

SPS(Spark Plasma Sintering) 처리기술에 의한 연자성 철심재료의 특성 변화

차현록, 이규석, 윤철호, 정태욱
한국생산기술연구원 부품 소재팀

Characteristics Analysis of Soft Magnetic Composite Core Material by SPS Process

Hyun Rok Cha, Kyu-Seok Lee, Cheol Ho Yun, Tae Uk Jung
Korea Institute of Industrial Technology

Abstract - 본 논문에서는 분말 연자성체에 플라즈마를 이용하였을 때 특성 개선에 관한 연구이다. 기존의 압분 방식은 낮은 강도를 갖는 단점 때문에 신뢰성에 문제가 있어서, 직접적인 모터분야에 연자성체(SMC)를 적용하는데 큰 문제점 이었다. 그러나 본 논문에서 제안하는 SPS(Spark Plasma sintering)공법을 적용한 모터 코어 제조 방법은 플라즈마를 이용하여 분말의 표면에서만 접촉이 일어나게 하는 소결 방식으로, 내부재료의 특성변화 없이 표면의 절연층끼리만 접촉되게 하여 자기적 특성의 손실없이 기계적인 강도를 높일 수 있었다. 실제적으로 기존의 압분체(Hoganass550+윤활제(KE))의 경우 파단강도가 700Mpa정도였으나 SPS를 적용시 1200Mpa까지 증가 되었다. 이러한 SPS 공법을 통해 연자성체(SMC)재료의 모터 Core 분야 적용하는 데 생기는 문제점을 해결하고자 하였다.

전류 Pulse 전원 발생 장치와 소결되는 분말(Powder)에 용이하게 전류가 전달될 수 있도록 Graphite Punch를 이용하도록 구성되어 있다. 또한, 온도 제어를 위해서 고온용 Thermo couple이 부착되어 온도 Sensing을 할 수 있는 구조로 되어 있다. 따라서 본 플라즈마 소결 방법을 이용하면 기존 압분 공정 대비 다음과 같은 우수한 특성이 있을 것으로 사료 된다.

- (1) 압분시 낮은 힘으로 가압하여도 높은 성형강도를 낼 수 있다. 따라서 기존의 압분 공정에서는 800Mpa이상의 고압으로 가압하여야만 강도를 낼 수 있어 가압시 절연 파괴가 발생 될 수 있으나, 플라즈마 소결 방법은 플라즈마에 의해서 발생된 표면에 고온이 발생되므로 낮은 압력에서 소결되므로 표면의 절연파괴가 적어 전기적 특성이 좋아 질것으로 판단된다.
- (2) 표면에서만 접촉이 발생되어 내부의 조직에 특성변화를 주지 않을 것으로 예상된다. 따라서 전기적 특성의 손실 없이 고강도를 구현할 수 있을 것으로 예상된다.

1. 서 론

SMC(Soft Magnetic Composite)은 기존의 전기강판과는 달리 분말형태의 자성체 입자에 무기질 코팅을 실시한 것으로써, 모터 설계시 기존의 전기 강판 재료보다 자유로운 형상의 자성체 Core를 형성할 수 있어 경량화 및 Compact화 할 수 있는 장점이 있었다[1].

또한 압분을 통한 모터 코어를 형성 하므로, 타발을 실시하여 모터 코어를 형성하는 전기 강판 재료 이용시 보다 재료 손실이 거의 없어서 원가 경쟁력 향상에 도움이 된다[2]. 또한 쉽게 분해가 되어 자원 재활용의 비율이 높아 친환경적이라는 평가를 받고 있다[3]. 이러한 장점 때문에 현재 SMC재질을 이용한 다양한 분야의 모터활용에 대한 연구가 적극적으로 추진되고 있다.[4]

현재 SMC 재질을 이용하는 대상은 운전 주파수가 높아 와전류 손실저감 효과가 큰 Application에 중점적으로 사용되고 있다. 이러한 운전주파수가 높은 대부분의 모터들은 고속운전을 한다는 공통점을 지닌다. 하지만 SMC 재질은 강도가 낮아 고속으로 운전 시 파손에 의한 치명적인 결함을 발생시킬 수 있다는 단점을 지니고 있다. 따라서 현재 이러한 단점을 극복하기 위해서 회전체인 Rotor는 기존의 전기강판을 사용하고, 고정자만 SMC재질을 이용하거나, 혹은 Rotor 표면에 파손을 방지할 수 있는 별도의 장치를 부착하고 있는 실정이다. 일부에서는 SMC 재질을 성형하는 과정에서 점착성분이 강한 ABS수지를 첨가하는 방법을 적용하기도 하였다. 그러나 이러한 방법들은 SMC의 본래의 성능에 저하시켜, 전기적 특성이 떨어지는 단점이 있어 강도 향상에는 다소 도움이 되나 궁극적인 대책이 되지 못하였다.

