

## Flux-gate 센서용 비정질 코아의 열처리효과

김용준 · 손대락

한남대학교 물리학과, 대전광역시 대덕구 오정동 133, 300-791

손동환

국방과학연구소, 경남 진해시 진해우체국 사서함 18호, 645-600

(2001년 5월 23일 받음, 2001년 6월 5일 최종수정본 받음)

Flux-gate마그네토미터는 1930년대에 개발되어 오늘날까지 저자장측정장치로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 비정질 코아를 사용하여 분해능이 우수하고 소비 전력이 적으면서 장기적 신뢰성이 우수한 flux-gate마그네토미터를 개발하기 위하여, 교류자기 특성이 우수한 Allied Chem.사의 2714A의 열처리에 의한 센서코아의 자기적 특성변화를 측정하였다. As quenched상태로 사용한 센서코아는 센서의 noise정도가 높고 시간과 온도에 따라서 교류자기특성이 변화하였으나, 350 °C에서 1시간 열처리한 시편의 경우, 센서의 noise 정도는 as quenched 상태보다 10배 정도 향상되었으며, 주파수 DC~10 Hz 범위에서 0.1 nT 정도의 noise를 보였다. 자기적특성 또한 매우 안정적인 특성을 보였으며, 시간이 경과함에 따라 최대자화력, 각형비, 보자력등이 지수함수적으로 포화치에 접근하는 경향을 보였다. 따라서 센서 설계시 이들 특성의 변화를 고려할 경우 장기적으로 매우 안정된 flux-gate마그네토미터의 개발이 가능함을 알 수 있었다.

### I. 서 론

Fluxgate 마그네토미터는 1930년대에 개발되어[1, 2], 이차세계대전을 전후로 저자장측정으로 많이 응용되었다. 1960년대 후반부터는 인공위성의 자세제어, 달의 자기장 측정 및 우주공간의 자장측정 등에 널리 활용되고 있으며, 그 외에도 지자원탐사등과 같이 그 용도가 다양하게 응용되고 있다. 저자장 측정기술은 flux-gate 마그네토미터 외에도 많은 원리가 개발되어 활용되고 있지만[3], flux-gate 마그네토미터가 소형으로 전력소모가 비교적 적으면서 장기적 신뢰성이 우수하여 아직도 많이 활용되고 있는 저자장측정기술이다. 또한 1980년대부터 비정질코아를 flux-gate 마그네토미터에 도입함으로써 센서의 전력소비를 줄이고 있다. 비정질코아를 flux-gate 마그네토미터에 사용할 경우 센서의 noise 감소 및 자기적 특성의 안정성을 위한 코아의 열처리가 가장 중요한 기술이다. 따라서 본 연구에서는 flux-gate 마그네토미터의 코아를 비정질리본을 사용할 경우의 열처리에 의한 센서코아의 noise 특성 및 장기적 신뢰성에 대하여 연구를 하였다.

### II. 실험장치구성

Flux-gate센서를 설계·제작할 경우 센서의 분해능을 향상시키기 위해서는 센서코아의 noise를 줄여야 한다. 이

를 위해서는 센서코아의 단면적이 증가하여 코아에 의한 자기적 noise 즉 Barkhausen noise는 감소시킬 수 있으나 코아를 자화시키기 위한 전력소비는 증가하게 된다. 또 다른 방법으로는 자화주파수를 증가시키는 방법으로 자화주파수를 증가시키고 측정하고자하는 피측정 자기장의 저주파 주파수대역의 신호를 필터를 사용할 경우 측정주파수대역의 noise를 감소시킬 수 있다. 비정질리본을 fluxgate 센서코아로 사용하는 이유가 후자의 방법으로 비정질리본의 경우 자화주파수를 수 100 kHz까지 높일 수 있다. 그러나 자화주파수가 높을 경우 코아를 자화시키는 데 필요한 에너지의 증가와 주파수가 높은 영역에서의 아날로그 증폭기 등의 전력소비가 증가하기 때문에 대부분 자화주파수를 수 10 kHz 영역에서 많이 사용하고 있다. 본 연구에서는 Co-계 비정질코아로 많이 사용되고 있는 Allied Chem.사의 2714A를 코아재료로 선택하여 열처리 조건에 따른 코아의 자기적 특성을 조사하였다.

