ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66, No. 6, pp. 981~987, 2017
http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.6.981

철도차량 추진용 Linear Pulse Motor의 축소 모델 해석 및 추력 리플 저감 연구

Study on the FEA Model of the Linear Pulse Motor for Railway Application and Reduction of Thrust Ripple

설 현 수* · 이 강 석* · 정 거 철* · 이 주†
(Hyun-Soo Seol · Gang-Seok Lee · Geochul Jeong · Ju Lee)

Abstract - In this paper, we describe the LPM structure with a two-phase, which is not used previously, and explain its operation principle. In order to predict the accurate performance of LPM reduction model, finite element model was derived and the back EMF of LPM reduction model was measured and compared. In order to investigate the thrust and normal force of the LPM reduction model, a driving circuit capable of applying two-phase pulse currents was constructed and the performance was predicted in conjunction with the finite element analysis model. Finally, the design considering actual LPM size was performed. Since the size of the reduction model is small, the field could be made of a permanent magnet. However, it is almost impossible to manufacture a permanent magnet to match the size and capacity of a real LPM for a vehicle, in terms of cost and writing. Therefore, the actual vehicle LPM was replaced by wound type that generates a magnetic field by applying current to the field winding, and the final model was derived using the reaction surface method.

Key Words : LPM, Linear pulse motor, 2 phase pulse, FEA model

1. 서 론

세계적으로 증가하는 철도 수요 대응과 현대사회의 고속 교통수단에 대한 요구에 부응하고, 고유가 및 온실가스 등 원유 기반의 교통 시스템의 문제 해결을 위해 교통수단의 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 석유문제가 심각한 상황으로 전개될 경우, 대륙과 대륙 그리고 국가와 국가 사이의 장거리 이동을 할 수 있는 교통수단은 전기로 추진되는 철도이다. 현재 대중화 되어있는 바퀴 식 철도 차량은 초고속 운전 시 기하급수적으로 증가하는 소음, 공기저항 동력 전달의 한계, 레일의 마모라는 문제를 가지고 있으며 이러한 문제점을 가진 철도차량의 대안으로 선형 추진 시스템 연구가 진행 중이다[1,2,3]. 리니어 펄스 모터(Linear pulse motor; LPM)는 가속, 감속 성능 및 비점착 구동에 의한 등판능력이 우수하며, 저속부터 초고속까지 모든 속도영역 주행 가능, 차량 경량화에 따른 높은 에너지 효율, 가공전차선 설비가 불필요하고 차체를 기존 차량보다 가볍게 만들어 줄 수 있어 기존 철도 시스템보다 건설비용 저감 가능한 장점을 가지고 있어 충분한 전략성을 가지고 있다.

본 논문에서는 기존에 사용되지 않은 새로운 방식의 2상 구조를 가지는 LPM 구조를 제시하고, 그 동작 원리를 서술하였다. LPM 축소 모델의 정확한 성능을 예측하기 위해서 유한요소모델을 도출하였고, LPM 축소 모델의 역기전력을 측정하여 비교하였다. 또한 LPM 축소 모델의 추력 및 수직력 특성을 살펴보기 위해서, 2상 펄스 전류를 인가할 수 있는 구동회로를 구성하였으며, 유한요소모델과 연동하여 성능을 예측하였다. 마지막으로 실제 LPM 사이즈를 고려한 설계를 수행하였다. 축소 모델에서는 사이즈가 작기 때문에 계자를 영구자석으로 제작할 수 있었으나, 실제 차량용 LPM 사이즈 및 용량에 맞도록 영구자석으로 제작하는 것은 가격적인 면이나 제작성 면에서 거의 불가능하다. 따라서 실제 차량용 LPM은 계자권선에 전류를 인가하여 자계를 발생시키는 권선형으로 대체하였고, 반응표면법을 이용하여 최종 모델을 도출하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.
E-mail: julee@hanyang.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea
Received : March 21, 2017; Accepted : April 4, 2017

2. 철도차량 추진용 Linear Pulse Motor

2.1 Linear Pulse Motor의 구조

리니어 펄스 모터는 지상코일로부터 발생되는 전기적인 펄스 신호와 이동자에서 발생하는 일정한 자기장의 힘으로 추진력을 얻게 되는 장치이다. 그림 1은 리니어 펄스 모터의 구조를 나타내고, 이동자와 지상코일로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 지상코일의 구조는 그림 2와 같이 2 층권 형태를 가지며, 상층(Upper Layer) 및 하층(Lower Layer)가 쌓여있는 구조이다[4].

