

# 반경방향 착자형과 Halbach 배열형 영구자석 회전자를 갖는 고속 슬롯리스 기기의 공극자속밀도 특성 비교

論 文
50B-7-2

## Comparison on the Airgap Flux Density of High-Speed Slotless Machines with Radial Magnetization and Halbach Array PM Rotor

張錫明\* · 鄭相燮\*\* · 柳東完\*\*\*  
(S. M. Jang · S. S. Jeong · D. W. Ryu)

**Abstract** - High speed brushless permanent magnet(PM) machines need a key technology to minimize the iron core losses in stator and the eddy current losses in the retained sleeve and magnets caused by slotting harmonics. Thus, slotless or iron-coreless brushless PM machines have been applied for a very high rotational speed and/or the ripple-free torque. Unfortunately, slotless or coreless PM machines have lower open-circuit field than slotted and/or iron-cored types, which cause to reduce power density. Fortunately, Halbach array can generate the strong magnetic field systems without additional magnetic materials. In this paper, the 4-pole Halbach array is applied to the high speed machine and is compared with the radial magnetized PM array in field system. The iron-/air-cored stator of PM machine is constructed with/without winding slots. Open circuit magnetic fields of each type are presented from the analytical method and finite element method. Consequently, it is confirmed that the Halbach array field system with slotless stator is more suitable to the high speed motor because it has high flux density, sinusoidal flux distribution than others.

**Key Words** : high speed, slotless, brushless, Halbach array, radial magnetization

### 1. 서 론

최근 고속을 필요로 하는 부하와 시스템의 소형·경량화의 요구가 증가함에 따라서 고속 구동 시스템에 대한 요구와 관심이 높아져가고 있다. 즉, 고속을 필요로 하는 부하로는 우라늄 농축, 바이오 테크놀로지 분야의 미립자 분리와 정제를 위한 원심 분리기, 섬유 기계 등이 있으며, 최근에는 가공정도와 생산성 향상을 위한 공작 기계의 주축 구동에 초고속 모터가 요구되고 있다[1]. 한편, 소형·경량화의 요구로 고속화가 필요한 경우는 항공기, 선박 자동차 등의 발전 시스템, 플라이휠에 의한 에너지 저장 시스템, 천연 가스 파이프 라인 수송이나 액화 플랜트에서의 대형 고압 콤프레서 및 펌프 등이 있다[2-4].

그러나 고속회전에 따른 회전자의 기계적인 스트레스나 고주파 입력전원에 의한 철손 증가, 제어 기술, 베어링, 방열과 냉각 등 전기적, 기계적, 물성적으로 광범위한 문제점들이 야기된다. 더욱이 수만 rpm급 초고속 전기기기에서 회전자는 구조가 단순하고 튼튼해야 하므로 유도형보다는 릴럭턴스형, 스위치드 릴럭턴스형 등의 동기거나 직류기가 더욱 적합한 것으로 평가되고 있다[3,5,6].

최근에는 에너지 밀도가 높은 영구자석을 이용하여 더욱 콤팩트하고 고밀도화된 초고속 영구자석형 브러시리스 기기의 응용개발이 빠른 속도로 확산되고 있다. 그러나 영구자석형 기기도 자속 누설을 방지하기 위하여 별도의 자성체로 폐자로를 이루어야 하고, 이에 따라 초고주파 전원에 의한 자성체내의 철손이 크게 발생하므로 특별한 대책이 필요하다[7]. 특히, 슬롯형 영구자석 기기의 경우, 고정자의 철손뿐만 아니라 슬롯-치구조로 인한 코깅 토크와 슬롯 리플에 의한 영구자석과 도전성 슬리브에 와전류손이 크게 발생한다[7]. 따라서 전자기적 측면에서 가장 이상적인 고속용 영구자석 브러시리스 기기는 자속의 공간 고조파가 존재하지 않고 철심이 없으면서도 강한 정현파 자계를 발생시키는 계자 시스템을 갖는 것이다. 이를 위해서는 브러시와 슬롯, 그리고 철심이 없는 이른바 3-LESS (Brushless, Slotless, Coreless) 계자 시스템이 요구된다[5,6].

따라서 저자들은 전기-기계식 배터리(EMB)용 초고속 전동발전기에 코어리스(Coreless) 형태인 2극 외전형 Halbach 배열형과 슬롯이 없고 직경방향 착자형 회전을 갖는 Ring-Wound형 전동발전기를 설계·응용한 예도 있다[5,8-10]. 전자는 철손 및 코깅 토크, 와전류손이 존재하지 않으므로 효율은 매우 높으나 내전형 2극 배열은 구성할 수 없으며 배열 안쪽에 축의 크기과 권선 시행을 위한 공간 선택에 제약받을 수 있다. 또한 영구자석 체적당 자속량, 즉 영구자석 이용률이 낮다. 한편, 후자는 코깅 토크와 와전류손은 거의 없고 권선 작업이나 고정자 철심 제작이 비교적 쉽다[11]. 그러나 권선 공간에 의한 자기적 공극이 일반 슬롯

\* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博  
\*\* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士課程 修了  
\*\*\* 正 會 員 : (株)EMBEST 研究員  
接受日字 : 2000年 8月 4日  
最終完了 : 2001年 5月 30日

형에 비해 매우 크므로 공극자속밀도가 감소한다.

본 논문에서는 이러한 점들을 감안하여 초고속 구동에 적합한 4극, 40,000 rpm급의 영구자석 Halbach 배열 회전자를 갖는 슬롯리스 브러시리스 기기를 제안하고 이를 일반적인 반경방향 착자형 영구자석 회전자를 갖는 기기와 자계 특성을 비교·해석하고자 한다. 그리고 비교 자료를 토대로 전기 기계식 배터리용 초고속 슬롯리스 영구자석 기기를 설계하여 체적당 특성과 손실을 비교하였다.

