

## 마그네토스트릭션 효과를 이용한 회전축의 비접촉 결함진단

김윤영<sup>†</sup> · 한순우<sup>\*</sup> · 이호철<sup>\*\*</sup>  
(2001년 12월 10일 접수, 2002년 4월 26일 심사완료)

### Non-Contact Damage Detection of Rotating Shafts by Using the Magnetostrictive Effect

Yoon Young Kim, Soon Woo Han and Ho Chul Lee

**Key Words:** Rotating Shaft(회전축), Non-Contact Measurement(비접촉 측정), Elastic Waves(탄성파), Damage Detection(결함진단), Lift-Off Factor(간극인자)

#### Abstract

The purpose of this work is to suggest a new non-contact damage detection method for rotating ferromagnetic shafts. The presence and the location of a damage in rotating shafts are assessed by means of longitudinal elastic waves propagating along the shafts. These waves are measured by non-contact magnetostrictive sensors consisting of a coil and bias magnets. This paper shows the effectiveness of the sensors in the damage detection of rotating shafts. Several issues occurring in the application of the sensors to rotating shafts are carefully investigated.

#### 1. 서론

축(shaft)은 많은 기계에서 동력 전달을 위해 사용되는 핵심적인 요소로서, 파손될 경우 전체 시스템의 작동을 멈추게 하는 상황을 발생시키기도 한다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 축의 이상을 조기에 검출하기 위해 초음파 탐상 검사, 진동신호 분석 등이 사용되어 왔다.<sup>(2,3)</sup> 전통적인 초음파 탐상 방식은 탄성파의 전파/반사 원리를 이용하여 축 외부의 결함은 물론 축 내부에 존재하는 결함을 탐지할 수 있으며 측정된 신호의 판독이 용이하다는 장점이 있으나, 초음파의 발생/검출을 위해서는 탐촉자(probe)를 대상 물체에 밀착시켜야 하므로 축의 운전을 정지하여야 하는 문제가 발생한다.<sup>(4)</sup>

진동 신호 측정 방식은 베어링 하우징 등에서 측정되는 진동신호로부터 회전 중인 축의 이상을 진단하는 방식이다.<sup>(5,6)</sup> 이 방식은 축의 결함 발생을 간접적으로 평가하는 방식이기 때문에, 축의 이상을 정확히 예측하기 쉽지 않다. 특히 결함의 크기가 작은 경우에는 이 방법을 적용하기 어렵다.

한편 근접 센서(proximity transducer) 또는 레이저 변위계를 사용하는 경우<sup>(7)</sup> 측정방법이 비접촉이긴 하지만, 변위만으로 미세한 축의 결함을 찾아내기 어렵다. 그러므로 탄성파를 이용하여 회전 중인 축을 비접촉으로 검사하기 위해서는 새로운 방법의 검출 기법이 요구된다. 본 연구에서는 회전 중인 축에서 전달되는 탄성파를 비접촉으로 측정하는 새로운 방법으로, 마그네토스트릭션(magnetostriction) 효과를 이용하는 방법을 제안하고자 하며, 이 방법의 타당성을 실험으로 검증하고자 한다.

마그네토스트릭션 현상은 자성체 축 내부에서

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : yykim@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7154 FAX : (02)883-1513

<sup>\*</sup> 서울대학교 기계구조연구소

<sup>\*\*</sup> 삼성전기 기술총괄 DVD pick up 팀

전파하는 탄성파가 자기장의 변화를 일으키는 현상을 말하는데, 통상 이 현상과 그것의 역현상을 통틀어 지칭한다. 그리고 이러한 현상을 이용하여 계측하는 센서를 마그네토스트릭션 센서<sup>(8)</sup>(일본식 용어로는 자왜센서)라고 한다.

축과 유사한 구조에서 마그네토스트릭션 센서가 정지 상태에 있는 파이프나 축에 사용된 사례가 있으나,<sup>(9,10)</sup> 지금까지 본 연구에서처럼 회전 중인 축에 응용된 사례는 보고된 바가 없다. 따라서 이 논문에서는 회전 중인 축에서 마그네토스트릭션 효과를 이용하여 축의 내부에 전파하는 탄성파를 측정하는 방법과, 이렇게 측정된 탄성파를 이용하여 축의 결함을 진단하는 기법을 연구하고자 한다.

