

실험계획법을 이용한 Magnetic suspension의 최적설계

정재우, 김성일, 하승형, 홍정표, 이주훈\*  
 창원대학교 전기공학과, 한국전기연구원 전력설비진단그룹\*

Optimal Design of Magnetic Suspension Using Design of Experiment

Jae-Woo Jung, Sung-Il Kim, Seung-Hyoung Ha, Jung-Pyo Hong, Ju-Hoon Lee\*  
 Changwon National University

\* KERI

**Abstract** - This paper proposes the design method of a magnetic suspension that can control external vibration caused by low frequencies on the external vibrations by low frequencies. The magnetic suspension with individual controls is able to compensate the vibrations unlike a mechanical suspension. In the magnetic suspension, two characteristics are required. Firstly, magnetic motive force (MMF) by armature winding must be increased linearly. Secondly, identical magnitude of output force should be produced as direction of MMF. In this paper, axis-symmetric finite element analysis is used for magnetic field analysis. In order to optimize magnetic suspension, response surface methodology combined with experimental design is applied to investigate the characteristics and optimize the magnetic suspension for vibration-free table.

1. 서 론

자기 부상시스템은 자기력을 이용하여 두 물체를 물리적 접촉 없이 일정한 간격으로 유지시켜주는 시스템으로 자기 부상열차, 자기베어링 등 많은 부분에서 이용되고 있다. 비접촉식으로 인하여 기계적 손실이나 마모가 없으므로 유지 및 보수면에서도 유리하다[1]. 이러한 자기부상 시스템의 원리를 이용하는 것 중의 하나로 magnetic suspension을 들 수 있으며, 방진테이블에 적용되는 magnetic suspension은 외부진동을 감지해 일정한 공극을 유지시키도록 외부에서 유입되는 힘을 상쇄시키는 방향으로 힘을 발생시킨다. 이러한 magnetic suspension은 힘 발생 원리와 구조에 따라 core type과 PM type으로 나눌 수 있다. Core type의 경우 철심과 코일만으로 이루어진 구조로써 순수한 전자기 기구력에 의해서만 발생 힘이 결정된다. 반면 PM type은 영구자석이 삽입되어 있는 형태로써, 마주보는 두 개의 영구자석에 의해 reference force가 일정하게 발생하므로 반발력이 항상 존재한다. 본 논문에서는 core type과 PM type 두 가지 형태의 힘 발생 특성을 분석한다.

제어에 용이한 특성을 가지기 위해서는 전자기 코일에 전류가 인가되었을 때 전류의 극성에 따라서 힘이 동일하게 발생해야 한다. 이러한 특성을 가지는 magnetic suspension을 설계하기 위해서 본 논문에서는 최적설계 방법으로써 실험계획법(Design of Experiment: DOE)과 연계된 반응표면법(Response Surface Method: RSM)을 적용하여 magnetic suspension을 설계하고, 그 결과는 실험결과와의 비교를 통하여 특성을 증명한다.[2].

2. 본 론

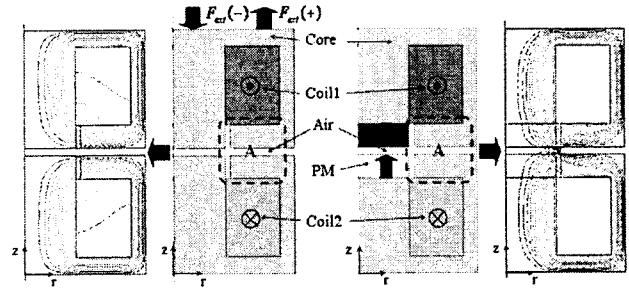
2.1 Magnetic suspension의 개념 및 초기모델 결정

본 논문에서는 초기 설계모델을 결정하기 위하여 시스템 내의 영구자석 삽입 여부에 따라 core type과 PM type을 검토하였다. 그림 1은 검토 대상으로서 core type과 PM type의 Z축 방향을 기준으로 한 축대칭 모델을 보여준다. Core type의 동작원리를 살펴보면, 외부진동에 의한 진동을 가속도 센서에서 감지하여, coil 1과 coil 2에 입력전류를 인가해줌으로써 외부 힘을 상쇄시키는 방향으로 magnetic force를 만들어준다.

