

# 회전속도 측정 기능을 포함한 비접촉 탄성과 센서의 개발

## Development of an Elastic Wave Sensor Including Rotary-encoding Capability

이 호 철\*·김 명 호\*\*·박 중 양\*\*

Hocheol Lee, Myong Ho Kim, Jung Yang Park

**Key Words :** Magnetostriction(자기변형), Magnetic Circuit(자기회로), Elastic Wave(탄성과), Rotary Encoder(회전 엔코더)

### ABSTRACT

In this paper, a hybrid sensor is proposed that has two capabilities: The first is to sense longitudinal or flexural elastic waves selectively which are transmitted along the target shaft, the second to measure the rotating speed of the shaft. All measurement are made in a noncontact manner since this sensor uses magnetostriction as its measuring principles. Furthermore, the switching between these two sensing capabilities are accomplished by a very simple mechanical operation. To verify the capabilities of the proposed sensor, an prototype sensor are fabricated and the experiments are made. The result shows this sensor can embody two sensing capabilities in one sensor configuration.

### 1. 서 론

회전기계에 사용되는 기계요소 중에서 축(shaft)은 회전 기계에서 동력을 전달하는 가장 핵심적인 역할을 수행하고 있는 요소로 이 요소가 파손되는 경우 회전기계 시스템 전체에 이상으로 이어질 가능성이 많고 이는 곧 경제적인 손실과 상황에 따라서는 인명의 피해로 이어지는 것을 의미하게 된다. 이 때문에 축에서 발생할 수 있는 각종 이상을 조기에 검출하는 기술에 대한 연구는 과거에서 지금까지 많은 연구자들의 관심대상이었다.<sup>(1)-(8)</sup>

축이나 파이프 등에서 발생하는 기계적인 변수(힘, 변위, 응력, 변형률 등)를 비접촉 방식으로 측정할 필요가 있는 응용 분야는 발전시설에서 사용하는 대형 축류나 공작기계의 주축에서 발생하는 힘, 파이프의 배관 검사<sup>(2-5)</sup> 등과 같은 진단(diagnosis)을 목적으로 하는 것과 최근 활발한 연구가 진행되고 있는 by-wire 시스템과 같이 정보를 전달하기 위한 목적의<sup>(6-9)</sup> 두 가지로 크게 구분할 수 있을 것이다.

기존에 제안된 회전하고 있는 축과 관련된 힘 측정 센서들은 매우 다양한 방법을 사용하고 있고 제한된 대역폭에서 안정적인 작동을 보장하고 있지만 다음 두 가지 측면에서 한계점을 안고 있다.

첫째로 측정할 수 있는 신호의 대역폭이 매우 상대적으로 좁다. 특히 기존의 자기변형(magnetostriction) 현상을 이용한 센서들의 경우 수 kHz정도까지의 대역폭을 가지고 있는 것이 보통이어서 외부에서 순간적으로 가해지는 충격력 등을 측정하기에는 한계가 명확하게 존재한다.<sup>(6,9)</sup>

둘째로 축이 경험할 수 있는 다양한 힘들 중에서 오직 토크를 측정하는 센서가 대부분이다.<sup>(2-8)</sup> 축이라는 기계요소가 기본적으로 회전력을 전달하는 것이라는 관점에서 보면 토크는 측정해야할 가장 중요한 힘임에 틀림없으나 축 방향의 힘이나 굽힘력 또한 축을 포함한 시스템의 상태를 나타내는데 매우 중요한 정보를 포함하고 있음을 간과해서는 안 될 것이다.<sup>(10)</sup>

회전하고 있는 축의 운동 상태에 관한 정보 중에서 축에 작용하는 힘만큼 중요한 정보는 축의 회전속도라고 볼 수 있다. 축의 동적인 안전성은 특히 축의 회전속도에 매우 밀접하게 연관되어있으며 외부에서 가해지는 똑 같은 힘도 축의 회전속도에 따라서 다른 영향을 주기도 한다.<sup>(11)</sup>

이 때문에 축의 회전속도를 측정하는 방법에 대한 연구는 매우 오래된 연구 주제 중 하나이다. 가장 대표적인 회전속도 측정방식은 자기(magnetic)식 엔코더(encoder)를 축에 부착하고 외부에 적절한 자기회로를 꾸민 뒤 자기회로 상에서 일어나는 자속밀도의 변화를 감지할 수 있는 센서를 이

