

## 유한 요소법과 실험계획법을 병행 사용한 고정밀 자기 부상 시스템의 최적 설계

이성구<sup>\*</sup>, 원성홍<sup>\*</sup>, 이형우<sup>\*</sup>, 이주<sup>\*</sup>  
 \*한양대학교 전기공학과

### Optimal design of High precision Maglev system using Finite Element Method and Design Of Experiments

Sung Gu LEE<sup>\*</sup>, Sung Hong Won<sup>\*</sup>, Hyung Woo LEE<sup>\*</sup>, Ju Lee<sup>\*</sup>  
 \*Dept. of Electrical Eng. at Hanyang Univ.

**Abstract** - This paper presents the design for improving performance of the high-precision Magnetic levitation system. Motor performance on various design schemes such as thickness and magnetizing patterns of the permanent magnets, pole pitch, length of air gap, turn number of windings, and thickness of the aluminum-core has been investigated in detail by using FEM(Finite Element Method). Simulation-based DOE (Design of Experiments) method is also applied in order to reduce the large number of analysis according to each design variable and consider the effect among variables. The design in all aspects is proposed by an optimization algorithm using regression equation derived from the simulation-based DOE.

#### 1. 서 론

고정밀 자기 부상 시스템은 크게 추진 시스템과 부상 시스템이 분리되어 있는 것과 추진 시스템과 부상 시스템이 분리되어 있지 않은 것으로 분류해 볼 수 있다. 어느 경우가 되었든 이동자의 부상에 필요한 적정 부상력과 이동자의 이동에 필요한 일정한 추진력이 중요한 성능 판단의 기준이 된다. 추진력에 존재하는 맥동은 정밀한 위치 제어에 악영향을 끼치며 제어 시스템의 복잡성을 증가시킨다. 위치 정밀도를 증가시키기 위해서는 이 추진력에 존재하는 맥동을 최대한 저감시키는 설계와 함께 이동자의 부상 시 필요한 적정 크기 이상의 부상력을 볼 수 있는 설계가 요구된다. 추진과 부상 시스템이 서로 분리되어 있는 시스템보다는 분리되어 있지 않은 시스템에서 이와 같은 설계에 어려운 점이 있으며 이는 추진력의 맥동을 저감시키는 설계가 추진력의 전체 크기 역시 저감시키는 경향이 존재하기 때문에 발생하게 된다. 실제 응용 면에서 추진과 부상 시스템이 분리되어 있지 않은 경우가 더욱 매력적이기 때문에 본 논문에서는 추진과 부상 시스템이 서로 분리되어 있지 않은 시스템 중 하나를 선택하여 추진력의 맥동 저감 설계와 적정 크기 이상의 부상력을 갖는 설계를 동시에 수행하였다. 그림 1은 몇 해 전 반도체 공정의 wafer marker용으로 제작된 Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM)으로 본 논문에서 설계에 이용된 고정밀 자기 부상 시스템이다[1]. 추진력과 부상력에 관한 위의 설계 요구 조건을 동시에 만족시키기 위한 설계 방법으로는 각각의 설계변수들의 조합을 통해 만들어 지는 어마어마한 수의 설계모델들을 실제로 제작하여 하나씩 검증해 나가는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 엄청난 설계 비용과 함께 굉장히 긴 설계 시간이 요구되어 실제로는 이용이 불가능한 방법이다. 설계변수들의 조합으로 나오는 각각의 설계 모델들을 실제로 제작하여 실험하는 대신 컴퓨터를 이용한 수치해석으로 모의실험 하는 방법을 통해 이와 같은 문제점을 해결할 수 있으나 이 방법 역시 설계 변수들의 개수가 많아서 계산해야 할 설계모델의 개수가 많아지면 상당한 설계 시간과 비용이 소요되는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 설계계획법(Design of Experiments)과 유한요소법을 병행 사용하는 방법을 통하여 해석해야 할 설계 모델들의 개수들을 최대한 줄이면서 목적하고자 하는 설계 모델을 찾을 수 있

는 방법을 제안, 검토하였다.

