

## Fe-B-Al 계 비정질합금의 자왜 및 자기탄성효과

조용수·김윤배·김창석

한국표준과학연구원

김택기

충남대학교 공과대학 금속공학과

(1993년 5월 14일 받음, 1993년 6월 17일 최종수정본 받음)

Fe-B계 비정질합금에 Al을 치환한  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  및  $Fe_{80}B_{20-x}Al_x$  급속응고합금의 포화자왜 및 인장응력에 의한 자기탄성효과가 조사되었다. 포화자왜는 Al 치환량이 증가 할수록 증가 하며, 비정질  $Fe_{82}B_{14}A_{14}$  합금에서 45 ppm으로 가장 높다. 비정질  $Fe_{82}B_{14}A_{14}$  합금의 인장응력에 따른 최대자속밀도의 변화율은 약  $0.026 T \cdot mm^2 / N$ 으로 고분해능 역학센서로 응용이 가능할 것으로 예상된다.

### I. 서 론

천이금속-준금속-비정질합금의 개발에 있어서 저자왜, 고투자율의 저손실재료에 관한 연구[1, 2]는 활발하나, 센서로의 응용에 있어서 중요한 고자왜 비정질합금의 개발에 관한 연구는 미약한 실정이다. 그러나 최근 비정질합금의 고자왜 및 우수한 탄성변형을 응용한 자기센서개발에 대한 연구가 활발히 진행되어 고포화자왜, 고자왜 및 고탄성 비정질합금의 개발이 요구되고 있다. 이는 천이금속-준금속계 비정질합금중 Fe-B계 합금은 고포화자왜 및 고자왜 특성을 나타내며, 특히, Metglas 2605( $Fe_{80}B_{20}$ )의 경우 자왜값이 30 ppm으로 자기탄성효과를 이용한 센서재료로 널리 응용되고 있다[3, 4]. 한편,  $\alpha$ -Fe에 Al의 첨가는 자왜를 증가시키는 것으로 보고되고 있다[5].

따라서 본 연구는 고포화자왜, 고자왜 Fe-B계 비정질합금의 자왜 및 자기탄성효과를 개선하기 위하여 Al을 치환한 Fe-Al-B계 비정질합금을 제조하여 포화자왜, 포화자왜 및 인장응력에 따른 교류자기이력곡선을 조사하였다.

### II. 실험방법

진공아크로를 이용하여 제조된  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  및  $Fe_{80}B_{20-x}Al_x$  ( $x=0, 2, 4, 6$ ) 모합금을 단롤법 급속응고장치를 이용하여 급속응고하였다. 급속응고시 룰의 표면속도

는 35 m/s로 일정하게 하였으며, 급속응고시료의 형상은 폭 약 1 mm, 두께 약 20  $\mu$ m의 균일한 리본이었다.

포화자왜는 시료진동형자력계(VSM, LDJ Model 9500)을 이용하여 측정하였으며, 포화자왜는 자체 제작한 소각자화회전법 자왜측정장치를 이용하여 측정하였다. 교류자기이력곡선은 single strip 교류자기이력곡선 측정장치를 이용하여 시료의 길이 방향으로 인장응력을 변화시키면서 측정하였다. 측정시 최대인가자장,  $H_m$ 은 500 A/m(6.25 Oe), 주파수는 50 kHz 였으며, 반자장을 제거하기 위하여 C-C type yoke로 채자회로를 구성하였다. 급속응고된 시료의 비정질상 형성여부는 X-선회절장치를 이용하여 조사하였다.

### III. 결과 및 고찰

Fe-B계 비정질합금의 포화자왜를 증가시키고 자기탄성효과를 높이기 위한 Al치환효과를 연구하기 위해서는 포화자왜를 감소시킬 것으로 예상되는 천이금속원소, Fe 보다는 B를 Al로 치환하는 것이 유리하다. 그러나 Fe-B계 비정질합금의 비정질형성능은 B의 치환량에 의해서 지배되어 B의 치환량이 12 at. %이하에서는 비정질상의 제작이 어렵다[6]. 따라서 본 연구에서는 비정질형성화 원소인 B의 함유량을 고려하여  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  및  $Fe_{80}B_{20-x}Al_x$  ( $0 \leq x \leq 6, \Delta x = 2 \text{ at. \%}$ ) 합금을 설계하여 급속응고하였다.

$Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  및  $Fe_{80}B_{20-x}Al_x$  급속응고합금의 X-선 회절 실험 결과,  $x=4$  이하에서는 비정질상으로 제조되나  $x=6$ 에서는 비정질 기지(amorphous matrix)에 소량의  $\alpha$ -Fe의 석출이 확인되었다. 이와같은 결과로부터 Fe-B계 비정질합금에 Al의 치환은 Si, P, C보다 비정질형성능을 감소시키는 것으로 판단되며, 이는 Al이  $\alpha$ -Fe의 안정화 원소이기 때문으로 사료된다. Fig. 1은 Al치환량에 따른  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  및  $Fe_{80}B_{20-x}Al_x$  급속응고합금의 포화자왜 및 포화자왜의 변화를 나타낸 것이다.

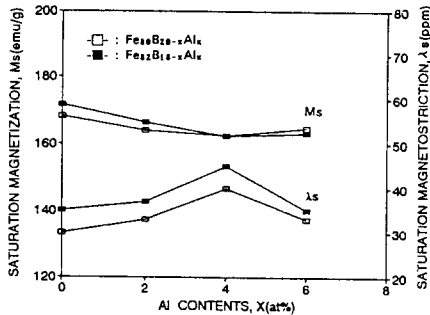


Fig. 1. Saturation magnetization and magnetostriction of  $Fe_{80}B_{20-x}Al_x$  and  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  alloys.

Fig. 1에서  $Fe_{80}B_{18-x}Al_x$  급속응고합금의 포화자왜는  $x=0$ 에서 35 ppm이나 Al치환량이 증가할 수록 증가하여  $x=4$ 에서 45 ppm으로 최대를 나타낸 후,  $\alpha$ -Fe이 석출하는  $x=6$ 에서 다시 감소한다. 또한 비정질  $Fe_{80}B_{20-x}Al_x$  급속응고합금의 포화자왜는  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  급속응고합금과 같은 경향이나 전체적으로 낮다. 이는 Fe함유량의 감소에 기인하는 것으로 사료된다. 이와같은 결과로부터 비정질  $Fe_{82}B_{14}Al_4$  합금의 자왜는 현재 고자왜 센서재료로 응용되고 있는 Metglas 2605( $\lambda_s=30$  ppm) 및 Metglas 2605CO( $\lambda_s=35$  ppm)에 비하여 각각 15 및 10 ppm 증가한다. 일반적으로 천이금속-준금속계 비정질합금의 포화자왜는 포화자왜에 지배된다[7]. 그러나 Fig. 1에서 비정질  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  합금의 포화자왜는 일정한 냉각속도에서 Al치환량이 증가할 수록 포화자왜가 감소함에도 증가한다. 이와같은 결과는 다음과 같이 고찰된다. 즉, 본 연구에서 Al의 치환량이 증가할 수록 비정질형성능이 감소하는 것으로 보아 Al치환이 비정질상내의 구조적, 성분적 불균일성을 증가시키며 이로 인한 부분자기이방성의 형성이 포화자왜의 증가를 유발하는 것으로 추측된다.

한편,  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  급속응고합금의 포화자왜는  $x=0$ 에서 171.6 emu/g로 Al함유량이 증가할 수록 완만히 감소하여  $x=4$ 에서 162.5 emu/g이고  $x=6$ 에서 약간 증가한 164.9 emu/g이다.  $x=6$ 에서 포화자왜의 증가는  $\alpha$

-Fe의 석출에 기인하는 것으로 사료된다.  $Fe_{80}B_{20-x}Al_x$  합금의 포화자왜도 같은 경향이나 Fe함유량의 감소에 의하여  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  합금 보다 낮은 포화자왜를 나타낸다.

비정질합금을 응력-자기 변환용 센서재료로 이용하기 위해서는 자왜특성 뿐만아니라 인장응력에 따른 교류자기이력곡선의 변화를 측정하는 것이 중요하다. Fig. 2 (a), (b)는 비정질  $Fe_{82}B_{18-x}Al_x$  합금중 포화자왜가 큰 비정질  $Fe_{82}B_{14}Al_4$  합금의 인장응력에 따른 자기이력곡선의 변화와 이로부터 구한 인장응력에 따른 최대자속밀도의 변화를 나타낸 것이다.