내전형 Halbach 배열과 반경방향 착자형 회전자를 갖는 슬롯리스 브러시리스 기기는 K. Atallah와 D. Howe가 제안하고 해석·비교한 예는 있으나 슬롯리스형 기기의 초고속 응용을 고려한 예가 없다[12]. 본 연구에서는 아래와 같은 이유로 일반적인 고속 2극기 대신에 4극기로 특성 해석 모델을 선택하였다.

- 원통형 영구자석 Halbach 배열은 2극 내전형 기기는 구성할 수 없으나 4극은 구성이 가능하다[13].
- 일반적으로 전기기기의 극수가 증가할수록 출력 밀도가 증가한다. 또한 고정자의 끝단 권선이 짧아지므로 동손이 작아지고 기기의 길이가 줄어든다[7].
- 초고속주 전원에서 철손이 적은 성층 철심이 기기에 응용되고 있으며, 특히 슬롯리스형 기기는 링형 철심으로 구조가 간단하므로 아몰퍼스 철심으로 성형 가공하기가 쉽다. 아몰퍼스 철심의 경우는 실리콘 철심보다 3배 이상의 저항성을 가지므로 철손이 매우 적게 발생한다[11].
- 현재 150,000 rpm급 2극 영구자석 기기의 개발 등 스위칭 기술의 발달에 힘입어 인버터의 출력 주파수는 크게 증가시킬 수 있다[2].

## 2. 반경방향 착자형과 Halbach 배열형 영구자석 슬롯리스 기기의 자속밀도 특성식

### 2.1 반경방향 착자형과 Halbach 배열형 영구자석 슬롯리스 모델

슬롯리스 기기의 고정자는 그림 1과 같이 슬롯이 없는 링형의 철심 요크에 환상형 권선을 감거나 요크의 안쪽 표면에 권선을 시행한다. 따라서 슬롯 리플에 의한 공극자속밀도의 공간고조파 성분이 적어 이에 따른 회전자 와전류손이 거의 없다. 그리고 슬롯-치 구조로 인한 코깅 토크가 없으므로 고속에서의 소음·진동의 문제가 없다. 더욱이 슬롯리스형 기기는 링형 철심으로 구조가 간단하므로 권선 작업이나 고정자 철심 제작이 비교적 쉽다. 그러나 권선 공간에 의한 자기적 공극이 일반 슬롯형에 비해 매우 크므로 공극자속밀도가 감소한다.

한편, 슬롯리스 기기의 회전자는 영구자석 배열에 따라 그림 1(a)의 반경방향으로 착자된 형태와 그림 1(b)의 Halbach 배열에 의한 형태로 구성할 수 있다. 반경방향 착자 모델은 자속경로를 만들어주기 위해 비자성체 회전축의 바깥쪽에 철심을 삽입하거나 축 자체를 자성체로 구성해야 한다. 그러나 Halbach 배열의 경우에는 자기 차폐 특성에 의해 배열 안쪽에 철심을 삽입하지 않을 수도 있기 때문에 회전축의 재질을 선정하는데 있어 매우 유리하다.

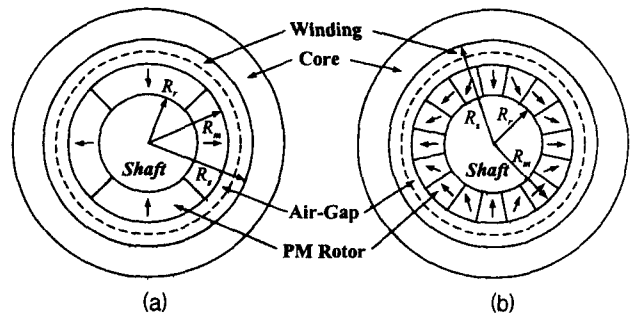


그림 1 3상 4극 슬롯리스 Ring-wound형 영구자석 브러시리스 기기

- (a) 반경방향 자화 회전자
- (b) 중심 또는 철심축을 갖는 Halbach 배열 회전자

Fig. 1 3-phase, 4-pole, slotless ring-wound PM brushless machines

- (a) Radial magnetization rotor
- (b) Halbach array rotor with air- or iron-cored shaft

## 2.2 공극자속밀도 특성식

### 2.2.1 반경방향 착자 영구자석형 회전자 모델

그림 1(a)와 같이 반경방향 착자 영구자석형 회전자 모델의 경우, 고정자 내측 표면에서의 자속밀도는  $np=1$  이면 식(1a)과 같이 주어지며,  $np \neq 1$  이면 식(1b)와 같이 주어진다[12]. 여기서  $n$ 은 공간고조파 차수,  $p$ 는 극쌍수,  $\mu_r$ 은 영구자석의 리코일 투자율,  $M_n$ 은 식(2)와 같이 주어진다.

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

여기서  $\alpha_p$ 는 자석의 극 호와 극 피치 사이의 비이다.

