자왜형 진동 센서의 비이력화를 통한 비가역적 자화성분 제거에 관한 연구

Study on the Elimination of Irreversible Magnetic Components Using Anhyseretization in a Magnetostrictive Vibration Sensor

이 호 철*·배 원 호*

Hocheol Lee and Wonho Bae

(2010년 7월 30일 접수 ; 2010년 8월 20일 심사완료)

Key Words : Ultrasonic Transducer(초음파 변환기), Bias Magnetic Field(바이어스 자기장), Magnetostriction(자왜 현상), Shaft Diagnosis(축 진단), Anhyseresis(비이력화)

ABSTRACT

Previous experimental results show that the magnetostrictive transducer has the peculiar characteristic with relation to their reversible magnetization and its practical usage will be hindered by this phenomena. In this paper, the idea of anhyseretization is adopted in order to solve this problem. The experimental results reveal that the anhyseretization can get rid of the extraordinary phenomena which are occurred by the change of biasing magnetic field. The effects of two important parameters, which are the amplitude and the decaying time of this process, on the anhyseretization are investigated experimentally. Finally the best operating condition is proposed in order to maximize the sensitivity under the anhyseretization.

1. 서 론

자왜(magnetostrictive) 물질은 피에조 물질과 더불어 초음파를 발생시키는 대표적인 물질이며 피에조(piezoelectric) 물질과 경쟁하는 관계로, 때로는 서로 보완하는 관계로 각종 산업에 사용되고 있는 대표적인 지능재료(smart material)다. 피에조 물질은 매우 우수한 성능과 긴 기술적 역사를 가지고 있는 검증된 물질이지만 동작 원리 측면에서 전기장을 이용하기 때문에 대상물에 배선을 통한 접촉이 반드시 필요하다는 단점이 있다. 결과적으로 응

용하고자 하는 대상이 회전체이거나 직접 배선이 불가능한 경우 등에서는 피에조 물질을 채택하는 것은 불가능하다⁽¹⁾.

물론 비접촉 방식으로 회전체 등의 거동을 측정하는 방법에는 광학을 이용하거나 정전용량의 변화를 이용하는 방법들도 있다^(2,3). 하지만 전자는 경제성 측면에서, 후자는 측정대상에 장착하는 방식 측면에서 한계가 명확하다. 게다가 이 두 센서는 모두 측정대상의 표면에 걸리는 응력을 측정하는 것이 아니고 응력에 의해서 발생된 변위를 측정하기 때문에 응용 분야에 한계가 있다.

이 연구는 빌라리 효과(Villari effect)라고 불리는 역자왜 현상(inverse magnetostriction)을 이용하여 회전체의 진동을 비접촉 방식으로 계측하는 센서에 대한 것이다⁽⁴⁻⁷⁾. 빌라리 효과는 자왜물질에 가해진 응력이 해당물질의 자기적 상태를 변화시킨다는 물

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

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

리적 현상에 관한 법칙이다. 최근 연구는 이 빌라리 효과를 이용하면 하나의 센서에서 두 종류의 서로 다른 모드의 진동 중에서 하나를 선택적으로 측정할 수 있음을 보여주었다⁽⁷⁾. 하지만 자기적 현상을 이용하는 다른 센서에서와 마찬가지로 빌라리 효과를 이용한 센서는 매우 심각한 이력(hysteresis)현상과 비선형성으로 인해 상용화를 하기에는 많은 문제점을 가지고 있음이 확인되었다⁽⁸⁾.

이력현상은 자기적 이력현상뿐 아니라 자왜현상 자체 즉, 자기장과 발생하는 변위의 관계에서도 나타나기 때문에 이를 해석적으로 혹은 수치적으로 예측하는 모델을 만드는 것은 매우 어렵다. 특히 이 연구에서 대상으로 삼고 있는 재료인 철의 경우 빌라리 역전(Villari reversal)이라고 하여 낮은 자기장 아래서 늘어나던 재료가 높은 변위(자기장)에서 오히려 줄어드는 현상을 보이는데 이 현상은 이 재료에 대한 해석을 더욱 힘들게 만든다.

