

반응표면법을 이용한 로프리스 엘리베이터용 영구자석 선형 동기전동기의 디텐트력 최소화

이상건*, 정군석^a, 주옥오*, 김도선*, 조윤희*
 동아대학교* 한라이비텍^a

Detent Force Minimization of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Ropeless Elevator System Using Response Surface Method

Sang-Gun Lee*, Koon-Seok Chung^a, Yu-wu Zhu*, Do-Sun Kim*, Yun-Hyun Cho*
 Dong-a University* Hara E.B.Tech^a

Abstract - 본 논문에서 로프리스 엘리베이터용 영구자석형(PM) 선형 동기전동기(LSM)의 디텐트력을 저감하기 위하여 반응표면법(RSM)을 이용한 디텐트력의 최소화 설계 방법을 제안하였다. RSM을 이용하여 정수 슬롯형과 분수 슬롯형 PM-LSM의 설계변수를 추론하고 유한요소법(FEM)으로 디텐트력을 구하였다. 반응표면법과 유한요소법의 해석결과를 토대로 분수 슬롯형 PM-LSM이 주어진 제적의 엘리베이터 시스템에 적합한 형상임을 입증한다.

1. 서 론

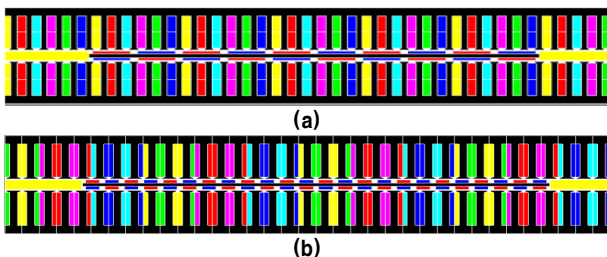
빌딩의 초고층화에 따른 지상 공간의 활용에 대한 관심이 높아지는 있는 지금 초고층 빌딩을 위한 엘리베이터 시스템에 대한 수요도 증가하고 있다. 초고층 빌딩의 경우 엘리베이터의 수가 많아지게 되는데 그에 따라 사용가능한 면적이 줄어들게 된다[1]. 그러나 경제성의 이유로 엘리베이터를 많이 설치 할 수 없기 때문에 짝수층과 홀수층을 위아래로 연결한 복층구조의 엘리베이터가 등장하기도 하였으나 여전히 많은 제약을 가지고 있다. 기존의 회전기를 이용한 엘리베이터 시스템은 하나의 축에 두 개 이상의 엘리베이터 카를 구동하는 것에는 한계가 있고, 이러한 시스템에서 엘리베이터 카는 수직운동만 가능하다는 제약을 받는다. 반면 로프 없이 구동되는 선형 전동기 엘리베이터 시스템은 앞서 언급된 문제들의 제약 없이 하나의 축에 대해 다수의 엘리베이터의 구동이 가능하며, 순환 가능한 엘리베이터 시스템의 구성이 가능해진다. 이와 같은 고효율 엘리베이터 시스템의 실현을 위해서는 기술적으로 전제 시스템의 효율을 향상시키는 것이 중요하다[2].

현재 로프 없이 구동되는 선형전동기 엘리베이터 시스템의 연구는 거의 행해지고 있지 않은 실정이며, 기술적인 자료 또한 한계가 있다. 게다가 선형 스위치드 릴럭턴스 전동기와 코어리스 영구 자석형 선형 동기 전동기에 한해서 로프리스 엘리베이터 시스템에 적용이 이루어지고는 있지만[3], 이러한 두 종류의 전동기들은 출력밀도에 한계를 지니고 있다. 반면 슬롯형 코어 타입의 PM-LSM는 코어리스 타입 PM-LSM의 출력밀도의 2배까지 구현할 수 있지만 엘리베이터 시스템에 슬롯형 코어형태의 PM-LSM을 적용함에 있어 큰 문제점은 코어와 영구자석 사이의 상호작용에 의한 디텐트력이다. 이러한 디텐트력은 추진력의 맥동을 발생시켜 소음 및 진동이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 엘리베이터 시스템의 효율을 향상시키기 위해서 슬롯형 코어 타입의 PM-LSM 엘리베이터 구동 시스템을 제안하고 디텐트력의 최소화를 위하여 반응표면법과 유한요소법을 이용하여 최적 구조의 설계를 수행하였다.

