

〈論 文〉

퍼지이론을 이용한 선삭의 절삭력제어

노상현* · 정선환** · 김교형***

(1993년 7월 14일 접수)

Cutting Force Control of Turning Process Using Fuzzy Theory

Sang-Hyun Noh, Seon-Hwan Cheong and Kyo-Hyoung Kim

Key Words : Turning Process(선삭), Non-Linear(비선형), Cutting Force Control(절삭력제어), Fuzzy Theory(퍼지이론), Fuzzy Reasoning(퍼지추론)

Abstract

The dynamic characteristics of turning processes are complex, non-linear and time-varying. Consequently, the conventional techniques based on crisp mathematical model may not guarantee cutting force regulation. This paper presents a fuzzy controller which can regulate cutting force in turning process under varying cutting conditions. The fuzzy control rules are established from operator experience and expert knowledge about the process dynamics. Regulation which increases productivity and tool life is achieved by adjusting feedrate according to the variation of cutting conditions. The performance of the proposed controller is evaluated by cutting experiments in the converted conventional lathe. The results of experiments show that the proposed fuzzy controller has a good cutting force regulation capability in spite of the variation of cutting conditions.

1. 서 론

최근 절삭가공에서의 정밀도 및 생산성 향상을 위하여 CNC 공작기계의 보급이 급속하게 증가되고 있다. 보통의 CNC 공작기계에서는 작업자의 경험과 숙련된 지식을 바탕으로 절삭조건을 가공하기 전에 미리 선택하여 작업하여야 한다. 그러나 공구와 공작물의 재질이 다양하고 공작물 재질의 불균일로 인한 절삭깊이의 변화, 공구마모 등의 확실한 요인이 있기 때문에 최적 절삭조건으로 가공하는 것은 실제로 매우 어려우며, 작업자는 항상 최악의 경우를 예상하여 여유있는 절삭조건으로 가

공하기 때문에 생산성 저하를 가져오게 된다. 그래서 CNC 공작기계에서 작업자의 지식이나 경험에 관계없이 생산성을 향상시킬 수 있으며 공작물과 공구를 보호할 수 있는 일정절삭력제어가 요구된다. 일정절삭력제어란 주로 황삭가공시 절삭 깊이 및 주축회전수가 변할때 이송속도를 변화시켜 절삭력을 일정하게 유지하는 것으로, 금속제거율(metal removal rate)을 증가시켜 생산성을 향상시킬 수 있으며 과도한 절삭력을 방지하여 제어시스템을 항상 안정하게 유지할 수 있기 때문에 공작물과 공구를 보호할 수 있다. 그렇지만 저렴하고 신뢰성있는 센서의 부족과 제어시스템의 이론적, 실험적 연구의 미비로 아직도 실용화되지 못하고 있다.

절삭력제어기로 구조가 간단하고 실현하기가 용이한 PI제어기나 PID제어기를 생각할 수 있으나 절삭공정의 비선형 특성과 절삭소재와 공구의 수많

*정회원, 대구공업전문대학 자동차과

**정회원, 금오공과대학교 생산기계공학과

***정회원, 영남대학교 기계공학과

은 조합에 따른 다양한 절삭공정의 비선형 특성과 절삭소재와 공구의 수많은 조합에 따른 다양한 절삭공정을 견실하게 제어하기에는 불충분하다. 또한 이와 같은 제어기를 잘 동조(tuning)하여 한 작업에 대하여 만족스러운 성능을 얻었을지라도 작업이 바뀌면 매번 제어기를 다시 구성하여야 하는 어려움이 따른다.

