

회전속도와 탄성파를 동시에 측정하는 비접촉 자왜형 센서의 자기적 특성 분석

Analysis of Magnetic Characteristics for a Noncontact Magnetostrictive Sensor Simultaneously Measuring Rotational Speed and Force

이 호 철*

Ho Cheol Lee

(2009년 2월 18일 접수 ; 2009년 3월 11일 심사완료)

Key Words : Magnetostrictive Sensor(자왜형 센서), Law of Approach(접근의 법칙), Noncontact Force Sensor(비접촉 힘 센서), Rotary Encoder(회전 엔코더), Ultrasonic Waves(초음파)

ABSTRACT

This work is the attempt to give qualitative explanations to complex magnetic phenomena which are observed in the previously proposed magnetostrictive sensor capable of ultrasonic waves and rotational speed measurement. The law of approach is adopted as analysis tool in order to account for some extraordinary output patterns and proved to be effective. The distance between the anhysteretic curve current magnetic state and the variation of anhysteretic curve by stress mainly determine the sensor output shapes and their uniqueness. It is also experimentally verified that the precisely determined bias magnetic field strength can not only remove the unusual output parts but also maximize its sensitivity.

1. 서 론

자기센서(magnetic sensor)라고 함은 홀(hall) 센서나 코일 센서와 같이 자기장 그 자체 물리량을 측정하는 센서는 물론이고 자기장의 변화를 수반하는 다른 물리적인 현상을 자기장을 이용해서 간접적으로 측정하는 센서를 포함해서 지칭한다. 예를 들어 Fig. 1에 보인 회전속도 측정용 센서는 영구자석(1번)에서 발생하여 코어(2번)를 따라서 흐르는 자속(magnetic flux)의 양이 그 아래 치형(5, 6번: λ 는 치형의 주기)이 놓이는가 놓이지 않는가에 따라서 공극(4번)의 두께가 바뀌는 것을 이용해서 회전체의 회전속도 및 회전량을 측정한다. 발생하는 자속의 변화는 슬레노이드 코일 형태의 코일(3번)에 의

해서 전압신호로 변환되어 출력신호로 나타난다⁽¹⁾.

Fig. 1에 보인 자기센서를 포함해서 자기장을 이용해서 물리량을 측정하는 센서들은 동일한 물리량을 측정하는 다른 센서와 비교했을 때 매우 독특한 특징을 가지고 있는데 그것은 측정이 비접촉 방식으로 이루어진다는 것이다. 즉, 공기를 통해서 심지어 진공상태에서도 자기장이라는 물리적인 현상은 전달이 가능하기 때문에 많은 독보적인 응용 분야를 구축하고 있다⁽²⁻⁵⁾.

자왜(magnetostriction) 현상도 이런 비접촉 특성을 보이는 대표적인 자기장과 관련된 물리현상이다. 자왜 물질이라고 불리는 물질들은 자기장 아래 놓이면 기계적인 변형을 일으키는데 이러한 현상은 가역적이어서 기계적 응력이 자왜 물질의 자기적 상태를 변화시킬 수 있다. 이들은 각각 주울 효과(Joule effect)와 빌라리 효과(Villari effect)라는 이름으로 알려져 있으며 비접촉 방식으로 대상에 걸리는 힘을 측정하는데 많이 사용되고 있다^(2-5,17).

* 교신저자; 정희원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : hclee21@cu.ac.kr
Tel : (053)850-2712, Fax : (053)850-2710

자왜 현상의 비접촉 특성을 가장 성공적으로 이용한 사례로 회전축에 걸리는 힘을 측정하는 분야가 있다. 회전하고 있는 물체에서 힘을 측정하는 방법은 고전적인 방법으로는 스트레인 게이지와 슬립링을 이용하는 방법에서부터⁽⁶⁾ 최근 급속도로 발달하는 무선통신 기술을 이용한 방법까지^(7,8) 다양하지만 슬립링을 이용하는 경우 잡음의 문제가, 무선통신을 이용하는 경우에는 경계성의 문제가 대두된다. 하지만 자왜 현상을 이용해서 축에서 발생하는 힘을 측정하면 이 두 가지 문제를 근본적으로 해결하는 것이 가능하다.

