

PMLSM의 진동저감을 위한 최적의 속도 프로파일에 관한 연구

이 동 엽*, 윤 강 준*, 정 춘 길*, 김 규 탁*, 최 영 휴**
 *창원대학교 전기공학과, **기계설계공학과

A Study on Optimum Acceleration Profile to Reduce Vibration of PMLSM

Lee Dong-yeup*, Yoon Kang-jun*, Jung Chun-gil*, Kim Gyu-tak*, Choi Yong-hyu**
 *Dept. of Electrical Engineering, Chang-won National Univ.

**Dept. of Mechanical Design & Manufacturing Engineering, Chang-won National Univ.

Abstract - This paper is proposed vibration minimize method of PMLSM which is designed to minimize detent force. To minimize of vibration at acceleration discontinuous point of velocity curve, genetic algorithm is applied. The vibration characteristic is compared general trapezoid velocity curve with proposed velocity profile.

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 ²]
극 피치	15 [mm]	공극길이	1.2 [mm]

1. 서 론

영구자석형 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor: PMLSM)는 추력/중량비가 높아 고추력화 및 고속화가 가능하며 시스템 전체의 효율이 높다는 장점을 가진다. 또한, 자성재료 및 고에너지 밀도의 영구자석의 개발로 인하여 전기철도와 같은 운송시스템, 공장 자동화의 장치, 칩마운터와 같은 반도체 제조장비 및 CNC 등의 직선 추력을 요구하는 분야는 물론 각종 OA기기 등에 이르기까지 그 응용분야가 확대되고 있다.

PMLSM중 치-슬롯 형태인 철심형 PMLSM은 높은 추력 밀도를 가지지만 영구자석과 전기자의 치-슬롯 구조에 의해 필연적으로 디텐트력(detent force)이 발생하게 된다. 이것은 구동 시 기기의 추력 맥동으로 작용하여 소음, 진동을 유발할 뿐 아니라 제어 성능을 저하시키는 요인이 되므로 PMLSM의 설계시 디텐트력이 최소화 되도록 설계하며, 디텐트력 최소화 기법으로는 영구자석을 스류시키는 방법이 일반적으로 많이 이용되고 있다.

이와같이 추력 리플이 최소화 된 PMLSM일지라도, 감속 운전을 자주 행하여야 하는 시스템에서는 기동 및 정지 시는 물론 속도가 변하는 시점 즉, 가속구간에서 등속구간으로, 등속구간에서 감소구간으로 가속도가 급변하는 지점에서 큰 진동이 발생하게 된다. 따라서, 고속 정밀 제어를 요구하는 PMLSM의 운전성능 향상을 위해서는 디텐트력 영향을 최소화하는 설계와 함께 가감속 운전 시 진동저감을 위한 최적의 속도Profile을 도출하여야 한다.[1]

따라서, 본 논문에서는 PMLSM의 치-슬롯 구조에 의한 추력리플 저감을 위하여 영구자석을 1/4슬롯 피치만큼 스류 시행을 시행한 시작기를 제작하였다. 또한, 속도 profile에 의해 발생하는 진동을 최소화시키기 위하여 가속도의 미분치인 Jerk가 무한대가 되지 않고 유한값을 갖는 S-curve를 제안하였으며 유전 알고리즘을 이용하여 진동이 최소로 되는 S-curve를 도출하였다. 설계 변수로는 Jerk의 면적, 가 감속 시간, s-curve fitting 시간을 설정하였다.

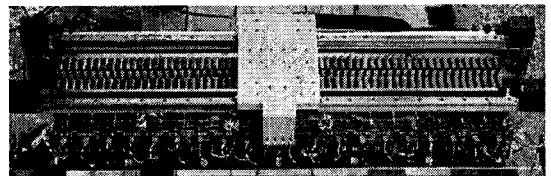
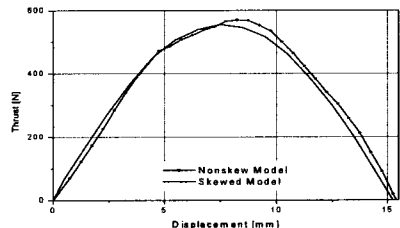
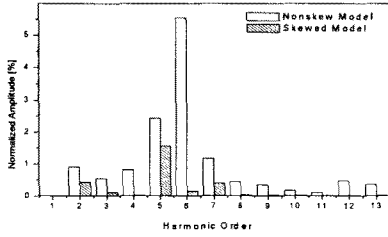


그림 1. 양속식 PMLSM

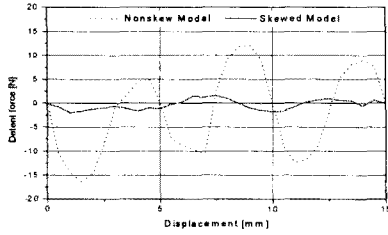
그림 1은 실제 제작된 양속식 PMLSM이다. 디텐트력 최소화를 위해 영구자석을 1/4 슬롯 피치만큼 스류 시행하였으며, 스류 시행으로 인한 디텐트력 저감효과를 알아보기 위하여 스류 시행하지 모델의 발생 추력 및 디텐트력을 스류시행 모델과 비교하여 그림 2에 나타내었다.



