

직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기와 전자석 추진 부상 시스템의 설계 변수에 따른 전자기 특성해석

장석명\*, 최지환\*, 박지훈\*, 성소영\*  
충남대학교\*

Analysis on electromagnetic characteristics of thrust/levitation system using linear switched reluctance motor and electromagnet according to design parameters

Seok-Myeong Jang\*, Ji-hwan Choi\*, Ji-Hoon Park\*, So-Young Sung\*  
Chungnam National University\*

**Abstract** - This paper deals with extraction of design parameters of Linear Switched Reluctance Motor (LSRM) and electromagnet based on force calculation using space harmonic analysis and 2D Finite Element Method (FEM) measurement. We introduce the design method employing FEM and parameter estimation method and a characteristics of LSRM according to variation of parameter.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 스위칭 제어 장치가 결합된 특수형태의 모터로 분류되어진다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각각 다른 개수의 극을 가지고 있다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구자석이 존재하지 않는 간단한 구조를 갖는다. SRM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자의 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자시킴으로써 토크를 얻게 된다. 즉, 스위칭 소자를 ON, OFF 시켜 해당권선에 전압을 인가하여 전류의 크기를 조절하고, 그때의 전류 크기와 비례하는 쇄교자속 수에 의해 가변속 운전이 가능하게 된다. SRM은 이러한 간단한 구조이기 때문에 제작 생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있고, 직류모터와 같이 기동특성이 좋고 토크가 큰 반면에 정기적으로 브러쉬를 교환하는 등 유지, 보수에 필요성이 적으며, 유도 전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적당 토크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다.[1] 직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기(LSRM)는 SRM을 축방향으로 잘라 펼쳐놓은 형태로 직선 운동이 필요한 곳에서 직접 추력을 발생시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. 또한 SRM은 고정자에만 권선이 설치되는 반면 LSRM은 고정자와 가동자 어느 곳에서나 권선을 설치할 수 있다. 따라서 SRM의 경우 권선이 설치되는 고정자와 회전자 뚜렷이 구분되나, LSRM의 경우 고정자와 가동자의 구분이 모호하므로 권선이 설치되는 부분을 고정자로 권선이 설치되지 않는 부분을 가동자로 구분한다.

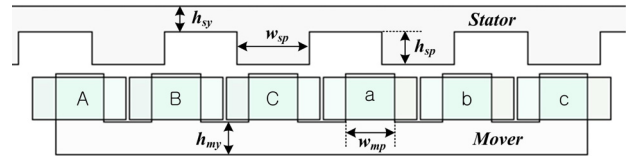
본 논문에서는 추진 부상 시스템에 사용되는 LSRM과 전자석의 설계 사양에 따른 힘특성을 다루고자 한다. 설계 요소에 대한 힘특성을 다루기 위하여 그림 1과 같이 해석 모델을 제시하였으며, 각각의 요소에 대하여 전자기 특성을 해석하였다. R.Krishnan이 제시한 힘 계산식을 이용하여 해석적인 방법에 의한 LSRM의 힘특성을 해석하였고, 유한요소법과 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 설계변수에 따른 힘 특성 해석

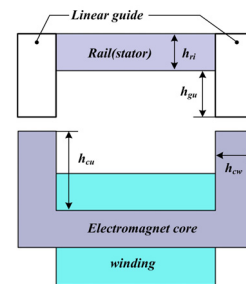
2.1 LSRM의 자계 특성식과 힘 특성식

그림 1의 LSRM은 6/4극의 구조로 가동자인 6극에 권선이 시행되고, 고정자는 4극이다. 그림 1에서 보여지는 LSRM의 설계변수는 대문자 A는 positive phase, 소문자 a는 negative phase이다.  $h_{my}$ 는 가동자의 요크 높이,  $w_{mp}$ 는 가동자의 치 너비,  $h_{sy}$ 는 고정자의 요크 높이,  $h_{sp}$ 는 고정자의 치 높이,  $w_{sp}$ 는 고정자의 치 너비이다. LSRM의 공극길이, 속도, 고정자와 가동자의 극피치는 고정된 상태에서 제시된 설계변수의 값을 달리하여 LSRM의 추력 및 수직력 특성을 해석하였다. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 코일에 의한 자계특성식은 식(1)의 코일에 의한 전류밀도로부터 계산할 수 있다.

$$J_n(x) = \sum_{n=1,odd}^{\infty} \frac{2Ni}{b_0} e^{-jk_n x} \tag{1}$$



〈그림 1〉 설계변수를 갖는 LSRM 해석모델



〈그림 2〉 설계변수를 갖는 전자석 해석모델

여기서, N은 극당 턴수, i는 부하 전류,  $b_0$ 는 슬롯 개구간 폭이며,  $K_n = n\pi/\tau$ 로 주어지며 n은 고조파 차수이다. 식(1)과 맥스웰 방정식을 이용하여 식(2)와 같은 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial z^2} = 0 \tag{2}$$

