

## Linear Motor Driver 설계에 대한 연구

김재필, 하근수\*, 정인성\*, 백수현,  
전자부품연구원(KETI) 정밀기기연구센터\*, 동국대학교

### Study on Design Linear Motor Driver

Jae-Pil Kim, Keun-Soo Ha\*, In-Sung Jung\*, Soo-Hyun Baek  
KETI\*, Dongguk Univ.

**Abstract** - In this paper, we designed a high precision Linear Motor Driver with 120 commutation method. It was composed of three parts which were divided into Power and Inverter Circuit, Analog Circuit with PWM Generation and Fault Protections, and Logic Circuit. We selected LC-DSP by MEI for testifying a high accuracy of a designed driver. We proved the propriety as measured the accuracy with each velocity.

#### 1. 서 론

정밀조립, 검사, 측정 등 정밀기기 분야는 산업이 고도화, 정밀화 됨에 따라 정밀도 향상 추구는 지속적 발전이 진행되고 있으며, 특히 정밀기기의 핵심 요소로 평가되는 구동부는 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 직결 구동(Direct Drive)방식으로 변화되고 있으며, 고속 초정밀 위치제어를 목적으로 하는 시스템에서는 정밀 Linear Servo System을 적용한 방식으로 기술적 전환이 빠르게 진행되고 있다. Linear Motor는 비교적 구조가 간단하고, 추력/중량비가 크므로, 고속 동작이 가능하며, 또한 서보 특성이 좋아 제어성능이 우수하여 컴퓨터 주변기기, 반송장치, 집적회로 제조구동용, 각종 로봇 등의 고속 동작을 필요로 하는 위치 제어 장치로써 실용화가 기대되고 있다. 그러나, 리니어 펄스 모터와 같이 모터 자체에 위치 결정 기능이 없으므로, 위치 결정 센서와 조합시켜 제어 할 필요가 있다. 위치 결정 센서, 속도센서와 조합시키면 대단히 고정밀도의 위치 결정, 속도 제어가 가능하다.

따라서, Linear Motor를 생각할 때에는 추력 특성을 고찰하는 동시에 제어 시스템을 고찰하는 일이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 특성을 지닌 Linear Motor를 구동하기 위한 고속 고정밀 운동에 적합한 드라이버를 구성하였으며, 전체적인 구성으로써 첫째, FLY BACK PWM 방식을 이용하여 AC-DC 컨버터 전원을 설계하였으며, 1,500kV의 내전압을 지니며, 사용된 고전압 펄스 트랜스의 패라이트 코어를 사용하였다. 출력 전압으로서 모터 구동을 위한 300VDC, 컨트롤러, 보호 회로 및 각종 제어 신호 구동을 위하여 15V, 5V DC 전원을 구성하였다.

둘째, Driver 자체 구동 및 컨트롤러와의 인터페이스를 위하여 아날로그 전압 입력 단자를 구성하였으며, 이는 약 16~25kHz의 캐리어 주파수를 지닌 PWM 파형으로 전환된다. 전환된 파형은 자극의 위치를 검출하는 홀 센서와 조합되어 스위칭 신호를 발생시킨다.

셋째, Driver 내에서 발생할 수 있는 에러에 대비한 보호 회로를 구성하였다. 인가되는 AC 전원에 따른 UnderVoltage, OverVoltage 검출 회로, Linear

Motor에 흐르는 전류에 대한 과전류 보호 회로, 온도 상승 검출을 위한 OverTemperature 회로 등으로 구성하였다.

넷째, 모터 구동을 위한 인버터 회로 설계시, 기존의 Linear Motor 드라이버에서 사용되던 IPM대신에 IGBT를 사용하였으며, 게이팅을 위한 게이트 드라이버를 구성하여 회로 구성 비용의 절감 효과를 가져왔다.

#### 2. 드라이브 설계

##### 2.1 전원부

본 연구에서 사용한 Driver 전원부는 기존의 전원 트랜스의 AC-DC 전원부와는 달리 고주파 트랜스를 사용한 플라이백 방식의 AC-DC 컨버터 설계 방식을 채택하였다. 그러므로, 트랜스의 부피 및 회로의 코스트, 사이즈를 감소시켰다.

