

Permanent Magnet Linear Synchronous Motor의 운전성능 향상을 위한 속도패턴의 변화

윤강준, 정춘길, 이동엽, 김규탁  
 창원대학교 전기공학과

Vibration Minimization of PMLSM by using the Jerk Continuity Acceleration curve

Yoon Kang-Jun, Jung Chun-Gil, Lee Dong-Yeop, Kim Gyu-Tak  
 Changwon National University Electrical Engineering

**Abstract** - This paper is proposed vibration minimize method of slotted PMLSM which is designed to minimize detent force. For improvement of operational performance by changing velocity profile to reducing the vibration at discontinuous section of acceleration curve in this paper, proter type machine is made, the vibration is compared general trapezoid velocity profile with vibration minimization velocity profile.

1. 서 론

영구자석형 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor: PMLSM)는 효율이 높고 추력/중량비가 높아 고추력화 및 고속화가 가능하다는 장점이 있고, 최근에는 선형 전동기의 발전으로 인해 전기철도 등의 운송수단, 공장 자동화의 반송 시스템, 그리고 반도체 제조장비 및 CNC 등의 직선 추력을 요구하는 분야는 물론 OA기기 등에 이르기까지 그 응용 분야가 확대되고 있다.

철심형(Slotted) PMLSM은 높은 추력 밀도를 가지지만 영구자석과 전기자의 치-슬롯 구조에 의해 필연적으로 디텐트력(detent force)이 발생하는데, 이러한 디텐트력은 구동 시 기기의 추력 맥동으로 작용하여 소음 진동을 유발할 뿐 아니라 제어 성능을 저하시킨다. 한편, 공심형(Slotless) PMLSM은 상대적으로 큰 자기적 공극으로 인해 슬롯형 PMLSM에 비해 추력밀도가 떨어지는 단점을 가지지만, 치-슬롯 구조가 없어 디텐트력이 근본적으로 제거되어 추력리플이 거의 발생하지 않고, 수직력이 작기 때문에 뛰어난 제어성능을 가진다.

최근 PMLSM의 연구동향으로 큰 추력을 발생시키는 철심형의 장점인 고출력화는 물론 공심형 PMLSM의 최대 장점인 추력 리플을 최소화시키고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

그러나 실제 운전 시 디텐트력 뿐만 아니라 제어기와 속도Profile 등에 따른 추력 리플도 발생하기 때문에, 고속 정밀 제어를 요구하는 PMLSM의 운전성능 향상을 위해서는 먼저 디텐트력 영향을 최소화하는 설계가 이루어지고, 가·감속 운전 시 진동저감을 위해 최적의 속도Profile을 적용하는 것이 필요 불가결하다.[1][2]

본 논문에서는 PMLSM의 추력리플 저감설계를 위해 영구자석을 1/4슬롯 피치만큼 스큐를 주었고, 실제 디텐트력 저감 설계를 한 철심형 PMLSM 시험기를 제작하였다. 정추력 특성시험 결과 디텐트력이 거의 나타나지 않는 만족스러운 결과를 얻었다. 그러나 가·감속 운전 시에는 가속구간에서 정속구간으로, 정속구간에서 감속 구간으로의 속도 변화 시 추력의 큰 변화에 따라 진동이 발생한다. 따라서 운전성능 향상을 위하여 속도 프로파일을 변화시켜 진동을 측정, 가속도 불연속 구간에서 발생하는 진동의 저감방법을 모색하였다.

2. PMLSM 특성해석 및 실험

2.1 PMLSM의 제원 및 특성

표 1은 본 연구에서 적용한 PMLSM의 기본 설계 치수와 전기적 사양 및 설계 파라미터를 나타낸 것이다.

표 1. Specific of PMLSM

항 목	값 [단위]	항 목	값
극 수	12	코일당 턴수	618
잔류자속밀도	1.2 [T]	치 폭	7.78 [mm]
영구자석 폭	12.5 [mm]	슬롯 폭	12.22 [mm]
영구자석 높이	7.5 [mm]	슬롯 깊이	30.55 [mm]
영구자석 길이	52 [mm]	상전류[최대]	4.24 [A/mm <sup>2</sup> ]
극 피치	15 [mm]	공극길이	1.2 [mm]

그림 1은 실제 제작된 양측식 PMLSM을 나타낸다.

