

주거 환경 적용을 위한 Slotless 선형 동기전동기의 위치 피드백 제어에 따른 구동 특성 개선

조경필* · 김용재**

Driving Characteristics Improvement according to the Position Feedback Control of Slotless Linear Synchronous Motor for Living Application

Kyoung-Pil Cho* · Yong-Jae Kim**

요약

Slotless 선형 동기 전동기(Linear Synchronous Motor)는 가동자의 구조가 간단하고 1차측 철심의 슬롯을 제거하여 갭 중의 자기에너지를 균일화해 추력 변동을 억제할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 고효율로 구동이 가능하고 제어성이 타 선형 전동기에 비해 뛰어나 반송장치의 적용이 확대 되고 있는 실정이다. 하지만 주거 환경 분야의 적용은 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 Slotless 선형 동기 전동기의 주거 환경 분야 적용을 위해 위치 피드백 제어에 따른 구동 특성을 고찰하고 속도 진동의 최소화와 안정된 응답 특성을 얻기 위해 부하 탑재와 가속도를 변화시켜 위치 피드백 제어를 비교함으로써 제어기의 유용함을 입증한다.

ABSTRACT

The slotless linear synchronous motor(LSM) has the advantages that the structure of the mover is simple and it can control the trust force ripple by make the magnetic energy in a gap uniform by removing a slot of the primary iron core. Also, the application of the transportation system is becoming expansion because it high efficiency drive is possible and compares with the other LSM as control is more excellent. However, the application of the living field was unsatisfactory. Therefore, in this study, we examined the drive characteristics by the position feedback control for the living field application of the slotless LSM and we prove useful of the controller through load loading and the acceleration changing to get minimization of the speed vibration and stable answer characteristics.

키워드

Slotless Linear Synchronous Motor, P Control, PD Control, Position Feedback
Slotless 선형 동기 전동기, P제어, PD제어, 위치피드백

1. 서론

최근 여러 산업 분야에서 전기기기를 이용한 직선 운동 구동 시스템의 필요성이 증가되고 있다. 과거에는 회전기와 직선운동으로 변환하는 기계장치를 결합

하여 직선 운동을 구현해 왔으나, 점차적으로 기계적 변환 장치 없이 선형 전동기로 직접 구동하는 방식이 증가되고 있다[1]. 현재 선형 전동기는 많은 연구가 진행되어 그 응용분야가 산업전반에 확대되고 있지만 주거환경 분야의 적용은 아직 미흡하다. 주거환경 분

* 조선대학교 전기공학과(kissme2454@naver.com)

** 교신저자 : 조선대학교 전기공학과(kimyj21@chosun.ac.kr)

접수일자 : 2012. 12. 20

심사(수정)일자 : 2013. 01. 20

게재확정일자 : 2013. 02. 20

야에서 요구되는 선형 전동기의 성능은 설치 코스트가 적고, 저속 구동이며, 지령속도에 대한 실속도의 진동이 적어야 한다. 또한 위치 결정 정도는 mm 단위로 가능하여야 한다. 따라서 이를 만족시키기 위해 본 논문에서는 Slotless 선형 동기전동기를 적용하였다. Slotless 선형 동기전동기는 상대적으로 큰 자기적 공극으로 인해 Slot형 선형 동기전동기에 비해 추력 밀도가 떨어지는 단점을 가지지만, 1차측 철심의 치슬롯 구조가 없어 코깅력이 근본적으로 제거되어 추력 리플이 거의 발생하지 않는다. 또한 수직력이 작기 때문에 더욱 뛰어난 제어성능을 가진다[2-3]. 주거 환경 분야에 요구되는 리니어 모터의 성능으로 가장 중요한 사항은 지령속도에 대한 실속도의 진동이 적어야 한다는 것이다. 이러한 진동은 위치 제어에 있어서 정밀도 및 안정도에 큰 영향을 미친다[2]. 이에 선형 기기 뿐만 아니라 회전기기에서도 범용성을 기대할 수 있는 동력학적 방식에 근거한 제어 알고리즘이 필요하며, 이러한 제어 알고리즘은 적용이 쉬우며 간단하여야 한다[4-8]. 따라서 본 논문에서는 Slotless 선형 동기 전동기의 위치 추종의 정밀성, 지령 속도에 대한 실속도의 진동억제를 위한 위치 피드백 제어를 고찰하고, 실험기를 통해 구동 특성을 고찰하였다. 또한 부하탐재, 가속도 변화 시 위치 피드백 제어의 유용성에 대해 검토하였다.

