

# 스텝 모터의 미세각 제어 구동 회로 및 병렬 운전 제어기 개발

이광운\*    장원식\*\*    유지윤\*\*\*  
산업 전자 기기 연구실, 고려 대학교 전기공학과 대학원

## Development of Micro-stepping Drive Circuit of Step Motor and Parallel Operation Controller

Kwang-Woon Lee\*    Won-Sik Chang\*\*    Ji-Yoon Yoo\*\*\*  
Industrial Electronics Lab., Korea University.

### Abstract

In this paper, we developed a micro-stepping drive circuit of step motor and proposed software algorithm for parallel operation of step motors driven by micro-stepping circuit. Also, we implemented a parallel operation controller with a 16-bit micro-controller.

### 1. 서론

스텝 모터는 모터의 회전 각도가 입력 펄스에 완전히 비례하고, 각도 오차가 누적되지 않아서 개루프 운전이 가능하며, 산업계에서 각종 자동화 기기에 널리 사용되고 있다. 하지만 스텝 모터는 위치 분해능이 정해져 있어 정밀한 위치 제어가 어렵고, 저속 운전시 발생하는 공진 및 진동 현상으로 인하여 낮은 속도 맥동을 구현하기가 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 스텝 모터의 미세각 제어 방식 구동 회로를 개발하였으며, 미세각 제어 방식으로 구동되는 스텝 모터들을 효과적으로 병렬 운전하기 위한 알고리즘을 제안하였고, 16비트 마이크로 콘트롤러를 사용하여 병렬 운전 제어기를 하드웨어로 구현하였다.

### 2. 스텝 모터의 미세각 제어

스텝 모터는 저속으로 운전할 때 발생하는 진동 및 공진 현상으로 인하여 속도 및 위치 응답에 맥동이 나타나는 단점이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 기계적인 댐퍼를 모터에 부착하기도 하는 데, 이 방식은 댐퍼 자체의 관성으로 인하여 모터의 가감속 특성을 저하시키는 결함이 있다.<sup>[1]</sup> 반면에 스텝 모터를 미세각 제어 방식으로 구동하면 별도의 기계적인 장치 없이도 저속에서 부드러운 속도 맥동을 얻을 수 있고 모터의 위치 분해능을 높일 수 있어, 낮은 속도 맥동과 높은 위치 분해능이 요구되는 분야에서 널리 이용되고

있다. 국내에서도 스텝 모터의 미세각 제어 방식 구동 회로가 산업계에서 널리 사용되고 있지만, 대부분의 수요를 외국 제품에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 배경하에 본 연구에서는 스텝 모터의 미세각 제어 방식 구동 회로를 개발하였다. 개발된 미세각 제어 회로는 1스텝을 128개의 미세 스텝으로 나누어 구동할 수 있다.

하이브리드형 2상 스텝 모터의 토크 방정식은 다음과 같이 회전자의 위치와 모터의 상 권선에 흐르는 전류의 함수로 표현되어진다.<sup>[2]</sup>

$$T = k(-i_A \sin \theta + i_B \cos \theta) \quad (1)$$

T : 모터의 A,B상에 의해 발생하는 토크

k : 모터 상수

$i_A, i_B$  : 모터의 A,B 상에 흐르는 전류

$\theta$  : 전기각으로 표현한 회전자의 위치

스텝 모터의 각 상 전류들을 다음과 같이 제어해 주면

$$i_A = I_R \cos \phi \quad (2)$$

$$i_B = I_R \sin \phi$$

$I_R$  : 정격 전류

모터의 토크 방정식은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$T = -kI_R \sin(\theta - \phi) \quad (3)$$

식 (3)으로부터 모터의 무부하 평형 안정점은  $\theta = \phi$ 인 곳에 존재함을 알 수 있다. 따라서 모터의 각 상 전류들을 식 (2)와 같이 서로  $90^\circ$  위상차가 나는 정현파가 되도록 미세각  $\phi$ 만큼 단계적으로 제어해 주면 모터 회전자의 회전각도 미세각  $\phi$ 만큼 단계적으로 증가하게 된다.

