

가스 분무법으로 제조된 Ni_xFe_{100-x} ($x=40\sim50$) 퍼멀로이 분말 및 압분 코아의 자기적 특성

노태환 · 김구현

안동대학교 신소재공학부, 경북 안동시 송천동 388, 760-749

최광보

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

김광윤*

한국과학기술연구원 나노소재연구센터, 서울 성북구 하월곡동 39-1, 136-791

(2002년 9월 11일 받음, 2002년 11월 20일 최종수정본 받음)

가스 분무법으로 제조한 High-Flux형 Ni_xFe_{100-x} ($x=40\sim50$, wt.%) 퍼멀로이 분말 및 압분 코아의 자기적 특성을 조사하였다. 포화자화는 45%Ni 조성에서 최대값을 보이며 이보다 Ni 함량이 낮아지면 인바 효과의 작용에 의해 급격하게 감소하였다. 압분 코아의 투자율은 Ni 농도가 낮아지면 현저히 증가하는 바 이는 자기변형의 감소에 기인하는 것으로 사료되었으며, 자심손실은 Ni=45%에서 가장 낮은 값을 나타내었다. Ni 농도가 50%에서 45%로 낮아짐에 따라 자심손실이 감소하는 주 원인은 전기 비저항의 증대에 따른 와전류 손실의 감소에 있는 것으로 생각되었다. Ni=45% 분말 합금으로 만든 압분 코아는 Ni=50%의 경우보다 더 우수한 투자율의 주파수 의존성, 큰 Q 값, 그리고 더 나은 직류 바이어스 특성을 나타내어 상용 High-Flux 코아(50%Ni-50%Fe)에 비해 더 좋은 압분 자심 재료가 될 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 가스 분무법, Ni-Fe 분말, 압분 자심, High-Flux 코아, 자심손실, 직류 바이어스 특성

I. 서 론

대표적인 금속계 연자성재료의 하나인 Ni-Fe 퍼멀로이는 주로 박판으로 사용되면서 각종 변성기, 리액터 및 센서 재료로 널리 이용되고 있으나, 전기저항이 작아 고주파에서의 와전류손실이 크고 투자율 및 자심손실의 주파수 의존성이 나쁘다는 단점을 갖는다. 그런데 이 퍼멀로이를 분말화하여 표면을 절연처리한 압분 자심은 높은 사용주파수까지 자심손실이 적고 일정한 투자율을 얻을 수 있으며 직류 바이어스에도 높은 자기적 안정성을 유지할 수 있어 노이즈 필터, 초크 코일 및 PFC(Power Factor Correction) 회로부의 리액터 등으로 유효하게 사용된다[1-4].

통상 MPP(Molybdenum Permalloy Powder) 코아라고 부르는 Ni-Fe 퍼멀로이계 압분 자심은 81%Ni-17%Fe-2%Mo (wt.%)의 조성을 가지며, 포화자속밀도가 7.5 kG, 투자율은 분말입도나 코아 제조조건에 따라 달라지나 대략 14~550의 것이 제공된다[3]. 문헌에 의하면 Ni-Fe 퍼멀로이계 합금은 약 80%Ni 근방의 조성에서 결정 자기이방성과 자기변형이 0이 되어, 이 부근의 조성영역에서 아주 높은 투자율이 얻어지고

자기적 손실도 낮아진다. 첨가원소인 Mo은 Ni-Fe 합금에서 일어날 수 있는 Ni-Fe 원자간의 바람직하지 않은 단범위 및 장범위의 결정학적 규칙화를 억제하여 초투자율을 증가시키고, 전자산란체로서 전기 비저항을 높이므로 와전류손실을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 상기 MPP 합금은 이러한 조성 원소들의 역할에 기초하여 만들어진 것이다[5].

한편 이러한 MPP 분말 이외에 Ni-Fe계 퍼멀로이 합금의 압분 코아 재료로서 근래 50%Ni-50%Fe(wt.%) 조성의 분말도 사용되고 있다[6, 7]. 일반적으로 High-Flux Core(또는 HI-FLUX core)라고 하는 이 50%Ni-50%Fe 합금 압분 자심은 MPP 코아보다 훨씬 큰 약 15 kG의 포화자속밀도를 가지고 있어 대단히 우수한 DC 바이어스 안정성을 가지며, 포화를 일으키지 않고 보다 큰 DC 전압이 인가되는 조건에서 사용될 수 있다. 또 MPP에 비하여 필터로 사용할 경우 보다 적은 권선수를 적용할 수 있어 부품 크기가 줄어들게 되는 장점도 있다. 그리고 코스트의 측면에서도 고가의 Ni를 적게 사용하므로 MPP보다 매우 유리하다.