### 2.2.2 Halbach 배열 영구자석형 회전자 모델

그림 1(b)의 Halbach 배열 영구자석형 회전자 모델의 경우, 슬롯의 영향을 고려하지 않고 영구자석의 상대 리코일 투자율이 1.0이라고 가정하면 고정자 내측 표면에서의 자속밀도는 식(3)과 같이 주어진다[12].

$$B_s(\theta) = \frac{2B_r p}{(p+1)} \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{(p+1)} \right] \times K \left( \frac{R_m}{R_s} \right)^{(p+1)} \sin(p\theta) \quad (3)$$

여기서  $B_r$ 은 잔류 자속밀도,  $R_s$ 는 고정자 철심의 내반경,  $R_r$ 과  $R_m$ 은 각각 영구자석의 내반경과 외반경이다. 중심 코어회전자의 경우  $K=1$ 이며, 철심 코어회전자의 경우  $K$ 는 식(4)와 같다.

$$K = \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{2p} \left( \frac{R_m}{R_s} \right)^{2p} \right]^{(-1)} \quad (4)$$

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

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

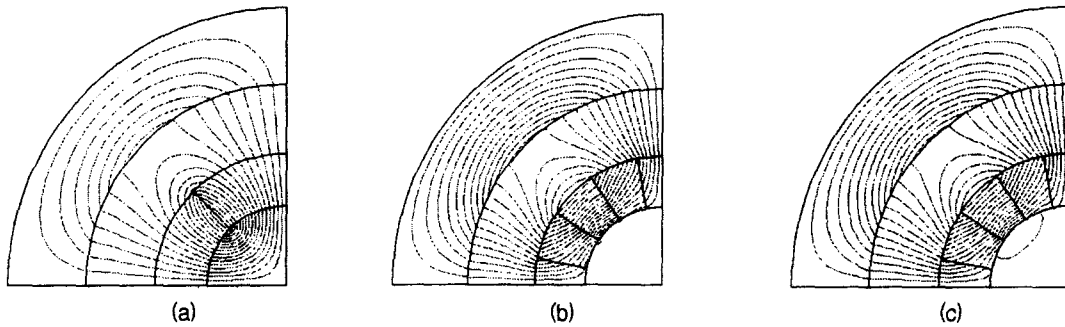


그림 2 영구자석에 의한 자속 분포( $R_r/R_m=0.5$ ,  $R_m/R_s=0.653$ )  
 (a) 반경방향 착자형; (b) 공심축을 갖는 Halbach 배열형; (c) 철심축을 갖는 Halbach 배열형

Fig. 2 Open circuit magnetic flux distributions

(a) Radial magnetization; (b) Halbach array with air-cored shaft; (c) Halbach array with iron-cored shaft

### 2.2.3 영구자석의 체적과 두께 및 자기적 공극

계자 시스템에서 사용되는 영구자석 체적은 식(5)와 같이 정의된다.

$$V_{PM} = \pi R_m^2 l_m \left[ 1 - \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^2 \right] \quad (5)$$

여기서  $l_m$ 은 영구자석 길이이다. 또한 영구자석 회전자의 반경이 정해질 경우에 자석 두께는 축 반경에 따라 결정되므로 식(1)과 식(3), 식(5)에서 자석 반경에 대한 회전축 반경의 비, 즉  $R_r/R_m$ 이 증가한다는 것은 영구자석의 상대적 두께가 감소함을 의미한다. 그리고 고정자 철심의 내반경이 정해질 경우에 자기적 공극 길이는 영구자석 외반경에 의해 결정된다. 즉, 식(1)과 식(3)에서  $R_m/R_s$ 이 증가하면 상대적인 자기적 공극이 감소함을 의미하므로 식(1)과 식(3)~식(5)는  $R_r/R_m$ ,  $R_m/R_s$ 의 함수임을 알 수 있다.

## 3. 자속밀도 특성 해석

### 3.1 자속 분포 특성

그림 2는  $R_r/R_m=0.5$ ,  $R_m/R_s=0.653$ 이고 동일한 체적일 때, 그림 1의 반경방향 착자형과 Halbach 배열형 영구자석 회전자를 갖는 슬롯리스 모델의 자속 분포이다. 반경방향 착자

형 모델의 경우 자속경로를 만들어주고 자기저항을 최소화하기 위해 자성체 축(이하 철심축이라 함)으로 구성하였다. 반면, Halbach 배열의 경우에는 자기차폐 특성에 의해 비자성체 축(이하 공심축이라 함)을 사용하여도 자속경로가 크게 변하지 않는다.

그림 3은 그림 2의 세 모델의 유한요소해석(FEM) 결과로 Halbach 배열형 모델이 반경방향 착자형에 비해 반경방향 공극자속밀도가 0.1T 정도 크며 철심 또는 공심축을 사용하여도 그 크기는 거의 동일하였다. 또한 표 1은 두 모델에 대한 공극자속밀도 분포의 고조파 분석 결과로 Halbach 배열형 모델은 기본과 외의 공간고조파가 거의 존재하지 않고, 이러한 공간고조파 스펙트럼은 식 (1)에 의한 계산 결과와 거의 동일하였으며 자석의 두께가 변함에 따라라도 동일하게 나타났다.

### 3.2 회전자와 영구자석 반경에 따른 공극자속밀도 특성

#### 3.2.1 영구자석 반경에 대한 회전자 반경의 비율

그림 4는 식 (1)과 식 (3)에서  $R_m/R_s=0.653$ 일 경우에  $R_r/R_m$ , 즉 상대적인 자석 두께에 따른 최대 공극자속밀도의 변화를 보여준다. 그림에서 해석적인 방법으로 유도된 자속밀도의 식 (1)과 식(3)의 결과와 2차원 유한요소 해석 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 Halbach 배열형 모델

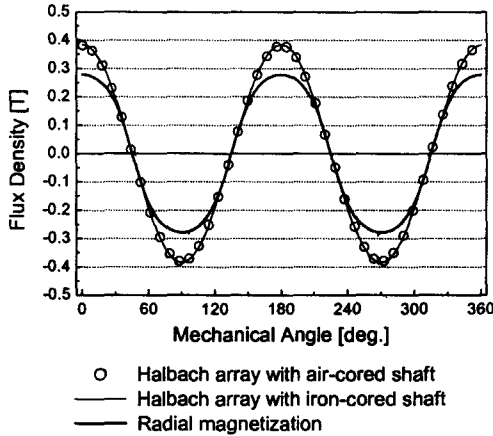


그림 3 유한요소법에 의한 공극자속밀도 분포 ( $R_r/R_m=0.5, R_m/R_s=0.653$ )

Fig. 3 Airgap flux density distribution(FEM results)

표 1 공극자속밀도 분포의 고조파 분석 ( $R_r/R_m=0.5, R_m/R_s=0.653$ )

Table 1 FFT analysis of airgap flux density distribution

	고조파 차수		
	1	3	5
공심축을 갖는 Halbach 배열	0.381	-	-
철심축을 갖는 Halbach 배열	0.384	-	-
반경방향 착자형 모델*	0.299 (0.295)	0.023 (0.020)	0.003 (0.003)

\* ( )안의 수치는 식(1)의 공간고조파 해석법에 의한 계산 결과이다.

