

연자성 철심재질을 이용한 진공 청소기용 BLDC 전동기 설계

이규석, 차현록, 윤철호, 정태욱
한국생산기술연구원 부품 소재팀

BLDC Motor Design for Vacuum Cleaner Using Soft Magnetic Composite

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

Abstract - 본 논문은 청소기용 BLDC 전동기 모터에 기존의 전기 강판이 아닌 SMC(Soft Magnetic Composite)를 적용하여 진공청소기용 BLDC 전동기 모터 설계를 하는데 있다. 본 논문에서 사용한 SMC는 순철 분말에 전기적 절연 코팅을 실시한 새로운 재질로 현재 많은 연구가 진행되고 있는 분야이다. 그러나 재질의 특성에 적합한 모터 설계에 관한 연구는 미진하였다. 따라서 본 연구는 진공청소기용으로 많이 사용되는 BLDC 모터에 SMC를 적용 하였을 때 BLDC 전동기의 특성을 알아 보고자 하였다. 본 연구에서 SMC재질을 사용할 때는 어느 조건에서 사용함이 유리한지 알 수 있었다. 또한 고속 청소기에 적합한 설계를 실시한 결과 SMC 재질의 낮은 투자율로 말미암아 인덕턴스가 감소하고, 전류가 높아져, 출력 증대 되는 것으로 나타났다. 향후 본 연구는 SMC를 이용한 BLDC 모터 설계 시 설계 기준으로 이용 될 수 있을 것으로 사료된다.

1. 서 론

BLDC 전동기(Brushless Direct Current Motor)는 토오크 제어와 속도 제어가 용이하며 신뢰성이 높고, 브러시가 없으므로 소음 및 Spark가 없어 수명이 길기 때문에 보수와 유지에 드는 비용을 저감할 수 있다, 또한, 영구 자석 회전자와 계자 자속과 집중 권선을 가진 고정자 권류에 의해 토오크가 발생하므로, 계자 전류를 필요로 하지 않아 효율이 높고, 자속을 집중하므로 출력 토오크가 크고, 구조가 간단하여 제작이 쉽다는 등의 여러 가지 장점으로 많은 연구가 진행되고 있다. [1][2]

본 논문에서는 BLDC모터 제작시 공정 및 비용 절감을 위해 진공 청소기 용으로 많이 사용되고 있는 BLDC 모터의 코어에 규소 강판이 아닌 SMC 분말 (Somaloy500ke 0.5%)을 적용시켜 BLDC 모터 설계 해석 하였다. 기존 규소 강판은 형상 및 설계에 대한 제한이 발생되고, 적용을 하기 위한 프레스 및 절단 공정이 수반되며, 코어 형상 제조시 재료의 손실이 수반되어 진다. 하지만 SMC 분말은 Fe 분말에 절연이 되어 있어서 와전류 손실을 최소화 할 수 있으며, 복잡한 형상을 성형하는데 용이하여, core 제조시 필요한 분량의 분말을 사용하면 되기 때문에 재료의 손실의 거의 없고, 수명이 완료되면 재생 후 다시 사용할 수 있다는 장점이 있다.[3]

이와같은 장점 때문에 본 논문에서는 스테이터 코어의 재질인 S60과 SMC 500Ke 재질 특성을 비교해보고 BLDC 모터의 기존 규소강판 코어 대신에 SMC 분말을 압분 적용시켜 FEM 해석을 실시하여 토오크를 비교 분석 하였다.

