

영구자석에 의한 Halbach 배열 자기시스템의 특성 해석

장석명*, 서진호*, 최상규**

* 충남대학교 ** 한국기계연구원

Characteristics Analysis on the Field System of Halbach Array by the Permanent Magnet

S. M. Jang*, J. H. Seo*, S. K. Choi**

* Chungnam National Univ. ** KIMM

ABSTRACT - A new permanent magnet has been suggested the novel permanent magnet array using advanced analytical approaches in 1979 by Klaus Halbach. In this paper, the Halbach array is utilized to compose the field system. The ferro-magnetic materials of the electric machines cause the fatal energy loses in high frequency. But Halbach array enables to make the various field distribution without ferro-magnetic materials. This paper presents the magnetic characteristics are analyzed by the analytical method and FEM in case that the field system is composed of the Halbach array.

1. 서론

초고속으로 회전하는 전기기기는 입력주파수가 매우 높아 철손, 와류손이 크게 발생되므로 기존의 형태로는 많은 손실을 감수할수밖에 없다. 이러한 손실을 줄이기 위한 한 방법으로 여러 개의 영구자석편으로 Halbach 배열을 하여 자기회로를 구성하는 방법이 있다[1][2][3]. Halbach 배열은 1979년 Klaus Halbach에 의하여 제안되었으며 여러 개의 영구자석편을 조합하여 자로를 구성하여 시스템에서 요구되는 자제분포를 발생시킬 수 있는 특수한 방식으로 여러 가지 면에서 큰 장점을 갖는다. 즉 영구자석의 Halbach 배열에 의하면 계자를 철심이 없이 구성하므로 일반적으로 고속 운전시에 크게 발생하는 철손이 전혀 수반되지 않는 특유의 잇점이 있어 최근에는 미국 등에서 응용분야가 확산되어 가고 있다.

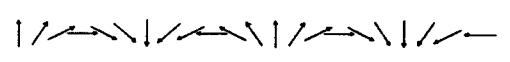
본 논문에서는 NdFeB 계열의 영구자석에 의한 Halbach 배열에 의하여 자기회로를 구성하는 경우의 자기적 특성을 해석하였고, 이를 직접 제작 실험하여 그 값을 비교하였다.

2. 영구자석 Halbach 배열 및 자기특성해석

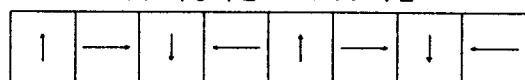
2.1 Halbach 배열의 개념

Halbach 배열의 기본 개념은 자화벡터 방향을 축

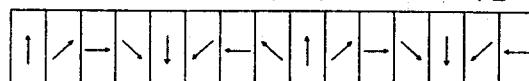
에 따라 연속적으로 회전시키는 형태로 연속자화를 시키므로써, 필요한 형태의 자제 분포를 얻는 것이다. 즉 그림 1(a)와 같이 자화벡터가 영구자석의 배열을 따라 연속적으로 회전하게 되면, Halbach 배열의 아래쪽 면에만 매우 강하고 정현적인 자제가 분포하게 된다. 그러나 자화벡터를 연속적으로 회전시키는 형태로의 자화 및 영구자석의 자극배치는 불가능하다. 따라서 이를 실제 전기기기에 적용하기 위해서는 그림 1(b),(c)와 같이 영구자석을 몇 개의 영구자석편으로 나누어 화살표 방향으로 자화를 시킨 다음 각각의 영구자석편을 일정한 회전자화벡터각도로 이루어 질 수 있도록 조립을 하게 된다.



(a) 이상적인 Halbach 배열



(b) 8개의 블록으로 이루어진 Halbach 배열



(c) 15개의 블록으로 이루어진 Halbach 배열

그림 1. Halbach 배열의 개념도

(화살표-자화방향벡터)

Halbach 배열에 의하여 자기회로를 구성하는 경우 기존방법에 의한 자기회로 구성법에 비해 기본자제가 약 1.4배정도 더 강하고, 더 정현적인 과형을 얻을 수 있으며 철심 없이 자로를 구성할 수 있는 등의 장점을 갖는다. 일반 전기기기의 경우에는 계자 및 전기자가 철심으로 구성되므로 철심 내에서는 자속이 변화하여 철손이 발생한다. 그러나 Halbach 배열을 응용하는 경우, 별도의 철심이 없이 계자를 구성하기 때문에 히스테리손이나 와전류손이 발생되지 않는 장점이 있다.