Driver 입력 전원은 220VAC 전원으로 동작되어진다. 따라서, 이를 직류 전압으로 정류하기 위하여, 브리지 다이오드와 평활 콘덴서를 사용하였다. 한편, 전원 인가시 발생할 수 있는 과전류를 검출하기 위하여 250V/30A의 Fuse를 DC 전원과 직렬로 연결하였다.

이러한 AC-DC 정류된 전압은 DC-DC 컨버터를 통하여 출력 전압이 발생되며, 출력 전압의 정전류 제어를 위하여 TOP234Y(Power Integrations, Inc)를 이용하였으며, KA431를 이용하여 메인 출력 전압인 5VDC의 정전류를 제어하고 있다.

##### 2.2 아날로그 신호 처리부

아날로그 신호 처리부는 크게 Linear Motor에 흐르는 모터의 전류를 센싱하는 전류 설정부, PWM 파형을 발생하는 회로부, 최대/연속 전류 셋팅하는 회로부, 그리고 드라이버의 보호 회로 동작을 위하여 UnderVoltage, OverVoltage, OverCurrent, OverTemperature 등의 에러 검출 회로로 구성되었다.

전류 설정부는 Driver의 효율 향상을 위하여 Linear Motor에 흐르는 전류의 설정을 가능하게 하였다. Linear Motor에 흐를 수 있는 전류의 경우, 최대 전류와 연속 전류의 두 가지 측면에서 전류 제한을 할 수 있다. 최대 전류의 경우, 본 연구에서는 30A의 최대 전류가 가능하며, 연속 전류의 경우 약 15A의 설정이 가능하다.

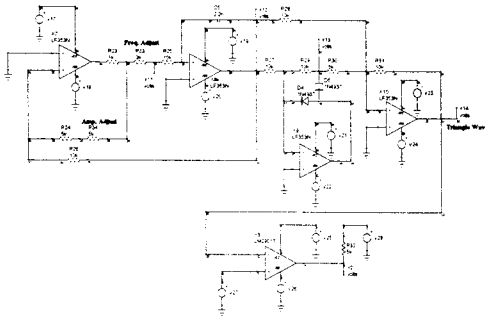
최대 전류의 경우, 전류대비 셋팅된 전압 비율은 6A/V이다. 즉, 최대 전류를 1V로 셋팅을 하였을 경우, 모터에 제한되는 최대 전류 값은 약 6A의 값을 가진다. 정밀한 전류 셋팅을 위하여 본 논문에서는 10%의 Tolerance를 가지는 볼륨 저항(0.5W급)을 선정하였다.

한편, 연속 전류의 경우, 최대 전류와는 달리 10A/V의 전류대비 전압 값을 가진다. 또한 모터에 흐르는 전

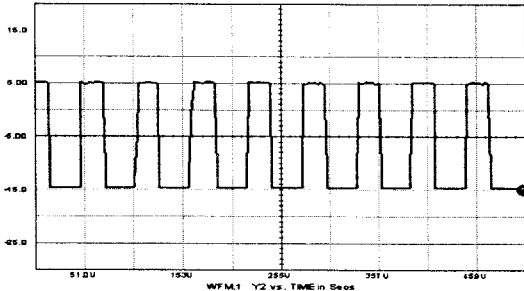
류값은 모니터링 단자를 설정하여 현재 권선에 흐르는 전류를 측정할 수 있다. 이는 설정된 전류값과의 연계성을 지닌다.

PWM 발생부는 선형성이 확보되면서 실용적인 삼각파 발생회로를 이용하여 구성된 회로는 삼각파와 구형파를 동시에 출력할 수 있는 회로이며, 히스테리시스 컴퍼레이터, 적분 회로로 구성되었다. 또한 삼각파의 주파수 및 크기를 조절함으로써, PWM파형의 유연성을 지닌다.

