

극박형 Fe-Al-Nb-B-Cu계 초미세결정합금의 자기적 특성

박진영 · 서수정

성균관대학교 공과대학 금속공학과

수원시 장안구 천천동 300

김광윤

한국과학기술연구원 금속연구부

서울특별시 성북구 하월곡동 39-1

노태환

안동대학교 금속공학과

경북 안동시 송천동 388

(1996년 8월 14일 받음, 1996년 9월 20일 최종수정본 받음)

Fe-B-Nb-Cu계 초미세결정합금의 고주파수 대역에서의 연자기 특성을 개선하기 위하여, 이 합금에 대한 Al 첨가효과 및 적정 Al 함유합금을 $10 \mu\text{m}$ 이하의 두께를 가진 극박형으로 만들었을 때의 자기적 특성이 조사되었다. 그 결과 $\text{Fe}_{78}\text{Al}_4\text{Nb}_5\text{B}_{12}\text{Cu}_1$ 조성합금의 경우에 100 kHz 이상의 고주파 영역에서 높은 실효투자율과 낮은 자심손실 값을 나타내었다. 또 이 합금을 두께 $10 \mu\text{m}$ 이하로 극박화한 경우 1 MHz영역까지의 실효투자율 및 자심손실 특성이 크게 개선되었다. 즉, 두께 $8 \mu\text{m}$ 의 $\text{Fe}_{78}\text{Al}_4\text{Nb}_5\text{B}_{12}\text{Cu}_1$ 합금의 1 MHz에서의 실효 투자율은 5,000이었으며, 자심손실은 1 MHz, 0.2 T에서 1.4 kW/kg 의 값을 보였다. 이러한 우수한 고주파 연자기 특성은 Al 첨가에 의해 자구조의 변화 및 10 nm 이하의 보다 미세한 α -Fe상 생성등에 기인하는 것으로 해석되었다.

I. 서 론

최근 컴퓨터, 통신기기, 가전기기 등 각종 전기·전자 장치의 소형경량화 및 기능의 고성능화가 급속히 진전되면서 이들 각종기기에 사용되는 전원장치의 소형화 및 고효율화가 요구되고 있다. 전원장치에 사용되는 연자성 부품의 경우 구동주파수와 자속밀도를 증가시킴으로써 소형화가 가능한데, 현재 100 ~ 500 kHz 대역의 고주파용 전원장치에 사용되는 연자성 재료로는 철계 및 코발트계 비정질 합금(두께 20 ~ 30 μm 정도)이 최적 합금으로 제시되고 있다. 그러나 최근 이들 주파수를 1 MHz 대역까지 증가시켜 보다 고도의 소형화를 달성하고자 하는 노력이 일본등 선진국에서 이루어지고 있으며, 이에 대응 가능한 재료로서 두께를 통상의 비정질합금보다 약 1/3 ~ 1/4로 감소시켜 와전류 손실을 최대한 억제한 극박형 코발트계 비정질합금이 보고되고 있다[1].

한편 액체압법으로 제조한 특정조성의 철계 비정질 합금을 결정화온도이상에서 열처리하면 약 10 nm 크기의 결정립 크기를 갖는 α -Fe상 초미세 결정구조가 형성되면서 영자왜 코발트 비정질합금과 비슷한 연자성 특성을 가짐과 동시에 높은 포화자속밀도를 나타내는 새로운 연자성체가 얻어짐이 밝혀졌다. 이와 같은 철계 초미세 결정

합금으로는 1988년 Yoshizawa[2] 등에 의해 Fe-Cu-Nb-Si-B 합금계에서 처음 보고된 이후, Suzuki[3, 4] 등에 의해 Fe-M-B-(Cu)계에서도 유사한 결과가 제시되었다. 그런데, 후자의 합금은 전자에 비해서 상대적으로 높은 Fe 분율을 가지고 있어 포화자속밀도가 약 1.5 ~ 1.7 T에 이르고, 투자율 또한 높다는 장점이 있다. 현재 초미세 결정합금이 우수한 연자기 특성을 나타내는 이유는 완전히 밝혀지지는 않았지만, 강자성체의 결정형역 내에서 다수의 미세한 α -Fe의 결정립이 포함될 경우 각 결정립이 가지는 고유 결정자기 이방성의 평균화에 의하여 실효적 결정자기이방성이 감소한다는 설명이 일반적으로 받아들여지고 있다. 그 이외에도 우수한 연자기 특성을 나타내는 원인으로는 결정화 조직의 자기변형률이 거의 영에 가까운 낮은 값을 보이는 것과 전체적으로 우수한 자기적인 균질성 등을 들고 있다. 현재 여러 초미세 결정 합금중 최초로 개발된 Fe-Si-B-Cu-Nb 합금은 Finemet라는 상품명으로 생산되어 각종 자기코어, 센서 등에 사용되고 있다.

