

SMC를 이용한 HDD용 스피들모터

김상욱, 김진환, 이용근, 김보열, 김영봉
인하공업전문대학 전기정보과학과

Spindle Motors using SMC for HDD

Sanguk Kim, Jinhwan Kim, Yonggeun Kim, Boyoul Kim, Youngbong Kim
Department of Electrical Information and Science, Inha Technical College

Abstract - This paper is presented for the development of the brushless DC(BLDC) spindle motors for hard disk drives. A new BLDC Motor has the use of insulated, compacted, iron powder for the armature core material of BLDC motors. Insulated iron powder in this paper is generally called soft magnet composite(SMC). The SMC is used for the stator of the motor instead of the laminated steel core. The motor used by SMC can have the good advantages in condition of the high frequency input power and small sized motor. It gets much more high efficiency than laminated steel core at same input power. The proposed motor has a technique of speed sensorless control. Experimental results show the performance of the proposed BLDC spindle motors for an HDD.

1. 서 론

정보기억장치용 초정밀 회전기기는 나노(nano) 미터 단위의 회전정밀도를 유지하면서 컴퓨터, 음향 및 영상 등의 데이터 저장 매체(HDD, CD, DVD, VCR, Camcoder등)의 구동원으로 사용되는 브러시리스 직류 모터 등을 포함한 회전기기를 말한다. 21세기 정보화 사회가 도래함에 따라 정보기억장치 및 프린터용 초정밀 회전기기는 그 사용범위가 더욱 커지고 있다. 특히 고용량, 초소형 정보기억장치 개발 등과 같은 미래산업을 주도하기 위해서는 초정밀 회전기기의 공통 기반 기술 중 초소형화 및 고효율화를 위하여 BLDC 모터의 기술 개발이 가장 중요한 기술 개발의 과제로 떠오르고 있다. 이를 위하여 모터 구조의 기계적인, 전기적인 최적화를 요구하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이들의 단점을 극복하기 위하여 고 효율로 운전되는 BLDC 전동기를 설계하였다.

본 논문에서는 하드디스크 드라이브용 전동기로서 SMC(Soft Magnet Composite)로 구성된 고정자와 마그네트로 구성되었다. 제어기의 구현은 역기전력을 측정하여 구현하는 센서리스 제어기로 구동되었다. 모터의 스테이터는 SMC를 이용하는데, 이는 파워더 타입으로 압축 소결하여 만들 수 있다. 따라서 이는 형상에 따라 자유롭게 3차원으로 설계가 가능하며, 기존 2차원 타입의 스틸 코어 스테이터 보다 설계가 매우 용이하다. 이를 통하여 코킹 토오크를 줄이기 위한 형상으로서의 가공에서 매우 유리한 잇점을 가지고 있으며, 스피들 모터의 초 소형화가 가능하다. 또한 SMC의 특징으로서 고주파 입력 전류에 매우 향상된 효율 특성을 가지고 있다.

따라서 본 전동기의 특징은 초소형화, 고효율화, 저손실, 발열감소, 형상의 최적화 등에 매우 우수한 특징을 가지고 있다.

본 논문에서는 센서리스 제어기를 구성하여, 설계된 전동기의 특성을 보기위하여, 실험을 실시하였으며

이를 통하여 전동기의 성능을 보았다.

2. 본 론

2.1 HDD

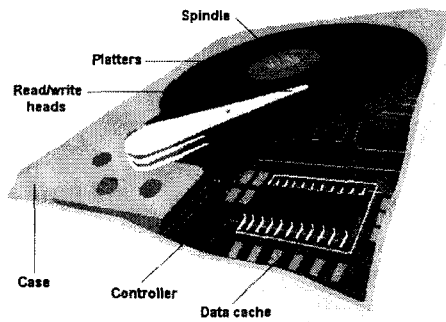
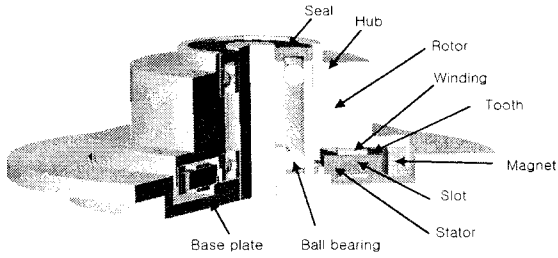


