

◆ 특집 ◆ 고성능 공작기계 수치제어장치

# 다계통 e-CNC 장치의 성능평가 기술 및 적용

## Performance Evaluation Method of the Multi-Path e-CNC Units and its Applications

이찬홍<sup>1,✉</sup>, 김경호<sup>1</sup>, 장태성<sup>2</sup>  
Chan-Hong Lee<sup>1,✉</sup>, Gyungho Kim<sup>1</sup> and Tae-Sung Chang<sup>2</sup>

1 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 ((Intelligent Manufacturing Systems Research Division, KIMM)  
2 두산인프라코어 공작기계 연구센터(Machine Tools R&D Center, Doosan Infracore Co., Ltd.)  
✉ Corresponding author: chlee@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7120

Key Words: e-CNC Unit (e-CNC 장치), Performance Evaluation (성능 평가), Virtual Machine Tools (가상 공작기계), Torque Curve Pattern (토크곡선 패턴), Velocity Ripple (속도 변동), CNC Auto Tuning (CNC 오토튜닝)

### 1. 서론

현대식 공작기계는 고도의 지능화와 상태감시로 자율가공과 무인가공을 추구하기 때문에, 에너지 입출력 반응속도가 빠른 서보모터를 구동장치로 사용하고, 이에 대한 제어기로 인간의 감각으로 실현하기 어려운 복잡한 3D 형상을 신속하게 NC 데이터화 할 수 있는 고속 CNC 장치를 사용한다.<sup>1</sup> 최근 CNC 장치는 더욱 발전하여 공작기계와 CNC 가 일대일 대응이 되는 제한된 성능에서 벗어나, 한 대의 CNC 가 여러 대의 공작기계를 제어하고 다수의 축을 동시에 제어하는 지능화 강화 고속 e-CNC 로 발전하게 되었다.

공작기계의 가공 성능향상을 위해서는 우선 기계 구조물의 강성을 높이고 경량화시키며, 안내면의 마찰력을 최소로 유지하는 노력을 해야 하고, 이에 상응하게 e-CNC 장치와 구동모터는 고 가감속 실현 및 고정밀 위치제어를 병행해야만 한다. 기계 구조물의 성능 개선은 기계 구조물만의 실험으로 문제점을 대부분 개선할 수 있으나, e-CNC 장치는 e-CNC 유니트만의 실험으로 이송계의 제어성능상 문제점을 파악하기 어렵다. 즉, 연결되는 모터와 모터 드라이버, 볼스크류, 안내면 마찰, 절삭력 등 피드백 구동 경로상의 전기적, 기계적 반응

요소들을 고려하여 이송제어를 실행해야, 비로소 e-CNC 장치의 고객이 원하는 근본적 위치제어 성능과 취약부를 규명할 수 있다.<sup>2</sup>

따라서 e-CNC 장치의 취약부를 정상적인 외란 상태에서 파악하기 위해서 연결되는 서보모터까지를 광의의 e-CNC 장치로 정의하면, 이송계에서 발생하는 각종 토크 외란까지를 고려한 객관적 평가가 될 수 있다. 여기서 외란은 볼스크류의 비틀림과 백래쉬, 베어링 강성, 이송계 관성, 절삭력, 마찰 등으로 인한 서보모터부에 대한 기계적 이송계의 토크신호 변화이다. 이와 같이 구동모터를 e-CNC 장치내의 요소로 정의하고, e-CNC 장치의 외란 없는 평가를 위해서 외란이 상시 발생하는 공작기계 이송계와 서보모터부를 하드웨어적으로 단절시키고, 공작기계에서 발생하는 절삭력과 가감속, 관성력으로 인한 토크변화를 시뮬레이션하여 구동모터의 부하로 공급하면 e-CNC 장치만의 성능을 순수히 파악할 수 있다.

본 논문에서는 e-CNC 장치의 성능을 외란이 제거된 상태에서 평가하기 위해서 가상 공작기계의 개념을 도입하여, 실제 공작기계에서 발생하는 토크 현상을 8 가지 토크로써 시뮬레이션하여 서보모터에 부하로 적용하고 e-CNC 장치에 의한 구동모터의 위치 및 속도, 가감속도 변동성, 미소 위

치결정 능력 등을 평가하였다. 또한 가상 공작기계를 이용하여 e-CNC 장치의 PID 게인 최적 튜닝을 적용함으로써, 현장에서 가공부품 형상에 따른 게인의 최적튜닝을 사전에 쉽게 수행하여 가공품의 형상정밀도를 향상시킬 수 있는 기반을 마련하였다.

