

# 궤적 오차를 제거한 4축 CNC 제어기의 개발

이치환 (위덕대 전자공학과 [www.pwm.pe.kr](http://www.pwm.pe.kr))

Development of 4-axis CNC Controller for Removing Trajectory Error

C.H. Lee (Uiduk Univ., Electronic Eng.)

## ABSTRACT

An economical 4-axis CNC controller employing step motors is designed and implemented in this paper. By using the inherent ability of holding position of the motor, the CNC controller uses open-loop control for removing trajectory error and for a simple hardware. Each drive of axis has an 8-bit microprocessor 89C52 and a PC controls the axes and pendant by means of RS232C serial communication. Backlash is also compensated at the axis controller. While compensating the backlash, the feed rate becomes zero in order to minimize trajectory error. The trajectories of 16ms interval are computed on PC and are sent to motor drives. In the drives, the trajectories are linearly interpolated for 2ms interval. The developed CNC does not require add-on specific motion card on PC. From the experimental results, the validity of the CNC controller based on step motor is proved.

**Key Words** : CNC system, motion control, step motor

## 1. 서론

CNC 시스템은 서보 전동기와 공작기계를 결합하고, 컴퓨터에 연결시켜 공작기계에 직접 program 을 전달, 가공케 하는 장치로 공장 자동화시스템에서 가장 중요한 역할을 수행하고 있다. 구동장치로 DC motor 가 오랫동안 사용되어왔으나, 마이크로프로세서 발달로 AC servo 가 현재에는 널리 사용되고 있다. 전동기와 연결된 기계부는 마찰, 관성 및 토크 비선형성 등으로 인하여 복잡한 비선형 특성이 있으므로, 이러한 결점을 극복하기 위하여 정밀한 기계구조를 요구하고 있다. 기계적 정밀도의 요구는 CNC 시스템 고비용의 원인이 된다. 더욱이 기계적 backlash 는 CNC 시스템의 난제 중 하나로 적절한 처리가 요구된다. CNC 개발초기에는 제어의 간편성으로 DC motor 와 아날로그 PID 제어기를 적용하였으나 현재는 컴퓨터 기술을 도입한 디지털 AC servo 를 주로 이용한다. 위치 제어기 설계에서, 기계적 비선형성을 극복하기 위하여 100Hz 정도의 속도대역폭을 가지며 전동기 회전자를 저관성이 되도록 만든다. 제어기는 PI 를 기본으로, 변형된 적응제어기, 모델추종제어기, feed forward 제어기 등이 있으며 이들은 모두 외란에 대하여 궤적오차를 가진다. 또한 제어기의 파라미터

결정은 기계의 운동방정식에 기초하여 결정되므로 부하상황에 따라 궤적오차 특성이 변화된다. 위치지령에 대한 응답은 수 10ms 정도 이므로 부하변동 등의 외란에 대한 궤적오차는 필연적으로 발생한다. Backlash 가 존재하는 경우에는, backlash 보정이 이루어지는 동안 궤적오차는 더욱 커지게 된다. 속응성을 얻기 위해 전통적으로 CNC 제어기는 이득을 크게 하였으나 큰 overshoot 가 문제로 등장한다.

한편, 개방형 구조의 CNC 는 네트워크를 통한 상위계층과의 접속, CAD/CAM 시스템과의 데이터 교환 등이 가능하도록 구현되고 있다. 이러한 급격한 기술의 발달과 더불어 저가형 개방형 CNC 시스템에 대한 요구도 증가하고 있다. CNC 시스템은 hardware 및 software 구조가 복잡하며 개발시 많은 인력과 비용을 필요로 하지만, 최근 저가형, 고성능 CNC 시스템의 구축을 위해 PC 를 주제어기로 도입하는 추세이며, 부가적으로 DSP 보드를 내장하여 모션제어기를 구성한다. 구동장치는 대부분 BLDC 전동기로 대체되었으며 소형 탁상용 밀링의 경우 스텝 모터를 사용하기도 한다.

본 논문은 경제적 가격의 CNC 시스템 구축을 위한, 궤적오차를 제거한 저가형의 4축 CNC 시스템을 설계, 제작한다. 구동부는 고토크 스텝 모터

를 채용하며, XYZC 4 축과 pendant 에 89C52 마이크로프로세서 5 개를 사용하여 PC 와 RS232C 통신으로 연결된다. IBM-PC 는 주어진 G-code 프로그램을 해석하고 linear 및 circular interpolation 을 통하여 16ms 샘플링 궤적을 연산하여 각 축의 모터제어기에 RS232C 직렬통신으로 전달한다. 스텝 모터 제어기는 2ms 마다 궤적을 선형 보간하여 위치제어를 행한다. XYZC 4 축 CNC 시스템을 제작하여 실험하였고, 특별한 hardware 모션 제어기 없이 PC 와 스텝모터로 경제적 CNC 시스템을 구성 할 수 있음을 보였다.

