

# 초고속 전기기기용 고성능 자기회로 시스템

장석명\*, 서진호\*, 정상섭\*, 이성호\*, 최상규\*\*

\* 충남대학교 전기공학과 \*\* 한국기계연구원

## Efficient Magnetic Field System for High Speed Electric Machines

S.M. Jang\*, J.H. Seo\*, S.S. Jeong\*, S.H. Lee\*, S.K. Choi\*\*

\* Chungnam Nat'l Univ. \*\* Korea Institute of Machinery & Materials

**Abstract** — This paper treated a new method that generates the dipole magnetic field for high speed machines by using Halbach array, which was suggested by Klaus Halbach. The Halbach array can produce the various field distribution without magnetic materials. Therefore, the iron losses can be reduced. This paper presented the magnetic characteristics on both linear and cylindrical Halbach array. And the Halbach array for dipole field was manufactured with Nd-Fe-B magnets having 1.17(T), the measured flux density was compared the theoretical values acquired by three dimensional FEM analysis. Finally, the magnetic characteristics of Halbach array were compared with those of other conventional dipole field systems.

또한 유한요소해석을 위한 영구자석을 포함하는 정자계 시스템의 지배방정식은 맥스웰 방정식으로부터 식(3)과 같이 도출된다.

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) \right] = \mathbf{J}_0 \quad (3)$$

단,  $\mu_0$ : 진공투자율,  $\mathbf{J}_0$ : 외부전류,  $\mathbf{M}$ : 자화벡터,  $\mathbf{A}$ : 자기벡터 포텐셜

본 논문에서 제작하여 응용하고자 하는 원통형 Halbach 배열에 사용되는 영구자석은 Na-Fe-B 계열로서, 잔류자속밀도가 1.17(T), 보자력이 10,800[Oe]이며 그림 1(b)와 같이 원통 내부에 균일한 2극의 자계가 발생된다. 2차원 해석결과인 그림 1(b)는 Halbach 해석모델 형상이 축방향으로 무한한 길이인 것으로 가정하고 유한 요소해석을 수행한 것인데, 실제로는 축방향 길이가 100[mm]로 유한하여 계자원통 끝단 부분에서 누설자속이 발생하게 된다. 따라서 이와 같은 자속의 누설 부분을 고려하기 위해서는 3차원 해석이 요구된다. 원통형 Halbach 배열의 가운데 부분을 기준으로 상하 대칭이고, 자속의 발생특성을 고려하면 그림 2와 같은 3차원 유한요소해석을 위한 요소망과 해석결과인 자속밀도분포를 얻을 수 있다. 그림 2(b)에서 원통내부의 자속밀도가 끝단으로 갈수록 누설로 인하여 자속밀도의 크기가 감소된다.

### 1. 서론

초고속으로 회전하는 전기기기는 입력주파수가 매우 높기 때문에 자속의 누설을 줄이기 위해 사용되는 철심부분에서 히스테리시스손 및 와류손 등의 손실이 크게 발생된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법중의 하나로, 철심을 사용하지 않고 여러 개의 영구자석편만으로 영구자석을 조합하여 자기회로를 구성하는 Halbach 배열이 있다. 이 Halbach 배열은 K. Halbach에 의하여 제안된 것으로, 계자를 철심이 없이 구성하므로 일반적으로 고속 운전시에 크게 발생하는 철손이 전혀 수반되지 않는 특유의 이점이 있기 때문에 전기역학적 전지나 신행 동기전동기 등 많은 분야에서 응용이 되고 있다[1][2][3].

본 논문에서는 초고속모터용 계자시스템을 구성하기 위한 Halbach 배열의 설계와 해석, 그리고 제작에 의한 실측 등을 다루었다. 즉 Nd-Fe-B 영구자석을 이용하여 Halbach 배열에 의한 자기회로를 구성하는 경우의 자기적 특성을 해석하였고, 이를 직접 구성 제작하여 유한요소해석을 이용한 계산 및 계측에 의한 결과를 비교 분석하였다. 또한 Halbach 배열에 의한 계자 시스템의 자기적인 특성을 일반적인 계자시스템과 비교하였다.

