

Fe계 나노결정 연자성코아의 개발동향

조현정 · 박원욱

인제대학교 공과대학 나노공학부

최근 들어 노트북, 통신장비 등 고성능 전자기기들은 산업수요의 특성상 소형화와 경량화 추세가 가속화되고 있으며, 컴퓨터, 냉장고, 에어컨 등 가전제품에 있어서도 안정한 전류공급 및 역률의 향상이 의무화 되고 있다. 따라서 내부에 사용되는 부품의 고주파화, 고효율화, 손실감소를 위한 고성능 연자성코아 (그림 1. 참조) 개발의 필요성이 한층 증대되고 있는 실정이다.

연자성코아는 높은 투자율(permeability), 낮은 보자력(coercivity) 그리고 낮은 히스테리시스 손실(hysteresis loss)을 가진 자성재료이므로 자기장에 의해서 생성되는 플럭스 밀도(flux density)를 증폭하는데 사용될 수 있으며, 이러한 자기적 성질들을 이용할 수 있는 범위는 지속적으로 광범위해지고 있는 추세이다. 연자성 물질은 높은 투자율과 높은 포화 자화값, 작은 이방성을 가지며 고주파 영역에서 전기저항이 크므로 와전류(eddy current) 등에 의한 에너지 손실이 작다. 높은 포화자화와 유용한 연자성 성질을 가진 Fe계 비정질 합금은 여러 가지 응용 분야에서 사용되어져 왔으며, 합금이 사용되는 형태에 있어서는 리본, 그리고 분말이 주로 사용되는데 포화자화값을 제외한 자화특성의 향상에는 Co계 합금에 비해 한계가 있다.

이에따라, 첨단 연자성재료 분야에서는 비정질재료를 결정화시켜, 결정립의 크기를 나노크기로 미세화시켜 기존의 재료가 가지지 못한 새로운 특성을 얻으려는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 즉, 기존 재료의 한계를 극복하는 기능성 재료로서 나노 결정립 재료의 조성, 결정립의 크기 등을 제어

하게 되면, 기존의 재료에서 얻어지지 않는 새롭고 우수한 특성들이 나타나게 된다. 이러한 우수한 특성들로 인해 초미세 결정립 재료가 전자·정보통신 산업에서 Co계 비정질재료보다 핵심적인 소재로 사용될 가능성이 높아지고 있다. 최근에 이용 가능한 연자성 물질들의 범위는 나노결정 연자성재료들의 발달에 의해 상당히 증가됐다. 이러한 재료들은 대개 철합금들이고 전형적으로 10~15 nm의 결정립 크기를 가진다. 이러한 재료들의 예외적인 성질은 1A/m 이하의 보자력과 상대적으로 높은 포화 자화값(13KG)과 더불어서 높은 투자율(~100,000)이다. 지금까지 가장 흔히 연구된 합금인 $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ 은 대개 급속응고에 의해 생성되며, 나노결정 구조를 만들기 위해서 결정화온도 이상에서 어닐링처리된다.

대부분 일본에서 상품화된 나노결정 연자성체인 Fe-B-Si-Nb-Cu 계(the "FINEMET" family)와 Fe-(Zr, Hf, or Nb)-B 계(the "NANOPERM" family)의 합금은 각각 일본의 Hitachi Special Metals와 Alps Electric Co.에서 스트립코아 형태로 상품화되었는데, Fe계 비정질 상태의 합금과 비교하여 볼 때 더 좋은 연자성 성질을 가지며 높은 포화 자화값을 가진다. 그런데, 지금까지 주로 사용된 리본형태의 연자성스트립에 비해 연자성합금 분말은 제조방법에 따라 복잡한 모양의 부품성형을 가능하게 만들 수 있는 장점이 있다. 높은 밀도와 우수한 가공성을 가진 Fe계 나노연자성 분말은 고온압출, 고온압연, hot pressing, gun method, explosive compaction, static high-pressure compaction 등과 같은 특별한 성형(consolidation)방법을 이용하여 코아로 만들 수 있다.

