

영구자석의 overhang 길이 및 skew 효과를 고려한 LSM 추력함수 도출

표세호, 이동엽, 장기봉, 김규택
 창원대학교 전기공학과

A Elicitation of Polynomial Equation of Thrust Coefficient for Linear Synchronous Motor by Experimental Design Method

Se-Ho Pyo, Dong-Yeup Lee, Ki-Bong Jang, Gyu-Tak Kim
 Changwon National University Electrical Engineering

Abstract - 본 논문은 900[N]급 PMLSM에서 영구자석의 오버행과 스류가 고려된 모델의 추력을 손쉽게 구할 수 있는 추력방정식을 도출하였다. 추력에 영향을 미치는 6개의 설계변수(공극, 치 길이, 영구자석의 폭과 높이, 영구자석 오버행 및 스류의 길이)를 선정하여 추력방정식을 도출하였으며, 3차원 유한 요소 해석을 통한 해석치와 실험치를 비교 분석하여 타당성을 확보하였다.

1. 서 론

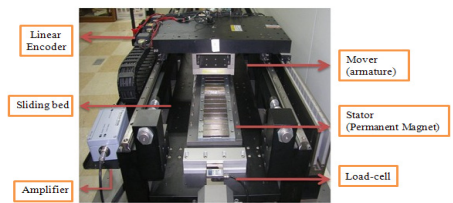
Linear Synchronous Motor(LSM)은 영구자석과 치-슬롯 구조의 상대적인 위치변화에 따라 디텐트력이 발생하게 된다. 디텐트력은 LSM의 운전 시 추력의 리플로 작용하여 운전특성을 크게 저하시킨다. 그러므로 추력의 리플성분인 디텐트력을 저감시키기 위하여 영구자석 또는 전기자 철심에 스류를 시행하는 방법, 영구자석의 폭 조절법, 전기자 슬롯의 형상 변화 등 많은 기법들이 적용되고 있다. 이 기법들 중 영구자석에 스류를 시행하는 방법이 널리 사용되고 있다. 영구자석에 스류를 시행하면 디텐트력을 크게 저감시킬 수 있으나, 발생 추력 또한 감소하게 된다. 그러므로 영구자석에 스류를 시행 할 경우, 저감된 발생추력을 보상하기 위하여 철심길이보다 영구자석의 축 방향 길이를 더 크게 하는 방법, 즉 영구자석에 오버행을 시행하는 방법이 많이 사용된다[1].

재질의 비선형 및 형상의 복잡성을 쉽게 고려 할 수 있는 유한요소 해석이 전기기기 특성 해석에 널리 사용 되고 있다. 영구자석에 스류와 오버행이 동시에 시행 된 모델의 경우 2차원 유한요소 해석을 통해서도 정확한 해석을 할 수 없기 때문에 3차원 유한요소해석을 반드시 수행하여야 한다. 하지만, 3차원 유한요소해석의 경우, 해석의 정확성을 얻을 수 있지만, 고성능의 하드웨어, 계산 시간의 증대 등의 단점을 지니게 된다. 따라서 본 논문에서는 3차원 유한요소 해석을 통하지 않고, LSM의 발생 최대 추력을 설계변수에 따라 계산 할 수 있는 추력 방정식을 도출 하였다[1][2]. 추력 방정식의 도출을 위해 설계 변수로는 LSM의 공극의 자속밀도에 영향을 주는 공극 길이(l_g), 영구자석의 폭(W_{pm}), 높이(l_{pm}), 스류 길이(l_{skew}), 오버행 길이(l_{oh}), 치의 축 방향(W_{core}) 길이를 선정하였다. 각 설계 변수에 따른 추력의 변화 특성을 3차원 유한요소 해석을 통하여 획득하였으며, 각 변수에 가중치를 고려하여 추력방정식을 도출 하였다.

2. 해석모델 및 특성해석

2.1 해석모델

그림 1과 표 1은 해석모델인 900[N]급 LSM의 시작기와 사양을 나타낸 것이다.



