

## 고 에너지 밀도를 갖는 Halbach Planar Motor 특성해석

주 건 배\*, 이 동 엽, 김 규 탁  
 창원대학교 전기공학과

### The characteristics Analysis of Halbach Planar Motor which has a High Energy density

Jianpei Zhou\*, Dong-Yeup Lee, Gyu-Tak Kim  
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ.

**Abstract** - In this paper, a synchronous permanent magnet planar motor (SPMPM) with Halbach array is proposed for its high energy density. The magnetization and flux density distribution are obtained by magnet scalar potential; the characteristics such as inductance, back-EMF and thrust are evaluated. It can be concluded that the analysis of SPMPM with Halbach magnet array is credible and feasible.

#### 1. 서 론

X-Y 모터의 종류에는 일반 회전기와 마찬가지로 유도형, 펄스형, 동기기형 등이 있다. 펄스형 X-Y 모터는 일반 회전형 스텝모터의 단점인 진동, 소음 특성에 취약한 특성을 가지므로 고속, 고정밀 구동용 모터로 상용화에는 다소 무리가 있으며, 유도형 X-Y모터 또한 아직 초보적인 연구수준에 머물러있다. 영구자석을 이용한 동기기형 X-Y모터가 현재 평면 운동을 위한 구동용 모터로서 많은 연구가 진행되고 있으며 일부는 이미 상용화되고 있다[1,2].

영구자석을 이용한 X-Y 모터는 바둑판 무늬와 같은 형태로 자석의 N극과 S극을 번갈아 배치하고 코일은 X방향과 Y방향 코일을 따로 배치해서 구동되는 형태를 갖는다. 결국 X-Y 모터의 구동원리는 일반 단축용 선형모터와 같으나, X-Y 모터에서 가장 기본적인 것은 얼마만큼 자속밀도를 키우는가에 달려 있다고 해도 과언은 아니다.

따라서 본 논문에서는 높은 에너지밀도를 갖는 X-Y 모터의 설계를 위하여 Halbach배열을 시행한 X-Y모터를 제안하였다. Halbach 배열은 기존의 Asakawa배열법, Chitayat배열법과는 전혀 다른 자석 배열법으로서 x, y축으로 자화된 조각자석을 삽입하여 z방향 자속의 누설을 억제할 뿐만 아니라 공간효율성을 높일 수 있다. Halbach배열의 특성 해석을 위해 자기 스칼라포텐셜을 이용한 해석적 방법으로 자속밀도를 구하였으며, 이를 이용하여 발생력, 역기전력, 인덕턴스 특성을 계산하였다. 시작기의 실험치와 이론치를 비교함으로써 본 연구의 타당성을 입증하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문의 해석모델인 동기형 영구자석 평면전동기를 나타낸 것이며, 그림 2는 본 논문에서 제안한 영구자석의 Halbach배열이다. 그림 2에서 쪼갠 자석이 삽입되는 N극과 S극사이의 거리를  $r_1$ 로 나타내었다.

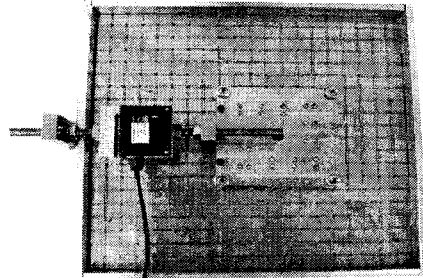


그림 1 동기형 영구자석 평면 모터

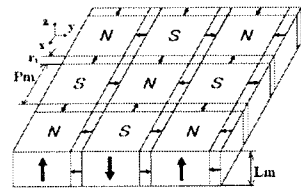


그림 2 Halbach을 적용한 영구자석 배열

##### 2.2 공간 고조파법을 이용한 특성 해석

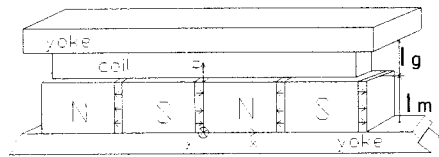


그림 3 해석 모델의 단면

본 논문에서는 SPMPM의 특성해석을 행하기 위하여 공간고조파법을 수행하였다. 공간고조파법으로 특성해석을 위하여 다음과 같은 가정을 두었다.

