

< 논문 >

회전속도 측정기능을 갖춘 비접촉 축 진동센서의 가능성 검증

이호철[†] · 김명호* · 박중양*

(2006년 6월 12일 접수, 2006년 10월 25일 심사완료)

Feasibility Verification of a Non-Contact Vibration Sensor for Rotating Shafts Endowed with Rotational-Encoder Capability

Hocheol Lee, Myong Ho Kim and Jung Yang Park

Key Words : Magnetostriction(자기변형), Non-Contact Measurement(비접촉 측정), Shaft Transient Vibration(축진동), 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 transient vibration signals selectively which are transmitted along the target shaft, and the second to measure the rotating speed of the shaft. All measurements are made in a non-contact manner since this sensor uses magnetostriction as its measuring principle. The signal selection between two vibration modes requires only electrical switching operations and the switching between these two sensing capabilities-vibrations and rotational speed-are accomplished by a very simple mechanical operation. To verify the capabilities of the proposed sensor, a prototype sensor is fabricated and the experiments are made. The results show this sensor can embody two sensing capabilities in one sensor configuration.

1. 서론

기계요소 중에서 축(shaft)는 보통 회전기계에서 회전력(torque)을 전달하는 기능을 담당하는 요소로 가장 핵심적인 기계요소다.⁽¹⁾ 만일 축 요소가 본래 설계된 한계 값보다 큰 순시적인(instantaneous) 힘이나 주기적인(cyclic) 힘을 받게 되면 부분적인 혹은 전체적인 파손이 발생하고 이는 회전기계 전체에 이상으로 이어지기 쉽다. 회전기계의 파손은 경제적인 손실뿐 아니라 인명의 피해로 이어질 가능성이 높기 때문에 회전하고 있는 축의 건강성(healthiness)을 체크하여 현재 존재하는 혹은 존재할 가능성이 있는 이상을 검출하는 기술에 대한 연구는 지금까지 다양한 분야의 많은 연구자들의 관심대상이었다.⁽²⁻¹⁵⁾

축 요소에서 발생하는 각종 결함들은 다양한 형태로 축 자체 혹은 축에 연결된 다른 부품이나 케이스의 동적 특성에 영향을 주게 되어있으므로 많은 결함진단 방법들은 축 혹은 축을 포함하는 전체 시스템에서 발생하는 다양한 물리적인 현상을 측정하는 측정기술에 의존하게 된다.

진동신호는 이러한 목적으로 가장 많이 사용되는 물리적인 양이다. 축 자체의 진동신호를 계측하거나 축이 연결되는 부품 혹은 축이 장착되는 시스템의 외관에서 진동신호를 계측하면 이 신호에 포함된 결함과 관련된 정보를 추출할 수 있고 이를 통해서 결함의 존재유무, 위치, 그리고 심각한 정도를 파악할 수 있다. 축이 연결된 부품이나 외관에서 진동신호를 계측하는 것은 측정과정의 측면에서 수월하기 때문에 많이 적용되는 방법이지만 가장 중요한 축에서 발생하는 결함에 대한 정보가 다른 정보에 묻힐 가능성이 높기 때문에 정확한 정보를 추출한다는 측면에서는 이상적인 방법이라고 할 수 없다.^(6,7) 이 때문에 회전 중인 축에 대해서 축이 받는 힘을 비접촉 방식으로 측정하기 위한 많은 시도들이 있어왔지만 많은 경우

[†] 책임저자, 회원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

E-mail : hclee21@cu.ac.kr

TEL : (053) 850-2712 FAX : (053) 850-2710

* 일진 클로벌㈜

고가의 장비를 필요로 하기 때문에 경제적인 측면에서 효율적이지 못하다.⁽²⁻¹¹⁾

자기변형(magnetostriction) 현상을 이용한 센서들은 이런 측면에서 매우 이상적인 센서로 활용할 수 있는 특징을 가지고 있음이 이미 많은 연구를 통해서 확인된 바 있다.⁽⁹⁻¹⁵⁾ 예를 들어 자기변형 현상을 이용한 센서는 측정 원리 면에서 자기장을 이용하기 때문에 기본적으로 비접촉이다. 또 센서의 구성에 필요한 부품들이 매우 간단하고 그 재료 또한 쉽게 구할 수 있는 것들이어서 경제적인 측면에서 유리함을 함께 가지고 있다.