2. 해석 및 결과

2.1 PM-LSM의 세부적인 구조의 차이

그림 1은 본 논문에서 비교한 두 가지 형태의 PM-LSM 구조를 나타내었다. (a)는 정수 슬롯 분포권 타입의 PM-LSM이고, (b)는 분수 슬롯 집중권 타입의 PM-LSM이다.



〈그림 1〉 PM-LSM의 구조 (a) 정수 슬롯 분포권 타입 (b) 분수 슬롯 집중권 타입

표 1은 각각의 구조에 대한 파라미터로써 정수 슬롯형 PM-LSM의 코어 구조는 극 당 슬롯이 3(q=1)인 유도전동기와 유사하며 일반적으로 분포권을 사용한다. 반면 9슬롯/8극 분수 슬롯형 PM-LSM의 코어 구조는 집중권을 사용한다. 그 이유는 PMLSM의 분포권보다 집중권이 권선 체적을 비교하였을 때 훨씬 작아지기 때문이다.

분수 슬롯형 이동자의 길이와 정수 슬롯형 이동자의 길이를 일정하게 유지하며 제작상의 편의를 고려하여 정수 슬롯의 이동자 길이는 600[mm], 분수 슬롯의 이동자 길이는 이보다 짧은 594[mm]로 선정하였다. 이때 PM-LSM에서 이동자 길이에 대한 디텐트력의 영향은 중요하지 않기 때문에 이번 연구에서 이동자 길이에 대한 디텐트력의 영향은 고려하지 않기로 한다.

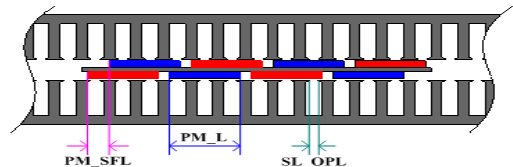
〈표 1〉 PM-LSM 권선 구조의 차이에 따른 파라미터

Items	정수 슬롯 분포권	분수 슬롯 집중권
극 간격	60mm	24.75mm
슬롯 간격	20mm	22mm
슬롯 폭	12mm	12mm
상당 극당 슬롯 수	1	3/8
공극 길이	2mm	2mm
이동자 길이	600mm	594mm

이제 디텐트력을 최소화하기 위하여 PM-LSM의 최적화된 구조가 필요하다. 디텐트력은 일반적으로 슬롯 오프닝 길이, 공극 길이, 영구자석의 길이, 스큐 등 여러 인자에 영향을 받는다. 하지만 유한요소해석(FEM)을 통하여 인자들의 최적값을 예측하기란 쉽지 않다. 따라서 유한요소 해석과 최적화 알고리즘인 반응표면법(RSM)을 사용하여 디텐트력에 영향을 끼치는 인자의 최적값 구원이 절대적으로 필요하다[4]. RSM은 수리통계학의 일종으로 2차 근사 모델 함수가 사용된다. 하지만 실제 모델과 비교하여 RSM의 2차 근사 함수는 에러를 포함하기 때문에 이를 보정하기 위하여 window-zoom-in 모델이 사용되어 최적화 설계를 실시하였다.

2.2 정수 슬롯형 PM-LSM의 최적 설계

디텐트력을 최소화하기 위하여 세 가지 인자에 대한 최적화를 수행하였다. 그림 2는 각각의 설계 변수를 나타내고, 표 2는 설계 가능한 인자들의 범위를 나타내고 있다.