저자들은 근래 극박형 비정질합금 제조공정을 이용하고, 고포화자속밀도의 합금조성과 미세조직을 정밀제어하여 보다 소형화가 가능한 MHz 대역 고주파용 철계 극박형 초미세결정 연자성 합금을 연구하여 왔다. 그 결과

최근 1 MHz 정도의 주파수 대역에서 높은 투자율(3,000)과 저자심손실(0.2 T에서 2 kW/kg)의 연자성 특성을 나타내는 극박형(두께 10 μm 이하) Fe₈₃B₉Nb₇Cu₁ 합금[5]을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 이 합금보다 고주파에서 더욱 우수한 연자성 특성과 낮은 자심손실을 갖는 연자성 재료를 개발하기 위해서, Fe에 고용성 결정자기방성을 감소시키고 재료의 전기 비저항을 높이며, 결정립을 미세화시키는 것으로 알려진 Al[6, 7]을 Fe-B-Nb-Cu계 합금에 첨가하여 보다 우수한 자기적 특성을 나타내는 적정 Al 조성을 밝히고, 이 합금을 극박화하여 1 MHz 고주파대역에서 높은 포화자속밀도 및 실효 투자율, 그리고 낮은 자심손실을 갖는 새로운 극박형 초미세결정 합금을 개발하고자 하였다.

II. 실험방법

순도 99.9 % 이상의 Fe, Nb, B, Cu, Al 원료금속을 소정의 조성대로 평량한후 진공 아-크 용해로를 사용하여 모합금을 제조하였다. 아-크 용해시 모합금의 불균일성을 방지하기 위하여 5회 이상 뒤집어 반복 용해하였다. 비정질 합금리본은 진공 및 분위기를 유지할 수 있는 단물형 급냉용고 장치를 사용하였으며, 모합금의 용해는 최대 출력 5 kW인 고주파 유도로를 사용하였다.

비정질 리본의 제조조건은 만들고자 하는 비정질 리본의 두께에 따라 적절히 변화시켰는데, 통상의 비정질 리본 시료는 분사압력 1~2 kg/cm², 냉각물 회전 선속도 40~45 m/s, 석영관 노즐직경 0.5~0.55 mm로 Ar 분위기하에서 제조하였으며, 이때 제조한 Fe-Al-B-Nb-Cu계 비정질 리본합금의 폭은 1~2 mm 내외였고 두께는 대략 20 μm 전후였다. 한편 두께 10 μm 이하의 극박형 비정질 리본시료는 통상의 제조조건으로는 표면이 양호한 시료를 제조할 수 없기 때문에 진공중에서 제조하였으며, 냉각물 회전 선속도 50~60 m/sec, 분사압력 0.005~0.02 kg/cm², 정방형 석영슬릿의 크기 0.2×4 mm 등의 제조조건으로 두께 10 μm 이하, 폭 3~4 mm의 극박리본을 성공적으로 제조하였다. 철계 초미세 결정 합금의 극박 리본 제조조건에 따른 자기적 특성의 변화는 참고문헌에 자세히 보고되어 있다.[5]

제조된 리본은 X-선 회절분석을 통하여 비정질임을 확인하고, 외경 21 mm의 구리 보빈에 적정 길이만큼 토로이드 형태로 감아 10⁻³ Torr 이하의 진공도를 유지할 수 있는 석영관 내에서 1시간 동안 열처리한 후 Ar 분위기에서 공냉하였다. 열처리에 사용된 노는 유도자기장이 발

생하지 않도록 무유도 권선 방식으로 감아 사용하였다.

열처리한 시료는 토로이드 형태로 감은 뒤 직류 및 교류 자기특성을 측정하였다. 교류실효투자율은 임피던스 분석기(Hewlett Packard, 4192A)로 측정하였고, 직류 자기특성은 B₁₀ 측정시 10 Oe(800 A/m), 보자력은 0.1 Oe(8 A/m)를 가하여 DC Recording Fluxmeter(Toei, TRF-5AH1)로 측정하였다. 자심손실의 측정에는 B-H Analyser(Iwatsu, SY820)을 사용하였다. 열처리후 결정화된 시료의 미세조직 및 상분석에는 Cu-K_α선에 의한 X-선 회절시험기(Rigaku, CN2013) 및 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope: Philips, CM30)을 이용하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. Al 첨가효과

극박형 리본합금의 자기적 특성은 제조공정에 매우 의존적이며, 또 제조하기가 대단히 어려우므로 Al이 첨가된 최적 조성은 우선 통상의 제조공정으로 만들어진 합금(원형노즐을 사용하여 알곤 분위기중에서 제조한 두께 20 μm 내외의 시료)에서 조사되었다.

