

수직력을 고려한 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계

장석명<sup>1</sup>, 박지훈<sup>1</sup>, 고경진<sup>1</sup>, 심호경<sup>2</sup>, 심소영<sup>2</sup>  
 충남대학교 전기공학파<sup>1</sup>, 한국기계연구원<sup>2</sup>

Design of Linear Switched Reluctance Motor considering to Normal Force

Seok-Myeong Jang<sup>1</sup>, Ji-Hoon Park<sup>1</sup>, Kyoung-Jin K<sup>1</sup>o, Ho-Kyung Sung<sup>2</sup>, So-Young Sung<sup>2</sup>  
 Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University<sup>1</sup>, KIMM<sup>2</sup>

**Abstract** - This paper deals with design of Linear Switched Reluctance Motor (LSRM) considering to normal force. First, we derived design factor from pole arc ratio of stator and mover, and calculated time constant using inductance and resistance. Second, we decided design parameter from design factor using time constant, and analyze characteristics for LSRM using finite element analysis. Finally, we analyzed force characteristic according to design factor.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 스위칭 제어 장치가 결합된 특수형태의 모터로 분류되어진다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 불극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 개수의 극을 가지고 있다. 특히, 고정자 부분에 만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구자석이 존재하지 않는 간단한 구조를 가진다. SRM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자의 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자시킴으로서 토크를 얻게 된다. 즉, 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 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, 유도전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적당 토크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다.[1] LSRM은 SRM을 축 방향으로 잘라 펼쳐놓은 형태의 기기로 회전기가 직선 추력을 얻기 위하여 기어, 벨트 등을 연결하는 반면에 직접 추력을 전달할 수 있다. 그러나 직선기의 경우 구조적으로 수직력이 크게 발생하게 되어 공극의 크기를 십 수 mm 정도로 취해야만 하므로 회전에 비하여 역률이 나쁘다. 또 단부 효과 및 공극에서의 누설자속을 적게 하기 위하여 극 간격이 가능한 한 크게 해야 하는 등 회전기와는 구조 및 특성이 매우 다르다.[2]

본 논문에서는 수직력을 고려한 LSRM의 설계를 다루고자 한다. LSRM은 구조적으로 수직력이 크게 발생하며, 이것은 설계/제작시 단점으로 작용한다. 또한 LSRM을 이용한 대상이 웨이퍼 이송장치 이거나 부상시스템인 경우 수직력에 의한 리플을 방지하기 위한 해석 및 설계가 필요하다. 본 논문에서는 수직력을 고려한 LSRM의 설계와 제작을 위한 모델의 요구 사양을 결정하고 만족하는 LSRM의 설계 요소를 이용하여 수직력

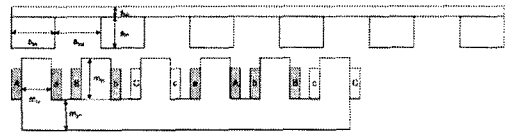


그림 1. LSRM의 설계 모델

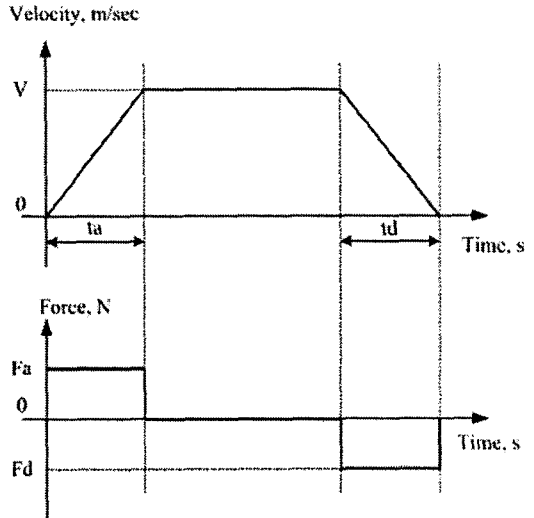


그림 2. LSRM의 속도와 힘 프로파일

의 특성을 해석하였다.

