

전류 제어를 가지는 고성능 5상 스텝 모터 구동 드라이버 설계

千旻洙[†], 金學珍^{*}, 權容寬^{**}, 姜碩熙^{***}

Design of High Performance 5 Phase Step Motor Drive System with Current Control Loop

Kwang-Su Chun, Hak-Jin Kim, Yong-Kwan Kwon and Suk-Hee Kang

요 약

본 논문은 전류 제어를 가지는 마이크로 스텝 제어를 통하여, 뛰어난 5상 스텝 모터 구동드라이버를 제안하였다. 시스템의 최소화 구성을 위하여 아날로그 전류 제어를 제안하였다. 이로 인해 가격 절감 효과를 가지고 왔으며, 기존 상용 제품과 비교하여 소음 및 발열의 감소도 확인하였다. 본 시스템을 위치 제어 로봇에 적용하여 위치 제어 적용 가능성 및 제안된 아날로그 제어기와 구동 드라이버의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes that 5 phase step motor drive system has high performance utilizing a micro step control with a current controller. Also this paper proposes an analog current controller to minimize size of the 5 phase step motor drive system. It has better advantages of cost and noise and heating than commercial products. As a result, Applying this system to position control robot the validity of suggested analog current controller and driver system is verified.

Key Words : 5 phase step motor, micro step control, current controller, position control robot

1. 서 론

스텝모터는 입력 펄스와 동기 하여 모터 권선의 여자전류를 순차적으로 인가 하면, 입력 펄스 한 개에 고정자의 기계적인 각도만큼 회전 하는 모터이다. 한 개의 입력 펄스에 대하여 회전자는 한 스텝만 기계적으로 이동하므로, 개루프(Open loop control) 제어 형태로 널리 사용된다^[1].

스텝 모터는 다른 모터와 비교하여 정지 시 매우 큰 유지 토크(Holding torque)를 가지며, 기동 및 정역 운전의 응답 특성이 우수하다. 그리고 직류 모터와는 달리 브러쉬를 가지고 있지 않고, 구동 회로 구성이 간단하여 저가 시스템 구성의 장점으로 산업용 기기에서 널리 사용 되고 있다.

그러나 일반적인 스텝 모터 구동 방식은 기계적으로 정해진 스텝 각 보다 미세한 각도의 운전이 불가능 하며, 고속에서는 토크의 현저한 저하로 인해 탈조가 쉽게 발생 하고, 저속에서는 많은 진동 및 공진 현상이 발생하게 되는 단점이 있다^[1~3].

이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 1970년대 중반부터 마이크로 스텝 제어 방식이 제안되었다. 마이크로 스텝 제어란, 상 여자 전류 크기를 제어하여 기계

[†]교신저자 : 정희원, (주)다사테크 부설연구소 주임연구원

E-mail : chunbig@dasatech.co.kr

^{*}정희원, (주)다사테크 부설연구소 수석연구원

^{**}정희원, (주)다사테크 부설연구소 연구소장

^{***}정희원, (주)다사테크 대표이사

접수일자 : 2006. 7. 26

1차 심사 : 2006. 8. 15

2차 심사 : 2006. 9. 4

심사완료 : 2006. 9. 8

적으로 정해진 각도 보다 미세한 각도의 운전이 가능하게 하여, 그에 따른 위치 정밀도 향상, 속도 리플 감소, 공진현상 등의 단점이 최소화되며, 운전 속도 및 최대 토크 증가 등의 성능 향상을 가지고 온다^[2].

일반적으로 사용 되어지는 상 여자 시점 변경을 이용한 마이크로 스텝 제어 방식은, 상 여자 시점에 따라 발생 되는 상전류를 이용하는 오픈 루프 형태의 전류 제어방식이며, 정확한 전류 제어가 되지 않으므로 정확한 토크 제어가 불가능 하다^[3]. 그리고 스텝 모터의 단점인 발열 및 소음등의 단점은 완전히 해결하지 못 하였다.

본 논문에서는 이와 같은 단점을 보완하고자, 5상 펜타곤 결선 방식의 스텝 모터 구동 드라이버에 전류 제어기를 포함 시키는 마이크로 스텝 운전 방식을 제안한다.