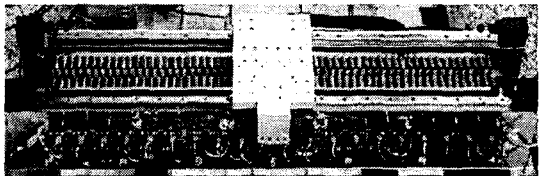


그림 1. 양측식 PMLSM

그림 2에서는 PMLSM의 자속 분포도를 나타내었다. 양측식 PMLSM의 대칭성을 이용하여 전체영역의 1/2을 해석모델로 선정하였고, 구동 중 나타나는 치-슬롯에 의한 디텐트력과 가동자가 유한한 길이를 가짐으로써 발생하는 단부효과(End-Effect)에 의한 디텐트력을 모두 고려하기 위해 Full 모델 특성해석을 수행하였다.

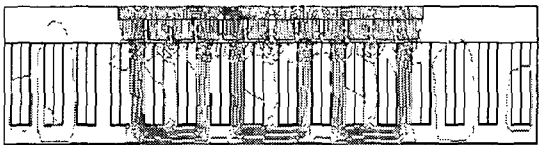
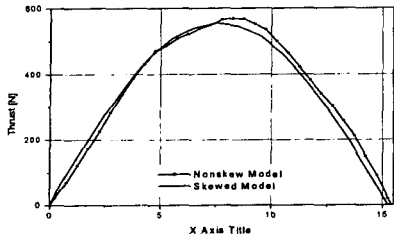


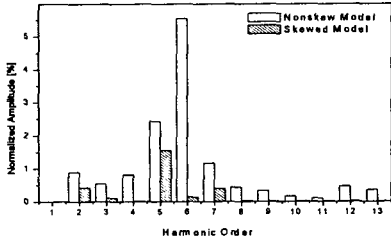
그림.2 등포텐셜 라인도

2.2 1/4 Slot pitch Skewed PMLSM 특성해석

PMLSM의 운전특성에 추력리플로 작용하는 디텐트력을 제거하기 위하여 영구자석에 1/4 슬롯피치만큼 스큐를 적용하여 특성해석을 수행하였다.



(a) 추력



(b) 고조파 분석

그림 3. 추력과 고조파 분석

그림 3은 초기모델과 영구자석에 1/4 슬롯피치만큼 스큐를 시행한 모델의 추력 특성해석 결과와 추력의 고조파 분석 결과를 비교한 것이다. 스큐를 시행할 경우 추력의 피크값은 555.46[N]으로 시행전에 비해 12[N] 정도 감소하지만 스큐를 시행한 모델의 경우 추력의 고조파 분석결과 왜형률이 1.65 [%]로 초기모델의 8.861[%]보다 고조파의 영향이 대폭 줄어든 거의 정현파에 가까운 결과를 얻었다.

그림 4는 초기모델과 스큐를 시행한 모델의 디텐트력을 비교한 것이다. 초기모델의 디텐트력 피치값이 12.21 [N]에서 스큐를 시행할 경우 2.04[N]으로 대폭 감소하였다.

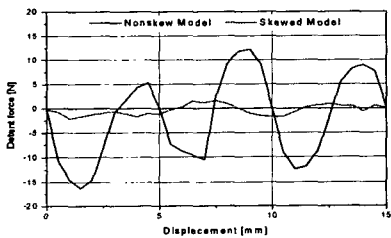


그림 4. 디텐트력

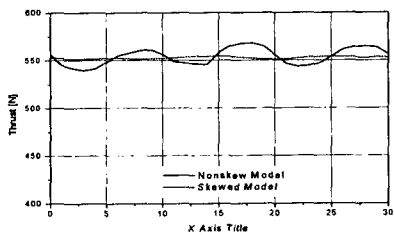
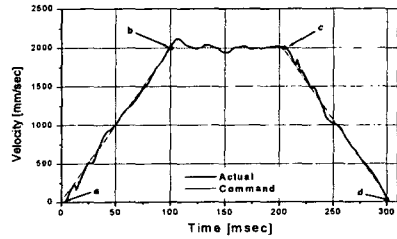