절삭가공에서 일어나는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 적응제어 방법들이 많이 연구되었다. 가변이득적응제어(variable gain adaptive control)는 Koren과 Masory^(1~3)가 제안한 것으로 절삭조건 변화에도 개회로 이득을 일정하게 유지하기 위하여 적분제어기의 이득을 가변시키는 제어방법으로, 알고리즘이 간단하다는 장점이 있지만 체계적인 방법이 되지 못하였다. 모델기준 적응제어(model reference adaptive control)는 원하는 동특성을 갖는 기준모형을 설정하여 이 기준모형의 출력과 플랜트의 출력이 일치하도록 플랜트의 파라미터를 조정하는 방식으로, Tomizuka 등⁽⁴⁾은 선삭에서 이송속도와 절삭력 사이의 동특성을 예측하기 위한 수학적 모델을 제시하였고, 적응 PI제어기와 고정이득 PI제어기의 성능을 비교하였다. Lauderbaugh 등⁽⁵⁾은 밀링에서 모델기준 적응제어기가 고정이득 제어기에 비하여 우수한 성능을 나타내었지만 적응제어기가 잡음에 매우 민감하고, 알고리즘의 실행시간이 길기 때문에 이에 대한 개선이 요구된다고 하였다. Daneshmend 등⁽⁶⁾은 선삭에서 절삭력제어를 위하여 여러가지 모델기준 적응제어알고리즘을 시뮬레이션에 의하여 성능을 평가하였다. 그리고, 자기동조 적응제어(self tuning adaptive control) 방식은 플랜트의 파라미터를 추정하면서 추정된 파라미터를 바탕으로 적절한 제어기를 설계하는 방식으로 Elbestawi 등^(7,8)이 밀링에 적용하였다. Fassois 등⁽⁹⁾은 자기동조 적응제어에서 계산을 보다 간단히 할 수 있는 알고리즘을 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 그러나 이들 모델기준적응제어 방식과 자기동조 적응제어 방식은 정확한 수학적 해석에 의존하고 있기 때문에 모델링의 한계에 부딪히게 되고 대개 알고리즘의 매우 복잡하여 현재 상용화된 마이크로프로세서나 컴퓨터상에서 실시간 구현이 어렵기 때문에 동특성이 빠른 시스템에 대한 응용을 제한하고 있다.

이미 연구자 등은 선삭가공에서 절삭력을 일정하게 유지하기 위하여 적응제어를 행하였다.⁽¹⁰⁾ 이

연구에서는 가변이득 비례적분제어기를 제안하였고, 가변이득 비례적분제어기가 절삭깊이와 주축회전수의 변화에서도 절삭력이 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 그러나, 제어시스템을 모델링하여 제어기를 설계하여야 함으로, 복잡하고 비선형성인 절삭과정을 정확하게 모델링하기는 어렵다. 그리고 온라인 파라미터 추정알고리즘이 없기 때문에 제어 알고리즘이 간단하여 반응속도가 빠르다는 장점은 있지만 공구와 공작물의 재질이 변할때 마다 절삭 파라미터를 미리 절삭실험을 통하여 구해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 시스템의 수학적모델이 필요없으며 입출력의 정보만을 가지고 제어기를 간단히 구성할 수 있는 퍼지제어를 선삭가공에 적용해 보고자 한다. 일반적으로 퍼지제어를 이용한 제어기는 기존 제어시스템과 비교해 볼 때 병렬형 제어, 논리적 제어, 그리고 언어적 제어 등의 특출한 잇점을 가지고 있으며 직관과 경험에 그 기초를 두며, 여러개의 경험론적 결정규칙의 집합으로 구체적인 수학적모델이 필요 없다. 퍼지집합이론은 Zadeh에 의해 이론적 근거가 확립되었으며,⁽¹¹⁾ Mamdani에 의해 제어에 처음으로 도입되었다.⁽¹²⁾ Mamdani는 퍼지제어를 모형 증기기관 제어에 직접 응용하였다. 그 이후 최근까지 퍼지제어는 산업계에 널리 응용되어 왔으며, 그 대표적인 예로서, Yasunobu의 지하철운전,⁽¹³⁾ 컨테이너크레인운전,⁽¹⁴⁾ Sugeno의 자동차운전,⁽¹⁵⁾ Li의 서보시스템제어⁽¹⁶⁾ 등 여러분야에 도입되어 좋은 결과를 얻었으며 최근에는 복잡하고 느린 공정시스템에서부터 로봇 및 서보제어와 같은 빠른 시스템에까지 퍼지제어의 응용범위를 넓혀가고 있다.

본 연구에서는 복잡하고 비선형적인 선삭가공에 새로운 퍼지제어기를 제안하고, 제안된 퍼지제어기의 유용성을 검토하기 위하여 절삭깊이와 주축회전수 등의 절삭조건을 변화시키면서 절삭력 실험을 행하였다.

