ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(3), 67-73 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.3.067

Influence of Coating Agent and Particle Size on the Soft Magnetic Properties of Fe Based Nano Crystalline Alloy Powder Core

S. J. Jang, S. W. Kim, Y. J. Choi, B. S. Jeon, T. H. Lee, and C. B. Song*
Div. of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, Cheonan 331-717, Korea

J. Namkung
Material Research Division, Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 790-330, Korea

(Received 30 March 2015, Received in final form 29 May 2015, Accepted 3 June 2015)

This is a basic research for improving soft magnetic property of Fe based nano crystalline alloy powder core. The main study is done around characteristics of permeability, core loss, and DC bias depending on amount of insulation coating agent and particle size. First, $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ amorphous alloy ribbon was fabricated by using the planar flow casting (PFC) device. Then, heat treatment and ball milling were done to obtain alloy powder. The amount of polyether imide (PEI) added to it was varied by 0.5, 1.0, 2.0, 2.5 wt% to have compression molding into 16 ton/cm^2. After going through crystalline heat treatment, the made toroidal nano crystalline powder core (OD12.7 mm*ID7.62 mm*H4.75 mm) had smaller permeability as amount of insulation coating agent decreases. However, it was found out that core loss and DC bias characteristics have been improved. The reason for this results were expected to be because green density of power core decreases as amorphous alloy powder particles become smaller as amount of alloy powder insulation coating agent increases, it was determined that 1 wt% of insulation coating agent is appropriate. Also, for powder core made based on alloy powder size with amount of insulation coating agent fixed at 1 wt%, effective permeability and core loss were outstanding as particle size became bigger. However, characteristics of DC bias became worse as applied DC field increases. This is expected to be due to insulation effect, residual pores, or molding density of powder core resulting from thickness of coating on surface of alloy powder.

Keywords : planar flow casting (PFC), amorphous alloy ribbon, nano crystalline, powder core, permeability, core loss, DC bias

철기(Fe Based) 나노결정질 합금 분말코어의 코팅제 및 입도가 연자기적 특성에 미치는 영향

장세종 · 최영진 · 김상욱 · 전병서 · 이태행 · 송창빈*
공주대학교 신소재공학과, 충남 천안시 서북구 천안대로 1223-24, 331-717

남궁정
포항산업과학연구원, 경북 포항시 남구 청암로 67, 790-330

(2015년 3월 30일 받음, 2015년 5월 29일 최종수정본 받음, 2015년 6월 3일 게재확정)

본 연구는 철기(Fe based) $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ 나노결정 합금의 분말코어(powder core)의 연자기적 특성 향상을 위한 기초연구로서, 절연 코팅제의 첨가량 및 분말입도에 따른 투자율, 코어손실 및 DC 바이어스 특성을 주로 조사하였다. 우선 합금조성을 PFC 장치를 이용하여 비정질 합금리본을 제조한 후, 열처리, 미분쇄 및 분급하여 얻어진 합금분말에 절연 코팅제(PEI)의 첨가량을 0.5, 1.0, 2.0, 2.5 wt%로 변화시켜 16 ton/ cm^{2}으로 압축성형 및 결정화 열처리하여 제조한 토로이달 나노결정 분말코어(OD12.7 mm × ID7.62 mm × H4.75 mm)는 절연 코팅제 함량이 증가할수록 투자율은 감소하였지만, 코어손실 및 DC 바이어스 특성은 향상됨을 확인하였다. 이러한 이유는 합금분말 절연 코팅제 첨가량이 증가할수록 비정질 합금분말 입자가 적어져 분말코어

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-41-521-9374,
Fax: +82-41-568-5776, e-mail: cbsong@kongju.ac.kr

의 성형밀도가 낮아지기 때문으로 추정되었으며, 절연 코팅제의 함량은 1 wt%가 가장 적합한 것으로 판단되었다. 또한 절연 코팅제 함량을 1 wt%로 고정하고, 합금분말의 입도에 따라 제조한 분말코어의 경우, 실효투자율 및 코어손실은 입도가 클수록 우수하였지만, DC 바이어스 특성은 인가자장이 증가함에 따라 더욱 나빠짐을 확인하였다. 그 이유는 합금분말 표면의 코팅층 두께 차이에 의한 절연효과, 잔류기공 혹은 분말코어의 성형밀도 차이 등에 기인하는 것으로 추정되었다.

주제어 : PFC법, 비정질 합금리본, 나노결정, 분말코어, 투자율, 코어손실, 직류 바이어스 특성

I. 서 론

최근 연자성 재료(soft magnetic materials)는 각종 가정용/산업용/의료용/국방용 등의 전기 · 전자기기 등의 중요한 부품소재로 활용되어 전기 에너지를 가장 많이 소비하는 사용 주체일 뿐만 아니라, 전기를 생산하는 발전기(generator)의 핵심 소재로서, NT기술을 접목시킨 새로운 개념의 고성능 · 고효율 부품소재 및 제품 개발에 대한 Needs가 증가함에 따라 새로운 연자성 합금설계는 물론, 제조법에 관한 연구가 활발하게 진행되어 왔다[1-3].