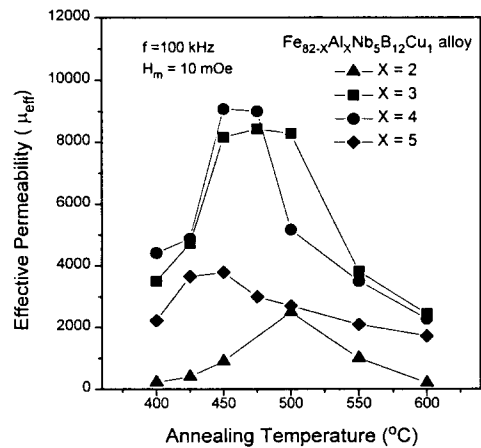


Fig. 1. The changes of effective permeability for Fe_{82-x}Al_xNb₅B₁₂Cu₁ (X = 2~5 at%) alloys as a function of annealing temperature.

Fig. 1은 1시간동안 열처리한 Fe_{82-x}Al_xNb₅B₁₂Cu₁ (X = 2~5 at%) 합금의 열처리 온도에 따른 100 kHz에서의 실효 투자율의 변화를 나타낸 것이다. 조사된 합금계의 최적 열처리온도는 각각 다르나, 최적 열처리온도

에서 열처리한 각 조성 합금의 실효투자율을 비교해보면 Al을 4 at% 첨가한 합금의 실효투자율이 약 9,000으로 다른 합금들보다도 높은 값을 보여주고 있다.

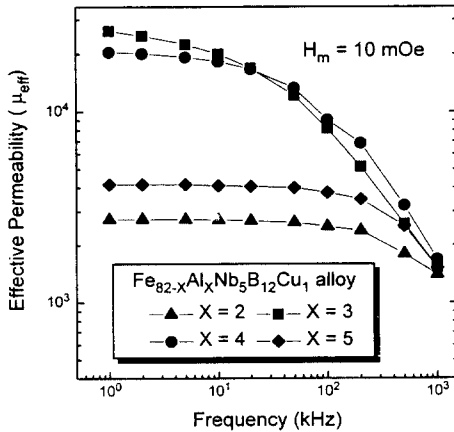


Fig. 2. The changes of effective permeability for $Fe_{82-x}Al_xNb_5B_{12}Cu_1$ ($X = 2 \sim 5$ at%) alloys as a function of frequency at optimum annealing temperature.

Fig. 2에는 최적 열처리온도에서 1시간동안 열처리한 후 측정된 $Fe_{82-x}Al_xNb_5B_{12}Cu_1$ ($X = 2 \sim 5$ at%) 합금의 실효투자율의 주파수 의존성을 나타내었다. 1 kHz에서 1 MHz까지 측정주파수 전 구간에서 Al을 3 ~ 4 at% 첨가한 경우의 실효투자율이 2 또는 5 at%를 첨가한 경

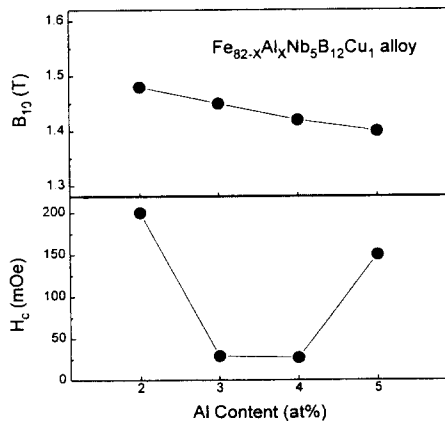


Fig. 3. The variations of B_{10} and H_c values for $Fe_{82-x}Al_xNb_5B_{12}Cu_1$ ($X = 2 \sim 5$ at%) alloys as a function of Al content at optimum annealing temperature.

우의 실효투자율보다 커, Al 3 ~ 4 at%를 첨가하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 이처럼 높은 실효투자율을 보이는 Al 3 at%과 4 at%를 첨가한 합금의 실효투자율을 서로 비교해 보면 주파수가 1 ~ 20 kHz인 구간에서는 Al을 3 at% 첨가한 경우 더 높은 실효투자율을 보이지만, 20 kHz 이상의 고주파 영역에서는 4 at% 첨가한 경우가 더욱 높은 투자율을 보여주고 있다. 따라서 고주파영역에서 우수한 연자기 특성을 나타내는 합금으로는 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 조성이 더 적합할 것으로 판단된다.

