

회전자의 영구자석 배열에 따른 초고속 슬롯리스 브리시리스 기기의 특성 비교

장석명*, 정상섭*, 류동완*, 차상도*, 최상규**
 *충남대 전기공학과 **한국기계연구원

Comparison of High-Speed Slotless Brushless Machines with Permanent Magnet Array Rotor

Seok-Myeong Jang*, Sang-Sub Jeong*, Dong-Wan Ryu*, Snag-Do Cha*, Sang-Kyu Choi**
 *Chung-Nam National Univ. **KIMM

Abstract - Proposed slotless PM machine is constructed without stator winding slots. Its stator magnetic material is in the form of a ring and winding have a toroidal configuration and its rotor consists of a 4-pole Halbach array or radially magnetized PM rotor. Thus, airgap flux density distribution and induced emf waveform are essentially sinusoidal. Open circuit magnetic fields and developed torque of each type are presented from the analytical method and finite element method.

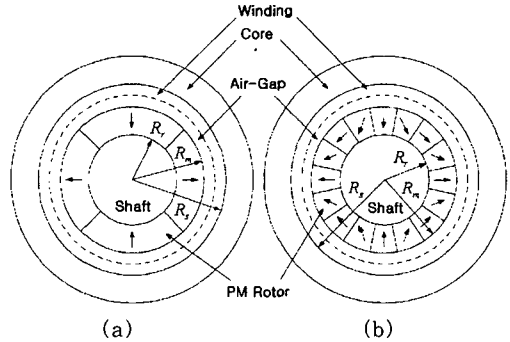


그림 1. 3상, 4극 슬롯리스 모터
 (a) 반경방향 자화를 갖는 영구자석 회전자
 (b) Halbach 배열을 갖는 영구자석 회전자

1. 서 론

슬롯형 영구자석 브리시리스 기기는 초고속 운전시 슬롯 리플에 의해 영구자석과 도전성 슬리브에서의 와전류 손실, 코깅 토크에 의한 소음 및 진동이 크게 문제된다. 또한 영구자석 Halbach 배열형 코어리스 기기는 철심이 없기 때문에 손실 및 코깅 토크 문제가 발생하지 않아 고속 운전에 유리하지만 영구자석의 이용률, 즉 영구자석 중량당 발생자속이 매우 작다[1]. 따라서 본 논문에서는 슬롯형 기기와 Halbach형 기기의 단점을 각각 보완한 새로운 형태의 슬롯리스(slotless) 영구자석 기기를 제안한다. 제안된 모델의 회전자는 4극의 외부자계를 형성하기 위한 영구자석 Halbach 배열을 가지며 링형의 슬롯이 없는 고정자를 갖는다. 한편, 특성비교를 위해 기존의 반경방향으로 자화된 영구자석 회전자를 갖는 슬롯리스 모델을 제시하였다. 두 모델은 Z.Q.Zhu와 D.Howe가 제안한 특성식과 2차원 유한요소해석에 의해 자석 두께에 따른 공극자속밀도와 설계 특성 및 발생 토크를 비교하였다.

2.2 영구자석에 의한 공극자속밀도

슬롯의 영향을 무시하고, 영구자석의 상대 리코일 투자율이 1.0이라고 가정하면 Halbach 기기의 고정자 보어에서의 자속밀도는 식 (1)과 같다[2].

$$B_g(\theta) = B_m \sin(p\theta) \\
 = \frac{2B_r p}{(p+1)} \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{(p+1)} \right] \times K \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{(p+1)} \sin(p\theta) \quad (1)$$

여기서 기호는 그림 1에서 각각 보이며 B_r 은 보자력, p 는 극 쌍수이다. 공심 코어 회전자의 경우 $K=1$ 이며, 철심 코어회전자의 경우 K 는 식 (2)와 같다.

$$K = \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{2p} \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{2p} \right]^{(-1)} \quad (2)$$

