

Permanent Magnet Excitation in Small Axial Flux Driver with MR Sensor and Thin Film Multilayer Winding

최 도순*
(Do-Sun Choi)

요 약 NdFeB로 만들어진 permanent magnet dc driver는 많은 분야에서 사용된다. 그중 소형 disk type servo driver는 컴퓨터의 hard disk driver나 floppy driver등과 같은 소형기기의 구동용으로 사용된다. 기존의 dc driver는 coil를 감아 winding으로 사용한다. 만들어진 driver에는 copper printed multilayer winding을 사용하였다. 이 논문에서는 thin film multilayer winding의 제조방법, 특성에 관하여 논한다. 또한 dc driver의 commutation를 위해 사용되는 hallsensor 대신에 비 선형 특성의 MR sensor를 선형화 시켜 driver의 commutation에 사용하였으며 이렇게 만들어진 소형 driver의 rpm, torque등의 특성을 연구하였다.

Abstract. The disc type driver with Nd-Fe-B magnet is one of the servo drivers, which have many applications in various fields. For efficient and easy, it is desirable to be small and thin in its size. However, the driver which uses a conventional wire reel is very difficult to be reduced in its volume. one of alternatives to achieve the above goal is the thick film multilayer winding. The winding method will significantly reduce the total volume of the driver. Therefor this paper proposed the thick film multilayer winding methods and consists of parts: design manufactures, properties and applications.

1. 서 론

disc type driver는 많은 분야에서 이용되는 servo actuator이다. 이 servo actuator는 사용범위에 따라 소형 및 micro화가 시도되어지고 있는 추세이다. 특히 notebook computer나 휴대용 소형기기에 사용되는 구동장치는 예를 들어 harddisk의 구동 driver 나 Floppy disk driver의 구동 driver는 그의 부분품을 소형화하지 않으면 안된다.

이와 같은 소형기기의 중요부품인 구동용 driver의 소형화와 micro화는 필수적인 것이

다. 이를 위하여 servo motor의 높이와 부피를 줄여야 한다. 그러나 높이와 부피를 줄일 때 driver의 효율이 낮아진다. 높이와 부피를 줄이는 방법으로 여러 가지 방법이 사용되지만 그 중의 한 방법으로 servo driver의 winding인 stator coil의 도선 두께와 절연체를 줄이므로써 가능하

다. 그러나 기존의 coil winding으로는 두께와 부피를 줄이는데 한계가 있다. 이를 위하여 stator coil winding을 etched에 의한 thin film etched에 의한 multilayer/3/를 시도하므로써 가능케 했다. 이 논문에서는 etched winding의 multilayer를 위한 structure, characteristic 및 etched winding을 이용한 servo driver의 특성을 분석하여 design된 servo driver가 소형기기의 driver로 적합한지를 분석하였다. 또한 brush less driver의 position sensing을 위하여 사용되는 hall sensor 대신에 그 특성이 비 선형이며 소형인 MR sensor를 선형화 시켜 driver의 position sensing을 위해 사용하기 위한 방법과 그 효과를 비교하였다.

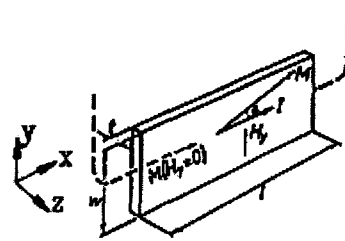
2 Structure of Brush less Permanent Magnet Driver

<그림 1>은 permanent magnet driver의 structure를

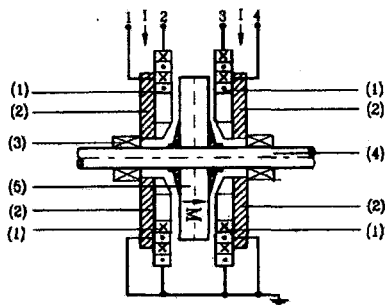
* 관동대학교 산업 시스템공학과 부교수

나타낸 것으로 driver는 stator와 rotor 그리고 back iron 으로 구성되어 있다. magnet rotor는 NdFeB의 permanent-

magnet로 8극으로 되어 있으며 maximum energy product ($B \cdot H$)는 220 ~ 280 [kJ/m]이며 remanence induction (B_r)는 881 [kA /m] 이다. back iron은 silizium과 iron의 합금으로 되어 있으며 permeability (μ_a)는 4 [A/cm] 이고 static coercivity field intensity 는 0.2 [A/cm]이다. stator winding은 etching에 의한 thin film multilayer로 rotor를 사이에 두고 양쪽에 위치 하고 있다.