2. LSRM의 설계

2.1 설계 사양

그림 1은 LSRM의 설계 모델을 보여주고 있으며, 6/4극의 구조로 가동자인 6극에 권선이 시행되고, 고정자는 4극이다. 여기서  $s_{tw}$ 는 고정자 치 너비,  $s_{sw}$ 는 슬롯 너비,  $s_{sh}$ 는 치 높이,  $s_{yh}$ 는 요크 높이이고,  $m_{tw}$ 는 가동자 치 너비,  $m_{th}$ 는 치 높이,  $m_{yh}$ 는 요크 높이이다. 그림 1에서 알 수 있듯이 LSRM의 가동자는 고정자의 하단에 위치하며, 가동자의 수직력에 의하여 공극이 달라질 수 있기 때문에 초기 설계 사양에 의한 공극에 의한 LSRM의 설계뿐만 아니라 6극에 따른 특성 해석의 검토도 중요하다. 그림 2는 LSRM의 속도와 힘 프로파일을 보여주고 있으며, 가속시간과 감속시간 그리고 정속도와 그에 따른 LSRM의 힘 특성을 나타낸다. 그림 2의 프로파일을

통하여 LSRM의 초기 설계를 진행하며, 표 1은 그림 2의 프로파일을 정리한 LSRM의 설계 사양을 보여주고 있다.

표 1. 요구 사양

설계 요소	사양
속도 (V)	1 m/s
가속 시간 (ta)	0.5 sec
감속 시간 (td)	0.5 sec
고정자 길이	2 m
공극 길이	3 mm

## 2.2 LSRM의 초기 설계

표 1의 요구 사양을 이용하여 가속도를 계산할 수 있으며  $2 \text{ m/sec}^2$ 이다. 계산된 가속도와 제작될 LSRM의 가동자의 질량을 통하여 힘을 도출할 수 있으며, 본 논문에서는 그림 1의 가동자와 고정자의 설계 요소에 따른 LSRM의 설계를 진행하였다. 이때 가동자 코일의 전류 밀도와 입력 전류는  $8 \text{ A/mm}^2$ 과  $5 \text{ A}$ 로 고정하였다.

4극인 고정자의 길이 즉, 가동자의 이동거리는 표 1로부터  $2 \text{ m}$ 이고, LSRM의 가동자가 가속과 정상상태 그리고 감속에 관한 특성을 설계될 모델로부터 실현하기 위해서는 소형 모델임을 알 수 있다. 설계 특성식[3]으로부터 얻어진 설계 요소로부터 요구 사양을 만족하는 고정자와 가동자의 치 너비를 결정해야 한다. 이것은 치 너비와 전류 밀도, 입력 전류로부터 요구 사양 중 속도를 만족함을 알기 위함이며, 치 너비와 전류 밀도 등을 이용한 극당 턴 수로 저항과 인덕턴스 값 및 시정수를 계산할 수 있으며, 설계 요소에 의하여 요구 속도를 만족하기 위해서는 입력 전류가 인가될 수 있는 시간이 결정된다. 따라서 저항과 인덕턴스에 의한 시정수의 5배가 정상 상태임을 이용하여 요구 사양을 만족하는 설계 요소를 결정할 수 있다.

## 2.3 LSRM의 특성 해석

표 2는 요구 사양을 만족하는 LSRM 초기 설계를 위한 설계 사양을 보여주고 있다. 표 2의 설계 사양으로부터 LSRM의 특성 해석을 수행하였다.

그림 3은 LSRM의 인덕턴스를 해석한 결과이며, 비정렬 위치에서 최소값  $0.046 \text{ H}$ , 정렬 위치에서 최대값  $0.0088 \text{ H}$ 를 갖는다. 그림 4는 LSRM의 추력 특성을 유한요소해석을 통하여 해석한 결과이고, 최대값은  $3.43 \text{ N}$ 이다. 그림 5는 수직력 특성을 해석한 결과이고, 최대값은  $27.68 \text{ N}$ 이다.

