

고성능 미세스텝 구동회로의 개발

李光雲, 張源植, 朴廷培, 呂炯基, 柳志潤

Development of High Performance Microstepping Driver

Kwang-Woon Lee, Won-Sik Jang, Jung-Bae Park, Hyeong-Gee Yeo, Ji-Yoon Yoo

요 약

2상 하이브리드 스텝모터를 미세스텝으로 제어하면 저속에서도 부드럽게 회전하고, 스텝 분해능을 높일 수 있으며, 공진으로 인한 바람직하지 못한 현상들을 제거할 수 있다. 본 논문에서는 고성능 미세스텝 구동회로를 개발하였다. 본 논문에서 개발한 미세스텝 구동회로는 2상 하이브리드 스텝모터의 1 회전스텝(1.8도)을 128 미세스텝으로 분할하여 구동할 수 있는 위치 분해능을 가지며 스텝모터를 장시간 구동할 때 발생하는 열로 인한 문제점을 줄이기 위한 전류 절약 동작모드를 지원한다.

ABSTRACT

Microstepping control of two phase hybrid step motors provides high step resolution as well as smoothness of operation at low speed, and removes most of the resonance phenomena which is undesirable. This paper focuses on the development of a microstepping driver with enhanced performance. The developed microstepping driver can divide one step(1.8 degree) into 128 microsteps and supports current saving mode to remove the thermal problems which results from long time operation.

Key Words: Hybrid step motor, Microstepping, Current saving mode

1. 서 론

스텝모터는 입력 펄스에 동기하여 일정 각도씩 회전하고 위치 오차가 누적되지 않으며, 기동, 정지, 정역전의 응답성이 우수하고, 구동회로가 비교적 간단하다는 장점으로 인하여 각종 산업용 기기에서 개루프 제어의 형태로 널리 사용되고 있다. 그러나 스텝모터는 저속 영역에서 운전할 때는 쉽게 탈조되며, 입력 펄스에 대한 모터의 회전각이 정해져 있어 적은 속도 맥동과 세밀한 위치 제어가 요구되는 분야에서 사용하기가 곤란하다.^[1] 이러한 문제점들을 개선하기 위해 스텝모터를 미세스텝으로 구동하는 방식이 1970년대 중반에 제안되었으며^[2], 그 이후로 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.

스텝모터의 미세스텝 구동은 모터 각 상 권선에 흐르는 전류를 제어하여 일반 구동 방식에서의 스텝회전각보다 더 세밀한 미세각으로 회전시키는 방식으로, 결과적으로 고정밀

위치 제어가 가능해지며, 공진 영역에서의 문제점들을 개선할 수 있고, 속도 맥동을 줄여 저속 회전 시에도 진동이 거의 발생하지 않는 특징이 있다.^[3] 미세스텝으로 구동되는 스텝모터를 사용하면 적은 비용으로 서보 시스템 구현이 가능하기 때문에, 미세스텝 구동회로는 소형 정밀 기계 및 중·소형 천체 망원경등 높은 정밀도의 위치 제어 및 적은 속도 맥동이 요구되는 분야에 적용할 경우 그 이점이 크다.^[4]

이와 같은 미세스텝구동에 관한 이론적 내용과 효과는 이미 보편화된 사실이다.^[1-3] 그러나 이론적으로 말하자면 미세스텝 구동으로 인한 제어 성과는 거의 극한에 이르러야 할 것임에도 불구하고, 미세스텝 구동회로 설계와 그 제어 방식에 따라 많은 제약과 받고 있다. 따라서 그 정밀도를 높이기 위해서는 하드웨어와 제어 방식의 선정은 물론 이에 소요되는 비용 등의 복합적인 노력이 필요하며 궁극적으로는 하드웨어와 소프트웨어의 설계에 그 핵심이 있다. 참고적으로 부연하면

미세스텝 구동은 이론적으로는 비교적 쉽고 일면 진부한 듯 하나 그 실현에는 많은 노-하우가 있어 국내의 동 분야 제품의 수준이 매우 낮으며 개발능력 또한 미진한 가운데 국내 수요의 대부분이 외국제품에 의존하고 있다.