적분 회로는 히스테리시스 컴퍼레이터의 출력 전압을 적분하여 콘덴서에 충전하지만, 그 출력이 히스테리시스 컴퍼레이터의 임계값 전압에 도달하면 출력은 반전되고, 이번에는 콘덴서를 방전한다. 출력전압이 임계값에 도달하면 출력이 재차 반전하여 충전을 개시한다. 이것을 반복함으로써 히스테리시스 컴퍼레이터로부터는 구형파가, 적분회로로부터는 삼각파가 출력된다. 삼각파 출력의 피크값은 컴퍼레이터의 히스테리시스값으로 정해진다. 이 회로는 OP 앰프의 출력 포화전압에 따라 삼각파의 경사가 선형성을 유지한다. 출력 포화 전압은 전원 전압에 의존하며, 본 논문에서 사용되어진 PWM 발생 회로도 및 시뮬레이션 파형은 다음과 같다.



[그림 2.1] 설계된 삼각파 발생회로부



[그림 4.2] PWM 시뮬레이션 파형

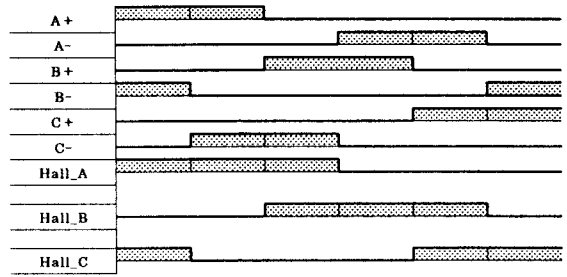
보호 회로부는 Driver의 손상을 미연에 방지하도록 UnderVoltage(205VAC이하), OverVoltage(240VAC 이상), OverCurrent(설정된 최대 및 연속 전류값 이상) 등으로 구성되었다.

개인 설정부는 컨트롤러에서 보내어지는 전압의 비율을 설정하는 Ref Gain, 전류 이득을 결정하는 Loop Gain, 정지 명령에 대한 Linear Motor의 운전을 멈추게 하는 Balance 등으로 구성되어졌다.

### 2.3 스위칭 신호 처리부

본 논문에서 사용한 Linear Motor는 모터의 위치 검출하기 위하여 홀 센서를 이용하였다.

홀센서는 Linear Motor 운전시 모터의 위치를 검출하는 소자로서, 특히 Linear Motor의 초기 위치를 검출함으로써 리니어 스케일을 이용한 제어 동작 구현에 중요한 역할을 한다.



[그림 2.3] 스위칭 신호와 홀센서 검출신호와의 관계

홀센서의 검출 신호가 "100"이 될 경우, 스위칭 로직 신호는 A상의 High Side, C상의 Low Side가 ON이 되어 Linear Motor는 초기 구동을 한다. 이러한 초기 구동이 이루어진 후, 컨트롤러에서는 리니어 스케일을 이용하여 위치 제어 및 속도 제어를 하며, 이에 대한 인버터 스위칭 신호는 홀 센서를 통하여 이루어진다. 즉, 초기 구동이 홀센서를 통하여 이루어진 후, 구동을 위한 스위칭 로직신호는 [그림 2.3]에 의하여 결정되어지며, 이를 근간으로 리니어 스케일의 분해능 만큼 제어를 하며, 이는 앞서 설명한 스위칭 로직 신호와 제어시 발생하는 여러 값만큼의 양이 PWM 신호의 듀티비를 바꿔 AND게이트를 통하여 최종 인버터 구동을 위한 스위칭 신호로서 사용되어진다.

구성된 로직은 PWM 신호의 듀티 폭에 따라 출력 펄스가 발생되어 IGBT의 컨트롤 신호 입력 단자로 인가된다. 이에 따라 IGBT는 설정된 캐리어 주파수 대역인 16kHz~25kHz로서 ON/OFF하게 된다.

한편, Linear Motor에 인가되는 로직 신호는 자극의 위치를 검출하는 홀센서에서 여러 발생시, LED를 ON시켜 로직신호 발생을 차단한다.

