

<論 文>

# 선삭에서 일정 절삭력 유지를 위한 구속 적응제어에 관한 연구

김 인 수\* · 황 흥 연\*\* · 김 광 준\*\*\*

(1986 년 3 월 6 일 접수)

## A Study on the Application of Adaptive Control Constraint to Maintain Constant Cutting Force in Turning

In-Soo Kim, Hong-Yeon Hwang and Kwang-Joon Kim

**Key Words:** Adaptive Control Constraint(구속 적응 제어), I-Control(적분제어), Constant Cutting Force(일정 절삭력), Cutting Process Modeling(절삭과정모델링), Stability(안정성)

### Abstract

Adaptive control constraint (ACC) is applied to a turning process to keep the cutting force constant while the cutting conditions vary. In this system, a given reference force is compared with the measured cutting force and the difference is input to the controller to adjust the feed.

Since it is found that the effective ACC loop gain depends on both depth-of-cut and spindle speed and thereby influence the system stability, a simple computer algorithm is built in the controller to maintain the stability of the whole system by on-line estimation of the process parameters during cutting.

### 기 호 설 명

$a$  : 절삭깊이 [mm]  
 BLU : Basic length unit [mm]  
 $F$  : 실제 주절삭력 [N]  
 $f$  : 이송량 [mm/rev]  
 $F_r$  : 기준 절삭력 [N]  
 $G1(S)$  : 서어보 시스템의 전달함수 [mm/pulse]  
 $H$  : 공구동력계와 A/D 변환기의 Gain  
 $K$  : 전체 제어 시스템의 Gain [1/sec]  
 $K_c$  : 제어기의 Gain

$K_f$  : 이송률 Gain  
 $K_r$  : 주절삭력비 [N-mm/rev]  
 $N$  : 주축속도 [rpm]  
 $T$  : Sampling time [sec]  
 $U$  : 제어기의 출력  
 $V$  : 절삭속도 [m/min]  
 $V_f$  : 이송속도 [mm/sec]  
 $\omega_n$  : 서어보 시스템의 고유진동수 [Hz]  
 $\alpha, \beta$  : 절삭과정 실험식의 지수  
 $\zeta$  : 서어보 시스템의 감쇠비

\* 한국과학기술원 생산공학과(현재 한국기계연구소 산업공학실)

