

축을 따라 전파되는 초음파 모드의 선택적 측정이 가능한 센서 개발

Development of sensors with mode-selective measuring capability of ultrasonic waves traveling on a cylindrical shaft

이호철†
Hocheol Lee

Key Words : Ultrasonic Wave(초음파), Shaft(축), Sensor(센서), Mode Select(모드 선택)

ABSTRACT

A sensor having capability to measure two different kinds of ultrasonic waves selectively is described. Under the same bias field configuration, this magnetostrictive type sensor can selectively measure longitudinal waves and flexural ones. Since the switching operation of mode selection is made only by changing the polarity of the permanent magnets used to configure the bias field, it will be very useful after the permanent magnet are interchanged with electromagnets. In order to find the optimal operating bias field, finite elements analysis is used and the condition for flexural wave measurements to meet is found. The linearity of the sensor is verified by experiments and the requirements for linearity also are proposed.

1. 서 론

1800년대 중반 경에 Joule 과 Villari 에 의해서 각각 자왜현상과 역자왜현상이 발견된 뒤, ‘자기적 에너지와 기계적 에너지의 상호전환’이라는 이 흥미로운 성질을 이용한 많은 공학적 사례들이 발표되었다.^(1~3)

피에조 물질(piezoelectric materials)의 출현과 전자기(electromagnetic)적인 방식의 가진기들이 출현하면서 많은 응용분야를 빼앗기기는 했지만 여전히 적지 않은 응용분야에서 자왜현상을 이용한 연구가 진행되고 있다. 자왜현상을 이용한 센서나 가진기가 매력적일 수 있는 가장 대표적인 응용분야는 비접촉(noncontact) 계측 혹은 가진 분야다. 피에조 방식의 경우 센서나 가진기를 측정대상에 부착하여 초음파 혹은 진동신호를 측정하는 방식도 많이 채택된다.⁽⁴⁾ 하지만 피에조 물질을 이용한 센서 혹은 가진기의 경우 일반적으로 직접적인 배선이 뒤따라야 한다는 문제가 있어 많은 장점에도 불구하고 한계가 명확한 상황이 많다. 이에 비해서 자왜현상을 이용한 센서나 가진기의 경우 자기장을 매개로 해서 에너지 혹은 신호의 전달이 이루어지기 때문에 직접적인 배선이 없이도 측정 혹은 가진이 가능하다는 상대적 장점을 가진다.

비접촉 방식을 이용하기 때문에 간단한 방식으로 발생시키는 초음파의 모드를 바꿀 수 있다는 것은 이미 Kwun 과 Teller 의 연구를 통해서 언급된 바 있다.⁽⁵⁾ Kwun 은 이 연구에서 다양한 방식의 바이어스(bias) 자기장의 배치가 축에 종방향, 횡방향, 그리고 비틀림 방향으로의 다양한 모드의 초음파를 발생시킬 수 있음을 정성적으로 보여주었다. 이런 연구가 의미가 있는 것은 각각의 모드의 초음파들이 저마다 색다른 특징을 가지고 있기 때문에 초음파를 이용한 이상진단 등에 각각의 특색이 유용하게 사용될 수 있기 때문이다.⁽⁶⁾

Kwun 의 연구가 실제 공학적 활용으로 연결되기 위해서 필요한 조건은 하나의 센서에서 2 가지 이상의 모드의 초음파를 생성 혹은 계측하는 것이 가능해야 한다는 것이다. Lee 와 Kim 은 이러한 관점에서 하나의 센서에서 종방향과 횡방향의 초음파만을 선택적으로 계측할 수 있는 센서의 가능성을 제시하였다.⁽⁷⁾ 그러나 이 연구에서도 종방향과 횡방향에 대해서 코일센서는 같은 것을 사용하였으나 바이어스 자기장을 구성하는 영구자석은 서로 다른 형태를 사용하였기 때문에 엄밀한 의미에선 동시 계측이 가능한 것으로 볼 수 없었다. 즉, 선택적 계측은 가능하지만 이 ‘선택’이 빠르게 전환되는 것은 불가능하였다.

