≪연구논문≫ Journal of The Korean Magnetics Society, Volume 11, Number 4, August 2001

가스분무법으로 제조한 MPP 분말코어의 자기적 특성에 미치는 열처리 효과

김구현 · 노태환*
안동대학교 공과대학 신소재공학부, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

김광윤
한국과학기술연구원 미래기술연구본부, 서울 성북구 하월곡동 39-1, 136-791

정인범 · 최광보
(주) 창성 중앙연구소, 인천시 남동구 남촌동 남동공단 11B-9L, 405-100

(2001년 5월 30일 받음, 2001년 8월 10일 최종수정본 받음)

가스분무법으로 만든 MPP 압분자심을 무자장 및 자장중에서 열처리한 후 냉각속도를 달리할 때 얻어지는 자기적 특성의 변화를 조사하였다. 무자장중에서 열처리시 냉각속도가 증가하면 교류투자율 및 자심손실이 감소하였으며, 이는 각각 빠른 냉각속도에서의 불균일한 내부응력의 발생과 이상 와전류손실의 감소에 기인하는 것으로 해석되었다. 한편 MPP 압분체를 무자장 열처리 후 냉각속도를 달리하여도 Ni-Fe 합금에서 전형적으로 나타나는 규칙상의 형성에 따른 자기적 특성의 변화는 보이지 않았으나, 느린 냉각속도의 조건하에서 자장열처리를 하면 용이하게 구성원자의 방향성 규칙화에 의해 유도자기이방성이 생성되며 상당한 투자율 및 자심손실의 변화가 얻어지는 것으로 관찰되었다.

주제어 : 가스분무법, MPP 분말코어, 자장열처리, 유도자기이방성

I. 서 론

일반적으로 자성재료는 주파수, 인가자장, 온도 등에 따라 투자율이 달라진다. 또 사용주파수가 높아지면 자심손실이 증가하게 되며, 특히 금속자성재료에서는 와전류손실이 커지게 된다. 따라서 가능한 한 투자율이 일정하고 손실이 적은 자심을 얻기 위해서, 오래 전부터 자성체를 분말화하여 전기절연재로 표면을 코팅한 성형체를 개발해 왔다.

공업적으로 이러한 압분자심(壓粉磁芯)을 생산하게 된 것은 1921년 미국에서 전해철분을 절연 압축한 것이 처음이며[1], 1927년에는 투자율이 큰 Ni-Fe계 퍼멀로이로 이를 만들기 시작하여 당시 전기통신분야의 발전에 크게 공헌하였다[2]. 1935년에는 독일의 지멘스사가 카보닐 철분을 이용한 분말코어를 개발하였다[3].

이와 같이 오래 전부터 등장한 압분자심은 역사적으로 전화통신선에 인덕턴스를 보충해 주므로서 신호주파수의 변화를 방지하는 통신용 장하코일(loading coil)로서 발전해 왔다. 그러나 현재는 산화물 자성재료(페라이트)의 발전 및 광통신 시대의 전개와 함께 이러한 용도로서의 압분자심의 역할은 거의 사라지게 되었다[4].

하지만 최근 들어 반도체소자의 발전과 함께 전자기기의 소형화, 고성능화를 실현시킬 자기코어로서 고기능성 금속 압분자심의 역할이 새롭게 부각되고 있다. 그 중요한 응용의 일례로, 전자기기의 노이즈를 방지하는 노이즈 필터를 들 수 있다[4]. 즉 스위칭 전원의 고주파화에 따른 노이즈 문제에 대응하기 위해 자속밀도가 커 포화되기 어렵고 저손실이면서 직류중첩특성이 좋은 압분자심이 많이 사용되게 되었다. 그리고 스위칭전원의 평활용 쵸크코일이나 에어컨, 냉장고, 세탁기 등 인버터 방식의 가전제품에 있는 PFC(Power Factor Correction) 회로부의 리액터로서도 그 중요성이 더해 가고 있다[5].