\*\* 한국과학기술원 생산공학과

\*\*\* 정회원, 한국과학기술원 생산공학과

### 1. 서 론

Fig. 1에 보인 바와 같이 선삭작업에 구속적응제어

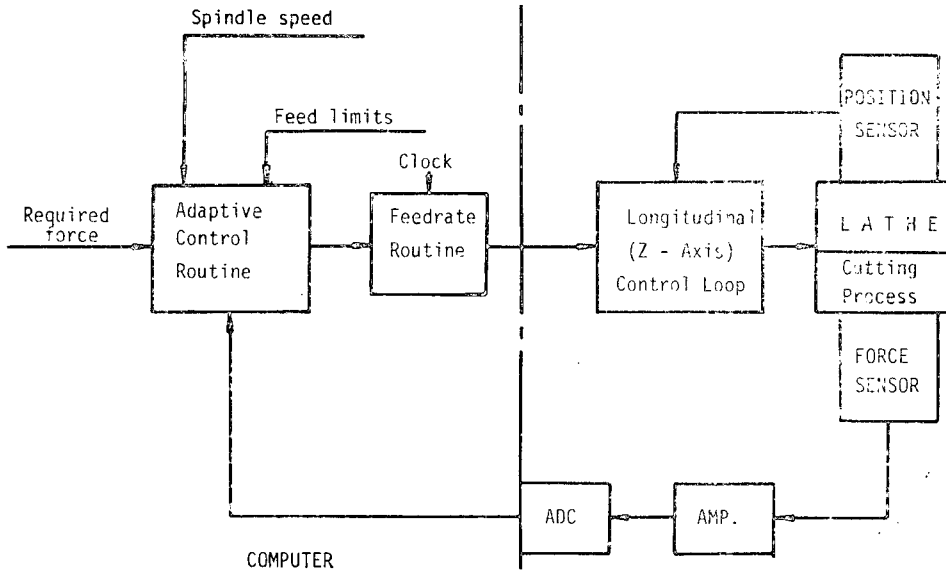


Fig. 1 Adaptive control constraint system in turning

(adaptive control constraint) 시스템을 적용하여 허용 이송속도범위내에서 주절삭력이 일정하게 유지되도록 이송속도를 조절하면 다음과 같은 이점을 얻을 수 있다. 즉, 절삭깊이가 작아질 경우 이송속도를 증가시킴으로써 불필요한 절삭시간을 단축시킬 수 있고, 절삭깊이가 커질 경우 이에 맞추어 이송속도를 감소시킴으로써 과도한 절삭력의 발생을 방지하여 안정절삭조건을 유지하고 공작기계 및 공구를 보호할 수 있다.

공작기계에 적용된 ACC 시스템에 관한 연구 사례를 살펴보면, J. Tlustý와 M.A. Elbestawi는 검출요소로서 절삭력을 이용한 ACC 밀링머시인을 개발하였고<sup>(1)</sup>, F.Guisti와 M. Santochi는 ACC를 선반작업에 적용하여 이송량이 절삭과정(cutting process)의 변화에 적절히 적응하도록 하였다<sup>(2)</sup>. O. Masory와 Y. Koren은 선반작업 시에 절삭력을 측정하여 이송속도를 제어함과 동시에 절삭조건 변화에 따라 시스템이 불안정해지는 것을 막는 제어 알고리즘을 개발하였다<sup>(3-6)</sup>.

본 연구에서는 절삭과정의 정적특성에 관한 식과 그에 포함된 계수를 실험을 통하여 결정함으로써 절삭과정을 모델링하고, 절삭시에 검출되는 주절삭력에 따라 이송속도를 제어하며 절삭과정의 변동에 관계없이 시스템의 안정을 보장하는 제어 프로그램 및 제어장치를 개발하여 선삭작업에 응용하여 보고자 한다.

## 2. 제어 시스템의 모델링 및 제어기의 제어원리

스텝핑 모우터 구동기로부터 공구까지의 이송제어 서어보 시스템의 전달함수  $G1(S)$ 를 다음과 같이 가정한다.

$$G1(S) = \frac{BLU \cdot \omega_n^2}{S^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot S + \omega_n^2} \text{ [mm/pulse]} \quad (1)$$

Fig. 2는 모우터 구동기에 입력되는 pulse 주파수의 계단형태의 변화에 대한 서어보 시스템의 응답 시험결과이며 이로부터 산출된 서어보 시스템의 고유진동수와 감쇠비는 각각  $\omega_n = 1.9 \text{ Hz}$ ,  $\zeta = 0.54$ 이다.

이송속도  $V_f$ 와 이송량  $f$ 사이의 관계는 다음과 같다.

$$f = \frac{60}{N} \cdot V_f \text{ [mm/rev]} \quad (2)$$

여기서,  $N$ 은 주축의 분당 회전수이다.

절삭과정의 정적특성을 나타내는 S. Spiewak과 T.U. Warsaw 제안식<sup>(7)</sup>의 절삭날각 항을 계수  $K_s'$ 에 포함시켜 공구에 작용하는 주절삭력  $F$  및 이송량  $f$ 와 절삭깊이  $a$ 와의 관계를 다음과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned} F &= K_s' \cdot f^{1-\alpha} \cdot a^\beta \\ &= K_s \cdot f \cdot a \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $K_s = K_s' \cdot a^{\beta-1} / f^\alpha$

여러 절삭조건에서의 절삭실험 결과를 주절삭력 및 이송과 절삭깊이에 대해 plot한 결과는 Fig. 3과 같다. 이로부터 선형 최소오차자승법(linear least square