<그림2>(a) MR sensor의 구조



1: winding(2+2 phase) 2: back iron
3: bearing 4: shaft 5: magnet rotor

<그림1> servo driver의 structure

3. Position Sensing

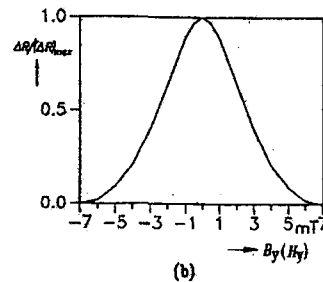
brush less driver의 rotor position sensing을 위하여 일반적으로 사용되는 hall sensor 대신에 MR-sensor를 사용하였다. 이때 MR-sensor는 그의 특성곡선이 비 선형 특성 때문에 position sensing에 적합하지 않다.

<그림2>(a)는 MR-sensor의 구조를 나타낸 것으로 sensor의 비 선형특성은

$$\rho(\theta) = \rho_0(1 + \beta \cos^2 \theta)$$

$$\Delta R / (\Delta R)_{\max} = 1 - (H_y / H_0)^2 \quad \text{<식 1>}$$

이다. <그림2>(b)는 <식1>에 의한 비 선형특성 곡선을 나타낸 것으로 rotor의 N극과 S극을 구분하지 못한다.



<그림2>(b) 비선형곡선

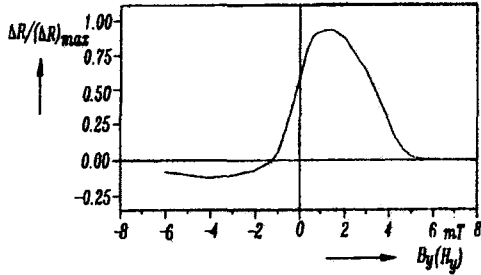
MR-sensor의 선형화를 위하여 센서 뒷면에 permanent magnet를 부착하면 <식1>은 sensor의 z 방향으로 작용하는 자기력 H_0 에 의해 <식2>로 변하여 비 선형곡선을 선형화 시킬 수 있다. 센서 뒷면에 부착된 magnet는 NdFeB로 그 크기는 가로 2mm, 세로 2mm 그리고 높이가 1mm이다.

$$R(\theta) = R_0 + \Delta R(H_y^2 + H_0^2) / H_0^2 \quad \text{<식2>} \\ + 2 \Delta R H_y \cdot H_0 / H_0^2$$

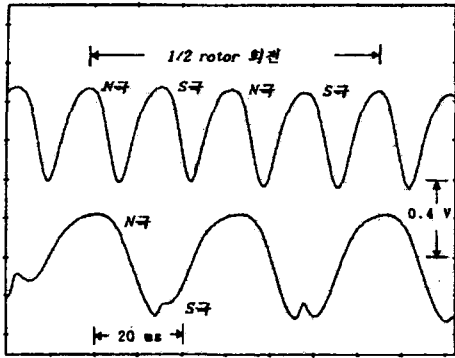
$$\Delta R / (\Delta R)_{\max} =$$

$$1 - (H_B^2 + H_y^2) / H_0^2 - 2 H_y H_0 / H_0^2 \quad \text{<식3>}$$

위<식3>에 의한 센서 특성곡선을 <그림3>에 나타내었으며 sensor가 driver 내에서 position sensing을 한 그림을 <그림4>에 나타내었다.



