

<論 文>

# Machining Center에서 End Milling할 때 Torque에 의한 가공변수의 적응제어에 관한 연구

박 천 경\* · 윤 문 철\*\*

(1986년 7월 24일 접수)

## A Study on the Adaptive Control of Process Parameters using Torque for End Milling Operation in Machining Center

Chun Kyung Park and Moon Chul Yoon

**Key Words:** Adaptive Control(적응제어), Numerical Control(수치제어), Controller(제어기)  
Variable Gain(가변게인), Cutting Torque(절삭토크)

### Abstract

The purpose of this study is to describe the strategy of machining process suitable for developing adaptive control with constraint of NC-machine tool.

The algorithm that controls machining process parameters of every sampling time is established for the constraint of torque in machining center. To prove this AC algorithm, manual AC-unit control test is used for simulating the on-line AC strategy control. Also machining tests are carried out on a CNC-machining center fitted with the ACC systems and compared with the simulated results.

The practical effectiveness of the ACC systems so discussed and the reduction of machining time are demonstrated with reference to typical models of cutting workpieces. As a typical model, taper and step geometry model are selected.

The computer simulation results have a good agreement with the experimental observation and make it possible to develop a NC-machine tool with an on-line ACC system.

### 기 호 설 명

$D$  : 엔드밀의 직경(mm)

$d$  : 반경 방향 절삭깊이(mm)

$E(i)$  : 절삭 토크 오차

$f$  : 가공 이송속도(mm/rev)

$K$  : AC 개방회로 게인

$K_c$  : 제어기 게인

$K_e$  : 변환 계수

$K_h$  : CNC 하드웨어 시스템의 게인

$K_n$  : CNC 서어보 시스템의 게인

\* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

\*\* 정회원, 서울대학교 대학원

$K_p$  : 공구 및 공작물의 재질, 주축 회전수, 절삭깊이  
에 의한 프로세스 계인

$K_s$  : 비절삭력 상수

$N$  : 주축 회전수 (rev/min)

$P$  : 엔드밀의 잇수

$T$  : 절삭 토오크 (kg-mm)

$T_s$  : 샘플링 주기

$U(i)$  : 명령 시그널

$U_0$  : 기준 명령시그널

$V_s$  : 이송속도 명령

$\omega$  : 축방향 절삭깊이 (mm)

$\omega_n$  : CNC 서어보 루프 다이내믹의 고유진동수

$\lambda$  : 엔드밀의 나선각 (degree)

$\xi$  : CNC 서어보 루우프 다이내믹의 감쇠비

$\tau$  : 프로세스의 시간상수

## 1. 서 론

최근 공작기계에 NC 시스템의 보급과 더불어 컴퓨터 산업의 발전으로 CNC 시스템 방법이 현저하게 발전하고 있다. 또 CNC화 됨에 따라 공작기계는 하드웨어 시이퀀스 제어 (hardwired sequence control) 방식에서 마이크로 프로세서 등의 칩 (chips)으로 구성된 PLC (Programmable Logic Controller)를 개발하였고 소프트웨어 시이퀀스 제어 (softwired sequence control) 방식을 채택하여 더욱 flexible하여졌고 다양한 일을 할 수 있게 되었다.

보통의 CNC 시스템의 작동은 작업자의 숙련된 지식을 이용하여 가공변수 즉 절삭조건 (절삭속도, 이송속도, 절삭깊이) 등을 선택하여 작업을 하여야 했다. 실제로 생산가공에서 과도한 절삭력 및 토오크가 걸려 공구가 파손되거나 하는 일이 없어야 하고 또 생산성을 향상시키기 위해 CNC 공작기계에 적응제어 (Adaptive Control; AC) 시스템을 도입 하는것이 필요하게 되었다.

최근에는 CNC 시스템에서 manual part program과 각종 APT (Automatic Programmed Tools; JAPT, FAPT, EXAPT, SYMBOLIC-APT, 등)가 사용되고 있고 이들 시스템을 사용할 때 황삭고정주기 사이클 (Roughing canned cycle)이 사용되고 있다. 이 황삭주기 사이클의 절삭과정은 절삭깊이의 증가 유형에 따라 스텝모델과 테이퍼 모델의 두 가지로 나누어 생각할 수 있고 기타의 절삭과정은 이 두 작업의 조합된 형태라고 볼 수 있다.

지금 까지 연구된 바에 의하면 적응제어 시스템은

목적에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

### (1) 기하학적 적응제어 (Geometric Adaptive Control)

기하학적 적응제어는 공작기계 및 공작물의 변형, 공구마모 등 진기적, 기계적인 정밀도한계 (精密度限界)에 의한 오차를 직접 혹은 간접적으로 측정하여 공작물의 치수 및 형상의 정밀도를 높이는 것이다.