회전 중인 축의 경우, 축의 진동으로 인하여 축과 센서간의 간격이 변하게 되는데, 이것이 계측되는 신호에 끼치는 영향을 간극인자라는 개념을 도입하여 체계적으로 연구하였다. 그리고 본 연구에서 제안하는 계측기법을 인위적인 결함이 있는 축에서의 결함 위치를 찾아내는데 적용해 보았다. 축에서의 탄성과 해석을 용이하게 하기 위해 표준적인 사각파를 이용하였으며, 이를 발생시키기 위해 공기총으로 발사체를 축에 타격시키는 장치를 구성하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 전체적인 실험 장치와 마그네토스트릭션 효과를 개략적으로 설명하였다. 그리고 간극인자의 영향을 체계적으로 살펴본 후, 회전축에서의 탄성과 검출, 회전축에서의 이상진단에 대한 실험 결과를 제시하였다. 마지막으로 이를 바탕으로 본 연구의 결론을 도출하였다.

## 2. 실험장치 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 반대쪽 끝단은 회전축과 같은 지름을 갖는, 길이가 짧은 원통형 발사체에 의해 가려진다. 이 발사체는 압축 공기에 의해 발사되는데, 발사체의 타격에 의해 발생하는 충격파는 발사체의 크기에 비례하는 사각형 충격파이다. 이러한 가격에 의해 축에서

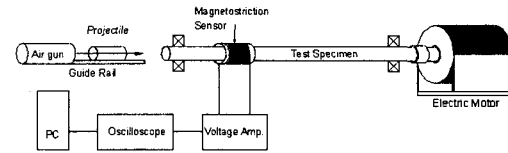


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

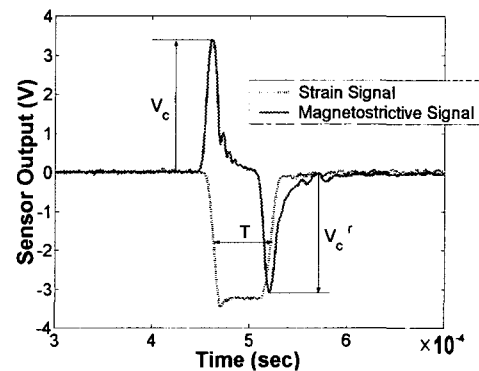


Fig. 2 Elastic wave signals measured by a strain gage and a magnetostrictive sensor

계측되는 전형적인 신호형태가 Fig. 2에 나타나 있다. (자세한 제원은 실제 실험과 관련된 절에서 추후 기술함) 스트레인게이지에 의한 신호와 마그네토스트릭션 센서에 의한 신호의 특징을 비교하기 위해서, 정지된 상태에 있는 축을 대상으로 하여 측정된 결과를 Fig. 2에 제시하였다.

마그네토스트릭션 현상은 통상 주울(Joule) 효과와 빌라리(Villari) 효과를 동시에 일컫는 것인데, 주울효과는<sup>(1,11)</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 탄성파(즉, 탄성 응력파) 등에 의해 자성체 내부에 기계적 변형이 발생되면 이 변형이 자성체의 유도 자기장의 변화를 일으키는 현상이다. 그러므로 탄성파가 전파되는 자성체 주변에 코일을 설치하게 되면, 그 코일에 전압의 변화가 발생하게 된다. 따라서 코일의 전압 변화로부터 탄성파의 변화를 계측할 수 있게 되는데,<sup>(12)</sup> 이러한 원리를 이용하여 응력을 측정하는 센서를 마그네토스트릭션 센서라고 한다.

자성체에서 발생하는 유도 자기장의 자속밀도

(flux density)  $B$ 는 외부에서 가해지는 자기장  $H$  및 응력  $\sigma$  와 다음과 같은 관계가 있다.<sup>(13)</sup>

$$B = \mu^0 H + q\sigma \quad (1)$$

여기서,  $\mu^0$ 는 투자율(permeability)이며  $q$ 는 마그네토스트릭션 효과를 나타내는 계수로서  $q = (dB/d\sigma)_H$  와 같이 표현되는데 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  $\sigma = E\epsilon$  으로 간단히 표현할 수 있다. 여기서  $E$ 는 재료의 종탄성계수이다. 물리적으로 볼 때, 이 경우는 전파되는 탄성파의 응력  $\sigma$  가 축의 단면에 균일하게 분포되었다고 볼 수 있는 경우에 해당된다.

