

## 개방자기회로에서 강자성재료의 보자력 측정장치 개발

유권상

한국표준과학연구원 전자기표준부  
유성우채국사서함 102호 304-600

박진습

삼성전자 생산기술팀  
경기도 용인시 기흥읍 농서리 산 24번지, 449-711

(2000년 10월 6일 받음, 2000년 11월 17일 최종수정본 받음)

보자력은 시편의 자화를 0으로 감소시키기 위해서 필요한 임계 자기장의 세기로 강자성체를 연·경 자성체로 구분하는 기준이 된다. 개방자기회로에서 자성재료의 보자력을 간단히 측정할 수 있는 시스템을 구성하고, 데이터지향언어인 LabVIEW를 사용하여 자기장 제어와 데이터 수집이 가능하도록 하였다. 구성된 보자력 측정 장치의 측정범위는 수십 A/m에서 수십 kA/m이고, 보자력이 14.63 kA/m일 때 합성표준불확도는  $\pm 0.22$  kA/m이다.

### I. 서 론

보자력은 자성체 입자의 크기, 자구의 pinning, 점결함(point defect) 및 내부응력 등과 관련되는데, 자성체의 입자 크기가 감소하면, 자구 수가 증가하고, 개개 자구의 누설 자속이 증가하므로 보자력이 증가한다[1]. 보자력은 경자성 재료와 연자성 재료를 구분하는 기준이 되는 측정량으로 1,000 A/m 이하이면 연자성 재료, 1,000 A/m 보다 크면 경자성 재료로 IEC 규격에서는 규정하고 있다[2].

보자력을 측정하면 첫째, 전기기계, 자동차, 컴퓨터 및 정밀시계 등에 사용되는 부품 재료의 자성을 정밀검사할 수 있고, 둘째, 열처리, 가공과 같이 고투자율 재료로 구성된 부품의 여러 생산단계에서의 자성을 모니터링할 수 있으며, 셋째, 소결과정 후 경자성 재료의 구조를 모니터링할 수 있다[3].

또한 탄화물 금속의 구조적 특성을 규명할 수 있다. 텅스텐 초경합금에서 탄화물의 결정립 크기가 작아지거나, 탄화물 사이의 코발트 층(cobalt layer)이 얇아지면, 보자력은 증가한다. binder phase에 텅스텐이 많이 용해되면 보자력은 증가하고, 소결과정 등에 의해 역학적인 스트레스가 인가되면 보자력은 증가한다.

보자력은 탄화물 합금의 마모 저항(abrasion resistance)과 정도에 직접적으로 관련된다.

탄화물금속은 산업체의 거의 모든 분야에서 마모(wear)에 관련된 부품이나 연장으로 사용되고 있으며, 보자력

$H_c$ 와 중량비 포화자화(weight-specific saturation magnetization)  $\sigma_s$ 는 소결탄화물금속(sintered carbide metal)의 생산에 가장 중요한 품질특성(quality characteristics)이 되고 있다.

탄화물 금속을 생산하는 목적은 바인더 상(binder phase)으로 최적의 성분과 기하학적 배열을 재현성있게 생산할 수 있기 때문이다. 카바이드 금속에서 보자력을 측정하면, 첫째 카바이드의 grain 크기, 둘째 코발트 양의 분포, 셋째 바인더 상에 있는 용해된 텅스텐 카바이드의 양, 넷째 파우더를 grinding하거나 소결 과정에서 유입된 응력(stress)의 정도를 유추할 수 있다. 그리고 미세구조 해석(micro-structural analysis)을 기본으로 하여 바인더 상을 평가하는 것은 대단히 복잡하고, 평가 과정에 시험시편을 파괴해야하는 단점이 있으나 보자력  $H_c$ 와 중량 비 포화자화  $\sigma_s$ 를 측정하면 간단하고 신속하게 그리고 비파괴적으로 바인더 상을 평가할 수 있다[4].

보자력 측정은 폐자기회로인 시편에 대해 자기이력곡선계(hysteresis loop tracer)로 할 수 있으나, 대단히 고가이므로 중소기업체에서 구입하기에는 무리가 따른다. 따라서 IEC에서는 개방자기회로에서 보자력을 간단히 측정할 수 있는 규격을 제정하였다[5].

