장거리 반송용 전기자 분산배치 분포권 PMLSM의 추력맥동 저감을 위한 단부형상 설계

박의종* · 김용재**

The Design of End Edge Shape for Reduction of Long-Distance Transportation Stationary
Discontinuous Armature PMLSM Thrust Ripple with Distributed Winding

Eui-Jong Park* · Yong-Jae Kim**

요 약

최근 저소음, 고속, 고추력의 반송장치가 요구됨에 따라 영구자석 선형동기전동기가 대두되고 있으나 반송 경로 전장에 전기자를 설치하는 선형 동기전동기의 특성으로 인해 장거리 반송장치에 적용시 설치비용의 증가를 가져온다. 따라서 우리는 전기자를 분산시켜 배치하는 방법을 제안하여 비용증가의 문제점을 해결하고자 하였다. 하지만 가동자의 진행시 분산배치된 전기자 사이를 통과하게 되면 전기자의 불연속 구간인 단부에 의해 디텐트력이 발생하여 추력 맥동이 발생하고 기기 성능저하와 소음, 진동의 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 단부에 의한 영향을 저감하기 위해 전기자 끝단의 치 높이와 보조치 형상에 따른 디텐트력의 특성을 파악하고 다구찌의 실험계획법을 이용하여 단부 효과를 가장 저감할 수 있는 형상을 제안하였다.

ABSTRACT

Recently, the permanent magnet linear synchronous motor as low noise, high speed and high thrust force transportation system has been proposed but this motor causes an increase of material cost because of its characteristic arranging the armature on the full length of transportation lines when this system is applied to the long distance transportation system. Therefore, we suggested discontinuous arrangement method of the armature to solve this problem. However, Detent force which causes thrust force ripple generating noise, vibration and decline of performance is generated when a mover pass between the armatures. Thus, in this paper, we examined characteristic of detent force to reduce the end edge effect according to the end edge teeth's height and auxiliary teeth and suggested the shape that can the most reduce the detent force.

키워드

Stationary Discontinuous Armature, PMLSM, Auxiliary Teeth, End Edge Detent Force, Cutting Teeth
전기자 분산 배치, PMLSM, 보조치, 단부 디텐트력, 치 절단

1. 서 론

일반적으로 직선운동을 사용하는 반송 장치에는 회

전운동을 직선운동으로 변환시키기 위해 기어, 볼스크류, 랙앤드 피니언 등이 이용되었다. 하지만 선형 동기 전동기는 이러한 장치들을 사용하지 않으면서 저

* 조선대학교 전기공학과(puj1988@hanmail.net)

** 교신저자(corresponding author) : 조선대학교 전기공학과(kimy21@chosun.ac.kr)

접수일자 : 2013. 09. 11

심사(수정)일자 : 2013. 10. 21

게재 확정일자 : 2013. 11. 15

소음, 고속, 고추력의 반송이 가능하기 때문에 반도체, 디스플레이, 자동차, 철도, 정밀 측정기계 산업 등에서 그 필요성이 대두되고 있다[1-4].

PMLSM은 추진자계를 발생시키는 전기자를 무버로 사용하거나 고정자로 사용할 수 있으며 전기자를 가동자로 사용하는 시스템은 전력을 공급하는 케이블을 반송경로 전장에 추가로 설치해야 하기 때문에 장거리 반송장치에 적합하지 않다. 따라서 우리는 추진자계를 발생시키는 전기자를 반송경로 전장에 배치하였고 설치비용 및 제작시간의 절감을 위해 그림 1과 같이 전기자를 일정한 간격으로 분산시켜 배치하는 전기자 분산배치 시스템을 제시하였다. 하지만 전기자를 분산시켜 배치하기 때문에 전기자 사이의 불연속 구간 즉, 단부가 존재한다. 이러한 단부는 가동자가 전기자에 진입 또는 반출할 때 가동자의 구동을 방해하는 디텐트력을 크게 발생시켜 기기의 소음 및 성능 저하의 원인이 된다[5-6]. 현재 이러한 단부의 영향을 저감시키기 위해 영구자석의 스큐, 반페 슬롯, 치 절단, 보조극, 보조치 설치 등의 다양한 연구가 진행되고 있지만 이들을 조합하여 진행한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 전기자 끝단에 위치하지 높이를 조절 방법과 전기자 끝단에 보조치를 설치하는 두 방법을 조합하여 단부의 영향을 저감시키는 방법을 제안하였다. 먼저 2-D 유한요소법을 이용하여 단부에서 발생하는 디텐트력을 분석하고 설계변수를 결정한 후, 다구찌의 실험계획법을 바탕으로 한 직교배열표를 작성하고 이 표를 분석하여 단부효과를 가장 저감하는 최적 형상을 설계하고자 한다.

