≪해설논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 21, Number 2, April 2011 DOI: 10.4283/JKMS.2011.21.2.077

고에너지효율 연자성 복합 분말 소재의 연구개발 동향

김휘준*

한국생산기술연구원 뿌리산업연구부문, 인천광역시 연수구 송도동 7-47, 406-840

(2011년 4월 18일 받음, 2011년 4월 22일 최종수정본 받음, 2011년 4월 22일 게재확정)

우리 삶의 질을 좌우하는 전자기 기기의 고기능화, 자동화, 소형화 추이에 따라 사용량이 급격히 증가하고 있는 연자성 소재로서 가장 널리 사용되고 있는 전기강판과 에너지 고효율화라는 시대의 요구에 따라 새롭게 부상되고 있는 연자성 복합 분말 소재에 대해 각 연자성 소재 분야에서 철손 제어 인자 및 이들 인자들의 제어 방안에 대해 문헌을 고찰했다. 전기강판에서는 히스테리시스 손실을 낮추기 위해 정련공정을 통해 자구이동을 방해하는 결함을 제거하고 결정립의 크기를 최적화하고 있으며, 와전류 손실의 감소를 위해 합금첨가원소를 통해 비저항을 높이고 판재의 두께를 박판화하고 있다. 이와 동시에 코팅을 통해 자구의 이동이 용이하도록 응력의 방향 및 크기를 제어하며, 압연기술과 열처리 기술을 통해 집합조직을 최적화하여 고투자율 및 저철손을 동시에 충족시켜 나가고 있다. 연자성 복합 분말 소재의 경우, 분말 표면의 복합화를 통해 철계 조성, 코팅, 윤활재 및 바인더, 성형 및 열처리 조건 등에 복합적으로 의존하는 연자성 코어의 최종 자기특성을 제어하고 있다. 온간 및 다단 성형과 같은 새로운 성형공정, 2단 소둔/자성 열처리와 같은 소둔 조건, 나노결정질, 비정질 및 벌크 비정질 등과 같은 새로운 조성, 적절한 코팅층의 변수들을 최적화할 경우, 연자성 복합 소재의 자성특성은 향상될 것으로 기대된다.

주제어 : 연자성, 연자성 복합 분말 소재, 전기강판, 철손, 히스테리시스 손실, 와전류 손실

I. 서 론

연자성 소재는 자동차, 로봇, 전자, 전기, 신재생에너지, 컴퓨터 및 통신 산업 등 우리산업 전반에 걸쳐 널리 사용되고 있으며, 사용하는 기기들의 고기능화, 자동화, 소형화 추이에 따라 사용량이 급격히 증가하고 있다. 지난 수 십년 동안 다양한 형태의 연자성 소재가 사용되어 왔는데, 전기강판, Fe, Ni-Zn/Mn-Zn 훼라이트, Fe-Ni, Fe-Si, Fe-Si-Al, 비정질(amorphous), 나노결정질(nano crystalline), 금속계 유리질(metallic glass) 금속 등이 대표적이다. 지금까지 많은 연구자들에 의해 연자성소재의 제조 공정, 특성, 자성 특성에 미치는 첨가 원소의 영향, 그리고 응용분야 등과 같은 다양한 관점에 대해 논의되었다.

전기강판은 현재까지 지속적으로 연자성 특성이 개선되고 있으며, 전세계적으로 사용되고 있는 연자성 소재의 97%, 연간 약 10조원의 시장을 차지할 만큼 가장 널리 사용되고 있다. 한편, 우리가 사용하고 있는 전력의 5% 이상이 전기강판이 사용되고 있는 모터 및 변압기의 자심에 의해 발생하는 철손(core loss)에 의해 소모되고 있다[1].

최근 분말야금공정에 의해 제조된 연자성 복합 분말 코어가 균일한 3차원적 자성특성, 복잡한 형상의 코어 제조 가능성, 중·고주파 영역에서의 낮은 철손 등의 장점을 활용하여 연자성 코어 산업에서 그 영역을 확대해가고 있다[2].

