

반경 및 원주 방향 자화된 플라스틱 자석을 갖는 BLDC 전동기의 전자기적 특성 해석 및 비교

장 석영, 최 장영, 조 한욱, 양 현섭\*, 이 성호\*\*, 정 상섭\*\*  
 충남대학교, (주) 삼성테크윈\*, LG D/A 연구소\*\*

Comparison and Electromagnetic Analysis of BLDC Motors  
 with Radial and Polar Plastic Magnets

SeokMyeong Jang, JangYoung Choi, HanWook Cho, HyunSup Yang\*, SungHo Lee\*\*, SangSub Jeong  
 Chungnam National University, Samsung Techwin\*, LG D/A Laboratory\*\*

**Abstract** - This paper deals with the comparison and analysis of brushless DC (BLDC) motor with radial and polar anisotropic plastic magnet. The open-circuit field distributions and back-emf for BLDC motor with polar plastic magnet are established analytically and the results are validated extensively by comparison with finite element (FE) analyses. On the basis of two dimensional (2-D) analytical solutions, this paper predicts open-circuit field characteristics according to design parameters and makes a comparison between BLDC motor with polar plastic magnet and it with radial plastic magnet in terms of required magnet volume and harmonic of air-gap flux density waveform.

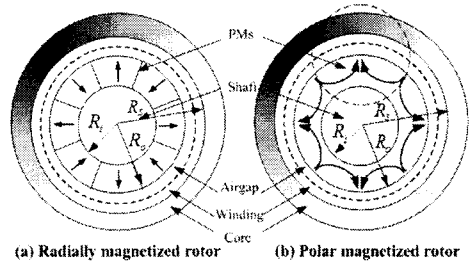


그림 1. 두 가지 다른 종류의 자화를 갖는 BLDC 전동기

1. 서 론

플라스틱 (ferrite-bonded) 자석은 팬 과 펌프 모터에 응용되어지는 소형 브러시리스 직류전동기 (BLDCM)에 널리 사용되어지고 있다. 대부분의 경우, 플라스틱 자석은 정현적인 공극자속밀도를 얻기 위하여 그리고 자속을 증가시키기 위하여 원주 방향으로 착자되어진다. 한편, 원주 이 방향 착자된 영구자석 회전자를 갖는 BLDC 전동기는 회전자 코어를 갖지 않기 때문에 결과적으로 제작 원가 및 회전자 관성이 줄어들게 된다. 따라서 원주 이 방향 착자된 영구자석 회전자를 갖는 전동기는 반경 방향 및 평행 방향 착자된 플라스틱 자석을 갖는 BLDC 전동기 비하여 좀 더 우수한 기기로 자리를 잡을 것이다 [1].

[1]은 유한요소 해석법을 사용하여 회전자 코어가 없는 원주 이 방향 플라스틱 자석을 갖는 BLDC 전동기의 특성 해석을 수행하고 해석 결과는 실험결과와 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다. 유한요소 해석은 자계분포의 예측에 있어서 포화의 고려와 같은 정확한 해석을 제공하지만, 이 해석법은 시간을 많이 소비할 뿐만 아니라, 기기의 성능에 설계변수들이 미치는 영향에 대한 예측을 해석 해에 비하여 심도 있게 조사할 수 없다 [2].

따라서 자기 벡터자위와 2차원적인 극 좌표계로부터 유도된 해석 해를 바탕으로 본 논문은 반경 및 공심/철심형 이 방향 착자된 플라스틱 자석을 갖는 BLDC 전동기의 무부하시 자계 분포 및 역기전력 특성에 대하여 해석하고, 동일 자속밀도 조건하의 요구 자석 체적량 비교 및 공극자속밀도 파형의 고조파 성분 비교를 수행하였다. 여기서 공심/철심형 원주 이 방향 착자된 회전자에 대하여 극수, 자석 두께 및 자석 외 반경에 따른 자계 변화 특성 또한 제시하였다.