나타내었다. 1차측은 주행로 전체 길이 480[mm]에 걸쳐서 12개의 코일을 집중권으로 구성하여 연속 배치하였다. 2차측은 Nd-Fe-B 타입 영구자석을 사용하였다.

표 1. 실험기의 사양
Table 1. The specifications of experimental device

Item	Value	
Full-Stroke	480[mm]	
Stator	Total number	12
	Pole pitch	53.3[mm]
	Winding turn	280[turn]
	Winding resistance	3.0[Ω]
Mover	Total number	4
	Pole pitch	40[mm]
	Air gap	7.0[mm]

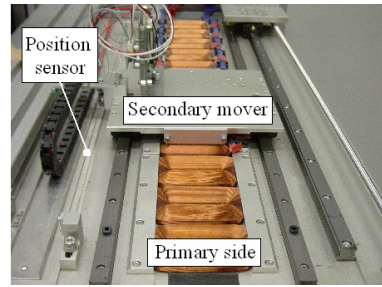


그림 1. 실험장치
Fig. 1 The experimental device

II. Slotless 리니어 동기 전동기의 구조 및 사양

III. Slotless 리니어 동기 전동기의 구동 특성

표 1에 실험기의 사양을, 그림 1에 실험기의 외관을

3.1. 위치 피드백에 의한 P제어

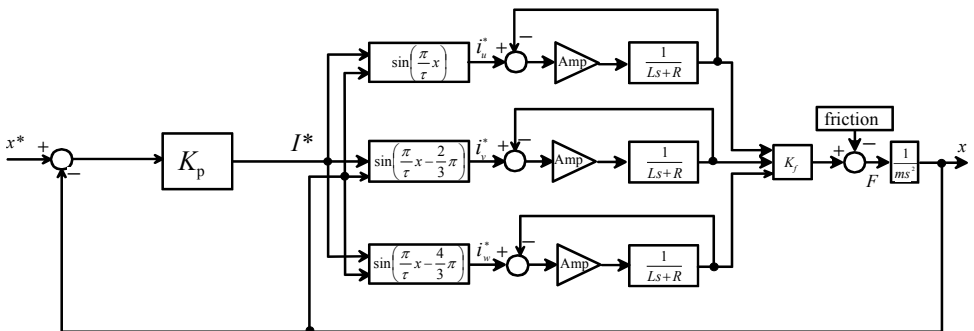


그림 2. 위치 피드백에 의한 P제어 블럭도
Fig. 2 The block diagram of the P control by the position feedback

먼저, 비례보상인 P제어만으로 서보구동을 실시하였다. 그림 2에 위치 피드백에 의한 P제어 블럭도를 나타내었다. 지령위치 패턴은 가속도 $a=0.5[m/s^2]$, 최고속도 $V_{max}=0.1[m/s]$ 의 사다리꼴 패턴이 되도록 하였다. 여기서, P Gain의 값은 2차측 가동자가 속도변동을 발생시키지 않는 조건하에서 추종할 수 있는 최대치로 결정한다. 또한, 2차측 가동자는 무부하 상태로 구동 실험을 실시하였다. 그림 3에 P제어시의 구동특성을 나타내었다. 그림 3(a)에 시간에 따른 위치 특성을, 그림 3(b)에 속도 특성을 나타내었다. 실험을 반복한 결과, 2차측 가동자가 추종 가능한 범위의 P Gain 최대치는 $K_p=3500[A/m]$ 로 결정되었다. 그림 3(a)에서 알 수 있듯이 시간에 대한 위치 추종성은 양호함이 확인되었다. 하지만, 속도 특성은 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 2차측 가동자가 격렬하게 속도 진동을 일으키면서 구동하고 있어 주거환경 분야의 적용은 부적절하다. 이에 속도변동을 억제할 필요가 있다.