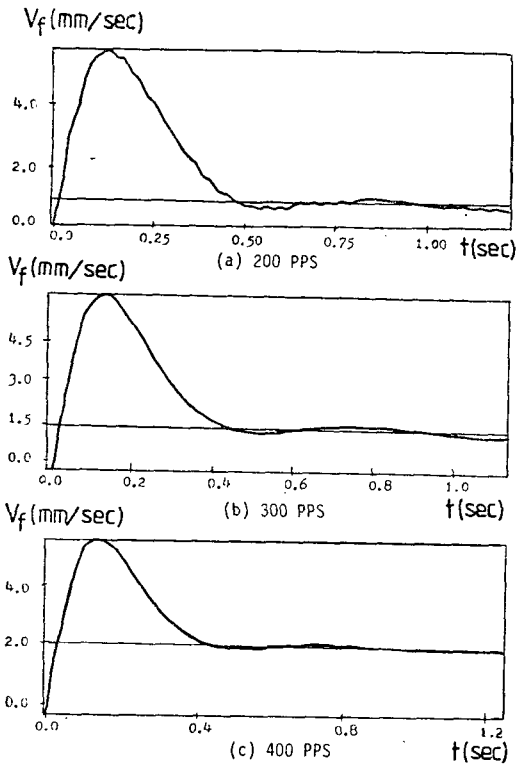


Fig. 2 Servo system responses to step input  
Input: pulses from computer  
Output: Movement of tool in the feed direction

error method)을 이용하여 매개변수의 값을 구하면  $K_r' = 1963.23$ ,  $\alpha = 0.2451$ ,  $\beta = 0.9046$ 이다.

제어기로서 적분 제어기를 사용하면, 절삭력 오차  $E$  및 제어기의 출력  $U$ 와 이송속도  $V_f$  사이의 관계는 다음과 같다.

$$U(i) = U(i-1) + K_c \cdot E(i-1) \quad (4)$$

$$V_f(i) = K_r \cdot U(i) \quad (5)$$

여기서  $(i)$ 는  $i$ 번째 샘플링을 나타내며  $K_c$ 는 제어기 Gain,  $K_r$ 는 이송속도에 관계되는 상수이다.

이상과 같이 모델링한 제어 시스템을 블록선도로 나

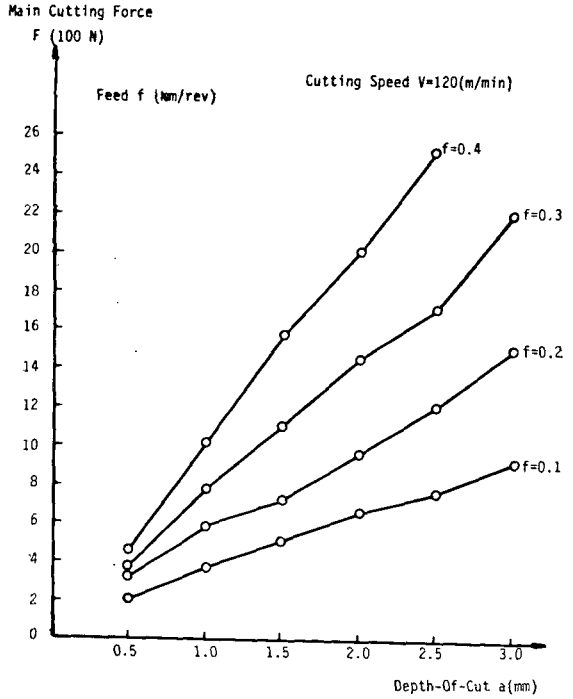


Fig. 3 Experimental data for cutting process modeling

타내면 Fig. 4와 같고 전체 Open-Loop의 Gain  $K$ 를 구하면 다음과 같다.

$$K = K_c \cdot K_r \cdot H \cdot BLU \cdot 60 \cdot K_s \cdot a / N \quad (6)$$

여기서 상수  $H$ 는 공구동력계와 A/D 변환기의 Gain이다.

전체 제어시스템이 안정하게 되는  $K$ 의 범위를 Routh의 안정조건<sup>(8)</sup>을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$0 < K < 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot T \quad (7)$$

식(6), 식(7)로부터 알 수 있는 바와 같이, 절삭깊이와 주축속도는 전체 Gain의 일부분이므로 절삭깊이의 증가 및 주축속도의 감소는 전체 Gain을 증가하여 시스템의 불안정을 유발한다. 큰 절삭깊이로 절삭할 경우 시스템의 불안정을 막기 위해서는 제어기 Gain을 매우 작게 하여야 하나 이는 제어시스템의 응답속도를

