

**Halbach Array를 적용한 추진력 및 부상력 동시제어용 Planar Motor의 해석적 기법을 통한 정밀 특성 해석**

곽상엽, 정상용, 정현교  
서울대학교 전기역학연구소

**Accurate Characteristic Analysis of Halbach-Arrayed Planar Motor for Simultaneous Control of Thrust and Normal Force through Analytic Approaches**

Sang-Yeop Kwak, Sang-Yong Jung, Hyun-Kyo Jung  
Seoul National University, Electromechanics Laboratory

**Abstract** - 본 논문에서는 해석적 기법을 적용하여, 추진력과 부상력을 동시 제어하는 Planar Motor의 정밀 특성 해석을 나타내었다. 특히, 본 해석 모델은 가동자의 요크를 제거하기 위한 Halbach Array를 적용하였으며, 이에 대한, 정밀한 특성 해석을 위해 공간고조파 해석법도 제안한다. 또한, 해석해 검증에 위하여 유한 요소해석법에 의한 결과와 비교 분석을 하며, 이를 토대로 한 해석 모델의 동작 특성을 살펴본다.

1. 서 론

Planar Motor는 평면상에서 두 방향의 운동을 하도록 설계된 전기기기로서, 최근 여러 산업 분야에서 그 쓰임이 널리 알려져 왔다. 특히 최근에는, 고정밀 제어를 함께 채택하여 비접촉 운전이 가능하게 됨으로써, 분진없는(Particle Free) 환경에서의 응용이 가능해졌다. 이 경우, 정밀한 제어 및 구동이 요구되는데, 본 해석 모델에서는 2차원 평면 추진력과 수직력을 동시에 발생시키면서 제어시키는 방식을 채택하였다. 즉, 선형기기 운전시, 추진력과 수직력은 일정한 전기각 차이(90도)로 발생하게 되는데, 부상력과 추진력이 동시에 발생하는 지점에서 운전하면서, 정밀 제어하는 시스템이다. 특히, 본 모델에서는 가동자를 Halbach Array로 채택하였는데, 이는 코어를 사용하지 않으므로써 가동자의 중량을 저감할 수 있었으며, 동시에 중량당 출력 밀도(Power Density)를 높일 수가 있다.

본 논문에서는 이러한 일반적인 자화 분포를 지니는 모델을 2차원 해석적 기법인 공간고조파 해석(Space Harmonic Method)을 도입하여, 공극을 비롯 여러 영역에서의 자속 분포와 특성값을 도출하였으며, 이에 대한 결과의 타당성을 유한요소해석 결과와의 비교를 통하여 이루었다. 특히, 자석배열 양단부에서 나타나는 누설 자속 효과(fringing effect)도 함께 검토하였으며, 이에 따른 동작 특성도 살펴본다. 또한, 인가된 전류에 따른 발생하는 추진력과 수직력의 정성적 분포와 정량적 값의 변화 등을 유도하여 정밀한 위치 제어용 Planar Motor의 정확한 운전을 예측할 수가 있다 [1]-[4].

본 논문에서는 기존의 집중회로 해석적 기법이 아닌, 정밀한 해석적 기법을 바탕으로 일반적인 자화분포를 지니는 Halbach array의 자기적 특성을 매우 정확하게 유도하였으며, 이를 바탕으로 정밀한 추진력과 부상력 제어용 Planar Motor의 동작 특성도 함께 살펴볼 수 있다.

2. 2차원 Planar Motor

일반적으로 2차원 Planar Motor는 평면상에서 한 가동자가 두 축 운동을 하는 기기를 의미하는데, 이는 여러 다양한 자석의 배열을 통해서, 자석과 코일 분포 간의 상호 작용에 의해 이루어진다. 그림 1에서는 개발된 2차원 Planar Motor의 개략도를 나타내었는데, 한 가동자 내에 4개의 코일부가 서로 엇갈리게 배치되어 있