본 논문에서는 개방자기회로에서 강자성 재료의 보자력을 자동으로 측정할 수 있는 시스템을 개발한 후, 초경합금 시편에 대해 개발한 장비와 자기이력곡선계로 측정된 보자력값을 비교하였다.

## II. 보자력 측정원리

보자력  $H_c$ 는 포화된 자성체 시편의 자기분극(magnetic polarization)을 0까지 감소시키는데 필요한 자기장의 세기로 자기반전(magnetic reversal)에 저항하는 자기장의 양을 나타낸다. 균일한 자기장 내에 자성체 시편을 놓았을 때, 자성체로부터 자속이 나오든지 들어가게 되어 주위 자기장이 교란되는데 시편이 탈자되어 시편의 자기분극이 0이 되면, 주위 자기장이 교란되지 않는다. 이와 같은 조건을 코일로 제작된 자속감지기 (magnetic flux detector)를 사용해 균일한 자기장의 교란이 일어나지 않는 순간을 탐지하여 보자력을 결정 할 수 있도록 한다[5].

이 측정을 위해 시편을 솔레노이드의 중심에 개방회로 상태로 놓는다. 자기장 감지기의 위치는 Fig. 1과 같이 시편의 끝 근처에 위치시키는 방법을 사용한다.

우선 포화가 되게 시편을 착자시킨 후, 솔레노이드의 자기장을 변화시키면서 진동하는 시편에 의한 자기장 교란이 일어나지 않을 때까지 탈자를 시킨다. 이때 시험시편의 자기분극에 의해 탐지코일에 유도되는 교류전압이 0이 되는 점을 감지한다. 필요한 인가 자기장의 세기를 측정하면 시편의 보자력이 된다.

시험 시편은 긴 형상이 되게 하여, 형상효과가 보자력 측정에 심각한 영향을 미치지 않도록 자기탈자인자(self-demagnetizing factor)를 작게 한 후, 그 장축이 솔레노이드의 축과 일치되게 위치시킨다. 예를 들어, 실린더 형 시편인 경우, 길이 대 직경의 비가 5:1보다 큰 형상이 좋고 [5], 보다 정확하게 보자력을 측정하기 위해 반자장 계수를 보정할 필요가 있다. 시험을 하기 전에 시편을 착자시켜야 하는데, 시편의 종류에 따라 다르다. 보자력이 비교적 작은 연자성체인 경우, 솔레노이드 내부에서 자체적으로 착자가 가능하지만, 강자성체인 경우는 영구자석, 전자

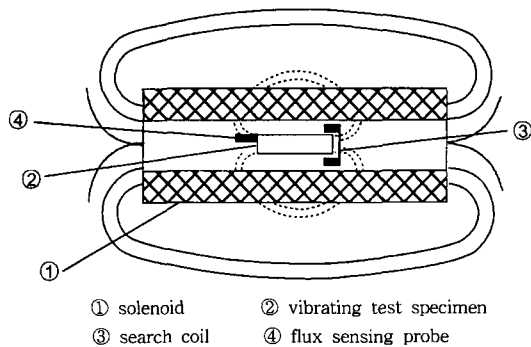


Fig. 1. Vibrating sample method for coercimeter.

석, 펄스자석 등과 같이 별도의 장치로 착자시켜야 한다. 이때 낮은 보자력과 높은 전기전도도를 갖는 자성체에 대해서는, 자화력을 멈추지 않고 서서히 증가시켜야 한다[5].

자기장의 세기를 50% 증가시켰을 때 1% 미만으로 보자력이 증가될 때, 포화는 이루어진다고 간주한다. 그리고 포화 자화시키기 위한 자기장의 인가시간은 재료 내부를 완전히 투과할 수 있도록 충분히 길어야 한다. 이 시간은 재료의 투자율, 전기전도도, 두께에 따라 다르며 보통 2초에서 20초 사이이다[5].