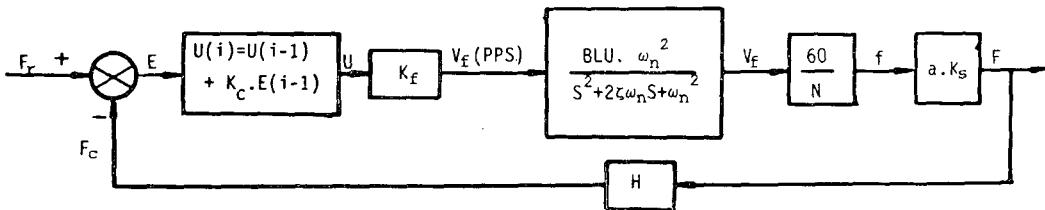


Fig. 4 Block diagram of the adaptive constraint control system

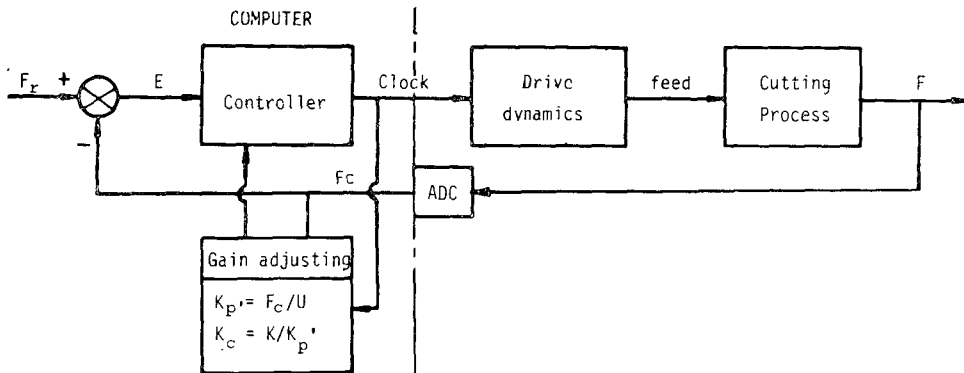


Fig. 5 Gain adjusting scheme of the ACC system

느리게 하여 또 다른 문제를 일으키게 된다.

이러한 이유로 다음과 같은 제어기 Gain의 조절 알고리즘을 제안한다. 즉 시스템의 전체 Gain  $K$ 를 식 (7)로 표시된 안정범위내의 적당한 값으로 정하고 절삭조건의 변동에 상관없이  $K$ 를 일정하게 유지시킨다. 한편  $K$ 는 식 (6)에 나타낸 바와 같이 절삭과정과 제어기 Gain의 함수이므로 Open-Loop Gain  $K$ 를 일정하게 유지시키기 위해 온라인으로  $K_r \cdot a/N$  값을 산출하고 그에 따라 제어기의 Gain  $K_c$ 를 조절시킨다.

전체 Gain  $K$ 에서 제어기의 Gain  $K_c$ 를 제외한 Gain을  $K_p$ 라 하면,  $K_p$ 는 A/D 변환기를 통해 수치화된 절삭력  $F_c$ 를 제어기의 출력  $U$ 로 나눈 값이므로 다음과 같은 식이 성립된다.

$$K_p = F_c / U = K_r \cdot H \cdot BLU \cdot 60 \cdot K_r \cdot a / N \quad (8)$$

다음 단계의 제어기 출력시에 쓰여질  $K_c$ 는  $K$ 를 식 (8)로부터 구해진  $K_p$ 로 나눈 것이다.

$$K_c = K / K_p \quad (9)$$

식 (8), 식 (9)으로 표시된 제어기의 Gain 조절 알고리즘의 블록선도는 Fig. 5와 같다.

