

# 영구자석 Halbach 배열을 이용한 초고속 모터용 계자시스템의 구성과 특성 해석

論 文  
48B - 4 - 2

## Construction and Characteristics Analysis on the Field System of the High Speed Motor by using Permanent Magnet Halbach Array

張錫明\* · 徐鎮鎬\*\* · 鄭相燮\*\*\* · 崔相奎§  
(Seok-Myeong Jang · Jin-Ho Seo · Sang-Sub Jeong · Sang-Kyu Choi)

**Abstract** - A high speed motor has been generating a lot of attention due to its performance-more light, thin, short, compact than ordinary motors. But they have low efficiency with high frequency power source because of the iron losses which may produce too much heat as well as the copper losses occurred in the rotor windings.

The Halbach array can generate the strong magnetic field systems without additional magnetic materials, therefore the iron losses can be removed.

In this paper, the Halbach array is applied to the field system for the high speed motor, and three dimensional FEM is used to analyze the field of the Halbach array considering with the leakage flux. The measured values of flux density are also compared with the FEM analysis. And the magnetic characteristics of the Halbach array field system are compared with those of the conventional field systems such as slot-coil-iron type, PM-iron type.

Consequently, it is confirmed that the Halbach array field system is more suitable to the high speed motor because it has high flux density, sinusoidal flux distribution than others.

**Key Words** : High speed motor, Iron losses, Halbach array, NdFeB, Coerless, Slot-coil-iron type, PM-iron type

### 1. 서 론

초고속 구동용 모터는 동일 출력의 범용 모터에 비하여 자성체의 체적이 매우 작아지므로 소형, 경량화가 가능하다. 따라서 가정용 전기제품, 정보관련 장비, 항공기, 잠수함, 미사일, 인공위성 등에 탑재되는 구동시스템 등에 특히 적합하므로 그 개발 및 응용의 중요성이 최근 급격히 증대되고 있다. 그런데 초고속 모터는 동일 출력의 범용 모터에 비하여 극소형화되기 때문에, 모터에서 발생하는 열을 최소화하고, 회전자가 원심력에 충분히 견디도록 구조가 간단하며 견고해야 하는 것이 필수조건이다[1].

그 동안에는 유도형 모터가 견고하고 유지보수가 간단하다는 등의 여러 장점 때문에 각 분야에서 일반적인 구동력 발생장치로 사용되어 왔다. 그러나 코일, 농형 알루미늄 바, 회전자 슬롯-치 등을 구성되는 자기적인 구조가 수만 rpm급 이상으로의 고속 구동을 하기에는 너무 복잡하여 기계 역학적으로 적합하지가 않다. 더구나 높은 주파수의 전원으로 구동하는 경우에는 철손과 동손에 의한 열이 크게 발생하

로, 유도형 모터의 초고속 구동은 과열에 의한 냉각문제, 효율 저하 등 많은 문제점을 야기한다. 즉, 와전류손은 입력 전원 주파수의 제곱에 비례하고, 히스테리시스손은 전원주파수에 비례하게 되므로 초고속 구동시 인가되는 수 kHz이상의 고주파수에서는 상용전원으로 구동되는 경우에 비해서 철손이 대폭 증가하게 된다[2,3].

이러한 점을 해결하기 위하여 최근에는 국내외적으로 초고속 구동 시스템에 릴럭턴스형 동기 모터를 비롯한 특수형 모터를 개발하여 응용하려는 연구가 이루어지고 있다. 릴럭턴스형 동기 모터는 회전자 구조가 매우 간단하기는 하지만, 회전자 위치에 따른 릴럭턴스 변화율에 의해 토크를 발생시킴으로 고속으로의 운전을 위하여 인가되는 고주파수 전원에 의하여 자성체에서의 철손의 발생은 필연적이다. 그러므로 릴럭턴스형 모터도 유도형 모터에 비하여 초고속 구동에 비교적 유리한 편이기는 하지만 근본적인 제약을 갖는다. 그래서 최근 영구자석을 이용하여 초고속 구동용 모터를 개발하고자 하는 연구가 이루어지고 있다[1,3,4].

즉 1983년경부터 일반 페라이트자석에 비하여 잔류자속밀도가 수배이상인 되는 네오디움계열의 NdFeB 영구자석이 개발되면서 이 분야의 연구개발이 급증하게 되었다[3]. NdFeB 영구자석형 모터는 구조가 간단하고 컴팩트하므로 수십만 rpm까지의 초고속화에 가장 적합한 것으로 평가되어 최근 국내외적으로 연구개발이 크게 이루어지고 있다[1]. 그러나 기존의 자기회로와 동일하게 구성하는 경우 영구자석형 모터도 역시 근본적인 문제는 갖고 있다. 즉 자속의 누설을 방

\* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 博士課程

§ 準 會 員 : 韓國機械研究院 先任研究員 · 工博

接受日字 : 1998년 6월 5일

最終完了 : 1999년 3월 10일

지하기 위하여 폐자료를 이루는 철심을 병용하므로, 고주파 전원에 의하여 철손이 역시 크게 발생하여 과열이 된다 [1,3,4]. 이와 같은 발열, 효율저하 등의 문제를 근본적으로 해결하기 위한 방법으로는 기존 모터의 자기회로 및 전기회로를 바꾸어 특수한 형태로 재구성하는 등 모터의 구조를 근본적으로 개선해야만 한다.

본 논문에서는 이러한 점들을 감안하여 초고속 구동에 가장 적합할 것으로 평가되는 영구자석의 Halbach 배열법을 응용한 특수형 모터의 개발을 위한 기본을 확립하고자 한다. 즉 Halbach 배열은 1979년 Klaus Halbach이 처음으로 제안한 것으로, 여러 개의 영구자석편을 적절히 조합하여 모터시스템에서 요구되는 자계분포를 발생하는 특수 형태의 자기회로를 구성하게 되므로 초고속 구동 모터 시스템에 매우 적합하다[5,6]. Halbach 배열에 의하여 계자를 구성하는 경우, 폐자료를 구성하기 위한 별도의 철심이 없이 영구자석만으로 구성하므로 철심에서의 철손이 전혀 없게 된다. 또한 강자계를 발생하기 때문에 전기자를 코어리스(Coreless)로 할 수 있어서 역시 이에 따른 철손이 배제된다. 따라서 초고속형 모터 및 발전기에 응용하고자 하는 연구가 최근 확산되어 가고 있다[7,8].