*Tel: (032) 850-0406, E-mail: khj@kitech.re.kr

본 논문에서는 현재까지 널리 사용되고 있는 전기강판의 철손저감 인자들의 영향 및 제어방안을 기초로 하여 연자성 복합 분말 소재분야에서 에너지효율 향상을 위해 수행하고 있는 최근의 연구동향을 소개하고자 한다.

II. 전기강판의 철손 제어 인자 및 방안

1. 전기강판의 철손 기구

방향성 및 무방향성 전기강판은 폭 1,000 mm 이상 두께 0.1~0.65 mm의 판재형태로 제조되는데, 기지인 Fe에 Si을 첨가하면 전기저항이 증가하여 교류 자화 조건에서 사용할 경우 철손이 감소한다. 그러나 Si 첨가에 따라 자기변형 및 결정 자기이방성이 감소한 반면에 포화자화가 감소하고 취성이 발생하는 단점이 있다.

교류 자화 조건하에 있는 연자성 소재내에서는 자벽이동에 의해 와전류가 발생하는데, 이로 인해 내부열이 발생하고 이를 철손이라 부른다. 일반적으로 철손은 Fig. 2에서와 같이 히스테리시스 손실(hysteresis loss), 고전 와전류 손실(classical eddy current loss), 이상 와전류 손실(anomalous eddy current loss) 등으로 구분된다.

히스테리시스 손실은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 주파수에 독립적인데, 이론적으로는 계산할 수 없고 측정된 *B-H*곡선의 단면적에 비례한다. 다양한 연자성 소재에 대한 연구에 의하면 일반적으로 히스테리시스 손실은 연자성 소재의 화학조성, 불순물의 분포, 집합조직, 결정립 크기 및 내부응력, 코팅면

Fig. 1. The main application industrial fields of soft magnetic core materials.

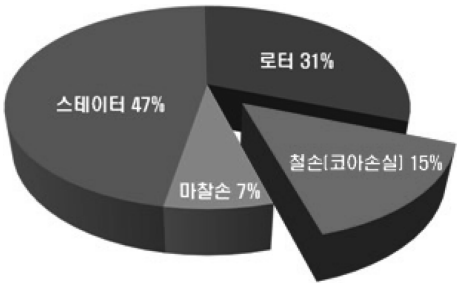

Fig. 2. The electrical energy consumption portion of each component in motor.

과의 응력, 표면조도 등에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 즉, 연자성 소재내에 존재하는 결함에 의해 자벽이 이동에 방해를 받는 것과 연관이 있으며, 따라서 고순도 소재일수록 상대적으로 낮은 히스테리시스 손실을 나타낸다. 실험식에 의하면 히스테리시스 손실은 주어진 자화 주파수에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_h = K_h f(\hat{B})^n \tag{1}$$

여기서, $\hat{B}$는 최대자속밀도, K_h 및 n은 연자성 소재 인자 및 자화조건에 의존하는 상수이다.

고전와전류 손실은 자화 주파수 f에 따라 다음과 같이 계산될 수 있는데, 투자율은 일정하다는 가정 즉, B-H곡선이 선형이라는 가정이 전제되어 있다.

$$P_e = \frac{K_c(\hat{B}fd)^2}{\rho} \tag{2}$$

여기서, K_c는 재료의존 상수이고, d는 두께, ρ는 전기저항이다. 식에서 보는 바와 같이 고전와전류 손실을 감소시키기 위해서는 두께를 줄이고 전기저항을 높여야 한다.