종파를 측정하기 위해서는 Fig. 3에서처럼 축에 코일을 솔레노이드 형태로 감게 된다. (앞으로 이러한 솔레노이드 형태의 마그네토스트릭션 센서를 간단히 '솔레노이드 센서'라 부르려고 한다.) 축단면에서 균일한 응력분포를 갖는 종파에 의해 유도되는 자기장의 분포도 축 단면에 걸쳐 균일하다고 가정할 수 있다. 따라서, 솔레노이드 코일에서 발생하는 유도 전압  $V$ 는 패러데이-렌츠(Faraday-Lenz) 법칙에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(14)</sup>

$$V(x, t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 코일이 감긴 횟수를,  $\phi$ 는 코일을 한 번 감았을 때의 코일 내부의 자속을 의미한다. 코일 내부의 자속  $\phi$ 는 코일이 감싸는 단면적  $A$ 에 대한  $B$ 의 적분으로, 즉  $\int_A B dA$ 로 표시할 수 있으므로 식 (1)과 (2)를 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$V(x, t) = -N \frac{d}{dt} \int_A B dA \quad (3)$$

식 (1)에서 있는  $\mu^0, H, q$ 가 시간에 따라 변화하지 않는 경우, 탄성파에 의해 발생하는 변형률  $\epsilon$  과 코일에서 유도되는  $V$ 와의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>(15,16)</sup>

$$V(x, t) = -NqE \int_A \frac{\partial \epsilon}{\partial t} dA \quad (4)$$

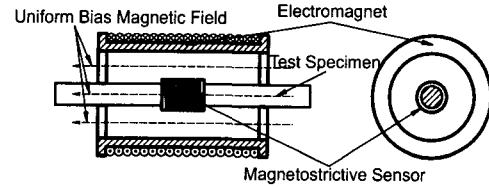


Fig. 3 The schematic diagram of the sensor and the solenoid type electromagnet to apply a uniform bias magnetic field

식 (4)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.

이 센서의 장점 중의 하나는 솔레노이드 코일의 직경, 코일이 감기는 길이, 권선수를 조절하면 센서의 감도 등을 비교적 쉽게 조절할 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 원통형 아크릴에 코일을 감아 센서를 제작하였는데, 아크릴은 공기와 거의 같은 크기의 투자율(permeability)를 갖기 때문에 솔레노이드 센서의 성능에 미치는 영향이 거의 없다고 볼 수 있다.

신호의 신호대 잡음비(S/N비)를 늘리고, 원하는 형태의 파의 종류를 계측하기 위해서 센서가 설치되는 축부위에 정적 편향 자기장(bias magnetic field)를 가해 주어야만 한다. 특히 종파를 효과적으로 측정하기 위해서 본 연구에서는 Fig. 3에서처럼 솔레노이드 형태의 편향 전자석을 축 주위에 설치하였다. (이에 대한 이론적, 실험적 근거는 이호철<sup>(13)</sup>을 참조할 것)

### 3. 간극인자의 영향

지금까지 마그네토스트릭션 효과가 무엇인지, 그리고 이것을 이용하여 실험을 하기 위해서 어떤 실험장치를 구성해야하는지를 살펴보았다. 이 절에서는 회전하고 있는 축에서 마그네토스트릭션 효과를 이용하여 탄성파를 측정할 때 나타날 수 있는 문제점을 살펴보고 이와 관련된 실험 결과를 제시하고자 한다.

마그네토스트릭션 센서의 성능에 가장 큰 영향을 주는 것은 편향 자기장, 충전인자(fill factor), 간극 인자(lift-off factor)이다. 편향 자기장, 그리고

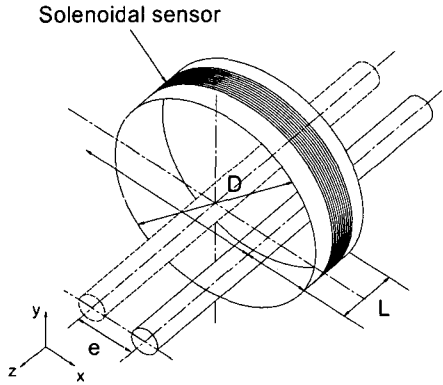


Fig. 4 The configuration of the solenoidal sensor

충진인자(센서의 내경과 축의 직경의 비율) 등도 센서의 성능에 상당한 영향을 끼치지만,<sup>(13)</sup> 특히 회전축에서는 간극인자가 센서 성능에 가장 큰 영향을 끼칠 수 있다. 간극인자란 Fig. 4에 도시되어 있듯이 센서의 직경(D)에 대한 마그네토스트릭션 센서의 중심과 축 중심 간의 편심량(e)의 비로서 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\zeta = \frac{e}{D} \quad (5)$$

회전축에서 간극인자의 영향을 특별히 주의깊게 살펴보아야 하는 이유는 축의 회전에 수반되는 횡방향 진동으로 인하여, 센서와 축간의 거리, 즉 간극인자가 시간에 따라 변화하기 때문이다.