축에서 발생할 수 있는 진동 모드는 회전(torsional) 진동, 축 방향(longitudinal) 진동, 그리고 굽힘(flexural) 진동의 3가지인데 축 혹은 축에 연결된 부품에서 발생할 결합은 축의 진동 모드에 각각 독특한 영향을 주게 된다. 따라서 이 3가지 진동 신호를 계측하는 것은 결합진동에 매우 유용한 수단을 제공한다. 하지만 지금까지 제안된 자기변형을 이용한 센서들은 대부분 회전력을 측정하는 기능에 국한되어있었고 일부 회전력 이외의 힘을 측정하려는 시도가 있었으나 이 또한 축 방향의 힘 혹은 굽힘 방향의 힘을 단독으로 계측하는 것에 국한된 연구였다.^(2,3-14)

회전기계에 대한 상태정보를 추출할 때 많은 경우 정상상태(steady state)에서의 진동신호를 측정한다. 하지만 음파를 이용해서 기계의 이상 유무를 검증하는 경우에서와 같이 과도(transient)에도 기계의 결합에 대한 많은 정보가 담겨 있다. 그럼에도 불구하고 센서의 대역폭의 한계 등과 같은 센서 선택 측면에서의 한계로 인해 과도신호에 대한 연구는 그리 활발하게 진행되지 못했다.

이에 본 논문에서는 회전하고 있는 축에서 발생하는 과도진동 신호를 자기변형 현상을 이용하여 비접촉 방식으로 계측할 수 있는 센서에 대한 아이디어를 제안하였다. 본 센서는 기존에 제안된 센서와 달리 축 방향 진동과 굽힘 진동을 하나의 센서 형상에서 선택적으로 측정할 수 있는 기능을 가지고 있어 하나의 센서로 2가지 신호를 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 측정을 원하는 신호가 다른 모드의 진동 신호와 섞여 있는 경우에도 원하는 신호만을 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이는 각 모드의 진동 신호에 서로 다른 결합에 대한 정보가 포함되어있다는 측면에서 결합진단에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

본 논문에서 제안한 진동신호를 측정하는 센서의 형상은 유도형(inductive) 회전속도 측정 센서와 매우 유사한 형상을 가지고 있음을 알 수 있다. 이에 본 논문에서는 앞서 제안한 진동신호를 측정하는 센서에 회전속도를 측정하는 기능을 포함할 수 있는 방안을 제시하였고 이를 실험을 통해서 검증하였다. 회전속도는 회전체에서 가장 기본적인 측정대상으로 이 기능을 아무런 추가 요소 없

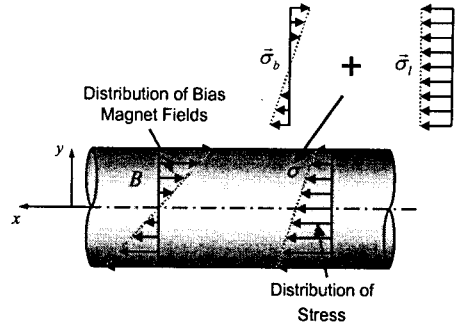


Fig. 1 Sensing principle of elastic waves using magnetostriction in a shaft

이 부가함으로써 제안된 센서의 유용성을 한층 높였다. 이는 회전속도와 힘의 계측이 함께 필요한 동작기계 주축의 상태진단이나 by-wire system에 매우 유용하게 활용될 수 있다.⁽⁷⁻¹²⁾

