전기자 분산배치 PMLSM의 단부 코깅력 저감을 위한 전기자 스큐각의 영향 분석

김용재* · 김재홍**

The Analysis of Skewed Armature Effect for Reduction of End Edge Cogging Force of
Stationary Discontinuous Armature PMLSM

Yong-Jae Kim* · Jae-Hong Kim**

요 약

영구자석 선형 동기 전동기는 회전기기에 비해 구조적으로 간단하여 보수 점검이 용이하고 정밀, 고속, 고 추력화 등의 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 반송경로 전장에 전기자를 설치해야 하는 구조적 특성으로 인해 반송경로가 길어지면 길어질수록 초기 설치비용이 상승하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 전기자를 분산시켜 배치하는 방식을 제시하였으나 전기자를 분산시켜 배치할 경우 전기자 양 끝단에는 구조상 반드시 단부가 존재하게 되며 이러한 단부는 추력 맥동을 야기하는 코깅력을 크게 발생시켜 기기의 소음과 진동 및 기기의 성능 저하의 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 기기의 운전특성을 향상시키기 위해 전기자의 스큐에 따른 단부특성을 3D FEM 수치해석을 이용하여 파악하고 단부 코깅력을 가장 저감시키는 전기자 스큐를 제안하고자 한다.

ABSTRACT

The permanent magnet linear synchronous motors facilitate maintenance, for it is structurally simple compare to rotating machine and has lots of advantage such as a precision control, high speed, high thrust and so on. However, it causes an increase of material cost because of structural characteristics that need to arranges the armature on the full length of transportation lines. Thus, in order to resolve this problem, we propose the discontinuous arrangement method of the armature but the edge always exists due to the structure when the armature is arranged discontinuously. Due to this edge, the cogging force is greatly generated and it causes thrust force ripple generating noise, vibration and decline of performance. Therefore, in this paper, we examined the characteristic of end edge according to the skew angle through 3-D numerical analysis using finite element method(FEM) and improved the operation characteristics.

키워드

PMLSM, Skewed Armature, End Edge Armature, Cogging Force, Stationary Discontinuous Armature

영구자석 선형 동기 전동기, 전기자 스큐, 전기자 단부, 코깅력, 전기자 분산배치

* 조선대학교 전기공학과(kimyj21@chosun.ac.kr)

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

접수일자 : 2013. 11. 13

심사(수정)일자 : 2013. 12. 16

게재확정일자 : 2014. 02. 11

I. 서론

현재 각종 산업 현장의 반송 장치에서는 기어, 볼 스크류, 랙앤드 피니언 등을 이용하여 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환시켜 사용하고 있으나 이러한 장치들은 운동 변환 과정에서 소음, 진동, 손실 등으로 작용하여 기기의 효율을 떨어뜨린다. 이에 반하여 선형 전동기는 운동 변환 장치들을 사용하지 않으면서 저소음, 고속 직선운동이 가능하며 영구자석 사용 시에는 고추력의 직선운동 또한 가능하기 때문에 반도체, 디스플레이, 자동차, 철도, 정밀 측정기계 산업 등에서 선형 전동기의 필요성이 대두되고 있다[1-4]. 이러한 장점을 바탕으로 우리는 고하중 장거리 반송 장치에 선형 전동기를 적용하고자 한다.

영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor: 이하 PMLSM)는 추진자계를 발생시키는 전기자를 가동자 또는 고정자로 사용할 수 있다. 즉, 반송경로 전장에 영구자석 또는 전기자를 배치해야 하는 시스템이며 거리에 따라 설치비용 및 제작시간에 대한 부담이 증가하게 된다. 또한 전기자를 가동자로 사용하는 시스템은 전력을 공급하는 케이블을 반송경로 전장에 추가로 설치하기 때문에 단거리 반송장치에 많이 사용되지만, 추진자계를 발생시키는 전기자를 반송경로 전장에 배치하는 시스템은 장거리 반송장치로의 적용이 가능하다. 따라서 우리는 설치비용 및 제작시간의 절감을 위해 그림 1과 같이 전기자를 일정한 간격으로 분산시켜 배치하는 전기자 분산배치 시스템을 제시하고자 한다. 하지만 전기자를 분산시켜 배치하기 때문에 각 전기자 사이의 불연속 구간으로 인해 필연적으로 단부가 존재하게 된다. 이러한 단부는 가동자가 전기자에 진입 또는 반출할 때 가동자의 구동을 방해하는 코깅력을 크게 발생시켜 기기의 소음 및 성능저하의 원인이 된다[5]. 현재 이러한 단부의 영향을 저감시키기 위해 영구자석의 스큐, 반폐 슬롯, 치 절단, 보조극, 보조치 설치 등의 다양한 연구가 진행되고 있으며 본 논문에서는 전기자에 스큐를 적용하여 스큐 각에 따른 단부의 영향을 분석하고자 한다. 먼저 3D FEM 수치해석을 통해 기본 모델 및 제안 모델의 코깅력을 해석하고 분석 후, 단부의 영향을 가장 저감할 수 있는 스큐 각을 제시하고자 한다.

