

# 드릴 공정시 절삭 토크 제어

## 제 1 편 : 절삭 토크 제어기의 설계

오영탁\*, 권원태\*\*, 주종남\*\*\*

### Cutting Torque Control in Drilling

#### Part 1 : Design of a Cutting Torque Controller

Young Tak Oh\*, Won Tae Kwon\*\* and Chong Nam Chu\*\*\*

#### ABSTRACT

As the drilling depth increases, the cutting torque increases and fluctuates, which can lead to the machine tool vibration, severe tool wear, and catastrophic tool breakage. Hence, cutting torque control is very important to improve productivity in drilling. In this paper, a PID controller was designed to control the drilling torque. The plant including the feed drive system, cutting process and spindle drive system was modeled for controller design. The Ziegler-Nichols method was used to determine the controller gain and control action times and 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 method and the root locus plot. The performance of the designed controller and the effect of controller gain tuning were verified from experiments.

**Key Words** : Controller gain tuning (제어기 이득 동조), Drilling torque (드릴 절삭 토크), PID controller (비례-적분-미분 제어기), Plant modeling (플랜트 모델링)

#### 1. 서론

절삭 중 공구에 과도한 부하가 작용할 경우 공구 마모가 촉진되고 공작기계에 진동이 발생할 수 있으며 공구 파손의 위험이 커진다. 이러한 절삭 공정의 이상현상은 생산성에 악영향을 미친다. 따라서 절삭 공정 중 절삭 상태를 실시간으로 감시하고 이상이 있을 경우 적절한 조치를 취할 수 있는 절삭 공정 감시 및 제어 시스템(cutting

process monitoring and control system)은 생산성 향상 및 무인 생산 시스템의 구축을 위해 반드시 필요하다.

드릴 공정은 밀링 공정과 함께 머시닝센터에서 가장 빈번히 이루어지는 절삭 공정이다. 드릴의 종류는 선단(point)이나 생크(shank)부의 형상에 따라 다양하게 분류되며 그 중 표준 트위스트 고속도강 드릴이 가장 널리 이용된다. 선삭이나 밀링의 경우와 달리 드릴 공정에서는 가공 깊이가

1997 2001년 3월 8일 접수

\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

\*\* 서울시립대학교 기계정보공학과

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

깊어질수록 칩이 원활히 배출되지 않고 가공 구멍 내벽과 드릴 플루트 사이에 쌓이게 된다. 이로 인해 일정한 이송으로 가공하더라도 가공 깊이가 증가함에 따라 절삭 추력 및 절삭 토크가 증가하고 공구 파손의 위험도 증가한다. 특히 절삭 추력의 증가에 비해 절삭 토크의 증가가 더욱 크며 공구 파손 전 절삭 토크의 증가가 더욱 뚜렷이 나타난다<sup>(1,2)</sup>. 드릴 공정은 가공 순서 상 후순위 공정에 속하므로 드릴 공정에서의 공구 파손과 같은 이상 현상은 생산성을 극도로 저하시킨다. 따라서 드릴 절삭 공정 중 과도한 절삭 토크를 실시간으로 검출하고 제어할 수 있는 시스템은 공구파손 방지를 통한 가공 생산성 향상을 위해 반드시 필요하다.

공구 과부하 방지를 위한 절삭 공정의 제어는 많은 연구자들에 의해 꾸준히 연구되었다. Koren 등<sup>(3)</sup>은 선삭 공정에서 절삭 조건이 변할 경우 제어기 이득을 절삭계 이득의 변화에 적응시키는 적응 제어 알고리즘을 개발하고 이를 절삭력 제어에 적용하였다. 그러나 제어된 절삭력의 과도 상태 응답에 진동이 나타나며 안정 시간이 오래 걸리는 단점을 보였다. Tomizuka 등<sup>(4)</sup>은 선삭 공정의 절삭계를 모델링하고 절삭력 적응 제어 시스템을 개발하였다. 고정 이득을 갖는 비례-적분 제어기와 적응 제어기의 성능을 비교하여 적응 제어기가 절삭력 제어에 더 적합함을 보였다. 그러나 샘플링 주파수에 따라 모델의 차수가 달라지는 단점이 있으며 비례-적분 제어기를 대체할 수 있는 비례-적분-미분 제어기에 대해서는 언급하지 않았다. Huang 등<sup>(5)</sup>은 비례-적분-미분 제어기로 절삭력을 제어할 경우 제어 성능은 우수하나 제어기의 이득을 시행착오법으로 결정하는 단점이 있으며 이를 극복하기 위한 퍼지 제어기를 제시하였다. 그러나 절삭 공정 모델링을 통해 시행착오법 없이 제어기를 설계하는 방법에 대해서는 언급하지 않았다. Furness 등<sup>(6)</sup>은 비례-적분 및 극배치 기법을 적용하여 형상 드릴링(form tool drilling)에서의 절삭 토크 제어를 위한 제어기를 설계하였다. 제어기의 설계를 위해 공작기계에서의 절삭 공정을 모델링 하였으나 절삭계에서 발생하는 시간 지연 효과를 고려하지 않았으며 제어되는 절삭 토크는 제어 기준 절삭 토크와 편차를 보였다.

본 연구에서는 표준 트위스트 고속도강 드릴로 깊이가 직경의 3 배 이상인 구멍 가공 시 주축 모터 전류로부터 추정된 절삭 토크 제어를 위한

PID 제어기를 설계하였다. 제어기의 설계를 위해 머시닝센터에서 행해지는 드릴 공정을 제어 대상 플랜트로 모델링하고 플랜트의 전달함수를 결정하였다. Ziegler-Nichols 방법을 이용하여 제어기의 이득 및 제어 동작 시간을 결정하였으며 제어기의 성능 향상을 위해 근궤적 선도를 이용하여 제어기의 이득을 동조(tuning)하였다<sup>(7)</sup>. 특정 절삭 조건에 대한 제어기 동조 이득이 결정된 이후 절삭 조건이 변할 경우 Ziegler-Nichols 방법과 근궤적 선도를 이용하지 않고 간단히 제어기 동조 이득을 결정하는 방법을 제시함으로써 제어 시스템의 실용성을 향상시켰다.