2. 센서의 동작원리 및 형상

2.1 진동신호 측정 센서의 원리

선행 연구를 통해서 검증된 연구 결과를 Fig. 1을 이용해서 설명 하도록 하자.⁽¹³⁻¹⁵⁾ Fig. 1는 회전하고 있는 축의 어느 한 순간 축의 진동에 의해서 축 단면에 걸린 응력 상태를 보여주고 있다. 축 단면에 걸리는 응력 σ 는 단면에 대해서 균일한 크기를 가지는 축 방향 진동에 의한 응력(σ_l) 성분과 축 단면을 따라서 선형적으로 변화하는 굽힘 진동의 의한 응력(σ_b) 성분이 함께 작용하고 있는 일반적인 응력분포다.⁽¹⁶⁾ 회전력에 의해서 발생하는 전단응력은 본 센서의 측정대상이 아닌 관계로 고려하지 않았다. B 는 외부에 존재하는 자기회로에 의해서 축에 생성되는 자기장 분포를 나타내며 바이어스(bias) 자기장이라고 부른다. 선행연구의 결과는 축 진동에 의한 응력 분포 성분 중에서 이 바이어스 자기장의 분포와 비슷한 성분들이 선택적으로 측정됨을 보여주었다. 즉, 바이어스 자기장이 단면에 대해서 균일한 크기를 가지면 축 방향의 응력만이 측정되고 이 바이어스 자기장이 굽힘 진동에 의한 응력 분포와 같이 선형적인 특징을 가지면 굽힘 진동에 의한 응력만이 측정된다.

센서가 장착된 위치($x = x_0$)에서 바이어스 자기장 B 의 분포가 식(1)과 같은 형태로 근사적으로 표현된다고 할 때 B 의 모양을 결정하는 계수 중에서 $a_0 = 0$ 이라면 굽힘 진동만을 측정하게 되고 $a_1 = 0$ 이라면 축 방향의 진동만을 측정하게 된다.

$$B(x_0, y) = a_0 + a_1 y \quad (1)$$

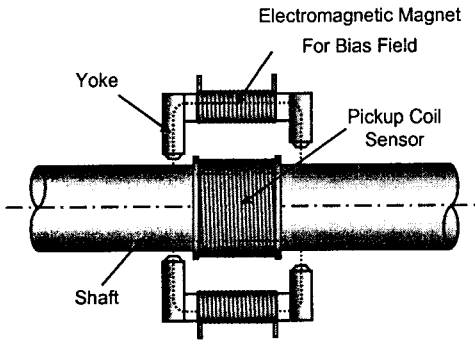


Fig. 2 Schematic diagram of the newly proposed vibration sensor using an electromagnet

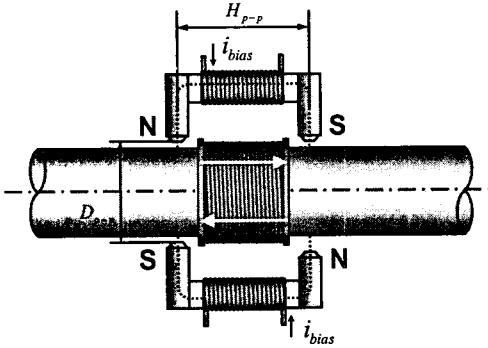


Fig. 3 Sensor configuration for measuring flexural vibrations of the shaft

선행연구는 서로 다른 바이어스 자기장을 사용하여 서로 다른 모드의 과도진동 신호를 계측하는데 성공했지만 한계를 가지고 있었다. 축 진동을 측정하는데 필요한 바이어스 자기장과 굽힘 진동을 측정하는데 필요한 바이어스 자기장을 만들어 주기 위해서 각각 다른 외부 자기회로를 사용하였기 때문에 이 두 모드의 진동을 측정하고자 하는 경우 2개의 센서가 필요한 것이다. 이러한 단점을 극복하는 방법으로 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 바이어스 자기장 생성용 자기회로를 제안하였다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 바이어스 자기장은 전자석과 철심부(yoke)로 구성되는 자기회로에 의해서 만들어진다. 전자석에 기자력(magnetomotive force)을 제공하는 코일에 흐르는 전류의 방향을 바꾸면 서로 다른 두 종류의 바이어스 자기장이 얻어진다. Fig. 3은 이 두 종류의 바이어스 자기장 중에서 굽힘 진동을 측정하기 위한 바이어스 자기장 구성을 보여주고 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 축의 내부에 서로 반대방향의 자기장을 형성하도록 두 전자석의 전류가 흐르고 있어 축 방향 진동에 의한 응력은 코일 센서에 의해서 측정되지 않는다. 서로 마주 대하는 2쌍의 N-S극이 상호 거리

