켈 스트립이 연질자성재료(soft magnetic material)이므로 긴 시간에 걸쳐 실험을 하는 데는 다시 예자화를 해야 하는 번거로움이 있다.

이런 문제점을 개선하기 위해서 본 연구에서는 니켈 스트립을 봉재에 45° 방향으로 부착시키고, 솔레노이드형 코일에 전류를 가해 유도 비틀림 초음파를 보내고 받는 새로운 방안을 제안하였다(Fig. 1(b) 참조). 이 방법의 특징은 유도 비틀림파의 발생이 용이할 뿐 아니라, 센서 출력에 대한 정량화도 용이하다는 것이다.

본 연구에서 제안한 것과 유사한 방식이 Ohzeki⁽⁸⁾의 연구에서 사용된 적이 있으나, 그 연구에서는 강자성체 스트립을 밀링 머신 축에 45° 방향으로 여러 장 부착하여 밀링 가공시의 토크만을 측정하였다. 하지만 본 연구에서는 강자성체 스트립을 장착하여 배관에서 비틀림파의 발생과 측정을 할 수 있는 방안을 제시하였으며, 아울러 측정 대상이 자성체여야 한다는

자기변형 현상의 한계점을 넘어 비자성체(non-ferromagnetic material)에도 자기변형 현상을 응용할 수 있음을 보였다.

2. 이론적 배경

2.1 자기변형 현상

자기장 H 가 작용하는 공간에 자성물질을 두게 되면 자성물질 내부의 자기유도 B 는 자기장의 세기 H 에 의한 항과 자성물질의 자화 M 에 의한 항의 합으로 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$B = \mu_0(H + M) = \mu_0\mu_r H \quad (1)$$

이 때 기계적 변형과 관련된 자기변형 효과인 빌라리 효과와 주울 효과는 다음과 같은 한 쌍의 식으로 표현할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E^H} + q^* H \quad (2)$$

$$B = \mu^{\sigma} H + q\sigma \quad (3)$$

여기서 ϵ 는 변형률, σ 는 재료에 가해지는 응력, E^H 는 일정한 자기장이 걸려있을 때의 탄성계수, 그리고 μ^{σ} 는 일정한 응력이 작용할 때의 투자율이다. 식 (2)와 (3)의 q 와 q^* 는 각각 빌라리 효과와 주울 효과를 나타내는 계수로 그 정의는 다음과 같다.

$$q = \left. \frac{dB}{d\sigma} \right)_H, \quad q^* = \left. \frac{d\epsilon}{dH} \right)_\sigma \quad (4)$$

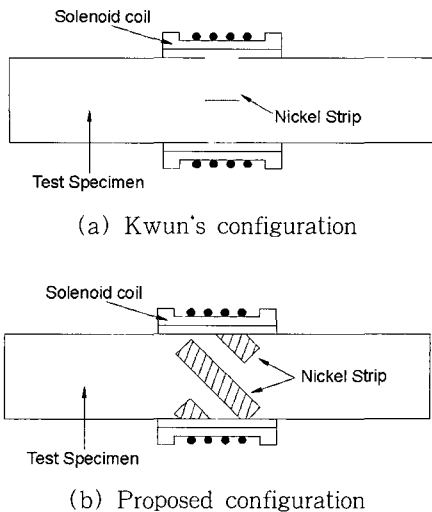


Fig. 1 Comparison of nickel strip configurations for the generation and measurement of torsional waves

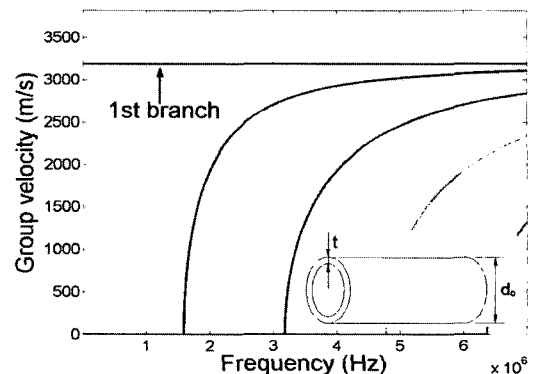


Fig. 2 The group velocity of torsional waves in an aluminum pipe ($E = 73$ GPa, $\rho = 2800$)

kg/m³, d_o = 25 mm, t = 1 mm)

