

용탕인출법으로 제조한 퍼말로이 박판의 미세구조와 자기적 특성의 상관관계

박성용¹, 임경묵², 남궁정³, 김문철³, 박찬경^{1#}

The Relationship between Microstructure and Magnetic Properties of Permalloys Fabricated by Melt Drag Casting

S. Y. Park, K. M. Lim, J. Namgung, M. C. Kim, C. G. Park

Abstract

Permalloys were successfully fabricated by melt drag casting in the present study, and their variation of microstructure and consequent magnetic properties were investigated as a function of Si contents and annealing temperature. The increases in Si content and annealing temperature resulted in the increases of grain size and amount of Ni₃Fe ordered phase. Both the grain size and Ni₃Fe ordered phase controlled by Si and annealing temperature had a important role on permeability of permalloys.

Key Words : permalloys, melt drag casting, texture, permeability

1. 서 론

최근 디지털 기술과 반도체 기술 등의 급속한 발달은 전자산업 및 컴퓨터 기술의 눈부신 발전을 가져왔다. 따라서 전기·전자 장치의 소형화, 경량화, 고속화를 위하여 고주파수화가 가능하게 되었다. 이러한 기술적 발전을 뒷받침하는 가장 중요한 부분 중 하나가 연자성 재료의 발전이다 [1]. Ni-Fe 이원계 합금으로 정의되는 퍼말로이(permalloy)는 높은 투자율과 자속밀도를 가지는 대표적인 연자성 재료이다. 이 합금계는 70~80% Ni 을 함유한 고투자율재료, 45~50% Ni 을 함유한 고자속밀도 재료, 30~40% Ni 조성의 교류저철손재료 등으로 구분된다. Ni 함량에 따라 위와 같은 다양한 특성을 나타내는 퍼말로이는 inductor,

transformer 등 전자·전기 기기의 부품으로 사용될 뿐만 아니라 전자파로 인한 기기의 오작동을 막기 위한 전자파 차폐제로 사용되고 있다[2].

퍼말로이의 자성특성에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 합금제조 시 압연, 열처리 및 첨가원소에 의해서 결정되는 합금의 미세구조인 것으로 알려져 있다. 미세구조적인 요소에는 집합조직의 방향성, 합금내 게재물, 결정구조, 결정립 크기 등이 있으며, 이러한 요소들의 상대적인 중요도는 합금 조성에 따라 달라질 수 있다. 1900년대 초부터 35~80%Ni-Fe 이원합금 또는 이에 Mo, Cu, Si, Mn 등의 원소가 첨가되는 퍼말로이(permalloy) 개발에 관한 연구가 활발한 연구가 진행되어왔고, 또한 열처리에 의해 발달하는 결정학적 방향에 따라 결정되는 자기 이방성 등이 많이 연구되었

1. 포항공과대학교 신소재공학과

2. 생산기술기술연구원

3. 포항산업과학기술 연구원 신금속연구팀

교신저자: 포항공대 신소재공학과 cgpark@postech.ac.kr

다[2]. 자기 이방성은 압연공정과 재결정 과정에서 형성되는 결정 방향성에 의해 발달하므로 퍼말로이 박판 제조 공정조건을 최적화하여 적절한 결정 방향성을 가지도록 제어하는 것이 매우 중요한 문제이다.

기존의 퍼말로이 박판 제조는 합금 용해 주조 후 열감 압연과 냉간 압연, 그리고 열처리를 거치는 공정으로 제조하였다. 용탕인출법은 ~300 μm 두께의 박판을 주조함으로써 기존 공정 중 열간 압연 또는 냉간압연을 생략할 수 있는 박판 제조 공정이다. 본 연구에서는 용탕인출법으로 제조한 퍼말로이 박판의 자기적 성질과 미세조직의 상관관계를 압연 및 첨가 원소, 열처리를 달리하여 밝히고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 기존의 Fe-79Ni 퍼말로이를 기본 조성으로 하여 Si 이 첨가된 새로운 합금계를 개발하였다. Si의 첨가는 퍼말로이의 주조가능 온도를 넓히는 역할을 하여 퍼말로이의 주조성이 개선되었다. 표 1에 본 연구에서 상용한 퍼말로이의 조성을 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of permalloys used in the present study.

