

# 자외 현상을 이용한 회전축 내부의 비접촉 탄성과 측정

한순우\* · 이호철\*\* · 김윤영\*\*\*

## Non-Contact Measurement of Elastic Waves Propagating in a Rotating Shaft using Magnetostrictive Effects

Soon Woo Han, Ho Chul Lee, Yoon Young Kim

**Key Words** : rotating shaft, non-contact measurement, elastic waves, lift-off factor

### Abstract

The purpose of this work is to suggest a new non-contact measurement method applicable to the diagnosis of rotating shafts. Longitudinal elastic waves propagating along the shafts are measured by magnetostrictive sensors that make use of the coupling phenomena between strains and magnetic induction in ferromagnetic shafts. These sensors have been successfully applied in pipes and others, but it appears that the present application of them to rotating shafts is made here for the first time. Several issues appearing in the present application are carefully investigated and several experimental results are presented to address the usefulness of the present method.

### 1. 서론

축(shaft)은 많은 기계에서 동력 전달을 위해 사용되는 핵심적인 요소로서, 파손될 경우 전체 시스템이 작동을 멈추어야 하는 상황이 발생한다. 이를 방지하기 위한 축의 이상을 검사하는 대표적인 방식으로는 진동신호 분석을 들 수 있는데<sup>1)2)</sup> 베어링 하우징 등에 가속도계, 근접 센서(proximity transducer) 등을 부착하여 회전중인 축의 진동 신호를 분석하여 결함 유무를 판단하는 기법이다. 그러나 정재파동(standing wave) 또는 변위 만을 측정하므로 결함의 위치 판단이 용이하지 않고, 결함의 크기가 크지 않은 경우 정재 파동에 의해 잘 검출해 낼 수 없는 단점이 있다.<sup>3)4)</sup> 또 다른 방식인 초음파 탐상 방식은 비교적 작은 결함도 잘 검출해 내며, 결함의 위치 판단 또한 용이하다는 장

점이 있으나<sup>5)</sup> 접촉식 탐촉자(probe)를 사용하는 관계로 축이 회전 중일 경우에는 측정이 불가하다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 두 방식의 장점을 결합한 방식 즉, 회전중인 축에서 전달되는 탄성파를 비접촉으로 측정하는 새로운 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 마그네토스트릭션(magnetostriction) 효과 또는 현상을 이용하는 방법을 제안하고 이 방법의 타당성을 실험적으로 검증하고자 한다. 마그네토스트릭션 현상은 자성체 축 내부에서 전파하는 탄성파에 의해 축 내부의 자기장이 변화하는 현상 또는 그 역현상을 말하는 것으로 이러한 현상을 이용하는 센서를 마그네토스트릭션 센서<sup>6)</sup>(일본식 용어로는 자왜센서)라고 한다.

축과 유사한 구조에서 마그네토스트릭션 센서가 사용된 사례로는 정지 상태에 있는 파이프나 축 등이 있으나<sup>7)8)</sup>, 본 연구에서처럼 회전 중인 축에 응용된 사례는 보고된 바가 없다. 따라서 이 연구에서는 회전 중인 축에서 마그네토스트릭션 효과를 이용하여 축의 내부에 전파하는 탄성파를 측정하는 가능성을 제시하고자 한다. 특히 회전 중인 축의 경우, 축의 진동으로 인하여 축과 센서간의 간격이 변하게 되는데, 이것이 계측되는 신호에 기

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 삼성 전기 기술총괄 DVD pick up 팀

\*\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : yykim@snu.ac.kr

Tel : (02)880-7154, Fax : (02)883-1513

치는 영향을 간극인자라는 개념을 도입하여 체계적으로 연구하였다.

축에서의 탄성과 해석을 용이하게 하기 위해 표준적인 사각파를 이용하였는데, 이를 발생시키기 위해 공기총으로 발사체를 축에 타격시키는 장치를 구성하였다.

본 연구에서는 먼저 전체적인 실험 장치와 마그네토스트릭션 효과에 대해 개략적으로 설명한 후, 간극인자의 영향, 회전축에서의 탄성과 검출에 대한 실험 결과와 방법을 체계적으로 살펴보고, 이를 바탕으로 이 연구의 결론을 도출하였다.