즉 Halbach에 의해 1980년대에 이론적인 특성해석에 관한 연구 성과가 있었으며[5, 6], 1993년 미국의 POST가 에너지성의 지원아래 전기-기계 배터리(Electro-Mechanical Battery; 이하 EMB) 시스템 구동용 초고속 전동발전기의 계자 시스템에 Halbach 영구자석배열을 사용하는 방안을 제안하여 매우 효과적임을 입증한 바가 있고[7], Trumper 등은 6자유도 자기부상기에 적용한 바도 있다[8]. 그러나, 지금까지의 발표 자료에서는 영구자석의 Halbach 배열을 응용한 전체 시스템은 물론이고 특성 해석이나 설계, 제작, 성능 측정에 관한 구체적인 과정 및 자료를 명확하게 제시한 경우가 거의 없다. 물론 국내에서도 본 저자들에 의한 경우 이외에는 연구된 바가 전혀 없다.

60,000 rpm급 초고속 모터용 원통형 계자를 구성하기 위하여 영구자석의 Halbach 배열 개념을 적용하였다. 제작된 시스템에서 중요 부분의 자속밀도 특성을 측정하고 3차원 유한요소 해석결과와 비교·검토하였다. 또한 이를 바탕으로 영구자석 Halbach 배열을, 초고속 구동용 기기에의 응용의 타당성을 입증하기 위하여 동일체적을 갖는 서로 다른 형태의 일반 자기회로를 예로 들어 비교·분석하였다. 즉 일반형태의 계자, 즉 철심의 슬롯안에 코일이 놓여진 형태의 계자와, 영구자석과 폐자료를 구성하는 철심으로 이루어진 계자를, 동일한 체적조건에서의 자기적인 특성을 3차원 유한요소해석(이하 3-D FEM)을 통하여 영구자석 Halbach 배열에 의한 계자와 성능을 서로 비교·검토하였다. 그 결과 Halbach 배열에 의해 계자를 구성하는 경우, 모터에서 발생하는 유기전압이나 토크의 크기를 결정하는 체적 및 중량당 발생하는 자속밀도 특성이 특별히 양호하고, 반경방향 공극자속밀도가 거의 정현적으로 발생함을 확인하였다. 이로써 초고속 모터에 Halbach 배열을 응용하는 경우의 타당성 및 유용성을 제시할 수 있었다.

## 2. 영구자석의 Halbach 배열 및 자기적 특성과 초고속모터에의 응용성

### 2.1 기본 개념

Halbach 배열은 자화벡터 방향이 축을 따라 회전시키는 형태가 되도록 연속 자화시켜 설계자가 원하는 자계 분포를 얻고자 하는 것이다. 즉, 그림 1(a)와 같은 정현적인 자계 분포를 얻기 위해서는 영구자석의 자화벡터가 그림 1(b)와 같은 배열이 되도록 착자시켜야만 한다. 그러나 실제로는 그림 1(b)와 같이 자화벡터를 연속적으로 착자시킬 수 없으므로 그림 2와 같이 유한개의 영구자석편을 사용하여 자화벡터 방향이 적절하도록 착자를 하면 그림 1(a)와 같은 정현파 자계를 발생시킬 수 있다[4,5].

### 2.2 Halbach 배열 시스템의 자기적인 특성

#### 2.2.1 특성 해석을 위한 지배방정식

영구자석에 의한 Halbach 배열 시스템의 자기적인 특성 해석을 위한 지배방정식은 전자기 현상의 기본 법칙들을 적용하여 유도한다. 즉 자속밀도  $\mathbf{B}$ 와 벡터포텐셜  $\mathbf{A}$ 와의 관계는 식(1)과 같다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{1}$$

또한 자속밀도  $\mathbf{B}$ , 자화벡터  $\mathbf{M}$ , 자계의 세기  $\mathbf{H}$ 의 관계는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \\ &= \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \end{aligned} \tag{2}$$

여기서  $\mu_0$ 는 진공투자율,  $\mu_r$ 은 비투자율을 나타낸다. 또한 자성체에서의 외부전류  $\mathbf{J}_0$ 와 내부의 자화벡터에 의한 등가자화전류  $\mathbf{J}_m$ 에 의하여 합성자계  $\mathbf{H}$ 가 발생되므로 식(3)과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_m \tag{3}$$

여기서 등가 자화전류  $\mathbf{J}_m$ 과 자화벡터  $\mathbf{M}$ 과의 관계는 식(4)와 같다.

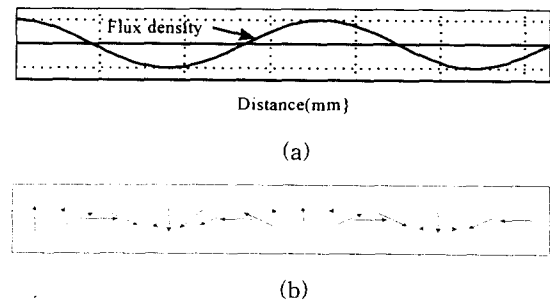


그림 1. Halbach 배열의 개념도(화살표-자화벡터)  
 (a) 정현적인 자계 분포 (b) 이상적인 Halbach 배열  
 Fig. 1 Concept schematic of Halbach array  
 (a) Sinusoidal distribution of magnetic field  
 (b) Ideal Halbach array

$$\mathbf{J}_m = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{M}) \quad (4)$$

따라서 식(3)은 식(2), 식(4)에 의하여 식(5)와 같이 된다.