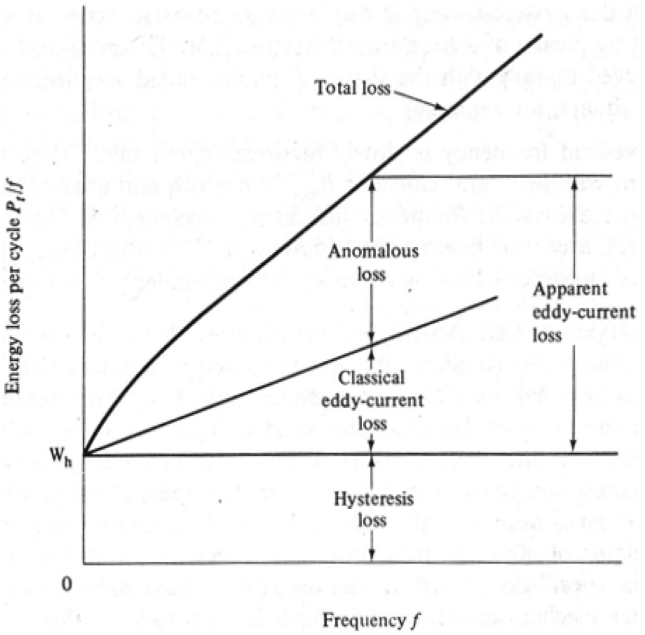

Fig. 3. Energy loss per cycle as a function of magnetizing frequency in soft magnetic materials.

이상 와전류 손실이 히스테리시스 손실과 고전와전류 손실을 합한 값보다 큰데 이는 자벽이동 동안에 발생하는 손실기구(loss mechanism)에 기인하는 것으로 보고되고 있다[3]. 이들 손실기구로는 자벽의 휨(domain wall bowing), 자벽의 핵생성 및 소멸, 불균일 자벽이동 및 사이클간 비가역적 자벽이동 등이 고려되고 있다. 이상와전류 손실은 다음과 식에 의해 계산될 수 있다.

$$P_a = 8.8\sqrt{\sigma G S V_0}(\hat{B}f)^{\frac{3}{2}} \tag{3}$$

여기서, σ는 전기전도도, S는 소재의 단면적, 그리고 G와 V_0는 자화조건 및 재료에 의존하는 상수이다.

무방향 저 Si 전기강판의 50 Hz에서 히스테리시스 손실은 전체 손실의 30~60%, 고전와전류 손실은 40~60%, 이상와전류 손실은 10~20%인데, 자속밀도에 따라 달라진다. 고 Si 전기강판의 경우 이상와전류 손실은 더욱 증가한다.

2. 전기강판의 자기특성 제어인자

전기강판의 자구구조에 영향을 주고 결국은 자기특성을 제어하는 인자들로는 불순물, 적층두께, 화학조성, 주파수 및 최대 자속밀도 등이 있다. 어떤 응용분야에서는 연자성 코어의 철손이 전기강판의 실험을 통해 예측되는 손실보다 40% 이상 증가할 수 있는데, 이와 같이 연자성 코어의 철손을 가중

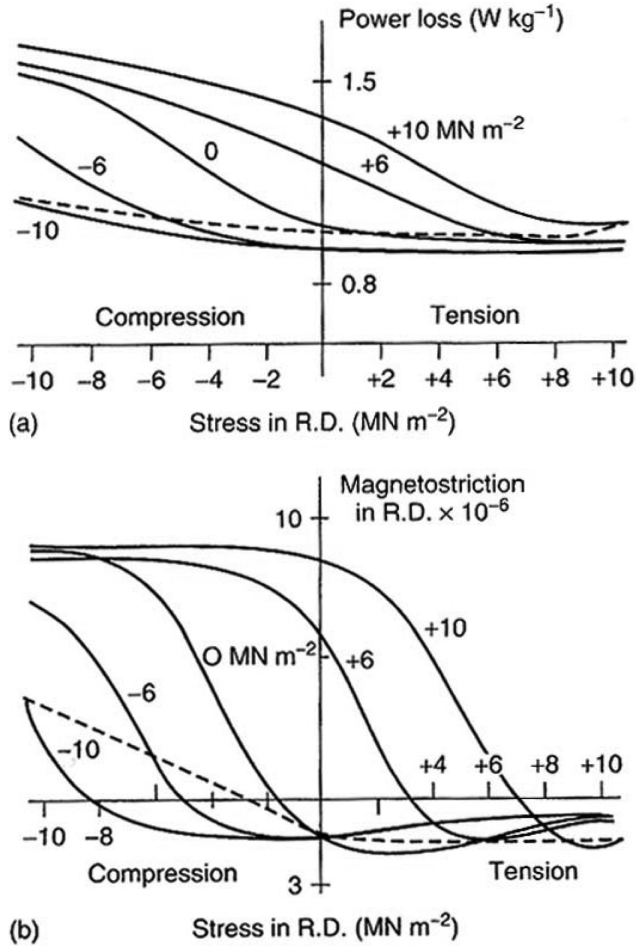

Fig. 4. Variation of loss and magnetostriction with stress applied along the rolling direction of grain-oriented electrical steel (from A. J. Moses et al., 1978).