그러나 이 High-Flux 합금은 MPP 코아 재료에 비해 결정 자기이방성 및 자기변형이 큰 조성 영역에 속하여 고투자율 특성을 얻기가 어려우므로, 상용으로 제공되는 코아의 투자율 범위가 MPP에 비하여 좁아지며(14~160 정도) 자심손실도 크다.

*Tel: (02) 958-5414, E-mail: kykim@kist.re.kr

본 연구에서는 판재를 분쇄하여 분말을 제조하는 방법 대신 분무법으로 제조한 High-Flux형 분말의 자기적 특성 및 분말 코아의 특성을 처음으로 보고하는 바, 현재 일반적으로 사용하고 있는 50%Ni-50%Fe 합금 코아의 위에 든 특성과 장점을 보다 고도화 시키기 위하여 Ni를 40~50%의 범위에서 변화시켜(즉 Ni의 함량을 보다 낮은 쪽으로 이동시키면서) 그 분말 및 압분 코아의 자기적 특성을 조사하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서 사용한 Ni-Fe(Ni 40~50 wt.%)의 2원계 합금 분말은 분사압 5~7 kgf/cm²의 질소가스 분무법으로 500 kg 이상 대량 제조하였으며, Fig. 1에 대표적 형상의 일례를 나타내었다. 분무분의 모양은 구형이며, 직경은 20~80 μm의 범위에 있다. 하지만 실제 코아 제조는 다양한 분말크기를 갖는 것을 혼합하여 사용하였다.

압분체는 원료분말에 물유리를 기본으로 하는 절연 세라믹 혼합물을 습식법으로 코팅한 후 기계식 프레스법으로 8~10 ton/cm²의 압력을 가하여 토로이드 모양(외경 23.6 mm, 내경 14.4 mm, 높이 8.8 mm)으로 성형하였다. 이 때 분말 대비 세라믹 물질의 양은 0.25 wt.% 정도로 하였으며, 약 0.3%의 윤활제를 첨가하였다.

압분 성형체는 무유도 관상로를 사용하여 880°C에서 30분간 질소분위기 열처리를 하였다. 제조된 합금 분말은 먼저 X-선 회절분석을 통하여 결정상(결정구조) 및 격자상수의 변화를 Ni 농도의 함수로서 조사하였다. 분말의 자기적 특성은 진동시료형 자력계(Toci VSM-5)로 포화자화 M_s 와 보자력 H_c 를 측정하였으며, 성형한 코아를 열처리한 시료는 직경 0.25 mm의 동선으로 1, 2차 코일을 각각 50회 감은 후 LCR 미터(HP 4284A)로 구한 인덕턴스 $L[\mu H]$ 로부터 다음 식에

의해 교류 투자율 μ_{ac} 을 계산하였고 동시에 품질계수(quality factor) Q 값을 측정하였다.

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

여기서 A 는 코아의 유효 단면적[cm²], l 은 평균 자로의 길이[cm], N 은 코일 권선수이다. 또 직류바이어스 특성을 20 A의 직류가 인가된 가운데 100 kHz의 주파수에서 측정하였으며, B-H 분석기(Iwatsu SY-8216)를 사용하여 50 kHz의 주파수 및 1 kG의 자기유도 조건에서 자심손실을 측정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 Ni-Fe 합금계에서 Ni 함량이 40~44%로 변화할 때의 결정구조의 변화를 나타낸 것이다. 상온에서의 Ni-Fe 합금의 결정상은 Ni 조성에 따라 크게 두 종류로 나뉘어 Ni이 0~30% 정도인 Fe측 합금은 체심입방격자(BCC)를 가지며 40~100%Ni의 조성에서는 균일한 면심입방격자(FCC)의 고용체를 만드는 것으로 알려져 있는데[8], 이 그림에서 보는 바와 같이 가스분무법으로 만든 분말 합금에서도 역시 40% Ni의 조성에 이르기까지 FCC 결정상을 그대로 유지하고 있다. 이 때 격자상수는 Fig. 3에서와 같이 Ni 농도의 감소에 따라 거의 직선적으로 증가하여 40% Ni이 되면 3.596 Å에 이르게 되며, 이 조성영역에서의 결정구조에 어떤 변화도 없음을 시사하고 있다.