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

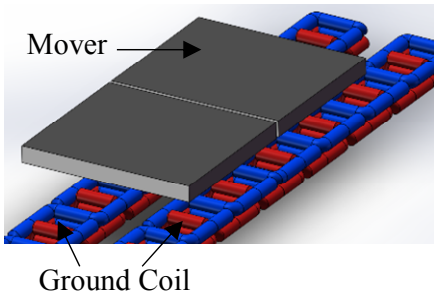

그림 1 리니어 펄스 모터의 구조
Fig. 1 Structure of linear pulse motor

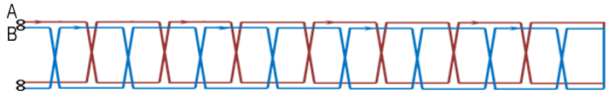

그림 2 리니어 펄스 모터의 권선 레이아웃
Fig. 2 Winding layout of linear pulse motor

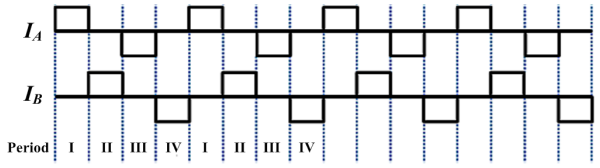

그림 3 2상 펄스 전류의 동작 구간
Fig. 3 Operation range of 2 phase pulse current

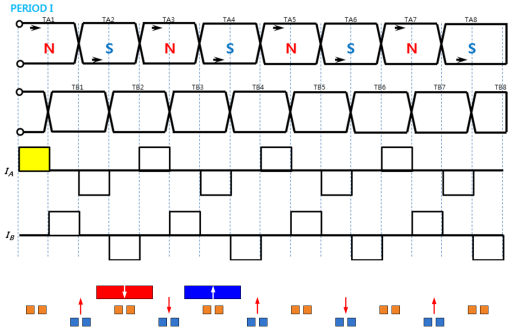

그림 4 동작 구간 1에서 구동 원리 및 이동자의 위치
Fig. 4 Driving principle and mover position in operation I

2.2 Linear Pulse Motor의 구동원리

LPM은 A상과 B상의 전류에 따라 4가지 운전 구간을 갖는다. 그림 3에서 운전 구간 I에서는 A상에서만 양의 전류가 흐르며, 고정자 권선은 그림 4와 같은 극성을 갖는다. 운전 구간 II에서는 B상에만 양의 전류가 흐르며, 고정자 권선은 그림 5와 같은 극성을 갖는다. 운전 구간 III에서는 A상에만 음의 전류가 흐르며, 고정자 권선은 그림 6과 같은 극성을 갖는다. 운전 구간 IV에서는 B상에

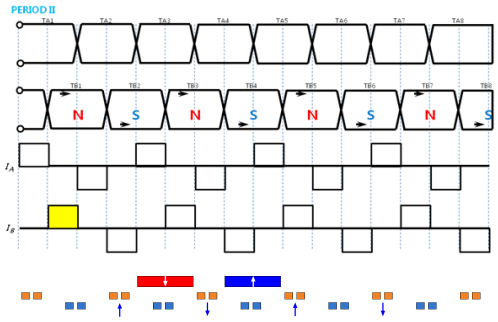

그림 5 동작 구간 2에서 구동 원리 및 이동자의 위치
Fig. 5 Driving principle and mover position in operation II

