

〈論 文〉

선삭가공에서 절삭력을 일정하게 유지하기 위한 적응제어

노상현* · 김진락** · 김교형**

(1992년 6월 23일 접수)

Adaptive Control for Cutting Force Regulation in Turning Operation

Sang-Hyun Noh, Jin-Rak Kim and Kyo-Hyoung Kim

Key Words : Adaptive Control(적응제어), Turning Operation(선삭가공), PI Controller(비례적분제어기), Cutting Force Regulation(일정절삭력유지), Modeling(모델링), Stability(안정성)

Abstract

Adaptive Control is applied to regulate cutting force in turning operation under varying cutting conditions. Regulation is achieved primarily by adjusting feedrate. Such control leads to better machine utilization and increased tool life. The modeling of adaptive control system in turning operation is presented. The experimental results show that the adaptive PI controller is stable and performs more effective force control over wide range of cutting conditions as compared with the fixed gain PI controller.

기 호 설 명

- | | |
|--------------------|-------------------------------------|
| F_c : 제촉 절삭력 | p : 이송승수 |
| F_r : 기준 절삭력 | s : 라플라스 변환의 복소변수 |
| a : 절삭깊이 (mm) | t : 시간 |
| E : 절삭력 오차 | T : 주축의 회전주기 (60/n) |
| f : 이송 (mm/rev) | U : 서보시스템 입력신호 |
| F : 절삭력 (N) | V_f : 이송속도 (mm/sec) |
| K : 개회로 이득 | z : z 변환의 복소변수 |
| K_e : 변환계수 | ζ : 서보시스템의 감쇠비 |
| K_f : 비절삭력 상수 | ω_n : 서보시스템의 고유진동수 (rad/sec) |
| K_g : 적분제어기 이득 | τ : 플랜트 시간상수 |
| K_n : 비례제어기 이득 | |
| K_m : 기어 잇수비 | |
| K_p : 플랜트 이득 | |
| K_s : 서보 이득 | |
| n : 주축 회전수 (rpm) | |

1. 서 론

절삭가공에서의 생산성 및 정밀도 향상을 위해서 CNC 공작기계의 보급이 급속하게 증가하고 있다. CNC 공작기계에서는 작업자의 숙련된 지식과 경험에 의하여 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 등의 절삭조건을 미리 선택하여 작업을 하여야 한다. 그러나 생산가공에서 생산성 향상을 위한 절삭깊이

*정회원, 대구공업전문대학 자동차학과

**영남대학교 기계공학과 대학원

***정회원, 영남대학교 기계공학과

및 이송의 증가는 절삭력의 증가로 공구나 공작물의 변형을 유발하여 공작물의 정밀도가 떨어지고 최악의 경우에 대한 여유있는 절삭조건을 선정하는 것은 생산성저하를 가져온다. 그래서 작업자의 지식이나 경험에 관계없이 생산성을 향상시키기 위해 CNC 공작기계에 적응제어의 응용이 필요하게 되었다. 절삭과정동안 공작기계가 적당한 절삭조건을 가지기 위한 적응제어는 구속적응제어와 최적적응제어로 크게 나눌 수 있다.⁽³⁻⁶⁾ 구속적응제어는 절삭과정동안 절삭력, 최대허용토크, 절삭온도 등을 제어기가 자동적으로 일정하게 유지하여 작업능률을 최대로 하는 것이고 최적적응제어는 가공비용이나 가공시간 등의 성능지수를 시스템의 제한조건을 만족시키는 범위에서 최적화하기 위하여 절삭조건을 일정하게 유지하는 것이다. 실제로 절삭 작업에서 성능지수를 정의하는 것은 매우 어려우며, 생산 환경에서 필요한 파라미터를 온라인으로 신뢰성있게 측정할 수 있는 센서가 부족하므로 공작 기계에 대한 적응제어는 대개 구속적응제어 형태이다.

절삭과정은 시변비선형(time-varying nonlinear) 과정이기 때문에 재래의 고정이득 선형제어기(linear controller with fixed gain)로는 절삭파라미터가 변화될 때 절삭시스템의 안정성을 보장할 수 없다. 적응제어 시스템에서는 절삭조건에의 주요변화 파라미터인 절삭깊이가 변할때 이송속도를 변화시켜 일정 절삭력을 유지하도록 하여 생산성을 향상시키고 안정한 절삭조건을 유지하게 되므로 공작물과 공구를 보호할 수 있다.