〈그림 2〉 최적화를 위한 PM-LSM의 3가지 인자

〈표 2〉 최적화를 위한 가용 인자들의 범위

인자	기호	1차 최적화 범위	2차 최적화 범위
영구자석의 길이	PM_L	40-55 [mm]	47-55 [mm]
영구자석의 스큐	PM_SFL	0-20 [mm]	10 [mm]
오픈 슬롯의 길이	SL_OPL	3-12 [mm]	3-8 [mm]

그림3은 회귀분석을 시행하여 설계변수와 반응변수에 대한 관계를 수학적 모형으로 추정된 것으로 2차 근사 함수로 표현하면 아래 식과 같다.

$$F_{df} = 119x_1^2 + 434x_2^2 + 43x_3^2 - 17x_1x_2 + 140x_1x_3 + 74x_1 - 40x_2 + 192x_3 + 168 \quad (1)$$

이때 F_{df} 는 디텐트력, x_1 은 PM_L, x_2 는 PM_SFL, x_3 는 SP_OPL이다. 표 3은 식 1에 따라 얻어진 표면 반응 그래프이다.

〈표 3〉 반응 표면법에 의한 각각의 인자들 사이의 디텐트력 영향관계

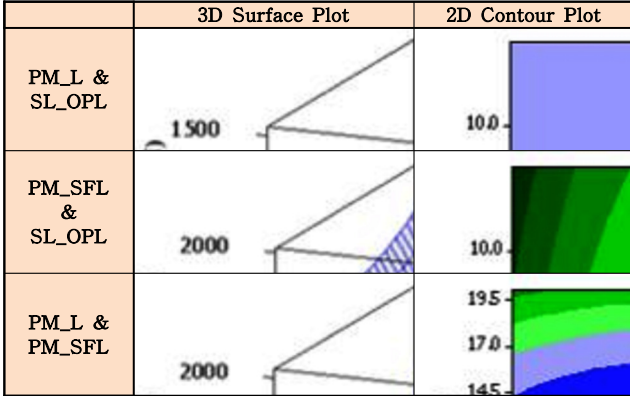


표 4는 식 1에 의해 구해진 디텐트력의 최적값(최소값)을 나타내고 있다. 이때 -30.8[N]의 부의 값이 도출되었는데 이는 예러 값으로 처리한다. 현재 설계 변수의 범위에서는 2차 근사 함수의 굴곡점(Point)를 정확히 유추하는게 불가능하므로 window-zoom-in 모델을 적용하였다.

〈표 4〉 정수 슬롯 타입의 2차 근사함수에 의한 디텐트력의 최적값

	PM_L(mm)	PM_SFL(mm)	SL_OPL(mm)
High	55	20	12
Current	52	10	4
Low	45	0	3
Detent Force (N)			
Minimum			
$F_{df} = -30.8424$			

FEM을 통한 2차 최적점 검출을 되풀이하며 인자의 영역을 축소하는 과정을 2번 이상 되풀이 하여 21.6[N]의 최소화된 디텐트력을 얻었다.

2.3 분수 슬롯형 PM-LSM의 최적 설계

두가지 타입의 비교를 위하여 정수 슬롯형 PM-LSM의 설계 변수 인자를 그대로 사용하여 분수 슬롯형 PM-LSM의 디텐트력 최소화를 수행하였다. 표 4는 변수들의 가용범위를 나타내었다.

〈표 4〉 최적화를 위한 가용 인자들의 범위

인자	기호	1차 최적화 범위
영구자석의 길이	PM_L	18-24 [mm]
영구자석의 스튜	PM_SFL	0-11 [mm]
오픈 슬롯의 길이	SL_OPL	3-12 [mm]