II. 분포권 PMLSM의 기본모델

2.1 단부 디텐트력

전기자를 분산시켜 배치하는 시스템은 전기자의 불연속으로 인해 구조상 반드시 단부가 존재한다. 이러한 단부에 의해 가동자가 전기자 설치부와 비설치부의 경계를 진입 및 반출 시, 전기자 측 철심과 가동자 영구자석 사이에서 발생하는 흡인력이 크게 변동하게 되는데 이를 단부 디텐트력이라 한다. 그림 2는 단부에서 발생하는 힘이 가동자에 미치는 영향에 대하여 나타낸다. 가동자가 전기자에 진입하는 진입부에서 발

생하는 흡인력은 가동자의 진행 방향과 같은 방향의 힘으로서, 즉 가동자를 전기자 측으로 끌어들이는 힘

그림 1. 전기자 분산 배치 방식의 PMLSM
Fig. 1 Schematic representations of stationary unit of the PMLSM

그림 2. 전기자의 단부가 가동자에 미치는 영향
Fig. 2 Forces exerted in the mover at the end edge

표 1. PMLSM의 사양
Table 1. The specifications of PMLSM

	Items	Value
Mover	Number of poles	4 [Poles]
	Height of PM	3 [mm]
	Length of PM	25 [mm]
	Pole pitch	30 [mm]
	Back iron height	6 [mm]
	Back iron length	135 [mm]
Armature	Number of slots	17 [slots]
	Turns per phase	100 [turns]
	Slot pitch	10 [mm]
	Width of teeth	5 [mm]
	Height of teeth	23.5 [mm]
	Armature length	175 [mm]
Mechanical air-gap		5 [mm]

으로 작용하여 가동자를 가속시킨다. 또한, 가동자가 전기자를 벗어나는 반출부에서 발생하는 흡인력은 가동자의 진행 방향과 역방향의 힘으로서, 즉 가동자를 전기자 측에 되돌리는 힘으로 작용하여 가동자를 감

속시키기 때문에 이러한 단부 디텐트력은 저감시켜야 한다.

2.2 분포권 PMLSM 사양

표 1에 분포권 PMLSM의 사양을 나타낸다. 전기자 분산배치 분포권 PMLSM의 가동자는 총길이 135[mm]로, Nd-Fe-B타입 영구자석 4극을 자로강판에 배치하였다. 영구자석 길이는 25[mm], 높이는 3[mm], 극 간격은 30[mm]이다. 또한, 전기자 총 길이는 175[mm]이고 권선법은 분포권으로서 한상 당 턴수는 100[turns]이다. 슬롯 간격은 10[mm]이며 17슬롯으로 구성한다. 기본모델의 형상은 그림 3에 나타내었으며 2-D유한요소법을 이용하여 가동자가 전기자에 진입 시부터 반출 시까지 1[Step]당 0.5[mm]씩 이동하며 해석하였다. 이때의 요소수는 204204, 절점수는 104338이다. 그림 4에 기본모델의 위치에 따른 디텐트력을 나타내었다. 가동자가 전기자에 진입 및 반출시에는 ± 13.16 [N]이 발생하였고 가동자가 전기자에 완전히 대항시에는 ± 0.6 [N]이 발생하였다. 단부에 의한 디텐트력이 완전대항시의 디텐트력에 비하여 22배 크게 발생하기 때문에 이러한 힘은 전기자를 분산시켜 배치하는 시스템에서 가동자가 전기자의 불연속 구간을 통과 시 기기 제어에 어려움으로 작용하게 된다[7]. 또한 그래프에서 보는바와 같이 단부구간 디텐트력의 최대값과 최소값의 차이는 완전대항시의 값보다 매우 크게 차이나는 것을 확인할 수 있다. 이는 가동자 진행 시 기기의 리플로 작용하게 된다. 따라서 단부 디텐트력의 영향을 저감할 수 있는 설계를 수행해야 한다.

III. 다구찌 실험계획법을 이용한 디텐트력 저감 설계

다구찌의 실험계획법은 제어 불가능한 잡음인자의 영향을 최소화 하면서 동시에 목적 특성치를 최적화하기 위해 제어가능인자의 수준을 조절할 수 있도록 해주는 실험 기법이다[8]. 모든 경우의 수를 실험하는 전조합 실시법의 경우 $5^5=3125$ 번의 실험을 거쳐야 하지만 다구찌 실험계획법을 사용할 경우 $25+a$ 번의 실험만으로도 목적값에 도달할 수 있는 장점이 있다. 따

라서 실험진행을 경제적으로 할 수 있으며 충분히 검증된 방법이기 때문에 다구찌의 실험계획법을 이용하여 진행하였다.

