

유한 요소법을 이용한 직선형 스위치드 릴럭턴스 모터의 설계

장 석명, 권 정기, 조 한욱, 박 지훈, 성 호경*, 김 봉섭*
 충남대학교, KIMM*

Design of Linear Switched Reluctance Motors using Finite Element Method

S. K. Jang, J. K. Kwon, H. W. Cho, J. H. Park, H. K. Sung*, B. S. Kim*
 Chungnam National Uni., KIMM*

Abstract - This paper deals with design of linear switched reluctance motors(LSRM) which drive a testing machine of eddy current magnetic repulsion system using Halbach array and conducting plate. The design method employing finite element method and parameter estimation method and a characteristic of LSRM according to variation of parameter is introduced

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)는 스위칭 제어 장치가 결합된 특수형태의 모터로 분류되어진다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 개수의 극을 가지고 있다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구 자석이 존재하지 않는 간단한 구조를 가진다. 이것이 SRM의 특징이다. SRM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자 시킬 때 고정자의 쇄고 자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자 시킴으로서 토오크를 얻게 된다. 즉, 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 해당권선에 전압을 인가하여 전류의 크기를 조절하고, 그 때의 전류 크기와 비례하는 쇄고 자속 수에 의해 가속속 운전이 가능하게 된다. SRM은 이러한 간단한 구조이기 때문에 제작·생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있으며 또한, 직류모터와 같이 기동특성이 좋고 토크가 큰 반면에 정기적으로 부러쉬를 교환하는 등 유지, 보수 필요성이 적으며 유도전동기와 비교할 때에는 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적당 토크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다[1].

직선형 스위치드 릴럭턴스 모터(LSRM)는 SRM을 축 방향으로 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 회전자가 뚜렷이 구분되나, LSRM의 경우 고정자와 가동자의 구분이 모호하므로 권선이 설치되는 부분을 고정자로 권선이 설치되지 않는 부분을 가동자로 구분한다. 본 논문에서는 Halbach 배열을 갖는 자기부상시스템 시험기의 구동 시스템으로 사용하기 위한 LSRM의 전자기적 설계를 다루고 있다. 설계 과정은 자기 회로 설계와 전기 회로 설계로 구분되어지며, 자기 회로의 설계는 유한요소법과 파라미터 추정 기법을 이용하여 요구 사양에 적합한 기계적인 구조를 설계하였으며, 전기적 특성값으로부터 전기 회로를 설계하였다. LSRM의 설계를 위하여 각각의 설계 파라미터에 의한 특성 해석을 수행하였으며, 특성 해석치가 설계치에 부합하도록 설계 파라미터를 가변시켰다.

2. 본 론

2.1 직선형 스위치드 릴럭턴스 모터의 특성 해석

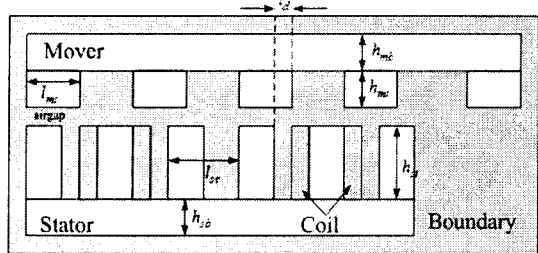


그림 1. LSRM의 해석 모델 및 설계 변수

LSRM은 고정자와 가동자가 모두 돌극형 구조를 가지고 있으므로 특정 부분을 영역으로 분류하고, 카터 계수를 이용하여 유효 공극 길이를 산정하는 방법 등을 이용하는 공간 고조파법에 의한 전자장 해석이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 유한요소법을 이용하였으며, 그림 1은 LSRM의 특성 해석을 수행하기 위한 해석 모델 및 설계 변수를 제시하고 있다. 초기 설계 모델로 제시한 LSRM은 6/4극을 갖는 모델로서, 설치 장소의 공간적 제약과 직선형 기기의 동기 속도를 고려하여 가능한 극피치를 최대화 하는 모델로 선정하였다.