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

\*\* (주) 일진글로벌

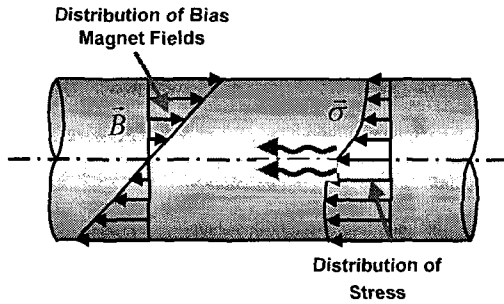


Fig 1 Sensing principles of elastic waves using magnetostriction in a shaft

용해서 측정함으로써 회전속도에 관한 정보를 읽어 내는 것이다.<sup>(11,12)</sup>

축에서 발생하는 탄성파(응력)를 비접촉으로 측정하는 방법에 대한 선행 연구<sup>(13)</sup>에서 이미 바이어스(bias) 자기장의 형상에 따라서 축방향 힘과 굽힘력을 선택적으로 측정할 수 있음을 보인바 있다. 본 논문에서는 기존에 제시된 아이디어를 이용하여 센서를 제작함으로써 아이디어를 구체화시키고 자기회로에 대한 정성적 해석을 수행하여 축방향 힘과 굽힘방향의 힘을 측정할 수 있음을 보였다. 또한 제시된 센서가 매우 단순한 기계적 조작을 통해서 회전속도를 측정하는 엔코더로 작동할 수 있도록 기능을 추가하였다. 즉, 축의 회전속도를 측정하고 싶은 경우에는 회전속도를 측정하고 축에 걸리는 힘을 측정하고 싶은 경우에는 힘을 측정할 수 있도록 2가지 센서의 기능을 하나의 자기회로 안에 포함시켰다. 이는 좁은 공간 안에 서로 다른 기능의 센서를 포함시킴으로써 공간 활용도를 높이고 센서의 효율성을 높일 수 있음을 의미하게 되어 회전속도의 측정과 힘의 측정이 모두 필요한 응용분야(예를 들어 공작기계의 상태 측정)에 매우 유용하게 사용될 것이라 예상된다.

## 2. 센서의 원리 및 자기회로 해석

### 2.1 탄성파 측정 센서의 원리

선행 연구에서 밝혀진 내용을 Fig. 1을 이용해서 요약 설명하면 다음과 같다. 축 상의 특정 부분에 외부로부터 힘이 가해진다면 이 힘에 의해서 발생한 축 상의 응력 변화는 축을 따라서 탄성파의 형태(Fig. 1에서  $\sigma$ 로 표현)로 진행될 것이다. 이때 축 상의 측정을 원하는 지점에서 축 내부에 자기장(Fig. 1에서  $B$ 로 표현)을 형성시키면 진행되는 탄성파 중에서 그 분포가 축에 걸려있는 자기장과 닮은 성분만이 계속된다. Fig. 1의 경우 축의 단면에 형성된 자기장이 굽힘파의 응력분포와 비슷하기 때문에 진행되는 굽힘파만을 선택적으로 측정하게 된다.

상기 선행 연구를 바탕으로 본 논문에서는 Fig. 2와 같은 형상의 센서를 제안하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 외부의

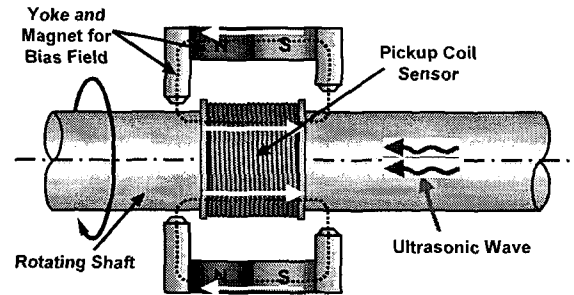


Fig 2 Schematic diagram of a longitudinal elastic wave sensor in a noncontact manner

영구자석과 요크에 의해서 생성되는 자기장은 축의 단면에 대해서 축의 한 방향으로 일정하므로 진행되는 탄성파 내에 존재하는 인장/압축과 성분만을 계속하게 될 것이다. Fig. 2에 보인 영구자석 중에서 어느 한 쪽의 극을 바꾸면 축 내에 형성되는 자기장은 굽힘 파를 측정하기 적당한 분포를 가지게 될 것이며 이를 이용하면 굽힘 파만을 측정할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 영구자석을 사용하였으나 영구자석을 전자석으로 대체한다면 간단한 전기적인 스위치 조작으로 2가지 종류의 탄성파를 선택적으로 측정하는 것이 가능하게 될 것이다.