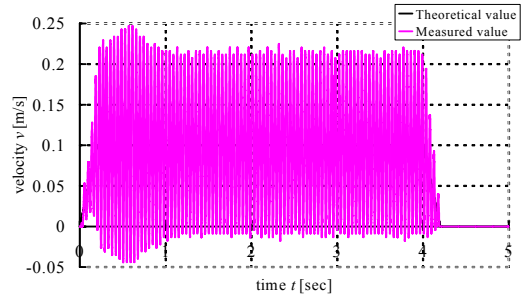


그림 3. P제어 구동 특성 : (a) 위치 특성 (b) 속도 특성

Fig. 3 The driving characteristics of the P control : (a) Position characteristics (b) velocity characteristics

3.2. 위치 피드백에 의한 PD제어

비례 보상인 P제어만으로 구동 특성을 고찰한 결과, 위치특성의 추종성에는 문제가 없었지만 속도 특성에서 격렬하게 속도 진동을 하는 것을 알 수 있었다. 따라서 이러한 속도 진동을 억제하기 위해 미분보상인 D제어를 추가하여 PD제어를 수행하였다.

그림 4에 위치 피드백에 의한 PD제어 블럭도를 나타내었다. 실험 조건은 P제어 특성과 비교하기 위해 동일하게 하였다. 지령 위치 패턴으로서 가속도 $a=0.5[m/s^2]$, 최고속도 $V_{max}=0.1[m/s]$ 가 되도록 하였다. 이때, P Gain 값은 2차측이 속도 변동을 발생시키지 않는 조건하에서 추종할 수 있는 최대치로 결정하였다. 제어주기 $T=1.0[msec]$ 로 하고, 2차측은 무부하 상태로 실시하였다. 그림 5에 PD제어 구동 특성을 나타내었다. 그림 5(a)에 시간에 따른 위치 특성을,

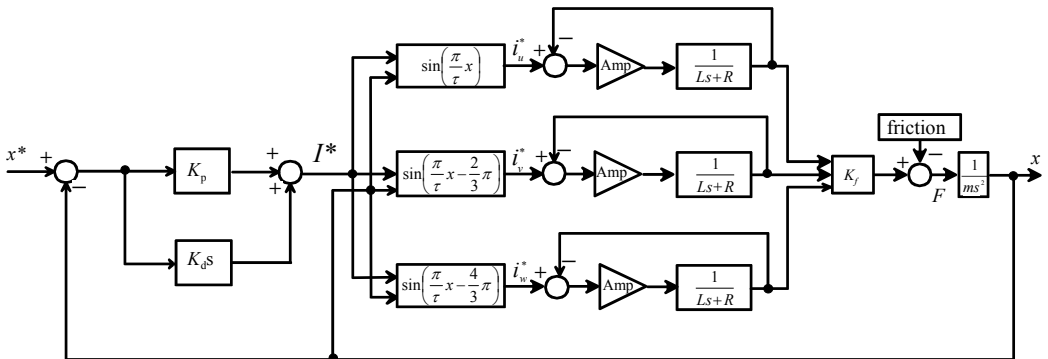
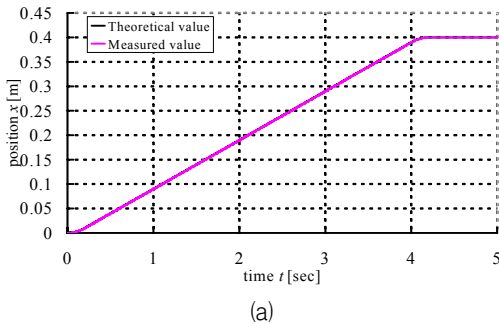
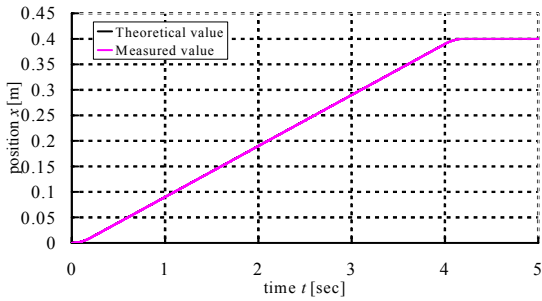
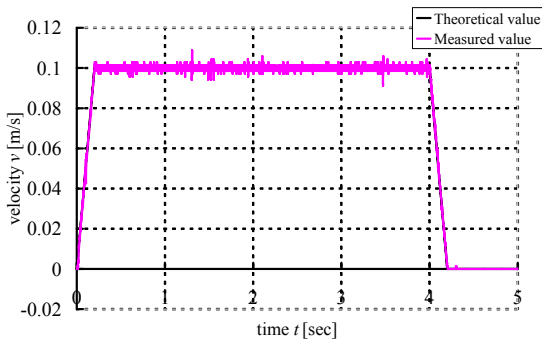