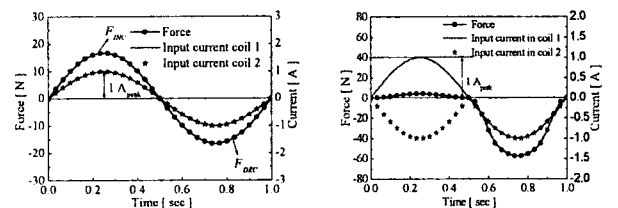
그림 1의 core type의 힘 발생 원리를 보면, 외부 힘  $F_{ext}(-)$ 가 가해졌을 때 coil1과 coil2에 같은 극의 전류가 입력되고 두 body 사이에서 외부 힘  $F_{ext}(-)$ 를 상쇄시키는 반발력이 만들어진다. 반대로 외부 힘  $F_{ext}(+)$ 가 외부에서 가해졌을 때는 coil1과 coil2에 각각 반대되는 극의 전류가 인가되어 흡입력을 발생시켜서 진동을 억제시킨다.

한편 PM type의 힘 발생 원리는 다음과 같다. 서로 마주보는 영구자석에 의한 반발력  $F_{REF}$ 가 기본적으로 존재한다. 외부 진동에 의한 힘  $F_{ext}(-)$ 가 발생했을 때 coil 1과 coil 2에서 서로 같은 방향의 전류를 인가하여 두 개의 영구자석을 증자시키고 외부 힘  $F_{ext}(-)$ 와 동일한 크기의  $F_{INC}$ 를 추가로 발생시켜 진동을 상쇄시킨다. 외부진동에 의한 힘  $F_{ext}(+)$ 가 발생했을 때, coil 1과 coil 2에는 영구자석을 감자시키는 전류가 인가되고, 순수 영구자석에 의한 힘  $F_{REF}$ 에서 외부 힘  $F_{ext}(+)$ 와 동일한 크기인  $F_{DEC}$ 만큼의 힘이 감소하여 진동을 상쇄시킨다.

core type은 그림 2와 표 1에서 보는 바와 같이 전류 크기에 따라 발생하는 힘은 비선형적이고, 전류의 방향에 따라 발생하는 반발력과 흡입력의 차이는 매우 크다. 그러므로 core type은 제어에 용이하지 못하다. 반면 PM type은 전류 변화에 따라 힘이 선형으로 변화하며 전류의 방향



(a)Core type (b)PM type  
 <그림 1> Core type와 PM type의 축대칭 모델



(a) Core type (b) PM type  
 <그림 2> 전류에 따른 발생 힘 양상

<표 1> 힘의 방향에 따른 힘의 크기

항 목	흡입력 [N]	반발력 [N]
모 델	$F_{INC}$ [N](PM type)	$F_{DEC}$ [N](PM type)
Core type	4.1	57.3
PM type	15.3	16.7

이 바뀔 때  $F_{INC}$ 와  $F_{DEC}$ 의 크기가 비슷함을 볼 수 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 동일전류 인가 시  $F_{INC}$ 와  $F_{DEC}$ 의 크기가 비슷하게 발생함을 볼 수 있으며, 이를 근거로 PM type이 제어에 유리하다고 판단할 수 있다.

2.2 최적설계 과정

두 가지 형태의 magnetic suspension을 검토해본 결과 PM type이 제어에 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다. 이 모델을 기본으로 하여 RSM과 결합된 DOE를 수행하여 최적설계를 진행한다.