여기서,  $A_{zn}$ 은 자기 벡터퍼텐셜 A의 z성분이고, 전류밀도와 같은 방향 성분을 갖는다. 식(2)의 해와 자기 벡터퍼텐셜의 정의로부터 식(3)의 자계특성식을 얻을 수 있다.

$$B_{xn} = k_n \left\{ \frac{\mu_0 J_n (\tanh k_n Y - \sinh k_n Y)}{K_n (\sinh K_n R_t - \tanh k_n R_s \cosh k_n R_t)} \right\} e^{-jk_n x} \tag{3}$$

$$B_{yn} = jk_n \left\{ \frac{\mu_0 J_n (\sinh k_n Y - \cosh k_n Y)}{K_n (\sinh K_n R_t - \tanh k_n R_s \cosh k_n R_t)} \right\} e^{-jk_n x}$$

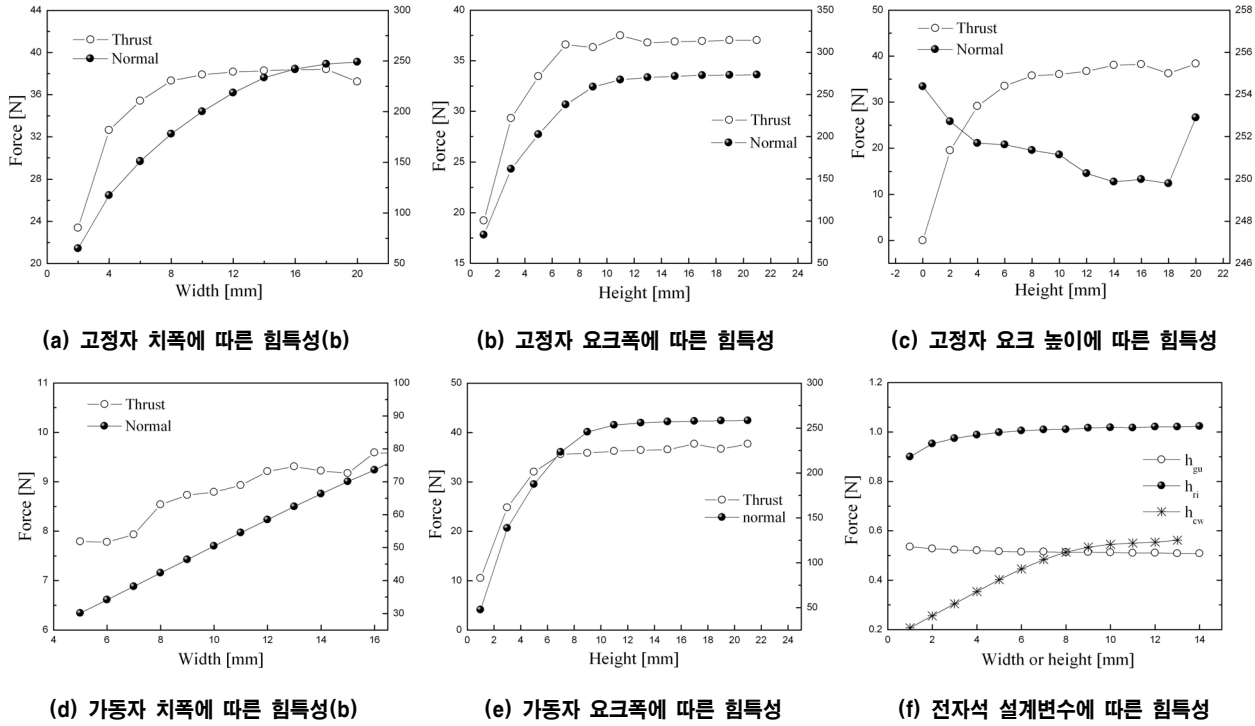
식(3)의 자계특성식을 이용하여 자속밀도를 구하기 위한 경계조건은 주어져 있다.[2]

R. Krishnan은 공극 자속밀도( $B_y$ )를 이용하여 정렬과 비정렬 위치에 서 힘 계산을 위한 수식을 제시하였으며 식(1)과 같다.[3]

$$F_x = \frac{B_y^2}{2\mu_0} ZY = \frac{B_y^2}{2\mu_0} L_w g \tag{4.1}$$

$$F_y = -\frac{B_y^2}{2\mu_0} XZ = -\frac{B_y^2}{2\mu_0} w_{sp} L_w \tag{4.2}$$

여기서, X는 치 피치이고, Y는 공극길이, Z는 기기의 깊이이며,  $L_w$ 는 적층방향 길이이고,  $w_{sp}$ 는 고정자의 치 너비이다.



