

## 머시닝센터에서 드릴링 토크 제어기의 설계

오영탁\*(서울대 정밀기계설계공동연구소), 권원태(서울시립대 기계정보공학과),  
주종남(서울대, 기계항공공학부)

### Design of a Drilling Torque Controller in a Machining Center

Y. T. Oh (Inst. of Advan. Mach. & Design, SNU), W. T. Kwon (Mechanical & Inf. Eng. Dept., UOS),  
C. N. Chu (School of Mech. & Aero. Eng., SNU)

#### ABSTRACT

As the machining depth increases, the drilling torque increases and fluctuates and the risk of drill failure also increases. Hence, drilling torque control is very important to prevent the drill from failure. In this study, a PID controller was designed to control the drilling torque in a machining center. The plant including the feed drive system, cutting process, and spindle system was modeled for controller design. The Ziegler-Nichols rule was used to determine the controller gain and control action times. The root locus plot was used to tune the controller gain for a certain cutting condition. Also, suggested was a simple method to obtain the tuned controller gain for an arbitrary cutting condition not using the Ziegler-Nichols rule and root locus plot. The cutting torque control performance of the designed controller and the effect of gain tuning on the control performance were examined.

**Key Words :** Drilling torque control (드릴링 토크 제어), gain tuning (이득동조), PID controller (비례-적분-미분 제어기), Plant modeling (플랜트 모델링)

#### 1. 서론

드릴링은 머시닝 센터에서 가장 빈번히 행해지는 절삭 공정중의 하나이다. 드릴 공정중 가공 깊이가 증가하면 칩배출이 원활히 이루어지지 못하여 절삭 토크와 절삭 온도가 상승하며 공구 파손의 위험이 높아진다. 따라서 공구 파손의 방지를 위해서는 공구에 작용하는 과부하를 실시간으로 검출하고 제어할 수 있는 시스템이 필요하다.

공구 과부하 방지를 위한 절삭 공정 제어는 많은 연구자들에 의해 꾸준히 시도되었다. Koren 등<sup>(1)</sup>과 Tomuzuka 등<sup>(2)</sup>은 선반에서의 절삭력 제어를 위한 적응 제어 알고리즘을 개발하였다. Huang 등<sup>(3)</sup>은 엔드밀링 공정에서 피치 제어를 이용하여 절삭력을 제어하였다. Furness 등<sup>(4)</sup>은 비례-적분 제어 알고리즘 및 극베치 기법을 적용하여 형상 드릴링(form tool drilling)에서의 절삭 토크를 제어하였다. 그러나 제어되는 절삭 토크는 기준 절삭 토크와 편차를 보

였다. 김기대 등<sup>(5)</sup>은 밀링 공정에서 주축 모터 전류를 이용하여 절삭력을 간접 측정하고 비례 제어 알고리즘을 이용하여 절삭력을 추종 제어하였다.

본 연구에서는 표준 트위스트 고속도강 드릴로 깊이가 직경의 3 배 이상인 구멍 가공 시 주축 모터 전류를 이용하여 절삭 토크를 간접 추종하고 추정된 절삭 토크의 제어를 위한 PID 제어기를 설계하였다. 머시닝 센터에서 행해지는 드릴 공정을 제어 대상 플랜트로 모델링하고 플랜트의 전달 함수를 결정하였다. Ziegler-Nichols 규칙을 적용하여 제어기의 이득 및 제어 동작 시간을 결정하였으며 제어기 성능 향상을 위해 근궤적 선도를 이용하여 제어기 이득을 동조(tuning)하였다. 특정 절삭 조건에 대한 제어기의 동조 이득이 결정된 이후 임의의 절삭 조건에 대해 Ziegler-Nichols 규칙과 근궤적 선도를 사용하지 않고 간단히 제어기 동조 이득을 결정하는 방법을 제시함으로써 설계된 절삭 토크 제어기의 실용성을 향상시켰다. 절삭 실험을 통해 설계된

제어기의 절삭 토크 제어 성능을 검증하였다.

## 2. 플랜트 모델링

이송 속도를 조절하여 절삭 토크를 제어할 수 있는 제어기의 설계를 위해 이송을 입력으로 하고 주축 전류를 출력으로 하는 제어 대상 플랜트를 구성하였다. 플랜트는 이송계와 절삭계, 그리고 주축 계로 구성된다.