특히, 원주 방향 플라스틱 자석의 무부하시 자계를 정확하게 예측하기 위하여 극 좌표계에 적절한 자화 모델링 기법을 제시하고, 무부하시 자계 분포 및 역기전력에 대한 특성 해석 결과의 타당성은 유한요소해석 결과와의 비교에 의해 입증되어졌다.

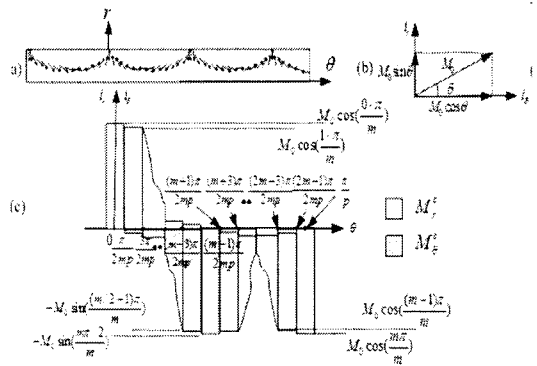


그림 2. 원주 방향 자화 모델링

2. 원주 방향 착자된 플라스틱 자석을 갖는 BLDC 전동기

2.1 구조 및 가정

그림 1 (a) 와 (b) 는 각각 8극 반경 및 원주 방향 자화된 회전자 및 슬롯리스 고정자를 갖는 BLDC 전동기를 보여준다. 여기서  $R_i$ ,  $R_o$ ,  $R_m$ 는 각각 영구자석의 내·외 반경 및 고정자 내 반경을 나타내며, 두 가지 모델의 이것들은 같은 값들을 갖는다. 해석의 편의를 위해 영구자석의 비 투자율은 1이라 가정하고, 고정자 코어의 투자율은 무한이라 가정한다.

2.2 자화 모델링

영구자석에 의한 자계특성 해석 시 영구자석의 정확한 자화 모델링이 먼저 수행되어야 한다. 반경방향 자화에 대한 수학적 모델링은 이미 널리 알려져 있는데 반해, 원주 방향 자화에 대한 해석적 모델링 기법에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문은 극 좌표계에 적절한 원주 방향 플라스틱 자석에 대한 자화 모델링 기법을 소개하고자 한다. 이를 위해서, 그림 2는 원주방향 자화에 대한 푸리에 전개를 위한 모델을 보여준다. 그림 1 (b)에 표현된 자화는 그림 2(a)와 같이 각각의 세그먼트의 조합으로 표현 할 수 있으며, 그림 2(a)의 각각의 세그먼트에 그림 2(b)에 표현된 벡터 합성을 적용하여 그림 2(c)와 같은 푸리에 전개를 위한 모델을 얻는다. 결과

적으로, 원주 방향 자화 모델의 자화는 반경방향 자화 성분과  $\theta$  방향 자화 성분으로 구성되어 있다고 예측할 수 있으며, 이를 수학적으로 표현하면 식 (1)과 같은 원주 방향 자화의 푸리에 급수를 얻는다.

$$\vec{M}_{polar} = \left[ M_r^p \cos p\theta_i + M_\theta^p \sin p\theta_i \right] \quad (1)$$

여기서  $p$ 는 극 쌍수를 나타낸다.  $M_r^p, M_\theta^p$  은 각각 반경방향 및  $\theta$ 방향 푸리에 계수를 나타낸다.

### 2.3 무부하시자계 특성식

영구자석 영역에는 전류가 없으므로 맥스웰 방정식에 의해  $\text{curl}\mathbf{H} = 0$  이므로  $\text{curl}\mathbf{B} = \mu_0\text{curl}\mathbf{M}$  이 되고 여기에 벡터자위의 정의  $\text{curl}\mathbf{A} = \mathbf{B}$ 를 대입하여 풀면 원주 방향 자화된 회전자에 의한 자계분포 예측을 위한 지배방정식은 식 (2)로 주어진다.

$$\frac{d^2}{dr^2} A_z + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} A_z - \left(\frac{p}{r}\right)^2 A_z = -\frac{\mu_0}{r} pM \quad (2)$$