시키는 요인을 코어 제조 인자(Core building factor)라고 정의하고 측정되고 있다[4].

기계적 응력은 전기강판의 자기특성에 유리한 조건을 제공할 수도 있고 불리한 조건을 제공할 수도 있다. Fig. 4는 주파수 50 Hz, 포화자속밀도 1.5 T의 조건에서 압연방향을 따라 자화될 때 방향성 전기강판에서 응력에 따른 철손 및 자기변형(magnetostriction)의 변화를 나타내고 있다. 자기변형은 전기기기의 소음발생 요인이기 때문에 변압기와 같은 응용분야에서는 신중하게 고려되어야 할 특성 중의 하나인데, 압축응력에 따라 자기변형이 급격하게 변하지만 인장응력의 경우 상대적으로 거의 변화가 없다. 한편, 압연방향에 수직인 방향으로 압축응력이 동시에 주어졌을 때 길이방향으로의 압축에 대한 자기변형 및 철손의 민감도는 크게 감소하지만 수직인 방향으로 인장응력이 주어지면 오히려 자기 특성이 더욱 나빠진다. 기계적 응력으로 인해 연자성 소재내에 자기탄성 에너지(magneto-elastic energy)가 발생하고, 자유 자기에너지를 다시 최소화하기 위해 심지어 탈자화된 상태에서도 자구가 재배열된다. 전기강판에서 자구들은 인장응력 방향에 가장 가깝고 압축응력 방향에서 가장 먼 <100> 방향으로 배열하는 경향이 있는데, 이는 자화 방향을 따라 인가되는 압축응력의 유해한 영향이 큰 것에 비해 인장응력의 영향은 작기 때문이다.

방향성 전기강판의 표면에 코팅을 하면 압축응력에 대한 자기 특성의 민감도를 감소시킬 수 있다. 높은 투자율의 전기강판은 특수하게 선정된 고응력 코팅 덕분에 응력 민감도가 낮다. 방향성 전기강판에서 코팅에 의해 발생한 응력으로 인해 응력 민감도 곡선은 압연방향을 따라 큰 인장응력 영역으로 이동하게 된다. 이들 응력 민감 특성은 예측된 자구 구조의 재배열로부터 정성적으로 계산할 수 있는데, 자구 구조의 재배열로 인해 자기탄성에너지에 의해 생긴 전체 자유에너지가 최소로 된다. 이론적으로, 자기탄성에너지는 응력의 크기, 개별 결정립의 <100>방향에 대한 응력의 방향, 포화 자기변형 상수(λ_{100} 및 λ_{111})에 따라 달라진다. Si의 함량이 증가함에 따라 가기변형 상수들은 감소하다가 6.5 wt.% Si 조성에서 가장 낮은 값을 나타낸다.

3. 전기강판에서 자기특성 최적화

전기강판에서 주요 연구개발 목표는 동일한 재료에서 철손 및 투자율을 동시에 최적화 하는 것이다. 일반적으로 높은 투자율을 얻기 위해서는 합금첨가 원소의 함량을 낮추고 결정립을 작게 하는 것이 필요하지만, 낮은 철손을 만족시키기 위해서는 높은 합금원소 함량 및 큰 결정립이 요구된다. 이를 위해서 탈황, 탈탄, 및 진공 탈가스 공정을 통해 정련된 전기강판에 집합조직을 더욱 정밀하게 제어함으로써, 높은 투자율 및 낮은 철손이 동시에 충족되고 있다[5]. 최근 들어 자기특성 향상을 위해 집합조직 제어가 방향성 전기강판에서만 아니라 무방향성 전기강판에서도 중요하게 되었다.