### 2.1 z 축 이송계 모델링

공작 기계에 입력된 이송 지령은 가감속 회로와 서보 시스템을 거쳐 실제 공작 기계 이송으로 구현되므로 이송계를 식 (1)과 같이 2 차 시스템으로 모델링 할 수 있다

$$G_f(s) = \frac{1}{(\tau_a s + 1)(\tau_s s + 1)} \quad (1)$$

가감속 회로 시정수  $\tau_a$  와 서보 시스템 시정수  $\tau_s$  는 공작 기계 컨트롤러 파라미터에 저장되어 있으며 그 값은 각각 0.01 sec 와 0.033 sec 였다. 이송 계 모델의 타당성 검증을 위해 이송 실험을 수행하였으며 그 결과를 이송계 모델을 통해 시뮬레이션 한 결과와 비교하였다. 비교 결과를 Fig 1 에 나타내었다. 시뮬레이션 된 이송 속도는 실제 측정된 이송 속도에 대하여 11%의 과도 상태 오차와 0.3%의 정상 상태 오차를 보였다

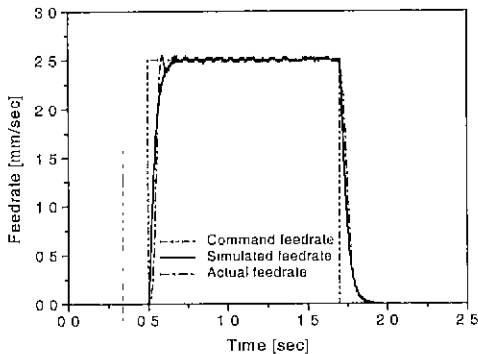


Fig 1 Simulated and measured feedrate (command feedrate = 2.5 mm/sec)

### 2.2 절삭계 모델링

이송에 대한 절삭 토크의 정상 상태 응답이 나타나기까지는 드릴의 회전에 의한 시간이 필요하다 또한 이송에 대한 마찰 저항과 절삭 저항 등으로 인해 절삭 토크 응답은 이송 입력에 대해 시간 지

연을 가진다 따라서 절삭계를 식 (2)와 같이 2 차 시스템으로 모델링 할 수 있다.

$$G_c(s) = \frac{K_c}{(\tau_p s + 1)(\tau_i + 1)} \quad (2)$$

절삭계의 시정수들은 절삭 실험을 통해 결정될 수 있다 절삭 실험 데이터로부터 최소 자승법을 통해 결정된  $\tau_p$  와  $\tau_i$  는 각각 0.03 sec 와 0.1 sec 였다.  $K_c$  는 절삭계 이득이며 회전 당 이송에 대한 평균 절삭 토크의 비로써 정의된다. 이 값은 드릴의 직경이나 공작물의 종류에 따라 달라진다. 직경 10 mm 드릴로 SM45C 를 절삭할 경우  $K_c$  는 45 9647 로 얻어졌다. 이송계와 절삭계 모델을 결합하여 지령 이송에 대한 절삭 토크 응답을 시뮬레이션 하였다. Figure 2 는 직경 10 mm 드릴로 600 rpm 의 주축 회전수에서 SM45C 를 절삭하면서 이송 속도를 50, 70, 100, 그리고 120 mm/min 로 변화시켰을 경우 공구 동력계를 통해 측정된 절삭 토크와 시뮬레이션 한 절삭 토크를 비교한 것이다

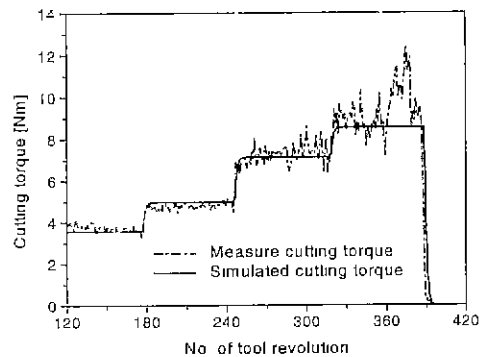


Fig. 2 Variations of simulated and measured cutting torque according to the feedrate change (50→70→100→120 mm/min)

절삭 깊이가 깊어질 경우 실제 절삭 토크는 시뮬레이션 된 절삭 토크보다 큰 값을 가지며 그 값의 변화가 심하다. 이는 가공 깊이 증가에 따라 칩 배출이 원활히 이루어지지 못함에 기인한다. 시뮬레이션을 통해 인어진 절삭 토크는 실제 절삭 토크에 대해 평균 6%의 과도 상태 오차와 68%의 정상 상태 오차를 보였다.