### (2) 기술적 적응제어 (Technological Adaptive Control)

기술적 적응제어 시스템은 가공비용 혹은 가공시간 등의 PI (Performance Index)를 시스템의 제한조건이나 프로세스를 만족시키는 범위에서 최적화 하는 ACO (Adaptive Control for Optimization)와 기계의 최대 허용마력, 절삭력, 토오크, 절삭온도 등의 제한조건 및 프로세스를 만족하는 범위에서 가공 변수 즉 절삭조건을 증감시키는 ACC (Adaptive Control with Constraints)로 분류할 수 있다.

실제로 절삭 작업에 있어서 타당성 있는 PI를 얻는 것과 프로세스 중 필요한 가공변수를 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 ACO 시스템은 주로 연삭작업에 제한되고 있다. 실제의 모든 선삭, 밀링, 드릴링, 보어링 등의 적응제어는 대개가 ACC 형태이다. 이에 대한 연구는 Bedini<sup>(1,2,3,4)</sup>, Miler<sup>(5)</sup>, Tlusty<sup>(6)</sup> 등 여러 연구자에 의해 검토 되었으나 이들 연구는 주로 절삭과정만 폐쇄회로로 보고 가공변수만의 적응제어 시스템을 밀링에 적용하였고 제어기 변수에 대한 연구는 되지 않았다. 또한 프로세스 예견에 대하여도 Koren, Masory<sup>(7,8,9)</sup>는 절삭과정의 가공변수뿐 아니라 CNC 제어기 및 AC-unit의 가변제인 (variable gain)도 고려한 적응제어 시스템을 선삭작업에서 하였다. 본 논문에서는 Koren의 알고리즘을 밀링에 적용하는 ACC-CNC 시스템을 제안 CNC 시스템에 AC 시스템을 적용할 때 생기는 변수예측과 또 스텝 및 테이퍼의 두 가지 형상모델에 대한 변수들의 거동 및 그 때의 생산성을 알아보고 또 이 시스템을 밀링에 적용할 때의 이들 시스템의 적용 가능성을 AC-unit 제어실험 (control test)을 통하여 그 타당성을 검토하여 실제 CNC 시스템에 AC 시스템을 적용할 수 있도록 하는 ACC-CNC 시스템의 설계기준을 설정하여 시스템의 최적설계의 기초적인 자료를 얻고자 한다.

## 2. 이 론

### 2.1 적응제어 시스템의 설정

전형적인 ACC 시스템은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며 AC-제어기와 절삭과정 (Cutting process)으로

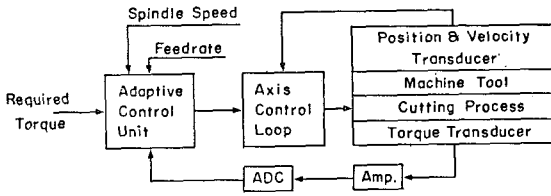


Fig. 1 Typical adaptive control system of machine tool

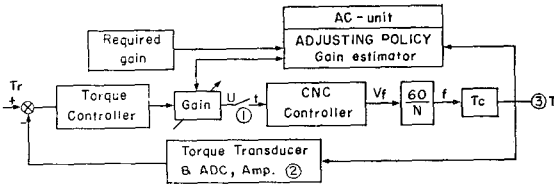


Fig. 2 Block diagram of the ACC-CNC system

구분된다. Fig. 1에서 이송 속도는 요구하는 토크를 일정하게 유지하기 위해 조절되고 이때 절삭과정은 폐쇄회로(closed loop)의 일부분으로 간주되고 절삭과정 중 절삭조건 즉 가공변수의 변화는 적응제어 시스템의 성능에 영향을 미치게 된다. 이런 형태의 적응제어 시스템을 특히 변수적응제어 시스템(parametric adaptive system)이라 부르고 공작기계에 적용되는 적응제어 시스템은 대부분이 이런 부류에 속하며 순수한 제어이론(control theory)에 의한 적응제어 시스템과는 구분된다.

본 연구에서는 시스템을 Fig. 2와 같이 모델링 하였고 절삭과정 중 변수의 변화는 시스템 성능에 영향을 미치게 된다.

## 2.2 적응제어 전략

시스템은 Fig. 2에서와 같이 폐쇄회로인 피드백(feedback)을 형성한다. 주축 회전수가 일정한 절삭과정에서 이송속도( $f$ )는 요구하는 절삭토크( $T_r$ )에 상당하는 절삭깊이( $d$ )에 따라 적응하게 된다. 적응제어 시스템은 데이터 샘플링의 형태로 절삭토크를 샘플링한다. 이 절삭토크는 디지털 시그널  $T_c$ 로 변환되고 이 값은  $T_r$ 과 비교하게 된다. 이때 절삭토크 오차  $E(i)$ 는

$$E(i) = T_r(i) - T_c(i) \quad (1)$$

여기서,  $i$ 는  $i$ 번째 샘플링

절삭토크 오차  $E(i)$ 는 AC-unit의 토크 제어기(Torque controller)로 보내져 보정되고 CNC-제어기에 있는 이송속도 제어회로에 시그널을 전송하게 되고 시그널의 부호에 따라 이송속도를 증감시켜 절삭토크

