

개선된 속도 프로파일에 의한 선형전동기 소음 특성에 관한 연구

전진용, 오준태, 김규식
서울시립대학교

A Study on the Noise Characteristics of Linear Motor by Improved Velocity Profile

Jin-Yong Jeon, Joon-Tae Oh, Gyu-Sik Kim
Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul.

ABSTRACT

자동반송 장비의 주행축에 적용되는 횡자속 선형전동기는 위치제어를 목적으로 한다. 위치제어는 자동 반송 장비가 최소 구동시간에 최대의 생산을 할 수 있도록 성능이 우수한 구동 프로파일을 사용하게 되는데, 어떤 종류의 구동 프로파일을 적용하느냐에 따라 시스템 전체의 응답 속도는 물론이고 진동과 소음을 최소화하여 전체 시스템의 성능을 좌우하게 된다.

일반적으로 사용되는 사다리꼴 속도 프로파일은 변화가 일정한 가속속 전류를 필요로 하고, 전체 구동시간이 짧아 간단한 시스템에 널리 사용되고 있지만, 가속의 끝점과 감속 구간의 시작점에서 급격한 속도 변화에 따른 저크(Jerk)가 발생하여 기구부에 충격이 가해지며, 이로 인한 진동과 소음을 유발해 순간적으로 큰 동적 에러를 발생시킨다.

따라서, 본 연구에서는 부드러운 속도 프로파일을 가지며 운동의 시작점과 끝점에서 '0'의 가속과 저크를 가지는 고차원의 구동 프로파일을 제시하고 횡자속 선형전동기에 적용하여 소음 특성을 분석하였다.

1. 서론

LCD 제조 공정상에서 원판 글래스(Glass)를 운반하는 자동 반송 장비의 주요 목적은 직선운동에 의하여 재공품(Work in Process)을 원하는 목적지까지 반송하는 것인데, 이 때 사용되는 직선운동의 구동원은 영구자석형 동기전동기와 같은 회전형 모터에 회전운동을 직선 운동으로 변환하는 기계적인 동력변환 장치이다.

랙피니언, 볼스크류, 타이밍 벨트로 대표되는 기계적 동력 변환 장치 중에서 LCD 제조 공정과 같은 대형, 중하중, 장거리 자동 반송 장비용으로는 랙피니언이 주로 사용되지만, 대량 생산을 하는 반송라인에서 연속적인 반복운동을 할 경우, 랙피니언 또한 랙과 피니언에 의한 기계적 마찰로 과량의 분진을 발생시켜 생산 수율을 저하시키고 잦은 유지 보수로 인해 많은 비용을 들이게 되며 장거리 반송용으로 설치 시 직선성을 유지하기 위한 설치상의 어려움도 심각한 실정이다.

이러한 문제점으로 인해 최근엔 분진의 발생을 최소화시키고 대형, 중하중, 장거리 이송에 적합한 횡자속 선형전동기의 연구가 활발히 이루어지고 있고, LCD 자동 반송 장비의 주행축으로 적용하기 위한 검토가 적극적으로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 기존에 사용되어 오던 사다리꼴 속도 프로파

일이 가지고 있는 문제점을 개선한 여러 가지 차수의 고차 구동 프로파일의 속도, 가속도, 저크 특성을 분석하고 선형전동기에 적용하여 소음이 개선됨을 확인하였다.

2. 횡자속 선형전동기

2.1 횡자속 선형전동기 기본 구조

횡자속 선형전동기는 자속의 이동방향이 이동자의 이동 방향에 대해 횡방향이며 전류가 이동자와 같은 방향으로 흐르는 것이 특징이다.^[1-2] 이동자에 설치된 영구자석의 자극을 교대로 배치하여 자속이 일정한 방향으로 발생하도록 하고, 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 권선이 있는 철심은 양측 극면에서 τ_p 만큼 엇갈리게 설계된다. 권선은 설치상의 이점을 고려하여 이동자에 설치할 수도 있다.