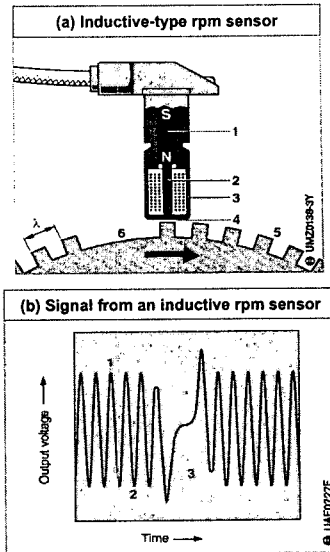


Fig. 4 Measuring principle of inductive-type rotational speed sensor and its signal⁽¹⁸⁾

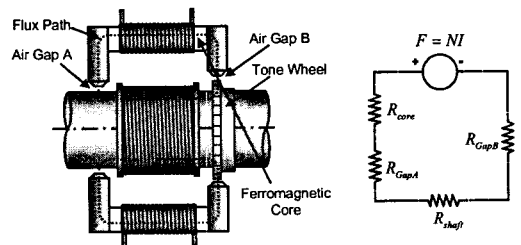


Fig. 5 Sensor configuration of the newly proposed sensor for rotational speed measurement

(D_{p-p}, H_{p-p})에 따라서 조금 다른 형태의 자기장을 형성할 수 있으나 코일 내부에는 항상 비대칭적인 자기장이 형성된다.⁽¹⁷⁾

제안된 진동측정 센서는 선행 연구에서 제안된 센서와 달리 하나의 센서에서 2종류의 진동을 선택적으로 측정할 수 있으며 어떤 모드의 진동을 측정할 것인가를 전환하는 것이 완전히 전기적인 방법에 의존하기 때문에 단순한 스위치 조작만으로 가능하다는 장점이 있다.

2.2 회전속도 측정 센서의 원리

Fig. 4(a)는 유도형 회전속도 측정 센서의 동작원리를 설명해주고 있다.⁽¹⁸⁾ 유도형 회전속도 측정 센서는 영구자석(혹은 전자석)으로 자기회로를 구성하고 구성된 자기회로 상에 강자성체로 만들어진 톤니바퀴와 자속의 변화를 측정하는 센서를 삽입하는 것으로 이루어진다. 톤니바퀴를 회전속도를

측정하고자 하는 축에 고정시켜 함께 회전시키면 회전에 따라서 톱니바퀴의 서로 다른 부분이 자기 회로를 지나가게 된다. 이(tooth)가 존재하는 부분이 지나갈 때와 이가 존재하지 않는 부분이 지나갈 때 공극(air gap)의 크기가 달라지므로 전체 자기 회로에 흐르는 자속(magnetic flux)이 변화한다. 코일 센서는 이 자속의 변화를 패러데이의 법칙에 의해서 전압으로 변환시키는 역할을 하게 되어 이가 지나감에 따라서 Fig. 4(b)와 같은 신호를 얻게 된다.

Fig. 3과 Fig. 4(a)를 비교해보면 전자석(혹은 영구자석)에 의해서 기자력을 발생시키고 자기회로상의 변화를 측정하는 센서가 있다는 측면에서 두 센서의 구성은 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 5는 이에 착안하여 Fig. 3에 보인 진동측정센서의 자기회로의 일부에 톱니바퀴를 삽입하여 회전속도 측정용 센서로 사용할 수 있도록 한 센서의 개념도와 그 자기회로도들을 보여주고 있다. 이 자기회로도는 Fig. 3에서 극간 상호 거리 D_{p-p} 가 H_{p-p} 에 비해서 충분히 커서 자속의 누설을 무시할만하다고 가정할 때 위쪽 혹은 아래쪽의 자기회로에 대한 모델링이다. Fig. 5에 사용된 F 는 기자력, N 은 전자석용 코일의 감은수, I 는 전자석에 흐르는 구동용 전류, R_{core} 는 전자석의 철심의 자기저항, R_{shaft} 는 측정대상 축의 자기저항, R_{GapA} 와 R_{GapB} 는 각각 A와 B부분의 공극 자기저항을 나타낸다.