이 용도에 사용되는 압분자심의 특징으로는, 반자장이 큰 분말의 집합체로 되어 있어 자화곡선의 선형성이 좋고 투자율의 자장에 대한 일정성이 확보되며, 공극의 3차원적인 분산에 따라 통상의 갭형 자기코어에서 나타나는 누설자속(fringing flux)이 없다는 것을 들 수 있다. 그 외 고주파손실 특히 와전류손실이 적으며, 재료에 따라 포화자속밀도가 커 불포화영역 ΔB의 크기가 크고, 동작점에 있어서의 증분투자율($\mu_\Delta = \Delta B/\Delta H$)이 크다는 점도 중요하다.

*Tel: 054-820-5755, E-mail: thnoh@andong.ac.kr

현재 사용되고 있는 압분자심을 재료별로 나눠 보면 철계, MPP를 포함한 퍼멀로이계 및 센더스트계 등이 있는데[6, 7], 그 중 MPP(molybdenum permalloy powder cores)는 Mo을 소량 함유하는 고 Ni계 퍼멀로이 분말을 절연물질로 피복한 후 압축성형하여 만든 고주파용 자심재료로서, 아주 높은 품질계수 Q 값, 낮은 자심손실, 양호한 주파수 특성, 온도 및 교류자속에 대한 매우 큰 안정성 등을 가지고 있어 공업적으로 가장 중요한 압분자심 재료이다[8].

이러한 MPP 코어의 제조는 전통적으로 미국의 경우 주조, 압연후 파쇄의 방법을 많이 써 왔으며, 또 이 제조공법에 관련된 기술사항은 비교적 잘 알려져 있다[6, 7]. 그러나 근래 각국에서는 수분무법(water atomization)이나 가스분무법(gas atomization)에 의한 분말제조법이 널리 도입되고 있으며 이 방법에 의해 우수한 MPP용 분말이 제조되고 있으나, 그 기술적 및 학술적 내용은 거의 알려져 있지 않고 있으며 특히 국내에서는 아직 전혀 보고된 바가 없다.

이에 본 연구에서는 가스분무법으로 만든 MPP 분말코어를 여러 가지 방법으로 열처리할 때 나타나는 자기적 성질의 변화를 검토하여, 향후 보다 다양한 자성을 가진 MPP 코어를 만들기 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

II. 실험방법

본 연구에서 사용한 MPP 코어의 원료분말은 분사압 6~7 kgf/cm^{2}의 질소가스 분무법으로 제조하며, 81%Ni-17%Fe-2%Mo(wt%)의 조성을 가진다. 압분체는 원료분말에 물유리를 기본으로 하는 절연 세라믹혼합물을 습식법으로 코팅한 후 기계식 프레스로 8~10 ton/cm^{2}의 압력을 가하여 토로이드 모양(외경 23.6 mm, 내경 14.4 mm, 높이 8.9 mm)으로 성형하였다. 이 때 분말 대비 총 세라믹량은 1 wt% 정도로 하였다.

Fig. 1은 실험 재료로 사용한 압분자심의 미세조직 사진으로, 퍼멀로이 분말모재(회색) 및 공극 등을 볼 수 있다. 그러나 분말표면에 얇은 층으로 분포하는 세라믹 코팅재는 이 그림에서는 정확히 관찰되지 않고 있다. 입자의 직경은 평균 60 μm 정도이나, 실제 100 μm 전후에서부터 상당히 작은 입자에 이르기까지 꽤 넓은 분포를 하고 있음을 볼 수 있다.

압분성형체는 무유도 관상로를 사용하여 650°C에서 30~210분간 열처리 시간(t_a)을 변화시켜 가면서 질소분위기중에서 어닐링하였으며, 열처리 후에는 수냉(water quenching, WQ), 공냉(air cooling, AC), 노냉(furnace cooling, FC) 등을 하여 자성체에 대한 냉각속도를 변화시켰다.