- ① 모든 해석영역은  $\pm x$ 방향,  $\pm y$ 방향으로 무한하며 주기성을 가짐
- ② 영구자석은  $\pm z$ 방향으로만 자화되어 있으며,  $\pm x$ 방향,  $\pm y$ 방향으로 주기적으로 분포
- ③ 철심의 투자율은 무한대이며 자기포화현상은 무시

그림 3은 해석 모델의 단면을 나타낸 것이며, 표 1은

본 연구에서 사용한 Halbach배열을 적용한 동기형 영구자석 평면 모터의 설계사양이다.

표 1. 설계 사양

분류	변수	기호	값	단위
영구자석	잔류자속밀도	$B_r$	1.3	T
	극간격	$P$	20	mm
	두께	$l_m$	10	mm
공극	거리	$l_{gm}$	1	mm
	두께	$L_c$	5	mm
코일	너비	$W$	8	mm
	길이	$d$	20	mm
	안쪽 길이	$W_c$	8.5	mm
	상당 턴수	$n$	600	

본 논문에서 해석모델의 자화는 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$\vec{M} = M_x \vec{x} + M_y \vec{y} + M_z \vec{z} \quad (1)$$

여기서,

$$M_x = -j \frac{B_r}{\mu_0} \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{l=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{kl} \cos(a_k r_1) \sin(a_l r_1) \exp[ja(kx + ly)]$$

$$M_y = -j \frac{B_r}{\mu_0} \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{l=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{kl} \cos(a_k r_1) \sin(a_l r_1) \exp[ja(kx + ly)]$$

$$M_z = -\frac{B_r}{\mu_0} \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{l=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{kl} \cos(a_k r_1) \sin(a_l r_1) \exp[ja(kx + ly)]$$

$$a_k = k \frac{\pi}{p}, \quad a_l = l \frac{\pi}{p}, \quad a = \frac{\pi}{p}$$

이다.

### 2.2.1 자속 밀도의 특성

공극의 자속 밀도는 식(2)로 계산할 수 있다.

$$B_{gz} = \frac{8B_r}{\pi^2} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{l=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{D_{kl}} \left\{ C_{kl} \times J + \frac{1}{kl} \cos(a_k r_1) \cos(a_l r_1) \right\} \times (\exp(\lambda_{kl} z) + \exp(2\lambda_{kl} l_{gm}) \exp(-\lambda_{kl} z)) \sin(a_k x) \sin(a_l y) \quad (2)$$

여기서,

$$C_{kl} = \frac{a}{\lambda_{kl}} \left( \frac{1}{\tanh(\lambda_{kl} l_k)} - \frac{1}{\sinh(\lambda_{kl} l_k)} \right)$$

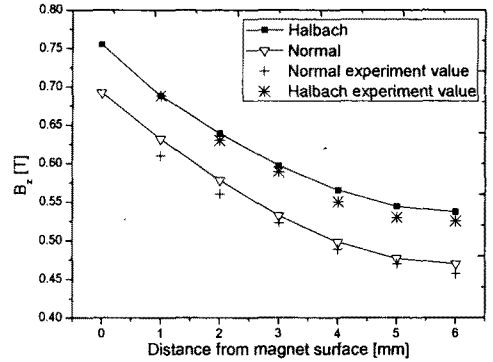
$$D_{kl} = \exp(\lambda_{kl} l_{gm}) \sinh(\lambda_{kl} l_g) \left( \frac{\mu_r}{\tanh(\lambda_{kl} l_k)} + \frac{1}{\tanh(\lambda_{kl} l_g)} \right)$$

$$J = \frac{1}{k} \cos(a_k r_1) \sin(a_l r_1) + \frac{1}{l} \cos(a_l r_1) \sin(a_k r_1)$$