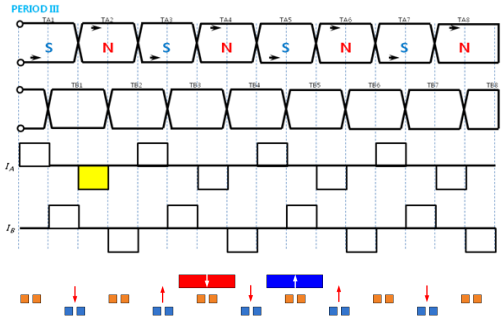

그림 6 동작 구간 3에서 구동 원리 및 이동자의 위치
Fig. 6 Driving principle and mover position in operation III

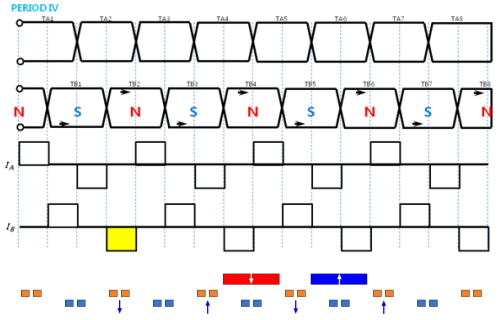

그림 7 동작 구간 4에서 구동 원리 및 이동자의 위치
Fig. 7 Driving principle and mover position in operation IV

만 음의 전류가 흐르며, 고정자 권선은 그림 7과 같은 극성을 갖는다. 운전 구간 IV 이후에는 다시 운전 구간 I부터 IV까지를 반복한다. 각각의 운전 구간은 이동자의 위치에 의해 결정된다.

3. Linear Pulse Motor 유한요소해석 모델

3.1 Linear Pulse Motor의 설계 파라미터

실제 크기의 선형시스템을 검증하기 위해서는 막대한 지상코

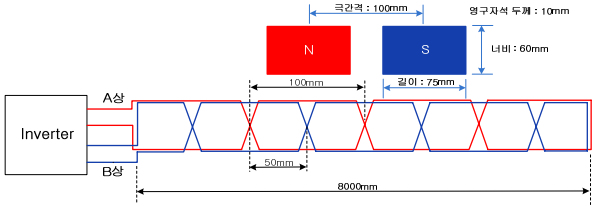

그림 8 리니어 펄스 모터 디자인 파라미터
Fig. 8 Linear pulse motor desgin parameter

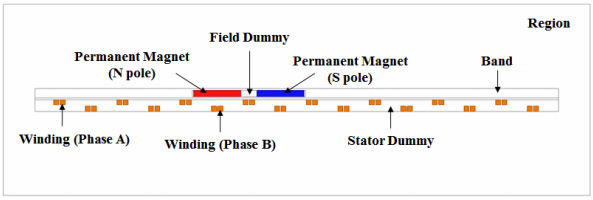

그림 9 2차원 유한요소해석 모델
Fig. 9 2D FEA model

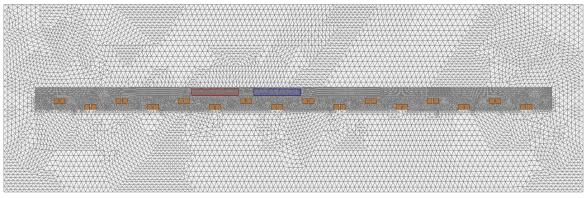

그림 10 2차원 유한요소해석의 메쉬분할도
Fig. 10 Mesh Plot of 2D FEA model

일의 건설비용 및 이동자의 제작비용이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 LPM 축소 모델을 설계하였다. LPM 축소 모델의 설계 파라미터는 다음 그림 8과 같다.