표 2. 특성 해석을 위한 설계 사양

항 목		사 양
가동자	치 너비	15 mm
	치 높이	15 mm
	슬롯 너비	15 mm
	요크 높이	10 mm
고정자	치 너비	22.5 mm
	치 높이	10 mm
	슬롯 너비	22.5 mm
	요크 길이	8 mm
스택 길이		50 mm
공극 길이		3 mm

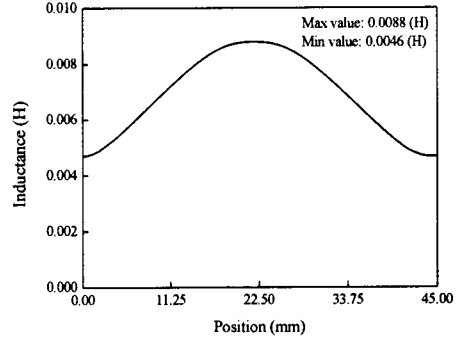


그림 3. LSRM의 인덕턴스 특성

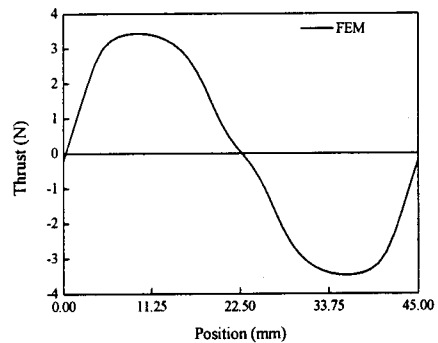


그림 4. LSRM의 추력 특성

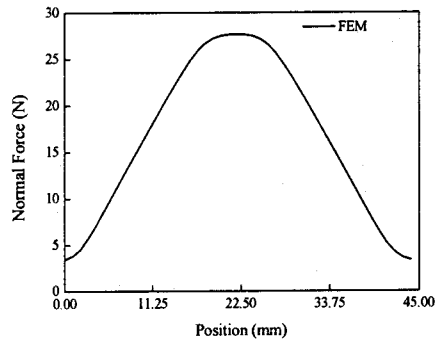


그림 5. LSRM의 수직력 특성

## 3. 설계 요소에 따른 LSRM의 수직력

표 2의 설계 사양으로부터 LSRM 가동자의 질량은 극소간판 질량과 권선 질량의 합으로 계산할 수 있으며, 밀도와 부피의 곱으로 도출할 수 있다. 따라서 LSRM 가동자의 질량은 약  $1 \text{ kg}$ 이며,  $F=ma$ 의 공식에 의하여 힘  $F$ 는 약  $2 \text{ N}$ 이 된다. 이것은 해석된 LSRM의 추력의 최대값에 만족한다. 또한 수직력의 최대값  $27.68 \text{ N}$ 은 가동자가 구동시 리플이 발생할 수 있는 값이며, 리플이 없는 평활한 구동을 위하여 수직력의 해석이 필요함을 의미한다. 따라서 요구 사양을 만족하는 초기 설계 사양에 대하여 설계 요소를 변경하여 수직력을 해석하였다.

동일한 입력 전류와 상당 턴수 및 입력 전류에 대하여 설계 요소에 따라 Case I, Case II, Case III로 해석 모델을 선정하였다.

Case I은 가동자의 치 높이를 20 mm로, Case II는 고정자의 치 높이를 13 mm로, Case III은 가동자와 고정자의 치 높이를 20 mm와 13 mm로 하였다. Case I은 추력의 최대값이 3.39471 N이고, 수직력의 최대값은 27.838 N이다. Case II는 추력의 최대값이 3.47346 N이고, 수직력의 최대값은 27.8023 N이다. Case III은 추력의 최대값이 3.51238 N이고, 수직력의 최대값은 27.5551 N이다. 각 해석 모델에 대한 추력과 수직력을 정리하면 표 3과 같다. 표 3의 결과로부터 초기 모델에 대하여 고정자의 치 높이가 커지면 추력과 수직력이 커짐을 알 수 있다. 따라서 동일 가동자에 대하여 고정자의 설계 요소 중 치 높이를 가변하였을 때 만족하는 추력과 수직력을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