2.2 제어 시스템

2상 이상의 이동자가 τ_p /상수 간격으로 일정하게 배치되어야 한 방향으로 연속적인 힘을 발생시킨다.^[3] 따라서 고정자 철심에 가해지는 전류는 $0 \sim \tau_p$ 에서는 (+)전류를, $\tau_p \sim 2\tau_p$ 에서는 (-)전류를 인가해야 한다.

4상의 전동기에 인가되는 최종 전압파형은 위상이 $\tau_p/4$ 만큼 차이를 가지는 Sin파를 펄스폭 변조한 형태가 된다.

그림1은 4상 횡자속 선형전동기의 제어 블록도를 나타낸다.^[4]

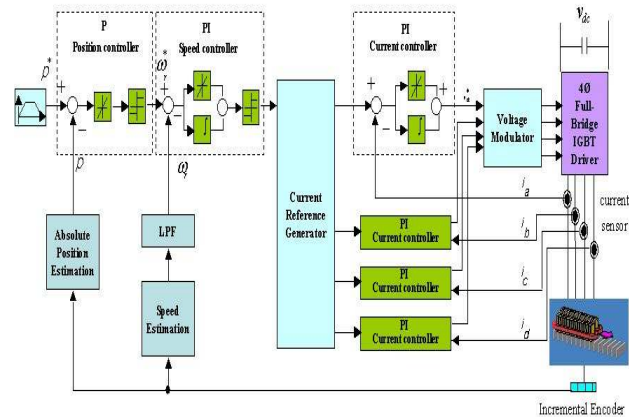


그림 1 횡자속 선형전동기 제어 블록도
Fig. 1 Control block diagram of TFLM

3. 구동 프로파일 설계 및 특성 분석

3.1 구동 프로파일 제한

자동 반송 장비의 주행축 이송에 적용되는 횡자속 선형전동기는 위치제어를 목적으로 한다. 재공품을 이송하는 모든 행위가 정밀한 위치제어에 의해 이루어진다. 이 때, 위치제어기는 자동 반송 장비가 최소 구동시간에 최대의 생산을 할 수 있도록 성능이 우수한 구동 프로파일을 사용하게 되는데, 어떤 종류의 구동 프로파일을 적용하느냐에 따라 시스템 전체의 응답 특성은 물론이고 진동과 소음을 최소화 하여 전체 시스템의 성능을 좌우하게 된다.^[5]

구동 프로파일은 위치 프로파일을 기준으로 했을 때, 위치 프로파일의 도함수가 속도 프로파일이고, 속도 프로파일의 도함수가 가속도 프로파일, 가속도 프로파일의 도함수가 저크(Jerk) 프로파일이다.

사다리꼴 속도 프로파일은 변화가 일정한 가속도 전류를 필요로 하고, 전체 구동시간이 짧아 간단한 시스템에 널리 사용되고 있지만, 가속의 끝점과 감속의 시작점에서 급격한 속도 변화에 따른 저크가 발생하여 기구물에 충격이 가해지며, 이로 인한 진동과 소음을 유발해 순간적으로 큰 동적여력을 발생시킨다.

본 장에서는 사다리꼴 속도 프로파일이 가진 문제점을 개선할 수 있는 다양한 형태의 고차 구동 프로파일을 제시하고 차수별로 위치, 속도, 가속도, 저크 특성을 비교 분석한다.