어, 운동 방향별로 코일부 2개씩 힘을 발생시키게 된다. 최근, 정밀 운전을 요구하는 시스템, 특히 분진없는 환경내에서의 운전에서는 비접촉 부상식이 많이 요구가 되는데, 이를 위해 본 연구 모델에서는 가동자와 고정자의 요크를 제거하였으며, 대신, 코일부를 고정자로 하면서, 가동자를 Halbach Array된 영구 자석부로 대체하였다. Halbach Array 적용은 기본적으로 요크를 제거함으로써, 가동자의 중량을 저감할 수 있으며, 동시에 외부 누설 자속 차단 효과도 기대할 수가 있다. 본 연구에서 적용된 Planar Motor는 이러한 구조 하에서 추진력과 부상력 동시 제어용으로 사용되며, 힘의 발생 분포가 매우 이상적이기 때문에 정밀한 위치 및 속도 제어가 가능하게 된다.

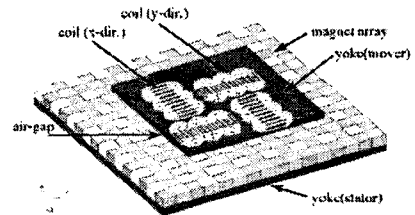


그림 1. 2차원 Planar Motor

3. 정밀 해석해 도출

3.1 공간고조파 해석법

본 연구에서는 기존에 개발된 공간고조파 해석법에서 영구자석을 Halbach Array 모델로 변환하여 적용하였다. 적용된 공간고조파법은 다중층영역에서의 지배방정식의 해를 계산하는 과정에서 푸리에 급수 전개를 적용하여 도출하는 방식으로, 근사화된 결과가 아닌 실제 구조가 인가되어 좀더 정밀한 특성을 기대할 수가 있다. 식 (1)은 각 영역별 지배방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J(x) \quad (1)$$

지배방정식 (1)에서  $J(x)$ 는 영구자석의 경우엔 등가 자화 전류 성분, 전기자 코일의 경우엔 전류 밀도에 해당하며, 해석해의 주기성을 고려한 모델링이 필요하다.

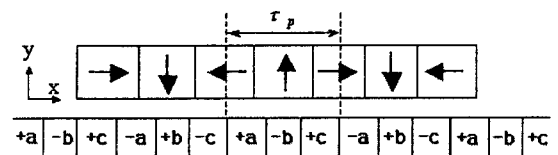


그림 2. Halbach Array를 적용한 해석 모델

그림 2.에서는 개략적인 해석 모델을 나타내었는데, 우

선 Halbach된 영구자석의 경우, 2차원 자화 세기 분포를 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M = M_x \hat{x} + M_y \hat{y} \quad (2)$$

이때, 식 (1)에 적용될 등가 자화 전류는 다음과 같다.

$$J_m \hat{z} = \nabla \times M = \frac{\partial M_x}{\partial x} \hat{z} = \frac{n\pi}{\tau_e} H_c \sum_n a_n \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x \hat{z} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } a_n = \frac{2}{\tau_e} \int_{-\frac{\tau_e}{2}}^{\frac{\tau_e}{2}} (\pm) H_c \cos \frac{n\pi}{\tau_e} x dx,$$

$H_c$ : 자석의 coercivity [A/m]

이를, 식 (1)을 통해 그림 2.의 공극 및 자석 등, 각 영역에 적용하면 식 (4)와 같은 일반해가 유도된다.

$$A_m(x) = \mu \sum_n (A_n e^{nK_e x} + B_n e^{-nK_e x} + \frac{\tilde{J}_m}{n^2 K_e^2}) \sin nK_e x \quad (4)$$

여기서,  $K_e = \frac{n\pi}{\tau_e}$ ,  $\tilde{J}_m$ :  $J_m(x)$ 의 절대값 크기

식 (3)과, (4)에 나타난  $\tau_e$ 는 수정된 반파장으로서, 주기적인 특징이 있는 푸리에 급수 전개에서 자석의 제한 길이를 표현하기 위하여 도입되었는데, 그 값은 충분히 큰 값이어야 하며, 동시에 정밀도를 위해 고조파 차수 및 식 (3)에서의 적분 영역도 무척 커야한다. 자기 벡터 포텐셜 값  $A_m(x)$ 에서 공극자속밀도 값을 유도할 수가 있는데, 본 모델의 경우 식 (5)를 통해 유도된다.