그림 4. 위치 피드백에 의한 PD제어 블럭도
Fig. 4 The block diagram of the PD control by the position feedback

그림 5(b)에 속도 특성을 나타내었다. 그림 5의 (b)에서 확인할 수 있듯이 속도 진동을 일으키지 않고 2차측 실속도는 지령치의 $\pm 5.0\%$ 이내에 나타나고 있어 P제어 보다 개선됨을 확인하였다.



(a)



(b)

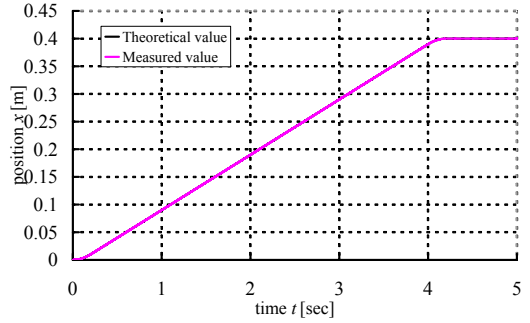
그림 5. PD제어 구동 특성 : (a) 위치 특성 (b) 속도 특성

Fig. 5 The driving characteristics of the PD control : (a) position characteristics (b) velocity characteristics

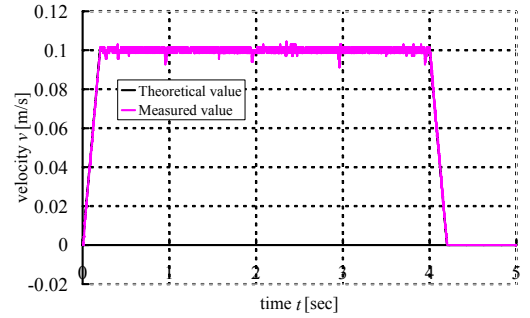
3.3. 부하를 탑재할 경우의 구동 특성

그림 4의 PD제어를 적용하여 2차측에 부하를 탑재한 경우의 구동 특성을 고찰하였다. 부하의 질량은 $m=10.12[\text{kg}]$, $21.32[\text{kg}]$ 으로 실험하였다. 실험 조건은 부하를 탑재하지 않고 실험한 PD제어와 동일하게 하였다. 그림 6에 $m=10.12[\text{kg}]$ 일 때의 구동 특성을, 그림 7에 $m=21.32[\text{kg}]$ 일 때의 구동 특성을 나타내었다. 그림 6, 7(a)에 시간에 따른 위치 특성을, 그림 6, 7(b)에 속도 특성을 나타내었다. 실험을 반복한 결과 Gain의 값은 양쪽 모두의 경우 모두 $K_p=30000[\text{A/m}]$, $K_d=300[\text{A/m/s}]$ 로 결정되었다. 부하 탑재 시에는 그림 6과 7에서 확인할 수 있듯이 위치 특성의 추종성에

문제가 없고, 속도 특성에 대해서도 V_{max} 구동 시 속도 진동은 확인되지 않았다.