## III. 측정장치 구성

### 3.1. 보자력 측정 장치 구성

본 실험에서 구성한 보자력 측정장치의 개략도와 사진이 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 주어져있다. 16-bit의 분해능을

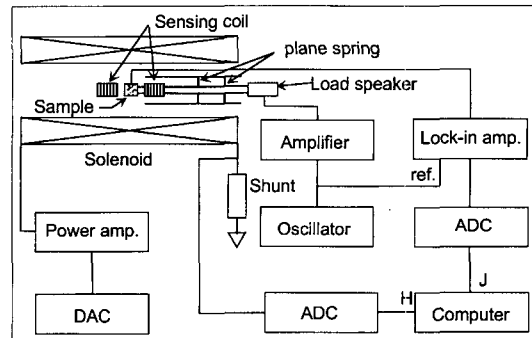


Fig. 2. Block diagram of the constructed coercimeter.

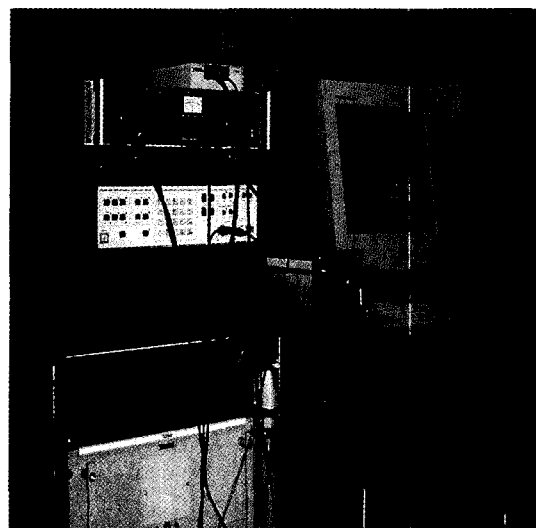


Fig. 3. Photograph of the constructed coercimeter.

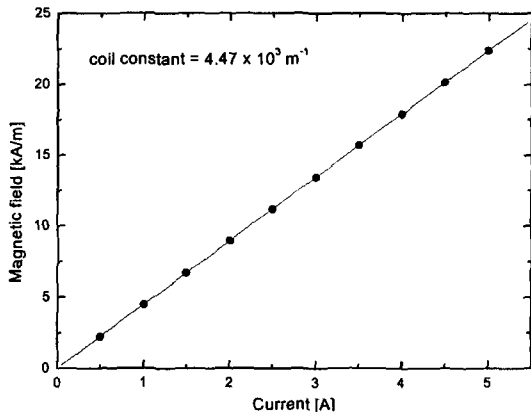


Fig. 4. Coil constant of the fabricated solenoid.

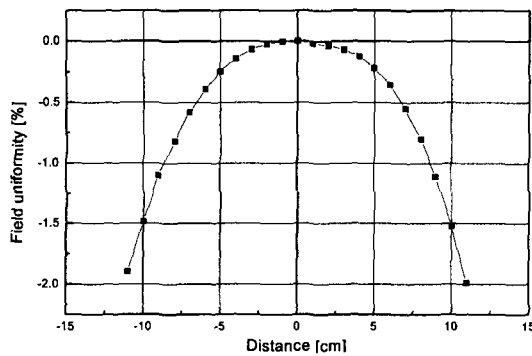


Fig. 5. Field uniformity of the fabricated solenoid.

갖는 multifunction I/O board(NI PCI-MIO-16XE-10)의 아날로그 출력을 사용하여 주파수가 0.005 Hz인 삼각파형을 생성시켜 전력증폭기(Techron 7562)로 전력증폭한 후, 솔레노이드에 전류를 흘림으로써 시편에 자기장이 인가되게 하였다. 자기장의 세기는 솔레노이드에 연결된 센트(1.094 Ω) 양단의 전압을 DAQ board의 1번 입력단으로 측정하였다. 파형발생기(hp 3325)에서 발생한 80 Hz의 파형을 전력증폭기(Techron 7562)로 증폭하여 스피커(50 W, 8 Ω)에 인가함으로써 시편을 진동시켰고, 자기모멘트는 탐지코일에 연결된 록-인 증폭기(EG&G PAR 5210)에서 R-θ 모드로 측정된 전압을 DAQ board의 2번 입력단자로 측정하였다. 이 때 록-인 증폭기의 기준신호는 파형발생기에서 발생한 신호를 사용하였다.