본 연구에서는 같은 형태의 자기장 구성을 이용하여 선행된 연구의 한계를 극복하고자 하였다. 영구자석을 사용하여 서로 다른 바이어스 자기장을 구성하되 영구자석의 배치형태는 완전히 같고 극성을 다르게 하는 것만으로 서로 다른 모드를

† 이호철; 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : hcllee21@cu.ac.kr
Tel : (053) 850-2712, Fax : (053) 850-2710

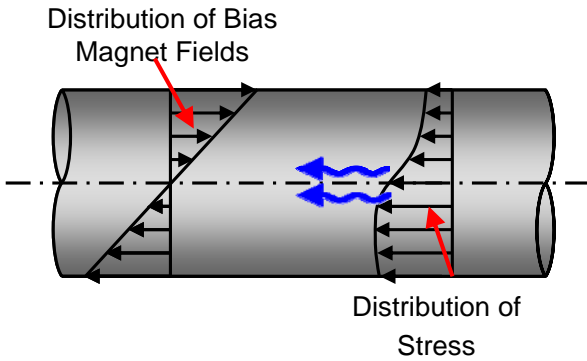


Fig. 1 Concept of Selectively Measuring Wave Modes

선택적으로 측정할 수 있음을 보였다. 이는 본 연구에서 사용된 영구자석을 전자석으로 대체하면 간단한 전기적 스위치 동작만으로 원하는 모드를 선택해서 측정할 수 있음을 간접적으로 보여주는 것이다.

하나의 센서 형상에서 두 가지 모드의 초음파를 측정할 수 있음을 보인 뒤에 센서의 기본 특성은 선형성(linearity)에 대한 검증을 수행하였으며 제시된 센서는 선형성 측면에서 만족스런 결과를 보여주고 있음을 확인하였다.

센서가 원하는 모드를 최적의 조건에서 측정할 수 있도록 자기회로의 최적화를 수치해석적 방법을 이용하여 진행하였으며 이후 센서의 설계에서 사용할 수 있는 지침을 제시하였다. 센서를 실제로 제작하여 실험을 수행하였으며 제작된 센서는 원하는 성능을 보여주었다.

2. 이론

2.1 모드 선택이 가능한 센서의 원리

Fig.1 은 축을 따라서 전달되는 초음파 중에서 종방향과 횡방향의 초음파를 선택적으로 측정할 수 있는 원리를 보여주고 있다. Fig.1 의 오른쪽은 초음파의 응력상태를 보여주고 있다. 만일 뒤틀림파가 포함되지 않았다면 응력 상태로 보아 횡파와 종파가 섞여있는 것임을 알 수 있다. 이러한 응력상태를 가진 초음파가 그림의 왼쪽에 보인 것과 같은 비대칭적인 바이어스 자기장을 통과하면 이 때 발생하는 자기장의 변화는 응력상태 중에서 온전히 횡파만에 의해서 영향을 받는다는 것이 알려져 있다.

Fig.2 는 이러한 특성을 이용하여 같은 영구자석 구성에서 단지 극성만을 달리하여 서로 다른 형태의 바이어스 자기장을 만들어 낼 수 있는 센서의 구성을 보여주고 있다. Fig.2 의 자기장 구성

