

새로운 영구자석 배열에 의한 X-Y 평면 모터의 특성해석

황 예\*, 이 동 엽, 김 규 탁  
 창원대학교 전기공학과

The Characteristics Analysis of X-Y Planar Motor  
 with New Permanent Magnet Array

Rui Huang\*, 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 new permanent magnet array is proposed and the magnetic field distribution is obtained analytically by using magnetic scalar potential. Compared to those of Asakawa, Chitayat and experimental data, the superiority and feasibility of the novel magnet array are verified. The characteristics of the synchronous permanent magnet planar motor with this novel magnet array such as inductance, back-EMF, and force are calculated by analytical method.

1. 서 론

2차원 운동을 할 수 있는 동기형 영구자석 평면 전동기(SPMPM)와 같이 영구자석을 사용하는 전동기의 경우 계자역할을 하는 영구자석에 의한 자속밀도는 기기의 특성을 결정하는 가장 중요한 역할을 한다. 그러므로 X-Y 모터에서 가장 기본적인 것은 얼마만큼 자속밀도를 높게 하느냐에 달려 있다고 해도 과언은 아니다. 자속밀도는 영구자석의 배열과 밀접한 관계가 있으며, 기존 배열법으로는 Asakawa배열법, Chitayat배열법이 있다. Asakawa배열은 기기면적의 50%밖에 영구자석을 배열할 수 없으며, Chitayat배열은 마름모꼴로 N,S극의 영구자석을 맞대어 번갈아 배열하는 방법이다[1,2].

본 논문에서는 기존 배열법의 단점을 보완하고 성능을 높일 수 있는 새로운 자석배열법을 제안하고 기존 배열법과 특성을 비교하였다. 제안된 새로운 배열법은 N,S극을 번갈아가며 수평과 수직방향으로 배열하고 인접한 극사이에 발생하는 누설자속을 감소 시키기 위하여 극사이가격을 두었다. 제안한 배열의 특성 해석을 위해 자기스칼라포텐셜을 이용한 해석적 방법으로 구하여진 자속밀도를 이용하여 코일에 의한 힘, 역기전력, 인덕턴스를 구하였다[3]. 기존 배열법과 제안된 배열법을 특성을 비교하므로써 본 연구에서 제안한 새로운 배열법이 우수한 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

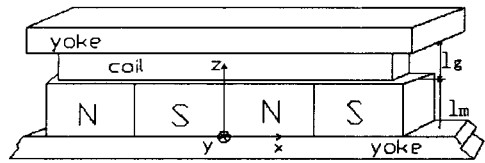
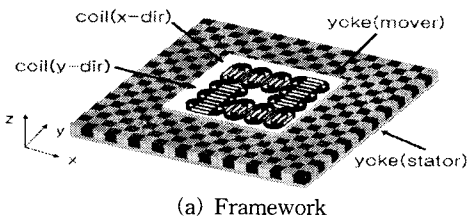


그림 1 동기형 영구자석 평면 전동기

그림 1은 시작기인 SPMPM의 Framework와 해석 단면을 나타낸 것이다. 그림 1(a)에서 알 수 있는 바와 같이 SPMPM의 전체 형상에서 가동자에 4개의 코일쌍이 존재를 하게 된다. 2개의 코일쌍은 X-축 운동에 사용되며, 나머지 2개의 코일쌍은 Y-축 운동에 사용된다. 그림 2는 Asakawa, Chitayat 및 본 연구에서 제안한 영구자석의 배열을 나타낸 것이다.

표 1은 시작기의 설계 사양을 나타낸다.

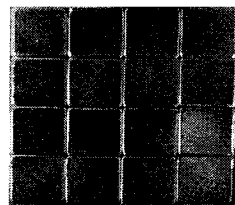
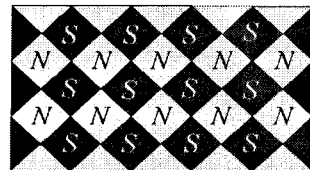
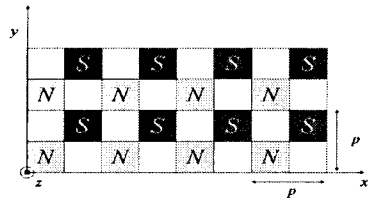


그림 2 여러 가지 영구자석 배열

표 1. 시작기의 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	

## 2.2 해석적 방법을 통한 특성 해석

자화는 Z방향 성분만 존재하고 Z방향으로 일정하다고 가정 하면 다음의 식으로 표현할 수 있다. 식(1)은 Asakawa배열의 자화이고 식(2)는 Chitayat배열의 자화, 식(3)은 제안된 배열의 자화이다.

$$\vec{M}_z = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \frac{B_r}{\mu_0} \left[ \sin(k \frac{2\pi}{P} x) + \sin(k \frac{2\pi}{P} y) \right] \quad (1)$$

$$\vec{M}_z = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{l=1,3,\dots}^{\infty} \frac{16}{\pi^2} \frac{B_r}{\mu_0} \frac{1}{kl} \sin \left[ k \frac{\pi}{P} (x+y) \right] \sin \left[ l \frac{2\pi}{P} (y-x) \right] \quad (2)$$

$$\vec{M}_z = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{l=1,3,\dots}^{\infty} \frac{16}{\pi^2} \frac{B_r}{\mu_0} \frac{1}{kl} \sin(k \frac{\pi}{P} x) \sin(l \frac{2\pi}{P} y) \quad (3)$$