이 연구에서는 빌라리 효과를 이용한 센서를 이용함에 있어 이력현상을 극복할 수 있는 방안의 하나로 비이력화(anhysteretization)를 제안하였다. 즉, 이력현상을 해석해서 예측하는 것이 아니라 측정에 영향을 미치는 이력에 의한 비가역성분을 측정에 앞서 제거해줌으로써 문제를 해결하고자 한다. 후술하는 연구 결과는 비이력화를 이용하면 기존의 연구 결과에서 보이던 이력현상에 기인한 특이한 현상들을 제거할 수 있어 센서의 상용화에 한발 더 다가설 수 있음을 보여준다. 게다가 이 연구에서 제안하는 해결 방안은 재료와 관계없이 적용이 가능하기 때문에 최근에 수행된 자왜물질과 관련된 연구들에 모두 적용할 수 있다^(9,10).

논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 자기이력으로 인해서 나타나는 대표적인 현상이 어떤 것이고 이러한 현상이 어떻게 실용적인 측면에서 정량적 센서 혹은 actuator로 사용이 불가능하게 하는지를 보여준다. 이런 이력현상의 제거를 위해서 이 연구에서 채택된 비이력화에 대한 개념을 설명하고 이 연구에서 사용한 실험장치 및 비이력화 방법에 대해서 설명한다. 결론 부분에서는 기존에 수행된 연구 결과에서 나타났던 특이한 현상들이 비이력화를 통해서 모두 제거될 수 있음을 보였으며 비이력화와 관련된 몇 가지 주요 파라미터들이 센서의 출력에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다.

2. 본 론

2.1 자기이력으로 인한 현상

비이력화의 필요성을 설명하기 위하여 기 수행된 연구의 내용을 이해할 필요가 있기 때문에 이에 대하여 간략하게 설명한다. Fig. 1은 강자성체로 이루어진 축에서 발생하는 종진동과 횡진동을 비접촉 방식으로 측정하기 위해서 진행된 실험을 보여주고 있다^(7,8). 그림의 오른쪽에서 강철로 된 구체(ball)를 스텝모터를 이용해서 정해진 각도만큼 끌어 올린 뒤에 자유낙하 하도록 한다. 자유낙하로 떨어진 구체는 측정대상인 축(target rod)의 끝 단에 부딪히고 이때 발생한 진동이 축을 따라서 전파된다. 구체가 정확하게 축 중심에 타격을 가하면 종(longitudinal) 진동이 발생할 것이고 빗겨서 타격이 가해진다면 종진동과 횡(flexural) 진동이 함께 발생할 것이다⁽⁷⁾. 중앙에 놓인 센서는 종진동을 측정하기 위해서 구성된 센서를 보여주고 있다. 횡 진동에서도 똑 같은 현상이 발생하지만 횡 진동의 경우 분산(dispersion)이 심해서 이력현상으로 인한 효과를 관측하기 쉽지 않다. 이에 이 연구에서는 종진동에 대한 실험만을 대상으로 하였다. 비접촉 진동센서는 자왜현상을 이용하고 있으며 축에 근접해서 놓인 코일 센서와 외부에서 바이어스 자기장을 생성하기 위한 전자석으로 구성되어있다.

기존 연구에서 지적된 바와 같이 비접촉 방식으로 축에서 발생하는 종진동을 측정할 때 바이어스 자기장의 세기를 변화시킨 뒤에 측정된 진동신호에서는

Fig. 1 Experimental setting for noncontact longitudinal vibration sensor performance^(7,8)

앞부분에서 비정상적으로 큰 신호가 발생하며 이는 센서를 상용화함에 있어 매우 큰 장애로 작용하게 된다. Fig. 2는 이력현상으로 인해서 발생하는 비정상적인 신호의 예를 보여주고 있다. 그림에서 (a)는 정상적인 진동신호를 나타낸다. 펄스 형태의 신호가 반복해서 나타나는 것은 충격신호가 축의 양끝 자유단에서 반사되면서 왕복 진행하고 있음을 보여주고 있다. 반면 (b)는 바이어스 자기장의 세기를 변화시킨 뒤에 비정상적인 충격신호가 감지된 경우를 보여주고 있다. 이 신호는 다른 진동신호 비해서 형태도 특이할 뿐 아니라 크기도 비정상적으로 커서 이를 제거하지 않는다면 추후에 센서의 정량적인 사양(specification)을 마련하기가 불가능하게 될 것이다.