본 논문에서 설계, 제작한 스텝 모터의 미세각 제어 구동 회로의 구성을 그림 1에 나타내었다. 각 상 권선에 대한 전류 기준치는 식 (2)에 의해 계산하여, 롬(ROM)에 테이블로 저장하였다. 롬의 어드레스 단자에는 증가/감소 카운터의 출력이 연결되어 있어, 증가/감소 카운터의 클럭 및 방향 입력 신호에 의해 D/A 컨버터로 출력되는 롬의 테이블 정보가 변화하게 된다. 에러 앰프(Error Amp)에서는 상 권선에 대한 전류 기준치와 실제 상 전류를 비교하여 그 차이를 증폭하고, PWM부에서는 톱니파와 에러 앰프의 출력을 비교하여

\*\*\* 高麗大 工科大学 電氣工學科 教授  
\*\* 高麗大 大學院 電氣工學科 碩士 課程  
\* 高麗大 大學院 電氣工學科 博士 課程

H-Bridge의 On-Off 신호를 발생시킨다. H-Bridge는 PNP POWER BJT와 n-Channel MOSFET를 사용하여 최대 3A의 전류를 흘릴 수 있도록 구성하였고, 2 $\mu$ -sec의 데드 타임(Dead Time)을 주었다. 모터의 상 전류는 H-Bridge의 하단에 2개의 센싱용 저항을 달아, 저항에 걸리는 전압을 차동 증폭하여 센싱하였다.

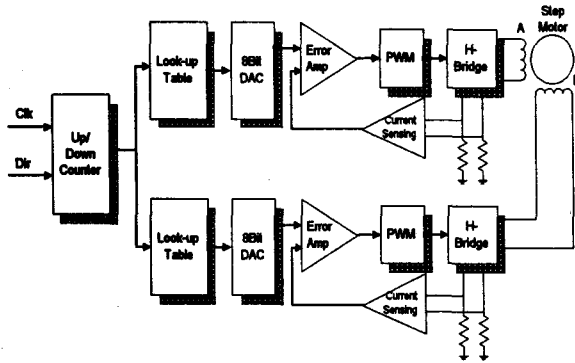


그림 1. 미세각 제어 방식 구동 회로의 구성도

### 3. 스텝 모터의 병렬 운전 제어

#### 3.1 가속도 테이블의 저장 형식

마이크로 프로세서를 사용하여 스텝 모터를 제어할 때는 일반적으로 그림 2와 같은 제어 시스템을 구성한다. 카운터는 모터 구동부로 출력되는 펄스 신호를 계수하는 데, 카운터의 값은 곧 모터의 회전 각도와 등가로 볼 수 있다. 펄스 발생기는 기준 펄스의 주파수를 내부의 켄수(Divisor) 레지스터의 값으로 나눈 주파수의 펄스 신호를 발생시킨다.

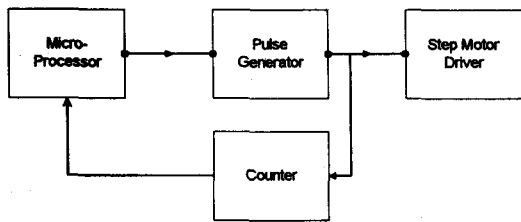


그림 2. 스텝 모터 제어 구성도

모터의 회전 속도를 가감속할 때는 가속도 테이블을 만들어서 모터 구동부로 출력되는 펄스열의 주파수를 조절해 준다. 가속도 테이블은 최저 속도, 최고 속도, 그리고 가속도 정보를 바탕으로 계산되어지며, 가감속 제어시 펄스 발생기의 켄수 레지스터에 써줄 값을 최저 속도에서 최고 속도에 이르기까지 순차적으로 저장하는 방식이 일반적으로 사용된다. 그러나 미세각 제어 구동 방식의 경우에는 일반 구동에서 필요한 주파수에 1스텝의 각도 분해능의 곱만큼 더 높은 주파수의 펄스 신호가 필요하기 때문에, 일반적인 가속도 테이블 저장 방식은 메모리 크기 문제로 인하여 적절하지 못하다.

펄스 발생기의 켄수 레지스터에는 정수값만을 쓸 수 있기 때문에 양자화 (Quantization) 문제로 인하여 가속도 테이블에는 같은 켄수 값이 여러개 반복되게 된다. 따라서 본 연구에서는 가속도 테이블을 켄수와 켄수의 반복 횟수로 나누어서 저장하는 방식을 사용하였다. 그림 3은 펄스 신호를 최저 200PPS(Pulse per Second) 에서 최대 30KPPS까지 가속할 때, 가속 시간을 2초에서 4초까지 변화시키면서 가속도 테이블의 크기 변화를 시뮬레이션한 것이다. 본 연구에서 사용한 방식은 기존의 가속도 테이블 저장 방식에 비해 훨씬 적은 메모리를 필요로 하고, 가속 시간이 변화하더라도 가속도 테이블을 저장하는 데 필요한 메모리의 크기는 크게 증가하지 않음을 보여준다.