본 논문에서는 위와 같은 스텝모터의 고정밀 미세스텝 구동에 관하여 성능 면에서 우수하여 고정밀 미세스텝 구동이 가능하고 속도 맥동이 적으며, 적은 비용으로 제품화가 가능한 미세스텝 구동 회로와 이에 관련된 소프트웨어를 개발하고 실험과 검증을 통하여 그 우수성을 확인하였기에 보고하고자 한다.

구체적으로는 본 연구에서 구현한 미세스텝 구동회로는 2상 하이브리드 스텝모터의 1회전 스텝(1.8도)을 128미세스텝으로 분할하여 구동할 수 있는 미세스텝 분해능을 가지며, 16비트 마이크로컨트롤러를 내장하여 모터를 장시간 구동할 때 발생하는 열을 줄이기 위한 모터 정지시의 상 전류 절약 기능을 소프트웨어 기법에 의해 지원한다. 특히 극저속 구동시에도 속도 맥동 없이 미세스텝 구동이 가능하도록 설계되었다.

2. 미세스텝 구동을 위한 모터 상 전류 파형의 선택

2상 하이브리드 스텝모터에서 코깅(cogging) 토크 성분을 고려하지 않을 때, 모터의 발생 토크 T는 각 상에 흐르는 전류와 회전자의 전기각의 함수로 표현되어지며 식 (1)과 같다.⁽⁵⁾

$$T = -K_0 I_a \sin \theta_c + K_0 I_b \cos \theta_c \quad (1)$$

식 (1)에서 K_0 는 모터의 토크 상수, I_a 와 I_b 는 모터의 상 전류, 그리고 θ_c 는 회전자의 전기각을 나타낸다. 모터의 상 전류 I_a 와 I_b 를 식 (2)와 같이 제어해 주면 모터의 토크 방정식은 식 (3)과 같이 표현되어진다.⁽⁵⁾

$$I_a = I_R \cos \phi, \quad I_b = I_R \sin \phi \quad (2)$$

$$T = K_0 I_R \sin(\phi - \theta_c) \quad (3)$$

식 (2), (3)에서 I_R 은 모터의 정격 전류를 의미한다. 식 (3)으로부터 모터의 토크 평형점은 회전자의 전기각 θ_c 와 상 전류의 위상각 ϕ 가 동일한 곳에 위치하며, 전류 위상각 ϕ 를 일정 미세각씩 변화시킴으로써 모터의 회전자를 미세스텝으로 회전시킬 수 있음을 알 수 있다.

그러나 모터의 코깅 토크 성분이 큰 경우, 식 (2)와 같은 전류 파형을 채택한 미세스텝 구동방식은 스텝모터를 미세스텝으로 구동할 때 위치 오차를 수반하게 된다. 코깅토크를 고려한 2상 하이브리드 스텝모터의 토크 방정식은 식 (4)와 같다.⁽⁶⁾

$$T = -K_0 I_a \sin \theta_c + K_0 I_b \cos \theta_c - A_3 \sin(4\theta_c) \quad (4)$$

식 (4)에서 A_3 는 4차 고조파 코깅 토크 성분의 크기를 의미한다. 코깅 토크의 영향을 보상하기 위해 각 상 전류의 파형을 다음과 같이 선택해 줄 수 있다.⁽⁶⁾

$$I_a = B_1 \cos \phi - \frac{K}{2K_0} (5 \cos(3\phi) + 3 \cos(5\phi)) \quad (5)$$

$$I_b = B_1 \sin \phi - \frac{K}{2K_0} (-5 \sin(3\phi) + 3 \sin(5\phi)) \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 B_1 은 기본파 성분의 크기이고, K 는 모터의 전류 파형을 선택하는 데 있어서의 설계 변수로 코깅토크의 영향을 보상하도록 적절히 선정해 주어야 한다.⁽⁶⁾

3. 미세스텝 구동회로의 구성

미세스텝 구동회로의 주 기능은 스텝모터의 상 전류를 상 전류 기준 파형을 추종하도록 제어하는 것으로, 미세스텝 구동회로의 성능은 구동회로의 전류 제어 성능과 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 개발한 미세스텝 구동회로는 상 전류 기준 파형 발생부, 전류 제어부, PWM부, 그리고 H-Bridge로 구성되며, 전체 구성은 그림 1과 같다.