를 증가시키거나 감소시킨다. CNC-제어기의 출력명령(output command)  $U(i)$ 는

$$U(i) = U_0 + K_c \cdot E(i) \quad (2)$$

여기서  $K_c$ : 제어기 게인

$K_c$ 는 전체 개방회로 이득  $K$ 의 부분이므로 안정성을 고려할 때 작아야 하고 정상상태에서  $E(i)$ 는  $K$ 와 반비례 하므로 원하는 토크를 얻기 곤란하다. 따라서 오차를 없애기 위해 출력명령  $U$ 와 토크오차  $W(i)$ 의 시간 적분치는 비례 해야한다.

$$W(i) = W(i-1) + T_s \cdot E(i) \quad (3)$$

여기서  $W(i) = U(i)/K_c$

이것을 시간적분 형태로 나타내면

$$U = K_c \int_0^t (T_r - T_c) dt = K_c \int_0^t E dt \quad (4)$$

로 된다.

실제로 CNC 공작기계의 축방향 속도와 이송명령 사이에는

$$V_f = K_n \cdot U \quad (5)$$

여기서  $K_n$ 은 CNC 서어보 시스템의 게인

절삭 이송속도  $f$ 는

$$f = \frac{60}{N} \cdot V_f = \frac{60}{N} K_n \cdot U \quad (6)$$

$N$ : 주축의 회전수(rpm)

CNC 서어보 시스템은 각 축방향으로 이차지연 시스템으로 볼 수 있고 입력  $U$ , 출력이  $f$ 인 경우에

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{df}{dt} + \omega_n^2 f = K_n U \quad (7)$$

로 나타낸다.

여기서  $\xi$ : CNC 서어보 루우프 다이내믹의 감쇠비

$\omega_n$ : CNC 서어보 루우프 다이내믹의 고유진

동수

$K_n$ : 서어보 루우프 게인

절삭토크  $T$ 는 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{1}{2} F \cdot D = K_s \cdot d^n \cdot f \cdot D \quad (8)$$

$K_s$ : 비절삭력

$l, m$ : 지수상수 ( $l, m < 1$ )

$K_s, l, m$ 은 절삭공구 및 재질에 따른 상수

절삭토크  $T$ 는 센서 및 ADC에 의해 디지털 변환 값  $T_c$ 로 된다.

$$T_c = K_s \cdot T \quad (9)$$

$K_s$ : 센서에 따른 변환상수

실제로 절삭깊이와 주축 회전속도는 절삭과정 중 변화하므로 절삭토크에 영향을 준다. 그러므로 일정한 토크를 변화시켜야 하며 이런 이송속도의 변화에 대

한 절삭토크 응답은 일차의 지연요소를 갖는 시스템이라 할 수 있다. 따라서 토크 변환값  $T_c$ 와 이송속도 사이에는 1차의 상미분 방정식으로 나타내고

$$\tau \frac{dT_c}{dt} + T_c = K_p \cdot f \quad (10)$$

$K_p$ : 절삭깊이, 주축회전수, 공구 및 공작물 재질에 따른 프로세스 게인  
 $\tau$ : 시간상수

로 된다.

토크  $T_c$ 는

$$T_c = K \int_0^t E \cdot dt \quad (11)$$

여기서,

$$K = 60 \cdot K_c \cdot K_n \cdot K_s \cdot K_r \cdot \frac{d^n}{N} \cdot f^{i-1} \cdot D = K_p \cdot K_c$$

$$K_p = 60 \cdot K_n \cdot K_s \cdot K_r \cdot \frac{d^n}{N} \cdot f^{i-1} \cdot D$$

이다.

### 2.3 가변게인 예측기 알고리즘

절삭과정 예측기는 개방회로 게인에 영향을 미치는 요소인 토크 즉  $K_p \cdot \frac{d^n}{N} \cdot f^{i-1} \cdot D$ 를 측정해야 하나 이는 실제로 또 다른 센서와 컴퓨터 출력 채널이 필요하며 전체 개방회로 게인  $K$ 를 유지하는 프로세스게인  $K_p$ 를 예측할 필요가 있다. 정상상태에서  $K_p = T_c/U$ 이며 또 일정한 개방회로 게인  $K$ 를 유지하기 위해서는  $K = K_p \cdot K_c$  이므로  $K_c$ 가 조절 되어져야 한다. 그런데 AC-unit의 일부인 예측기는 미니컴퓨터로 구성되고  $K_p = T_c/U$ 와 같은 나뉠셈을 하여야 하므로 실시간 적용이 곤란하게 된다. 실시간 적용을 하도록 하기 위해서는 어셈블러로 하는 것이 좋고 실제로 이런 계산은 하아드웨어적으로 되지않은 경우 매우 적용이 느리다. 또 측정 토크  $T_c$ 는 잡음(noise)을 갖고 있으므로 게인  $K_p$ 는 토크  $T_c$ 에 포함된 잡음의 영향을 받는다. 이와같은 단점을 극복하고 알고리즘의 나뉠셈과정을 없애며 실시간 적용을 위한 예측기 모델로 가변게인값  $K_m, K_c$ 를 도입하여 Fig. 3과 같이 예측기 모델링을 하였다.