여기서  $A_z$ 는 벡터자위의  $z$ 성분이며  $M = M_\theta^p/q + M_r^p$ 이다. 식 (2)로부터 얻어지는 벡터자위의 해석 해를 벡터자위의 정의에 대입함으로써 반경 방향 및  $\theta$ 방향 자속밀도를 얻을 수 있으며, 이 자속밀도 특성식에 포함된 미지의 계수들은 경계조건을 대입하여 구할 수 있다, 결과적으로 원주 방향 자화를 갖는 BLDC 전동기의 무부하시 자계 특성식은 식 (3)으로 주어진다.

$$B_g(r, \theta) = \Gamma \cos(p\theta) \quad (3.a)$$

$$\Gamma = p \frac{B_r [R_i^{p+1} - R_o^{p+1}]}{\Lambda(p+1)} \left[ r^{p-1} R_s^{-2p} + r^{-(p+1)} \right] \quad (3.a)$$

여기서 공심형 회전자에 대하여  $\Lambda=1$ , 반면에 철심형 회전자에 대하여  $\Lambda$ 는 식 (4)와 같다.

$$\Lambda = 1 - (R_i / R_s)^{2p} \quad (4)$$

### 2.4 역기전력 특성식

고정자 코일에 유도되는 역기전력은 공극을 지나는 쇠교자속의 시간에 대한 변화율이므로 식 (5)와 같이 주어진다. [3]

$$e_b = -d\Psi / dt \quad (5)$$

여기서  $\Psi$ 는 코일에 쇠교하는 자속량이다. 결과적으로 식 (5)에 의해 상당 역기전력은 식 (6)으로 표현된다.

$$e_b = 2pN_{ph} R_i l_a \omega_r K_{dn} \Gamma \cos p(\delta_y / 2 + \omega_r t + \theta_o) \quad (6)$$

여기서  $N_{ph}$ 와  $l_a$  각각 상당 턴 수 및 전동기의 축 방향 유효길이를 나타내며,  $\omega_r$  및  $K_{dn}$ 은 각각 회전속도 및 권선의 분포권계수를 나타낸다.  $\delta_y$  및  $\theta_o$ 는 각각 고정자 권선의 피치 각 및 정류 시간에 의존적인 초기 각이다.

### 3. 무부하시자계분포 및 역기전력에 대한 해석적 결과와 유한요소 해석결과와의 비교

그림 3 (a) 와 (b)는 각각 반경 및 공심/철심형 원주 방향 자화된 회전자를 갖는 BLDC 전동기에 대한 무부하시 자계 분포 및 역기전력 특성에 대한 해석적 결과와 유한요소 해석 결과와의 비교를 보여준다. 모든 해석적 결과는 유한요소 해석결과와 잘 일치함을 보이며, 원주 방향 자화된 회전자를 갖는 BLDC 전동기가 반경방향 자화된 회전자를 갖는 BLDC 전동기에 비하여 무부하시 자계 분포 및 역기전력 특성 측면에서 우수함을 알

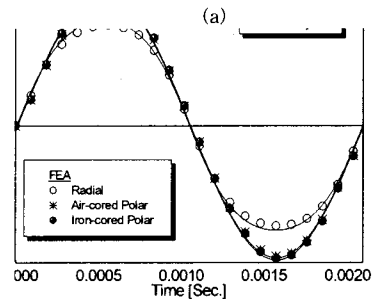
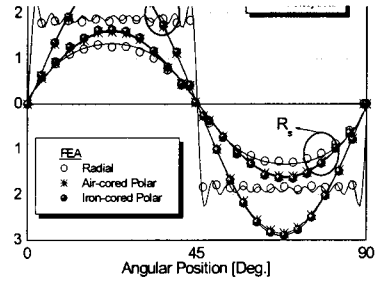