상 전류 기준 파형 발생부는 마이크로컨트롤러 80C196KC와 2개의 8비트 DAC로 구성된다. 전류 제어부는 상 전류 기준 파형과 모터의 상 전류를 비교하여, 상 전류가 기준 파형을 추종하도록 제어 신호를 만들어 PWM부로 입력시켜 준다. PWM부에서는 전류 제어기의 출력 신호를 삼각파와 비교하여 H-Bridge를 구성하는 스위칭 소자들의 on/off 제어 신호를 발생시키고, H-Bridge가 유니폴라 전압 스위칭 동작을 하도록 PWM부를 구성하였다.⁽⁷⁾ H-Bridge는 n채널 MOSFET를 사용하여 구성하였고, 게이트 드라이브 전용 IC인 IR2110을 사용하여 H-Bridge를 구성하는 스위칭 소자들을 단일 전원으로 스위칭 시킬 수 있게 하였으며, H-Bridge를 구성하는 스위칭 소자들의 스위칭 주파수는 20kHz로 설정하였다. 모터의 상 전류 검출을 위해 저가의 홀(hall) 소자를 사용하였다.

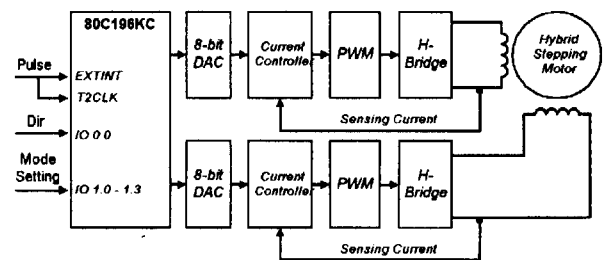


그림 1 미세스텝 구동회로의 하드웨어 구성도
Fig. 1 Hardware block diagram of microstepping drive

모터 구동용 전원으로 외부에서 18~36V 사이의 직류전원을 입력받도록 하였다. 그리고 미세스텝 구동회로에 DC-DC 컨버터를 내장시켜 모터 구동용 직류 전원으로부터 5V, ±12V 전원을 얻어내어 미세스텝 구동회로의 내부회로 전원으로 사용하였다.

3.1 마이크로컨트롤러의 소프트웨어 구성

마이크로컨트롤러 80C196KC의 주 기능은 상 전류 기준 파형을 발생시키는 것이다. 상 전류 기준 파형은 80C196KC의 메모리에 Look-up 테이블로 저장된다. 모터의 코깅토크 성분의 크기가 큰 경우, 그에 맞는 적절한 상 전류 기준 파형을 선택할 필요가 있다. 본 연구에서는 다양한 상 전류 기준 파형들을 식 (5),(6)에 근거하여 계산하여 Look-up 테이블로 저장하였고, 이들 파형들중에서 하나를 사용자가 선택하도록 소프트웨어를 구성하였다.

그림 1에 나타낸 것처럼 80C196KC는 외부에서 펄스(pulse), 방향(dir), 그리고 모드설정(mode setting) 신호를 입력받도록 되어있다. 본 연구에서는 펄스 신호가 80C196KC에 입력될 때마다 테이블 포인터를 방향 신호에 따라 증가 또는 감소시켜 가면서 Look-up 테이블을 읽어내어 DAC로 출력함으로써 상 전류 기준 파형을 발생시키게 하였다. 펄스 신호는 80C196KC의 인터럽트 단자와 내부 타이머의 입력단자에 연결되며, 이 펄스 신호에 의해서 80C196KC에 인터럽트가 요청되고, 내부 타이머는 증가하게 된다. 인터럽트 처리루틴에서는 현재 타이머의 값과 이전 인터럽트 발생시의 타이머 값을 비교하여 하나의 인터럽트가 발생되기까지 몇 개의 펄스가 80C196KC에 입력되었는지를 판별하고, 입력된 펄스 수만큼 테이블 포인터를 증감시켜 Look-up 테이블을 읽어내어 DAC로 출력한다. 본 연구에서는 상기와 같은 방식으로 80C196KC의 소프트웨어를 구성함으로써, 펄스 신호의 주파수가 높아지는 경우에도 80C196KC의 인터럽트 응답 가능 최대 주파수와 관계없이 적절한 상 전류 기준 파형을 발생시킬 수 있게 하였다.