본 연구에서 사용한 SM45C 재질을 갖는 축에서의 종파 전파속도는  $c=5060$  (m/s)이기 때문에 이 탄성파와 관련하여 다루어야 하는 주파수 대역이 최소 10kHz 이상인데 반해, 축의 회전에 의해 발생하는 횡방향 진동수의 범위는 1kHz 미만 대역이다(축의 회전속도가 1800rpm으로 30Hz와 몇몇 하모닉 성분들이 축의 진동에 주로 영향을 끼침). 실제 발전기축 등과 같은 대부분의 회전축에서는 회전에 의한 횡방향의 주요 진동수의 범위도 이 범위에 속한다고 볼 수 있다. 따라서, 솔레노이드 센서에 의해 종파가 계측되는 순간에는 축이 준 정적상태에 놓여 있다고 간주할 수 있다. 하지만, 준 정적 상태라 하더라도 축의 편심에 의한 효과가 센서의 감도에 영향을 끼치기 때문에 그 영향을 정량적으로 살펴볼 필요가 있다. 만약 그 영향이 크다면 센서의 교정이 매우 어렵

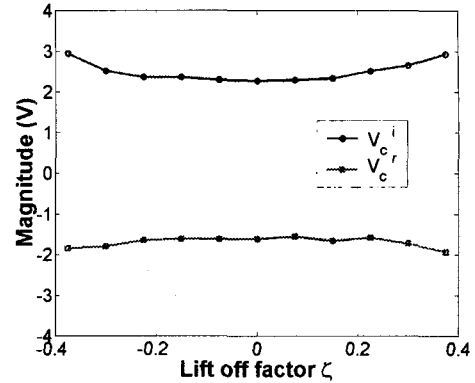


Fig. 5 Peak values of output of sensor for different lift-off factors(sensor diameter = 80mm; length = 30mm; No. of turns = 120; coil diameter = 0.5mm)

거나 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. Fig. 4에서처럼 의도적으로 내경이 큰 솔레노이드 센서를 축에 설치한 후 축 중심과 센서 중심이 일치하는 곳을 기준으로 센서를 x방향으로 -30mm에서 30mm 사이에서 6mm 만큼씩 이동시켜 가면서 11개의 지점에서 신호를 측정하였다. 이 실험을 위해 직경이 10mm인 원형축을 대상으로 하여 직경 80mm, 길이 30mm인 솔레노이드 센서를 제작하여 실험하였다. Fig. 5는 간극인자의 변화에 따라  $V_c^i$ (Fig. 2에 표시된 신호의 최대치)가 어떻게 변화하는지를 보여주는 실험결과이다.

Fig. 5가 보여주는 것은, 넓은 간극인자의 범위에 대해 센서의 출력의 변화가 별로 없다는 것이다. 특히 간극인자가  $\pm 0.1$ 보다 작은 경우, 간극인자가 출력에 미치는 영향을 사실상 무시할 수 있음을 알 수 있다. 참고로 Fig. 5에서 편심량이 커질 경우 출력의 크기가 다소 증가하는 현상은 솔레노이드 전자석 내부의 자기장이 전자석 가까운 부근에서 다소 증가되기 때문이다.

#### 4. 회전축에서의 탄성파 검출 및 결함 진단

이 절에서는 회전하고 있는 축에서의 종파를 검출하는 기법과, 이를 이용하여 축의 결함진단에 응용한 결과를 제시하고자 한다. 먼저 전체적인 실험 방법을 설명하고, 회전하는 축과 회전하지 않는 축에서의 측정된 탄성파를 비교하고자 한다. 그리고, 이러한 탄성과 측정 기법이 축의 결함 진단에도 매우 유용하다는 사실을 실험을 통해 보이게 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 LG 산전의 KMT200BT 정속 교류 모터로서 1800rpm의 회전속도를 갖는다.