이 자기회로에 대한 해석을 수행하면 식 (2)와 같은 형태의 자속에 대한 표현식이 구해지고 측정용 코일의 감은 수를 N_s 이라고 하면 실제로 센서에서 얻어지는 회전속도 신호는 패러데이의 전자기유도법칙에 의해서 식 (3)과 같이 주어짐을 알 수 있다.

$$\Phi = \frac{NI\mu_0}{(l_{GapA}/A_{GapA}) + (l_{GapB}/A_{GapB})} \quad (2)$$

$$V_{out} = \frac{-N_s NI \mu_0}{A_{GapB} [(l_{GapA}/A_{GapA}) + (l_{GapB}/A_{GapB})]^2} \frac{dl_{GapB}}{dt} \quad (3)$$

식 (2),(3)에서 μ_0 는 공기의 투자율, l_{GapA} , l_{GapB} 는 각 공극의 길이, A_{GapA} , A_{GapB} 는 각각 전자석 철심이 축과 마주보고 있는 부분의 유효면적을 나타낸다.

축에 장착된 톱니바퀴의 이가 있는 부분과 없는 부분에 대해서 l_{GapB} 이 서로 다르게 되므로 식 (3)에 의해서 회전속도를 측정할 수 있는 신호가 계측됨을 알 수 있다.

3. 센서 제작 및 실험 결과

3.1 센서의 제작 및 실험 장치 구성

앞서 제안된 아이디어의 유효함을 검증하기 위하여 원형(prototype)에 해당하는 센서를 제작하였고 Fig. 6은 이 센서의 외관을 보여주고 있다. Fig. 2에 보인 기자력 생성용 전자석은 제작이 편리한 영구자석으로 대체하였고 전자석에 흐르는 전류의 방향을 바꾸는 조작은 영구자석의 극성을 서로 다르게 배치하는 것으로 대신하였다. 축의 강제운동(rigid body motion)으로 인한 공극의 변화가 센서의 출력에 반영되는 것을 방지하기 위해서 기자력 생성용 영구자석과 철심을 모두 측정용 코일이 장착되는 축에 함께 일체형으로 배치하였다.

Fig. 7은 이렇게 제작된 센서를 이용하여 구성된 실험 환경을 보여주고 있다. 축을 다양한 속도로 회전시키고 동시에 축의 회전속도를 측정할 수 있