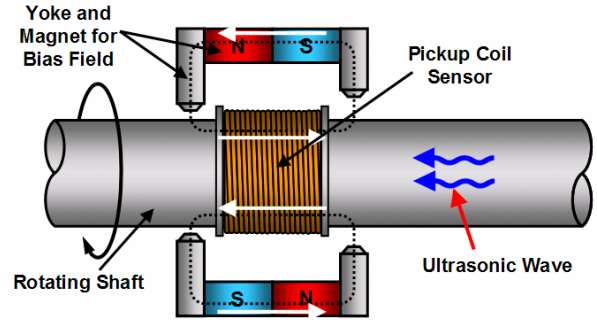


Fig. 2 Bias Magnetic Field Configuration for Flexural Waves

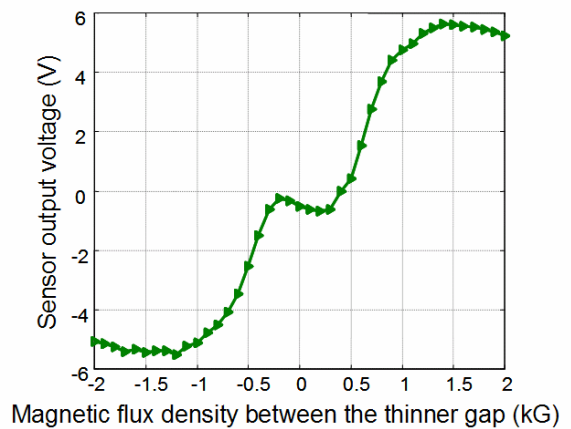


Fig. 3 Relation between Bias Field and Output Voltage

은 위쪽 영구자석과 아래쪽 영구자석이 서로 다른 방향을 향하고 있으므로 축의 단면 상에는 횡방향 초음파를 측정할 수 있는 비대칭적인 자기장이 걸리게 된다. 이는 이 바이어스 자기장 구성에서는 횡파만이 검출됨을 의미한다. Fig.2 에서 위쪽 혹은 아래쪽의 영구자석의 극성을 반대로 바꾸어주면 축상의 바이어스 자기장의 방향은 모두 한 쪽 방향을 향할 것이며 이는 종파만을 검출하는 바이어스 자기장 구성이 된다.

2.2 센서 바이어스 자기장 구성에 있어 주의점

센서의 바이어스 자기장을 구성함에 있어 무엇보다 주의할 점은 센서의 민감도를 충분히 확보함과 동시에 선형성을 확보할 수 있는 바이어스 자기장을 걸어주어야 한다는 것이다. Fig.3 은 바이어스 자기장의 세기에 따른 센서의 출력을 보여주고 있는데 바이어스 자기장의 크기가 작은 영역과 큰 영역에서는 출력신호의 왜곡이 발생할 것이 확실시 되므로 자기회로를 설계함에 있어 이 영역은 피해야 할 것이다.