솔레노이드는 길이 500 mm의 PVC원통에 사각코일(1 mm×3 mm)을 2,500회 감아 제작하였다. 코일 상수는 Fig. 4와 같이 4,472 m<sup>-1</sup>이며 최대 150 kA/m의 자기장

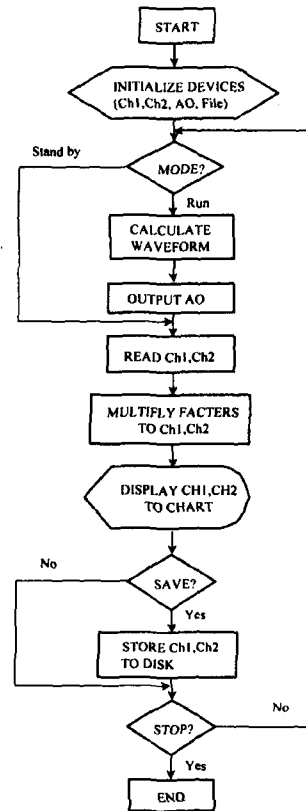


Fig. 6. Flow chart for measuring coercive field strength.

을 생성할 수 있다. 솔레노이드 내의 자기장은 시편의 체적영역에서 ±0.5% 이내의 균일도를 가져야 한다[5]. 본 실험에 사용된 솔레노이드의 경우 Fig. 5와 같이 ±0.5% 이내의 균일도를 갖는 영역은 중심에서 측방향으로 ±60 mm에 해당한다.

### 3.2. 측정 소프트웨어 개발

보자력을 효율적으로 측정하고 운영하기 위하여 Fig. 6과 같은 흐름도에 의해 자기장 제어와 데이터 acquisition 프로그램을 데이터지향언어인 LabVIEW를 사용하여 개발하였다. 주된 기능은 analog input(AI)과 analog output(AO) 채널의 환경을 설정하며, AI 채널에서 읽어들이는 전압을 chart로써 실시간으로 표시하고, Save 버튼을 사용하여 측정된 데이터를 ASCII 방식으로 디스크에 저장한다. 그리고 AO 채널에 출력되는 삼각파형의 전압을 생성시키며, 최대 진폭과 주파수를 설정하고, 전압의 극성과 크기 등을 모니터한다.

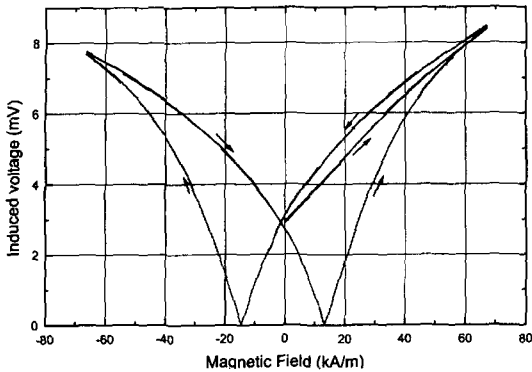


Fig. 7. Hysteresis loop of magnetic moment measured by the constructed coercimeter.

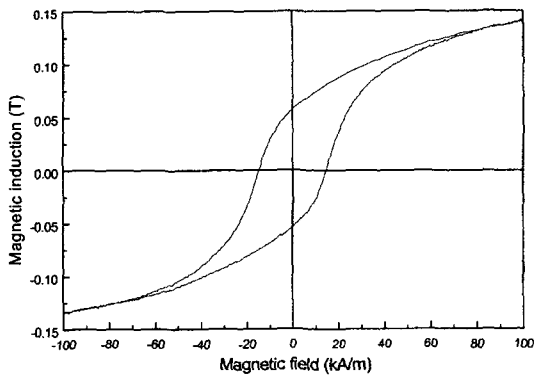


Fig. 8. J-H hysteresis loop measured by the hysteresisgraph system.