이러한 고성능 고투자율 연자성 재료 중, 비정질/나노결정 합금을 이용한 분말코어(powder core)는 종래 MPP, HIGH FLUX 등에 비해 비교적 가격적으로 유리할 뿐만 아니라, 특히 대전류 및 고주파 영역에서 투자율 및 코어 손실 등의 자기적 특성이 우수한 것으로 알려져 그 수요가 증가 있는 상황이다. Table I은 현재 상용 대표적 연자성 분말코어의 연자기적/물리적 특성 및 코스트 비교, 그리고 적용 주파수 대역 범위를 나타낸 것이다.

비정질/나노결정 합금 분말코어에 사용되는 합금분말은 고압 수분사법(high pressure water atomization)으로 제조하거나, 단롤법(single rolling process)으로 제조한 비정질 합금리본(alloy ribbon)을 ball mill이나 rotter mill 등의 기계적인 분쇄법으로 미분쇄한 분말의 표면에 물유리나 수지(water glass & epoxy) 등을 절연 코팅하여 사용한다. 이러한 분말코어는 대부분 분말야금법으로 제조하기 때문에 합금리본을 이용하는 권취형(혹은 적층형) 코어에 비해 3차원적으로 균일한 연자성 특성, 매우 낮은 와전류 손실, 중주파 및 고주파 영역에서 상대적으로 낮은 철손 및 열적 특성이 우수할 뿐만 아니라, 코어설계 및 조립 특성에 관한 자유도가 넓어 제품의 고성능화 · 경량화 · 소형화 및 코스트 절감에 기여하는 것으로 알려져 있다[4-8].

따라서 본 연구에서는 1988년 Yoshizawa 등[9]에 의해 개발된 $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$(FINEMET) 나노 결정립 합금분말의 압축 성형 시, 입자간 전기적 절연을 위해 첨가되는 절연체의 함량 및 합금분말 입도에 따른 자기적 특성을 조사함으로써, 우수한 연자기 특성을 갖는 분말코어를 제조하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

II. 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ 비정질 분말코어 제조 및 특성 평가실험을 위한 순서도를 나타낸 것이다.

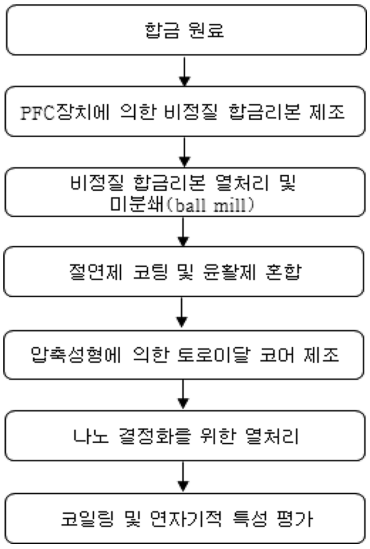


Fig. 1. Flow chart of this study.

Table I. Comparison of soft magnetic, physical properties and cost for commercial soft magnetic powder cores.

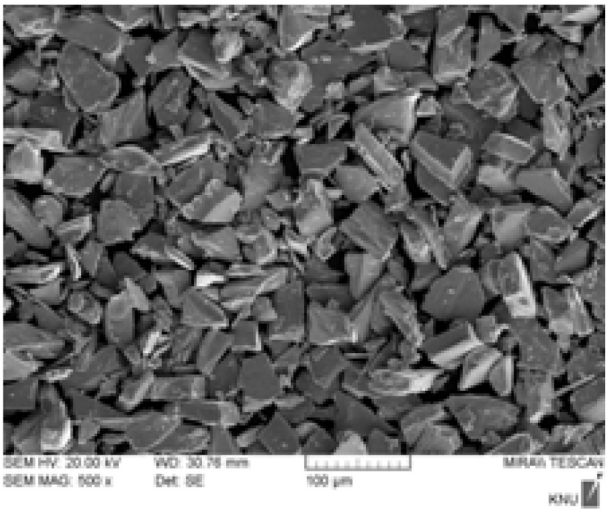
Materials	Core loss	DC bias	Frequency	Bs (T)	Temp. stability	Cost
MPP	Lower	Better	~300 kHz	0.8	Best	High
High flux	Low	Best	~300 kHz	1.5	Better	Medium
Sendust	Medium	Good	~300 kHz	1.0	Good	Low
Fe-Si steel	High	Good	~100 kHz	1.45	Good	Lower
Iron	Highest	Poor	~50 kHz	1.4	Poor	Lowest
Fe based amorphous	Lowest	Better	~1 MHz	1.56	Poor	Medium
Nano crystalline	Lowest	Good	~1 MHz	1.24	Poor	Medium
New-nanocrystal (Makino)	Low	Good	~1 MHz	1.84	Poor	Medium