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} - \mathbf{M}) \right] = \mathbf{J}_0 \quad (5)$$

결과적으로 영구자석을 포함하는 정자계 시스템의 지배방정식은 식(5)에 식(1)을 적용하면 식(6)과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{M}) \right] = \mathbf{J}_0 \quad (6)$$

### 2.2 자기적인 특성 예

#### (1) 리니어 Halbach 배열

그림 1(b)와 같이 자화벡터를 연속으로 회전시키는 이상적인 형태로의 착자 및 영구자석의 자극배치는 실제 가공에서 매우 어렵다. 따라서 그림 2와 같이 영구자석을 수 개의 영구자석편으로 나누어 각각을 화살표 방향으로 착자시킨 후 영구자석편을 일정한 회전 자화벡터 각도로 이루어질 수 있도록 조립한다.

그림 3은 2.1절에서 설명한 바와 같이 여러 조각의 영구자석을 적절하게 배치하는 경우 그림 1(a)와 같은 정현파 자계가 얻어질 수 있는가를 확인하기 위한 사례이다. 즉, 그림 2(a)와 (b) 모델을 식(6)의 지배방정식에 의해 2차원 FEM으로 각각 해석하여 얻어진 자속밀도분포이다. 그림 3(c)에서 보는 바와 같이 영구자석편수가 증가할수록 발생 자계의 세기는 커지며, 좀 더 정현적인 자계를 얻을 수 있다. 따라서 제작시에는 영구자석 편수를 가능한 많도록 해야 만 한다.

#### (2) 원통형 Halbach 배열

그림 4와 그림 5는 영구자석 Halbach 배열을 이용한 원통형 계자 시스템의 예이다. 이 모델에 대한 2차원 유한요소 해석을 수행한 결과, 계자 내부 또는 외부에서 균일한 2극의 자계가 형성됨을 알 수 있다.

### 2.3 초고속 모터의 필요조건과 Halbach 배열

수만 rpm 이상으로 구동되는 초고속 모터는 고밀도 에너지화가 전제되어야만 한다. 따라서 동일 출력의 범용 저속 모터에 비하여 자성체의 체적이 대폭 축소되어 소형, 경량화

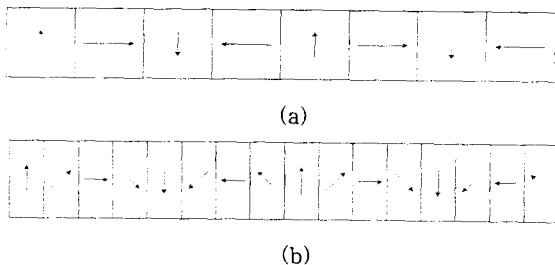


그림 2 선형 Halbach 배열(화살표 : 자화방향벡터)  
(a) 영구자석 편수: 8 (b) 영구자석 편수: 16  
Fig. 2 Linear Halbach array with  
(a) 8-segment; (b) 16-segment

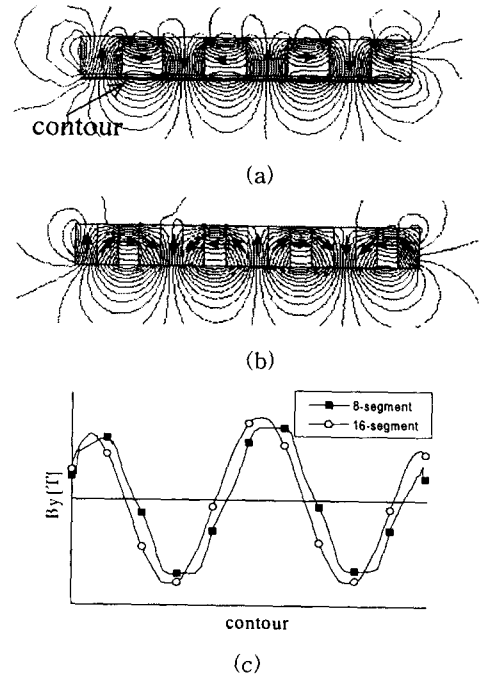


그림 3 선형 Halbach 배열의 자계 특성  
(a) 영구자석편수= 8개 (b) 영구자석편수=16개  
(c) 관측선(contour)에 따른 자속밀도 비교  
Fig. 3 Magnetic characteristics of a Linear Halbach array  
(a) 8-segment; (b) 16-segment;  
(c) Flux density vs. contour

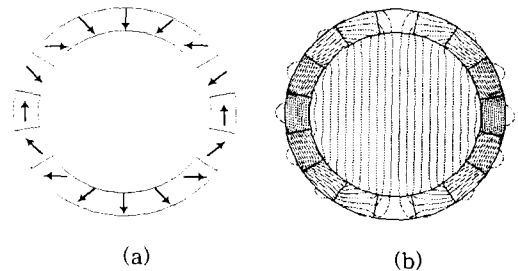


그림 4 원통 Halbach 배열을 이용한 내부 계자 시스템  
(a) 자석편의 자화방향과 배열; (b) 자속 분포  
Fig. 4 Inner field system with cylindrical Halbach array  
(a) Direction of magnetization and arrangement (b) Flux lines

가 된다. 그러나 초고속 운전시에는 수 kHz 이상의 높은 주파수의 전원으로 구동되므로 식 (7)로 표현되는 철손과 동손 등에 의한 과열로 효율 저하, 냉각 문제 등 치명적인 문제점이 발생하게 된다. 철 1kg당의 손실  $W_f$ 는

$$W_f = B^2 \left\{ \sigma_h \left( \frac{f}{100} \right) + \sigma_e d^2 \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right\} [W/kg] \quad (7)$$

여기서  $f$ : 입력전원 주파수,  $\sigma_h$ : 히스테리시스손 계수,  $\sigma_e$ : 와전류손 계수,  $B$ : 자속밀도,  $d$ : 규소강대의 두께이다. 식 (7)에서 히스테리시스손은 입력전원 주파수에 비례하고 와전류손은 제곱에 비례함을 알 수 있다.