Stute와 Goetz⁽¹⁾는 제어기의 이득을 조절하는 밀링시스템을 개발하였으나 초기 제어파라미터의 선택방법을 제시하지 않았고, Spiewak과 Szafarczyk⁽²⁾은 시뮬레이션을 이용하여 절삭력을 해석하였는데 프로세스이득이 이송과 회전속도로부터 추정되어야 하지만 온라인으로 추정하기에는 너무 복잡하다고 판단하였다. 체계적인 연구로는 Masory와 Koren^(4-6,14)이 선삭에서 절삭조건이 변화하더라도 프로세스파라미터를 온라인으로 추정하여 개회로 이득을 일정하게 유지하는 적응제어시스템을 제안하였지만 절삭과정의 독특성을 무시하였고 적절한 개회로 이득의 선정을 실험적인 시행착오법으로 하였다. 김인수 등⁽⁸⁾은 절삭과정을 정적특성식으로 모델링하였고 범용선반에 스텝모터를 장착한 구속적응제어시스템을 개발하였으며, 박천경 등⁽⁹⁾은 머시닝센터에서 엔드 밀링할 때 토크에 의한 가공변수

의 적응제어에 관하여 연구하였지만 모두 Masory와 Koren이 개발한 알고리즘을 그대로 이용하였다. Chen과 Chang⁽¹³⁾은 시스템을 안정하게 유지할 수 있는 비례적분제어기의 이득범위를 선정하는 방법을 연구하였다.

본 연구에서는 Koren과 Masory가 개발하여 적분제어기에 적용한 제어알고리즘을, 제어기 반응속도를 향상시키기 위하여 비례적분제어기에 적용하는 방법을 제시하고자 한다. 실험을 통하여 제어시스템을 모델링하고, 근제법법을 이용하여 시스템을 안정하게 유지하기 위한 개회로 이득을 선정하며, 기존의 보통선반을 적응제어시스템으로 개발하여 고정이득 비례적분제어기와 가변이득 비례적분제어기의 성능을 실험을 통하여 비교하고자 한다.

2. 제어시스템의 모델링

선삭가공에서 적응제어시스템의 개략적인 구성도는 Fig. 1과 같으며, 제어기, 서보시스템, 이송동특성, 절삭과정, 센서부분으로 크게 나눌 수 있다.⁽¹³⁾

2.1 서보시스템의 모델링

서보시스템 부분은 브러시리스(brushless) DC 서보모터 구동기에서 공구까지 해당되며, 먼저 서보모터 구동기에서 이송봉(feed rod)까지의 전달함수 $C_s(s)$ 를 다음과 같이 가정한다.^(13,15)

$$C_s(s) = \frac{K_s \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

식(1)의 계수를 결정하기 위하여 서보모터에 전압 입력을 가하고 이송봉의 각속도를 계측 하면 쉬우나, 각속도 계측이 어려워서 각속도를 적분한 각도를 계측하였다. Fig. 2는 서보모터에 정현파입력을 가하고 그 출력인 이송봉의 각도를 엔코더의 펄스수로 계측하고, 다시 이 값을 D/A변환기로 아날로그값으로 변환하여 신호분석기(signal analyzer)에 입력시켜서 그린 보드선도(bode plot)이다. 따라서

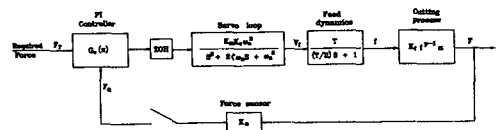


Fig. 1 Schematic diagram of adaptive control system in turning

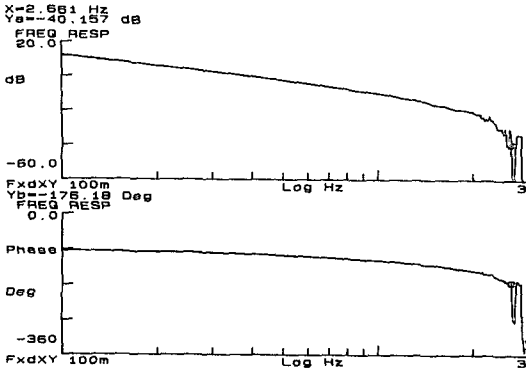


Fig. 2 Bode plot for servo system

Fig. 2의 보드선도는 이송부의 각속도가 아닌 각도에 대한 것으로 식(1)에 $1/s$ 을 곱한 결과이다. 그러므로 식(1)의 상수값을 이 선도로부터 구하면, 고유진동수 감쇠비 및 이득은 $\omega_n=2.66 \text{ Hz}$, $\zeta=0.43$, $K_s=0.66$ 이 된다.

이송부에서 공구까지는 기어장치로 구성되며, 이송부의 각속도 V_s 에 대한 이송을 V_f 까지의 전달함수는 식(2)와 같다.

$$V_f(s) = K_m V_s(s) \quad (\text{mm/s}) \quad (2)$$

여기서 잇수비 $K_m=0.0021414$ 이다.