그림 1. 하드디스크 드라이브

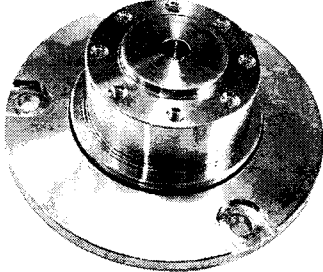
1956년 IBM에 의해 개발된 자기 디스크 RAMAC(Random Access Method of Accounting and Control)는 현재보다 훨씬 부피가 컸지만 기억 용량은 5MB 정도에 불과했다. 최초의 개인용 컴퓨터인 애플에서 저장 장치로 (카세트) 테이프 드라이브를 사용하고, 플로피 디스크만이 개인용 컴퓨터에서 사용할 수 있는 저장 장치의 전부였으나, 80년대 초 하드디스크를 장착한 최초의 IBM XT 컴퓨터가 등장하면서 개인이 하드디스크를 소유하는 시대가 열렸다. 당시의 하드디스크 용량은 10MB 내외였지만 현재의 기술의 발전과 소재의 개발로 인해 현재는 MB 시대를 넘어 GB(Gigabytes, 1GB는 1024MB) HDD가 일반화되고 있으며 1979년 최초로 출시된 5.25" 5MB인 ST-506부터 현재까지 약 20년이 동안 디스크 드라이브의 용량은 매년 평균 60%씩 증가하여 왔으며 향후 지속될 것으로 예상된다. 그림 1은 HDD의 구조를 나타내고 있다.

2.1.1 스피들모터

모터는 플래터를 일정한 속도로 회전시키는 장치이다. HDD용 모터는 스피들에 직접 연결되어 있기 때문에 '스피들 모터'라고도 부른다. HDD를 포함한 대부분의 저장 장치들을 드라이브(drive)라고 부르는 것은 디스크를 모터로 구동(drive)하기 때문이다. 모터가 달린 장치의 이름 뒤에는 거의 다 '드라이브'란 명칭이 붙는다. 플로피 디스크 드라이브, CD-ROM 드라이브, Tape 백업 드라이브 모두 모터로 구동하는 장치들이다. HDD는 모델에 따라서 3600, 4500, 5400, 7200, 10,033, 15,000rpm의 속도로 회전한다. 그림 2는 스피들모터의 구조 및 외형 사진을 보여주고 있다.



(a) 스피들모터의 구조



(b) 스피들모터
그림 2. 스피들모터

2.2 BLDC 모터 모델링 및 전자계 설계

BLDC 전동기의 모델링을 위하여 공극자속밀도는 한국의 자료에 대하여 등가회로를 구성하고, 특성을 해석한다. 해석상의 편의를 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- 1) 회전자와 고정자 철심은 링크부를 제외한 모든 부분의 투자율이 무한대이다.
- 2) 링크부의 자속은 공극을 통과하지 않고 회전자에만 존재 하는 누설자속이며, 링크부는 영구자석에 의해 자속밀도 B_s 로 포화된다.

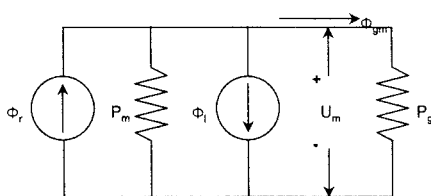


그림 3. 자기 등가회로

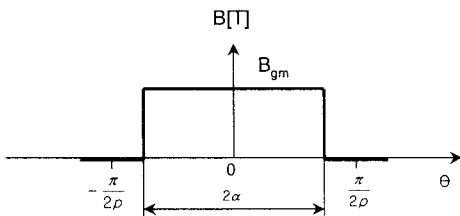


그림 4. 공극자속밀도 분포

이 가정에 의하여 등가회로를 구성하여 공극 자속밀도를 계산한다. 그림 3과 그림 4는 자기등가회로 및 공극자속밀도 분포를 보여준다. 프링징 효과를 무시하면 영구자석에 의한 공극 자속밀도는 앞 그림과 같이 구형파 분포를 갖고 그 크기 B_{gm} 은 다음 식으로 주어진다.