탄성파의 응력성분은 강자성체로 이루어진 축의 내부에서 자화성분의 변화를 일으키게 되는데 이 자화성분의 변화가 만일 코일 센서가 장착된 부분에서 발생한다면(즉, 탄성파가 코일 센서가 위치한 부분을 지나고 있다면) Fig. 2의 점선으로 표시된 자기회로 상에 추가적인 자화가 발생하는 것이다. 이 응력에 의해서 발생하는 추가적인 자화성분은 이미 구성된 자기회로 상에 새로운 기자력(magnetomotive force)이 발생을 의미하고 이는 곧 자기회로 상을 흐르는 자기력선속(magnetic flux)의 변화를 의미하게 된다. 결국 축의 주변을 감고 있는 코일 센서에 의해서 이 자기력선속의 변화를 계속하면 탄성파의 응력성분을 간접적으로 검출

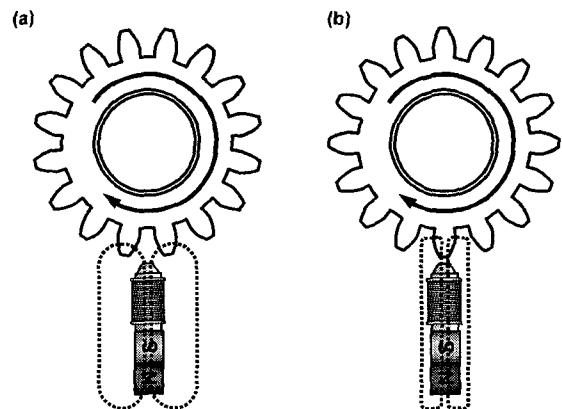


Fig 3 Sensing principles of a magnetic rotary encoder

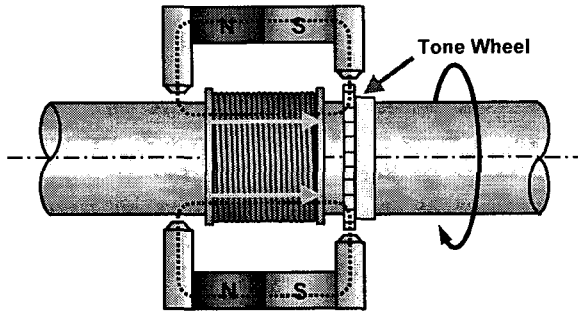


Fig 4 Schematic diagram of a rotating speed sensor in a noncontact manner

할 수 있게 된다.

### 2.2 회전속도 측정 센서의 원리

Fig. 3은 일반적으로 사용되고 있는 자기장을 이용한 회전속도 측정용 엔코더의 측정원리를 설명하고 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 톱니바퀴 형상을 한 강자성체 물체(이하 톱니바퀴라 칭함)를 회전축에 붙여서 같이 회전을 시킨다. 외부에는 영구자석을 이용하여 자기회로를 형성하고 이 자기회로의 한 곳에 자기력선속의 변화를 측정하기 위한 코일 센서를 장착한다. 영구자석에 의해서 발생하는 자기회로에 흐르는 자기력선속은 축에 부착된 톱니바퀴의 이(teeth)의 위치에 따라서 값이 달라지기 때문에 코일 센서에서 계측되는 전압신호는 축의 회전에 따라서 스치 지나가는 이의 수를 측정하는 수단으로 사용할 수 있게 된다.