2. 스테이터 코어 재질 특성 비교

2.1 S60 vs SMC500Ke

기존의 BLDC 모터에 많이 사용되고 있는 재질은 규소 강판(S60) 이다. 하지만 상호유도작용을 이용한 발전기, 모터 등에서는 철심에 맴돌이 전류가 생겨 자손이 발생하게 된다. 이 손실을 줄이기 위해 철심 절연체를 이용하여 적용해서 손실을 줄이게 되는데 이 적용과정을 생략하면서 철심의 손실을 줄이는 방법으로 SMC500Ke분말을 압분시켜 규소강판 대신 적용해 보았다. 두 시료의 자기적 특성은 MPG 100D 장비를 사용하여 철손 및 투자율을 측정 하였고 50, 60, 100~1500hz에, 전계 강도는 1000mT를 기준으로 측정 하였다. 시료의 비교를 위해서 직경 20mm의 S60과 동일한 직경의 SMC500Ke 분말을 796Mpa의 압력으로 압분 후 시료를 만든 후 시료의 특성을 측정 하였다. 그리고 SMC압분체의 강도를 향상 시키기 위해 500℃열처리 조건을 거친 시료를 이용하였다. 또한 SMC 분말의 경우 윤활제 Ke가 0.5% 포함된 SMC500Ke 0.5%분말을 사용하였다. .

2.1.1 철손 비교

각 시료의 주파수별 철손 값은 표 1과 같다. 표에서 보는 것과 같이 300hz이하에서는 SMC500Ke 분말이 S60에 비해 철손이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만 400hz 이상에서는 정반대로 SMC500Ke 압분체 시료의 철손값이 S60에 비해 현저히 줄어 드는 것을 볼 수 있다. 이때의 투자율을 보면 S60의 경우 50hz 일때 4678에서 1500hz 일때 677이고, SMC 500Ke 의 경우 50hz 일때 365에서 1500일때 363을 거의 동일하게 나왔다. 이는 곧 주파 대역에서 철손증가량으로 볼 때 기존의 S60 재질 보다 SMC분말 압분체가 좋은 특성을 가지고 있다고 볼 수 있다. 그림 1은 사

주파수별 철손 값을 그래프화 한 것이다. 그리고 위의 결과로 BLDC 모터 처럼 고속RPM으로 회전 하는 모터의 경우 고주파가 발생하게 되는데 이때 철손을 줄이기 위해서 S60보다 SMC 압분체가 장점을 가지고 있음을 알 수 있다.

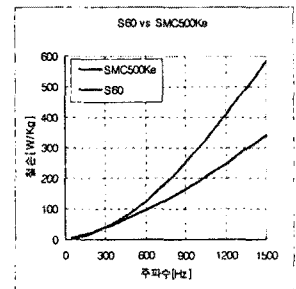
<표 1> 각 주파수별 시료의 철손값

시료 주파수	SMC 500Ke	S60
50hz	5.3	2.79
60hz	6.46	3.55
100hz	11.12	7.2
200hz	24.42	20.24
300hz	39.54	38.6
400hz	56.51	62.07
500hz	75.16	90.54
600hz	95.55	123.57
700hz	117.57	162.79
800hz	140.01	205.17
900hz	164.84	252.3
1000hz	191.02	303.15
1100hz	218.96	352.42
1200hz	248.31	410.01
1300hz	279.07	467.28
1400hz	310.39	523.47
1500hz	339.55	581.84

[철손단위:W/Kg]

따라서 위의 데이터를 토대로 BLDC 모터의 스테이터에 S60과 SMC500Ke 를 적용시켜 시뮬레이션해 보고 데이터를 비교해 보았다.

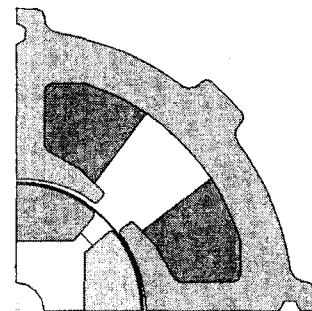
<그림 1> S60 vs SMC철손값



3. BLDC 전동기 FEM 분석

3.1 BLDC 전동기의 설계

다음의 BLDC 모터는 소비전력 1500W, 단상 BLDC모터로 입력전압이 311V 이다. 현재 이 모터는 진공용 청소기용 모터로 사용되고 있으며 고 RPM을 필요로 하는 제품에 사용되고 있으며, 사용 회전수 대역은 3000~4500RPM이다. 이 모터의 구조는 4개의 stator poles과 rotor에 4개의 magnet으로 구성되어 있다. 이 모터의 구조는 아래 그림과 같다. <그림 2>



<그림 2> BLDC Design (1/4 model)

3.1.1 설계 과정

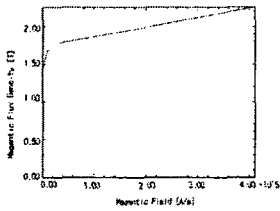
본 논문에서 설계된 BLDC모터의 설계는 표 2의 파라미터에 의해 설계되었다.