	Ni	Fe	Mo	Si
A	79	16	4	1
B	79	19	-	2
C	79	16	-	5

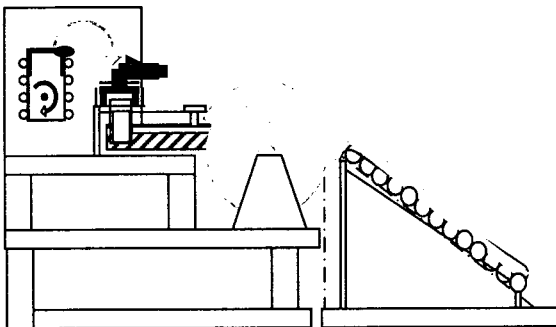


Fig. 1 Schematic diagram of melt drag casting facilities

그림 1은 본 연구에서 사용한 용탕인출 주조기의 개략도를 나타낸다. 용탕 주조 온도는 1580 $^{\circ}\text{C}$, 주조 속도는 약 2m/sec으로 제조하였다. 주조된 박판은 1100 $^{\circ}\text{C}$ 1시간 동안 균질화 처리를 하였고, 표면 개선을 위해 47, 56, 60, 66% 냉간 압연을 하였고, 1000, 1100, 1200 $^{\circ}\text{C}$ 에서 3시간 동안 열처리 후 로냉을 하였다.

용탕인출법으로 제조한 퍼말로이 박판의 자기적 특성을 측정하였고, 미세조직 관찰을 위하여 광학 현미경(OM), X선 분광기(XRD), 주사전자 현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM), EBSD(Electron Back-Scattered Diffraction) 등을 사용하였다.

3 실험결과 및 고찰

3.1 자기적 특성과 미세조직의 변화

용탕인출법에 의한 박판의 주조 조직은 급랭으로 인하여 수 마이크로에 달하는 미세 결정립으로 이루어져 있으나, 균질화 처리를 통하여 300 마이크로에 달하는 거대 결정립으로 성장하였다. 냉간압연으로 인하여 Ni-Fe의 (200)면으로 이루어진 조직을 보이지만, 이후 열처리 공정에서 재결정이 일어나며 결정립 미세화가 발생하였으며, XRD 결과를 통하여 이 조직은 (100)면을 위주로 발달하였음을 확인하였다. 뿐만 아니라 소둔 쌍정이 열처리 후의 시편에 다량 발견이 되었다. 최종 미세조직의 입도 크기와 자기적 특성을 각각 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 제조된 박판 중 상용 기준인 35000 이상의 효과투자율을 가지는 박판을 2% Si이 첨가된 조성에서 얻을 수 있었다.

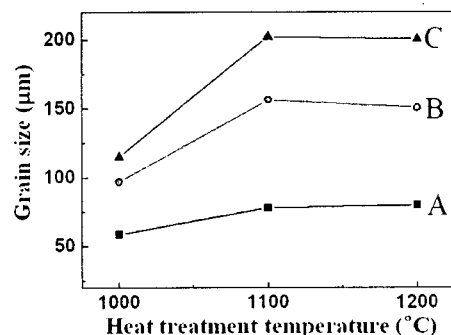


Fig. 2 Grain size variations after heat treatments for A, B, C alloys

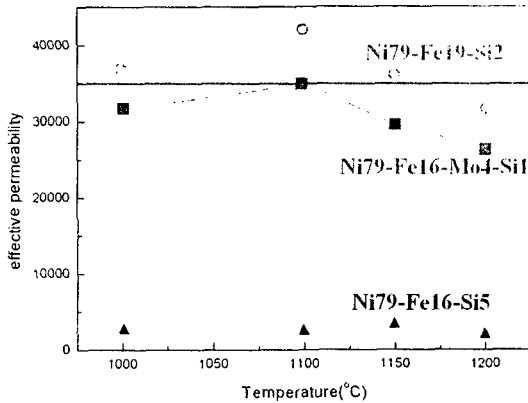


Fig. 3 Effective permeability of fabricated thin slabs according to composition and heat treatment temperature