식(1), (2)로부터 서보모터 입력부에서 이송을까지의 전달함수는 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$V_f(s) = \frac{K_m K_s \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} U(s) \quad (3)$$

2.2 이송동특성 및 절삭과정 모델링

이송은 주축의 회전당 공구의 이동거리로 정의되기 때문에 이송속도를 주축의 회전시간동안 적분한 형태로 주어진다. 그러므로 이송속도 V_f 와 이송 f 사이의 동적관계는 식(4)와 같이 얻을 수 있다. (13)

$$f(t) = \int_0^t V_f(z) dz - \int_0^{t-T} V_f(z) dz \quad (4)$$

여기서 z, t 는 시간함수, $T=60/n$ (n : 주축의 rpm)이다.

식(4)를 라플라스 변환하면 식(5)와 같이 표현된다.

$$f(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} V_f(s) \quad (5)$$

식(5)의 시간 지연항은 Pade' 근사법⁽¹⁶⁾에 의해

식(6)과 같이 표현된다.

$$e^{-sT} = \frac{1 - (Ts/2)}{1 + (Ts/2)} \quad (6)$$

식(5)에 식(6)을 대입하여 간단히 정리하면 식(7)이 얻어진다.

$$f(s) = \frac{T}{(T/2)s + 1} V_f(s) \quad (7)$$

절삭력 F 는 정상상태에서 이송과 절삭깊이의 함수이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다. (4~8, 13~16)

$$F = K_f f^p \quad a = (K_f f^{p-1} a) f \quad (8)$$

여기서 F 는 주절삭력, K_f 는 비절삭력, a 는 절삭깊이, f 는 이송, p 는 절삭과정에 관계되는 상수이다.

식(8)의 각각의 계수를 결정하기 위하여 이송과 절삭깊이를 변화시키면서 절삭력을 구하면 Fig. 3을 얻는다.

최소자승법으로 각각의 미지수의 값을 구하기 위해 식(8)에 로그값을 취해 선형화시키고 그 값을 구하면 K_f 는 1822, p 는 0.7525이다.

식(7)과 식(8)로부터 식(9)를 얻을 수 있다.

$$F(s) = \frac{T K_f f^{p-1} a}{(T/2)s + 1} V_f(s) \quad (9)$$

2.3 계측부분 모델링

절삭력 F 는 전기적회로를 통하여 디지털양인 F_c 로 변환되며 그 관계식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

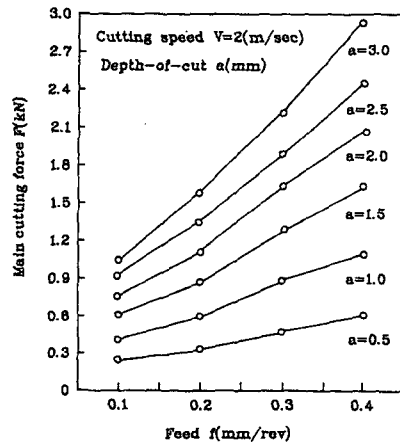


Fig. 3 Cutting process identification

$$F_c = K_e F \quad (10)$$

여기서 K_e 는 F 와 F_c 사이의 변환계수이며 센서와 앰프의 증폭비에 관계하는 상수이다. 식(3), 식(9), 식(10)을 정리하여 제어기를 제외한 전 플랜트의 개회로 전달함수를 구하면 아래와 같다.

$$C_p(s) = \frac{K_p \omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(\tau s + 1)} \quad (11)$$

$$K_p = K_s K_m 60/n K_{jf}^{p-1} a K_e$$

$$\tau = 30/n$$

3. 적응제어기 설계

비례적분제어기는 정상상태 오차를 줄여주는 적분제어기와 비례제어기를 합한 형태로, 구조가 간단하여 제어기 구성이 쉽다. 또한 비례적분제어기는 적분제어기 단독으로 사용할때 반응속도가 느려지는 것을 비례제어기가 보완하여 빠른 반응속도에서도 안정성을 유지한다.

제어기로 비례적분제어기를 사용하는 경우 제어기는 식(12)와 같이 표현된다.

$$C_c(z) = K_h + K_g \frac{1}{1-z^{-1}} \quad (12)$$

여기서 K_h 는 비례이득, K_g 는 적분이득이다. 식(12)를 식(13)과 같이 쓸 수 있다.

$$C_c(z) = \frac{K_h(K_{gh} - z^{-1})}{1 - z^{-1}} \quad (13)$$

여기서 $K_{gh} = 1 + K_g/K_h$ 이다.