회전축의 실험에 사용된 솔레노이드 센서는 내경 14mm, 외경 18mm, 길이 20mm의 원통형 아크릴에 직경 0.3mm의 코일을 총 120회 감아서 제작한 형태이다. 이 센서는 Fig. 6에서처럼 축과 직접 접촉하지 않도록 별도의 지지대에 장착되어 있다. 축의 외경이 10mm이므로 축의 외경과 센서의 내경 사이 거리는 2mm이다. 이 그림에서는

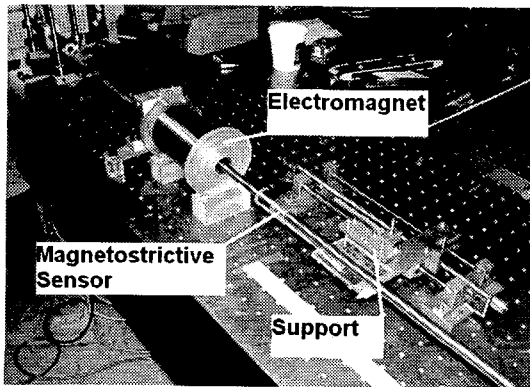


Fig. 6 Magnetostriuctive sensor and solenoidal electromagnet used in the experiment

실험장치를 설명하기 위해서 편향 전자석과 자외 센서를 축의 다른 위치에 두었으나 실제 실험에서는 Fig. 3에서와 같이 설치된다. 이 센서에서 측정된 신호는 Stanford Research System사의 SRS 560 예증폭기(Pre-amplifier)에서 증폭된 후 Lecroy사의 9310 오실로스코프를 거쳐 PC로 저장된다. 신호의 증폭 대역폭은 0.1k - 300 kHz이며 2Ms/s로 신호를 샘플링하였다.

탄성과 발생을 위해서 기본형 홉킨슨 봉(Hopkinson bar)에서와 같이, 발사체를 회전하고 있는 축에 타격시켰다. 이를 위해서 압력 조절 밸브와 전자식 공기 공급 개폐 장치를 통해 나오는 약 0.4MPa의 일정한 압력을 가진 압축공기를 순간적으로 방출하여 발사체를 발사시켰으며, 이 방법으로 일정한 크기의 탄성파를 발생시킬 수 있었다. 본 연구에서처럼 발사체와 측정 대상 축의 재질과 단면적이 동일한 경우, 축에서 발생하는 사각형태의 종파의 이론적인 지속 시간  $T$ 와 응력  $\sigma$ 의 크기는 각각  $T=2l_1/c$ ,  $\sigma=V\rho c/2$ 로 주어진다.<sup>(17)</sup> (Fig. 2에  $T$ 에 대한 도식적 설명이 있음) 여기서  $l_1$ 은 발사체의 길이,  $c$ 는 종파속도,  $V$ 는 발사체의 속도,  $\rho$ 는 밀도를 나타낸다.

실제 실험시 발사체의 길이가 길어질수록 발생하는 탄성파의 지속시간이 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 실험에서는  $l_1=25\text{mm}$ 의 발사체를 사용하였는데 이 경우 발사체의 속도는  $V=1\text{m/s}$ 에 해당되며, SM45C 축에서의  $c=5060\text{m/s}$ ,  $\rho=7840\text{kg/m}^3$ 를 고려하면 종파의 응력이 20MPa로 재료의 항복응력인 340MPa보다 충분히 작다는 것을 알 수 있다.

4.2 회전축에서의 탄성과 검출

먼저 결함이 없는 회전축에서 솔레노이드 센서를 이용하여, 비접촉으로 탄성파를 측정하는 실험 결과를 제시하고, 그 결과를 회전하지 않는 축에

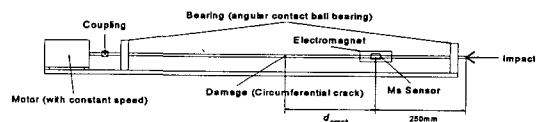


Fig. 7 Experimental setup for the non-contact measurement of longitudinal waves in a rotating shaft

**Table 1** Comparison of the solenoidal sensor signals in non-rotating and rotating shafts (See Fig. 8 for the definition of  $V$ )

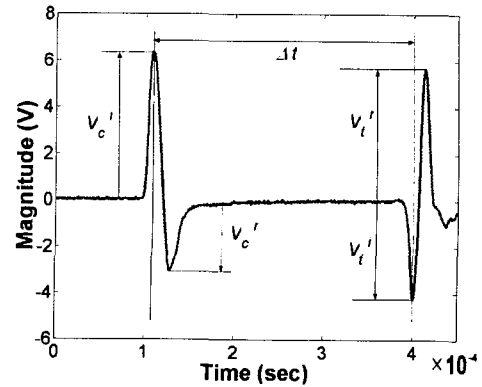
	$V_c^i$	$V_c^r$	$V_t^i$	$V_t^r$	$\Delta t$
Non-rotating	6.37	-3.06	-4.25	5.69	$2.92 \times 10^{-4}$
Rotating	6.45	-3.25	-3.5	5.25	$2.93 \times 10^{-4}$
Relative Difference(%)	1.3	6.2	17.7	7.7	0.3

서 측정된 탄성파와 비교해 보려고 한다. 실제 센서가 놓이는 위치는 종파가 발생하는 끝단에서 250mm 되는 점을 선정하였다 (Fig. 7 참조). 이 절에서는 계측된 신호의 타당성을 검증하기 위해서 결함이 없는 축을 대상으로 실험을 수행하였으며, 다음 절에서는 실제 결함이 있는 축을 대상으로 실험을 수행하였다.

