

2 상 하이브리드형 스텝 모터의 미세 스텝 구동에 관한 연구  
 ( A study on a Microstepping drive for 2 Phase Hybrid-type step motors )

오 권 순 학 김 권 호 김 광 배  
 ( S. H. Kwon , K.H. Kim , K.B. Kim )

한국 과학 기술 연구원 제어 시스템 연구실  
 ( Control Systems Laboratory, KIST )

In this paper we addressed the basic concept of microstepping, analyzed the combined effect of the motor detent torque and the current profile, and implemented a microstepping drive system using an one-chip microprocessor, power MOSFET's, and a 1.8 degree bifilar-wound hybrid-type step motor excited by a bipolar drive. Experimental results show that microstepping produces greater resolution, eliminates resonant step loss, and reduces motor vibrations.

1. 서 론

스텝 모터는 구동이 간단하고, 개회로 제어에 의한 위치 제어가 가능하며, 위치 오차가 누적되지 않을 뿐만 아니라 경제적이라는 점에 의하여 프린터, 디스크 드라이버 등의 컴퓨터 주변 기기를 비롯한 각종 자동화기에 널리 사용되어 왔다. 그러나 스텝모터는 구조상으로 결정되는 스텝각으로 인하여 정밀 위치 제어가 곤란하고, 저속 및 중속 영역에서 동작이 곤란한 공진영역이 존재하며, 또한 최대응답 주파수가 제한되는 등의 문제점으로 인하여 그 사용 범위가 제한되어 왔다. 그러면 중 1970년대 중반이후 디스크 드라이버, X-Y 프로터, 로봇트 등의 분야에서 요구되는 고정밀 위치 제어를 충족시키기 위하여 분해능이 높은 새로운 스텝 모터의 개발 노력이 있었으나 이는 기술적, 경제적 이유로 크게 발전하지 못하였다. 반면 원하는 위치 (Detent position)에 의하여 결정되는 전류의 크기를 조절하여 한 스텝각을 원하는 미세 스텝각으로 분할하여 구동함으로써, 위치 정밀도 향상, 속도 리플(Ripple)의 감소, 공진 현상 개선과 더불어 운전 속도 및 토크의 증가 등의 성능 향상을 가져온 미세 스텝 구동에 대한 연구는 1975년 Fredriksen에 의하여 시작된 이래 계속하여 발전을 거듭하여 왔다.

본 연구에서는 이러한 미세 스텝 구동 시스템의 기본 동작 원리를 설명하고, 하이브리드 스텝 모터의 수학적 모델에 근거하여 미세 스텝 구동에 필요한 기준 전류 파형 (Current profile)을 구하였으며, 또한 위치 정밀도 향상을 위하여 디텐(Detent) 토크 성분을 고려한 경우의 미세 스텝 구동을 위한 기준 전류 파형을 구하였다. 그리고 이를 바탕으로 원칩 마이크로프로

세서 (One-chip microprocessor)와 전력 MOSFET 및 기타 소자를 사용하여 미세 스텝 구동 시스템을 구성하였으며, 구성된 시스템을 스텝각이 1.8°인 하이브리드 스텝 모터에 적용하여 실험을 수행하고 그 결과를 표시하였다.

2. 모델링 및 기준 전류 파형

미세 스텝의 기본 개념은 모터축의 미세 구간 회전을 위하여 전스텝(Full step)상전류를 그림 1과 같이 미세 구간의 상전류로 변환시켜 구동하는 방식이다.

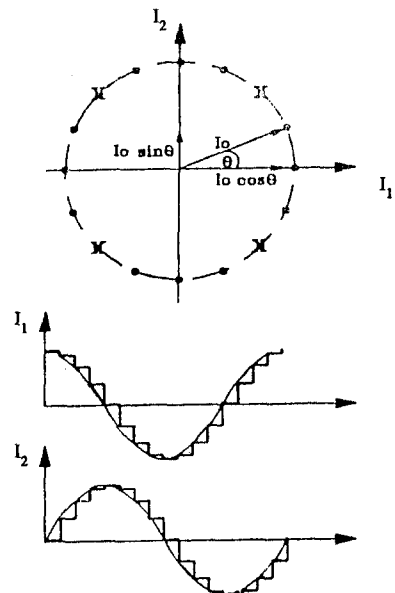


그림 1. 미세 스텝 구동 방식의 기준 전류 파형

하이브리드 스텝 모터의 발생 토크는 각 상에 흐르는 전류 ( $I_1, I_2$ )와 전기각 ( $\theta_e$ )의 함수로 아래와 같이 나타내진다.