은  $R_r/R_m$ 가 감소함에 따라 자속밀도가 크게 증가하다가  $R_r/R_m=0.5$ 이하에서는 증가율이 감소하였다. 그러나 반경방향 착자형 모델은  $R_r/R_m=0.7$  이하에서 영구자석이 두꺼워오도 불구하고 자속밀도가 감소하였다.

결과적으로  $R_r/R_m=0.8$  이상, 즉 영구자석 두께가 얇을 때에는 반경방향 착자형 모델이 공극자속밀도가 약간 높지만, 자석의 두께가 증가할 수록 Halbach 배열형이 월등히 크다. 따라서 슬롯리스 응용에서는 Halbach 배열형 모델이 공극자속밀도 특성뿐만 아니라 영구자석의 이용률 관점에서도 훨씬 우수한 특성을 갖는다.

### 3.2.2 동일 자속을 얻기 위한 두 모델의 영구자석 체적 비교

식 (5)에서 회전자 외반경  $R_m$ 과 길이  $l_m$ 이 정해져 있다면 두 모델의 영구자석의 체적은  $1-(R_r/R_m)^2$ 에 비례한다. 따라서 그림 5는 영구자석 체적에 따른 공극자속밀도 변화를 보여준다. Halbach 배열형은 자석 체적의 증가에 따라 거의 선형적으로 공극자속밀도가 증가하지만, 반경방향 착자형 모델은 어느 정도 증가하면 더 이상 공극자속밀도는 커지지 않고 감소하는 경향을 갖는다.

그림 6은  $R_m/R_s=0.653$ 에서 반경방향 착자형 모델의  $R_r/R_m$ 에 따른 Halbach 배열형 모델의  $R_r/R_m$ 의 변화를 보여준다. 이를 통해 동일한 공극자속밀도를 발생시키기 위해 반경방향 착자형과 Halbach 배열형 모델에서 요구되는 영구자석의 체적을 비교할 수 있다. 즉,  $R_r/R_m=0.8$  이하에서는 Halbach 배열형 모델이 반경방향 착자형 모델보다 영구자석의 체적이 적게 요구된다.

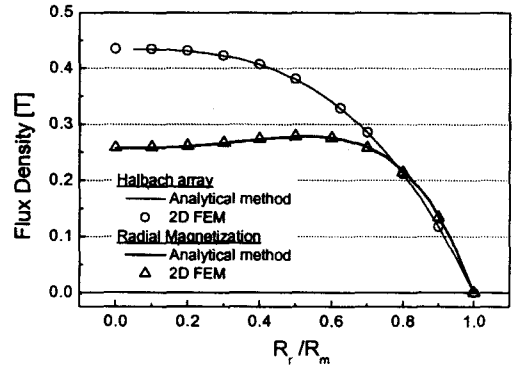


그림 4  $R_r/R_m$ 에 따른 공극자속밀도 비교( $R_m/R_s=0.653$ )

Fig. 4 Comparison of airgap flux density with  $R_r/R_m$

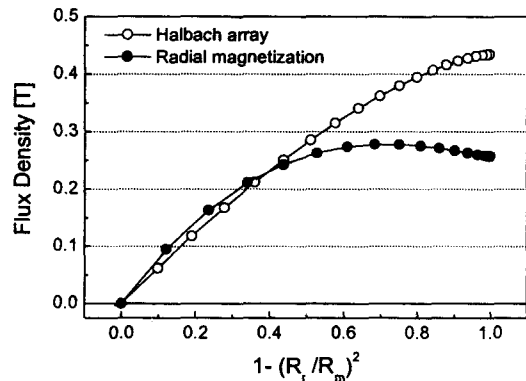


그림 5  $1-(R_r/R_m)^2$ 에 따른 공극자속밀도 비교

Fig. 5 Comparison of airgap flux density with  $1-(R_r/R_m)^2$

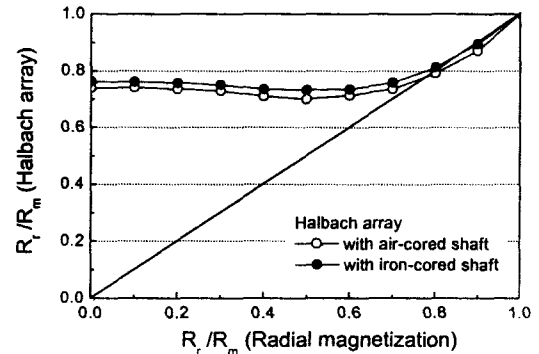


그림 6 반경방향 모델의  $R_r/R_m$  변화에 따른 Halbach 배열 모델의  $R_r/R_m$  변화

Fig. 6 Variation of  $R_r/R_m$  for Halbach rotor with  $R_r/R_m$  of radial magnetization rotor

### 3.3 영구자석 반경과 고정자 내반경에 따른 공극자속밀도 특성

#### 3.3.1 고정자 내반경에 대한 영구자석 반경 비율

그림 7은 식 (1)과 식 (3)에서  $R_r/R_m=0.6$ 일 때  $R_m/R_s$ 에 따른 공극자속밀도 변화를 보여준다.  $R_m/R_s$ 가 증가할 수록, 즉 상대적인 자기적 공극이 작을수록 Halbach 배열형과 반경방향 착자형의 발생 자속밀도의 차이가 0.5T까지도 증가하며, 이러한 경향은 철심형과 공심형 축을 갖는 Halbach 배열에서도 나타난다. 결과적으로 Halbach 배열형 회전자를 슬롯형 기기와 같이 자기적 공극이 작은 기기에 응용할 경우에 보다 큰 공극자속밀도를 얻을 수 있으며, 축의 재질의 선정에 유의해야 한다.