3.2 Linear Pulse Motor의 2차원 유한요소해석 모델

그림 9는 그림 8의 설계 파라미터를 기반으로한 유한요소 해석(finite element analysis : FEA) 모델이다. 이동자는 2극 영구자석으로 구성되어있다. 지상 코일은 2층권 형태를 가지며, 상층(Upper Layer)에는 A상 권선이 있고, 하층(Lower Layer)에는 B상 권선이 위치한다. 그림 10은 유한요소해석 모델의 요소 분할도를 나타낸다. LPM과 같은 선형전동기 (Linear motor) 모델을 유한요소해석을 할 때에는 적절한 요소분할이 중요하다. 선형전동기의 경우, 해석영역(Region)을 회전전동기보다 상대적으로 넓게 적용한다. 회전전동기는 일반적으로 전기 강판으로 구성되기 때문에, 외부로 누설되는 자속의 양이 적다. 하지만, 선형전동기의 고정자를 전기 강판으로 구성하면, 막대한 제작비용이 들기 때문에 대부분 공심형으로 제작한다. 따라서, 누설 자속이 많이 발생하므로 해석 영역을 넓게 설정해야한다. 또한, 해석 정밀도를 향상시키기 위해서, Air-gap, Band, Stator Dummy의 요소수를 크게 설정하는 것이 바람직하다. 표 1은 본 논문에서 설정한 요소분할수이다.

표 1 LPM의 요소분할 개수
Table 1 Number of element for LPM

	Number of Element
Stator Dummy	10665
Field Dummy	246
Permanent Magnet	1422
Winding	896
Band	8018
Region	12271
Total	33518

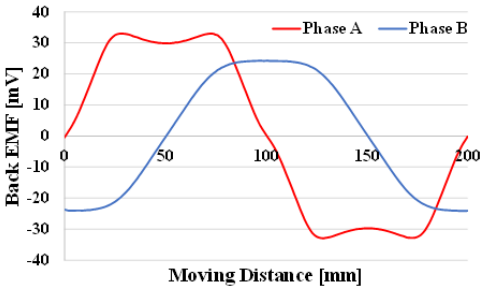

그림 11 2차원 유한요소해석 모델의 역기전력
Fig. 11 Back EMF of 2D FEA model

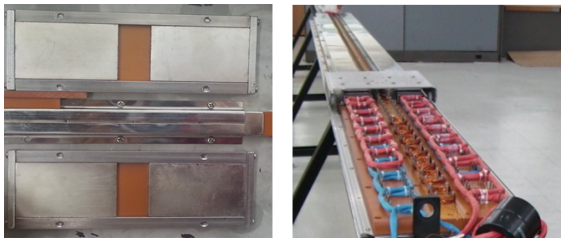

그림 12 리니어 펄스 모터의 이동자 및 권선
Fig. 12 Mover and winding of linear pulse motor

그림 11은 2차원 유한요소해석 모델의 역기전력을 나타낸다. 이 때, 해석된 LPM의 속도는 시험 값과 동일한 5.575Hz이다. A상과 B상 역기전력의 최대값은 각각 33V와 24.3V이며, RMS 값은 26.3Vrms와 19Vrms이다.

3.3 역기전력 측정

그림 12는 제작된 LPM 축소 모델의 이동자 및 권선을 나타낸다. LPM 축소 모델의 무부하 역기전력을 측정하기 위해 고정자 권선을 개방한 상태에서 이동자를 강제로 밀어서 관성으로 움직이는 순간 고정자 권선에서 발생하는 전압을 측정하였다. 측정결과 역기전력 파형은 그림 13에 나타냈다. A상의 역기전력의 최대값은 32.8mV, B상은 22mV가 발생하였으며, 이때의 주파수는

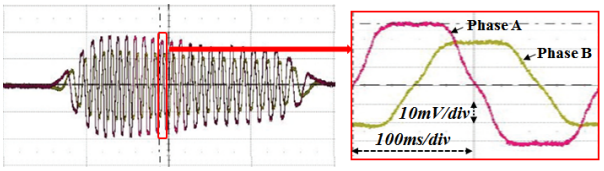

그림 13 리니어 펄스 모터의 역기전력 측정 파형
Fig. 13 Back EMF of linear pulse motor

5.575Hz로 이동자의 이동속도로 환산하면 4.014km/h이다. 영구자석과의 A상 권선의 거리가 더 가까우므로 A상 권선에서 더 높은 역기전력이 측정된다. 또한 3.2절에서 수행한 무부하 역기전력의 최대값과 거의 유사한 결과를 확인함으로써, 유한요소해석모델의 타당성이 입증되었다.