그림 3. 분포권 PMLSM의 기본모델
Fig. 3 Basic model of PMLSM with distributed winding

그림 4. 기본모델의 디텐트력
Fig. 4 Detent force of the basic model

그림 5. 치 절단 및 보조치 설치 모델
Fig. 5 Model with cutting and auxiliary teeth

3.1 설계변수 선정

그림 5에 우리가 제안한 모델을 나타내었다. 슬롯

을 상,하로 나누었을 때 전기자 반출부의 슬롯은 그림에서 보는바와 같이 절반만 사용되고 있어 치 절단 가능한 구조이다. 따라서 치의 설계변수는 전기자 반출부의 끝에서 두 번째에 위치한 치의 높이를 A, 가장 끝에 위치한 치의 높이를 B로 정하였다. 다음으로 전기자에 추가로 설치되는 보조치의 설계변수는 전기자와 보조치의 간격을 C, 보조치의 너비를 D, 보조치의 높이를 E로 정하여 총 5인자로 구성하였다. 설계변수 A와 B의 범위는 코일의 위치를 고려하여 28-36[mm]로 정하였으며 설계변수 E 또한 치의 높이이기 때문에 동일한 범위로 설정하였다. 설계변수 C와 D는 슬롯 간격의 두 배수인 2-10[mm]를 범위로 하였다. 또한 각 설계변수의 조절 폭은 2[mm]간격으로 각 설계변수 별로 5수준을 갖도록 하였다. 이를 다구찌의 방법으로 나타내면 $L25(5^5)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 25는 실험 횟수이고, 실수를 나타내는 5는 설계변수의 수준 수, 지수를 나타내는 5는 설계변수의 인자 수이다.

3.2 다구찌의 실험계획법을 이용한 설계

표 2에 다구찌의 실험계획법을 이용한 직교배열표와 2-D 유한요소법을 이용한 최대 단부 디텐트력의 해석값을 나타내었다. 이 때 직교배열표상 최소 디텐트력 값은 No. #18에서 7.84[N]으로 기본모델의 13.16[N]에 비해 40.45[%]의 저감을 보였다. 하지만 다구찌의 실험계획법은 평균값에 대한 주효과를 파악하여 최적 설계를 할 수 있기 때문에 이를 이용한 최소값 설계를 진행하였다.

그림 6에 디텐트력 평균값에 대한 주효과 그래프를 나타내었으며 표 3에 각 수준별 평균값과 텔타값을 나타내었다. 먼저 우리는 그래프를 통해 각 인자별 디텐트력을 최소로 할 수 있는 수준값을 확인하였다. 즉, A=28[mm], B=32[mm], C=10[mm], D=10[mm], E=30[mm]일 때 디텐트력이 가장 최소가 될 수 있는 조건이다. 또한 각 설계변수가 디텐트력에 미치는 영향을 살펴보면 설계변수 E가 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 설계변수 A=28[mm], B=32[mm], C=10[mm], D=10[mm]으로 고정시킨 후 설계변수 E를 조절하며 재해석 하였다. 해석 결과 최대 단부 디텐트력이 8-9[N]으로 기본모델 대비 많은 저감을 보였지만 직교배열표상의 최소값보다 더 크게

발생하여 적합하지 않음을 알 수 있다.

다음으로 우리는 디텐트력에 두 번째로 영향을 미치는 설계변수 A를 주목하였으며 B=32[mm], C=10[mm], D=10[mm], E=30[mm]으로 고정시킨 후 설계변수 A를 조절하며 재해석 하였다. 해석 결과 A=34[mm]에서 7.02[N]으로 기본모델 대비 46.66[%]가 저감되었으며 직교배열표상의 값이나 설계변수 E를 조절한 값보다 더 저감됨을 확인하였다. 따라서 최소값 설계에서는 설계변수 A의 영향이 큼을 확인하였다. 그림 7에 기본모델과 비교 그래프를 나타내었다.