## 2. 가상 공작기계의 설계 및 제작

### 2.1 e-CNC 장치의 관점에서 본 공작기계의

#### Virtual 화

공작기계의 Virtual 화는 목적에 따라, 공작기계를 스폰링으로 연결된 강성구조로 관찰할 수 있고, 각 이송축과 단위 구조물에서 발생하는 오차나 처짐분포로 관찰한 오차구조로 정의할 수도 있다. 본 논문에서는 e-CNC 장치의 평가를 위해 공작기계를 토크 발생장치로 Virtual 화 하였다.<sup>3</sup>

Fig. 1 과 같은 다계통 복합가공기에서는 다수의 서보모터를 제어하기 위해서 고성능의 e-CNC 장치를 사용한다. e-CNC 장치의 성능을 해당 공작기계 구조물의 외란과 무관하게 평가하기 위해서 다계통 복합가공기에서 발생하는 각종 하중을 볼스크류에 전달되는 토크 패턴으로 변환해서 구동모터에 토크부하로 적용하였다.

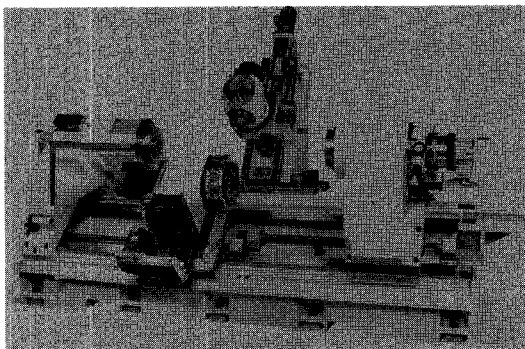


Fig. 1 Multi-axis CNC lathe using several servo motors

Fig. 2 와 같이 볼스크류 이송계에서 공작물을 밀링가공할 경우, 절삭력은 볼스크류의 회전력으로 변환돼서 토크로 변화된다. 이 변환관계는 식 (1)과 같이 표시된다. 여기서 T는 토크(N·m), F는 절삭력(N), L은 볼스크류 리드(m)를 나타낸다.<sup>4,5</sup>

$$T = \frac{F \cdot L}{2\pi} \quad (1)$$

만약 폴리나 기어로 모터의 회전이 감속된다면 구동모터에 가해지는 토크는 기어비에 비례한다. 즉 토크는 감소된다. 이송계의 안내면 위쪽에서 발생하는 가감속 관성력, 마찰력, 진동력 등은 질삭력과 동일한 식에 의해서 변환되고, 각각의 경우는 시간적으로 토크 패턴에 차이가 있다. 그리고 이송계의 볼스크류에서 발생하는 백래쉬는 상기 식으로 변환되지 않고, 단지 토크의 단속현상으로 나타난다.

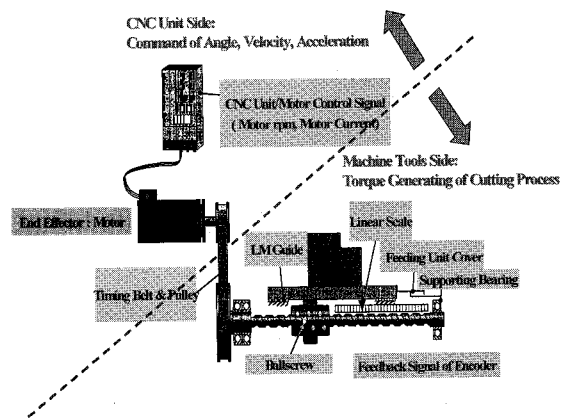


Fig. 2 Feeding unit with Servo motor and CNC unit

### 2.2 가상 공작기계의 구성요소

Fig. 3 에는 위와 같은 개념으로 설계된 가상 공작기계 장치를 보여주고 있다. 가상 공작기계 장치는 크게 위치와 속도를 제어하는 타겟모터와 부하모터, 부하모터에서 가해진 토크를 측정할 수 있는 토크미터, 그리고 타겟모터의 회전오차를 측정할 수 있는 외부 엔코더로 구성되어 있으며, 타겟모터와 토크미터는 타이밍 벨트로 연결되어 있다. 타겟모터가 내장 엔코더의 피드백을 받아 목표로 하는 속도로 회전하고 있는 가운데, 부하모터에 임의의 토크부하 패턴을 적용하여 타겟모터의 회전을 방해하게 된다.

부하모터는 토크모드 방식의 개루프 상태로 제어되며, 이 때 가해진 토크는 중간에 연결된 토크미터(Onosoki, SS-500)를 이용하여 측정한다. 타겟모터에는 자체 엔코더(131,072 cnts/rev) 외에 고분해능 엔코더(Heidenhain, RON905)를 외부 모터축에 장착하여 타겟모터의 속도변동을 보다 정밀하게 측정할 수 있게 하였다. 고분해능 엔코더는 외부 체배박스를 이용하여 한 회전당 1,440,000 개의 펄

스가 출력되어 원래 장착된 내장엔코더에 비해 10 배 이상 향상된 분해능을 보여준다. 실험에 사용된 서보시스템은 Mechatolink 통신 기반의 Yaskawa Sigma II 로, 서보모터와 드라이브 모두 Yaskawa 사의 제품을 이용하였다.

