

# 리니어모터 이송시스템의 진동저감을 위한 이송속도 최적화

최영휴\*, 최응영+, 김규탁\*\*

Feed rate optimization of a PMLSM driven feed drive system for minimum vibrations

Young-Hyu Choi\*, Eung-Young Choi+, Gyu-Tak Kim\*\*

## Abstract

This paper presents feed rate optimization of a PMLSM driven feed-slide for minimum vibrations by smoothing velocity curve with finite jerk. First of all, the PMLSM was designed and made to reduce detent force. Next, a PMLSM driven feed-slide system was mathematically modeled as a 4-degree-of-freedom lumped parameter model. The key idea of our vibration minimization method is to find out the most appropriate smooth velocity curve with finite jerk. The validity of our proposed method has been verified by comparing computer simulation results of the feed-slide model with experimental ones.

**Key Words** : Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM) driven feeding system, Skewed PM, Smooth velocity curve, Finite jerk, Genetic algorithm

## 1. 서론

영구자석형 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor: PMLSM)는 추력/중량비가 높아 고 추력화 및 고속화가 가능하며 시스템 전체의 효율이 높다는 장점을 가진다. 또한, 자성재료 및 고에너지 밀도의 영구자석의 개발로 인하여 전기철도와 같은 운송시스템, 공장 자동화의 장치, 칩 마운터와 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. 이와 같은 디텐트력은 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 스쿠시키는 방법이 일반적으로 많이 이용되고 있다.

하지만, 추력 리플이 최소화 된 PMLSM일지라도 가·감속 운전을 자주 행하여야 하는 시스템에서는 기동 및 정지 시는 물론 속도가 변하는 시점 즉, jerk가 무한대가 되는 지점에서 큰 진동이 발생하게 된다. 따라서, 고속 정밀 제어를 요구하는 PMLSM의 운전성능 향상을 위해서는 디텐트력 영향을 최소화하는 설계와 함께 가·감속 운전 시 진동저감을 위한 유한한 jerk 값을 갖는 최적의 이송 속도선도를 도출하여야 한다.

본 논문에서는 PMLSM의 속도선도에 의해 발생하는 진동을 최소화시키기 위하여 가속도의 미분치인 Jerk가 무한대가 되지 않고 유한값을 갖는 속도선도를 제안하며, 유전 알고리즘을 적용하여 이러한 속도선도를 형성하는 S-curve를 선정한다.

\* 발표자, 창원대학교 기계설계공학과 (yhchoi@changwon.ac.kr)

주소: 경남 창원시 사림동 창원대학교

+ 창원대학교 기계설계공학과 대학원

++ 창원대학교 전기공학과

## 2. 양측식 PMLSM

Fig. 1은 실제 제작된 양측식 PMLSM이고, Table. 1은 본 연구에서 적용한 PMLSM의 기본 설계 치수와 전기적 사양 및 설계 파라미터를 나타낸 것이다.

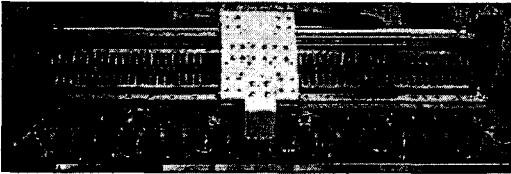


Fig. 1. Double Sided PMLSM

Table 1. Specification of PMLSM

항목	값 [단위]	항목	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]

### 2.1 디텐트력 (Detent force) 안정화

Fig. 2는 부하각 90도에서의 정상상태 운전특성을 비교한 그림이다. 초기모델의 리플율은 2.135 [%]로써 정상상태 운전 시에도 추력리플이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면, 영구자석을 1/4슬롯피치 만큼 스쿠를 시행한 모델의 리플율은 0.72 [%]로 리플이 없는 일정한 정추력이 발생하고 있다. 따라서, 스쿠를 시행함으로써 디텐트력이 제거되어 정속 운전 시에는 추력리플이 발생하지 않는 양호한 특성을 얻을 수 있었다.