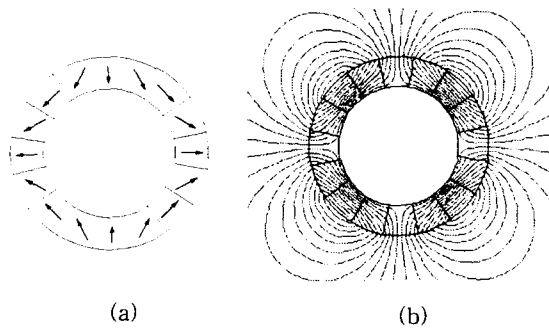


그림 5 원통 Halbach 배열을 이용한 외부 계자 시스템  
(a) 자석편의 자화방향과 배열 (b) 자속 분포  
Fig.5 Outer field system with cylindrical Halbach array  
(a) Direction of magnetization and arrangement  
(b) Flux lines

따라서 일반적인 모터 형태인 슬롯형 또는 영구자석형으로 자기회로를 구성하는 경우, 철심을 필연적으로 사용하게 되므로 고주파 전원에 의한 철손이 매우 커진다. 따라서 기존 모터의 자기회로 구조를 특수한 형태로 재구성하는 등 모터의 구조를 근본적으로 개선해야 한다. 이에 고정자와 회전자의 자기회로를 개선하는 특수한 예로, 영구자석의 Halbach 배열을 응용하여 계자를 구성하는 경우에는 아래와 같은 이유로 초고속 응용에 적합하게 된다.

- 폐자로를 구성하기 위한 별도의 철심이 없이 영구자석만으로 자기회로를 구성하므로 철손이 배제된다.
- 계자의 내부 공간에 강자계를 발생시키기 때문에 플라스틱, 복합재 등의 비자성체와 코일만으로도 전기자를 구성할 수 있기 때문에 코어리스(Coreless) 전기자를 갖는 모터가 되어 전기자에서의 철손이 없게 된다.

### 3. 제작 및 특성 해석

#### 3.1 설계 파라미터 및 제작

##### 3.1.1 설계 파라미터

8조각의 영구자석으로 Halbach 배열을 하여 원통형 2극 계자 시스템을 구성한다. 이때 Halbach 배열 내부에서 반경 방향의 기본파 자속밀도의 최대치  $B_0$ 는 영구자석 감자곡선과 투자율  $\mu_r$ 을 고려하여 식 (8)과 같이 주어진다.

$$B_0 = B_r C_N \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) / \mu_r \quad (8)$$

여기서  $r_1, r_2$ 는 각각 계자의 외반경과 내반경,  $B_r$ 은 영구자석의 잔류자속밀도,  $C_N$ 는 배열 영구자석편이 증가할수록 원통내부 자속밀도가 증가하는데 이를 고려한 보정계수이다.

따라서 시스템에서 요구하는 사양에 따라 식(8)에 의하여 원통형 Halbach 배열 계자의 설계 파라미터를 계산한 결과가 표 1과 그림 6이다. 즉 시스템 요구사양을 만족하기 위하여 필요한 계자 내부에서의 자속밀도는 0.4[T] 인데, 이러한 조건을 만족시키기 위한 정해진 영구자석 배열의 외경과 내경은 그림 6과 같다.

표 1 Halbach 배열형 모터의 설계 사양

Table 1 Design parameter of Halbach array type motor

항 목	사 양	항 목	사 양
최대 동작 속도	60,000[rpm]	상수	3
출 력	6[kW]	잔류자속밀도	11.7[kG]
외 경	105 [mm]	보자력	10,800[Oe]
내 경	70 [mm]	비투자율	1.08
축방향 길이	100 [mm]	영구자석편수	8[개]

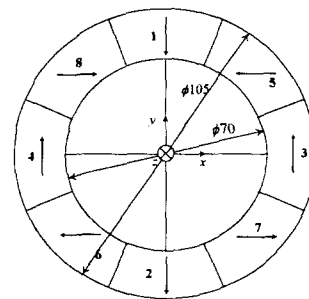


그림 6 설계된 Halbach 배열형 2극 계자 시스템  
Fig. 6 Designed dipole field system using Halbach array

#### 3.1.2 제작

Halbach 배열은 각 영구자석편의 자화방향이 각각 다르기 때문에 원통 형태의 조립 상태에서 그대로 착자하는 것은 매우 어렵다. 따라서 그림 7과 같이 각각 자화시킨 다음 이들을 자화벡터방향이 일정한 각도로 회전할 수 있도록 조립하였다. 이 때 그림 9와 같은 감자특성을 갖는 8개의 NdFeB 영구자석편을 원통형으로 조립하여 2극의 자계분포를 갖도록 계자를 구성하였다.

그림 8은 표 1의 사양에 의해 실제로 제작된 모습이다. 화살표는 각 자석편의 착자방향을 나타내며, 자화방향은 축을 따라 각 영구자석편마다 90°를 유지하도록 조합하였다. Halbach 배열에 의한 자계는 원통내부에는 강한 자계가 발생하지만 원통 외부로는 누설이 없기 때문에 자속의 폐회로를 만들어 주기 위한 별도의 자성체에 의한 체결이 필요하지 않다. 다만 그림 8(a)에서의 영구자석 외부에는 비자성체인 스테인레스로 둘러싸 기계적 강도를 보강하였다.