$$B (= B_x \hat{x} + B_y \hat{y}) = \nabla \times A + \mu_0 H_0 \quad (5)$$

여기에서,  $H_0$ 는 Halbach Array 특성을 나타내며, 이 성분이 없는 일반적인 식에서는, 식 (3)과 같이, x축 자화방향 자석을 고려할 수가 없게 된다. 즉, 본 모델의 경우에서  $H_0$ 는 x방향 자화 세기량에 해당되며, 푸리에 고조파 전개시 위상차를 고려해야한다.

이와 마찬가지로, 전기자 코일에서도 영구자석 해석과 동일한 순서로 해석해를 도출할 수가 있는데, 식 (6)에서는 전기자 전류 밀도 분포가 나타나있다.

$$J_c(x) = \sum_n b_n \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x \quad (6)$$

$$\text{여기서, } b_n = \frac{2}{\tau_e} \int_{-\frac{\tau_e}{2}}^{\frac{\tau_e}{2}} \left( \frac{NI_s}{S_w S_d} \right) \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x$$

$S_w$ : 슬롯 폭[m],  $S_d$ : 슬롯 깊이[m]

$I_s$ : 각 상의 선전류[A]

식 (6)에서 알 수 있듯이, 본 해석법에서는 직접적으로 전기자 전류, 코일 형상 및 배치를 표현할 수 있으며, 영구자석에 의한 자계 해석과 독립적으로 수행한다. 식 (6)에 의한 식 (1)의 해석해는 다음과 같이 정리된다.

$$A_c(x) = \mu \sum_n (C_n e^{nK_e x} + D_n e^{-nK_e x} + \frac{\tilde{J}_c}{n^2 K_e^2}) \sin nK_e x \quad (7)$$

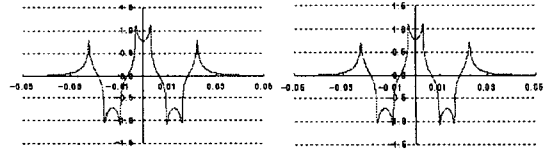
여기서,  $\tilde{J}_c$ :  $J_c(x)$ 의 절대값 크기

두 자기원으로 부터 최종적인 해 식 (4)와 식 (7)은 각 영역에서의 일반해 및 고유해를 지나게 되는데, 영역간의 경계 조건을 토대로 미지수가 결정되어 최종적인 해가 도출되게 된다. 물론, 최종적인 해는 독립적으로 구한 두 해의 선형합으로 귀결된다.

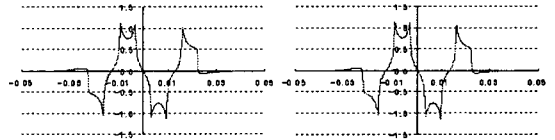
### 3.2 해석 결과 및 FEM과 비교

제한된 해석해의 정확성 검증을 위하여, 그림 2.의 모델에서 공극자속밀도 값을 구하여, FEM 결과와 함께

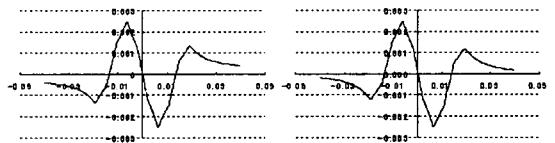
비교할 수가 있다.



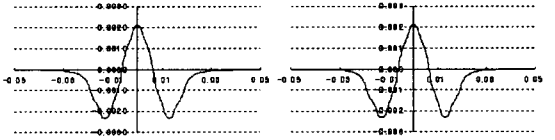
(a) 공간고조파해석법 (b) 유한요소법  
그림 3. 영구자석에 의한 y방향 공극 자속 밀도 (x축 : 위치 [m], y축 : 자속 밀도 값(T))



(a) 공간고조파해석법 (b) 유한요소법  
그림 4. 영구자석에 의한 x방향 공극 자속 밀도 (x축 : 위치 [m], y축 : 자속 밀도 값(T))



