

Halbach Array를 적용한 SPMPM의 성능 향상 I

주 건 배*, 정 수 권, 이 동 업, 김 규 탁
 창원대학교 전기공학과

The Improvement of performance for SPMPM with Halbach Array I

Jianpei Zhou, Dong-Yeup Lee, Gyu-Tak Kim
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - In this paper, a synchronous permanent magnet planar motor (SPMPM) with Halbach array is proposed for its performance improvement. The magnetization and flux density distribution are obtained by magnet scalar potential; the characteristics such as 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

Planar Motor의 종류에는 일반 회전기와 마찬가지로 유도형, 펄스형, 동기형 등이 있다. 펄스형 Planar Motor는 일반 회전형 스텝모터의 단점인 진동, 소음 특성에 취약한 특성을 가지므로 고속, 고정밀 구동용 모터로 상용화에는 다소 무리가 있으며, 유도형 Planar Motor 또한 아직 초보적인 연구수준에 머물러있다. 반면에 영구자석을 이용한 동기기형 Planar Motor는 현재 평면 운동을 위한 구동용 모터로서 많은 연구가 진행되고 있으며, 일부는 이미 상용화되고 있다[1,2].

영구자석을 이용한 Planar Motor는 바둑판무늬로 영구자석의 N극과 S극을 번갈아 배치하고 코일은 X방향과 Y방향 코일을 따로 배치해서 구동되는 형태를 갖는다. 결국 Planar Motor의 구동원리는 일반 단방향 리니어 모터와 같다.

본 논문에서는 높은 에너지 밀도를 갖는 Planar Motor의 설계를 위하여 Halbach배열을 시행한 Planar Motor를 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.

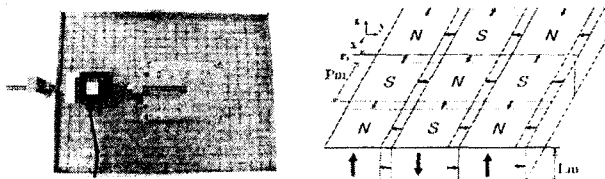
Halbach배열 Planar 모터의 특성 해석을 위해 자기 스칼라 포텐셜을 이용한 해석적인 방법을 이용 자속밀도를 구하였으며, 이를 이용하여 역기전력, 발생 추력 특성 등을 계산하였다. 이때, 정확한 발생 추력을 계산하기 위해서는 수직력에 의한 마찰력의 검토가 필수적이다. 일반적으로, 단방향 리니어 모터는 LM가이드에 의해 지지·안내 된다. LM가이드는 마찰력을 저감시키기 위하여 내부가 볼 베어링을 삽입하여 마찰력을 최소화 시킨다. 그러나 Planar Motor에서는 가동자가 자유로운 2차원 평면운동을 해야 하므로 LM가이드를 사용할 수 없다. 따라서 Planar Motor는 일반적으로 볼 베어링을 가동자의 아래쪽에 설치하여 지지하는 형태를 가진다. 이 때문에 수직력에 의한 마찰력이 가동자에 크게 작용하게 되므로 수직력에 대한 고찰이 선행되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 발생 추력을 향상시키기 위해서 Halbach 배열 Planar Motor를 설계·제작하였으며, 역기전력과 발생 추력 등을 이론치와 실험치를 비교함으로써 Planar Motor에서 수직력이 가동자의 운동에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1에 본 논문의 해석모델인 SPMPM과 시작기에 적용한 Halbach 배열을 도식적으로 나타내었다. Halbach 배열 그림에서 조각 자석이 삽입되는 N극과 S극사이의 거리를 r_1 로 나타내었다.



〈그림 1〉 SPMPM의 시작기와 Halbach 배열

표 1은 본 논문에서 해석한 Halbach배열을 적용한 SPMPM의 설계사항을 나타낸 것이다.

〈표 1〉 시작기의 설계사항

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 공간 고조파법을 이용한 특성 해석

본 논문에서는 SPMPM의 특성해석을 하기 위하여 공간 고조파법을 적용하였다. 공간 고조파법은 특성해석을 위하여 몇 가지의 가정을 하는 것이 필수적이다. 즉 특성해석에 있어서 어느 정도의 오차를 포함하는 단점이 있다. 그러나 FEM등과 같은 수치해석법을 이용한 특성 해석보다 계산 시간이 아주 빠른 장점이 있어 전기기기의 초기 설계 시에 많이 적용된다.

