

이송 및 주축속도 가변속에 의한 볼 엔드밀
절삭공정의 절삭력 추적제어

이 천 환*, 이 승 욱* , 이 건 북**

Cutting Force Control by Variable Feed and
Spindle Speed in Ball-end Milling Process

Chun-Hwan Lee*, Seung-Ug Yi**, Gun-Bok Lee***

ABSTRACT

There are two important variables in machining process control, which are feed and cutting speed. It is possible to improve the machining accuracy and the productivity by maintaining the optimal feed and cutting speed. In this work, a controller is designed to achieve on-line cutting force control based on the modeling of cutting process dynamics established through step response test. Two schemes are proposed and implemented. The first is feed control under the constant spindle speed and the second is spindle speed control under the constant feed. Finally, both are proved to work properly through simulation and experimentation.

Key Words : Cutting Force Control, Feed Control, Spindle Speed Control, Machining Process Control, Cutting Process Dynamics

1. 서 론

공작기계를 이용한 절삭공정에 있어서 절삭속도 및 이송속도는 생산성 및 가공정도에 영향을 미치는 중요한 두가지 인자이다. 즉 절삭속도 및 이송속도를 주어진 조건내에서 최대로 유지함으로써 생산성을 크게 향상시킬 수 있으며 지난 수십년간 공작기계 제어는 이러한 목적을 달성키 위한 노력을 꾸준히 추구하여 왔다. 이상과 같은 목적을 위한 첫번째 핵심이 되는 과제는 공작기계를 이용한 고속, 정밀 절삭의 달성이다. 그러나 고속 절삭은 공구파손, 마모, 가공정도 저하, 공구수

명, 단축 체터등 여러가지 문제를 야기시키 때문에 절삭조건과 절삭 동특성의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 제어방식의 개발을 필요로 한다. 이러한 문제들은 제어이론 관점에서는 모델링 오차, 외란, 측정오차 등에 기인한 안정도 문제, 제어기의 강인성에 관계되기 때문에 이들을 만족시키는 제어 알고리즘의 개발 및 적용의 필요성이 대두되는 것이다. 이러한 관점에서 개발된 제어 알고리즘에 의한 공작기계의 절삭력 제어는 가공정도와 생산성을 향상시키고 절삭과정중 발생할 수 있는 절삭동특성의 변화에 능동적으로 대응할 수 있는 잇점을 제공한다.

* 숭실대 대학원
** 숭실대 기계과

이상의 목적을 성취하기 위한 절삭력 추종제어는 절삭조건 내에서 최대허용 기준 절삭력을 정하고 절삭 공정중 발생하는 절삭력을 이 기준절삭력에 추종되도록 제어함으로써 항상 이송속도를 최대로 유지하고자 함을 기본 개념으로 공작기계의 이송속도와 주축회전 속도를 제어함으로써 실현할 수 있다.

절삭공정제어 분야의 연구로서는 국내외적으로 80년대 초부터 절삭력 추종제어와 공구위치 추종제어의 두 방향으로 연구가 진행되어 왔다. Lee⁽¹⁾는 드릴의 기하학적 형상을 고려하여 드릴공정의 모델을 개발하고 드릴의 위치에 따라 변화하는 기준절삭력을 추종하도록 하는 선형 모델 추종제어(Linear Model Following Control)을 수행하였으며, Oh⁽²⁾는 밀링공정에서 공구의 휨을 고려하여 일차형 이산치 모델을 유도하고 기준 모델 적응제어 이론을 적용하여 절삭력을 기준절삭력에 추종하도록 하는 연구를 수행하였다. Koren⁽³⁾은 개루프 이득을 추정하고 이에 따라 폐환제어의 이득을 가변시키는 제어 시스템을 제안하였으며, Lauderbaugh⁽⁴⁾는 2차형 밀링 공정 모델을 적용하여 기준 모델 적응제어(Model Reference Adaptive control)을 수행하였다. 또한 Masory⁽⁵⁾는 절삭깊이, 절삭속도, 재질 변화 등으로 인한 절삭공정중의 이득변화가 발생했을 경우 일정 제어기 이득 방식의 안정성을 해석하였다.

