

직경방향으로 착자된 영구자석형 고속모터의 자계특성

Part I : 무부하시 자계분포

장석명, 최장영, 조한욱, 양현섭\*, 이성호\*\*  
충남대학교, (주)삼성테크윈\*, LG D/A 연구소\*\*

Field Distribution in High Speed Motor with Diametrically Magnetized PM Rotor

Part I : Open Circuit Field

Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Han-Wook Cho, Hyun-Sub Yang\*, Sung-Ho Lee\*\*  
Chungnam National University, Samsung Techwin Inc.\*, LG D/A\*\*

**Abstract** - This paper deals with field distributions in high speed motor with two different types of diametrically magnetized PM rotor, one is that rotor is consisted of PM and shaft, the other is that rotor has only PM. In case of high speed motor with rotor consisted of PM and shaft, this paper predicts field distributions in high speed motor according to the quality of shaft. The magnetic field solutions are derived analytically in terms of vector potential and 2-D polar coordinate system. The results are shown in good conformity with those obtained from the commonly used finite element method.

터 (PMSM)와 원형 자석으로만 구성되어진 직경방향 착자된 PMSM의 구조를 보여준다. 본 논문에서 그림1 (a)의 경우 축의 재질을 순철과 공기의 투자율과 비슷한 재질에 대해 각각 해석하였다. 그림 2 (a)와 (b)는 각각 그림 1 (a)와 (b)에서 보여지는 직경방향 착자된 PMSM의 구조에 대한 단순화된 해석모델을 보여준다. 해석 모델에서 로마문자 I 과 II는 각각 슬리브를 포함한 공기영역과 영구자석영역을 나타내며,  $\tau$ 는 극 간격으로 2극기 이므로  $\pi$ 와 같다. 한편, 순철의 투자율과 축 방향 길이는 무한이라 가정한다.

1. 서 론

영구자석형 고속 모터는 일반 중·저속모터에 비해 적은 체적에서 높은 출력을 얻을 수 있어, 항공시스템, 터보 콤프레셔, 터보 발전기, 플라이 휠 에너지 저장장치 등에 많이 활용되고 있다. 그러나 중·저속급의 회전자에 비해 고속 모터는 고속회전에서 오는 원심하중이 매우 커 UTS(Ultimate Tensile Strength)가 작은 영구자석으로 이루어진 회전자를 설계/제작시 많은 주의가 필요하다[1]-[4]. 또한 높은 전기적 주파수에 의해 큰 철손 및 시공간 고조파에 의해 회전자에서 와전류 손실이 발생하기 때문에, 회전자를 냉각하기 어려운 고속회전기에서는 전자기적으로 손실을 최소화 할 수 있는 극수 및 자화 방법, 그리고 구조를 선택해야 한다[5][6]. 본 논문에서 선택한 직경방향으로 착자된 영구자석 회전자는 자기적으로는 정형적인 공극 자속밀도를 얻을 수 있어 회전시 시공간 고조파를 최소화 할 수 있으며, 기구적으로도 고속에 알맞은 구조이다[5]. 또한 상대적으로 취약한 영구자석을 보호하기 위해 슬리브에 UTS가 매우 높은 Incol 718을 사용하는데 있어 매우 적합한 기계적 구조를 갖는다. 이와 같이 많은 장점을 갖는 직경방향으로 착자된 영구자석 회전자를 이용하여 설계/제작된 고속회전기가 해외에서 많이 활용되고 있으며, 국내에서도 많은 연구가 이루어 졌다. 그러나 이를 정확히 수학적으로 모델링하여 분석하는 작업이 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 본 논문에서는 직경방향으로 착자된 영구자석형 고속회전기의 자계 특성을 분석하기 위해 회전자의 구조를 크게 2가지 형태로 분리하여, 단순화된 해석모델을 제시하고, 자계특성식을 수립하여 자계분포 특성을 분석하였다. 본 논문 결과물은 추후 Part II : Armature-Reaction Field, Part III : Effect of Stator Slotting,, Part IV : Magnetic Field On Load를 위한 연구의 기반이 될 것이며, 또한 회전자 와전류 손실을 예측하는데 있어 큰 도움이 될 것이라 사료된다.