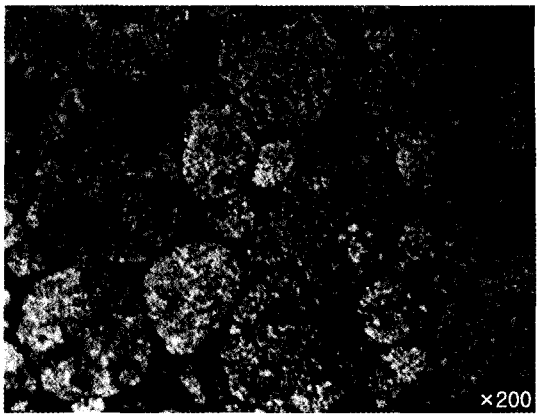

Fig. 1. Optical micrograph of MPP core.

자장열처리는 자장인가용 코일이 수냉되는 자장열처리 전용로를 사용하여 수행되었으며, 어닐링중은 물론 냉각시에도 계속해서 토로이드의 높이방향으로 1 kOe의 자장을 인가하였다.

열처리한 시료는 직경 0.25 mm의 동선으로 1, 2차 코일을 각각 50회씩 감은 후, DC 자기이력곡선 측정기(Toei TRF-5AH1)를 사용하여 초투자율(μ_i)과 보자력(H_c)을 측정하였으며, LCR 미터(HP 4284A)로 구한 인덕턴스 L [nH]로부터 다음 식에 의해 교류투자율(μ_{ac})을 계산하였다.

$$\mu_{ac}=\frac{Ll}{4\pi AN^2}$$

여기서 A는 시료의 유효 단면적 [cm^2], l은 평균자로의 길이 [cm], N은 코일 권선수이다.

또 직류중첩특성을 20 Oe의 직류자장이 인가된 가운데 100 kHz에서의 교류투자율을 측정한 다음 이의 저주파 투자율에 대한 비로 나타내는 퍼센트 투자율로 구하였고, B-H 분석기(Iwatsu SY-8216)를 사용하여 50 kHz의 주파수 및 1 kG의 자기유도 조건에서 자심손실(P_L)을 측정하였다.

모든 시료는 각각 3개씩 동일 조건에서 만들어 특성을 측정한 후 평균하였다.

III. 실험결과 및 고찰

먼저 본실험을 하기 전에 적정 어닐링 시간(t_a)을 구하기 위해, 수냉시료를 사용하여 열처리 시간에 따른 투자율

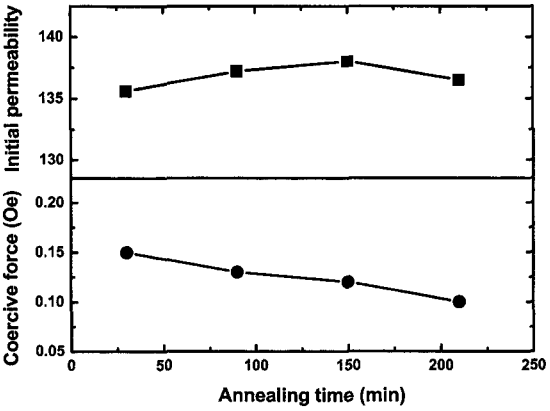

Fig. 2. Initial permeability and coercive force as a function of annealing time for MPP cores annealed at 650°C upon water quenching.

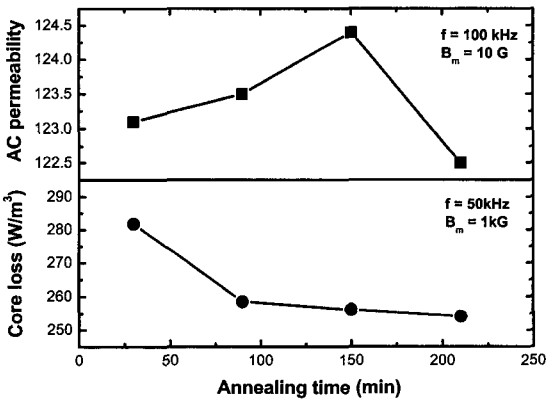

Fig. 3. AC permeability and core loss as a function of annealing time for MPP cores annealed at 650°C upon water quenching.