이상에서 언급한 절삭력 제어에 관한 연구와 그외 유사한 연구들은 절삭속도(주축속도)는 일정하게 유지하면서 이송속도만을 변화시키는 제어방법을 채택하고 있기 때문에 가공시의 여러 불확실한 요인에 의한 좀더 신속한 대응이나 절삭력과 공구위치의 동시제어를 위한 주축회전 속도제어의 가능성에 대한 여지를 남겨두고 있다. 본 연구에서는 절삭속도(주축회전속도)는 일정하게 유지하면서 이송속도만의 변화에 의한 절삭력 제어뿐만 아니라 이송속도를 일정하게 유지하면서 주축회전속도의 변화에 의한 절삭력 제어의 가능성을 확인해 보고자 한다.

절삭공정의 실험을 위해 CNC 머시닝 센터(CNC Machining Center)를 사용했으며, 이송을 공급하기 위해 머시닝 센터 베드를 이용하지 않고 독자적으로 구입한 A.C. 모터에 의해 구동되는 XY테이블을 사용하였다. 모든 신호의 이동이 컴퓨터를 통하여 이루어지도록 하기 위하여 머시닝 센터의 기존에 내장된 NC 프로그램 제어용 Control Box를 차단하고 컴퓨터와 DACA Board(A/D, D/A, 카운터, 타이머, 인터럽트 등의

기능수행)를 통하여 주축의 직류모터 구동 드라이버와 XY 테이블을 구동하는 교류모터 인버터, 공구동력계로부터 측정후 증폭, 여과 등의 신호처리된 절삭력 신호를 인터페이스하여 전체적으로 페루프 구조를 이루도록 하였다.

제어시스템 구성을 위한 첫단계로 D.C. 모터와 드라이버로 구성된 주축구동 시스템과 A.C. 모터와 인버터로 구성된 이송구동 시스템의 동특성을 실험적으로 파악하였으며 일정절삭속도하에서 이송제어에 의한 절삭공정의 모델링과 일정이송속도 하에서 절삭속도 제어에 의한 절삭공정의 모델링을 수행하였다. 인식된 기본모델을 근거로 제어기 설계를 수행하였다.

2. 절삭공정의 동적모델

절삭공정의 동적모델링을 위해서는 아래의 3경우에 대한 동특성을 파악하여야 한다. 즉,

- ① 절삭깊이의 변화에 의한 동적응답
- ② 이송속도의 변화에 의한 동적응답
- ③ 절삭속도(주축 회전속도)의 변화에 의한 동적응답

일반적으로 절삭력 제어를 위해 절삭깊이를 변화시키는 경우는 실용적인 측면에서 그다지 활용되고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 두번째, 세번째 경우에 대해서만 동적실험을 통하여 모델링을 수행하였다. 실제로 밀링가공시의 절삭력은 Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 정상상태에서도 날의 수와 주축속도에 관계되는 신호 주파수를 기본 주파수로 하여 많은 고조파 성분을 포함하고 있기 때문에 이러한 실제 절삭력 신호를 제어하기보다는 기초 절삭력 신호를 신호처리한 평균 절삭력 신호에 대

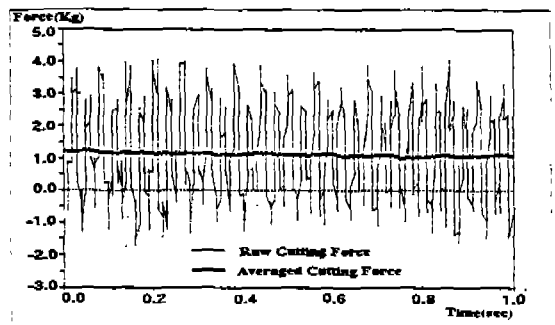


Fig. 2.1 Raw and Averaged Cutting Force Signal in Ball-end Milling Process

한 제어를 수행하였다. 현실적으로는 절삭공정만의 동특성(Cutting Process Dynamics)을 별도로 실험적으로 추출하는 것은 의미가 적고 또한 이론적 모델은 수학적으로 대단히 비선형적 특성을 나타내기 때문에 제어기 설계를 위해 사용키에는 그다지 실용적이지 못하다. 이와 같은 현실적 제약과 실용적 측면을 고려하여 본 연구에서는 주축 및 이송모터 구동 드라이버와 모터, 절삭공정이 모두 일체화된 시스템에 대한 모델링을 수행하였다.