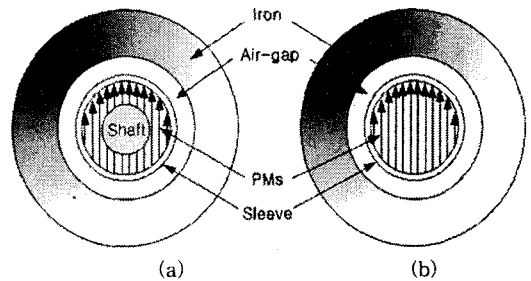


그림 1. 회전자의 구조가 (a) 영구자석 + 축 과 (b) 원형 영구자석으로만 구성된 직경방향 착자된 PMSM의 구조

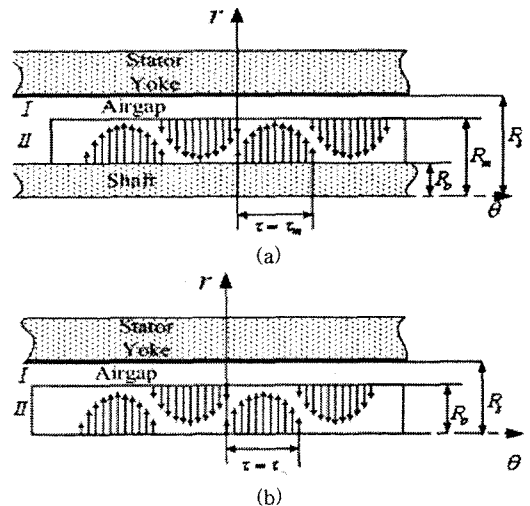


그림 2. 회전자의 구조가 (a) 영구자석 + 축 과 (b) 원형 영구자석으로만 구성된 직경방향 착자된 PMSM의 단순화된 해석모델

2. 직경방향 착자된 PMSM

2.1 해석 모델

그림 1(a)와 (b)는 각각 회전자의 구조가 영구자석과 축으로 구성되어진 직경방향 착자된 영구자석형 동기모

## 2.2 영구자석에 의한 자계 특성식

직경방향 착자된 PMSM에 대한 회전자 부분의 영구자석 배열은 식 (1)과 같은 푸리에 급수로 주어진다.

$$M = \sum_{n=\text{odd}}^{\infty} M_n e^{-j\theta} \quad (1)$$

여기서,  $M_n$ 은 영구자석의 자화  $M$ 의  $r$ 방향 푸리에 계수이다. 맥스웰 방정식  $\nabla \times H = J$ 와 자기벡터 퍼텐셜의 정의  $\nabla \times A = B$ 를 이용, Coulomb gauge  $\nabla \cdot A = 0$ 를 적용하면 식 (2)와 같은 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{d^2}{dr^2} A_{zn} + \frac{1}{r} \frac{dA_{zn}}{dr} - \frac{q^2}{r^2} A_{zn} = -j\mu_0 \frac{q}{r} M_n \quad (2)$$

여기서  $\mu_0$ 은 진공의 투자율이고,  $A_{zn}$ 은 자기 벡터퍼텐셜  $A$ 의  $z$ 성분이며, 직경방향 착자된 PMSM의 기하학적인 구조에 의해 자기 벡터 퍼텐셜은  $A_{zn}$ 만 존재한다. 한편, 식 (2)의 지배방정식은 그림2의 모든 모델에서 동일하다. 다음으로 벡터 퍼텐셜의 정의  $\nabla \times A = B$ 에 식 (2)에서 구해진  $A_{zn}$ 을 대입하면, 그림 2에 제시된 영역 I 즉 공기영역과 영역II 즉 자석영역의  $r$ 방향 및  $\theta$ 방향 자계특성식이 식 (3)으로 주어진다.

$$\begin{aligned} B'_{\theta n} &= -\frac{j}{r} [A' r + B' r^{-1}] e^{-j\theta} \\ B''_{\theta n} &= -\frac{j}{r} [A'' r + B'' r^{-1} - \frac{j\mu_0 r \ln r M_n}{2}] e^{-j\theta} \\ B'_{rn} &= [A' - B' r^{-2}] e^{-j\theta} \\ B''_{rn} &= [A'' - B'' r^{-2} - \frac{j\mu_0 M_n (\ln r + 1)}{2}] e^{-j\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 계수  $A'$ ,  $B'$ ,  $A''$ ,  $B''$ 는 각 모델에 따라 다른 값을 가지며, 경계조건을 대입함으로써 구할 수 있다. 각 모델에 대한 경계조건은 각각 식 (4), 식 (5)와 식 (6)으로 주어진다.