#### 3.3.2 상대적인 자기적 공극이 작은 경우의 공극자속밀도 특성

3.3.1절에서 전술하였듯이 슬롯형 기기는 상대적인 자기적 공극이 작으므로  $R_m/R_s$ 가 1에 가까워진다. 그림 8은 식 (1)과 식 (3)에서  $R_m/R_s=0.82$ 인 경우에  $R_r/R_m$ 에 따른 최대 공극자속밀도의 변화로 그림 4와 유사한 특성 곡선을 갖으나 철심축을 갖는 Halbach 배열형 모델이 비교적 우수한 자기 특성을 보인다. 그림 9는 영구자석 체적에 따른 공극자속밀도 변화로 공심축과 철심축을 갖는 Halbach 배열의 경우에 두 모델의 자속밀도 차이가 크고 공심축 모델이 좀 더 선형적인 특성을 갖는다. 그림 10은 동일 공극자속밀도를 발생시키기 위한 반경방향 착자형 모델의  $R_r/R_m$ 에 따른 Halbach 배열형 모델의  $R_r/R_m$ 의 변화로 그림 6과 유사한 특성을 갖지만 축 재질에 따라 자속밀도의 차이가 좀 더 크다. 결과적으로 상대적인 자기적 공극이 작은 경우에도 Halbach 배열형 모델이 반경방향 착자형 모델보다 우수한 영구자석 이용률을 보이며, 특히 철심축을 사용할 경우 좀 더 증가된 공극자속밀도 특성을 얻을 수 있다.

### 3.4 공심형 고정자를 갖는 Halbach 배열의 자계 특성

#### 3.4.1 자속 분포

영구자석 Halbach 배열은 일반적으로 철심이 없이도 강한 자계를 발생할 수 있다[4,8,13]. 그림 11은 공심 고정자의 경우에 영구자석 배열에 따른 자속분포이다. Halbach 배열형 모델이 반경방향 자화형 모델보다 더 넓은 영역까지 자계 영향이 미침을 알 수 있다. 따라서 공심 고정자를 갖

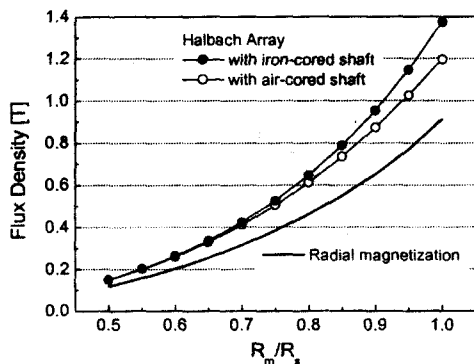


그림 7  $R_m/R_s$ 에 따른 공극자속밀도 특성 비교( $R_r/R_m=0.6$ )  
Fig. 7 Comparison of airgap flux density with  $R_m/R_s$

는 Halbach 배열형 모델은 외부로의 자속 영향이 크므로 자속을 집중시킬 수 있는 철심이 필요하다. 반면 그림 12의 내부 자계형 Halbach 배열을 이용하여 4극을 구성할 경우 별도의 자속 집중체가 없어도 자기 차폐 능력이 우수하고, 권선이 시행되는 유효공극 반경에서의 공극자속밀도 특성도 우수하다. 따라서 영구자석 Halbach 배열을 초고속 기기에 응용할 경우 내전형 회전자를 갖는 모델은 철심 고정자를, 외전형 모델은 공심 고정자를 사용해야 한다.

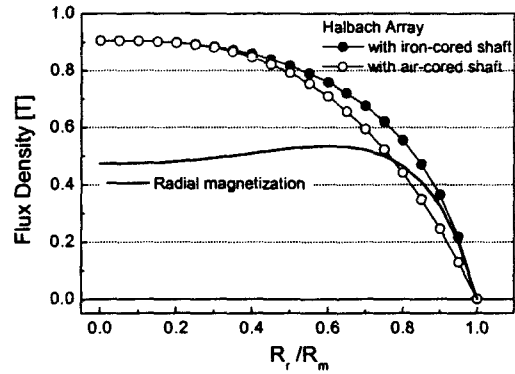


그림 8  $R_r/R_m$ 에 따른 공극자속밀도 비교( $R_m/R_s=0.82$ )  
Fig. 8 Comparison of airgap flux density with  $R_r/R_m$

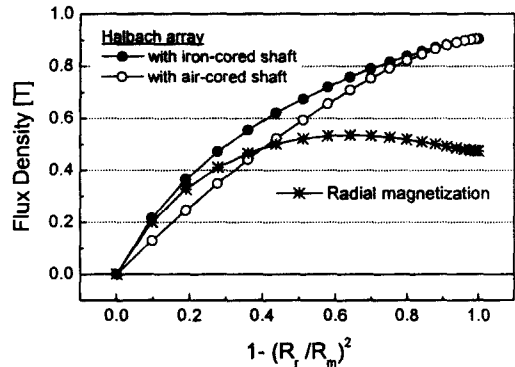


그림 9  $1-(R_r/R_m)^2$ 에 따른 공극자속밀도 비교( $R_m/R_s=0.82$ )  
Fig. 9 Comparison of airgap flux density with  $1-(R_r/R_m)^2$