2.2. 해석적인 방법에 의한 특성방정식

여러개의 영구자석편으로 Halbach 배열을 하여 계자를 구성하는 경우에 발생하는 자계공간의 자속밀도 크기는 K. Halbach에 의하여 제시된 바와 같이 식(1), 식(2)로 표현된다. 즉

$|z| = r_1, |z| = r_2$ 의 두 개의 원으로 구성된 원통형태의 다극 자계인 경우 원통내부의 자속밀도는 식(3.26)과 같다. 즉 N 極双인 경우의 자계중의 자속밀도는

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

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

식(1), 식(2)는 영구자석의 Halbach 배열이 그림 1(a)와 같이 자화벡터가 연속적으로 회전하는 경우 이지만, 이를 실제 제작하여 응용할 때는 그림 1(b),(c) 같이 몇 개의 영구자석편을 조합을 하게 되므로 이를 고려하기 위하여 보정계수를 사용한다.

만일 $n > 0$ 인 경우,

$$B^*(z_0) = B_r \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z_0}{r_1}\right)^{n-1} \frac{n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{n-1}\right] K_n \quad (3)$$

$$n = N + \nu M \quad (4)$$

여기서 M 은 영구자석편의 개수, ν 는 존재하게 되는 공간 고조파 차수이다.

또한 식(3.3)에서의 계수 K_n 은 자석배열의 기하학적 구성을 위하여 결정되는 상수로 식(5)와 같다.

$$K_n = \frac{\sin[(n+1)\varepsilon\pi/M]}{(n+1)\pi/M} \quad (5)$$

여기서 ε 은 $M/2(N+1)$ 으로서 공간조고파와 관계되는데 일반적으로 1 이하가 된다.

2.3 유한요소법 해석

(1) 지배방정식

영구자석을 포함하는 정자계 시스템의 지배방정식을 도출하기 위한 일반적인 기본방정식은 다음과 같다. 즉 자속밀도 B 와 벡터포텐셜 A 와의 관계는

$$B = \nabla \times A \quad (6)$$

또한 자속밀도 B , 자화벡터 M , 자계의 세기 H 의 관계는

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 H + M \\ &= \mu_0 \mu_r H \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 μ_0 는 진공투자율 [H/m], μ_r 은 비투자율을

나타낸다.

또한 자성체에서의 외부전류 J_0 와 내부의 자화벡터에 의한 등가자화전류 J_m 에 의하여 자계 H 가 발생되므로 그 관계는 식(8)과 같다.

$$\nabla \times H = J_0 + J_m \quad (8)$$

여기서 등가 자화전류 J_m 과 자화벡터 M 과의 관계는 식(9)과 같다.

$$J_m = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times M) \quad (9)$$

따라서 식(8)은 식(7),(9)에 의하여 식(10)과 같아진다.

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu_0} (B - M) \right] = J_0 \quad (10)$$

따라서 영구자석을 포함하는 정자계 시스템의 지배방정식은 식(10)에 식(6)을 적용하면 식(11)과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times A - M) \right] = J_0 \quad (11)$$

2.4 해석결과

Halbach 배열을 응용하기 위한 영구자석은 네오디뮴 계열의 NdFeB로 그림 2와 같은 자기특성을 갖는다.

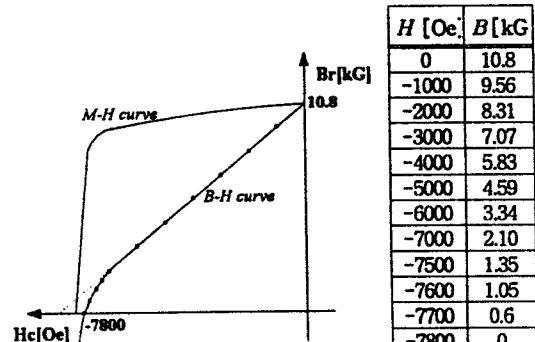


그림 2. NdFeB 영구자석(MQ30계열)의 감자특성

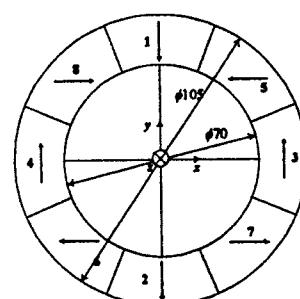
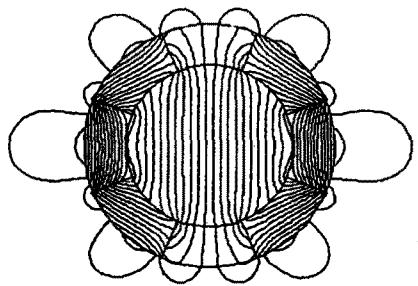