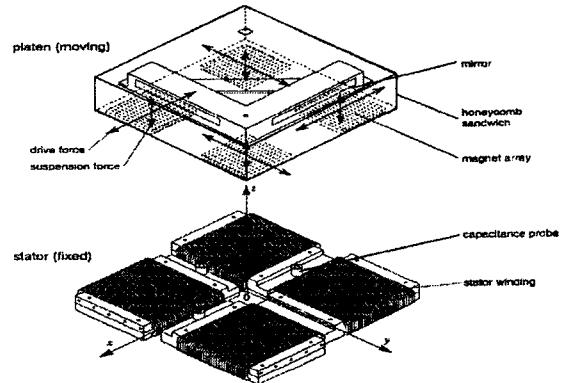


그림 1. PMLSM

#### 2. 본 론

##### 2.1 PMLSM의 구조와 구동원리

PMLSM의 구조는 그림 1과 같이 4개의 3상 영구자석형 선형 동기 전동기(Permanent Magnet Linear Motor, PMLSM)로 이루어져 있다. 이동자는 무게를 줄이기 위하여 알루미늄 재질의 Honey-Ccomb 구조와 Halbach type Magnet array 가 사용되었다. 이동자 아래 표면에 영구자석을 부착하고, 위 표면에 위치측정을 위한 거울과 웨이퍼를 부착하였다. 각각의 PMLSM은 이동자의 부상 및 추진을 독립적으로 제어하며, I, III 구간은 부상과 X방향의 추진을, II, IV 구간은 부상과 Y방향의 추진을 담당한다[2][3].

그림 2는 PMLSM의 구동원리를 기술하기 위한 공극자속밀도 분포를 나타내고 있다. 그림에서  $B_P$ ,  $B_C$ 는 각각 영구자석 및 전기자 전류에 의한 공극자속밀도를 나타내며, 공간적인 분포가  $x_d$ 만큼 차이를 가지고 정현적으로 존재하는 경우 각각은 식(2.1) 및 식(2.2)으로 표현할 수 있다.

$$B_P = B_{Pm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (2.1)$$

$$B_C = B_{Cm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} (x - x_d)\right) \quad (2.2)$$

여기서,  $B_{Pm}$ ,  $B_{Cm}$ 은 각 자속밀도의 최대치를 나타내며,  $\tau$ 는 극 간격을 나타낸다.

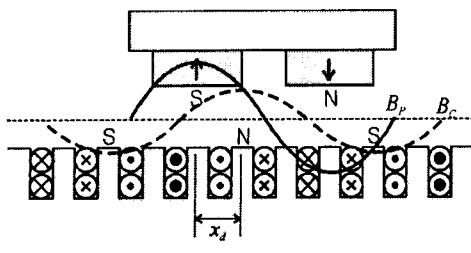


그림 2. 구동 원리도

공극자속밀도는 식(2.3)과 같이  $B_P$ 와  $B_C$  합으로 표현되며, 공극상의 미소 체적  $dv$ 에 축적되는 자기에너지  $dW_g$ 는 식(2.4)으로 구할 수 있다.

$$B_g = B_P + B_C \quad (2.3)$$

$$dW_g = \frac{B_g^2}{2\mu_0} dv = \frac{1}{2\mu_0} (B_P + B_C)^2 dv \quad (2.4)$$

공극에 축적되는 전체 자기에너지  $W_g$ 는 식(2.5)과 같이  $dW_g$ 을 공극 전체에 대하여 적분함으로써 구해진다.

$$\begin{aligned} W_g &= \int_v dW_g dv = \frac{\rho h l_g}{2\mu_0} \int (B_P + B_C)^2 dx \\ &= \frac{V_g}{4\mu_0} \left( B_{Pm}^2 + B_{Cm}^2 + 2B_{Pm}B_{Cm} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x_d\right) \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

여기서,  $\rho$ ,  $h$ ,  $l_g$ ,  $V_g$ 는 각각 극수, 폭, 자기적 공극의 길이, 자기적 공극의 체적을 의미한다.

PMLSM에 발생하게 되는 추력  $F$ 는 가상변위의 원리를 적용하여 식(2.6)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= -\frac{\partial W_g}{\partial x_d} \\ &= \frac{\pi V_g}{2\tau\mu_0} B_{Pm} B_{Cm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_d\right) \\ &= F_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_d\right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기서,  $F_{\max}$ 는 추력의 최대치를 나타낸다. Magnet array에 의해 발생되는 실제 공극자속밀도는 그림 2와 같이 정현적으로 분포하지 않고 고조파 성분을 포함하게 된다. 따라서 추력은 식 (2.6)와는 달리 맥동을 포함하게 된다.