IV. 측정결과 및 고찰

보자력 측정을 위한 시편의 크기는 가로, 세로가 10.8 mm이고, 길이가 20.6 mm인 초경합금이다. 최대 73 kA/m의 자기장을 인가하여 측정된 자기모멘트의 히스테리시스가 Fig. 7에 주어져있다. 이 때 전류의 세기는 16.3 A이다. 자기모멘트가 0이 될 때, 자기장의 세기가 자기분극보자력인데, 이렇게 결정한 자기분극보자력의 크기는 14.63 kA/m이고, 합성표준불확도는  $\pm 0.22$  kA/m이며, Fig. 8과 같이 자기이력곡선계(Magnet-Physik Remagraph C-500)에서 구한 값 14.64 kA/m와 잘 일치한다.

일반적으로보자력은 시편의 방향을 180° 회전시키거나 슬레노이드에 흐르는 전류의 극성을 바꾸어서 측정할 두

값의 평균값을 취한다. 하지만 재료의보자력이 500 A/m 이상일 때는 오차가 적어서 자기장의 두 방향 모두에 대하여 측정할 필요가 없다[5].

앞의 순서대로 측정이 수행되었을 때 재료가 균일한 자기분극을 가지는 경우, 일반적으로 기대되는보자력 측정의 재현성은보자력이 40 A/m보다 적을 경우  $\pm 5\%$ ,보자력이 40 A/m 보다 클 경우에는  $\pm 2\%$ 이하이다[5]. 그러나 이 재현성은 시험 시편의 균일하지 않은 특성이나 형태에 따라 영향을 받을 수 있으므로 주의가 요망된다.

측정 장비들은 강한 자기장과 다량의 자성 재료가 없는 곳에 설치하여야 하고 주위의 자기장은 0.5 A/m 이하가 되도록 상쇄시키거나 차폐시켜야 한다. 그리고 시험 시편을 준비하는 과정이나 준비한 후에 내부 응력이 유입되지 않도록 주의해야한다. 그리고 자화과정과 탈자과정 동안에 시편의 온도가 상승되지 않도록 주의해야 한다.

IV. 결 론

개방자기회로에서 수십 A/m에서 수십 kA/m 범위의 크기를 가지는 강자성체의보자력을 측정할 수 있는 장치를 제작하고, 데이터지향언어인 LabVIEW를 사용하여 자기장 제어와 데이터 수집이 가능하도록 하였다. 초경합금 시편에 대해 개발한 장비의 경우 합성표준불확도보자력이 40 A/m 이하인 경우  $\pm 1.5\%$ 이고,보자력이 40 A/m 이상인 경우  $\pm 2.5\%$ 인데, 자기이력곡선계로 측정된 자기이력곡선에서 구한보자력을 비교한 결과 잘 일치하였다.

참고문헌

- [1] J. K. Yi, B. W. Lee and H. C. Kim, JMMM, **130**, 81 (1994).
- [2] IEC Standard Publication 404-1, Magnetic Materials, (1979).
- [3] Catalog of KOERZIMAT® CS 1.096, INSTITUT DR. FÖRSTER (1995).
- [4] K. Ausl nder, New Measurement Technique allows New Applications in the Carbide Metal Industry, Manual of INSTITUT DR. FÖRSTER.
- [5] IEC Standard Publication 404-7, Method of Measurement of the Coercivity of Magnetic Materials in an Open Magnetic Circuit (1982).

## **Development of Coercivity Measuring System for Ferromagnetic Materials in Open Magnetic Circuit**

**K. S. Ryu**

*Div. of Electromagnetic Metrology, KRISS, Taejon 305-600, Korea*

**J. S. Park**

*Manufacturing Technology Team, Samsung Electronics, Kyunggi-Do, 449-711, Korea*

(Received 6 October 2000, in final form 17 November 2000)

Coercivity is defined as the magnetic field strength required to reduce the magnetic polarization to zero of magnetic specimen which has been previously magnetized to saturation. This quantity is a reference for classifying soft and hard magnetic materials. We have constructed the measuring system for measurement of coercivity of ferromagnetic materials in open magnetic circuit. The measurement range of the constructed system is from tens A/m to tens kA/m, the combined uncertainty is  $\pm 0.22$  kA/m as coercivity is 14.63 kA/m.