## 2. 플랜트 모델링

머시닝센터에서 드릴 가공 중 주축 전류를 이용하여 절삭 토크를 간접 측정하였다. 이송속도를 조절하여 절삭 토크를 제어할 수 있는 제어기의 설계를 위해 이송을 입력으로 하고 주축 전류를 출력으로 하는 제어 대상 플랜트를 정의하였다. 플랜트는 이송계, 절삭계 그리고 주축계로 구성되어 있으므로 각 요소들의 전달함수를 구하면 플랜트의 전달함수를 결정할 수 있다.

### 2.1 Z 축 이송계 모델링

공작기계에 입력된 이송 지령은 가감속 회로와 서보시스템을 거쳐 실제 공작기계의 이송으로 구현된다. 따라서 가감속 회로  $\tau_a$  와 서보시스템의 시정수  $\tau_s$  를 알 수 있다면 이송계를 식 (1)과 같이 2 차 시스템으로 모델링 할 수 있다<sup>(8)</sup>.

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

본 연구에 사용된 공작기계 이송부는 지수형(exponential type) 가감속 회로를 채택하고 있다. 또한 이송 서보 시스템은 3 차로 모델링 되지만 1 차 시스템으로 근사화 될 수 있다. 가감속 회로의 시정수 및 1 차로 근사화 서보 시스템 시정수는 공작기계 컨트롤러의 파라미터에 저장된 값으로부터 얻을 수 있다<sup>(8)</sup>. 본 연구에서 사용된 공작기계의 가감속 회로 시정수  $\tau_a$  와 서보시스템 시정수  $\tau_s$  는 각각 0.01 sec 와 0.033 sec 이다.

이송계 모델의 타당성을 검증하기 위하여 이

송 실험을 수행하였다. NC 프로그램에 입력한 지령 이송속도는 각각 2.5 mm/sec 와 4.167 mm/sec 였다. 이송 중 z 축 엔코더 신호를 측정함으로써 이송속도를 알아내었다. 측정된 이송속도와 이송계 모델로부터 시뮬레이션 된 이송속도를 비교하였으며 그 결과를 Fig. 1(a)와 (b)에 나타내었다.

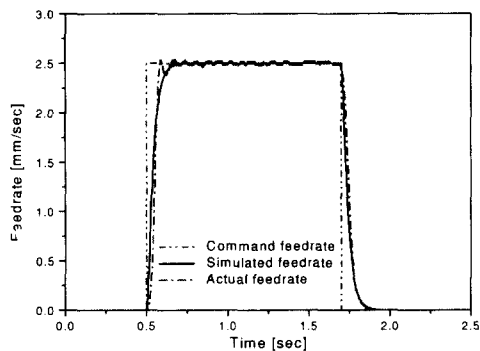


Fig. 1(a) Comparison between the simulated and measured feedrate (Command feedrate=2.5 mm/sec)

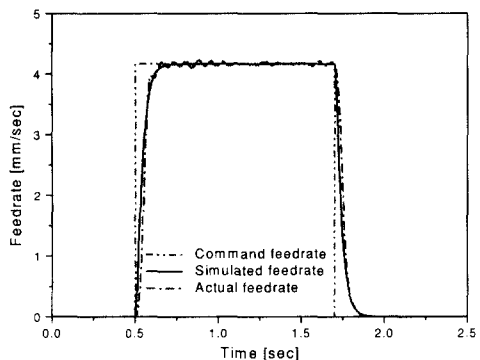


Fig. 1(b) Comparison between the simulated and measured feedrate (Command feedrate=4.167 mm/sec)

Figure 1(a)에서 실제 이송속도는 미소한 오버슈트(overshoot)을 보이나 시뮬레이션 된 이송속도에는 오버슈트가 나타나지 않았다. 이는 실제 4 차인 이송계가 복소 극점을 가지나 2 차로 근사화 된 이송계 모델은 실수 극점을 가지는 것에 기인한다. 그

러나 시뮬레이션 된 이송속도는 약 7%의 과도 상태 오차와 0.3%의 정상 상태 오차를 가지며 실제 이송속도를 추종하였다.

## 2.2 절삭계 모델링

가공 중 이송이 변할 경우 드릴의 회전과 절삭에 의한 저항 및 마찰 등으로 인하여 새로운 이송 입력에 대한 절삭 토크의 정상상태 응답이 나타나기까지 시간이 소요된다. Figure 2 는 계단 이송 입력에 대한 절삭 토크의 응답을 측정된 결과로서 2 차 시스템의 계단 응답과 유사한 특성을 보인다. 따라서 절삭계를 2 차 시스템으로 모델링 하였다.

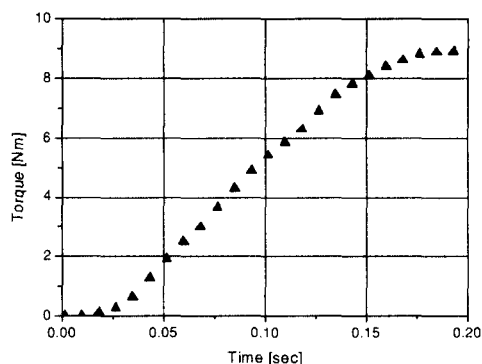


Fig. 2 Cutting torque response to step input of machine tool feed ( $\phi$  10 mm drill, 900 rpm, 180 mm/min)

2 차 절삭계 시스템의 시정수들을  $\tau_{fc}$  와  $\tau_t$  라 하면 절삭계의 전달함수는 식 (2)와 같이 표현된다.  $K_c$  는 절삭계의 이득이며 회전 당 이송에 대한 평균 절삭 토크의 비로써 정의된다.

$$G_c(s) = \frac{K_c}{(\tau_{fc} + 1)(\tau_t + 1)} \quad (2)$$

절삭 실험 데이터로부터 최소자승법을 통해 결정된  $\tau_{fc}$  는 0.03 sec 이며  $\tau_t$  는 0.1 sec 이다.  $K_c$  는 공작물 및 드릴 직경에 따라 달라진다. 직경 10 mm 드릴로 탄소강인 SM45C 공작물을 가공할 경우  $K_c$  는 45.9647 이다. 절삭계 모델의 검증을 위해 이송계와 절삭계를 결합하여 지령 이송에 대한 절삭 토크 응답을 시뮬레이션 하였다. 가공 중