## 2. CNC 구성

### 2.1 스텝 모터

스텝 모터가 소형화 및 자동화로 인해 새로이 중요하게 부각되고 있다. 스텝 모터는 1920 년대에 영국에서 개발된 후 1960 년대에 초기 NC 공작기계에 도입되면서 실용화되었다. 스텝 모터는 DC 모터에 비해 속도제어가 쉽고, 정확한 위치제어가 가능하기 때문에 컴퓨터의 발달과 더불어 디지털 제어의 구동원으로서 그 응용분야가 많아지고 있다. Feedback 소자 없이 자기 위치를 유지하는 스텝 모터는 일반적인 1.8° 스텝 모터에서 half-step 구동으로 1 회전에 400 스텝이 얻어진다. 마이크로스텝핑 기술을 사용하면 위치정도가 확장된다. 엔코더의 부착으로 과부하 상태를 검출할 수도 있다.

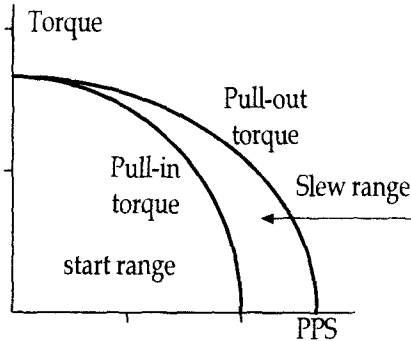


Fig. 1 Step motor characteristics

Start range 는 위치오차 없이 운전정지를 행할 수 있고 slew range 에서는 가감속 가속도를 제한하여 운전해야 된다. 스텝 모터는 토크 지령에 대해 최대 1.8°(full-step)의 위치지연을 가지며 부하 토크가 없을 때 위치오차 0 이 된다. 발생 토크는 위치오차각의 함수로 주어지며 위치 변동시 진동이 수반된다. 최대 위치오차는 1 스텝이다. 스

텝 모터의 구동은 고속운전에 적합한 PWM 정전류 방식으로 SLA7026 을 사용하였고 half-step 이다. 마이크로프로세서에 직접 연결하며 4V 2A 모터의 고속운전을 위해 28V 직류를 공급한다.

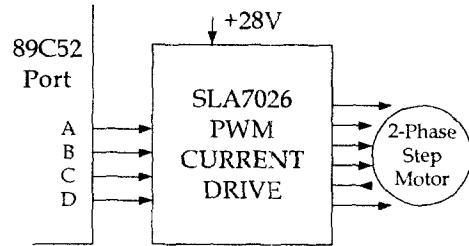


Fig. 2 Step motor drive

### 2.2 Connection

4 축 스텝 모터 제어기와 pendant 에는 각각 독립적인 마이크로프로세서 89C52 가 사용된다. G-code 에 대한 해석과 위치지령은 PC 에서 담당하며 각 마이크로프로세서 간의 정보전달은 RS232C 로 이루어진다.

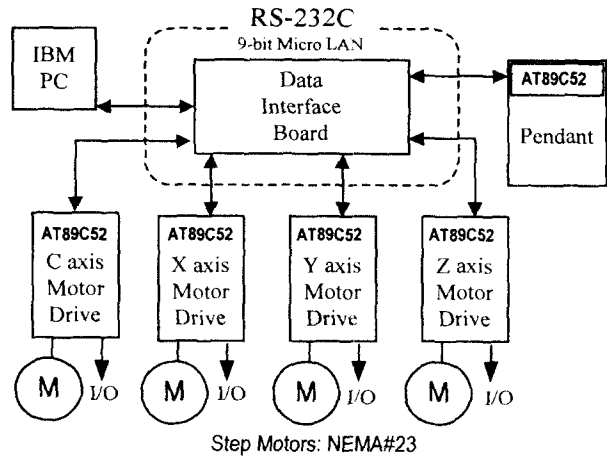


Fig. 3 Configuration of the CNC system

89C52 에서 수행하는 위치제어 및 실시간 위치 정보 파악, I/O 전달 등의 job 이 원활히 이루어지도록 RS232C 9-bit 통신 mode 를 이용하여 micro LAN 을 구성한다. 57K baud 로 1byte 전달에 약 100us 가 소요되며 PC 는 master 로, 다른 장치는 slave 로 구성된다. Pendant 는 XYZC 축의 단독이송 및 federate(0-150%)와 동작 상태표시, run/stop/hold 의 지령 등에 사용된다. 모터제어기는 디지털 입출력 port 를 가지며 M-code 에 해당된다.