본 방식을 적용하여 전 속도 영역에서 정상적인 운전이 가능 하며, 뛰어난 위치 제어 특성과 소음 및 발열을 최소화 하여 안정적인 구동 드라이버를 구성하였다.

그리고 제안된 구동 드라이버를 실제 기구부(DTR : Desktop-Robot)에 적용하여 반복 위치 오차 측정을 통하여 뛰어난 위치 제어 성능을 검증하였다.

2. 5상 마이크로 스텝 제어

마이크로 스텝 제어란, 모터의 권선에 흐르는 전류량을 제어함으로써, 미세 각에 회전자가 유지 할 수 있는 토크를 만들어 주는 방식이다^[1].

5상 스텝 모터의 경우 각 상전류의 위상차가 $2\pi/5$ (72°)로 인가 해주어야 5상 정현파 전류를 인가 할 수 있다. 이 때, 모터에서 발생하는 모터의 토크 T_t 는, 각 상의 토크 $T_1 \sim T_5$ 의 합으로 구성 되며, 식(1)과 같이 표현 된다.

$$T_t = \sum_{i=1}^5 T_i \tag{1}$$

$$T_i = T_{hi} \sin\left(\theta + (i-1) * \frac{2\pi}{5}\right)$$

여기서, T_{hi} 는 각 상에 대한 유지 토크이다.

마이크로 스텝 제어 각의 한 스텝 각을 ϕ 라 하면, 식 (1)의 유지 토크는 식 (2)와 같이 표현 된다.

$$T_{hi} = K_T i_j \sin\left(\phi + (j-1) * \frac{2\pi}{5}\right) \tag{2}$$

여기서, K_T 는 토크상수이다.

식 (1)과 식 (2)에 의해 각 상에서 발생하는 토크의 평형점이 벡터 합으로 발생하며, 정해진 기계각 보다 미세한 마이크로 스텝 제어가 가능하다.

위 식과 같이 마이크로 스텝 제어를 하기 위해서는 정현파 형태의 상전류 파형을 모터에 인가하여, 모터 각 상의 토크 평형이 깨지지 않도록 제어해야 된다.

그러나 상 여자 시점 변경을 이용한 마이크로 스텝 제어의 상전류는, 유사 정현파 형태의 상전류 파형으로 제어가 된다. 이와 같은 상 여자 시점 변경을 이용한 마이크로 스텝 제어의 경우, 근본적인 정현파 전류 제어가 아니다^[3].

본 논문에서는 모터 상전류를 근본적인 정현파 전류 파형으로 제어하기 위하여, 각각의 모터 상전류를 폐루프(Feedback loop control) 제어를 통하여 보다 뛰어난 제어 성능을 확인하였다.

3. 제안된 제어방식

3.1 제안된 시스템 구성

이상에서 살펴 본 마이크로 스텝 제어를 하기 위해서는 정확한 전류 제어를 수행하여야 한다.

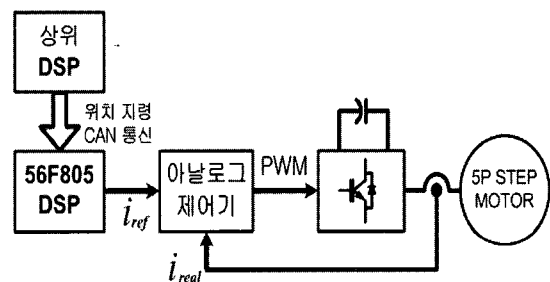


그림 1 시스템 구성도
Fig. 1 System configuration

그림 1은 본 논문에서 제안하는 전체 시스템 구성도이다.

본 시스템에서는 정확한 전류 제어를 위해 다음과 같은 시스템 구성을 가진다.

전체 시스템의 구성은 전류 지령을 만들어주는 CPU부, 전류 제어를 수행 하는 아날로그 제어기부, 파워 스위치부, DC-link부, 5상 스텝 모터로 구성된다.

상위 DSP는 위치 제어 시 CAN 통신으로 필요한 위치 지령을 주는 별도의 위치 제어기이다. 본 논문에서는 TI사의 TMS320VC33 DSP를 이용한 (주)다사테크사의 iM- Σ 모션 컨트롤러를 이용하였다.