본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위해서 기존의 SMC를 제조 하는 압분 방법과는 달리 플라즈마를 이용한 소결 방법을 제안하였다. 플라즈마를 이용한 소결 방식을 적용할 경우 분말표면에서만 접촉이 발생 되고, 순간적인 고열에 의한 접합이 발생되므로 내부의 재질특성에 영향을 주지 않으면서 기존 대비 강도를 대폭 향상 시킬 수 있었다.

2. 본 론

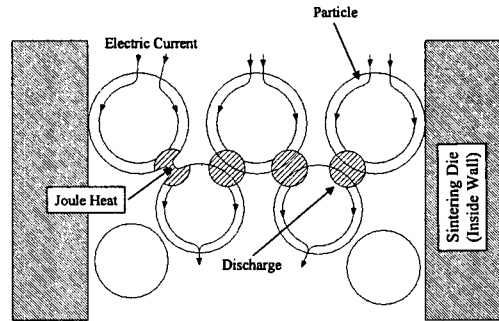
2.1 기존의 SMC 성형 방법

현재 가장 많이 적용 되고 있는 성형 방법은 SMC 재료의 특성을 가장 잘 살릴 수 있는 압분(Compaction)방법을 적용하고 있다. 압분은 금형 내에 분말(Powder)을 삽입하고 고압으로 눌러 찍어 내는 방법으로서, 소결법에 의한 성형 보다 분말 표면을 둘러싸고 있는 절연막의 파괴를 최소화 할 수 있기 때문에 SMC 재료의 성형 범으로 가장 많이 활용되고 있다. 그러나 이 방법은 단순히 분말을 고압으로 압력을 가한 상태이기 때문에 강도가 낮을 수밖에 없다는 단점을 가지고 있었다.

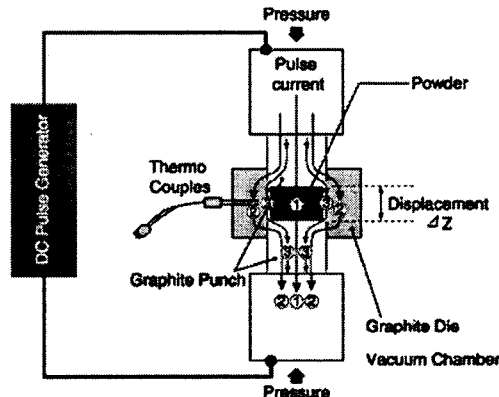
2.2 제안된 플라즈마 소결(Spark Plasma Sintering) 방법

플라즈마 소결법은 입자 표면에 발생되는 플라즈마에 의해서 입자들끼리 접합되는 원리를 이용한 소결 방법이다. 그림1에서 보는 것과 같이 DC Power source에서 저전압, 고전류의 DC pulse전원을 공급해 준다. 이때 소결되는 전원의 On-Off가 반복됨으로써 입자 사이에 방전이 발생되게 된다. 방전에 의해서 생기는 전계는 주위를 이온화 시켜 스파크 플라즈마를 발생하게 된다. 이로 인해서 순간적으로 입자 표면에 순간적으로 5000~12000도의 고온이 발생하여 입자들이 서로 달라붙게 된다. 이와 같은 플라즈마 소결을 위해서 그림 2와 같은 장치를 구성하게 된다.

그림2에서 보는 것과 같이 순간적으로 1000~30000A를 발생 할 수 있는



〈그림 1〉 플라즈마 소결의 기본 원리



〈그림 2〉 플라즈마 소결의 장치 구성

2.3 실험 방법

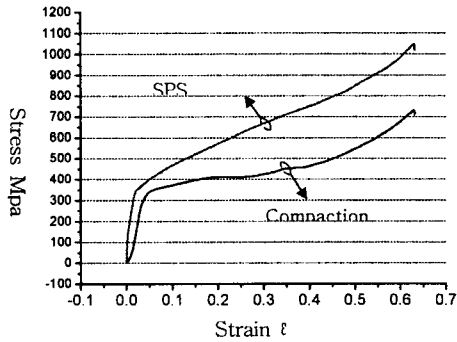
실험에 사용된 SMC 분말은 웨가네스사의 SMC500과 SMC550에 윤활제(Kenolube)가 첨가된 사용된 분말을 사용하였다. 특성 파악을 위해서 15mm의 원형의 시편을 제작하여 기계적 강도와 전기적 강도 특성을 비교 하였다. SPS의 공정 변수를 파악하기 위해서 주위 온도를 300~900℃ 변화 하였을 때 유지시간(Holding Time)을 1~7분까지 변화 시켜 가며 특성을 파악 하였다. SPS시 주위 조건은 진공 중에서 실시하였으며, 최대인가 전류를 3000A까지 인가 될 수 있는 장비에서 전류를 인가하였다.