Lee 등은 자왜 현상을 이용하여 회전축에 걸리는 힘을 측정하는 센서와 Fig. 1에 보인 회전속도를 측정하는 센서가 측정 원리 면에서 큰 차이가 없다는 점에 착안하여 이 두 센서를 하나의 센서형상에 구현하였다⁽⁹⁾. Lee는 또한 최근 연구에서 축에 걸리는 힘 중에서 인장력과 압축력을 선택적으로 측정할

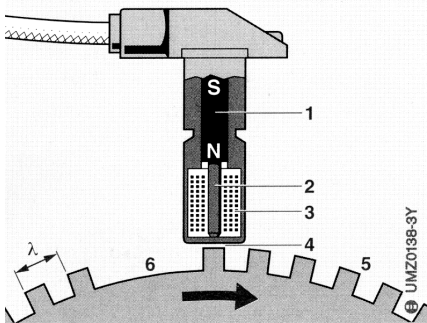


Fig. 1 Schematic diagram of a wheel speed sensor using magnetic circuit⁽¹⁾

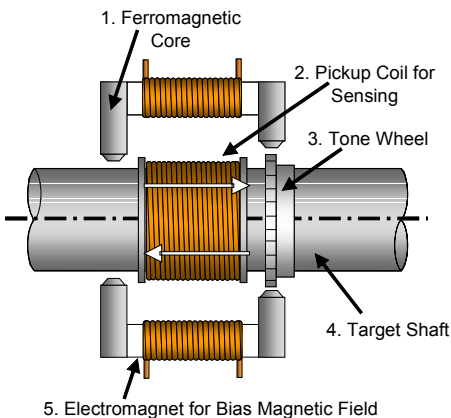


Fig. 2 Sensor configuration under consideration⁽⁹⁾

수 있는 센서를 제안하고 이를 실험적으로도 검증하였다⁽¹⁰⁾.

이런 일련의 자왜형 센서에는 모두 회부로부터 직류형태의 바이어스 자기장이 회전축 상에 걸리게 되고 이 바이어스 자기장은 필요에 따라서 그 크기는 물론이고 방향까지 변화한다⁽¹⁰⁾. 이렇게 외부에서 걸어주는 바이어스 자기장이 변하는 경우 자성체의 자기적인 상태는 매우 복잡한 양상을 띠게 된다는 것이 알려져 있다^(11,12). Lee의 선행 연구가 센서로서의 가능성을 검증하는 것에는 성공하였으나 이 센서를 실제로 사용할 때 발생할 수 밖에 없는 바이어스 자기장에 따른 복잡한 현상에 대해서 그 원인까지 설명하지는 못하였다.

이 연구에서는 이렇게 자왜형 센서 혹은 그와 비슷한 자왜 현상을 활용하는 센서에서 발생하는 복잡한 자기적인 현상의 원인을 규명하고 그 대책을 찾고자 한다. 최근 Jiles는 접근의 법칙(law of approach)이라고 불리는 법칙을 자왜 현상에 적용하여 복잡한 현상을 비교적 정확하게 해석할 수 있는 이론적 틀을 제시한 바 있다⁽¹³⁾. 이 연구가 이전의 이론이 설명하지 못하는 많은 부분들까지 설명을 가능하게 해주었지만 이 연구를 센서에서 발생하는 실질적인 문제를 해결하는 데 적용한 사례는 지금까지 보고된 바가 없다. 이 연구에는 새롭게 제안된 센서가 동작하는 도중에 발생하는 자왜 현상과 관련된 복잡한 현상을 Jiles의 이론을 이용하여 정성적인 차원에서 설명하고자 한다. 또한 이러한 정성적인 분석을 통해서 센서가 최적의 상황에서 동작할 수 있는 조건을 제시하고자 한다. 이 연구는 센서의 특성을 정확하게 파악함으로써 최적의 성능을 구현한다는 측면에서도 의미가 있으나, 하나의 반도체 센서 안에 측정모듈과 ADC, DAC, DSP 기능을 모두 포함시켜 자기 센서의 비선형 및 이력 특성을 극복하려는 최근의 시도에 비추어 의미가 있다고 하겠다⁽¹⁴⁾.