전류 지령 값을 만들어주는 DSP는 FREESCALE사의 16BITS DSP인 DSP56F805를 사용하였다. 전류 지령은 D/A 컨버터인 TLC7225로부터 아날로그 전류 지령이 출력이 되며, 전류 제어기의 지령 값으로 사용된다.

본 시스템의 경우 DSP56F805 DSP 한 개로 4대의 5상 스텝 모터를 동시에 제어 할 수 있다.

전류 제어를 수행하는 아날로그 제어기는 Rail to Rail 동작이 가능한 TI사의 OP AMP인 TLV2374를 사용하였다.

전류 제어를 통해 나온 PWM 신호는 FET 구동드라이버인 IR2104로 입력되고, FET를 구동 시킨다. 이때 스위칭 주파수는 40[kHz]로 설정하였다.

모터의 상전류 검출은 4개의 션트 저항을 이용하였다.

모터 구동을 위한 DC-link 전원은 경제적인 측면을 고려하여, DC 48[V]로 구성하였다. 이 DC-link 전압은 높을수록 모터 구동에 유리하다.

3.2 전류(아날로그) 제어기 구성

본 논문의 전류 제어기는 OP AMP를 이용한 아날로그 제어기로 구성했다.

5상 스텝 모터 한 개를 제어하기 위해서는 5개의 전류 제어기가 필요하며, 만약 모든 전류 제어를 DSP가 부담하면, 연산량의 문제로 고가의 DSP를 이용해야 한다. 따라서 경제적인 측면을 고려하여 아날로그 전류제어기로 구성하였다.

그리고 DSP 자원을 최소화 하여 DSP 한 개로 동시에 4대의 모터 구동이 가능하다.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 전류 제어기의 블록도이다.

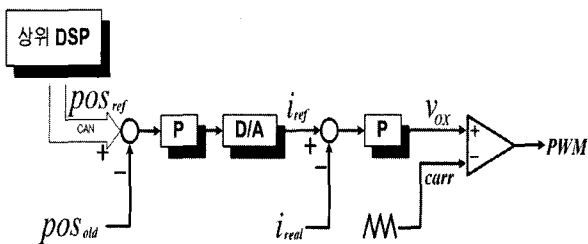


그림 2 전류 제어기 구성도
Fig. 2 Current control loop configuration

일반적인 스텝 모터의 위치 제어는 개루프 제어를 사용하며, 본 논문의 위치 제어 역시 개루프 제어를 수행하였다. 위치 지령에 따른 전류 지령 값은 DSP에서 생성하며, 이 전류 지령 값과 측정된 실제 전류와 비교 한다. 전류 오차 값은 P제어를 통하여, 제어 출력 값은 삼각파 캐리어와 비교되어 PWM을 발생 시켜준다.

전류 제어 시 P제어만을 사용 한 이유는, I제어를 동반 할 경우 아날로그 제어기의 특성 상 DC 오프셋 전압의 영향으로 제어기 출력에 영향을 주기 때문이다.

OP AMP를 이용한 아날로그 전류 제어기의 등가 회로도는 그림 3과 같다.

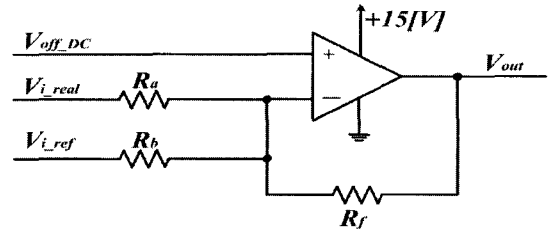


그림 3 아날로그 전류 제어기
Fig. 3 Analog current controller

그림 3에서 V_{i_ref} 는 제어기에 주어지는 전류 지령 값이며, V_{out} 는 제어기의 출력으로 삼각파 캐리어와 비교 하는 PWM의 기준 값으로 사용된다.

본 시스템의 아날로그 전원은 경제적인 측면을 고려하여 단방향 전원(DC +15[V])만을 이용 한다. 따라서 제어기의 기준 전위는 0[V]가 아니므로 V_{off_DC} 라는 오프셋 전압을 이용하여, 기준 전압(제어기 기준전압은 +7.5[V])을 설정하였다.

V_{i_real} 는 측정 된 상전류이며 R_a 와 R_f 의 저항 비로 P제어 게인을 설정하였다.