전기강판의 두께를 줄이는 것이 와전류 손실을 감소시키기 위해서 중요한 요인이며, 방향성 전기강판의 경우 두께 0.1 mm 전기강판이 상업적으로 생산되고 있다. 무방향 전기강판의 경우 이보다 더욱 얇은 두께가 필요하지만, 가격이 보다 중요한 요인이 되기 때문에 고합금 전기강판에 한정되고 있다. 주어진 조성에서, 철손을 감소시키기 위해서는 두께 및 결정립 크기를 최적화해야 하는데, 최적 조건은 히스테리시스 손실에 대한 와전류 손실의 비와 연관되어 있다.

최근 전기강판의 자기손실을 낮추기 위해 Fig. 5에서와 같은 히스테리시스 손실 및 와전류 손실을 저감하려는 다양한 대책들을 시도하고 있다. 먼저 히스테리시스 손실의 저감을 위해서는 결정립을 크게 하고, 불순물, 개재물, 잔류응력 등과 같이 자구이동을 방해하는 요인들(pinning sites)을 제거하고 있으며, 표면처리를 통해 압축응력에 의해 발생된 표면 근

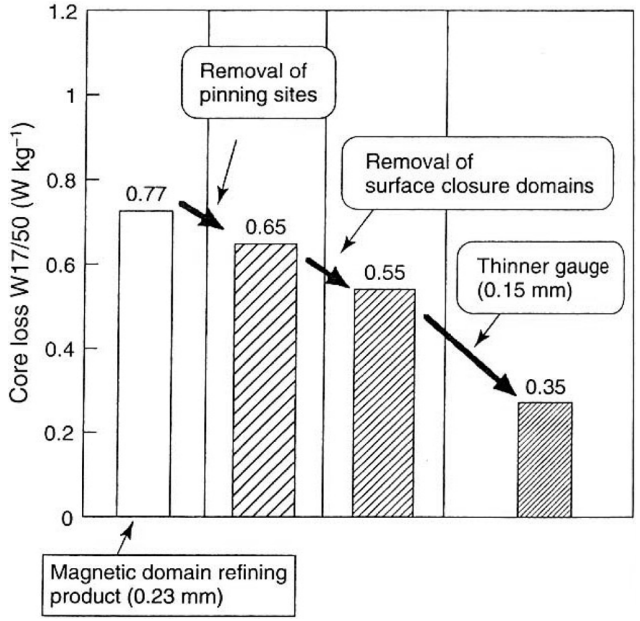

Fig. 5. Future prospects for low loss grain-oriented electrical steel (from Kubotal et al., 2000).

접 자구(surface closure domain)를 제거하고 있다. 한편, 두께를 더욱 감소시켜 와전류 손실을 낮추려는 연구도 지속적으로 시도되고 있다.

III. 연자성 복합 분말 소재의 고에너지효율화 연구동향

전자기 소자에 사용되는 연자성 복합 분말 소재(SMC; soft magnetic composites)는 전기적 절연막에 의해 둘러싸인 철계 자성분말로 정의될 수 있다. 연자성 분말코어 부품들은 일반적으로 2단 성형, 온간 성형, 상대적으로 낮은 온도에서 열처리에 의한 다단 및 자성 소둔 등과 같은 새로운 기술과 기존의 분말 성형 기술을 결합시켜 제조되고 있다. 이들 복합 소재들은 대부분의 응용분야에서 기존의 적층 전기강판 코어에 비해 몇 가지 유리한 점이 있다. 연자성 복합 분말 소재의 경우 3차원적으로 균일한 연자성 특성, 매우 낮은 와전류 손실, 중주파 및 고주파에서 상대적으로 낮은 철손, 열적 특성의 개선, 유연한 설계 및 조립 특성, 중량 및 가격의 저감 가능성 등과 같은 고유 특성에 관심이 집중되고 있다.

연자성 복합 분말 소재의 새로운 개발로 인해 새로운 기계 설계 방안 및 새로운 제조 기술이 결합될 경우 전자기 기기의 응용에 이들 소재의 관심은 더욱 높아지고 있다. 이들 복합체들은 경량화 및 소형화와 같은 장점을 제공한다. 경량화는 소재, 부품설계 및 제조공정 분야에 있어 몇 가지 기술개발을 통해 구현된다. 부품 설계방안을 확립하기 위해서는 연자성 복합 분말 소재의 전자기 손실 특성에 관심을 가져야 한다. 몇가지 다양한 형태의 철계 연자성 복합 분말 소재가 있는데, 1) 수지와 결합한 순철 분말, 2) 소결 철계 분말, 3) Zn-에스테르 및 탄소가 첨가된 순철 분말, 4) 철계 분말 합금(Fe, Ni, Co, Si), 5) 상업적으로 유용한 철계 분말 “Somaloy” 등이 여기에 속한다[6, 7].