그림 3. 해석적 결과와 유한요소 해석결과와의 비교: (a) 각기 다른 반경방향 위치에서의 무부하시 자계 분포 및 (b) 역기전력

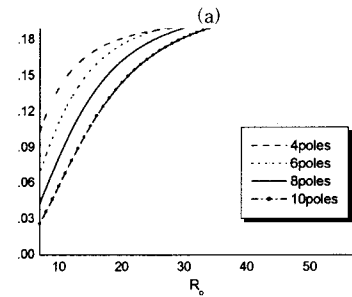
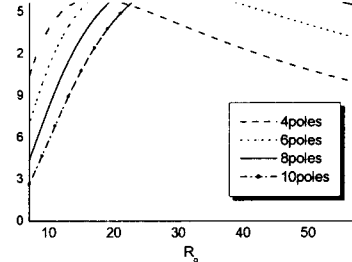
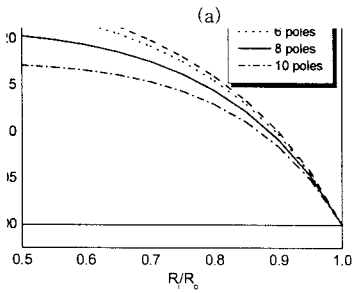
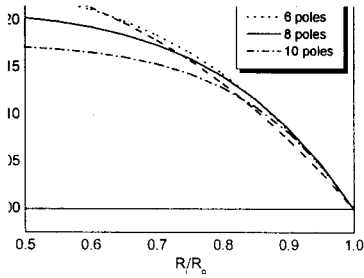


그림 4. 자석 외 반경에 따른 최대 자속밀도의 변화: (a) 공심 및 (b) 철심형 원주 방향 자화 회전자.

수 있다. 자화된 회전자를 갖는 BLDC 전동기에 비하여 무부하시 자계분포 및 역기전력 특성 측면에서 우수함을 보임을 알 수 있다. 또한 철심형 원주 방향 자화 회전자와 공심형 원주 방향 자화 회전자는 무부하시 자계분포 및 역기전력 파형에서 거의 차이가 나지 않고 공심형으로 할 경우 회전자 관성 및 제조 원가 측면에서 유리할 것이므로 원주 방향 자화된 회전자를 갖는 BLDC 전동기의 경우 공심형 회전자가 적합할 것으로 사료된다.

### 4. 원주 방향 자화된 플라스틱 자석을 갖는 BLDC 전동기의 설계변수에 따른 자계변화 특성



(b)

그림 5. 자석 두께에 따른 최대 자속밀도의 변화: (a) 공심 및 (b) 철심형 원주 방향 자화 회전자.

#### 4.1 극수 및 영구자석 외반경

고정된 영구자석 두께 및 공극길이에 대하여, 그림 4는 공심/철심형 원주 방향 플라스크 자석의 외 반경  $R_o$ 에 따른 최대 공극자속밀도의 변화를 보여준다.  $R_o$ 가 작은 경우 극수가 증가함에 따라 공극자속밀도는 작아지는 반면에,  $R_o$ 가 큰 경우 극수가 증가함에 따라 자속밀도는 커진다. 따라서 극수에 따른 최적의 영구자석 외반경의 길이를 결정할 수 있다.

#### 4.2 극수 및 영구자석의 두께

고정된  $R_o$  및  $R_o/R_s$ 의 비에 대하여, 그림 5는 다양한 극수를 갖는 공심/철심형 원주 방향 자화된 회전자에 대하여  $R_i/R_o$ 의 변화에 따라 공극자속밀도의 최대 값이 어떻게 변화하는지를 보여준다. 공심형 회전자의 경우, 임의의  $R_i/R_o$ 의 비에서 최대 자속밀도를 갖는 극수는  $R_i/R_o$ 의 비에 따라 변화하는 반면, 철심형의 경우 최대 자속밀도를 갖는 극수는 모든  $R_i/R_o$ 의 비에서 10극이 차지한다. 그림 4와 5에서의 결과로부터, 자석의 극수, 외 반경 및 두께와 같은 기하학적인 크기는 자석의 이용율을 높이기 위하여 종합적으로 고려되어야 함을 알 수 있다.

