

**특집 : Magnetics 기술동향**

# Powder Core의 기술동향

## 최 광 보

((주)창성 중앙연구소 부장)

### 1. 개요

초크 코일, 펄스 트랜스포머, 노이즈 필터 등의 부품에서, 전자회로의 전기에너지의 제어 또는 저장과 전달 역할을 하는 인덕터 코어인 분말 코어(powder core)는 일본에서는 압분자심(compressed magnetic powder core, 壓粉磁心)이라고도 부르며, 산화철계 분말의 소결자성체인 페라이트(ferrite), 압연 또는 급속응고 공정을 거쳐 판상(sheet or ribbon)으로 제조된 원소재를 적층(laminated or wound) 형태로 가공하여 사용하는 규소강(silicon steel)과 비정질(amorphous)재료와 함께 널리 사용되는 대표적인 연자성(soft magnetic) 수동부품이다.

현재 상용화된 분말 코어 소재는 매우 다양하나, 모두 철 또는 니켈계 금속합금이라는 점, 분말형태의 원소재를 분말야금학적 공정을 통해 가공한다는 점, 그리고 와전류 손실의 최소화와 자로 전체에 균일한 분산공극을 형성하기 위해 개개의 분말이 미세한 절연층(0.5 $\mu$ m)에 의해 분리되어 있다는 점에서 공통점을 가진다. 따라서, 조성이 같더라도 판상 적층 재료 등과는 달리, 분말재료에서는 각형의 이력곡선이 아닌 완만한 직선의 이력곡선을 얻을 수 있어, 투자율은 낮아지나, 소재의 사용한계인 포화에 도달할 때까지 자기적 특성을 유지할 수 있어, 대전류까지 인덕턴스(L)를 유지할 수 있는 장점이 있다. 분말 코어 소재는 크게 니켈계 합금, 철계 합금 그리고 고순철 등의 세 부류로 구분할 수 있으며 분말 코어 제조 공정은 그림 1과 같다.

니켈계 합금 중에서, 물리 퍼멀로이 분말(Moly-Permalloy Powder, MPP, 81%Ni-17% Fe-2%Mo)이 가

장 일반적으로 사용되는 대표적인 재료이다. 1920년대에 미국 벨 연구소에서 처음 개발된 이 재료는 자기학적으로 자왜(magnetostriktion,  $\lambda$ )와 결정자기이방성상수(crystalline anisotropy constant, K)가 매우 작아, 기본적인 연자기 특성이 우수하여, 자장과 온도의 변화에 대한 투자율의 안정성이 뛰어나고, 코어 손실이 낮아, 초창기에는 전화통신용(telephone loading coil)로 사용되었고, 이후 전자산업의 발달에 따라 스위칭 전원공급장치(SMPS)의 핵심 부품으로 그 용도가 확대되었다. 니켈계 합금 중 가장 최근에 개발된 하이플럭스(High Flux, 50%Ni-50%Fe)재질은, MPP 대비 코어 손실이 다소 높고 투자율의 안정성이 떨어지나, 높은 포화자속값을 가져 대전류 특성이 기존의 어떠한 재료보다 우수하여 최근 고밀도 전원장치용으로 수요가 급증하고 있다.

고압수분사 고압가스분사	MPP High-Flux Sendust
건조 및 열처리	분말제조
입도 조정	자성조질
절연세라믹 코팅	분포공극조질
고압성형	Toroidal Type
열처리	자성조질
후처리	Epoxy코팅
검사 및 출하	L, Q, DCB 등