$$T(\theta_e, I_1, I_2) = T_1(\theta_e, I_1) + T_2(\theta_e, I_2) + T_d(\theta_e) \quad (1)$$

여기서  $T_1$ 과  $T_2$ 는 각각 1상과 2상 전류에 의하여 발생되는 토크를 나타내고,  $T_d$ 는 디텐(Detent) 토크를 나타낸다. 이 모터 토크는 마찰과 히스테리시스(Friction and hysteresis) 토크 및 부하(Load) 토크( $T_L$ )에 대응되며, 마찰과 히스테리시스 토크의 영향은 평형점 주위에 제어 불능 구간(Dead band)을 초래하여 위치 오차를 발생시키는 원인이 되며, 부하 토크는 평형점을 이동시키는 효과를 나타낸다. 디텐 토크는 8차 이상의 고조파(Harmonics) 성분은 무시하고 4차 고조파 성분만을 포함하며,  $T_1$ 과  $T_2$ 가 정현적(Sinusoidal)이라고 가정하면  $T_1, T_2, T_d$ 는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} T_1 &= -T_{H1} \sin \theta_e \\ T_2 &= T_{H2} \cos \theta_e \\ T_d &= -K_d \sin 4\theta_e \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} T_{H1} &= K_1 I_1 - K_s I_1^3 \\ T_{H2} &= K_1 I_2 - K_s I_2^3 \end{aligned} \quad (3)$$

위에서  $T_{H1}$ 과  $T_{H2}$ 는 1상과 2상 각각의 홀딩(Holding) 토크이며,  $K_d$ 는 디텐 토크이다. 또한  $K_1$ 는 토크 상수로 전류가 영인 점에서의 경사( $\frac{dT_H}{dI}$ )이다.  $K_s$ 는 전류가 증가함에 따라 나타나는 홀딩 토크의 왜곡을 근사화시키는 자기포화 성분(Saturation factor)이다. 토크와 더불어 미세 스텝 구동에 있어서 중요한 함수중의 하나가 홀딩 토크의 강성(Stiffness)인데, 이는 모터축의 회전각에 대한 토크의 변화율을 나타내며, 모터축의 위치 오차에 직접적 영향을 주는 함수이다. 강성은 아래와 같이 정의된다.

$$S(\theta_e, I_1, I_2) = \frac{\partial T}{\partial \theta_e} \quad (4)$$

따라서 스텝 모터의 강성은 식(1)과 식(4)로부터 아래와 같이 구해진다.

$$S(\theta_e, I_1, I_2) = S_1(\theta_e, I_1) + S_2(\theta_e, I_2) + S_d(\theta_e) \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} S_1 &= -T_{H1} \cos \theta_e \\ S_2 &= -T_{H2} \sin \theta_e \\ S_d &= -4K_d \cos 4\theta_e \end{aligned} \quad (6)$$

(1) 이상적인 조건하에서의 기준 전류 파형

스텝 모터에 대한 조건이 이상적인 경우, 즉

$$K_s = K_d = T_f = T_L = 0$$

인 경우에 대한 각 상의 전류를 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$I_1 = I_R \cos \phi \quad (7)$$

$$I_2 = I_R \sin \phi \quad (8)$$

여기서

$$I_R = \text{정격 전류}$$

$$\phi = \text{위치 지령치의 전기각}$$

이때의 토크 및 강성은 아래와 같다.