본 연구에서는 구동 드라이버의 입력과 절삭력 사이의 동특성을 표준입력신호로서 계단입력 신호(Step Input Signal)를 가하여 그 응답으로부터 1차 지연형 시스템으로 모델링 하였다. 모델링을 위한 스텝시험은 주축회전속도를 일정하게 유지하고 이송모터 구동 드라이버의 인가전압을 계단적으로 변화시켰을 경우와 이송

속도를 일정하게 유지한채 주축모터 구동 드라이버의 인가전압을 계단적으로 변화시키는 두가지 경우에 대해 수행하였다.

Fig. 2.2(a), (b)와 Fig. 2.3(a), (b)는 두 경우에 대한 전형적인 스텝응답 곡선을 나타내며 대체로 일차계의 특성을 나타내고 있음을 보여주고 있다. 후에 상술되는 바와 같이 일차계로서의 모델링을 통하여 제어기 구조의 단순화를 기할 수 있을 뿐만 아니라 실제 절삭 실험을 통하여서도 우수한 제어성능을 나타내고 있기 때문에 일차계로의 모델링은 충분히 그 정당성을 갖는 것으로 간주할 수 있다. 또한 동특성은 절삭속도와 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따라서 다소의 차이를 나타내나 이러한 점은 모델링 오차로 간주하여 제어기 설계 시 반영하여 영향을 받지 않도록 함으로써 본래의 목적인 절삭력 추종제어를 원활히 달성할 수 있다.

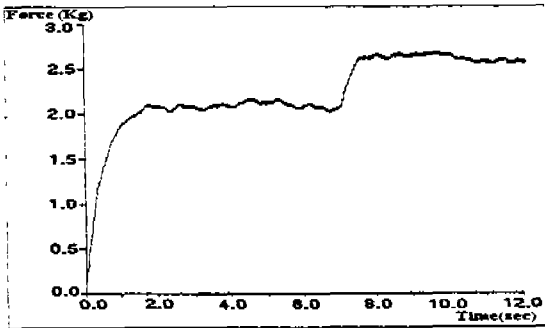


Fig. 2.2(a) Averaged Cutting Force Signal due to Step Change in Feed under Constant Spindle Speed

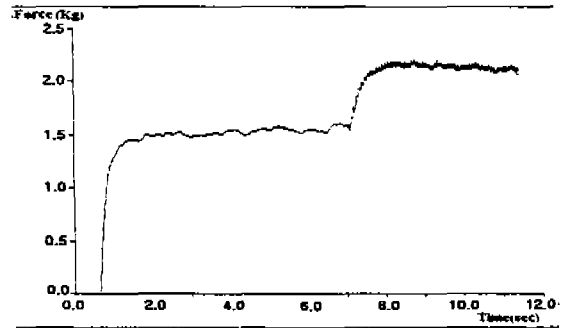


Fig. 2.3(a) Averaged Cutting Force Signal due to Step Change in Spindle under Constant Feed

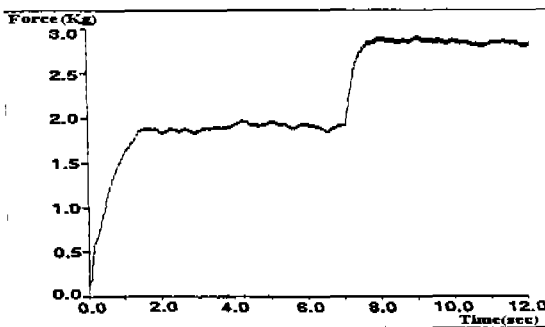


Fig. 2.2(b) Averaged Cutting Force Signal due to Step Change in Feed under Constant Spindle Speed