이 때 자기적 특성은 MPG100 장비를 사용하여 철선 및 투자율 등을 파악하였고, 주파수는 50, 60Hz에서 전계강도는 500mT, 1000mT를 기준으로 측정하였다.

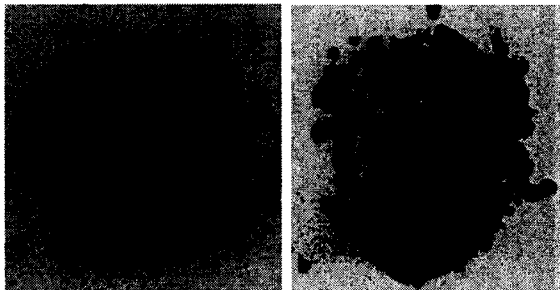
2.4 실험 결과

2.4.1 기계적 강도

그림 3은 기존의 압분 방식을 적용했을 때와 제안된 SPS를 이용하여 성형을 실시했을 때 기계적 강도를 나타내는 그래프이다. 제안된 SPS를 이용한 소결 방법은 250Mpa로 압축 하였을 때 Stress를 분석한 결과 이다. 그림에서 압분체는 초기 탄성영역에서는 급격히 강도가 증가하다가 결국에는 파괴되는 것을 볼 수 있다. 여기서 기존의 압분 공정의 허용 응력은 SPS방법에 의한 응력보다 낮은 것을 알 수 있다. 이때 압분 공정의 응력은 350Mpa였고, SPS방법을 거친 것의 응력은 380Mpa였다. 또한 기존 압분 공정의 파괴 응력은 720Mpa 이나, SPS방법을 거친 것의 파괴응력은 1,100Mpa로 전체적으로 기계적인 강도는 SPS방법을 거친 것이 기존 압분 공정을 거친것보다 더 높게 나타남을 알 수 있었다. 그림 4는 압축강도 실험을 실시한 후 시료를 비교한 것으로써, 제안된 SPS 방법으로 제작된 시료가 기존의 압분(Compaction)을 이용한 방법으로 제작된 것 보다 훨씬 강도가 높음을 알 수 있다.



〈그림 3〉 압분(Compaction) 과 제안된 SPS 성형 강도비교



(a) SPS (b) Compaction

〈그림 4〉 압축강도 시험 후 SPS, Compaction의 파괴정도 비교

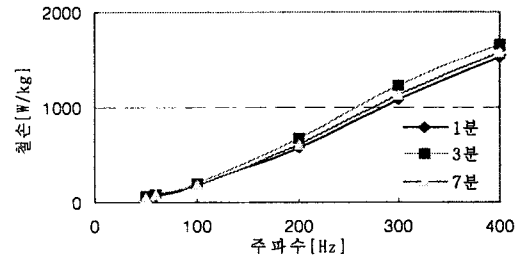
2.4.2 자기적 특성 분석

표 1은 기존의 압분 공정을 거쳐서 제조한 분말의 철손 값이다. 철손의 측정값은 100Hz, 1000mT기준으로 철손을 측정했을 때, 표1 에서 보듯 철 손 값은 시료와 압력 조건에 따라서 10~60w/Kg 수준으로 나타났다.

〈표 1〉 기존 압분 공정을 거친 SMC 재료의 철손값

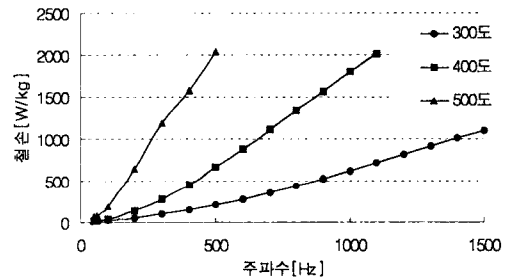
시편	압분압력	Core loss(W/Kg)
somaloy 500	800Mpa	19.06
somaloy500-KENOLUBE	800Mpa	11.28
Somaloy 550	800Mpa	39.28
Somaloy 550- KENOLUBE	800Mpa	12.61
Somaloy500	250Mpa	68.66
Somaloy500	400Mpa	51.16

그림 5는 SPS Holding Time(고온으로 올린 후 지속되는 시간)을 조절했을 때 철손 값을 나타낸다. 성형온도는 압분 후 열처리 온도인 500도를 기준으로 Holding time을 변화 시켜 가며 특성을 파악 하였다. 그림 5에서 보듯 SPS의 Holding Time이 증가 될수록 철손 값은 증가 하나, Holding Time의 변화에 값의 큰 변화는 없는 것으로 사료 된다. 이때 SPS의 가압 조건은 45KN(250Mpa)로 SMC 500에 윤활제 KE가 함유된 시료를 SPS를 이용하여 제작한 시료를 1000mT을 기준값으로 정한 후 측정된 결과 이다. 이때 100Hz에서 측정값을 비교 해보면, Holding Time이 1,3,7분일 경우 173, 203, 184 W/kg이었다.