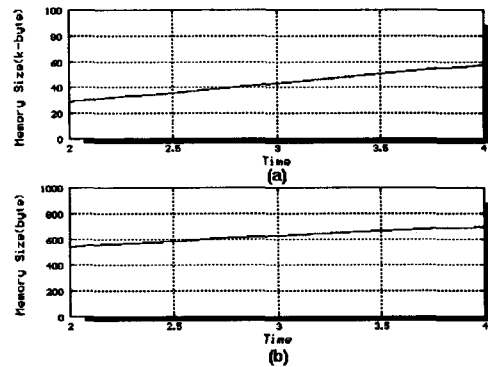


그림 3. 가속도 테이블의 저장 형식 비교

(a) 일반적인 저장 형식

(b) 본 논문에서 사용한 형식

#### 3.2 가감속 제어 알고리즘

모터의 회전 속도를 가감속할 때는 모터가 한 스텝 회전했을 때, 즉 하나의 펄스 신호가 모터 구동부로 출력될 때마다 펄스 신호의 주파수를 바꾸어 주게 된다. 하나의 펄스 신호가 출력되었는지의 여부는 카운터를 폴링하거나, 또는 펄스 신호로 프로세서에 인터럽트를 거는 방식을 사용하여 알아낼 수 있다. 하나의 마이크로 프로세서로 여러개의 스텝 모터를 병렬 운전하기 위해서는 인터럽트 방식을 사용해야 하는데, 미세각 제어 방식으로 구동되는 스텝 모터를 제어하는 경우 펄스 신호의 주파수가 높아서 마이크로 프로세서에 많은 부하를 주므로 병렬 운전 제어가 어려운 문제점이 있다.

본 논문에서는 가속도 테이블에서 같은 켄수 값이 여러개 반복된다는 사실에 착안하여 가감속 제어시 8개의 펄스마다 인터럽트를 거는 방식을 사용하였다. 8개의 펄스마다 인터럽트를 걸면 마이크로 프로세서의 부하를 덜어 줄 수 있어, 하나의 마이크로 프로세서로 미세각 제어 방식으로 구동되는 스텝 모터들을 병렬 운전할 수 있다.

그림 4는 200PPS에서 30KPPS까지 가속할 때 가속 구간에서의 속도 궤적을, 매 펄스마다 인터럽트를 거는 방식과 본 논문에서 사용한 8개의 펄스마다 인터럽트를 거는 방식에 대해 시뮬레이션한 것이다. 본 연구에서

사용한 방식에서도 기존의 방식과 별 차이 없는 가속 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

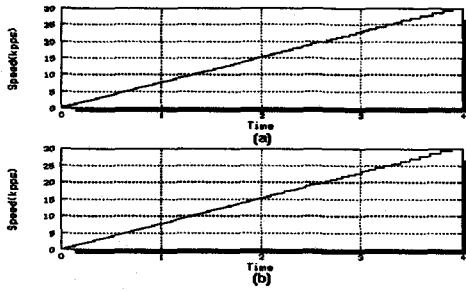


그림 4. 가속 구간에서의 속도 변화  
(a) 매 펄스마다 인터럽트 거는 방식  
(b) 8개의 펄스마다 인터럽트 거는 방식

### 3.3 병렬 운전 제어 알고리즘 및 하드웨어

본 논문에서는 병렬 운전 제어를 인텔의 16비트 마이크로 프로세서 80C196KC를 사용하여 구현하였다. 본 논문에서 구현한 스텝 모터 제어기는 모두 8개의 스텝 모터를 제어할 수 있으며, 8개중 3개의 모터는 병렬 운전 제어가 가능하다. 본 논문에서 구성한 스텝 모터 제어 루프의 구성도는 다음과 같다.

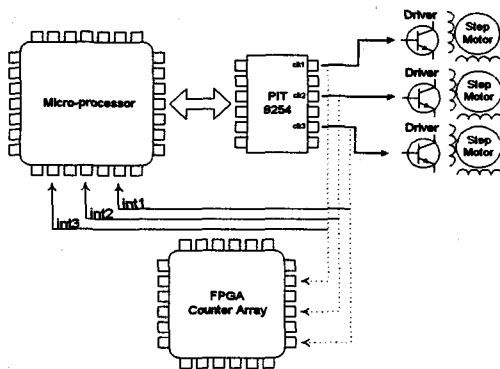


그림 5 스텝 모터 제어 루프의 구성도

펄스 발생기로는 8254를 사용하였다. 8개의 스텝 모터를 제어하기 위해서는 8개의 카운터가 요구되는데 일반 TTL IC를 사용하여 카운터를 구현하면 회로의 크기가 커지기 때문에 FPGA를 사용하여 카운터부를 집적화시켰다. 8개의 모터 중 병렬 운전의 대상이 되는 3개의 모터로 출력되는 펄스 신호는 모두 프로세서의 인터럽트 단자에 연결하였고, 나머지 5개의 모터로 출력되는 펄스 신호들은 AND 게이트를 사용하여 하나의 인터럽트 단자에 연결하였다.