120° 통전 방식이기 때문에 발생할 수 있는 홀센서 에러는 모든 홀센서 신호가 같은 레벨로 발생하였을 경우이다. 따라서, 이의 검출을 위하여 Exclusive-OR 로직을 이용하여 홀 센서 에러를 검출하였으며, 이에 대한 로직 구성은 아래와 같다.

$$Hall_{Error} = (Hall_A \oplus Hall_B) + (Hall_B \oplus Hall_C) + (Hall_C \oplus Hall_A)$$

### 2.4 인버터부

본 논문에서는 약 16kHz~25kHz의 캐리어 주파수를 가지는 PWM파형으로서 Linear Motor를 스위칭시키고 있다. 각각의 발생된 여자 신호는 IR2136이라는 3 Phase Bridge Driver를 거쳐 Linear Motor에 인가된다. 본 논문에서 사용된 IR2136은 최대 600V까지 동작이 가능한 N-Channel MOSFET 및 IGBT를 구동할 수 있는 Floating Channel을 가지고 있으며, 200ns의 Dead time 및 400ns의  $t_{on}/t_{off}$ 을 가지고 있으며, IR2136은 구동을 위한 Enable 단자를 가지고 있고, 3상 모터의 스위칭을 위한 6개의 입·출력 단자를 가지고 있다. 한편, 인버터 구동을 소자로서는 IRG4PC50KD(International Rectifier社)를 사용하였으며, 이는 Linear Motor에 흐르는 최대 전류치를 고려하여 선정하였다.

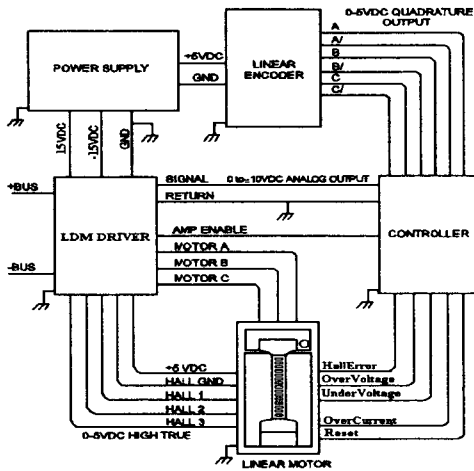
## 3. 실험 및 고찰

### 3.1 실험 구성

본 논문에서는 Driver의 성능 검증을 위하여 Anorad사의 LCK-S-3-P 모터를 대상 모터로서 선정하였으며, LC-DSP (MEI社) 컨트롤러와 1μm의 분해능을 가지는 MS-63-35G 리니어 엔코더를 이용하였다. 사용된 Linear Motor의 사양은 다음과 같다.

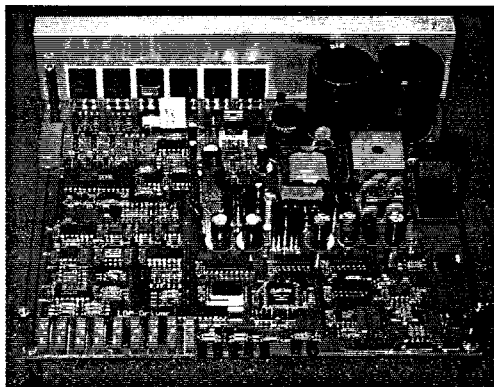
항 목	사 양
유효스트로크	500mm
선간저항	1.3 Ω(25℃)
선간인덕턴스	10.0 mH
추력상수	55.5 N/A
역기전력상수	18.5 Vsec/m

위와 같은 사양을 가진 Linear Motor를 대상으로 Driver 성능을 평가하기 위하여 500mm의 행정거리를 각각의 일정 속도 및 가속도로 왕복운동을 하여 500mm에서의 정밀도를 측정하였다. 실험 구성도는 다음과 같다.



[그림 3.1] 실험구성도

본 논문에서 설계된 Linear Driver는 다음과 같다.