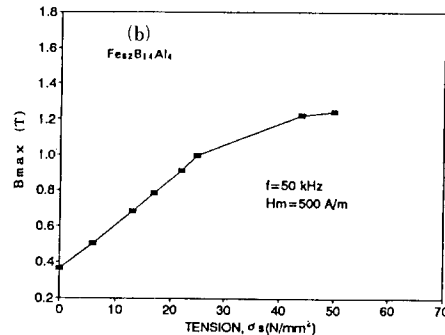
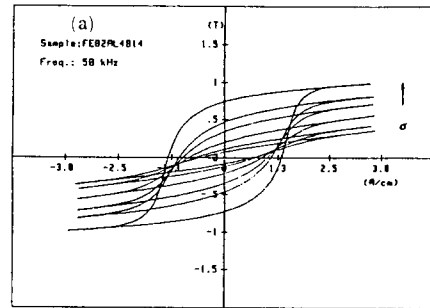


Fig. 2. a) Changes of hysteresis loop of  $Fe_{82}B_{14}Al_4$  alloy under different tensile stress.

b) Dependence of maximum magnetic induction on tensile stress for amorphous  $Fe_{82}B_{14}Al_4$  alloy.

Fig. 2 (a)에서 인장응력이 증가함에 따라 자기이력곡선의 최대자속밀도 및 각형비가 계속 증가하며 인장응력 50 N/mm<sup>2</sup> 이상에서는 자기이력곡선에 더 이상의 변화가 일어나지 않는다. 이와같이 인장응력에 따라 각형비와 최대자속밀도가 증가하는 것은 비정질  $Fe_{82}B_{14}Al_4$  합금이 양자왜의 특성을 갖기 때문인 것으로 사료된다. 또한 Fig. 2(b)에서 비정질  $Fe_{82}B_{14}Al_4$  합금의 최대자속밀도는 인장응력 25 N/mm<sup>2</sup> 까지 가역적, 직선적으로 변하며, 인장응력에 따른 최대자속밀도 변화율은 약 0.026

$T \cdot \text{mm}^2 / \text{N}$ 이다. 이는 최대가용인장응력이  $13 \text{ N/mm}^2$  이고, 인장응력에 따른 잔류자속밀도의 변화율이 약  $0.013 T \cdot \text{mm}^2$ 으로 Victrovac 7075 ( $\text{Fe}_{70}\text{Ni}_8\text{Si}_{10}\text{B}_{12}$ ,  $\lambda_s = 30 \text{ ppm}$ ) 합금[3] 보다 우수하다. Fig. 3은 비정질  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{14}\text{Al}_4$ 합금의 인장응력에 따른 투자율 및 교류자기이력손실의 변화를 나타낸 것이다.

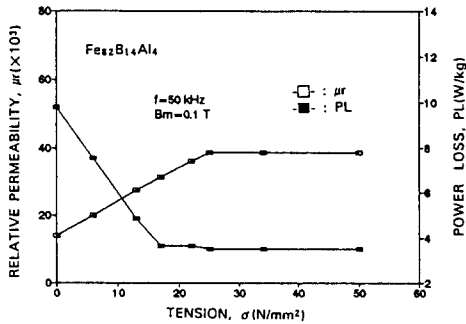


Fig. 3. Power loss and relative permeability of amorphous  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{14}\text{Al}_4$  alloy.

Fig. 3에서 인장응력이 증가할 수록 일축이방성 형성에 의하여 투자율은  $25 \text{ N/mm}^2$ 까지 직선적으로 증가하며, 자기이력손실은  $15 \text{ N/mm}^2$ 까지 직선적으로 감소한 후 일정하게 나타난다. Fig. 4는  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  및  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$  급속응고합금의 인장응력에 대한 최대자속밀도의 변화율을 Al치환량의 변화에 따라서 조사한 결과이다.

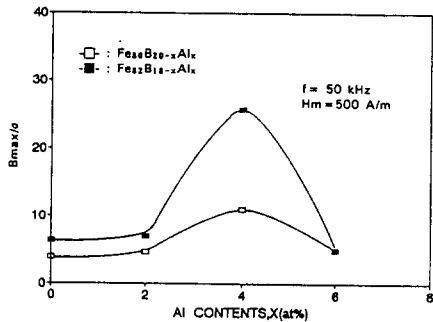


Fig. 4.  $B_{\text{max}}/\sigma$  of  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$  and  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  alloys.