식(13)의 제어기와 함께 샘플링시간을 0.1초로 하여 전 시스템의 전달함수를 구하면 아래와 같다.

$$C(z) = \frac{K(K_{gh} - z^{-1})(0.287z^{-1} + 0.515z^{-2} + 0.071z^{-3})}{(1 - 0.060z^{-1} + 0.237z^{-2})(1 - 0.259z^{-1})(1 - z^{-1})} \quad (14)$$

여기서 $K = K_h K_p$ 이다.

K_{gh} 는 Ziegler-Nichols의 계단반응법⁽¹⁷⁾으로 대략적인 이득을 구한 다음 반복수정하여 일정한 값 1.9로 선정하고, 모든 K 값에 대하여 Z 평면에 근궤적을 그리면 Fig. 4와 같으며 그림에서 안정한 K 값의 범위를 구하면 다음과 같다.

$$0 < K < 0.807$$

K 값은 식(14)에서 제어기이득 K_h 와 플랜티이

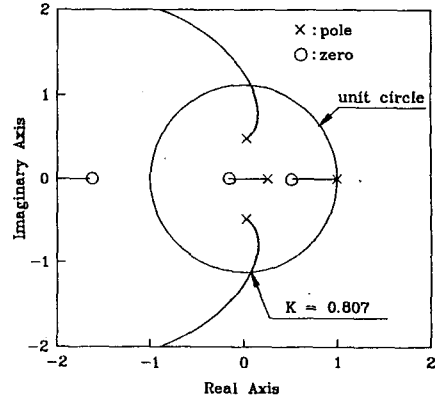


Fig. 4 Z-plane root locus plot for force feedback control

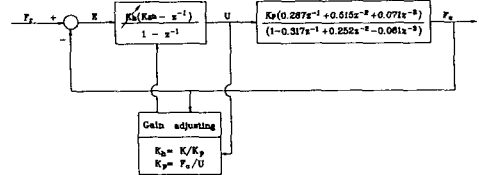


Fig. 5 Gain adjusting scheme for adaptive control system

득 K_p 로 분리될 수 있으며, 이득 K_p 는 식(11)로부터 알 수 있듯이 절삭과정동안 절삭조건의 변화에 따라 변동된다. 절삭깊이와 주축회전수는 전체 이득의 일부분이므로 절삭깊이의 증가 및 주축회전수의 감소는 전체이득을 증가하여 시스템의 불안정을 유발한다. 큰 절삭깊이로 절삭할 경우 시스템의 불안정을 막기 위해서는 제어기이득을 매우 작게 하여야 하나 이는 제어시스템의 반응속도를 느리게 한다. 따라서 절삭과정의 변화에 따라 제어기 이득 값도 변화하여야만 K 값을 안정한 범위내에서 일정한 값으로 유지시킬 수 있다. 즉, K 값을 일정한 값으로 고정시키고 K_p 값의 변화에 따라 K_h 값을 조절하면 절삭조건의 변화에도 시스템의 안정성을 확보할 수 있다.

K_h 값을 계산하는 방법은 식(15)에 주어진다.

$$K_h = K/K_p \quad (15)$$

식(15)에서 K 값을 일정하게 두고 K_p 값을 온라인으로 산출하면 K_h 값을 얻을 수 있다. K_p 값은 정상상태에서 식(16)과 같이 쓸 수 있다.

$$K_p = F_c/U \quad (16)$$

위 과정을 종합하여 제어기를 포함한 전 시스템의 구성도를 그리면 Fig. 5와 같다.

4. 실험 및 실험결과

4.1 실험장치

실험은 CNC선반 대신에 보통선반을 개조하여 자동화시킨 선반을 이용하였다. 시스템의 구성은 선반, 퍼스널 컴퓨터와 주변장치, 브러시리스 DC 서보모터, 스트레인형식의 공구동력계(Kyowa, TD-300KA), 증폭기 및 필터(Kyowa, DPM-310B), A/D 및 D/A변환기, 엔코더, 업/다운(up/down) 변환회로, 32비트 펄스카운터 등으로 구성되며 실험장치의 개략적인 구성도는 Fig. 6과 같다.