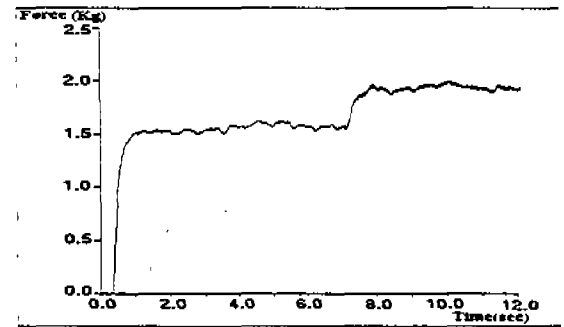


Fig. 2.3(b) Averaged Cutting Force Signal due to Step Change in Spindle under Constant Feed

3. 제어기 설계

도출된 구동 드라이버에의 인가전압을 입력으로 하고 절삭력을 출력으로한 임출력 모델을 근거로 하여 볼랜드 밀 가공시의 절삭력 추종제어를 위한 제어기를 설계하였다.

기본적으로 제어기가 갖추어야 할 요건은 폐루프 시스템의 내부 안정성을 보장해야 하며, 원하는 목표응답을 달성해야 한다. 각각의 경우에 대한 제어기 설계 방법은 다음과 같다.

3.1 일정주축속도 - 이송속도제어

Fig. 2.2(a), (b)로부터 이송모터 구동 인버터의 인가전압과 절삭력 사이의 동적관계를 다음과 같이 1차계로 모델링 하였다.

$$P_f(s) = \frac{K_f}{\tau_f s + 1} \quad (3.1)$$

제어기 설계를 위해 기준입력과 절삭력 사이의 기준 목표치를 모델을 식(3.2)와 같이 선정하면,

$$T_M(s) = \frac{1}{\tau_m s + 1} \quad (3.2)$$

$\tau_m < \tau_f$

Fig. 2.2(a), (b)로부터 제어 대상인 플랜트의 시정수 τ_f 는 대략 0.6초 내외의 값을 가지므로 기준 목표치 모델의 시정수 τ_m 은 플랜트의 시정수보다는 약간 빠른 0.3초로 선택하였다. Fig. 3은 플랜트 P와 제어기 C를 포함한 전체 폐루프 시스템의 블록선도이다. 그림으로부터 전체 폐루프 시스템의 전달함수식은 다음과 같다.

식(3.3)의 폐루프 시스템 전달함수 $T(s)$ 는 추적제어를 달성하기 위해서 기준 목표치 모델 $T_M(s)$ 와 일치해야

$$T(s) = \frac{C(s)P_f(s)}{1 + C(s)P_f(s)} \quad (3.3)$$

하며, 기준 목표치 모델 $T_M(s)$ 와 식(3.3)의 폐루프 시스템 전달함수식 $T(s)$ 의 관계로부터 다음과 같은 제어기 전달함수 $C(s)$ 를 구할 수 있다.

$$C(s) = \frac{as + b}{s} \quad (3.4)$$

3.2 일정이송속도 - 주축속도제어

주축 회전속도 제어의 경우도 이송제어의 경우와 같은 방법으로 제어기를 설계하였다. 주축모터 구동 드라이버의 인가전압과 절삭력과의 관계를 역시 1차계로 모델링 하였다. 즉,

$$P_s(s) = \frac{K_s}{\tau_s s + 1} \quad (3.5)$$

윗 식(3.5)에서 정상상태 이득 K_s 는 이송속도 제어인 경우와는 반대로 입력에 대해 주축회전 속도가 증가함에 절삭력이 감소하게되어 음의 값을 갖게되고 실험적으로 식(3.5)의 시정수 τ_s 는 Fig. 2.3(a), (b)로부터 약 0.8초 정도의 값을 가지므로 기준 목표치 모델의 시정수를 이송속도 제어의 경우보다 느린 0.5초로 결정하였다.