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

	Items	Value
Mover	Number of poles	8[Poles]
	Height of PM	3[mm]
	Length of PM	26[mm]
	Pole pitch	30[mm]
	Back iron height	6[mm]
	Back iron length	268[mm]
Armature	Number of slots	9 [slots]
	Turns per phase	75 [turns]
	Slot pitch	40 [mm]
	Slot width	24 [mm]
	Width of teeth	16 [mm]
	Height of teeth	20 [mm]
	Armature length	360 [mm]
Stack length		50[mm]
Mechanical air-gap		5[mm]

그림 1. PMLSM의 기본모델
Fig. 1 Basic model of PMLSM

II. PMLSM의 기본모델

2.1 기본모델의 해석 사양

표 1에 PMLSM의 사양을 나타낸다. 영구자석은 Nd-Fe-B타입으로 30[mm]의 극 피치 간격을 두어 8극으로 배치하였으며 가동자의 총길이는 268[mm]이다. 전기자는 슬롯 간격 40[mm]로 총 9슬롯을 배치하였으며 전기자의 길이는 360[mm]로 구성되어 있다. 또한 전기자 치의 너비는 16[mm], 높이는 20[mm]이며 가동자, 영구자석, 전기자의 적층 폭은 50[mm]이다. 한 상당 코일 권수는 75[turn]이며 Air-gap은 5[mm]으로 구성된다. 그림 1에 PMLSM의 기본모델을 나타내었다.

2.2 3D FEM 수치해석의 Mesh조건

FEM이란 해석 공간을 유한개의 소 영역(element)

으로 나누고, 각 요소에 대해 절점(node)이라는 한 점에서 근사함수(trial function or interpolation function)를 이용하여 근사된 요소방정식을 구성한 후 이를 전 공간에 대해 조합하여 근사 해를 구하는 수치해석방법으로 소 영역을 어떻게 분할하느냐에 따라 해석 결과 값에 영향을 미치게 된다[6]. 또한 어떤 특성을 주로 파악 하느냐에 따라서 메쉬의 조건이 상이하게 된다. 본 논문에서 다루는 코깅력의 경우 공극 자속밀도의 정확한 파악을 위해 공극에 근접할수록 메쉬는 조밀하게 설정해야 한다. 또한 3D FEM의 경우 누설자속 값 까지 고려하기 때문에 알맞은 메쉬조건에 신중을 기해야 한다. 따라서 기본모델의 공극 메쉬조건은 동일하게 고정시킨 상태에서 나머지 소 영역들의 메쉬 크기를 1[mm]부터 10[mm]까지 1[mm] 간격으로 조절하여 메쉬에 따른 단부 코깅력 값을 비교하였다. 그 결과 1[mm]와 10[mm]메쉬의 결과값 차이는 1.21[N]으로 1[mm]모델의 최대값인 22.43[N]기준으로 5.4[%]의 차이를 보여 나머지 소 영역들의 메쉬 크기에 따른 영향은 상대적으로 적음을 확인하였다. 하지만 1[mm]모델은 10[mm]모델에 비하여 해석 시간에서 5배 이상, 파일 용량에서 20배 이상의 차이를 보였기 때문에 이 후의 해석에서는 메쉬 조건을 10[mm]로 설정하여 진행하기로 결정하였다. 표 2에 메쉬 크기에 따른 해석 조건 상태를 나타내었다.