표 3. 해석 모델에 따른 힘 특성 결과

모델	추력	수직력
초기 모델	3.43 N	27.68 N
Case I	3.39471 N	27.838 N
Case II	3.51238 N	27.5551 N
Case III	3.47346 N	27.8023 N

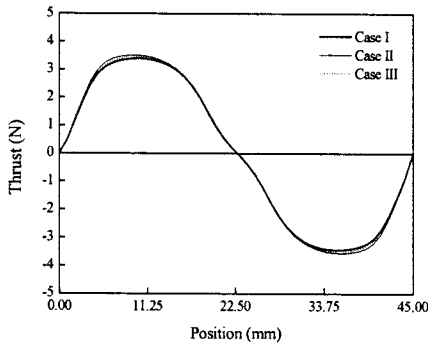


그림 6. 해석 모델에 따른 추력 특성

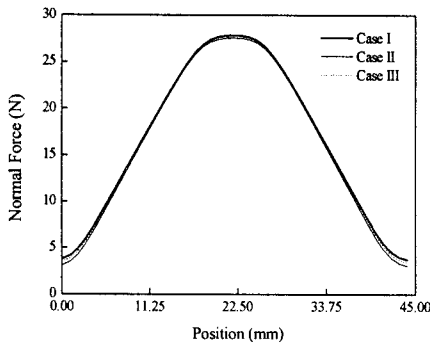


그림 7. 해석 모델에 따른 수직력 특성

#### 4. 결 론

LSRM은 SRM을 축 방향으로 잘라 펼쳐 놓은 형태의 기기로 동일 체적의 다른 기기에 비해 토크가 크고, 제작단가와 유지보수 면에서 우수한 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 가동자가 고정자의 하단에 위치하는 형태의 LSRM에 대한 설계를 다루고 있으며, 구조적으로 하단에 위치하는 가동자의 수직력을 고려한 설계를 다루고 있으며, 설계 요구 사양을 만족하기 위하여 고정자와 가동자의 극호를 이용하여 설계 변수를 도출하였으며, 고정자 권선과 고정자와 가동자간의 구조 등으로부터 인덕턴스와 저항을 계산하여 요구 속도에 적합한 시정수를 이용하여 설계 사양을 결정하였다. 또한 설계 사양으로부터 유한요소해석을 이용하여 LSRM의 특성 해석을 수행하였으며, 해석된 결과는 요구 사양과 만족함을 확인하였다. 마지막으로 하단에 위치하는 가동자의 구동시 리플 특성을 예측하기 위하여 설계 요소에 따른 해석 모델을 선정하여 힘 특성을 해석하였다. 해석된 결과로부터 동일 권선 사양의 가동자의 힘은 고정자의 설계 요소에 따라 크게 변함을 알 수 있으며, 추후 동특성 해석을 통하여 공극의 변화에 따른 구동 특성을 확인할 예정이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어, 박사학위논문, 한양대학교, 2001.
- [2] 정연호, VVVF 인버터로 구동되는 LIM의 동특성, 석사학위논문, 충남대학교, 1996.
- [3] K.N.Srinivas, R.Arumugam, "Analysis and characterization of switched reluctance motors," IECON '03, The 29th Annual Conference of the IEEE, vol.3, 2-6 Nov. 2003, pp.2690-2698.
- [4] R.Krishnan, Switched reluctance motor drives, CRC Press, 2001.
- [5] Seok Myeong Jang, Ji Hoon Park, Jang Young Choi, Han Wook Cho, "Analytical prediction and measurements for inductance profile of linear switched reluctance motor," IEEE Trans. Magnet., vol.42, Oct. 2006, pp.3428-3430.
- [6] 장석명, 박지훈, 최장영, 유대준, 성호경, "고속 직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계," 2007년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회, 2007.4.19~20.