이러한 회전속도 센서의 원리에 착안하여 앞서 제시한 탄성과 측정 센서의 자기회로상의 한 부분에 톱니바퀴를 삽입한다면 회전속도를 측정하는 센서로의 전용이 가능할 것이다. Fig. 4에 회전속도를 측정하는 센서의 형상을 개략적으로 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 톱니바퀴 상의 이가 존재하는 부분이 자기회로 안으로 들어와 있기 때문에 축의

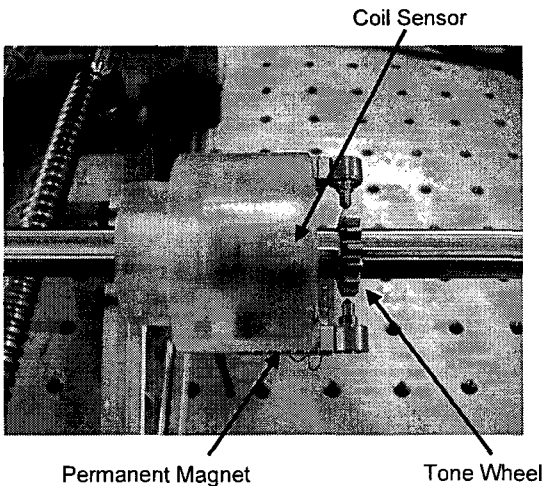


Fig 6 Appearance of the fabricated sensor

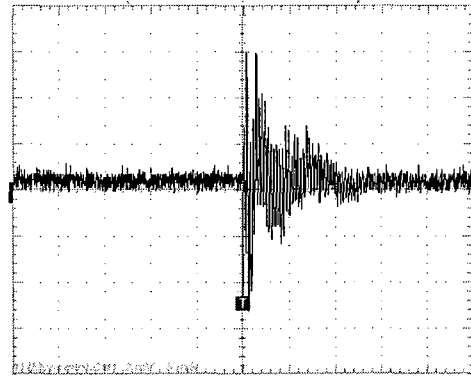


Fig 7 A measuring signal - longitudinal wave

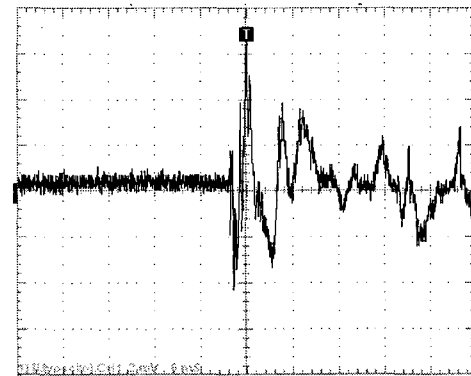


Fig 5 A measuring signal - flexural wave

회전에 따라서 자기회로를 흐르는 자기력선속의 변화가 발생하고 이를 이용해서 회전속도를 검출할 수 있게 된다.

### 3. 실험적 검증

Fig. 5는 앞서 제안한 센서를 실제로 제작한 모습이다. 영구자석을 이용하여 자기회로를 구성하였으며 축을 포함하는 자기회로에서 발생하는 자기력선속을 측정하기 위한 코일 센서를 장착하였다.

먼저 탄성파의 측정이 가능한지를 살펴보기 위하여 회전하고 있는 축의 한 쪽 끝단에 비자성체로 만들어진 구형 발사체를 축방향으로 충돌시켜 인장/압축 탄성파를 발생시켰다. Fig. 6은 이렇게 발생하여 진행되는 탄성파를 측정한 결과를 보여주고 있다. 또한 굽힘 탄성파를 측정할 수 있음을 확인하기 위하여 한 쪽 영구자석의 극성을 반대로 장착하고 회전하고 있는 축의 측면에서 발사체를 충돌시켜서 굽힘 탄성파를 발생시키고 이를 측정해보았다. Fig. 7은 분산(dispersion) 현상을 보이는 굽힘 탄성파가 잘 계측되고 있음을 보여주고 있다.