4. Linear Pulse Motor 특성

4.1 펄스파 전류의 생성

LPM은 마이크로 스텝 구동 방식으로 고정자 권선에 정현파에 가까운 전류를 인가할 수 있으나, 한 주기 동안 여러 번의 스위칭을 해야 하므로 많은 스위칭 손실이 발생한다. 철도차량과 같이 차체의 관성이 크고 대용량의 전원이 인가되는 LPM의 경우에는 펄스 구동이 적합하다. 2상 펄스 구동은 그림 14와 같이 한 주기 동안 하나의 스위칭 소자에서 2번(ON 1회, OFF 1회)의 스위칭이 일어난다. 2상 펄스 전류를 유한요소해석 모델에 입력해

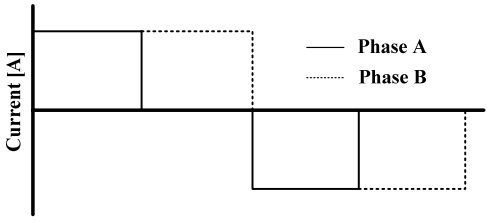

그림 14 LPM 구동을 위한 2상 펄스 전류
Fig. 14 2 phase pulse current for operation of LPM

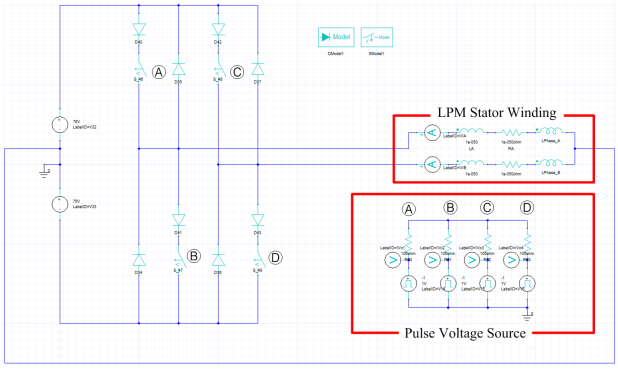

그림 15 2상 펄스 전류 생성을 위한 외부회로
Fig. 15 External circuit for 2 phase pulse current generation

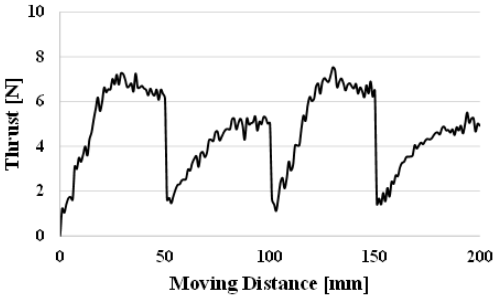

그림 16 2차원 유한요소해석 모델의 추력
Fig. 16 Thrust force of 2D FEA model

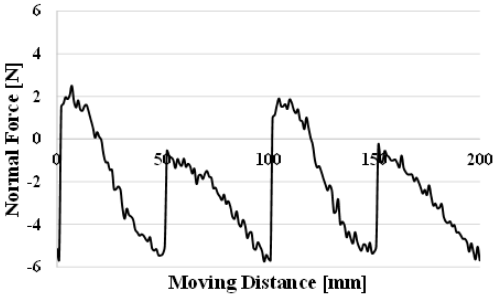

그림 17 2차원 유한요소해석 모델의 수직력
Fig. 17 Normal force of 2D FEA model

표 2 Linear pulse motor의 성능
Table 2 Performance of linear pulse motor

	Average	Pk to Pk	Unit
Thrust force	4.65	6.42	N
Normal force	-2.30	7.59	N

주기 위해서는 그림 15와 같은 구동회로를 구성해야한다. 그림 15의 구동회로와 그림 9의 유한요소해석 모델을 연동하여 해석하면 2상 펄스파를 고려한 LPM의 성능을 예측할 수 있다.