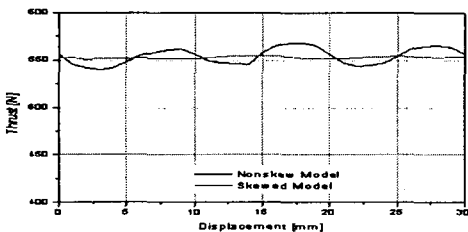


Fig. 2. Thrust in steady state operation

## 3. 이송계의 진동해석

### 3.1 수학적 모델링

Fig 3 은 PMLSM 으로 구동되는 이송 시스템이다.

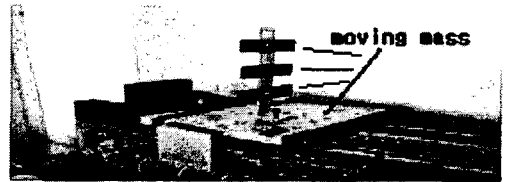


Fig 3. PMLSM feed driven system.

Fig. 4 는 이송계의 진동해석을 위해 리니어 모터에 의해 이송되는 이송계를 4자유도의 운동계로 모델링하였다.

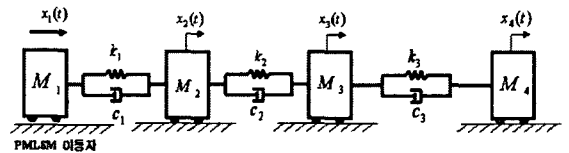


Fig 4. Mathematical modeling of 4-d.o.f PMLSM feed driven system.

이송계의 수학적 모델링을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- (가) 이송운동은 평면 내에서 일어난다.
- (나) 리니어 모션 블록은 선형 스프링이다.
- (다) 가이드 레일과 리니어 모션 블록 사이의 마찰은 무시할 수 있다.
- (라) 실제로는 이송계가 이송되지만 수학적 모델에서는 가이드 레일이 이송계의 이송 방향과 반대방향으로 이송 된다고 가정하고, 대신 이송 감가속도에 따른 관성력이 이송계에 증가의 외력으로 작용하는 것으로 간주한다.
- (마) 가이드 레일은 굴곡이 없다.

### 2.2 운동방정식

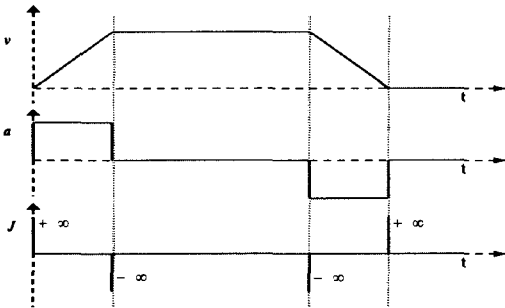
PMLSM 이송계의 진동해석을 위하여 Fig. 4와같이 4자유도계로 모델링하였고, 뉴턴의 운동법칙에 의한 모델링의 운

동방정식은 아래와 같다.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (1)$$

여기서  $M, C, K$ 는 각각 시스템의 질량관성, 감쇠, 강성 계수행량이다. 그리고,  $\{x\} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$ 는 운동자유도 벡터이고, 가진력  $\{F\} = [f_1 \ f_2 \ f_3]$ 이다.

가·감속 운전시의 진동 특성을 해석하기 위하여, 이동자가 그림5와 같은 사다리꼴 형태의 속도선도로 운전하는 경우를 해석하였다. 이 속도선도를 미분하면, 가속도 및 Jerk 선도를 얻을 수 있다.



· Fig. 5 Typical feed velocity and associated acceleration & jerk curve

그림 5의 가속도 선도에서 알 수 있듯이 가속도 선도는 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.

#### 4. 유전 알고리즘을 이용한 속도 최적화

일반적인 속도 패턴에서의 진동의 주요 발생지점인 가속도의 불연속점에서 진동이 크게 발생한다. 따라서 이러한 불연속점을 없애기 위하여 본 논문에서는 불연속 구간들을 연속이며 미분 가능한 구간으로 변화시키기 위해 Fig. 6과 같은 유한의 Jerk 선도를 인가함으로써 관성 충격에 의한 진동 현상을 최소화하고자 유전 알고리즘을 적용하였다.