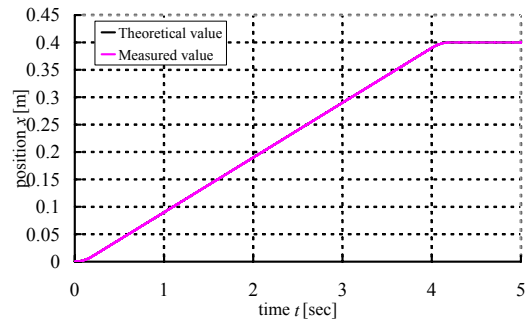
(a)



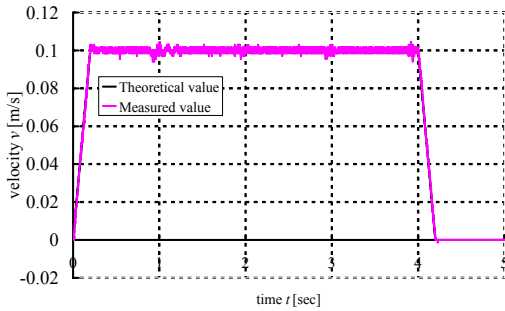
(b)

그림 6. $m=10.12[\text{kg}]$ 구동 특성 : (a) 위치 특성 (b) 속도 특성

Fig. 6 $m=10.12[\text{kg}]$ driving characteristics : (a) position characteristics (b) velocity characteristics



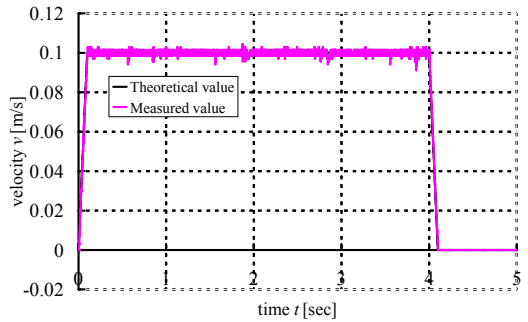
(a)



(b)

그림 7. $m=21.32[\text{kg}]$ 구동 특성 : (a) 위치 특성 (b) 속도 특성

Fig. 7 $m=21.32[\text{kg}]$ driving characteristics : (a) position characteristics (b) velocity characteristics



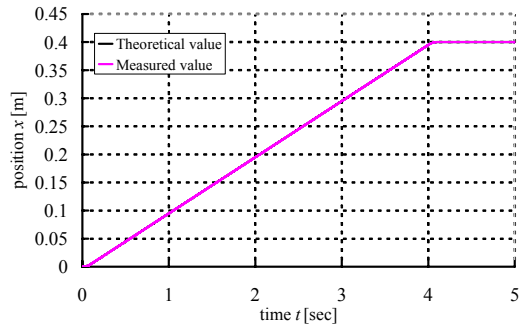
(b)

그림 8. $a=1.0[\text{m/s}^2]$, $m=10.12[\text{kg}]$ 구동 특성 : (a) 위치 특성 (b) 속도 특성

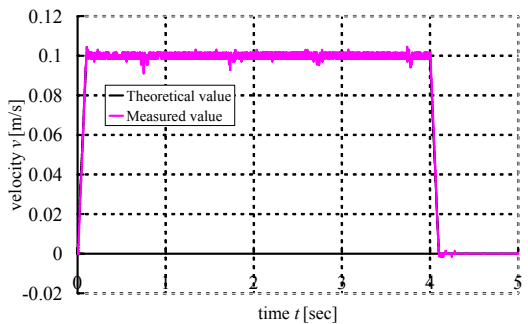
Fig. 8 $a=1.0[\text{m/s}^2]$, $m=10.2[\text{kg}]$ driving characteristics : (a) position characteristics (b) velocity characteristics

3.4. 가속도를 변화시킬 경우의 구동 특성

다음은 PD제어기를 이용하여 가속도 a 를 변화시켜 구동 특성을 고찰하였다. 부하를 탑재하지 않고 가동자만 구동 할 때 가속도의 2배인 $a=1.0[\text{m/s}^2]$ 로 구동을 실시하였다. 그 외의 실험 조건은 가속도 $a=0.5[\text{m/s}^2]$ 일 때와 동일하게 한다. 그림 8에 $a=1.0[\text{m/s}^2]$, $m=10.12[\text{kg}]$ 일 때의 구동 특성을, 그림 9에 $a=1.0[\text{m/s}^2]$, $m=21.32[\text{kg}]$ 일 때의 구동 특성을 나타내었다. 그림 8, 9의 (a)에 시간에 따른 위치 특성을, 그림 8, 9(b)에 속도 특성을 나타내었다. Gain의 값은 양쪽 모두 $K_p=30000[\text{A/m}]$, $K_d=300[\text{A/m/s}]$ 로 결정되었다. 가속도를 변화시킬 경우의 구동 특성 역시 그림 8과 9에서 확인할 수 있듯이 위치 특성의 추종성에는 문제가 없고 속도 특성에 대해서도 2차측의 속도 진동이 발생하고 있지 않는 것을 알 수 있었다.