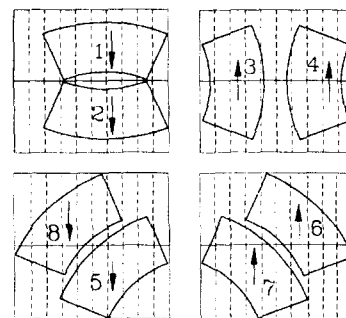


그림 7 2극 계자를 구성하기 위한 영구자석편  
Fig. 7 Segment of permanent magnet for dipole field

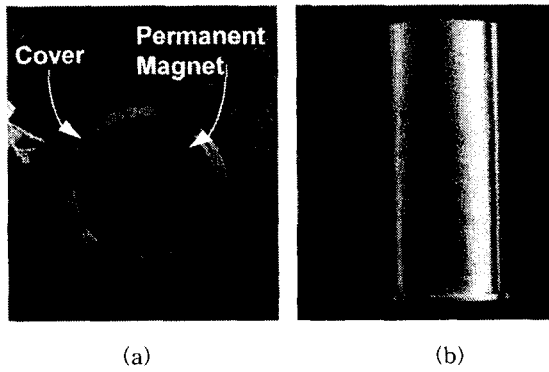


그림 8 Halbach 배열에 의한 계자 시스템의 제작된 모습  
 (a) 정면도; (b) 측면도  
 Fig.8 Photograph of dipole field system using Halbach array (a) Front view; (b) Side view

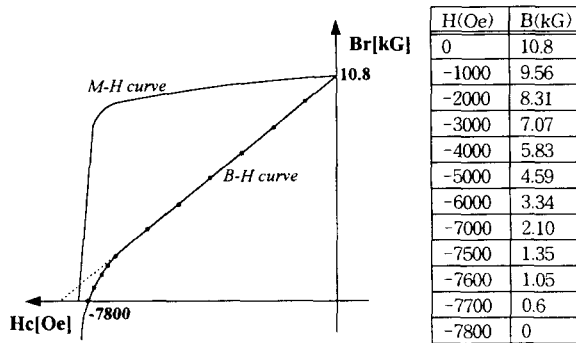


그림 9 NdFeB 영구자석의 감자특성  
 Fig. 9 Demagnetization curve of NdFeB PM

3.2 자기적인 특성 해석

그림 8와 같이 제작된 계자 시스템의 자속밀도값을 식(6)의 지배방정식에 의하여 3-D FEM으로 해석한 결과와 영국 Lakeshore사의 자속계를 이용한 측정치와 비교하였다. 이 때 사용된 영구자석의 자화곡선은 그림 9와 같다.

(1) x-z 평면에서의 자속밀도 분포

그림 10은 y=0, x-z 평면 자속밀도값을 해석치와 측정치를 도시하였다. 측정치와 해석치가 비교적 잘 일치하였으며 평면의 중심부에서는 균등한 자계가 형성되었다. 다만 평면의 바깥쪽에서는 영구자석 접합부의 자기 왜형으로 인하여 다소 평활하지 못함을 볼 수 있다. 또한 계자 원통의 끝단 부분으로 갈수록 값이 다소 떨어지게 되는데, 이것은 끝단에서 자속이 누설되기 때문인 것으로 추정된다.

(2) x-y 평면에서의 자속밀도 분포

그림 11은 z=50mm인 지점에서 x-y 평면 자속밀도분포의 FEM 해석치와 측정치를 비교한 것인데, 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 다만 평면 바깥쪽에는 각기 다른 자화방향을 갖는 영구자석이 접합된 부분이기 때문에 자기적인 왜형이 약간 발생됨을 볼 수 있다.

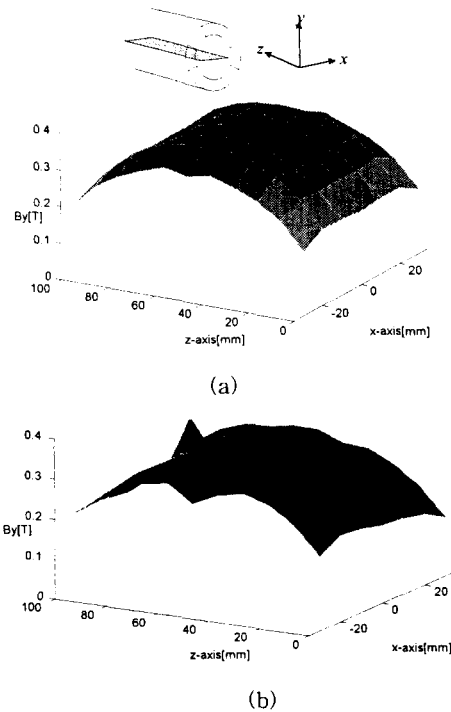


그림 10 중심축 x-z 평면에서의 자속밀도 분포  
 (a) 계산치(FEM 3D); (b) 측정치  
 Fig. 10 Flux density distribution in the y-direction  
 (a) Calculated by FEM 3D; (b) Measured values

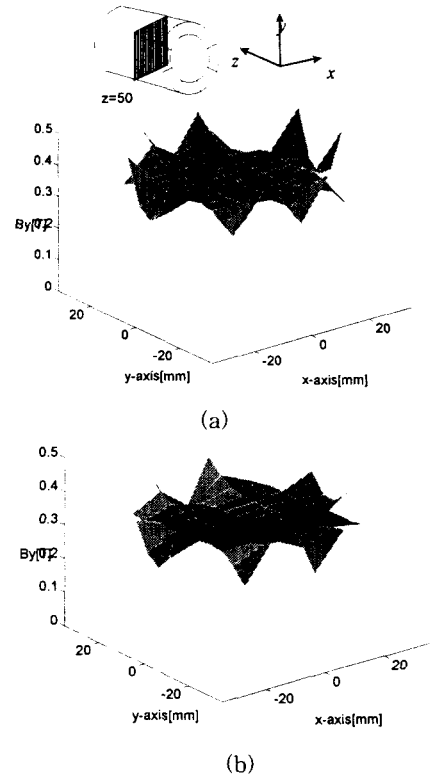


그림 11 x-y평면에서의 자속밀도분포(z=50mm)  
 (a) 계산치(FEM 3D); (b) 측정치  
 Fig. 11 Flux density distribution in the y-direction  
 (a) Calculated by FEM 3D; (b) Measured values

(3) 회전각에 따른 반경방향 자속 밀도

그림 12는 원통 좌표계에서 반경이  $r=25\text{mm}$ 이며 축방향 길이가 각각  $z=0\text{mm}$ ,  $z=50\text{mm}$ 인 경우에 대하여 반경방향에 따른 자속밀도값의 3-D FEM에 의한 계산치와 측정치를 비교한 것이다. 만일 반경  $r=25\text{mm}$  이하에서 측정한다면 더욱 정현적인 분포를 얻을 수 있다. 또한 축방향 길이가  $z=0\text{mm}$ 에서는 계산치와 측정치는 거의 같은 분포를 나타내고 있지만, 축방향 길이가  $z=50\text{mm}$ 에서는 실제 측정치가 계산치에 비해서 다소 작게 나타났다. 그러나 이러한 결과는 측정치에서 영구자석의 착상상태, 가공과정에서의 자기적 성능 저하, 측정오차 등에 의한 것으로 추정되는데, 이를 감안할 때 잘 부합되고 있는 것으로 판단된다.