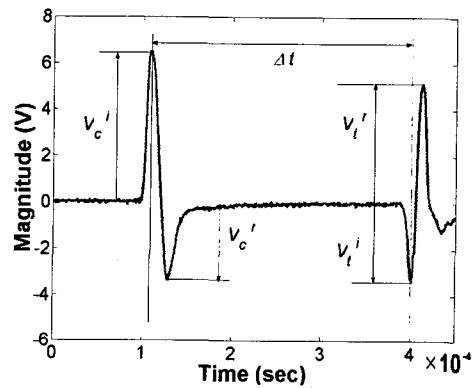
Fig. 8(a)와 (b)는 회전하지 않는 축과 회전하고 있는 축에서 측정된 신호를 보여주고 있다. 정지하고 있는 축에서 계측된 신호인 Fig. 8(a)의 신호에 대해서는 그 특성, 타당성 및 유용성이 이미 검증되어 있기 때문에<sup>(13)</sup> 여기서는 Fig. 8(b)에 있는 신호를 Fig. 8(a)의 신호와 비교함으로써, 그 타당성을 살펴보고자 한다.

먼저 Fig. 8(b)의 신호는 Fig. 8(a)의 신호에 비해 약간의 잡음만 추가되었다는 것 이외에는 사실상 Fig. 8(a)의 신호와 동일하다는 것을 알 수 있다. 참고로, Fig. 8(a,b)에서 처음 나타난 파형은 발사체의 충격에서 의해 Fig. 7의 오른쪽에서 왼쪽으로 전파하는 사각형 압축 종파를 나타낸 것이고, 두 번째 나타나는 파형은 모터와의 연결부에서 반사되어 돌아오는 인장 종파를 나타낸다. 계측된 신호가 축의 회전 유무에 따라 어떻게 달라지는지를 체계적으로 보기 위해 두 신호의  $V_c^i$ ,  $V_c^r$ ,  $V_t^i$ ,  $V_t^r$ 와  $\Delta t$ 를 Table 1에 비교해 보았다.

먼저 Table 1에 주어진 두 신호의 피크치들인  $V_c^i$ ,  $V_c^r$  등의 값을 보면, 두 값이 거의 동일하다는 사실을 알 수 있다. 이것은 축의 진동에 의해 발생하는 간극인자의 변화가 거의 영향을 끼치지 않는다는 사실을 입증하는 것이다. 이를 뒷받침



(a)



(b)

**Fig. 8** The signal measured by the solenoidal sensor in a undamaged shaft. The results shown in (a) and (b) are those obtained for non-rotating and rotating(1800 rpm) shafts, respectively

하기 위하여, Fig. 9에는 회전 중인 축의 횡방향 변위를 레이저 변위계(모델명: Keyence LC 2400)를 이용하여 계측한 결과를 실었다. 축의 진동 변위의 크기는  $\pm 1\text{mm}$  범위로, 실제로 축이 운전되는 상황에 비해 의도적으로 큰 진동량을 갖도록 하였는데도 불구하고 이러한 축 진동은 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.

다음으로 시간  $\Delta t$ 를 비교해 보자. 이 시간은

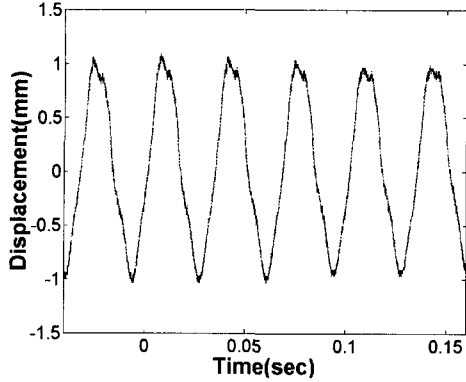


Fig. 9 A typical lateral displacement oscillation of the rotating shaft measured by a laser displacement meter

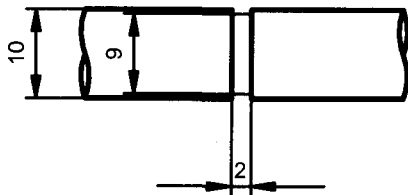


Fig. 10 Specification of a circumferential crack

중과가 센서가 놓인 위치에서 다른 단의 연결부 사이의 거리의 2배에 해당하는 거리를 이동한 시간으로, 이 시간이 정확하게 평가될 수 없다면 이 기법을 결함진단에 사용하기 곤란하게 된다. 실제로 센서가 놓인 위치와 모터와의 연결부의 거리가 0.75m이므로 축에서의 중과속도인  $c=5060$  m/s를 이용하면 이론적인  $\Delta t_{theory}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta t_{theory} = 2.96 \times 10^{-4} \text{ (sec)}$$

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.