이송속도가 단계적으로 바뀌는 경우에 대한 절삭 실험을 수행하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. Figure 3 은 직경 10 mm 드릴로 600 rpm 의 주축 회전수로 SM45C 를 절삭하면서 이송속도를 50, 70, 100, 그리고 120 mm/min 로 변화시켰을 경우 공구 동력계를 통해 측정된 절삭 토크와 시뮬레이션 된 절삭 토크를 비교한 것이다. 절삭 깊이가 깊어질 경우 실제 절삭 토크는 시뮬레이션 된 절삭 토크보다 큰 값을 가지며 그 값의 변화가 심하다. 이는 가공 깊이가 깊어짐에 따라 칩이 원활히 배출되지 못하고 구멍 내벽과 드릴 플루트 사이에 끼임(clogging)으로 인한 것이다.

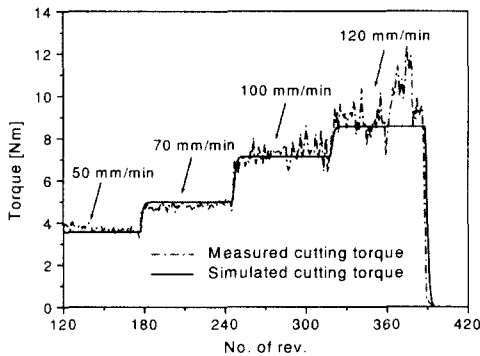


Fig. 3 Cutting torque variation according to the feedrate change during drilling ( $\phi$  10 mm drill, 600 rpm, 50 → 70 → 100 → 120 mm/min)

계산된 절삭 토크는 측정된 절삭 토크에 대해 평균 6%의 과도 상태 오차와 6.8%의 정상 상태 오차를 가진다. 이상의 결과에서 제시된 절삭계 모델은 실제 절삭계를 잘 반영함을 알 수 있다.

### 2.3 주축계 모델링

3 상 교류 유도 모터의 토크와 전류 사이의 관계를 해석하기 위해 일반적으로 사용되는 방법은  $d$ - $q$  변환을 이용한  $d$ - $q$  모델링이다. 회전하는 회전자 전류를 고정된  $d$  축 및  $q$  축 고정자 전류로 변환하면 모터 토크와 고정자 전류 사이에는 식 (3) 과 같은 관계가 성립한다<sup>(9)</sup>.

$$T_m = \frac{3pL_m}{4L_r} (\lambda_{dr} I_q - \lambda_{qr} I_d) \quad (3)$$

- $p = \text{no. of phase}$
- $L_m = \text{magnetizing inductance of winding}$
- $L_r = \text{magnetizing inductance of rotor}$
- $I_d = d \text{ axis current of stator}$
- $I_q = r \text{ axis current of stator}$
- $\lambda_{dr} = \text{flux of rotor in } d \text{ axis}$
- $\lambda_{qr} = \text{flux of rotor in } q \text{ axis}$

그런데 공장기계 주축 유도 모터의 벡터 제어에 의해  $q$  축 쇄교 자속  $\lambda_{qr}$  은 0 이 되고 로터의  $d$  축 쇄교 자속  $\lambda_{dr}$  은 일정하게 제어되므로 모터 토크는 고정자의  $q$  축 전류에 비례한다. 전류 센서를 이용하여 측정되는 고정자 주축 전류  $I_s$  는 고정자의  $d$  축 전류와  $q$  축 전류의 벡터 합과 같다. 그런데  $d$  축 전류는 매우 작은 일정한 값을 갖도록 제어되므로 측정된 주축 전류  $I_s$  는  $q$  축 전류에 근사적으로 비례한다. 따라서 측정된 주축 전류와 모터 토크 사이의 관계를 식 (4)와 같이 근사적인 선형식으로 나타낼 수 있다.

$$T_m = K_s I_q \approx K_s I_s \quad (4)$$

절삭 토크는 전체 모터 토크에서 무부하 운전 토크를 빼줌으로써 얻을 수 있으므로 절삭 토크와 주축 전류 사이의 관계는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$T_c = T_m - T_{tare} = K_s (I_s - I_{tare}) \quad (5)$$

Figure 4 는 절삭 중 측정된 절삭 토크와 주축 전류의 선형적인 관계를 나타내고 있다.

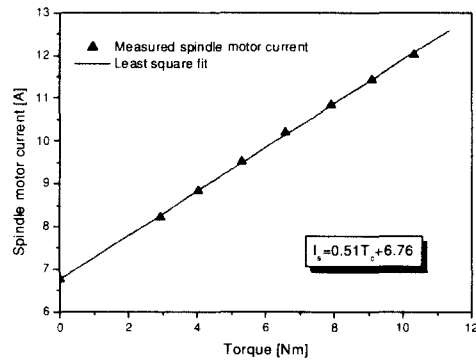


Fig. 4 Linear relationship between the cutting torque and spindle motor current

그런데 드릴에 작용하는 절삭 토크는 주축과 기어를 거쳐 모터에 전달되므로 절삭 토크의 계단 입력에 대해 주축 전류의 응답이 정상상태에 도달하기까지는 시간이 필요하다. 그런데 주축계에 단위 계단 토크를 입력하는 것은 매우 곤란하다. 따라서 절삭 실험을 통해 Fig. 5 와 같이 측정된 절삭 토크와 주축 전류를 선형회귀하고 이때의 절삭 토크를 램프(ramp) 입력으로 간주하였으며 이에 대한 주축 전류의 응답을 토대로 주축계를 식 (6) 과 같이 시정수가  $t_d$  인 1 차 시스템으로 모델링 하였다.

$$G_i(s) = \frac{K_i}{(t_d s + 1)} \quad (6)$$

$K_i$  는 식 (4)와 (5)의  $K_s$  의 역수로서 주축 전류와 절삭 토크 사이의 비를 나타내며 주축계의 이득에 해당한다. 이 값은 절삭에 의한 주축 전류량의 평균을 절삭 토크의 평균으로 나누어 줌으로써 구할 수 있다. 600rpm 의 주축회전수에서 주축계 이득  $K_i$  는 0.586 이다. 최소자승법을 이용하여 측정된 절삭 토크와 주축 전류를 선형회귀 하였으며 이로부터 결정된 주축 전류의 시정수는 0.029 sec 였다.