4. 자기회로의 비교·분석을 통한 영구자석 Halbach 배열의 초고속 모터에의 응용성 검토

2.3절에서 검토한 바와 같이 초고속 기기는 고성능화 및 콤팩트화를 이루기 위해서는 자기회로내의 손실을 최소화하면서 계자 시스템 내부에서 발생하는 자속밀도의 크기를 크게 하도록 설계해야만 한다. 본 절에서는 영구자석 Halbach 배열의 초고속모터에의 응용성을 검토하기 위하여 보편적으

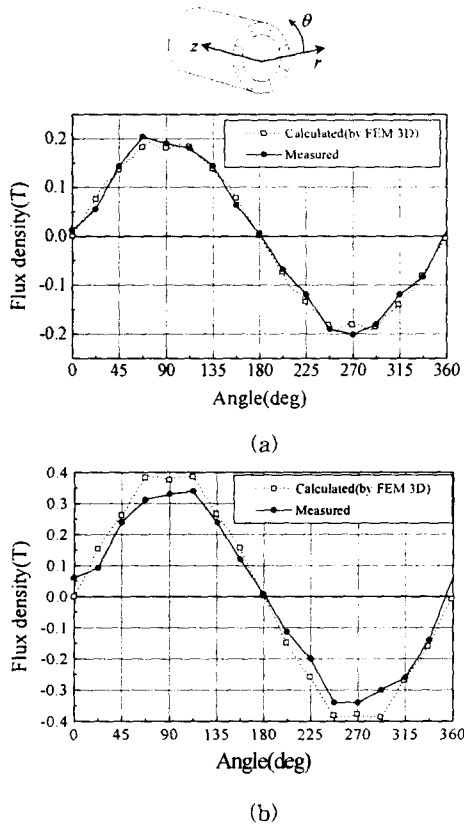


그림 12 반경방향 자속밀도 특성  
(a)  $z=0\text{mm}$ ,  $r=25\text{mm}$ ; (b)  $z=50\text{mm}$ ,  $r=25\text{mm}$   
Fig. 12 Comparison of calculated and measured flux density in the radial direction  
(a)  $z = 0\text{mm}$ ,  $r = 25\text{mm}$ ; (b)  $z = 50\text{mm}$ ,  $r = 25\text{mm}$

로 적용되는 형태의 계자를 사례로 들어 성능을 분석 검토하였다.

4.1 모델 사례

Halbach 배열에 의한 계자 시스템과 자기적인 성능을 비교 분석하기 위한 모델로 2가지 사례를 들었다. 즉, 일반적으로 사용되고 있는 철심-슬롯-코일형 및 철심-영구자석형을 Halbach 배열에 의한 자기회로와 자기적인 특성을 각각 해석하여 그 결과를 비교·검토하였다. 단 각 모델의 직경 및 축방향 길이는 체적이 동일하도록 하였으며, 이러한 조건하에서 가능한 최대 자속밀도값을 갖도록 슬롯폭, 요크 두께, 영구자석의 자화방향 두께 등의 파라미터를 정하였다[2]. 그리고 자성체의 포화자속밀도 값은 일반적인 설계치인 1.5T로 설정하였다.

4.1.1 철심-슬롯-코일로 구성된 모델

그림 6의 Halbach 배열의 자기회로 모델과 동일체적을 갖도록 그림 13과 같은 철심-슬롯-코일로 구성되는 자기회로 모델의 내경, 외경 및 축방향 길이는 각각 70mm, 105mm, 100mm로 결정하였다. 슬롯수는 24개이며, 2극의 자계를 발생하도록 3상 권선이 시행된 것으로 하였으며, 슬롯폭, 치폭, 요크 두께 등은 일반 기기의 설계 과정에 준하여 결정하였다[2].

이 모델에서 발생하는 자속의 크기를 결정짓는 주요 요소는 기자력과 슬롯 면적이므로, 초기 모델을 먼저 설정한 후 FEM을 이용하여 요크에서의 자속밀도값을 계산하였다. 그리고 그 값이 포화되지 않는 범위까지 슬롯면적과 기자력을 증가시켜 발생자속밀도의 크기가 가능한 한 최대가 되도록 하였다. 이때 슬롯에서의 전류밀도값은 일반적으로 4~8[A/mm<sup>2</sup>]이므로 약 5[A/mm<sup>2</sup>]의 값을 취하였다. 이 경우 철심 및 동선의 비중은 각각 7900[kg/m<sup>3</sup>], 8890[kg/m<sup>3</sup>]이므로, 전체 중량은 약 3.8[kg]이 된다.

4.1.2 철심-영구자석으로 구성된 모델

그림 14와 같이 철심과 영구자석으로 구성되는 모델의 체적은 4.1.1절에서와 마찬가지로 그림 6, 그림 13의 모델과 동일한 체적이 되도록 정하였다. 즉 자기회로의 내경, 외경 및 축방향 길이가 각각 70mm, 105mm, 100mm로 정하였으며, 요크 두께, 영구자석의 자화방향 길이 및 자극 각도 등은 영구자석 모터의 일반적인 설계과정에 따랐다[8].