A. 실험계획법

그림 3은 최적설계 대상 모델의 단면도와 설계인자를 나타낸다. 설계인자들의 영향도를 파악하기 위해 완전요인실험(Full Factorial Design: FFD)을 수행한다. 반응은 식 (1)에서 정의하는 바와 같이 발생 힘  $F_{DEC}$ 의 크기 Amplitude와  $F_{DEC}$ 와  $F_{INC}$ 의 비인 balance로 설정했다. FFD과정에서 각 변수의 중간 지점에서의 실험이 추가되었는데, 이는 2<sup>3</sup>FDD가 각 설계변수의 2수준에서만 실험이 되므로 변수의 수준 변화에 따라 발생하는 반응 값의 곡면적 변화를 감지할 수 기 때문이다. 이를 추정하기 위해 각 설계영역의 중간 지점에서 한 번 더 실험을 하게 되었다[3]. 전자기 권선에 의한 기구력은 688[A]으로 해석을 수행하였다. 주 효과 그래프는 그림 4와 같고, 변수들의 상호작용은 거의 나타나지 않아 무시하였다. 표 2는 FFD결과를 바탕으로 RSM의 범위를 결정된 결과이다. 여기서 FFD과정에서의 네 가지 인자 중 PM length와 main path의 영향도가 나머지 두 설계인자의 영향도에 비해 현저히 크므로 RSM에서는 이 두 설계인자만이 고려되었다.

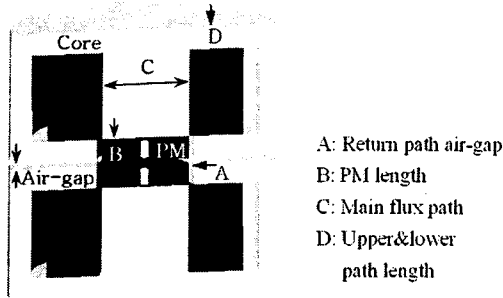
$$Amplitude = F_{EXT}(-), \quad Balance = \frac{F_{EXT}(+)}{F_{EXT}(-)} \quad (1)$$

### 3. 결 론

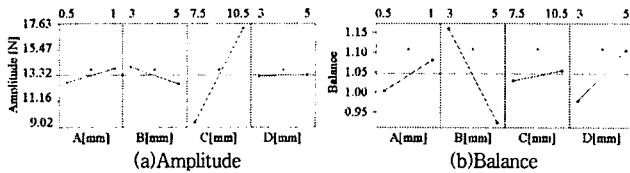
Magnetic suspension은 기존의 Mechanical suspension과는 달리 외부의 진동을 능동적으로 제어가 가능하다. 능동적인 제어가 가능하기 위해서는 전류의 방향에 따라 힘은 동일한 크기로 발생해야 한다. 본 논문에서는 이러한 특성을 만족시키는 magnetic suspension을 설계를 다루었다. DOE와 결합된 RSM을 사용하여 magnetic suspension의 설계 방법을 제시하고, 실제 제작하여 설계결과와 해석결과를 비교하여 설계의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서 제시한 Magnetic suspension system은 광학기기 또는 전자현미경, 반도체 공정의 방진테이블에 효과적으로 적용 가능할 것이라 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Masayuki Fujita, Toru Namerikawa, Funtio Matsumura and Kendo Uchida, "μ-Synthesis of an Electromagnetic suspension system", *IEEE Trans, Automatic Control*, Vol. 40, No 3, PP 530-536, 1995
- [2] Sung-II Kim, Ji-Young Lee, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Yoon Hur, and Yeon-Hwan Jung, "Optimization for Reduction of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Magnet Motor by Using the Taguchi Method", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 41, No. 5, pp. 1796-1799, May. 2005.
- [3] 김성일, 이지영, 홍정표, 김영균, "매일형 영구자석 진동기의 Performance 향상을 위한 반응표면론 법의 효과적인 적용", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, pp. 1108-1110, 2005년 7월
- [4] D. C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments", New York: Wiley, 2001.



〈그림 3〉 설계대상 모델의 단면도와 설계인자



〈그림 4〉 설계인자와 주 효과 그래프

〈표 2〉 RSM 수행 시 설계인자와 범위

설계인자	항 목	최소[mm]	최대[mm]
PM length(B)		4.5	5
Main flux path(C)		9.5	10.5

#### C. RSM의 적용

본 연구의 목적은 큰 amplitude의 확보와 동시에 두 힘,  $F_{ext}(-)$ 와  $F_{ext}(+)$ 의 비인 balance가 1이 되도록 자기회로를 설계하는데 있다. 따라서 RSM을 이용하여 두 조건을 동시에 만족시키는 최적설계를 수행하였다.

여러 가지 실험계획법 중에서 본 연구에서는 중심합성계획(Central Composite Design: CCD)을 사용하였다. 중심합성계획법은 중심점(Center point)과 축점(Axial points)을  $2^k$  요인실험(Factorial design)에 추가시킴으로써 적은 횟수의 실험으로 설계변수와 출력사이의 비선형성을 고려할 수 있는 합리적인 실험계획법이다[3].