<그림3> 부가적인 자기력이 있을때의 센서 특성곡선



*위 signal: 부가적인 자기력이 없을 때

*아래 signal: 부가적인 자기력이 있을때

<그림4> driver의 rotor가 반회전 했을 때 rotor의 sensor의 position sensing

<그림4>에는 sensor 뒤에서 부가 자기력 H_o 가 있을 때와 없을 때를 나타내고 있다. 그림에 의하면 부가 자기력이 없을 때는 sensor의 특성곡선이 driver의 회전시 rotor의 N극과 S극을 구분하지 못하나 부가 자기력이 있을 때는 N극과 S극을 구분 하므로써 position sensing이 가능함을 보여 주고 있다.

4. Rotor

thin type disk driver의 rotor는 permanent magnet로 합금인 NdFeB를 사용하였으며 극수는 8극이다. dc driver의 회전토크에 중요한 역할을 하는 rotor magnet의 induction은 자속밀도 \vec{B} 와 magnet field intensity \vec{H} 에 의해 결정되는데

$\vec{B} = \mu(\vec{H} + \vec{M})$ $\vec{M} = f(\vec{H})$ 로 주어지며 \vec{M} 은 magnetization factor이다. field 계산을 위하여 magnetic field intensity 를 이용하면 $\vec{B} = \text{rot } \vec{V}$,

$$\vec{H} = -\text{grad } \varphi$$

$$-\text{div } \vec{H} = \text{div } \vec{M} = \Delta \varphi \quad \text{<식4>}$$

$$\varphi = -\frac{1}{4} \int \frac{\text{div } \vec{M}}{r} dv = \frac{1}{4} \int \frac{\text{div } \vec{H}}{r} dv \quad \text{<식5>}$$

가 구해진다. rotor의 induction 계산시 rotor는 permanent magnet 이므로 magnet로부터 고정된 자속이 나온다고 보고 field의 변화 $\text{div } \vec{M}$ 을 pole(magnet) 표면으로 집중시키고 pole 표면에 집중된 field를 line element charge로 보고 z방향으로 발생되는

induction을 biot savarti law/2를 이용하여 구하면

$$B_z(\rho) = \frac{\mu_o A^*}{4\pi} \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{p=0}^{k-1} \left\{ \sum_{i=0}^{k-1} \left[\sum_{j=1}^k (-1)^{i+j} I_z(\rho) \right] + \sum_{i=3}^k (-1)^{i+1} I_z(\rho) \right\} \right] \quad \text{<식6>}$$

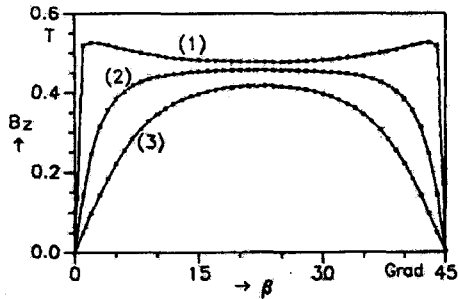
로 된다. 이때 $A^* = \text{rot } \vec{M}$ 이며

$\text{rot } \vec{M} = \vec{n}(\vec{M}_i - \vec{M}_o)$ 으로 주어지고 \vec{M}_i 는 magnet의 내부 magnetization 값이다. 그리고

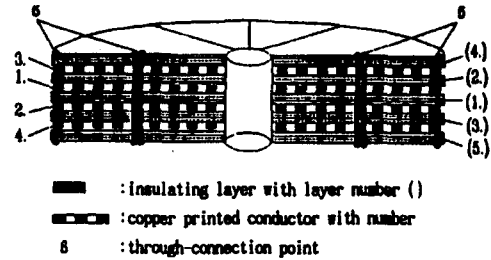
\vec{M}_o 는 외부 magnetization 값이며 여기서는 0이다. 위 식의 $I_z(\rho)$ 는

$$I_z(\rho) = \left[\arctan \frac{(z_p + h) \cdot (y_p + l/2)}{x_p \sqrt{(y_p + l/2)^2 + x_p^2 + (z_p + h)^2}} - \arctan \frac{z_p \cdot (y_p - l/2)}{x_p \sqrt{(y_p - l/2)^2 + x_p^2 + z_p^2}} - \arctan \frac{z_p \cdot (y_p + l/2)}{x_p \sqrt{(y_p + l/2)^2 + x_p^2 + z_p^2}} - \arctan \frac{(z_p + h) \cdot (y_p - l/2)}{x_p \sqrt{(y_p - l/2)^2 + x_p^2 + (z_p + h)^2}} \right] \quad \text{<식7>}$$

이 된다. 여기서 l 은 line element charge 이며 <그림 5>는 <식6>에 의해 얻어진 z방향 induction 성분을 나타낸 것이다.