이송기어박스를 분리하여 이송봉에 DC 서보모터를 장착하여 이송을 조절하고, 공구동력계를 통하여 측정된 절삭력은 증폭기에 의해 증폭되고 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력된다. 또한 제어기 출력은 D/A변환기를 거쳐 아날로그 신호로 변환되어 DC 서보구동기로 입력된다. 선반은 일반 보통선반으로 주축용 모터의 동력은 2.2 kW이며 주축의 변속은 수동으로 조절되어 일정하게 유지된다. 컴퓨터는 IBM PC호환기종으로 메모리는 4메가 바이트이며 CPU는 32비트 마이크로프로세서

(80386)이며 연산속도는 33 MHz이다. 데이터 입·출력을 위하여 디지털 입·출력장치가 부착되어 있다. 이송거리와 이송속도를 계측하기 위해 이송봉에 1000(pulse/rev)의 엔코더를 부착하였다. 엔코더 신호는 방향판별을 위한 업/다운 변환회로를 거쳐 32비트 카운터에서 계측되어 컴퓨터에 입력된다. 공구동력계를 통하여 계측되는 절삭력신호는 증폭기에 의하여 증폭되고 컷-오프 주파수(cut-off frequency)가 10 Hz인 저역필터에 의하여 절삭력의 동적성분과 잡음을 제거한 후 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에 입력된다. 여기서 컷-오프 주파수를 10 Hz로 선정한 이유는 본 실험에서 사용한 필터의 최소 주파수가 10 Hz이기 때문이며, 일반적으로 선반의 기본 구조 주파수는 250 Hz 정도의 고주파수⁽¹⁸⁾이기 때문에 정적성분에 의한 절삭상태의 변화를 관찰하기에 충분하다. 그리고 C언어를 이용하여 모든 제어프로그램을 작성하였고 샘플링 시간은 0.1초로 하였다. 샘플링시간을 0.1초로 선정한 이유는 제어알고리즘의 실행시간보다는 크게 하고 서보시스템의 고유진동수를 감지할수 있는 최대 샘플링 시간인 0.188초 보다는 작게하기 위해서이다. 시편은 탄소강(SM45C)을, 공구는 초경공구를 사용하였으며 Fig. 7과 같이 1 mm식 계단모양으로 미리 가공하여 1 mm에서 3 mm까지 깊이변화를 주었다. 주축모터의 동력, 시편의 재질 및 실험의 안정성을 고려하여 기준절삭력을 1 kN으로 하였다.

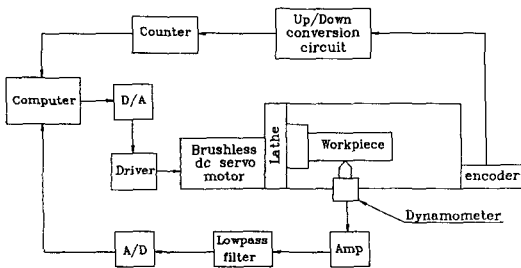


Fig. 6 Schematic diagram of experimental set-up

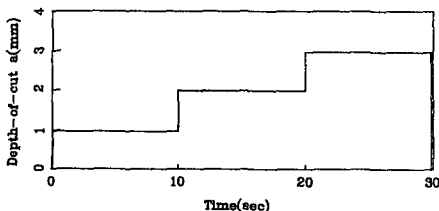


Fig. 7 Depth-of-cut versus time for experimental results

4.2 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 선삭에서 절삭조건이 변할때 주절삭력을 일정하게 제어하기 위하여 제어기이득이 일정한 비례적분제어기와 적응제어기를 사용한 경우에 대하여 각각 실험하여 제어기의 성능을 비교하였다. 제어기의 이득 K_{ga} 값은 1.9로 선정하여 실험하였다. 제어기이득이 일정한 비례적분제어기를 이용한 실험결과는 Fig. 8~Fig. 12와 같다. 주축의 회전수가 405 rpm이며 K_n 가 0.006인 Fig. 8에서는 시스템은 안정하지만 반응속도가 아주 늦고, K_n 가 0.02인 Fig. 9에서는 반응속도가 빠르고 시스템도 안정하며, K_n 가 0.04인 Fig. 10의 경우에는 절삭깊이가 2 mm이상 깊어짐에 따라 시스템이 매우 불안정해짐을 알 수 있다. 그리고 405 rpm에서 제어성능이 비교적 좋았던 K_n 의 값인 0.02에서도 Fig. 11과 같이 주축의 회전수가 245 rpm로 늦어지는 경우에는 절삭깊이가 깊어지면 시스템이 불안정하게