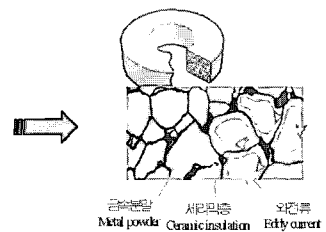


그림 1 분말 코어 제조 공정도

대표적 철계 합금으로는, 1930년대에 일본 동북대학에서 처음 개발된 샌더스트(SENDUST, 85%Fe-9.5%Si-5.5%Al)를 들 수 있다. 이 재료 역시 영(≒0)자왜와 낮은 이방성 상수값을 가져, 퍼멀로이 재료와 같이 투자율의 안정성이 우수하고, 코어 손실이 낮으며, 상대적으로 가격이 저렴한 장점을 가진 반면, 재료 자체가 취약하여 가공성이 떨어져 고 투자율을 얻기가 어렵고, 직류중첩 특성이 퍼멀로이계 재료보다 우수하지 못한 단점을 가지고 있다. 여기서 직류중첩특성이란, 전원공급장치에서 교류입력을 직류로 변환하는 과정에서 발생하는 미약한 교류에 일정치의 직류가 중첩된 파형에 대응하는 자성코어의 자기적 특성으로서, 통상 교류에 직류가 중첩되는 경우, 직류전류에 비례하여 코어의 투자율이 떨어지게 되는데, 이 때 직류를 중첩하지 않은 상태의 투자율 대비 직류중첩시의 투자율의 비율을 백분율(%μ, percent permeability)로 나타내어 직류중첩특성을 평가한다. 샌더스트 이외의 철계 재료로는 아직 충분히 상용화되지는 않았으나, 3%Si 조성의 규소강 재료에 기초하여 자성 특성의 향상을 위해 6.5%Si로 합금조성을 조정하여, 판상이 아닌 분말 형태로 원소재를 제조하여 분말코어 제조공법을 적용한 규소강 분말 코어를 들 수 있다. 개발 성공시, 저렴한 가격에 우수한 직류중첩특성을 가진 새로운 자성 분말 코어의 탄생이 기대된다.

마지막으로, 철재료로는 스폰지 철(sponge iron)분말로 제조한 투자율 75 이하의 순철 코어(iron core)와 특이한 미세구조(양과 껍질 형태의 입계)를 가진 카보닐철 분말로 제조된 투자율 40 이하의 카보닐철 코어(carbonyl iron core)가 있다. 순철 코어는 투자율의 안정성, 코어손실, 온도안정성 면에서, 상기의 퍼멀로이계와 샌더스트 코어 대비 특성이 현격히 떨어지지만, 분말 코어중에서 가장 가격이 저렴하여, 저가 또는 50 kHz 이하의 스위칭 주파수의 전원장치에 노이즈 필터와 초크 코일로서 많이 사용되고, 카보닐철 코어는 원료가 가격이 철코어 대비 상당히 높으나, 투자율이 낮으며, 미세한 원료의 입도와 앞서 언급한 특수한 미세구조에 의해 높은 품

질계수(Q)를 얻을 수 있어, 음향기기의 노이즈 필터와 노트북 컴퓨터의 VRM(voltage regulator module)용 코어로 주로 사용된다.

앞에서 기술한 여러 재료의 기본적인 특성을 표1에서 간략하게 정리하였으며, 이 중에서 MPP, High Flux, 샌더스트는 제조공정의 특성상 고압의 성형을 하여야 하므로, 제품의 형상에 제약이 많아 토로이달(toroidal) 형상 이외에 U 또는 E 형상 등 용도에 따른 다양한 형태의 변화를 주기가 어려운 반면, 순철 코어는 상대적으로 저압에서 성형되기 때문에 쉽게 다양한 형태로 제작이 가능하다.

## 2. 재료의 선택

전원공급장치를 포함한 회로 설계자들은 설계시에 어떠한 기준을 가지고 재료를 선택하여야 하는가? 여러 가지 항목을 검토하여야 하나, 그 중 안정된 전류를 제공하는 인덕터의 재료로서 가장 중요한 기준은 온도, 주파수 및 투자율의 안정성과 낮은 권선 저항 및 코어 내부의 작은 전력 손실의 특성을 갖는 재질을 선택할 필요가 있다. 또한 인덕터 발열이 적어야 하며, 동일 재료에서도 적정 투자율, 적정 크기, 적절한 형상의 코어 선택을 통해 최적 설계가 용이할 수 있어야 한다. 경제성까지 고려하며, 최적 설계를 하기 위한 재료선정을 위해서는, 다양한 재료에 대한 깊이 있는 이해와 풍부한 실무경험이 필요하다. 이를 위하여, 기본적인 분말 자성 코어 요구 특성 항목에 대하여 서술하고자 한다.