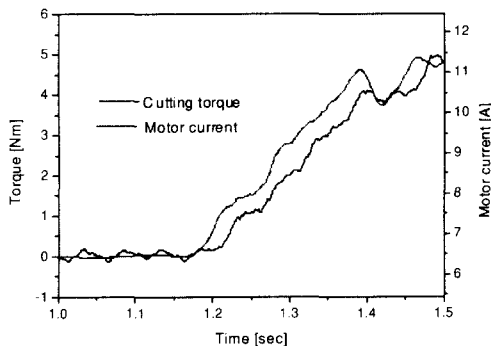


Fig. 5 Time delay of the spindle motor current from the cutting torque ( $\phi$  10 mm drill, 600 rpm, 70 mm/min)

주축계 모델의 검증을 위해 주축 모터 전류로 절삭 토크를 추정하였다. 절삭 중 측정된 주축 전류로부터 절삭 토크를 추정하고 이를 회전 공구

동력계로부터 측정된 절삭 토크와 비교하였으며 그 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 사용된 드릴의 직경은 10 mm, 공작물은 SM45C, 주축 회전속도는 600 rpm, 가공 깊이는 30 mm 였다. 주축 전류로부터 추정된 절삭 토크는 실제 절삭 토크에 대하여 평균 23.2%의 과도 상태 오차와 2.4%의 정상 상태 오차를 보였다. 과도 상태 오차가 크게 나타난 것은 절삭 시작 시 주축 모터의 회전속도를 일정한 유지를 위하여 주축 모터로 과도한 전류가 공급되기 때문이다.

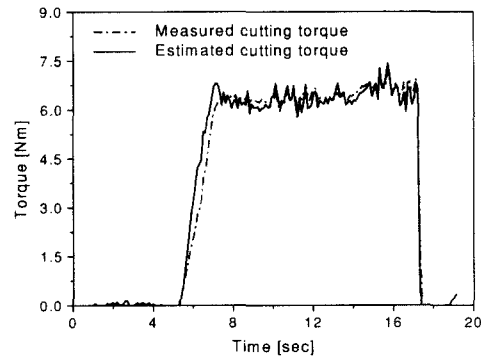


Fig. 6 Comparison between the measured cutting torque and estimated cutting torque from spindle motor current ( $\phi$  10 mm drill, 600 rpm, 100 mm/min)

이상의 결과로부터 제시된 주축계 모델을 이용하여 주축 전류로부터 실제 절삭 토크를 추정할 수 있음을 확인하였다.

### 2.4 플랜트 전달함수

이송계, 절삭계, 그리고 주축계 모델을 결합하면 제어 대상 플랜트의 전달함수는 식 (7)과 같다.

$$G_{plant}(s) = \frac{K_c K_i}{(\tau_a s + 1)(\tau_s s + 1)(\tau_{fc} s + 1)(\tau_r s + 1)(t_d s + 1)} \quad (7)$$

식 (7)의 분모의 계수들은 절삭 조건과 무관한 상수이다. 분자의 절삭계 이득과 주축계 이득은 드릴 직경이나 공작물, 그리고 주축 회전수 등의 절삭 조건에 따라 달라진다.

### 3. 제어기의 설계

2 장에서 얻어진 플랜트 전달함수에 기초하여 절삭 토크 제어기를 설계하였다. 특정 절삭 조건에 대해 Ziegler-Nichols 방법과 근계적 선도를 이용하여 제어기의 동조 이득 및 제어 동작 시간을 결정하였다. 이후 절삭 조건이 변하는 경우 Ziegler-Nichols 방법과 근계적 선도를 이용하지 않고 간단하게 제어기 동조 이득을 결정하는 방법을 제시함으로써 제안된 절삭 토크 제어기의 실용성을 향상시켰다.

**3.1 제어기 이득 및 제어 동작 시간의 결정**

고정 이득을 갖는 제어기의 전달함수는 식 (8) 과 같은 형태로 표현되며 전달함수의 계수에 따라 비례, 비례-적분, 비례-적분-미분 제어기 등으로 구분된다.

$$G_{con}(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (8)$$

제어기 이득과 제어 동작 시간 결정을 위해 Ziegler-Nichols 방법을 이용하였다. 제어기를 이득이  $K$  인 비례 제어기로 가정하면 플랜트와 제어기를 포함하는 폐루프 시스템의 전달함수는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$G_{cl}(s) = \frac{KK_c K_f}{(\tau_a s + 1)(\tau_s s + 1)(\tau_{fc} s + 1)(\tau_i s + 1)(\tau_d s + 1) + KK_c K_f} \quad (9)$$

폐루프 시스템의 특성 방정식(characteristic equation)  $D(s)$  는 아래의 식과 같이 얻어진다.

$$D(s) = a_0 s^5 + a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + a_5 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \tau_a \tau_s \tau_{fc} \tau_i \tau_d \\ a_1 &= \tau_a \tau_s \tau_{fc} \tau_i + \tau_s \tau_{fc} \tau_i \tau_d + \tau_{fc} \tau_i \tau_d \tau_a + \tau_i \tau_d \tau_a \tau_s + \tau_d \tau_a \tau_s \tau_{fc} \\ a_2 &= \tau_a \tau_s \tau_{fc} + \tau_a \tau_s \tau_i + \tau_a \tau_s \tau_d + \tau_a \tau_{fc} \tau_i + \tau_a \tau_{fc} \tau_d + \tau_a \tau_i \tau_d \\ &\quad + \tau_s \tau_{fc} \tau_i + \tau_s \tau_{fc} \tau_d + \tau_s \tau_i \tau_d + \tau_{fc} \tau_i \tau_d \\ a_3 &= \tau_a \tau_s + \tau_a \tau_{fc} + \tau_a \tau_i + \tau_a \tau_d + \tau_s \tau_{fc} + \tau_s \tau_i + \tau_s \tau_d + \tau_{fc} \tau_i \\ &\quad + \tau_{fc} \tau_d + \tau_i \tau_d \\ a_4 &= \tau_a + \tau_s + \tau_{fc} + \tau_i + \tau_d \\ a_5 &= 1 + KK_c K_f \end{aligned}$$