다음식은 주축회전 속도 제어를 위한 기준 목표치 모델식이다.

$$T_M(s) = \frac{1}{\tau_m s + 1} \quad (3.6)$$

$\tau_m < \tau_s$

또한 Fig. 3으로부터 폐루프 시스템의 전달함수식은 아래 식(3.7)과 같으며 역시 목표치 응답을 달성하기 위해서는 폐루프 시스템의 전달함수 $T(s)$ 와 기준 목표치 모델 $T_M(s)$ 가 일치해야 한다.

$$T(s) = \frac{C(s)P_f(s)}{1 + C(s)P_f(s)} \quad (3.7)$$

식(3.6)과 식(3.7)로부터 주축 회전속도 제어를 위한 제어기 전달함수 $C(s)$ 는 다음과 같이 비례 미분 제어기의 형태를 갖는다.

$$C(s) = \frac{as + b}{s} \quad (3.8)$$

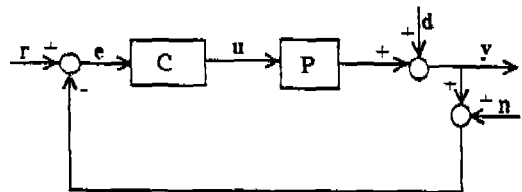


Fig.3 Block Diagram of Cutting Process Control.

4. 시뮬레이션

실험적으로 확립한 절삭공정의 동적모델과 기준 목표치 모델을 기준으로 하여 설계된 제어기를 이용하여 이송 속도제어 및 절삭 속도제어에 대한 시뮬레이션을 각각 기준 입력이 일정 주기로 변화하는 경우에 대해서 실시하였다. 또한 제어기 설계시 제외되었던 외란과 잡음을 고려하여 평균 0.2(kg), 공분산(Covariance) 0.1, 대역 폭 2Hz의 유색잡음(colored noise) (Fig. 4. 1)이 작용하도록 하였다.

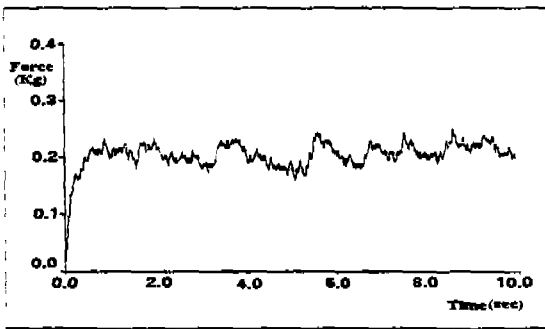


Fig. 4.1 Disturbance with mean : 0.2, Covariance : 0.1

4.1 일정주축속도 - 이송속도제어

설계된 제어기의 성능을 평가하기 위해 확립된 이송-절삭력의 동적모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4.2는 시뮬레이션의 결과로써 기준절삭력이 일정 주기로 변화하는 경우에 대한 제어입력과 절삭력을 나타내고 있으며 부하외란의 존재에도 불구하고 좋은

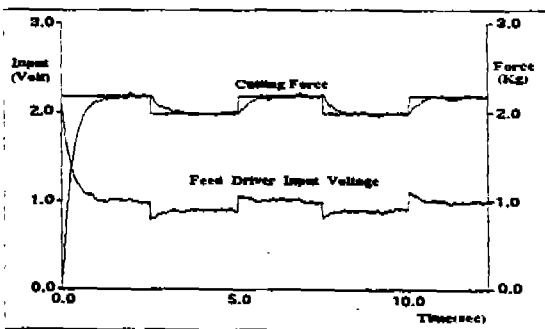


Fig. 4.2 Tracking Control under Constant Spindle Speed

추종성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

4.2 일정이송속도 - 주축속도제어

Fig. 4.3은 주축속도-절삭력의 동적모델과 설계된 제어기를 이용하여 시뮬레이션한 결과로써 각각 제어입력과 절삭력을 나타내고 있으며 역시 모두 양호한 결과를 보여주고 있다. 기준목표치 모델의 시정수 τ_m 은 플랜트 응답속도가 다소 느린 관계로 이송제어의 경우보다는 다소 느리게 선택하였다.

