

# 계층적 분석법을 이용한 근육모사용 마그네틱 구동기의 설계

\*연제현<sup>1</sup>, 장인배<sup>1</sup>, 박인항<sup>2</sup>, 한동철<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부, <sup>2</sup> 서울대학교 기계항공공학부

## The Design of Magnetic Actuator for Muscle Simulator by Analytical Hierarchy Method

\*J. H. Yeon<sup>1</sup>, I. B. Chang<sup>1</sup>, I. H. Park<sup>2</sup>, D. C. Han<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division of Mechanical Engineering & Mechatronics, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

<sup>2</sup> School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

Key words : Electromagnetic actuator(전자석 구동기), AHM(계층적 분석법), Muscle simulator(근육모사)

### 1. 서론

대 변위 마그네틱 구동기의 개발은 자동차의 안정적인 Damper 시스템, 자동차 충돌 모형에서의 근육모사 시스템, EMV 시스템에 의한 차세대 자동차 기술에 배경을 두고 있으며, 본 논문에서는 기존의 대 변위 마그네틱 구동기가 가지는 큰 부피와 무게의 일반적인 단점을 보완하기 위해 계층적 분석법을 이용한 릴럭턴스 경로 조절 방식의 마그네틱 구동기의 최적 설계를 구현하였다.

### 2. 마그네틱 구동기의 설계

#### 2.1 마그네틱 구동기의 작동원리

릴럭턴스 경로 조절 방식의 마그네틱 구동기의 작동원리가 되는 전자석과 영구자석의 자속의 흐름도가 그림 1에 도시되어 있다.

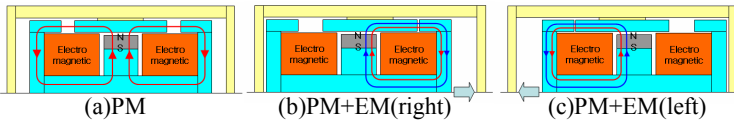


Fig.1 The flux path formation by the electromagnetic actuator

영구자석 혼합형 마그네틱 구동기는 한 개의 반경 방향으로 자화된 링형의 영구자석, 두 개의 폴 페이스, 두 개의 전자석, 하나의 이동체, 그리고 하우징 요소로 구성되며, 서로 마주하는 폴 페이스 사이에 위치한 이동체가 지지 가이드를 따라 움직이는 형태로 하고 있다. 링 타입 영구자석의 반발 자기장이 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 반경 방향으로 흐른다. 여기서 전자석 자료가 그림 1(b)와 같이 시계 방향으로 형성되면, 오른쪽 자속 밀도는 증가하는 반면에 왼쪽은 감소하여 결론적으로 이동체가 오른쪽으로 움직이게 된다. 그와 반대로, 그림 1(c)에서 보는 바와 같이, 전자석 자료가 반 시계 방향으로 형성되면 그림 1(b)에서 설명한 자속과 반대가 되어 이동체가 왼쪽으로 움직이게 된다. 이로서 마그네틱 구동기는 전자석과 영구자석의 자기장의 경로가 분리가 되면서 전자석은 자기력의 제어만 담당하고 영구자석은 기본 자기장을 제공 하며, 이와 같은 전자석 구동기의 특성은 식(1)과 같이 선형화 된 변위강성, 전류강성에 의해 결정된다.

$$F = K_x \cdot x + K_i \cdot i \quad (1)$$

여기서,  $K_x$  는 작동점에서 구동기의 위치 변화에 따른 힘의 변화로부터 얻어진 선형화된 변위강성이고,  $K_i$  는 작동점에서 전류의 변화에 따른 힘의 변화로부터 얻어진 선형화된 전류강성이다.