### 3. 실험 및 실험결과

#### 3.1 실험장치

Fig. 6에 보여진 본 연구의 제어 시스템은 중형 범용선반(Lodge & Shipley, 11.2 kW), 3축 절삭력을 동시에 측정할 수 있는 압전식공구동력계(Kistler model 9257 A), 스텝핑 모우터, 12 bit 분해능(resolution)을 갖는 A/D 변환기, 소형 컴퓨터와 주변장치, 이송제어를 위해 Pulse를 스텝핑 모우터의 구동기에 전달하는 interface 회로와 디지털 제어를 위한 제어 프로그램등으로 구성되어 있다. 범용선반을 사용한 본 연구

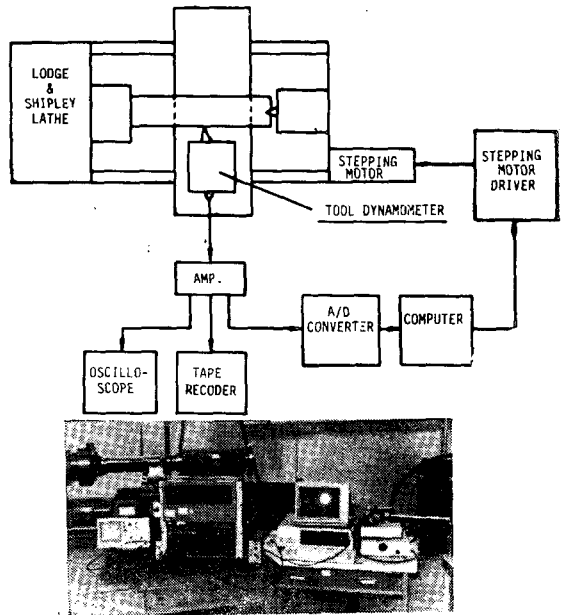


Fig. 6 Experimental set-up for the ACC system in turning

에서는 이송대 기어박스를 추축과 분리하고 이송축을 스텝핑 모우터의 축에 연결하여 이송제어가 가능하게 하였다. 소형 컴퓨터(IBM PC XT에 상응)의 CPU는 16 bit 마이크로프로세서(8088)이며, 제어 프로그램의 작성은 실시간 연산(real time computing)과 주변장치와 CPU option의 제어를 위해 어셈블리어(assembly language)를 이용하였다.

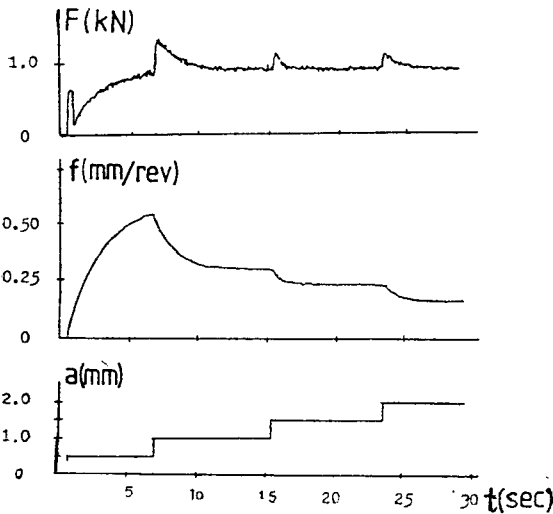
제어시스템의 구성시에 쓰인 각 계수들의 값은 Table 1과 같다. 여기서 샘플링간격을 0.1 sec로 설정한 이유는  $K_r \cdot a/N$  및  $K_c$ 를 8088 CPU로 계산할 수 있는 시간보다는 크게하고 서버보 시스템의 고유진동수를 감지할 수 있는 최대 샘플링간격인 0.26 sec 보다는 작게하

**Table 1** Coefficients for control system

Coefficient	Value	Unit
$K_f$	0.19685	[mm/sec]
$BLU$	0.005	[mm]
$H$	0.2048	[1/N]
$F_r$	1000.0	[N]
$T$	0.1	[sec]

**Table 2** Experimental conditions for control system with constant gain controller

Experiment No.	Controller gain $K_c$	Depth of cut $a$ [mm]	Spindle speed $N$ [rpm]	Results
1	0.5	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	500	Fig. 7
2	2.0	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	500	Fig. 8
3	8.0	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	500	Fig. 9
4	4.0	1.0, 2.0, 3.0	500	Fig. 10
5	4.0	1.0, 2.0, 3.0	350	Fig. 11