(a) 추력



(b) 발생 추력의 고조파 분석



(c) 디넨트력

그림 2. 추력과 고조파 분석

스큐를 시행할 경우 추력의 피크값은 555.46[N]으로 스큐 시행 전에 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.

또한, 초기모델과 스큐를 시행한 모델의 디넨트력을 비교하면 초기모델의 디넨트력 피치값이 12.21 [N]에서 스큐를 시행할 경우 2.04[N]으로 대폭 감소하였다.

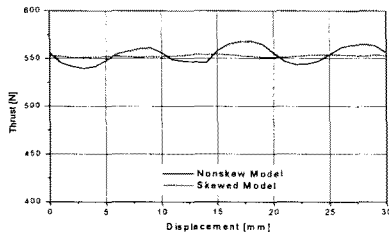


그림 3. 정상상태 운전특성

그림 3은 부하각 90도에서의 정상상태 운전특성을 비교한 그림이다. 초기모델의 리플율은 2.135[%]로써 정상상태 운전 시에도 추력리플이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면, 연구자석을 1/4슬롯피치 만큼 스큐를 시행한 모델의 리플율은 0.72[%]로 리플이 없는 일정한 정추력이 발생하고 있다. 따라서, 스큐를 시행함으로써 디넨트력이 제거되어 정속 운전 시에는 추력리플이 발생하지 않는 양호한 특성을 얻을 수 있었다.

3. 진동최소화를 위한 S 커브 최적화 설계

PMLSM의 가, 감속 운전시의 진동 특성을 해석하기 위하여, 이동자가 그림 4와 같은 사다리꼴 형태의 속도 선도로 운전하는 경우를 해석하였다. 이 속도선도를 미분하면, 가속도 및 Jerk선도를 얻을 수 있다.

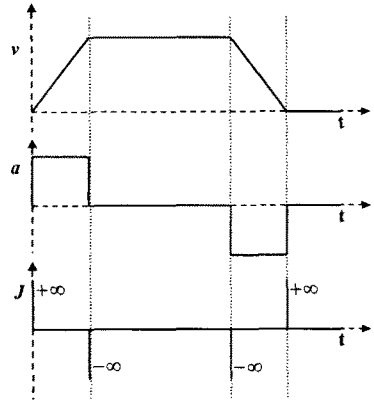


그림 4. 속도 선도

그림 4의 가속도 선도에서 알 수 있는 바와 같이 가속도는 4지점에서 불연속점들을 갖는다. 따라서, 이들 불연속점에서 미분이 불가능하게 되고, 무한대의 Jerk 값을 가지게 된다. 이러한 무한대의 Jerk 값에 의해 발생하는 관성 충격에 의해 직선 이동 시스템에 진동이 크게 유발된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 불연속 구간들을 연속이며 미분 가능한 그림 5와 같은 Jerk곡선을 인가함으로써 관성 충격에 의한 진동현상을 최소화하고자 유전 알고리즘을 적용하였다.

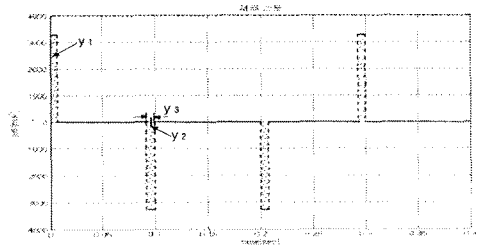


그림 5. Jerk 선도

본 논문에서는 그림 4의 저크가 무한대인 부분을 일정 크기를 갖는 그림 5와 같은 저크 형태로 가정하여 부드러운 가속도 선도를 생성하여 PMLSM을 모델링하여 진동량을 최소화시켰다.

$$\text{설계변수} : \mathbf{x} = \{x_1 \ x_2 \ x_3\}$$

$$\text{Minimize } f(\mathbf{x}) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 w_i \left(\frac{f_i(\mathbf{x})}{f_i^*} \right)^2}$$

여기서, $f_1(\mathbf{x})$ 는 최대 진동값, $f_2(\mathbf{x})$ 는 진동 최대값들의 RMS치, $f_3(\mathbf{x})$ 는 가동자의 이동거리 오차, w_i 는 합이 1인 가중치(Weighting factor), f_1^*, f_2^*, f_3^* 는 스케일링 인자(Scaling factor)이다. 이때의 제약조건은 다음과 같으며 y_{error} 는 0.00001[m]로 설정하였다.

$$g_1(\mathbf{y}) : [x_{vib}(\mathbf{y})]_{\max} - [x_{vib}(\mathbf{y})]_a < 0$$

$$g_2(\mathbf{y}) : [x_{vib}(\mathbf{y})]_{r.m.s} - [x_{vib}(\mathbf{y})]_a < 0$$

$$g_3(\mathbf{y}) : |x_1(\mathbf{y}) - x_k(\mathbf{y})| < x_{error}$$

PMLSM의 이송 속도 최적화 문제를 풀기 위한 적합도 함수와, 벌점함수는 아래와 같이 정의하였다.

$$Fitness = \frac{1}{f(x) + p(x)}$$

$$p(x) = \varepsilon \cdot \left[c_1 \times \sum_{i=1}^c \left\{ \frac{g_i(x)}{g_i} \right\}^2 + c_2 \times \delta \sum_{i=1}^c \left\{ \frac{\Phi_i(x)}{\Phi_i} \right\} \right]$$

그림 6은 150세대동안 유전자 알고리즘 적용결과 세대 변화에 따른 최대 적합도를 나타낸 것인데 35세대 이후 최대 적합도 값이 4.42768로 수렴함을 알 수 있다.