4.2 Linear Pulse Motor의 성능

그림 9의 유한요소해석 모델에 그림 15의 구동회로를 연동하여 유한요소해석을 수행하였다. LPM 축소 모델에 대한 유한요소해석 결과, 그림 16과 같은 추력 파형과 그림 17과 같은 수직력 파형을 얻었다. 유한요소해석 모델은 2극에 대한 출력만 나타내지만, LPM 축소 모델은 4극을 갖기 때문에 해석 결과 값에 2배를 취해주면 LPM 축소 모델의 실제 출력이 된다. 2차원 유한요소해석 결과, 평균 추력은 4.65N이 발생하고 수직력은 -2.3N이었다. 따라서 LPM 축소 모델에 200A의 펄스 전류가 인가될 경우, 해석 결과 값의 2배인 9.3N의 추력과 -4.6N의 수직력이 발생할 것으로 예측할 수 있다.

5. 권선형 LPM의 추력 리플 저감 설계

철도차량 추진용 LPM은 수 백 톤에 이르는 차량을 끌어야 하므로 매우 큰 추력을 필요로 한다. 따라서 LPM의 사이즈 및 입력 전력이 LPM 축소 모델에 비해서 수 십 배 이상 더 많이 필요하다. 축소 모델에서는 사이즈가 작기 때문에 계자를 영구자석으로 제작할 수 있었으나, 실제 차량용 LPM 사이즈 및 용량에 맞도록 영구자석으로 제작하는 것은 가격적인 면이나 제작성 면에서 거의 불가능하다. 따라서 실제 차량용 LPM은 계자권선에 전류를 인가하여 자계를 발생시키는 권선형으로 대체하였다. 이러한 권선형 LPM도 앞의 4.2절에서 보여준 영구자석형 LPM 축소 모델의 유한요소해석 결과와 같이 추력 리플 및 부상력 리플이 매우 크게 발생한다. 따라서 철도차량 추진을 위한 실제 사이즈의 LPM 권선형 모델의 추력 리플을 최소화하기 위해 반응표면법을 이용한 최적 설계를 수행하였다.

5.1 반응표면법을 이용한 설계

실제 사이즈의 권선형 LPM의 설계 사양은 표 3과 같다. 반응표면법을 이용한 설계를 위해서 설계변수를 그림 18과 같이 선정하였다. 이 설계 범위를 가지고 중심 합성 계획법을 위한 설계

표 3 실제 사이즈의 리니어 펄스 모터의 설계 사양
Table 3 Design specification of real linear pulse motor

	Value	Unit
공극 길이	30	mm
고장자 극 피치	480	mm
차상 계자 권선 기자력	10,000	A-Turn
지상 전기자 권선 전류	2,000	A_{rms}

그림 18 리니어 펄스 모터의 설계 파라미터
Fig. 18 Design parameter of linear pulse motor

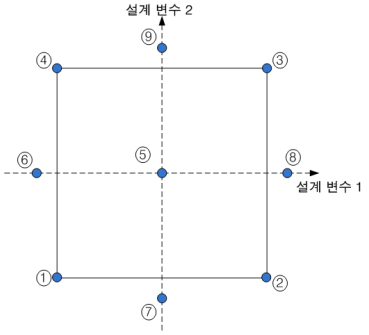

그림 19 중심 합성 계획법을 위한 설계 포인트
Fig. 19 Design points for central composite design

표 4 설계 포인트에 따른 설계 변수 및 해석 결과
Table 4 Design variables and analysis results according to design potin

No.	A [mm]	B [mm]	Thrust [N]	Ripple [N]
1	300	40	384.6	58.6
2	300	80	410.2	58.6
3	400	80	342.1	85.1
4	400	40	424.8	96.3
5	350	60	436.6	110.8
6	350	31.7	446.1	139.4
7	279.3	60	371.2	96.6
8	350	88.3	407.6	63.7
9	420.7	60	356	99.1