### 2.1 투자율

자성체에서 외부로부터 인가되는 자장의 세기에 대한 자속의 발생 능력을 의미하는 것으로서 투자율은 코어 재질 및 형상에 따라 변하며 동일한 형상, 크기 및 권선상태에서 높은 투자율을 가지는 자성체는 높은 인덕턴스를 가지게 된다. 투자율과 인덕턴스의 관계는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

표 1 코어재질별 특성 비교

코어 재질	코어 손실	직류중첩특성	가격	주파수	포화자속밀도	온도안정성
MPP	Lowest	Better	High	1 MHz	7,000G	Best
High Flux	Low	Best	Medium	1 MHz	15,000G	Better
Sendust	Medium	Good	Low	2 MHz	10,000G	Good
Iron	Highest	Poor	Lowest	50 kHz	10,000G	Poor
Amorphous(gapped)	Medium	Better	Highest	300 kHz	6,500G	Poor
Ferrite(gapped)	Lowest	Poor	Low	1 MHz	4,500G	Poor

$$L = \frac{0.4\pi\mu N^2 A \times 10^{-2}}{\ell} \quad (\mu H)$$

- 여기에서, L = 인덕턴스(inductance,  $\mu H$ )
- $\mu$  = 코아재료의 투자율(permeability)
- N = 권선수
- $\ell$  = 평균자로(mean magnetic path length, cm)
- A = 코아의 단면적(cross section area,  $cm^2$ )

### 2.2 품질계수

가청주파수와 사용 주파수 범위에서 이론적으로 완벽한 리액턴스(유도저항)에 가까운 부품은 높은 품질의 수행을 얻기 위해서 필요하며 필터에서 높은 감쇄비와 제한된 공명의 향상과 cut-off를 짧게 하기 위해서 높은 품질의 인덕터(분말 자성 코아)가 필요하다. 인덕터에 있어서 품질은 Q factor로 평가할 수 있다. 인덕터의 Q는 저항과 리액터의 비로 다음과 같이 규정할 수 있다.

$$Q = \frac{2\pi fL}{R_{DC} + R_{AC} + R_d}$$

- f : 주파수(cycles/sec)
- L : 인덕턴스(H)
- $R_{DC}$  : 선 저항( $\Omega$ )
- $R_{AC}$  : 코아의 손실에 기인한 저항
- $R_d$  : 권선간 유전손실에 의한 저항

### 2.3 직류중첩특성

인덕터에 직류 중첩시 투자율은 감소하는데 이는 코아의 자기적 특성의 변화에 기인한 것으로서, 코아는 일정치의 자기적 에너지를 저장할 수 있으나 그 이상의 영역에서 코아의 투

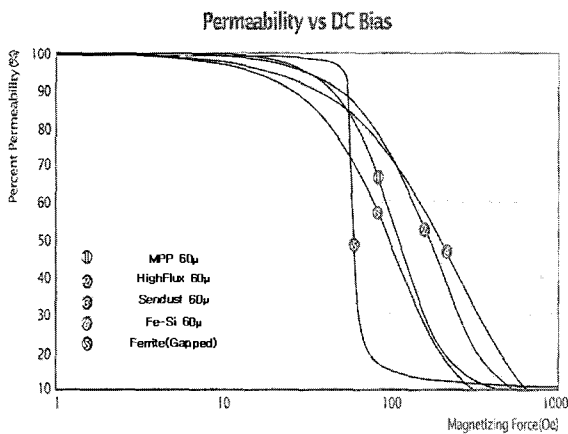


그림 2 Powder core 재질별 직류 중첩 특성

자율은 감소하게 되고 인덕턴스 또한 감소하다. 결과적으로 직류중첩특성이 우수하다는 것은 높은 직류에서 일정한 인덕턴스를 유지한다는 것을 의미한다.

그림 2에서와 같이 각 재질별로 직류 중첩 특성에 차이가 있으며 이는 재료의 포화자속 밀도에 비례한다. 페라이트 경우 낮은 포화자속 밀도로 인하여 대전류에서의 투자율이 급격히 감소하며 대전류 특성을 만족하기 위하여 gap을 낸 것으로 누설자속이 발생하는 단점이 있다.

### 3.4 코아손실

코아 손실은 인덕터에서의 저항 손실로써 코아의 권선과 에너지의 손실 구성에 반영되어진다. 코아 제조 분야에서 사용되어지는 코아 손실은 주파수로 인하여 변하는 와전류 손실과 주파수와 자속밀도로 인하여 변하는 히스테리시스 손실과 고주파수에 기인하여 변하는 잔류 손실을 포함하며 그 관계식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{R_{AC}}{\mu L} = ef^2 + aB_m f + cf$$

- $\frac{R_{AC}}{\mu L}$  : 총 손실
- $ef^2$  : 와전류 손실
- $aB_m f$  : 히스테리시스 손실
- $cf$  : 잔류 손실