3.2 다양한 구동 프로파일의 해석

구동 프로파일의 기본인 위치 프로파일을 고차항의 다항식으로 나타내기 위해서 다음 식(1)과 같은 고차 다항식을 기본 형태로 제시한다. 제시된 다항식의 계수를 정하기 위해서 구동 프로파일의 초기 조건을 설정하고, 도함수를 이용해 속도, 가속도, 저크 프로파일을 구한다.

$$y = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + \dots + c_n t^n \quad (1)$$

표 1 차수별 위치 프로파일 다항식
Table 1 Position profile polynomial per order

차 수	위치 프로파일 다항식	초기 조건
3차	$y = 3t^2 - 2t^3$	$y(0)=0, y(1)=1$ $y'(0)=0, y'(1)=0$
4차	$y = 4t^3 - 3t^4$	$y(0)=0, y(1)=1$ $y'(0)=0, y'(1)=0$ $y''(0)=0$
5차	$y = 10t^3 - 15t^4 + 6t^5$	$y(0)=0, y(1)=1$ $y'(0)=0, y'(1)=0$ $y''(0)=0, y''(1)=0$
6차	$y = 15t^4 - 24t^5 + 10t^6$	$y(0)=0, y(1)=1$ $y'(0)=0, y'(1)=0$ $y''(0)=0, y''(1)=0$ $y'''(0)=0$
7차	$y = 35t^4 - 84t^5 + 70t^6 - 20t^7$	$y(0)=0, y(1)=1$ $y'(0)=0, y'(1)=0$ $y''(0)=0, y''(1)=0$ $y'''(0)=0, y'''(1)=0$

표1은 위치 프로파일의 기본 고차 다항식인 식(1)에 대해 임의의 초기 조건을 설정하고 3차, 4차, 5차, 6차, 7차에 대해 차

수별로 위치 프로파일을 구한 식을 나타낸다. 예를 들면, 3차 다항식에서 초기조건은 시간이 '0'이 시점에서 위치와 속도는 '0'이고, 시간이 '1'초인 시점에서 위치는 '1'이고 속도는 '0'이라는 초기 조건을 설정하였다.

그림2는 고차 다항식의 위치 프로파일을 나타낸다. 3차, 4차, 5차, 6차, 7차는 시작점에서 위치가 서서히 증가하고 끝나는 지점에서 서서히 감소하는 부드러운 곡선 모양을 가진다. 이것은 가속 구간에서 일정한 기울기를 가지는 사다리꼴 속도 프로파일을 적분했을 때 나타나는 포물선 형태의 2차 함수와 비교할 때 가속의 끝점에서 상대적으로 훨씬 안정된 부드러운 프로파일을 제공한다.

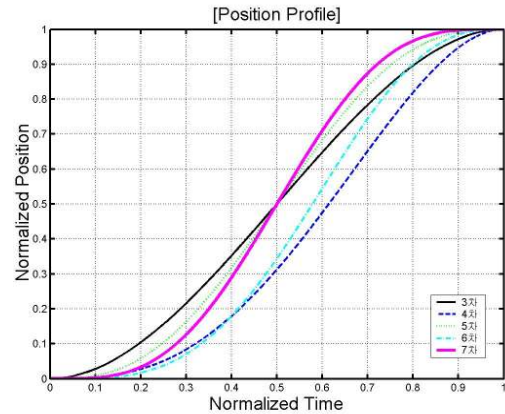


그림 2 고차 다항식의 위치 프로파일
Fig. 2 Position profile of high order polynomial

그림3은 고차 다항식의 위치 프로파일로부터 도함수를 적용하여 유도된 속도 프로파일을 나타낸다. 그림에서 나타나는 고차원의 속도 프로파일에서는 정속 구간이 존재하지 않는다. 하지만, 최대속도 지점을 수식적으로 구할 수 있으므로 최대속도 지점까지 고차원의 속도 프로파일을 사용한 후 정속 운전을 삽입하고 나머지 속도 프로파일을 적용하여 원하는 형태의 속도 프로파일을 수식적으로 유도해 낼 수 있다. 고차원의 속도 프로파일이 전체 구간에서 부드러운 속도 변화를 제공하지만, 전체 움직이는 이동 시간측면에서 보았을 때, 속도 프로파일의 전체 면적이 이동거리이므로 고차원의 속도 프로파일 면적이 사다리꼴 프로파일 면적과 같아지려면 이동 시간이 길어져야 하는 단점이 발생한다.