### 2.3 주축계 모델링

3 상 교류 유도 모터의 전류는 식 (3)과 같이 모터 토크에 근사적으로 비례하며<sup>(6)</sup> 절삭 토크는 전체 모터 토크에서 무부하 운전 토크를 빼줌으로써

얻을 수 있으므로 절삭 토크와 주축 전류 사이의 관계는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$T_m \approx K_f I, \quad (3)$$

$$T_c = T_m - T_{\text{idle}} = K_f (I - I_{\text{idle}}) \quad (4)$$

그런데 드릴에 작용하는 절삭 토크는 주축과 기어를 거쳐 모터에 전달되므로 절삭 토크에 대한 주축 전류의 정상 상태 응답이 나타나기까지는 시간이 소요된다. 본 연구에서는 주축계를 식 (5)와 같이 1차 시스템으로 모델링 하였다

$$G_i(s) = \frac{K_f}{\tau_d s + 1} \quad (5)$$

주축계 시정수  $\tau_d$  는 절삭 실험을 통해 측정된 절삭 토크와 주축 전류로부터 결정되었으며 그 값은 0.029 sec 였다.  $K_f$  는 주축계 이득으로서 절삭에 의한 주축 전류량의 평균을 절삭 토크의 평균으로 나누어 줌으로써 결정된다. 그러나 이 값은 주축 회전수에 따라 달라진다 주축계 모델의 검증을 위해 절삭 중 측정된 주축 전류로부터 절삭 토크를 추정하고 이를 공구 동력계로부터 측정된 절삭 토크와 비교하였으며 그 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 직경 10 mm 드릴로 600 rpm 의 주축 회전수에서 SM45C 를 가공하였다.  $K_f$  는 0.586 이다. 절삭 깊이는 30 mm 였으며 이송 속도는 100 mm/min 였다

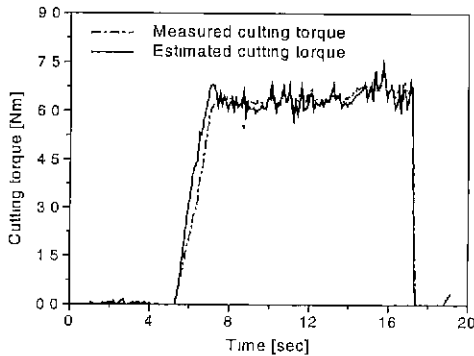


Fig. 3 Comparison of the measured and estimated cutting torque from the spindle motor current measurement

드릴이 절삭을 시작하는 경우 주축 모터의 회전 속도를 일정하게 유지하기 위해 주축 모터로 피다한 전류가 공급되므로 주축 전류로부터 추정된 절삭 토크는 실제 절삭 토크보다 다소 크다. 그러나 드릴이 공작물에 완전히 진입한 이후 추정된 절삭

토크는 실제 절삭 토크에 대해 평균 2.3%의 오차를 가진다.

## 2.4 플랜트 전달 함수

이송계와 절삭계, 그리고 주축계 모델을 결합하면 식 (6)과 같은 플랜트 전달 함수를 얻을 수 있다 식 (6)의 분모의 계수들은 절삭 조건에 무관한 상수이다. 분자의 절삭계 이득과 주축계 이득은 드릴 직경이나 공작물, 그리고 주축 회전수 등의 절삭 조건에 따라 달라진다.

$$G_{plant}(s) = \frac{K_c K_f}{(\tau_u s + 1)(\tau_s s + 1)(\tau_{fc} s + 1)(\tau_s s + 1)(\tau_d s + 1)} \quad (6)$$