2. 퍼지제어기 설계

퍼지제어기는 명확한 값(crisp value)으로 측정된 입력변수값을 적절한 퍼지값(퍼지집합)으로 바꾸어 주는 퍼지화부와 그 반대로 작용하는 비퍼지화부, "If-then-" 형태의 복수개의 규칙들로 되어

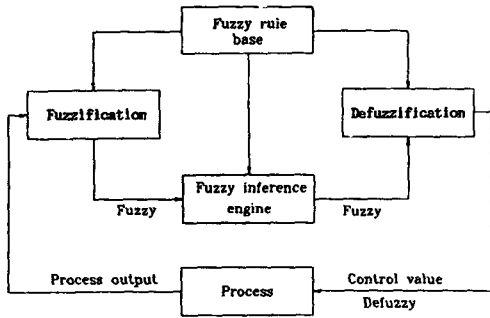


Fig. 1 Basic configuration of fuzzy logic controller

있는 퍼지규칙부, 그리고 퍼지규칙들을 이용하여 퍼지입력에 대한 퍼지출력을 추론해 내는 퍼지추론 장치부 등으로 되어 있으며 기본 구성은 Fig. 1과 같다.

본 연구에서는 선삭과정에서의 주절삭력을 일정하게 하는 것이 목적이므로 퍼지제어기의 입력변수를 기준절삭력과 계측절삭력의 차인 절삭력오차와 그 오차의 변화량으로 하고, 출력변수는 절삭력을 조절하기 위해 이송속도 조절에 사용되는 DC 모터 입력 전원으로 하였다. 그러므로 조건부 변수는 오차(e)와 오차의 변화량(Δe)이고, 결론부 변수는 제어입력의 변화량(Δu)으로 된다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$e(k) = F_r(k) - F_c(k) \quad (1)$$

$$\Delta e = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (3)$$

여기서, $F_r(k)$ 와 $F_c(k)$ 는 각각 k 번째 샘플링 시간의 기준절삭력과 실제절삭력이고, $u(k)$ 는 k 번째 제어입력량이다.

조건부 변수와 결론부 변수가 정해지면 실제값을 퍼지변수인 $E, \Delta E, \Delta U$ 로 변환한다.

$$E = G_e e \quad (4)$$

$$\Delta E = G_c \Delta e \quad (5)$$

$$\Delta U = (1/G_u) \Delta u \quad (6)$$

여기서, G_e, G_c, G_u 는 실제값을 퍼지 변수로 바꾸어 주는 상수이다.

절삭력오차가 ± 400 N정도 변화하므로 ± 400 N과 퍼지 대표값 ± 4 와 대응시키기 위하여 G_e 와 G_c 를 0.01로 하였고, 제어입력 전압변화를 ± 1 V로 하기 위하여 G_u 를 2로 선정하였다.

그러므로 퍼지제어 입출력 관계는 다음과 같다.

$$R: E \times \Delta E \longrightarrow \Delta U \quad (7)$$

소속함수는 설계자의 경험적 지식과 시뮬레이션을 통하여 제어변수 $E, \Delta E, \Delta U$ 에 대한 퍼지변수를 다음과 같이 9개의 용어집합(term set)으로 정의하였다.

$$T = \{PVB, PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB, NVB\}$$

여기서, NVB: Negative Very Big

NB: Negative Big

NM: Negative Medium

NS: Negative Small

ZO: Zero

PS: Positive Small

PM: Positive Medium

PB: Positive Big

PVB: Positive Very Big

실제한 소속함수는 퍼지추론시 수식계산을 쉽게 하기 위하여 삼각형 형태로 설계하였고, 입출력 변수에 대한 전체집합(universe of discourse)을 계측량의 변화 폭과 조각값의 영향성을 고려하여 설정하였다.

Fig. 2는 퍼지변수들의 멤버쉽함수를 나타낸다.

본 연구의 퍼지제어기는 Two-input/Single-output (MISO) 시스템이므로 제어규칙은 다음과 같이 표현된다.

$$R = \{R_{MISO}^1, R_{MISO}^2, \dots, R_{MISO}^n\}$$

여기서, R_{MISO}^i 는 "If-then"문으로 아래와 같이 기술할 수 있다.

"If E is PB and ΔE is PS , then ΔU is PVB "

위의 입출력관계에 따라 제어규칙을 만들면 Table 1과 같다.