2.2 비이력화의 개념 및 실험 방법

자성물질이 가진 특징 중에서 다른 물질들과 특

Fig. 2 Abnormal peak signal measured right after the bias magnetic field is changed⁽⁸⁾

Fig. 3 The concept of anhyseresis curve

별히 대별되는 것 중 하나가 이력현상이다. 이력현상은 현재의 자기적 상태가 외부에서 가해진 자화력(magnetic strength)에 의해서 단일하게 결정되지 않고 지난 이력(history)에 의존한다는 것이다. Jiles는 가역적 자화성분과 비가역적 자화성분의 합으로 자화현상을 모델링하였고 실험을 통해서 가역-비가역 자화성분 이론이 복잡한 이력현상을 잘 설명할 수 있음을 보였다⁽¹¹⁾.

Fig. 3을 이용해서 설명해보자. Fig. 3에서 실선은 일반적인 자성물질의 이력곡선을 보여주고 있다. 예를 들어 자화곡선 상의 한 지점 Q의 상태는 가역적인(reversible) 자화성분과 비가역적인(irreversible) 자화성분이 섞여있다. 가역적인 자화성분이란 말 그대로 가역적이어서 외부에서 걸어주는 자화력의 방향 혹은 크기에 비례하여 바뀌게 되는 성분이다. 반면 비가역적인 자화성분은 한 번 변화가 일어나면 반대 방향으로 같은 크기의 외부 자화력을 가해도 본래 상태로 돌아가지 않는다. Fig. 3에서 점선으로 표시된 곡선은 비이력곡선(anhyseresis curve)를 나타낸다. 이 이력곡선은 가역적인 자화성분만을 가지고 있는 상태를 나타낸다. 어떤 자화상태 Q에서 비가역적인 자화성분을 제거하고 가역적인 자화성분만을 남기면 비이력곡선 상의 P점으로 자화상태가 변하게 된다. 이를 비이력화(anhyseretization)라고 부르며 자기테이프 기록장치 등에서 음성신호의 정확한 재생을 위해서 사용된다^(12~14).

Fig. 4 Initial magnetization curve(blank circle), major magnetization curve(solid circle) and anhyseresis curve

실제로 비이력화를 하는 방법은 간단하다. 만일 Q에서 비이력화를 진행한다면 현재 가해진 자화력에 크기가 점차 줄어드는 교번 자기장을 외부에서 추가로 가해지면 비가역적 자화성분은 모두 사라지고 가역적인 자화성분만 남게 된다. Fig. 3의 X축인 자화력 축에 이를 도식적으로 표시하였다. 당연히 이 비이력 자화곡선은 주 자화곡선을 구성하는 상단부와 하단부의 사이에 위치해야 할 것이다.

현재 사용하고 있는 축의 재료는 S45C 탄소강인데 이 시편에 대해서 실제로 이력곡선과 비이력곡선을 구한 결과를 Fig. 4에 보였다. Fig. 4에서 내부가 채워진 원으로 표시된 곡선부분이 초기 자화곡선(initial magnetization curve)이고 내부가 채워지지 않은 원으로 표시된 곡선이 주(major) 자화곡선이다. 반면 점으로 표시된 곡선은 위에서 설명한 비이력화를 통해서 얻은 비이력 자화곡선을 보여주고 있다. 예상했던 바와 같이 이력곡선의 사이에 존재함을 실험을 통해서도 확인할 수 있었다.