일반적으로 자성특성에 영향을 미치는 구조적 인자 중 대표적인 것으로 결정립의 크기이다. 입계가 자성 도메인의 움직임을 방해하는 작용을 함으로 해서 총 입계 면적이 줄어드는 방향, 즉 큰 결정립 조직에서 우수한 자성 특성이 관찰된다. 본 연구에서도 1%Si를 함유한 박판보다 2%Si를 함유한 경우가 큰 결정립을 보이며 자성 특성 또한 우수하였다. 5%Si를 함유한 경우는 가장 큰 결정립을 가짐에도 불구하고 극히 저하된 자성 특성을 보였으며, 1, 2%Si 포함한 경우에도 1100°C 이상의 열처리를 통해 자성 특성이 감소하였다. 이들의 경우는 다음 절에 언급하였다.

각 조건의 박판에 대하여 EBSD를 사용하여 측정된 집합조직을 ODF(orientation distribution function)을 사용하여 정량화 하였다 (표 2).

Table 2 Volume percentages of texture components in thin slab after heat treatment.

Alloy & Heat treat. Temp. (°C)	{100} <001>	R{124} <211>	Others	Random
B-1000	0.46	13.74	14.0	71.8
B-1100	2.20	15.78	13.7	68.32
B-1200	0.30	16.66	15.9	67.14
A-1100	0	17.28	13.69	69.03
C-1100	0	12.66	12.91	74.4

면심입방 구조를 가지는 Ni 합금의 경우 결정

학적으로 <100> 방향에서 자화가 용이하고, <111> 방향으로 자화가 어려운 것으로 알려져 있다[3]. 본 연구에서 사용한 용탕 인출법의 경우 초기 시편의 두께가 얇음으로 인하여 압연량이 많지 않아 압연에 의한 집합 조직의 형성은 미미하며, 열처리 중 재결정에 의한 R{124}<211>의 집합조직이 일부 형성되었지만 random한 방향의 배열이 지배적이었다. 우수한 자성 특성을 보인 B 합금의 경우에 <100> 방향의 집합조직이 일부 관찰되며, 그 량이 자성 특성과 유사한 관계를 지닌다. 즉, 본 연구에서 제조한 퍼말로이의 경우 특정 방향으로 강한 자성을 띠는 이방성은 보여주지 않고 있다.

3.2 첨가 원소의 영향

용탕주조법에서 Si의 첨가는 응고 시에 mushy zone 확대하여 주조성을 향상시킨다. 또한, 그림 2에서 확인할 수 있듯이, 결정립의 크기를 증가시키는 효과를 보였다. 일반적으로 Si의 첨가는 Fe 합금에서 abnormal 결정립 성장을 통해 조대 결정립을 형성하거나, 용질 끌림 현상(Solute drag effect)에 의해 결정립 성장을 억제하는 효과를 보여주고 있으나, 본 연구에서와 같이 결정립 성장을 촉진하는 것에 대하여는 아직 명확히 밝혀진 바 없으며 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

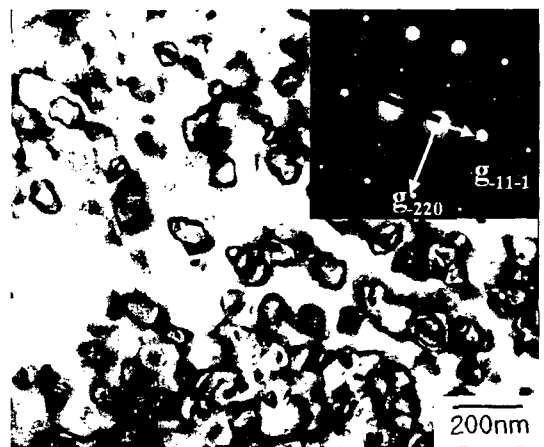


Fig. 4 Formation of Ni₃Fe ordered phase in alloy D.