한편, 이러한 교류특성 이외, 최적 열처리온도에서 열처리한 시료의 직류특성을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 B_{10} 값의 변화를 살펴보면, Al의 함량이 2 at%에서 5 at%로 증가되면 B_{10} 은 약 1.48 T에서 1.40 T로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 Al의 첨가에 따라 Fe의 함량이 줄어드는 것에 기인하는 것으로 보여진다. 또 보자력(H_c)의 경우는, 높은 투자율을 보이는 Al = 3 ~ 4 at% 합금에서 약 25 ~ 30 mOe정도의 낮은 보자력을 나타내지만, Al을 2, 5 at%를 첨가한 경우에는 각각 200, 150 mOe로 높은 보자력을 보인다. 따라서 최적의 직류특성을 나타내는 합금계도 실효투자율의 변화에서 조사된 결과와 마찬가지로 Al을 3 ~ 4 at% 첨가한 합금임을 알 수 있다.

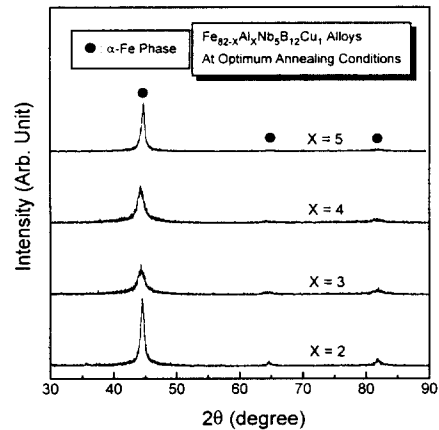


Fig. 4. XRD patterns of $Fe_{82-x}Al_xNb_5B_{12}Cu_1$ ($X = 2 \sim 5$ at%) alloys at optimum annealing temperature.

이와 같은 Al 첨가에 따른 자기적인 특성변화의 원인을 조사하기 위하여 X-선 회절 분석 및 투과전자현미경을 이용하여 미세구조의 변화를 관찰하였다. Fig. 4에는 적정열처리를 거친 $Fe_{82-x}Al_xNb_5B_{12}Cu_1$ ($X = 2 \sim 5$ at%) 합금들의 X-선 회절 패턴을 나타내었다. 각 조성의

합금은 bcc-Fe결정의 석출을 의미하는 α -Fe상의 (110), (200) 및 (211)면에 해당되는 피크가 나타나는데, 각각의 조성에 따라 결정화 피크의 강도와 폭에서 차이를 보인다. 이때 이들 (110) 피크로부터 Scherrer의 식을 이용하여 각 합금의 결정립 크기를 계산하면 Table I에 나타낸 것과 같은 결과가 얻어진다.

Table I. The changes of grain size obtained by the scherrer formula from XRD main peak of $Fe_{82-x}Al_xNb_5B_{12}Cu_1$ ($X = 2 \sim 5$ at%) alloys annealed at optimum temperature.

| Al Content (X at%) | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------|-------|------|------|-------|
| Grain Size(nm) | 37 nm | 7 nm | 7 nm | 19 nm |

즉, Al이 3~4 at%일 경우에는 7 nm 정도의 초미세 결정립이 형성된 반면, Al이 2 또는 5 at% 첨가된 합금에서는 수십 나노미터 크기의 큰 결정립들이 형성된 것으로 분석되었다. 이와 같이 Al을 3~4 at% 첨가한 합금에서 7 nm 정도의 보다 작은 초미세 결정립을 얻었을 경우에 우수한 연자기 특성을 얻을 수 있는데, 이에 대한 이론적 타당성은 Herzer[8]가 결정립 크기와 보자력 및 투자율과의 상관관계에 대해 적용한 이방성 분산 모델에 의해 주어진다. 이 이론에 의하면 초미세 결정구조 상체의 실효적 결정자기이방성의 크기 및 보자력은 결정립 크기의 6승(D^6)에 비례하고 투자율은 D^6 에 반비례한다. 또 X-선 회절 결과를 확인하기 위하여 최적 열처리온도에서 열처리한 시료의 미세조직을 직접 관찰하였고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Al을 2 at% 첨가한 합금은 이의 암시아상에 의하며 결정립의 크기가 30~40 nm인 α -Fe 상이 석출되며, 그외 미세한 화합물도 석출됨을 SAD 패턴이 보여주고 있다. 그러므로 자기적 특성 결과와 미세구조 분석 결과를 비교해 보면 이 시료의 낮은 자기적 특성은 α -Fe상의 큰 결정립의 형성외에도 화합물상의 석출에도 기인되는 것으로 판단된다. Al을 3, 4, 5 at% 첨가한 시료의 미세조직은 모두 α -Fe 단상으로 되어 있는데 그중 Al을 3과 4 at%를 첨가한 시료는 10 nm 이하의 결정립 크기를 나타내는 반면에, 5 at% 첨가한 시료는 20 nm 정도의 크기를 가지는 결정립 조직이 관찰되었다.