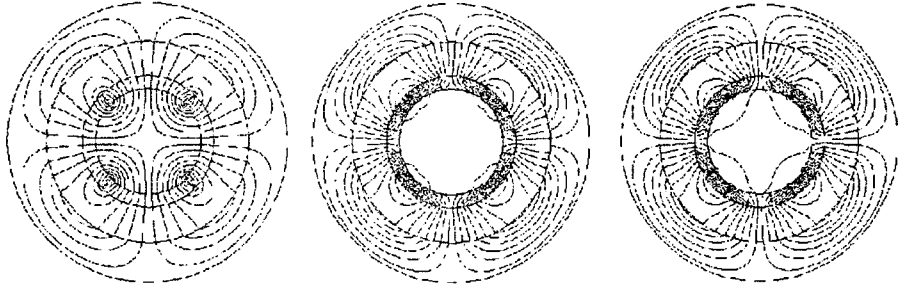
한편, 일반형태의 기기인 경우 $np=1$ 이면, 고정자 보어에서의 자속밀도는 식(3)과 같이 주어지며, $np \neq 1$ 이면, 식(4)와 같이 주어진다. 식 (3)과 식(4)에서 μ_r 은 영구자석의 리코일 투자율, M_r 은 식 (5)와 같다.

그림 3과 그림 4는 고정된 R_m/R_s 비를 갖는 경우에 두 모델의 R_r/R_m 의 비를 변화시키면서 최대 공극자속밀도의 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이 식 (1)과 식 (3), 식 (4)의 해석적 방법과 유한요소 해석 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 Halbach 배열형의 공심 철심형 모두 R_r/R_m 이 감소함에 따라 자속밀도가 증가하고 $R_r/R_m=0.5$ 이하에서는 증가율이 급격히 감소하였다. 그러나 반경방향으로 자화된 회전자의 경우 $R_r/R_m=0.7$ 이하에서 급격히 자속밀도의 증가율이 감소하였다. 그림 5는 두 모델의 비교 그래프로써 R_r/R_m 가 작은 경우, 즉 자석 두께가 두꺼울 수록 Halbach 배열의 자속밀도 특성이 매우 우수함을 알 수 있다.

2. 본 론

2.1 해석 및 비교 모델

슬롯리스 기기의 고정자는 그림 1과 같이 링형의 요크에 환상형 권선을 감거나 요크의 안쪽에 권선을 시행한다. 구조적으로 고정자에 슬롯이 존재하지 않으므로 공극자속밀도 분포는 정현적이다. 따라서 이에 따른 고조파 손실이 거의 없으므로 초고속 구동에 적합한 것으로 알려져 있다. 한편, 영구자석 배열에 따라 회전자는 그림 1(a)의 반경방향으로 착자된 형태와 그림 1(b)의 Halbach 배열에 의한 형태로 구성할 수 있다. 반경방향 착자 모델의 경우 자속경로를 만들어주기 위해 비자성체축의 바깥쪽에 철심을 삽입하거나 축 자체를 자성체로 구성할 수 있다. 그러나, Halbach 배열의 경우에는 자기 차폐 특성에 의해 배열 안쪽에 철심을 삽입하지 않을 수도 있다. 그림 2는 회전자 영구자석 배열에 따른 슬롯리스 기기의 자속 분포를 보여준다.



(a) 반경방향 자화 (b) Halbach 배열(비자성체 축) (c) Halbach 배열(자성체 축)
그림 2 회전자 영구자석 배열에 따른 슬롯리스 기기의 자속 분포

$$B_{\theta}(\theta) = \frac{\mu_0 M_n}{\mu_r} \left\{ \frac{\left(\frac{R_m}{R_s}\right)^2 - \left(\frac{R_r}{R_s}\right)^2 + \left(\frac{R_r}{R_s}\right)^2 \ln\left(\frac{R_m}{R_r}\right)}{\frac{\mu_r+1}{\mu_r} \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_s}\right)^2\right] - \frac{\mu_r-1}{\mu_r} \left[\left(\frac{R_m}{R_s}\right)^2 - \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^2\right]} \right\} \cos \theta \quad (3)$$

$$B_{\theta}(\theta) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} 2 \frac{\mu_0 M_n}{\mu_r} \frac{np}{np^2-1} \left(\frac{R_m}{R_s}\right)^{np+1} \cdot \left\{ \frac{(np-1) + 2\left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{np+1} - (np+1)\left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{2np}}{\frac{\mu_r+1}{\mu_r} \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_s}\right)^{2np}\right] - \frac{\mu_r-1}{\mu_r} \left[\left(\frac{R_m}{R_s}\right)^{2np} - \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{2np}\right]} \right\} \cos np\theta \quad (4)$$

$$M_n = 2(B_r/\mu_0)\alpha_p \frac{\sin \frac{n\pi\alpha_p}{2}}{\frac{n\pi\alpha_p}{2}} \quad (5)$$