사용된 원료금속의 순도는 상용 시약용 전해 철(Fe, 3N up), 규소(Si, 4N up), Fe-B alloy(15 wt%B, 3N), 전해 니오븀(Nb, 3N up), 전해 구리(Cu, 3N up)를 사용하였으며, 1회 용해 시 사용된 시료 량은 이론적 화학조성에 따라 총 250 g을 천평하여 사용하였다. 비정질 합금리본 제조 시 사용된 PFC 장치의 slit nozzle은 Ø38 mm*길이 220 mm의 투명 석영관 하단에 slit nozzle(넓이23 mm*간격0.45 mm)이 설치된 것을 사용하였다.

Slit nozzle 크기로 제조된 비정질 합금리본은 분말로 분쇄하기 위해 시계태엽처럼 권취하여 튜브전기로의 석영관 내에 장입(약 50 g/회)하고 450 ºC에서 30 min 동안 N_2 분위기에서 열처리 및 조분쇄 한 후, 볼밀(ball mill)로 최대 11시간 동안 밀링(볼 : 시료 = 6 : 1)하여 미분쇄하여 소정의 입도(26~74 μm, 74~125 μm, 53~74 μm, 44~53 μm, 37~44 μm, 26~37 μm, –26 μm)로 분급하여 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 PFC장치로 제조한 합금리본 사진(a)과 볼밀로 미분쇄한 비정질 합금분말 외형의 SEM image(b)을 나타낸 것이다.

분급된 비정질 합금분말은 polyether imide(PEI)로 절연 코팅하여 토로이달 분말코어(OD12.7 mm*ID7.62 mm*H4.75 mm)로 제조하였다. 이때 사용된 윤활제(lubricant)는 별도의 기초실험을 통해 최적으로 선택된 Zn-stearate를 1 wt% 첨가하였으며, 16 ton/cm^{2}으로 압축 성형하였다. 제조된 분말코어는 잔류응력 제거 및 나노결정화 열처리를 위해 무유도 권선로에 장입하여 N_2 분위기에서 550 ºC에서 50 min 동안 열처리하였다. 또한 분말코어의 연자기적 특성 평가를 위해 임피던스 분석기(Hewlett Packard HP4284A)와 B-H analyzer (Iwatsu SY-8232)를 사용하였다.

(a)



(b)

Fig. 2. (Color online) Photographs of the fabricated $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ amorphous ribbon (a) by the PFC process and ball-milled powder (b) in this study.

III. 실험결과 및 고찰

1. 비정질 합금분말 및 코어 제조를 위한 열처리

Fig. 3은 본 연구에서 PFC 장치로 제조한 $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ 비정질 합금리본(폭 23 mm, 두께 23~28 μm)을 DSC로 분석한 결과이다. 합금리본 시료의 온도가 상승하면서 1차적으로 525 ºC(T_{x1})에서 비교적 선명하게 나타난 peak는 bcc 구조의 초정 α-Fe(Si), 2차적으로 약 679 ºC(T_{x2})에서 관찰된 peak는 잔류 비정질 상에서 고온 안정상으로 알려진 bct 구조 Fe_2B 상의 석출에 따른 peak이며, 결정화 온도차($\Delta T_X = T_{X2} - T_{X1}$)는 약 154 ºC임을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 이러한 결과로부터 비정질 합금리본을 미분쇄하기 위해 시도한 열처리온도는 450 ºC, 나노 결정화를 위한 열처리온도는 550 ºC에서 소정시간 실시하였다.

Fig. 4는 Fig. 3에 나타낸 동일한 합금리본을 분쇄하기 위

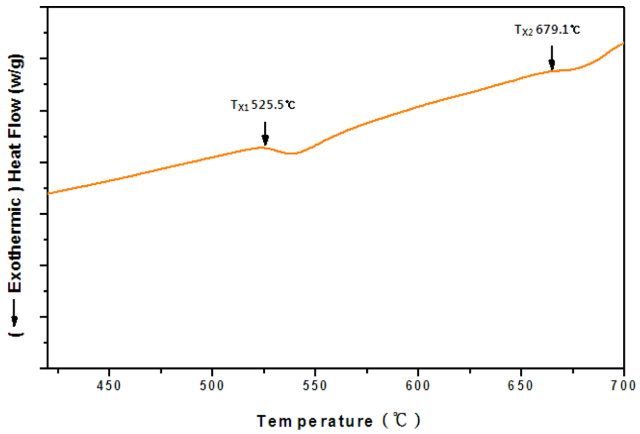


Fig. 3. (Color online) Result of DSC analysis of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ amorphous alloy ribbon.