## 2. 실험 장치 개요 및 자왜 효과

Fig. 1은 본 연구의 대상인 회전축에 대한 실험 장치의 개략도를 보여주고 있다. 축은 전기 모터에 의해 회전하며, 마그네토스트릭션 센서는 회전하는 축과 접촉하지 않도록 별도의 지지대에 의해 고정되어 있다. 축이 모터와 연결된 반대쪽의 끝 단은 회전축과 같은 지름을 갖는 길이가 짧은 원통형 발사체가 압축 공기에 의해 발사되어 부딪힌다. 이때, 축에 발사체의 길이와 비례하는 종파 성격을 갖는 사각형 응력파가 발생되는데, 축에서 계측되는 전형적인 신호가 Fig. 2에 나타나 있다. (자세한 제원은 실제 실험과 관련하여 나중에 기술함) 축이 회전하지 않는 경우, 축에 스트레인 게이지를 부착할 수 있는데, Fig. 2의 점선이 스트레인 게이지에 의해 계측된 스트레인 신호이며, 실선은 마그네토스트릭션 효과를 이용하여 계측된 신호의 모습이다. 이 그림의 목적은, 스트레인 신호와 마그네토스트릭션 센서에 의한 신호의 차이를 명확히 하고자 하는 것이다.

마그네토스트릭션 현상은 통상 주울(Joule) 효과와 빌라리(Villari) 효과를 동시에 일컫는 것인데, 주울효과<sup>9)</sup> 자성체 주변에 설치된 코일에 전류 펄스를 흘려주면 코일의 주변에 발생하는 자기장의 변화에 의해 자성체의 물리적 변형(길이, 부피 변화)이 유도되는 현상을 말한다. 그리고 빌라리효과란 자성체에 탄성파 등에 의해 기계적 변형이 발생되면 이것이 자성체의 유도 자기장의 변화를 일으키는 현상으로 자성체 주변에 코일을 설치하면 이 자기장의 변화를 전압의 변화로 측정할 수 있게 된다. 따라서 코일에서 발생하는 전압의 변화를 측정하면 탄성파의 정보를 알 수 있게 되는데 본 연구에서는 이 빌라리 현상을 이용한 탄성파계 축에 초점을 둔다. 그리고 이러한 원리에 의한 센서를 통상 마그네토스트릭션 센서라고 부른다.

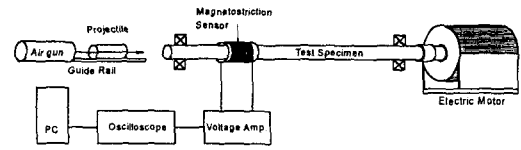


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

이 현상을 이용하게 되면 물체와의 직접 접촉 없이 축 내부에서 전달되는 탄성파를 측정할 수 있는 장점이 있다.

종파를 측정하는 경우에는 축에 코일을 Fig. 3에서처럼 솔레노이드 형태로 감게 되는데(향후 이러한 형태의 마그네토스트릭션 센서를 솔레노이드 센서라 부르고자 한다), 이 때 코일에서 발생하는 유도 전압  $V$ 는 패러데이-렌츠(Faraday-Lenz) 법칙에 의해 다음과 같이 구할 수 있다<sup>10)</sup>

$$V(x, t) = -N \frac{d}{dt} \int_A B dA \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 코일이 감긴 횟수를,  $A$ 는 코일의 단면적,  $B$ 는 코일 내부의 유도 자기장의 자속밀도(flux density)로서 외부에서 가해지는 자기장  $H$ 와 응력  $\sigma$ 에 대해 다음과 같은 관계가 있다.<sup>11)</sup>

$$B = \mu^o H + q\sigma \quad (2)$$

식 (2)에서  $\mu^o$ 는 투자율(permeability)이며  $q$ 는 마그네토스트릭션 효과를 나타내는 계수로서 본 연구에서처럼 축에서의 종파를 다룰 때는 상수로 취급할 수 있다. 축에서 전달되는 종파가 봉속도(bar velocity)로 전달된다고 볼 수 있는 경우에는 응력  $\sigma$ 와 변형률  $\epsilon$ 와의 관계를 종탄성계수  $E$ 만을 이용하여  $\sigma = E\epsilon$ 로 간단히 표현할 수 있으며 이 경우, 응력  $\sigma$ 가 축의 단면에 걸쳐 균일하다고 할 수 있다.