시편의 열처리를 위한 전기로는 시편의 온도를 500 °C까지 자동으로 조절할 수 있게하였으며, 열처리장치 외부에 솔레노이드를 이용하여 종방향의 자장하에서도 열처리를 할 수 있게 하였다. 열처리에 의한 자기적특성의 변화는 일반적으로 DC자기이력곡선을 사용하여 측정을 하여 비교하나, 본 연구의 경우 열처리가 flux-gate센서코아의 목적으로 한정되어 있기 때문에, 리본상태에서 100 kHz까지 측정가능한 single strip형 교류자기이력곡선 측정장

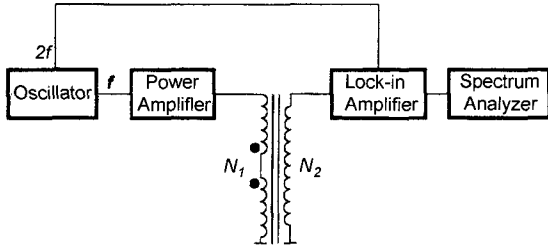


Fig. 1. Schematic diagram for the measurement of noise spectrum of the flux-gate sensors.

치[4]를 사용하여 실제 센서코아의 자화주파수영역인 25 kHz에서 측정하였다. 열처리에 의한 센서코아의 noise변화를 측정하기 위해서는 flux-gate 센서를 직접 제작하여 측정하였다. 센서코아는 폭 3 mm의 비정질리본을 10회 권취하고 일차코일을 직경이 0.2 mm인 에나멜동선을 346회 권선하였으며, 감지코일은 직경이 0.1 mm인 에나멜동선을 1123회 권선하였다. 또한 fluxgate 센서의 noise spectrum을 측정하는 방법은 Fig. 1과 같이 flux-gate 마그네토미터의 원리대로 감지코일에서 유도되는 기전력의 2f 주파수성분을 Lock-in 증폭기를 사용하여 측정한후 FFT spectrum analyzer를 사용하여 측정하였다.

### III. 측정결과 및 토의

Fig. 2는 비정질리본 2714A의 열처리 온도를 250 °C에서부터 500 °C까지 50 °C 간격으로 1시간 열처리한 시편을 자화주파수 25 kHz에서 측정한 결과이다. Fig. 2-(a)는 자기장이 없는 경우에, Fig. 2-(b)는 종방향의 자기장을  $1 \times 10^{-2}$  T로 인가한 상태에서 열처리한 후에 교류자기이력곡선을 측정한 결과이다. 자장중 열처리의 경우 자장이 없는 경우에 비하여 교류자기이력곡선의 각형비는 우수하여지나 보자력은 커지는데, 이는 자장중 열처리효과에 의하여 자구가 커지는데 기인한 것으로 생각된다. 따라서 flux-gate센서코아로서 비정질리본(2714A)의 경우는 자장이 없는 상태에서 열처리 하는 것이 더 효과적이었으며 열처리 온도는 350~400 °C 정도가 최적임을 알 수 있었다.

열처리에 의한 센서코아의 noise를 비교하기 위하여 폭 3 mm, 길이 95 mm인 비정질리본을 as quenched상태와 350 °C에서 1시간 열처리 후 10회 권취하여 코아를 만들어 flux-gate 센서의 noise spectrum을 측정한 결과가 Fig. 3이다. Fig. 3-(a)는 as quenched 상태의 코아에 의한 noise spectrum으로 noise level이 1.0 nT 이지만 350 °C