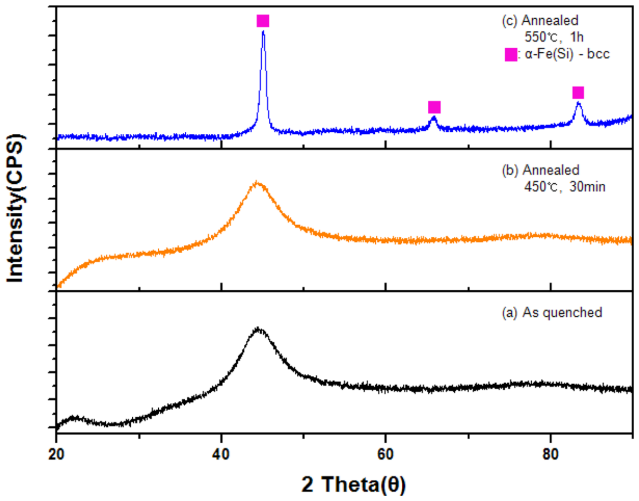


Fig. 4. (Color online) XRD patterns of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ amorphous alloy ribbon.

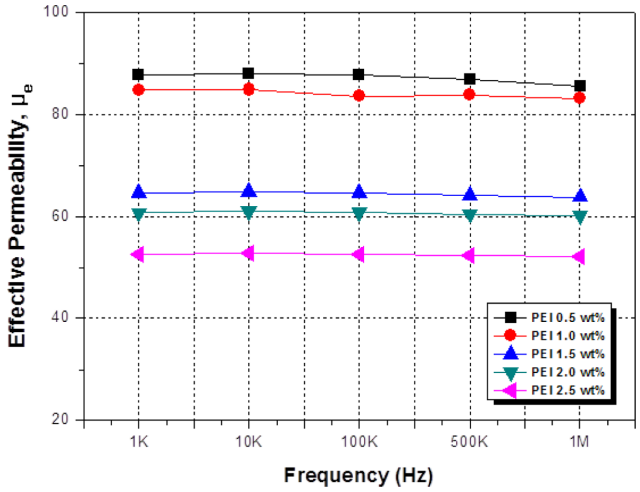


Fig. 6. (Color online) Variation of effective permeability for applied frequency of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ nano crystalline alloy powder core samples with different contents of polyether imide.

해 시계태엽처럼 권취(약 50 g)하여 450 ºC에서 30 min 동안 N_2 분위기에서 열처리 전(a)과 열처리 후(b)의 시료를 XRD로 분석한 결과로 2개의 시료 모두 결정화된 peak는 발견되지 않고 hallow pattern 만 관찰되었다. 또한 Fig. 4(c)는 미분쇄한 비정질 합금분말을 절연코팅 및 압축성형하여 토로이달 코어(OD12.7 mm*ID7.62 mm*H4.75 mm)로 제조하여 나노 결정화를 위해 N_2 분위기에서 550 ºC*1 h 동안 열처리하여 분석한 결과로 선명한 3개의 peak가 관찰되었으며, 모두 bcc구조인 α-Fe(Si) peak임을 확인하였다.

2. 코팅제(PEI) 함량의 따른 분말코어의 연자기적 특성

Fig. 5는 분말코어 제조 시 성형특성이 우수한 윤활제 선택을 위해 상용 시판되는 paraffin, BN, Ca-st, Zn-st 및 Hi-Lube 고체 윤활제를 26~74 μm 비정질 합금분말에 첨가하여 원통형 성형체(Ø13 mm) 시료의 성형조건(PEI 함량은 1 wt% 및 성형압력 450 kgf/cm²)을 동일하게 제조하여 성형밀도(green density)를 조사한 결과이다. Ca-st를 첨가한 시료가 5.422 g/cm³로 가장 높게 나타났지만, 성형강도가 매우 약한 것으로 확인되어 본 연구에서는 이하 모두 Zn-st를 1 wt% 사용하여 실험하였다.

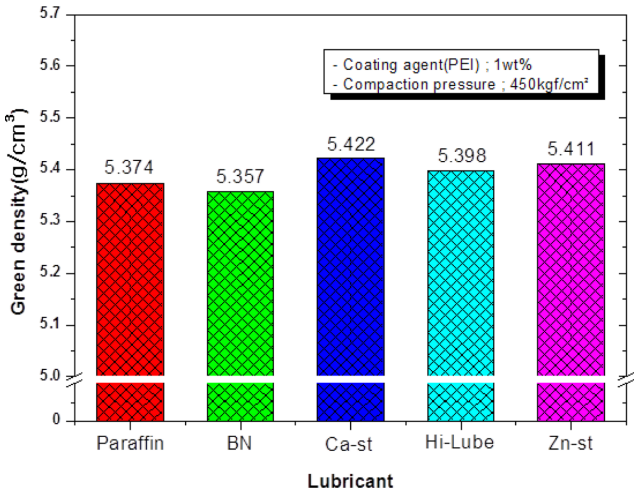


Fig. 5. (Color online) Comparison of green density for the lubricant of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ nano crystalline alloy powder compacts with different lubricant.