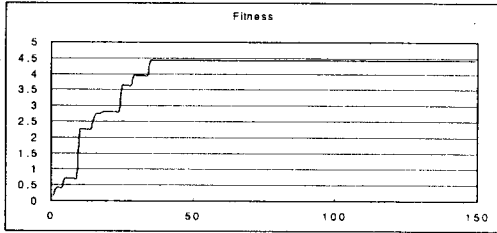
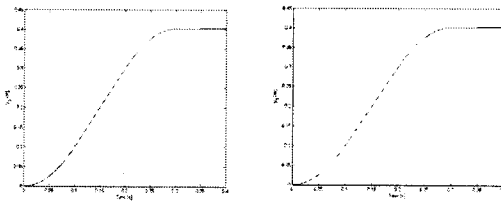


그림 6. 적합도

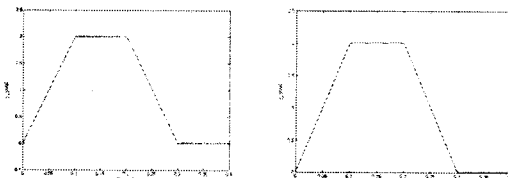
표 2 최적 파라메터

Design variable	Value
x_1	0,0994 [s]
x_2	0.0056 [s]
x_3	3270.81 [m/s ³]

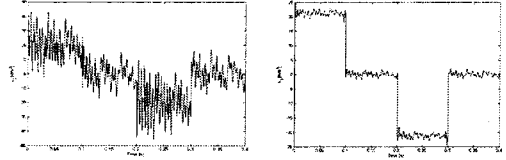
진동 최소화를 위한 설계변수 x_i 값을 표 2에 나타내었다. 진동최소화를 위한 최적 Jerk 곡선을 적용하여 PMLSM의 가, 감속시의 진동 특성을 행한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 알 수 있는바와 같이 무한대의 Jerk 값에 의해 발생하는 관성 충격에 의해 진동은 크게 감소함을 알 수 있다. 그림 8은 본 연구의 타당성 검증을 위하여 현재 널리 이용되고 있는 사다리꼴 속도곡선과 본 연구에서 제안한 방법에 의한 실험치를 비교하여 나타내었다.



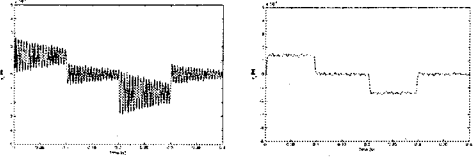
(a) 이동변위



(b) 속도

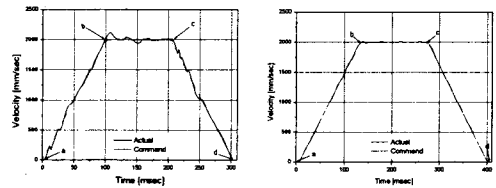


(c) 가속도

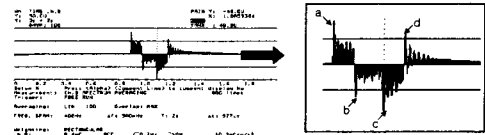


(d) 진동량

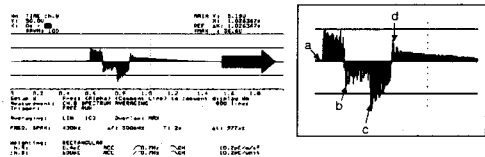
최적화 전 최적화 후
그림 7. 진동 특성 해석



(a) 속도



(b) 최적화전 진동 특성



(c) 최적화후 진동 특성
그림 8. 진동 측정 결과

3. 결 론

본 논문에서는 PMLSM의 가, 감속 운전시의 관성 충격력에 의한 진동을 최소화 시키기 위하여 저감시키기 위하여 가속도의 미분값인 Jerk를 일정 크기로 설정하는 속도 Profile를 제안하였으며 관성 충격에 의한 진동 현상을 최소화하고자 유전 알고리즘을 적용하였다. Jerk의 최적화를 통하여 관성 충격은 97[%] 가량 제거되어 양호한 가,감속 운전이 이루어짐을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. H. Choi, S. M. Cha, J. H. Hong, and J. H. Choi, 2004, "A study on the Vibration Analysis of a Ball Screw Feed Drive System," Proceedings of the 11th International Manufacturing Conference in Chain (IMCC'2004), Paper No. B-083.