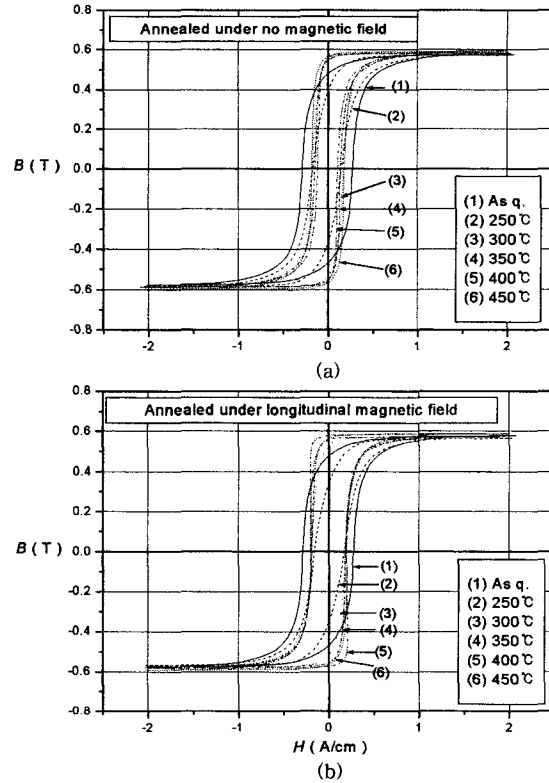


Fig. 2. Ac hysteresis loop of annealed amorphous ribbon (2714A) at 25 kHz magnetizing frequency; (a) annealed under no magnetic field, (b) annealed under longitudinal field of  $1 \times 10^{-2}$  T.

로 열처리한 코아의 경우 0.1 nT이하로 열처리에 의하여 센서 noise가 10배 정도 감소함을 알 수 있었다.

장기적인 신뢰성이 요구되는 flux-gate 마그네토미터의 개발을 위해서는 사용할 센서코아의 장기적 안정성에 대하여 조사를 하여야 된다. 특히 비정질 자성재료를 센서코아로 사용할 경우는 결정질 자성재료를 센서코아로 사용할 경우와 다르게 센서의 장기적 안정성에 대하여 조사를 하여 사용하여야 한다. 비정질 코아의 경우 장기적 신뢰성을 위하여 1970년대에 많은 조사가 이루어졌으며, 주로 구조적 안정성에 관하여 많은 연구가 수행되어 왔다[5, 6]. 그러나 본 연구에서와 같이 flux-gate센서코아로서의 안정성 실험에 대한 구체적인 연구보고가 없어서 센서코아로 사용할 2714A 비정질 리본에 대한 가속수명시험을 통하여 코아의 자기적 특성의 장기적인 안정성에 관한 시험을 수행하였다. 대부분의 센서특성은 온도와 시간의 함수로 변화하게 되며, Arrhenius형의 가속수명 모델의 경우[7], 온도 T에만 의존하는 열화율(degradation rate)의 함수

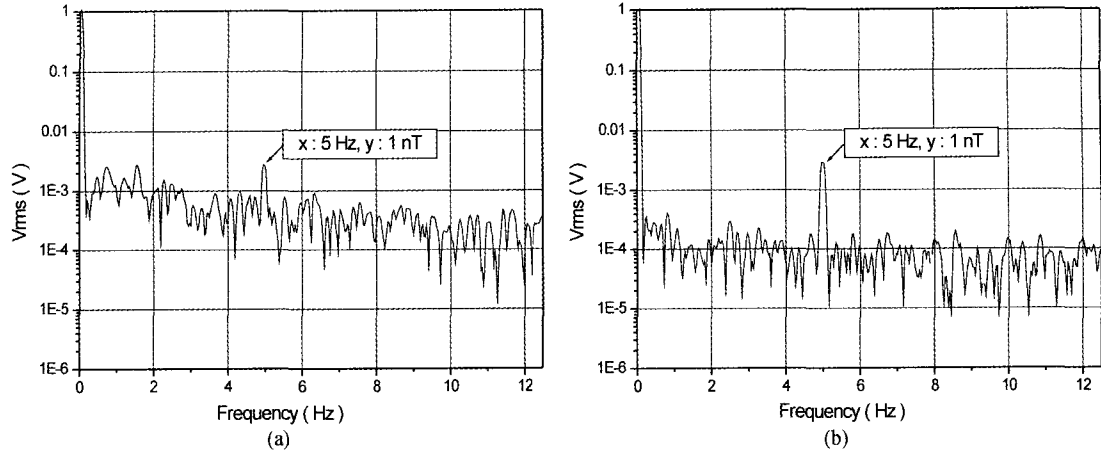


Fig. 3. Noise spectrums of the flux-gate sensors; (a) using as quenched state ribbon, (b) using ribbon annealed at 350 °C during 1 hours.