## 3. 제어기의 설계

### 3.1 제어기 이득과 제어 동작 시간의 결정

고정 이득 제어기의 전달 함수는 식 (7)과 같이 표현되며 그 계수에 따라 비례, 비례-적분, 그리고 비례-적분-미분 제어기 등으로 구분된다

$$G_{ctrl}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (7)$$

제어기 이득과 제어 동작 시간의 결정을 위해 Ziegler-Nichols 규칙을 이용하였다. 제어기를 이득이  $K$  인 비례 제어기로 가정하면 플랜트와 제어기를 포함하는 폐루프 시스템의 전달 함수는 식 (8)과 같으며 특성 방정식(characteristic equation)  $D(s)$  는 식 (9)와 같이 얻어진다.

$$G_{cl}(s) = \frac{KK_c K_f}{(\tau_u s + 1)(\tau_s s + 1)(\tau_{fc} s + 1)(\tau_s s + 1)(\tau_d s + 1) + KK_c K_f} \quad (8)$$

$$D(s) = a_0 s^5 + a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + a_5 \quad (9)$$

$$a_0 = \tau_u \tau_s \tau_{fc} \tau_s \tau_d$$

$$a_1 = \tau_u \tau_s \tau_{fc} \tau_s + \tau_s \tau_{fc} \tau_s \tau_d + \tau_{fc} \tau_s \tau_d \tau_u + \tau_s \tau_d \tau_u \tau_s + \tau_u \tau_d \tau_s \tau_{fc}$$

$$a_2 = \tau_u \tau_s \tau_{fc} + \tau_u \tau_s \tau_s + \tau_u \tau_s \tau_d + \tau_u \tau_{fc} \tau_s + \tau_u \tau_{fc} \tau_d + \tau_u \tau_s \tau_d + \tau_s \tau_{fc} \tau_s + \tau_s \tau_{fc} \tau_d + \tau_s \tau_s \tau_d + \tau_{fc} \tau_s \tau_d$$

$$a_3 = \tau_u \tau_s + \tau_u \tau_{fc} + \tau_u \tau_d + \tau_s \tau_{fc} + \tau_s \tau_s + \tau_s \tau_d + \tau_{fc} \tau_s + \tau_{fc} \tau_d + \tau_s \tau_d$$

$$a_4 = \tau_u + \tau_s + \tau_{fc} + \tau_s + \tau_d$$

$$a_5 = 1 + KK_c K_f$$

식 (9)의 계수들 중  $a_5$  를 제외한 계수들은 상수이다 특성 방정식의 계수들을 이용하여 Routh 배열을 구성할 수 있으며 안정성 조건(stability criterion)으로부터  $K_c$  이 결정되며 시스템 응답의

진동 주기가 결정된다<sup>7)</sup>

임계 이득과 응답의 진동 주기로부터 Ziegler-Nichols 규칙을 적용하여 제어기의 이득 및 제어 동작 시간을 결정한다. 600 rpm의 주축 회전수에서 직경 10 mm 드릴로 SM45C를 절삭할 경우 제어기 종류별 비례 이득 및 제어 동작 시간은 table 1과 같다. 플랜트 이득은 26.9353이다.

Table 1 Controller gain and control action times

Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	0.081	$\infty$	0
PI	0.073	0.238	0
PID	0.097	0.143	0.036

플랜트와 각각의 제어기를 포함하는 페루프 시스템의 단위 계단 응답 시뮬레이션을 통해 PID 제어기의 제어 응답 특성이 가장 우수함을 확인하였으며 드릴링 토크 제어기로 PID 제어기를 선정하였다.

### 3.2 제어기 이득의 동조

Figure 4(a)는 플랜트와 PID 제어기를 포함하는 페루프 시스템의 근궤적 선도이다. 시스템의 주극점(dominant pole)은 감쇠비가 약 0.35인 곳에 위치한다. 이는 시스템의 과도 응답에 오버슈트 및 진동이 나타날 수 있음을 의미한다. 드릴링은 구멍 가공 깊이가 깊어질수록 절삭 공정이 불안정해진다. 따라서 제어 응답의 오버슈트 및 진동은 절삭 공정의 불안정성을 증폭시킬 수 있다. 따라서 제어기의 이득을 동조하여 시스템의 감쇠비가 증가되는 위치로 주극점을 이동시켰다. 근궤적 선도 상에서 시스템의 감쇠비가 0.9가 되도록 주극점을 이동하였으며 이때 동조된 비례 이득은 0.029였다. 제어기 이득 동조 후의 페루프 시스템의 근궤적 선도를 Fig 4(b)에 나타내었다.