표 1. 해석 모델의 제원

구 분	변 수	값
고 정 자	알루미늄 core 두께	25.4 [mm]
	권선 개수	33
	권선 당 코일 턴 수	54
	전류의 Peak 값	0.5 [A]
	Pole pitch	25.6 [mm]
이 동 자	공극의 크기	0.25 [mm]
	영구 자석	Nd-Fe-B
	영구 자석의 개수	15
	잔류 자속 밀도	1.25 [T]
	Magnet array의 길이	92 [mm]
	Magnet array의 폭	96 [mm]

표 1은 본 논문에서 연구된 PMLSM의 주요 제원을 나타내고 있다. 그림 1.에서 보는 것과 같이 이 시스템은 네 개의 동일한 PMLSM 구조이므로 하나의 PMLSM의 2차원 해석을 통하여 전체 시스템에 대한 이해와 성능 예측이 가능하다. 해석을 위해 상용 툴인 Ansoft 사의 Maxwell EM을 사용하여 2차원 전자장 해석을 수행하였다.

## 2.2 실험계획법(Design Of Experiments)

실험계획법(Design Of Experiments)은 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 제품 품질특성에 영향을 미치는 요인들이 어떤 것들인지를 알아보기 위하여 실험의 배치와 실시를 어떻게 하고, 또 얻어진 데이터를 어떠한 통계적 방법으로 분석을 하는지에 관한 이론이다. 이와 같은 실험계획법을 이용하면 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 적은 비용으로 선정, 그 효과를 수량적으로 측정할 수 있게 된다.[4]

표 2는 추진력과 부상력 모두에 영향을 미칠 것으로 예상되는 설계 변수들을 나열해 놓은 것으로 pole pitch, 공극의 길이, 코일 턴 수, 알루미늄 core의 두께, 영구자석 두께, 자화 패턴 등 총 6개의 설계 인자와 그 인자들의 수준을 나타내고 있다. 6개 설계 인자들의 수준을 모두 2수준으로 정하였는데 이는 우선 각 설계 인자들이 부상력과 추진력의 맥동에 미치는 영향을 살펴보는 동시에 이런 과정을 통해 만들어진 결과의 오차를 따져 설계 변수들의 수준을 더 높게 선정해야 하는지를 판별하는 기준으로 삼기 위한 것이다. 본 연구에서는 모든 설계 변수들을 2수준으로 선정해서 얻은 결과의 오차가 그리 크지 않아 설계 변수들의 수준 수를 높여 실행하는 이후의 과정을 생략하였다.

표 2. 설계 인자와 수준

설계 인자	설계 수준
Pole pitch	2
공극의 길이	2
코일 턴 수	2
알루미늄 core의 두께	2
영구자석의 자화패턴	2
영구자석의 두께	2

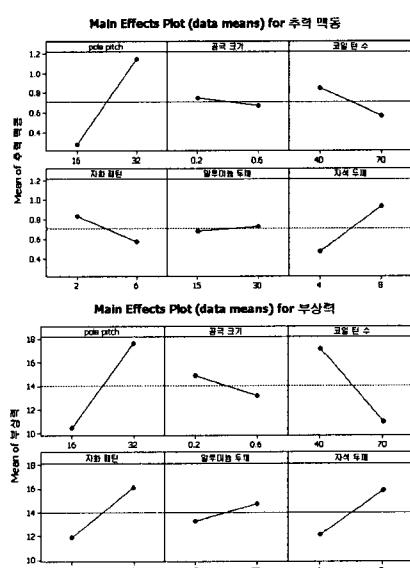


그림 3. 설계 인자들의 영향분석

추진력의 맥동을 줄이고 적정 크기 이상의 부상력을 얻기 위한 모델을 선정하기 위해 MINITAB에서 지원하는 반응표면 최적화 루틴을 이용하여 그림 4 와 같은 결과를 얻었다.