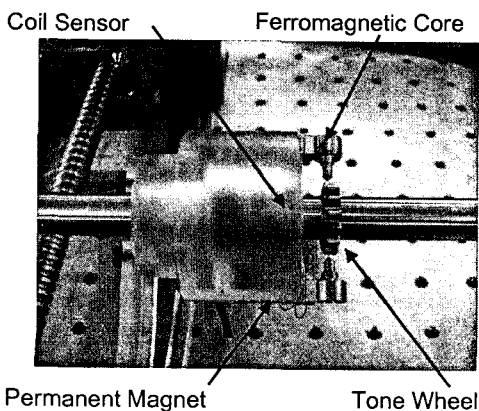


Fig. 6 Fabricated prototype of the newly proposed sensor

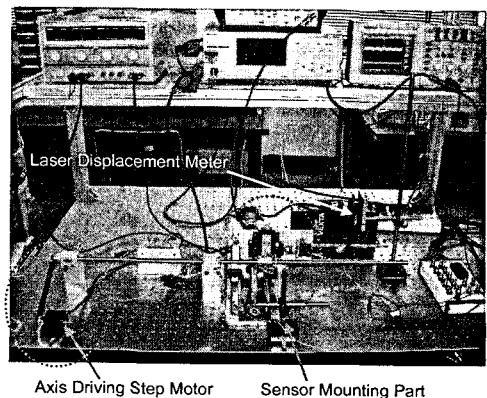


Fig. 7 Experimental setup for verifying the capability of the proposed sensor

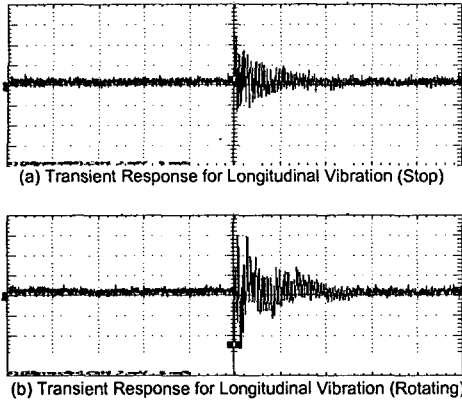


Fig. 8 Experimental results under the longitudinal wave measuring mode configuration

도록 하기 위해서 5상 스텝모터를 사용하였다. 스텝모터에 인가되는 전압은 모터의 구동을 위해서 사용됨과 동시에 회전속도를 측정하는데 사용된다. 측정대상과 무관한 센서출력을 생성할 소지가 있는 축의 강제운동이 얼마나 일어나는지를 평가하기 위해서 레이저 변위계(Kyence LC2400)를 사용하였다. 측정결과 1000rpm까지 축의 진동은 10 μ m 내외로 무시해도 무방한 수준이었다.

많은 경우 측정하고자 하는 진동신호와 회전속도 신호는 그 주파수 대역이 많은 차이를 보이기 때문에 두 신호가 섞여있는 경우라도 간단한 신호 처리만으로 두 신호의 상호 영향을 제거할 수 있으나 만일 진동신호를 측정함에 있어 회전속도를 측정하는 신호가 방해가 된다면 간단한 기계적 조작(회전속도 측정용 톱니바퀴를 자기회로 상에서 제거함)만으로 이를 제거할 수 있다.

3.2 실험 결과

Fig. 7과 같이 구성된 실험환경에서 먼저 제작된 센서가 축의 과도진동만을 측정할 수 있도록 톱니바퀴를 자기회로에서 약간 이동한 뒤에 스텝모터가 정지된 상태에서 공압을 이용하여 발사체를 축의 끝단에 빗겨 충돌시켰다. 이때 발사체에 의해서 만들어진 가진력은 축 진동과 굽힘 진동을 모두 가진하는 혼합신호다. 이렇게 발사체에 의해서 가진된 힘을 제안된 센서를 이용하여 축이 정지했을 경우에 대해 측정하였다. 또 축을 일정한 회전속도로 회전시킨 뒤에 같은 방식으로 발사체를 충돌시켜 축이 회전하는 상태에서도 신호를 측정하였다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 이렇게 측정된 축 진동의 과도응답신호를 보여주고 있다. (a)는 회전하고 있지 않는 축에서 얻은 신호이고 (b)는 1800rpm으로 회전하고 있는 상태에서 축에서 측정한 신호에 해당

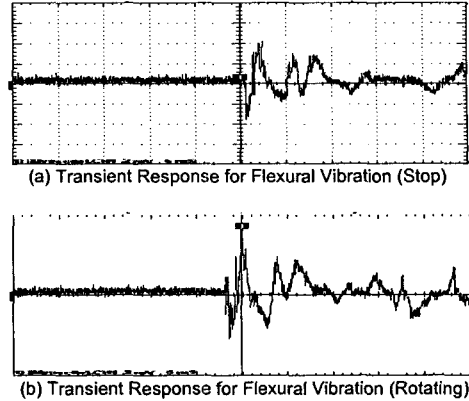


Fig. 9 Experimental results under the flexural wave measuring mode configuration

한다. 측정된 신호에서 확인할 수 있듯이 축이 멈춰있던 회전하고 있던 축의 과도진동을 정확하게 측정할 수 있음을 알 수 있다. 또 축 방향 진동과 굽힘 진동이 동시에 가진 되었음에도 불구하고 축 진동에 해당하는 신호만이 측정되었음도 확인할 수 있다.