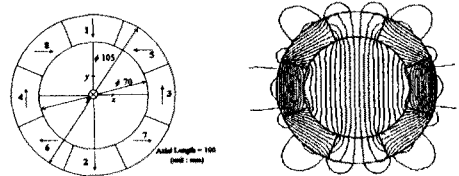


그림 1. 원통형 Halbach 배열의 단면도 및 자속분포

### 2. Halbach 배열의 자기적인 특성

Halbach 배열의 개념은 자화벡터가 영구자석의 배열을 따라 연속적으로 회전하게 되면, 영구자석의 한쪽에 매우 강하고 정현적인 자계가 분포할 수 있다는 것이다. 원통형태의 Halbach 배열인 경우 발생하는 자계중의 자속밀도는 식(1), 식(2)로 표현된다[1].

$$B^*(z_0) = \left( \frac{z_0}{r_1} \right)^{N-1} B_r \frac{N}{N-1} \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{N-1} \right] ; N \geq 2 \quad (1)$$

$$B^*(z_0) = B_r \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) ; N = 1 \quad (2)$$

단,  $r_1$ : 안쪽 원의 반지름,  $r_2$ : 바깥쪽 원의 반지름,  $N$ : 극쌍,  $B_r$ : 잔류자속밀도

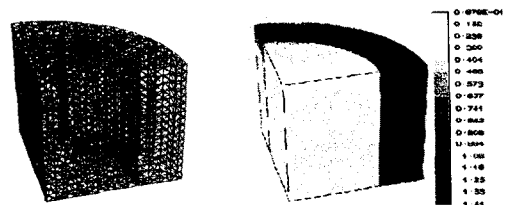


그림 2. 3차원 유한요소해석을 위한 요소망과 자속밀도 분포

### 3. 원통형 Halbach 배열에 의한 계자시스템의 제작 및 자기특성

초고속모터용 계자시스템으로 응용하기 위한 원통형 Halbach 배열의

제작도는 그림 3과 같다. 그림 3에서 화살표는 각 영구자석편의 자화 방향벡터를 표시한 것이며 축을 따라 각 영구자석편마다 90°를 유지하도록 조합되어 있다.

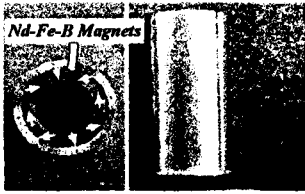
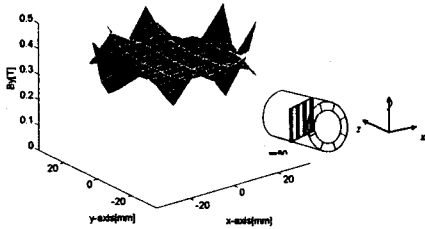
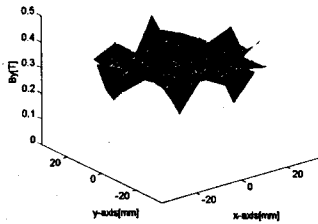


그림 3. 원통형 Halbach 배열의 제작도

그림 3과 같이 제작된 Halbach 배열에 의한 계자 시스템의 자속밀도 값을 그림 2(b)의 3차원 유한요소해석결과와 비교하기 위하여 다음과 같이 측정하였다. 즉 그림 4는 x-y 평면에서의 자속밀도값을 축방향 길이가 50[mm]인 경우에 대해서 도시한 것으로서, 평면 안쪽은 균등한 자계가 형성되고 있음을 알 수 있다.



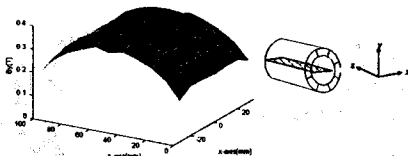
(a) 이론치(3D FEM)



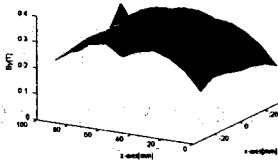
(b) 계측치

그림 4 x-y 평면에서의 자속밀도분포(z=50)

그림 5는 x-z 평면에서의 y방향 자속밀도를 나타낸 것이다. 그림에서 계자 원통의 끝단 부분으로 갈수록 자속밀도의 크기가 떨어지게 되는데 이것은 끝단에서의 자속의 누설 때문이다.



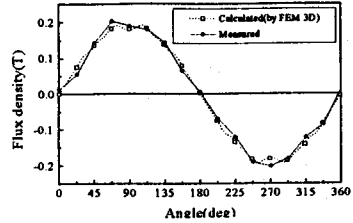
(a) 3차원 유한요소해석에 의한 이론치



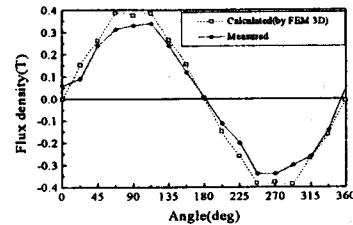
(b) 계측치

그림 5. x-z 평면에서의 자속밀도 분포

그림 6은 원통 좌표계에서 반지름이 25[mm]이며 축방향 길이가 각각 0[mm], 50[mm]인 경우에 대하여 반경방향에 따른 자속밀도값의 이론치와 계측치를 비교한 것이다. 축방향 길이가 0[mm]인 경우에는 이론치와 계측치는 거의 같은 분포를 나타내고 있지만, 축방향 길이가 50[mm]인 경우에는 실제 계측치가 이론치에 비해서 다소 작게 나타났다. 이와 같은 이론치와 계측치는 영구자석의 착자상태, 가공과정에서의 자기적 성능 저하, 계측오차 등을 감안할 때 잘 부합되는 것으로 판단된다.