식 (10)의 계수들 중  $a_1, a_2, a_3, a_4$  는 상수이며

$a_5$  는 절삭 조건에 따른 변수이다. 특성 방정식의 계수들을 이용하여 식 (11)과 같은 Routh 배열을 구성할 수 있으며 안정성 조건(stability criterion)으로부터  $d_1 = 0$  을 만족시키는  $K$  가 시스템의 임계 이득  $K_{cr}$  이다. 임계 이득이 결정되면 시스템 응답의 진동 주기  $T$  는 식 (12)로부터 얻어진다.

|   |       |       |       |       |  |
|---|-------|-------|-------|-------|--|
| 0 | $s^5$ | $a_0$ | $a_2$ | $a_4$ |  |
| 1 | $s^4$ | $a_1$ | $a_3$ | $a_5$ |  |
| 2 | $s^3$ | $b_1$ | $b_2$ | 0     |  |
| 3 | $s^2$ | $c_1$ | $c_2$ | 0     |  |
| 4 | $s^1$ | $d_1$ | 0     | 0     |  |

$$b_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1}, \quad b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1} \quad (11)$$

$$c_1 = \frac{a_3 b_1 - a_1 b_2}{b_1}, \quad c_2 = a_5$$

$$d_1 = \frac{b_2 c_1 - b_1 c_2}{c_1}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{c_1}{c_2}} \quad (12)$$

임계 이득과 시스템 응답의 진동 주기로부터 Ziegler-Nichols 제 2 규칙에 의해 제어기 종류별 비례 이득과 제어 동작 시간이 결정될 수 있다. 600 rpm 의 주축 회전수에서 직경 10 mm 드릴로 SM45C 를 절삭할 경우 플랜트 이득은 26.9353 이며 이때 Ziegler-Nichols 방법으로 얻어지는 제어기 종류별 비례 이득과 제어 동작 시간은 table 1 과 같다.

Table 1 Controller gain and control action times (10 mm diameter drill, 600 rpm, SM45C workpiece)

| 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 |

**3.2 제어기 종류의 결정 및 제어기 비례 이득의 동조**

절삭 토크 제어기의 선정을 위해 각각의 제어기를 포함하는 폐루프 시스템의 단위 계단 응답

(unit step response)을 시뮬레이션 하였으며 그 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 PID 제어기의 성능이 가장 우수함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 절삭 토크 제어기로서 PID 제어기를 채택하였다.

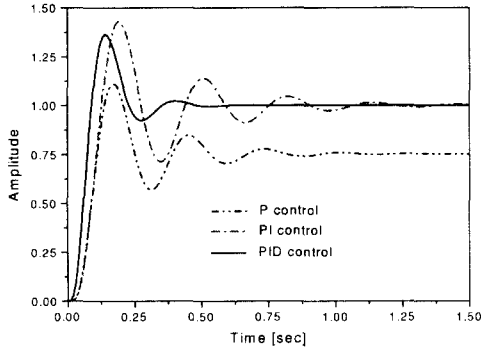


Fig. 7 Step responses of the closed loop systems according to the control type

그런데 PID 제어기를 포함한 시스템의 단위 계단 응답에는 33%의 피크 오버슈트(peak overshoot)가 존재한다. 드릴 공정은 가공 깊이가 깊어질수록 칩 배출의 불량으로 인해 절삭 상태가 불안정해지므로 제어 응답의 오버슈트는 절삭 공정의 불안정성을 증폭시킬 위험이 있다. 따라서 페루프 시스템의 감쇠를 증가시켜 제어 응답의 오버슈트를 줄이는 것이 필요하며 이를 위해 근궤적 선도를 이용하여 제어기의 이득을 동조하였다. 제어 동작 시간은 고정시키고 제어기의 비례 이득만을 변화시켜 시스템의 감쇠비가 증가하는 위치로 시스템의 주극점을 이동시킨다<sup>17)</sup>. 제어기의 전달함수를 식 (8)과 같은 형태로 표현하였으므로 비례 이득을 동조하는 것은 적분기 이득과 미분기 이득을 함께 동조하는 것과 동일한 효과를 가진다. Figure 8(a)는 제어기 이득 동조 이전의 페루프 시스템의 근궤적 선도이다. 주극점의 위치는  $-7.587 \pm 20.961i$  이며 이때의 감쇠비(damping ratio)는 약 0.35 이다. 제어 응답의 오버슈트 감소를 위해 시스템의 감쇠비가 0.9 가 되도록 제어기의 비례 이득을 동조하였으며 제어기 이득 동조 후의 시스템의 근궤적 선도를 Fig. 8(b)에 나타내었다. 주극점의 위치가  $-7.538 \pm 3.345i$  로 변화되었으며

동조된 비례 이득의 값은 0.029 였다. 이득 동조 전후의 페루프 시스템 주극점들의 위치 변화로부터, 제어기의 이득 동조를 통해 시스템의 응답 속도는 다소 느려지지만 응답의 오버슈트 및 진동이 감소됨을 추론할 수 있다.