탄성파에 의해서 야기되는 자기장의 변화는 전자기 유도법칙에 의해서 솔레노이드의 양단에 발생하는 전압 $V(t)$ 을 통해서 측정할 수 있다.

$$V(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

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

일반적으로 강자성체로는 철, 니켈, 코발트 등이 있으며 이 중 본 연구에 사용된 니켈은 연질자성체로 자화곡선의 상승이 빠르고 히스테리시스가 적어 자기장이 제거된 후 원래의 형상으로 빨리 돌아오는 성질을 가지고 있다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 알루미늄 배관과 같은 비자성체 웨이브가이드에서 비틀림 유도 초음파를 발생시키고 측정하고자 한다. 유도 초음파는 원거리 탐상에 매우 효과적이는데, 이 중 비틀림파의 첫 번째 모드(first branch)는 분산현상이 없기 때문에,⁽¹¹⁾ 배관 등에서의 결함 진단에 매우 용이하다. Fig. 2는 본 연구에서 사용하는 알루미늄 배관에서의 주파수-군속도 곡선을 보여주고 있다.

3. 제안된 유도 비틀림파의 발생 및 측정

3.1 실험장치 및 트랜스듀서

본 연구에서는 원형 배관의 둘레를 감싸는 솔레노이드 형태의 트랜스듀서를 구성하여 축 방향으로 진행하는 비틀림파를 검출할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 외경 25 mm, 두께 1 mm, 길이 2 m의 알루미늄 원형 배관이 사용되었고, 이 실험대상에 니켈 스트립을 부착하는 방식을 이용하여 비틀림파를 발생

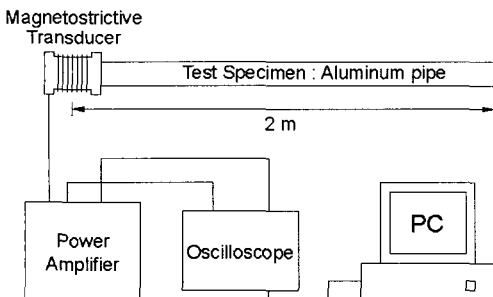


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

시켰다.

실험에 사용된 솔레노이드형 트랜스듀서는 지름 0.3 mm의 에나멜선을 내경 26 mm, 외경 28 mm의 케이스에 64회 감아서 제작하였으며 감은 부분의 길이는 19.2 mm이다.

원형 배관에서 진행하는 비틀림파를 솔레노이드형 트랜스듀서로 보내고 측정하는 실험장치는 Fig. 3과 같다. 파워앰프(RAM-5000)를 이용하여 솔레노이드형 트랜스듀서에 자기장이 가해지면 자기변형 현상에 의해 니켈 스트립의 변형이 발생한다. 이로 인해 비틀림파가 발생하여 축 방향으로 진행하고 이 비틀림파가 다시 솔레노이드형 트랜스듀서를 통과하게 되면 역자기변형 효과에 의해 자기장이 변화된다. 이 자기장의 변화는 솔레노이드형 트랜스듀서에 기전력을 유도하고 이 신호는 다시 파워앰프에 의해 증폭되어 오