4.3 솔레노이드 센서의 응용: 회전축에서의 결함진단

앞에서 솔레노이드 센서를 사용하는 경우 회전

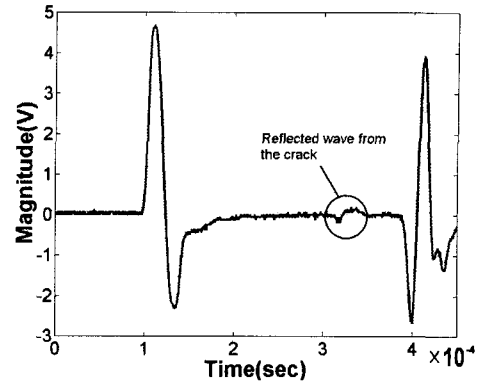


Fig. 11 The wave signal measured by the solenoidal sensor in the rotating shaft with a circumferential crack located 0.55m away from the solenoidal sensor location

하고 있는 축에서도, 회전하지 않는 축과 동일한 정밀도로 탄성파를 측정할 수 있다는 것을 보인다. 여기서는 이러한 측정 기법을 이용하여, 비접촉으로 축의 결함을 찾아낼 수 있다는 가능성을 제시하고자 한다. 이를 위해서 Fig. 10과 같이 원주방향으로 동일한 깊이 1mm의 결함을 갖는 축을 가공하였다. 이 결함은 비틀림 응력을 받는 가스터빈, 증기 터빈 또는 비행기 엔진 축에서 종종 나타나는 결함<sup>(18)</sup>을 이상화한 것으로 볼 수 있다.

원주 결함이  $d_{crack}=0.25$ m에, 그리고  $d_{crack}=0.55$ m에 있는 (Fig. 7 참조) 두 개의 회전축(회전속도는 1800rpm)에 대해, 4.1절에 제시된 방법으로 중과를 발생시켜 솔레노이드 센서로 계측한 신호를 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 실었다. 먼저 Fig. 11의 결과를 살펴보면, 그림의 처음과 끝에 있는 두 개의 큰 파형은 Fig. 8과 동일한 특성을 갖는 파형이며, 중간에 나타나 있는 2개의 작은 파형은 결함에 의해 나타나는 파형이다. 이 중 첫 번째 작은 파형은 충격에 의해 발생한 파가 센서를 지난 후, 원주결함에 의해 부분적으로 반사되어 오른쪽으로 되돌아 온 것이다. 이것이 계속 진행하여 오른쪽 끝단에서 다시 반사하여 왼쪽으로 전파되는 인장파가 바로 두 번째로 잡힌 작은 파형이다. 결함에 의한 이 파형의 피크가 뜨는 시간의 위치와 중과의 속도를 이용하면 센서에서 결함까지의 거리를 구할 수 있다. 그 결과는 Table 2에 주어져 있다. Table 2에는 Fig. 12에 있는 신

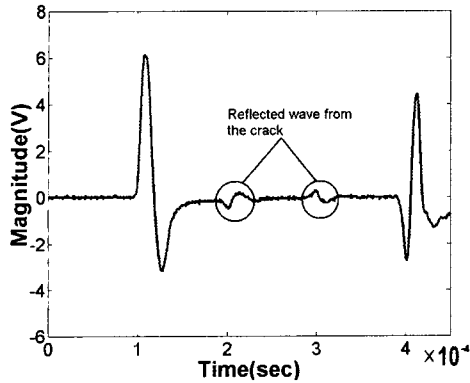


Fig. 12 The wave signal measured by the solenoidal sensor in the rotating shaft with a circumferential crack located 0.25m away from the solenoidal sensor location

호로부터 결함까지의 위치를 추정한 결과도 함께 제시되어 있다.