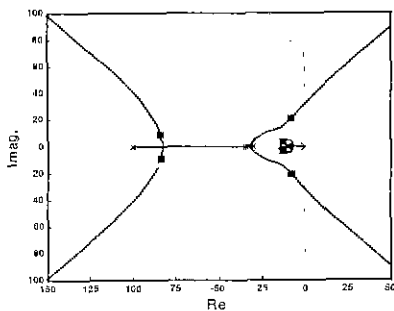


Fig. 4(a) Root locus plot of the closed loop system when the PID controller is not tuned

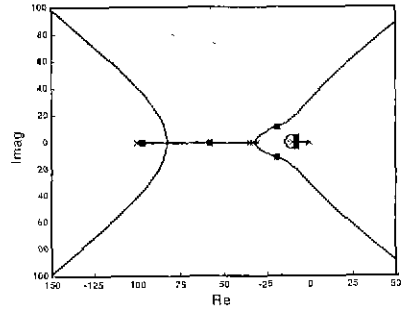


Fig. 4(b) Root locus plot of the closed loop system when the PID controller is tuned

### 3.3 동조 이득 결정 과정의 단순화

절삭 조건이 바뀔 때마다 위의 과정을 반복하여 제어기 동조 이득을 결정하는 것은 실용성 측면에서 매우 불리하다. 따라서 본 절에서는 제어기의 동조 이득을 간단히 결정하는 방법에 대해 기술한다. 페루프 시스템 특성 방정식 계수들 중 절삭 조건에 의한 변수인  $a_5$ 를  $\lambda$ 라 가정하면 Routh 배열로부터 임계 이득을 결정하는 식은 다음과 같은 상계수 이차 방정식의 형태가 된다.

$$m_1 x^2 + m_2 x + m_3 = 0 \quad (10)$$

$$m_1 = -a_0^2 a_1$$

$$m_2 = a_0 a_1 a_2 a_3 + 2 a_0 a_1^2 a_4 + 2 a_0^2 a_3^2 - a_1^2 a_2^2$$

$$m_3 = a_1^2 a_2 a_3 a_4 - a_0 a_1 a_3^2 a_4 - a_1^3 a_4^2$$

따라서 식 (10)을 만족하는  $x$ 는 상수이다. 그런데  $x = 1 + K_p, K_r K_i = K_{cr} K_{plant}$ 이므로 임계 이득과 플랜트 이득의 곱은 항상 일정하다. 따라서 제어기의 비례 이득과 플랜트 이득의 곱은 항상 일정하게 되며 결국 제어기 동조 이득  $K_p$ 와 플랜트 이득의 곱은 항상 일정하다. 앞 절에서 플랜트 이득이 26.9353인 경우 제어기 동조 이득은 0.029이므로 두 이득의 곱은 0.78112이다. 따라서 제어기 동조 이득과 플랜트 이득 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$K_p = 0.78112 / K_{plant} \quad (11)$$

따라서 절삭 조건이 변할 경우 플랜트 이득만 결정되면 Ziegler-Nichols 규칙이나 근궤적 선도를 사용하지 않고 제어기의 동조 이득을 간단히 결정할 수 있다.

## 4. 절삭 토크 제어기의 성능 검증

설계된 PID 제어기의 성능 및 이득 동조 효과의 검증을 위한 실험을 수행하였다. 직경 10 mm의 드릴로 SM45C 공작물에 깊이 40 mm의 구멍을 가공하였다. 주축 회전수는 600 rpm, 이송 속도는 120 mm/min 였다. Figure 5는 구멍을 한번에 가공한 경우의 절삭 토크와 주축 모터 전류이다. 가공 깊이가 직경의 3 배 이상인 지점부터 절삭 토크가 급격하게 증가하며 이에 따라 주축 모터 전류도 증가하고 있음을 볼 수 있다.