식 (2)에서의  $\mu^o$ ,  $H$ ,  $q$ 가 시간 변화에 대해 일정하면 다음과 같이 탄성파에 의한 변형률  $\epsilon$ 과 코일에서 유도되는  $V$ 와의 관계는 식(3)과 같이 표현된다<sup>12)</sup>.

$$V(x, t) = -NqE \int_A \frac{\partial \epsilon}{\partial t} dA \quad (3)$$

식 (3)에서 알 수 있듯이 솔레노이드 센서에서 측정되는 전압은 변형률의 시간 미분이다. 따라서 Fig. 2에서와 같이 변형률이 급격하게 변화하는 곳에 큰 출력의 솔레노이드 신호가 나타나게 된다. 그런데 이 센서의 장점 중의 하나는 솔레노이드 코일의 직경, 코일이 감기는 길이, 권선수를 조절하면 센서의 감도 등을 쉽게 조절할 수 있다는 것

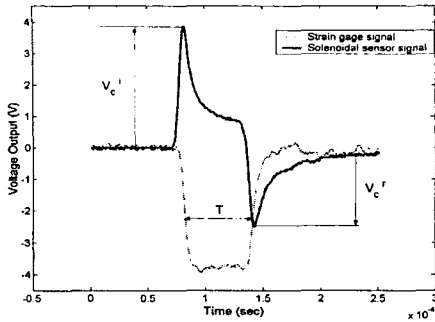


Fig. 2 Elastic wave signals measured by a strain gage and a magnetostrictive sensor

이다. 본 연구에서는 원통형 아크릴에 코일을 감아 센서를 제작하였는데, 아크릴은 공기와 거의 같은 크기의 투자율(permeability)을 갖기 때문에 자왜 센서의 성능에 미치는 영향이 거의 없는 장점이 있다<sup>13)</sup>.

계측되는 신호의 신호대 잡음비 (S/N비)를 늘리고, 원하는 형태의 파의 종류를 계측하기 위해서 계측되는 축의 부위에 편향 자기장 (bias magnetic field)를 가해 주게 된다. 특히 종파를 측정하기 위해서 Fig. 3에서처럼 솔레노이드 형태의 전자석을 축 주위에 설치하였다. (이에 대한 이론적, 실험적 근거는 Lee and Kim<sup>11)</sup>을 참조할 것)

### 3. 간극 인자의 영향

마그네토스트릭션 센서의 성능에 영향을 끼치는 것은 여러 가지가 있으며 그 중 대표적인 것이 편향 자기장, 충전 인자(fill factor), 간극 인자(lift-off factor)라고 할 수 있다. 편향 자기장, 그리고 충전인자(센서의 내경과 축의 직경의 비율) 등도 센서의 성능에 상당한 영향을 끼치지만<sup>13)</sup>, 회전 축의 경우에는 간극인자의 영향을 특별히 고려할 필요가 있다. 간극인자란 Fig. 4에 도시되어 있듯이 센서의 직경(D)에 대한 자왜 센서의 중심과 축 중심 간의 편심량(e)의 비로서 정의된다.

$$\zeta = \frac{e}{D} \quad (4)$$

회전축에서 간극인자의 영향을 살펴보아야 하는 이유는 축이 회전하는 경우 발생하는 축의 진동으로 인하여, 센서와 축간의 거리 또는 간극인자가 시간에 따라 변화하기 때문이다.