(a) 공간고조파해석법 (b) 유한요소법  
그림 5. 전기자 전류에 의한 y방향 공극 자속 밀도 (x축 : 위치 [m], y축 : 자속 밀도 값(T))



(a) 공간고조파해석법 (b) 유한요소법  
그림 6. 전기자 전류에 의한 x방향 공극 자속 밀도 (x축 : 위치 [m], y축 : 자속 밀도 값(T))

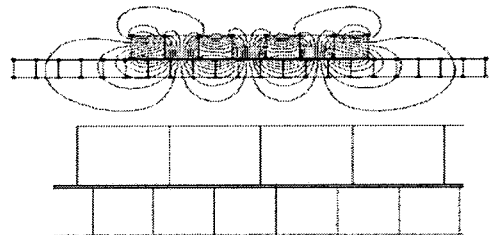


그림 7. 유한요소 해석시 자속 분포 및 요소 분할

위에서 나타난 그림 3.에서 6.은 공간고조파법과 유한요소법을 이용하여 구한, 영구자석과 전기자 전류에 의한 x 및 y 방향 각각의 자속 밀도를 비교하여 나타난 결과이다. 해석해의 경우, 적분 영역은 전동기 길이의 2배 이상, 고조파 차수는 1000차 이상을 인가하였으며, 유한요소법의 경우 전체 요소수를 최소 3단계 이상을 두도록 하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 각 자속밀도 분포 및 해당값은 매우 유사하며, 특히, 자기적인 성질을 지니는 요크가 없으므로, 그 패턴이 매우 이상적이며, 각

그림의 양단부에 나타난, 누설 프리징 효과도 충분히 설명해 주고 있다. 그림 7.에서는 유한요소해석시의 요소 발생 및 자속 파형 분포를 나타내고 있다.

#### 4. 추력 및 부상력 계산 및 운전 특성

##### 4.1 추력 및 부상력

공간고조파 해석에서 추력과 부상력은 공극 중앙에서, 맥스웰 응력법을 이용하여 계산하였는데, 일반적으로 선형기기에서는 계산하는 위치에 대하여 값 차이가 현저하므로, 매우 세분하여 계산해야한다. 특히, 부상력에 대해서는, 일반 유한요소해석에서도 공극 내부에서의 텐서 라인에서의 절점 및 주위 요소수 등에 민감하게 나타나며, 해석해에서도 물론, 세분화하여 계산해야하는데, 부상력 계산시 계산점의 수가 추력 계산 경우에 비하여 무척 커야 할 것이다.

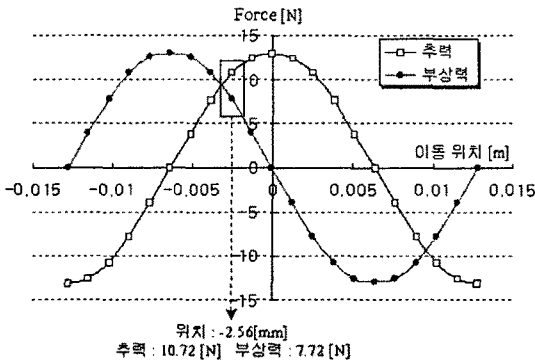


그림 8. 이동 위치별 추력 및 부상력 특성

그림 8.에는 계산된 추진력과 부상력의 분포가 나타나 있는데, 정확하게 90도의 위상차를 지니고 있다. 즉, 추력에 기여하는 성분은 q축 전류 성분이며, 부상력에 기여하는 성분은 d축에 해당하게 된다.