한편, Fig. 2에서 Al을 4 at% 첨가한 합금의 경우 20 kHz 이상의 측정 주파수 구간에서는 Al을 3 at% 첨가한 경우보다 오히려 더 높은 투자율을 보이는데, 이에 관련된 미세조직의 차이는 거의 관찰되지 않았다. 4 at% Al 합금에서 얻어지는 실효투자율의 우수한 주파수 의존

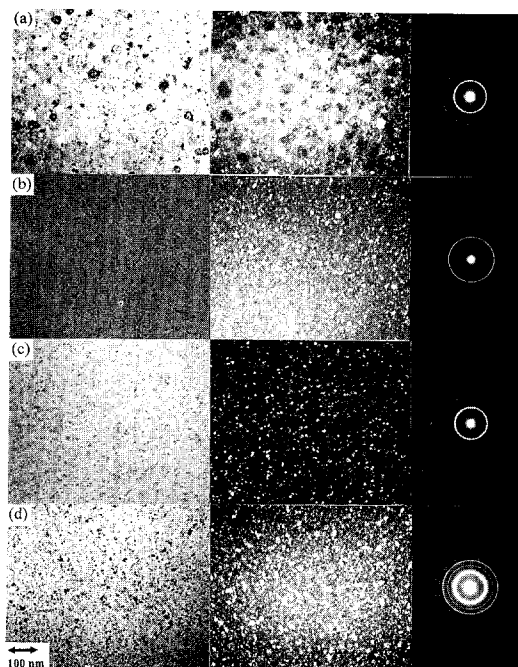


Fig. 5. The variations of microstructure for $Fe_{82-x}Al_xNb_5B_{12}Cu_1$ ($X = 2 \sim 5$ at%) alloys annealed at optimum temperature by TEM(Transmission Electron Microscope). (a) $X = 2$ (b) $X = 3$ (c) $X = 4$ (d) $X = 5$.

성의 원인을 조사하기 위하여 최적 열처리 온도에서 열처리한 시료의 각형비(remanence ratio, Br/B_{10})을 조사하였고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 각각 Al이 2, 3, 4 at% 첨가됨에 따라서 각형비는 점차 감소하며, 5 at% 첨가시 다시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 각형비는 자구의 자화방향의 분포정도를 나타내는 것으로 재료내에 있는 이방성의 크기와 방향에 의존하는데, 일반적으로 자계방향과 수직방향으로 자화되어 있을 경우 낮은 각형비를 나타낸다. 자화방향이 자계방향에 수직일 경우 고주파 자화 구동시 주로 스핀회전에 의해 자화증대가 일어나는데, 고주파 대역에서는 통상 이러한 자화거동이 지배적이 되며 이럴 경우 고투자율이 얻어진다. 본 연구에서는 자기 측정시 리본의 길이 방향으로 자계가 가해지므로, Al 3~4 at%에서 큰 고주파 투자율이 얻어진다는 것은 리본의 폭(또는 두께) 방향으로, 그 원인은 분명치 않으나, 자기 이방성이 우선적으로 형성된다는 것을 의미한다. Al을 4 at% 첨가한 합금에서 고주파 특성이 우수한 원인은 이와 같은 낮은 각형비에 기인되는 것으로 생각되어질 수 있다.

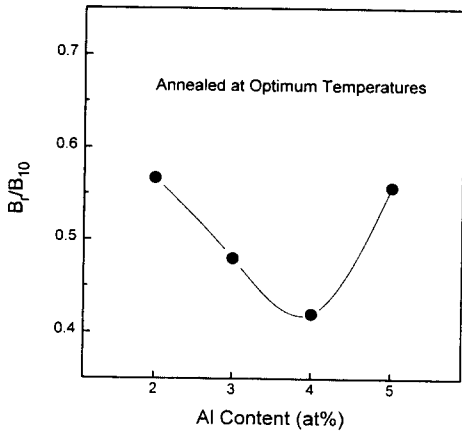


Fig. 6. The changes of remanence ratio(B_r/B_{10}) for $Fe_{82-x}Al_xNb_5B_{12}Cu_1$ ($X = 2 \sim 5$ at%) alloys as a function of Al content.