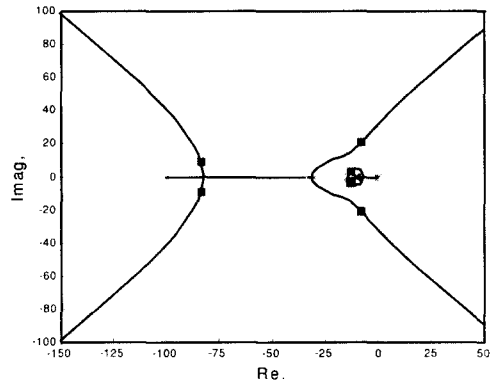


Fig. 8(a) Root locus plot of the closed loop system when the PID controller is not tuned

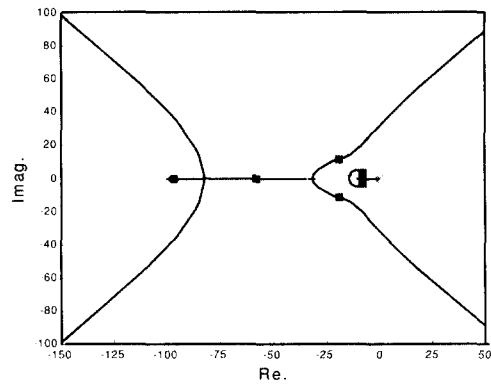


Fig. 8(b) Root locus plot of the closed loop system when the PID controller is tuned

Figure 9 는 이득 동조 전후의 제어기를 포함하는 페루프 시스템의 단위 계단 응답을 시뮬레이션 한 결과이다. 제어기의 비례 이득을 동조한 경우 페루프 시스템의 응답 속도는 이득 동조 전의 경우에 비하여 다소 느려졌다. 그러나 시스템의 감쇠비가 증가하였으므로 응답의 오버슈트 및 진동이 이득 동조 전의 경우에 비하여 감소하였음을 확인할 수 있다.

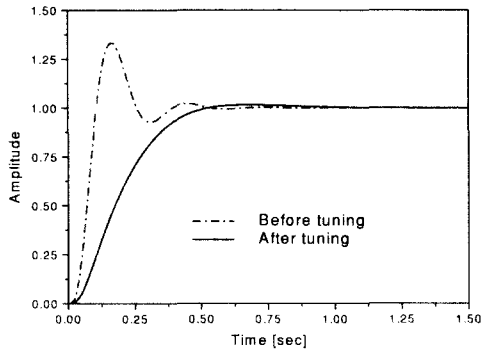


Fig. 9 Comparison of the unit step response of the closed loop system before and after controller gain tuning

이상의 과정을 통해 특정 절삭 조건에서의 절삭 토크 제어를 위한 PID 제어를 설계할 수 있었다. 그런데 드릴 직경이나 공작물, 그리고 주축 회전수 등과 같은 절삭 조건의 변화에 의해 플랜트 이득이 바뀔 경우 위의 과정을 반복하여 제어를 설계하는 것은 실용성 측면에서 불리하다. 따라서 다음 절에서는 특정 절삭 조건에 대한 제어기 동조 이득이 결정된 이후 절삭 조건 변경 시 Ziegler-Nichols 방법과 근궤적 선도를 이용하여 제어기 동조 이득을 간단하게 결정하는 방법을 제시한다.

3.3 제어기 이득 결정의 단순화

페루프 시스템의 특성 방정식 계수들 중  $a_5$  를 제외한 계수들은 상수이다.  $a_5$  를  $x$  라고 가정하면 식 (11)의 Routh 배열에서 임계 이득을 결정하는  $d_1$  은 식 (13)과 같이 계수들이 상수인 이차식의 형태로 표현된다.

$$d_1 = m_1x^2 + m_2x + m_3 \tag{13}$$

$$m_1 = -a_0^2 a_1$$

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

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

따라서  $d_1 = 0$  을 만족하는  $x$  는 일정한 값을 가진다. 그런데  $x = 1 + K_{cr} K_c K_f = 1 + K_{cr} K_{plant}$  이므로 임계 이득  $K_{cr}$  과 플랜트 이득  $K_{plant}$  의 곱은 항상 일정하다. 그러므로 Ziegler-Nichols 제 2 규칙에 의

해 얻어지는 PID 제어기의 비례 이득과 플랜트 이득의 곱 또한 상수가 되고 페루프 시스템 극점들의 위치는 플랜트 이득이 변하더라도 항상 동일하다. 이는 플랜트의 시정수들이 절삭 조건에 무관한 상수인 것에 기인한다. 근궤적 선도를 이용하여 제어기 이득을 동조할 경우 동조된 비례 이득은 동조 이전의 비례 이득에 일정한 값을 곱한 것이므로 결국 플랜트 이득과 제어기 동조 이득의 곱은 식 (14)와 같이 항상 일정하다.

$$K_p K_{plant} = constant \tag{14}$$

따라서 식 (14)의 상수가 결정되면 공작물이나 드릴, 또는 주축 회전수의 변경에 의해 플랜트 이득이 변하더라도 Ziegler-Nichols 방법과 근궤적 선도를 사용하지 않고 제어기 동조 이득을 간단히 얻을 수 있다. 앞 절에서 플랜트 이득이 26.9353 인 경우 제어기 동조 이득은 0.029 였으므로 식 (14)의 상수는 0.78112 이다. 그러므로 PID 제어기의 동조 이득을 구하는 식은 아래와 같이 표현되며 동조 이득과 플랜트 이득의 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 10 과 같이 쌍곡선의 형태를 가진다.

$$K_p = \frac{0.78112}{K_{plant}} \tag{15}$$

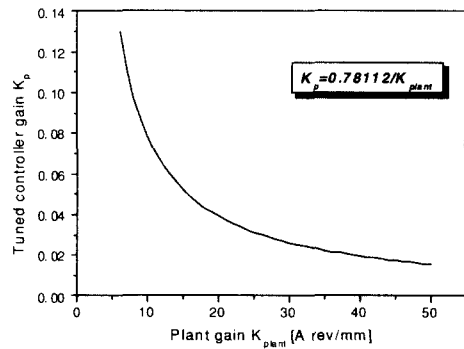


Fig. 10 Relationship between plant gain and tuned controller gain

제어기 동조 이득 결정 과정이 단순화 됨으로써 절삭 토크 제어 시스템의 현장 적용 시 플랜트



이득만 결정되면 작업자는 식 (15)로부터 간단히 제어기 동조 이득을 얻을 수 있다.