연자성 복합 분말 소재 응용에 있어 최근 상업적 적용 예로는 일본의 Asian Seiki사에서 생산한 ABS형 브레이크 시스템용 BLDC-모터가 있다. SMC를 적용한 기기는 짧은 자성 경로 및 최소 무게를 사용하도록 설계되어야 한다. 자성코어 및 자기 기기 등과 같은 몇몇 응용분야에서, 이들 복합체에 의해 전기강판 또는 페라이트 소재들이 대체되고 있다.

1. 연자성 복합 분말 소재의 철손 제어인자

전기강판에서 언급한 바와 같이 전통적으로, 자성 소재의 손실에 기여하는 인자들은 세 가지로 분류되는데, 1) 히스테리시스 손실, 2) 와전류 손실, 3) 잔류 손실 등이 있다. 잔류 손실은 매우 적어서 무시할 정도인데, 단지 매우 낮은 유도 수준 또는 매우 높은 주파수에서만 중요하기 때문에 전력응용분야에서는 무시된다. 따라서, 자기 기기의 총 철손은 와전류 손실 및 히스테리시스 손실의 합인데, 이들 손실에 대한 인자 및 제어방안은 Fig. 6에서 보는 바와 같다.

히스테리 손실은 저주파에서 주요 손실 부분인데, 분말 자성소재의 경우 큰 입자크기, 높은 순도 그리고 응력제거 열처리에 의해 저감될 수 있다. 철분말 자성소재에서 철입자의 순도 및 응력을 받은 영역은 자벽이동을 방해하는 피닝 사이트(pinning site)를 증가시킨다. 이들에 의해 증가된 보자력은 철분말의 고순도화 및 응력제거 열처리에 의해 감소시킬 수 있다. 자벽이동을 방해하는 또 다른 인자는 입자내부의 결정립이다. 히스테리 손실을 줄이기 위해서는 성형한 다음 열처

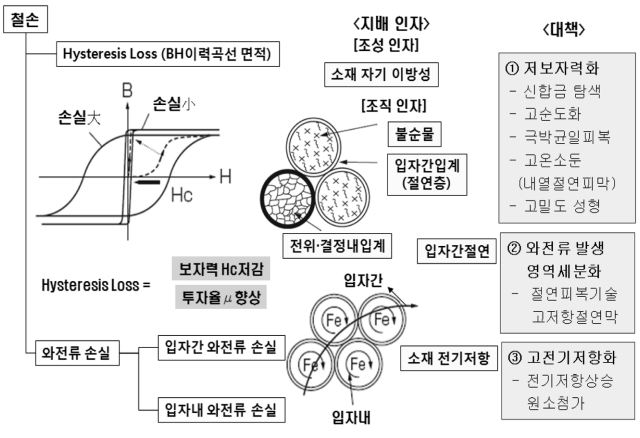

Fig. 6. The schematic diagram of the concept to reduce hyteresis loss and eddy current loss in soft magnetic composites.

리를 반드시 수행해야 한다.

와전류 손실은 교류전기장에서 발생하는 코어내의 전기적 저항 손실로 인해 발생한다. 와전류가 재료에 유발되면, 두 가지 주요 효과가 관찰되는데, 재료의 불완전한 자화(표면효과) 및 철손의 증가이다. 와전류 손실을 최소화하기 위해서는 우선, 철분말에 Si을 첨가함으로써 전기저항을 증가시키고 두께를 더욱 얇게 적층하고 있다. 최근에는 와전류 손실을 최소화하기 위해 절연된 철분말을 사용하는데, 모든 입자들에 절연 코팅을하면 입자 내부에 매우 작은 와전류 경로를 제공하여 성형체에 매우 높은 저항을 유발한다. 모든 입자들 사이에 작은 비자성 거리는 공기간극(air gap)으로 작용하여 성형체의 투자율을 감소시키는 단점이 있다[2].