Fig. 4에서  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  급속응고합금의 인장응력에 따른 최대자속밀도변화량은 포화자왜와 같은 경향으로  $x=4$ 에서 최대이다.  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$  급속응고합금도 같은 경향성이나  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  급속응고합금에 비하여 전조성에서 낮다. 또한 비정질  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{14}\text{Al}_4$ 합금의 인장응력에 따른 최대자속밀도의 변화율은 비정질  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{16}\text{Al}_4$ 합금의  $0.011 T \cdot \text{mm}^2 / \text{N}$ 에 비하여 2배 크며, Metglas 2605

( $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ ) 합금조성인  $x=0$ 에서의  $0.004 T \cdot \text{mm}^2 / \text{N}$ 에 비하여는 6배 이상 크다.

Fig. 5는  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  및  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$  급속응고합금의 최대자속밀도가 가역적, 직선적으로 변하는 최대가용인장응력의 Al조성의존성을 나타낸 것이다.

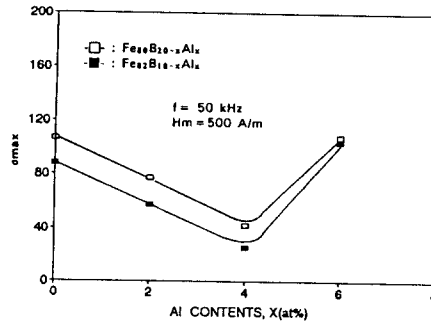


Fig. 5.  $\sigma_{\text{max}}$  of  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$  and  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  alloys.

Fig. 5에서  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  급속응고합금의 최대가용인장응력은  $x=4$ 에서 가장 낮다.  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$  급속응고합금도 같은 경향성으로  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  급속응고합금보다 전조성에서 높다. Fig. 4 및 5에서 Al치환량이 증가하여 포화자왜가 증가할 수록 인장응력에 따른 최대자속밀도의 변화율은 증가하나, 최대가용인장응력은 감소한다. 이는 포화자왜가 높을 수록 인장응력에 의한 자화가 용이하기 때문으로 사료된다.

#### IV. 결 론

Fe-B계 비정질합금에서 Al을 치환한  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  및  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$  급속응고합금은  $x=4$ 까지 비정질상으로 제조가 가능하다. 또한 비정질  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  및  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$  합금의 포화자왜는 Al치환량이 증가할 수록 증가하며, 비정질  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{14}\text{Al}_4$ 합금에서 45 ppm으로 가장 높다. 한편, 비정질  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  및  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$ 합금의 인장응력에 따른 최대자속밀도변화율은 Al치환량이 증가할수록 증가하며, 비정질  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{14}\text{Al}_4$ 합금에서  $0.026 T \cdot \text{mm}^2 / \text{N}$ 으로 가장 높다. 따라서 Fe-B계 비정질합금에 Al을 치환한 비정질 Fe-B-Al계 합금은 자기변형을 이용한 센서로 응용시 분해능이 우수할 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

[1] H. R. Hilzinger, IEEE Trans. Magn., **MAG-21**,

- 2020(1985).
- [2] R. Boll and H. Warlimont, IEEE Trans, Magn., **MAG-17**, 3053(1981).
- [3] J. Seekircher and B. Hoftmann, Sensor and Actuators, **A21-A23**, 401(1990).
- [4] K. Mohri and S. Takeuchi, IEEE Trans. Magn., **MAG-17**, 3379(1981).
- [5] E. P. Wohlfarth, Ferromagnetic materials, North-Holland Publishing Co., **2**, 115(1980)
- [6] R. Hasegawa and Ranjan Ray, J. Appl. Phys. **49**(7), 4174(1978)
- [7] O' Handley R. C., Solid St. Communs, **21**, 1119(1977)

## Magnetostriction and Magnetoelastic Properties of Amorphous Fe-B-Al Alloys

Y. S. Cho, Y. B. Kim, and C. S. Kim

*Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon, 302-764, Korea*

T. K. Kim

*Department of Metallurgical Engineering,*

*Chungnam National University, Taejon, 302-764, Korea*

*(Received 14 May 1993, in final form 17 June 1993)*

Saturation magnetostriction and magnetoelastic properties of amorphous  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18-x}\text{Al}_x$  and  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20-x}\text{Al}_x$  alloys have been studied. Saturation magnetostriction of the alloys has increased according to the increase of Al content. The amorphous  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{14}\text{Al}_4$  alloy shows the highest saturation magnetostriction of 45 ppm among the alloy systems. The ratio of maximum magnetic induction change to tensile stress of this alloy is about  $0.026 \text{ T}\cdot\text{mm}^2/\text{N}$ , and it is considered to be applicable for a high resolution mechanical sensor.