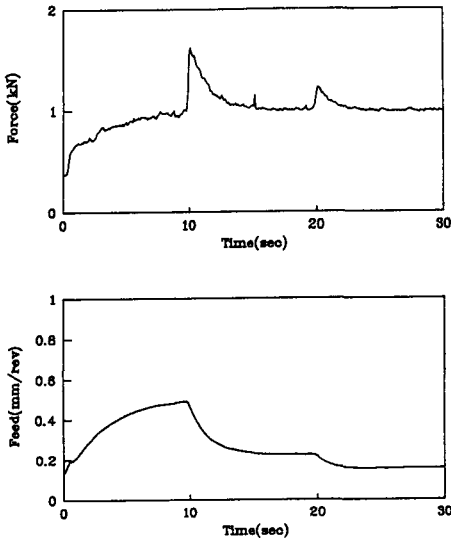


Fig. 8 System response of PI controller with $K_h=0.006$ and $n=405$ rpm

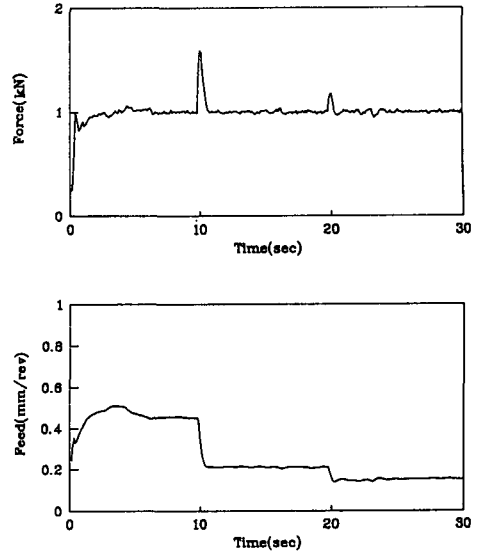


Fig. 9 System response of PI controller with $K_h=0.02$ and $n=405$ rpm

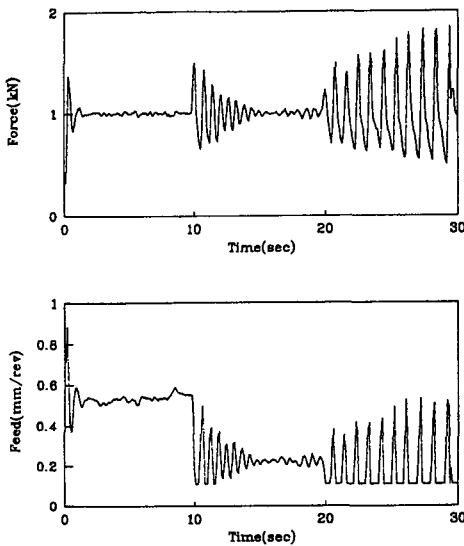


Fig. 10 System response of PI controller with $K_h=0.04$ and $n=405$ rpm

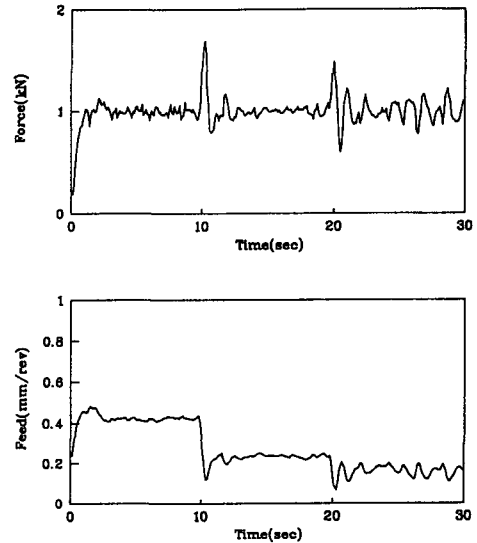


Fig. 11 System response of PI controller with $K_h=0.02$ and $n=245$ rpm

되고, Fig. 12와 같이 700 rpm으로 빨라지면 반응이 늦어짐을 알 수 있다. 즉 비례적분제어기를 사용한 경우 시스템의 응답은 제어기 이득 K_h 가 작은값에서는 안정하지만 응답속도가 느리고, 제어기 이득이 큰값에서는 시스템의 응답성은 빠르나 절삭깊이가 깊어짐에 따라 시스템이 불안정해진다. 그

리고 적절한 K_h 값에서도 주축속도가 늦어지고 절삭깊이가 깊어지면 시스템이 불안정해지고 주축속도가 빨라지면 반응속도가 늦어진다. 적응제어에서는 절삭조건에 관계 없이 시스템이 항상 안정하도록 이득 K_h 값을 앞에서 언급된 이득 조정 알고리즘에 따라 자동으로 조절된다. 전체 개회로 이득