Fig. 9의 (a)와 (b)는 같은 실험을 센서가 굽힘 진동만을 측정할 수 있도록 구성된 뒤에 측정을 수행한 굽힘 진동에 대한 과도응답신호를 보여주고 있다. 축 진동의 경우와 마찬가지로 측정된 신호에는 분산현상(dispersion)을 명확하게 확인할 수 있는 굽힘 파만이 측정됨을 확인할 수 있고 멈춘 경우나 회전하고 있는 경우나 신호에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 10은 자기회로에 톱니바퀴를 포함시켜 제안된 센서를 회전속도 측정용으로 구성된 뒤에 회전속도 신호를 계측한 결과를 보여주고 있다. 스텝모터에 인가되는 펄스 신호의 주파수는 2kHz이고 사용된 스텝모터가 0.72°/pulse의 특성을 가지고 있으며 사용된 톱니바퀴의 이의 개수가 15개이므로 이론적으로 계산된 이와 이 사이의 주기 T는 16.7ms다. Fig. 10에서 측정된 주기는 약 16msec로 계산된 주기와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 센서가 진동센서로 사용될 때 센서의 출력에 가장 큰 영향을 주는 인자인 바이어스 자기장의 크기에 대한 평가를 위한 실험을 수행하였다. 가진기를 이용하여 크기가 일정한 축 방향 진동을 축에 가한 상태에서 Fig. 3에 보인 자기회로에 형성되는 자속밀도를 변화시켜가면서 이에 따른 출력신호의 변화를 살펴보았다. Fig. 11은 이 실험의 결과를 보여주고 있는데 그림에서 다음과 같은 특징적인 사실을 발견할 수 있다. 먼저 가장 좋은 S/N비를 얻어 낼 수 있는 바이어스 자기장 값(1.5kG 부근)이 존재하며 이 값을 넘어서

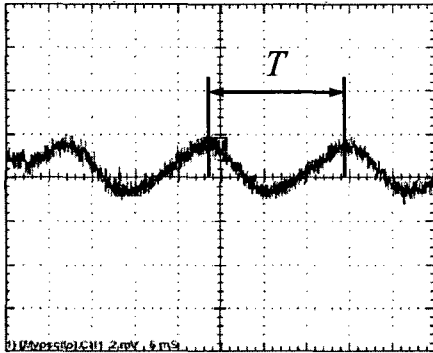


Fig. 10 Experimental results under the rotational speed measuring mode configuration

는 영역에서는 센서의 출력이 다시 줄어들 수 있다. 또한 바이어스 자기장이 작은 영역에서 센서가 국부적인 최대 출력(250G 부근)을 보임을 확인할 수 있다. 이 두 가지 현상은 모두 축의 재료로 사용된 철(iron)이 가지고 있는 기본적인 자기변형 현상과 잘 일치함을 알 수 있다. 즉 첫 번째 현상의 원인은 축의 재료인 철이 자기변형 현상에 있어 포화현상을 보임으로 인해서 바이어스 자기장의 세기가 커져도 센서의 출력이 더 이상 증가하지 못하는 것으로 해석할 수 있다. 두 번째 현상인 국부적인 최대치도 철이 낮은 자기장 영역에서 국부적으로 자기변형이 최대가 되는 현상에 그 원인이 있는 것으로 해석된다.⁽¹⁹⁾

4. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 자기변형 현상을 이용하여 비접촉 방식으로 축의 2가지 진동모드를 선택적으로 측정할 수 있는. 센서에 대한 기본적인 아이디어를 제시하였다. 또한 제안된 센서의 구성이 회전속도를 측정하는 유도형 센서와 비슷한 것에 착안하여 진동측정용 센서에 치차를 삽입하여 회전속도까지 측정할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 실험 결과를 통해서 측정된 진동신호와 회전속도 신호는 모두 축이 회전상태이건 정지상태이건 관계없이 원하는 신호를 출력으로 내보냄을 확인하였으며 자기회로의 구성에 따라서 진동센서 혹은 회전속도 측정 센서로의 모드 전환이 가능함을 확인하였다. 센서의 민감도 분석의 일환으로 센서의 출력에 가장 큰 영향을 주는 바이어스 자기장에 대한 평가를 실험을 통해서 진행하였다. 이를 통해서 센서에 걸어주는 바이어스 자기장의 크기를 센서의 S/N 비가 최대가 되도록 조절할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 센서는 아직 몇 가지 근본적인 한계를 가지고 있는데 그 중 하나는 축 방향