표 1. 설계 변수에 따른 특성 확인을 위한 초기 설계 사양

설계 변수	고정자	가동자
극피치	40 (mm)	60 (mm)
치피치	20 (mm)	24 (mm)
치깊이	40 (mm)	15 (mm)
백아이언 길이	20 (mm)	10 (mm)
극호각 (β_s/β_r)	30/36	

표 1은 그림 1에 제시한 초기 해석의 설계 사양을 보여주고 있다. 초기 해석 모델의 고정자와 가동자의 재질은 모두 선형적인 투자율을 갖는다고 가정하였으며, 코일부의 기자력은 슬롯 면적, 권선의 전류 밀도 (A/mm^2) 및 점적율을 고려하여 산정하였다. LSRM의 설계 변수에 따른 특성 해석을 위하여 설계 변수 중 고정자의 극피치를 고정하였으며, 다른 설계 변수를 변화시키면서 LSRM의 추력 및 수직력의 특성을 확인하였다. 그림 2는 고정자 및 가동자의 치깊이에 따른 추력 및 수직력의 특성값을 보여주고 있다. 그림에서 가동자의

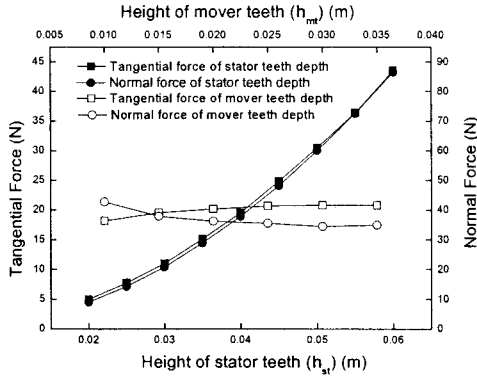


그림 2. 고정자 및 가동자의 치깊이에 따른 힘특성

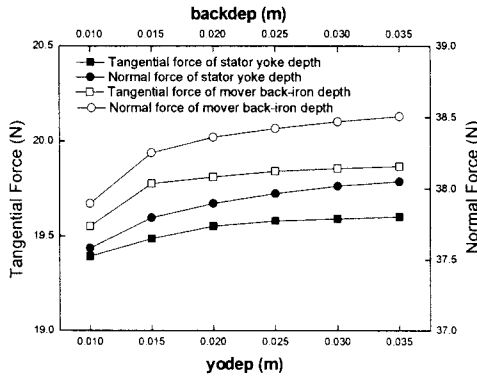


그림 3. 고정자 및 가동자의 백아이언 두께에 따른 힘특성

치깊이가 증가할수록 추력 특성값은 증가하며, 수직력 특성값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 고정자의 치깊이가 증가할수록 추력 및 수직력의 특성값은 모두 증가하며, 증가분의 변동폭이 유사한 것을 확인할 수 있다. 이것은 고정자의 치깊이가 증가할수록 슬롯 내에 감을 수 있는 권선의 수가 증가하기 때문이다.

그림 3은 고정자 및 가동자의 백아이언 두께에 따른 힘특성을 보여주고 있다. 그림에서 고정자 및 가동자의 백아이언 두께가 증가할수록 추력 및 수직력의 특성값은 증가하며, 점차 포화되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 백아이언의 두께를 산정하는 기준을 얻을 수 있다.