$$T = -T_{H0} \sin(\theta_e - \phi) \quad (9)$$

$$S = -T_{H0} \cos(\theta_e - \phi) \quad (10)$$

여기서

$$T_{H0} = K_1 I_R \quad (11)$$

이와 같이 이상적인 조건하에서는 토크와 강성 파형(Torque and stiffness profile)은 정현적이고 모터축의 평형점은 위치 지령치와 같게 된다. 강성은 평형점에서 최대값  $K_1 I_R$ 을 갖게 된다. 따라서 위치 지령치 전기각의 한 주기( $2\pi$ )를 원하는 미세 스텝수(예: 4, 8, 16, 32, 64, 128)로 나눔에 따라 미세 스텝의 정도(Resolution)가 결정된다. 그러나 모터에 자기포화나 디텐 토크, 히스테리시스 및 부하 토크가 존재하는 경우에는 모터축의 평형점과 위치 지령치는 일치하지 않아 위치 오차가 발생하게 된다.

(2) 디텐 토크(Detent torque)를 고려한 경우의 전류 파형

식(1) 및 식(2)로 나타내지는 스텝 모터에 대하여 4차 고조파 성분 디텐 토크를 제외한  $K_s, T_f$  및  $T_L$ 을 무시한 조건에서 스텝 모터에 발생되는 토크 및 강성은 아래와 같이 표현된다.

$$T = -K_1 I_1 \sin \theta_e + K_1 I_2 \cos \theta_e - K_d \sin 4\theta_e \quad (12)$$

$$S = -K_1 I_1 \cos \theta_e - K_1 I_2 \sin \theta_e - 4 K_d \cos 4\theta_e \quad (13)$$

4차 고조파 성분 디텐 토크에 의한 영향을 제거하기 위한 기준 전류 파형을 아래와 같이 설정할 수 있다.

$$I_1 = B_1 \cos \phi - B_3 \cos 3\phi + B_5 \cos 5\phi \quad (14)$$

$$I_2 = B_1 \sin \phi + B_3 \sin 3\phi + B_5 \sin 5\phi \quad (15)$$

식 (12)와 식 (13)으로부터 모터 토크는

$$T = -K_1 B_1 \sin(\theta_e - \phi) + K_1 B_3 \sin(3\phi + \theta_e) + K_1 B_5 \sin(5\phi - \theta_e) - K_d \sin 4\theta_e \quad (16)$$

$$S = -K_1 B_1 \cos(\theta_e - \phi) + K_1 B_3 \cos(3\phi + \theta_e) - K_1 B_5 \cos(5\phi - \theta_e) - K_d \cos 4\theta_e \quad (17)$$

이다. 부하가 없는 경우에 위치 오차를 배제하기 위하여는 일정한 토크 강성을 갖는 것이 바람직하다. 즉,  $\theta_e = \phi$  에서 토크 T는 식 (18)을 만족해야 한다.

$$T = (K_1 B_3 + K_1 B_5 - K_d) \sin 4\phi = 0 \quad (18)$$

그리고 토크 강성 S는 식 (19)를 만족해야 한다.

$$S = -K_1 B_1 + (K_1 B_3 - K_1 B_5 - 4 K_d) \cos 4\phi = \text{Constant} < 0 \quad (19)$$

위의 식 (18)과 (19)로부터  $I_1$ 과  $I_2$ 를 구하면 아래와 같다.

$$I_1 = B_1 \cos \phi - \frac{K_d}{2 K_1} (5 \cos 3\phi + 3 \cos 5\phi) \quad (20)$$

$$I_2 = B_1 \sin \phi - \frac{K_d}{2 K_1} (-5 \sin 3\phi + 3 \sin 5\phi) \quad (21)$$

이때 모터에서의 총 전력 소비에 의하여 모터 전류는 제한되게 되는데, 각 상의 전류는 아래의 관계식을 만족하게 된다.

$$I_1^2 + I_2^2 \leq I_{\max}^2 \quad (22)$$

여기서  $I_{\max}$ 는 단상 운전시의 최대 전류

식 (20), (21) 및 (22)로부터 식 (23)이 만족하게 된다.

$$\text{Max}(I_1^2 + I_2^2) = (B_1 + 4 \frac{|K_d|}{K_1})^2 \leq I_{\max}^2 \quad (23)$$

따라서 모터 전류의 기본파 성분의 크기  $B_1$ 은 다음과 같이 제한된다.