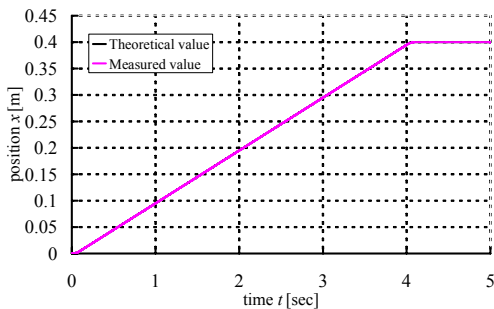
(a)



(b)

그림 9. $a=1.0[\text{m/s}^2]$, $m=21.32[\text{kg}]$ 구동 특성 : (a) 위치 특성 (b) 속도 특성

Fig. 9 $a=1.0[\text{m/s}^2]$, $m=21.32[\text{kg}]$ driving characteristics : (a) position characteristics (b) velocity characteristics



(a)

IV. 결론

본 논문은 Slotless 리니어 동기 모터의 위치 피드백에 의한 P제어와 PD제어의 구동 특성을 취득하였다. P제어의 특성은 2차측의 격렬한 속도 진동으로 인해 주거 환경 분야의 적용은 부적절한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 주거 환경 분야에서 요구하는 속도 변동률인 $\pm 10\%$ 이내로 하기 위해 새롭게 미분 보상인 D제어를 추가하여 2차측의 부하를 탑재할 경우와 가속도를 변화시켜 구동특성을 비교해 본 결과 속도 진동을 일으키지 않고 2차측 실속도는 지령치의 $\pm 5.0\%$ 이내로 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 Slotless 리니어 동기 모터의 위치 피드백에 의한 PD 제어의 타당성을 입증할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 조선대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행된 것임.

참고 문헌

- [1] 전용호, 조황, "IPMSM 전동기의 비선형 적응 백스텝핑 속도 제어", 한국전자통신학회논문지, 6권, 6호, pp. 855-864, 2011.
- [2] 리ニア드라이브技術委員會, "汎用化が進むリニア드라이ブの現状", 電気學會技術報告, 第953号, pp. 7-34, 2004.
- [3] 海老原, "最近のFA機器における高精度位置決め用モータの選定", 機械設計, 第45卷, 14号, pp. 12-14, 2001.
- [4] 이원부, 박수홍, "Gyro Sensor 제어용 Servo Motion 제어기 개발", 한국전자통신학회논문지, 5권, 5호, pp. 493-497, 2010.
- [5] 김중선, "센서리스 BLDC 전동기의 강인한 속도 제어", 한국전자통신학회논문지, 3권, 4호, pp. 266-275, 2008.
- [6] 한종길, 손영수, "2관절 유연한 로봇 팔에 대한 비선형 제어", 한국전자통신학회논문지, 4권, 3호, pp. 236-242, 2009.
- [7] 정양권, 엄태현, 김기훈, 최형주, "SMPS 기반 발전기 제어 시스템에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 7권, 1호, pp. 107-115, 2012.
- [8] 고덕영, 정동규, "차량 핸들 제어용 모터 구동장치 개발", 한국정보기술학회논문지, 4권, 4호, pp. 77-81, 2006.

치 개발", 한국정보기술학회논문지, 4권, 4호, pp. 77-81, 2006.

저자 소개



조경필(Kyoung-Pil Cho)

2009년 조선대학교 전기공학과 졸업(공학사)
2011년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
2011년~현재 조선대학교 대학원 전기공학과 재학(박사과정)
※ 관심분야 : 전기기기 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 대학원공학연구과 전기공학 졸업(공학박사)
2007년~현재 조선대학교 전기공학과 조교수
※ 관심분야 : 전기기기 설계 및 해석