및 보자력의 변화를 조사하였으며 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

어닐링 시간의 증가에 따라 초투자율은 증가하고 보자력은 감소하고 있는데, 이러한 변화는 분말재료의 고압 성형시 발생한 내부변형 및 응력의 완화에 기인하는 것으로 생각된다. 단 t_a가 150분 이상이 되면 보자력은 계속 감소하나 투자율이 약간 낮아지는 경향을 나타내고 있어 적정 열처리 시간은 150분 정도로 보여진다. 여기서 어닐링 시간이 상당히 길어질 때 투자율이 다시 감소하는 이유는 현재 분명하지가 않다.

Fig. 3은 어닐링 시간에 따른 교류투자율과 자심손실의 변화를 나타내고 있다. Fig. 2와 마찬가지로 150분 정도의 열처리 시간에서 가장 높은 투자율이 얻어지고 자심손실

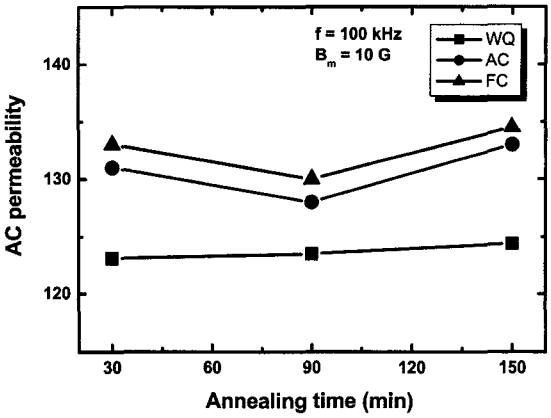

Fig. 4. AC permeability as a function of annealing time for MPP cores annealed at 650°C upon various cooling processes.

또한 극소화된다. 이 때 자심손실은 210분의 열처리에서 약간 더 저하되는 경향이 보이기는 하나 150분의 경우와 큰 차이는 없다.

이상의 결과로서 고압 성형된 MPP 코어의 자기적 성질을 개선하는데 필요한 어닐링 시간의 길이는 대략 150분 정도로서 충분한 것으로 판단되었다.

Fig. 4는 650°C에서 압분자심을 어닐링한 후, 각각 수냉, 공냉, 노냉을 통하여 냉각속도를 바꾸어 가면서 냉각시켰을 때 얻어지는 교류투자율의 t_a 의존성을 보여주고 있는데, 세 경우 모두 어닐링 시간이 증가하면서 투자율이 증가하고 있다. 단 일반적인 80%Ni-Fe 퍼멀로이라면 냉각속도를 빨리하는 경우 Ni_3Fe 규칙격자상의 형성이 억제되어 투자율이 상승할 것으로 기대되나[9], 본 연구에서 사용한 MPP 합금의 경우 이러한 현상은 관찰되지 않았고 냉각속도가 빠른 수냉의 경우가 가장 투자율이 낮고 냉각속도가 가장 느린 노냉의 경우 가장 높은 투자율을 나타내었다.

이와 같이 MPP 압분자심 재료의 경우 규칙상 형성에 의한 투자율 변화효과가 거의 관찰되지 않는 것은 이 합금의 조성에 Mo이 첨가되어 있어 냉각속도의 민감성이 낮아졌기 때문으로 보이며[10], 결국 Fig. 4와 같이 냉각속도가 증가하면서 투자율이 저하되는 것은 불균일한 내부응력의 발생이 증가되기 때문으로 판단된다.