스텝모터를 장시간 구동시킬 때는 권선의 저항 성분으로 인해 모터에서 많은 열이 발생되며, 이로 인해 모터의 절연이 파괴되는 문제가 발생할 수 있다. 모터가 정지해 있을 때는 부하를 지탱할 수 있는 토크 범위 내에서 모터의 상 전류를 일정하게 감소시킴으로써 모터에서 발생하는 열을 줄일 수 있다. 본 연구에서는 미세스텝 구동회로가 1초가 지나도록 펄스 신호를 입력받지 못하면 모터의 상 전류 기준 파형을 일정하게 줄여주는 전류 절약 모드로 동작하도록 마이크로컨트롤러의 소프트웨어를 구성하였다.

마이크로컨트롤러 80C196KC의 전체 제어 소프트웨어 흐름도를 그림 2에 나타내었다. 전원이 들어오면 80C196KC는 상 전류 기준 파형, 미세스텝 분해능, 그리고 전류 절약 모드

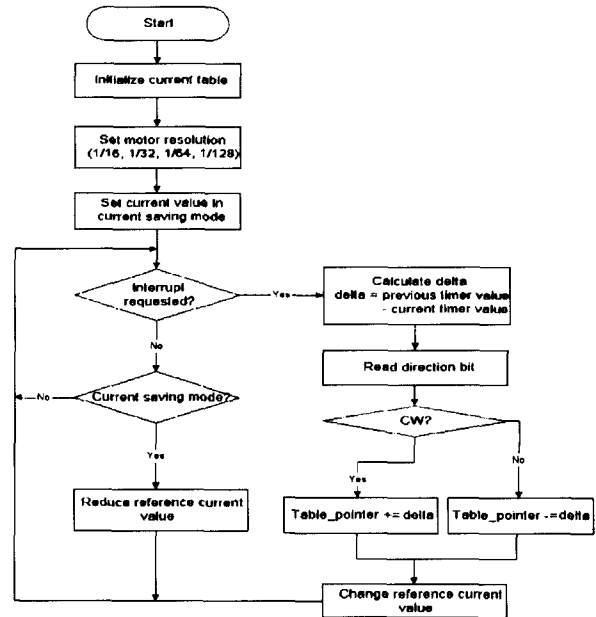


그림 2 마이크로컨트롤러의 소프트웨어 흐름도
Fig. 2 Software flow chart of microcontroller

에서의 상 전류 감소치를 설정한다. 그리고 펄스 신호가 입력될 때마다 인터럽트 처리루틴에서 Look-up 테이블의 값들을 읽어내어 새로운 상 전류 기준 파형을 발생시키며, 펄스 신호가 1초가 지나도록 입력되지 않으면 전류 절약 모드로 들어가서 상 전류 기준 파형의 크기를 일정하게 감소시킨다.

3.2 전류 제어기의 구성

본 연구에서는 전류 제어기를 연산증폭기를 사용하여 그림 3과 같이 구성하였다. 그림 3에서 V_o 는 전류 검출용 홀 소자의 출력 전압을 나타내며, V_{ref} 는 DAC에서 출력되는 전압 신호로, 모터의 상 전류 기준 파형을 나타낸다. 그림 3에서 전류 제어기의 출력 V_c 는 다음과 같다.

$$V_c = \frac{R_b}{R_a + R_b} V_{ref} + \frac{R_c}{R_a} \frac{V_{ref} - V_o}{1 + sRC} \quad (7)$$

저항 R_a 와 R_b 는 전향제어 이득을 조절하는데 사용되고, R_a 와 R_c 는 DC 이득을 조절하는 데 사용되며, R_c 와 C 는 전류 제어기의 차단 주파수를 설정하는 데 사용된다. 상 전류 기준 파형의 최대 주파수는 모터의 최대 회전속도를 3,000rpm으로 보았을 때 2.5kHz 정도가 된다. 본 연구에서는 스위칭 소자들의 스위칭 주파수를 20kHz로 설정하였고, 전류 제어기의 차단 주파수는 5kHz로 설정하여 스위칭으로 인한 잡음 성분들이 전류 제어기에서 감쇄되도록 하였다.