〈그림 3〉 유한요소법에 의한 설계변수에 따른 LSRM과 전자석 힘특성

### 2.2 전자석의 부상력 해석

그림 2는 전자석의 부상력 해석을 위한 2차원 해석모델이며, 1차축과 2차축 모두 C코어 형태로 되어있다. 전자석의 설계변수는 그림에 제시되어 있으며 공극길이와 전류의 크기, 턴수를 고정시키고 설계변수에 대해서 해석하였다. 이 그림에서 전자석에 저장된 에너지는 식(5)와 같이 표현된다.

$$W_m(t) = \frac{1}{2} L[i(t)]^2 = \frac{1}{2} L(z, i) [i(t)]^2 \quad (5)$$

여기서  $i(t)$ 는 코일에 흐르는 전류이고,  $L(z, i)$ 는 권선의 인덕턴스로 식(6)으로 주어진다.

$$L(z, i) = L(z) = \frac{N}{i} \phi(t) = \frac{N}{i(t)} \frac{Ni(t)}{R_m} = \frac{\mu_0 N^2 A}{2z(t)} \quad (6)$$

여기서  $\phi(t)$ 와  $N$ 은 각각 공극자속 및 권선의 턴 수이고,  $z(t)$  및  $R_m$ 은 각각 공극길이 및 그림의 자기회로에 대한 릴럭턴스이다. 식(5)와 식(6)을 이용하여 식(7)로 주어지는 전자석의 부상력을 구할 수 있다.

$$F(z, i) = \frac{dW_m(t)}{dz} = \frac{d}{dz} \left\{ \frac{1}{2} L(z, i) [i(t)]^2 \right\} = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left\{ \frac{i(t)}{z(t)} \right\}^2 \quad (7)$$

### 2.3 해석결과

그림 3은 LSRM과 전자석의 설계변수에 따른 해석결과를 보여주고 있다. 그림 3.(a), (b), (c)는 고정자의 설계변수에 따른 힘특성을 나타내고, 그림 3.(d), (e)는 가동자의 설계변수에 따른 힘특성을 나타내며, 그림 3.(f)는 전자석의 설계변수에 따른 힘 특성을 보여준다. 요크높이를 제외하면 설계변수값이 커질수록 추진력과 부상력이 커짐을 확인할 수 있다. 하지만 기기의 체적이 커지면 기계적·전기적 손실이 커지게 되므로 적정 설계값을 선택하는 것이 중요하다. 전자석의 부상력 특성은 전류밀도를 일정하게 하기 위해 턴수를 최소화하여 해석한 것이며 전자석의 부상력이 전류의 제곱에 비례하므로 전류가 큰 상태에선 설계변수에 따른 힘의 차이가 커지게 된다.

## 3. 결 론

LSRM은 SRM을 축방향으로 잘라 펼쳐 놓은 형태의 기기로 동일 체적의 다른 기기에 비해 토크가 크고, 제작단가와 유지보수 면에서 우수한 특성을 가지고 있다. 본 논문에서는 가동자와 고정자의 설계변수들에

따른 유한요소법을 이용한 힘 특성 해석을 수행하였다. 해석된 결과로부터 최종적으로 하나의 해석모델을 선정하여 2D 유한요소해석을 수행하였으며, 전류의 입력 스위칭은 해석모델의 인덕턴스 프로파일을 근거로 하여 수행하였다. 해석된 결과로부터 동일권선 사양의 가동자의 힘은 고정자와 가동자의 설계 요소에 따라 크게 변화함을 알 수 있었으며, 추후 동특성 해석에 적용할 것이다.

〈표 1〉 최적 설계사양을 LSRM모델

항 목		사 양
가동자	치 폭	15 [mm]
	치 높이	15 [mm]
	요크 높이	10 [mm]
고정자	치 폭	22.5 [mm]
	치 높이	10 [mm]
	요크 높이	8 [mm]
공극길이		3 [mm]
스택길이		34 [mm]

### 〔참 고 문 헌〕

- [1] 김윤현, "토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어", 박사학위논문, 한양대학교, 2001.
- [2] 장성명, 박지훈, 최장영, 성호경, "해석적인 방법에 의한 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일 선정", 2005년 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환 시스템학회 추계학술대회, 권호, pp254-256, 2005.
- [3] Byeong-Seok Lee, Han-Kyung Bae, P. Vijayragha van, R. Krishnan, "Design of a linear switched reluctance machine", IEEE Trans. Ind. Appl, Vol36, no.6, pp.1571-1580, Nov. 2000.