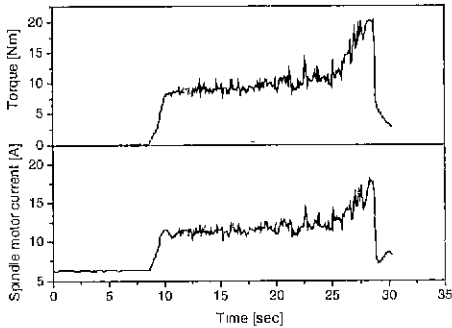


Fig 5 Cutting torque and the spindle motor current variations during drilling a hole

Figure 6(a)와 (b)는 이득을 동조하지 않은 제어기로 절삭 토크를 제어한 경우의 절삭 토크와 주축 모터 전류, 그리고 이송 속도의 변화이다. 제어 기준이 되는 주축 모터 전류는 11 ampere 이며 이에 해당하는 절삭 토크는 9 Nm 이다 제어되는 절삭 토크의 평균은 기준 절삭 토크를 추종하고 있지만 제어 응답에 매우 큰 진동이 나타나고 있다 이는 페루프 시스템의 주극점이 감쇠가 매우 작은 곳에 위치하고 있기 때문이다. 그러나 제어 응답이 발산하지는 않았다.

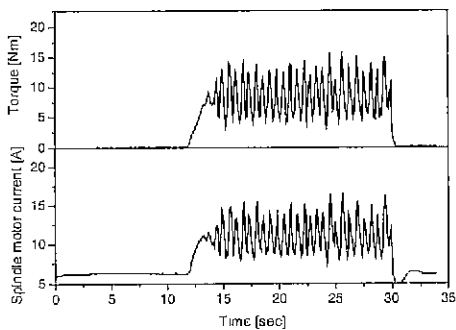


Fig. 6(a) Controlled patterns of the cutting torque and spindle motor current before gain tuning

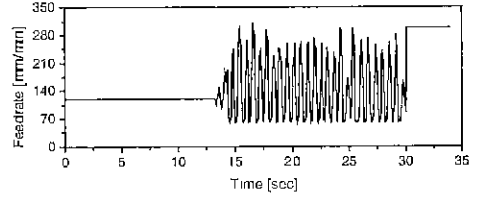


Fig. 6(b) Feedrate variation before gain tuning

Figure 6(c)와 (d)는 이득을 동조한 제어기로 절삭 토크를 제어한 경우이다. 제어되는 절삭 토크는 기준 절삭 토크를 충실히 추종하고 있으며 제어 응답의 진동 성분 또한 이득 동조 전의 경우에 비하여 매우 감소하였음을 볼 수 있다 이는 시스템의 감쇠비가 증대되는 위치로 주극점이 이동되었기 때문이다. 제어 응답에 나타나는 미소한 진동 성분은 철의 영향으로 드릴 공정의 특성상 완전히 제거될 수는 없다.

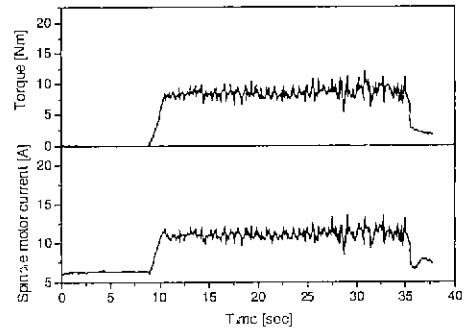


Fig. 6(c) Controlled patterns of the cutting torque and spindle motor current after gain tuning

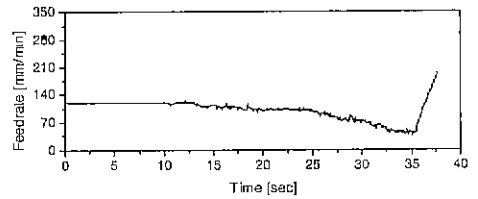


Fig. 6(d) Feedrate variation after gain tuning

직경 13 mm 드릴로 500 rpm의 주축 회전수에서 SM45C 공작물에 깊이 78 mm의 구멍을 가공하였다. 이 경우 플랜트 이득은 39.677 이었으며 식 (11)에 의해 결정된 동조 이득은 0.02 였다. Figure 7(a)는 구멍을 한번에 가공한 경우 절삭 토크와 주축 모터 전류의 변화를 보여주고 있다. 가공 깊이가 증가함에 따라 절삭 토크의 레벨 및 진폭이 증가함을 확

인할 수 있다. 그러나 절삭 토크를 제어할 경우 제어되는 절삭 토크는 기준 절삭 토크를 잘 추종하고 있으며 이송 속도는 절삭 토크의 상승을 억제하기 위해 가공 깊이가 깊어질수록 점진적으로 감소하고 있음을 볼 수 있다.