본 연구에서 사용한 SM45C 재질의 축에서의 종

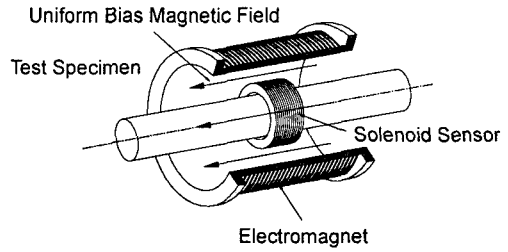


Fig. 3 The schematic diagram of the sensor and the solenoid type electromagnet

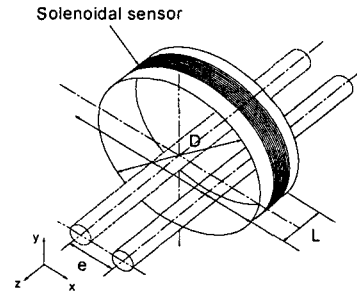


Fig. 4 The configuration of the solenoidal sensor

파 전파속도는  $c=5060$  (m/s)이기 때문에 이 탄성파와 관련하여 다루어야 하는 주파수 대역이 최소 10 KHz이상인데 반해, 회전하는 축의 회전에 의해 발생하는 횡방향 진동수의 범위는 1 KHz 미만 대역이다. 실제 발전기축 등과 같은 대부분의 문제에서는 회전에 의한 횡방향 진동수의 범위도 이 범위에 속한다고 할 수 있다. 따라서, 솔레노이드 센서에 의해 종파가 계측되는 순간에는 축이 준 정적상태에 놓여 있다고 볼 수 있다. 하지만, 준 정적 상태라 하더라도 축의 편심에 의한 효과가 센서의 감도에 영향을 끼치기 때문에 이에 대한 영향을 살펴보아야만 한다. 만약 그 영향이 크다면 센서의 교정이 매우 어렵거나 불가능하기 때문에, 회전축 내부에서 전파되는 탄성파를 측정하는데 솔레노이드 센서를 사용할 수 없게 된다.

이를 살펴보기 위해서, 본 연구에서는 정적 상태에 있는 축에서, 간극인자의 변화에 따른 센서의 출력을 실험적으로 구해보았다. 내경이 큰 솔레노이드 센서를 설치한 후 축 중심과 센서 중심이 일치하는 곳을 기준으로 센서를 x방향으로 -24mm에서 24mm 사이에서 6mm 만큼씩 이동시켜 가면서 9개의 지점에서 신호를 측정하였다. 이 실험을 위해 직경이 10mm인 원형축을 대상으로 하여 직경 80mm, 길이 30mm인 솔레노이드 센서를 제작하여

실험하였다. 그 신호로부터 Fig. 2에 표시된 바와 같은 신호의 최대치  $V_c'$ 가 간극인자에 따라 어떻게 변화하는지를 Fig. 5에 나타내었는데, 간극인자의 값이 상당히 크다 하더라도, 간극인자의 값이 작은 경우에 비해 센서의 출력에는 큰 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 특히 간격인자가 0.1보다 작은 경우, 즉 편심량  $e$ 의 값이  $\pm 6\text{mm}$  이내인 경우에는 출력 차이를 무시할 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서, 축의 횡진동 변위량에 의한 간극인자의 범위가  $\pm 0.1$ 이내인 경우 간극 인자의 영향을 사실상 무시할 수 있음을 알 수 있다. 참고로 Fig. 5에서 편심량이 커질 경우 출력의 크기가 다소 증가하는 현상은 슬레노이드 전자석 내부의 자기장이 전자석 가까운 부근에서 다소 증가되기 때문이다.

#### 4. 회전축에서의 탄성과 검출

이 절에서는 회전하고 있는 축에서의 종파를 검출하는 기법을 제시하고자 한다. 전체적인 실험 방법을 설명하고, 회전하는 축과 회전하지 않는 축에서의 측정된 탄성파를 비교하여 회전중인 축에서 탄성파를 효과적으로 측정해 낼 수 있음을 보이고자 한다.

##### 4.1 실험 방법

먼저 회전축에서의 탄성과 검출을 위한 실험 방법을 살펴보고자 한다. 실험장치에 대한 전체적인 구성은 Fig. 1과 같은데, 실험에 사용된 축의 재질은 SM45C이며 길이는 1000mm, 직경은 10mm이다. 축의 양단은 레이디얼 볼 베어링(radial ball bearing)으로 각각 지지되어 있으며 축은 유연 커플링(flexible rubber coupling)에 의해 연결된 전기 모터에 의해 구동된다. 축에 커플링이 취부되는 부분의 지름이 9.5mm이 되도록 가공하고 나머지 외경은 가공하지 않은 채 베어링을 억지 끼워 맞춤으로 장착하였다.

본 연구에서 사용된 전기 모터는 정속 교류 모터로서 1800rpm의 회전속도를 갖기 때문에 회전시 생기는 횡방향 1차 진동 성분은 30Hz부근에 위치하는데, 본 연구에서 관심을 두는 종파의 주파수 대역은 최소 10 KHz 이상이므로 종파 측정시 준정적 상태로 간주할 수 있음을 알 수 있다.

실험에 사용된 센서는 내경 14mm, 외경 18mm, 코일부의 길이 20mm의 원통형 아크릴에 직경 0.3mm의 코일을 총 120회 감아서 제작하였다.