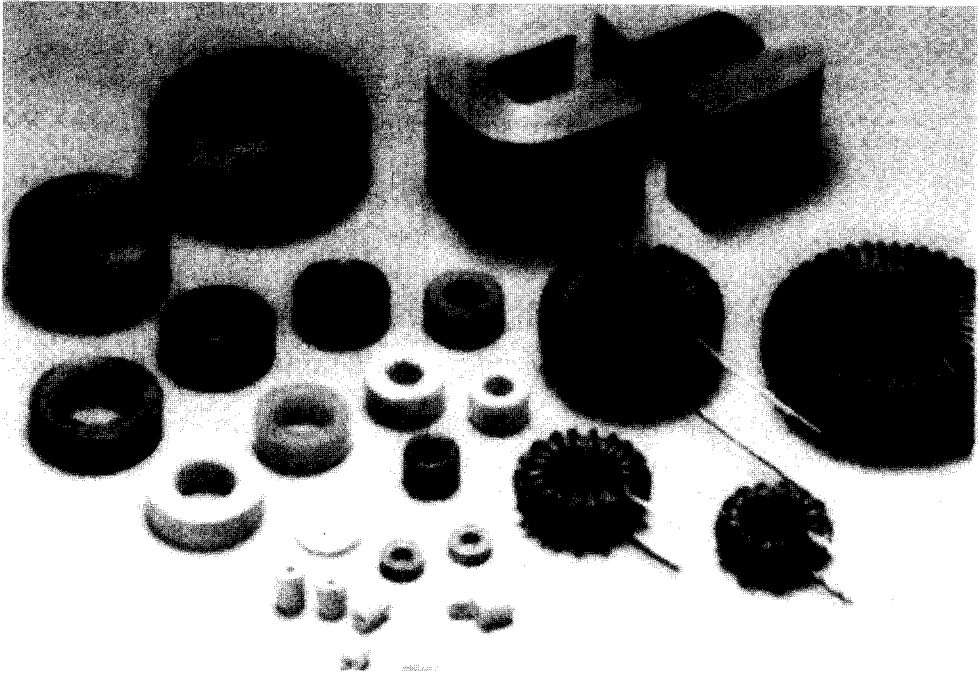


Fig. 1. 산업화된 연자성코어의 외형

또한, 연자성 분말의 성형에 필요한 허용 노출온도가 600°C 정도인 나노결정재료가 비정질재료보다 분말 성형이 보다 쉬운 특징이 있으므로 이를 이용한 나노결정립 분말연자성코어의 산업화가 국내·외에서 활발히 추진되고 있는 상태이다.

비정질 상태의 Fe-B-Si-Nb-Cu를 결정화 온도 이상에서 열처리 하면, 비정질이 결정화 되면서 나노크기의 결정립이 자성 특성에 영향을 크게 준다. 이때, Cu는 기지내의 작은 클러스터를 형성하여 핵생성을 유도하고, Nb는 낮은 원자의 이동도(mobility) 때문에 결정립 성장을 억제한다. 연자성재료의 일반이론에 의하면, 결정립(grain) 크기가 1 μm보다 작아짐에 따라 연자성 특성이 나빠지고, 보자력이 증가된다. 따라서 연자성 특성을 증가시키기 위해서는 결정립 크기를 크게 하거나 어닐링 등을 통해 자구(magnetic domain) 크기를 작게 해야 한다. 그러나, FINEMET에서는 새로운 현상이 나타나는데 결정립이 nanometer 정도로 크기를 작게 했을 때 연자성이 아

주 좋아지게 된다. FINEMET의 최적 결정립 크기는 15 nm 이고, 이 경우 고주파 영역에서 Co계 비정질 합금보다 자화능력이 좋다. 한편, NANOPERM의 경우에는 최적 결정립 크기는 25 nm이고, 저주파 영역(60 Hz)에서 에너지 손실이 작으므로 변압기(transformer)재료로 많이 사용된다. 이러한 초미세결정립 재료의 용도로서는 변압기 및 인덕터, 엑시머 레이저 등의 반도체 장치, 인버터나 SW전원용 부품, 노이즈 제어 부품 등이 있다. 노이즈 대책 부품의 코어설계에 나노연자성재료를 사용하면 약 1/2로 소형화가 가능하게 된다. Fe-Zr-B(NANOPERM)에서의 포화 인덕턴스는 1.7T, Fe-B-Si(FINEMET) 비정질에서는 1.55T, Fe-3% Si에서는 2T 값을 가지는데 큰 변압기 등 부품의 크기와 용량이 증대될수록 적은 손실과 높은 포화자화값을 가지는 NANOPERM으로부터 연자성코어를 만드는 것이 효과적이다.

그런데, 이러한 나노결정 합금은 좋은 연자성 성질을 보이거나 큐리(Curie)점까지의 온도 한계를 보인다.

이러한 추세에 따라, 비정질 형태의 Curie 점을 올리고 이러한 합금의 응용분야를 넓히기 위해서 최근 새롭게 개발된 합금이 Co가 Fe를 약 50% 가까이 부분적으로 대체한 합금(the "HITPERM" family)으로서, 이 경우 Curie 온도를 약 900°C 까지 올릴 수 있다. 높은 온도에서도 나노결정재료를 사용하기 위해서는 고온에서 좋은 연자성특성이 유지되어야 하며, 온도에 대한 안정성도 크게 요구되므로, HITPERM은 이러한 수요에 따라 개발된 신합금이다.

앞에서 소개한 바와 같이 나노결정립 합금은 기존의 비정질 재료의 한계를 뛰어 넘어, 고성능 연자성 코아로서 산업화된 기존재료들을 대체할 수 있는 범위를 점차 확대하고 있는 추세이며, 전자기 및 센서

분야에서 무한한 가능성을 나타내고 있다. 이에따라 본고에서 주로 소개한 일본 외에 국내의 Amotech, 독일의 Vacuumschmelze GmbH, 프랑스의 Imphy 등 여러 기업에서도 21C 들어 새로운 나노결정 연자성합금 개발에 역점을 두고 있는 실정이다. 그러므로, 컴퓨터 및 휴대폰의 핵심부품인 소형 변압기, 인덕터, 그리고 자기센서 등 첨단전자부품 및 소재산업의 선진기술확보를 위해서는 요즈음이 특히 나노결정 연자성재료에 대한 관심과 연구개발에 대한 투자지원의 확대가 매우 필요한 시점인 것으로 분석되며, 이 분야의 선진기술확보를 위한 합금설계 및 제조공정에 대한 국제기술경쟁도 앞으로 더 치열해질 것으로 전망된다.