

엔드밀링 공정에서 극점배치 구속적응제어 시스템

정 성 종*

A Pole-Assignment ACC System in the Peripheral End Milling Process

Sung-Chong Chung

Abstract

In order to regulate the cutting force at a desired level during peripheral end milling processes, a feedrate override Adaptive Control Constraint (ACC) system was developed. The feedrate override function was accomplished through a development of Programmable Machine Controller (PMC) interface technique on the NC controller. Nonlinear model of the cutting process was linearized as an adaptive model with a time varying process parameter. An integral type estimator was introduced for on-line estimation of the cutting process parameter. Zero order hold digital control methodology which uses pole-assignment concept for tuning of PI controllers was applied for the ACC system. Performance of the ACC system was confirmed on the vertical machining center equipped with FANUC OMC through a large amount of experiment.

Keywords : Adaptive control constraint (ACC : 구속적응제어), Feedrate override (이송속도 제어), Peripheral end milling (측면 엔드밀링), PI (비례-미분), PMC interface (PMC 인터페이스), Pole-assignment (극점배치), Real-time (실시간), Stability (안정성)

1. 서 론

절삭공정에서 적응제어는 크게 구속적응제어(Adaptive Control Constraint, ACC), 최적적응제어(Adaptive Control Optimization, ACO), 기하학적적응제어(Geometric Adaptive Control, GAC)로 분류되며,⁽¹⁾ 고속 고강성 가공의 경우 안정한 절삭조건하에서 최적

절삭계수 추정을 통한 생산성 향상의 방향으로 ACC에 대한 연구가 요구되어지고 있는 것이 작금의 상황이다.⁽¹⁾

밀링공정이나 선삭공정에서 ACC 기법을 도입하여 연구한 예는 많다. 그 중에서도 Tomizuka 등⁽²⁾은 모델추종적응제어 (Model Reference Adaptive Control, MRAC) 기법을 이용하여 밀링공정에서 절삭력을 추종

* 한양대학교 기계설계학과

제어할 수 있음을 보였고, Koren 등⁽³⁾은 적분제어기를 사용한 가변게인 제어시스템 (Variable gain control-system) 을 도입하여 선삭공정에 응용한 바 있다. Elbestawi 등⁽⁴⁾은 밀링공정에서 파라미터 적응제어 알고리즘 응용하여 절삭력 적응제어를 실현하였다. 이외에도 Altintas⁽⁵⁾ 나 Ulsoy⁽⁶⁾, Fussell 과 Srinivasan⁽⁷⁾ 등에 의하여 밀링이나 선삭공정에 대한 절삭력 구속적응제어 연구가 수행되었다. 그러나 이들 연구의 대부분은 공작기계 구동부나 기존 NC 장치에 커다란 설계변경을 요구하거나 현실화 하기에 복잡한 제어 방법론 등을 사용하고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 극복하고 실용화하기 편리한 극점배치 (Pole-assignment) 를 이용한 PI (비례-적분) 제어기를 갖는 구속적응제어 기법을 개발함으로써 실시간 (Real-time) 으로 머시닝센터 상에서의 밀링공정에서 최적의 절삭계수를 추정하는 방향으로 일정절삭력제어를 수행하였다. 공칭초기 절삭계수는 신경회로망 (Neural-Networks) 기법을 이용하여 개발한 절삭계수 모형⁽⁸⁾을 통하여 선정할 후, 온라인 (On-line) 으로 적분형 추정기를 이용하여 최적의 절삭공정계수를 추정하면서 극점배치법을 사용하여 PI 제어기의 계수를 추정하도록 하였다. PMC 인터페이스를 통한 이송속도 제어를 이용하여 실시간에서 일정절삭력 제어를 실현하였으며, PI제어기의 계수값에 따른 ACC 시스템의 특성을 분석하였다. 이송속도 Override 를 채용한 이송속도 제어법을 이용하여 머시닝센터 상에서 구현된 본 적응제어 시스템을 이용하면 공절삭 (Air cutting) 시간을 감소시킴과 동시에 단위 시간 당의 절삭량 (Metal Removal Rate, MRR) 을 극대화 시킬 수 있고, 현장에서 NC 프로그래머의 경험부족으로 입력된 낮은 생산성 조건하의 절삭계수나 불안정한 절삭조건을 안정화 및 최적화할 수 있어 효율적인 고속 및 고강성 절삭을 실현할 수 있다.

2. 극점배치 구속적응제어 시스템

2.1 구속적응제어

절삭공정에서 야기되는 chatter는 가공정도는 물론 공구 수명을 단축시키고 안정성을 해치기 때문에 현장에서는 chatter방지를 위해 안전한 영역에서 가공을 수행하고 있

다. 이 경우 작업자의 경험에 의하여 선정되는 가공조건은 MRR 을 최적화시키지 못하고 있는 것이 현실이다. 즉, NC 프로그래머에 의하여 입력된 가공조건은 안전한 최적의 MRR 관점에서는 낮거나 높은 것이 현실이며, 이를 최적화하여 밀링공정의 생산성을 극대화하기 위해서는 NC 프로그램 입력치에 관계없이 절삭상황에 따라 절삭계수를 최적으로 제어할 수 있는 실시간 적응제어 기술이 요구된다.⁽¹⁻⁸⁾ 또한 엔드밀링 공정에서 발생하는 절삭력은 공구휨에 영향을 주게되며, 정밀가공을 실현하기 위해서는 공구휨 양을 일정하게 제어할 수 있는 절삭력 구속적응제어가 필요하다.^(1,9)