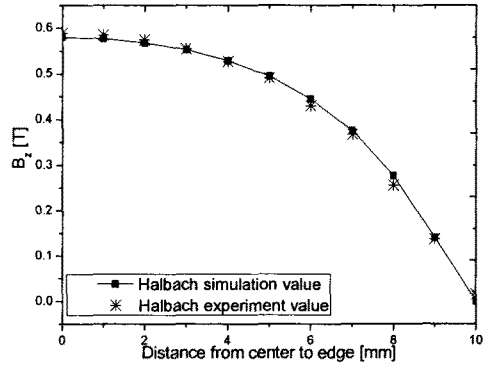
이다.

그림 4(a)는 영구자석 표면에서 z축 방향으로 거리에 따른 최대 자속밀도를 나타낸 것이다. 최대 자속 밀도는 Halbach을 취하지 않은 No Halbach모델에 비해서 Halbach모델이 14% 크게 나타났다. 그림 4(b)에 영구자석 표면에서 z축 방향으로 3.5[mm] 떨어진 공극에서 영

구자석 중심에서 가장자리까지(xy평면상)의 최대 자속밀도를 나타내었다. 그림 4(b)에서 알 수 있듯이 해석치와 실험치가 잘 일치하는 아주 양호한 결과를 얻을 수 있었다.



(a) 공극의 거리에 따른 최대 자속밀도



(b) 영구자석 중심에서 가장자리까지의 최대자속밀도

그림 4 최대 자속밀도 특성

### 2.2.2 쇄교 자속

전기자 코일과 쇄교하는 자속은 식(3)에 의하여 계산할 수 있다.

$$\varphi = \iint B_{gz} dx dy = \frac{-2A}{a_k a_l} (\cos(a_k(x_0 + p)) - \cos(a_k x_0)) \quad (3)$$

여기서,

$$A = \frac{16B}{\pi^2} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{l=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ C_{kl} \times J + \frac{1}{kl} \cos(a_k r_1) \cos(a_l r_1) \dots \right\} \times \frac{\sin(l_m \lambda_{kl}) \sin(\lambda_{kl} (l_g - l_s))}{\lambda_{kl} (l_g - l_s) \sin(\lambda_{kl} l_{gm})}$$

그림 5는 쇄교 자속 특성을 나타낸 것이다. Halbach모델의 최대 자속은 No Halbach모델보다 16.9[%], Chitayat모델보다 27.0[%], Asakawa모델에 비하여 53.8[%]향상 되었다. 기존 자석 배열 모델과 비교하여 월등한 쇄교 자속의 증가를 확인할 수 있었다.

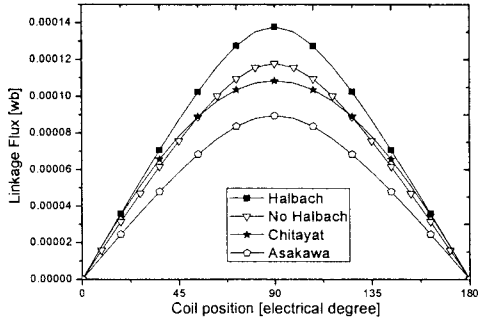


그림 5 쇠교자속

### 2.2.3 역기전력

1상당 코일에 대한 역기전력의 계산은 식(4)와 같다.

$$E = -N_t \frac{d\phi}{dt} = -\frac{2aN_t}{a_l} (\sin(a_k(x_0 + p)) - \sin(a_k x_0)) \quad (4)$$

그림 6은 역기전력특성을 나타내었다. Halbach모델의 역기전력은 No Halbach모델과 비교하여 14.1[%], Chitayat모델 보다 25.3[%], Asakawa모델 보다 53[%]가 높았다.