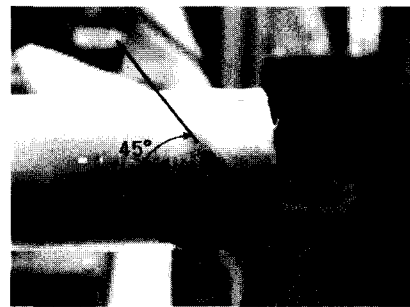


Fig. 4 Nickel strip attached at the end of the pipe

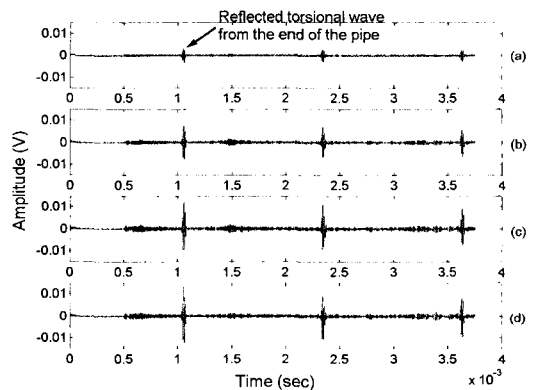


Fig. 5 Measured signals by the proposed transducer configuration (a) for input current 3 A and (b) for input current

4.75 A (c) for input current 6 A and (d) for input current 8.44 A
 실로스코프(LeCroy LT354-M)와 퍼스널 컴퓨터에 전송되고 신호처리 과정을 거치게 된다.

본 연구에 사용된 니켈 스트립은 길이 25 mm, 폭 3 mm, 두께 0.15 mm의 크기로 가공되었으며 이액형 에폭시를 이용하여 Fig. 4와 같이 원형 배관의 축에 45° 각도로 4개를 부착시켰다. 이처럼 니켈스트립을 45° 각도로 부착시킨 이유는 비틀림파를 발생시키기 위해서는 축에 대해 45° 방향으로의 변형이 필요하기 때문이다.⁽¹²⁾

3.2 실험 결과

(1) 제안된 방법에 의한 유도 비틀림파 측정

대상체에 전파되는 비틀림파를 발생/측정하기 위해 서솔레노이드형 트랜스듀서를 원형 배관 끝단에 설치하고 3 A, 4.75 A, 6 A, 그리고 8.44 A의 전류를 파워앰프를 이용하여 이 솔레노이드형 트랜스듀서에 가해주었다. Fig. 3과 같이 끝단에 설치된 솔레노이드형 트랜스듀서에서 발생된 비틀림파는 2 m를 진행하여 반대편 끝단을 맞고 다시 2 m를 되돌아와 그 솔레노이드형 트랜스듀서에서 측정된다. 이렇게 측정된 신호를 Fig. 5에 실었다.

Fig. 5를 보면, 인가하는 전류가 커짐에 따라 출력되는 센서의 출력이 함께 커지는 것을 알 수 있다. 솔레노이드형 트랜스듀서에서 발생된 비틀림파가 자유단에서 반사되어 왕복하고 있음을 알 수 있고 또한 비틀림파가 잘 측정됨을 알 수 있다.

이 실험에 사용된 펄스 형태는 40 kHz를 중심주파수로 하는 사인(sine)파형 1개로 구성되었다. 이 방법은 초음파를 이용하는 유사한 실험에서 많이 사용되는 방법이다. 이 연구에서 사용하는 펄스는 파워앰프 RAM-5000에서 자체적으로 발생시킬 수 있는 펄스이다.

(2) 기존의 방식에 의한 유도 비틀림파와의 비교

유도 비틀림파를 발생시키기 위한 기존의 방식은 니켈 스트립을 원형 배관의 둘레에 감아서 붙인 후 영구자석을 이용하여 원둘레 방향으로 예자화를 시켜 주고(Fig. 1(a) 참조), 예자화된 니켈스트립 주위에 솔레노이드형 코일로 자기장을 부가하여 유도 비틀림파를 발생/측정하는 것이었다. 즉, 원둘레 방향으로의 니켈 스트립 예자화량과 축 방향으로의 솔레노이드형 트랜스듀서 내의 자기장의 세기가 같아지게 되면 원

형 배관 축의 45° 방향으로의 변형이 발생하게 되고 이로 인해 비틀림파가 발생하게 된다.

그러나 이러한 방식의 문제점은 솔레노이드형 트랜스듀서에서 발생하는 자기장의 세기가 적절하지 못하면 비틀림파가 발생되지 않으므로 정량화가 어렵고 실험의 재현성이 떨어질 수 있다.