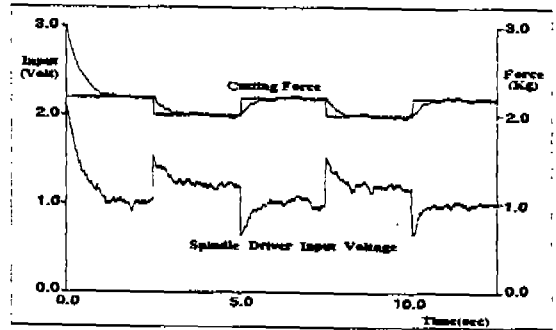


Fig. 4.3 Tracking Control under Constant Feed

5. 실험

5.1 실험장치

본 연구를 위해 구성된 실험장치의 개략도는 Fig. 5.1에 나타나 있다. 본 연구에서는 절삭공정의 실험을 위해 CNC 밀링 머시닝 센터(CNC Milling Machining Center)를 사용하였으나 공구의 이송공급은 본 연구를 위해 사용된 머시닝 센터가 XY방향의 이송을 공급하는 구동원이 스텝 모터로 구성되어 있어 본 연구의 목적에 적합치 못하고 머시닝 센터의 자체 컨트롤러를 제거하고 컴퓨터와의 인터페이스를 합에 있어 제약이 많기 때문에 머시닝 센터 베드 위에 XY 테이블을 장착하여 이송을 공급하였다. 주축은 D. C. 모터로 구동되며 최고속도는 2000RPM으로 제한되어 있어 제어범위 설정에 장애요소로 작용하였다. 구동 드라이버는 PWM방식으로 제어되며, 모터의 타코제너레이터로부터 속도신호를 피드백 받아 아날로그적으로 속도제어 루프를 구성하는 서보 컨트롤러를 내장하고 있다. 머시닝 센터 자체의 컨트롤러 입력단자를 차단하고 주축모터 구동 드라이버의 속도신호 입력단자와 컴퓨터의 인터페이스 보드에 내장된 D/

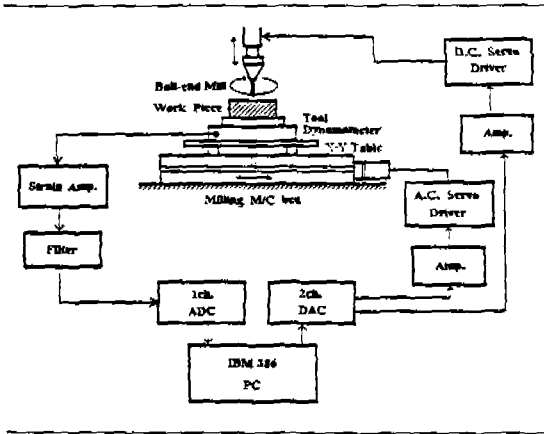


Fig. 5.1 Schematic Diagram of the Experimental Setup

A 변환기와 직접 연결하여 제어가 수행될 수 있도록 하였다. 본 연구를 위해 사용된 DACA(Data Acquisition And Control adapter) 보드는 컴퓨터와 이송 및 주축모터 구동 드라이버에 연결되어 제어신호를 공급하는 D/A 변환기, 공구동력계로부터 측정된 절삭력을 디지털 신호로 변환하는 A/D 변환기, 모터의 엔코더(Encoder) 신호를 측정하기 위한 카운터, 그리고 인터럽트(Interrupt)를 위한 타이머를 내장하고 있다. 공구동력계는 스트레인 게이지 형(Strain Gage Type)으로 절삭과정에서 발생하는 절삭력을 X, Y, Z세방향의 힘 성분으로 측정할 수 있으며 신호는 스트레인 증폭기(Strain Amplifier)를 통하여 증폭하였다. 스트레인 증폭기로부터 나오는 신호는 Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 많은 고주파 성분을 포함하고 있어 컴퓨터로 받아들이기 전에 저역필터를 통하여 평균화하였고 DACA보드의 A/D 변환기에서 요구하는 전압범위에 맞추기 위해 증폭기를 통하여 증폭하였다.