Fig. 5 Experimental setup for anhysteretization

Fig. 6 Current waveform for anhysteretization

비이력화의 효과를 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험을 진행하였다. 실험 장치의 구성은 Fig. 1과 같이 하되 바이어스 자기장을 만들기 위해서 가해지는 전류의 파형을 PC에서 제어하는 방식으로 비이력화를 진행하였다. 강체 구를 일정한 각도만큼 올렸다가 자동으로 낙하하는 제어 및 비이력화 가진 신호는 National Instrument사의 PCI-6221을 이용하였으며 센서에서 측정된 진동신호를 오실로스코프로부터 받는다는 동사의 USB-GPIB 모듈을 이용하였다. 전체 실험과정은 동사의 LabVIEW를 이용하여 자동화하였다. Fig. 6의 파선으로 표시된 부분이 기존의 바이어스 자기장을 생성하기 위한 전류 파형이라면 실선으로 표시된 것이 비이력화를 진행하면서 바이어스 자기장을 걸어준 경우의 전류 파형이다. 이와 같은 비이력화 실험을 통해서 Fig. 2의 (b)에서 본 비정상적인 신호들이 효과적으로 제거되는지를 확인하고 비이력화를 위한 전류 파형과 관련된 2가지 주요 변수들이 비이력화에 미치는 영향을 확인하였다.

2.3 비이력화를 이용한 실험 결과

Fig. 7은 2.2절에서 설명한 실험의 결과를 보여준다. 먼저 바이어스 자기장용 전자석을 이용하여 자화력과 잔류자속밀도가 모두 '0'인 원점에서 출발하여 주 자화곡선을 한 바퀴 돈 뒤에 Q의 상태로 오게 한다. 이 상태에서 Fig. 5에 보인 강 구체 낙하 실험을 실시하고 신호를 얻는다. Fig. 7의 오른쪽 하단에 보인 신호가 이렇게 얻어진 신호다. 바이어스 자기장의 변화가 있었기 때문에 비정상적으로 큰

Fig. 7 Elimination of an abnormal part from the signals by anhysteresis process

초기 신호가 측정되었음을 알 수 있다. 축을 비자화시킨 뒤에 다시한번 Q의 상태로 오게 한 다음에 이번에는 비이력화를 실시한다. 비이력화를 실시하였기 때문에 축의 상태는 Fig. 7의 P에 있다고 할 수 있다(그래프에서 파선은 비이력자화곡선에 해당한다.). 이 상태에서 다시한번 같은 강 구체 낙하실험을 실시한다. 이 두 가지 실험은 센서가 부착된 축의 자기적 상태가 한쪽은 비이력화를 진행한 것이고 다른 한쪽은 그렇지 않다는 것을 제외하고는 모두 동일하다. Fig. 7의 왼쪽 상단에 보인 측정신호가 비이력화를 진행한 뒤 측정된 신호로 앞서 Q에서 측정했을 때 보였던 비정상적인 신호는 보이지 않음을 알 수 있다. 이를 통해서 비이력화가 효과적으로 비가역적 자화성분으로 인해서 생기는 문제점을 해결할 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8 Two major parameters with relation to anhyseresis

Fig. 9 Output voltage variation according to anhyseretization intensity

비이력화의 효과를 확인하였기에 비이력화와 관련된 주요 변수들이 비이력화 및 센서에 어떤 영향을 미치는지를 확인하는 실험을 수행하였다. 교류자기소거법을 이용한 비이력화와 관련된 변수로는 Fig. 8에 보인 바와 같이 비이력화에 사용된 파형의 최대 크기(peak amplitude)와 감쇠시간(decay time)을 선정하였다.

(1) 첨두치(peak value)에 의한 영향

Fig. 9는 Fig. 8에 보인 비이력화 전류 신호의 첨두치(peak value)를 변화시키면서(X축) 센서의 출력 신호의 크기(Y축)가 어떻게 변화하는지를 살펴본 것이다. 첨두치의 크기가 작을 때는 불안정한 값을 보이다가 약 3V를 넘어서면서 안정화되어 그 뒤에는 거의 일정한 값을 보임을 확인할 수 있다. 여기서 안정화가 안 되었다는 것은 아직 비가역적인 자화성분이 상당히 남아있다는 것을 의미한다. 결국 Fig. 9는 비이력화가 성공적으로 수행되려면 일정한 자기장 이상의 크기가 필요하다는 것을 의미한다. 사실 비가역적 자화성분의 많은 부분이 자성체 속에 존재하는 결함이나 불순물들로 인한 자벽(domain wall)의 고정(pinning)에 의해서 발생하고 이 자벽을 옮기는데 일정한 크기 이상의 자기적 에너지를 필요하다는 것을 고려할 때 타당한 실험결과라고 하겠다. 실용적인 관점에서 볼 때 이 첨두치를 크게 하는 것은 관련된 전자장치의 경제적인 측면에서나 전력 측면에서 좋지 못하므로 이 값을 가급적 작게 할 필요가 있겠다.