각각의 모터 구동부로 출력되는 펄스 신호 모두가 프로세서에 인터럽트를 요청하면 프로세서의 처리 속도 제한으로 인하여 모든 인터럽트에 응답할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 특정 위치에서 모터를 정지시키거나, 또는 특정 체적을 따라 모터를 가속 회전해야 하는 경우에만 펄스 신호에 의해 프로세서에 인터럽트가 요청되도록 하였다. 각각의 모터에는 소프트웨어로 동작 모드를 지정하는 플래그를

지정하였다. 동작 모드 플래그가 가속 제어 모드, 또는 특정 위치 정지 모드로 설정되어 있는 모터로 출력되는 펄스 신호들에 의해서만 인터럽트가 걸리도록 하였기 때문에, 정지되어 있거나 일정 속도로 회전하고 있는 모터로 출력되는 펄스 신호에 의해서는 프로세서에 인터럽트가 요청되지 않는다.

동작 모드가 가속 제어 모드일때는 8개의 펄스 신호마다 인터럽트가 걸리기 때문에, 충분히 프로세서가 인터럽트 요청에 응답할 수 있다. 동작 모드가 정지 제어 모드일 때는 매 펄스마다 인터럽트가 걸려, 정확한 위치에 모터를 정지시킬 수 있게 하였다. 또한 정지 제어 모드라도 정지시키고자 하는 위치에 근접해야만 인터럽트가 걸리도록 하여, 병렬 운전 제어에 따른 프로세서의 부하를 최소화하였다. 그림 6은 인터럽트 서비스 루틴의 수행 순서도이다.

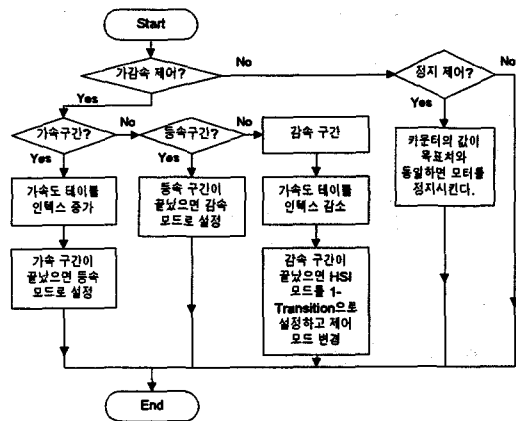


그림 6. 인터럽트 서비스 루틴의 순서도

본 논문에서 설계, 제작한 스텝 모터 병렬 운전 제어기의 전체 구성도는 그림 7과 같다. 모터 제어부는 직렬 통신 포트를 통하여 주 컴퓨터와 연결이 되어 있어 주 컴퓨터로부터 제어 명령을 전달받는다. 모터 제어부에는 수동 조작기가 부착되어 있어, 수동으로 각각의 모터를 제어할 수 있다.

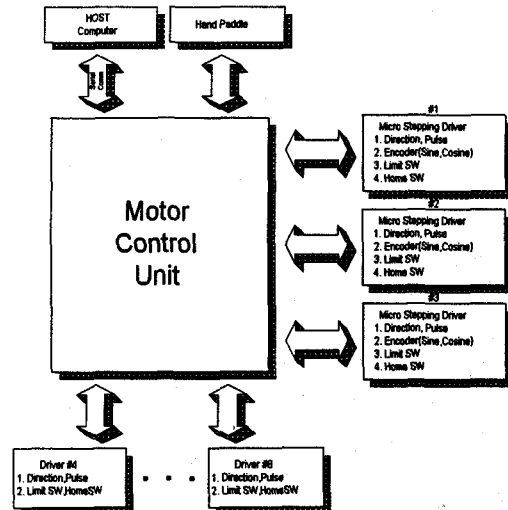


그림 7. 스텝 모터 제어기의 전체 구성도

## 4. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 미세각 제어 구동 회로를 실험하기 위해 사용한 스텝 모터의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 시험 대상 모터의 사양

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 <sup>2</sup>
총 중량	1.1 kg

그림 8은 1스텝을 128개의 미세 스텝으로 나누어 제어할 때, A 상에 대한 전류 기준치와 실제 상 전류를 나타낸 것이고, 그림 9는 A 상과 B 상의 전류를 리사주도로 나타낸 것이다. 그림 9로부터 각 상의 전류가 90° 위상차가 나는 정현파로 제어되고 있음을 알 수 있다.