$$B_1 \leq I_{\max} - 4 \frac{|K_d|}{K_1} \quad (24)$$

### 3. 시스템 구성

미세 스텝 구동시 위치 오차에 영향을 미치는 요인으로는 전류 양자화 효과 (Current quantization effect), 불일치된 상전류 (Unmatched phase current), 영 근방에서의 전류 (Current near zero), 디텐 토크 (Detent torque), 토크-전류간의 비선형성 (Torque-current nonlinearity), 부하 토크 (Load torque) 등이 있다. 따라서 스텝 모터를 미세 스텝 모드로 구동함에 있어서 가장 중요한 요소중의 하나는 스텝 모터의 각 상에 흐르는 전류의 제어라 할 수 있다. 본 연구에서는 미세 스텝 구동 시스템을 마이크로프로세서 및 MOSFET를 이용하여 실현하였으며, 구현된 미세 스텝 구동 시스템의 기본 구성은 기준 신호 발생부, 전류 제어부, 구동부, 전류 검출부 및 전원부로 이루어지며 그림 2는 전체 시스템의 블록 선도를 나타낸다.

기준 전류 신호 발생부는 원하는 스텝값 및 속도에 따라 기준 전류를 발생시키는 역할을 담당하며, 원 칩 마이크로프로세서 (One-chip microprocessor, Intel사의 8751 H)와 EPROM으로 구성된다. 전류 제어부는 전류 검출부로부터 귀환되는 전류 신호와 기준 전류를 이용하여 히스테리시스(Hysteresis) 전류 제어 방식에 의하여 전류 제어를 수행한다. 구동부는 2상 스텝 모터를 양극(Bipolar) 구동시키기 위하여 H형으로 MOSFET를 사용하여 실현하였다. 또한 전원부는 제어용 전원과 모터용 전원부로 구성되어 있다.

소프트웨어는 마이크로프로세서가 미세 스텝각과 기준 속도를 각각 포트 1과 외부 인터럽트 0 (Zero)을 통하여 받아 포트 0으로 기준 전류가 저장되어 있는 EPROM 주소를 출력하는 기능을 수행하며, 이들은 마이크로프로세서가 내장하고 있는 4 Kbytes의 EPROM에 저장된다. 그림 3은 전체 소프트웨어의 흐름 선도를 나타낸다.

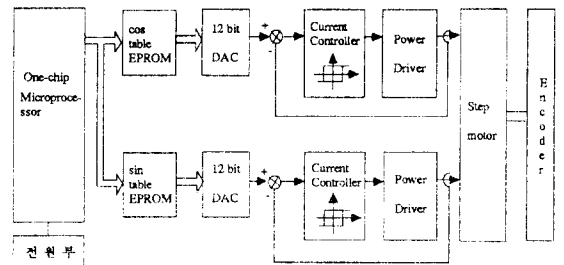


그림 2 전체 시스템 블록 선도

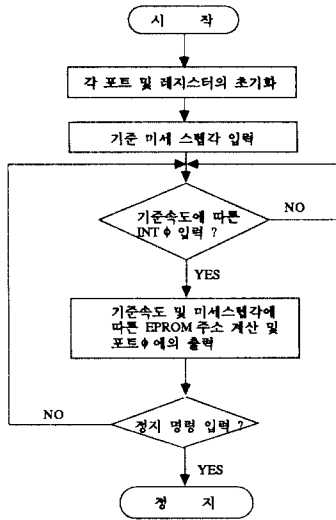


그림 3. 미세 스텝 구동용 소프트웨어 흐름 선도

#### 4. 실험 및 검토

본 연구의 실험 대상 모터는 Japan servo (주)의 KP6BM2로서 제반 사양은 표 1과 같다.