탄성파 측정에 대한 실험결과는 회전속도를 측정하기 위한 톱니바퀴를 자기회로 상에서 약간 비껴난 지점에 위치시

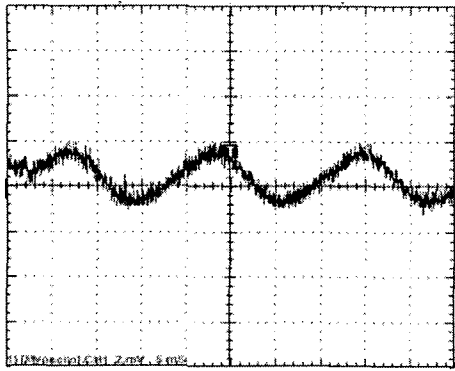


Fig 8 A measuring signal - rotating speed signal

킴으로서 구현이 가능하다. 만일 톱니바퀴가 자기회로 상에 위치하도록 이동 시키면(Fig. 5) 축의 회전속도를 측정하는 것이 가능하게 된다. Fig. 8은 이렇게 회전속도를 측정할 수 있도록 하여 측정된 축의 회전신호를 보여주고 있다. 축에 장착된 톱니바퀴 이의 개수가 15개이고 측정된 신호에서 한 주기가 약 15ms이므로 이를 이용해서 계산된 회전속도는 266.7rpm으로 실제 축의 회전수 250rpm와 잘 일치한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 회전 중에 있는 축을 따라서 전파되는 탄성파를 측정함으로써 축이 경험하는 힘을 계측할 수 있는 센서와 회전속도를 측정하는 센서가 하나의 자기회로 상에 구성될 수 있음을 정성적으로 보였다. 실제로 센서를 제작하여 축방향의 간단한 기계적인 조작만으로 축에 걸리는 힘의 측정과 축의 회전속도를 측정하는 기능을 전환할 수 있음을 보였고 자기회로의 구성에 따라서 인장/압축과와 굽힘과를 선택적으로 측정할 수 있음과 회전속도를 측정할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 정량적인 자기회로 해석을 통하여 센서의 특성에 영향을 주는 파라미터들을 도출하고 이를 통해서 센서의 성능을 최적화 시키는 연구가 현재 진행 중에 있다.

#### 참 고 문 헌

(1) Dimarogonas, A. D., 1983, *Analytic Methods in Rotor Dynamics*, Applied Science Publishers, New York  
 (2) Ohzeki, H., Mashine A., Aoyama, H., and Inasaki, I., 1999, "Development of a Magnetostrictive Torque Sensor for Milling Process Monitoring," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.121, pp.615~622  
 (3) Suzuki, I. S., Sasaoka, T., and Toda, K., 1994, "In-process Detection of Torque on a Drill Using

Magnetostrictive Effect," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.30, No.6, pp.4632~4634

(4) Albrecht, A., Park, S. S., Altintas and Y., Pritschow, G., 2005, "High Frequency Bandwidth Cutting Force Measurement in Milling using Capacitive Displacement Sensor," *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Vol.45, pp.993~1008

(5) 김 윤 영, 박 찬 일, 한 순 우, 조 승 현, 2004, "자기 변형 트랜스듀서를 이용한 유도 비틀림파의 발생 및 배관의 이상진단," *한국소음진동공학회논문집*, 제 14권, 제 2호, pp. 144~149

(6) Fleming, W., 1982, "Automotive Torque Measurement: A Summary of Seven Different Methods," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol.31, No.3, pp.117~124

(7) Fleming, W., 1989, "Magnetostrictive Torque Sensors-Derivation of Transducer Model," SAE paper, 890482, pp.519~538

(8) Zabler, E., Dukart, A. Heintz, F. and Krott, R., 1994, "A Non-contact Strain-Gage Torque Sensor for Automotive Servo-driven Steering System," *Sensors and Actuators A*, Vol.41~42, pp.39~46

(9) Garshelis I. J., 1991, "New Types of Magnetoelastic Transducers for Sensing Force Related Parameters," SAE paper, 910856, pp.1201~1210

(10) Han, S. W., Lee, H. C. and Kim, Y. Y., 2003, "Noncontact Damage Detection of a Rotating Shaft Using the Magnetostrictive Effect," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.22, No.4, pp.141~150

(11) Kikuchi, Y., Nakamura, F., Wakiwaka, H., and Yanada, H., 1997, "Consideration of Magnetization and Detection on Magnetic Rotary Encoder Using Finite Element Method," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.33, No.2, pp.2159~2162

(12) Shi, Y., Zhang, H., Jiang, X., Wen, Q., and Han, B., 2004, "Design of Output Voltage Waveform on Magnetic Encoder," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.282, pp.317~320

(13) Lee, H., Kim, Y. Y., 2002, "Wave Selection Using a Magnetomechanical Sensor in a Solid Cylinder," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol.112, No.3, pp.953~960