V_{i_ref} 는 D/A 컨버터에서 발생 하는 전류 지령이다. D/A 컨버터의 사용 전압(+10[V])은 제어기의 사용 전압(+15[V])과 범위가 다르다. 따라서 R_b 를 이용하여 제어 전압 사용 범위를 동일하게 하였다. V_{i_ref} 의 R_b 와 R_f 의 저항 비는 V_{i_real} 의 R_a 와 R_f 의 저항 비와 동일한 비율이 되도록 설정하였다.

V_{i_ref} 인 전류 지령 값은 DSP의 샘플링 시간에 따라 변화 되는 이산화(Discrete) 된 신호이다. 따라서 수동소자를 이용한 저역 통과 필터(Low pass filter)를 구성하여, 보다 선형적인 지령 값을 만들어 주며, 주파

수가 증가 시(모터 속도 증가 시) 상전류 지령 값의 감소 효과도 가져온다.

그림 3의 전류 제어기의 특성식은 식 (3)으로 나타낼 수 있다(단, R_a 와 R_b 는 같다고 함).

$$V_{out} = V_{cjt_DC} + \left\{ -(-V_{i_ref} - V_{cf_DC}) \left(\frac{R_f}{R_b} \right) - (V_{i_real} - V_{cf_DC}) \left(\frac{R_f}{R_a} \right) \right\} \\ = V_{cf_DC} + \left(\frac{R_f}{R_a} \right) \{ (V_{i_ref} + V_{cf_DC}) + (-V_{i_real} + V_{cf_DC}) \} \quad (3)$$

본 제어기는 OP AMP의 반전 단자를 이용한 가산 반전 증폭기로 동작을 한다. 따라서 제어기 출력이 반전이 되기 때문에 식 (3)과 같이 V_{i_ref} 을 반전입력시켜주었다.

모터 상전류는 모터 최고속도인 1500[rpm]에서는 약 1.2[kHz]가 된다. 스위칭 주파수는 40[kHz]이고, 전류 제어기의 대역폭(Band width)은 5[kHz]로 설정하였다.

V_{i_ref} 는 모터 최고속도에서의 상전류 주파수를 고려하여 약 2.2[kHz]의 차단 주파수를 가지는 저역 통과 필터를 적용하였다.

V_{out} 는 스위칭 주파수를 고려하여 차단 주파수가 약 40[kHz]인 저역 통과 필터를 적용하였다.

4. 전류 제어기 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 제어기의 타당성을 검증하기 위하여, 전력전자 회로 시뮬레이션 툴인 PSIM 6.0을 이용하였다.

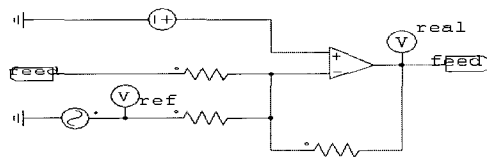


그림 4 제어기 시뮬레이션 회로
Fig. 4 Controller simulation circuit

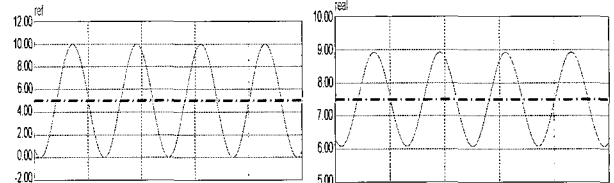
그림 4는 시뮬레이션을 위한 아날로그 전류 제어기의 등가 회로도 이다.

그림 5는 그림 4의 시뮬레이션 결과이다.

그림 5 (a)의 지령 값은 0~10[V] 출력을 하는 D/A 컨버터의 등가화 출력이다. 0~10[V]는 모터 상전류의 -1.5~+1.5[A]의 전류에 해당한다.

그림 5 (b)의 결과 값은 0.5[V]당 모터 상전류의 0.5[A]에 해당하는 값이며, 이 결과 값은 실제 시스템에서는 삼각파 캐리어와 비교 하는 PWM의 기준 값으로 사용된다.

즉, DA 컨버터를 이용 0~10[V]의 정현파 입력 시, 모터 상전류는 -1.5~+1.5[A]의 정현파로 제어 가능하다고 볼 수 있다.