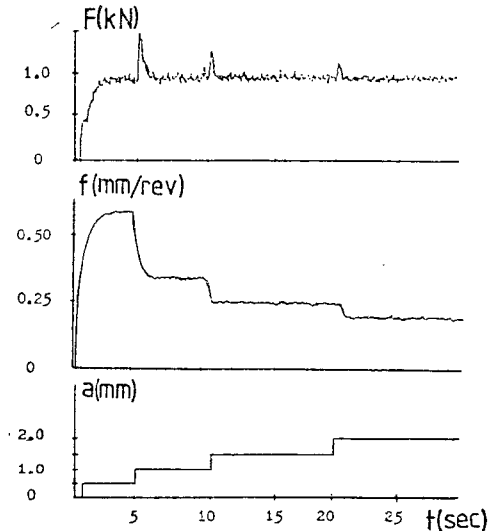
**Fig. 7** System responses for  $K_c=0.5$  and  $N=500$  rpm (KT 300 coated carbide tool and SM 45 C workpiece throughout the experiments)

기 위해서이다. 애널로그 절삭력 신호를 디지털화 하는 데는 30 kHz의 변환율을 갖는 A/D 변환기(Tecmar Lab Master)를 사용하였다.

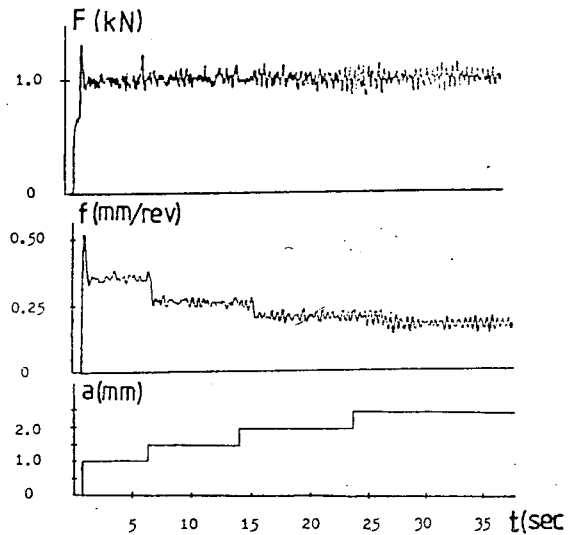
**3.2 실험 및 실험결과**

(1) 제어기 Gain이 일정한 제어시스템의 실험 본 실험에서는 제어기의 Gain  $K_c$  및 절삭조건의 변화에 대한 제어시스템의 성능변화에 관하여 알아보았다. Table 2에 구체적 실험조건이 있다.

Table 2에 대한 실험결과는 각각 Fig. 7~Fig. 11과 같다. 주축속도가 500 rpm인 경우,  $K_c$ 가 0.5 일 때는 시스템의 응답속도가 너무 늦게되며(Fig. 7),  $K_c$