예측기의 가변게인 값  $K_m$ 은 입력명령  $U$ 와의 곱으로 절삭토크  $T_c$ 로 되며 정상상태에서  $K_m = K_p$  및  $T_c = U \cdot K_p$ 로 되어 모델 예측오차  $E_m$ 은

$$E_m = T_c - T_s = T_c - U \cdot K_m = U(K_p - K_m) \quad (12)$$

가변게인  $K_m$ 은 자동적으로 오차를 줄이게 되도록 적응하며 이 과정을 적분형태로 나타내면

$$K_m = C_1 \int_0^t E_m \cdot dt = C_1 \int_0^t (T_c - U \cdot K_m) dt \quad (13)$$

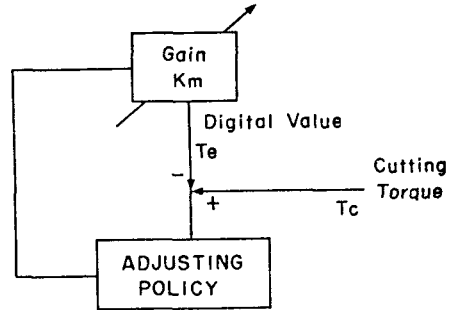


Fig. 3 Block diagram of process gain estimator

따라서 AC-unit의 예측기 알고리즘은 다음과 같다.

$$E_m(i+1) = T_c(i) - U(i) \cdot K_m(i) \quad (14)$$

$$K_m(i+1) = K_m(i) + C_1 \cdot E_m(i+1) \quad (15)$$

시스템 전체의 개방회로 게인은 모든 가공조건에서 일정 하여야 하고 정상상태에서

$$K = \bar{K}_c \cdot K_p = \bar{K}_c \cdot K_m = \frac{K_c \cdot K_m}{T_s} \quad (16)$$

결국 CNC 제어기 게인값  $K_c$ 는 다음과 같다.

$$K_c = C_2 \int_0^t (K - K_c \cdot K_m) dt \quad (17)$$

즉,

$$E_c(i+1) = T_s \cdot K - K_c(i) \cdot K_m(i) \quad (18)$$

$$K_c(i+1) = K_c(i) + C_2 \cdot E_c(i+1) \quad (19)$$

여기서  $K$ 는 전체 시스템 개방회로의 설계치로서 안전성과 성능에 직접 관계한다. 일반적으로  $K$ 가 크면 민감도가 커서 응답이 빠르나 overshoot가 생기기 쉬우므로 일정한 제한값을 요구하게 된다. 반면  $K$ 가 작으면 안전성은 높으나 응답이 느려진다.

### 2.4 적응제어 전략의 적용모델

컴퓨터 시뮬레이션 결과의 타당성을 검토하기 위하여 실제 CNC 공작기계의 황삭과정을 잘 나타낼 수 있는 가장 간단한 형태의 두 가지 절삭모델을 선택 하였다. 이때 엔드밀 작업의 절삭방법은 상향절삭(up-milling)을 한다.

(1) 계단형 모델(step geometry model)

Fig. 4(a)는 계단형 엔드밀 절삭을 나타내고 절삭깊이의 변화를 나타낸다. 절삭깊이는 최고 3mm로 하였고 실제 절삭 이송속도는 샘플링 값  $f(i)$ 와 같다.

(2) 테이퍼 모델(taper geometry model)

Fig. 4(b)는 테이퍼형 엔드밀 작업을 나타내고 이 때 절삭깊이가 선형적으로 변하고 최대 절삭깊이도 계단형 모델과 같은 값을 택한다. 두 형태의 절삭 이송속도  $f(i)$ 는 AC-unit의 컴퓨터에서 계산되고 AC-unit

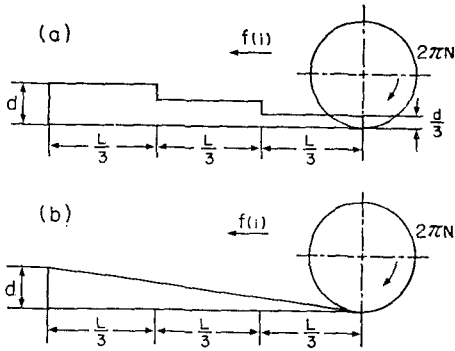


Fig. 4 (a) AC test in step variable depth profile milling  
 (b) AC test in taper profile milling  
 (Axial depth of cut  $\omega=32\text{mm}$ , Diameter of cutter  $\phi=16\text{mm}$ , Helix angle  $\lambda=30^\circ$ , up-milling)

는 on-line의 경우에 CNC-제어기 및 센서와 인터페이스 되어야 한다.