(a) 지령값, 2[V/div], 1[msec/div] (b) 결과 값, 1[V/div], 1[msec/div]
(a) Controller Reference (b) Controller Result

그림 5 시뮬레이션 결과 파형 (모터 속도 1050[rpm]으로 가정)
Fig. 5 Simulation result waveforms, Motor speed 1050[rpm]

5. 실험 결과

본 논문에서 제안한 방식의 타당성을 검증하기 위하여, 5상 스텝 모터는 다마가와(TAMAGAWA)사의 TS3624N2E4를 사용 했으며, 사양은 표 1과 같다.

표 1 모터 사양
Table 1 Motor specification

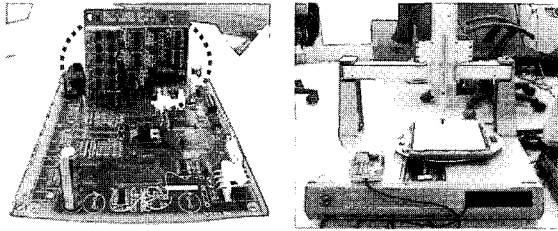
상 수	5[phase]
스텝각	0.72°
정격 전류	1.5[A]
유지 토크	0.8[N · m]
회전자 관성 모멘트	220[g · cm ²]
총 중량	700[g]

모터 구동을 위해, DC 48[V]의 전압을 인가하고, 마이크로 스텝 각은 128분주를 했다.

그림 6은 본 논문의 타당성의 입증하기 위해 제작한 PCB 및 적용한 기구부이다.

그림 6 (a)에서 점선으로 표시된 부분이 아날로그 제어기와 파워 스위치부를 포함 하는 것이며, 모터 당 한 장 씩 추가 실장이 가능하다.

그림 6 (b)의 기구부는 DTR로써 위치 제어를 통한 조립, 실링, 검사 등을 하는 자동화 로봇이다.



(a) 구동 PCB (b) DTR 적용
 (a) Motor drive PCB (b) DTR application

그림 6 제작된 5상 스텝 드라이버
 Fig. 6 Developed 5 phase step motor drive

그림 7은 본 논문에서 제안한 방식의 타당성을 검증하기 위해 기존 상용제품(일본)의 상전류 측정 파형이다. 상용제품은 상 여자 시점 변경을 이용한 마이크로 스텝 제어를 수행하며, 상전류는 유사 정현파 형태를 나타낸다. 이와 같은 유사 정현파 구동 시에는 토크의 맥동 및 소음, 모터의 발열등의 문제점이 발생한다.

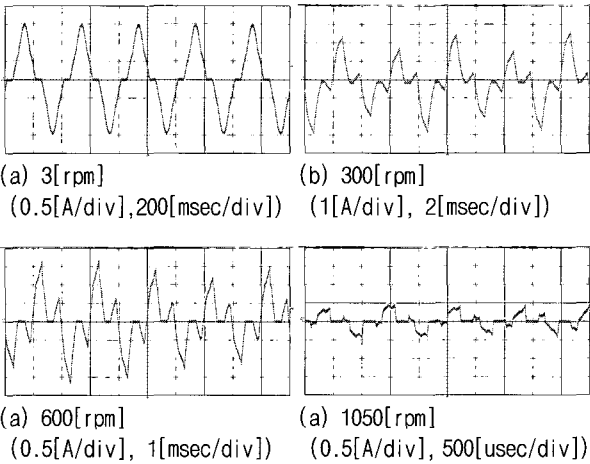
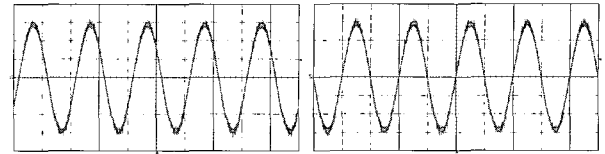


그림 7 상용제품에 의한 상전류 파형
 Fig. 7 Phase current waveforms of the commercial product

그림 8~11은 본 논문에서 제안한 시스템을 이용하여 속도에 따른 모터 상전류의 측정 파형이다. 속도별 상전류 파형은 모터 단품 시와 DTR 적용 시 각 두 번 씩 측정하였다. 측정에 사용된 계측기는 LECROY사의 WAVERUNNER 6100인 오실로스코프를 이용하였다.