본 연구는 머시닝센터에서 엔드밀링을 이용한 고생산성 가공시 chatter, 공구파손 등을 방지하고, 공구휨 양을 일정하게 유지하며 안전한 조건에서 생산성을 극대화 할 수 있는 절삭공정 제어를 위하여 공구의 마멸상태, 절삭깊이 그리고 재료상태가 변하는 경우에도 평균 주절삭력을 일정하게 유지할 수 있는 구속적응제어 기법에 대하여 연구하였다. 절삭 개시전 초기 절삭계수는 공구, 공작물 그리고 공칭 절삭속도가 주어진 경우 가 개발된 신경회로망 기법⁽⁸⁾에 의하여 최적절삭계수를 선정하고, 절삭깊이와 공구의 절삭성 등이 가공중 바뀌는 경우에도 최적의 절삭조건을 유지할 수 있도록 Fig. 1 과 같은 방법으로 절삭계수를 실시간으로 추정하여 절삭력의 구속적응제어를 실현하였다.

공작기계 구동부는 NC 제어기의 설계변경 없이 절삭력을 제어할 수 있도록 하기 위해 FANUC OMC 를 갖는 NC 제어기에서 이송속도 Override 를 사용하였다. OMC 의 경우 이송속도 override 는 입력한 공칭 이송

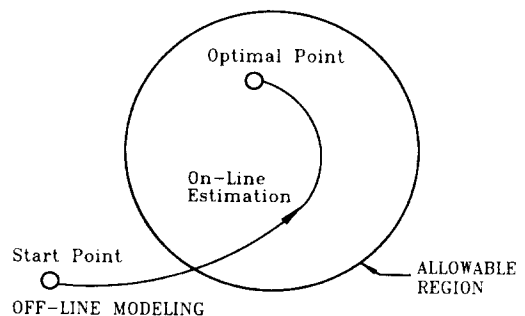


Fig. 1 Parameter estimation procedure in adaptive control systems⁷.

속도의 0 - 150 % 내에서 10 % 씩 override 가 가능하다.¹¹⁰⁾

2.2 극점배치 적응제어 기법

2.2.1 고정계인형 PI 제어기

측면절삭 엔드밀링 (Peripheral end milling) 시 축방향 절삭깊이가 일정한 경우 공작물에 걸리는 평균 주절삭력 F 는

$$F = K_s d^\alpha f^\beta s^\gamma \quad (1)$$

로 모형화 할 수 있고^{19,111)} 여기서 K_s 는 비절삭저항, d 는 반경방향 절삭깊이, s 는 주축 회전속도, f 는 이송속도 그리고 α , β , 및 γ 는 지수인자이다. 식 (1)에서 비절삭저항 K_s 는 공작물의 기계적인 성질, 공구상태, 공구형상 등을 대표하며, 축방향 절삭깊이의 변화에 따라 변하게 된다.

Fig. 2에 나타낸 절삭력 제어시스템에서 절삭력 오차는 기준절삭력과 실제절삭력의 차

$$E(i) = F_r(i) - F_c(i) \quad (2)$$

로 정의되며, 여기서 $F_r(i)$ 는 기준절삭력이고 $F_c(i)$ 는 A/D 샘플된 실제절삭력이다.

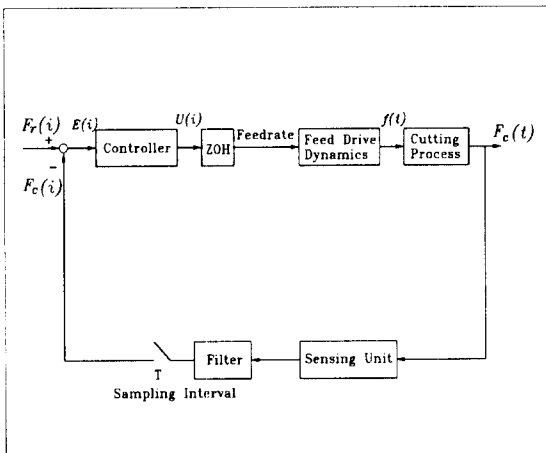


Fig. 2 Cutting force regulation system

실제절삭력과 이송속도와의 관계는 식 (1)을 변형하여

$$F_c(t) = (K_s d^\alpha \beta^{-1} s^\gamma) f = K_c(t) f(t) \quad (3)$$

와 같이 절삭조건에 따라서 변동하는 계수 $K_c(t)$ 를 갖는 선형모델로 간략화 된다. A/D 샘플 후 절삭력 오차를 제거하기 위해 게인 K_p 와 K_i 그리고 샘플시간 T 를 갖는 PI 제어기인

$$U(i) = \left[K_p + \frac{K_i T}{1 - z^{-1}} \right] E(i) \quad (4)$$

그리고 이송속도 명령의 출력에 필요한 ZOH (Zero Order Hold)와 공작기계 이송계의 동특성을 고려하면,

$$\frac{F_c(i)}{U(i)} = K_m K_c \frac{(1 - e^{-T/\tau}) z^{-1}}{1 - e^{-T/\tau} z^{-1}} \quad (5)$$

이 된다. 여기서, K_m 은 이송계와 측정장치 게인의 곱, τ 는 이송계의 시정수를 나타낸다. 식 (5)에서 평균 주절삭력 제어를 위한 샘플시간 T 는 이송계의 시정수 τ 에 비해서 크기 때문에

$$\frac{F_c(i)}{U(i)} = K_m K_c z^{-1} \quad (6)$$

이 된다. 식 (4)와 식 (6)을 이용하면 Fig. 2의 블록 선도를 Fig. 3과 같은 시변 절삭공정계수 K_c 를 갖는 이산 적응제어시스템으로 변환할 수 있다.