(2) 자기적 상태에 따른 영향

자기이력현상으로 인해서 자화곡선 상의 한 점이

Fig. 10 Three different magnetic states for the same magnetic field strength

Fig. 11 Output voltage variation according to anhysteretization intensity at the three different magnetic state shown in Fig. 10

라고 하더라도 그 이력에 따라서 서로 다른 자화상태를 가짐은 주지의 사실이다. 만일 이 연구에서 제시한 비이력화에 관한 가정이 사실이라면 어떤 이력을 가진 자화상태라고 하더라도 비이력화를 통해서 같은 상태로 귀결되어야 할 것이다. 이를 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 같은 자화력의 세기에 대해서 다시 말해, 같은 X축 값에 대해서 존재할 수 있는 대표적 자기적 상태는 3가지가 있다. Fig. 10을 참고로 하여 설명하면 하나는 자화가 전혀 이루어지지 않은 상태에서 진행되는 초기 자화곡선(그림에서 짧은 파선으로 표시됨)을 따라 이동한 것(A)이고 다른 하나는 주 자화곡선에 있으나 포화 상태까지 도달한 뒤에 자화력이 작아지는 과정 중(그림에서 긴 파선으로 표시됨)에 있는 것(B)이며 마지막 상태는 자화가 반대방향으로 포화가 된 뒤에 다시 원래 방향으로 포화되는 과정 중(그림에서 실선으로 표시됨)에 있을 때(C)다. Fig. 10에 각각의 상태를 A, B 그리고 C로 표시하였다. 사실 Fig. 9에 보인 결과는 A에서 측정된 것을 보여준 것이다.

Fig. 11에 A, B 그리고 C 상태에서 Fig. 9의 결과를 얻기 위해서 수행한 실험을 똑같이 수행한 결과를 보였다. 예상했던 대로 모든 자기적 상태에 있어서 출력신호는 약 3V가 넘어가면서 안정화되었고 그보다 작은 값에서는 매우 불규칙한 모습을 보이고 있다. 이는 바이어스 전압을 변화시킨 뒤에 관찰되는 비정상적인 신호가 비가역적인 자화성분의 영향이

Fig. 12 Output voltage variation according to anhysteretization times at the three different magnetic state shown in Fig. 10

라는 간접적인 증거라 볼 수 있다.

(3) 감쇠시간(decay time)에 의한 영향

Fig. 12는 Fig. 8에서 설명한 감쇠시간을 변화시켜가면서 센서의 출력전압이 어떻게 변화하는지를 살펴본 결과다. 그림을 통해서 내릴 수 있는 결론은 감쇠시간은 그 시간이 짧고 깊어 출력에 그리 큰 영향을 주지는 않는다는 것이다. 서로 다른 자기적 상태 A, B, 그리고 C에 대해서 감쇠시간이 달라져도 크게 다르지 않은 출력 양상을 보이고 있음도 확인할 수 있다.

(4) 바이어스 자기장에 따른 영향

마지막으로 비이력화를 진행하면서 실험을 했을 때 바이어스 자기장의 크기가 출력에 어떤 영향을 주는지를 확인하기 위한 실험을 실시하였다. 즉 Fig. 8에서 바이어스 자기장용 전류(current for biasing)로 표시된 크기(실험 상에서는 바이어스 전압용 전자석에 걸어주는 DC 전압)를 변화시키면서 출력의 크기를 살펴보았다. Fig. 13은 실험결과를 보여주고 있다. 출력의 크기는 바이어스 자기장의 크기가 작을 때는 작다가 이 자기장이 커지면서 함께 커지며 일정한 크기가 되면 최대값을 보이고 다시 작아지는 경향을 보인다. 이는 선행연구에서 지적인 바와 같이 출력의 크기가 바이어스 자기장의 크기에 영향 받는 것이 아니고 자왜곡선의 기울기에 의해서 영향을 받기 때문에 생기는 현상이다⁽⁷⁾. 실용