제어규칙이 만들어지면 입력조건에 따른 출력을 추론한다. 추론은 제어에 널리 사용되는 Mamdani

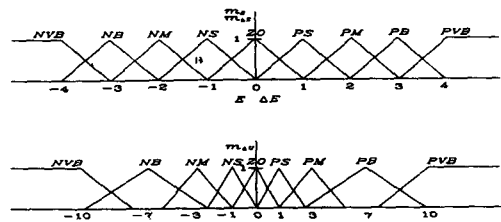


Fig. 2 Membership functions of fuzzy variables

Table 1 Rule base for fuzzy logic controller

E \ ΔE	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB
NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZO
NB	NVB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS
NM	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
NS	NVB	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ZO	NVB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB
PS	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB	PVB
PM	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB
PB	NS	ZO	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB	PVB
PVB	ZO	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB

의 Minimum연산을 이용하여 추론을 행한다.

아래와 같은 두개의 제어규칙이 존재하면,

R_1 : If E is PB and ΔE is ZO then ΔU is PB

R_2 : If E is PM and ΔE is ZO then ΔU is PM

규칙에 대한 적합도는 다음과 같으며,

$$w_1 = PB(E) \wedge ZO(\Delta E) \tag{8}$$

$$w_2 = PM(E) \wedge ZO(\Delta E) \tag{9}$$

R_1, R_2 규칙에 의한 추론결과는 아래와 같다.

$$PB^* = w_1 \wedge PB(\Delta U) \tag{10}$$

$$PM^* = w_2 \wedge PM(\Delta U) \tag{11}$$

두개의 추론은 무게중심법을 사용하여 비퍼지화한다.

$$\Delta U = \frac{\Delta U_1 PB^* + \Delta U_2 PM^*}{PB^* + PM^*} \tag{12}$$

여기서 $\Delta U_1, \Delta U_2$ 는 ΔU 의 중심좌표에서 추론값

의 위치이다.

퍼치추론 과정과 비퍼지화를 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 그러므로 공정제어 입력은 다음과 같다.

$$u(k) = u(k-1) + G_u \Delta U(k) \tag{13}$$

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구의 실험장치는 CNC 선반대신에 일반 범용선반을 개조하여 자동화시킨 선반을 이용하였다. 시스템의 구성은 선반, 퍼스널 컴퓨터와 주변장치, 브러시리스 DC서보모터, 공구동력계, 증폭기, A/D 및 D/A변환기, 엔코더, 업/다운(up/down) 변환회로, 32비트 펄스카운터 등으로 구성되며 실험장치의 개략적인 구성도는 Fig. 4와 같다.