**Fig. 8** System responses for  $K_c=2.0$  and  $N=500$  rpm



**Fig. 9** System responses for  $K_c=8.0$  and  $N=500$  rpm

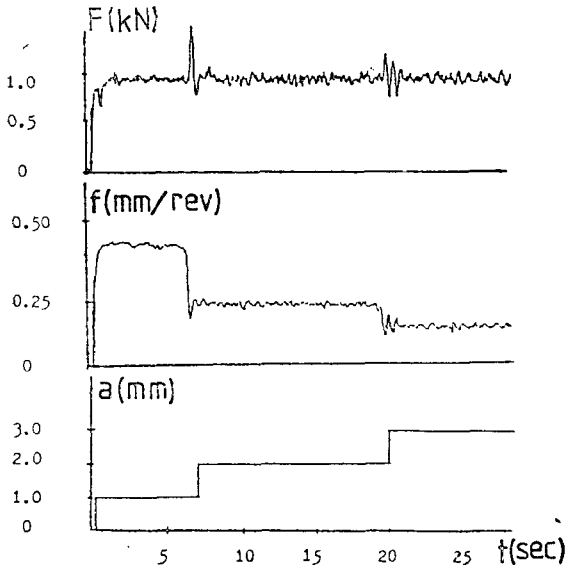


Fig. 10 System responses for  $K_c=4.0$  and  $N=500$  rpm

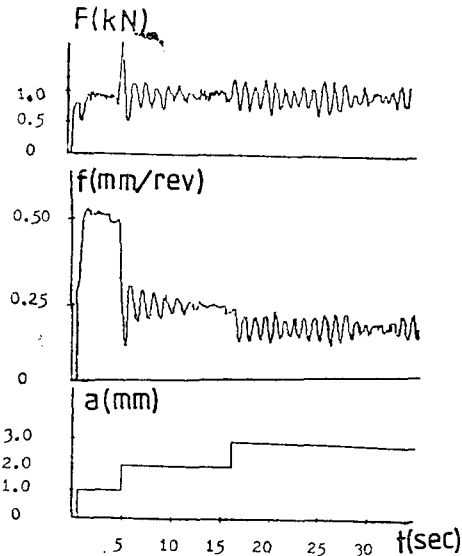


Fig. 11 System responses for  $K_c=4.0$  and  $N=350$  rpm

가 8.0 일 경우에는 절삭깊이가 커짐에 따라 시스템이 불안정 해진다 (Fig. 9). 또한 주축속도가 500 rpm에서 제어성능이 비교적 좋았던  $K_c$ 의 범위 (2.0, 4.0)에서도 주축속도가 350 rpm 이하, 절삭깊이가 3 mm 이상하면 제어시스템이 불안정하다 (Fig. 10, Fig. 11).

즉 적분제어기 (I-Controller) 만에 의한 시스템의 응답은 제어기의 Gain  $K_c$ 가 작은 경우 시스템은 안정하

Table 3 Experimental conditions for ACC system

Experiment No.	Depth of cut $a$ [mm]	Spindle speed $N$ [rpm]	Results
6	1, 2, 3	500	Fig. 12
7	1, 2, 3	400	Fig. 13
8	1, 2, 3	300	Fig. 14

나 응답속도가 너무 느리고,  $K_c$ 가 커지면 응답 속도가 빨라지나 시스템이 불안정한 결과를 보여주고 있으며, 또한 적절한  $K_c$ 에서도 절삭속도가 작아지거나 절삭깊이가 커지면 시스템이 불안정해진다.

(2) 구속 적응제어 시스템의 실험

절삭조건의 변동에 관계없이 시스템이 안정하도록  $K_c$ 를 앞에서 언급된 알고리즘에 따라 조절하였다. 식 (7)로부터 시스템의 안정을 위해서는 전체 Gain  $K$ 는 1.29 이하이어야 하므로  $K$ 값을 1로 정한다. 구체적인 실험내용은 Table 3 과 같다.

Fig. 12~Fig. 14에 보인 실험결과에서 알 수 있는 바와 같이,  $K_c$ 가 일정한 제어시스템의 경우 절삭과정의 변동에 따라 시스템이 불안정하여지기도 하나 (Fig. 7, Fig. 11),  $K_c$ 가 절삭과정의 변동에 따라 자동적으로 조절되는 경우에는 시스템이 항상 안정하다. 또한 Open-Loop Gain  $K$ 를 식 (7)의 절대 안정범위중 비교적 큰 값으로 정하여 응답속도도 빠른 것을 관찰할 수 있다. 그러나 구속 적응제어 시스템은 절삭초에 절삭깊이가 작고 주축속도가 크면, 식 (8), 식 (9)에 의해