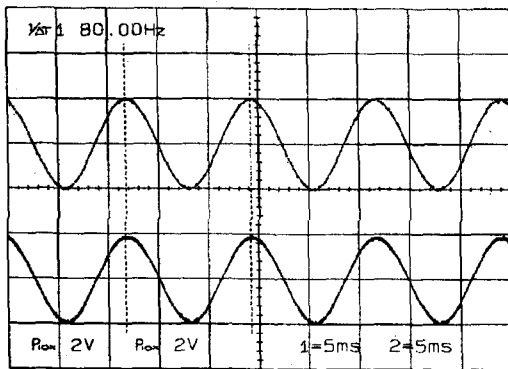


그림 8. 상 전류 기준치(상)와 실제 상 전류(하)

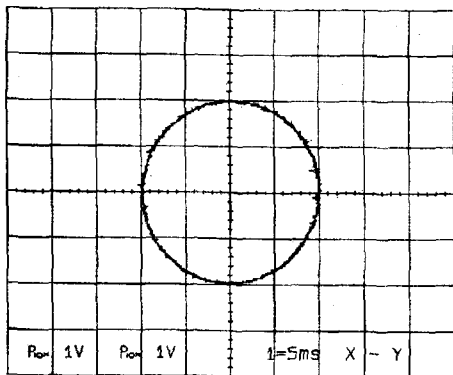


그림 9. A상 전류와 B상 전류의 리사주도

그림 10은 스텝 모터의 회전축에 로터리 인코더를 부착한 후, 모터를 0.2RPM으로 회전시키면서 일반 구동 방식(Full Step)과 미세각 제어 구동 방식의 회전각을 관측한 것이다. 일반 구동 방식의 경우 맥동이 나타나는 반면에 미세각 제어 방식의 경우 맥동 없이 부드럽게

모터가 회전함을 알 수 있다. 모터에 부착된 인코더는 한 바퀴 회전에 4000 펄스가 출력되는 것으로, 4채배하여 사용하였다.

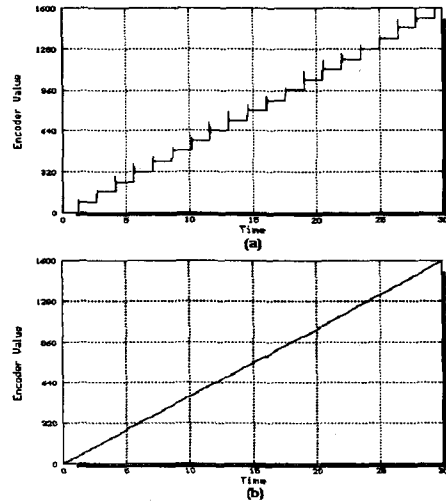


그림 10. 구동 방식에 따른 스텝 모터의 회전 특성  
(a) 일반 구동 방식(Full Step, 1.8°)  
(b) 미세각 제어 구동 방식(128 micro-step)

## 5. 결론

본 논문에서는 스텝 모터의 미세각 제어 구동 회로와 스텝 모터의 병렬 운전 제어기를 개발하였다. 개발된 미세각 제어 방식 구동 회로는 1스텝을 128개의 미세 스텝으로 분해할 수 있으며, 실험 결과로부터 모터를 맥동 없이 부드럽게 회전시킴을 확인하였다. 또한 본 연구에서 개발한 스텝 모터 제어기는 미세각 제어 방식으로 구동되는 8개의 스텝 모터를 제어할 수 있으며, 그 중 3개의 모터는 병렬 운전 제어가 가능하다.

앞으로의 연구 과제로는 위치 분해능이 높은 로터리 인코더를 사용하여 미세각 제어 구동 회로의 위치 오차와 반복 오차를 측정하는 일이 남아 있다.

## 참고 문헌

- [1] Takashi Kenjo, Stepping Motors and Their Microprocessor Controls, Clarendon Press, Oxford, 1984.
- [2] Mohan, Undeland and Robbins, Power Electronics : Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, 1989.
- [3] Unitorde Intergrated Circuits Inc., Product & Applications Handbook, 1993.
- [4] Xilinx Inc., XACT 4000, User Guide, Reference Guide and Macro Library, 1993.
- [5] Intel Inc., 16-bit Embedded Controller Handbook, 1993.