〈표 2〉 설계 Parameter

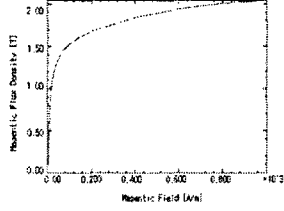
항 목	Value	Unit
스테이터 외경	78	mm
로터 외경	35	mm
공극	0.5	mm
적층	30	mm
극수	4	
슬롯당 턴수	34	turn

위 설계 항목에 대하여 설계 되어진 BLDC 모터에 스테이터의 재질만 현재 규소 강판으로 사용중인 S60 대신 SMC분말을 대입하여 스테이터의 재질을 변경후 FEM 해석을 실시 하였다.

모터 설계시 재질의 특성은 B-H 곡선으로 나타나는데 각 재질에 따른 B-H의 특성이 상이하므로 각 재질에 맞는 특성 곡선을 FEM 해석에 대입하여 해석을 실시하였다. FEM 방식은 전동기의 특성해석, 권선의 인덕턴스, 자속분포 및 특정 위치에 대한 정도(精度) 높은 자속 밀도 계산을 할 수 있어, 자석의 두께나 재질선정에 도움을 줄수 있다. [4][5][6] S60과 SMC분말의 B-H 특성 곡선은 아래와 같다.



〈그림 3〉 B-H curve S60



〈그림 4〉 B-H curve SMC500Ke

3.2 BLDC 전동기의 FEM 분석

BLDC 전동기를 FEM으로 해석하였다. Stator의 재질에 따른 각 rpm 별 토오크를 해석 하였다. 토오크는 맥스웰 응력법으로 계산을 할 수 있다.

벡터 \vec{P} 는 식 (1) 맥스웰 응력 텐서(Maxwell Stress Tensor)에 의해 구하여 진다. [7]

$$\vec{P} = \int_S \vec{B}(\vec{B} \cdot \vec{n})dS - \frac{1}{2} \int_S B^2 \vec{n}dS \quad (1)$$

식 (2)는 임의의 체적 V에 작용 하는 힘 \vec{F} 이다.

$$\vec{F} = \int_S \vec{P}dS \quad (2)$$

식 (3)과 같이 토오크 \vec{T} 의 계산은 구하고자 하는 부분의 적분 경로를 지나는 요소에서의 힘을 구하고, 회전 중심에서 부터의 반경을 곱하여 구할 수 있다. 토오크 식은 다음과 같다.

$$\vec{T} = \vec{R} \times \vec{F} \quad (3)$$

(\vec{S} : 체적 V의 표면적, \vec{n} : 표면적 S의 법선 방향 단위 벡터,

\vec{B} : 자속 밀도, \vec{R} : 회전 중심에서 적분 경로까지의 반경)

3.2.1 BLDC 전동기 Torque 비교

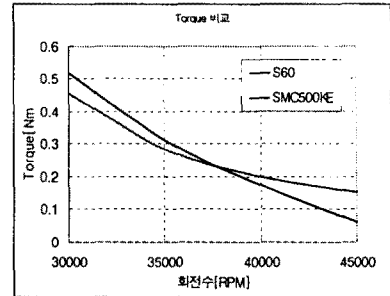
표 3는 BLDC 전동기의 사용 회전수 대역인 3000rpm부터 4500rpm까지 스테이터 재질에 S60과 SMC 분말을 사용 했을때의 토크값을 비교한 결과 값이다.

〈표 3〉 S60 과 SMC 분말 사용시 토오크값 비교

RPM \ 재질	30000	35000	40000	45000
S60	0.517	0.3124	0.1743	0.0619
SMC분말	0.4563	0.2851	0.201	0.1513

단위 : Nm

대체로 30000~35000rpm까지는 S60의 재질을 사용하였을 때가 토크값이 좋게 나왔고, 40000~45000rpm부터는 SMC분말을 사용했을때 토크값이 향상되었다. 이를 그래프로 보면 그림 5와 같다 이처럼 40000rpm 이상에서의 토오크값 향상은 출력값의 증가를 가져올 수 있다.