이 센서의 실제 모습은 Fig. 6에 나와 있는 바와

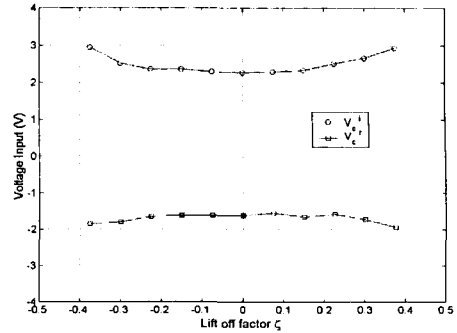


Fig. 5 Peak values of output of sensor for different lift-off factors

같이 축과 접촉하지 않도록 별도의 지지대에 장착되어 있다. 축의 외경이 10mm이므로 축과 센서는 축의 외경과 센서의 내경거리 사이는 2mm이다. 이 그림에서는 편향 전자석과 자왜 센서가 별도의 위치에 놓여 있으나 실제 실험을 하는 경우에는 Fig. 3에서처럼 같이 놓이게 된다. 이 센서에서 측정된 신호는 Stanford Research System사에서 제작한 SRS 560 예증폭기(Pre-amplifier)에서 증폭되어 Lecroy사의 9310 오실로스코프로 거친 후 PC로 저장된다. 신호의 증폭 대역은 100 - 300KHz이며 2Ms/s의 속도로 신호를 샘플링하였다.

탄성과 발생을 위해서 기본형 홉킨슨 봉(Hopkison bar)에서와 같이, 발사체를 회전하고 있는 축에 타격시키게 된다. 이를 위해서, 압력 조절 밸브와 전자식 공기 공급 개폐 장치를 통해 나오는 약 0.4MPa의 일정한 압력을 가진 압축공기를 순간적으로 방출하여 발사체를 발사시켰는데, 이 방법으로 일정한 크기의 탄성파를 발생시킬 수 있었다. 본 연구에서처럼 발사체와 측정 대상 축의 재질과 단면적이 동일한 경우, 축에서 발생하는 사각형태의 종파의 지속 시간  $T$ 와 응력  $\sigma$ 의 크기는 다음의 식으로 간단히 구해진다.<sup>14)</sup> (Fig. 2에 대한 도식적 설명이 있음)

$$T = \frac{2l_1}{c} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{V\rho c}{2} \quad (6)$$

여기서  $l_1$ 은 발사체의 길이,  $c$ 는 종파속도,  $V$ 는 발사체의 속도,  $\rho$ 는 밀도를 나타낸다. 본 실험에서는  $l_1=25\text{mm}$ 이며, SM 45C 재질의 축에서는  $c=5060 \text{ m/s}$ ,  $\rho=7840 \text{ Kg/m}^3$ 이므로 이 데이터를 식 (5)에 대입하면 사각형태의 종파의 지속시간  $T$ 는  $9.9 \times 10^{-6} \text{ sec}$ 로 계산되며, 실제 실험에서도 이 시간을 확인할 수 있었다. 본 실험에서 사용된 발

사체의 속도는  $V=1\text{m/s}$ 로 측정되며 이 경우 응력 값의 크기가 20 MPa로 재료의 항복응력 340 MPa 보다 상당히 낮기 때문에 그 값의 범위가 적정하다고 할 수 있다.

#### 4.2 실험 결과 및 고찰

여기서는 결함이 없는 회전축에서 솔레노이드 센서를 이용하여, 비접촉으로 탄성파를 측정할 실험 결과를 제시하고, 그 결과를 회전하지 않은 축에서 측정한 탄성파와 비교해 보고자 한다.

실제 센서가 놓이는 위치는 Fig. 7에서 표시되어 있는 것처럼 발사체가 부딪혀 종파가 발생하는 끝단에서 250 mm 되는 점을 선정하였다.

Fig. 8(a)와 (b)에는 회전하지 않는 축과 회전하고 있는 축에서 솔레노이드 센서로 측정된 신호를 보여주고 있다. 정지하고 있는 축에서 측정된 신호인 Fig. 8(a)의 신호의 타당성 및 유용성이 이미 검증되어 있기 때문에<sup>13)</sup> 여기서는 Fig. 8(b)에 있는 신호를 Fig. 8(a)의 신호와 비교함으로써, 그 타당성을 살펴보고자 한다.