위의 결과로부터 Fe-Nb-B-Cu계 합금에 Al을 적정 함량 첨가하면 α -Fe의 결정립이 미세화 되어 연자기 특성이 향상되며, 자구구조의 변화에 따라 실효투자율의 고주파 특성이 향상됨을 알 수 있었다.

2. 극박화 효과

최근 저자 등[5]은 리본합금의 두께를 감소시키는 방법을 Fe-B-Nb-Cu계 합금에 적용하여 와전류 손실의 감소에 의해 상당한 고주파 특성의 향상을 가져옴을 발표한 바 있다. 위에서 밝힌 바와 같이, 고주파에서의 연자기 특성이 가장 우수한 것으로 판명된 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 조성의 합금에 대하여 극박화 공정을 통하여 고주파에서의 연자기 특성을 더 한층 향상시키고자 하였다. Fe-B-Nb-Cu계 합금과는 달리 Fe-Al-Nb-B-Cu계의 경우 Al 첨가에 따라 용탕의 유동도가 다소 떨어지는 경향을 보이므로 진공중 급냉용고공정 변수들을 정밀하게 조절하여야만이 극박형 리본(8 μm)을 제조할 수 있었다.

Fig. 7에는 극박형 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금(두께 8 μm)의 측정 주파수에 따른 실효투자율의 변화를 나타내었다. 이때 비교를 위하여 통상의 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금(20 μm)과 극박형 $Fe_{83}B_9Nb_7Cu_1$ 합금(7 μm)[5]의 주파수에 따른 투자율 변화를 함께 제시하였다. 그림에서와 같이 극박화한 리본의 경우 100 kHz 이하에서는 통상두께의 리본에 비해 낮은 실효투자율을 보이나 100 kHz 이상의 고주파에서 실효투자율이 현저히 증가하여 1 MHz에서 약 5,000 정도의 높은 값을 얻을 수 있었다. 100 kHz 이하의 저주파 영역에서는 통상의 두께를 갖는 시료

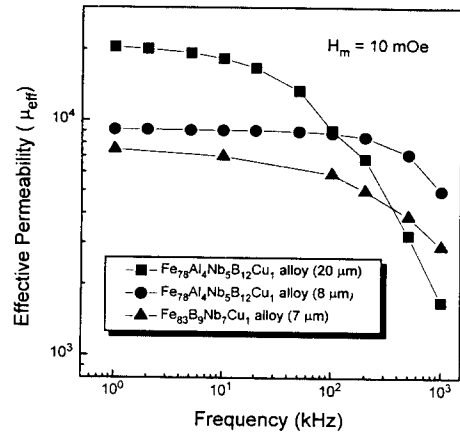


Fig. 7. The changes of effective permeability for ultrathin $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ alloy as a function of frequency.

에서 훨씬 높은 실효투자율을 나타내는데, 리본두께가 20 μm 일때 1 kHz의 주파수에서 약 20,000이었던 실효투자율이 8 μm 로 두께가 감소하면 9,000 정도로 급격하게 감소하고 있다. 이와 같이 저주파에서 두께가 감소할수록 실효투자율이 크게 저하하는 것은 표면효과와 증대가 그 주된 원인인 것으로 판단된다. 또 Yagi 등[1]은 두께가 극히 얇은 초박형 비정질합금에서 현저한 자벽수의 감소 현상을 관찰하였는 바, 일반적으로 자벽이동이 지배적인 저주파영역에서는 자벽수가 감소되면 실효투자율 역시 감소하는데, 본 합금계에서도 이러한 현상이 존재할 가능성이 있는 것으로 사료되나 확인되지는 않았다. 한편 극박형 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금(8 μm) 시료와 극박형 $Fe_{83}B_9Nb_7Cu_1$ 합금(7 μm) 시료의 투자율의 주파수 의존성을 비교하면, Al이 첨가된 합금의 실효투자율의 주파수 의존성이 더욱 우수함을 알 수 있었으며, $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금(8 μm) 시료의 1 MHz에서의 실효투자율은 약 5,000 정도로 $Fe_{83}B_9Nb_7Cu_1$ 합금(7 μm) 시료의 실효투자율 3,000과 비교하여 대략 두배로 향상된 값이 얻어졌다.