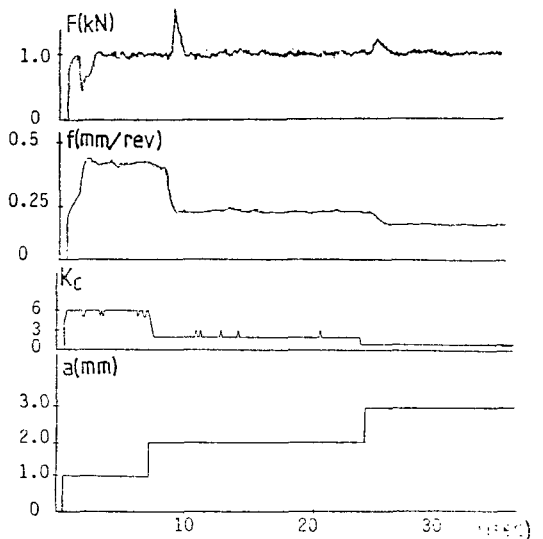


Fig. 12 ACC system responses at  $N=500$  rpm

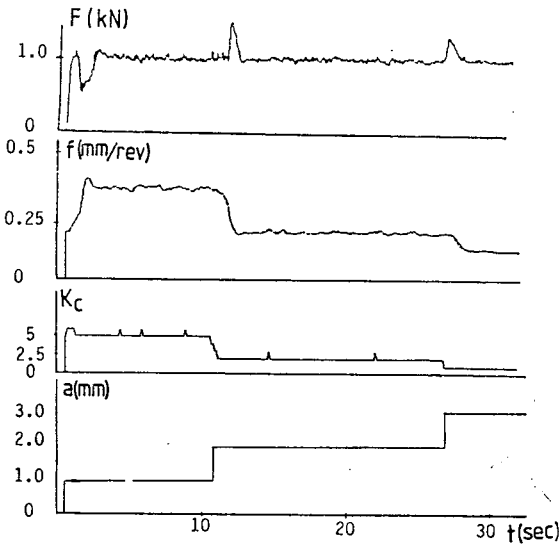


Fig. 13 ACC system responses at  $N=400$  rpm

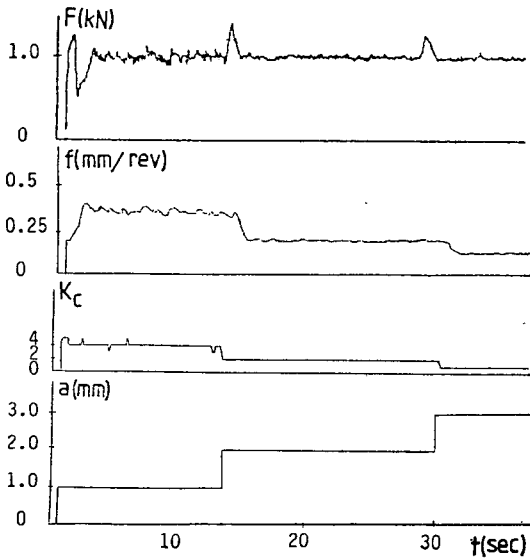


Fig. 14 ACC system responses at  $N=300$  rpm

$K_c$ 가 크게 되므로 상대적으로 절삭력오차에 민감하게 되어 일시적으로 제어출력의 변동이 유발되는 문제점도 발견되었다.

4. 결 론

공작물로 탄소강 SM 45 C 와 초경공구를 사용한 절

삭시험으로부터 절삭과정의 정적특성을 나타내는 기준의 실험식형태에 필요한 상수를 결정하였다. 적분제어기만을 적용하여 절삭력을 일정하게 제어할 경우 절삭조건이 양호하지 못할 때 시스템이 불안정함을 보였고 이의 해결을 위해 절삭조건의 변동에 따라 이송속도를 조절하고 제어기를 적응시키는 제어 알고리즘을 제시하였다. 이 알고리즘에 따라 구축 적응제어 시스템을 구성하여 실험해 본 결과, 공작기계 및 공구보호 그리고 생산성 향상을 위해 선반작업에 적용될 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- (1) J. Tlustý and M. Elbestawi, "Analysis of Transients in an Adaptive Control Servomechanism for Milling with Constant Force", ASME Paper No. 76-WA/Prod-31, 1976
- (2) F. Giusti, M. Santochi and G. Tantussi, "A Constant Cutting Power Adaptive Control for Rough and Fine Turning", Proc. of the MTDR Conf., pp.187~193, 1984
- (3) O. Masory and Y. Koren, "Adaptive Control System for Turning", Annals of the CIRP, Vol. 29, No. 1, pp.281~284, 1980
- (4) Y. Koren and O. Masory, "Adaptive Control with Process Estimation", Annals of the CIRP, Vol. 30, No. 1, pp.373~376, 1981
- (5) U.A. Galip, Y. Koren and F. Rasmussen, "Principal Development in the Adaptive Control of Machine Tools", Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 105, pp. 107~112, 1983
- (6) O. Masory, "Real Time Estimation of Cutting Process Parameters in Turning", Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, Vol. 106, pp.218~221, 1984
- (7) S. Spiewak, T.U. Warsaw and M. Szafarczyk, "Algorithms of Optimization and Structures of ACC Controllers for Rough Turning", Annals of the CIRP, Vol. 29, pp.413~418, 1978
- (8) K. Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice Hall, 1970