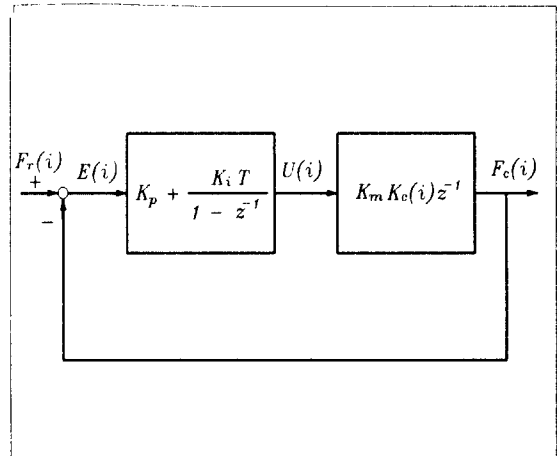


Fig. 3 Digital control system for cutting force regulation

Fig. 3으로 부터 기준절삭력과 실제절삭력 사이의 전달함수를 구하면

$$G(z) = \frac{F_c(i)}{F_c(i)} = \frac{(K_p K_m K_i - T K_m K_i z^{-1} - K_i K_m K_i z^{-2})}{1 + (K_p K_m K_i + T K_m K_i - 1)z^{-1} - K_i K_m K_i z^{-2}} \quad (7)$$

이 되고, 전달함수의 극점은 다음과 같이 된다.

$$z_{poles} = z_1 \text{ and } z_2 \quad (8)$$

여기서,

$$z_{1,2} = \frac{1}{2} \left[(1 - K_p K_m K_i - T K_m K_i) \pm \sqrt{(1 - K_p K_m K_i - T K_m K_i)^2 + 4 K_i K_m K_i} \right]$$

식 (8) 로 부터 절삭력 제어시스템이 안정할 조건은

$$|z_{poles}| = |z_{1,2}| < 1 \quad (9)$$

이 됨을 알 수 있다. 식 (9)에서 데이터 처리장치, 절삭 공정, 그리고 제어대상 동작기계의 사양에 의거하여 T 및 K_m 이 결정되고, 적절한 K_p 와 K_i 를 선정하면 제어시스템의 안정성은 절삭공정에 지배받는 시변계수 $K_c(i)$ 에 제한을 받게 된다. 식 (3) 에서 볼 수 있듯이 $K_c(i)$ 는 절삭중 K_s , d , s 및 f 가 바뀌면 샘플 시간에 따라서 변하게 된다. 그러므로, 절삭공정중에 안정성을 유지하기 위해서는 식 (9) 에서 적절한 K_p 와 K_i 값을 선정하여, 절삭조건에 관계없이 단위원 내에 z_{poles} 이 존재하도록 하여야 한다.

2.2.2 PI 형 적응제어기

앞의 2.2.1 절에서는 제어기의 계수 K_p 와 K_i 를 고정시킨 후 절삭조건에 따라 변동하는 극점이 식 (9) 의 안정화 조건을 만족하도록 제어를 시도하였으나, 공구의 마멸정도와 절삭조건 변화로, $K_c(i)$ 값이 커지게 되면 절삭공정에서 불안정한 현상이 야기된다. 이와 같은 현상을 제거하기 위해서는 어떠한 가공조건에서도

$$|z_{poles}| < 1 \quad (10)$$

을 만족하는 제어기의 설계가 필요하다. 또한 절삭공정의 극점이 안정한 영역에 놓이도록 제어게인 K_i 와 K_p 를 초기 추정과정과 실험을 통해서 적절한 값이 되도록 선정할 수 있으나, 이런 일련의 추정과정은 실험을 통한 초기 추정과정을 요구하며, 때로는 부정확한 추정이 야기하는 불안정성의 문제를 가지게 된다.

$K_c(i)$ 의 변화에 관계없이 식 (10) 을 만족시키기 위해서는 절삭공정 파라미터인 $K_c(i)$ 의 실시간 추정이

필요하며, 추정치 $K_c^c(i)$ 는 적분형 추정기를 도입하면,

$$E_f(i) = F_c(i) - K_m K_c^c(i-1) U(i) \quad (11)$$

$$K_c^c(i) = K_c^c(i-1) + g_c E_f(i) \quad (12)$$

가 된다. 여기서, $K_c^c(0)$ 과 g_c 는 사용자가 지정하는 상수이며, g_c 는 안정성과 추정속도를 고려하여 선정한다. 식 (11) 을 통해서 $K_c^c(i)$ 가 추정되면, PI 적응제어기의 실시간에서의 게인값은 식 (13) 이 되도록 선정한다.

$$z_{1,2} = \text{Desired Poles} \quad (13)$$

식 (13) 에서 Desired Poles 은 식 (9) 를 만족하는 것으로 적응제어기 설계자가 안정성과 속도성을 고려하여 선정한다.