두 번째로 주의해야 할 점은 Fig.4 에 설명된 바와 같이 바이어스 자기장을 구성하는 두 개의 극점이 너무 멀리 떨어져 있는 경우 종파의 측정

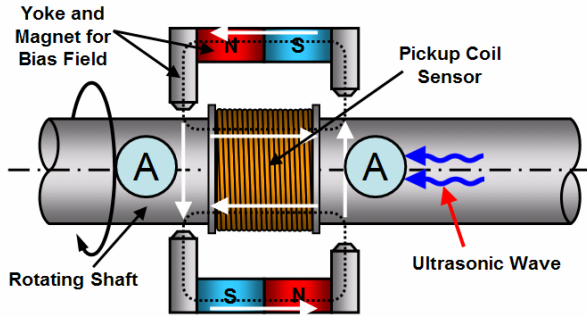


Fig. 4 Possible Problems for Flexural Wave Measurements

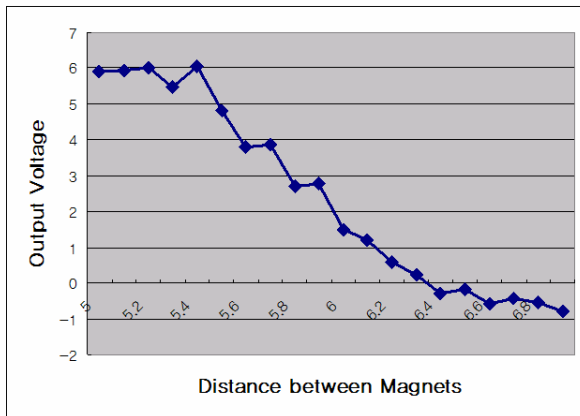


Fig. 5 Relation between the Distance of Magnets and Output Voltage

에는 문제가 없으나 횡파의 측정에서는 심각한 문제가 야기될 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 자기장은 횡파를 측정할 수 있도록 해주는 방향으로 흐를 수 있지만 축을 가로지르면서 흐를 수도 있기 때문이다. 축을 가로지르는 방향으로 형성된 자기장(그림에서 A로 표시)은 횡파 혹은 종파의 측정에 아무런 도움도 주지 않는 성분이므로 이 성분을 가급적 줄여야 할 것이다.

중양에 삽입되는 코일로 인해서 영구자석의 양극점을 가까이 하는 데는 한계가 존재하므로 측정용 코일을 위한 공간을 최대한 확보하면서 민감도도 확보할 수 있는 양극점의 거리를 찾기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. Fig.5에서 볼 수 있듯이 양극점 사이의 거리가 일정한 크기 이상으로 벌어지면 횡파 측정을 위한 자기장이 급속도로 감소함을 확인할 수 있고 이를 통해서 최대 간극을 설정할 수 있다.

3. 실험 결과

3.1 센서의 출력신호

Fig.6과 같이 센서와 센서를 이용한 측정시스템을 구성하였으며 이를 통해서 계측한 신호를

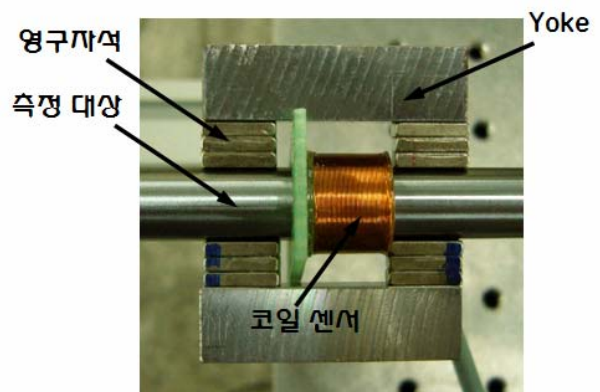
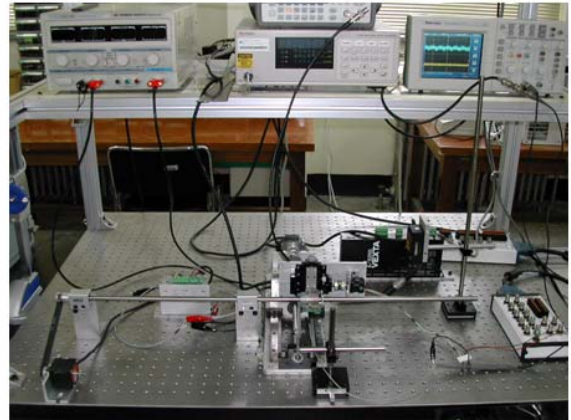


Fig. 6 Measurement System and Sensor Appearance

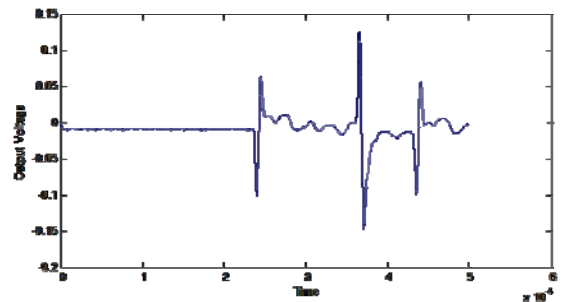


Fig. 7 Output Signal from Sensor Under Longitudinal Wave Configuration

Fig.7에 보였다. 축에 가해진 입력 신호는 횡파와 종파를 섞어서 넣어주었지만 종파만을 감지하는 바이어스 구성을 사용하여 종파만이 측정됨을 확인할 수 있다.