Fig. 6에서 Fig. 8은 $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ 비정질 합금분말의 연자기적 특성에 미치는 절연제의 첨가량을 조사하기 위해 polyether imide(PEI)를 선택하여 비정질 합금분말의 0.5~2.5 wt% 범위로 변화시켜 토로이달 분말코어를 제조하였다. 이때 사용된 비정질 합금분말의 입도는 26~74 μm, Zn-st 윤활제는 합금분말의 1 wt% 첨가 및 나노 결정화 열처리는 550 ºC에서 1 h 동안 질소(N_2) 분위기에서 실시하였다.

Fig. 6은 절연제(PEI) 첨가량에 대한 실효 투자율의 주파수 의존성을 나타낸 것으로, 절연제가 0.5 wt% 첨가한 분말코어의 경우, 실효 투자율은 87로 가장 높은 값이 얻어져 100 kHz까지는 거의 일정하게 유지되지만, 그 이상의 주파수에서는 약간 감소하였다. 그러나 절연제의 첨가량 증가할수록 실효 투자율은 예측한 대로 감소하지만, 적용 주파수 증가에 따른 투자율 감소는 비교적 적게 나타났으며, 이러한 거동은 입자간 절연 특성이 향상되기 때문인 것으로 추측되었다.

Fig. 7은 분말코어에 사용된 절연제 첨가량 변화에 따른 코어손실을 나타낸 것으로 절연제 양이 증가할수록 코어손실은 감소하였으며, 예를 들면, 50 kHz의 주파수에서 0.5 wt%의 절연제를 첨가한 경우, 약 211 mW/cc지만, 2 wt% 첨가하면 141 mW/cc로 약 67 % 감소하였다. 이러한 결과는 분말 입자

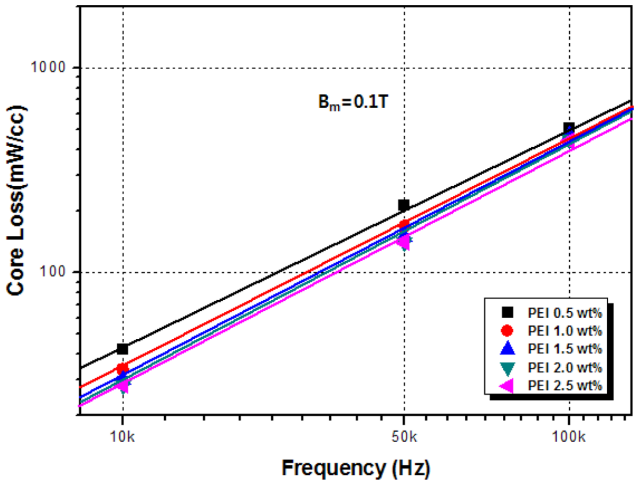


Fig. 7. (Color online) Variation of core loss for applied frequency of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ nano crystalline alloy powder core samples with different contents of polyether imide.

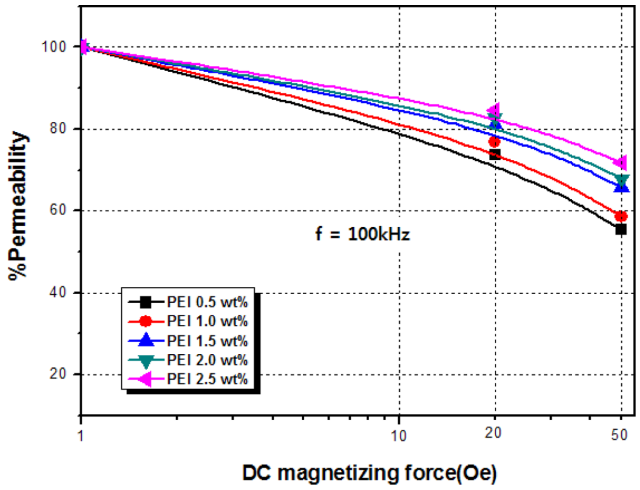


Fig. 8. (Color online) Variation of % permeability for DC bias field of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ nano crystalline alloy powder core samples with different contents of polyether imide.