<그림5> rotor magnet의 z 방향 induction



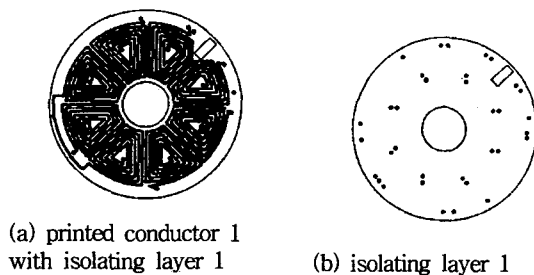
<그림7> etched winding의 측면도

isolating layer(4)와 (5)는 layer(2)와 layer(3)의 copper 를 보호하기 위하여 사용되어진 것이다. winding은 총 4 phase로 설계하였으며 one phase는 4 개의 코일로 구성 되어 있다. one phase를 위하여 layer 와 layer 사이를 through connection 시켰으며 <그림6>(b)에 보이는 layer 의 흑점은 through connection point 이다. phase 당 winding 저항은 1.8Ω 이며 inductance는 $11.72 \mu H$ 이다.

5.Thin Film Multilayer etched Winding

5.1 Design of a multilayer etched winding

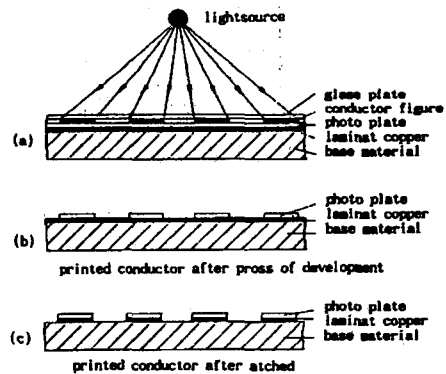
<그림6>은 photo etching을 이용하여 만들어진 stator winding을 보인 것으로 총 5 layer로 되어있다. 그중(a)는 첫번째 layer와 (b)는 첫번째 isolating layer(Epoxyde glass)를 보인 것이다. copper를 thin film(Epoxyde glass) 위에 etching을 통해 printing 시킨 것이다. etching 시킨 copper는 99.5 %의 순도를 가지며, copper의 두께는 $200 \mu m$, 폭은 $280 \mu m$ 그리고 etched 된 copper와 copper 사이 거리는 $280 \mu m$ 이다. 절연층으로 사용된 layer(Epoxyde glass)의 두께는 $150 \mu m$ 이다. <그림7>은 design 된 etched winding의 측면도를 나타낸 것으로 layer(1)은 절연체의 양쪽 면에 copper가 etched 되어져 있으며 layer(2)는 절연체의 윗 쪽에 그리고 layer(3)는 절연체의 아래쪽에 copper가 etching 되어져 있다.



<그림6> winding의 etched conductor layout

5.2 Manufacture of etched Winding

etched winding의 제작을 위하여 가장 중요한 점은 copper 가 프린트되어질 film 이다. 이 필름의 재질로는 phenol paper와 epoxyde paper 그리고 얇은 두께에 절연성이 강하고 단단한 epoxyde glass가 있는데 그 중 epoxyde glass를 사용하였으며 copper는 atching을 위하여 99.5 % 순도의 copper film이 사용되어 졌다. printed conductor의 figure를 copper film 위에 설치하기 위하여 photo dunch/4 방법을 사용하였다. photo dunch 방법은 <그림 8>에 보이고 있다.