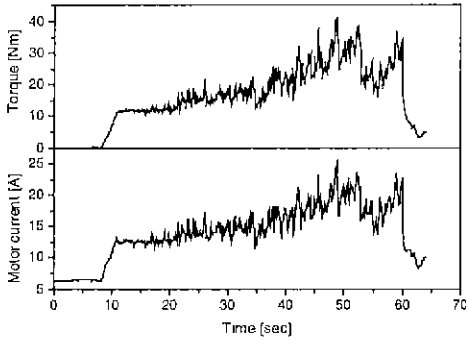


Fig. 7(a) Cutting torque and spindle motor current variations in standard drilling (13 mm diameter drill)

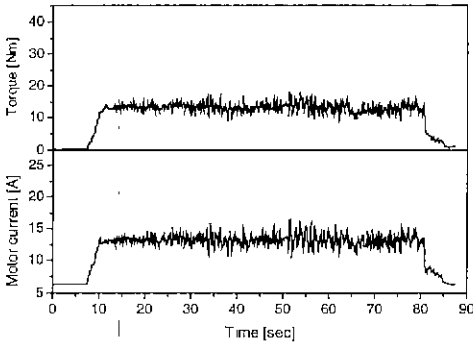


Fig. 7(b) Controlled cutting torque and spindle motor current (13 mm diameter drill)

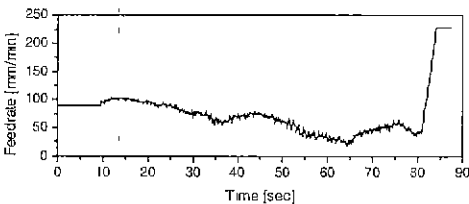


Fig. 7(c) Controlled feedrate (13 mm diameter drill)

#### 4. 결론

가공 깊이가 증가에 따른 드릴링 토크의 상승을

억제하기 위한 제어를 설계하였다. 제어기의 설계를 위해 머시닝 센터에서 행해지는 드릴 공정을 제어 대상 플랜트로 모델링 하였으며 그 전달 함수를 결정하였다. Ziegler-Nichols 제 2 규칙을 이용하여 드릴링 토크 제어를 위한 PID 제어기를 설계하였고 제어기 성능 향상을 위해 근궤적 선도를 이용하여 제어기 이득을 동조하였다. 절삭 조건이 바뀔 경우 제어기 동조 이득을 간단히 결정할 수 있는 방법을 제시함으로써 제어기의 실용성을 확보하였으며 실험을 통해 제시된 방법의 타당성을 검증하였다. 설계된 PID 제어기는 이송 속도의 조절을 통해 주축 모터 전류로부터 추정된 절삭 토크를 제어하였으며 제어되는 절삭 토크는 기준 절삭 토크를 잘 추종하였다.

#### 참고문헌

1. Y. Koren, O. Masory, "Adaptive Control with Process Estimation," *Annals of the CIRP*, Vol. 30, pp 373 - 376, 1981.
2. M. Tomizuka, S. Zhang, "Modeling and Conventional/Adaptive PI Control of a Lathe Cutting Process," *ASME J of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 110, pp. 351-354, 1988.
3. S. J. Huang, C. Y. Shy, "Fuzzy Logic for Constant Force Control of End Milling," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 46, pp. 169-176, 1999.
4. R. J. Furness, T. C. Tsao, J. S. Rankin, II, M. J. Muir, K. W. Manes, "Torque Control for a Form Tool Drilling Operation," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 7, pp. 22-30, 1999.
5. 김기대, 권원태, 주종남, "주축 모터 전류를 통한 절삭력의 간접 측정 및 절삭력 추종 제어," *한국정밀공학회지*, 제 14 권, 제 10 호, pp. 15-27, 1997.
6. V. D. Toro, "Basic Electric Machines," Prentice-Hall, 1990.
7. K. Dutton, S. Thompson, B. Barraclough, "The Art of Control Engineering," Addison-Wesley, 1997.