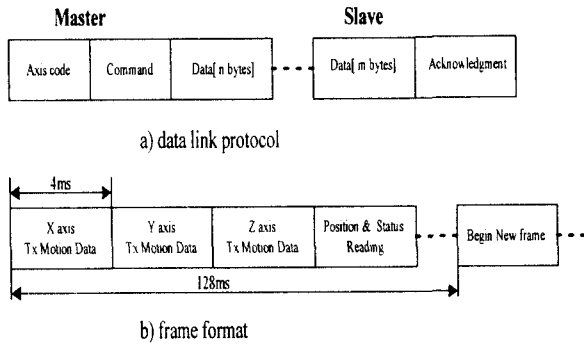


Fig. 4 Communication protocol

위치정보는 32 bit 로 표현되고 feed rate 는 16 bit 로 8 bit 의 고정소수점을 취한다. PC 에서 16ms 동안 이동될 궤적을 계산하고 한번 전송에 128ms 이동궤적을 보낸다. 각축의 32 bit 위치정보와 feed rate%는 128ms 마다 수신하여 표시하고 다음 궤적 계산에 사용된다. Feed rate 는 1% 단위로 이동량을 설정한다. 모터제어기는 16ms 의 궤적 정보로부터 2ms 이동량을 interpolation 하여 스텝모터에 펄스 지령을 내린다. 이때 균일한 펄스주기를 얻기 위해 100us 인터럽트로 일정 주기 펄스 열을 출력한다.

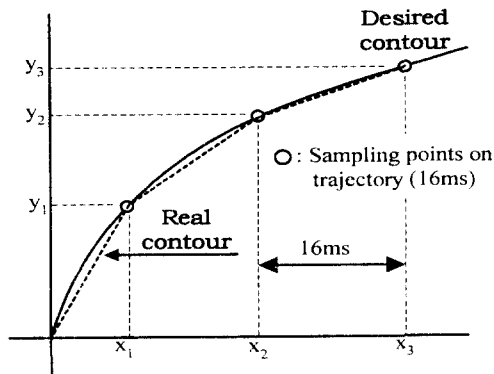


Fig. 5 Contour motion and sampling points

Backlash 는 모터제어기에서, 이동방향이 변하는 시점에서 backlash 량을 위치오차로 취급하여 모터를 적절한 가감속 운전으로 보상시킨다. 임의의 한 축에서 backlash 보상이 발생하면 feed rate 가 0 이 되도록 설정하여, 다른 축의 이동에 의해 발생하는 궤적오차를 최소화 시킨다. Backlash 의 설정은 8 bit 스위치로 89C52 port 에 직접 입력되도록 설치한다.

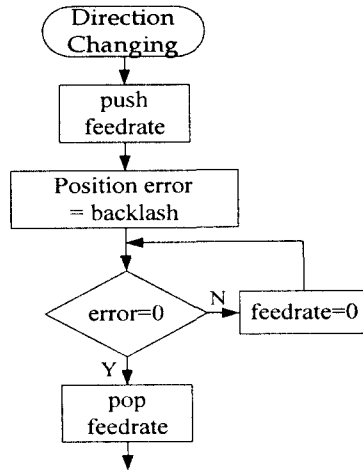


Fig. 6 Backlash compensation

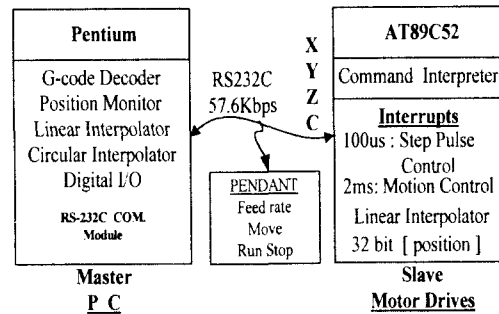


Fig. 7 Configuration of software

PC 에서는 G-code 번역기, 보간기, XYZC 위치 표시기 및 RS232C 통신 모듈 등이 있다. Pendant 및 모터제어기는 8 bit 마이크로프로세서 89C52 를 이용하고 RS232C, 100us 와 2ms timer 등 3 개의 interrupt 를 이용하여 실시간 처리된다.