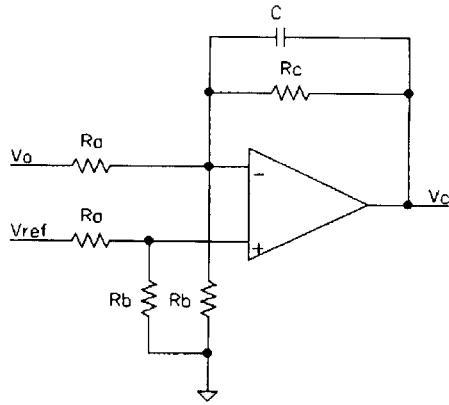


그림 3 전류 제어기의 구성
Fig. 3 Configuration of current controller

본 연구에서 H-Bridge를 구성하는 n채널 MOSFET의 게이트 드라이버로 사용한 IR2110은 부트-스트랩(boot-strap) 방식으로 MOSFET를 스위칭하기 때문에,^[8] 부트-스트랩 커패시터가 계속 충전·방전 되도록 일정 주파수의 PWM 펄스 신호가 IR2110으로 입력되어야 한다. 만약 PWM부에서 과변조(overmodulation) 현상이 발생되면 부트-스트랩 커패시터가 방전되어 MOSFET를 제대로 스위칭할 수 없게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 PWM부의 삼각파 신호의 크기를 전류 제어기 출력신호의 최대값보다 약간 크게함으로써 과변조 현상이 발생되지 않게 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 설계, 제작한 미세스텝 구동회로의 성능을 검증하기 위해 사용한 2상 하이브리드 스텝모터는 Parker Hannifin社의 OEM57-83이라는 제품으로, 그 사양을 표 1에 나타내었다. 모터에는 24V의 전압을 인가하였고, 전류기준 파형으로는 순수 정현파를 택하였으며 모터 상 전류의 최대값은 3A로 설정하였다. 전류 검출용으로 사용한 홀소자는

표 1 실험 대상 모터의 사양
Table 1 Specifications of test motor

모터의 종류	하이브리드형 스텝 모터
상 수	2
스텝각	1.8 degree
정격 전류	3 A/Phase
static torque	0.71 N·m
관성 모멘트(회전자)	0.234 kg·cm ²
총 중량	1.1 kg

3A의 전류가 흐를 때 4V의 전압을 출력한다.

그림 4는 미세스텝 구동회로의 미세스텝 분해능을 128미세스텝으로 설정하고, 스텝모터를 0.01rps의 일정 속도로 회전시킬 때의 모터의 상 전류 기준 파형과 실제 상 전류를 나타낸 것이다. 모터의 상 전류가 전류 기준 파형을 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 5, 6, 7은 각각 모터를 0.1rps, 1rps, 10rps의 속도로 회전시킬 때의 상 전류 기준 파형과 실제 상 전류를 나타낸 것이다. 상 전류 기준 파형의 주파수가 높아질수록 상 전류가 전류 기준 파형을 제대로 추종하지 못함을 알 수 있는데, 이는 모터의 회전 속도증가로 인한 역기전력 증가로 인해 모터에 인가되는 실제 유효전압이 감소되기 때문이다.

실험 대상 모터를 미세스텝으로 구동할 때, 각 미세스텝에서의 위치 오차를 측정하기 위해 모터의 회전축에 1회전당 128,000개의 펄스가 출력되는 광학식 엔코더를 부착하였다. 그림 8과 9는 각각 미세스텝 구동회로의 미세스텝 분해능을 16, 128 미세스텝으로 설정하고, 모터를 0.01rps의 일정 속