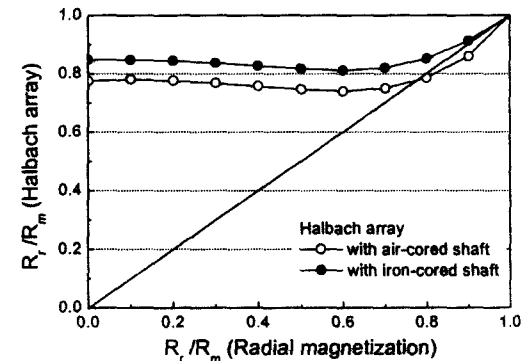


그림 10 반경방향 모델의  $R_r/R_m$  변화에 따른 Halbach 배열 모델의  $R_r/R_m$  변화( $R_m/R_s=0.82$ )  
Fig. 10 Variation of  $R_r/R_m$  for Halbach rotor with  $R_r/R_m$  of radial magnetization rotor

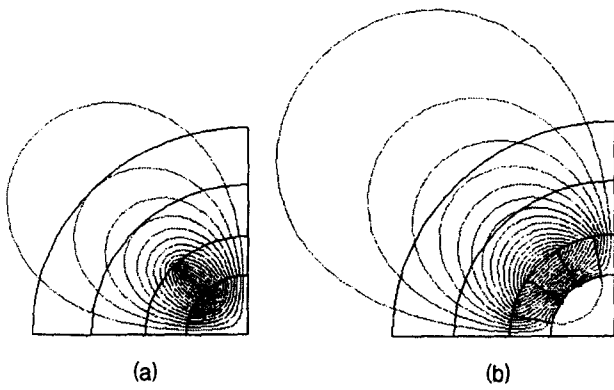


그림 11 공심형 고정자를 갖는 모델의 자속 분포 특성 ( $R_r/R_m=0.5$ )

- (a) 반경방향 자화를 갖는 회전자
- (b) 내전형 Halbach 배열을 갖는 회전자

Fig. 11 Flux distribution of model with air-cored stator

- (a) Radial magnetization rotor
- (b) Internal Halbach array rotor

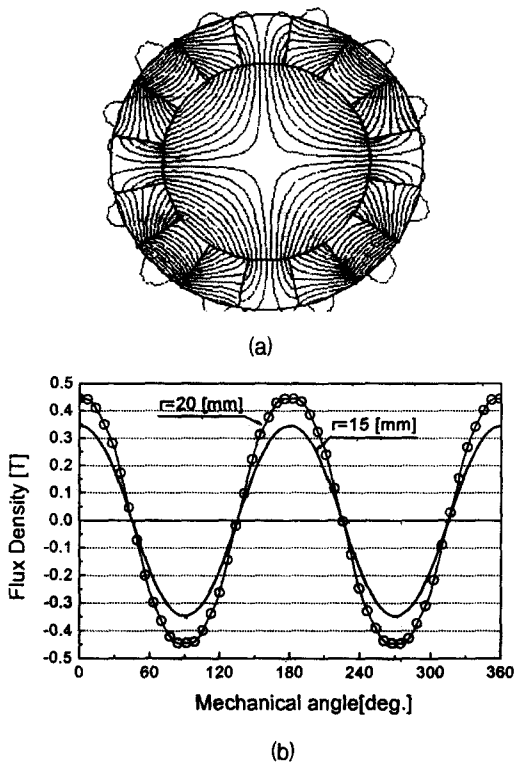


그림 12 공심형 고정자를 갖는 외전형 Halbach 배열의 자기 특성

- (a) 자속 분포; (b) 공극자속밀도 분포

Fig. 12 Magnetic field of external Halbach array with air-cored stator

- (a) Flux distribution; (b) Distribution of airgap flux density

### 3.4.2 공심 또는 철심 고정자의 비교 특성

그림 13은 철심 및 공심형 고정자를 갖는 경우의  $R_r/R_m$ 에 따른 공극자속밀도 변화를 보여준다. 반경방향 착자형 모델에서는 철심형과 공심형은 최대 0.1[T] 정도의 공극자속밀도 차이를 보이며, Halbach 배열형 모델은 최대 0.2[T] 정도로 좀 더 큰 공극자속밀도 차이를 보인다. 그림 14는 영구자석 체적에 따른 공극자속밀도 특성 곡선으로 철심 및 공심형 고정자를 갖는 경우를 비교하였다. 고정자 재질에 따라서 자속밀도 크기에는 차이가 있지만 변화율에는 차이가 없었다. 그림 15는 그림 6과 그림 9와 같은 공극자속밀도 특성 곡선으로 공심형 고정자 모델에서도 철심형 고정자 모델과 같이  $R_r/R_m=0.8$  이하에서는 Halbach 배열형 모델이 반경방향 착자형보다 영구자석의 체적이 적게 요구된다.