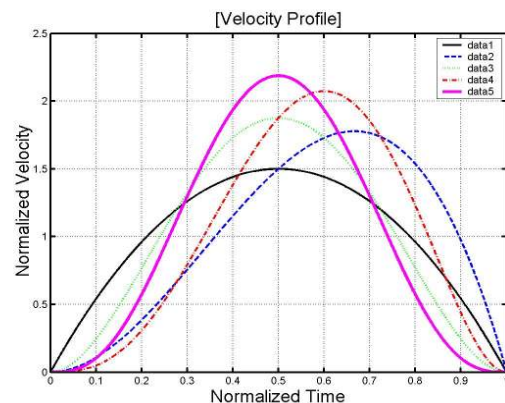


그림 3 고차 다항식의 속도 프로파일
Fig. 3 Velocity profile of high order polynomial

그림4는 고차 다항식의 속도 프로파일로부터 도함수를 적용하여 유도된 가속도 프로파일을 나타낸다.^[6] 3차는 시작점에서 (+)의 가속도를 끝점에서 (-)의 가속도를 발생시키고, 4차는 끝점에서 큰 (-)의 가속을 발생시켜 시스템을 불안정하게 만든다. 5차, 6차, 7차는 시작점과 끝점에서 모두 '0'의 가속도를 가지므로 상대적으로 안정된 프로파일을 제공한다.

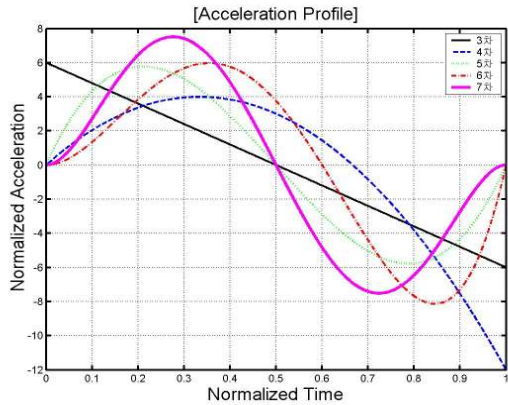


그림 4 고차 다항식의 가속도 프로파일
Fig. 4 Acceleration profile of high order polynomial

그림5는 고차 다항식의 가속도 프로파일로부터 도함수를 적용하여 유도된 저크 프로파일을 나타낸다. 3차는 전구간에서 일정한 (-)의 저크를 계속해서 발생시켜 기구물에 연속적인 스트레스를 가하게 되고, 4차는 시작점에서 (+)의 저크를 끝점에서는 (-)의 저크를 발생시키고, 5차는 시작점과 끝점에서 비교적 큰 (+)의 저크를 발생시키고, 6차는 끝점에서 큰 (+)의 저크를 발생시킨다. 따라서 시작점과 끝점에서 저크를 발생시키지 않고 중간 단계에서는 위 아래 같은 크기의 저크를 발생시키는 7차 방정식이 기구물에 가해지는 스트레스를 분산시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

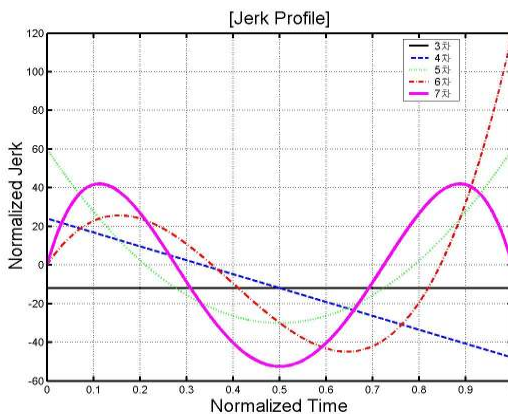


그림 5 고차 다항식의 저크 프로파일
Fig. 5 Jerk profile of high order polynomial

4. 결론

제안한 고차 구동 프로파일의 소음 특성을 분석하기 위하여 5000N의 횡자속 선형전동기가 적용된 LCD 자동 반송 장비인 스토커의 주행축에 적용하여 시험을 실시하였다.^[7] 구동의 시작과 끝점에서 '0'의 가속과 저크를 가지는 7차 속