$$B_{gm} = \frac{\mu_0}{g'} U_m \quad (1)$$

여기서, μ_0 는 공극의 투자율, g' 은 유효 공극 길이로 공극길이 g 와 카터 계수 k_c 의 곱으로 주어진다. 공극 퍼미언스를 P_g 라 하면 공극 자속 Φ_{gm} 은 다음과 같

다.

$$P_g = \frac{\mu_0 A_g}{g'} = \frac{\mu_0}{g'} \cdot 2\alpha \cdot r_s \cdot L_r \quad (2)$$

$$\phi_{gm} = B_{gm} A_g = P_g U_m \quad (3)$$

여기서, 2α , r_s , L_r 은 각각 영구자석의 극호각, 고정자 내반경 및 회전자 축 방향 길이이다. 링크부의 두께를 y 라하면 링크부는 크기 $2B_{sy}L_r$ 의 누설자속이 존재하고 영구자석 양단의 웨지부에도 누설자속이 존재한다. 전체 누설자속을 ϕ_i 이라 하면 영구자석 포텐셜은 다음과 같다.

$$U_m = \frac{\phi_r - \phi_i}{P_m + P_g} \quad (4)$$

여기서, ϕ_i 은 영구자석의 잔류자속으로 잔류자속밀도 B_r 과 영구자석의 단면적의 곱으로 주어지며 P_m 은 영구자석의 퍼미언스로 다음과 같다.

$$P_m = \frac{\mu_0 \mu_r A_m}{l_m} \quad (5)$$

여기서, μ_r 과 l_m 은 영구자석의 투자율과 자화방향 길이이고 영구자석의 단면적 A_m 은 영구자석의 폭 w_m 과 축 방향 길이의 곱이다. 이상의 결과로 공극자속밀도를 구하면 다음과 같다

$$B_{gm} = \frac{\mu_0 \phi_r - \phi_i}{g' P_m + P_g} = \frac{\mu_0}{g'} \frac{B_r w_m L_r - \phi_i}{\mu_0 \mu_r w_m L_r / l_m + \mu_0 2\alpha r_s L_r / g'}$$

$$= \frac{B_r w_m L_r - \phi_i}{g' \mu_r w_m L_r / l_m + 2\alpha r_s L_r} \quad (6)$$

$$B_m = \frac{2\alpha r_s L_r}{w_m L_r} B_{gm} = \frac{2\alpha r_s L_r}{w_m L_r} \frac{B_r w_m L_r - \phi_i}{g' \mu_r w_m L_r / l_m + 2\alpha r_s L_r}$$

$$= \frac{l_m \cdot 2\alpha r_s L_r}{g' \mu_r \cdot \frac{w_m L_r}{g'}} f_{kg} B_r \quad (7)$$

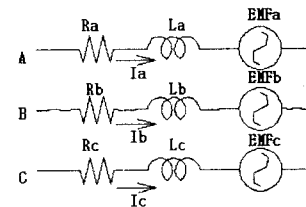


그림 5. BLDC 전동기 등가회로

BLDC 전동기의 등가 회로(그림 3)는 저항, 인덕턴스, 전압원으로 구성되며, 저항은 회전자 권선의 권선저항을, 인덕턴스는 각 상에 흐르는 전류로부터 생성된 자속에 의한 인덕턴스 성분을, 전압원은 회전자의 자속이 공간적으로 회전하여 회전자권선에 자속 변화를 일으켜 유기되는 전압을 각각 모델링 한다. 각상에 인가되는 전압과 전류의 관계를 나타내는 전압식은 아래식과 같다.

$$V_a = R_a \times I_a + L_a (dI_a / dt) + EMF_a$$

$$V_b = R_b \times I_b + L_b (dI_b / dt) + EMF_b$$

$$V_c = R_c \times I_c + L_c (dI_c / dt) + EMF_c \quad (8)$$

전동기가 정상상태 운전중이고, 인덕턴스가 작다고 가정하면

$$V_{ab} = I_a \times (R_a + R_b) + EMF_{ab}$$

$$= I_a \times R_{ab} + EMF_{ab} \quad (9)$$

식(9)와 같고, 또한 EMF가 일정한 영역에서 전동기를 구동하면 통전각 내에서의 EMF는 일정함으로 EMF는 식 (10)으로 표현된다.