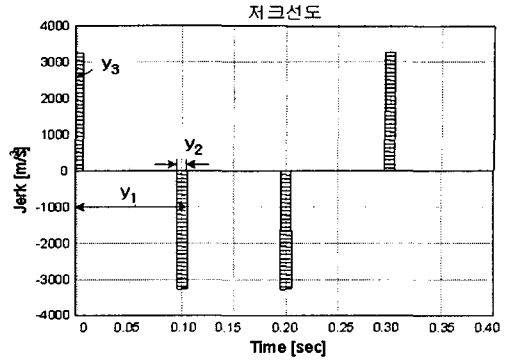


Fig. 6 Finite jerk curve

#### 4.1 최적화 문제 정의

유한의 Jerk 선도를 만들기 위해 적용한 유전 알고리즘에서 설계 변수와 목적함수는 아래와 같다.

$$\text{설계변수} : \mathbf{y} = \{y_1 \ y_2 \ y_3\}$$

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

여기서,  $f_1(\mathbf{y})$ 는 최대 진동값,  $f_2(\mathbf{y})$ 는 진동 최대값들의 RMS치,  $f_3(\mathbf{y})$ 는 가동자의 이송거리 오차,  $w_i$ 는 합이 1인 가중치(Weighting factor),  $f_1^*, f_2^*, f_3^*$ 는 스케일링 인자(Scaling factor)이다.

#### 4.2 구속조건

이송계 가속도 최적화 문제를 풀기 위해 적당한 구속조건을 설정하고 이 구속조건을 위배할 경우 벌점을 부여하여 적합도 값을 감소시킴으로써 최적해로 선택될 가능성이 낮아지게 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 구속 조건을 정의한다.

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

$$g_2(\mathbf{y}) : [x_{vib}(\mathbf{y})]_{rms} - [x_{vib}(\mathbf{y})]_a < 0$$

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

여기서,  $[x_{vib}(\mathbf{y})]_a$ 는 이동자의 진동진폭 허용 한계치이다.  $x_{error}$ 는 최적화전·후의 이송거리의 오차로 10 [ $\mu\text{m}$ ]로 설정하였다.

각 구속조건에 대한 적합도 함수와 벌점 함수는 아래와 같다.

$$Fitness = \frac{1}{f(\mathbf{y}) + p(\mathbf{y})} \quad (3)$$

$$p(\mathbf{y}) = \epsilon \cdot \left[ c_1 \times \sum_{i=1}^c \left( \frac{g_i(\mathbf{y})}{g_i^*} \right)^2 + c_2 \times \delta \sum_{i=1}^c \frac{\Phi_i(\mathbf{y})}{\Phi_i^*} \right] \quad (4)$$

여기서,  $g_i(\mathbf{x})$ ,  $\Phi_i(\mathbf{x})$ 는  $i$ 번째 구속조건 of 벌점level과 벌점양이고,  $c_1$ ,  $c_2$ 는 가중치,  $g^*$ ,  $\Phi^*$ 는 스케일 인자들,  $\delta$ 는 벌점상수, 그리고  $\epsilon$ 는 최소화 of 경우 -1, 최대화 of 경우 +1 이다.

#### 4.1 최적설계 프로그램

유전자 알고리즘을 이용하여 작성한 최적화 프로그램의 흐름도를 Fig. 7에 나타내었다.

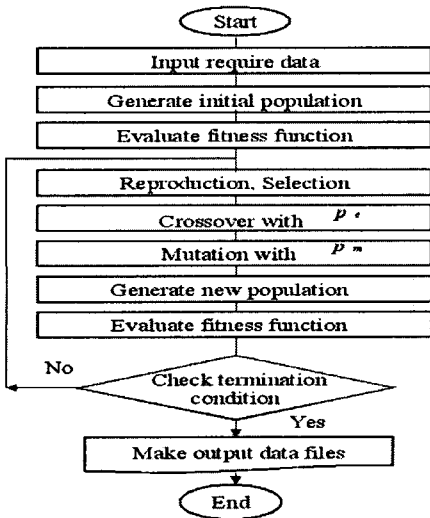


Fig. 7 Flowchart of the optimization program using a genetic algorithm

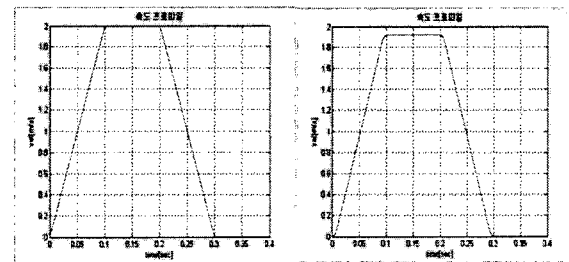
유전 알고리즘에 사용된 유전 연산자는 룰렛 휠 방법과 엘리트전략을 함께 사용하였으며, 단순교배와 단순돌연변이를 사용하였다. 유전 알고리즘에 이용한 입력 조건을 Table. 2에 정리 하였다.