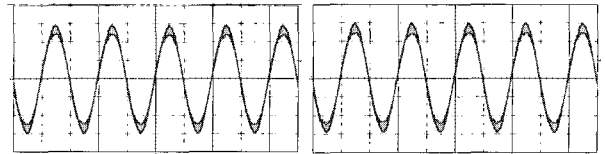
본 논문에서 제안한 기법 적용 시 그림 8~11에서 볼 수 있듯이 모터 상전류는 정현파이다. 이와 같이 정현파 형태로 상전류를 제어 하면 식 (1)에 의해 모터의 토크도 제어 가능하다.



(a) 모터 단품 (b) DTR 적용
 (a) Single motor (b) DTR application

그림 8 상전류 파형, 모터 속도 3[rpm]
 (0.5[A/div], 200[msec/div])

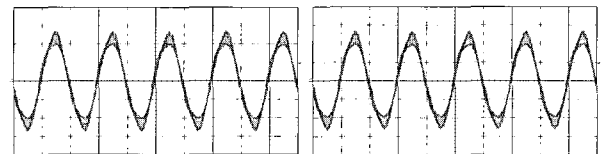
Fig. 8 Phase current waveforms, Motor speed 150[rpm]



(a) 모터 단품 (b) DTR 적용
 (a) Single motor (b) DTR application

그림 9 상전류 파형, 모터 속도 300[rpm]
 (0.5[A/div], 2[msec/div])

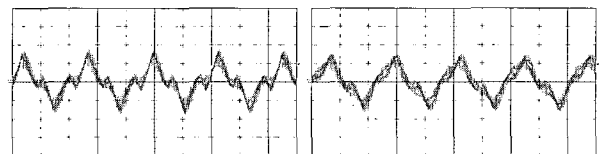
Fig. 9 Phase current waveforms, Motor speed 450[rpm]



(a) 모터 단품 (b) DTR 적용
 (a) Single motor (b) DTR application

그림 10 상전류 파형, 모터 속도 600[rpm]
 (0.5[A/div], 1[msec/div])

Fig. 10 Phase current waveforms, Motor speed 600[rpm]



(a) 모터 단품 (b) DTR 적용
 (a) Single motor (b) DTR application

그림 11 상전류 파형, 모터 속도 1050[rpm]
 (0.5[A/div], 500[usec/div])

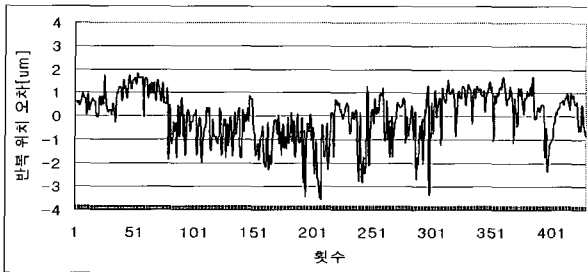
Fig. 11 Phase current waveforms, Motor speed 1050[rpm]

속도 증가 시 그림 11과 같이 정현파의 왜곡이 발생되면, PWM은 과변조 구간 운전을 하는 것이다. 과변조 운전은 일반적으로 DC-link 전압이 부족하여 나타나는 현상이다. 이상적인 경우 DC-link 전압은 모터 최고 속도와 비례하나, 경제적인 문제와 모터의 절연

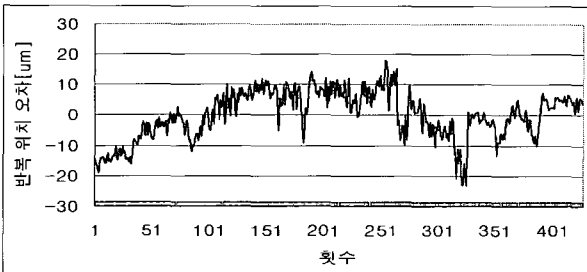
등급의 문제로, 본 시스템에서는 DC +48[V]로 설정하였다. 이는 모터의 최고 속도까지 정상 운전이 가능한 전압 범위이다.

그림 12는 그림 6(b)의 DTR에 제안된 시스템을 적용 하여 반복 위치 오차를 측정한 결과이다. 반복 위치 오차란, 동일한 위치 지령 값 입력 시, 실제 기구부의 위치 오차를 의미한다. 이는 본 시스템과 같이 개루프 위치 제어 수행에 있어 중요한 시험 항목이다.