한편 이 조성 영역에서의 포화자화를 측정해 보면 결정구조의 일정성과 달리, Fig. 4에 보는 바와 같이 Ni 농도에 따른 포화자화(인가자장: 10 kOe)가 상당한 변화를 하고 있다. 물론 변화량 그 자체가 크지는 않으나, Ni 농도의 감소에 따라 포화자화가 증가하여 45% 근방의 조성에서 최대 값을 보

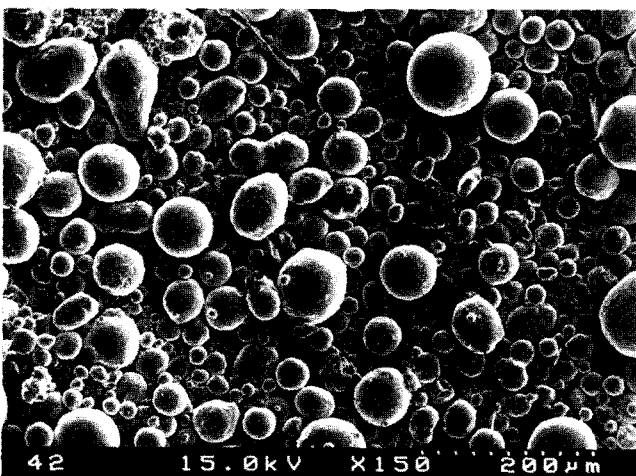


Fig. 1. The shape of gas-atomized 42% Ni-Fe permalloy powders.

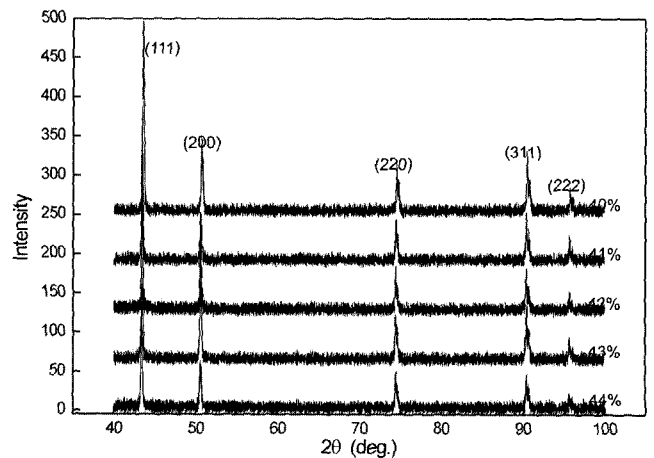


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of Ni-Fe(Ni=40~44%) permalloy powders.

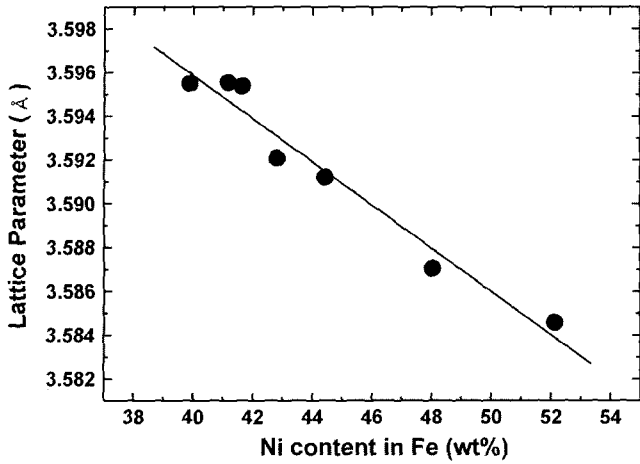


Fig. 3. The variation of lattice parameter with Ni content in Ni-Fe powder alloys.