[그림 3.2] 설계된 Linear Driver

### 3.2 실험 결과

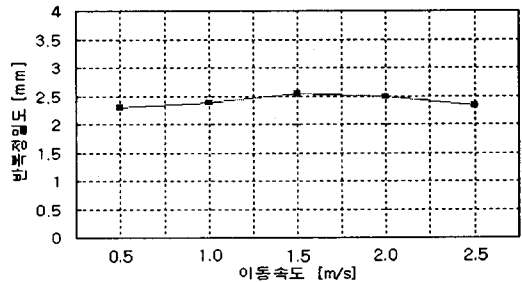
본 논문에서는 개발된 고정밀 Driver의 성능 검증을 위하여 각각의 속도에 따른 일정 거리를 왕복 운동하는 실험을 하였으며, 이 때 발생하는 Linear Motor의 위치정밀도를 측정하였다. 따라서, 본 논문에서는 Linear Motor의 최대 장점인 고속 운동에서 실험을 구현하므로서 고정밀성을 검증하였다. 각각의 속도에 따른 위치 정밀도 측정 결과와 그래프는 다음과 같다.

[표 3.1] 속도에 따른 반복정밀도 측정 결과

이동가속도(G)	0.5	1	1.5	2	2.5
이동속도(m/s)	0.5	1	1.5	2	2.5
이동거리(mm)	500	500	500	500	500
Dwell시간(ms)	500	500	500	500	500
측정위치오차 (μm)	0.75	0.75	-0.75	-2.50	-2.50
	1.00	-0.50	-0.25	-2.75	-3.75
	-0.75	-0.75	0.50	-4.25	-4.25
	0.00	0.00	-1.75	-3.75	-3.50
	1.00	1.25	-0.75	-4.25	-4.50
반복정밀도(μm)	2.29	2.38	2.55	2.49	2.34

평균반복정밀도는 다음과 같다.

$$(2.29+2.38+2.55+2.49+2.34)/5 = 2.41(\mu\text{m})$$



[그림 3.3] 반복정밀도 측정 그래프

## 4. 결 론

본 논문에서는 고속 고정밀의 Linear Motor 구현을 위한 고정밀 Driver를 구현하고자 하였다. 개발된 Driver는 120° 통전 방식의 고속 고정밀 Linear Motor Driver로써, 설계된 Driver는 전원부 및 인버터부, PWM 발생부, 보호 회로, 개인 설정부로 구성된 아날로그 회로부, 스위칭 로직 회로 발생부 등으로 구성하였다. 특히, 본 논문에서는 고정밀의 Driver 구현을 위하여 Driver 자체 내에 드라이버 개인 설정부를 설계하였다.

설계된 Driver의 성능 검증을 위하여 제어기로서는 상용제품인 LC-DSP 컨트롤러를 사용하였으며, 대상이 되는 Linear Motor는 Anorad사의 LCK-S-3-P 모터가 사용되었다.

Linear Motor의 고속 왕복 운동시 발생하는 위치 반복정밀도를 측정함으로써 설계된 Driver의 성능을 평가하여 그 타당성을 입증하였다. 이상의 고정밀의 Driver를 사용하여 운전시 변화가 되는 속도 프로파일에 따른 속도 및 가속도의 변화량에 대한 응답성을 높여 정밀도를 향상시켰다.

### [참 고 문 헌]

- [1] H.Wakiwaka, H.Yajima, and H.Yamada, "Design and Evaluation of Linear DC Motor for Pen recorder", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31, No.6, pp3755~pp3757, Nov. 1995
- [2] Y.Kano, M. Yamaguchi, and K.Manabe, "Positioning Control Characteristics of Rectangular-Type Linear DC Motor", 日本應用 磁氣學會誌, Vol. 21, No. 4-2, pp857~pp860, 1997
- [3] N.Samejima, H.Takeda, Y.Sasaki, and K.Miura, "Dual Mode High Speed Position Control of a Linear DC Motor", 계측자동제어학회논문지, Vol. 25, No.11, pp1202~pp1209, 1989
- [4] 전자부품연구원 정밀기기연구센터, "Linear Motor를 장착한 정밀인쇄회로기판의 Punching Machine 개발에 관한 연구", 전자부품연구원 출판부, 1999
- [5] "DC Brushless Servo Amplifier", Parker Hannifin Corporation, 1996