두 그림만을 보면, Fig. 8(b)에는 Fig. 8(a)에 비해 약간의 잡음만 추가되었을 뿐, 사실상 Fig. 8(a)의 신호와 동일한 것을 알 수 있다. 이것을 정량적으로 비교하기 위해, 두 신호의  $V_c, V_c', V_b, V_b'$  와  $\Delta T$ 를 Table 1에 비교해 보았다. 이 표를 살펴보기에 앞서, Fig. 8(a)와 (b)에 처음 나타난 신호는 발사체의 충격에서 의해 Fig. 7의 오른쪽에서 왼쪽으로 전파하는 사각형 압축 종파를 나타낸 것이고, 두 번째 나타나는 신호는 모터와의 연결부에서 반사되어 돌아오는 인장 종파를 나타낸다는 점을 밝혀 두고자 한다. (따라서 두 신호의 위상이 다름) 먼저 Table 1에 주어진 두 신호의 피크값을 보면, 두 값이 거의 동일하다는 사실을 알 수 있다. 이것은 축의 진동에 의해 발생하는 간극인자의 변화가 거의 영향을 끼치지 않는다는 사실을 보여 준다.

실제로 축의 횡방향 변위를 측정할 결과  $\pm 1\text{mm}$ 범위로 나타나서 실제로 축이 운전되는 상황에 비해 의도적으로 큰 진동량이 발생하도록 하였는데도 불구하고 이 영향이 센서의 출력에 거의 영향을 끼치지 않는다는 것을 알 수 있다. 축의 진동에 의한 간극인자를 평가하면 최대  $\zeta=0.07$ 에 해당하게 되어 Fig. 5의 결과로부터 이 범위 내에서는 센서의 출력의 변화가 거의 없다는 사실을 확인할 수 있다.

마지막으로, 시간  $\Delta T$ 를 비교해 보자. 이 시간은 종파가 센서가 놓인 위치에서 다른 단의 연결부 사이의 거리의 2배에 해당하는 거리를 이동한 시

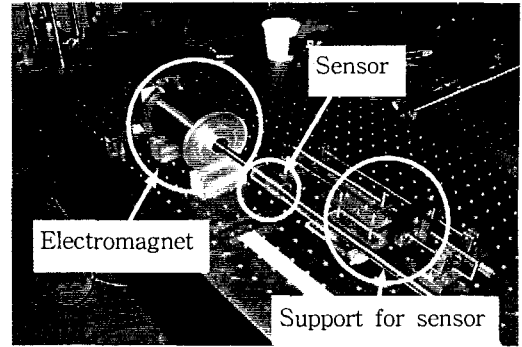


Fig. 6 Magnetostrictive sensor and electromagnet used in the experiment

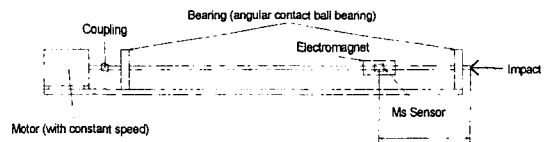


Fig. 7 Location of sensor in the experimental setup

간으로, 이 시간이 정확하게 평가될 수 없다면 이 기법을 탄성파 측정에 사용하기 곤란하다. 실제로 센서가 놓인 위치와 모터와의 연결부의 거리가 0.75m 이므로 축에서의 종파속도인  $c=5060\text{m/s}$ 를 이용하면 이론적인  $\Delta T_{theory}$ 는  $2.96 \times 10^{-4}$  (sec)으로 계산된다. 그런데 Table 1을 보면 회전축과 회전하지 않는 축에서의  $\Delta T$ 가 거의 동일할 뿐 아니라, 이론적으로 구한 거리와 단지 1% 이내로 가까이 있다는 사실을 알 수 있다. 따라서 축이 회전하는 경우에도, 솔레노이드 센서를 이용하여 정확하게 탄성파를 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

#### 5. 결론

회전하고 있는 축에서 전파되는 종파 형태의 탄성파를 비접촉으로 측정하기 위해 마그네토스트릭션효과를 이용한 측정기법을 제안하였으며, 이 기법이 회전축에서의 탄성파 측정에도 매우 유용한 방법임을 실험적으로 보였다. 축의 회전할 때 발생하는 진동에 의한 마그네토스트릭션 센서의 출력에 대한 영향을 간극인자 개념을 도입하여 정량적으로 살펴보았다. 그 결과, 종파와 같이 전파속도가 빠른 탄성파를 측정하는 경우, 축의 횡방향 진동량이 상당히 커다 하더라도 센서의 출력은 거의 영향이 받지 않는다는 사실을 알 수 있었다. 이상의 실험 결과를 볼 때, 본 연구에서는 제시하

