

곡선 구간에 운행 가능한 선형 전동기 제어에 관한 연구

김원곤*, 김형균*, 윤영민*, 박건우*, 문인호*, 조상준*, 김장목**
 (주)신성이엔지 기술연구소*, 부산대학교 전기공학과**

A study of Linear Motor Control applied Curve Section

Won-Gon Kim*, Hyeung-Gyun Kim*, Yung-Min Yoon*, Gun-Woo Park*, In-Ho Moon*, Sang-Joon Cho*, Jang-Mok Kim**
 Shinsung ENG Co. Ltd, Institute of Technology*, Busan National University**

Abstract - 본 논문에서는 곡선구간에서도 구동이 가능한 선형 전동기 제어방법을 제안하였다. 곡선구간에 선형 전동기를 적용할 때 전동기의 고정자와 이동자의 기구적인 위치 상호관계에 의해 각 상의 위상관계는 직선구간과 다르게 나타나게 된다. 따라서 직선구간의 제어방법은 그대로 곡선구간에 적용 시 제어성능이 저하되어 전동기의 발생추력은 감소하게 되고, 최악의 경우 곡선구간에서 구동이 불가능한 상태가 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 전동기의 역기전력 정보로부터 위상정보를 추출하여 곡선구간의 구동 제어 알고리즘에 반영하였고, 제어시스템을 구성하여 곡선구간에서 전동기의 구동성능이 개선됨을 보인다.

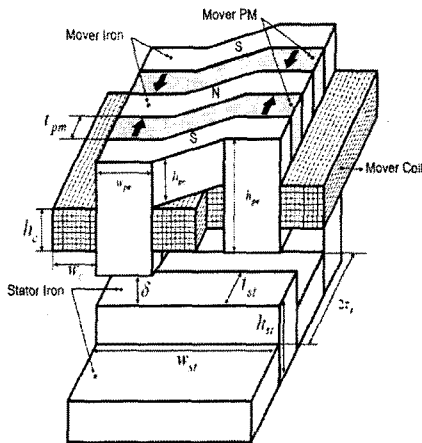
1. 서 론

최근 선형 전동기(Linear Motor, 이하 LM이라 칭함)에 대한 기술이 급성장하고 다양한 응용분야에 적용됨으로써 이에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재는 많은 연구결과를 토대로 수송기관 및 OA, HA, FA 기기 등 각종 자동화 시스템의 핵심 구동장치로 응용개발이 날로 확대되고 있는 추세이다. LM을 시스템에 적용하여 얻을 수 있는 장점으로써는 고정밀성, 고속성, 유지보수의 간편성, 구조의 단순성, 비접촉성, 정속성 등이 있다. LM 제작관련 기술은 추력범위가 작게는 수십에서 크게는 수천 뉴턴(Newton, [N])급까지 현재 생산되고 있으며, 사용자의 요구에 따라 용량은 꾸준히 증가하고 있다. 또한 그동안의 최대 약점으로 부각되던 높은 가격부담도 수요증가에 따른 대량생산과 고부가가치화에 의해 경쟁력을 갖출 수 있게 되었다. 이러한 LM을 적용한 응용시스템을 직선구간뿐만 아니라 곡선구간에서도 사용이 가능한다면 LM의 응용분야는 더욱 확대될 수 있다. 본 논문에서는 직곡선구간 구동용으로 적합한 영구자석여자 횡자속 선형 전동기(Permanent-Magnet Excited Transverse Flux Linear Motor, 이하 TFLM이라 칭함)를 소개하고, 곡선 구간에 TFLM의 제어방법과 구동시스템에 대한 연구를 진행하기로 한다.

2. 제어 시스템

2.1 전동기 설계사양 및 형상

그림 1은 본 연구를 위해 제작된 직곡선 구동용 TFLM 시작품의 형상을 나타내고, 표 1은 세부 설계사양을 나타낸다. 제작된 전동기는 곡선구간에서 고정자와 이동자 사이가 전기적, 기구적으로 완전히 분리됨으로써 곡선구간 구동용으로 적합하다.