표 1. 실험 대상 모터의 제반 사양

|       |                       |
|-------|-----------------------|
| 스텝각   | 1.8 Degree/step       |
| 상 수   | 2 상                   |
| 정격전압  | 5.4 V                 |
| 정격전류  | 1.5 A/Phase           |
| 권선저항  | 3.6 Ohm/phase         |
| 인덕턴스  | 9 mH/phase            |
| 홀딩토크  | 6.0 Kg cm             |
| 디텐토크  | 180 g cm              |
| 관성모멘트 | 230 g cm <sup>2</sup> |

그림 4는 전스텝 구동 방식 및 1/32 미세 스텝 구동 방식의 실제 전류 파형이며, 그림 5는 각각의 회전자 위치 파형을 나타낸다. 이 그림에서 1/32 미세 스텝에서도 진동 현상 없이 거의 직선 운동을 하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 1/128 미세 스텝 구동 방식에서 실제 전류가 정현파인 경우와 디텐 토크를 고려한 경우의 전류 파형이며, 그림 7은 각각의 회전자 위치 파형을 나타낸다. 이 그림에서 디텐 토크를 고려한 경우의 위치 정밀도가 높음을 알 수 있다.

그림 8에는 실험 대상 모터의 공진 주파수인 120 PPS에서

의 실제 전류와 회전자가 공진하고 있는 모습을 나타낸다. 같은 주파수에서 1/4 미세 스텝 구동을 할 경우의 실제 전류 파형과 회전자 위치 파형은 그림 9와 같으며, 이 그림으로부터 공진 현상이 제거되었음을 알 수 있다.