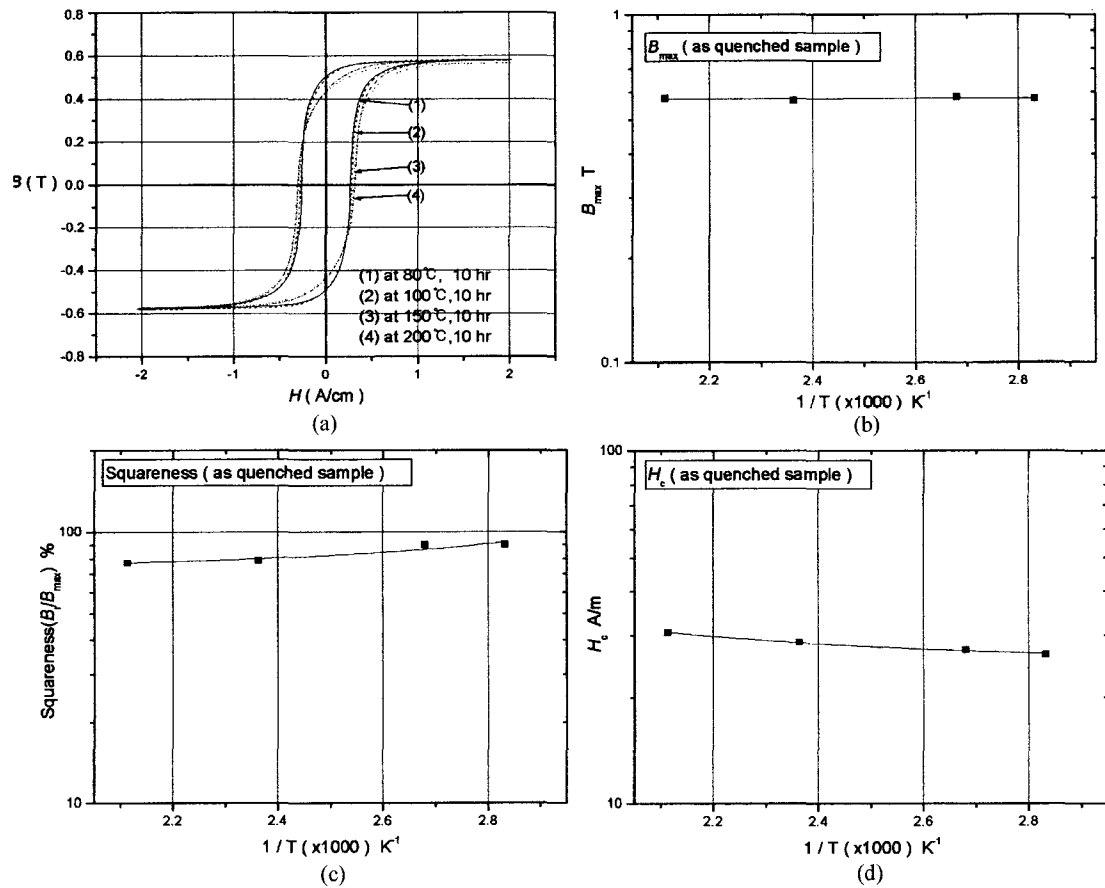