$$EMF_{ab} = K_e \times \omega \quad (10)$$

상기(10)식을 (9)식에 대입하면

$$\omega = (V_{ab} - I_a \times R_{ab}) / K_e \quad (11)$$

이다. 한편 BLDC 전동기의 토오크는 전기자 권선의 권선 전류에 비례 한다. A, B상에 의해서 발생하는 전동기 토오크는

$$T_e = K_t \times I_{ab} \quad (12)$$

이고, 전동기의 특성식은 다음과 같다.

$$\omega = (V_{ab} - T_e \times R_{ab} / K_t) / K_e \quad (13)$$

전동기의 특성을 그래프로 나타내면 그림 5와 같다.

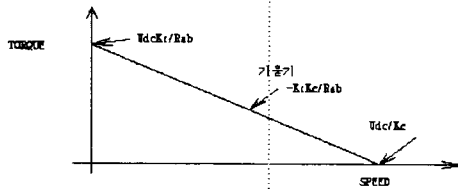


그림 6. BLDC 전동기의 특성 그래프

2.3 SMC

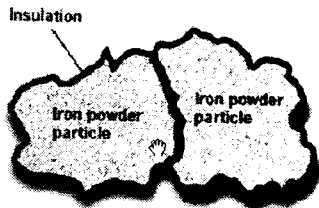


그림 7. SMC의 구조

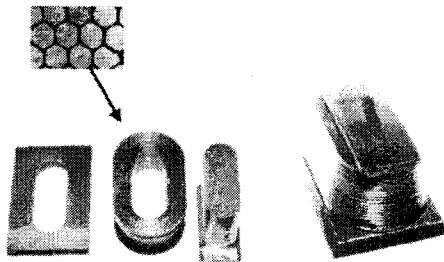
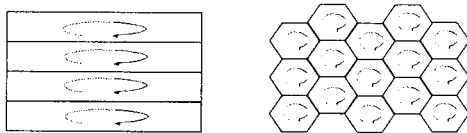


그림 8. SMC를 이용한 3차원 스테이터



(a) Si-Fe 와전류 (b) SMC 와전류

그림 9. 스테이터의 와전류 특성

SMC는 Soft Magnet Composite로 불리며, 그림 6과 같이 코팅된 파우더 분자가 절연되어 입자표면에 얇은 절연층이 있는 고순도 철분으로 구성되어 있다. 고정자를 SMC로 구성하기 위해서는 SMC 파우더를 압축 소결하여 만들 수 있다. 따라서 그림 7과 같이 형상에 따라 자유롭게 3차원으로 설계가 가능하며, 기존 Si-Fe 코어 스테이터 보다 설계가 매우 용이하다. 이러한 특성은 소재의 재사용이 가능하며, 필요없는 부분의 제거가 가능하므로 저 가격화를 이룰 수 있다. 또

한 고주파 입력 전류에 매우 향상된 효율 특성을 가지고 있으며, 그림 8과 같이 일반 Si-Fe 스테이터에 비해 와전류가 100[micron] 내외의 매우 작은 입자내에서 발생되기 때문에 그림 9와 같이 와전류 손실이 적은 특징을 가지고 있다. 또한 고주파수 즉, 높은 속도 영역에서 철손 저항이 기존 코어보다 적어 효율 향상과 발열을 줄일 수 있는 특징을 가지고 있다.

SMC는 아래와 같은 장점과 단점을 가지고 있다.

- 1) 장점
 - 3차원 형상구조(설계의 자유도 확대)
 - 투자율이 3차원 적인 등방성 구조
 - 높은 치수 정밀도
 - 표면과 모서리 등의 조도가 높음
 - 고주파 대역에서 낮은 철손
 - 고속 영역에서 높은 효율
 - 조립의 용이성
 - 높은 내구성
 - 높은 내 부식성
 - 높은 생산성
 - 재활용이 가능한 친환경성
- 2) 단점
 - 낮은 투자율(550 이하)
 - 낮은 포화 자속 밀도(0.2T 낮음)
 - 저주파 대역에서 낮은 철손
 - 낮은 기계적 강도(20Mpa)

따라서, SMC는 이들 특성에 고주파 입력을 가지는 초고속 스펀들 모터의 경우에 매우 유리한 특징을 가지고 있다. 이로부터 본 논문에서는 Hewlett-Packard사의 소말로이 500 제품의 SMC를 사용하여 실험을 수행하였다.