한편 Fig. 5는 냉각속도의 변화에 따른 자심손실의 변화를 보여주는 것으로, 세 가지 냉각방법 모두 t_a 증가에 따라 손실이 감소하고 있으나, 그 중 냉각속도가 가장 빠른 수냉의 경우 자심손실이 가장 적으며 반대로 노냉의 경우는 아주 큰 자심손실을 나타낸다. 이는 대개 높은 교류

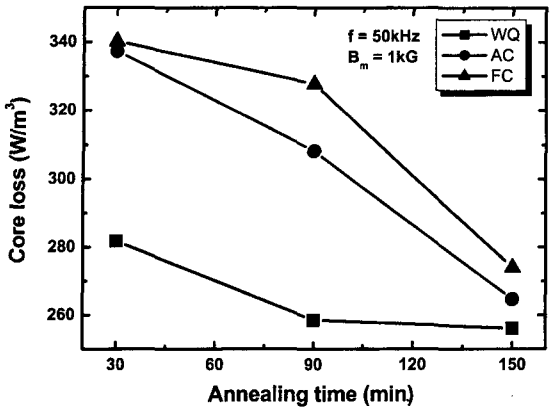

Fig. 5. Core loss as a function of annealing time for MPP cores annealed at 650°C upon various cooling processes.

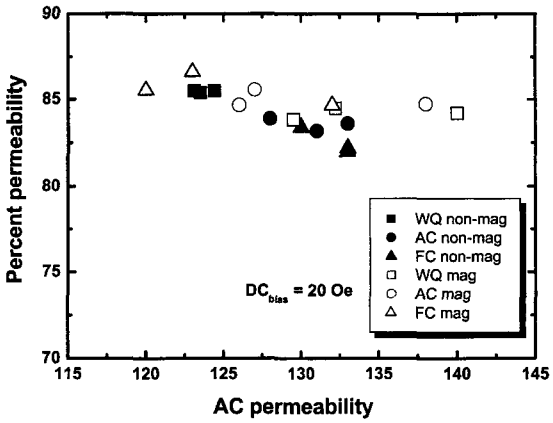

Fig. 6. Percent permeability of MPP cores annealed at 650°C. The annealing was carried out in magnetic or non-magnetic field.

투자율을 가지면 교류자심손실도 작을 것이라는 일반적인 기대와는 반대되는 현상으로, 그 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다.

연자성 재료의 자심손실은 자기이력손실, 와전류손실, 그리고 잔류손실 등으로 나뉘어지나 금속의 경우는 자기이력손실과 와전류손실이 중요하다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 냉각속도가 느린 노냉시료의 경우 높은 투자율이 얻어지는 것으로 보아 자기이력손실이 상대적으로 낮을 것으로 생각해 볼 수 있다. 그렇다면 노냉 시료에서 큰 자심손실이 얻어지고 수냉 합금에서 낮은 손실 값이 나타나는 것은 와전류손실의 크기에 의해 결정되고 있으리라는 추정이 가능해진다.

와전류손실에 관한 이론에 의하면 균일자화에 의해 일어나는 와전류손실은 자성체의 모양과 크기, 주파수, 유도자속의 크기, 전기비저항 등에 의해 결정되는 것으로 이들은 현재의 실험조건에서 냉각속도에 대한 의존성이 없다. 여기서 전기비저항은 냉각속도에 따라 격자규칙도의 변화가 있으면 달라질 수 있으나, 본 실험결과(Fig. 4)에서는 규칙격자의 형성을 나타내는 자기적 특성의 변화가 관찰되지 않았기 때문에 별로 변화가 없는 것으로 간주하였다.

그런데 자벽이 존재하여 국소적인 스핀회전에 의해 자화가 진행되는 소위 불균일 자화의 경우 국소적으로 흐르는 미시적 와전류가 중요해지며, 이에 의한 손실을 이상 와전류손실이라고 한다[11].

Fig. 1에서 보는 바와 같이 MPP 코어의 미세입자는 주로 수 십 μm 정도의 크기를 가지므로, 단자구 입자와는 거리가 멀다(결정자기이방성이 큰 영구자석의 단자구 입자의 크기가 대략 1 μm 전후[12]이고 연자성체는 이 보다 더 작음). 따라서 이 재료에는 많은 자벽이 존재하며 교류자화과정에 이들 자벽의 이동이 상당한 정도로 기여하리라고 생각된다.