Table 2에 있는 결과를 보면, 솔레노이드 센서를 이용하면 마그네토스트릭션 센서를 이용한 비접촉 측정기법으로도 결함의 위치를 잘 파악해낼 수 있음을 알 수 있다. 특히 오차의 범위가 매우 작아, 신뢰성 있는 진단기술로서의 가능성을 제시하고 있다. 비록 인위적으로 만들어진 원주결함을 대상으로 하였지만, 회전하고 있는 축에서 비접촉적인 방법으로 탄성파를 이용한 결함진단의 가능성을 이 연구에서 처음으로 제시하였다.

향후 이 비접촉기법을 실용화하기 위해서는 1) 주울효과를 이용한 비접촉 탄성파 발생, 2) 매우 작은 결함신호를 검출할 수 있는 신호처리기술, 3) 여러 개의 단을 갖고 있는 축에서의 결함진단 기술에 대한 후속 연구가 필요하다.

## 5. 결론

회전하고 있는 축에서 전파되는 종파 형태의 탄성파를 비접촉으로 측정하기 위해 마그네토스트릭션효과를 이용한 측정기법을 제안하였으며, 이 기법이 회전축의 이상진단에도 매우 유용한 방법임을 실험적으로 보였다. 특히 마그네토스트릭션 센서를 이용한 기존의 연구는 정지 상태의 파이프나 축에 국한되었음에 반해, 본 연구에서는 회전하는 축에 마그네토스트릭션 센서를 처음

Table 2 Estimated damage distance  $d_{crack}$  from the sensor. The arrival time of the peak in the reflected signal from the damage is used to calculate  $d_{crack}$

Case	Given	Estimated	Relative Error (%)
Case 1	0.25m	0.24m	4.0
Case 2	0.55m	0.52m	5.5

으로 성공적으로 적용하였다. 이와 관련하여 축이 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 크다 하더라도 센서의 출력은 거의 영향이 받지 않는다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 원주결함이 있는 회전축에 이 기법을 적용하여 균열의 위치를 매우 정확하게 찾아낼 수 있었다. 이상의 실험 결과를 볼 때, 본 연구에서는 제시하는 마그네토스트릭션 효과를 이용한 회전축의 결함진단기법이 타당할 뿐 아니라, 실용가능성이 매우 크다는 것을 확인할 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) Korea Electrotechnology Research Institute, 1998, A Study on the Maintenance Technology and the Development of On-Line diagnosis System for Power Plant, Ministry of Science & Technology, Seoul.
- (2) Mcgonnagle, M. J., 1961, Nondestructive Testing, Gordon and Breach, New York.
- (3) Bray, D. E. and Stranley, R. K., 1997, Nondestructive Evaluation, CRC Press, New York.
- (4) Rose, J. L., 1999, Ultrasonic Waves in Solid



- Media, Cambridge Univ. Press, New York.
- (5) Goodwin, M. J., 1989, Dynamics of Rotor-Bearing Systems, Unwin Hyman, London.
- (6) Eun Gu Jang, 1998, "Variables of Vibration," *Rotor Vision*, Vol. 14, Bently Nevada Korea.
- (7) Miles, T. J., 1999, "Torsional and Bending Vibration Measurement on Rotors using Laser Technology," *Journal of Sound and Vibration*, 226(3), pp. 441~467.
- (8) Kwun, H., 1991, "Back in Style : Magnetostrictive Sensors," *Technology Today*.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Joule, J. P., 1847, "On the Effects of Magnetism Upon the Dimensions of Iron and Steel Bars," *Philosophical Magazine*, Vol. 30.
- (12) Villari, E., 1865, "Change of Magnetization by Tension and by Electric Current," *Annalen der Physik und Chemie*, Leipzig, Vol. 128.
- (13) Ho Chul Lee, 2001, "Design and Analysis of a Mode Seletable Stress Wave Sensor Using the Villari Effect," Ph.D. Thesis, College of Engineering Seoul National University.
- (14) Griffiths, D. J., 1999, Introduction to Electrodynamics, Prentice Hall, New York.
- (15) Williams, R. C., 1959, "Theory of Magnetostrictive Delay Lines for Pulse and Continuous Wave Transmission," *IEEE Transactions on Ultrasonic Engineering*, pp. 16~37.
- (16) Seung Hyun Cho, Ho Chul Lee, Yoon Young Kim, 2000, "Noncontact Modal Testing Method Using Magnetostrictive Effect," *Proceeding of the KSNVE Autumn Annual Conference*, pp. 701~707.
- (17) Graff, K. F., 1975, "Wave Motion in Elastic Solids," Ohio State University Press.
- (18) Dimarogonas A. D., Paipetis S. A., 1983, Analytical Methods in Rotor Dynamics, Applied Science Publishers, London.