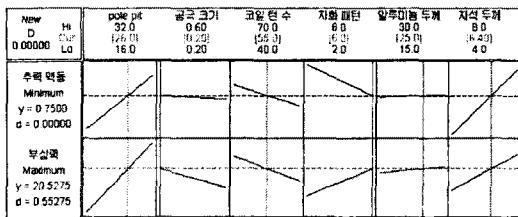


그림 4. MINITAB의 반응표면 최적화 루틴 결과

### 2.3 해석 결과

설계 변수로 선정한 6개의 설계 인자들 중 오직 자화 패턴만이 다른 5개의 인자들은 다른 양상을 보여 주었다. 즉 자화 패턴이 정원파에 가까울수록 추진력의 맥동은 감소하면서 부상력은 증가하는 경향이 있었으며 나머지 인자들은 모두 추진력의 맥동과 부상력이 동시에 감소하거나 동시에 증가하는 경향을 보였다. 부상력과 추진력의 맥동이 같이 증가하거나 감소하는 경향을 보이는 설계 인자는 적당한 선에서 값을 선정하여 목적하는 부상력과 추진력을 얻도록 하고 영구자석의 자화 패턴은 자화 패턴이 증가할수록 부상력은 증가하고 주력 리플은 감소하므로 제작이 가능한 자화 패턴까지 증가시켜 설계에 이용해야 한다는 결론이 나왔다. 실험계획법을 토대로 예측한 설계 모델의 추진력 맥동과 부상력의 크기는 각각 0.75 [N], 20.5275 [N] 이었으며 이 설계 모델의 실제 유한요소해석의 결과 값들은 그림 5에 나와 있듯이 0.90 [N], 18.06 [N] 이었다. 그림 6은 기존 모델의 추진력의 맥동과 부상력을 나타내고 있으며 그 값은 각각 1.55 [N]과 19.4 [N]이었다. 그림 7은 유한 요소 해석에 이용된 해석 모델의 Mesh도를 나타내고 있다.

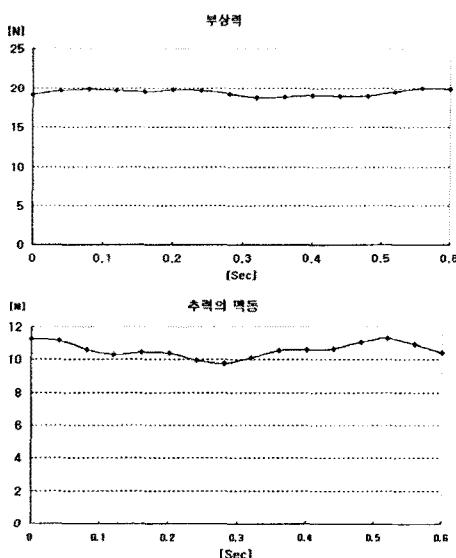


그림 5. 최종 모델의 부상력과 추진력

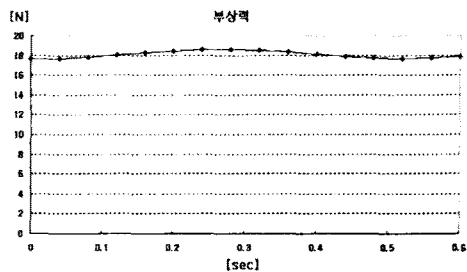


그림 6. 기존 모델의 부상력과 추진력

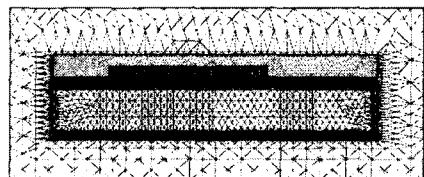


그림 7. 해석 모델

### 3. 결 론

본 논문에서는 고정밀 자기 부상 시스템의 부상력을 적정 크기 이상으로 유지하면서 추진력의 맥동을 저감시키기 위해 실험계획법(Design Of Experiments)과 2차원 유한요소법을 병행 사용하는 방법을 제안, 수행하였다. 제안된 방법으로 사용해 얻은 결과들을 통하여 실험계획법과 유한 요소 해석을 병행 사용하는 설계 방법이 적은 시간과 비용으로 요구하는 결과를 얻는데 매우 효과적이라는 사실을 알 수 있었으며 나아가 기타 여러 시스템 설계에 적용될 경우 아주 효과적인 설계 방법이 될 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축 지원 사업으로 수행된 논문입니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] "Single plane orthogonally movable drive system," US patent 4,654,571, March 1987
- [2] "High-precision planar magnetic levitation," Ph.D dissertation, MIT, June 1997]
- [3] "Analysis and design of synchronous permanent-magnet planar motors," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 17, No. 4, December 2002
- [4] "최신 실험계획법," 機電研究社, 박동규