#### 4. 절삭 토크 제어기의 성능 검증

앞 절에서 제시된 PID 제어기의 성능 및 이득 동조 효과의 검증을 위해 절삭 토크 제어 실험을 수행하였다. 직경 10 mm의 표준 트위스트 고속도강 드릴로 SM45C 공작물에 깊이 40 mm의 구멍을 가공하였다. 주축 회전수는 600 rpm, 이송속도는 120 mm/min였다. 절삭 토크를 제어하지 않고 구멍을 가공한 경우의 절삭 토크와 주축 모터 전류를 Fig. 11에 나타내었다. 가공 깊이가 직경의 3배 이상인 지점부터 절삭 토크의 상승이 뚜렷이 나타나기 시작하며 이에 따라 주축 모터 전류 또한 증가함을 볼 수 있다.

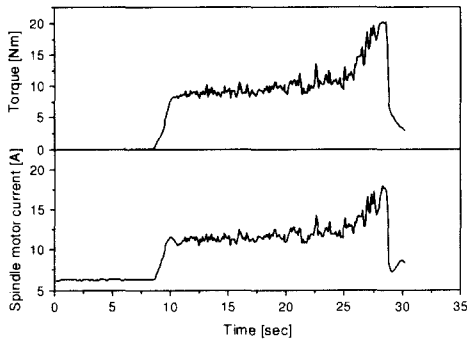


Fig. 11 Cutting torque and the spindle motor current variations during drilling a hole ( $\phi$  10 mm drill, 600 rpm, 120 mm/min)

제어기 비례 이득 동조가 절삭 토크 제어 성능에 미치는 영향을 검증하기 위하여 비례 이득을 동조한 제어기와 동조하지 않은 제어기로 절삭 토크를 각각 제어하였다. 제어시의 절삭 토크와 주축 모터 전류, 그리고 제어기의 출력에 해당하는 이송속도의 변화를 Fig. 12(a)부터 Fig. 12(d)까지 나타내었다. 제어 기준이 되는 주축 모터 전류는 11 Ampere이며 이에 해당하는 절삭 토크는 약 9 Nm이다. Figure 12(a)와 Fig. 12(b)는 이득을 동조하지 않은 경우이다. 제어되는 절삭 토크의 평균은 기준 절삭 토크를 추종하고 있지만 제어기의 출력이

진동함으로 인하여 제어 응답에 매우 큰 진동이 나타난다. 이는 3.2 절에서 언급한 바와 같이 페루프 시스템의 주극점이 감쇠가 작은 곳에 위치하고 있기 때문이다. 그러나 주극점의 실수부가 음의 값을 가지므로 제어되는 절삭 토크가 발산하지는 않았다.

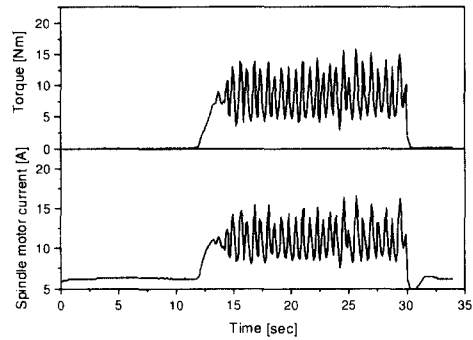


Fig. 12(a) Controlled patterns of the cutting torque and the spindle motor current before gain tuning ( $\phi$  10 mm drill, 600 rpm, 120 mm/min)

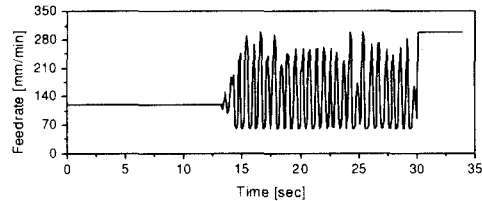


Fig. 12(b) Feedrate equivalent to the controller output before gain tuning ( $\phi$  10 mm drill, 600 rpm, 120 mm/min)

Figure 12(c)와 Fig. 12(d)는 제어 이득을 동조한 경우 제어되는 절삭 토크와 주축 전류, 그리고 이송속도의 변화를 보여주고 있다. 제어되는 절삭 토크는 기준 절삭 토크를 충실히 추종하고 있으며 Fig. 12(a)에서와 같은 제어 응답의 극심한 진동이 나타나지 않는다. 이는 주극점의 이동을 통해 시스템의 감쇠가 증대되었기 때문이다. 제어 응답에 나타나는 미소한 진동 성분은 가공 깊이 증가에 따른 칩의 영향 때문이며 절삭 토크를 제어하더라도 드릴 공정의 특성상 칩에 의한 영향을 완전히

제거할 수는 없다. 제어기의 출력에 해당하는 이송속도는 가공 깊이가 깊어지면서 절삭 토크의 상승을 억제하기 위하여 점진적으로 감소되었다.

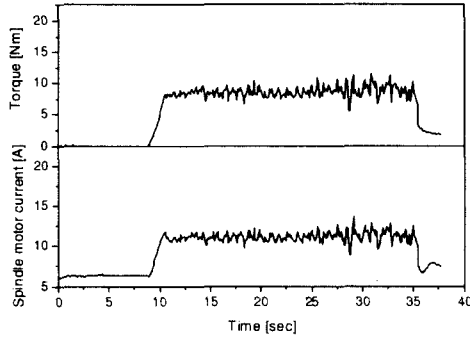


Fig. 12(c) Controlled patterns of the cutting torque and the spindle motor current after gain tuning ( $\phi$  10 mm drill, 600 rpm, 120 mm/min)

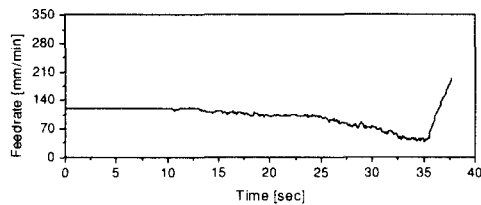


Fig. 12(d) Feedrate equivalent to the controller output after gain tuning ( $\phi$  10 mm drill, 600 rpm, 120 mm/min)

이상의 실험 결과로부터 드릴링 토크는 주축 모터 전류로부터 정확히 추정될 수 있으며 설계된 PID 제어기는 주축 전류로부터 추정된 드릴링 토크를 실시간으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 또한 제어 성능의 향상을 위한 이득 동조의 필요성을 확인하였다. 식 (15)에 제시된 제어기 동조 이득 결정의 단순화 방법에 대한 검증은 위해 드릴의 직경이 달라진 경우의 절삭 토크 제어 실험을 수행하였다. 회전 당 이송량이 동일하더라도 드릴의 직경이 달라질 경우 절삭 이득이 달라지며 이는 플랜트 이득이 달라짐을 의미한다. 600 rpm의 주축 회전수에서 직경 13 mm 드릴로 SM45C를 절삭하였다. 구멍의 가공 깊이는 78 mm 이다.