그림 5. 정상상태 운전특성

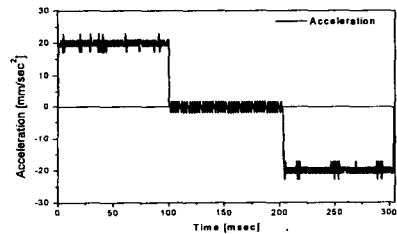
그림 5는 부하각 90도에서 정상상태 운전특성을 비교한 그림이다. 초기모델의 리플율은 2.135[%]로써 정상상태 운전시에 추력리플이 크게 나타나고 있음을 알수 있고, 반면 영구자석 스큐를 시행한 모델의 리플율은 0.72[%]로 거의 리플이 없는 일정한 정추력이 발생하고 있음을 알수 있다. 스큐를 시행함으로써 디텐트력이 제거되어 정속 운전 시에는 추력리플이 발생하지 않는 양호한 특성을 나타낸다.

### 3. 속도패턴에 따른 진동

실제 시험기를 제작 PMLSM을 구동시켜 운전시 발생하는 추력리플을 측정하였다. 초기 설계시 특성해석을 통해 운전특성에 리플로 작용하는 추력 리플, 특히 치-슬롯에 의한 디텐트력은 거의 제로로 설계하였다. 그러나 실제 운전 시 추력 리플은 제어기와 속도 Profile, 부하상태 등에 따라 다르게 발생한다. 속도 패턴에 따른 진동을 측정하기 위하여 가속도계를 장착하였다.



(a) 속도 Profile



(b) 가속도 Profile

그림 6. 속도, 가속도 Profile

그림 6은 무부하시 가·감속시간을 100msec로 설정한 속도 Profile을 적용하였을 때 PMLSM의 운전결과와 그 때의 가속도 Profile을 나타낸다.

그림 6에서 가속구간에서 정속구간으로, 정속구간에서 감속구간으로 속도가 변하는 점, 즉 가속도가 급변하는 지점에서 진동이 크게 발생한다. PMLSM의 속도는 지령속도에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

가속도 Profile에서도 a,b,c,d점에서 가속도가 순간적으로 급격히 변화하는데 이 점에서 진동이 심하게 발생하게 된다.

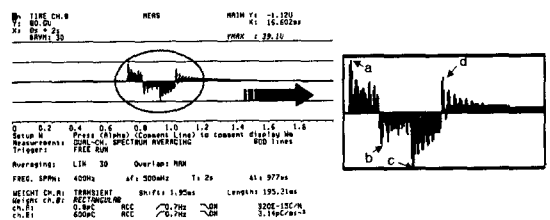


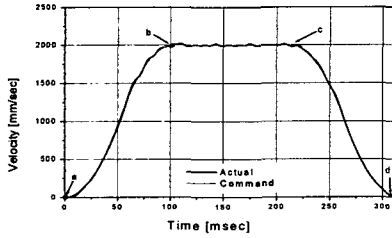
그림 7. 진동 측정 결과

그림 7은 PMLSM 운전 시 측정된 진동을 나타낸다. 실험에서 속도 Profile을 적용시켜 PMLSM을 운전할 경우 가속도가 급변하는 a,b,c,d 점 부근에서 시험기에 순간적인 임팩트로 작용하는 진동이 많이 발생함을 확인하였다.

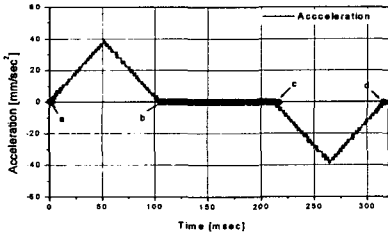
따라서 운전리플인 진동을 줄이기 위해서 가속도 급변 구간이 없는 가속도 연속인 S-Curve 형태의 속도 프로파일을 적용하게 되었다.