표 2. 직교배열표
Table 2. Table of orthogonal array

No.	A	B	C	D	E	Maximum detent Force [N]
#1	28	28	2	2	28	9.5599
#2	28	30	4	4	30	9.5362
#3	28	32	6	6	32	9.7098
#4	28	34	8	8	34	9.3474
#5	28	36	10	10	36	11.2429
#6	30	28	4	6	34	13.2788
#7	30	30	6	8	36	15.6669
#8	30	32	8	10	28	8.7205
#9	30	34	10	2	30	10.4656
#10	30	36	2	4	32	14.8674
#11	32	28	6	10	30	9.7207
#12	32	30	8	2	32	9.8291
#13	32	32	10	4	34	10.8704
#14	32	34	2	6	36	14.3675
#15	32	36	4	8	28	13.5548
#16	34	28	8	4	36	16.1136
#17	34	30	10	6	28	7.8398
#18	34	32	2	8	30	7.8386
#19	34	34	4	10	32	8.0524
#20	34	36	6	2	34	12.4641
#21	36	28	10	8	32	10.7368
#22	36	30	2	10	34	11.9031
#23	36	32	4	2	36	13.2466
#24	36	34	6	4	28	8.2463
#25	36	36	8	6	30	9.2209

그림 6. 디텐트력 평균값에 대한 주효과 그래프
Fig. 6 Main effects plot for means

표 3. 각 수준별 평균 및 델타값
Table 3. Mean and delta value for levels

Level.	A	B	C	D	E
1	9.879	11.882	11.707	11.113	9.584
2	12.6	10.955	11.534	11.927	9.356
3	11.669	10.077	11.162	10.883	10.639
4	10.462	10.096	10.646	11.429	11.573
5	10.671	12.27	10.231	9.928	14.128
Δ	2.721	2.193	1.476	1.999	4.771
Rank	2	3	5	4	1

그림 7. 기본모델과 제안모델의 단부 디텐트력
Fig. 7 End edge detent force of basic model and proposed model

IV. 결 론

본 논문은 장거리 반송장치용 분포권 PMLSM의 설치비용 절감을 위해 전기자를 분산배치 하는 시스템에서 추력 리플로 작용하여 기기의 운전 특성을 감소시키는 디텐트력을 저감하기 위해 전기자 반출부의 형상을 변화시켰다. 먼저 반출부에 위치한 치의 높이와 보조치의 치수를 A-E까지의 설계변수로 정하였다. 다음으로 다구찌의 실험계획법을 이용하여 디텐트력을 최소로 할 수 있는 형상설계를 진행하였다. 설계변수 중 디텐트력에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 보조치의 높이였으나 추가적인 해석결과 디텐트력의 최소값을 구하기 위해서는 설계변수 A의 영향이 더 크게 작용함을 확인하였다. 따라서 설계변수 A=34[mm], B=32[mm], C=10[mm], D=10[mm], E=30[mm]일 때 최대 디텐트력은 7.02[N]으로 기본모델 대비 46.66[%]가 저감되어 단부효과를 개선할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 얻은 결과를 바탕으로 PMLSM의 전기자 분산배치 시 운전특성을 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] M. Karita, "Present Status of Linear Drives for Industry Applications in Japan", Proc. IEEJ conf. Linear Drives for industry applications, pp. 462-467, 2001.
- [2] Yong-ho Jeon, Whang Cho, "Nonlinear and Adaptive Back-Stepping Speed Control of IPMSM", The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 6, No. 6, pp. 855-864, 2011.
- [3] Yong-Jin Kim, Young-Chul Bae, Kwang-Heon Kim, "Implementation of Motor Driver for Control of AC Servo Motor of Robot", The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 7, No. 3, pp. 553-558, 2012.
- [4] Yong-Seon Moon, Sang-Hyun Roh, Kwang-Hun Jo, Young-Chul Bae, "Design of Robot Joint Structure using Multiple Motors", The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 7, No. 2, pp.

417-423, 2012.

- [5] Joon-Keun Woo, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 1157-1160, 2002.
- [6] In-Soung Jung, Sang-Baeck Yoon, Jang-Ho Shim, Dong-seok Hyun, "Analysis of forces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor", IEEE Trans, Energy Convers, Vol. 14, No. 4, pp. 1365-1270, 1999.
- [7] Chang-Hwan Kim, "Robust Disturbance Suppression Control for AC Servo Motors", The Journal of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences, Vol. 7, No. 4, pp. 839-848, 2012.
- [8] Sun Joong Ryu, "BGA Deveop Process Optimization for the Vertical Wet Equipment Using Taguchi Experiment", Journal of the Korean Vacuum Society, Vol. 18, No. 4, pp. 310-317, 2009.

저자 소개

박의종(Eui-Jong Park)

2013년 조선대학교 전기공학과 졸업(공학사)

2013년~현재 조선대학교 대학원 전기공학과 재학(석사과정)

※ 관심분야 : 모터 설계 및 해석

김용재(Yong-Jae Kim)

1996년 조선대학교 전기공학과 졸업(공학사)

2003년 일본 무사시 공업대학 대학원 공학연구과 전기공학 졸업(공학석사)

2006년 일본 무사시 공업대학 대학원 공학연구과 전기공학 졸업(공학박사)

2007년~현재 조선대학교 전기공학과 부교수

※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석