이 경우 절삭 이득은 67.5928 이며 주축계 이득은 0.587 이었다. 따라서 플랜트 이득은 39.677 이며 식 (15)으로부터 얻어진 제어기 동조 이득은 0.02 이다. 미분 및 적분 제어 동작 시간은 10 mm 드릴로 절삭 토크를 제어한 경우와 동일하다. Figure 13은 절삭 토크를 제어하지 않고 구멍을 가공한 경우의 절삭 토크와 주축 모터 전류이다. Figure 14(a)와 Fig. 14(b)는 절삭 토크를 제어한 경우의 절삭 토크와 주축 모터 전류, 그리고 제어기의 출력인 이송속도를 나타내고 있다.

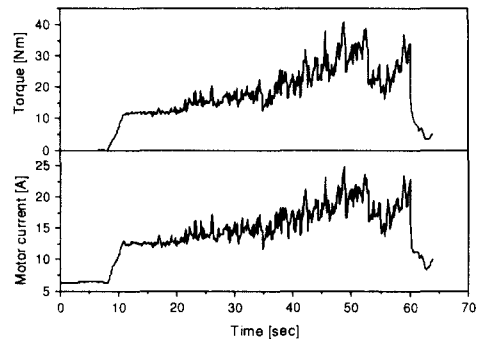


Fig. 13 Cutting torque and the spindle motor current variations when the cutting torque is not controlled ( $\phi$  13 mm drill, 500 rpm, 90 mm/min)

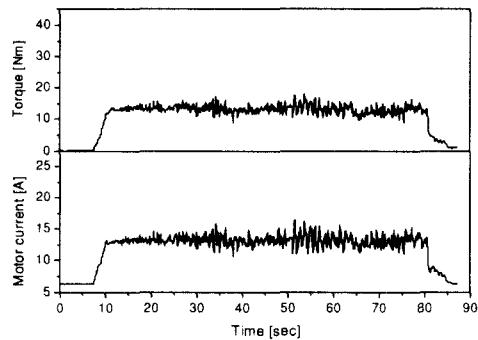


Fig. 14(a) Cutting torque and the spindle motor current variations when the cutting torque is controlled ( $\phi$  13 mm drill, 500 rpm, 90 mm/min)

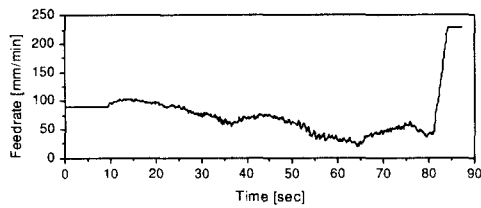


Fig. 14(b) Feedrate variation when the cutting torque is controlled ( $\phi$  13 mm drill, 500 rpm, 90 mm/min)

절삭 토크를 제어하지 않을 경우 가공 깊이가 증가함에 따라 절삭 토크의 레벨 및 진폭이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 그러나 식 (15)로부터 결정된 동조 이득을 채택한 제어기로 절삭 토크를 제어한 경우 가공 깊이가 깊어지더라도 제어되는 절삭 토크는 기준 절삭 토크 (약 13.5 Nm)를 잘 추종하고 있음을 볼 수 있으며 이로부터 제시된 제어기 동조 이득 결정의 단순화 방법이 타당함을 알 수 있다.

## 5. 결론

드릴 공정 시 가공 깊이 증가에 따른 절삭 토크의 상승을 억제하기 위한 절삭 토크 제어기를 설계하였다. 제어기의 설계를 위해 머시닝 센터에서 행해지는 드릴 공정을 제어 대상 플랜트로 모델링 하였다. 플랜트를 구성하는 이송계와 절삭계 그리고 주축계를 모델링하고 전달함수를 결정하였으며 실험을 통해 모델링의 타당성을 검증하였다. 특정 절삭 조건의 드릴 공정에 대하여 Ziegler-Nichols 방법을 사용하여 절삭 토크 제어를 위한 PID 제어기를 설계하였으며 근궤적 선도를 이용하여 제어기의 이득을 동조하였다. 절삭 조건이 바뀔 경우 Ziegler-Nichols 방법과 근궤적 선도를 사용하지 않고 제어기 동조 이득을 간단히 결정하는 방법을 제시함으로써 제어기의 실용성을 확보하였으며 실험을 통해 제시된 방법의 타당성을 검증하였다. 설계된 PID 제어기는 이송속도의 조절을 통해 주축 모터 전류로부터 추정된 절삭 토크를 제어하였으며 제어되는 절삭 토크는 기준 절삭 토크를 잘 추종하였다.

## 참고문헌

1. R. J. Furness, A. G. Ulsoy, C. L. Wu, "Feed, speed, and Torque Controller for Drilling," ASME J. of Eng. for Ind., Vol. 118, pp. 2-9, 1996.
2. D. F. Galloway, "Some Experiments on the Influence of Various Factors on Drill Performance," Trans. of the ASME, Vol. 79, pp. 191-231, 1956.
3. Y. Koren, O. Masory, "Adaptive Control with Process Estimation," Annals of the CIRP, Vol. 30, pp. 373-376, 1981.
4. 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.
5. 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.
6. R. J. Furness, T. C. Tsao, J. S. Rankin, II, M. J. Muth, K. W. Manes, "Torque Control for a Form Tool Drilling Operation," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 7, pp. 22-30, 1999.
7. K. Dutton, S. Thompson, B. Barraclough, "The Art of Control Engineering," Addison-Wesley, 1997.
8. FANUC Ltd., "FANUC AC Servo Amplifier Maintenance Manual," B-65005/07, 1988.
9. V. D. Toro, "Basic Electric Machines," Prentice-Hall, 1990.