영구자석에 의한 공극의 자계 계산시 자기스칼라퍼텐셜  $\phi$ 를 계변수로 두면 각 영역에서 식(4), (5)와 같은 지배방정식을 유도할 수 있다. 자기스칼라퍼텐셜을 계변수로 하면 영구자석의 자화분포를 그대로 이용할 수 있어 계산이 편리해진다.

$$\nabla^2 \Phi_I = 0 \quad (\text{공극 영역}) \quad (4)$$

$$\nabla^2 \Phi_{II} = \frac{\nabla \cdot \vec{M}}{\mu_r} \quad (\text{영구자석 영역}) \quad (5)$$

위의 식을 경계조건을 이용하여 풀면 다음 식(6), (7)과 같이 자기 스칼라 포텐셜을 계산 할 수 있다.

$$\Phi_{Ik} = A_k [\exp(a_k z) - \exp(2a_k(l_g + l_m)) \exp(-a_k z)] \quad (6)$$

$$\Phi_{IIk} = B_k [\exp(a_k z) - \exp(-a_k z)] \quad (7)$$

여기서,

$$A_k = -\frac{1}{2} \frac{M_k}{a_k \mu_r \sinh(a_k l_g) \cosh(a_k l_m) + \cosh(a_k l_g) \sinh(a_k l_m)},$$

$$B_k = \frac{1}{2} \frac{M_k}{a_k \mu_r \sinh(a_k l_g) \cosh(a_k l_m) + \cosh(a_k l_g) \sinh(a_k l_m)},$$

$a_k = k \frac{2\pi}{P}$ 이다.

스칼라 포텐셜과 자속밀도의 관계식을 구하면 식(8)과 같이 자속밀도를 쉽게 구할 수 있고 자속밀도는 기기의 발생력, 역기전력, 쇄교자속 등 기기의 특성을 계산하는

가장 기본이 되는 수식이다.

$$B_{gz} = \mu_0 H_{gz} = -2\mu_0 \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{l=1,3,\dots}^{\infty} B_{kl} \lambda_{kl} e^{\lambda_{kl} l_{gm}} \times \cosh(\lambda_{kl}(z - l_{gm})) \sin(a_k x) \sin(a_l y) \quad (8)$$

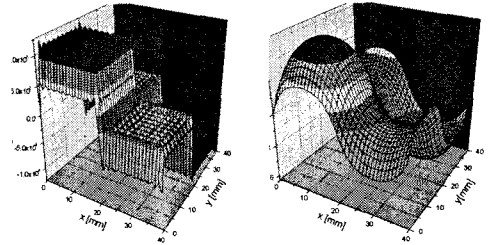
여기서,

$$B_{kl} = -\frac{M_{kl} \sinh(-\lambda_{kl} l_{gm}) \sinh(\lambda_{kl} l_m)}{2\lambda_{kl} \operatorname{sch}_{kl}}$$

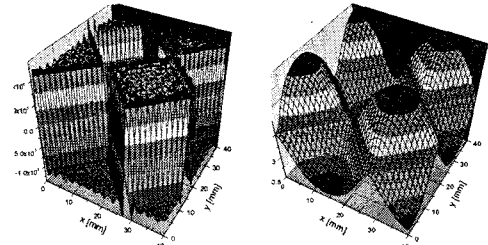
$$\operatorname{sch}_{kl} = \mu_r \sinh(\lambda_{kl} l_g) \cosh(\lambda_{kl} l_m) + \cosh(\lambda_{kl} l_g) \sinh(\lambda_{kl} l_m)$$

$$l_{gm} = l_g + l_m, \quad \lambda_{kl} = \sqrt{a_k^2 + a_l^2}, \quad a_k = k \frac{\pi}{P}, \quad a_l = l \frac{\pi}{P}$$

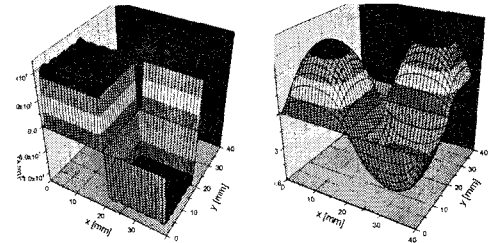
그림 3은 Asakawa, Chitayat, 제안된 모델에 따른 자화분포와 공극(영구자석 표면위 3mm)에서의 자속밀도 분포도 이다.



(a) Asakawa



(b) Chitayat



(c) 제안된 모델

그림 3 자화 분포와 자속밀도 분포

그림 4는 자석 중심에서 표면에서 공극의 거리에 따른 최대 자속 밀도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 해석결과와 실험치가 잘 일치하여 해석결과와 타당성을 입증할 수 있었다.