여기서 α_p 는 자석 극호와 극피치 사이의 비이다.

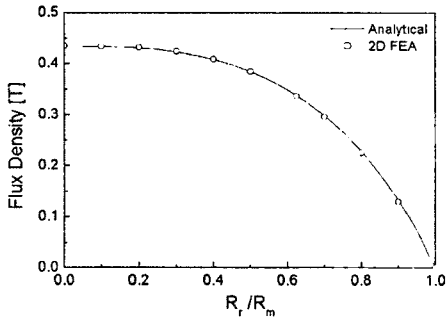


그림 3 Halbach 배열을 갖는 회전자의 경우 R_r/R_m 에 따른 최대 자속밀도의 변화($R_m/R_s=0.653$)

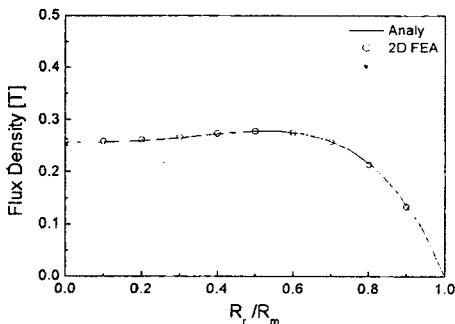


그림 4 반경방향 자화를 갖는 회전자의 경우 R_r/R_m 에 따른 최대 자속밀도의 변화($R_m/R_s=0.653$)

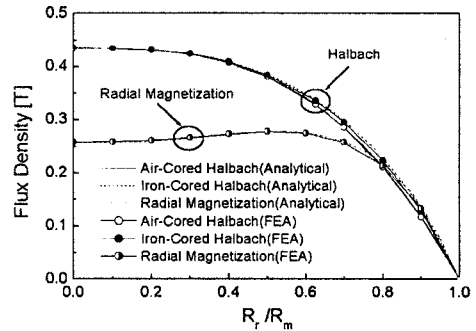


그림 5 R_r/R_m 에 따른 최대 공극자속밀도 비교

2.3 공극자속밀도의 고조파 분석

표 1은 각 모델에 대한 공극자속밀도 분포의 고조파 분석 결과이다. Halbach 배열의 경우 고조파가 존재하지 않는 정현적인 파형을 갖는다. 표 1과 같은 공극자속밀도 파형의 공간고조파 스펙트럼은 R_r/R_m 에 따라 동일하게 나타난다. 그림 6은 $R_r/R_m=0.8$ 인 경우에 회전자 형상에 따른 공극 자속밀도 파형을 보여준다.

표 1. Airgap Flux Density FFT($R_r/R_m=0.8$)

Harmonic Order	1	3	5
Air-Cored Halbach	0.21186	-	-
Iron-Cored Halbach	0.22488	-	-
Radial Magnetization	0.23476	0.02262	0.00299

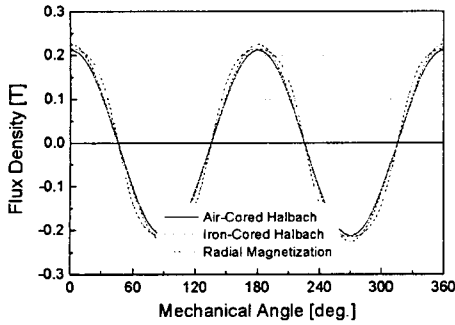


그림 6 공극자속밀도 분포 파형($R_r/R_m=0.8$)