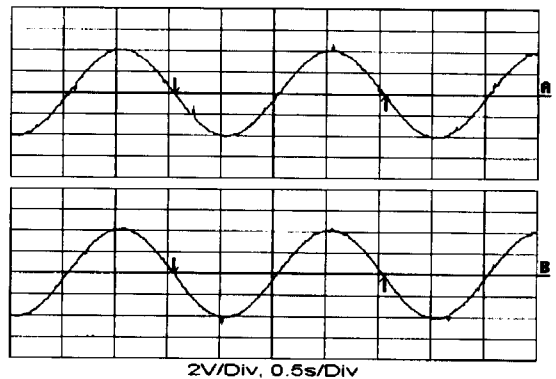


그림 4 전류 파형:전류 기준 파형(A), 상 전류(B), 회전속도:0.01rps
Fig. 4 Current waveforms:current reference waveform(A), phase current(B), speed:0.01rps

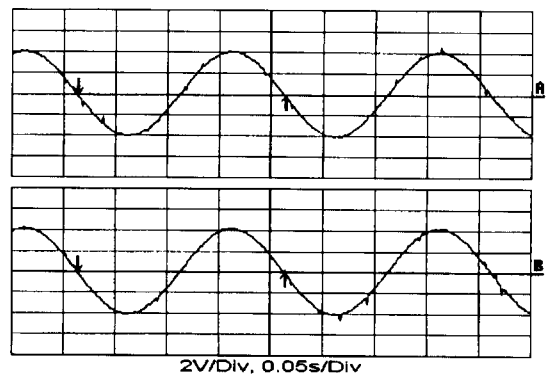


그림 5 전류 파형:전류 기준 파형(A), 상 전류(B), 회전속도:0.01rps
Fig. 5 Current waveforms:current reference waveform(A), phase current(B), speed:0.01rps

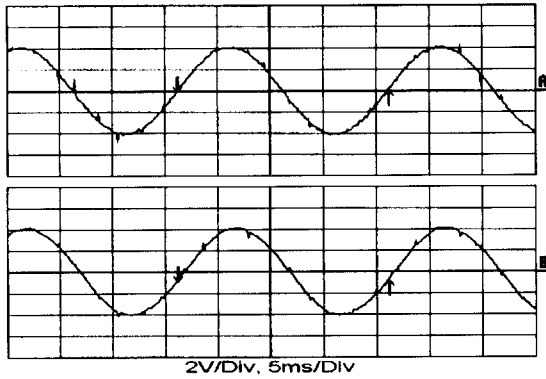


그림 6 전류 파형:전류 기준 파형 (A), 상 전류(B), 회전속도:1rps
 Fig. 6 Current waveforms:current reference waveform(A), phase current(B), speed: 1rps

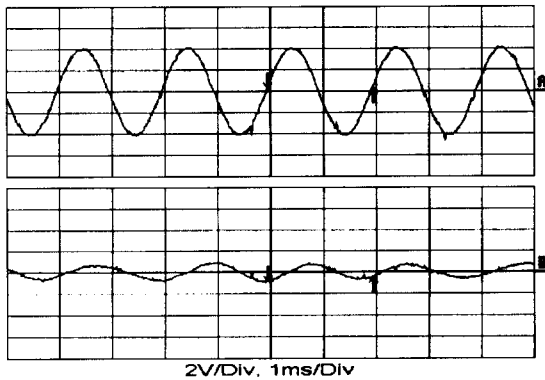


그림 7 전류 파형:전류 기준 파형(A), 상 전류(B), 회전속도:10rps
 Fig. 7 Current waveforms:current reference waveform(A), phase current(B), speed: 10rps

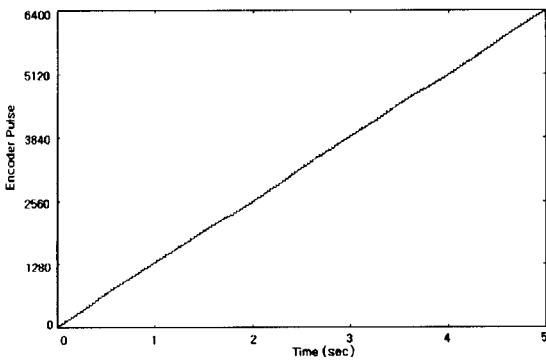


그림 8 미세스텝 구동시의 회전자의 위치변화 (회전속도:0.01rps,16미세스텝)
 Fig. 8 Position variations of rotor in microstepping mode (0.01rps, 16 microstep)