2. 연자성 복합 분말 소재의 복합화 공정

연자성 복합 분말 소재는 매우 얇은 절연층으로 코팅된 연자성 분말로 제조되는데, 고주파 응용에서 와전류 손실을 최소화하기 위해서는 절연특성이 좋고 미세한 분말이 요구된다. 저주파의 경우, 절연이 덜 중요하지만, 재료의 자화에 미치는 와전류의 부정적인 영향을 최소화하기 위해 필요하다.

일반적으로 절연 코팅은 두 가지 범주로 구분되는데, 무기코팅의 경우 Fe_2O_3와 같은 금속 산화물 코팅, 아연 인산염, 철 인산염, 망간 인산염과 같은 인산염 코팅, 그리고 황산염 코팅 등이 있으며, 이에 반해 유기코팅의 경우 열가소성 코팅 및 열경화성 코팅이 있다.

투자율을 최대로 유지하기 위해서는 입자간 절연물의 양이 최소로 되고 철의 양이 최대로 되어야 한다. 에폭시 양이 6.5 vol.%를 넘으면 고주파에서는 사용할 수 없다. 고분자 수지 결합 철분말로 제조된 코어는 수지의 혼합량을 최대한 낮춰야 하지만, 이 경우 코어의 강도가 낮아진다.

연자성 철분말을 고분자로 코팅하는 수많은 방법이 있는데, 1) 용매에 수지를 녹인 용액에 철분말을 분산시키고 용매를 제거하는 방법, 2) 수지를 분말 표면에 직접 코팅하는 방법, 3) 적당한 용매에 녹인 고분자를 유동상로(Fluidized Bed Furnace) 내에서 철분말에 코팅하는 방법 등이 대표적으로 사용되고 있다.

열경화성 수지는 코팅층이 잘 유지되지만, 한번 경화되면 복합화된 철분말을 재성형할 수 없다. 그러나, 열가소성 수지는 산업적으로 사용 가능한 용매에 거의 녹지 않기 때문에 균일하고 연속적으로 철분말에 코팅할 수 없고, 가열된 조건에서는 유동성이 너무 높아 쉽게 처리하기 어렵다.

에폭시, 아크릴, 폴리에스테르, 폴리우레탄 등과 같은 열가소성 대신 열경화성 수지를 선택하면 연자성 복합재의 자기적 특성 및 기계적 특성이 온도에 따라 변하는 것을 최소화 할 수 있는데, 1) 분말을 즉시 사용할 수 있고, 2) 제조 공정에서 분말 손실이 적고, 3) 작업자에게 덜 유해하며, 4) 우수한 절연층 제조가 가능하고, 5) 적은 투자비용이 소요된다는 장점이 있다.

인산염, 산화물, 황산염 등과 같은 무기 조성물을 포함한 무기 코팅은 전기적으로 절연된 입자를 제조하는데 사용될 수 있다. 철분말에 무기 코팅을 하는 방법으로는 연자성 분말 표면에 Fe-Zn 인산염을 코팅하는 습식 화학법, 적절한 온도 및 분위기의 로내에서 금속을 산화시켜 산화층을 코팅하는 건식 화학법이 있다. 습식 화학법의 경우, 코팅공정의 변수들인 시간, 온도 및 염욕 조성 등의 정밀 제어가 요구된다[8, 9].

3. 고에너지효율 연자성 복합 분말 소재의 활용 방안

이상적인 연자성 소재는 매우 높은 자기 투자율, 낮은 보자력 및 높은 자속밀도를 갖는 등방성 물질이면서, 3차원적 구조로 쉽게 성형되고 소재의 등방성을 그대로 유지해야 한다. 연자성 복합분말 소재의 경우, 절연층을 갖는 미립의 철계 분말로 구성된 등방성 소재이므로 이상적인 소재에 가깝다고 할 수 있다. 경제적이고 효과적인 분말공정에 의해 3차원 성형이 가능하고, 포화자속밀도는 전기강판에 가까우며, 와전류 손실은 훨씬 적다. 그러나, 연자성 복합 소재는 공기 간극을 갖고 있어 투자율이 감소하고, 성형과정에서 입자의 소성변형이 발생하여 히스테리시스 손실을 증가시킨다. 따라서 응력제거를 위한 열처리 공정이 반드시 필요하게 된다.