축이 순철인 경우

$$\begin{aligned} r=R_i & \quad B''_{\theta n} = 0 \\ r=R_o & \quad B''_{rn} = B'_{rn} \\ & \quad B''_{\theta n} = B'_{\theta n} \\ r=R_s & \quad B'_{\theta n} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

축의 투자율이 공기와 같은 경우

$$\begin{aligned} r=R_i & \quad B''_{\theta n} + B''_{rn} = \mu_0 M_n \\ r=R_o & \quad B''_{rn} = B'_{rn} \\ & \quad B''_{\theta n} = B'_{\theta n} \\ r=R_s & \quad B'_{\theta n} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

축이 없는 원형 영구자석인 경우

$$\begin{aligned} r=0 & \quad A''_{zn} = 0 \\ r=R_o & \quad B''_{rn} = B'_{rn} \\ & \quad B''_{\theta n} = B'_{\theta n} \\ r=R_s & \quad B'_{\theta n} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

## 3. 해석법 및 유한요소 결과의 비교

표 1은 해석결과와 유한요소 해석결과를 비교하기 위한 사양을 보여주며, 해석결과와 타당성을 입증하기 위해 모델 I, II, III의 치수는 임의로 선택한 것이다. 그림 3, 4와 5는 각각 모델 I, II와 III에 대해 회전자의 구조가 영구자석과 순철 재질의 축, 영구자석과 공기의 투자율과 같은 재질의 축 그리고 원형 영구자석으로만 구성되어진 세 가지 경우에 대해 각각의 해석 결과와 유한요소 해석 결과와의 비교를 보여준다. 해석결과는 유한요소 해석결과와 잘 부합됨을 볼 수 있다.

표 1 직경방향 착자된 PMSM의 설계사양

	Model I	Model II	Model III
$R_o$ (inner PM radius)	10.5	25	15
$R_m$ (outer PM radius)	14.25	35	20
$R_s$ (outer air-gap radius)	19.25	40	25
$B_r$ (remanence flux density)	1.1 (T)		

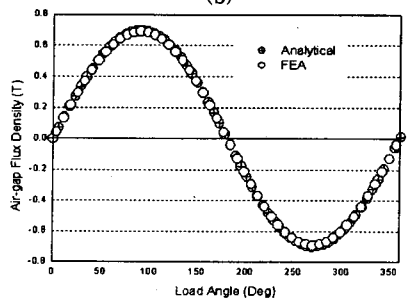
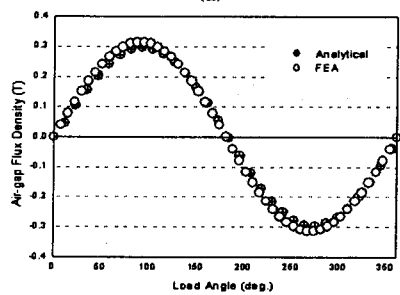
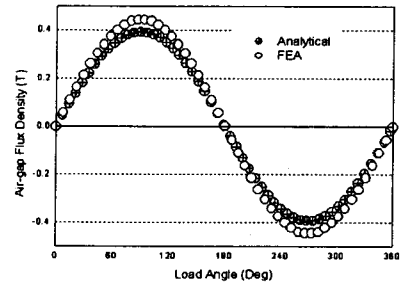
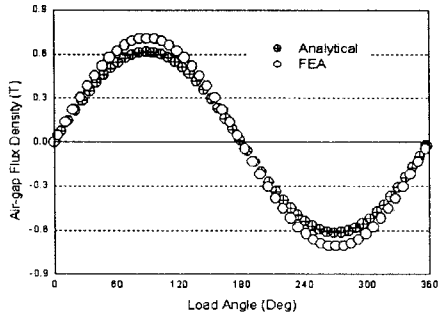
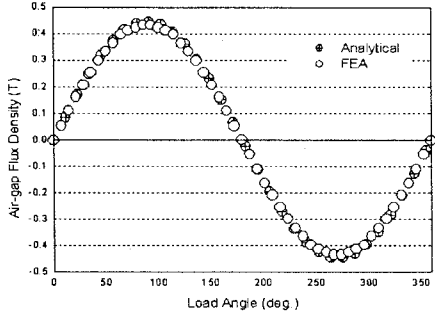