공작물의 이송은 A.C. 모터에 의해 구동되는 XY 테이블에 의해 공급하였다. 모터구동 드라이버는 주축모터 구동 드라이버와 마찬가지로 자체에 아날로그적으로 속도제어 루프를 내장하고 있다. 사용된 XY 테이블은 저속에서 구동토크의 저하로 스틱슬립현상을 나타내었다. 공작물 시편으로는 아크릴을 사용하였으며 공구로는 직경이 10mm인 볼엔드밀을 사용하였다. 또한 페루프 제어를 위한 소프트웨어와 제어알고리즘 처리, 데이터 수집·처리, 인터럽트 기능을 수행하기 위해 IBM PC

386 DX 기종을 사용하였으며 샘플링 시간은 0.01초로 하였다.

5.2 실험 결과

실험적으로 확립한 모델의 적합성과 기준목표치 모델에 의해 설계된 제어기의 성능을 평가하고 도출된 결과를 비교 검토하였다. Fig. 5.2(a), (b)는 일정한 주축회전속도 하에서 이송속도 제어방식에 의한 결과를 나타내며 측정된 절삭력, 구동 드라이버 입력 전압(제어신호), 기준절삭력, 기준절삭력과의 오차 등을 보여주고 있다.

Fig. 5.2(a)는 일정기준 절삭력 추종제어를 수행한 결과를 나타내며 시뮬레이션 결과와 비교하여 좋은 추종성을 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 5.2(b)는 주기적으로 변화하는 기준절삭력에 대한 추종제어의 실험 결과로서 시뮬레이션과 비교하여 다소 느린 응답을 나타내고 있으나 전반적으로 변동하는 기준입력에 대해 원활하게 추종하고 있음을 보여준다.

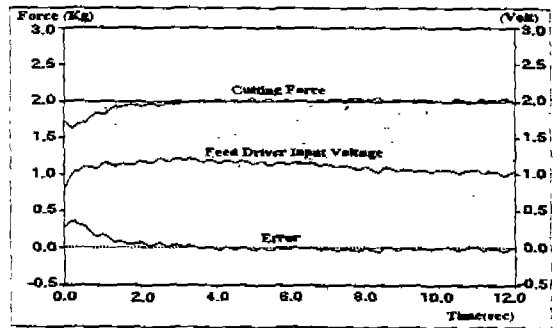


Fig. 5.2(a) Constant Force Control under Constant Spindle Speed

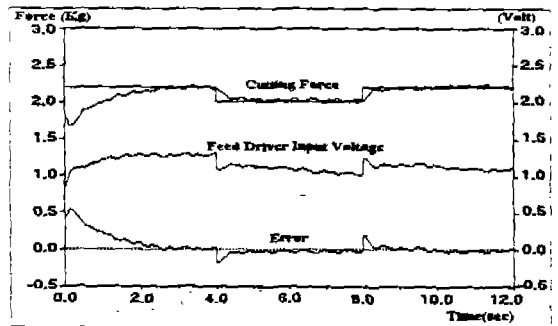


Fig. 5.2(b) Tracking Control under Constant Spindle Speed

Fig. 5.3(a), (b)는 일정한 이송속도 하에서 주축회전 속도제어의 수행 결과를 나타내며 이송제어의 경우와 마찬가지로 측정된 절삭력, 구동 드라이버 입력 전압, 기준절삭력, 기준절삭력과의 오차 등을 보여주고 있다. Fig. 5.3(a)는 기준절삭력이 일정한 경우에 대한 결과이다. 실험장치를 구성하는 하드웨어에 기인한 제한적 요소를 고려하면 대단히 양호한 실험 결과를 나타내고 있다. 정상상태에서의 저주파 요동은 XY테이블의 저속에서 불안정한 이송속도 특성 때문이며, 약 10초 이후 절삭력이 전체적으로 조금씩 드리프트 되는 현상은 스트레인 증폭기의 누적오차에 의한 것으로 간주된다. 이송제어의 경우에는 주축속도를 일정하게 유지한채 이송속도를 가변속 시키기 때문에 이송의 불안정을 피드백 제어로 극복함으로써 저주파 요동현상을 제거하여 가변속 주축속도제어의 경우보다 매끄러운 절삭력 추종제어를 달성하는 것으로 설명할 수 있다. Fig. 5.3(b)는 주기적으로 변동하는 기준절삭력 추종제어를 수행한 결과로서 일정기준 절삭력 제어의 경우와 마찬가지로 하드웨어에

기인한 오차요인을 감안하면 대단히 양호한 제어가 수행되고 있음을 알 수 있다. 정상상태에서 절삭력 신호에 나타나 있는 고주파신호 성분은 주축속도가 저속인 경우 저역필터에서 충분히 평균화되지 않은 점에 기인한 것으로 간주된다.