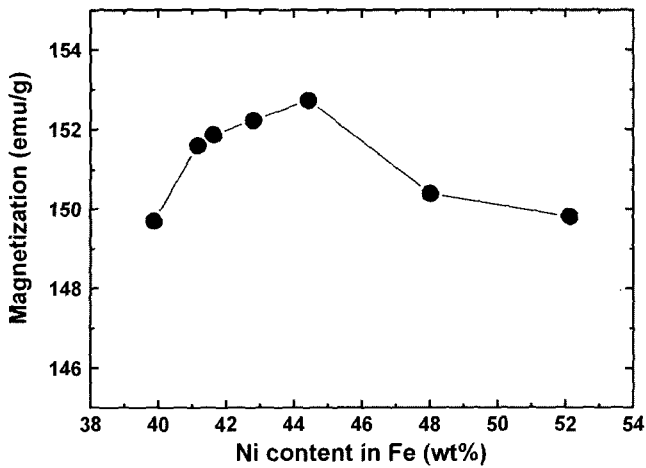


Fig. 4. The variation of saturation magnetization with Ni content in Ni-Fe powder alloys.

인 후, Ni 농도가 더욱 감소하면 포화자화는 오히려 감소하게 된다.

Fe에 소량의 Ni를 첨가할 경우 포화자화는 Slater-Pauling 곡선을 따라 약간 상승하나 Ni 농도가 높아지면 거의 직선적으로 감소하고, 약 30%Ni 지점에 이르면 큐리온도가 비정상적으로 낮아지면서 상온의 포화자화 또한 급격하게 작아지는 이상거동이 나타난다. Ni축에서의 변화도 마찬가지로 Ni이 40% 이하가 되면 포화자화와 큐리온도가 급격히 저하되는 소위 인바 효과(invar effect)가 나타난다[9]. Fig. 4에서 관찰되는 저 Ni 축에서의 포화자화의 감소는 바로 이와 같은 효과의 작용에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 5는 최대 10 kOe의 자장을 가하여 측정한 분말 보자력의 Ni 농도 의존성을 보여주고 있다. 대략 2~3 Oe의 크기를 가지는데, 전체적으로 보아 그 변화 경향은 뚜렷하지 않으나 Ni 농도의 감소에 따라 약간 보자력이 감소하고 있음을

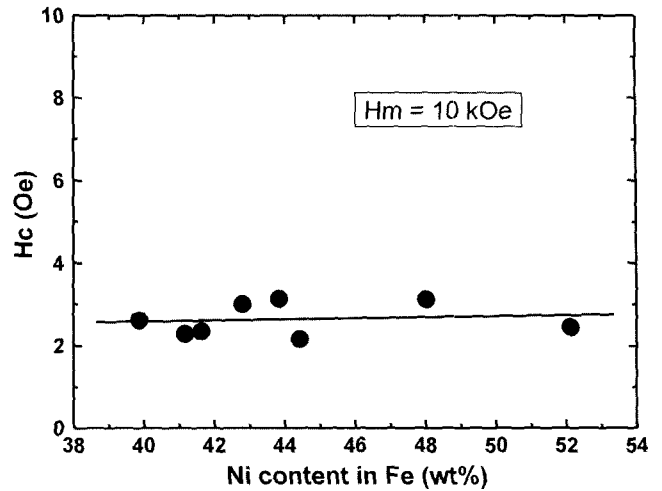


Fig. 5. The variation of coercive force with Ni content in Ni-Fe powder alloys.

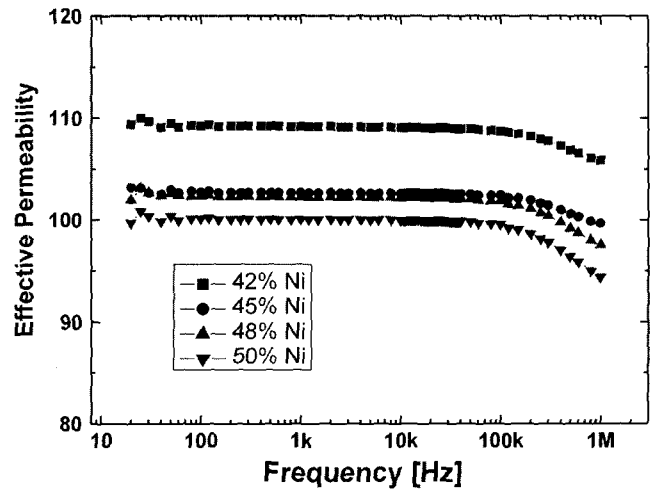


Fig. 6. The frequency dependence of effective permeability in Ni-Fe(Ni=42, 45, 48, 50 %) powder cores.

보여주고 있다.