그림 3. 영구자석 Halbach 배열을 이용한 계자의 해석모델(2극)



(a) 자속분포

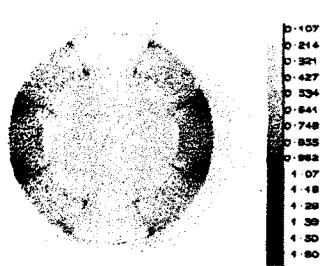


그림 4. Halbach 배열(2극)의 유한요소법에 의한 해석

그림 3은 영구자석 Halbach 배열을 이용하여 계자를 제작하기 위해 설계한 모델의 형상을 나타낸 것이다. 이것은 해석적인 방법을 통해 요구되는 내부자속밀도를 고려하여 설계된 것이다. 그리고 그림 4는 이 모델에 대한 유한요소해석을 수행한 결과이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 계자 내부에는 매우 균일한 2극의 자계가 형성됨을 알 수 있다.

식(2)에 의한 이론적인 내부자속밀도 값은 약 0.394 [T], 유한요소법에 의한 계산값은 0.35 [T]인데, 실제 Halbach 배열을 제작하여 계측한 값은 평균적으로 0.32~0.35 [T]를 나타내었다.

이중 축방향으로 전개하여 자속분포를 보았을 때의 이론적인 계산치 및 실제 계측치는 그림 5과 같다. 즉 각도에 따른 원주의 각 위치에서의 자속밀도값을 축방향으로 $z=2.5[\text{cm}]$, $z=5.0[\text{cm}]$, $z=7.5[\text{cm}]$ 의 각 위치에서 직경방향으로 중심으로부터 $r=1.5[\text{cm}]$, $r=2.5[\text{cm}]$, $r=3.5[\text{cm}]$ 의 위치에서 계산한 값과 실제 제작을 하여 계측한 값을 그래프로 나타낸 것이다. 이론적인 계산치 및 실제 계측치는 대체적으로 잘 일치하나, 중심에서 $r=3.5[\text{cm}]$ 인 곳인, 계자의 한쪽 표면에서는 자석 편의 접착부분이므로 그림 11에서 보는 바와 같이 실제 계측치는 매우 다르게 나타남을 볼 수 있다.

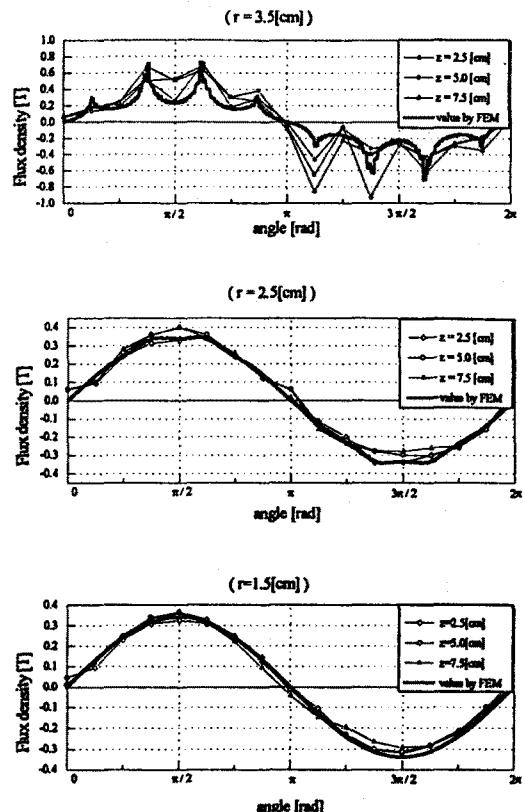


그림 5. Halbach 배열 내부자속밀도의 해석치 및 계측치 비교

3. 결론

본 논문에서는 새로운 영구자석 배열 방법인 Halbach 배열의 자기적인 특성을 해석하기 위하여 이론적인 특성식과 유한요소법에 의하여 계산된 결과를 비교검토하였다. 그 결과 K. Halbach이 제안한 바와 같이 영구자석편의 배열의 수와 자석편간의 자화방향벡터의 회전각도를 조정함으로써 요구되는 자극과 자계의 형태를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 현재는 초고속전동발전기의 계자를 설계 및 제작하여 응용하고 있다.

[참고문헌]

- [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"
- [3] David L. Trumper, Mark E. Willians, "Halbach Arrays in Precision Motion Control"