(a) 실험장치



(b) 기본모델 영구자석 배열 (c) 스류-오버행 모델 영구자석 배열

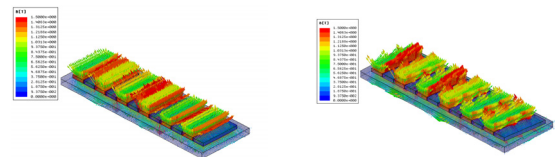
<그림 1> 시작기

<표 1> 시작기 사양

	Item	Symbol	Value(unit)
Stator	자속 밀도	B_r	1.36 (T)
	영구자석 높이	l_{pm}	9.0 (mm)
	영구자석 폭	W_{pm}	26.5 (mm)
	극 간격		30 (mm)
	영구자석 스류 길이	l_{skew}	0 (mm)
Mover (Armature)	영구자석 오버행 길이	l_{oh}	0 (mm)
	턴수		304
	치 높이	h_t	16.95 (mm)
	치 길이	W_{core}	93 (mm)
	치의 축방향 길이	w_t	14 (mm)
	슬롯 간격		40 (mm)
	정격 전류	I	6.53 (A)
공극 길이	l_g	1.4 (mm)	

2.2 특성해석

그림 1 (b)는 기본모델의 영구자석 배열이고, 그림 1의 (c)는 기본모델의 디텐트력을 저감시키기 위하여 스류를 10 [mm] 시행하고, 스류 시행으로 저감된 추력을 보상하기 위하여 4 [mm] 오버행을 시행한 스류-오버행 모델의 영구자석 배열이다. 그림 2는 두 모델의 자속밀도이다.



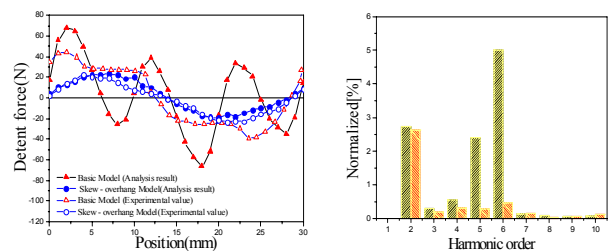
(a) 기본모델 자속밀도 (b) 스류-오버행 자속밀도

<그림 2> 자속밀도

2.3 실험 및 해석 결과 비교

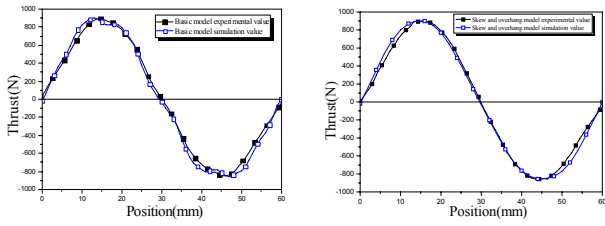
LSM의 추력 실험은 LSM의 추력과 디텐트력이 동시에 나타날 수 있도록 전기자에 정격전류를 인가시키고, 리니어 엔코더를 이용하여 이동자를 이동시키며 측정하였다. 로드셀(model: CAS, SBR-200L)은 고정자와 고정된 지지대 사이에 설치하여, 발생된 추력이 로드셀과 증폭기를 이용하여 전압이 출력 되도록 하였다. 이때 출력 전압은 추력이 20[kg] 일 때 증폭기 출력 전압이 1[V]가 되도록 설정하였으며, 전기자 전원은 6.53[A] 교류의 실효치를 고려하여 A상 9.23[A], B상 -4.615[A], C상 -4.615[A]의 고정된 직류를 인가하였다. 리니어 엔코더를 이용하여 1[mm] 간격으로 이동시키며 반복 측정하였다.

디텐트력의 측정은 추력의 측정방법과 동일하며, 이때 전기자 전원이 없는 상태로 측정하였다.