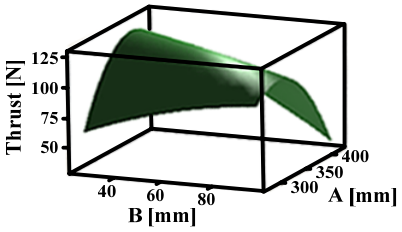

그림 20 추력에 대한 반응표면
Fig. 20 Response surface according to thrust

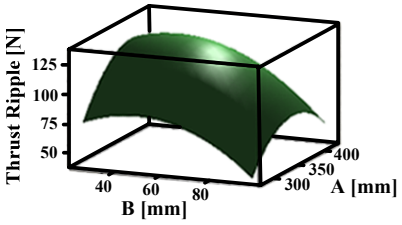

그림 21 수직력에 대한 반응표면
Fig. 21 Response surface according to normal force

포인트를 선정하였다. 중심 합성 계획법의 설계 포인트는 그림 19와 같이 요인점(포인트 1, 2, 3, 4), 중심점(포인트 5), 축점(포인트 6, 7, 8, 9)의 3부분으로 구성된다. 각각의 설계 포인트에서의 평균 추력 및 추력 리플 값들을 유한요소해석을 통해 구하고, 그 결과를 바탕으로 반응표면을 만든다. 표 4는 설계 포인트에 해당하는 설계 변수 및 추력 특성해석 결과를 나타낸다[5,6].

표 4의 설계 포인트별 추력 특성해석 결과를 통해 형성된 반응표면을 그림 20과 21에 나타냈다. 그림 20는 평균 추력에 대한 반응표면을 나타내고, 그림 21은 추력 리플에 대한 반응표면을 나타낸다. 본 연구에서는 반응표면법을 이용한 최적화를 위해 MINITAB 프로그램을 이용하였다. 이 때 가중치는 두 반응표면 모두 동등하게 1로 두었으며, 평균 추력은 크고, 추력 리플은 작아야 하므로 각각 망대, 망소 특성으로 설정하였다. 반응 최적화

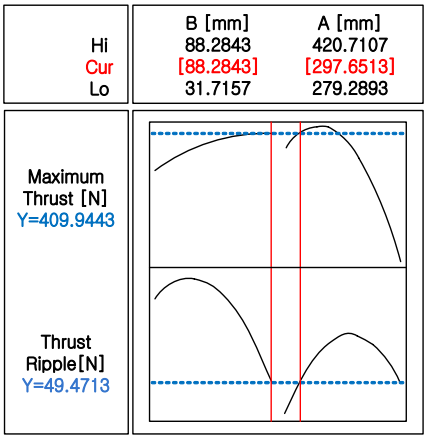

그림 22 반응표면법을 이용한 설계 결과
Fig. 22 Design results using response surface method

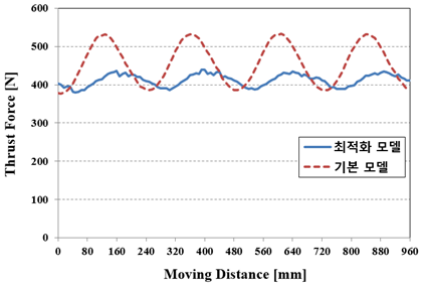

그림 23 2차원 유한요소해석 모델의 수직력
Fig. 23 Thrust of 2D FEA model

표 5 유한요소해석 결과
Table 5 Results of finite element analysis

	기본 설계 모델	최적화 모델	저감율
추력[N]	448.1	410.4	9.4 %
리플[N]	155.2	59.2	61.8 %

를 통해 그림 22와 같이 최적 설계 포인트를 찾았다. 따라서 A는 297.5mm, B는 88mm로 결정될 수 있다.