이송기어 박스를 분리하여 이송봉에 DC서보모터를 장착하여 이송을 조정하고, 공구동력계를 통하

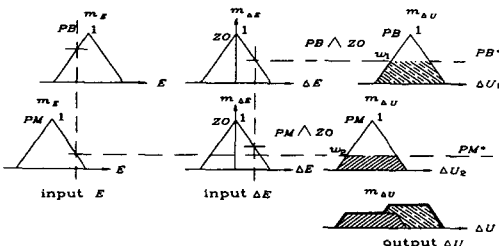


Fig. 3 Diagrammatic representation of fuzzy reasoning and defuzzification

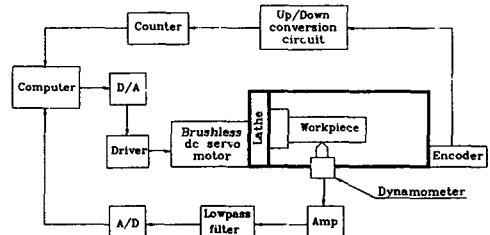


Fig. 4 Schematic diagram of experimental equipment

여 측정된 절삭력은 증폭기에 의해 증폭되고 A/D변환기를 통하여 컴퓨터에 입력된다. 또한 제어기 출력은 D/A변환기를 거쳐 아날로그신호로 변환되어 DC서보 구동기로 입력된다. 선반은 일반 보통선반으로 주축용 모터의 동력은 2.2 kW이며 주축의 회전수 변속은 수동으로 조정되어 일정하게 유지된다. 컴퓨터는 IBM PC 호환기종으로 메모리는 4메가 바이트이며 CPU는 32비트 마이크로프로세서(80386)이며 연산속도는 33 MHz이다. 데이터 입·출력을 위하여 디지털 입·출력장치가 부착되어있다. 이송거리와 이송속도를 측정하기 위해 이송봉 끝에 엔코더(1000 pulse/rev)를 부착하였다. 엔코더 신호는 방향판별을 위한 업/다운 변환회로를 거쳐 32비트 카운터에서 측정되어 컴퓨터에 입력된다. 공기동력계를 통하여 측정되는 절삭력신호는 증폭기에 의하여 증폭되고 컷-오프 주파수(cut-off frequency)가 10 Hz인 저역필터에 의하여 잡음을 제거한 후 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터에 입력되어 저장된다. 시편은 탄소강(SM45C)을, 공구는 초경공구를 사용하였으며, 기준절삭력은 주축모터의 동력, 시편의 재질 및 절삭조건 등을 고려하여 1 kN으로 하였으며, 샘플링시간은 0.05초로 하였다. 절삭깊이를 변화시키기 위하여 Fig. 5와 같이 1 mm 씩 미리 계단모양으로 가공하여 1 mm, 2 mm, 3 mm 를 각각 10초씩 30초간 실험하였다.

이송 f (mm/rev), 이송속도 V_f (m/sec) 및 주축의 회전수 n (rev/min)과의 관계는 식(14)와 같이

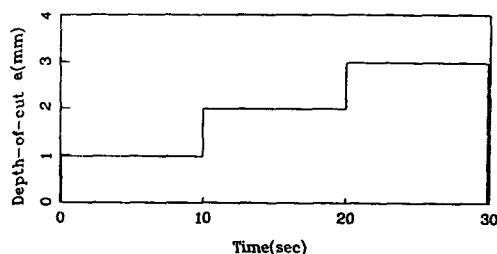


Fig. 5 Diagram of depth-of-cut versus cutting time

나타낼 수 있다. ⁽¹⁰⁾

$$f = \frac{60}{n} V_f \tag{14}$$

V_f 는 단위시간당 이송거리 s (mm)로 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_f = \frac{s}{t} \tag{15}$$

따라서 식(14)와 식(15)로부터 이송거리는 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{n}{60} ft \tag{16}$$

식(16)으로부터 각각의 절삭깊이에 대해 근사적으로 정상상태의 이송속도를 고려하여 미리 이송거리에 따른 형상을 가공하여 실험하였다.

그리고 주축의 회전수는 245 rpm, 405 rpm, 700 rpm에 대하여 각각 실험하였다.

Table 2 Specification of experimental equipment

Equipment	Specification
Lathe	Daegu Heavy Eng. DLF 400×750
Brushless DC Servo Motor	Toei Electric Co. DLDC-01H
DC Servo Driver	Toei Electric VLTT-01H
Encoder	Koyo, TRD-J1000-RZ
Dynamometer	Kyowa, TD-J300KA
Strain Amplifier	Kyowa, DMF310B
Tool	Korea Tungsten, KT300
A/D, D/A Converter	Hando, PC-Lab 812 Resolution : 12 bit Conversion rate : 30 kHz
Computer	Process Technology, 32 bit

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 선삭가공에서 절삭깊이 및 주축회전수 등의 절삭조건이 변할 때 주절삭력을 일정하게 제어하기 위하여 퍼지제어기를 설계하였다. 제안된 퍼지 제어알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 절삭실험을 행하였다.

Fig. 6은 주축의 회전수가 245 rpm인 경우의 실험결과를 나타낸다. 절삭깊이가 단계적으로 깊어짐에 따라 이송은 단계적으로 감소하여 절삭력은 기준절삭력인 1 kN으로 일정하게 제어됨을 알 수 있다. 제어기 출력의 변화량은 초기에 기준절삭력에 도달할 때까지 증가하며, 곧 기준절삭력에 도달하게 되어 제어기 출력의 변화량이 거의 없이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 그리고 절삭깊이가 1 mm에서 2 mm, 2 mm에서 3 mm로 급격하게 증가할 때 절삭력이 순간적으로 증가하고, 이때 제어기 출력의 변화량은 순간적으로 감소되어 곧 기준절삭력으로 유지됨을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 주축의 회전수가 각각 405 rpm, 700 rpm인 경우의 실험결과를 나