#### 2.2 AHM 기법을 이용한 최적 설계 변수 선정

엔지니어가 설계상 수 많은 대안들을 접했을 때 무엇이 최선의 선택인지 쉽게 확신을 할 수가 없기에 간단히 성취도 점수(desirability score)를 이용한 선형 가중법을 적용할 수 있지만 이는 선택할 수 있는 설계상의 대안이 몇 가지 밖에 없는 경우 편리한 방법이지만 하나, 하나의 변수에 가중값을 할당 할 때 다른 모든 시스템 변수들의 상관관계를 고려해야만 하기 때문에 단순한 사례에서도 경험이 부족한 설계 엔지니어에게 성취도 가중값을 올바르게 할당하기는 어려운 일이다. 모든 인자들을 즉시 비교하려는 대신에, 설계가 진행되는 각 단계마다 각 설계변수들의 상대적인 중요도(우선 순위)를 결정하고 가장 명확한 특성(힘, 부피, 무게 등)에 의거하여 각 설계변수에 대한 상대적인 특징을 평가한다. 이러한 선택 분석법을 계층적 분석법(Analytical Hierarchy Method)이라고 부르며, Thomas L. Saaty에 의해 개발되었다.

### 2.3 AHM의 적용

AHM 공정은 복잡하고 조직화 되지 않은 상태를 구성요소로 나누고 이 요소들을 계층적인 순서로 배열하는 방법이다. 이해를 쉽게 하기 위해서 그림 2에서 본 논문에서 구현 하고자 하는 마그네틱 구동기의 모습과 주요 설계변수에 대한 설명을 표 1에 나타내었다.

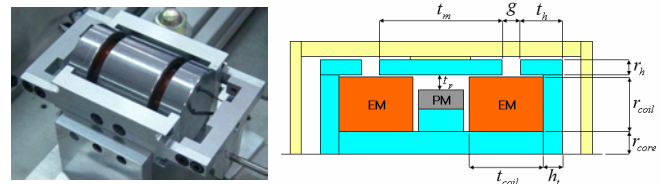


Fig.2 Schematic of Magnetic Actuator

Table 1 The parameters of Magnetic Actuator

parameter	symbol	parameter	symbol
Moving target length	$t_m$ (mm)	Housing length	$t_h$ (mm)
Nominal gap	$g$ (mm)	Housing thickness	$r_h$ (mm)
Coil thickness	$r_{coil}$ (mm)	Coil length	$t_{coil}$ (mm)
Coil turns	$N$	Coil area	$A$ (mm <sup>2</sup> )
Center core thickness	$r_{core}$ (mm)	PM gap	$t_p$ (mm)
Cover Housing thickness	$h_i$ (mm)		

AHM 공정에서 요소의 중요도 평가는 세 단계로 나뉘어진다; 1 단계: AHM 모델을 구축하고 각 계층별로 구성요소들의 상대적인 중요도나 우선 순위를 결정한다. 2 단계: 모델의 최하위 단계에 대해 설계상 판단들의 상대적인 중요도를 판단한다. 3 단계: 1, 2 단계의 결과들을 사용하여 설계상 판단들의 우위를 결정한다. 그림 3는 마그네틱 구동기의 주요 설계변수에 대한 계층적 분석법의 적용이다.

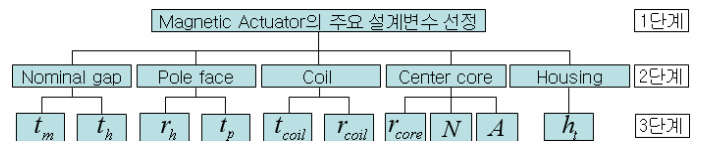


Fig.3 Apply for Actuator parameters by AHM

### 3. 수치해석

앞에서 설명한 AHM 기법을 이용해 그림 3의 구동기의 설계변수에 대한 상대적인 중요도를 결정하고 설계에 적용해 보았다. 표 2의 총점은 구동기 설계에 있어 각각의 설계변수 선정 시 설계 우선 순위를 알 수 있게 해주며 2단계 요소들은 각각의 3단계 하부요소들에 영향을 받으며 변화에 따른 이동체가 받는 힘을 ANSYS 10.0를 이용해 계산하였다.