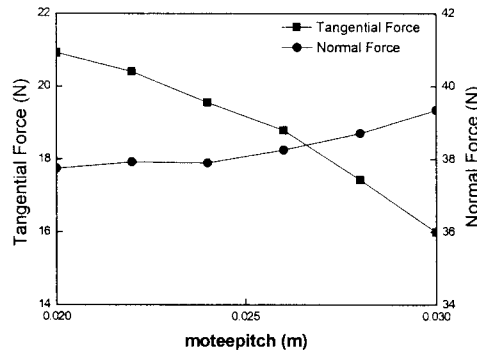


그림 4. 가동자 치피치에 따른 힘특성

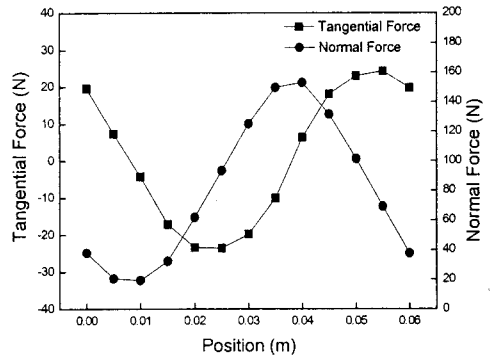


그림 5. 가동자 위치에 따른 힘특성

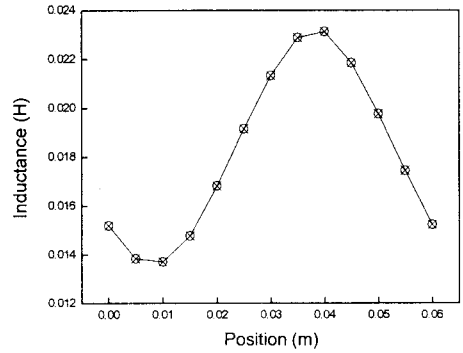


그림 6. 가동자 위치에 따른 인덕턴스의 변화

그림 4는 고정자의 치피치가 고정되어진 경우 가동자의 치피치에 따른 힘특성을 보여주고 있다. 그림에서 가동자의 치피치가 증가할수록 추력은 감소하며, 수직력은 증가하는 형태를 볼 수 있다. 이것은 릴럭턴스의 변화량이 점차 감소함을 의미한다. 일반적으로 스위칭 패턴을 고려하여, 가동자의 치피치는 고정자보다 크게 설계하며, 일반적으로 표 1에 제시한 극호비를 사용한다. 그림 2,3,4의 결과로부터 동기 속도를 고려하여 고정자의 극피치가 결정된 경우 요구 추력을 얻을 수 있는 설계 변수를 얻을 수 있다.

그림 5와 6은 각각 가동자의 위치에 따른 힘특성 및 인덕턴스 변화량을 보여주고 있다. 그림 5와 6의 특성값은 가동자를 고정시키고, 고정자를 일정 크기만큼 이동하면서 특성 값을 계산한 것이며 특히, 인덕턴스 특성값은 슬롯내의 전류 밀도를 적절히 턴 수와 전류량으로 배분하여 계산하였다.

2.2 직선형 스위치드 릴럭턴스 모터의 설계

표 2. LSRM 설계 요구 사항

요구 사항	크기
요구 추력	800 (N)
가동자 길이	80 (mm)
정격 속도	20 (m/s)
공극	5 (mm)

표 2는 Halbach 배열을 갖는 자기부상시스템 시험기

의 구동 시스템에 필요한 요구 사항을 보여주고 있다. 표에서 알 수 있듯이 고정자의 깊이는 80(mm)로 고정되어 있으며, 가능한 고정자의 극피치를 작게 설계해야 하는 공간적 제약을 갖는다.

2.2.1 자기 회로의 설계

표 3. Halbach 배열 자기부상시스템 추진용 LSRM 시험기의 설계 사양

설계 변수	고정자	가동자
극피치	90 (mm)	135 (mm)
치피치	45 (mm)	54 (mm)
치깊이	130 (mm)	40 (mm)
백아이언 깊이	30 (mm)	30 (mm)
사용 재질	M19	
극호각 (β_s/β_r)	30/36	

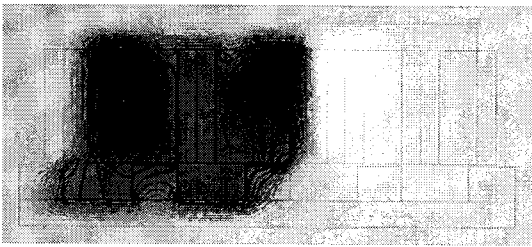


그림 7. LSRM 시험기의 전자기적 특성

표 3은 앞서 제시한 방법을 이용하여, 유한요소법과 파라미터 추정기법을 이용한 LSRM 시험기의 설계 사양을 보여주고 있다. 시험기의 극수비는 6/4극을 갖으며, 고정자의 치깊이는 요구 추력이 발생하는 기자력을 만족시키도록 설계 되었다 또한 가동자와 고정자의 치깊이는 시험기의 제작 비용과 추력 특성을 고려하여 선정하였다.