### 3. 제작

설계된 CNC 제어기는 소형 수동 밀링에 장착되었다. 5mm 피치 볼스크류에, 스텝 모터의 위치정도와 토크를 크게 하기 위하여 타이밍벨트로 4:1 감속시켜 연결한다. 사용된 스텝 모터는 최대토크 0.8Nm 로, 볼스크류에 작용하는 3.2Nm 는 가공에 충분한 토크이다. Half-step 으로 작동하는 스텝 모터는 1 회전/400 펄스 이므로 1BLU 0.003125mm 이다. XYZ 축의 양끝에는 limit SW 를 부착하였다.

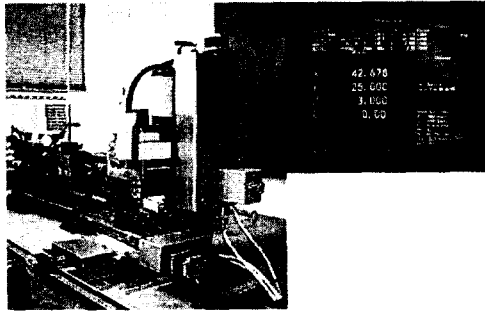
#### 4. 결론

스텝 모터를 사용하여 위치 제어 펌프를 사용하지 않는 4 축 CNC 제어기를 설계, 제작하였다. RS232C에 의한 micro LAN을 구성하여 PC에서 하드웨어의 도움 없이 직렬통신 port와 소프트웨어만으로 실시간 궤적을 추적하는 CNC 제어기가 구성되었다. 스텝 모터의 빠른 토오크 응답특성과 PC에서의 실시간 이송궤적 계산으로 궤적오차를 제거하였고, backlash 보정시 feed rate를 0으로 두어 축간 위치오차를 최소화시켰다. 범용 8 bit 마이크로프로세서 89C52와 스텝 모터로 구성되는 제안된 CNC 시스템은 수동 밀링의 CNC화, 개방형 CNC 시스템의 구축에 유리할 것으로 생각된다. 스텝 모터에 엔코더를 부착하여 위치정보의 실시간 감시가 이루어지면 고속, 정밀 운전이 가능하며, 볼스크류 공차 등의 기계적 오차요소에 대해 소프트웨어적 보상이 쉽게 이루어 질것으로 기대된다.

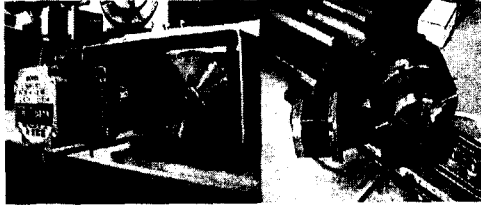
실험결과로부터 제안된 CNC 시스템의 성능이 실용상 충분하다고 판단되었다.

#### 참고문헌

1. Antonio Cantoni, "A stepper motor system for profile following and cutting", *IEEE Trans. On IECE-21(2)*, pp.66-70, May 1974.
2. Y. Altintas, N Newell and M. Ito, "Modular CNC design for intelligent machining, part 1: design of a hierarchical motion control module for CNC machine tools," *ASME Journal of manufacturing science and engineering*, vol. 118, pp. 506-513, Nov., 1996.
3. K. Srinivasan and Tsu Chin Tsao, "Machine tool feed drives and their control- A survey of the state of the art," *ASME Journal of manufacturing science and engineering*, vol. 119, pp. 743-748, Nov., 1997.
4. Y. Koren and C.C. Lo, "Advanced controllers for feed drives," *Annals of the CIRP*, vol. 41, pp. 689-698, Feb., 1992.
5. 이치환, "CNC 시스템을 위한 유도전동기의 모션제어기 설계", 한국자동제어학술회의 논문집 KACC'99, pp.D273-276, 1999



a) retro-fitted CNC milling



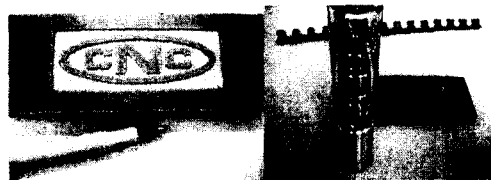
b) motor coupling

c) C-axis



d) pendant

e) control board



f) parts engraved by developed CNC

Fig. 8 Photos of retro-fitted CNC and parts

그림 8은 제작된 CNC 4축 밀링을 보인다. 그림 8f)는 가공물을 보인 것으로 정확한 궤적과 backlash 보정 능력, rotary table에 의한 가공능력 등을 확인 할 수 있다. XY축의 최대 이송속도는 500mm/min이며 Z축은 스프링의 무게를 고려하여 250mm/min으로 설정하였고 C축은 최대이송 2250°/min이며 0.0125° 스텝이다.