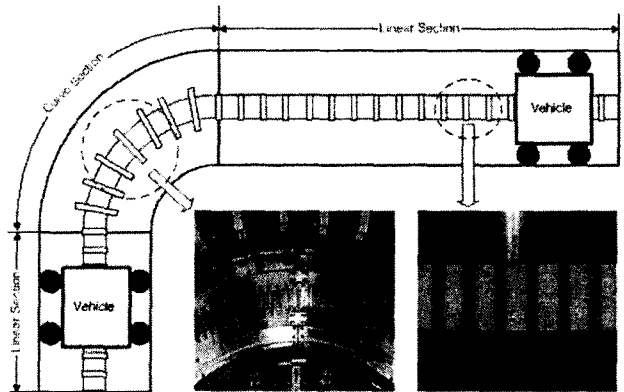
<그림 1> 직곡선 구동용 TFLM 시작품 형상

<표 1> TFLM 시작품 사양

항목	구분/기호	치수/사양
전동기 정격	기자력	3000[AT]
	추력(I_s)	112.1[N] : 직선구간 기준
공극	δ	2[mm]
권선	재질	Copper(1[mm]×3[mm])
	권선 수	42×2 turns
	폭(w_c)	16[mm]
	높이(h_c)	18[mm]
영구 자석	재질	NdFeB($B_r = 1.2[T]$, $\mu_r = 1.05$)
	두께(t_{pm})	10[mm]
고정자	재질	SM-490A
	극간격(τ_p)	20[mm]
	치두께(t_{st})	12[mm]
	폭(w_{st})	직선부: 80[mm], 곡선부: 120[mm]
이동자	높이(h_{st})	11[mm]
	재질	SM-490A
	폭(w_{pe})	40[mm]
	높이(h_{pe})	45[mm]

2.2 제어 알고리즘

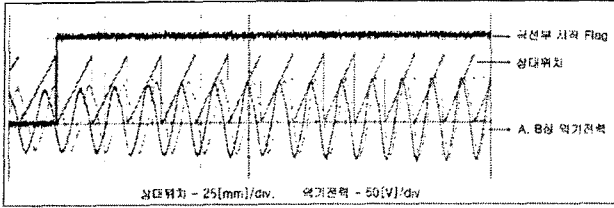
그림 2는 본 연구를 위해 제작 및 설치된 실험장치의 외관을 보여주고 있다. Vehicle은 직선, 곡선, 직선구간 순으로 위치제어를 통해 구동되게 된다. 직선구간에서 전동기 고정자의 극간격은 40[mm]로 일정하고, 곡선구간에서도 회전반경을 고려하여 그림과 같이 등 간격으로 배치하였다. 곡선구간에서 고정자폭은 Vehicle이 곡선구간에 진입 시 이동자가 고정자를 벗어나는 것을 방지하기 위하여 직선구간 보다 길게 선정하여 제작하였다.



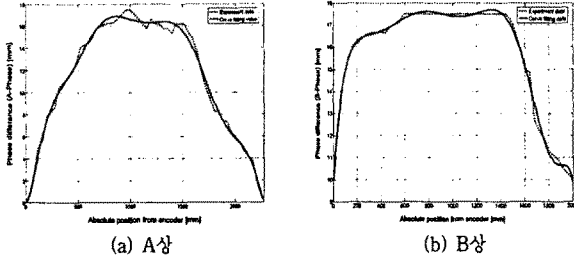
<그림 2> 실험장치 외관

그림 3은 Vehicle이 직선구간에서 곡선구간으로 진입하여 구동될 때 위치검출 센서로부터 계산된 A상의 상대위치와 전동기 각 상의 역기전력에 대한 실험결과를 나타낸다. Vehicle이 곡선구간에 진입하여 진행해 감에 따라서 A상과 B상의 위상차는 점점 줄어들게 됨을 알 수 있고, 곡선구간 가장자리 부근에서는 거의 위상차가 발생하지 않게 됨을 확인하였다. 따라서 곡선구간의 위상정보를 정확히 알아내기 위해서는 위치검출센서로부터 계산된 정보와 실제의 위상정보와의 차이를 검출하여 제어에 반영하여야 한다. 그림 4는 실험 결과로부터 전동기의 곡선구간 제어를 위한 위상차의 정보를 절대