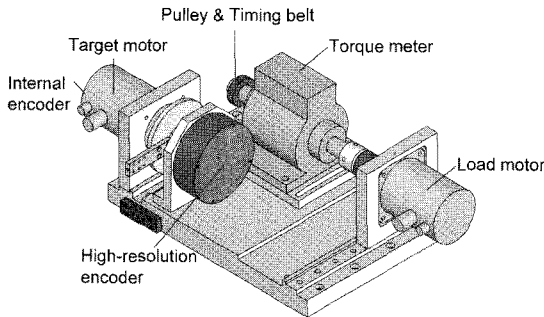


Fig. 3 e-CNC test unit using torque-patterns

### 2.3 공작기계에서 발생하는 토크패턴 추출

공작기계에서 대표적으로 나타나는 가공공정이나 현상에 대해서 그 특징을 살려서 토크 패턴으로 구성하였다. Fig. 4(a)는 선반에서의 선삭이다. 그림에 보이듯이 일정구간을 여러 번 공구가 지나가면서 표면을 정삭할 때 나타나는 패턴이다.

Fig. 4(b)에 나타난 드릴작업의 경우는 드릴이 중심 원뿔모양의 가공을 할 때까지 토크가 증가하

다가 급격히 감소하는 모양을 나타낸다. Fig. 4(c)는 머시닝센터에서 밀링작업을 할 때 나타나는 현상으로 이송분력이 어느 정도 기본적인 토크레벨을 주고, 밀링공구의 여러 개 날이 회전하면서 단속 절삭 토크변동을 나타낸다. Fig. 4(d)는 고정밀 가공기에서 가공성을 시범적으로 보여주기 위해서 삼각형 모서리를 선삭가공할 때 나타나는 토크 패턴이다. Fig. 4(e)는 선삭도중에 공작물에 구멍이 있는 경우나 경화층을 공구가 통과하는 경우 생기는 토크 모양이다. Fig. 4(f)는 이송계가 빠른 속도로 가속을 반복할 때 나타나는 토크 현상이다. Fig. 4(g)는 공작기계의 안내면으로 습동면을 사용할 경우 정 마찰계수에서 동 마찰계수로 변화하면서 토크가 급격히 감소하는 모양을 보여주고 있다. Fig. 4(h)는 볼스크류상에서 백래쉬가 일어날 경우 토크 곡선에 단속적인 현상을 나타낸 것이다.

### 3. 가상 공작기계를 이용한 위치결정 실험

#### 3.1 e-CNC의 제어성능 평가

2.3 절에서 정의된 토크곡선 중 대표적으로 선삭과 드릴링에 대한 토크패턴에 대해서 타겟모터의 속도변동특성을 실험하였다. Fig. 5는 실험장치의 사진을 보여주고 있다.

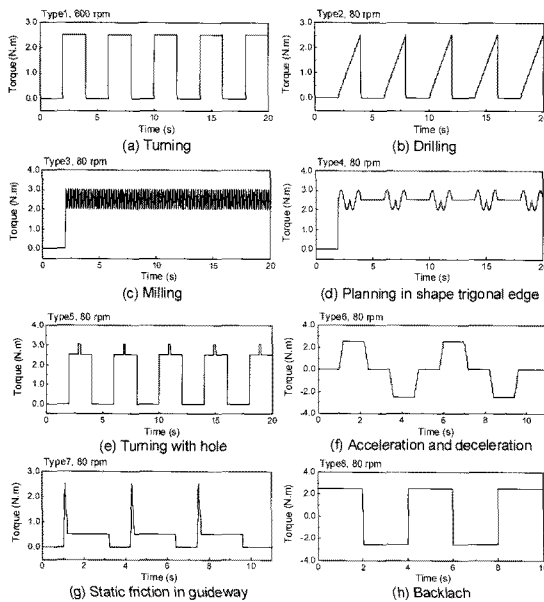


Fig. 4 Torque curve patterns in Machine Tools

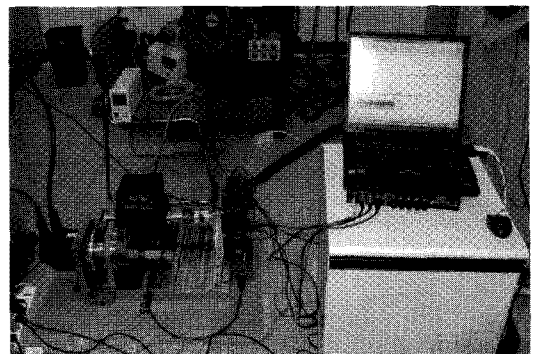


Fig. 5 Experimental setup with a Virtual Machine Tool

타겟모터가 일정한 속도로 구동하는 동안에 부하모터를 통해 토크가 공급되며, 이때 타겟모터에 연결된 엔코더를 통해 속도변동을 측정하였다. 외부에 연결된 고분해능 엔코더 신호는 DeltaTau사의 UMAC 제어기를 통해 입력받으며 제어기 자체적으로 제공된 프로그램을 이용하여 엔코더 값을 획득하였으며, 부하모터에 가해준 실제 토크는 토크미터의 출력을 A/D 보드(Wavebook 516)에 연결하

여 측정하였다.