〈그림 5〉 SPS 공정에서 Holding Time에 따른 철손값의 변화

그림 6은 SPS 성형 온도별 측정 결과이다. 초기에는 기존의 압분 열처리 온도와 같은 500도에서 성형을 실시한 후, 성형 온도를 낮추어 가며 특성을 파악하였다. 이때 Holding Time은 5분으로 고정하고, SMCS500에 윤활제 KE가 첨가된 사양을 SPS처리한 재질을 사용하고, 철손 측정 기준은 1000mT를 기준으로 측정하였다. 그 결과 성형온도가 낮아질수록 철손값 또한 낮아지는 것을 알 수 있었다. 그림6 에서 보듯이 측정 주파수 100Hz을 기준 시 성형온도가 300, 400, 500 일 때 철손값은 21, 42, 192w/kg로 결국 주위 온도가 낮아질수록 철손은 급격히 낮아짐을 알 수 있었다. 이를 통해서 SPS 공정에서 성형온도가 철손값에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 특히 성형온도가 300도일 때의 철손값은 기존의 압분공정에 의해서 제조된 성형체의 철손값과 유사한 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 더욱이 SPS의 성형압력인 250Mpa를 기준으로 상대 비교했을 때 기존의 압분 공정 대비 SPS 공정에서 강도뿐만 아니라 자기적 특성도 68.66w/kg 에서 21w/kg으로 낮아져 강도 향상과 철손 저감이 2가지 동시에 나타나는 특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서는 제안된 SPS방법으로 강도는 향상 되었으나 압분으로 얻을 수 있는 철손의 최저치 11w/kg을 달성하지는 못하였으나. 그러나 압분 공정이 지금까지 다양한 방법으로 최적화 되어온 반면 SPS 공정은 신규로 도입되어 검토 되고 있다는 점을 감안할 때, 향후 강도 향상과 특성 개선의 여지가 많은 공법으로 사료 된다.



〈그림 6〉 SPS 공정에서 성형온도 따른 철손값의 변화

3. 결 론

본 논문에서는 자성체로 전기기에 다양한 응용범위를 가지는 SMC재료의 고강도화를 위한 새로운 제조 공법에 대해서 제안하였다. 본 논문에서 제안된 SPS(Spark Plasma Sintering)을 이용시 기존 대비 약 1.3~1.7배의 파괴 강도가 향상되는 것을 알 수 있었다. 또한 SPS공정에서 성형온도 조건을 조절하여 철손값을 저감하는 방안을 도출하였다. 본 논문에서는 SPS 공정에서 성형 온도를 기존의 압분공정의 열처리 온도인 500도에서 300도로 낮춤으로써 철손값을 192w/kg에서 21w/kg으로 저감시킬 수 있었다. 이 값은 현재 압분공정에서 낼 수 있는 최소 철손값인 11w/kg보다 다소 높은 값이기는 하지만 강도의 비약적인 향상과, 향후 SPS 공정변수를 좀 더 최적화 한다면 더욱 더 낮출 수 있을 것이다. 따라서 SPS 공정을 적용한 자성체의 제조 공정은 자성특성의 변화 없이 강도를 향상 시킬 수 있다는 유용한 방법으로 사용될 것으로 사료 된다. 아울러 향후 이 방법을 적용시 고속모터의 로터, 진동으로 인해서 파손의 위험으로 적용되지 못하였던 다양한 분야에 SMC를 적용한 모터 코어를 고강도화 하여 적용할 수 있을 것으로 사료 된다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Lars Hultman, "Soft Magnetic Composites for Advanced Machine Design", Presented at PMAAsia2005 in Shanghai, on April 6
- [2] Zhou Ye, "Production Aspects of SMC Components", Presented at PM2004, in Vienna, Austria, October 2004
- [3] Göran Nord, "Loss Calculations for Soft Magnetic Composites", Presented at 16th International Conference on Electrical Machines ICEM 2004
- [4] E. ENESCU, "Composite Materials from Surface Insulated Iron Powders", Romanian Reports in Physics, Volume 56, NO. 3, 2004