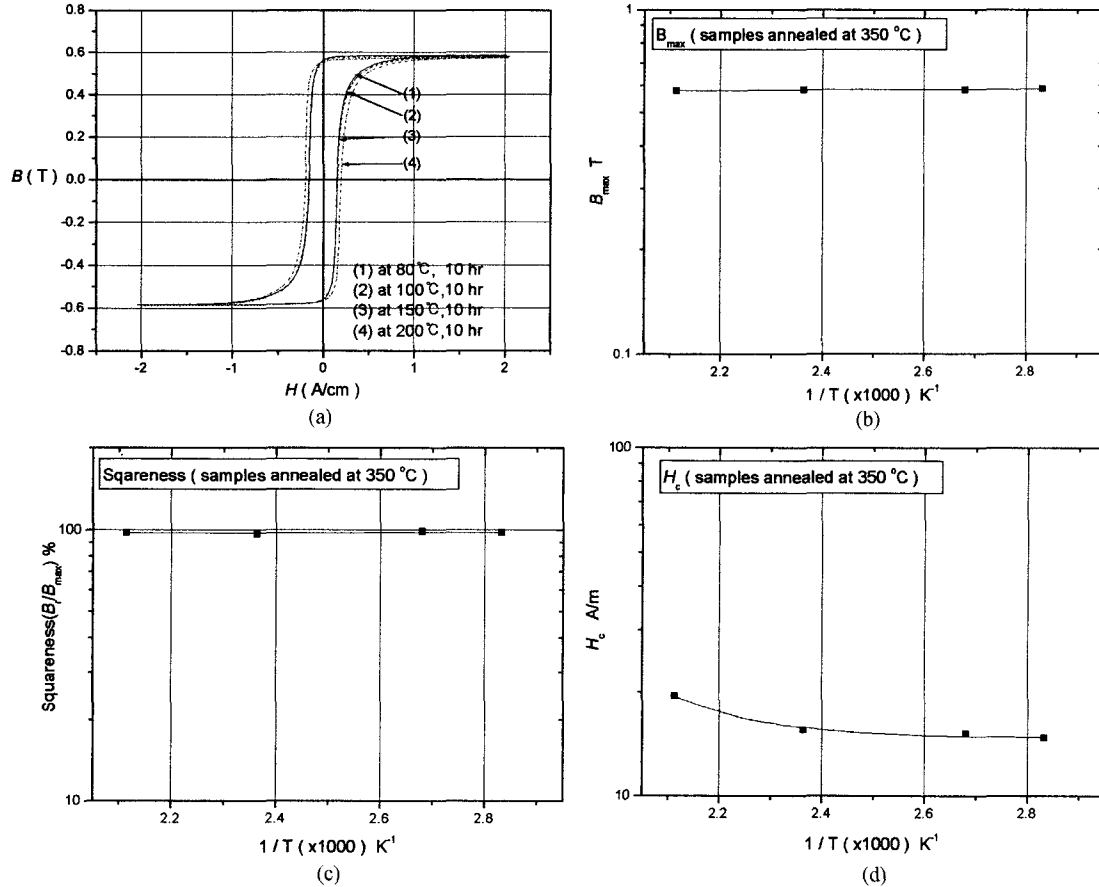