따라서 Fig. 5에서 수냉 합금의 경우 자심손실이 작은 것은 이상 와전류손실이 낮아 얻어진 결과로 해석되어야 하며, 결국 이 합금에서는 자벽이동이 쉽지 않음을 의미한다. Fig. 4에서 수냉시료의 경우 투자율이 낮음은 바로 이와 같은 설명을 뒷받침해 주는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 직류중첩특성을 나타내는 퍼센트 투자율의 냉각속도 의존성을 측정한 것으로, 무자장중에서 열처리할 때 냉각속도가 빠른 수냉 합금의 경우 비록 교류투자율은 약간 낮지만 보다 우수한 직류중첩 특성을 나타내고 있으

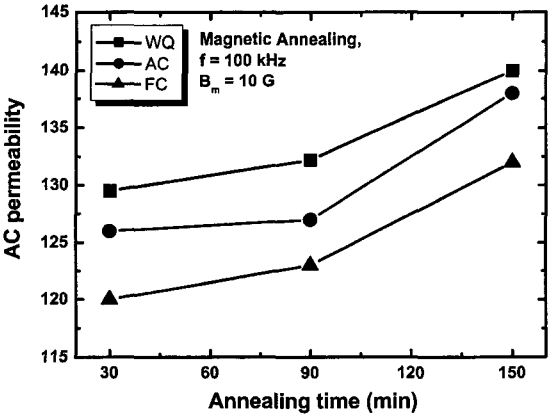

Fig. 7. AC permeability as a function of annealing time for MPP cores magnetic-annealed at 650°C upon various cooling processes.

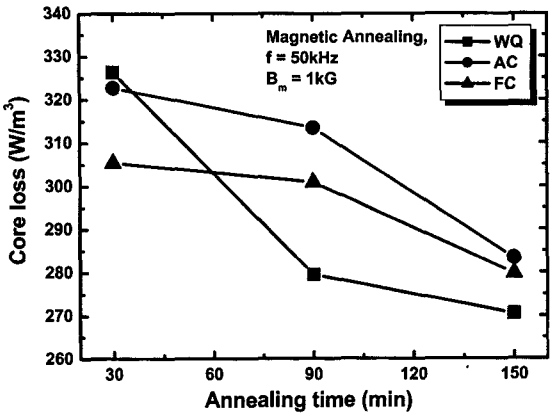

Fig. 8. Core loss as a function of annealing time for MPP cores magnetic-annealed at 650°C upon various cooling processes.

며, 노냉 시료의 경우는 그 반대 경향을 보여주고 있다.

Fig. 7은 자장중에서 어닐링한 후 각각 수냉, 공냉, 노냉을 한 세 종류의 합금이 나타내는 교류투자율의 어닐링시간 의존성을 보여주고 있다. t_a의 증가에 따라 모두 투자율이 높아지고 있으나, 그 크기는 수냉한 경우에 가장 크고 노냉한 합금에서 가장 낮은 값이 얻어졌다. 이는 Fig. 4의 결과와 반대되는 것으로서, 노냉한 경우 투자율이 낮아진 것은 인가자장의 방향(토로이드의 높이 방향)으로 유도자기이방성이 발생되어 측정자장의 방향(토로이드의 원주 방향)으로 자화가 어려워졌기 때문으로 생각된다. 반면 수냉 및 공냉을 한 합금은 냉각속도가 상대적으로 빨라 유도자기이방성이 생성이 억제되어 측정방향으로의 자화가 어려워지지 않을 것으로 생각되며, 그 결과 비교적 큰 투자율이 얻어진 것으로 보인다.

Fig. 8은 자장열처리 후 냉각속도가 다른 시료의 자심손실을 나타낸 것으로 냉각속도가 빨라 자장열처리 효과가 그리 크지 않으리라고 생각되는 수냉 합금의 손실이 가장 작고, 상대적으로 자장열처리 효과가 큰 노냉 합금의 경우 손실이 크게 나타났다. 후자의 합금의 손실은 아마도 본래 큰 이상 와전류손실에다 유도자기이방성의 생성으로 증가된 이력손실이 덧붙여져 얻어진 것으로 생각되어진다.

자장열처리후 얻어지는 직류중첩 특성의 투자율 의존성은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 무자장중에서 열처리했을 경우와 크게 다르지 않았다.