Table. 2 Input parameters of genetic algorithm

Parameters		Value
Maximum generation		150
Population size		60
Number of variable		3
Probability of Crossover, $p_c$		0.8
Probability of mutation, $p_m$		0.01
Length of binary string [bit]	$y_1$	9
	$y_2$	9
	$y_3$	12
	$\sum_{i=1}^3 y_i$	30

#### 4.1 최적화 결과

Fig.8은 최적화 전·후의 속도선도를 나타낸 것이다.



Before optimization

After optimization

Fig. 8 Feed rate profile

최적화 결과 가속도 값은 21.2603 [ $\text{m/s}^2$ ], S-Curve time은 5.6 [ms], Jerk 값은 3270.81 [ $\text{m/s}^3$ ]이었다.

진동최소화를 위한 최적 Jerk 곡선을 적용하여 PMLSM의 가·감속시의 진동 특성을 해석한 결과를 최적화 전과 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 무한대의 Jerk 값에 의해 발생하는 관성 충격에 의해 진동은 크게 감소함을 알 수 있다.

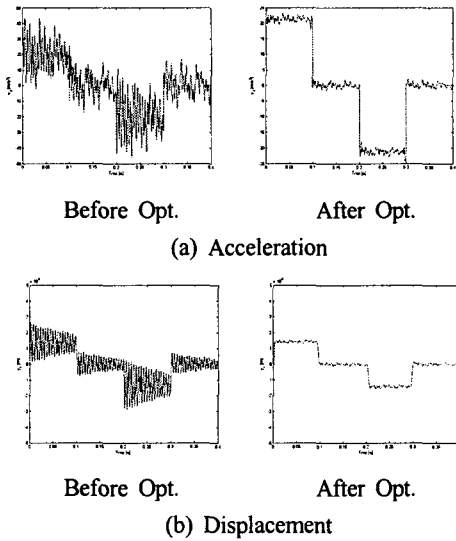


Fig. 9 Comparison of computed moving mass vibrations.

## 1.2 최적설계 결과 검증

Fig. 10은 PMLSM 이송계의 가감속 이송중의 진동을 측하기 위한 장치도이다.

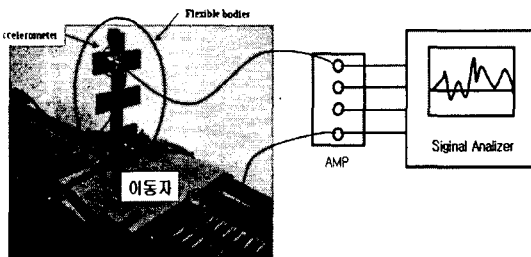


Fig. 10 Experimental setup of vibration

Fig. 11은 PMLSM이 최적화 이전의 속도선도에 의해 운리는 경우와 최적화 후의 속도 선도에 의해 운전되는 경계 대한 이동자(M<sub>1</sub>)의 진동측정 결과이다.

최적화 결과에 따라 가·감속 시간은 99.4 ms, S-Curve time은 6 ms로 적용하였다. 그 결과 전체 구간에서 가속도가 48 [m/s<sup>2</sup>]에서 23.3 [m/s<sup>2</sup>]으로 감소하였다. 이론치와 범치의 값을 비교해 보면 오차가 발생하는 이유는 Fig. 11에서와 같이 PMLSM의 제어기의 오차와 잔존하는 디텐션에 기인된 것으로 짐작된다.