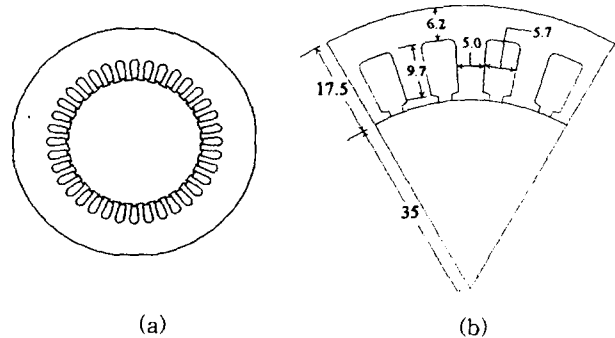


그림 13 철심-슬롯-코일형 계자 시스템  
(a) 철심-슬롯-코일형; (b) 설계 형상  
Fig. 13 Iron-slot-coil type dipole field system  
(a) Iron-slot-coil type; (b) Design parameters

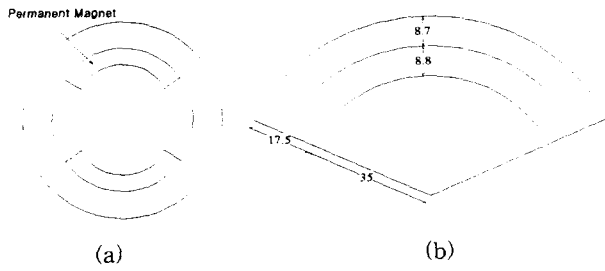


그림 14 철심-영구자석형 계자 시스템(단위:mm)

(a) 철심-영구자석형 (b) 설계 형상

Fig. 14 Iron-PM type dipole field system

(a) Iron-PM type ; (b) Design parameters

영구자석은 그림 6의 Halbach 배열에 의한 자기시스템의 경우와 동일한 것으로 그림 9와 같이 잔류자속밀도가 1.1[T], 보자력이 9800[Oe]의 값을 갖는 NdFeB계열로서 감자특성을 갖는다. 자극의 각도는 130°이며, 자화방향 길이는 철심이 포화되지 않는 범위에서 최대 자속을 발생하도록 결정하였다. 그 결과 자화방향 길이는 8.8[mm], 요크 두께는 8.7[mm]가 되었다. 철심-영구자석형 모델에서 철심과 영구자석의 비중은 약 7900[kg/m<sup>3</sup>]으로 거의 비슷하므로 전체 중량은 약 3.3[kg]이 된다.

#### 4.2 각 사례의 자기적인 특성 비교

4.1절에서 사례로 들은 철심-슬롯-코일형과 철심-영구자석형 자기회로 시스템의 형상 및 FEM 해석에 의한 자속분포는 그림 15와 같다. 또한 표 2는 철심-슬롯-코일형, 철심-영구자석형, 그리고 영구자석 Halbach 배열에 의한 자기회로 시스템의 자기적 특성을 비교검토하기 위한 자료이다.

표 2에서 각 모델의 자기시스템에 의하여 발생하는 내부 공간의 자속밀도는 철심-슬롯-코일형이 0.039T, 철심-영구자석형이 0.24[T], Halbach 배열형이 0.4[T]로서 큰 차이를 보인다. 체적당 발생 자속은 철심-슬롯-코일형이 0.57[Wb/m<sup>3</sup>], 철심-영구자석형이 3.5[Wb/m<sup>3</sup>], Halbach 배열형이 5.83[Wb/m<sup>3</sup>]이다. 또한, 중량당 발생 자속은 철심-슬롯-코일형이 70 [μWb/kg], 철심-영구자석형이 530[μWb/kg], Halbach 배열형이 740[μWb/kg]으로서 Halbach 배열에 의한 2극 계자 시스템의 자기적 특성이 매우 우수함을 알 수 있다.

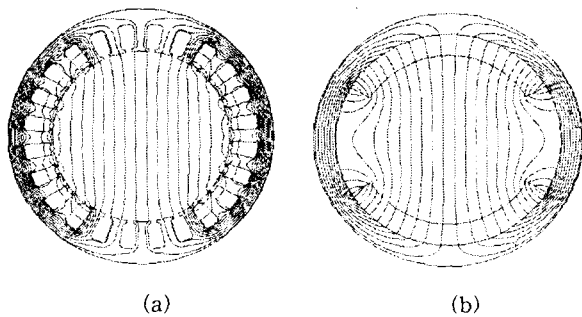


그림 15 계자 시스템의 종류에 따른 2극 계자의 발생특성

(a) 철심-슬롯-코일형; (b) 철심-영구자석형

Fig. 15 Flux distribution of dipole field system

(a) Iron-slot-coil type; (b) Iron-PM type

표 2 계자 시스템에 따른 자기특성 비교

Table 2 Comparison of results on three field system

항목	철심-슬롯-코일 시스템	철심-PM형 시스템	Halbach 배열
체적	· 내경 = 70[mm] · 외경 = 105[mm] · 축방향길이 = 100[mm]		
입력전류 및 영구자석	입력전류 = 5[A/mm]	영구자석의 잔류자속밀도 = 1.1[T]	
원통내부에서 자속밀도(T)	0.039	0.24	0.4
무게(kg)	3.8	3.2(PM무게: 1.24)	3.8
체적당 자속 (Wb/m <sup>3</sup> )	0.57	3.5	5.83
중량당 자속 (μWb/kg)	70	530	740.
비 고	· 3상 권선 · 슬롯수=24	자극각도 = 130°	PM 편수 = 8

#### 4.3 각 모델 사례의 초고속 모터 응용성 분석 및 Halbach 배열

(1) 자성체 슬롯-치-코일 구조의 자기회로와 초고속성

그림 13과 같은 모델은 유도형 모터에 흔히 사용되는 것으로 계자 내부에 발생하는 자속밀도가 0.039[T]로 특별히 작다. 따라서 유도형 모터는 공극자속밀도를 0.7[T] 이상의 값으로 크게 하기 위해서는 계자 내부의 회전자를 규소강판 등의 고투자율을 갖는 자성체로 구성하여 자속을 공극에만 집중시키고, 공극도 기계적인 조건이 허락하는 한 작게 한다.