식 (8) 과 (9) 를 이용하면 식 (13) 과 같은 극점배치 적응제어기에서 추정된 PI 게인은

$$\left. \begin{aligned} K_p^c(i) &= \frac{-z_1 z_2}{K_m K_c^c(i)} \\ K_i^c(i) &= \frac{1 - (z_1 + z_2) + z_1 z_2}{T K_m K_c^c(i)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

가 되며, 여기서 z_1 와 z_2 이다. Fig. 4 는 PI 형 적응제어기의 블록선도이다.

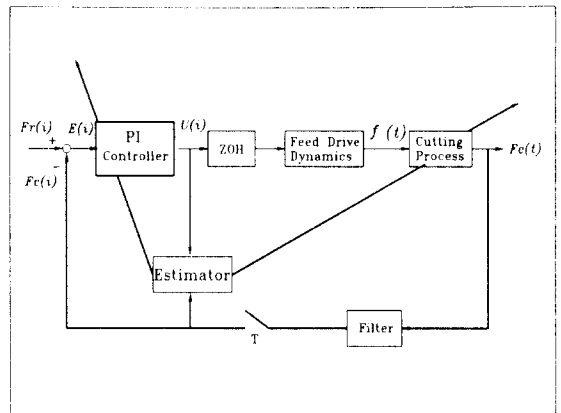


Fig. 4 Block diagram of the PI type adaptive controller

3. 실험장치의 구성

Fig. 5 는 PMC 인터페이스^[11]를 통한 이송속도

Override 를 이용하여 절삭력을 제어하는 경우에 대한 실험장치의 개략도이며, Fig. 6 은 이송속도 Override 가 수행되는 제어화면을 보여준다. [ACC ON] 을 선택 하면 [Feedrate Override] 가 실시간으로 제어되는 것을 볼 수 있다. 실험장치 및 조건을 Table 1 에 나타 내었으며, Fig. 7 은 적응제어 실험장면을 보여준다.

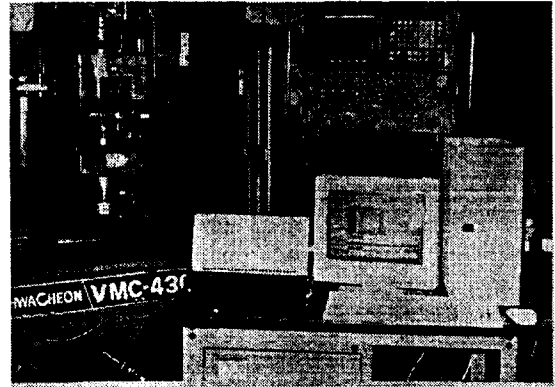


Fig. 7 Overview of experimental setup

Table 1 Experimental equipments and conditions

Equipments & Conditions	Specifications	Remarks
Machine Tool	VMC-430 with FANUC OMC	Hwacheon Machinery, Inc.
Tools	Flat End Mill	Diameter : 16 mm Length : 96 mm Teeth : 4 Material : H.S.S.
Workpieces	SB40	Width : 16 mm
Force Sensor	9257B	KISTLER
Charge Amp.	5019A	KISTLER
Cutting type	Peripheral end milling	
Reference force	800 N	
Nominal feedrate	200 mm/min	
Spindle speed	600 rpm	
PMC interface	PMC interface board	MASC-LAB, Hanyang Univ.
μ -computer	IBM PC 486	DX/2, 66 MHz
A/D Board	AD1200	Real Time Devices, Inc.

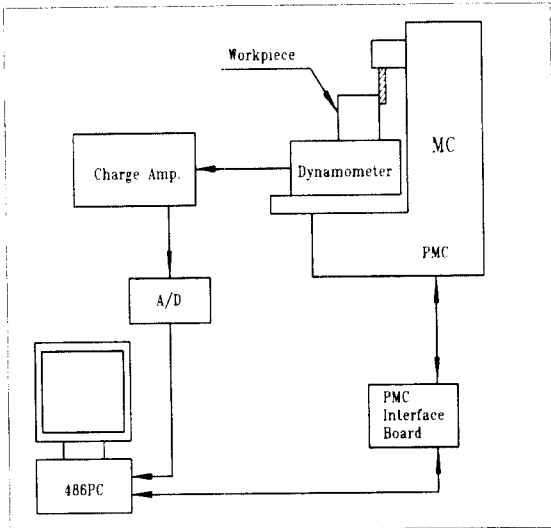


Fig. 5 Schematic diagram of experimental set-up

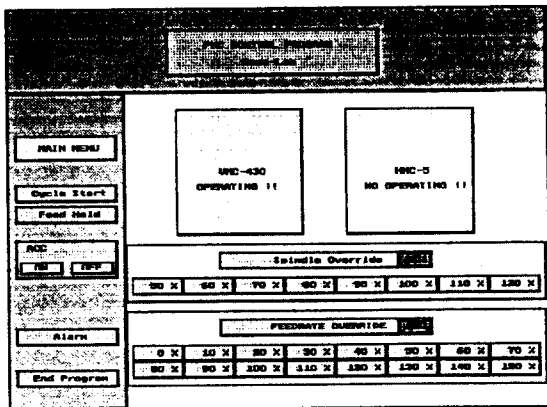


Fig. 6 Status of feedrate override control

4. 실험 결과 및 고찰

실험은 제어변수 K_p 와 K_i 를 고정시킨 상태와 적응 제어기를 채용한 상태로 구분하여 실시하였다. 주축의 회전속도는 600 rpm, 공칭 이송속도는 200 mm/min로 하였고, 샘플속도는 0.1 초로 하였다. 실험에 사용한 엔드밀의 공구인선은 4 개이며 샘플시간 0.1 초는 공구가 1 회전한 경우를 나타낸다.