## 4. 비교·검토 및 설계 예

### 4.1 비교·검토

슬롯리스 브러시리스 기기에 적합한 회전자를 선정하기 위해 일반적인 반경방향 착자형과 Halbach 배열형 회전자를 갖는 기기의 자기 특성을 비교·해석함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

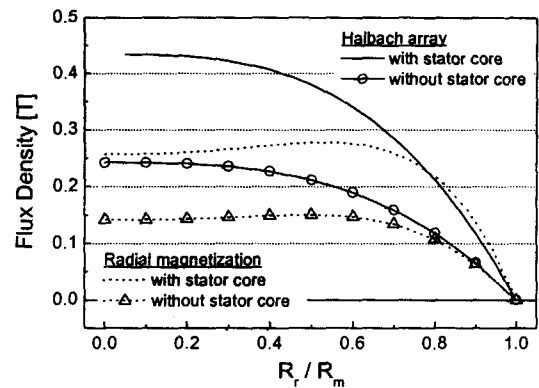


그림 13 철심/공심 고정자에 따른 공극자속밀도 비교

Fig. 13 Comparison of airgap flux density with/without iron-cored stator

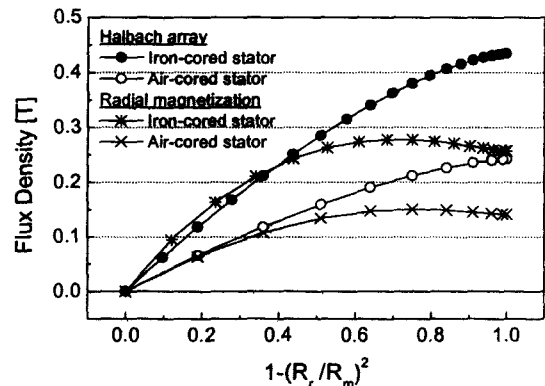


그림 14  $1-(R_r/R_m)^2$ 에 따른 공극자속밀도 비교

Fig. 14 Comparison of airgap flux density with  $1-(R_r/R_m)^2$

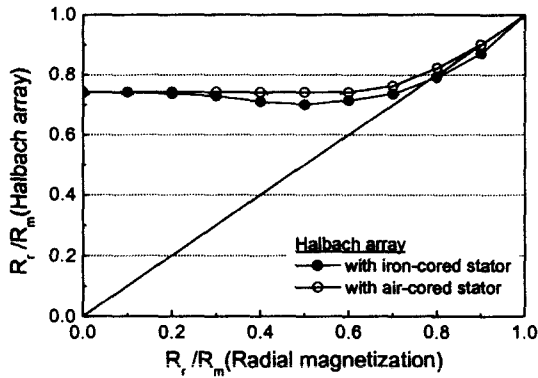


그림 15 반경방향 모델의  $R_r/R_m$  변화에 따른 Halbach 배열 모델의  $R_r/R_m$  변화

Fig. 15 Variation of  $R_r/R_m$  for Halbach rotor with  $R_r/R_m$  of radial magnetization rotor

- 그림 2에서 보듯이 일반적인 반경방향 착자 모델은 자속 경로를 위해 비자성체 회전축의 바깥쪽에 철심을 삽입하거나 축 자체를 자성체로 구성하지만, Halbach 배열의 경우에는 자기 차폐 특성에 의해 배열 안쪽에 철심을 삽입하지 않을 수도 있기 때문에 회전축의 재질을 선정하는데 있어 매우 유리하다. 다만, 그림 7에서 그림 10을 통해 알 수 있듯이 Halbach 배열형 회전자를 슬롯형 기기와 같이 자기적 공극이 작은 기기에 응용할 경우에는 보다 큰 공극자속밀도를 얻을 수 있으며, 축의 재질의 선정에 유의해야 한다.
- 표 1에서 Halbach 배열형 모델이 반경방향 착자형 모델에 비해 기본과 외의 공간고조파가 거의 존재하지 않는다. 또한 그림 4에서 그림 6을 통해 알 수 있듯이 자석의 두께가 증가할 수록 Halbach 배열형이 반경방향 착자형 모델에 비해 공극자속밀도가 크므로 실제 응용 영역에서 영구자석 체적당 발생 자속이 크다. 특히 이러한 특성은 슬롯형 기기와 같이 상대적인 자기적 공극이

작은 경우에 Halbach 배열형 모델이 더욱 우수한 영구자석 이용률을 보인다.

- 그림 13에서 그림 15을 통해 알 수 있듯이 공심 고정자를 갖는 모델에서도 내전형 4극 Halbach 배열형이 반경방향 착자형보다 영구자석 이용률이 크다. 그러나 내전형 4극 Halbach 배열형은 경우 그림 11에서처럼 외부로의 자속 영향이 크므로 자속의 차폐가 요구되는 시스템 응용시에는 철심형 고정자를 사용해야 한다. 반면 그림 12의 외전형 Halbach 배열은 별도의 자속 집중체가 없어도 자기 차폐 능력이 우수하므로 공심 또는 철심 고정자를 사용할 수 있다.

#### 4.2 설계 사례

4.1절의 비교 검토 자료를 토대로 전기 기계식 배터리, 즉 플라이휠 에너지 저장장치용 초고속 슬롯리스 영구자석 기기를 일반 특성식을 통해 설계하였다[5,9,14]. 전동모드시에는 플라이휠이 180초 동안에 40000 rpm까지 가속되어야 하며 발전 출력은 1kW이다. 표 2는 동일 요구 사양에 대한 두 모델의 설계 결과를 비교한 것으로 Halbach 배열형 모델이 반경방향 착자형 모델에 비해 기기의 체적을 13%까지 감소시킬 수 있었다. 또한 일반적인 슬롯리스기에서 비교적 큰 전기장하를 감소시킴으로써 동손을 줄여 손실을 16%로 줄일 수 있었다. 이 때 철손은 정현파 자속에 의한 일반적인 철손식에 의해 계산되었다[6].