고속으로 운전하는 경우 자성체에서 고주파수 전원에 의하여 발생하는 철손에 의한 과열은 물론, 공극이 작음에 따른 슬롯팅 효과에 의한 공간고조파의 발생으로 효율저하, 발열 및 냉각, 기계적인 스트레스 문제 등으로 초고속 운전이 불가능하게 된다. 따라서 이 모델은 초고속 모터의 계자 시스템으로는 부적합하다.

(2) 영구자석-자성체 구조의 자기회로와 초고속성

그림 14와 같은 모델은 자성체의 표면에 영구자석을 부착하는 형태를 취하기 때문에 고속으로 회전하는 경우 원심력에 의해 영구자석이 이탈할 우려가 있다. 또한 표 2에서 보는 바와 같이 슬롯-치-코일 구조의 자기회로에 비하여 체적당, 중량당 발생 자속밀도는 각각 6.1배, 7.57배로 높게 발생한다. 그러나 Halbach 배열형에 비해서는 내부 공간에 체적 및 중량당 0.6배, 0.72배의 낮은 자속을 각각 발생시킨다.

따라서 모터의 중량 및 체적이 커지고, 그림 14(a)와 같이 폐자로를 구성하기 위해 별도의 자성체를 사용해야 하고, 전기자에도 자성체를 사용해야 하므로 식(7)에 의하여 철손이 매우 커진다는 단점을 지닌다. 결국 이 모델로 초고속 모터의 계자 시스템을 구성할 경우, 자성체 손실이 철심-슬롯-코일형에 비해 작기는 하지만 필연적으로 크게 발생한다.

(3) Halbach 배열 구조의 자기회로와 초고속성

Halbach 배열로 계자 시스템을 구성할 경우에는 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 그림 4, 그림 5, 그림 6에서 보듯이 자속 차폐나 누설을 막기 위한 별도의 폐자로용 철심을 사용하지 않는다.
- Halbach 배열 구조는 표 2에서 보는 바와 같이 그림 13의 슬롯-치-코일 구조에 비해 체적당, 중량당 발생 자속이 각각 10.2배, 10.57배가 크고, 그림 14의 영구자석-자성체 구조에 비해서는 각각 1.66배, 1.4배가 크게 발생하여 내부공간에 0.4[T]의 높은 자속밀도를 발생시키는 고성능 자기특성을 갖는다. 따라서 회전자들 규소강판 등의 자성체를 사용하지 않고 플라스틱 등의 비자성체로 구성할 수 있다. 결국 구조적으로 매우 간단한 코어리스 기기를 구성할 수 있으므로 철손은 발생하지 않는다.
- 슬롯이 없으므로 영구자석 근처 외에서는 공극자속밀도가 정현적이고, 슬롯 리플에 의한 공간고조파가 거의 존재하지 않으므로 이에 따른 손실도 존재하지 않는다.

따라서 영구자석 Halbach 배열은 초고속 모터의 계자 시스템으로의 응용에 가장 적합한 것으로 평가된다.

3. 결론

본 논문에서는 8편으로 착자된 NdFeB 영구자석을 이용하여 Halbach 배열형 2극 계자 시스템을 설계 및 제작하였다. 그리고 3차원 FEM 해석 결과와 측정치를 비교·검토한 결과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 기본적인 자기회로 모델 사례를 들어 검토한 결과 아래와 같은 Halbach 배열이 초고속 응용시의 우수성을 확인·검증하였다.

- 계자에 별도의 폐자로용 철심을 사용하지 않으면서도 비교적 정현적이고 균일한 자계를 얻을 수 있는 자기회로이므로, 계자에서의 철손이 발생하지 않는다. 또한 배열 방법에 따라 선형/원통형 또는 내부/외부 계자 시스템을 구성할 수 있다.
- 자성체를 사용하지 않아도 매우 높은 공극자속밀도의 발생이 가능하다. 즉, 슬롯-치-코일 구조에 비해 체적당, 중량당 발생 자속이 각각 10.2배, 10.57배가 크고, 영구자석-자성체 구조에 비해 체적당, 중량당 발생자속이 각각 1.66배, 1.4배가 크게 발생하여 내부공간에 0.4[T]의 높은 자속밀도를 발생시키는 고성능 자기특성을 갖는다. 따라서 회전자들 플라스틱 등의 비자성체로 구성할 수 있으며, 이로써 전기자에서의 철손 발생이 전혀 없게 된다.
- 계자 및 전기자에 슬롯이 없으므로 공극자속밀도가 정현적이고 슬롯 리플에 의한 공간고조파가 거의 존재하지 않으므로 이에 따른 손실도 존재하지 않는다.

본 결과들로부터 초고속 모터의 계자 시스템으로의 응용은 물론, 많은 이점을 갖고 있는 영구자석 Halbach 배열 자기회로를 다양한 분야에 효과적으로 응용하기 위한 기반을 확립하였다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] Isao Yakahashi et al, "A Super High Speed PM Motor Drive System by a Quasi-Current Source Inverter", IEEE Trans. Magnetics, Vol.30, No.3, pp. 683-690, May/June 1994
- [2] 元鍾洙 譯, "電機設計學", 東逸出版社, 1994, 서울
- [3] Gordon R. Slemon, Xian Liu, "Core losses in permanent motors", IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 26, No. 5, pp. 1653-1655, September 1990
- [4] T. Sebastian, G. R. Slemon, "Transient Torque and Short Circuit Capabilities of Variable Speed Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. Magnetics, Vol. MAG-23, No. 5, pp. 3619-3621, Sept. 1987
- [5] Klaus Halbach, " Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets", Nuclear Instruments and Methods 187, pp.109-117, 1981
- [6] K. Halbach, "Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material", Nuclear instruments and Methods, 169, pp.1-10, 1980
- [7] 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 1994
- [8] 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

저 자 소 개



장 석 명(張 錫 明)

1949년 7월 3일생, 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업(공학), 1989년 미국 Univ. of Kentudy(방문 연구), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 평의원, 편집이사, 전기기기 연구회 간사장

Tel : (042) 821-5658

E-mail : smjang@ee.chungnam.re.kr