도로 회전시키면서 엔코더 출력 펄스를 계수하여 그린 것이다. 미세스텝 분해능을 16으로 설정하였을 때는 모터가 회전할 때 약간의 맥동이 나타나지만, 미세스텝 분해능을 128로 설정하였을 때는 속도 맥동없이 부드럽게 회전함을 알 수 있다. 그림 10은 미세스텝 구동회로에 의해 스텝모터를 128 미세스텝으로 구동할 때의 위치 오차를 측정하기 위해 1미세스텝 이동할 때마다 엔코더의 출력 펄스를 계수하여 그림으로 그린 것이다. 모터의 회전자가 정확하게 일정 미세스텝으로 회전하지는 않지만, 입력 펄스에 대해 일정하게 증분 동작을 함을 알 수 있다. 그림 11은 외국 상용제품(Parker Hannifin社, 모델명:OEM650)을 사용하여 그림 10과 같은 조건하에서 얻은 실험결과로, 그림 10과 비교해보면 본 연구에서 개발한 미세스텝 구동회로의 성능이 외국 상용제품에 뒤지지 않음을 알 수 있다.

그림 12는 전류 절약 모드에서의 전류 감소치를 현재 상 전류의 50%로 설정했을 때, 전류 절약 모드로 들어가는 순간의

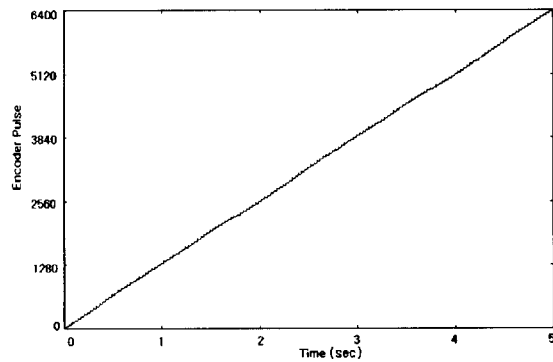


그림 9 미세스텝 구동시의 회전자의 위치변화 (회전속도 :0.01rps,128 미세스텝)
 Fig. 9 Position variations of rotor in microstepping mode (0.01rps, 128 microstep)

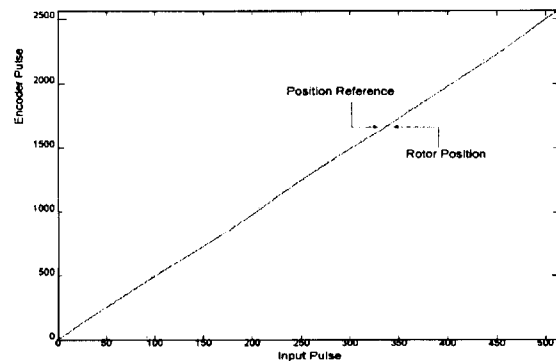


그림 10 미세스텝 구동시의 회전자의 위치변화(128 미세스텝)
 Fig. 10 Position variations of rotor in microstepping mode (128 microstep)

상 전류 기준 파형과 상 전류를 나타낸 것이다. 그림 13은 본 연구에서 개발한 미세스텝 구동회로로 VME백에 장착이 가능하다.

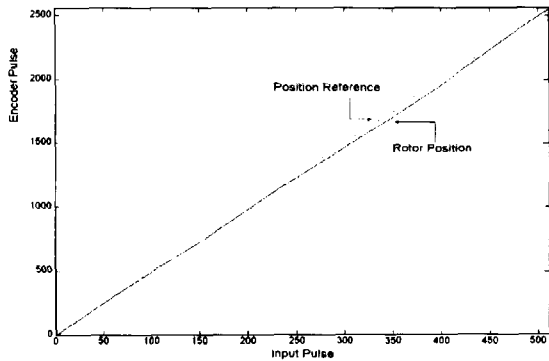


그림 11 미세스텝 구동시의 회전자의 위치변화
(128 미세스텝, 외제 상용제품)
Fig. 11 Position variations of rotor in microstepping mode
(128 microstep, foreign commercial product)