Fig. 6 과 Fig. 7 은 각각 선삭과 드릴링 토크패턴에 대해서 실험한 결과를 보여주고 있다.

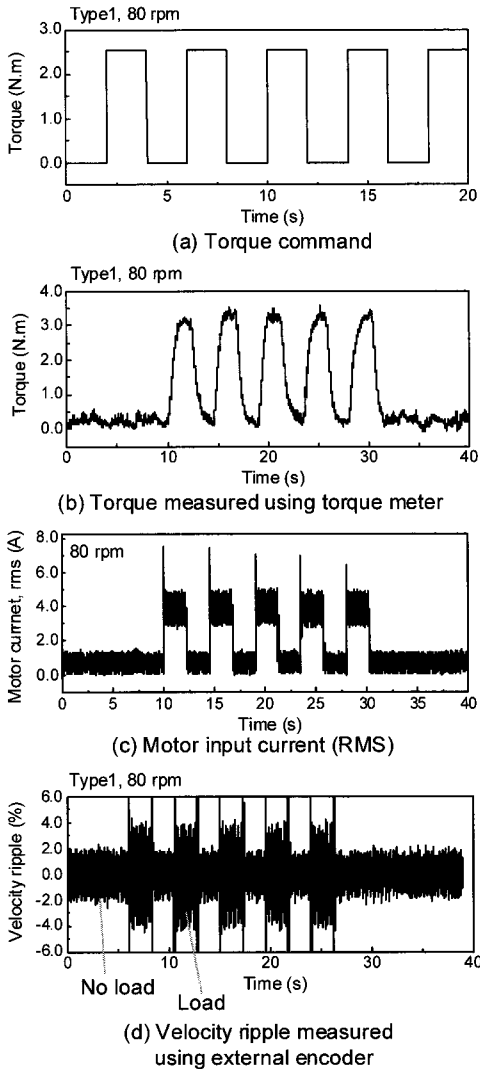


Fig. 6 Experimental results in case of torque pattern (a) turning

선삭토크패턴의 경우, 토크부하는 최대 2.5 N·m 크기의 사각파 형태로 부하모터에 가해지고 있으며(Fig. 6(a)), 이때 토크미터를 이용하여 실제 타겟 모터에 공급된 토크의 양을 측정하였다(Fig. 6(b)). 측정된 값은 전체적으로 명령치와 비슷한 형태를 취하고는 있으나 정확한 사각파가 아닌 뭉그러진 형태로 나타나고 있다. 이는 모터 및 토크미터 자

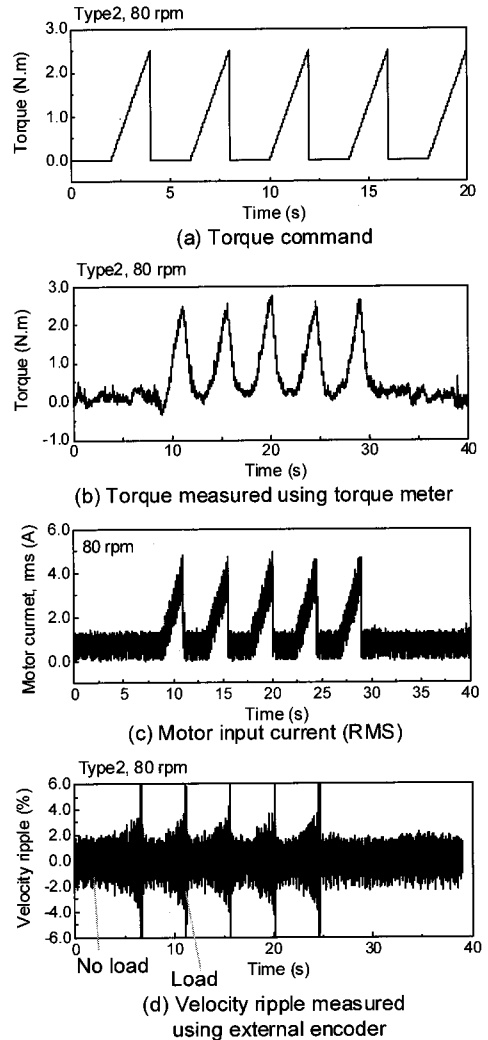


Fig. 7 Experimental results in case of torque pattern (b) drilling

체 회전축의 관성력에 기인한 것으로 생각된다. 좀 더 확실하게 입력된 토크량을 측정하기 위하여 모터에 들어가는 전류를 측정하여 이를 토크로 환산하였다. 모터의 3 상에 들어가는 전류인  $I_A, I_B, I_C$  를 각각 current meter 를 이용하여 측정하고, 식 (2) 와 같이 이들의 RMS(Root Mean Square)값에 토크 상수를 곱하여 모터에 입력되는 토크량을 구하였다. 식 (2)에서 토크상수인 0.82 는 실험을 통해 구한 값이다.