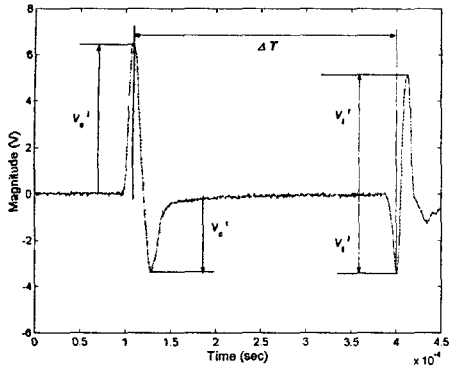
는 마그네토스트릭션 효과를 이용한 회전축의 비접촉 측정방법이 매우 타당할 뿐 아니라, 실용가능성이 매우 크다는 것을 확인할 수 있었다.

## 후기

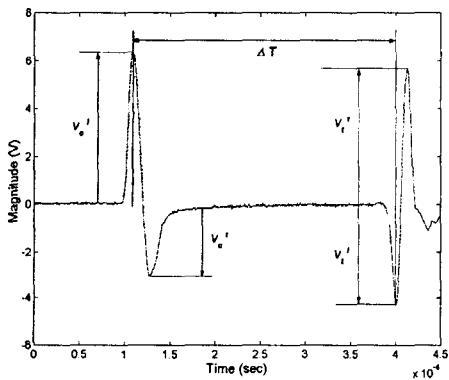
본 연구는 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행된 것으로 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Mcgonnagle, M. J., 1961, Nondestructive Testing, Gordon and Breach, New York
- 2) Bray, D. E. and Stranley, R. K., 1997, Nondestructive Evaluation, CRC press, New York
- 3) Goodwin, M. J., 1989, Dynamics of rotor-bearing systems, Unwin Hyman
- 4) 장은구, 1998, 기계요소와 진동 특성에 기인한 센서의 적용, Rotor Vision 14호, 한국 벤츨리네바다
- 5) Rose, J. L., 1999, Ultrasonic Waves in a Solid Media, Cambridge Univ. Press, New York
- 6) Kwun, H., 1991, Back in Style : Magnetostrictive sensors, Technology Today
- 7) Kwun, H. and Bartels, K. A., 1996, Experimental observation of elastic-wave dispersion in bounded solids of various configurations, J. Acoust. Soc. Am. 99(2), pp.962-968
- 8) 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.1202-1207
- 9) Joule, J. P., 1847, On the Effects of Magnetism Upon the Dimensions of Iron and Steel Bars, Philosophical Magazine, Vol. 30
- 10) Griffiths, D. J., 1999, Introduction to Electrodynamics, Prentice Hall, New York
- 11) Lee, H. C. and Kim, Y. Y., 2001, Wave selection using a magnetomechanical sensor in a solid cylinder, Submitted to J. Acoust. Soc. Am
- 12) 조승현, 이호철, 김윤영, 2000, 마그네토스트릭션 효과를 이용한 비접촉 모달 테스트 기법, 한국 소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp, 701- 707
- 13) 이호철, 2001, 빌라리 효과를 이용한 모드 선택 응력파 센서의 설계와 해석, 박사 학위 논문, 서울대학교 공과대학
- 14) Graff, K. F., 1975, Wave Motion in elastic solids, Ohio State University Press, Ohio.



(a) Signal in a non-rotating shaft



(b) Signal in a rotating shaft (1800rpm)

Fig. 8 The signal measured by the solenoidal sensor in a shaft.

Table 1 Comparison of the solenoidal sensor signals in non-rotating and rotating shafts

	$V_c'$	$V_c''$	$V_t'$	$V_t''$	$\Delta T$
Non-rotating	6.37	-3.06	-4.25	5.69	$2.92 \times 10^{-4}$
Rotating	6.45	-3.25	-3.5	5.25	$2.93 \times 10^{-4}$
Relative Difference	0.08	0.19	0.75	0.44	$0.1 \times 10^{-5}$