### 3. 기술 동향

최근 스위칭 전원장치 산업의 성장을 주도하는 것은 서버 PC, 고기능PC등의 시장이다. 주요 메이커는 IBM, DELL, HP 등이나, 실제 생산은 대만, 중국 업체에 의해 중국에서 이루어지고 있다. PC의 고급화 그리고 대용량화에 따라, 전원장치의 설계사양에도 큰 변화가 있다. 우선 CPU의 사양이 점점 고주파수화, 대전류화 되고 있으며, 이에 따른 안정적인 전원의 공급이 큰 이슈로 등장하게 되었다. 이에 대한 대응으로, 인텔사 등의 설계기준인 VRM(Voltage Regulator Module)이 가이드라인으로 적용되고 있으며, 이에 따르면, VRM용 인덕터는 저손실, 대전류 중첩특성이 절대적으로 요구된다. 또한, 멀티미디어 기능, 통신 기능 등 PC의 다기능화에 따라, 전원장치의 용량이 증가하고 있으며, 이에 따라 역률개선(PFC)회로의 채택이 의무화 되어가는 추세이다. 이에 따라 PFC회로의 추가에 따른 전원장치의 부피 증가를 최소화하기 위한 고성능의 PFC용 리액터로서 역시 대전류 안정성, 주파수 안정성 그리고, 저손실의 분말 코어가, 특히 High Flux 코어의 수요가 증가하는 추세이다.

중국이 전세계 전자제품의 생산 기지화 됨에 따라, 제품의

저가격화가 급속히 진행되고 있으며, 대량 물량에 기반한 중국 대만 업체의 저가격 정책에 대응하기 위한 저가형 제품의 개발이 활발히 진행되고 있다. 분말 코어 분야에서도 이러한 상황에 적극 대응하고 있으며, 대표적인 기술 개발 동향을 간략히 정리하였다. 또한 앞서 기술한 전원분야 고기능 제품에 대응하기 위한 최근의 신규 분말 코어 개발 동향(고기능화, 경제성 확보)을 정리해보았다.

### 3.1 신재료 및 신공정의 개발

현재 상용화된 분말 코어재료는 대부분 개발된지 70년 이상된 재료들로서, 재료의 안정성, 전자기적 특성 등이 충분히 검증된 상태이다. 그러나 최근의 고성능, 고기능화에 대한 만족할만한 수준의 대응에는 한계가 있다는 지적이 있다. 이에 대한 대응으로서, 다양한 기술적 시도가 진행 중이며, 대표적인 사례를 정리하였다.

#### 3.1.1 고품성 퍼멀로이계 분말 코어

니켈계 합금 중에서, MPP와 High Flux는 기본적인 연자기 특성과 온도의 변화에 대한 투자율의 안정성이 뛰어나고, 코어손실이 낮아 일반적으로 사용되는 대표적인 재료이다. 하지만, 최근 응용분야의 고성능화에 따라 요구되는 우수한 대전류 중첩특성과 낮은 코어 손실이 더욱더 요구되어지고 있는 실정이고, 이러한 요구를 충족하기 위하여 소재설계 면에서 금속원료의 입도 제어, 금속 내부의 내부 결합 제어 및 효과적인 세라믹 분말 코팅 기술이 꾸준히 연구되고 있다. 최근 일부 High Flux 제품에서 이러한 연구의 결과로 단점으로 지적되던 높은 코어 손실을 MPP 수준까지 낮추어 가격경쟁력이 우수하며 대전류 특성이 우수한 저손실 High Flux가 국내에서 출시되고 있다.

#### 3.1.2 고품성 철합금계 분말 코어

대표적인 철합금계 분말 코어인 샌더스트의 경우, 퍼멀로이

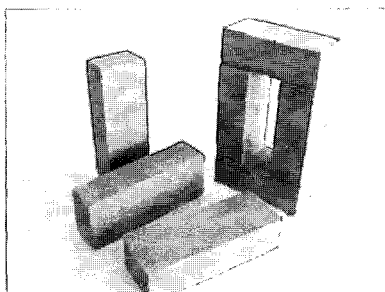
재료와 같이 투자율의 안정성이 우수하고, 코어 손실이 낮으며, 상대적으로 가격이 저렴한 장점을 가지고 있으나 고투자율을 얻기 힘들고, 직류 중첩 특성이 우수하지 못한 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위한 대안으로 연자기 특성이 우수한 Fe-6.5%Si 합금 조성을 분말야금 공법으로 제조한 규소강 분말 코어 개발이 활발하게 이루어지고 있으며, 기술적 측면에서 낮은 코어 손실을 구현하는 것이 핵심적 과제로 남아있으며, 조만간 저손실을 구현한 제품이 출시될 것으로 기대된다.