2.3 기본모델의 코깅력

전기자를 분산시켜 배치하는 경우 전기자 사이의 불연속 구간에 의해 필연적으로 단부가 존재하게 된다. 이러한 단부에 의해 가동자가 전기자 설치부와 비설치부의 경계를 통과할 때, 전기자 축의 철심과 가동자 축의 영구자석 사이에서 발생하는 흡인력이 크게 변동하게 되는데 이를 단부 코깅력이라 한다. 그림 2는 단부에서 발생하는 힘이 가동자에 미치는 영향에 대하여 나타내고 있다. 가동자가 전기자에 진입하는 진입부에서 발생하는 흡인력은 가동자의 진행 방향과 같은 방향의 힘이다. 이는 가동자를 전기자 축으로 끌어 들이는 힘으로 작용하여 가동자를 가속시키게 된다. 또한, 가동자가 전기자를 벗어나는 반출부에서 발생하는 흡인력은 가동자의 진행 방향과 반대방향의 힘이다. 이는 가동자를 전기자 축으로 되돌리는 힘으로 작용하여 가동자를 감속시키게 된다. 따라서 우리

는 기본 모델에서 발생하는 단부 코깅력의 특성을 파악하기 위해 3D FEM 수치해석을 수행하였다.

표 2. 메쉬 크기에 따른 해석 조건 상태
Table 2. The status of analysis conditions according to the size of mesh

Mesh 크기	해석 시간	해석 용량	요소수	절점수
1[mm]	7day	420GB	16255539	3089561
2[mm]	2day	134GB	5182959	1138961
3[mm]	1.5day	81GB	3100647	766783
4[mm]	1day	64GB	2311276	624851
5[mm]	20hour	50GB	1881518	547506
6[mm]	18hour	43GB	1617895	500268
7[mm]	16hour	39GB	1447414	469866
8[mm]	15hour	36GB	1330232	449074
9[mm]	14hour	34GB	1238832	432941
10[mm]	13hour	32GB	1159894	418966

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

그림 3. 가동자의 위치에 따른 기본모델의 코깅력
Fig. 3 Cogging force of basic model

해석 범위는 전기자와 가동자가 대향하고 있지 않은 상태에서 가동자를 전기자 측에 진입시켜, 가동자가 전기자를 완전하게 벗어나는 구간까지 해석을 수행하였다. 이때의 요소수는 1159894, 절점수는 418966이며, 1Step당 1[mm] 이동하도록 설정 하였다. 그림 3에 가동자의 위치에 따른 기본 모델의 코깅력 과형을 나타낸다. 가동자와 전기자가 완전하게 대향하고 있는 부분에서 발생하는 코깅력은 ± 0.9 [N], 가동자가 전기자에 진입 및 반출하는 부분에서 발생하는 최대 단부 코깅력은 ± 23.8 [N]이 발생 하였다. 그래프와 결과값에서 볼 수 있듯이 완전대향시의 코깅력과 단부에서 발생하는 코깅력의 크기는 25배 이상의 차이를 보였다. 이러한 단부 코깅력은 전기자 분산배치 PMLSM에서 가동자가 전기자에 진입 또는 반출시 원활한 진행을 방해하며 추력 맥동의 원인이 되어 기기의 성능을 저감시키기 때문에 반드시 저감시켜야 하는 요소이다.

III. PMLSM의 전기자 스큐 적용 모델

3.1 전기자 스큐

전기자 스큐는 강판을 사선으로 적층하여 구현할 수 있으며 그림 4에 전기자 스큐 적용 모델을 나타내었다. 해석시간 절감을 위해 메쉬 조건을 10[mm]로 조절하였으나 여전히 하루 이상의 해석시간을 보이기 때문에 스큐길이 간격을 5[mm] 간격으로 결정하여 스큐를 적용하지 않은 기본모델에서부터 5[mm] 간격으로 스큐길이를 증가시켜 각 모델을 구성하였다.

먼저 스큐길이를 0[mm]부터 25[mm]까지 구성된 모델을 해석하였으며 그림 5에 각 모델의 코깅력 그래프를 나타내었다. 그 결과 스큐길이가 증가함에 따라 그래프의 주기가 이동하는 현상을 보였으며 최대 단부 코깅력은 25[mm]모델에서 16.33[N]으로 기본모델의 23.65[N]대비 30.95[%] 저감되었다. 또한 각 모델 간 코깅력의 저감이 일정하게 진행되고 있기 때문에 25[mm]이후의 스큐길이에 대해서도 해석을 수행하였다.