간 절연 효과 상승에 의한 와전류 손실 저하 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 절연제 첨가량 변화에 따른 각 분말코어의 직류 바이어스(DC bias)의 자장에 따른 100 kHz에서 실효 투자율의 감소를 백분율(% permeability)로 나타낸 것이다. 예를 들면, 50 Oe 자장 인가 시, 절연제를 0.5 wt%의 절연제를 첨가한 경우 % 투자율은 약 55 %지만, 2.5 wt% 첨가하면 약 71 %로, 절연제의 함량이 증가 할수록 % permeability이 상승함을 알 수 있다. 이러한 이유는 절연제 증가로 분말사이의 절연성이 상승됨과 동시에 공극(air hole)이 감소할 뿐만 아니라, 분말입자가 균일하게 분포되므로 분말코어의 와전류 손실(eddy current loss)이 최소화되기 때문인 것으로 판단되었다.

2. 비정질 합금분말의 입도에 따른 연자기적 특성

Fig. 9는 본 연구에서 합금분말 입도에 따라 제조한 분말코어의 외측 표면을 SEM으로 관찰한 결과로, 분말코어 압축성형 시 PEI 절연제는 모두 1 wt% 첨가하였으며, 결정화 열처리는 550 ℃에서 1 h 동안, N_2 분위기에서 실시하였다.

Fig. 10은 합금분말 입도에 따른 분말코어 실효 투자율의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 실효 투자율은 입도가 클수록 큰 값이 얻어져 74~125 μm 범위 분말코어의 경우, 100

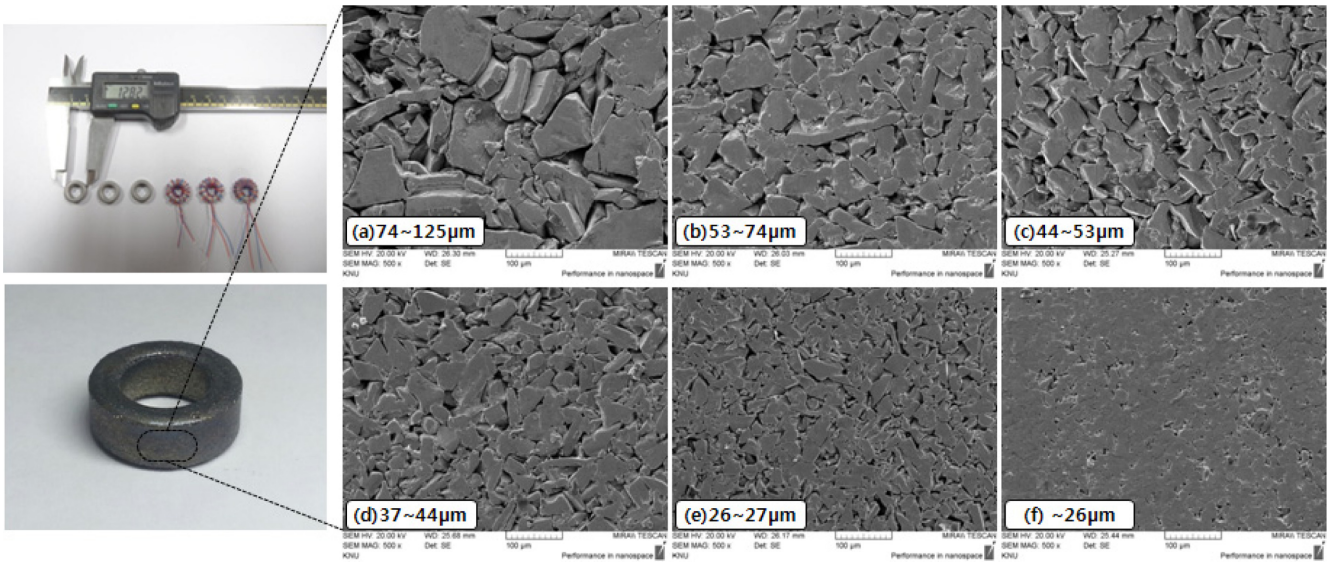


Fig. 9. (Color online) SEM image of the surface of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ nano crystalline alloy powder core samples with different particle size; (a) 74~125 μm, (b) 53~74 μm, (c) 44~53 μm, (d) 37~44 μm, (e) 26~37 μm and (f) –26 μm.

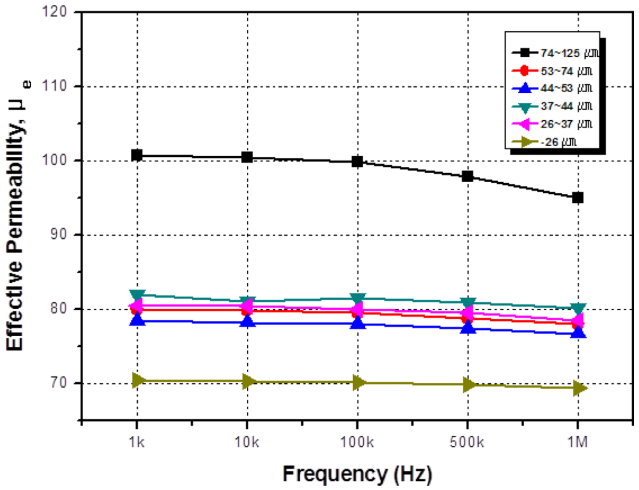


Fig. 10. (Color online) Comparison of effective permeability for applied frequency of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ nano crystalline alloy powder cores with different particle size.