이상의 실험 결과에서 보듯이 MPP 분말코어의 자기적 특성은 보통의 비정질 리본합금이나 퍼멀로이 등의 연자성 재료와 달리 상당히 복잡한 양상을 나타내므로, 이를 보다 명확히 설명하기 위해서는 자구구조 등에 관한 추가적인 연구가 요구된다. 현재 MPP 코어의 자구구조 관찰을 위한 실험이 진행중에 있다.

IV. 결 론

가스분무법으로 만든 MPP 압분자심을 무자장 및 자장중에서 열처리한 후 냉각속도를 달리할 때 얻어지는 자기적 특성의 변화를 조사하였으며, 그 주된 결과는 다음과 같다.

1) 무자장 중에서 열처리할 때 냉각속도가 증가하면 불균일한 내부응력의 발생에 의해 교류투자율이 감소하였다. 또 냉각속도가 높으면 자심손실이 감소하였는데 이는 이상 와전류손실의 감소에 기인하는 것으로 해석하였다.

2) MPP 압분체의 경우는 열처리 후 냉각속도를 달리하여도, Ni-Fe 합금에서 전형적으로 나타나는 규칙상의 형성에 따른 자기적 특성의 변화는 관찰되지 않았다.

3) 냉각속도에 따라 그 경향은 다르나 MPP 합금을 자장 중에서 열처리할 경우 상당한 투자율의 변화가 나타나는 바, 이로부터 이 합금은 자장중에서 용이하게 구성원자의 방향성 규칙화에 의해 유도자기이방성이 생성되고 자성의 변화가 얻어질 수 있는 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

[1] B. Speed and G. W. Elmen, Trans. AIEE, **40**, 1312(1921).
[2] W. J. Shackelton and I. G. Barber, Trans. AIEE, **47**, 429 (1928).
[3] A. Weis, El. Nach. T., **12**, 47(1935).
[4] 岡部政和, 日本應用磁氣學會誌, **9**, 355(1985).
[5] SMPS 세미나I 텍스트 : 역률개선대책 및 분말자성코아의 이용(2000. 11) pp. 103-132.
[6] C. Heck, Magnetic Materials and their Applications, Butterworth, London (1974) pp. 430-456.
[7] A. Goldman, Handbook of Modern Ferromagnetic Materials, Kluwer Academic Publishers, Boston (1999) pp. 183-205.
[8] The Arnold Engineering Co., Magnetic Powder Cores Catalogue (1998).
[9] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE Press, New York (1993) pp. 114-115.
[10] R. A. McCurrie, Ferromagnetic Materials : Structure and Properties, Academic Press, San Diego (1994) pp. 40-43.
[11] B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley, Reading (1972) pp. 446-453.
[12] 김영희, 자기 및 자성재료, 반도출판사, 서울 (1997) pp. 120-122.

한국자기학회지 Volume 11, Number 4, August 2001

The Effects of Heat-treatment on Magnetic Properties for Gas-atomized MPP Dust Cores

G. H. Kim and T. H. Noh*

Department of Metallurgical Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

K. Y. Kim

Future Technology Research Division, KIST, Seoul 136-791, Korea

I. B. Jeong and G. B. Choi

Research Center, Changsung, Incheon 405-100

(Received 30 May 2001, in final form10 August 2001)

The effects of heat-treatment with magnetic or non-magnetic field on magnetic properties of gas-atomized MPP dust cores subjected to various cooling processes after annealing were investigated. Upon magnetic-field annealing, ac permeability and core loss decreased with the increase of cooling rate, which were attributed to the generation of inhomogeneous internal stress and anomalous eddy current loss, respectively. It was not observed the formation of ordered phase and the related change in magnetic properties at the cooling stage for MPP dust cores. In MPP alloys, magnetic anisotropy was easily induced through the directional order, and permeability and core loss were changed under the conditions of low cooling rate and magnetic annealing.

Key words : gas-atomized, MPP dust cores, magnetic field annealing anisotropy