2. 본 론

2.1 자왜형 센서의 거동

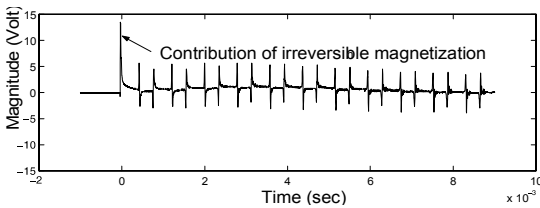
Fig. 2는 Lee가 최근 제안한 회전속도 측정과 축에 걸리는 힘을 하나의 형상에서 측정할 수 있는 센서를 보여주고 있다⁽⁹⁾. 센서의 동작원리를 간략하

게 설명하면 다음과 같다. 전자석(Fig. 2의 5번)에 의해서 만들어진 바이어스 자기장은 강자성체로 만들어진 축(Fig. 2의 4번)을 자화 시켜 특정한 자기적 상태로 만든다. 이때 이 축에 힘이 가해지면 축의 내부에서 역자왜 현상이 발생하여 축의 자기적 상태가 변화한다. 자기적 상태의 변화는 축과 코어(Fig. 2의 1번, 4번)를 통과하는 자속(magnetic flux)의 변화를 야기하고, 이 자속의 시간에 따른 변화는 식 (1)과 같이 전자기유도 현상에 의해서 측정 코일(Fig. 2의 2번)에서 전압의 형태로 측정된다⁽¹⁵⁾.

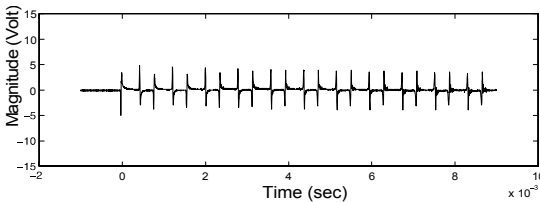
$$V(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{B} 는 자속밀도를 나타내고 \mathbf{A} 는 Fig. 2에서 측정 코일이 감싸고 있는 축의 단면적을 나타낸다. 이 센서는 회전속도 신호도 측정할 수 있는데 Fig. 2에서 tone wheel로 표시된 부분은 Fig. 1에서 5,6 번으로 표시된 치형의 역할을 수행하게 되어 Fig. 2의 픽업 코일(2번)에는 회전속도 신호까지 섞여 나오게 된다.

만일 위쪽에 있는 전자석에 의해서 발생하는 자속의 방향과 아래쪽에 있는 전자석에 의해서 발생하는 자속의 방향이 서로 같은 방향이면 인장(혹은



(a) The first impact of projectile after changing magnetic state



(b) The second impact of projectile after changing magnetic state

Fig. 3 Measured signals at different positions on the hysteresis curve

압축) 응력이 측정되고 Fig. 2와 같이 서로 다른 방향이면 굽힘 응력이 측정된다⁽¹⁰⁾.

센서의 출력은 바이어스 자기장의 크기에 의해서도 매우 민감하게 영향을 받지만 같은 크기의 바이어스 자기장이 같은 출력을 낸다는 보장은 없다. 이는 강자성체 물질이 가지고 있는 독특한 이력(hysteresis) 특성에 기인한 것으로 자기이력 곡선 상에서 같은 크기의 외부 바이어스 자기장을 걸어주어도 서로 다른 자기적 현상을 보이게 된다.

Fig. 3은 이런 현상 중 하나를 보여주고 있다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 모두 축의 한 쪽 끝을 홉킨슨바(Hopkinson bar) 실험에서와 비슷한 방식으로 충격을 가해서 인장/압축 탄성파(elastic wave)를 생성하고 이를 Fig. 2의 센서를 이용해서 측정된 신호를 보여주고 있다. 그림에서 일련의 파동조각들이 보이는데 이는 충격에 의해서 만들어진 탄성파가 축의 양쪽 끝 자유단에서 반사되면서 위상 반전을 일으키면서 진행되는 것을 보여준다. 위상 반전과 더불어 구조감쇠에 의해서 침투값이 지속적으로 작아지는 현상도 관찰 된다.