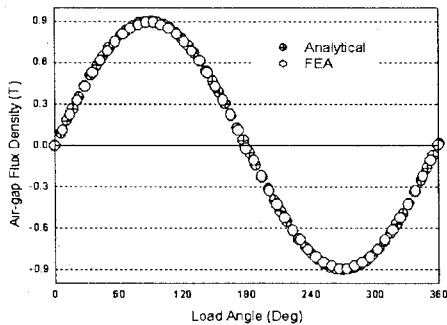
그림 3. 회전자의 구조가 (a) 영구자석과 순철 재질의 축, (b) 영구자석과 공기의 투자율과 같은 재질의 축 그리고 (c) 원형 영구자석으로 구성되어진 경우의 모델 I에 대한 해석 결과와 유한요소해석 결과와의 비교



(a)

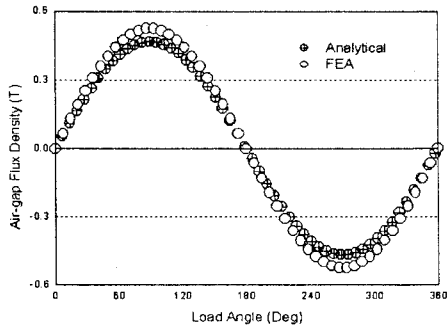


(b)

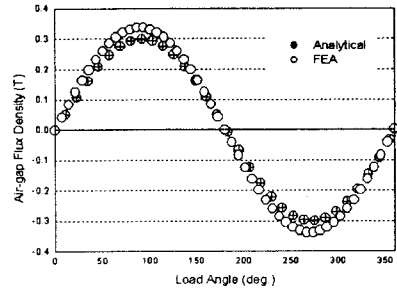


(c)

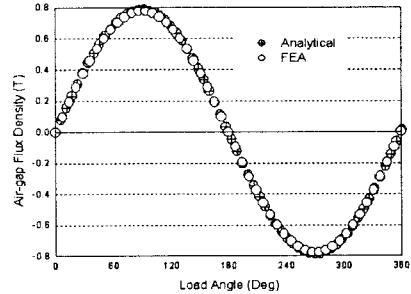
그림 4. 회전자의 구조가 (a) 영구자석과 순철 재질의 축, (b) 영구자석과 공기의 투자율과 같은 재질의 축 그리고 (c) 원형 영구자석으로 구성되어진 경우의 모델 III에 대한 해석 결과와 유한요소해석 결과와의 비교



(a)



(b)



(c)

그림 5. 회전자의 구조가 (a) 영구자석과 순철 재질의 축, (b) 영구자석과 공기의 투자율과 같은 재질의 축 그리고 (c) 원형 영구자석으로 구성되어진 경우의 모델 III에 대한 해석 결과와 유한요소해석 결과와의 비교

#### 4. 결 론

본 논문에서는 고속회전에서 자기적으로나 구조적으로 적합한 구조를 직경방향 자화된 영구자석형 고속회전기의 자계특성 분석을 위해 단순화된 해석모델을 제시하였으며, 자계특성방정식을 수립하여 취득된 각각의 영역에서의 자계분포와 유한요소해석을 이용하여 얻은 자계분포를 비교하여 본 논문에서 제안된 단순화 해석모델의 적합성을 비교 검증하였다. 본 논문의 결과는 최종적으로는 고속회전시 슬롯효과, 와전류 효과, 계자전류에 의한 공극자속밀도의 왜곡으로 인한 회전자 손실을 추측하는데 있어 시발점이 될 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] K.J. Bins, P.J.G Lisboa and M.S.N. Al-Dia, "The use of canned rotor in high speed permanent magnet machines", Proc. EMD, 1991, pp. 21-25
- [2] Akira Iiba, Tadshi Fukao, "Super high speed Electrical Machines and its Application"
- [3] Shigeo Hayashi, Ysuo Fusikawa, "A Feasibility Study of 100kW CGT Turbo Generator and its Application", Proc. IGTC, 1999 Gobe
- [4] Isao Takahashi, Takehisa Koganzewawa, "A Super High Speed PM Motor Drive System by Quasi - Current Source Inverter", IEEE Tran. IAS, Vol. 30. No 3 May/June 1994
- [5] K.Ng, Z.Q. Zhu and D. Howe, "Open-Circuit Field Distribution in a Brushless Motor with Diametrically Magnetized PM Rotor, Accounting for slotting and eddy current effect", IEEE Tran. on Magnetics, Vol. 32, No 5.
- [6] N. Boules, "Impact of slot harmonics on losses of high-speed permanent magnet machines with a magnet retaining ring", Electric Machines and Electromechanics, 6 : 527-539, 1981