Fig. 13 Sensor output voltage according to the biasing magnetic field variations

적인 관점에서는 바이어스 자기장을 위해서 소모되는 전력을 최소화 시키되 출력 전압은 가급적 크게 하는 것이 좋으므로 Fig. 13에 표시한 영역 중에서 가급적 작은 바이어스 전압을 사용할 필요가 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

이 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 자왜형 센서를 사용할 때 외부에서 걸어주는 바이어스 자기장을 변화시키면 비정상적인 신호가 관측된다. 이 비정상적인 신호는 자성물질이 가지는 이력현상에 의한 것이며 특히 자화성분 중에서 비가역적인 자화성분의 영향에 의해서 나타난다. 이런 비정상적인 신호를 없애기 위해서 비이력화의 개념을 도입하였으며 비이력화가 비정상적인 신호를 제거하는데 효과가 있음을 실험적으로 확인하였다. 비이력화에 사용되는 파형의 특징(최대값 및 감쇠시간)이 미치는 영향을 분석하여 파형의 최대치는 일정한 크기 이상이 되어야 비이력화 효과를 나타낼 수 확인하였고 감쇠시간은 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다. 또한 서로 다른 자기이력을 가지는 자기적 상태에 대해서 비이력화가 공통적으로 효과가 있음을 확인하였다. 마지막으로 비이력화를 진행하면서 출력 전압을 최대로 만들고 동시에 전력 측면에서도 유리한 최적의 바이어스 전압의 크기가 존재함을 실험적으로 확인하였다.

후 기

이 연구는 대구가톨릭대학교 2010년 일반 교내연구

구비지원에 의해서 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Giurgiutiu, V., 2008, "Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors," Elsevier, New York, p. 518.
- (2) Miles, T. J., Lucas, M., Halliwell, N. A. and Rothberg, S. J., "Torsional and Bending Vibration Measurement on Rotors Using Laser Technology," Journal of Sound and Vibration, Vol. 226, No. 3, pp. 441~467.
- (3) Wolfenbittel, R. F. and Foerster, J. A., 1990, "Noncontact Capacitive Torque Sensor for Use on a Rotating Axle," IEEE Trans. on Instruments and Measurements, Vol. 39, No. 6, pp. 1008~1013.
- (4) Fleming, W. J., 1990, "Magnetostrictive Torque Sensors - Comparison of Branch, Cross, and Solenoidal Designs," SAE paper, 900264, pp. 393~420.
- (5) Andreescu, R., Spellman, B. and Furlani, E. P., 2008, "Analysis of a Non-contact Magnetoelastic Torque Transducer," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 320, pp. 1827~1833.
- (6) 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.
- (7) Lee, H. C., 2008, "Mode-selective Ultrasonic Wave Sensor and Its Characteristics," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, pp. 247~254.
- (8) Lee, H. C., 2009, "Analysis of Magnetic Characteristic for a Noncontact Magnetostrictive Sensor Simultaneously Measuring Rotational Speed and Force," Transactions of Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 418~424.
- (9) Lee, J. S., Kim, Y. Y. and Cho, S. H., 2009, "Beam-focused Shear-horizontal Wave Generation in a Plate by a Circular Magnetostrictive Patch Transducer Employing a Planar Solenoid Array," Smart Materials and Structures, Vol. 18, 015009.

(10) Park, C. I., Kim, W. C., Cho, S. H. and Kim, Y. Y., 2005, "Surface-detached V-shaped Yoke of Obliquely Bonded Magnetostrictive Strip for High Transduction of Ultrasonic Torsional Wave," Applied Physics Letters, Vol. 87, 224105.

(11) Jiles, D. C., 1995, "Theory of the Magneto-mechanical Effect," Journal of Physics. D: Applied Physics, Vol. 28, pp. 1537~1546.

(12) Fiorillo, F., 2004, Measurement and Charac-

teristics of Magnetic Materials, Elsevier Academic Press, Amsterdam, pp. 347.

(13) Mee, C. D. and Daniel, E. D., 1996, "Magnetic Storage Handbook," McGraw-Hill, New York, pp. 7.5.

(14) Mee, C. D. and Daniel, E. D., 1996, "Magnetic Recording Technology," McGraw-Hill, New York, pp. 2.52.