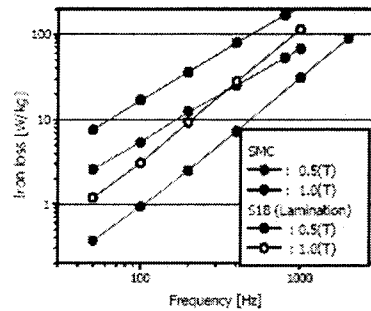


그림 10. SMC 및 Si-Fe(S18)의 주파수-철손 특성 비교

2.4 실험결과

본 실험에서는 SMC를 이용한 HDD용 BLDC 스펀들모터와 Si-Fe 코어를 사용한 BLDC 스펀들모터를 비교 검토 하였다. 표 1의 조건하에서 12 슬롯의 스테이터로 구성되어 있으며, 로터는 8극으로 구성되어 있다. 그림 10과 같이 사용한 SMC는 편리상 성형 압축된 봉재를 설계된 두께로 자르고, 와이어 커팅을 하여 그림 11과 같이 제작하여 사용하였다. 그림 11은 개발된 BLDC모터이다.

표 1. 스테이터 조건

분류	SMC
코일 지름	0.3mm
권선 턴수	16
스테이터 내경	14.4mm
스테이터 외경	27.5mm
스테이터 높이	2.5mm

그림 12는 제안된 모터와 기존 모터와 입력 전력을 비

교 검토 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 입력전력이 전속도 영역에서 낮은 것을 볼 수 있으며, 특히 고속영역(고주파 영역)에서 현저히 특성이 양호함을 알 수 있다.

그림 13-16은 7,500rpm 및 19,500rpm에서의 DC 입력전압 및 1상 입력 전류를 각각 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 고속영역에서 입력 전류파형의 크기가 적고, 우수한 특성을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

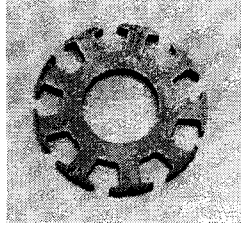


그림 11. SMC로 제작된 스테이터

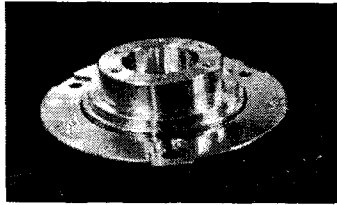


그림 12. 개발된 스핀들 모터

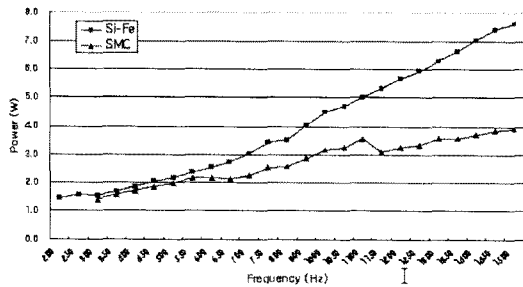
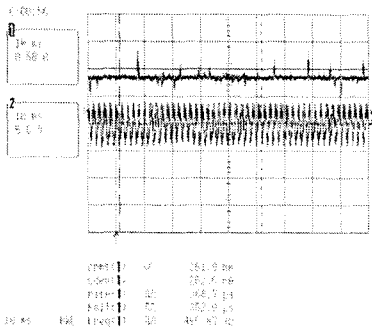


그림 13. 기존 Si-Fe 코아 및 SMC로 구성된 BLDC 모터의 입력 전력 비교



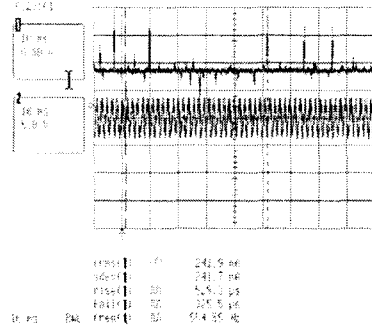
[7,500rpm, 5V, 0.5A, 10msec/div]