Table 2 The priority order of the two step

parameter	$t_m$	$t_h$	$r_h$	$r_{coil}$	$t_{coil}$	$N$	$A$	$r_{core}$	$t_p$	$h_i$	총점
Nominal gap	9	9	7	7	5	5	3	7	7	1	12.889
Pole face	5	5	9	9	5	5	3	7	5	1	11.727
Coil	3	3	3	3	9	9	7	7	7	1	9.861
Center core	3	3	5	5	8	8	9	5	5	1	10.215
Housing	1	1	3	1	3	3	9	7	7	1	5.379

### 3.1 공칭 공극

공칭 공극은  $t_m$  과  $t_h$  에 영향을 받는다. 두 변수의 길이를 변화시키며 이동체가 받는 힘을 구하였고 결과는 그림 4 와 같으며 공칭 공극 5mm 를 유지하면서 최대 힘을 내는 설계변수를 찾았다.

### 3.2 폴 면적

폴 면적은  $r_h$  와  $t_p$  에 영향을 받으며 위와 마찬가지로 실험을 수행 하였으며 결과는 그림 5 과 같다. 폴 면적은 마그네틱 구동기의 힘과 가장 밀접한 관계를 가지고 있으며  $r_h$ ,  $t_p$  와 비례관계를 가지고 있으나 본 논문의 요지는 구동기가 낼 수 있는 가장 큰 힘을 찾아내는 것이 아닌 최적의 설계변수의 선정이므로 그림 5 의 결과를 신뢰할 수 있다.

### 3.3 중심 코어

중심 코어 반지름은  $N$  과  $A$  에 영향을 받으며 반지름  $\pm 1$  당  $\pm 24$  의 coil turns 차이가 생긴다. 표3는 수치해석에 앞서 반지름에 따른  $N$ ,  $A$  의 상관 관계의 정리이며 그림 6 은 그에 따른 결과이다.

Table 3 Relationship between coil turns and coil area

$r_{core}$ (mm)	$N$	$A$ (mm <sup>2</sup> )	Force(N)
2	312	345	78.612
3	288	322	82.463
4	264	299	80.318
5	240	276	74.438
6	216	253	68.206
7	192	230	60.674

### 3.4 코일

중심 코어의 수치해석 결과에 따라 coil 의 area 는 322(mm<sup>2</sup>)이며 표 4는  $r_{coil}$  과  $t_{coil}$  의 상관 관계이며 그림 7 은 그에 따른 결과이다.

Table 4 Relationship between coil length and coil thickness

$[t_{coil}, r_{coil}]$ (mm)	Force(N)
[25, 12.8]	75.741
[26, 12.3]	76.175
[27, 11.9]	76.907
[28, 11.5]	76.710
[29, 11.1]	76.813

### 3.5 좌, 우 하우징 두께

마그네틱 구동기의 우회 자로는 좌, 우 하우징 두께에 영향을 받으며  $h_t$  의 두께 변화에 따른 결과가 그림 8 에 나타나 있다.