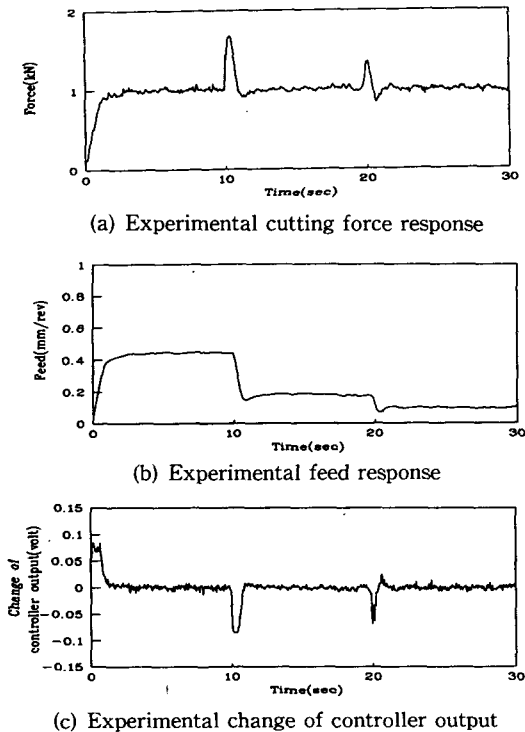


Fig. 6 Responses of fuzzy controller with 245 rpm

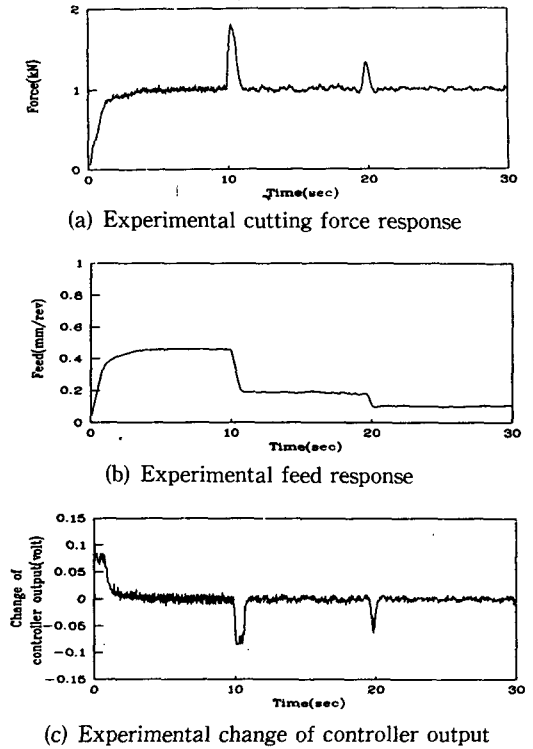


Fig. 7 Responses of fuzzy controller with 405 rpm

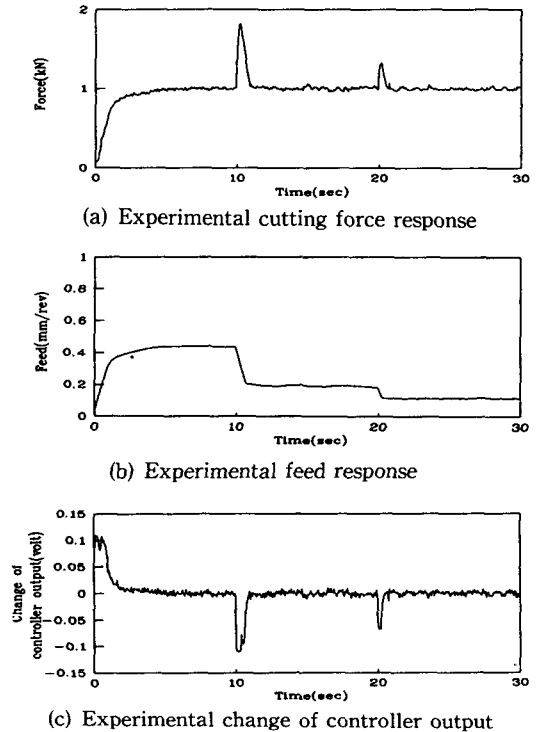


Fig. 8 Responses of fuzzy controller with 700 rpm

타낸다. 주축의 회전수가 405 rpm, 700 rpm인 경우에서도 245 rpm인 경우와 마찬가지로 절삭깊이가 단계적으로 증가할수록 이송은 반대로 단계적으로 감소하게 되어 절삭력이 일정하게 제어됨을 알 수 있다. 그리고 절삭깊이가 1 mm씩 일정하게 증가할 때 이송이 일정하게 감소하지 않는 것은 절삭과정이 비선형성이기 때문이다.