Fig. 3의 (a)는 축의 센서가 장착될 부분을 먼저 탈자화 시킨 뒤에 바이어스 자기장을 걸어주고 첫 번째 타격을 가했을 때 얻어진 신호이고 (b)는 첫 번째 타격 이후에 추가로 가해진 타격에 의해서 얻어진 신호를 보여주고 있다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 비슷해 보이지만 한 가지 근본적인 차이를 보인다. 그것은 첫 번째 타격 신호 (a)에서 발견되는 비정상적으로 큰 첫 번째 탄성파 신호다. (a)의 첫 번째 탄성파는 유난히 큰 진폭을 가지고 있고 그 모양도 이후에 관찰되는 탄성파와 비교했을 때 특이함에 비해 (b)에서 관찰되는 신호는 뒤에 이어지는 반사된 탄성파 신호들과 거의 같은 모양과 크기를 가지고 있음을 알 수 있다. 이런 현상은 탈자화를 거친 뒤에 가해진 첫 번째 타격에 의한 신호에서는

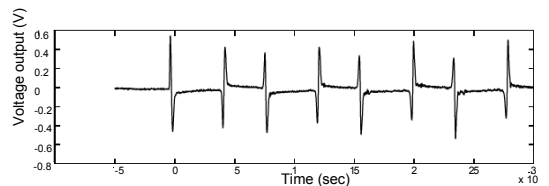


Fig. 4 Measured signal under the saturated magnetization

항상 발견되는 것으로 확인 되었는데 앞선 연구에서는 이에 대한 명확한 설명이 제시되지 못하였다. 이 현상과 관련된 또 다른 특이한 현상은 바이어스 자기장에 의한 축의 자화 정도가 거의 포화 자화에 다다르면 이러한 현상이 사라진다는 것이다. Fig. 4는 탈자화를 진행한 뒤에 거의 포화 자화에 가까운 바이어스 자기장을 걸어준 상태에서 측정한 첫 번째 타격에 의한 신호를 보여준 것이다. Fig.3의 (a)와 마찬가지로 첫 번째 타격에 의한 신호임에도 불구하고 첫 번째 파동 신호에서 보이는 특이한 모양과 크기가 나타나지 않고 있다. 이 현상 역시 선행 연구에서는 그 원인이 명확하게 제시되지 않았다.

2.2 접근의 법칙과 역자왜 현상

Jiles는 접근의 법칙을 이용해서 역자왜 현상을 많은 부분을 정량적인 수준까지 설명하는데 성공하였다⁽¹³⁾. 그의 이론에 의하면 역자왜 현상은 다음의 3가지에 요소에 의해서 결정된다.

- ① 현재 자화 상태가 비이력(anhysteresis) 곡선에서 얼마나 멀리 떨어져있는가?
- ② 비이력 곡선으로부터 떨어진 거리는 응력에 의해서 얼마나 민감하게 변화하는가?
- ③ 비이력 곡선 자체는 응력에 의해서 어떻게 변화하는가?

Jiles에 의하면 현재의 자화 상태는 식(2)와 같이 가역적인 성분과 비가역적인 성분의 합으로 구성된다.

$$M = M_{rev} + M_{irr} \tag{2}$$

여기서 *rev*는 가역적인(reversible) 자화성분을 *irr*은 비가역적인(irreversible) 자화성분을 나타낸다. 또한 이 자화상태가 응력에 의해서 변화하는 양상은 식(3)과 같은 미분방정식으로 표현이 된다.

$$\frac{dM}{d\sigma} = \frac{1}{E\xi} \sigma(M_{an} - M) + \frac{dM_{an}}{d\sigma} \tag{3}$$

여기서 *E*는 영의 계수(Young's modulus), ξ 는 자성체 내부의 피닝 에너지(pining energy), M_{an} 은 식(4)와 같이 주어지는 비이력 자화상태를 나타낸다.

$$M_{an}(H, \sigma) = M_s \left[\coth\left(\frac{H_{eff}}{a}\right) - \frac{a}{H_{eff}} \right] \tag{4}$$

여기서 *a*는 볼츠만 상수와 관련된 값이고 M_s 는 포화 자화, H_{eff} 는 실효 자기장을 나타낸다⁽¹⁶⁾.