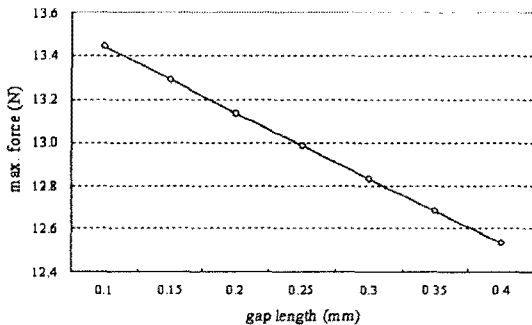


그림 9. 공극 길이에 따른 최대 발생력

그림 9.에서는 공극 길이에 따른 최대 발생력으로, 이는 그림 8.에서 나타난 추력 및 부상력의 최대 값에 해당된다. 그림에서 나타나듯이 공극 길이가 늘어남에 따라 발생력도 점점 감소함을 보이는데, 부상력의 정밀 제어를 위해서는 이러한 공극 변화율의 정확한 센싱이 요구된다. 즉, 공극 변화를 보상은 부상력 회복은 물론, 동시 발생하는 추력에도 큰 영향을 주게 된다.

본 모델의 경우, 추력과 부상력이 모두 발생하는 위치에서 운전하게 되는데, 그림 8.에서 나타난 임의적 위치(위치 : -2.56[mm])에서의 추력(10.72[N])과 부상력(7.72[N])을 유지하면서 동작하는 모델을 본 논문에서는 해석하였다.

##### 4.2 운전 특성

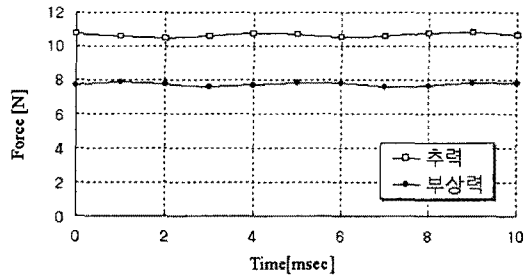


그림 10. 일정 추력 및 부상력 운전  
(이동 속도 : 1[m/sec], 이동 거리 : 10[mm])

그림 10.에서는 초기 추력과 부상력을 유지하면서, 수평 방향 동기 운전시(속도 : 1[m/sec]) 나타나는 발생력 특성을 나타내었다. 전기자 전류의 주파수는 동기 주파수를 인가하였으며, 본 결과에서는 인버터의 스위칭 주파수는 고려되지 않았다. 즉, 그림 10.에서 나타난 해석 결과는 Halbach Array를 적용한 가동자가 움직일 때 발생하는 추력과 부상력의 맥동에 해당되며, 특히, 본 모델의 경우 요크가 없으므로, 순수히 자극 배열과 코일 분포에 기인한 결과라고 분석된다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 평면 2차원 움직임을 갖는 Planar Motor의 Halbach Array 적용시 나타나는 전자기적 특성을, 제안된 해석해를 바탕으로 정밀 분석하였으며, 이를 바탕으로 추력과 부상력 동시 제어 운전시 발생하는 특성에 대하여 살펴보았다. 특히, Halbach Array 특성을 위한 해석해의 도출은 각 요소별 형상과 공간적인 배치를 표현하는 공간고조파해석법을 바탕으로 하였으며, 그 타당성과 정확성은 유한요소해석법 결과와의 비교를 통하여 검증되었다.

최근, 분진없는 환경 하에서 응용되는 정밀한 2차원 평면 모터의 개발이 많이 이루어지는데, 발생 추력 및 부상력의 정확한 해석 및 정밀 제어가 필수적이며, 새로운 형상 개발도 향후 이어져야 한다고 판단된다.

##### [참 고 문 헌]

- [1]Sang-Yong Jung, Hyun-Kyo Jung, Jang-Sung Chun, "Performance Evaluation of Slotless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Energized by Partially Excited Primary Current," IEEE trans on Magnetics, Vol. 37, 3757-3761, September, 2001.
- [2]정상용, 전장성, 정현교, "부분여자원 영구자석형 선형동기 전동기의 단부효과 해석," 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.306-308, 2000년 12월.
- [3]Sang-Yong Jung, Hyun\_Kyo Jung, "Space Harmonics Analysis of Linear Induction Motor considering Stator Slotting," ASAEM'2001, pp. 5-6, Hangzhou, China, May 28-30, 2001 1989.
- [4]Sang-Yong Jung, Sung-Moon Cho, Hyun-Kyo Jung, Jang-Sung Chun, "Skew Effect of Core Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with High Positioning Accuracy," LDIA '01, pp171-174, Nagano, Japan, October 17-19, 2001