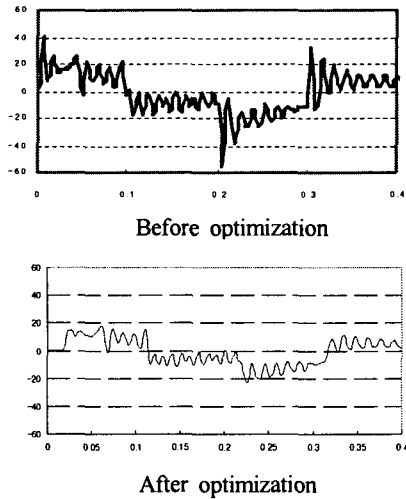


Fig. 11 measured acceleration of moving mass

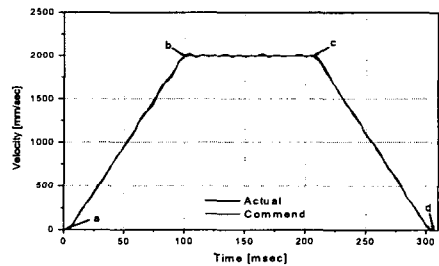


Fig. 12 Actual and commanded velocity profile

## 5. 결론

본 논문은 사각과 형태의 가속도 선도 입력에 의해 발생되는 리니어 모터 이송계의 진동을 줄이기 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 Jerk 값이 유한하게 되고 가속도 선도가 전 구간에서 미분 가능한 4자유도 이송계의 최적 속도선도를 위한 파라미터들을 얻었다. 그리고 이러한 최적 속도선도를 4자유도 이송계에 적용함으로써 이송계의 이동자의 진동을 측정된 결과 가속도 불연속점에서 발생하는 가속도의 피크 값이 48 [m/s<sup>2</sup>]에서 23.3 [m/s<sup>2</sup>]으로 감소함을 확인하였다. 따라서 기계적인 이송충격에 의한 진동은 이송속도 최적제어를 하면 거의 제거된다. 그러므로 본 연구의 이송속도 최적화 방법은 Linear Motor 이송계의 진동을 최소화하기 위한 최적 입력속도 설계에 효과적으로 적용될 수 있다.

참고로 본 논문에서는 철심형 PMLSM의 운전 중 디텐트력에 의한 진동성분을 감소시키기 위해 영구자석을 1/4슬롯 피치 만큼 스큐를 시행하였다. 그 결과 디텐트력은 피크 값이 12.21 [N]에서 2.04 [N]으로 감소하였다.

## 후 기

본 연구는 교육인적자원부 지방대학혁신역량강화사업(NURI) 지원으로 수행되었습니다.

## 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), No. B-083.
- (2) J. H. Choi, 2004, "A Study on the Vibration Analysis and Dynamic Design Optimization of a Ball Screw Feed Drive System," Ph. D dissertation, Changwon National Univ.
- (3) W. J. Chung, C. K. Park, D. S. Hong, et al., 2003, "A New Optimization Technique for Wafer-Transfer-Crane Dynamic Control Using a Genetic Algorithm," Proceeding of Int. Conference on Computer, Communication and Control Technologies.
- (4) Y. S. Trang, 1995, "An Investigation of Stick-Slip Friction On the Contouring Accuracy of CNC Machine Tools," Int. J. Mach. Tools Manufacturing, Vol.35, No.4, pp.565-576.
- (5) W. W. Nam, 2000, "A Study on the Design and Control of High Speed and Precision Feed Drive System," Ph. D Thesis, Graduate school of Yonsei Univ.
- (6) Proceedings of JSPE Autumn Conference, 1989, pp. 81-82, & pp.477-488.
- (7) C. H. Park, and H. S. Lee, 2000, "Precision Positioning Technologies with Ball-screw," Journal of KSPE, Vol.17, No.12, pp.26-33.
- (8) Z. Michalewicz, 1996, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs," Springer-Verlag.
- (9) I. Boldea, and S. A. Nasar, 1985, "Linear Motion Electromagnetic Systems," John Wiley and Sons.
- (10) I. Chae Lim, Joon-keun Woo, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, and Gyu-Tak Kim, 2002, "Detent Force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.38, No.2, pp.157-160.
- (11) Mitsuo Gen, and R. Cheng, 1997, "Genetic Algorithms and Engineering Design," John Wiley & Sons, Inc.
- (12) Mitsuo Gen, and R. Cheng, 1997, "Genetic Algorithms and Engineering Design," John Wiley & Sons, Inc.
- (13) H. S. Byun,, 1999, "Dynamic Design Optimization of a Pneumatic Suspension Seat Using Genetic Algorithm," Master's Thesis, Changwon National University.