그림 14. Si-Fe 코아를 이용한 스핀들모터의 DC 입력 전압, 1상 입력 전류

3. 결 론

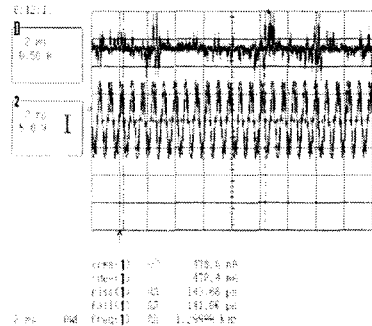
본 논문은 효율 향상을 위하여 BLDC 스핀들 모터를 개발하였다. BLDC 전동기는 SMC(Soft Magnet Composite)로 구성된 고정자와 마그네트로 구성하였다. 제어기의 구현은 역기전력을 측정하여 구현하는 센서리스 제어기로 구동되었다. SMC는 파우더 타입으로 압축 소결하여 만들 수 있으며, 자유롭게 3차원으로 설

계가 가능하므로, 기존 2차원 타입의 코아 스테이터 보다 설계가 매우 용이하다. 이를 통하여 스핀들 모터의 초 소형화, 자가격화, 고효율화, 저손실, 형상의 최적화, 저발열 등을 확보 할 수 있었다. 실험을 통하여 개발된 전동기의 특성 및 성능이 고속영역에서 기존의 코아 스테이터를 채용한 전동기보다 우수함을 입증하였다.



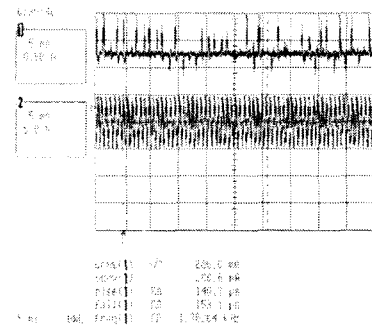
[7,500rpm, 5V, 0.5A, 10msec/div]

그림 15. SMC 코아를 이용한 스핀들모터의 DC 입력 전압, 1상 입력 전류



[19,500rpm, 5V, 0.5A, 2msec/div]

그림 16. Si-Fe 코아를 이용한 스핀들모터의 DC 입력 전압, 1상 입력 전류



[19,500rpm, 5V, 0.5A, 5msec/div]

그림 17. SMC 코아를 이용한 스핀들모터의 DC 입력 전압, 1상 입력 전류

[참 고 문 헌]

- [1] J.R. Hendershot Jr and Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Clarendon Press, 1994.
- [2] "Motor Application Note", Ansoft, 2000.
- [3] Alan Jack et al, "Permanent Magnet Machines with Powdered Iron Cores and Pre-pressed Windings", IEEE Transactions on Magnetics, 1994.

- [4] B.C. Mecrow, A.G. Jack and S.A. Evans "Permanent Magnet Machines with Soft Magnetic Composite Stators", International Conference on Electrical Machines, Istanbul, Turkey, September 1998.
- [5] Jack, A.G., Mecrow, B.C., Maddison, C.P. and Wahab, N.A. "Claw pole armature permanent magnet machines exploiting soft iron powder metallurgy" IEEE International Machines and Drives Conference, Milwaukee, May 1997
- [6] B.C. Mecrow, A.G. Jack and C.P. Maddison, "Permanent magnet machines for high torque, low speed applications", International Conference on Electrical Machines, Vigo, Spain, Sept. 1996.
- [7] C.P. Maddison, B.C. Mecrow and A.G. Jack, "Claw pole geometries for high performance transverse flux machines", International Conference on Electrical Machines, Istanbul, Turkey, Sept. 1998.
- [8] A.G. Jack, B.C. Mecrow, and P.G. Dickinson "Iron loss in machines with powdered iron stators", IEEE IEMDC Conf., Seattle, May 1999.
- [9] A.G. Jack, B.C. Mecrow, P.G. Dickinson, D. Stephenson, J.S. Burdess, J.N. Fawcett, T. Evans, "Permanent Magnet Machines with Powdered Iron Cores and Pre-Pressed Windings", IEEE IAS Conf., Phoenix, US, 1999.
- [10] 정인성, 허진 "Metal Powder 성형코어를 적용한 모터기술 및 적용사례" KETI, 2004.