먼저, 공극의 자속 밀도는 식(1)로 계산할 수 있다.

$$B_{gz} = \frac{8B_r}{\pi^2} \sum_{k=1,3,5,\dots} \sum_{l=1,3,5,\dots} \frac{1}{D_{kl}} \left\{ C_{kl} \times J + \frac{l}{kl} \cos(a_k r_1) \cos(a_k r_1) \right\} \times (\exp(\lambda_{kl} z) + \exp(2\lambda_{kl} l_{gm}) \exp(-\lambda_{kl} z)) \sin(a_k x) \sin(a_l y) \quad (1)$$

여기서,

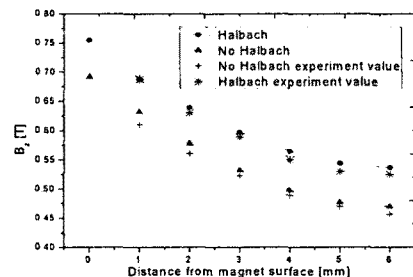
$$C_{kl} = \frac{a}{\lambda_{kl}} \left(\frac{1}{\tanh(\lambda_{kl} l_k)} - \frac{1}{\sinh(\lambda_{kl} l_k)} \right)$$

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

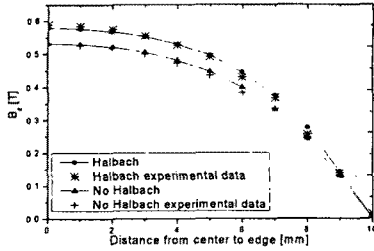
$$J = \frac{1}{k} \cos(a_k r_1) \sin(a_k r_1) + \frac{1}{l} \cos(a_l r_1) \sin(a_l r_1)$$

이다.

그림 2(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 2(b)에 영구자석 표면에서 z축 방향으로 3.5[mm] 떨어진 공극에서 영구자석 중심에서 가장자리까지(x-y평면상)의 최대 자속밀도를 나타내었다. 그림 2(b)에서 알 수 있듯이 해석적인 방법을 통한 이론치와 실제 실험치가 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) 공극의 거리에 따른 자속밀도



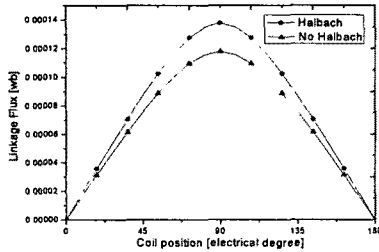
(b) 영구자석 중심에서 가장자리까지의 자속밀도
 <그림 2> 자속 밀도 특성

전기자 코일과 쇄교하는 자속은 식(2)에 의하여 계산 할 수 있다.

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

$$A = \frac{16B}{\pi^2} \sum_{k=1,3,5} \sum_{l=1,3,5} \left\{ G_{kl} \times J + \frac{1}{kl} \cos(a_k r_1) \cos(a_k r_1) \dots \right\} \\ \times \frac{\sin(l_m \lambda_{kl}) \sin(\lambda_{kl}(l_g - l_s))}{\lambda_{kl}(l_g - l_s) \sin(\lambda_{kl} l_{gm})}$$

그림 3은 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 있다.

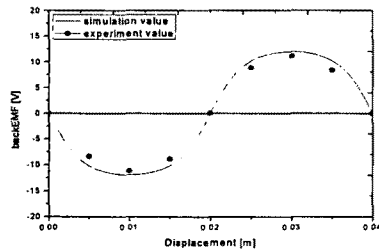


<그림 3> 쇄교 자속

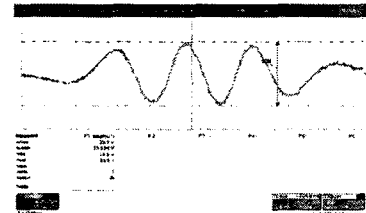
한 상당 코일에 대한 역기전력의 계산은 식(3)과 같다.

$$E = -N_i \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{2a N_i}{a_l} (\sin(a_k(x_0 + p)) - \sin(a_k x_0)) \quad (3)$$

그림 4(a)는 Halbach 모델에 대한 역기전력의 이론치와 실험치를 비교하였고, 그림 4(b)는 실제 측정된 역기전력 파형을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 해석적인 방법을 통한 이론치의 피크값은 11.9[V]이고 실험치의 피크값은 11.1[V]로 나타났다. 이론치와 실험치가 잘 일치하는 만족스러운 결과를 얻었다.