5.2 추력 리플 저감 모델 특성

반응 최적화를 통해 얻은 변수 값을 가지고 유한요소해석을 수행하였다. 그림 23은 기본 모델과 반응표면법을 이용한 설계 모델의 추력을 나타낸다. 기본 모델의 변수 A는 360mm이고 변수 B는 20mm이다. 반응표면법을 이용한 모델은 기본 모델에 비해 평균 추력은 9.42% 감소하였지만, 추력 리플은 61.84% 감소하였다. 반응표면법을 이용한 설계를 통해 평균 추력의 저감은 최소화하였으며, 추력 리플을 최대한 줄이는 설계를 도출하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 LPM의 구동 원리 및 축소 모델의 구조를 서술하였고, LPM 축소 모델의 성능 특성 해석을 위해 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석의 타당성을 입증하기 위해 LPM 축소 모델의 무부하 역기전력을 측정하였고, 해석 결과와 비교하여 측정치와 유사한 결과 값이 나오는 것을 확인하였다. LPM의 출력 특성을 확인하기 위해서는 유한요소해석 모델에 2상 펄스 전류를 인가해야 하므로, 구동회로를 구성하여 유한요소해석 모델과 연동하였다. 추력 해석 결과는 4.65N으로, 실제 4극인 축소 모델은 9.3N이 나올 것이라 예측할 수 있다. 또한, 권선형 LPM 모델의 큰 추력 리플 성분을 저감하기 위한 반응표면법을 이용하여 설계를 진행하였다. 극당 상당 슬롯수가 1인 고정자 권선의 극 피치와 계자 권선의 극 피치를 서로 다르게 설계하면 그 차이에 따라 추력 및 추력 리플 값이 다르게 나오며 이 값들 중 최적의 값을 찾기 위하여 반응표면법을 사용하였다. 그 결과 비록 평균 추력이 약 9% 감소하였지만, 추력 리플이 약 62% 감소되는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016 R1A2A1A05005392).

References

[1] Chan-Bae Park, Byung-Song Lee, Chang-Young Lee, "Characteristic Analysis of Superconducting LSM for the Wheel-rail-guided Very High Speed Train according to Winding Method of the Ground 3-phase Coils," The Tractions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 8, pp. 1164~1169, 2014.

[2] Chan-Bae Park, Jae-Hee Kim, Byung-Song Lee, "Design of a Small-scaled Superconducting LSM for the Very High Speed Railway Vehicle," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 11, pp. 1602~1607, 2014.

[3] Hyun-Soo Seol, Eung-Seok Park, Ju Lee, Chan-Bae Park, "Design of High-Speed LSM Rotary Type Testing Machine in Consideration of Mechanical Strength," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 64, No. 5, pp. 824~829, 2015.

[4] Jaehuck Choi, Chanyong Zun, Hyungsoo Mok, "Reducing the Thrust Ripple Generated by the Staking of Stator Phase Windings of a Linear Pulse Motor," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66, No. 2, pp. 447~452, 2017.

[5] Yun-Chul Choi, Jung-Ho Lee, “Optimum Design Criteria for Maximum Torque Density & Minimum Torque Ripple of SynRM according to the Rated Wattage using Response Surface Methodology,” The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 57, No. 10, pp. 1777~1781, 2008.
[6] Young-Hyun Kim, Jung-Ho Lee, Nam-Hoon Kim, Bon-Sam Koo, Chan Hui Kim, “Optimum Design Criteria for Maximum Torque Density & Minimum Torque Ripple of Flux Switching Motor using RSM & FEM,” The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 59, No. 3, pp. 549~554, 2010.

저 자 소 개

설 현 수 (Hyun-Soo Seol)

1987년 3월 30일생. 2012년 한양대 전자정보시스템 졸업(학사). 2012년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석박사통합과정.

이 강 석 (Gang-Seok Lee)

2013년 한양대 전기공학과 졸업(학사). 2013년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석박사통합과정.

정 거 철 (Geochul Jeong)

2012년 한밭대 전기공학과 졸업(학사). 2015년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2012년 10월~2013년 9월 한국철도기술연구원 위촉연구원.

이 주 (Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System정보과학 연구과졸업(박사). 1997년 한국 철도 기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.