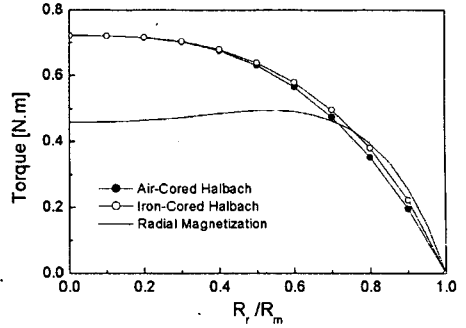


그림 8 R_r/R_m 의 변화에 따른 토크 특성

2.4 자석 채적에 따른 공극자속밀도

그림 7은 R_m/R_r 비와 α_p 를 일정하게 고정시켜 놓은 상태에서 반경방향 자화 회전자의 R_r/R_m 에 대해서 공심과 철심 Halbach 회전자의 R_r/R_m 변화를 보여준다. 이를 통해 동일한 공극자속밀도를 발생시키기 위해 반경방향 자화모델과 Halbach 배열 모델에서 요구되는 영구자석의 부피를 비교할 수 있다. 따라서, 그림 7의 결과에서 보듯이 임의의 R_r/R_m 비 이하에서는 Halbach 배열 회전자를 가진 모터의 경우에 작은 영구자석의 부피가 요구된다.

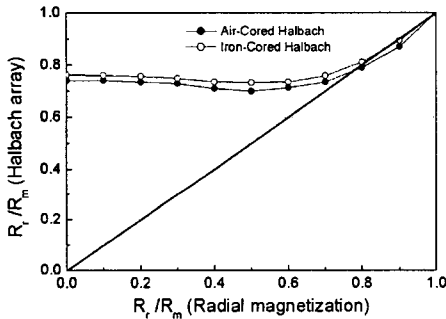


그림 7 반경방향 자화 회전자의 R_r/R_m 변화에 따른 Halbach 회전자의 R_r/R_m 변화

2.5 전자기적 발생 토크

영구자석형 브러시리스 AC 모터의 경우 전자기적 토크는 식 (6)과 같다.

$$T_{em} = 3\sqrt{2} r k_w p N_{ph} B_{gm} L_a I \sin \gamma \quad (6)$$

여기서 k_w 는 권선계수, p 는 극 쌍수, N_{ph} 는 상당 턴수, B_{gm} 공극 자속밀도의 최대치, L_a 는 유효 스택길이, I 는 상전류의 실효값, γ 는 유기전압과 전류와의 위상각이다. Halbach 배열 회전자의 경우 $B_{gm} = B_m$, 반경방향 자화 회전자의 경우 B_{gm} 은 식 (3)과 (4)에서 $n=1$ 인 경우와 같다.

그림 7은 R_r/R_m 의 변화에 따른 토크 특성을 보여주고 있다. Halbach 모터가 고정자에서 자속밀도의 값이 더 크며, 자속밀도의 왜곡이 더 적기 때문에 손실이 더 적게되고 그에 따라서 토크 성능 역시 증가하게 된다.

3. 결 론

Halbach 배열 영구자석 회전자를 갖는 슬롯리스 PMSM과 반경방향 영구자석 회전자를 갖는 슬롯리스 PMSM에 대해 논하였다. Halbach 배열 영구자석 회전자를 갖는 기기의 경우 공극자속밀도가 매우 정현적이었으며, 축의 재질에 따라 공극자속밀도의 변화가 거의 없었다. 또한 일반적인 반경방향 자화 회전자를 갖는 기기의 공극자속밀도에 비해 큰 공극 자속밀도를 갖고 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.M.Jang, S.S.Jeong, D.W.Ryu, S.K.Choi, "Comparison of three types PM brushless machines for an electro-mechanical battery", IEEE Trans. on Magnetics., September 2000(Will be published)
- [2] K. Atallah and D. Howe, "The Application of Halbach Cylinders to Brushless AC Servo Motors", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 34, NO. 4, JULY 1998.
- [3] Z. Q. Zhu, D. Howe, E. Bolte and B. Ackermann, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet dc Motors, Part I: Open-Circuit Field", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 29, NO. 1, JANUARY 1993