$$Torque = 0.82I_{rms}, \text{ where } I_{rms} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}} \quad (2)$$

Fig. 6(c)는 측정된 전류의 RMS 값을 보여준다. 토크의 명령치인 사각파형태가 정확하게 나타나고 있으며, 이를 식 (2)를 이용하여 토크로 환산하면 3 N·m 로 입력치와 거의 비슷한 것을 알 수 있다. Fig. 6(d)는 타겟모터의 속도리플을 외부 엔코더를 이용해 측정된 것으로, 토크부하가 공급되지 않을 때에는  $\pm 2\%$ , 토크부하가 공급되는 동안에는 평균적으로  $\pm 4\%$ 의 변동을 보이고 있으나 목표로 하는 속도에는 잘 추종하고 있다.

이러한 속도변동 특성에는 e-CNC 장치와 모터 드라이브의 게인설정 및 응답특성에 따라 달라지므로, e-CNC 장치만의 평가를 위해서는 동일한 모터 드라이브 하에서 서로 다른 e-CNC 장치들을 대상으로 그 특성을 비교해 봐야 할 것으로 판단된다. Fig. 7 은 다른 토크패턴인 드릴링 작업시에 모델링된 톱니파형에 대해 실험한 것으로 Fig. 6 과 같은 결과를 보이고 있다.

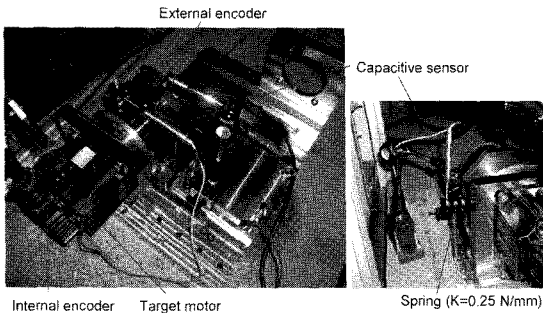


Fig. 8 Measurement setup of micro step response

e-CNC 에서 명령된 엔코더의 최소단위 1 펄스 신호에 대해 모터가 얼마나 정확히 추종하는지를 알아보기 위해 미소 이송능력을 평가하였다. 제어기에서 1 펄스로 이송명령을 준 후, 무부하와 부하 상태에서 외부 엔코더와 정전용량형 센서를 통해 모터회전축의 회전량을 측정하였다. Fig. 8 은 정전용량형 센서를 통해 미소 이송정도를 측정하기 위한 장치를 보여준다. 모터 회전축에 원판을 고정하고, 원판 중심으로부터 측정바를 반경방향 외곽으로 설치하여 정전용량형 센서의 측정값으로부터 회전량을 환산할 수 있게 하였다. 현재의 실험 시스템에서는 내장 엔코더 1 펄스당 외장 엔코더에서는 11 펄스, 정전용량형 센서에서는 6.6  $\mu\text{m}$  가 측정되어야 한다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 각각 무부하 상태와, 외부에

서 2.88N·m 의 부하가 가해진 상태에서 측정된 미소 이송능력을 보여주고 있다. 부하는 Fig. 8 에 나타난 것과 같이 모터 회전축 원판에 스프링을 설치하여 스프링 탄성력에 의해 부하를 가해주었다.

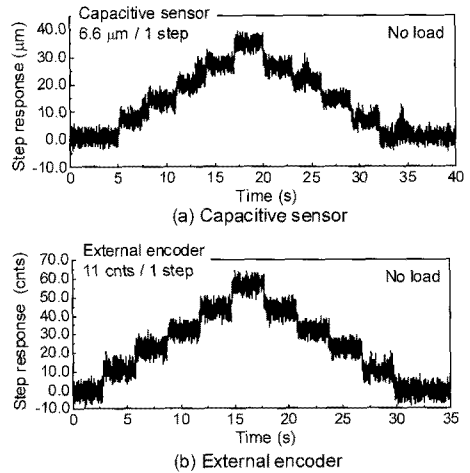


Fig. 9 Step response without torque load

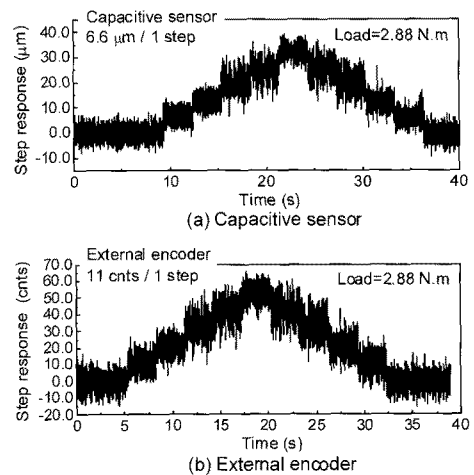


Fig. 10 Step response with torque load of 2.88 N·m

부하가 가해지지 않은 상태에서는 계단 형태의 정확한 미소 이송능력을 보여주고 있는데 반해, 토크부하가 가해지면 전체적으로는 잘 따라가고 있지만 각 스텝은 명확히 구분되지는 않는다. 이는 제어기의 게인이 무부하 상태에서 최적으로 맞추어진 상태이므로 부하상태에서는 외부부하에 대해 적절히 대응하지 못했기 때문이다.