6. 결 론

머시닝센터를 이용한 볼앤드릴 절삭가공에 있어서 다음의 두가지 방법으로 절삭력 제어를 수행하였다.

1. 일정 주축회전속도 - 가변속 이송제어
2. 일정이송속도 - 가변속 주축회전 속도제어

첫번째의 경우는 국내외에서 이미 많은 연구가 수행된바 있으나 두번째 방법에 의한 제어는 CNC 공작기계의 연구에 있어서 새로운 방향 모색과 주축 및 이송 동시제어의 가능성을 파악키 위해 본 연구에서 처음 시도하였으며 시뮬레이션 및 실험을 통하여 주축회전속도를 가변속 함으로써 절삭력 제어를 충분히 수행할 수 있음을 입증하였다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.

- (1) 실험적으로 확립한 1차계 모델은 제어목적을 달성하는데 충분히 근사하게 절삭공정의 동특성을 나타낸다.
- (2) 이송속도를 일정하게 유지한채 주축회전 속도를 가변속 함으로써 절삭력 제어를 수행할 수 있다.
- (3) 이송과 절삭속도 동시제어 가능성을 제시하였다.

참고문헌

1. Gun Bok, Lee, "Digital Control for Burr Minimization in Drilling", Ph. D. Dissertation, Univ. of California, Berkeley, 1989
2. Jun-Ho, Oh, "Model Referene Adaptive Control of the Milling Process", Ph. D. Dissertation, Univ. of California, Berkeley, 1985
3. Koren, Y., and O, Masory, O., "Adaptive Control with Process Estimation", Annals of the CIRP, Vol. 30, 1981
4. Lauderbaugh, L. K and Ulsoy, A. G, "Implementation of Model Reference Adaptive

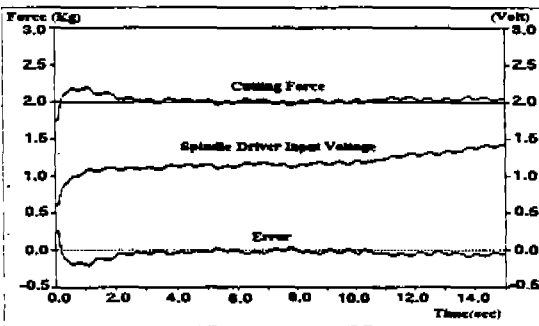


Fig. 5.3(a) Constant Force Control under Constant Feed

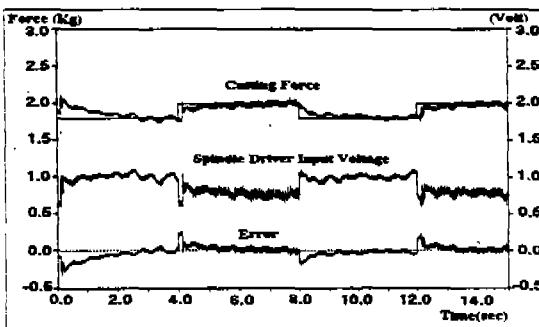


Fig. 5.3(b) Tracking Control under Constant Feed

- Force Control in Milling", Ph. D. Dissertation, Univ. of Michigan, 1986
5. Masory, O., and Koren, Y., "Stability Analysis of a Constant Force Adaptive Control System for Turning", Trans of ASME, J. of Eng. for Industry, Vol. 101, Nov., 1985
 6. Koren, Y., "Computer Control of Manufacturing System", McGraw-Hill, New York, 1984
 7. Ulsoy, A. G., Koren, Y., Rasmussen, F., "Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools", ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 105, pp.107~112, June 1983
 8. Tomizuka, M., and Zhang, S. Z., "Modeling and Conventional/Adaptive Control of a Lathe Cutting Process", Proc. of the ACC, Boston, MA, June, 1985
 9. 이천환, 이승욱, 이진복, "이송 및 주축속도 가변속에 의한 볼엔드밀 절삭 가공의 추적제어", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(1), pp.644~647, 1993