3.2 센서의 선형성

센서의 선형성을 확인하기 위해서 측정대상인 축에 발사체를 부딪히게 하고 그 충돌속도를 일정하게 변화시켜 가면서 출력신호를 살펴보았다. Fig.8은 이론에 의해서 얻어진 출력신호와 실제 계측신호를 보여주고 있는데 이론과 실험결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만 이러한 선형성은 앞서 언급한 바와 같이 Fig.3에서 출력을 선형으로

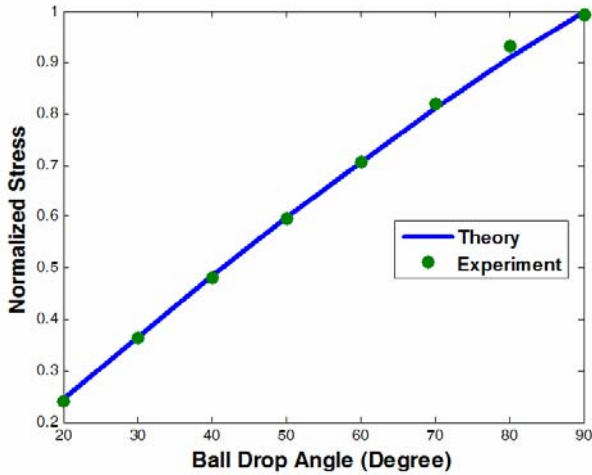


Fig. 8 Linearity of Proposed Sensor

만들 수 있는 영역을 정확하게 선택하는 경우에만 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 하나의 형상에서 영구자석의 극성만 바꾸어줌으로써 두 가지 종류의 서로 다른 모드의 초음파를 선택적으로 측정할 수 있음을 보였다. 이는 영구자석이 전자석으로 대체되는 경우 매우 유용한 센서가 될 것이다.

실제로 센서를 제작하여 선택적인 계측이 가능함을 검증하였으며 제안된 센서가 원하는 동작을 할 수 있기 위해서 영구자석이 만족해야 하는 제한 조건을 수치해석을 통해서 찾아냈다. 센서의 중요한 특성인 선형성을 확보하기 위해서 바이어스 자기장이 만족해야 하는 조건에 대한 고찰을 수행하였고 실험을 통해서 제작된 센서의 선형성을 확인하였다.

현재 본 연구에서 사용된 영구자석을 전자석으로 교체하여 보다 실용성 있는 센서에 대한 연구가 진행 중에 있다.

참고문헌

- (1) Garshelis, I.J. and Jones, C.A., 1999, "Miniaturized Magnetoelastic Torque Transducers", IEEE Trans. On Magnetics., Vol.35, No.5, pp.3649~3651.
- (2) Kwun, H. and Bartels, K. A., 1998, "Magnetostrictive Sensor Technology and its Applications", Ultrasonics, Vol.36, pp.171~178.
- (3) Kleinke, D. K., and Uras, H. M., 1993, "A Noncontacting Magnetostrictive Strain Sensor", Rev. Sci. Instrum., Vol.64, No.8, pp.2361~2367.
- (4) Sundaresan, M. J., Ghoshal, A. and Schulz, M. J., 2002, "A Continuous Sensor for Damage Detection in Bars", Smart Mater. Struct. Vol.11, pp.475~488
- (5) Kwun, H. and Teller, C. M., 1994, "Magnetostrictive

Generation and Detection of Longitudinal, Torstional, and Flexural waves in a steel rod", J. Acoust. Soc. Am., Vol.96, No.2, pp.1202~1204.

(6) Shkerdin, G., and Gloreux, C., 2005, "Lamb Mode Conversion in an Absorptive Bi-layer with a Delamination", J. Acoust. Soc. Am., Vol.118, No.4, pp.2253~2264.

(7) Lee, H., and Kim, Y. Y., 2003, "Wave selection using a Magnetostrictive Sensor in a Solid Cylinder", J. Acoust. Soc. Am., Vol.112, No.3, pp.953~960.

(4) Kenneth, G. M., 1995, Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York.