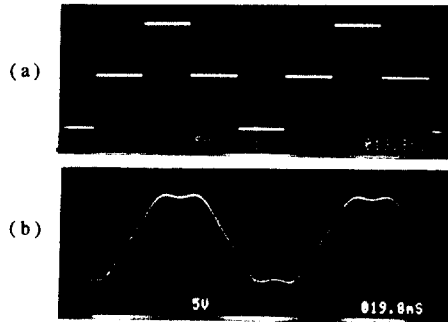


그림 4. 전스텝(a) 및 1/32 미세 스텝 구동시(b)의 전류 파형

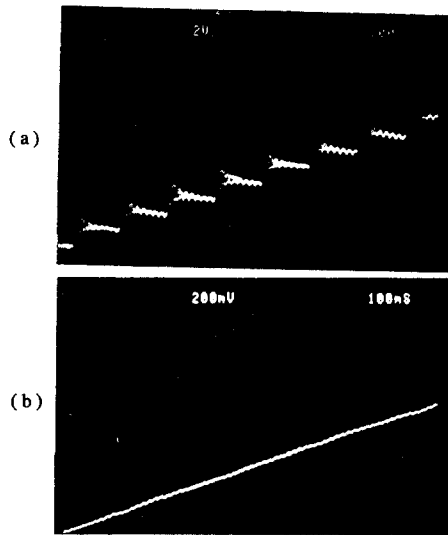


그림 5. 전스텝(a) 및 1/32 미세 스텝 구동(b)시의 회전자 위치 파형

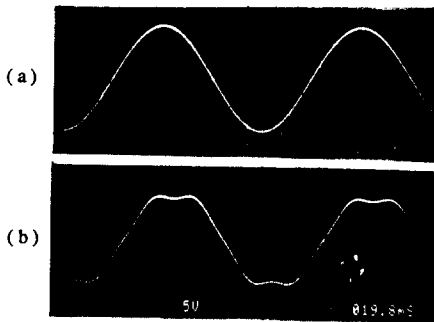


그림 6. 1/128 미세 스텝 구동시 디텐 토크를 고려하지 않은 경우(a), 디텐 토크를 고려한 경우(b)의 전류 파형

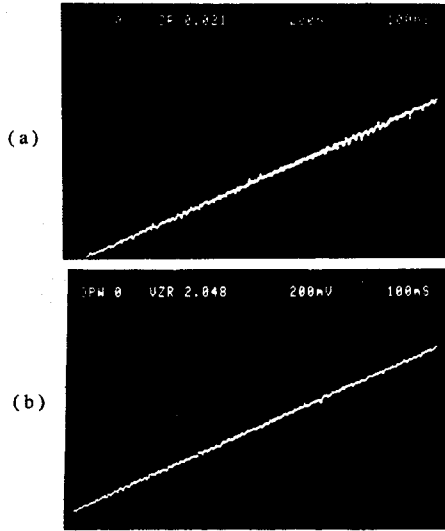


그림 7. 1/128 미세 스텝 구동시의 디텐 토크를 고려치 않은 경우 (a), 디텐 토크를 고려한 경우 (b)의 위치 파형

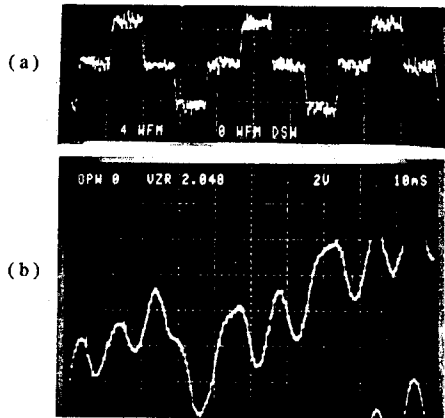


그림 8. 전스텝 구동시 120 PPS에서의 전류 (a) 및 회전자 위치 파형 (b)

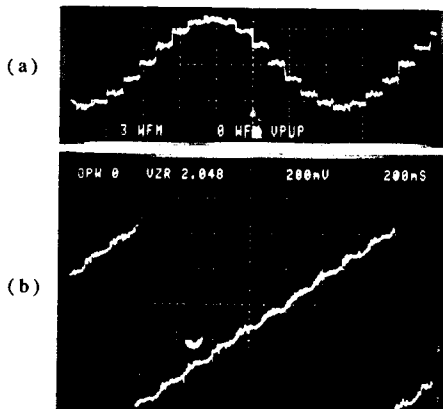


그림 9. 1/4 미세 스텝 구동시 120 PPS에서의 전류 (a) 및 회전자 위치 파형 (b)

## 5. 결론

본 연구에서는 마이크로프로세서를 이용하여 2 상 하이브리드 스텝 모터 (스텝각  $1.8^\circ$ )의 미세 스텝 ( $0.014^\circ/\text{step}$ ) 구동을 실현하였다. 따라서 피치가  $5 \text{ mm/rev}$ 의 리드 스크류 (Lead screw)를 사용할 경우 1 펄스당  $0.19 \mu\text{m}$  씩 진행하게 된다. 실험 결과  $\frac{1}{32}$  미세 스텝 ( $0.056^\circ/\text{step}$ )에서도 진동 현상 없이 거의 직선 운동을 하고 있음을 알 수 있었으며 120 PPS 근처에서 발생하던 공진현상도 제거되었다.

하이브리드 스텝 모터가 갖고 있는 디텐 토크의 영향을 억제할 수 있도록 정현파 전류 기준치를 설정하였으며, 회전자의 회전운동을 측정하기 위하여 25,000 PPR의 엔코더 (Encoder)를 사용하였다. 그러나 1/128 미세 스텝 (25,600 미세 스텝 / rev)에 대한 위치 정도를 해석하기 위해서는 360,000 PPR 이상의 분해능을 가진 엔코더를 사용하여 미세 스텝 구동시 시스템의 위치 오차를 정밀 측정하여 오차의 범위를 규정하는 필요가 있다.

## 참고 문헌

- [1] W.W.Chiang, "Optimal cogging torque compensation during microstepping under constant load," IMCSD, pp. 349 - 355, 1987.
- [2] J. Biran, "A high performance drive system and control IC for microstepping application," Motor-con., pp. 215 - 230, Oct. 1986.
- [3] E.K.Pritchard, "Mini-stepping motor drives," IMCSD, pp.Q-1 - Q-11, 1976.
- [4] H.D.Chai and A.C. Leenhouts, "Position error analysis for microstepping," IMCSD, pp.265 - 274, 1985.
- [5] M.L. Patterson and R.D.Haselby, "A microstepped XY controller with adjustable phase current waveforms," IMCSD, pp.163 - 168, 1977.
- [6] E.K. Pritchard, "Another cure for mid-frequency resonance," IMCSD, pp.61 - 65, 1979.
- [7] E.K. Pritchard, "Concepts and characteristics of microstepping," IMCSD, pp.229 - 242, 1980.
- [8] 김광배 외, 자동차 기술 고도화를 위한 Servo motor의 고정밀 제어 기술 개발, 한국 과학 기술 연구원 최종 보고서, 1989.