Fig. 11 은 제어기에 의해 정지상태로 유지하고 있는 모터에 외부에서 갑자기 충격하중을 가했을 때 제어기가 얼마나 빨리 반응하는가를 살펴본 것이다. 외부에서 측정된 고분해능 엔코더 신호는 충격하중이 가해진 당시  $\pm 3000$  펄스까지도 떨리고 있으나, 대략 0.27 초 이내에 원상태로 회복하고 있는 것을 알 수 있다.

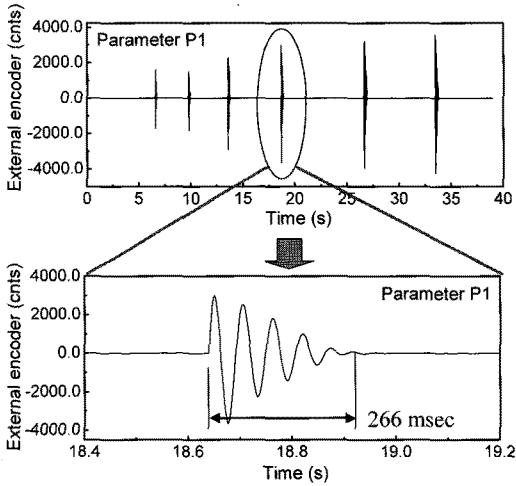


Fig. 11 Impact response

Fig. 12 는 정속으로 구동하고 있는 모터 회전축을 손으로 잡아 간헐적으로 구동을 방해했을 때 측정된 속도변동 특성을 보여주고 있다. 무부하시 기본적으로  $\pm 0.8\%$ 의 속도변동을 유지하고 있는 가운데 하중이 가해진 경우에는 최대  $\pm 1.7\%$  정도로 2 배 정도 커져서 속도변동이 나타나고 있다.

Fig. 13 은 부하가 가해지지 않은 상태에서의 타겟모터의 반복 위치결정정도를 살펴본 것이다. 모터 내부 엔코더로 100 펄스씩 5 번 왕복명령을 주었을 때 측정된 외부 엔코더의 값으로, 정확히는 1,098 펄스가 측정되어야 하나, 실제 1117.6 펄스로 1.8%의 오차를 보이고 있다.

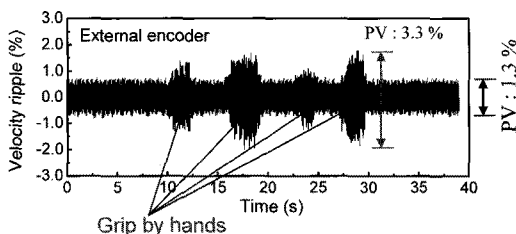


Fig. 12 Effect of external disturbance

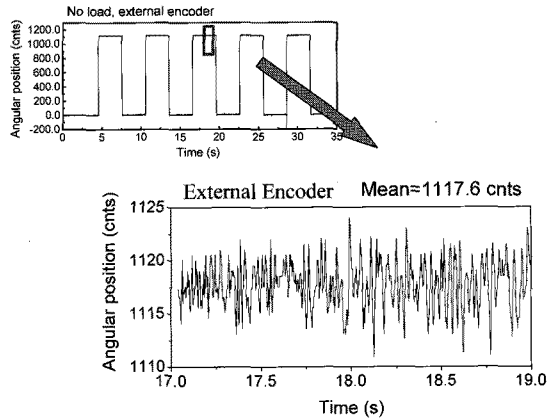


Fig. 13 Angular position repeatability without load

이상과 같이 구축된 가상공작기계를 e-CNC 장치에 연결하여 여러 토크부하 하에서 속도변동성 및 미소 이송정도, 동적 안정성 등을 측정하여 e-CNC 장치의 평가에 활용할 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 평가방식은 완전히 e-CNC 장치만의 평가는 아니고 제어에 사용된 모터 드라이브 특성 및 계인상태에 따라서도 매우 큰 영향을 받는다. 그럼에도 불구하고 실제 공작기계에서 CNC 장치는 서보모터와 같이 사용됨을 가정할 때 e-CNC 자체만의 평가는 큰 의미를 갖지 못하며 모터 드라이브 및 여러 부하가 가해진 상태에서의 평가가 더 큰 의미를 갖을 수 있다.