Fig. 4. Ac magnetic properties change of as quenched amorphous ribbon under accelerated aging test of different temperature; (a) ac hysteresis loops at the magnetizing frequency of 25 kHz, (b) maximum magnetic induction, (c) squareness, (d) coercivity depending on the temperature.



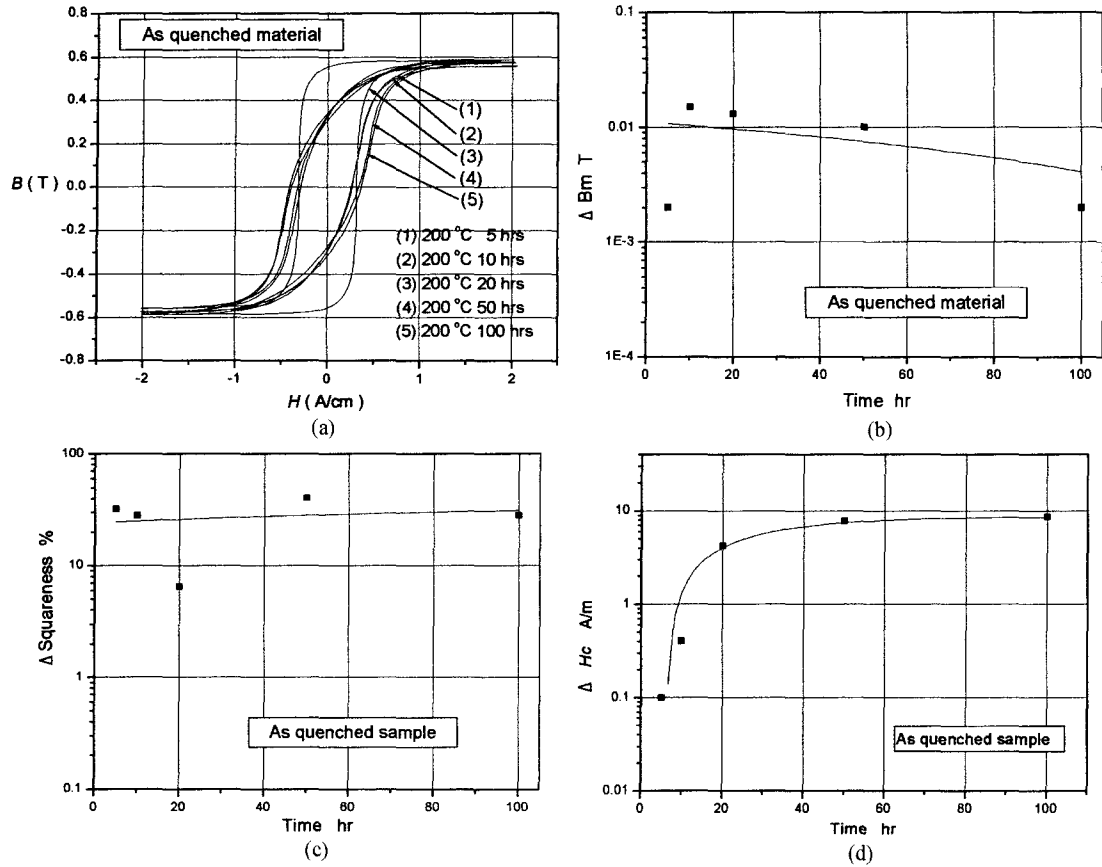
**Fig. 5.** Ac magnetic properties change of amorphous ribbon annealed at 350 °C during 1 hours under accelerated aging test of different temperature; (a) ac hysteresis loops at the magnetizing frequency of 25 kHz, (b) maximum magnetic induction, (c) squareness, (d) coercivity depending on the temperature.

$\lambda(T)$ 를  $\lambda(T)=e^{\frac{a-b}{kT}}$ 로 표시할 수 있고 고장 비율(failure rate)을 이 열화율의 함수로 표시할 수 있다.

Fig. 4의 경우 as quenched 시편을 시간을 10시간으로 고정하고 온도를 80 °C, 100 °C, 150 °C 및 200 °C에서 수명가속시험을 한 결과이다. Fig. 4(a)는 온도가 증가함에 따라 자화주파수 25 kHz에서의 자기 이력 곡선의 형태의 변화를 보여주고 있으며, 교류 자기 이력 곡선의 주요 물리 변수인 최대자기유도  $B_{max}$ , 각형비  $B_r/B_{max}$  및 보자력  $H_c$ 를 온도의 역수  $1/T$ 에 대하여 그린 그림이 Fig. 4(b), Fig. 4(c) 및 Fig. 4(d)이다. 최대자기유도는 측정 오차 범위내에서 변화를 관측하기 어려웠지만 각형비는 온도가 증가함에 따라 감소하였다. 보자력은 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 점선은 최소자승법으로 곡선을 그린 것으로 온도가 증가함에 따라 지수

함수적으로 증가하였다. Fig. 5는 350 °C로 1시간 열처리한 시편을 Fig. 4의 경우와 같이 가속시험을 한 결과로 열처리를 한 시편의 경우 최대자속밀도 및 각형비가 온도에 무관함을 볼 수 있는데, 이는 열처리에 의하여 준안정적인 부분결정화단계로 구조적으로 안정되었음을 보여준다. 그러나 보자력의 경우 열처리에 의하여 그 값은 감소하였으나 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 4와 Fig. 5에서 보면 비정질리본을 350 °C에서 1시간 정도 열처리를 하면 구조적으로 매우 안정적이면서 내구성이 우수한 센서코아로써 사용가능함을 알 수가 있다.