극박형 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금의 B_{10} 및 H_C 를 조사한 결과, 적정 열처리 온도에서 1시간 동안 열처리 하였을 때 각각 1.40 T와 35 mOe의 값이 얻어졌다. B_{10} 에는 극박화의 영향이 거의 없었으나, H_C 값은 극박형의 경우 통상 두께의 리본에 비해 약 10 mOe 정도 증가하였는데, 이는 리본 표면의 상태(표면의 거칠기 등)가 통상두께의 리본에 비해 극박리본에서 더 크게 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

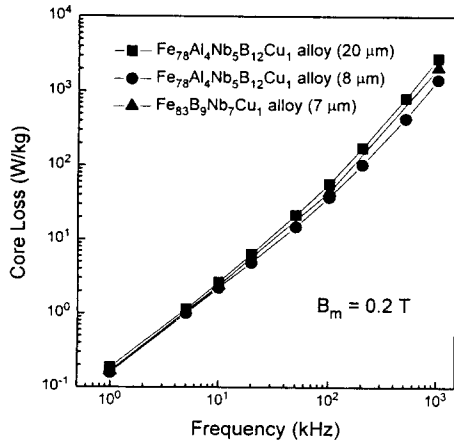


Fig. 8. The changes of core loss for ultrathin $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ alloy as a function of frequency.

Fig. 8은 극박형 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금의 측정 주파수에 따른 자심손실의 변화를 나타낸 것이며, 비교를 위하여 통상의 두께를 가진 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금시료와 극박형 $Fe_{83}B_9Nb_7Cu_1$ 합금(7 μm)[5] 시료의 자심손실값을 함께 나타내었다. 여기서 극박형 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금의 경우 1 MHz에서 약 1.4 kW/kg으로 가장 낮은 자심손실값을 보이고 있다. 재료두께와 관련된 고전적 와전류손실(P_e)[9]은 다음과 같은 Maxwell의 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_e = \frac{(\pi t f B_m)^2}{6\rho}$$

여기서 t 는 리본 두께, f 는 주파수, B_m 은 최대유도자속이며 ρ 는 전기비저항을 나타낸다. 그림에서와 같이 두께감소에 따른 큰 자심손실의 감소는 이 식으로부터 고전적 와전류 손실이 감소하는데에 기인하는 것으로 판단할 수 있다. 한편 극박화에 따라 자심손실이 1 ~ 100 kHz에서보다 100 kHz ~ 1 MHz의 고주파 대역에서 더욱 급격하게 감소하며, Al 첨가 극박합금 시료와 Al이 첨가되지 않은 Fe-Nb-B-Cu 극박합금 시료와의 주파수에 따른 자심손실 값을 비교해 볼 때, 측정된 전 주파수에서 Al이 첨가된 극박 합금시료가 더욱 낮은 자심 손실을 갖는 것은 위의 두께 감소에 의한 고전적 와전류 손실만으로는 충분히 설명되지 않는다. 왜냐하면 Al이 첨가되지 않은 시료가 더 얇은 두께를 가지고 있지만 자심 손실은 오히려 큰 값을 보여주기 때문이다. 일반적으로 전체 손실특성[10]

은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$W_{total} = W_H + W_{ec} + W_a$$

여기서 W_H 는 히스테리시스 손실, W_{ec} 는 고전적 와전류 손실, W_a 는 이상 와전류 손실(anomalous loss 또는 excess eddy current loss) 이라고 하며, $W_{ec} + W_a$ 합한 값을 통칭하여 와전류 손실이라고 한다. 특히 고주파에서는 고전적인 와전류 손실도 영향을 미치지만 이상와전류 손실이 더 주된 손실로 작용하는 것으로 보고[11]되고 있다. 또한 이상와전류 손실은 자벽의 생성 및 소멸, 그리고 비정상 사인파의 자구운동 등 대부분이 자구구조의 정적 및 동적 변화에 가장 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그러므로 두께가 10 μm 이하인 극박형 시료의 경우 100 kHz 이상의 고주파영역에서 Al을 첨가한 시료의 경우 Al을 첨가하지 않은 시료보다 더욱 낮은 손실값을 보이는 이유는 두께 감소 및 비저항이 작용하는 고전적인 와전류 손실의 감소외에, 이상 와전류 손실이 많은 영향을 받는 자구구조에 변화가 있을 것으로 생각된다. 그 이유로는 극박형 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금의 경우에는 각형비가 0.3으로 극박형 $Fe_{83}B_9Nb_7Cu_1$ 합금의 각형비 0.7보다 훨씬 더 낮은 각형비를 보이고 있기 때문이다. 이러한 낮은 각형비는 자화성분이 폭 방향으로 많이 배열되어 있음을 의미하며 이러한 구조는 특히 100 kHz 이상의 고주파 영역에서의 연자기 특성에 유리하기 때문이다.