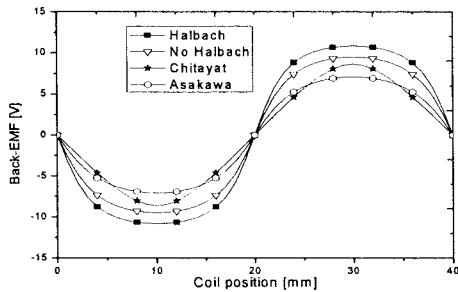


그림 6 역기전력

### 2.2.4 인덕턴스

인덕턴스는 다음 식(5)를 이용하면 간단하게 계산할 수 있다.

$$L = \frac{N_t \phi}{i} = \frac{-2N_t A}{i a_k a_l} (\cos(a_k(x_0 + p)) - \cos(a_k x_0)) \quad (5)$$

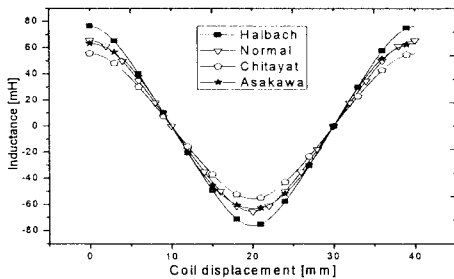


그림 7 인덕턴스

그림 7은 인덕턴스 특성을 나타내었다. Halbach모델의 인덕턴스는 No halbach모델의 인덕턴스 보다 16.6 [%], Chitayat모델 보다 21.0[%], Asakawa 모델 보다 37.3[%]

향상되었다.

### 2.2.4 발생력

코일이 x 방향으로 운전할 때의 발생력은 식(6)에 의하여 계산된다.

$$F_x = -\frac{N_t}{W_c} \int_0^{w_c} f_x(r+t) dt$$

$$= \frac{-12N_t A}{w_c a_k a_l} \sin(a_k y) \sin(a_k \frac{d}{2}) \sin(a_k (\frac{w}{2} + 1 + \frac{w_c}{2})) \sin(\frac{a_k w_c}{2})$$

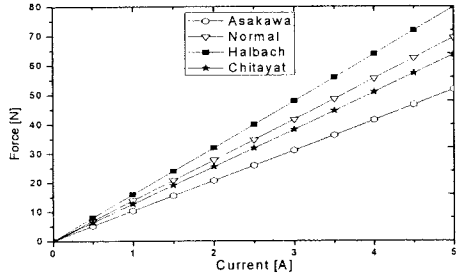


그림 8 발생력

그림 8은 전류 변화에 따른 발생력 특성이다. Halbach 모델의 발생력은 No halbach모델의 발생력보다 16.6[%], Chitayat모델보다 25.4[%], Asakawa모델 보다 54.1[%]높게 나타났다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 SPMPM의 쇠교 자속의 향상을 위하여 영구자석의 Halbach배열을 제안하였다. Halbach모델은 조각자석의 삽입으로 인하여 인접해있는 자석 사이의 누설 자속을 최소화시킴으로서 Z방향으로의 자속밀도를 향상시킨 모델이다. 기존모델과 Halbach모델의 해석을 위해 스칼라 포텐셜을 이용한 해석적 방법을 사용하였다. 자속밀도는 전기기기의 특성을 결정하는 주요한 요소로서 자속밀도의 향상으로 발생력, 역기전력, 쇠교자속, 인덕턴스등의 특성이 크게 향상되었으며 결과를 실험을 통하여 입증하였다.

따라서, 본 논문에서는 동일한 크기의 기기에서 공간 효율성이 크고 동일한 영구자석을 이용한 경우 에너지밀도를 크게 향상시킨 Halbach배열법을 제안하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01 03) 지원으로 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] H. S. Cho and H. K. Jung, "Analysis and design of synchronous permanent-magnet planar motors," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.17, pp.492-299, Dec.2002.
- [2] J. Y. Cao, Y. Zhu, J. S. Wang, W.S. Yin, and G. H. Duan, "A novel synchronous permanent magnet planar motor and its model for control applications," *IEEE Trans. Magn.*, vol.41, pp.2156-2163, June.2005.