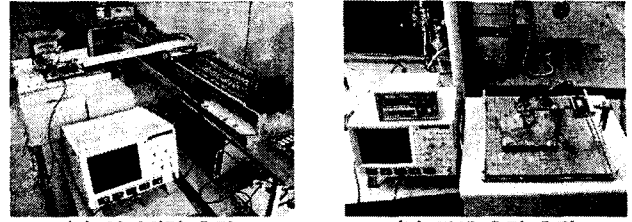


(a) 이론치와 실험치의 비교



(b) 역기전력 측정 파형 (1[m/s] 구동 시)
 <그림 4> 역기전력 특성

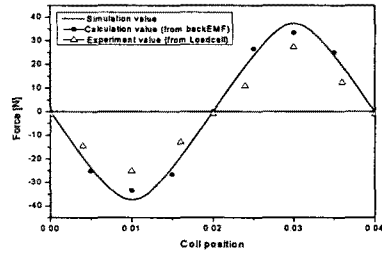
역기전력 측정은 SPMPM과 구동용 선형 전동기를 결합하여 구동용 선형 전동기를 1[m/s]로 운전할 때 한 상의 코일에서 발생하는 역기전력 파형을 오실로스코프를 통해 측정 하였고, 발생 추력은 로드셀을 가동자와 결합하여 고정시켜 놓은 상태에서 DC전류를 가변시키면서 발생 추력을 측정하였다. 그림 5에 실제 실험 장비와 방법을 나타내었다.



(a) 역기전력 측정 (b) 발생 추력 측정
 <그림 5> 역기전력과 발생추력 측정 장비

한편, 발생 추력은 식(4)에 의하여 계산할 수 있다.

$$F_x = \frac{N_i}{W_c} \int_0^{w_i} f_x(r+t) dt \quad (4) \\ = \frac{-12N_i I A}{w_c a_k} \sin(a_k y) \sin(a_k \frac{d}{2}) \sin(a_k (\frac{w}{2} + 1 + \frac{w_c}{2})) \sin(\frac{a_k w_c}{2})$$



<그림 6> 발생 추력 특성

그림 6은 가동자의 위치 변화에 따른 발생 추력 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 해석적인 방법을 통한 이론치의 피크값은 37.4[N]이고 실제 측정된 역기전력 상수에 의한 추력의 계산치는 33.3[N]이다. 그러나 로드셀을 이용하여 측정된 실제 발생 추력은 이보다 작은 27.3[N]으로 측정되었다. 즉, 실측한 역기전력을 이용하여 계산한 추력보다 로드셀에 의해 실측한 추력이 6[N] 작게 측정되었다. 이는, 실험시의 오차도 포함되었겠지만 가장 큰 원인은 수직력에 의한 마찰력이 크게 작용하였기 때문이다. 따라서 발생 추력을 향상시키기 위해서는 수직력에 의한 마찰력을 최소화시켜야 됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 SPMPM의 발생 추력의 향상을 위하여 영구자석의 Halbach배열을 제안하였다. Halbach모델은 조각자석의 삽입으로 인하여 인접해 있는 영구자석 사이의 누설 자속을 최소화함으로써 Z 방향으로의 유효 자속밀도를 향상시킨 모델이다. 공극자속밀도가 기존의 배열법에 비해 12.2[%] 증가하였으며 이를 이용하여 역기전력 및 발생 추력을 비교한 결과 기기의 제반 특성이 크게 향상되었으며 실험을 통하여 본 논문의 타당성을 입증하였다.

특히, Planar 모터에서는 수직력이 마찰력으로 크게 작용하여 발생 추력을 저하시키는 가장 큰 원인을 확인하였다. 수직력에 의한 마찰력의 최소화에 대한 연구는 차후의 과제로 삼겠다.

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

[참 고 문 헌]

[1] 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.
 [2] 주 건 배, 이 동 업, 김 규 탁, "고 밀도 에너지를 갖는 Halbach Planar Motor의 특성해석", *KIEE 춘계학술대회 논문집*, pp. 127~129, 2006.