### 2.5 적응제어 시스템의 가공시간

가공물의 길이  $L$ 인 두 형태의 모델을 절삭할 때의 가공시간(machining time)은 다음과 같다. 가공시간을  $T_m$ 이라 하면

$$T_m = \sum_{i=1}^k \frac{L_i}{f(i) \cdot N} = \frac{L \times I}{N} \sum_{i=1}^k \frac{1}{f(i)} \quad (20)$$

여기서  $I$ : 가공물 등분 분할비

$N$ : 주축 회전속도(rpm)

$K$ : 샘플링 횟수

가공시간 계산은 AC-unit에 의한 컴퓨터 시뮬레이션으로 부터 가공변수  $f(i)$ 를 구하여  $T_m$ 을 계산할 수 있다. 또 금속제거율은 단위 시간당의 가공 체적량으로 표시되며 결국 가공시간을 줄이면 상대적으로 금속제거율이 증가된다.

## 3. 실험

### 3.1 실험절차

ACC 전략 알고리즘의 타당성을 검토하기 위해 수직 머시닝센터(VA-40, HITACHI SEIKI: 오른손좌표제 FANUC system, 6M-B model)에서 실험을 하였다. 절삭 토오르크의 측정은 식(8)의 상수를 얻는데 필요한 데이터를 얻기위한 실험을 하였으며 엔드밀(HSS:  $\phi 16$ , 잇수  $p=4$ )작업으로 SM45C 강을 상향절삭으로 하여 이송방향 절삭력을 AST-MH 밀링용 공구동력계로 측정

하였고 (8)식에 의하여 이를 토오르크로 변환하였다. 이때 엔드밀의 overhang을 152mm로 하였다. 토오르크는 증폭기(Amp.)와 Data-Corder를 거쳐 Linear corder에 기록하여 토오르크를 환산 하였다. 절삭조건으로 가공범위를 고려하여 central composite design에 의한 실험을 하였다. 실험조건으로

주축 회전속도:  $N=400\text{rpm}$

절삭날당 이송속도( $f$ ): 0.025, 0.05, 0.075, 0.1mm/rev

반경방향 절삭깊이( $d$ ): 1, 2, 3mm

축방향 절삭깊이( $\omega$ ): 32mm

을 택하였고 엔드밀 작업은 반경방향의 절삭깊이가 커터반경 보다 작은 범위( $D > 2d$ )에서 하였다. 또 A 전략을 통하여 얻은 가공변수를 샘플링하여 얻은 값을 수동으로 머시닝센터에서 입력하고 CNC-controller를 통한 절삭과정을 거쳐 절삭 토오르크를 측정하여 AC 전략 알고리즘의 타당성을 검토하는 실험을 하였다. 실험의 근거로 실제로 AC 시스템의 연구에 있어서 on-line 제어의 곤란성 때문에 센서의 역할로서 절삭 토오르크를 예측하는 식을 실험적으로 세우고 이를 센서의 감지 토오르크로 한다. 이 절삭 토오르크를 AC-unit에서 요구되는 절삭 토오르크와 비교하여 오차를 줄이는 적응제어 전략에 의하여 가공변수인 이송속도를 계산하고 이를 절삭 메이터로 하여 Manual Part Programming으로 수동 입력하여 절삭작업을 수행하여 실제의 on-line 적응제어 시스템과 같은 역할을 하게 하였다. 이때의 실험은 Fig. 2의 ① 부분에서 AC 시스템에서 얻은 가공변수를 머시닝센터에 테이프를 입력하고 ③ 부분에서 절삭 토오르크를 측정한다. ② 부분에서는 실제로 on-line 시스템에서 나타낼 수 있고 토오르크의 감지 작업은 절삭 토오르크식에서 예견할 수 있다.

## 4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 해석

CNC 시스템에 AC 시스템을 도입한 ACC-CNC 시스템은 6차의 비선형 방정식의 형태로 되고 따라서 이에 상당하는 불연속 방정식(discrete equation)의 알고리즘을 유도할 필요가 있다. 절삭과정 모델식(10)은 실제의 절삭과정을 나타내게 되며 controller의 절삭토오르크 및 계인 값은 적분법을 사용하여 예측할 수 있으나 식(8), (11), (15), (19)의 불연속 방정식으로 쉽게 계산된다. 해석결과 각 변수에 대한 AC 시스템의 거동은 두가지 모델의 경우에 대하여 Fig. 5~Fig. 14로 나타내었다.

이때 실험데이터를 Multiple Regression 방법으로 curve fitting 하여 상수  $K_c=118$ ,  $l=0.4236$ ,  $m=0.3999$  를 각각 얻었고 이를 컴퓨터 시뮬레이션 데이터로 사용하였다.