### 3.2 e-CNC 장치의 최적 PID 계인 튜닝

다계통 e-CNC 를 장착한 복합가공기는 20 개 이상의 축들이 동시에 공간적으로 운영되고 있어서 각 축간의 상대적인 동기화와 각 이송계에서의 위치정밀도 유지가 매우 중요하다. 그러나 공작기계 제작사들은 복합가공기의 최종 검사에서 사용자가 사용하는 무거운 공작물이나 가감속도의 레벨을 고려치 않고 각 축들간의 동기화와 이송계의 파라미터 튜닝을 일반적인 경우로 셋팅함으로써, 실제 고객들이 장비를 사용함에 있어서 진동과 가공 품질상에 문제가 발생하기도 한다. 그래서 공작기계 제작사들은 고객의 특수한 목적과 현장의 조건을 맞추기 위해서 현장에서 이송계에 대한 파라미터 튜닝을 재시도한다. 이 과정에서 기계의 작동과 가공공정의 재현성 부족으로 장비의 튜닝이 단시간 내에 완결되지 못한다. 이러한 현상이 국내뿐만 아니라 외국에서도 발생할 경우, 공작기계 제조사로서는 A/S 로 인한 손해가 상당히 많게

되므로, 이러한 경우에 가상공작기계를 이용하면 원거리에서도 사용자의 장비에 대한 Auto Tuning 을 쉽게 수행할 수 있다.

Auto Tuning 을 위하여 토크부하는 실제 공작기 계에서 발생하는 여러가지 하중을 종합하여 합성 토크로써 공급하였다. 파라미터 최적화 실험에 사 용된 제어기는 MEI (Motion Engineering Inc)사의 DSP 제어기로써 사용자 코딩을 위한 라이브러리 를 제공하기 때문에 쉽게 원하는 알고리즘으로 프 로그램 할 수 있다. 합성토크부하를 부하모터에 전압으로 가해주는 모듈 및 PID 게인튜닝 최적화 를 위한 모듈은 MEI DSP 보드 및 마이크로소프트 의 비주얼 베이직을 이용하여 개발하였다. 파라메 터 최적화 과정 및 개발된 프로그램을 Fig. 14 에서 보여주고 있다.

타겟모터의 PID 최적화는 모터가 이송하는 동 안에 RMS 오차를 목적함수로 하여 이 목적함수가 최소화되도록 Gradient 탐색법을 이용하여, PID 게 인이 초기값으로부터 새로운 값을 탐색하는 방 향으로 이루어졌다. Fig. 15 는 개발된 프로그램을 이 용하여 합성토크부하를 부하모터에 가했을 때 얻 어진 전압의 출력값을 MEI 보드의 DAC OUTPUT 을 통해서 모니터링 한 것이다. 부하모터에 가해 지는 토크부하는 가감속시에 매우 크며, 정속시에는 삼각파형의 질삭력이 작용하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 16 은 목적함수인 타겟모터의 RMS 오 차를 보여주는 것으로 초기 -360 의 오차로부터 -220 정도로 작아져 수렴하고 있는 것을 볼 때 최 적화가 잘 진행되고 있음을 알 수 있다. Fig. 17 은 PID 게인의 최적화 탐색과정을 나타낸 것이다. 8 번

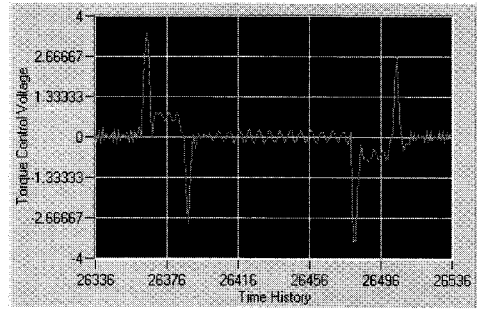


Fig. 15 Variation of torque output

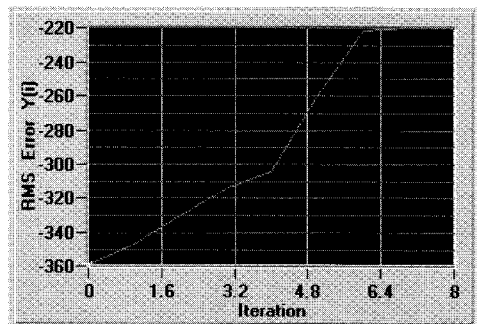


Fig. 16 Variation of target motor RMS error

의 최적화가 진행되는 동안 P, I, D 게인은 각각 2500, 800, 80000 의 초기값으로부터 5000, 630, 104000 의 새로운 값으로 수렴하고 있다.