4.1 고정게인형 PI 제어기

Fig. 8 은 수차례 사전 실험과정을 통하여 얻어진 $K_c(t)$ 값을 이용하여, 제어기 게인 $K_i=2.5$ 와 $K_p=0.05$ 로 선정된 후 절삭깊이가 1, 2, 3 mm 의 계단형

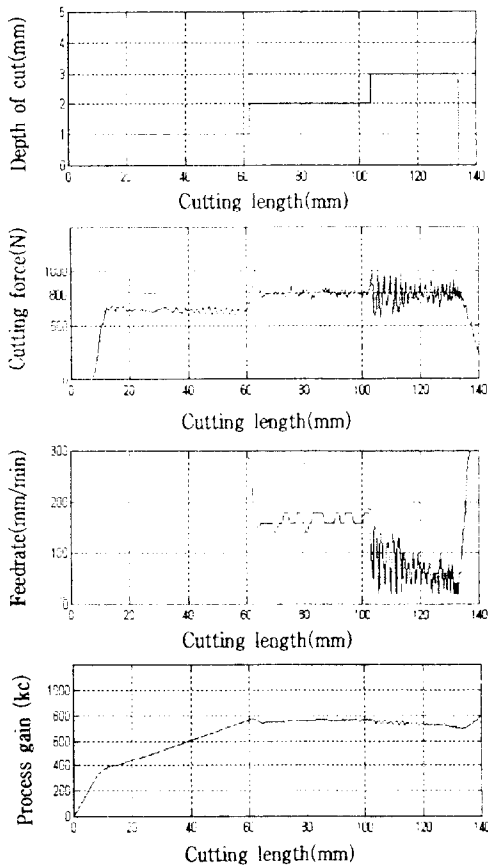


Fig. 8 Cutting force regulation for fixed gain case ($K_i=2.5$, $K_p=0.05$)

으로 주어지는 경우, 800 N 일정절삭력 제어를 시도한 결과이다. 초기 절삭시 절삭력이 800 N 에 미치지 못하는 것은 절삭깊이가 매우 작아서, 이송속도 Override 를 이용한 이송속도 제어시 이송속도를 최대 150 %, 300 mm/min 까지 증가시켜도 절삭력이 기준 절삭력에 이르지 못하기 때문이다. 그러나 이것은 서론에서 언급하였듯이 적응제어 시스템을 이용함으로써 MRR 을 극대화할 수 있음을 실증하는 것이다. 절삭깊이가 2 mm 인 중간부분에서는 갑작스런 절삭깊이 변화에 따라 초기에 발생하는 절삭력의 급격한 변화를 제외하고는 800 N 으로 절삭력 일정제어가 잘 이루어지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 절삭깊이가 3 mm 로 주어진 후반부 가공에서는 식 (3) 에서 정의된 $K_c(t)$ 값의 증가로 인하여 제어기의 극점이 단위원 내를 벗어나게 되어 불안정한 절삭력 제어가 이루어짐을 알 수 있다.

4.2 적응제어형 PI 제어기

Fig. 8 의 예에서 볼 수 있듯이 고정게인형 제어기의 경우 안정한 절삭을 위해서는 절삭공정계수 $K_c(t)$ 값의 별도 추정과정이 요구된다. 그러나, 어떤 경우에는 공구의 마멸상태에 따라서 $K_c(t)$ 값이 부정확하게 규명되는 경우도 발생한다. 그리고, 어떤 영역에서는 $K_c(t)$ 값의 큰 변화로 인하여 고정게인형 제어기에서는 불안정한 절삭이 이루어지게 된다. 여기서는 2.2.2 절에 제시한 적응제어형 PI 제어기를 이용하여 $K_c(t)$ 값을 절삭공정 중 온라인 예측후, 극점배치법을 이용하여 PI 게인을 자동으로 추정제어하는 실험을 수행하였다. Table 2 는 실험조건을 보인 것이다. 실험조건 I- IV 모두 800 N 의 일정절삭력 제어를 실험한 것으로 주축회전속도, 공칭이송속도, 샘플속도, 공작물 그리고 공구형상 등은 고정게인형 PI 제어기의 경우와 같게 취하였다.