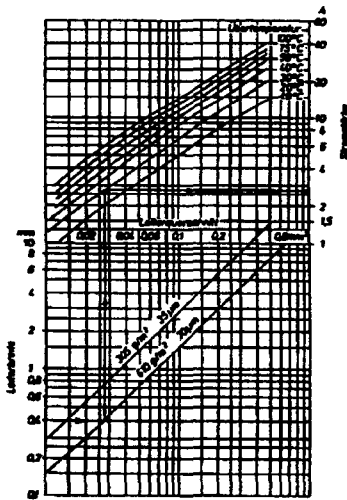


<그림 8> phodruich and etched process

printed conductor의 process of development를 위하여 그림과 같이 copper film이 입혀진 thin film(base material) 위에 제품이 완성된 후 copper의 보호 및 절연을 위하여 thin photo layer를 그리고 winding의 conductor figure가 그려진 dia를 그 사이에, 그리고 마지막으로 얇은 유리를 올려놓고 light source를 비추면 <그림8> 중간과 같은 형태로 thin film 위에 printed conductor가 형성되어 지며 이것을 다시 etching을 시키면 <그림8> 아래와 같은 형태의 printed conductor가 base material 위에 만들어진 다.

5.3 Etched Winding(printed conductor)의 Current Capacity

micro electronic과 thin film technic은 많은 부분에서 전류의 흐름에 제한을 받게 된다. 비교적 높은 전류는 printed conductor의 얇은 도체에 열을 발생시키고 그 열로 인하여 화제가 발생하게 된다. thin film으로 제작되어진 multilayer winding은 driver의 큰 토크와 효율을 위하여 winding의 얇은 도체에도 불구하고 비교적 큰 전류를 흘려야만 한다



<그림9> etched conductor의 current capacity

최대 전류의 흐름은 일반적으로 도체 표면의 온도와 도체의 절연에 의해 결정되어 진다.

<그림9>는 epoxede glass에 copper를 etching 하였을 때의 단면적 높이와 너비에 대한 허용 전류와의 관계를 나타낸 그림이다. 만들어진 printed conductor의 두께가

200 μm 폭이 280 μm 일 때 최대 허용 전류는 <그림9>에 의해 상온에서 2[A] 까지 흘릴 수 있다. 실험에 의한 전류 대비 온도의 측정치는 1.5[A]의 전류를 30분 동안 conductor에 흐르게 한 후 winding의 표면 온도를 측정한 결과 68⁰C 였다. driver 동작 시 동작 온도는 75⁰C 이므로 2[A] 까지는 제작되어진 multilayer winding의 도체에 문제없이 흘릴 수 있다.

6. Servo Driver의 특성

etched winding을 이용한 servo driver는 winding의 저항과 inductance를 포함하고 있으며 driver에 흐르는 전류는 이곳에서 전압 강하가 일어난다.

servo driver에 인가된 전압V는 구동회로의 voltage u_s 와 역기전력 $u_i(\beta)$ 으로 이루어지며 <식8>로 주어진다.

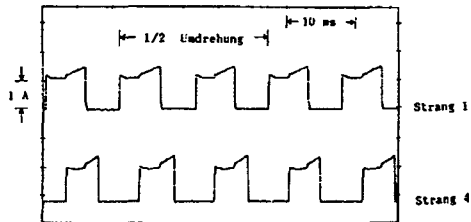
$$V = u_i(\beta) + i(\beta) \cdot R + L \frac{di}{dt} + u_s(\beta)$$

$$V = u_i(\beta) + v_s(\beta) \quad \text{<식8>}$$

각 phase에 흐르는 전류는

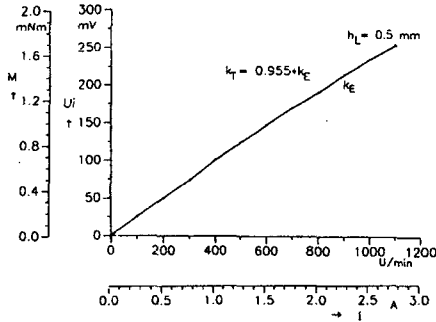
$$i(\beta) = \frac{V}{R} + \frac{v_i}{R} + \frac{u_s(\beta)}{R} \quad \text{<식9>}$$

이며 <그림10>은 회전수 1000rpm 에서 인가 전압이 3.4V 이고 winding의 저항이 1.7 Ω 일때 magnetoresistive sensor에 의한 commutation시 driver의 phase1, 2, 3, 4에 흐르는 전류 중 phase3(strang3)과 phase4 (strang4)에 흐르는 전류의 측정치를 나타낸 것이다.