한편 일정한 온도에서 열화시간에 따른 특성의 변화를 측정한 결과가 Fig. 6과 Fig. 7이다. Fig. 6은 as quenched 상태의 시편에 대하여 Fig. 7은 350 °C로 1시간 열처리한



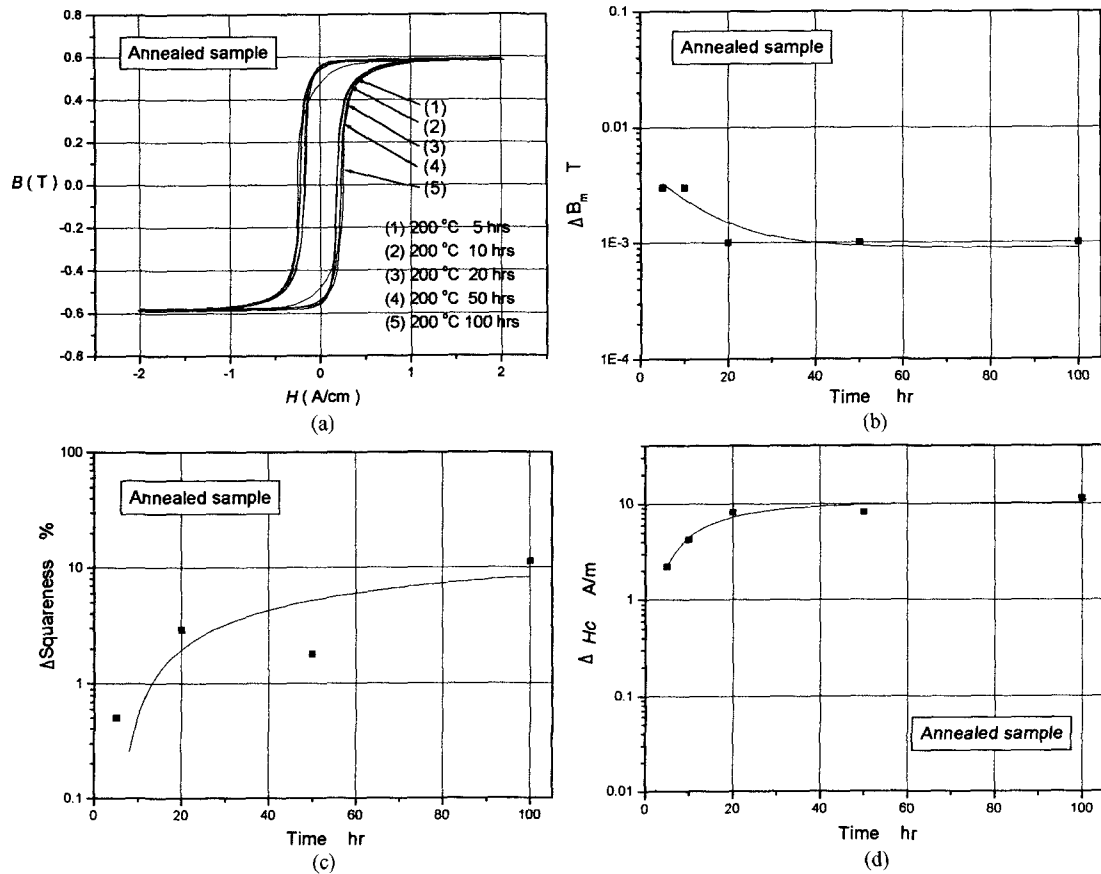
**Fig. 6.** Ac magnetic properties change of as quenched amorphous ribbon under accelerated aging test of different aging time; (a) ac hysteresis loops at the magnetizing frequency of 25 kHz, (b) maximum magnetic induction, (c) squareness, (d) coercivity depending on the aging time.