식(3)을 통해서 현재의 자화상태(*M*)가 비이력 곡선(M_{an})으로부터 먼 거리에 있으면 그 거리가 응력에 의한 자화상태의 변화를 지배적으로 변화시킴을 알 수 있는데 이는 우변의 첫째항으로 표시된다. 이때 발생하는 자화성분의 변화는 비가역적인 성분이 대부분이다. 응력의 영향은 등가의 외부자기장을 가해주는 것과 같은 효과를 가지고 있어서 현재 자화상태를 비이력 자화곡선 쪽으로 밀어주게 되는데 이 과정에서 현재 자화상태의 구성 성분 중에서 비가역적인 자화성분의 많은 부분이 사라지게 된다. 즉 식(3)에서 우변의 첫 항이 '0'에 가까워지게 된다는 것이다. 그 이후에는 식(3)의 우변 둘째 항인 M_{an} 의 응력에 따른 변화율이 현재의 자화상태의 변화를 지배하게 되는데 이때 변화하는 자화성분은 가역적인 성분이 주가 된다.

한 가지 언급해야 할 것은 포화자화에 가까운 영역에서의 거동이다. Fig. 5는 주이력곡선(major hysteresis curve)과 비이력 곡선을 함께 그린 것인데 그림에서 포화자화 영역에 가까운 Q점에서는 이 두 곡선의 차이가 거의 없다는 것을 보여주고 있다. 즉, 이 영역에서의 자화성분의 변화는 주로 가역적인 성분에 의해서 좌우된다고 볼 수 있다.

2.3 접근의 법칙을 이용한 센서 거동 해석

Fig. 3의 (a)와 (b)에 보인 거동은 접근의 법칙을 이용해서 설명이 가능하다. 탈 자화 상태(Fig. 5에서 O점)로 만든 뒤에 바이어스 자기장에 의해서 자화가 진행이 되면 측정 대상 축의 자화상태는 주이력 곡선 상의 어느 한 점 P에 위치할 것이다. 이 자화상태는 상대적으로 많은 비가역적 자화성분을 가지

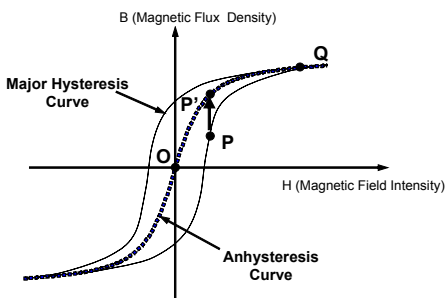


Fig. 5 Hysteresis curve and anhysteresis curve

고 있게 된다. 만일 이때 축의 한 끝에서 발생한 탄성파가 이 부분을 지나간다면 접근의 법칙에 의해서 자화상태 P는 비자화곡선 상의 점 P'로 접근해갈 것이다. 상대적으로 많은 비가역적 자화성분을 가지고 있던 P점은 매우 큰 자화상태의 변화를 경험하게 될 것이고 이 이후에 탄성파에 의해서 가해지는 응력은 주로 가역적 자화성분의 변화를 야기할 것이다.

Fig. 3의 (a)에서 첫 번째 탄성파가 매우 큰 특이한 신호로 측정되는 것은 이렇게 비가역적 자화성분이 해소되면서 발생하는 것으로 판단된다. 한 번 비가역적 자화성분이 해소되고 나면 이후의 신호는 가역적인 자화성분이 관여하기 때문에 매우 일관된 신호 양상을 보이게 된다.

가역적 성분과 비가역적 자화성분이 만들어내는 현상을 접근의 법칙으로 설명할 수 있음을 보여주는 또 다른 증거는 포화자화 상태에서의 거동이다. Fig. 4는 축의 상태를 거의 포화자화 상태(Fig. 5의 Q점)로 만들 수 있을 정도의 바이어스 자기장을 걸어주고 첫 번째 타격에서 얻은 신호라고 했는데 여기서는 첫 번째 타격임에도 불구하고 특이하고 비정상적으로 큰 신호가 보이지 않았다. 접근의 법칙의 관점에서 보면 Q점에서의 자화상태는 비이력 곡선과 거의 차이가 없는 대부분이 가역적인 자화성분이다. 이 때문에 비가역적 자화성분으로 인해서 발생하는 특이한 첫 신호는 발견되지 않는 것이다.