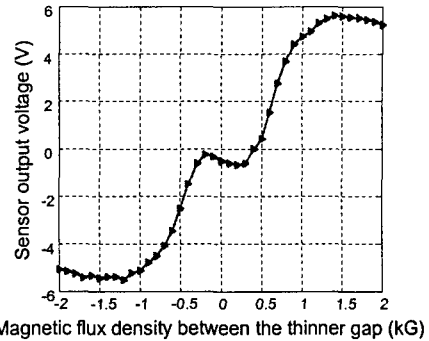


Fig. 11 Output voltage variation according to the magnitude of the bias magnetic field

진동과 같이 방향성이 없는 진동의 경우와 달리 굽힘 진동의 경우 굽힘의 방향이 있는 현재의 센서 구성으로는 굽힘의 방향을 측정할 수 없다는 것이다. 현재 2개의 센서를 이용하는 이 문제를 극복하는 방법에 대한 연구가 센서의 정량적인 분석과 함께 진행 중이다.

후 기

본 연구는 2004년도 대구가톨릭대학교 신입교수 연구비지원에 의한 것임을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Dimarogonas, A. D., 1983, *Analytic Methods in Rotor Dynamics*, Applied Science Publishers, New York.
- (2) Miles, T. J., Lucas, M., Halliwell, N. A., and Rothberg, S. J., 1999, "Torsional and Bending Vibration Measurement on Rotors Using Laser Technology," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 226, No. 3, pp. 441~467.
- (3) Rouston, R. L., Starkey, P. and Davies, W. P., 1992, "Torsional and Translational Vibrations of a Drive Shaft with a Cardan Joint," *ASME Flexible Mechanism, Dynamics, and Analysis*, DE-47, pp. 533~542.
- (4) Diangui, 2000, "Experiment on the Characteristics of Torsional Vibration of Rotor-to-Stator Rub in Turbomachinery," *Tribology International*, Vol. 33, pp. 75~79.
- (5) Wang, Q., Ismail, F. and Golnaraghi, M. F., 2001, "Assessment of Gear Damage Monitoring Techniques Using Vibration Measurements," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 5, pp. 905~922.
- (6) Baydar, N., and Ball, A., 2003, "Detection of Gear Failures via Vibration and Acoustic Signals Using Wavelet Transform," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, No. 4, pp. 787~804.
- (7) 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.
- (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) 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.
- (10) 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.
- (11) Fleming, W., 1982, "Automotive Torque Measurement: A Summary of Seven Different Methods," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 31, No. 3, pp. 117~124.
- (12) Garshelis I. J., 1991, "New Types of Magnetoelastic Transducers for Sensing Force Related Parameters," *SAE paper*, 910856, pp. 1201~1210.
- (13) Kim, Y. Y., Cho, S. H, and Lee, H. C., 2003, "Application of Magnetomechanical Sensors for Modal Testing," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 268, pp. 799~808.
- (14) Kim, Y. Y., Han, S. W., and Lee, H. C., 2002, "Non-contact Damage Detection of Rotating Shafts by Using the Magnetostrictive Effect," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 8, pp. 1599~1607
- (15) Lee, H. C., and Kim, Y. Y., 2002, "Wave Selection Using a Magnetomechanical Sensor in a Solid Cylinder," *Journal of Acoust. Soc. Am*, Vol. 112, No. 3 pp. 953~960.
- (16) Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., 1990, *Mechanics of Materials*, PWS-KENT, Boston.
- (17) Roters, H. C., 1941, *Electromagnetic Devices*, John Wiley & Sons, New York.
- (18) Kimberley, W., 2004, *Automotive Electrics and Automotive Electronics*, Robert Bosch GmbH.
- (19) Bozorth, R. M., 1993, *Ferromagnetisms*, IEEE Press New York.