Si 함량이 낮은 합금 영역에서는 결정립의 성장에 따라 자기적 특성이 함께 향상되었다. 그러나 Si 함량이 높은 C 합금의 경우 오히려 결정립이

가장 큼에도 불구하고 매우 낮은 자기적 특성을 보였다. 투과전자현미경을 이용하여 이들 시편의 차이를 관찰한 결과 C 합금에서 그림 4 와 같이 전형적인 Ni_3Fe 규칙격자가 다량으로 형성되었음을 알 수 있었다. 이 규칙 격자는 자기 이방성을 향상시킴으로써 투자율을 급격히 감소 시키는 것으로 C 합금에서 급격한 투자율의 감소의 원인이 된다[4].

3.3 열처리의 영향

용탕주조법으로 제조된 박판의 표면 거칠기를 향상시키기 위해 냉간 압연을 하였고, 압연 조직을 해소하기 위하여 진공 열처리를 수행하였다. 열처리 과정에서 결정립 내부에 자벽의 이동을 방해하는 변형이 해소되었지만, 재결정이 발생함으로 인하여 결정립 크기가 감소하였다. 그림 1 에 보인 바와 같이 A, B 합금의 경우 열처리 온도가 1100°C까지 증가할수록 결정립 크기는 증가하였으나, 그 이상의 온도에서는 결정립의 성장이 발생하지 않고 있다. 이는 자기적 특성에서도 유사한 경향을 보인다. 오히려 1100°C 이상의 온도에서 투자율이 저하되는 결과를 보이고 있다. 이러한 현상에 대한 이유로는 Si 첨가와 같이 Ni_3Fe 규칙격자의 형성을 들 수 있다. XRD 측정 결과에서 Ni-Fe 고용체와 Ni_3Fe 의 피크를 분리해 전체 넓이에 대한 Ni_3Fe 의 피크 넓이의 비율을 비교한 결과, B 합금의 경우 1000, 1100, 1200°C로 열처리 온도가 상승함에 따라 각각 0.23, 0.26, 0.40으로 상승하였다. 이러한 방법을 통한 규칙격자 비율의 정량화를 위한 식은 아직 확립되지 않았으나 열처리 온도가 증가함에 따라 규칙격자의 형성이 늘어남은 확인 할 수 있다.

Si이 Ni_3Fe 규칙격자의 형성을 촉진하는 원소로 알려져 있으나 그 양이 적으면 속도론적 제약으로 규칙격자의 형성이 힘들어 A, B 합금의 경우에 C 합금에 비하여 적은 양의 규칙격자가 생성되어 자성 특성의 저하가 두드러지지 않았다. 그러나 열처리 온도가 증가함에 따라 이러한 Ni_3Fe 규칙격자의 형성을 위한 제약을 약화시켜 투자율을

저하 시키는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 열처리후 로냉을 행하였으나, 박판의 열처리후 급랭을 시행한다면 높은 열처리 온도를 이용한 큰 결정립에서도 규칙격자가 없는 조직을 얻을 수 있어 자기적 특성의 향상이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

- (1) 용탕인출법을 이용하여 퍼말로이 박판을 성공적으로 제조하였으며, 기존의 공법으로 제조된 퍼말로이 합금과 거의 유사할 정도로 우수한 자성 특성을 나타내었다.
- (2) 퍼말로이에 첨가된 Si 는 결정립 크기를 증가시켜 투자율을 상승시키지만, 2% 이상이 첨가되면 Ni_3Fe 규칙격자를 형성하여 투자율을 크게 감소시켰다.
- (3) 퍼말로이 열처리 온도의 증가에 따라 결정립 크기가 증가하였지만 반면 규칙격자의 형성이 늘어나는 경향을 보였다. 이에 최적 열처리 온도는 1100°C임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업의 재정적 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) A. Tsaliovich, 1999, "Electromagnetic shielding handbook for wired and wireless EMC applications", Kluwer Academic Publisher.
- (2) F. Pfeiffer and C. Radeloff, 1980, J. Magn. Magn. Mater., Vol. 19, p190.
- (3) E. P. Wohlfarth, 1986, "Ferromagnetic materials", North-Holland physics publishing.
- (4) I.Chicinas, V. Pop, O. Isnard, J.M. Le Breton, J.Juraszek, 2003, Vol. 352, p34.