Craik와 Briss 및 Jiles의 연구에서 지적인 바와 같이 자화상태에 응력이 미치는 영향을 정량적으로 예측하는 것은 매우 복잡하다^(11~13). 예를 들면 같은 크기의 응력이라고 하더라도 그 응력이 인장력인가 압축력인가에 따라서 자화상태가 변화하는 양상이 완전히 달라지기도 하며 그 변화 양상 자체가 외부에서 걸어준 바이어스 자기장에 의해서 크게 변화한다. 하지만 이런 복잡한 자기적 현상은 대부분 비가역적인 자화성분이 일으키는 것이다. 비가역적인 자화성분이 사라지고 나면 이런 현상도 매우 일관된 양상을 보이게 된다. 이를 확인하기 위해서 인장력에 해당하는 탄성파가 가해질 때와 압축력에 해당하는 탄성파가 가해질 때 센서의 출력신호 모양을 Fig. 6과 같이 정의하고 이들 모양이 바이어스 자기장의 크기와 관련하여 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 여기서 하첨자 *c*와 *t*는 각각 압축응력

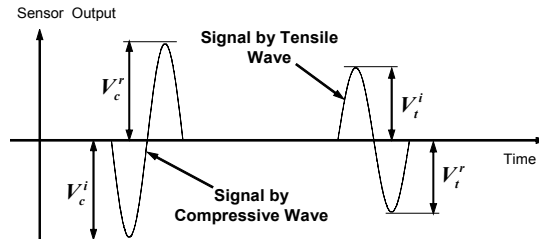


Fig. 6 Definition of signal shapes for compressive and tensile elastic waves

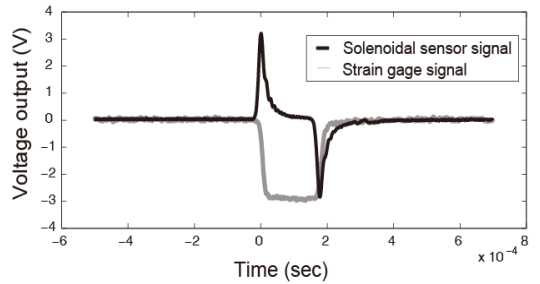


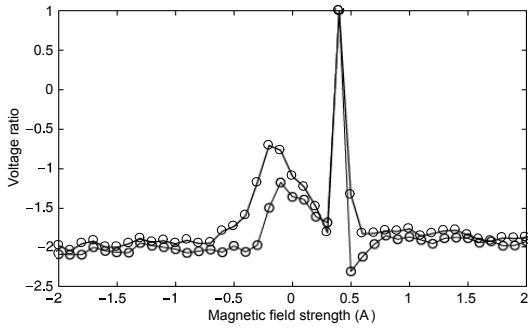
Fig. 7 Signals obtained from solenoidal sensor and strain gage

(compressive stress)과 인장응력(tensile stress)를 나타내고 상첨자 *i*와 *r*은 해당 응력이 가해지고 (incident) 풀릴 때(releasing) 나타나는 신호를 표시한다.

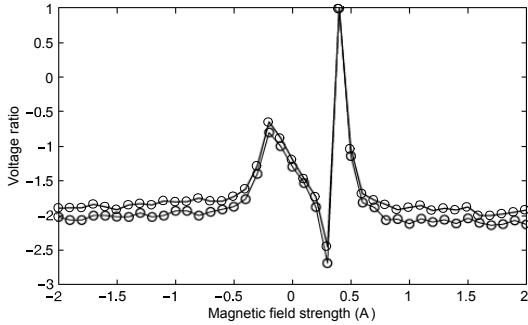
Fig. 6의 신호가 나타나는 것을 이해하기 쉽도록 하기 위해서 스트레인 게이지를 이용해서 측정된 신호와 Fig. 2의 코일 센서를 이용해서 측정된 신호를 Fig. 7에 보였다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 코일 센서를 통해서 측정되는 신호는 기계적 변위를 시간에 대해서 미분한 신호가 될 것이다. Fig. 7은 이를 잘 보여주고 있다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 압축력과 인장력이 가해지고 풀릴 때 신호의 비율($V_c^i/V_c^r/V_t^i/V_t^r$)을 2개의 신호에 대해서 추출해서 도시한 결과를 보여주고 있다. 예상한 바대로 바이어스 자기장이 작을 때 즉, 포화 영역에서 멀리 떨어져 있어서 비가역적인 성분이 많은 영향을 미치는 영역에서는 이 비율 자체가 매우 불규칙한 양상을 보이지만 포화영역으로 가까이 갈수록 일정한 값으로 다가감을 확인할 수 있다.