#### 2.3 최적설계 결과

RSM의 기본 이론을 바탕으로 CCD를 수행 한 후 amplitude와 balance에 대한 근사다항식을 식 (2), (3)과 같이 각각 얻을 수 있다.

$$\hat{y}_{Amplitude} = -41.881 - 5.36B - 4.9C + 0.2B^2 + 0.35C^2 + 0.2B \quad (2)$$

$$\hat{y}_{Balance} = -1.6 + 0.262B + 0.455C + 0.026B^2 - 0.021C^2 - 0.001B \quad (3)$$

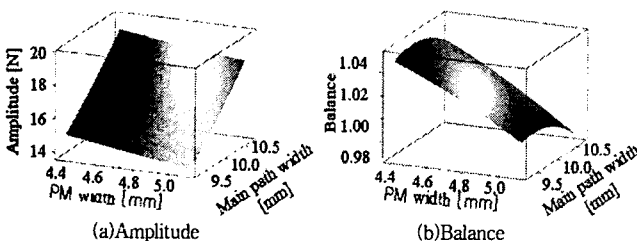
그림 5는 각 근사다항식에 의해 그려진 반응표면을 나타낸다. 그림 5에 그려진 반응표면을 통해 최적조건을 구하기 위한 목적함수의 영역은 식 (4), (5)와 같고, 두 조건을 만족하는 영역 및 최적 조건은 그림 6과 같다 [4].

$$18 \leq y_{Amplitude} \leq 19 \quad (4)$$

$$0.99 \leq y_{Balance} \leq 1.01 \quad (5)$$

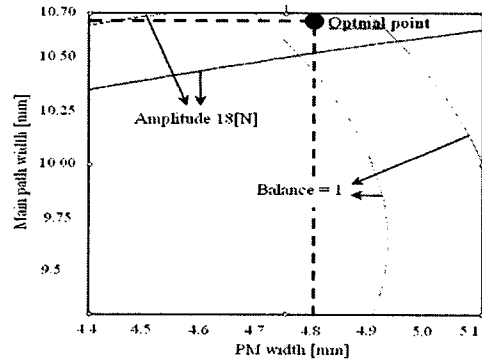
#### 2.4 실험 및 해석결과

최종적으로 결정된 치수를 바탕으로 실제 제작하고 실험하여 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 magnetic suspension의 힘 측정은 load cell과 load cell indicator를 이용하였다. FEM 해석결과와 실험결과를 비교해본 결과 그림 8에서 보는 바와 같이 기차력 크기에 따른 발생 힘은 선형적으로 변하고, Balance는 1에 가까운 값을 가짐을 볼 수 있었다. 하지만 발생 힘은 실험결과가 해석결과에 비해 낮은 값을 가졌는데 이는 magnetic suspension과 guide와의 마찰에 의한 오차라고 판단된다.

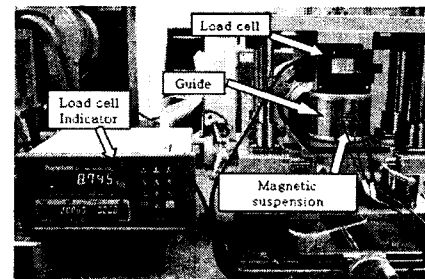


〈그림 5〉 반응표면

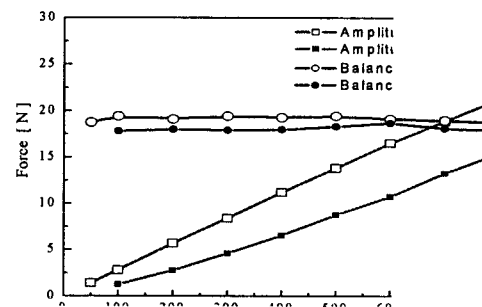
본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-03) 지원으로 수행 되었습니다.



〈그림 6〉 두 반응을 만족하는 영역 및 최적 점



〈그림 7〉 Magnetic suspension의 실험



〈그림 8〉 해석결과와 실험결과 비교