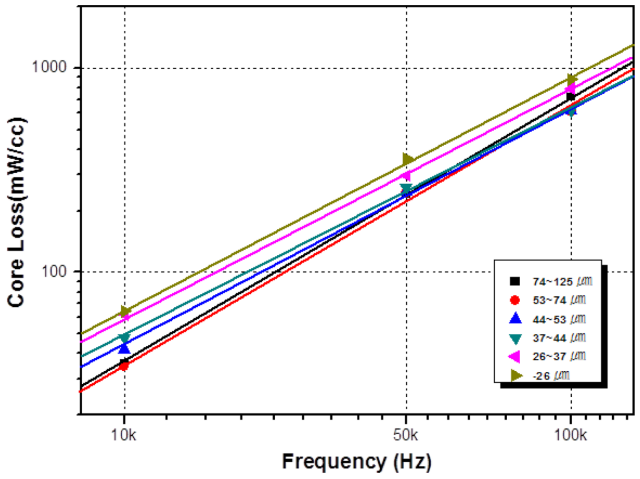


Fig. 11. (Color online) Comparison of core loss for applied frequency of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ nano crystalline alloy powder cores with different particle size.

kH에서 100이 얻어졌지만, 적용 주파수가 1 MHz로 높아지면 95로 5 % 저하함을 알 수 있다. 반면에 입도가 400 mesh 이하(–26 μm)로 제조된 분말코어의 경우, 실효투자율은 70 정도로 74~125 μm 범위 분말코어에 비해 약 30 %가 낮아졌으며, 주파수 의존성은 약 1 % 감소로 우수함을 알 수 있다. 이러한 이유에 대하여, 우선 분말입도가 작을수록 실효 투자율이 저하하는 것은 분말코어의 성형밀도 저하, 분쇄공정에서 축적된 잔류응력 증가 및 입형의 불균일성에 의한 내부 반자장의 누설영역 증가[6] 등에 기인한 것으로 판단된다. 두 번째 분말입도가 큰 것(74~125 μm) 일수록 주파수 증가에 따라 실효 투자율이 급격하게 감소하는 이유는, 일반적으로 와전류 손실이 큰 금속계 연자성 코어에서 나타나는 현상으로, 예를 들면, 실효 투자율($\mu_{eff} = \mu' - j\mu''$)은 낮은 주파수에서는 높지만, 높은 주파수에서는 급격하게 낮아짐과 동시에 투자손실(μ''/μ', 투자율의 허수항과 실수항 비율)의 증가, 즉, 투자율의 허수항(μ'')에 기여하는 분말코어의 와전류 손실이 증대하기 때문이다. 또한 Fig. 9에 나타낸 합금분말 입도에 따라 제조한 토로이달 코어 성형체 외형의 SEM 사진에서 관찰되는 바와 같이, 입자들이 클수록 생성되는 공극이 크고 불규칙하게 분포되어 자성분말 입자간 절연상태가 악화되고, 이로 인하여 코어의 전기저항값이 낮아져서 고주파특성이 저하되는 것으로 추정되었다.

Fig. 11은 합금분말 입도차이에 따른 분말코어의 코어손실 변화를 나타낸 것이다. 주파수 증가에 따른 변화율(코어손실 변화/주파수 변화)은 약간 차이가 있지만, 주파수 증가에 따라 코어손실은 선형적으로 증가하였으며, 입도차이에 따른 코어손실의 경우는 50 kHz에서 74~125 μm로 입도가 가장 클 때 242 mW/cc가 얻어졌지만, –26 μm로 작은 시료에서는 361 mW/cc로 약 33 % 증가하였다. 이러한 이유는, 분말코어의 합금분말의 입도가 미세할수록 입자표면에 산화물생성량의 증대 및 분말내의 입자사이즈(grain size) 미세화에 따른 보자력(H_c) 상승에 의한 이력손실(hysteresis loss) 증대에 기인하는 것으로 추정되었다.