### 3.1 진동저감을 위한 속도패턴

그림 8에서는 초기 속도Profile에서 진동의 주요 발생 지점인 가속구간에서 정속구간으로 변하는 점과 정속구간에서 감속구간으로 변하는 점에서 가속도의 불연속점을 연속이 되도록 삼각파형으로 만들었다. 속도가 S-Curve형태로 가속도 급변구간이 없는 속도,가속도 Profile을 나타낸다. 가·감속시간은 초기 속도Profile과 같은 100msec로 설정하였다. 진동이 심하게 발생하는 가속도가 불연속인 a, b점에서 S-Curve의 가속도 Profile은 연속적인 곡선을 그리게 된다.



a) 속도 Profile



b) 가속도 Profile

그림 8. S-Curve 속도, 가속도 Profile

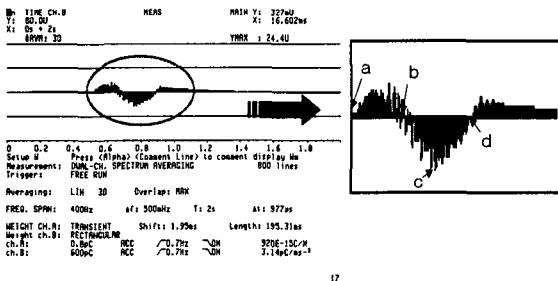


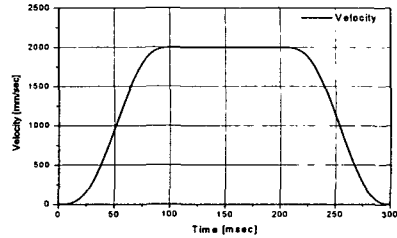
그림 9. S-curve 속도 Profile 진동 측정 결과

그림 9은 S-Curve 가속도 Profile을 적용하였을 때 진동을 나타낸다.

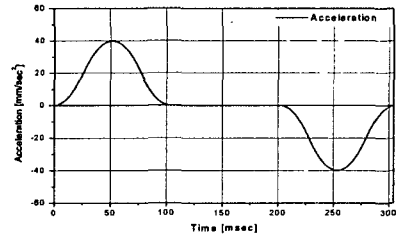
초기 속도 profile에서는 가속도가 불연속이 되는 a,b

점에서 순간적으로 강한 고조파 진동이 많이 발생하였는데, S-curve 속도 Profile을 적용할 경우에는 가속도의 급격한 변화가 없기 때문에 진동측정 결과도 비교적 완만하게 진동이 생기는 것을 확인하였고, 운전 특성에서도 초기 속도 Profile에 비해 리플이 적게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

그림 10는 S-curve 속도 Profile의 가속도를 곡선형태로 나타낸 것이다.



a) 속도 Profile



b) 가속도 Profile

그림 10. 진동저감을 위한 속도,가속도 Profile

위 실험결과에서도 알 수 있듯이 가속도 곡선이 진동에 직접적으로 영향을 주기 때문에 가속도를 곡선으로 주게 되면 보다 진동이 저감되는 운전특성을 예상할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 철심형 PMLSM의 운전성능을 향상시키기 위하여 추력 리플로 작용하는 치-슬롯에 의한 디텐트력을 영구자석을 1/4슬롯피치 만큼 스크류 시행하는 방법에 의해 저감하였고, 실제 시험기를 제작하여 초기 가속도 불연속점이 존재하는 속도Profile과 가속도 불연속점이 없는 S-Curve 속도 Profile을 만들어 실제 시험기에 적용하여 발생하는 각각의 진동 측정하였다.

그 결과 PMLSM 운전 시 가속도 불연속점에서 운전특성에 리플로 작용하는 고조파 진동들이 많이 발생하였다. 가속도 불연속점 없는 S-Curve속도 Profile로 운전 시 가속도 불연속점에서 발생 진동이 대폭 감소하여 운전성능이 향상됨을 알 수 있었다. 앞으로 가·감속 운전 시 진동이 최소화 되는 가속도 패턴 도출을 위한 연구를 시행할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Ki-Chae Lim, Joon-keun Woo, Gyu Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "Detent Force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No.2, pp. 11-57-160, 2002.
- [2] 임기채, "수치해석법을 이용한 영구자석 선형동기전동기의 특성해석 및 제어기 구현", 창원대학교 박사논문, 2000년