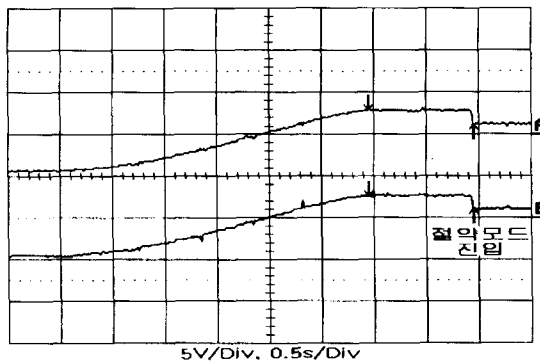


그림 12 전류 절약 모드에서의 전류파형
(A:전류 기준 파형, B:상 전류)
Fig. 12 Current waveforms in current saving mode
(A:current reference waveform, B:phase current)

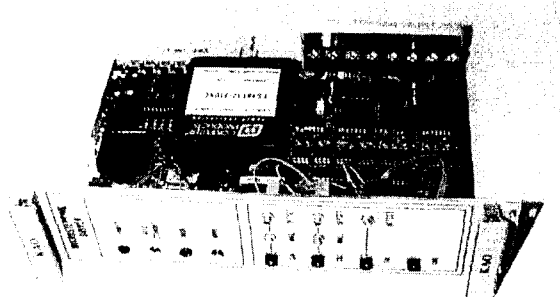


그림 13 제작된 미세스텝 구동회로
Fig. 13 Developed microstepping driver

5. 결 론

본 논문에서는 고정밀 미세스텝 구동이 가능하고 속도 맥동이 적으며, 적은 비용으로 제품화가 가능한 미세스텝 구동 회로와 이에 관련된 소프트웨어를 개발하였고 실험을 통하여 그 성능이 외제 상용제품과 비교하여 우수함을 검증하였다. 본 연구에서 개발한 미세스텝 구동회로는 모터의 1회전 스텝을 최대 128 미세스텝으로 분할하여 구동할 수 있는 미세스텝 분해능을 가지며, 마이크로컨트롤러를 내장하고 있어 모터가 정지해 있을 경우 모터의 상 전류를 일정하게 감소시켜 모터에서 발생하는 열을 줄여주는 전류 절약 모드를 소프트웨어로 지원하며, 미세스텝 구동회로의 상 전류 기준 파형과 미세스텝 분해능을 사용자가 설정할 수 있다. 특히 극저속 구동시에도 속도 맥동없이 미세스텝 구동이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] Takashi Kengo, Stepping motors and their microprocessor controls, Clarendon press, oxford, 1984.
- [2] T.R.Fredrikson, "Microstepping-a new control concept for rotary steep motors", proc. of 4th annual symposium on incremental motion control systems and devices, pp. HH-1, 1975.
- [3] Albert C. Leenhouts, "Compensation techniques in microstepping", proc. of 15th annual symposium on incremental motion control systems and devices, pp.175~180, 1986.
- [4] 유지훈, 이광운, 장원식, 망원경 구동 전자부 세부 설계 및 제작, 한국표준과학연구원 천문우주과학연구소, 1996.
- [5] Ned Mohan et al., Power electronics: converters, applications, and design, John Wiley & Sons, pp.368~370, 1989.
- [6] W.W. Chiang, "Optimal cogging torque compensation during microstepping under constant load", proc. of 16th annual symposium on incremental motion control systems and devices, pp.349~355, 1987.
- [7] Ned Mohan et al., Power electronics: converters, applications, and design, John Wiley & Sons, pp.91~98, 1989.
- [8] International Rectifier, Data Sheet, No. PD-6.011B.

〈 저 자 소 개 〉



이광운(李光雲)

1970년 12월 16일생. 1993년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중.



장원식(張源植)

1973년 9월 2일생. 1996년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정 재학중.



박정배(朴廷培)

1971년 5월 14일생. 1994년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중.



여형기(呂炯基)

1964년 7월 20일생. 1988년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990~1995년 한국국방연구원 근무. 현재 동 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중.



유지윤(柳志潤)

1955년 2월 25일생. 1977년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 일본 와세다대학 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1991년 창원대 공대 전기공학과 조교수. 현재 고려대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 편집위원.