센서의 정량적인 특성이 중요한 응용에서라면 급적 이 비율이 일정한 값을 유지하는 영역에서 사용해야 할 것이다.



(a) Voltage ratio V_d^i/V_c^i variation along the hysteresis curve

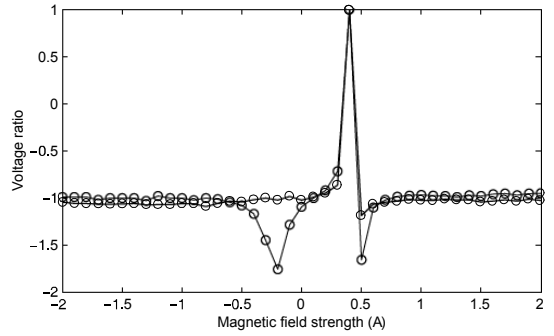


(b) Voltage ratio V_d^i/V_t^i variation along the hysteresis curve

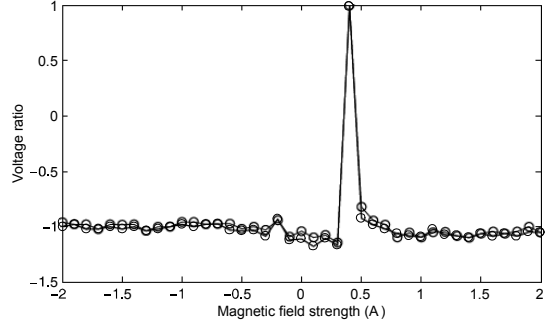
Fig. 8 The signal amplitude variations for wave indenting and releasing portions

Fig. 9의 (a)와 (b)는 응력이 가해지고 풀리는 경우에 대해서 압축응력과 인장응력의 비율을 추출한 결과를 보여준다. Fig. 8과 마찬가지로 바이어스 자기장이 포화영역으로 갈수록 일정한 값을 보임을 확인할 수 있고 이는 이 센서를 실제 상황에서 적용할 때 비가역적인 자화성분이 출력에 영향을 주지 못하도록 적절한 방법을 통해서 통제될 필요가 있음을 말해준다.

센서의 출력과 관련하여 비가역적인 성분의 부정적인 영향과 함께 고려해야 할 센서의 특성은 출력 민감도(sensitivity)다. 만일 포화자기장 영역에서 센서의 출력이 충분한 감도를 확보하지 못한다면 이는 또 다른 문제를 야기할 것이다. Fig. 10은 센서의 출력을 바이어스 자기장의 크기를 변화시켜가면서 측정된 결과인데 바이어스 자기장의 크기가 1.5A 부근에서 최대의 출력을 나타내고 있으며 Fig. 8과 9를 통해서 이 영역에서는 비가역적 성분의 거의 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다.