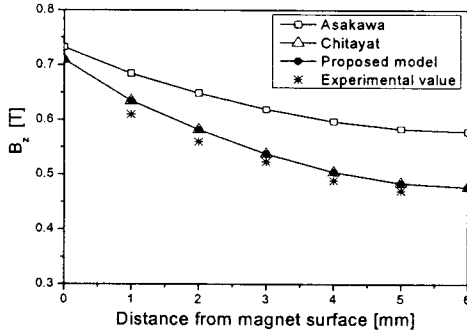


그림 4 공극의 거리에 따른 최대 자속밀도

가동자를 구동시키기 위한 발생력중 X축 방향으로의 힘은 식 (9)와 같이 계산할 수 있다. 전기가 전류에 변화에 따른 발생력을 계산하여 그림 5에 나타내었다.

$$F_x = \frac{-12N_s I T}{w_c a_i a_k} \sin(a_i y) \sin(a_i \frac{d}{2}) \sin(a_k (\frac{w}{2} + \frac{w_c}{2})) \sin(\frac{a_k w_c}{2}) \quad (9)$$

여기서

$$T = \frac{16B_r(l_g - l_s)}{\lambda_{k1} a_i a_k p^2} \sinh(\lambda_{k1} l_m) \sinh(\lambda_{k1}(l_g - l_s)) \sinh(\lambda_{k1}(l_m + l_g)) \quad (10)$$

이다.

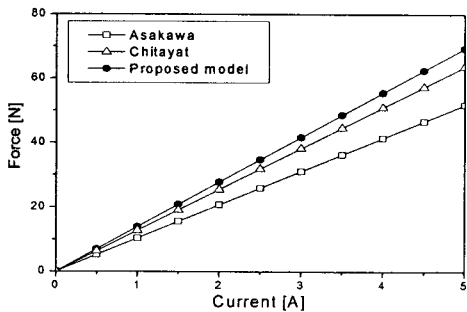


그림 5 발생력

제안모델의 발생력이 Asakawa모델과 비교하여 33.4 [%]증가하였고, Chitayat모델과 비교하면 9.1[%] 증가하였다.

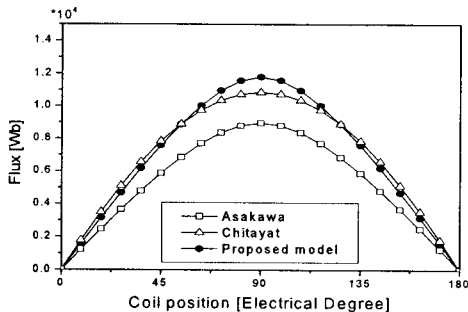


그림 6 쇄교자속

그림 6은 쇄교자속을 나타낸 것이다. 그림 6에서 알수 있듯이 제안모델의 쇄교자속량이 Asakawa모델과 비교하여 31.6[%] 증가하였고, Chitayat모델과 비교하면 8.7[%] 증가하였다.

그림 7은 역기전력 특성을 나타낸다. 제안모델의 역기전력은 Asakawa모델과 비교하여 34.1[%] 증가하였고, Chitayat모델과 비교하면 9.8[%] 증가하였다.

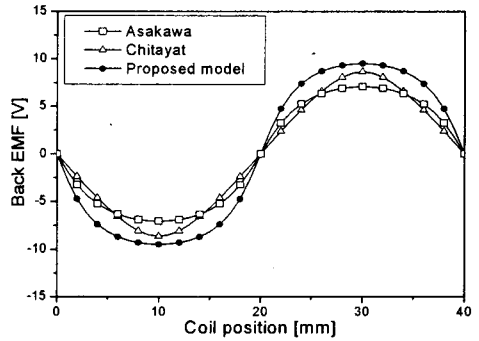


그림 7 역기전력특성

### 3. 결 론

본 논문에서는 동기형 영구자석 평면 전동기(SPMP M)에서 기존에 알려진 배열법과는 다른 공간의 효율성과 성능을 향상시키기 위한 새로운 배열법을 제안하였다. Asakawa, Chitayat, 제안 모델의 특성 해석을 위해 해석적 방법을 사용하였고, 자속밀도, 발생력, 역기전력, 쇄교자속 등 비교하였다. 이론치와 실험치가 잘 일치하는 양호한 결과를 도출할수 있었다.

영구자석 표면에서의 거리에 따른 자속밀도의 최대치는 제안된 모델이 Asakawa모델보다 작은값이나 이것은 영구자석사이의 거리가 짧아서 누설되는 자속의 양이 Asakawa모델보다 많기 때문이다. 하지만, 전체적인 쇄교자속의 양은 영구자석의 사용량이 2배이기 때문에 제안된 모델이 높은 에너지를 가지게 된다.

#### 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. 492-499, Dec. 2002
- [2] J. Cao, Y. Zhu, J. Wang, W. Yin and G. Duan, "Analysis and Comparison of Two-Dimensional Permanent-Magnet Arrays for Planar Motor", *IEEE Trans. Magn.*, vol.40, p p. 3490-3494, Nov. 2004.
- [3] Ki-Chae Lim, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "The Novel Technique Considering Slot Effect by Equivalent Magnetizing Current", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 3691-3693, 1999.