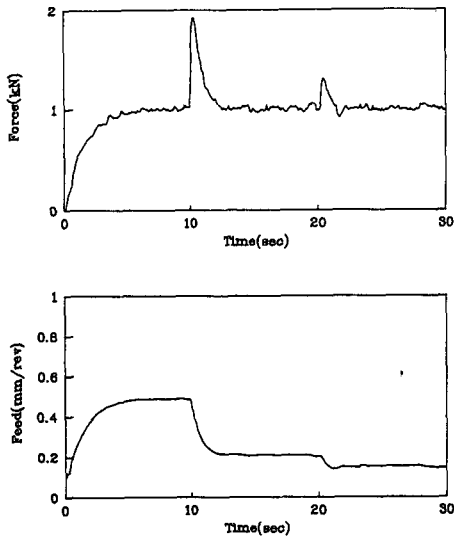


Fig. 12 System response of PI controller with $K_n = 0.02$ and $n = 700$ rpm

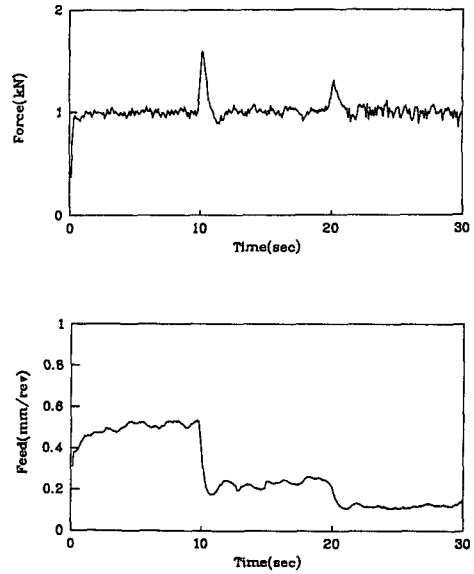


Fig. 13 Adaptive control System response with $n = 245$ rpm

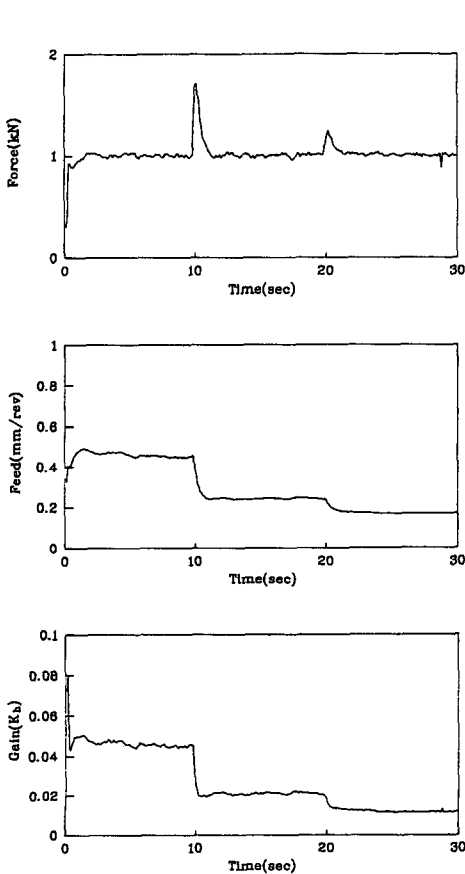


Fig. 14 Adaptive control System response with $n = 405$ rpm

K 의 안정한 범위에서 시스템의 안정성과 반응속도를 고려하여 K 의 값을 0.5로 선정하여 제어기이득 K_n 값을 조정하였다. Fig. 14와 Fig. 15는 주축의 회전수가 400 rpm 및 700 rpm인 경우로 반응속도가 빠르고 시스템이 매우 안정하며, 주축의 회전수가 아주 작은 245 rpm인 Fig. 13에서는 400 rpm과 700 rpm의 경우와 비교하여 진동이 약간 발생하지만 안정하였다. 적응제어시스템은 비례분제어기와 비교하여 광범위한 절삭조건의 변화에 대해서도 반응속도가 빠르며 시스템의 안정성을 유지할 수 있었다. 그러므로 적응제어기를 이용할 경우 절삭조건 변동에 따른 과부하로 동작기계 및 공구의 파손을 막고 항상 적절한 절삭조건을 유지하므로 생산성 향상을 이룰 수 있다.