그림 7은 LSRM 시험기의 자기벡터포텐셜 분포 및 자속선을 보여주고 있다. 그림에서 LSRM 시험기는 정격 전류에서 대부분의 영역이 포화되는 특성을 보여주고 있으므로, 식 (1)과 같은 투자율 곡선을 사용하였다.

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{\mu_{rmax}}{1 + C|\nabla \times A|^2} + \mu_{rmin} \right) \quad (1)$$

2.2.1 전기 회로의 설계

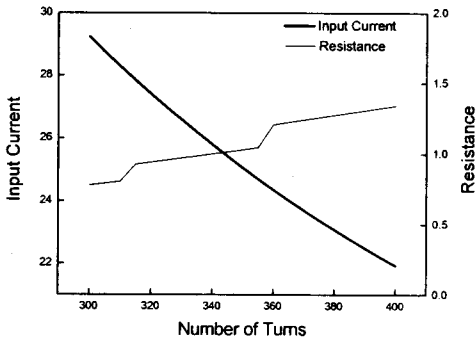


그림 8. LSRM의 권선 턴수 따른 입력 전류 및 권선 저항

표 4. 전기 회로의 설계 변수

설계 변수	크기
입력 전류	25 (A)
상당 턴수	350×2
도선 지름	1.6 (mm)
권선 저항	1.0874 (Ω)
상당 인덕턴스	0.1341 (H)
점적율	0.5

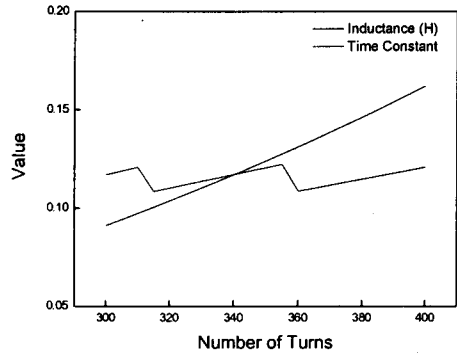


그림 9. LSRM의 턴 수에 따른 인덕턴스 및 시정수 특성

자기 회로의 설계에 의하여 요구 추력이 발생하는 슬롯의 면적을 계산하였으며, 슬롯 내의 전류 밀도는 점적율과 권선의 전류 밀도가 고려되었다. 따라서 슬롯 면적과 슬롯 내의 전류 밀도를 권선의 턴 수와 입력 전류량으로 적절히 나누어야 한다. 여기에서 턴 수의 증가는 입력 전류량의 감소를 의미하며, 상당 인덕턴스를 증가시키고, 권선 저항을 증가시킨다. 따라서 효율을 극대화시키는 적절한 턴 수 및 입력 전류량을 선택하여야 한다. 그림 8은 슬롯에 설치되는 권선의 턴 수에 따른 입력 전류량과 권선 저항의 특성을 보여주고 있다. 또한 그림 9는 권선의 턴 수에 따른 인덕턴스 및 시정수의 변화량을 보여주고 있다.

표 4는 그림 8과 같은 특성을 고려하여 적절히 선택된 전기 회로의 설계 사양을 보여주고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 Halbach 배열을 갖는 자기부상시스템 시험기의 구동 시스템으로 사용하기 위한 LSRM의 전자기적 설계를 다루었다. LSRM의 설계는 유한요소법과 파라미터 추정기법을 이용하였다. 또한 유한요소법에 의한 파라미터의 변화에 따른 힘 특성 및 인덕턴스 변화량 등의 해석을 수행하였다.

[참고 문헌]

- [1] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives, Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications", CRC Press, 2001
- [2] 황형진, 문재원, 안진우, "SRM의 극수비 변화에 따른 특성 해석", 대한전기학회 EMECS 학회 추계학술대회 논문집, pp. 36-38, 2003