(a) Voltage ratio V_d^i/V_c^i variation along the hysteresis curve



(b) Voltage ratio V_d^i/V_t^i variation along the hysteresis curve

Fig. 9 The signal amplitude variations for compressing and tensile waves

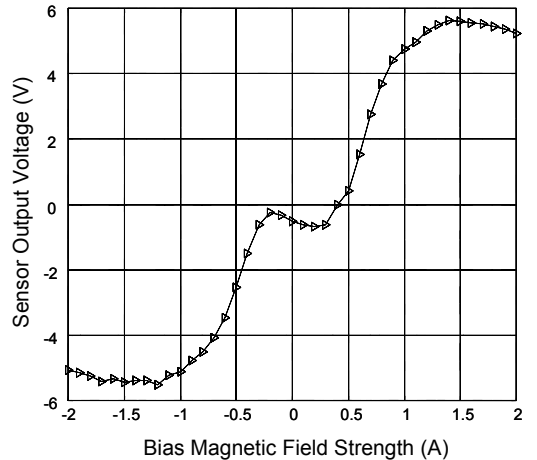


Fig. 10 Sensor output amplitude with respect to bias magnetic field variations⁽⁹⁾

3. 결론

이 연구에서 회전하고 있는 축에 대하여 회전속

도 정보를 담고 있는 신호와 축에 걸리는 탄성과 신호를 하나의 형상에서 측정할 수 있는 센서의 자기적 특성을 살펴 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 먼저 접근의 법칙을 정성적으로 적용하여 센서의 출력에서 나타나는 특이한 신호들이 비가역적인 신호의 영향임을 실험적으로 확인하였다. 센서의 출력을 정량적으로 사용해야 하는 경우에 대비하여 센서의 출력형상이 인장 및 압축 응력에 따라서 또한 응력이 걸리고 풀림에 따라서 어떻게 변화하는지를 살펴봄으로써 걸어주는 바이어스 자기장에 관한 기준을 제시하였다. 이 연구결과에 의하면 바이어스 자기장은 포화 자기장에 가까운 값을 걸어주어야 비가역적인 자화성분의 영향이 사라짐과 동시에 출력 감도도 최대가 된다.

후 기

이 연구는 한국학술진흥재단의 2006년신진교수연구지원사업(과제번호: D00017)에 의해서 수행된 과제임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- (1) Robert Bosch, 2007, "Automotive Electrics Automotive Electronics," Robert Bosch GmbH.
- (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, No. 4, pp. 615~622.
- (3) Fleming, W., 1982, "Automotive Torque Measurement: A Summary of Seven Different Method," IEEE Trans. On Vehicular Technology, Vol. 31, No. 3, pp. 117~124.
- (4) 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, No. 4, pp. 799~808.
- (5) Cho, S. H., Han, S. W., Park, C. I. and Kim, Y. Y., 2006, "Torsional Modal Testing of a Non-ferromagnetic Shaft by Magnetostrictive Patch Transducers," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 879~885.
- (6) Dally, J. W. and Riley, W. F., 1991, "Experimental Stress Analysis," McGRAW-Hill.
- (7) 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.
- (8) Torque Telemetry System, www.binsfeld.com
- (9) Lee, H. C., Kim, M. H. and Park, J. Y., 2006, "Feasibility Verification of a Non-contact Vibration Sensor for Rotating Shafts Endowed with Rotational-encoder Capability," Trans. of the KSME, Vol. 30, No. 12, pp. 1596~1602.
- (10) Lee, H. C., 2008, "Mode-selective Ultrasonic Wave Sensor and its Characteristics," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, pp. 247~254.
- (11) Craik, D. J. and Wood, M. J. 1971, "Magnetization Changes Induced by Stress in a Constant Applied Field," Journal of Physics D, Vol. 4, pp. 1009~1015.
- (12) Briss, R. R., Faunce C. A. and Isaac, E. D., 1971, "Magnetomechanical Effects in Iron and Iron-carbon Alloys," Journal of Physics D, Vol. 4, pp. 1040~1048.
- (13) Jiles, D. C., 1995, "Theory of the Magnetomechanical Effect," Journal of Physics D, Vol. 28 pp. 1537~1546.
- (14) Datasheet of TLE4997: Programmable Linear Hall Sensor, www.infineon.com
- (15) Griffiths, D. J., 1989, "Introduction to Electrodynamics," Prentice-Hall Inc.
- (16) Jiles, D., 1991, "Introduction to Magnetism and Magnetic Materials," Chapman & Hall.
- (17) Cho, S. H., Han, S. W., Park, C. I. and Kim, Y. Y., 2006, "Torsional Modal Testing of a Non-ferromagnetic Shaft by Magnetostrictive Patch Transducers," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 879~885.