Fig. 5의 계단형 가공의 경우 제어기 게인  $K_c$  및 서보 게인  $K_n$ 에 따라 AC-unit에서 요구 절삭토크  $T_c$ 에 적응하여 가는 거동상태를 나타내고 있다.  $K_c$  이외의 게인값이 일정한 경우  $K_c$ 가 클수록 응답이 빠르고 또  $K_c$ 가 같을 경우  $K_n$ 이 클수록 적응이 빠르게 되며 반면 시스템은 불안정 하게 된다. 또 시스템이 안정하다가도 절삭깊이가 증가됨에 따라 불안정 하여졌으며 이는 Fig. 5에 잘 나타나 있다. 따라서 AC-unit에서 적응 가능한 제한값을 취해야하고 이를 고려하여 시스템을 설계할 필요가 있다. 이송속도 보다는 엔드밀 반경방향 절삭깊이에 대하여 시스템의 안정성이 민

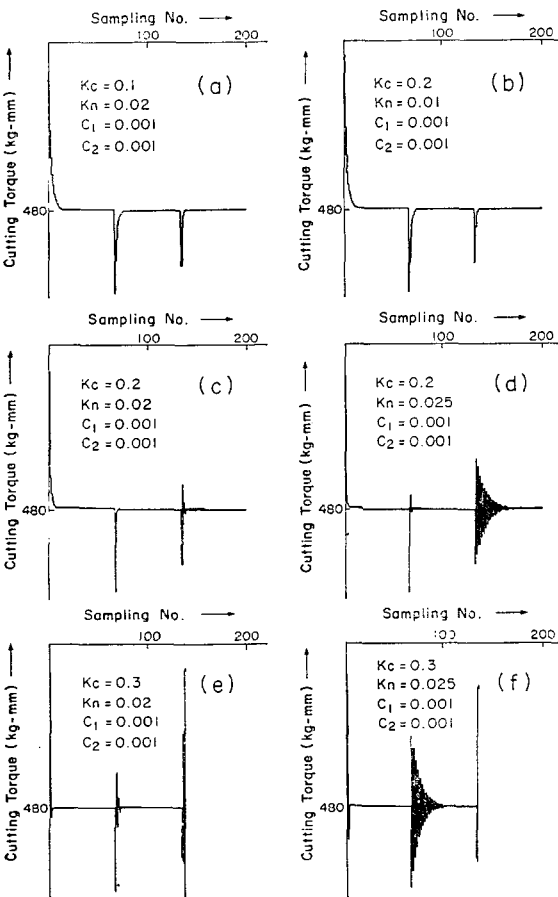


Fig. 5 Simulated cutting torque versus sampling No. in step change type

감한 반응을 보였다. 이는 Fig. 5(c)에 잘 나타나 있다. 이때 상수  $C_1, C_2$ 의 값은 0.001로 하였고 이 값은 절삭토크의 민감도에는 영향을 미치지 못하고 단지 가변계인 값  $K_c, K_n$ 의 민감도에만 관계한다.

Fig. 6은 테이퍼 형상 가공의 경우이며 게인 값  $K_c, K_n$ 에 따른 절삭토크의 거동을 나타내고 있다. 계단형모델의 경우처럼  $K_c, K_n$ 이 클수록 요구토크로 적응이 빨랐고 그 모양은 조금 달랐다. 마찬가지로 게인 값이 클수록 적응이 빨라 일정한 요구토크를 유지하나 절삭깊이가 커질수록 시스템은 불안정 하여졌다. 이는 Fig. 6에 잘 나타나 있다. 또 가변계인 개념을 도입한 경우 게인값  $K_n(i), K_c(i)$ 에 따라 시스템은 어느 정도 안정하여질 수 있으나 AC-unit에서 계산할 때 overflow가 생기지 않는 경우에 가능하다.

가변계인  $K_n(i)$ 의 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 Fig. 7, Fig. 8과 같고 이들 값은  $E(i)$ 의 값에 직접 관련된다. Fig. 9, Fig. 10은  $K_c(i)$ 의 변화를 나타내고 각각의 그림에서  $C_1, C_2$ 의 값이 가변 계인값의 민감도에 관련됨을 알 수 있다. 외부의 외란이 있을 경우 즉 고정도의 잡음(high-level noise)일 때는 예측기 게인  $C_1$ 을 작게하여 잡음을 줄이는 smoothing 효과를 얻는다.