Table. 2 Experimental conditions for PI type adaptive control

Case	Experimental Conditions			Results
	Radial depth of cut (mm)	Desired Poles		
		z_1	z_2	
I	2,3,4	0.2	-0.05	Fig. 9
II	2,3,4	0.1	-0.6	Fig. 10
III	2,3,4	0.001	-0.001	Fig. 11
IV	2~4	0.001	-0.001	Fig. 12

Fig. 9 는 절삭깊이가 2, 3, 4 mm 로 주어진 계단형 공작물의 일정절삭력 제어를 위하여, 원하는 극점을

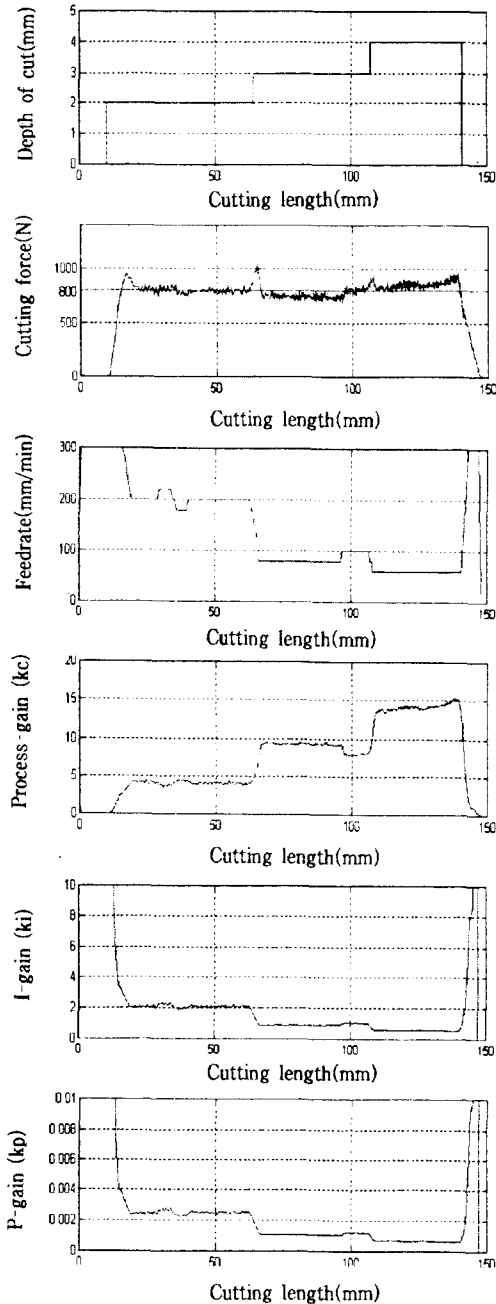


Fig. 9 PI adaptive control (Case 1)

$z_1=0.2$ 와 $z_2=-0.05$ 에 극점배치한 결과 이다. 절삭깊이 4 mm 구간 절삭시 후반부에서 이송속도가 일정한 값으로 제어되는 경우에도 절삭력이 상승하는 것은 공구마멸이 심한 때문이며, 이것은 비절삭저항 K_s 의 증가로 발생하며 실시간 추정된 절삭공정계수 K_c 값의 증가에서 판단할 수 있다. 초기 공절삭시 이송속도는 300 mm/min 로 제어되어 생산성 증대 효과를 볼 수 있으며, 절삭 개시점과 절삭깊이가 돌발적으로 변하는 지점에서 국부적인 절삭력 증가 이외에는 경절삭 또는 과절삭 구분 없이 공칭이송속도 200 mm/min 의 10% 분해능으로 제어되는 이송속도 Override 제어범위 내에서 800 N 일정절삭력 제어가 잘 이루어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 원하는 극점을 $z_1=0.1$ 과 $z_2=-0.6$ 에 극점배치한 결과 이다. 이 실험은 앞의 실험 I 에서 사용한 공구를 계속 사용하여 실험한 결과로서, 공구마멸의 정도는 실험 I 보다 큰 경우 이다. 과절삭 구간인 절삭깊이 4 mm 구간에서 이송속도가 일정하게 제어되는 경우에도 절삭력의 증가가 실험 I 의 경우보다 뚜렷하며, 이송속도의 10% 분해능 변화에 따른 절삭력의 변화가 현저하게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 실험 II 에서는 공구마멸의 심화로 비절삭저항 K_s 의 증가가 더욱 커지게 되고, 실시간 추정된 절삭공정계수 K_c 값으로부터 공구의 상태를 감시할 수 있다. 실험 I 의 경우와는 달리, 절삭 개시점과 절삭깊이가 돌발적으로 변하는 지점에서 국부적인 절삭력 증가는 물론 절삭력의 진동이 발생하는데, 이것은 극점배치에서 원하는 극점중 $z_2 = -0.6$ 으로 선정된 때문이다.

Fig. 11은 공구마멸이 적은 공구를 이용하여 실험 I 및 II 와 같은 조건하에서 원하는 극점을 $z_1=0.001$ 과 $z_2=-0.001$ 에 극점배치한 결과 이다. 결과에서도 볼 수 있듯이 실시간에서 추정된 비례계인 K_b 의 값은 실험 III 의 경우 실험 I 및 II 의 약 0.01 % 정도로서 적응제어기가 PI 형이 아닌 적분형 제어기로 생각할 수 있다. 식 (4)에서 적분형 제어기를 채용하는 경우, 식 (7) 전달함수의 극점은 1개가 되며, 극점배치형의 적응제어기는 더욱 단순하게 설계되어 진다. 적분형 적응제어기의 성능이 지배적인 실험 III 의 결과에서는 $z_1=0.001$ 과 $z_2=-0.001$ 에 배치된 극점의 영향으로 안정하고 양호한 일정절삭력제어가 수행되어짐을 알