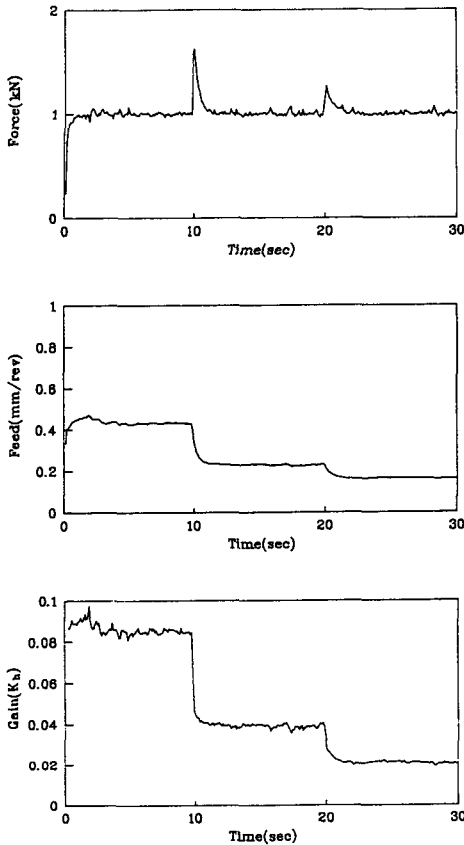


Fig. 15 Adaptive control System response with $n=700$ rpm

5. 결 론

본 연구에서는 선삭과정에서 절삭조건의 변화에도 절삭력을 일정하게 유지하기 위한 적응제어를 설계하는 방법을 제시하였다. 제어시스템을 모델링하였고, 기존의 보통선반을 적응제어 시스템으로 개발하여 여러가지 절삭조건에 대하여 실험한 결과, 기존의 비례분제어기에서는 절삭조건이 양호하지 못할때 시스템이 불안정하였지만, 적응제어기에서는 절삭조건의 변화에도 절삭력이 일정하게 유지되었고 반응속도도 빨랐다. 그러므로 선삭에서 적응제어기를 이용할 경우 절삭조건의 큰 변동에도 시스템이 항상 안정하고 일정 절삭력을 유지함으로써 공작물과 공구를 보호할 수 있고, 생산성을 향상시킬 수 있다.

참고문헌

- (1) Stute, G. and Goetz, F.R., 1976, "Adaptive Control System for Variable Gain in ACC Systems," Proc. 16th Int. MTDR Conf., pp. 117~121.
- (2) Spiewak, S. and Szafarczyk, M., 1978, "Algorithms of Operation and Structures of ACC Controllers for Rough Turning," CIRP, Vol. 27, No.1, pp. 413~418.
- (3) Koren, Y. and Masory, O., 1981, "Adaptive Control with Process Estimation," Annals of the CIRP, Vol. 30, No. 1, pp. 373~376.
- (4) Masory, O. and Koren, Y., 1983, "Variable-Gain Adaptive Control System for Machine Tools," Journal of Manufacturing Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 165~174.
- (5) Masory, O., 1984, "Real-Time Estimation of Cutting Process Parameters in Turning," Trans. ASME, Vol. 106, pp. 218~221.
- (6) Masory, O. and Koren, Y., 1985, "Stability Analysis of a Constant Force AC System for Turning," Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 107, No. 4, pp. 295~300.
- (7) Ulsoy, A.G., Koren, Y. and Rasmussen, F., 1983, "Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools," Trans. ASME, J. Dyn. Sys. Meas. and Cont., Vol.105, pp. 107~112.
- (8) 김인수, 황흥연, 김광준, 1986, "선삭에서 일정 절삭력유지를 위한 구속적응제어에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제10권 제3호, pp. 376~382.
- (9) 박천경, 윤문철, 1986, "Machining Center에서 End Milling 할 때 Torque에 의한 가공변수의 적응제어에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제10권 제6호, pp. 889~897.
- (10) Lin, S. B. and Masory, O., 1987, "Gains Selection for an Variable Gain Adaptive Control System for Turning," Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, No. 4, pp. 399~403.
- (11) Masory, O. and Lin, S. B., 1987, "Optimal Variable-Gain Adaptive Control System for

- Turning," 15th NAMR Conf., Proco, pp. 578~585.
- (12) Tomizuka, M. and Zhang, S., 1988, "Modeling and Conventional/Adaptive PI Control of a Lathe Cutting Process," Trans. ASME, Vol. 110, pp. 350~354.
- (13) Chen, Bor-Sen, and Chang, Yih-Fang, 1989, "Constant Turning Force Adaptive Controller Design," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 125~132.
- (14) Koren, Y., 1988, "Adaptive Control Systems for Machining," ACC, pp. 1161~1167.
- (15) Chen, Bor-Sen, and Chang, Yih-Fang, 1991, "Robust PI Controller Design for a Constant Turning Force System," Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 31, No. 3, pp. 257~272.
- (16) Franklin, G. F., Powell, J. D. and Workman, M. L., 1990, Digital Control of Dynamic Systems, Addison Wesley.
- (17) Aström, K. and Wittenmark, B., 1990, Computer-Controlled Systems, Prentice-Hall.
- (18) Tobias, S. A., 1965, Machine-Tool Vibration, John Wiley, p. 249.