시편에 대하여 시편의 온도를 200 °C로 유지하면서 5 시간에서부터 100 시간 동안 열화를 시키면서 측정한 결과이다. 우선 자기이력곡선을 보면 as quenched 시편의 경우(Fig. 6-(a)) 시간이 경과함에 따라 자기이력 곡선의 변화가 크며 200 °C 20시간의 근처에서 열처리에 의한 효과와 같은 현상으로 각형비가 우수한 시편의 상태가 되다가 다시 자기이력곡선의 각형비가 낮은 자기이력곡선의 형태로 되는 경향을 나타내었다. 그러나 350 °C에서 1시간 열처리를 한 시편의 경우 자기이력곡선(Fig. 7-(a))이 매우 안정적인 형태를 나타내고 있으며 시간에 따른 최대 자속밀도의 변화, 각형비의 변화 및 보자력의 변화가 as quenched 시편의 경우(Fig. 6-(a))보다 훨씬 더 안정적이며, 시간에 따라 지수함수적으로 포화치에 접근하는 경향을 보였다. 따라서 flux-gate센서코아로 350 °C에서 1시간 열처리를 한 시편을 사용할 경우, 자기적특성의 변화를 센

서설계시 고려하여야 하며, 이 경우 장기적으로 매우 안정된 코아의 특성을 유지하는 flux-gate센서를 제작할 수 있음을 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 분해능이 우수하고 소비 전력이 적으면서 장기적 신뢰성이 우수한 flux-gate마그네토미터를 개발하기 위하여 교류자기 특성이 우수한 Allied Chem.사의 2714A를 열처리 하여 센서코아의 특성 변화를 측정하였다. Co-비정질리본의 경우 as quenched 상태에서는 센서의 noise정도가 높고 시간과 온도 변화에 따른 교류 자기 특성이 변화하였으나 350 °C에서 1시간 열처리한 시편의 경우, 센서의 noise 정도는 as quenched 상태보다 10배 정도 향상되었으며, 주파수 DC~10 Hz 범위에서 0.1 nT



**Fig. 7.** Ac magnetic properties change of amorphous ribbon annealed at 350 °C during 1 hours under accelerated aging test of different aging time; (a) ac hysteresis loops at the magnetizing frequency of 25 kHz, (b) maximum magnetic induction, (c) squareness, (d) coercivity depending on the aging time.

정도의 noise 를 보였다. 자기적특성 또한 매우 안정적인 특성을 보이고 있었으며 시간이 경과함에 따라 최대자화력, 각형비, 보자력등이 지수함수적으로 포화치에 접근하는 경향을 보였으며, 센서 설계시 이를 고려할 경우 장기적으로 매우 안정된 센서 코어로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 연구는 국방과학연구소의 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Aschenbrenner, Hoch frequenztechn. U. Electroak., 44, 2(1934).
- [2] F. Forster, Z. Metallkde, **46**, 358(1955).
- [3] D. I. Gordon, IEEE Trans. on Mag, **8**, 8(1972).
- [4] 손대락 외, “제측소자용 고자왜 비정질합금의 제작 및 자기적 특성연구,” 한국표준과학연구원 KSRI-91-87-IR, (1991).
- [5] H. Fujimori, Rapidly Quenched Metals, Elsevier Science Publisher (1985), p. 1101.
- [6] R. C. O'Handly, J. of Appl. Phys., **62**, R15(1987).
- [7] W. Goepel *et al.*, Sensors Vol. 1 VCH (1989), p. 37.

## Annealing Effects of Amorphous Cores for the Application of Flux-gate Sensors

**Yong-Jun Kim and Derac Son**

*Department of Physics, Hannam University, Taejon 300-791, Korea*

**Dong-Hwan Son**

*Agency for Defense Development, P.O.Box 18, Chinhae 645-600, Korea*

(Received 23 May, 2001, in final form 5 June, 2001)

Flux-gate magnetometer was developed in 1930's, and it has been widely used for the low magnetic field measurements. In this work, we have employed amorphous ribbon 2714A produced by Allied Chem. Co. as sensor core material. To develop low noise, low power consumption, and high reliability flux-gate magnetometer, we have measured ac magnetic properties depending on the annealing conditions. As quenched state amorphous core shows high noise level and ac magnetic properties were changed under the condition of accelerated aging test, but amorphous ribbon, which was annealed under 350 °C during 1 hour, shows low noise level of 0.1 nT in the frequency range of dc~10 Hz which was 10 times better than the as quenched amorphous ribbon. Under accelerated aging test, ac magnetic properties such as squareness and coercivity of the annealed samples show higher reliability and approached to a certain limiting value as exponential function. We can see that high reliability and low noise flux-gate magnetometer could be developed, if we consider this ac magnetic properties change in the sensor design.