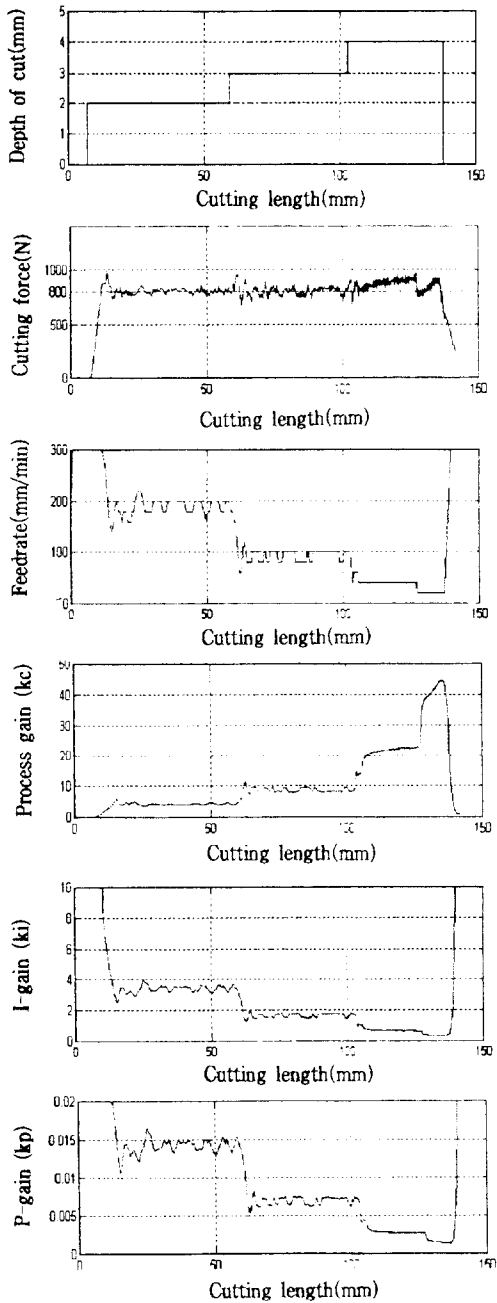


Fig. 10 PI adaptive control (Case II)

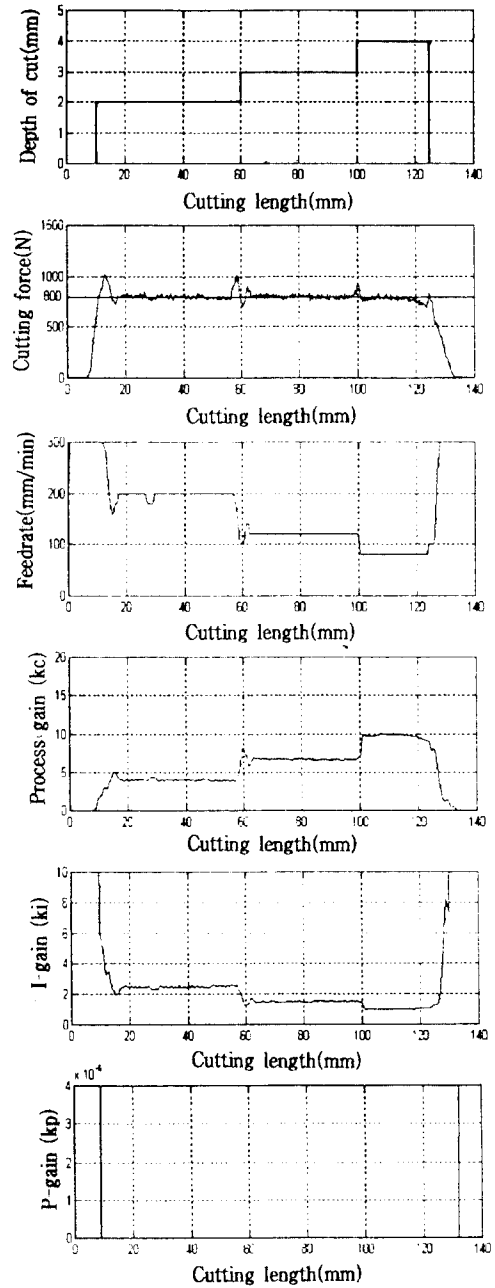


Fig. 11 PI adaptive control (Case III)