#### 5. 결론

코어리스(Coreless)와 슬롯리스(Slotless) 영구자석 기기는 손실 등이 적어 효율이 높고, 초고속 기기에서 심각한 문제가 되는 회전자의 와전류손에 의한 열적 문제를 해결할 수 있다. 그러나 자성체를 사용하지 않고 자기적 공극이 매우 큰 경우에는 공극자속밀도가 감소하여 영구자석 체적당 발생 자속량이 감소한다. 이는 기기의 체적 또는 중량당 출력 밀도를 감소시켜 초고속 구동 시스템의 소형·경량화를 저해하게 된다. 따라서 본 논문에서는 슬롯리스 기기의 공

표 2 전기기계식 배터리용 초고속 슬롯리스 영구자석 기기의 설계 예  
Table 2 Design example of high speed slotless PM machine for electro-mechanical battery

항 목	모 델		
	반경방향 착자형	Halbach 배열형	비 고
발전 출력 [W]		1000	
가속 토크 [Nm]		0.512	
$R_r/R_m$		0.55	
$R_m/R_s$	0.677	0.686	
최대 공극자속밀도 [T]	0.326	0.420	+28.8%
자속/영구자석 체적[Wb/m <sup>3</sup> ]	12.1	15.8	+30.6%
기기의 길이/외경[mm]	69/60	58/61	
상당 턴수	26	24	
발전출력/기기 체적 [W/cm <sup>3</sup> ]	5.13	5.90	+15.0%
철손+동손	31 W	26 W	-16.1%

극자속밀도 특성을 향상시키고자 초고속 구동에 적합한 4극, 40,000rpm 영구자석 Halbach 배열형 회전자를 갖는 슬롯리스 브러시리스 기기를 제안하였다. 또한 이를 일반적인 반경방향 착자형 영구자석 회전자를 갖는 기기와 비교·검토한 결과 Halbach 배열형 모델이 영구자석 체적당 자속밀도가 높으며 회전축 재질 선정에도 자유롭다. 그리고 두 모델을 전기 기계식 배터리용으로 설계한 결과 Halbach 배열형 모델이 기기의 체적과 손실을 크게 감소시킬 수 있었다. 따라서 슬롯리스 철심형 고정자 구조에 Halbach 배열 회전자 사용함으로써 회전자의 와전류손을 없애고 공극자속밀도를 증가시킴으로써 영구자석 기기의 출력 밀도를 높일 수 있으며, 특히 초고속 기기에의 응용에 적합함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] D.E Hesmondhalgh, MSc, PhD, CEng, MIEE, D. Tipping, BA, BSc, Phd, M. Amrani, MSc, "Design and construction of a high-speed high-performance direct-drive handpiece", IEE Proceedings, Vol. 134, No.6 Nov. 1987

[2] Isao Takahashi, Takehisa Koganezawa, Guijia Su, "A super high speed PM motor drive system by a quasi-current source inverter", IEEE Tran. on IAS, Vol. 30, No. 3, May/June 1994

[3] H. Hofmann, S.R.Sanders. "Synchronous reluctance motor/alternator for flywheel energy storage systems", in IEEE workshop on Power Electronics in Transportation, October 24-25, 1996, Dearborn, Mich. pp. 199-206

[4] B.T. Merritt, R.F. Post, G.R. Driefuerst, D.A. Bender, "Halbach Array Motor/Generators-A Novel Generalized Electric Machine," Lawrence Livermore National Laboratory

[5] 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 Transaction on Magnetics, Vol. 36, No. 5, September 2000

[6] 장석명, 정상섭, 류동완, 최상규, "EMB용 전동발전기 선정을 위한 슬롯형과 슬롯리스 Ring-wound형 영구자석 브러시리스 기기의 특성 비교", 대한전기학회 제50B권 제3호, 2001

[7] J.R. Hendershot Jr., TJE Miller, "Design of brushless permanent-magnet motors," Oxford, 1994

[8] 장석명, 서진호, 정상섭, 최상규, "영구자석 Halbach 배열을 이용한 초고속 모터용 계자시스템의 구성과 특성 해석", 대한전기학회 제48B권 제4호 pp152, 1999

[9] 장석명, 서진호, 정상섭, 최상규, 함상용, "전기기계식 배터리 시스템용 초고속 전동발전기의 설계, 제작 및 모드별 특성", 대한전기학회 제48B권 제8호 pp400-407, 1999

[10] 장석명, 류동완, 양현섭, 정상섭, 최상규, 함상용, "플라이 휠 에너지 저장 시스템용 Ring-Wound형

초고속 전동발전기의 설계 및 특성", 대한전기학회 학회학술대회, EMO-15, A권 pp.46-48, 1999.7.19-21

[11] Lawrence W. Langley, Robert L. Fisher, "Toroidally wound brushless DC motor," U.S. PATENT, Patent number 4547713, Oct. 15, 1985

[12] K. Atallah, D. Howe, "The application of Halbach Cylinders to Brushless AC Servo Motors," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 4, July 1998

[13] K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear instruments and Methods, 169, 1980(pp.1-10)

[14] Seok-Myeong Jang, Sang-Sub Jeong, Dong-Wan Ryu, Sang-Kyu Choi, "Design and analysis of high speed slotless PM machine with Halbach array", IEEE Transaction of Magnetics, 2001(to be published)

저 자 소 개



**장석명 (張錫明)**  
 1949년 7월 3일 생. 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업(공박). 1989년 미국 Univ. of Kentudy(Post-doc). 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수. 현재 당학회 평의원, 편집이사.  
 Tel : 042-821-5658  
 E-mail : smjang@ee.chungnam.ac.kr



**정상섭 (鄭相燮)**  
 1971년 1월 29일 생. 1996년 충남대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사 졸업. 1998년~현재 충남대 대학원 박사과정 수료.  
 Tel : 042-821-7608  
 E-mail : sangsub@ee.chungnam.ac.kr



**류동완 (柳東完)**  
 1976년 3월 9일 생. 1999년 충남대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 석사 졸업.  
 Tel : 042-535-3993  
 E-mail : emecalab@hanmail.net