그러나 이 경우는  $K_n, K_c$ 의 값이 정상상태에 늦게

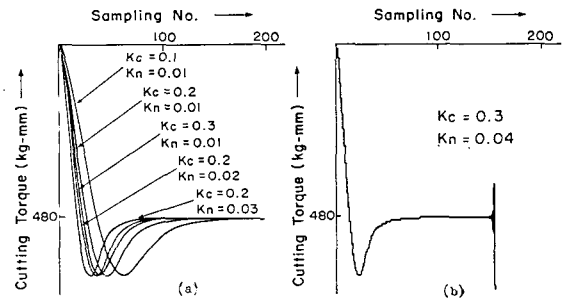


Fig. 6 Simulated cutting torque versus sampling No. in taper type

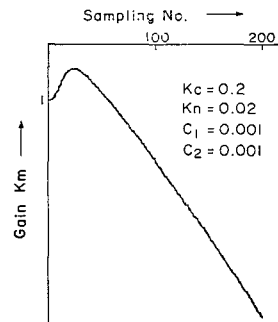


Fig. 7 Simulated variable gain  $K_n$  versus sampling No. for taper type

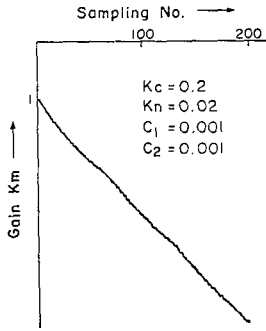


Fig. 8 Simulated variable gain  $K_n$  versus sampling No. for step change type

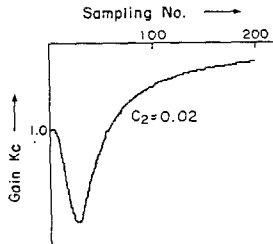


Fig. 9 Simulated variable gain  $K_c$  versus sampling No. for taper type

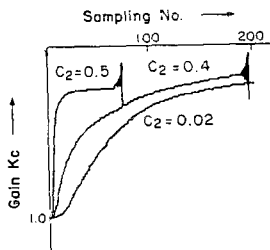


Fig. 10 Simulated variable gain  $K_c$  versus sampling No. for step change type

도달하는 단점이 있다. 반대의 경우는 정상상태에 빨리 도달하나 시스템이 불안정하여 지기 쉽다.

Fig. 11, 및 Fig. 12는 AC 시스템에서 요구하는 절삭토크  $T_s$ 에 적응하여가는 경우 가공변수 즉 이송속도의 거동 상태를 샘플링수에 따라 나타내고 있다. 이때 계단형과 테이퍼형의 경우 개인값으로서  $K_c=0.2$ ,  $K_n=0.02$ ,  $C_1=C_2=0.001$ 로 하였을 때의 변수의 변화를 나타내고 각각 Fig. 4의 (a), (b)에 대응한다.

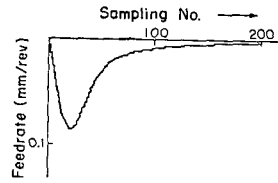


Fig. 11 Simulated feedrate versus sampling No. for taper type ( $K_c=0.2$ ,  $K_n=0.02$ )

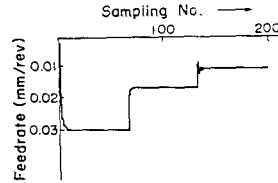


Fig. 12 Simulated feedrate versus sampling No. for step change type ( $K_c=0.2$ ,  $K_n=0.02$ )

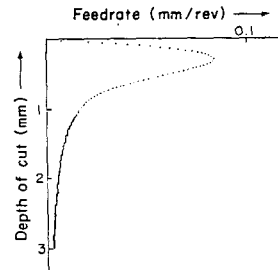


Fig. 13 Simulated feedrate versus depth of cut for taper type with AC ( $K_c=0.2$ ,  $K_n=0.025$ )

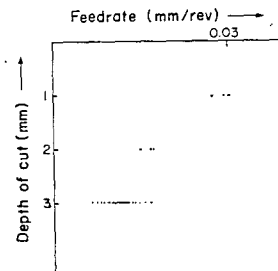


Fig. 14 Simulated feedrate versus depth of cut for step change type with AC ( $K_c=0.2$ ,  $K_n=0.025$ )

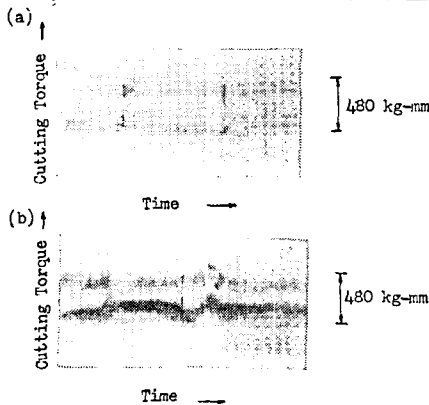
Fig. 13, Fig. 14는 테이퍼 및 계단형 모델의 적응제어시 이송속도와 절삭깊이와의 관계를  $f-d$  평면상에 나타낸 것으로 적응정도에 따라 가공시간 및 금속제거율이 달라지며 가공시간은  $\sum_{i=1}^k \frac{1}{f(i)}$ 에 비례한다. 테이퍼가공의 경우는 AC 시스템의 가공변수 변화가 비교적 연속적이거나 계단형의 가공에서는 3단계의 깊이 변화시 이송속도가 양 방향으로 진동하다가 한 점으로 접근한다. 두 형태의 경우 가공물 길이  $L=40$ , 샘플링

**Table 1** Comparison of machining time and metal removal rate of AC system with those of non-AC system

Geometry Type	Time with AC(min)	Time without AC(min)	Gain(%)
Step	3.117	11.797	73.56
Taper	3.132	15.914	80.32

Geometry Type	M.R.R. with AC(mm <sup>3</sup> /min)	M.R.R. without AC(mm <sup>3</sup> /min)	Gain(%)
Step	821.3	217.0	278.5
Taper	613.0	120.65	408.1



**Fig. 15** (a) Experimental cutting torque versus time for taper type milling  
(b) Experimental cutting torque versus time for step change type milling

수를 200으로 할 때 요구하는 토크를 유지 하면서 가공 할 때의 컴퓨터 시뮬레이션 결과 가공시간 및 금속제거율은 Table 1과 같다. 계산결과 본 논문에서 제시한 ACC-CNC 시스템은 보통의 시스템 보다 금속제거율이 증가되어 생산성을 향상 시킬 수 있다.