이상과 같이 가스 분무법으로 제조한 분말의 자기적 특성은 문헌상에서 보고한 판재의 특성과 Ni 함량에 따른 자기적 특성의 변화 경향이 큰 차이가 없음을 알 수 있었다[9].

Fig. 6은 앞에서 언급한 분말을 사용하여 제조한 압분 코어의 Ni 조성에 따른 실효투자율의 주파수 의존성을 나타내고 있다. 20 kHz에서의 투자율을 기준으로 해 볼 때, 50%Ni 함금이 가장 낮고 Ni 농도가 감소하면 투자율이 높아짐을 알 수 있다. 이러한 투자율의 변화의 원인을 지금 명확히 이해하기는 무척 어려우나, Ni의 감소에 따른 투자율의 증가는 자기변형의 감소와 관련이 있는 것으로 추정된다. 왜냐하면 Ni-Fe 2원계 합금의 결정 자기이방성은 42~50%Ni의 조성 범위에서 약간 증가하거나 거의 변화하지 않는 경향을 나타내나

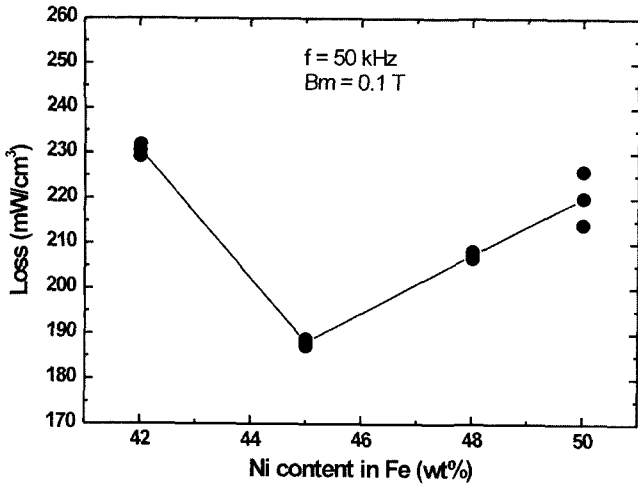


Fig. 7. The variation of core loss with Ni content in Ni-Fe powder cores.

자기변형은 상당히 그 값이 감소하기 때문이다[10, 11].

Fig. 6에서 언급할 또 다른 사실은 Ni이 48, 50 %일 때의 주파수 의존성과 42 및 45 %일 때의 주파수 의존성의 100 kHz 이상에서 다르게 나타난다는 것이다. 즉 후자의 경우, 보다 더 주파수 증가에 따른 실효 투자율의 저하 속도가 낮아지고 있는데 이는 저 Ni 합금에서 얻어지는 높은 전기 비저항에 따른 와전류 발생의 억제와 관련이 있는 것으로 사료된다. 실제 0 °C에서 Ni-Fe 2원합금의 전기 비저항은 Ni이 50 %일 때 $32 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이나 40 %이면 $55 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 으로 증가하기 때문이다[12].

Fig. 7은 Ni 농도의 변화에 따른 자심손실의 변화를 조사한 것이다. Ni=50 %일 때의 자심손실이 약 220 mW/cm^3 인데 대하여 Ni 농도가 감소하면 자심손실도 감소하여 45 % Ni 합금에서는 190 mW/cm^3 이하로 낮아지고 있다. 이러한 에너지 손실의 감소는 위의 투자율의 조성의존성에서 설명한 바와 Q 같이 Ni 농도가 낮아짐에 따른 연자성의 향상과 이에 따른 자기이력손실의 감소 및 전기 비저항의 증가에 따른 와전류손실의 감소에 기인하는 것으로 생각된다. 그러나 이 그림에서 Ni이 42 %로 감소하면 자심손실이 도리어 증가하는 것으로 나타나는데, 현재 이의 원인에 대해서는 정확히 말할 수가 없으나 다만 Fig. 6의 투자율의 변화에서 보듯이 다른 세 종류의 합금에 비해 Ni=42 % 합금의 투자율이 상대적으로 현저히 큰 것으로 보아 보다 용이한 자벽이동 현상이 존재(자기변형이 작으므로)하여 미시적 와전류 손실이 증가하는 것이 아닌가 추측된다.