도 프로파일을 적용했을 경우 사다리꼴 프로파일과 비교했을 때, 진동 소음 특성이 양호함을 검증하기 위하여 주행축의 시작 부분에 소음 측정기인 마이크로폰을 바닥에서 1.5미터, 이동 물체에서 1.5미터 거리에 설치하여 선형전동기가 출발하는 과정에서 발생하는 소음을 속도별로 측정하였다.

그림6은 제안한 7차 속도 프로파일과 기존의 사다리꼴 속도 프로파일을 적용했을 때 전동기의 구동 속도를 1[m/s]에서 2[m/s]까지 5구간에 대해 측정된 소음 크기를 나타낸다. 제안한 7차 속도 프로파일이 적용된 선형전동기의 소음이 사다리꼴 속도 프로파일에 비해 초기 구동 시 발생하는 저크를 제거하고 상하 대칭의 저크 분포를 가짐으로 인해 기구물에서 가해지는 스트레스를 최소화시켜 소음 발생을 줄이는 결과를 얻었다.

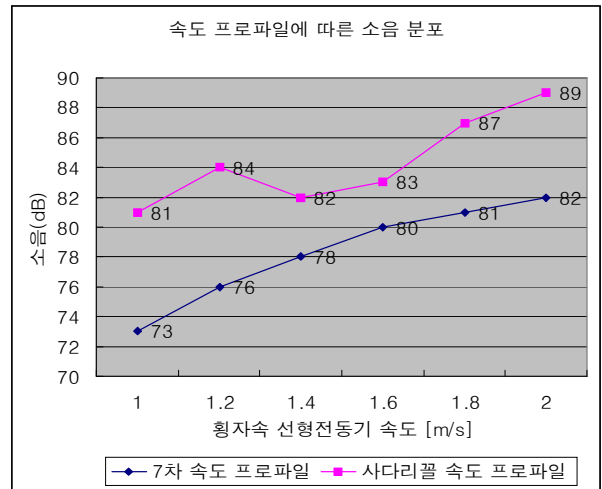


그림 6 7차 속도 프로파일과 사다리꼴 속도 프로파일의 속도별 소음 크기
Fig. 6 Noise magnitude of 7-th and trapezoidal velocity profile

참고 문헌

- [1] W.M Arshad, T.Backstrom, C.Sadarangani, "Analytical design and analysis procedure for a transverse flux maching", IEMDC 2001, pp. 115-121, 2001.
- [2] Henneberger G., Bork M., "Development of a new transverse flux motor", IEEE Colloquium on New Topologies for PM Machines, pp 1-6, 1997.
- [3] S.A Nasar, I. Boldea, "LINEAR ELECTRIC MOTORS : Theory, Design and Practical Application", PRENTICE-HALL. INC, 1987
- [4] 전진용, 황계호, 김지원, 김규식, "장거리 이송용 고회전력 영구자석 여자 횡자속 선형전동기 제어에 관한 연구", 전력전자학회 논문지 제11권, 제5호, pp.471-479, 2006
- [5] 김정환, "DSP로 리니어모터 제어하기", 통일출판사, pp.21-22, 2003
- [6] 정슬, "공학도를 위한 Matlab 및 Simulink의 기초와 활용", 청문각, 2002
- [7] 전진용, 문인호, 김규식, "횡자속 선형전동기를 이용한 스토커 적용에 관한 연구", 전력전자학술대회 pp104-106, June 2006.