최근의 철계 연자성 복합 소재는 바인더의 부피를 줄이고, 성형성을 높이기 위해 윤활성을 갖는 절연층을 사용하며, 저항을 증가시키기 위해 철입자 표면을 산화시키는 등의 복합적인 연구를 수행하고 있다.

연자성 복합화의 개념은 철계 연자성 분말의 조성, 코팅, 윤활재 및 바인더, 성형 및 열처리 조건 등에 복합적으로 의존하는 연자성 코어의 최종 특성을 제어하는데 매우 유연하다. 온간 및 다단 성형과 같은 새로운 성형공정, 2단 소둔/자성 열처리와 같은 소둔 조건, 나노결정질, 비정질 및 벌크 비정질 등과 같은 새로운 조성, 적절한 코팅층의 변수들을 최적화 할 경우, 연자성 복합 소재의 자성특성은 향상될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

[1] A. J. Moses, Interdisciplinary Science Reviews **22**, 100 (2002).

[2] H. Shokrollahi and K. Janghorban, J. Mater. Process. Technol. **189**, 1 (2007).
[3] G. Bertotti, Hysteresis in Magnetism for Physicists, Material Scientists and Engineers, Academic Press, San Diego (1998).
[4] A. J. Moses, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **41**, 409 (1984).
[5] H. Kronmuller and S. Parkin, Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials Vol. 4, Wiley, NewYork (2007) pp. 1932~1935.
[6] T. Maeda, H. Toyoda, N. Igarashi, K. Hirose, K. Mimura, T. Nishioka, and A. Ikegaya, SEI Tech. Review **60** (2005) pp. 3~9.
[7] K. Asaka and C. Ishihara, Hitachi Powdered Metals Tech. Report **4** (2005) pp. 3~9.
[8] I. Hemmati, H. R. Madaah Hosseini, and A. Kianvash, J. Magn. Magn. Mater. **305**, 147 (2006).
[9] A. H. Taghvaei, H. Shokrollahi, and K. Janghorban, J. Alloys Comp. **481**, 681 (2009).

Research Trend of Soft Magnetic Composite Materials with High Energy Efficiency

HwiJun Kim*
R&D Department of Liquid Processing & Casting Technology, KITECH, Songdo-dong, Incheon 406-840, Korea

(Received 18 April 2011, Received in final form 22 April 2011, Accepted 22 April 2011)

The use of soft magnetic materials have been increasing in the various industrial fields according to the increasing demand for high performance, automatic, miniaturing equipments in the recent our life. In this study, we investigated the effect of factors on the core loss and magnetic properties of electrical steel and soft magnetic composites. Furthermore, we reviewed the major efforts to reduce the core loss and improve the soft magnetic properties in the two main soft magnetic materials. Domain purification which results from reduced density of defects in cleaner electrical steels is combined with large grains to reduce hysteresis loss. The reduced thickness and the high electrical conductivity reduce the eddy current component of loss. Furthermore, the coating applied to the surface of electrical steel and texture control lead to improve high permeability and low core loss. There is an increasing interest in soft magnetic composite materials because of the demand for miniaturization of cores for power electronic applications. The SMC materials have a broad range of potential applications due to the possibility of true 3-D electromagnetic design and higher frequency operation. Grain size, sintering temperature, and the degree of porosity need to be carefully controlled in order to optimize structure-sensitive properties such as maximum permeability and low coercive force. The insulating coating on the powder particles in SMCs eliminates particle-to-particle eddy current paths hence minimizing eddy current losses, but it reduces the permeability and to a small extent the saturation magnetization. The combination of new chemical composition with optimum powder manufacturing processes will be able to result in improving the magnetic properties in soft magnetic composite materials, too.

Keywords : soft magnetic property, soft magnetic composite materials, electrical steel, core loss, hysteresis loss, eddy current loss