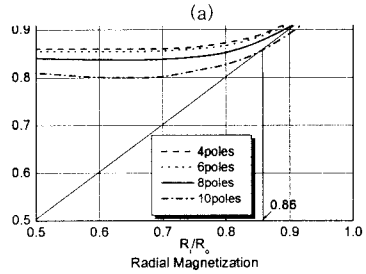
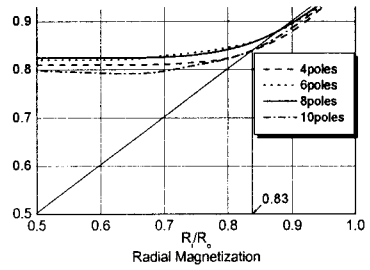
### 5. 반경 및 원주 방향 자화된 플라스크 자석을 갖는 BLDC 전동기의 비교

#### 5.1 자석 요구량

고정된  $R_o/R_s$ 의 비에 대하여, 그림 6은 공심/철심 원주 방향 자화된 회전자가 반경 방향 자화된 회전자가 생산하는 자속밀도와 동일한 자속밀도를 생산하기 위하여 요구되는 자석 체적량을 반경 방향 회전자를 기준으로 도시한 것이다. 철심형 원주 방향 자화된 회전자는 극수가 증가함에 따라 요구되는 자석 체적량이 늘어나며, 임의의  $R_i/R_o$ 의 비 아래에서 공심/철심형 원주 방향 자화된 회전자가 반경 방향 자화된 회전자에 비하여 요구 자석 체적량이 작음을 알 수 있다.

#### 5.2 공극자속밀도의 고조파

공극자속밀도에 함유된 고조파는 고정자와 회전자에 손실을 야기한다. 표 1은 원주 방향 및 반경 방향 자화된 자석에 의해 발생된 공극자속밀도에 함유된 고조파 함



(b)

Fig. 6. 반경 방향 자화된 회전자의  $R_i/R_o$ 의 비에 따른 (a) 공심 및 (b) 철심형 원주 자화 회전자의  $R_i/R_o$ 의 비 변화.

율을 보여준다. 표 1에서 알 수 있듯이, 원주 방향 자화된 회전자가 반경 방향 자화된 회전자에 비하여 훨씬 더 정현적인 파형을 갖으며, 이로 인해 철손도 적을 것으로 사료되므로 결과적으로 효율 역시 원주 이 방향 자화된 회전자가 더 좋을 것으로 예측된다.

### 6. 결론

본 논문은 반경 및 원주 방향 자화를 갖는 영구자석 기기의 무부하시 자계분포 및 역기전력에 대한 특성해석을 수행하였다. 해석방법은 2차원적인 극 좌표계 및 공간고조파법을 이용하여 특성식들을 도출하였고, 해석결과는 유한요소법과 비교하여 잘 부합함을 확인함으로써 해석법의 타당성을 입증함과 동시에 원주 방향 자화의 전자장 해석법 및 자화 모델링 기법을 제시했다. 또한 원주 방향 자화가 반경 방향 자화에 비해 공극자속밀도의 정현성 및 요구 자석 체적량 측면에서 우수함을 입증하였다.

표 1. 공극 자속밀도에 함유된 고조파 성분

Harmonic Order	1	3	5
Air-cored Polar	0.1937	-	-
Iron-cored Polar	0.1968	-	-
Radial	0.1628	0.0183	0.00414

### References

- [1] I. S. Jung, H. G. Sung, Y. D. Chun and J. H. Borm, "Magnetization modeling of a bonded magnet for performance calculation of inner-rotor type BLDC motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp.2810-2813, July, 2001.
- [2] Z. Q. Zhu, David Howe and C. C. Chan, "Improved Analytical Model for Predicting the Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent-Magnet Machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol.38, no. 1, pp.229-238, Jan. 2002.
- [3] Duane Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. The Writer's Collective, 2003.