반복 위치 오차 측정은 KEYENCE사의 LK-G3001 모델을 이용 하였으며, 계측기의 위치 측정 범위는 $\pm 0.1[\mu m]$ 이다.



(a) 볼스크류 DTR의 반복 위치 오차
(a) Repetition position error of ballscrew DTR



(b) 벨트 DTR의 반복 위치 오차
(b) Repetition position error of belt DTR

그림 12 DTR 적용 시 반복 위치 오차
Fig. 12 Repetition position error of DTR application

그림 12(a)의 조건은 300[rpm]의 속도로 모터 구동을 하였고, 피치 간격이 10[mm]인 볼스크류 타입의 DTR에서 약 430회 반복 위치 오차를 측정하였으며, 그림 12(b)의 조건은 300[rpm]의 속도로 모터 구동을 하며, 모터와 직결된 벨트형 타입의 DTR에서 약 430회 반복위치 오차를 측정하였다.

그림 12(a)의 볼스크류 DTR의 반복 위치 오차 측정 결과는 제안된 시스템 적용 시 반복 위치 오차가 $\pm 4[\mu m]$ 정도이다.

그림 12(b)의 반복위치 오차 측정 결과는 제안된 시스템 적용 시 반복 위치 오차가 $\pm 25[\mu m]$ 정도이다.

두 방식에서 반복 위치 오차의 차이는 볼스크류 DTR의 경우 볼스크류의 피치 간격 유격이 적용되기 때문이다.

그림 13은 운전 중인 모터 프레임의 표면 온도의 측정 결과이다. 온도 측정 장비는 HIOKI사의 3416 모델로 비접촉식 복사 온도계이다. 온도 측정은 30[분]마다 7시간 동안 14회 실시 하였으며, 온도 측정 시 상용 제품과 제안된 기법은 운전 조건 및 운전 환경이 동일하다.

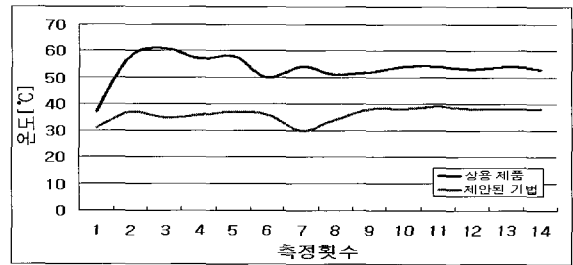
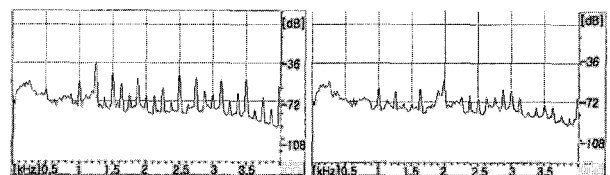


그림 13 모터 프레임 표면 온도
Fig. 13 Temperature of motor frame

그림 13에서 볼 수 있듯이 제안된 기법의 모터 프레임 표면 온도가 약 15[℃] 이상 낮다. 이는 상 여자 시점 변경을 이용한 마이크로 스탭 제어 방식은 정확한 전류 제어를 하지 못하며, 피크성 전류로 인해 열이 발생하기 때문이다.

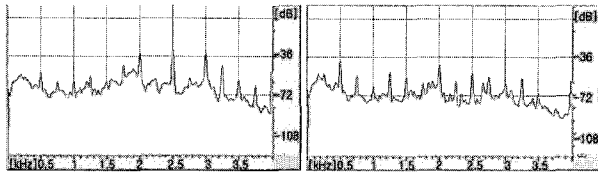
그림 14~17은 상용 제품과 제안된 기법 적용 시 속도에 따른 모터 단품에서 발생 하는 소음의 비교 결과 파형이다. 소음 측정은 AKG사의 C400BL를 이용하였다. 소음 측정은 상용제품과 제안된 기법의 소음을 동일한 주파수 영역에서의 피크 성분만 비교하였다.

그림 14와 15에서 볼 수 있듯이 저속도 구간에서는 측정영역에서 약 20[dB] 이상의 소음 저감 효과를 확인 할 수 있다.