(a) z = 0mm, r = 25mm



(b) z = 50[mm], r = 25[mm]

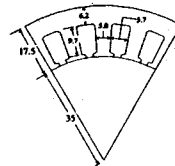
그림 6. 반경방향에 따른 자속밀도값의 이론치와 계측치의 비교

#### 4. 자기회로 시스템의 종류에 따른 2극 자계의 발생특성비교

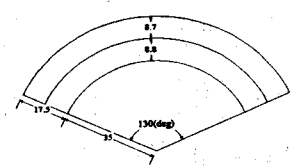
초고속 전기기기에서 우수한 토크 특성을 얻기 위해서는 계자 원통 내부에 발생되는 자계의 세기가 크기가 매우 중요하다. 여기서는 유한요소해석을 이용하여 계자시스템으로서 일반적으로 사용되고 있는 철심-슬롯-코일형과 철심-영구자석형을 Halbach 배열에 의한 계자시스템과의 자기적인 특성을 각각 비교하였다. 세 가지 모두 동일한 체적을 가지며 자성체가 포화가 되지 않는 등의 조건하에서, 가능한 높은 자속밀도값을 발생시키는 자기시스템이 되도록 하여 그 특성을 비교 검토하였다. 자성체의 포화자속밀도 값은 일반적인 전기기기 설계 경험을 바탕으로 약 1.5(T)로 설정하였다. 체적이 동일해야 하는 전제조건에 따라서 각 모델의 직경 및 축방향 길이는 정해지므로, 슬롯 폭, 요크 두께, 영구자석의 자화방향 두께 등의 설계 변수가 된다.

##### 4.1 철심-슬롯-코일로 구성되는 자기시스템 모델

모델의 내경, 외경 및 축방향 길이는 각각 70[mm], 105[mm], 100[mm]로 정해지며 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 슬롯 폭, 치폭, 요크두께 등이 설계변수가 된다. 본 해석모델의 슬롯 수는 24개이며, 2극의 자계가 발생하도록 3상 권선이 시행된 것으로 설정하였다.



(a) 철심-슬롯-코일형



(b) 철심-영구자석형

그림 7. 일반적인 2극 계자시스템의 모델형상(unit : mm)

슬롯에서의 전류밀도값은 일반적으로 특별한 냉각장치가 없는 경우에 4~8 [A/mm<sup>2</sup>]이므로, 슬롯에서의 점적율을 고려하지 않는 경우 약 5 [A/mm<sup>2</sup>]의 값을 취하기로 한다.

철심-슬롯-코일형 자기시스템의 유한 요소해석을 위한 지배방정식은 자계를 발생시키는 외부전류 J<sub>0</sub> 만 존재하므로 식(3)으로부터 식(4)과 같이 지배방정식을 도출할 수 있다.

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A}) \right] = \mathbf{J}_0 \quad (4)$$

#### 4.2 철심-영구자석으로 구성되는 자기시스템 모델

철심-영구자석형의 전체적인 치수는 철심-슬롯-코일형과 같으며 그림 7(b)의 요크 두께, 영구자석의 자화방향 길이 및 자극각도 등이 설계변수가 된다. 본 해석모델에서 사용된 영구자석은 Nd-Fe-B제형(N33H)로서 잔류자속밀도가 1.17[T], 보자력이 10,800[Oe]이다. 자극각도는 2극인 경우에 일반적으로 130°가 많이 사용되고 있으며, 영구자석의 자화방향 길이는 철심에서의 자속밀도가 포화되지 않는 범위 내에서 자기시스템 내부에 가능한 높은 자속밀도가 발생되도록 조정한다.

철심-영구자석형 자기시스템의 유한 요소해석을 위한 지배방정식은 식(3)에서 자계를 발생시키는 자화벡터 M만 존재하므로 식(5)와 같이 된다.

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) \right] = 0 \quad (5)$$

#### 4.3 Halbach 배열에 의한 계자시스템

Halbach 배열에 의한 자기회로 시스템의 모델 형상 및 치수는 그림 1(a)와 같다. 유한요소해석을 위한 절점수는 3560개, 1차 삼각형 요소수는 7038개이며, 2차원 비선형, 정자계 조건으로 해석하였다.