이러한 방식에 의해 솔레노이드형 트랜스듀서에 각각 입력전류를 3 A, 4.75 A, 6 A, 8.44 A로 부가하였을 때 측정된 신호는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 기존의 방식에서는 트랜스듀서의 입력전류, 즉 트랜스듀서에서 발생하는 파형이 자기장의 세기에 매우 민감하게 변하기 때문에 큰 출력의 유도 비틀림파를 보내기 어렵다. 만약 솔레노이드 코일에서 발생하는 교류 성분의 자기장의 세기가 커지면 니켈의 잔류 자화량에 의한 자기장의 세기가 상대적으로 작아져 Fig. 6(b)~(d)처럼 종파의 크기가 증가하게 되고, 또한 비틀림파를 구분하기가 어려워진다

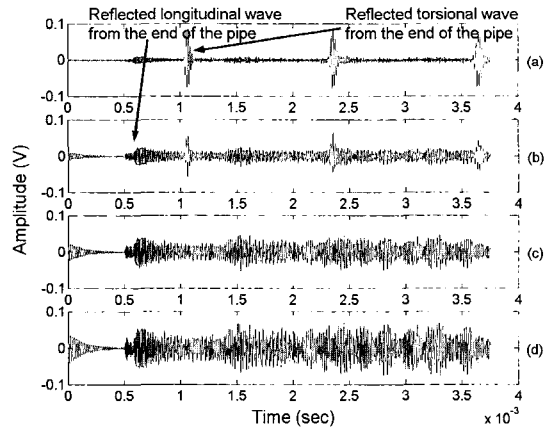


Fig. 6 Measured signals by the configuration shown in Fig. 1(a). (a) for input current 3 A and (b) for input current 4.75 A (c) for input current 6 A and (d) for input current 8.44 A

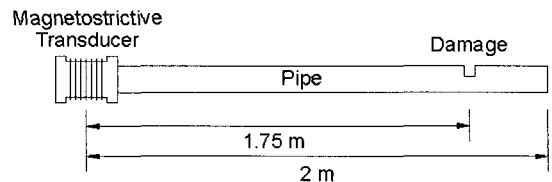


Fig. 7 Schematic diagram of the test specimen

for damage detection

(3) 유도 비틀림파를 이용한 배관의 결함 검출

본 연구에서 제안한 방식의 유용성을 검증하기 위해 배관의 결함 검출을 시도해 보았다. 트랜스듀서에서 발생된 비틀림파가 배관을 따라 진행하다가 결함을 만나면 진행하던 비틀림파의 일부가 반사되어 돌아오게 된다.

따라서 이 결함 신호의 시간 정보와 비틀림파의 속도를 이용하면 결함의 위치를 추정할 수 있다.

비틀림파를 결함 검출에 사용하면 발생시킨 펄스의 왜곡이 적기 때문에 결함의 정확한 위치를 추정하기 용이하다. 결함 검출용 배관은 외경 25 mm, 두께 1 mm, 길이 2 m의 알루미늄 원형 배관이 사용되었는데 Fig. 7과 같이 솔레노이드형 트랜스듀서는 끝단에 설치되었고, 이 솔레노이드형 트랜스듀서에서부터 1.75 m 떨어진 곳에 인위적인 결함을 만들어 놓았다. 부분 결함의 형상은 Fig. 8과 같다.

Fig. 7의 배관에서 유도 초음파를 발생시켜 계측된 신호는 Fig. 9와 같다. 결함까지의 거리를 추정하는 공식은 다음과 같다.