#### 3.1.3 비정질 분말 코어

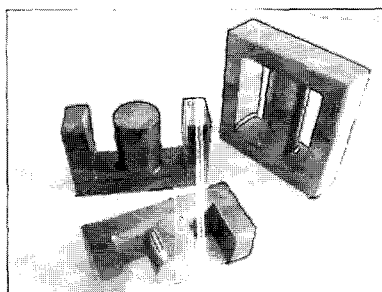
비정질 연자성 합금 및 나노 결정립 합금은 비정질화에 따른 자기 이방성의 소멸과 조성제어에 의한 자기변형의 최소화 등을 통하여 연자기 특성을 향상시킨 것으로, 리본을 말은 형태(wound)로 제조되어 왔으나, 최근 대전류 특성 향상을 목적으로 리본을 분쇄하여, 분말 코어 형태로 제조한 코어가 개발되었다. 현재까지는 투자율이 낮아 용도에 한계가 있으나, 추가적인 보완이 기대된다.

### 3.2 공정한계의 극복

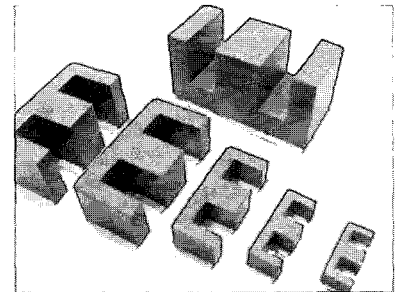
현재 상용화된 금속 분말 코어의 형상은 제조공정의 특성상 철코어 및 페라이트 대비 고압의 성형을 하여야 하므로, 제품의 형상에 제약이 많아 일반적으로 토로이달(toroidal) 형상 이외에 다양한 형상으로 코어를 제조하기가 어렵다. 하지만, 응용분야에 따라 다양한 형상이 요구되고 있는 실정이며, 이러한 형상을 얻기 위한 공정기술, 성형기술 및 금형 기술의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 현재 개발된 특수 형상 제품을 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)의 경우, 규소강 분말을 block 형태로 제조한 경우로, 단위블록을 적절히 조합하여 다양한 형태로 대용량 코어를 제조할 수 있는 설계상의 이점을 제공하며, 자동차 전원, 신재생에너지 전원 등에 응용이 검토되고 있다. High Flux 분말의 성형강도 개선을 통하여 제조



(a) Block 코어(규소강 분말)



(b) EER 코어(HighFlux)




(c) EE 코어(샌더스트)

그림 3 특수 형상 코어

한 EER 코어(그림 3(b))와 샌더스트 분말로 제조한 EE 코어(그림 3(c))는 기존의 보빈을 사용할 수 있어 권선이 용이할 뿐만 아니라 페라이트 등에서 얻을 수 없는 대전류 특성을 얻을 수 있어, 설계 변경 없이 대체가 가능하도록 설계된 예이다.

#### 4. 맺음말

MPP, High Flux, 샌더스트등 분말 코어를 재료학적 관점에서 전원 설계를 중심으로 소개하였다. 처음 개발된 이래로, 분말 코어의 주요한 사용용도는 전화 통신 장비에서 7, 80년대의 개인용 저용량 PC를 거쳐, 현재 유무선 통신, 디스플레이, 고기능PC, 휴대용 디지털 기기 등으로 옮겨온 상태이며, 앞으로도 전기자동차(HEV)의 전원 및 태양광 발전 등 신재생에너지 전원, 대용량 디스플레이 전원 등 새롭게 태동하는 미래 산업에서 중추적 역할을 할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 현재의 재료가 가진 몇몇 한계를 신기술로서 극복하고 고성능의 신재료를 개발하고, 공정의 혁신을 통한 경제성을 확보하는 것이 기술적으로 해결해야할 과제로 남아있다. 앞서 언급한 다양한 기술적 시도가 특히 국내에서 많은 결실을 맺어, 다가올 미래의 산업 분야에서 전력전자분야, 그리고 분말 자성 코어가 핵심적 역할을 하기를 기대해 본다. 

### 《저자 소개》



#### 최광보(崔光溥)

1965년 12월 7일생. 1988년 서울대 공대 금속공학과 졸업. 1990년 동 대학원 금속공학과 졸업(석사). 2005년 연세대 대학원 금속공학과 졸업(공학박). 1990년 2월~현재 (주)창성 중앙연구소 부장.