<그림 3> 디텐트력 및 고조파 분석

그림 3은 기본모델과 스쿼-오버행 모델의 디텐트력 특성을 비교한 것이다. 기본모델의 68.3[N]에서 스쿼-오버행 모델 23.3[N]으로 스쿼의 시행으로 디텐트력이 65.9[%] 크게 감소하였다. 기본모델의 경우 실험치와 해석치에 오차가 발생하였다. 이는 1[mm]씩 이동자의 변위를 이동할 경우, 디텐트력의 변화가 커 실측이 힘들기 때문이다. 스쿼-오버행 모델의 경우 이론치와 실험치가 일치하는 양호한 결과를 얻었다.



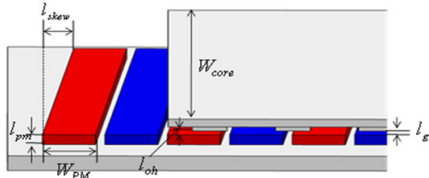
(a) 기본모델 추력 (b) 스쿼-오버행 모델 추력
〈그림 4〉 추력

그림 4는 두 모델의 실험치와 해석치를 비교한 것이다. 기본모델의 경우, 최대 추력의 해석치는 899.99[N], 실험치는 896.51[N]이다. 스쿼-오버행 모델의 해석치는 898.82[N], 실험치는 895.67[N]이다. 두 모델의 해석치와 실험치의 크기 및 주기가 일치하는 양호한 결과를 얻었다. 기본모델의 경우 디텐트력의 영향으로 인해 추력의 왜형률이 6.25[%]로 나타나고, 스쿼-오버행 모델의 왜형률은 2.75[%]로 추력 파형이 깨끗하게 출력됨을 확인할 수 있다. 이는 디텐트력에 영향을 주는 2,5,6 고조파가 스쿼의 시행으로 인해 5,6 고조파가 제거 되어 디텐트력의 영향이 크게 저감 되었기 때문이다. 하지만 완벽하게 제거 되지 못한 이유는 이동자의 단부효과로 인해 발생 되는 디텐트력의 2고조파는 스쿼에 의해서 제거 되지 않기 때문이다.

3. 추력방정식 도출

3.1 설계변수

추력 방정식의 도출을 위해 설계 변수로는 LSM의 공극의 자속밀도에 영향을 주는 공극 길이(l_g), 영구자석의 폭(W_{pm}), 높이(l_{pm}), 스쿼 길이(l_{skew}), 오버행 길이(l_{oh}), 치의 축 방향(W_{core}) 길이를 선정하였다. 그림 5와 표 2는 설계변수와 설계변수의 가변길이를 나타낸다.



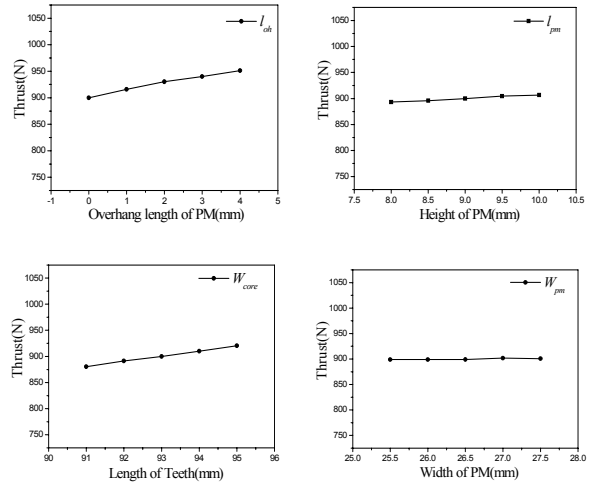
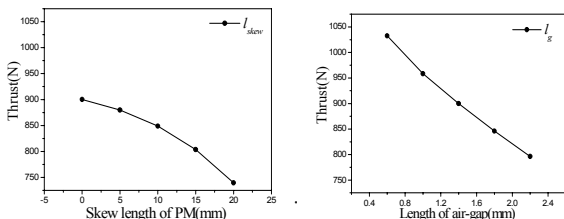
〈그림 5〉 설계변수