$$d_{\text{crack}}^{\text{estimated}} = c \times \frac{\Delta t}{2} \quad (6)$$

여기서 c 는 비틀림파의 군속도(group velocity)이

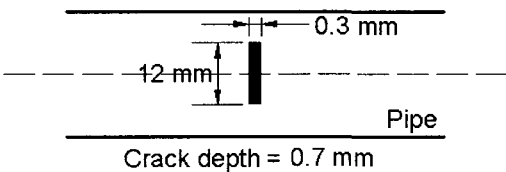


Fig. 8 Specification of the crack

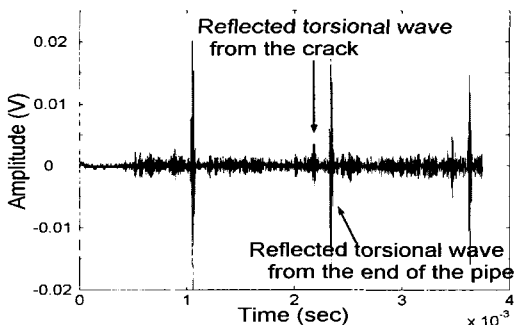


Fig. 9 Measured signal in a cracked pipe shown

in Fig. 7

며, Δt 는 비틀림파가 트랜스듀서와 결함사이를 진행한 시간이다. Fig. 9의 시간 정보를 이용하여 계산된 알루미늄 배관의 첫 번째 모드에서의 비틀림파 속도는 3094 m/s이다. 이 속도 c 와 Δt 를 식 (6)에 대입하여 결함까지의 거리를 추정하면 $d_{\text{crack}}^{\text{estimated}} \approx 1.73$ m 를 얻는다. 이 값은 실제 결함까지의 거리인 1.75 m 에 대해 약 1.5 %의 오차로 결함 위치를 추정할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 방법이 실제 배관의 결함 검출에 유용하게 응용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 알루미늄과 같은 비자성 배관에서 비틀림 유도 초음파를 발생시킬 수 있는 새로운 방안을 제시하였다. 제안된 방법은 알루미늄에 자성재료인 니켈 스트립을 배관축에 45° 경사지게 부착한 후, 솔레노이드 코일을 이용하여 그 곳에 비틀림 초음파를 발생시키고, 또한 측정하는 새로운 방법이다. 기존의 방법과는 달리 솔레노이드 코일에 가해지는 전류의 크기가 커짐에 따라 니켈 스트립에서 발생하는 비틀림파의 크기가 비례적으로 증가되는 방법이다. 제안된 방법의 타당성을 실험적으로 검증하였으며, 또한 배관의 인위적 결함 위치추정을 통해 그 유용성을 입증하였다.

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, pp. 76.
- (2) Villari, E., 1865, "Change of Magnetization by Tension and by Electric Current," *Ann. Phys. Chem.*, 126, pp. 87~122.
- (3) 김윤영 등, 2002, "마그네토스트리션 효과를 이용한 회전축의 비접촉 결함진단," *대한기계학회논문집 A*, 26권, pp. 1599~1607.
- (4) 안봉영 등, 2000, "배관결함 검출을 위한 자왜형 초음파 센서의 특징," *한국비파괴검사학회*, 제 20권, 제 1호, pp. 46~53.
- (5) Kwun, H. and Kim, S. Y., 2001, "Long-

range Guided Wave Inspection of Structures Using the Magnetostrictive Sensor,” 한국비파괴검사학회, 21(4), pp. 383~390.

(6) Graff, K. F., 1975, Wave Motion in Elastic Solids, Ohio State University Press, pp. 464~470.

(7) Kwun, H., 2002, “Method and Apparatus Generating and Detecting Torsional Wave Inspection of Pipes or Tubes,” United States Patent, Patent No: US 6429650 B1.

(8) Ohzeki, H. and Mashine, A., 1999, “Development of a Magnetostrictive Torque Sensor for Milling Process Monitoring,” J. Manuf. Sci. E., 121. pp. 615~622.

(9) Jiles, D. C., 1998, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman&Hall, pp. 121~129.

(10) Bozorth, R. M., 1993, Ferromagnetism, IEEE Press, pp. 267~275.

(11) Rose, J. L., 1999, Ultrasonic Waves in Solids Media, Cambridge University Press, London, pp. 143~153.

(12) Crandall, S. H., 1978, An Introduction to the Mechanics of Solids, McGraw-Hill Book Company.