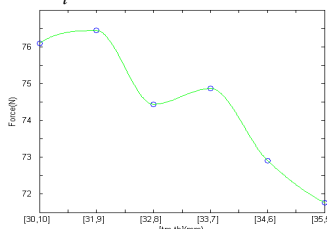


Fig.4 The simulation results of Nominal gap

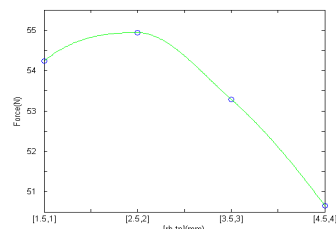


Fig.5 The simulation results of Pole face

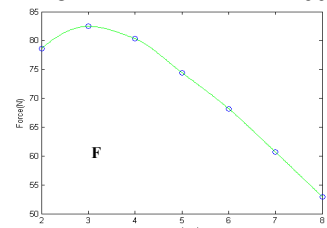


Fig.6 The simulation results of Center core

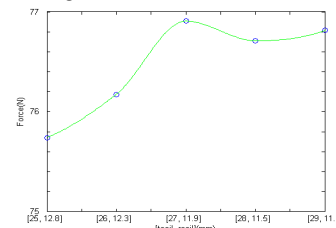


Fig.7 The simulation results of Coil

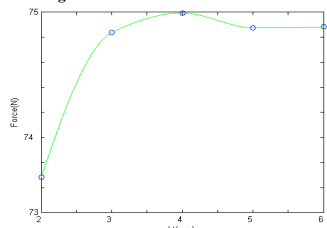


Fig.8 The simulation results of side Housing

## 4. 결론

계층적 분석법을 통해 도출된 마그네틱 구동기의 최적 설계 변수가 표 5 에 나타나 있다.

Table 5 The simulation results of Magnetic Actuator parameter

$t_m$ (mm)	31	$t_{coil}$ (mm)	27
$t_h$ (mm)	9	$N$	288
$r_h$ (mm)	2.5	$A$ (mm <sup>2</sup> )	322
$r_{coil}$ (mm)	11.9	$r_{core}$ (mm)	3
$h_t$ (mm)	4	$t_p$ (mm)	2

표 5 의 설계변수를 바탕으로 마그네틱 구동기 설계에 적용하였으며, 설계의 타당성을 검증하기 위하여 유한 요소 해석용 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 유한 요소 해석을 수행하였으며 해석 결과 중간 위치에서의 전자석 구동기의 변위 강성은 12.1(N/A), 전류강성 9.2(N/mm)였다.

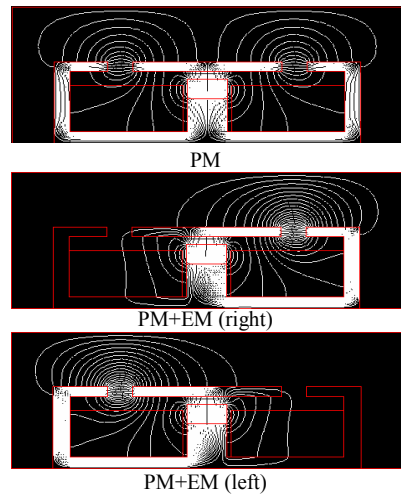


Fig.9 FEM analysis for the simplified model (ANSYS10.0)

그림 9 는 유한 요소 해석의 결과로 기준 위치에서의 영구자석만의 지속 선도와 영구자석과 전자석의 지속이 합쳐진, 한쪽으로 힘을 인가하고 있을 때의 지속 선도를 나타낸다. 전체적으로 누설이 있기는 하지만 이런 누설에 의한 영향은 근육의 힘-길이 특성을 추종하는데 있어 그리 큰 영향을 주지 않을 것으로 생각되며, 전자석의 지속이 영구 자석을 거의 통과하지 않음을 알 수 있으며, 영구 자석과 전자석의 지속이 중첩에 의하여 설계 개념과 같이 한쪽에서의 지속은 합산되고, 다른 한쪽에서의 지속은 감산이 이루어 지고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 그림 1 에서의 자료 설계와 정확히 일치하는 결과로서, 본 마그네틱 구동기의 타당성을 보장해 주며 본 논문의 설계변수 연구는 마그네틱 구동기 설계의 이해를 돕기 충분하다고 생각한다.

## 후기

본 논문은 2 단계 BK21 사업의 지원을 통해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- Alexander H. Slocum, "Precision Machine Design", pp,1~28, 1994
- 박인황 외, "전자석 구동기를 이용한 근육 특성의 정적 추종에 관한 연구", 기계학회, 2005
- Gerhard Schweitzer, Hannes Bleuler, and Alfons Traxler, "Active Magnetic Bearings", pp,55~112, 1994
- Eric H. Maslen, Carl R. Knospe, "Design of Thrust Actuators", pp,1~23, 2001