이상의 실험결과에서 알 수 있듯이 비선형성인 선삭가공에서 퍼지제어기를 이용할 경우 절삭깊이 및 주축회전수 등의 절삭조건의 변화에서도 절삭력을 일정하게 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 시스템이 복잡하고 절삭과정이 비선형적인 선삭가공에서 절삭깊이와 주축회전수 등의 절삭조건의 변화에서도 일정한 절삭력을 유지하기 위하여 퍼지제어기를 제안하였다. 기존의 보통 선반을 퍼지제어시스템으로 개발하였고 초경공구와 탄소강(SM45C)을 사용하여 절삭실험한 결과 절삭조건의 변화에서도 절삭력이 일정하게 유지되었다. 그리고 종래의 적응제어에서는 시스템의 모델이 필요하나 퍼지제어에서는 시스템의 모델이 필요없으며 퍼지추론에 의하여 일정절삭력제어가 가능하였다. 그러므로 선삭가공에 퍼지제어를 적용할 경우 여러가지 절삭조건의 변화에도 항상 일정한 절삭력을 유지할 수 있기 때문에 과부하로 인한 공구의 파손을 막을 수 있으며, 금속제거율을 증가시켜 가공시간을 단축할 수 있기 때문에 생산성을 향상시킬 수 있다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Masory, O., 1984, "Real-Time Estimation of Cutting Process Parameters in Turning," *Trans. ASME*, Vol. 106, pp. 218~221.
- (4) Tomizuka, M. and Zhang, S., 1988, "Modeling and Conventional/Adaptive PI Control of a Lathe Cutting Process," *Trans. ASME*, Vol. 110 pp. 350~354.
- (5) Lauderbaugh, L. K. and Ulsoy, A. G., 1989, "Model Reference Adaptive Force Control in Milling," *Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, No. 111, pp. 13~21.
- (6) Dameshmend, L. K. and Pak, M. A., 1986, "Model Reference Adaptive Control of Feed Force in Turning," *Trans. ASME, J. Dyn. Meas. and Cont.*, Vol. 108, pp. 215~222.
- (7) Elbestawi, M. A., Mohamed, Y. and Liu, L., 1990, "Application of Some Parameter Adaptive Control Algorithms in Machining," *Trans. ASME, J. Dyn. Meas. and Cont.*, Vol. 112, pp. 611~617.
- (8) Elbestawi, M. A. and Sagherian, R., 1987, "Parameter Adaptive Control in Peripheral Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 27, No. 3, pp. 399~414.
- (9) Fassois, S. D., Eman, K. F. and Wu, S. M., 1989, "A Fast Algorithm for On-Line Machining Process Modeling and Adaptive Control," *ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, No. 111, pp. 133~139.
- (10) 노상현, 김진락, 김교형, 1993, "선삭가공에서 절삭력을 일정하게 유지하기 위한 적응제어," *대한기계학회논문집*, 제17권 제1호, pp. 69~77.
- (11) Zadeh, Lotfi, A., 1973, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex System and Decision Processes," *IEEE Tr. on System, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No. 1, pp. 28~44.
- (12) Mamdani, E. H., 1974, "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant," *IEEE Proc. Control & Science*, Vol. 121, No. 12, p. 1585~1588.
- (13) Yasunobu, S. and Miyamoto, S., 1985, "Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control," in *Industrial Application of Fuzzy Control*, M. Sugeno(ed.), Elsevier Science Publisher B. V.(North Holland), pp. 1~18.
- (14) Yasunobu, S. and Hasegawa, T., 1987,

- “Predictive Fuzzy Control and its Application for Automatic Container Crane Operation System,” in Proc. 2nd IFSA Congress, Tokyo, Japan, pp. 349~352.
- (15) Sugeno, M. and Nishida, M., 1985, “Fuzzy Control of Model Car,” Fuzzy Sets and Systems, Vol. 16, pp. 103~113.
- (16) Li, Y. F. and Lau, C. C., 1989, “Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems,” IEEE Control System Magazine, pp. 65~72.