〈표 2〉 설계변수 가변길이

Item	Symbol	Variable range(mm)
영구자석 높이	l_{pm}	8 - 10
영구자석 폭	W_{pm}	25.5 - 27.5
영구자석 스쿼 길이	l_{skew}	0 - 20
영구자석 오버행 길이	l_{oh}	0 - 4
치 길이	W_{core}	91 - 95
공극 길이	l_g	0.6 - 2.2

3.2 설계변수에 따른 최대 추력 특성

그림 6은 3차원 유한요소 해석을 통해서 각 설계변수의 변화에 따른 최대추력의 변화 양상을 나타내었다. 6개의 설계변수 중 공극의 길이와 스쿼의 길이가 LSM의 최대추력에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 자석의 높이와 폭은 최대 추력에 크게 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.



〈그림 6〉 설계변수에 따른 최대추력

3.3 추력방정식

그림 6의 설계변수에 따른 최대추력의 양상을 통해서 각 설계변수의 가중치를 고려하여 부분실험법에 근거한 직교배열을 이용하여 실험계획법인 다구찌법에 의해 실험 수식을 도출하였다.

$$F = \frac{26.5l_{pm}}{[18.537 \times 1.005 W_{pm} \times (1.35l_{oh} + W_{core}) - 6.59 \times 1.25^5 \times l_{skew}] [0.3234l_g + 1.55]} \times l_{skew}$$

표 3은 도출된 추력 방정식을 통해 계산된 최대추력과 3차원 유한요소 해석을 통한 해석치를 비교한 것으로, 오차가 크지 않음을 확인할 수 있다.

〈표 3〉 3차원 유한요소 해석치와 추력방정식을 이용한 계산치 비교

Items [mm]						Peak Thrust[N]	
l_g	l_{pm}	l_{oh}	W_{core}	W_{pm}	l_{skew}	FEA	Equation
0.6	9	0	93	26.5	0	1032.63	1033.86
2.2	9	0	93	26.5	0	796.22	797.30
1.4	8.5	0	93	26.5	0	895.80	898.06
1.4	9	2	93	26.5	0	930.29	926.44
1.4	9	4	93	26.5	0	951.13	952.58
1.4	9	0	95	26.5	0	920.40	919.66
1.4	9	0	93	25.5	0	898.84	901.89
1.4	9	0	93	26.5	5	882.41	879.74
1.4	9	0	93	26.5	20	734.42	739.65
1.4	9	4	93	26.5	10	898.82	901.16
1.4	9	0	93	26.5	25	648.91	649.26
0.6	9	0	93	26.5	10	979.70	974.81
1	9.5	2	92	27	5	957.93	959.66
1	9	0	93	26.5	15	853.81	859.41
1.8	9	0	93	26.5	5	830.40	826.36
1.8	9	3	93	26.5	15	795.44	791.96

3. 결 론

LSM의 디텐트력을 줄이기 위해서 스쿼와 오버행을 시행한 모델의 특성해석을 위해서 3차원 유한요소 해석을 수행 해야한다. 3차원 유한요소 해석 시 고성능의 하드웨어와 오랜 해석시간이 필요한 단점을 줄이기 위해서 설계변수를 선정하여, 설계변수에 따른 추력방정식을 도출 하여 설계변수를 이용하여 LSM의 최대추력을 쉽게 구할 수 있다.

〔참 고 문 헌〕

[1] In-Cheol Hwang, Ki-Bong Jang and Gyu-Tak Kim, " A study on the characteristics analysis according to overhang and skew of permanent magnet in PMLSM", IEEE Trans. *Electrical Machines and System*,2007. ICEMS, International Conference on, pp1255-1258, Oct.2007
 [2] Ki-Chan Kim and Ju Lee, "A Study on the Overhang Coefficient for the Design and Analysis of Permanent Magnet Machine by simulation DOE",*IEEE Trans. Magnetics.*, Vol.43, No.6, pp.2483-2485,June.2007