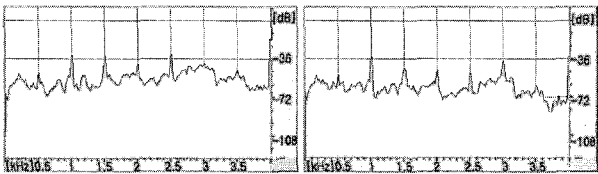
(a) 상용 제품 (b) 제안된 기법
(a) The commercial product (b) The proposed technique

그림 14 소음 파형, 모터 속도 150[rpm]
Fig. 14 Noise spectrum waveforms, Motor speed 150[rpm]



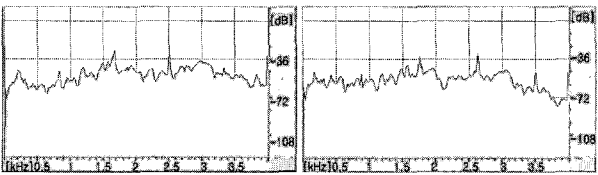
(a) 상용 제품 (b) 제안된 기법
(a) The commercial product (b) The proposed technique

그림 15 소음 파형, 모터 속도 300[rpm]
Fig. 15 Noise spectrum waveforms, Motor speed 300[rpm]



(a) 상용 제품 (b) 제안된 기법
(a) The commercial product (b) The proposed technique

그림 16 소음 파형, 모터 속도 600[rpm]
Fig. 16 Noise spectrum waveforms, Motor speed 600[rpm]



(a) 상용 제품 (b) 제안된 기법
(a) The commercial product (b) The proposed technique

그림 17 소음 파형, 모터 속도 1050[rpm]
Fig. 17 Noise spectrum waveforms, Motor speed 1050[rpm]

6. 결 론

본 논문에서 제안한 전류제어를 가지는 고성능 5상 스텝 모터 구동 드라이버의 타당성 위하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다.

제안한 방식은 아날로그 제어를 이용 하여 DSP 한 개로 4대의 모터를 구동 할 수 있는 경제적인 시스템을 개발하였다.

본 논문에서 제안한 방식은 실험을 통하여 기존 상용 제품보다 우수한 특성을 검증 하였으며, 약 15[°C] 이상의 발열량 감소 및 약 20[dB]정도의 소음 감소 효과도 확인하였다. 그리고 DTR에 적용하여 위치 제어 적용 가능 신뢰성 확보도 하였다.

그러나 본 시스템은 모터 속도에 따른 전류 지령 값

이 저역 통과 필터에 의해 수동적으로 변경이 되는 단점이 있다. 향후, 모터 속도에 따라 전류 지령 값이 능동적으로 변화하는 제어기 설계를 할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 박철순, 지대영, 안호균, 박승규, "CPLD를 이용한 5상 스텝모터의 마이크로스텝 구동 성능향상에 관한 연구", 전력전자 추계 학술대회 논문집, pp7-9, 1999.11.
- [2] 김명현, 김태엽, 안호균, 박승규, "5상 스텝핑 모터의 마이크로스텝 구동을 위한 저가형 전용 칩 및 제어시스템 설계", 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 1, pp. 88-95, 2004. 2.
- [3] 이광운, 장원식, 박정배, 여형기, 유지윤, "고성능 미세스텝 구동회로의 개발", 전력전자학회 논문지, Vol. 2, No. 3, pp37-43, 1997.09.

저 자 소 개



천광수(千僑洙)

2003년 수원대 전기공학과 졸업. 2005년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2005년~현재 (주)다사테크 부설연구소 주임연구원.



김학진(金學珍)

1992년 고려대 전기공학과 졸업. 1992년~1998년 (주)LG산전 로봇 설계팀. 1998년~현재 (주)다사테크 부설연구소 수석연구원.



권용관(權容寬)

1987년 성균관대 전기공학과 졸업(석사). 1987년~1989년 (주)LG전자 중앙연구소 주임연구원. 1989년~2004년 (주)LG산전 중앙연구소 책임연구원. 2004년~현재 (주)다사테크 부설연구소 연구소장.



강석희(姜碩熙)

1987년 서울대 전기공학과 졸업. 1987년~1995년 (주)LG산전 중앙연구소 로봇연구팀장. 1995년~1998년 (주)LG산전 로봇사업팀 설계팀장. 1998년~현재 (주)다사테크 대표이사.