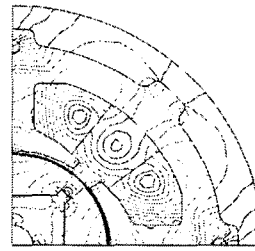


〈그림 5〉 각 RPM vs 재질별 토오크값 비교

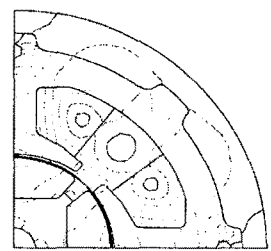
3.2.2 자속 밀도 분석

각 시료별 FEM 해석으로 나온 자속 밀도는 다음과 같다.

아래의 자속밀도는 45000rpm에서 S60과 SMC분말을 적용 했을때의 자속밀도를 나타낸 것으로 똑같은 시간 해석 조건에서의 자속밀도 포화도를 분석 것이다. 아래그림에서 보는 것과 같이 S60의 자속 포화가 SMC분말 스테이터에 비해 심해서 모터의 특성이 나쁠을 알 수 있다.



〈그림 6〉 S60



〈그림 7〉 SMC 분말

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 BLDC 모터에 사용중인 규소 강판 대신에 순철분말에 전기적 절연 코팅이 되어 있는 SMC500Ke 분말을 적용하여 BLDC 모터의 출력에 영향을 미치는 토크의 변화 및 두 시료의 각 주파수별 철손값의 변화를 알아 보았다. 우선 BLDC 모터의 스테이터 재료로 사용되는 S60과 SMC 분말을 비교 했을시 300Hz 이하의 주파수에서는 S60의 철손값이 적었지만, 400Hz 이상의 주파수에서는 SMC분말이 낮은 철손값을 가짐을 알 수 있었다. 이는 높은 주파수 대역에서는 S60보다는 SMC 분말이 장점을 가지고 있음을 알 수 있었다. 따라서 BLDC 모터처럼 높은 RPM회전하면서 고주파로 인해 철손을 발생시키는 기기에 S60대신 SMC를 적용시켜 FEM 해석을 해 보았다. 그 결과 모터의 회전수가 37500RPM을 넘어가는 경우부터 SMC를 적용한 BLDC 모터의 토오크가 S60에 비해 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 즉 BLDC 모터처럼 고속으로 회전하는 모터에서는 SMC분말을 사용함으로써 모터의 출력을 높일 수 있음을 알 수 있다. 이처럼 SMC 분말은 특정 조건에서 모터의 특성을 향상 시킬 뿐 아니라 재료의 특성상 많은 장점을 가지고 있기 때문에 향후 많은 분야에 적용 되어 질 것으로 생각 되어 진다.

〈참고 문헌〉

- [1] J. R. Hendershot Jr. and T. J. E. Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", MAGNA PHYSICS PUBLISHING and CLARENDON • OXFORD, 1994
- [2] T. J. E. Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drivers", CLARENDON • OXFORD, 1989
- [3] T. A. Lipo, "Innovative Concepts Utilizing Soft Magnetic Composites", Ground-Automotive Power and Energy Symposium, July 22, 2005
- [4] Antonio Savini and Giancarlo Fasola, "Computer - Aided Design of Heavily Saturated DC Motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-19, No.5, PP. 2088~2090, 1983.
- [5] J. R. Brauer, "Finite Element Software Aids Motor Design", A. O. Smith Data System, Inc. , PP. 1~7, 1985.
- [6] K. Sawa, H.Yamamoto & K. Miyachi, "Analysis of Amature Circuit Inductance of DC Machines by FEM", IEE PROC., Vol.132, No.6, PP. 307 ~ 314, 1985
- [7] M. Marinescu and N.Marinescu, "Numerical Computation of Torques in Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Magnetics. Vol. 24, No.1, PP. 463~466, 1988