Fig. 15(a), (b)는 두 모델의 절삭 토크의 변화를 나타내며 이 결과는  $K_c=0.2$ ,  $K_n=0.02$ ,  $C_1=C_2=0.001$ 인 경우의 결과인 Fig. 11, Fig. 12의 가공조건을 샘플링하여 머시닝센터에 가공변수인 이송속도를 입력하여 얻은 토크 시그널의 출력으로 이론적인 해석결과와 경우와 즉 계단형모델의 경우 Fig. 5(c), 테이퍼 모델의 경우는 Fig. 6(a)와 요구절삭토크에 적용하여 가는 거동이 잘 일치하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 CNC 공작기계에 AC 시스템을 도입

한 ACC-CNC 시스템의 on-line 전략을 엔드밀링으로 제안하였으며 그 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 절삭 토크를 유지하기 위한 ACC 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션 결과 각 변수 및 계인 값으로 절응제어 시스템의 특성을 알 수 있으며 이런 특성은 모든 가공 조건에서 적용 가능하다.

(2) 엔드밀(HSS : 016, p=4)로 SM45C 강을 가공할 때 절삭 토크와 가공변수 사이에는 로그-선형적인 관계가 있으며 특히 절삭 깊이에 대하여 ACC-CNC 시스템의 안정성이 민감한 반응을 보인다.

(3) ACC-CNC 시스템은 일정한 절삭 토크를 유지 하면서 금속제거율(metal removal rate)을 증가시킬 수 있으며 두 모델의 경우 약 2.7배 및 4배의 향상을 보였고 가공시간( $T_n$ )을 줄일 수 있어 CNC 공작기계에 엔드밀로 황삭가공시 생산성 향상에 큰 역할을 한다.

(4) ACC-CNC 시스템은 시뮬레이션 결과와 실험적인 결과가 잘 일치하였으며 공작기계의 제어기 설계 및 on-line 적응제어에 적용할 수 있고 이를 위한 신뢰성이 높은 센서(sensor)의 개발이 필요하다.

## 참 고 문 헌

- (1) Bedini, R., et al., "Experiments on Adaptive Control of a Milling Machine," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 98, No. 1, pp.239~245, 1976
- (2) Bedini, R., et al., "Experiments on Adaptive Control of a CNC Lathe," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, No. 1, pp.139~149, 1982
- (3) Bedini, R. and Pinotti, P.C., "A Hardwired Logic for the Adaptive Control of a Milling Machine," Int., J. of M.T.D.R., Vol. 16, pp.193~207, 1976
- (4) Bedini, R., et al., "Adaptive Control in Drilling, Int., J. of M.T.D.R., Vol. 17, pp.91~102, 1977
- (5) Miler, D.A., "Adaptive Control of Feedrate in the Milling Process," Int., J. of M.T.D.R., Vol. 14, pp.187~197, 1974
- (6) Tlustý, J. and Elbestawi, M., "Constraints in Adaptive Control with Flexible End Mills," Annals of the CIRP, Vol. 28, No. 1, pp.253~255, 1979
- (7) Koren, Y. and Masory, O., "Adaptive Control with Process Estimation," Annals of the CIRP,



- Vol. 30, No. 1, pp.373~376, 1981
- (8) Masory, O. and Koren, Y., "Adaptive Control System for Turning," Annals of the CIRP, Vol. 29, No. 1, 1980
- (9) Galip, U.A., Koren, Y., et al., "Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools," ASME Journal of Dynamic System and Measurement, and Control, Vol. 105, pp.107~112, 1983
- (10) Sata, T., et al., "Improvement of Working Accuracy of a Numerically Controlled Machine Tool by Computer Control Compensation(1st Report)," J. of JSPE, Vol. 45, No. 11, pp.1286~1290, 1979
- (11) Kannatey-Asibu, E.J. and Dornfeld, D.A., "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 103, pp.330~340, Aug., 1981
- (12) Filippi, A.D., "Adaptive Control in Turning, Cutting Forces and Tool Wear Relationships for p.10, p.20, p.30 Carbides," Annals of the CIRP, Vol. 7, pp.377~385, 1969
- (13) Center, R.M. & Idelson, J.M., "Adaptive Controller for a Metal Cutting Process, IEEE Trans, on Application & Industry Vol. 83, No. 72, pp. 154~161, 1964
- (14) Koren, Y., Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw-Hill, New York, 1983
- (15) Pressman, R.S. and Williams, J.E., Numerical Control and Computer Aided Manufacturing, Wiley, New York, 1977