위치 값에 대하여 나타난 결과를 보인다. 곡선구간에 진입 시 절대 위치를 원점(Origin)이라고 했을 때, A상과 B상의 이동자가 곡선구간을 완전히 벗어나는 시점의 위치 정보는 2760[mm] 부근임을 알 수 있다.

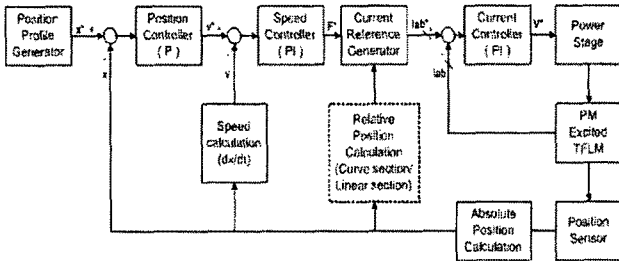


〈그림 3〉 곡선구간 진입 시 각 상의 위상변화 실험결과



〈그림 4〉 절대위치에 대한 각 상의 위상변화

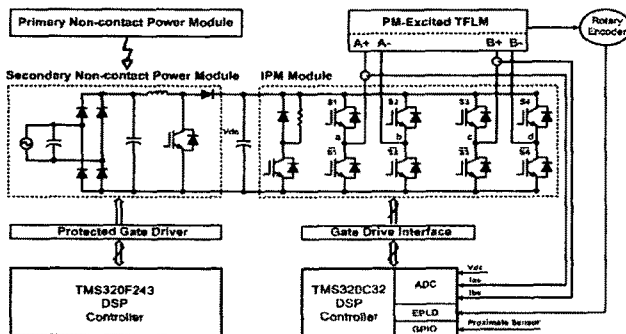
그림 5는 이상의 결과를 바탕으로 제안한 직곡선 구동시스템의 제어 알고리즘을 보인다. Vehicle이 원점을 출발하여 곡선구간에 진입하기 직전의 위치정보는 위치검출센서로부터 미리 획득하였고, 곡선구간에서는 그림 4에서 계산된 위상정보를 이용하여 제어하였다.



〈그림 5〉 제안한 위치 제어시스템의 블록도

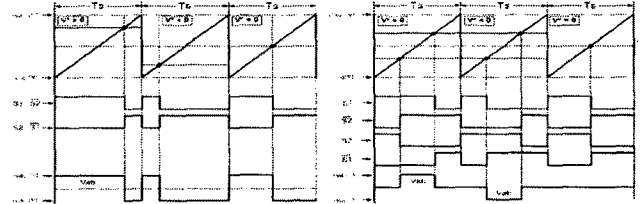
2.3 제어시스템 구성

그림 6은 직곡선 구동용 2상 TFLM 제어시스템의 블록도를 보인다. 제어시스템은 비접촉 직류전원 공급 장치 제어부와 TFLM 제어부분으로 나누어진다. 비접촉 전원장치 제어부분은 독립적으로 구성 및 제어된다. TFLM 제어를 위한 드라이버는 각상 전동기에 대하여 양방향 전류제어가 가능하고 직류 링크 전압 전체 범위를 제어에 이용하기 위한 Full-bridge 인버터와 비상시 시스템 보호를 위한 Dynamic Braker로 구성하였다. 시스템 위치제어를 위한 위치정보는 Vehicle 휠 부위에 설치된 Rotary Encoder와 Encoder의 위치 여러 정보 누적을 방지하기 위한 근접센서를 이용하여 획득하였다. 파워 스위칭 소자는 보호기능이 내장된 IPM(Intelligent Power Module)을 이용하여 구성하였다.