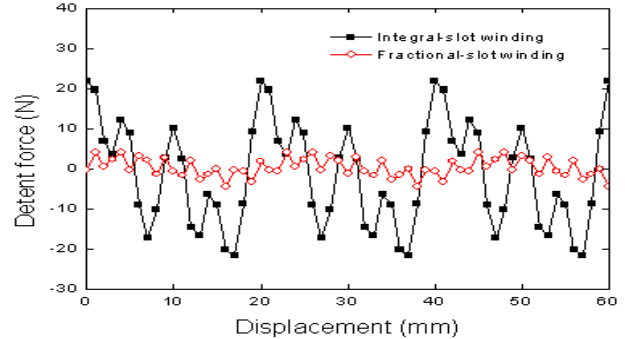
분수 슬롯형 PM-LSM의 디텐트력 최소화 과정은 앞서 정수 슬롯형 PM-LSM의 과정과 동일하다. 3개의 설계 변수를 지정하고 RSM을 통해 중심합성계획법에 근거하여 동일 실험점 5개를 제외한 유효 실험점 15개를 선정하였다. 선정된 15개의 실험점에 해당하는 PM-LSM의 구조를 디자인한 후 FEM을 이용하여 디텐트력을 계산하였다.

계산된 디텐트력의 최대값을 토대로 RSM은 2차 근사함수를 사용하여 설계 변수들 사이의 관련성을 정립하고 디텐트력의 최소값을 예측하게 된다. 표 5는 RSM에 의해 예측된 디텐트력의 최소값을 나타내었다.

〈표 5〉 분수 슬롯 타입의 2차 근사함수에 의한 디텐트력의 최적값

	PM_L (mm)	PM_SFL (mm)	SL_OPL (mm)
High	24	11	12
Current	22	5.5	3
Low	18	0	3
Detent Force (N)			
Minimum			
$F_{df} = 0.0448$			

최적화 과정을 통하여 0.0448 [N]의 디텐트력을 예측하였다. 하지만 2D-FEM을 통하여 계산된 디텐트력은 8[N]으로써 예측값과 해석값의 차이가 크게 발생하였다. 즉 초기에 사용된 2차 근사함수가 정확하지 않음을 알 수 있다. 좀 더 정확한 2차 근사 함수를 모델링 하기위하여 window-zoom-in 방법을 사용하였다. 그 결과 4.27[N]으로 디텐트력의 최소값을 얻었으며 최종 결과의 비교를 위하여 최적화된 정수 슬롯 및 분수 슬롯 타입 PM-LSM의 디텐트력 파형을 그림 3에 나타내었다.



〈그림 3〉 최적화된 2가지 타입의 PM-LSM의 디텐트력 파형 비교

3. 결 론

정수 슬롯형 PM-LSM과 비교하여 분수 슬롯형 PM-LSM의 디텐트력이 좀 더 높은 고조파를 포함하고 있으며 이는 분수 슬롯 구조에 기인함을 알 수 있다. 그리고 최적 설계된 분수 슬롯형 PM-LSM의 디텐트력 진폭값(amplitude of detent force)이 4.2[N]으로써 최대 디텐트력 48[N]의 8.91%에 해당한다. 더욱이 분수 슬롯형 PM-LSM의 디텐트력 피크 값이 정수 슬롯형 PM-LSM의 값에 비해 19.8%로써 분수 슬롯형 PM-LSM의 디텐트력 특성이 훨씬 우수함을 입증 하였다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.
This work is the outcome of a Manpower Development Program for Energy & Resources supported by the Ministry of Knowledge and Economy (MKE)

[참 고 문 헌]

- [1] B. Schmullung, O. Effing, and K. Hameyer, "State control of an electromagnetic guiding system for ropeless elevators," 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10, September 2007.
- [2] T. Ishii, "Elevators for skyscrapers," IEEE Spectrum, vol. 31, pp. 42-46, September 1994.
- [3] M. Platen, and G. Henneberger, "Examination of leakage and end effects in a linear synchronous motor for vertical transportation by means of finite element computation," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, pp. 3640-3643, September 2001.
- [4] X.K. Gao, T.S. Low, Z.J. Liu, and S.X. Liu, "Robust design for torque optimization using response surface methodology," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, pp. 1141-1144, March 2002.