Fig. 12는 합금분말 입도에 따른 분말코어의 직류 바이어스(DC bias)의 자장에 따른 100 kHz에서 실효 투자율의 감소에 대한 % permeability를 나타낸 것이다. 인가자장 50 Oe에서 분말입도가 비교적 큰 74~125 μm로 제조된 분말코어의 경우, % 투자율은 약 49 %이었지만, –26 μm의 시료에서는 약 62 %로 약 21 % 증가하였다. 이러한 이유는 합금분말 입도가 크면, 작은 입자에 비해 쉽게 포화되기 때문이며, 또한 Fig. 8

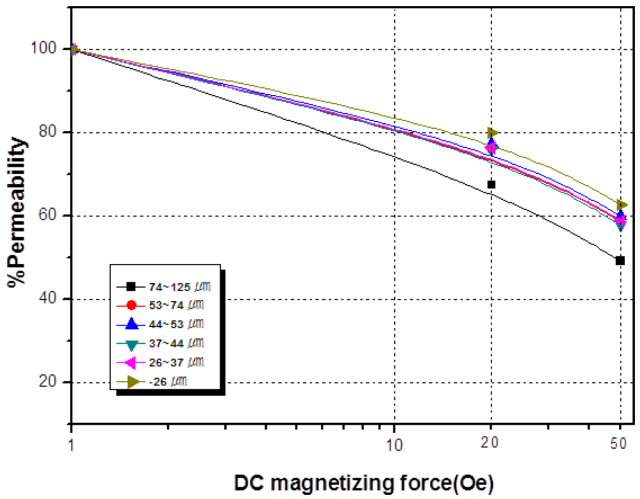


Fig. 12. (Color online) Comparison of % permeability for applied DC field of $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ nano crystalline alloy powder cores with different particle size.

에서 절연제 첨가량에 따른 거동과 마찬가지로 분말입도가 증가하면 동일한 절연제를 첨가할 경우에 절연층 두께는 증가하지만, 공극의 크기가 증가함과 동시에 분말코어 전체에 불균질하게 분포되어 발생하는 현상과 동일한 것으로 추정되었다.

IV. 결 론

본 연구는 철기(Fe based) $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$(FINEMET) 나노결정 합금의 분말코어(powder core)의 연자기적 특성 향상을 위한 기초연구로서, 절연 코팅제의 첨가량 및 분말입도에 따른 투자율, 코어손실 및 DC 바이어스 특성을 주로 조사하였다.

[1] 우선 합금조성을 PFC장치를 이용하여 비정질 합금리본을 제조한 후, 열처리, 미분쇄 및 분급하여 얻어진 합금분말에 절연 코팅제(PEI)의 첨가량을 0.5, 1.0, 2.0, 2.5 wt%로 변화시켜 15 ton/cm^{2}으로 압축 및 결정화 열처리하여 제조한 토로이달 나노결정 분말코어(OD12.7 mm*ID7.62 mm*H4.75 mm)는 절연 코팅제 함량이 증가할수록 투자율은 감소하였지만, 코어손실 및 DC bias 특성은 향상됨을 확인하였다. 그러한 이유는 합금분말 절연 코팅제 첨가량이 증가할수록 비정질 합금분말 입자가 적어져 분말코어 성형체의 밀도가 낮아지지만, 합금분말 입자간 절연 특성이 상승하기 때문으로 추정되었으며, 절연 코팅제의 함량은 1 wt%가 가장 적합한 것으로 판단되었다.

[2] 또한 절연 코팅제 함량을 1 wt%로 고정하고, 합금분말의 입도에 따라 제조한 분말코어의 경우, 실효 투자율 및 코어손실은 입도가 클수록 우수하였지만, DC bias 특성은 인가자장이 증가함에 따라 더욱 나빠짐을 확인하였다. 그 이유는 합금분말 표면의 절연 코팅 층 두께차이에 의한 절연효과, 잔류 공극 혹은 분말코어의 성형밀도 차이 등에 기인하는 것으로 추정되었다.

감사의 글

이 논문은 “2014년 공주대학교 연구년 사업”과 중소기업청에서 지원하는 “2014년도 산학연협력 기술개발사업(No. C0237788)”으로 수행된 결과물임을 밝힙니다.

References

[1] Y. Sato and J. Shibata, Transaction of the JSME (in Japanese) **61**, 260 (1995).
[2] A. Goldman, Handbook of Modern Ferromagnetic materials, Kluwer Academic Publishers, Boston, 183 (1999).
[3] K. B. Choi, Kor. Inst. Pow. Elect. **11**, 26 (2006).
[4] K. B. Choi, Ph.D. Thesis, Yonsei University, Korea, 93 (2004).
[5] T. H. Noh, H. Y. Choi and S. J. Ahn, J. Korean Magn. Soc. **14**, 7 (2004).
[6] T. H. Noh and H. Y. Choi, J. Korean Magn. Soc. **15**, 191 (2005).
[7] S. H. Hong, K. Y. Sohn, W. W. Park, J. M. Nam, B. G. Moon and Y. S. Song, J. Kor. Pow. Metall. Inst. **14**, 261 (2007).
[8] H. J. Kim, J. Korean Magn. Soc. **21**, 77 (2011).
[9] Y. Yoshizawa and K. Yamauchi, J. Appl. Phys. **64**, 6044 (1988).