IV. 결 론

고주파에서의 연자기 특성이 우수한 재료를 개발하기 위해서 기존의 Fe-B-Nb-Cu계 합금에 Al을 첨가했을 때의 자기적 특성변화 및 미세구조의 변화를 조사하였다. Al을 4 at% 첨가한 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금에서 우수한 고주파 연자기 특성을 보였는데, 이는 Al첨가에 의해 결정립 미세화 및 자구구조의 변화가 일어지기 때문으로 생각되었다.

한편 이러한 초미세 결정 $Fe_{78}Al_4Nb_5B_{12}Cu_1$ 합금을 극박화하여 고주파 영역에서 더욱 우수한 연자기 특성을 얻을 수 있었으며, 리본의 두께를 8 μm 로 감소시킨 경우 실효투자율 및 자심손실은 각각 1 MHz에서 5,000과 0.2 T, 1 MHz에서 1.4 kW/kg에 달하였다. 이러한 특성은 Al 첨가에 의한 결정립 미세화와 두께감소 및 비저항 상승에 의한 고전적인 와전류 손실의 감소에 기인하는 것으로 믿어지며, 그의 Al 첨가가 시료의 자구구조에 대한 변화를 일으켜 이상 와전류 손실을 감소시키는 효과도 포함될 수 있을 것으로 사료되었다.

감사의 글

본 연구는 'Kist-2000 프로그램 연구비 지원'에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M. Yagi, T. Sato, Y. Sakaki, T. Sawa and T. Inomata, *J. Appl. Phys.*, **64**, 6050(1988)
- [2] Y. Yoshizawa, S. Oguma and K. Yamauchi, *J. Appl. Phys.*, **64**, 6044(1988).
- [3] K. Suzuki, A. Makino, A. Inoue and T. Masumoto, *J. Appl. Phys.*, **74**, 3361(1993).
- [4] K. Suzuki, A. Makino, A. Inoue and T. Masumoto, *J. Appl. Phys.*, **70**, 6232(1991).
- [5] J. S. Lee, K. Y. Kim, T. H. Noh and I. K. Kang., *IEEE. Trans. Magn.*, **31**, 3901(1995).
- [6] H. Watanabe, H. Saito and M. Takahashi., *日本應用磁氣學會誌*, **17**, 191(1993).
- [7] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*, Van Nostrand, New York(1951) p. 67
- [8] G. Herzer, *IEEE. Trans. Magn.*, **26**, 1397(1989).
- [9] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*, Van Nostrand, New York(1951) p. 769
- [10] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman & Hall, London (1989) p271
- [11] F. E. Luborsky, *Amorphous Metallic Glass*, Butterworths, London(1983) p. 367

The Magnetic Properties of Ultrathin Fe-Al-Nb-B-Cu Nanocrystalline Alloys

J. Y. Park and S. J. Suh

Department of Metallurgical Engineering, Sungkyunkwan University

Suwon 440-746, Korea

T. H. Noh

Department of Metallurgical Engineering, Andong National University

Andong 760-749, Korea

K. Y. Kim

Division of Metals, Korea Institute of Science and Technology

Seoul 136-791, Korea

(Received 14 August 1996, in final form 20 September 1996)

The effects of Al addition to Fe-B-Nb-Cu alloy for improving the high-frequency magnetic properties and the magnetic properties of ultrathin $\text{Fe}_{78}\text{Al}_4\text{Nb}_5\text{B}_{12}\text{Cu}_1$ nanocrystalline alloy ribbons with the thickness less than $10 \mu\text{m}$ were investigated. It was found that the effective permeability at frequencies over 100 kHz was very high and the core loss was very low for the composition $\text{Fe}_{78}\text{Al}_4\text{Nb}_5\text{B}_{12}\text{Cu}_1$ alloy. Moreover, the reduction of the ribbon thickness below $10 \mu\text{m}$ was very effective in improving their permeability and the core loss characteristics up to the MHz frequency range. The values of effective permeability at 1 MHz and core loss at 0.2 T, 1 MHz were 5,000 and 1.4 kW/kg, respectively. It was considered that these results were due to far refined α -Fe phase structure with grain size less than 10 nm and domain structure modification.