Fig. 8은 Ni=42, 45, 48, 50 % 합금이 나타내는 품질계수 (quality factor) Q 값의 주파수에 따른 변화이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 Q 값의 최대치는 Ni 농도의 저하에 따라 증가하는 거동을 보여 Fig. 6의 투자율 크기의 조성 의존성에

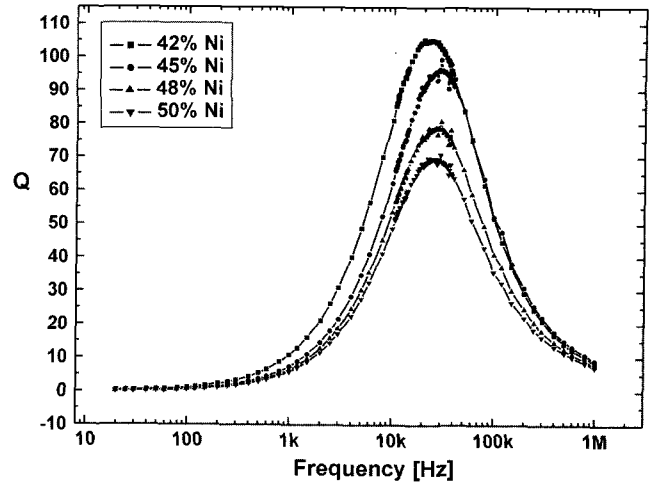


Fig. 8. The frequency dependence of value in Ni-Fe(Ni=42, 45, 48, 50 %) powder cores.

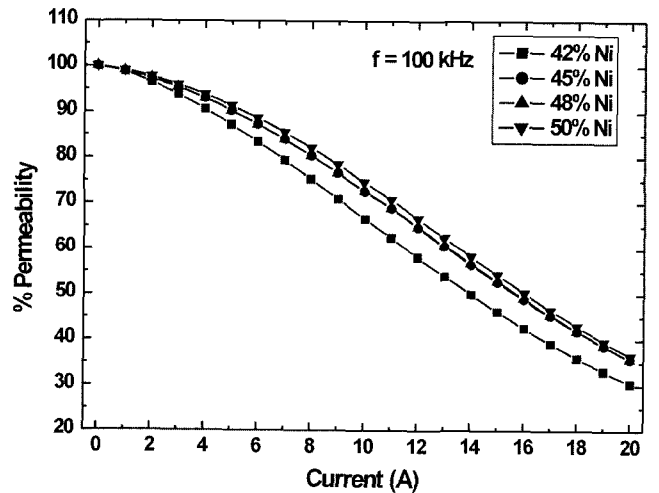


Fig. 9. The DC bias characteristics of Ni-Fe(Ni=42, 45, 48, 50 %) powder cores.

대응하고 있다. 그런데 반면 곡선의 피크가 나타나는 주파수는 Ni 함량이 낮아짐에 따라 점차 보다 높은 주파수로 옮겨가 Ni=45 %일 때 가장 높아지며 42 %Ni이 되면 다시 낮아지게 되는 바 이는 자심손실의 변화 경향에 잘 대응하고 있음을 볼 수 있다. 결국 이상과 같은 결과로부터 고주파용 자심재료로서는 Ni이 45 %의 조성을 가질 때 가장 우수한 특성이 나타나는 것으로 판단할 수 있을 것이다.

마지막으로 이들 Ni-Fe 합금의 직류 바이어스 특성을 조사하여 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 20 A까지의 직류를 가하면서 얻어지는 바이어스 특성을 보여주고 있으나, 가령 DC=2.8 A에서의 투자율 비를 비교해 보면 Ni=45, 48, 50 % 일 경우 각각 95.6 %, 95.7 %, 96.3 %로서 거의 같은 높은 값을 보여주나, Ni=42 %가 되면 94.2 %로 상당히 감소하고 만다. 이는 Ni 농도가 42 % 정도로 아주 낮아지면 직류 바

이어서 특성이 열화되는 것을 의미하는 것으로, 자심손실이나 Q 값의 조성 의존성에 관찰된 바와 같이 Ni 농도가 45 % 정도일 때 가장 우수한 특성을 가지고 있음을 확인시켜주고 있다.