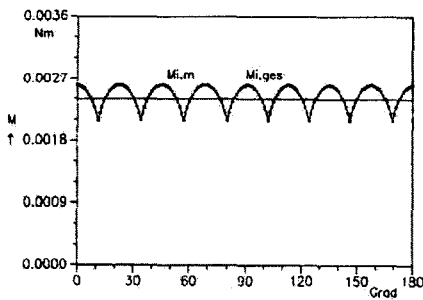


<그림10> servo driver의 phase3과 phase4에 흐르는 전류

제작된 servo driver의 torque는 1000rpm에서 23mNm이며 <그림11>는 motor의 current와 RPM과의 관계를 그리고 <그림12>은 motor의 torque 곡선을 나타낸 것이다.



<그림11> driver의 rpm 특성곡선



<그림12> driver의 torquer 곡선

7. 결 론

design된 servo driver는 disc type driver로써 coil winding을 etched에 의한 thin film multilayer 시키므로써 winding의 두께를 현저히 줄일 수 있으며 이를 통해 이 driver가 사용되는 기기의 소형화와 micro화가 가능하다. thin film에 의한 winding 내의 열 발생은 큰 문제가 되지 않으며 또한 그의 특성 분석을 통해 저전압 고효율 즉 큰 토크를 발생시키므로 notebook computer와 같은 harddisk driver의 구동 드라이버로 사용 가능하며 이를 다른 공학 분야의 소형 장비에 광범위하게 사용 가능하다는 것을 실험적으로 분석하였다. thin film을 통한 etched multilayer winding은 기존의 driver의 두께 및 부피를 획기적으로 줄

일 수 있을 뿐만 아니라 소형화에 비하여 비교적 높은 전류를 winding에 흘릴 수 있으며 또한 상대적으로 큰 토크를 만들 수 있다. 이를 위하여 보다 적은 센서인 MR센서를 사용하기 위하여 MR센서의 비 선형을 선형화 시켜 dc driver의 position sensing을 가능케 했다.

참고 문헌

[1] Misaki, T "Ananalysis of 3-dimen- sional magnetic field distribution in a small-sized synchronous motor with permanent magnet rotor", IEEE Trans Magn. MAG - 18, 1982, pp.436-466.

[2] Marinescu, M., "Analyse Berechnung magnetischer Konfiguration mit starr magnetisierten Permanent Magneten und begrenzt permeablem Eisen Archiv fuer Electronic 1979, Band 61, pp.259-277.

[3] Muller, H., "New development in design construction of multilayers PC- Word Convention", 1981, muenschen, pp.45-47.

[4] Hartmanen, H. "OMD/SMD Ober- flachen montierte Bauelemente in der Leiterplatentechnik Eugen G Leuze Verlag", 1986, Saulgau.

[5] Muller, H., "Ausgewaehlte Kapitel der strukturberechnung und des konzeption- nellen Entwurfs. prinzipien der konstruk - tiven Gestaltungleuze Verlag," Salgau, 1992.

[6] Henneberge, G., "Servoantrieb fuer werkzeugmaschinen und roboter stand der Technik

[7] Dibben, U Magnetoresistive Sensor IEEE Trans.Mag MAG-20(1984) p954-956



최 도 순(Do-Sun Choi)

1972년 숭실대학교 전자 공학과 공학사
1988년 Berlin 공대 전기 전자공학
공학석사
1993년 Berlin 공대 전기기계 공학박사
현재 관동대학교 산업시스템 공학과
부교수

관심분야: moto control, 전기기계, sensor