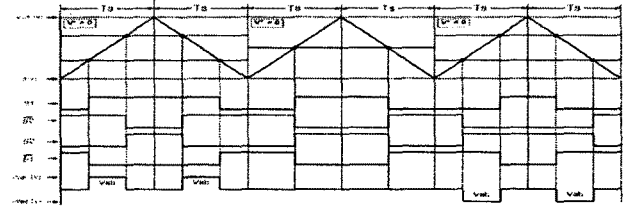


〈그림 6〉 제어시스템의 블록도

그림 7에서 9까지는 그림 6에서 보여주고 있는 Full-bridge 인버터를 구동하기 위한 PWM 스위칭 패턴을 나타낸다. 그림 7의 방식은 2-level 인버터 구동방식으로써 1-Arm의 독립된 PWM 발생기로부터 2-Arm의 파워 스위칭 소자를 구동함으로써 구현이 가장 간단하나 영 전류 등 제어 시 불필요한 스위칭으로 인한 전력 손실이 발생하게 되며, 전류리플이 큰 단점이 있다. 그림 8과 9에 제안한 방식은 3-level 인버터 구동방식으로써 2-Arm의 독립된 PWM 발생기를 이용하여 스위칭 손실을 최소화 할 수 있는 방식이다. 특히 그림 9의 방식은 ON 모드와 OFF 모드를 병행하여 사용함으로 그림 8의 방식에 비해 파워소자의 스위칭 손실을 절반으로 줄일 수 있기 때문에 가장 효율이 좋은 방식이다.



〈그림 7〉 Hard 스위칭 PWM 〈그림 8〉 Soft 스위칭 PWM (OFF)



〈그림 9〉 Soft 스위칭 PWM (ON-OFF)

3. 실험

표 2는 직곡선 구동시스템의 실험결과를 보인다. Vehicle 전체 Weight는 200[Kg]이고, Track에서 곡선구간을 포함하여 8[m]를 선정하여 구간반복 운전조건으로 실험을 수행하였다.

〈표 2〉 직곡선 구동시스템 실험사항

항목	사양
Motor	P.M Excited TFLM
Input Power	300VDC (비접촉 전원 공급장치, 3[KW])
주행 속도	Max. 1.2[m/sec]
정격 추력	200[N]
제어 방식	위치 제어 (위치정밀도 : 0.05[mm])
위치 검출	Rotary Encoder(2500PPR) + 근접센서(4[mm])
주행 거리	직선부:10[m], 곡선부:1.6[m]
Weight	200[Kg]

4. 결 론

본 논문에서는 직선구간에서 여러 가지 이점을 가지는 선형전동기를 곡선구간에서도 사용할 수 있는 제어방법에 대해 연구를 진행하였다. 제안한 방법을 적용할 시 곡선 구간에서 정확한 위상정보를 통한 안정적인 운행이 가능함을 알 수 있었다. 향후 연구는 곡선구간에서 각 상의 위상차를 직선구간에서와 유사하게 최대한 유지시킴으로써 추력 감소를 최소화하기 위한 TFLM 설계 및 제어방법, 제안한 PWM 스위칭 방식을 적용하여 더 안정적인 드라이버 성능확보 등이 필요하다.

〈참고 문헌〉

[1] Do. Hyun. Kang, Herbert Weh, "Design of an Integrated Propulsion, Guidance, and Levitation System by Magnetically Exited Transverse Flux Linear Motor(TFM-LM)", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, no. 3, pp.477-484, 2004.
 [2] J. H. Chang, D. H. Kang, J. Y. Lee, and J. P. Hong, "Development of Transverse Flux Linear Motor With Permanent-Magnet Excitation for Direct Drive Application", IEEE Transactions on Magnetics, pp.1-4, 2005.
 [3] J. W. Kim, 외 2명, "Development and Verification of Dynamic Simulation Model for Transverse Flux Linear Motor Using FEM Analysis Data", Proce.KIEE Conference 2005(B), pp.1135-1137, 2005.