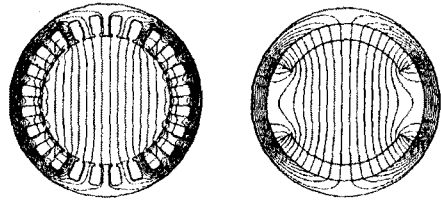
#### 4.4 자기회로 시스템의 비교분석 결과

4.1, 4.2절에서 모델링된 철심-슬롯-코일형과 철심-영구자석형 자기회로 시스템의 형상 및 유한요소해석에 의한 자속분포는 그림 8과 같다. 표 4.1에서 볼 수 있듯이 각 모델의 자기시스템 내부에서의 dipole의 자속밀도값은 철심-슬롯-코일형이 0.039[T], 철심-영구자석형이 0.24[T], Halbach 배열이 0.4[T]로서 큰 차이를 보이고 있다. 또한 체적당 발생 자속이나 중량당 발생 자속 등의 항목에서도 Halbach 배열에 의한 2극 계자시스템이 다른 일반적인 형태에 비해서 우수한 자기적 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한 철심-슬롯-코일형의 경우 계자시스템으로서 높은 공극자속밀도를 얻기 위해서는 계자 및 전기자 모두 철심을 사용해야 하며 공극의 길이가 매우 작아야 하며, 철심-영구자석형은 일반적으로 자성체의 표면에 영구자석을 부착하는 형태를 취하기 때문에 고속으로 회전하는 경우 원심력에 의해 영구자석이 이탈할 우려가 있다. 따라서 위 두 가지 형태는 필연적으로 철심에서 손실이 발생되며 입력 주파수가 높아질 경우 그 손실은 매우 증가하게 된다. 그러나 Halbach 배열로 계자시스템을 구성하게 되면 공극이 어느 정도 커도 높은 자속밀도를 발생시킬 수 있으며, 철심을 사용하지 않으므로 손실이 감소되는 이점이 있다.

표 1. 계자 시스템의 종류에 따른 자기 특성 비교

Items	Iron-slot-coil type	Iron-PM type	Halbach array
Overall dimension	Inner Diameter = 70(mm), Outer Diameter = 105(mm), Axial Length = 100(mm)		
Source	Input current = 5 (A/mm <sup>2</sup> )	Permanent Magnet	[ Br=1.17(T), Hc = 10,800(Oe) ]
Flux density in the field system(T)	0.039	0.24	0.4
Weight(kg)	3.8	3.2	3.8
Flux per volume (Wb/m <sup>3</sup> )	0.57	3.5	5.83
Flux per weight(maxwell×1000/kg)	7	53	74.
Remarks	3-phase winding Number of slots = 24 Specific gravity of iron = 7900 (kg/m <sup>3</sup> )	Degree per one PM = 130°	Numbers of magnet segment = 8 Specific gravity of permanent magnet = 7900 (kg/m <sup>3</sup> )



(a) 철심-슬롯-코일형 (b) 철심-영구자석형  
그림 8 계자 시스템의 종류에 따른 2극 자계의 발생특성

### 5. 결론

Halbach 배열은 철심을 사용하지 않고 요구되는 자계를 발생시키기 때문에 특히 초고속용에 적합하다. 또한 전기자는 플라스틱 등의 재질을 활용하여 자성체를 배제시키고 구성하는 방법을 응용하면 철심의 발생을 완전히 배제할 수 있어서 초고속에 가장 적합한 모터를 구성할 수가 있게 된다. 본 논문에서는 Nd-Fe-B 영구자석을 이용하여 선형 및 원통 형태의 Halbach 배열에 의하여 자기회로를 구성하는 경우의 자기적 특성을 해석하였으며, 원통형 Halbach 배열을 직접 구성 제작하여 3차원 유한요소해석에 의한 계산 및 실측을 수행하였다. 실험치와 3차원 유한요소해석에 의한 해석치를 비교한 결과 원통형 Halbach 배열의 어떤 부분에서도 거의 유사한 값을 가지는 것으로 확인되었다. 또한 자기회로 시스템의 종류에 따른 2극 자계의 발생특성을 비교를 통하여 Halbach 배열의 자기적인 특성이 타 형태의 계자시스템에 비하여 우수함을 확인하였다. 이로써 본 논문은 철심에 의한 손실을 거의 발생시키지 않는 고효율, 초고속 모터의 자기회로 설계시 유용한 자료가 되리라 사료된다.

본 연구는 한국전력공사(기초전력공학 공동연구소)의 연구과제 95-지-04의 일부와 통산산업부(에너지관리공단)의 연구비 지원에 의하여 수행된 연구결과입니다.

### REFERENCES

[1] K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear Instruments and Methods, 169,1980(pp.1-10)  
 [2] B. T. Merritt, R.F. Post, G.R. Dreifuerst, D.A. Bender, "Halbach Array Motor/Generators-A Novel Generalized Electric Machine", Lawrence Livermore National Lab., CA, Oct 94  
 [3] Trumper, D. L., Kim, W.-J., and Williams, M. E., "Design and Analysis Framework for Permanent-Magnet Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 2, pp. 371-379, March/April 1996.