IV. 결 론

현재 공업적으로 널리 사용되고 있는 고 포화자속밀도의 압분 자심인 High-Flux 코아(50 %Ni-50 %Fe 합금 코아)의 특성을 개선하고 제조 코스트의 절감 가능성을 탐색하기 위하여, Ni의 농도 범위가 40~50 wt.%인 Ni-Fe 2원계 합금 분말을 가스 분무법으로 제조하고 이를 사용하여 압분 자심을 만든 뒤 자기적 특성을 조사하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Ni의 함량이 50 %로부터 감소할수록 포화자화가 증가하여 45 % Ni 조성에서 최대 값을 보였다. 그러나 더 이상 Ni량이 감소(Fe량이 증가)하면 인바 효과의 작용에 의해 급격하게 포화자화의 크기가 낮아지는 현상을 나타내었다.

(2) Ni 농도가 50 %보다 낮아지면 투자율이 현저히 증가하는 바 이는 자기변형의 감소에 기인하는 것으로 사료되었으며, 자심손실은 Ni의 감소와 함께 저하하여 45 % Ni의 조성에서 최소치를 나타내었다. 이와 같이 Ni 농도의 저하와 함께 자심손실이 감소하는 원인은 주로 전기 비저항의 증대에 따른 와전류 손실의 감소에 있는 것으로 판단하였다.

(3) Ni=45 %의 합금으로 만든 압분자심은 Ni=50 %의 경우보다 더 우수한 투자율의 주파수 의존성, 큰 값, 그리고 좋은 직류 바이어스 특성을 나타내어, 종합적으로 현재의 상용 High-Flux 코아에 비해 더 나은 압분 자심 재료가 될 수 있

음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 에너지 관리공단의 에너지 절약기술개발사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Goldman, Handbook of Modern Ferromagnetic Materials, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 183-205(1999).
- [2] 牧野昇, 磁性材料とその應用, オ-ム社, 東京, pp. 272-283(1962).
- [3] Technical Bulletin of Magnetics(MPP-400 6E): Molypermalloy Powder Cores for Filter and Inductor Applications, Magnetics, Butler (1997).
- [4] SMPS 세미나 I 텍스트 : 역률개선 대책 및 분말 자성코아의 이용, 창성, 서울, pp. 103-132(2000).
- [5] R. A. McCurie, Ferromagnetic Materials : Structure and Properties, Academic Press, London, pp. 26-44(1994).
- [6] Technical Bulletin of Magnetics (HFC-1.1 6H) : High Flux Powder Cores, Magnetics, Butler, p. 2-2(2000).
- [7] Soft Magnetics Application Guide, Group Arnold(The Arnold Engineering Co.), Marengo, p. 30.17(2000).
- [8] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE Press, New York, pp. 102-104(1993).
- [9] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE Press, New York, pp. 109-113(1993).
- [10] S. Chikazumi, Physics of Ferromagnetism, Oxford University Press, New York, p. 287(1997).
- [11] S. Chikazumi, Physics of Ferromagnetism, Oxford University Press, New York, p. 354(1997).
- [12] R. M. Bozorth, Ferromagnetism, IEEE Press, New York, p. 107(1993).

Magnetic Properties of $\text{Ni}_x\text{Fe}_{100-x}(x=40\sim 50, \text{wt.}\%)$ Permalloy Powders and Dust Cores Prepared by Gas-Atomization

T. H. Noh and G. H. Kim

School of Advanced Materials Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea

G. B. Choi

Research Center, Changsung, Incheon 405-100, Korea

K. Y. Kim*

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

(Received 11 September 2002, in final form 15 November 2002)

We investigated the magnetic properties of High Flux-type $\text{Ni}_x\text{Fe}_{100-x}(x=40\sim 50, \text{wt.}\%)$ permalloy powders and dust cores. The powder was prepared by conventional gas atomization in mass production scale. At the composition of $\text{Ni}_{45}\text{Fe}_{55}$, saturation magnetization was maximum. In case of lower Ni content than $X=45$, the M_s decreased largely with the decrease in Ni content, which is due to the invar effect. The permeability of compressed powder cores increased with the decrease in Ni content, which was considered to be due to the decrease in the magnetostriction. In addition, the dust core with Ni=45 % showed the lowest core loss because of the increase in electrical resistivity leading to the low eddy current loss. From the better frequency dependence of permeability, larger Q value and superior DC bias characteristics of Ni=45 % than those of Ni=50 % core, it was confirmed that the 45 %Ni-55 %Fe powder alloy was better material for the dust core than commercial High Flux core materials.

Key words : Gas-Atomization, Ni-Fe Powder, Dust Cores, High-Flux Cores, Core Loss, DC Bias Characteristics