4. 결론

공작기계 e-CNC 장치의 성능과 취약부를 평가 하기 위해서 가장 기본적인 장치인 서보모터만을

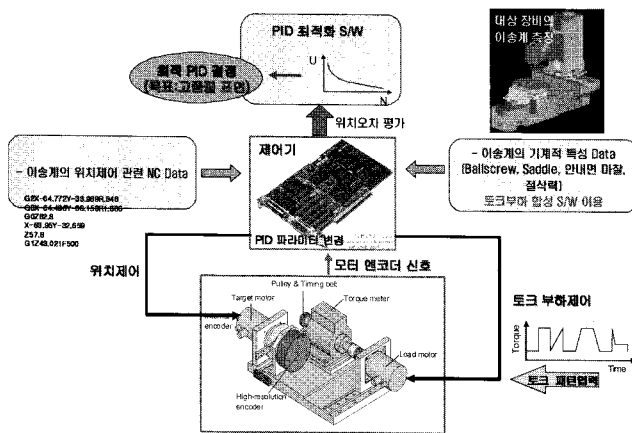
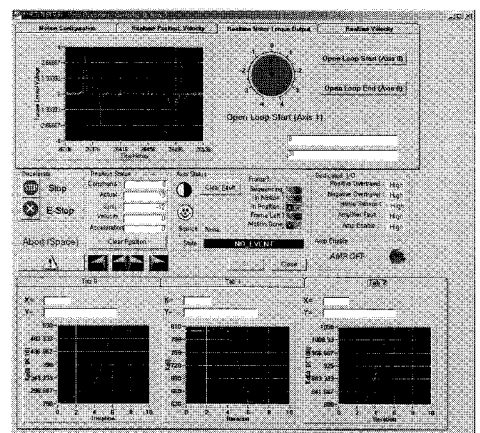


Fig. 14 Concept of PID optimization and its program



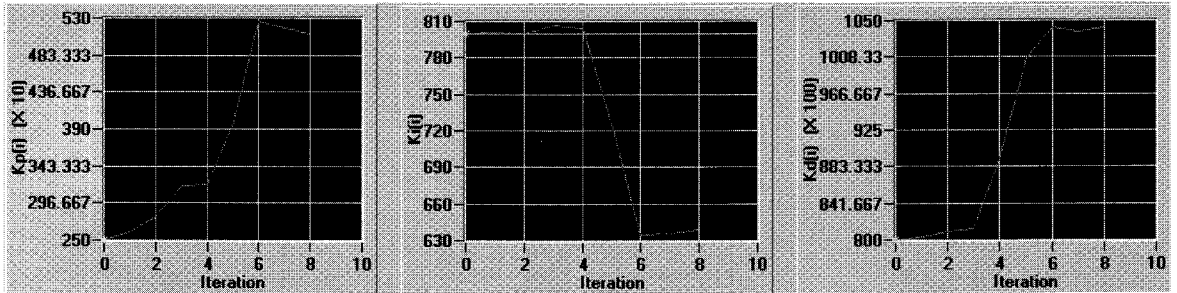


Fig. 17 Variation of PID gains during optimization

이용하여 실제 공작기계에서 발생하는 현상을 8 가지 토크패턴을 통하여 가상의 부하로써 작용할 수 있는 가상공작기계 장치를 설계, 제작하였다.

실제 선삭과 밀링시 발생하는 토크패턴을 이용하여 e-CNC 에 의한 구동모터의 속도변동성, 미소 이송정도, 동적 안정성 등을 평가한 결과, 설계된 가상 공작기계장치는 e-CNC 장치의 성능평가를 위해 충분히 유용하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 가상 공작기계장치를 이용하여 현장이 아닌 원격리에서도 가공공정에 따른 튜닝 최적화를 쉽게 할 수 있는 방법을 개발하였다.

1) 공작기계 내에서 발생하는 주요 가공공정과 현상을 토크패턴 8 가지로 특성화시켜 공작기계를 Virtual 화 하였다.

2) e-CNC 장치의 성능을 기계적 외란없이 평가 하기 위해서 e-CNC 장치에 타겟모터와 부하모터를 연결하고, 이 모터에 준비된 8 가지 토크 패턴을 회전상태에서 공급할 수 있는 가상공작기계를 설계, 제작하였다.

3) 제작된 가상공작기계를 이용하여 토크부하에 따른 타겟모터의 속도변동성과 미소 이송능력을 평가하여 CNC 성능테스트에 유용하게 사용할 수 있음을 확인하였다.

4) PID 튜닝 최적화 알고리즘을 개발하고, 이를 구축된 가상공작기계 실험장치에 적용하여 개인 튜닝이 원활이 이루어짐을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부에서 추진하는 10 대 부품소재기술개발사업의 하나로 수행되고 있는 “다 계통 e-CNC 모듈개발” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Hans, G., “Electrical Feed Drives for Machine Tools,” John Wiley & Sons Inc., 1983.
2. Christian, B., “Vergleichende Analyse von Vorschubantrieben fuer Werkzeugmaschinen,” Shaker Verlag, 2002.
3. Lee, C. -H. and Khim, G., “Performance Evaluation Method of CNC Units using Torque Curve Patterns,” International Conference on Smart Manufacturing Application(ICSMA2008), pp. 225-229, 2008.
4. Mitsubishi Electricity, “Manual for AC Servo Application,” Iijin Press, 2001.
5. Lee, G. -C., “Introduction to Servo Technology for Mechatronics,” Gijeon Press, 1994.