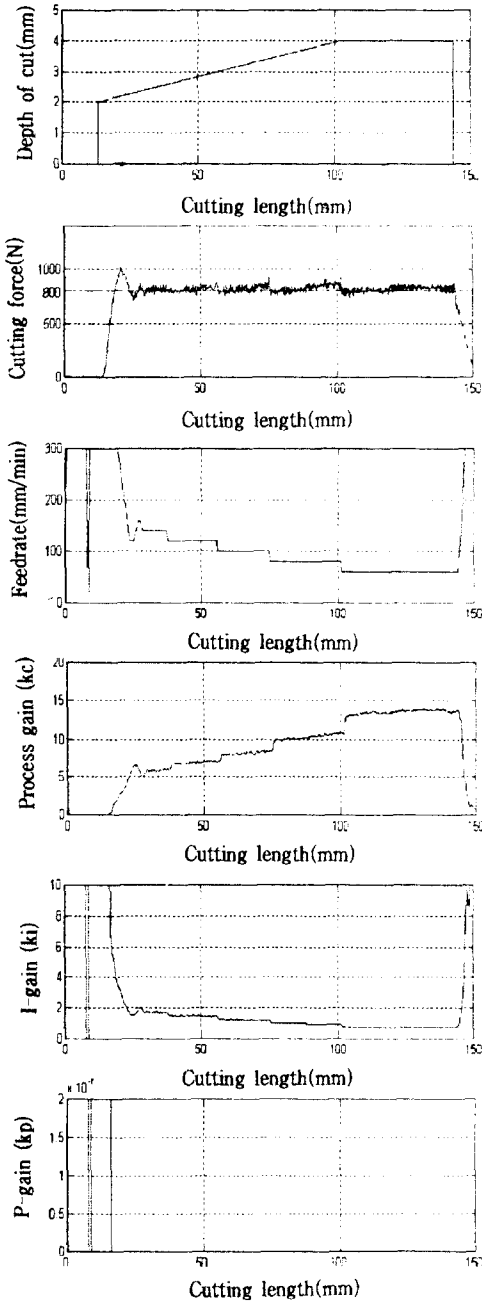


Fig. 12 PI adaptive control (Case IV)

수 있다. 또한 공구마멸의 정도가 실험 I 및 II 에 비하여 적기 때문에, 이송속도의 10% 분해능 변화에 따른 절삭력 제어시 보다 미세한 절삭력 제어를 달성할 수 있었으며, 실시간 추정된 절삭공정계수 K_c 값 또한 실험 I 및 II 에 비하여 적은 값이 됨을 볼 수 있다.

Fig. 12 는 공구마멸이 어느 정도 진행된 공구를 이용하여 절삭깊이가 경사지게 변화하는 조건하에서 원하는 극점을 $z_1=0.001$ 과 $z_2=-0.001$ 에 극점배치한 결과 이다. 실험 III 의 경우와 마찬가지로 적분형 적응제어를 경사절삭에 응용한 것으로 일정절삭력제어가 양호하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

(1) 일정절삭력 구속적응제어법을 Fanuc OMC 를 갖는 수직형 머시닝센터의 측면 엔드밀링 공정에 적용하여, 가공조건의 급격한 변화에도 이송속도 Override 를 이용 평균 주절삭력을 일정하게 유지할 수 있는 시스템을 개발하였다.

(2) 공작기계 구동부와 NC 제어기의 설계변경 없이 이송속도 Override 를 이용한 적응제어를 구현할 수 있도록 PMC 인터페이스 기법을 적용하였다.

(3) 절삭력의 비선형모형을 시변계수를 갖는 적응제어 모형으로 변환하였고, 실시간으로 절삭공정계수를 추정하는 극점배치 비례적분형 적응제어기를 구현하였다.

(4) 실시간에서 추정되는 절삭공정계수 K_c 를 이용하면 가공중 공구마멸 정도를 판단할 수 있고, 공구마멸의 상태감시 및 진단에 응용할 수 있다.

(5) 비례계인은 극점배치 적응제어기 설계시 불안정성을 야기할 수 있으며, 비례계인을 제거하더라도 적분계인만으로 적응제어기의 안정성을 확보할 수 있기 때문에 구속적응제어기를 1차 시스템으로 단순화 할 수 있다.

(6) 여러가지 경우에 대한 실험을 통하여 구속적응제어기법의 타당성을 검증하였으며, 이 시스템을 이용함으로써 공절삭 시간의 단축은 물론 안정한 절삭조건하에서 단위시간당 절삭량을 극대화 할 수 있다.

참고문헌

1. 정성중, 1988, "공작기계의 자동화를 위한 적응제어

- 기술의 개발 동향”, 대한기계학회지, 제 28 권, 제 3 호, pp. 167-170.
2. M. Tomizuka, J. H. Oh, and D. A. Dornfeld, 1983, "Model Reference Adaptive Control of the Milling Process", ASME winter annual meeting, Control of Manufacturing Processes and Robotic Systems, pp. 55-63.
 3. A. G. Ulsoy, Y. Koren and F. Rasmussen, 1983, "Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 105, pp. 107-112.
 4. M. A. Elbestawi, Y. Mohamed, and L. Liu, 1990, "Application of Some Parameter Adaptive Control Algorithms in Machining", ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, No. 4, pp. 611-617.
 5. A. Spence, Y. Altintas, 1991, "CAD Assisted Adaptive Control for Milling", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 113, No. 3, pp. 444-450.
 6. K. Danai, A. G. Ulsoy, 1987, "A Dynamic State Model for On-Line Tool Wear Estimation in Turning", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, No. 4, pp. 396-403.
 7. B. K. Fussell, K. Srinivasan, 1989, "On-Line Identification of End Milling Process Parameters", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, No. 4, pp. 322-330.
 8. 정성중, 1992, "적응제어 수치제어 시스템의 개발 (I) - 신경회로망 기법에 의한 절삭계수의 지적인 선정", 대한기계학회 논문집, 제 16 권, 제 7 호, pp. 1223-1233.
 9. S. Smith and J. Tlustý, 1991, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process", Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, No. 2, pp. 169-175.
 10. Fanuc, 1992, MTB Course (0-Series), Japan, Tokyo.
 11. I. Yellowley, 1985, "Observations of the Mean Values of Forces, Torque and Specific Power in the Peripheral Milling Process", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 25, No. 4, pp. 337-346.