다음으로 30[mm]부터 50[mm]까지의 모델을 구성하여 해석한 코깅력 그래프를 그림 6에 나타내었다. 앞서 그림 5에서 확인한 결과와 동일하게 스큐길이가

증가함에 따라 그래프의 주기가 이동하는 현상을 보였으며 최대 단부 코깅력 또한 스큐길이가 가장 큰 50[mm]모델에서 12.02[N]으로 기본모델의 23.65[N]대비 49.17[%] 저감되었다. 각 모델 간 최대 단부 코깅력의 저감율은 감소하였으나 여전히 스큐길이가 증

그림 4. 전기자 스큐 적용 모델
Fig. 4 Model of skewed armature

그림 5. 전기자 스큐 5-25mm 적용 모델의 코깅력
Fig. 5 Cogging force of 5-25mm skewed armature

그림 6. 전기자 스큐 30-50mm 적용 모델의 코깅력
Fig. 6 Cogging force of 30-50mm skewed armature

가함에 따라 최대 단부 코깅력은 감소하고 있다. 따라서 65[mm] 스큐 길이까지 추가해석을 수행하였다.

55[mm]부터 65[mm]까지의 모델을 구성하여 해석한 코깅력 그래프를 그림 7에 나타내었다. 앞서 진행했던 두 해석과 동일하게 스큐길이가 증가함에 따라 그래프의 주기가 이동하는 현상을 보였으나 각 모델 간 최대 단부 코깅력의 저감율은 매우 미미함을 확인할 수 있다. 이에 65[mm]에서 최대 단부 코깅력은 10.91[N]으로 기본모델 대비 53.87[%]저감함을 확인하였으며 그림 8에 스큐길이에 따른 최대 단부 코깅력을 도식하여 나타내었다.

IV. 결론

본 논문은 장거리 반송시스템에 적용될 전기자 분산배치 영구자석 선형 동기전동기의 운전을 저해하는 단부 코깅력을 감소시키기 위해 전기자에 스큐를 적

용하여 스큐길이에 따른 단부 코깅력의 영향을 고찰하였다. 먼저 메쉬 크기에 따른 코깅력을 분석하여 전자장 시뮬레이션 해석에 적합한 메쉬 크기를 도출하였다. 다음으로 전기자 스큐가 적용된 모델에 도출된 메쉬를 적용하여 스큐각에 따른 특성을 분석한 결과 코깅력 그래프의 주기는 스큐길이에 따라 증가하는 양상을 보였으며 이와 동시에 최대 단부 코깅력이 저감됨을 확인하였다. 또한 스큐길이가 증가함에 따라 코깅력의 리플이 감소하여 일정한 값에 수렴하는 듯

그림 7. 전기자 스큐 55-65mm 적용 모델의 코깅력
Fig. 7 Cogging force of 55-65mm skewed armature

그림 8. 각 모델별 최대 단부 코깅력
Fig. 8 Maximum cogging force of each models

한 모습을 확인할 수 있었다. 이는 기기의 운전 시 진동 및 소음을 저감하는데 유리하게 작용 하지만 65[mm] 스큐길이의 경우 전기자 슬롯피치의 1.5배에 해당하는 길이기 때문에 전기자 스큐를 적용하기 위해서는 적용 분야의 주변 상황 및 기기 사양의 충분한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

참고 문헌

- [1] M. Karita, "Present Status of Linear Drives for Industry Applications in Japan," *Proc. IEEE conf. Linear Drives for industry applications*, 2001, pp. 462-467.
- [2] Y.-S. Moon, S.-H. Roh, K.-H. Jo, and Y.-C. Bae, "Design of Robot Joint Structure using Multiple Motors," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 2, 2012, pp. 417-423.
- [3] Y.-H. Jeon and W. Cho, "Nonlinear and Adaptive Back-Stepping Speed Control of IPMSM," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 6, 2011, pp. 855-864.
- [4] Y.-J. Kim, Y.-C. Bae, and K.-H. Kim, "Implementation of Motor Driver for Control of

AC Servo Motor of Robot," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 3, 2012, pp. 553-558.

- [5] J.-K. Woo, G.-H. Kang, J.-P. Hong, and G.-T. Kim, "Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motors," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 38, no. 2, 2002, pp. 1157-1160.
- [6] I.-C. Hwang, "Characteristics Analysis of V-skew Model for Minimization of the Detent Force and Lateral Force," *Master thesis Changwon University*, 2007.

저자 소개

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 조교수

※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석

김재홍(Jae-Hong Kim)

2004년 동국대학교 전자전기공학부 졸업(공학사)

2006년 포항공과대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(공학석사)

2010년 포항공과대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(공학박사)

2009년 Research Fellow, Aalborg University, Denmark

2010년~2011년 두산인프라코어 선임연구원

2011년~현재 조선대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야 : 전력변환, AC 드라이브, 마이크로 그리드