

〈論 文〉

능동적 토크제어를 통한 드릴공정의 안정화

김중배* · 이상조**

(1993년 1월 27일 접수)

Stabilization of the Drilling Process through Active Torque Control

Joong-Bae Kim and Sang-Jo Lee

Key Words : Drilling(드릴가공), Cutting Force Control(절삭력 제어), Torque Variation(토크 변화), Cutting Stiffness Variation(절삭강성변화) Adaptive PI Controller(적응형 PI 제어기)

Abstract

The torque variation in drilling process represents the problems of the efficient and stable machining. In order to cope with them, the active control method is adopted to drill the workpiece under the constant cutting torque though the cutting stiffness of the workpiece or the diameter of the drill bit changes. The cutting process is modeled in the geometric viewpoint related with the feed and the number of cutting lips. And the dynamic model is approximated to the first order system for the purpose of control. The adaptive PI control is used in computer simulations and experiments. The results of the study show the validity of the drilling method with torque control.

기 호 설 명

a_1, b_1	: 플랜트 상수	p_1, p_2	: 상수
A, B	: 플랜트 다항식	q^{-1}	: 지연연산자
\hat{b}_1	: b_1 의 예측치	r_0, r_1, r_2	: 상수
C_1, C_2, C_3	: 상수	s_1, s_2	: 상수
D	: 드릴직경	T	: 샘플링 시간
d_1, d_2	: 상수	t_0, t_1, t_2	: 상수
f	: 적응이득	T_D	: 드릴의 1/2 회전시간
f_d	: 이송	T_q	: 토크
f_r	: 이송속도	\hat{T}_q^0	: 예측된 토크
G_{CL}	: 페루프계의 전달함수	u	: 제어입력
G_P	: 플랜트의 전달함수	ε^0	: 예측오차
G_{PI}	: PI 제어기의 전달함수	λ	: 가중치
K_t	: 절삭강성	Ω	: 스핀들 회전속도
K_u	: 상수		
P, R, S, T	: 제어기 다항식		

1. 서 론

*정회원, 연세대학교 기계공학과 대학원

**정회원, 연세대학교 기계공학과

드릴로 구멍을 가공할 경우 발생하는 절삭력은

축력(thrust)과 토크(torque)로 분류된다. 이러한 절삭력은 실제적인 드릴가공시 예측할 수 없는 외 부요인에 의해 변동하게 된다. 예를들면 절삭과정 중 발생하는 토크의 경우 순수하게 드릴 뿐만 아니라 가공중인 구멍벽면과 드릴의 플루트(flute)에 존재하는 칩 부스러기에 의해 발생하는 마찰토크가 있으며, 구멍의 깊이가 증가해 갈수록 마찰토크에 의한 토크의 변동은 증가해 간다. 그리고 절삭날에서의 구성인선 발생, 온도변화, 또는 날의 마모 등으로 토크의 변동량은 예측할 수 없는 영향을 받게 된다.

일반적으로 드릴가공시의 절삭조건은 가공 데이터 편람에 제시된 조건을 선정하게 되는데 여기에는 드릴의 재질, 드릴의 형상특성 및 가공물의 재질에 따라 적정한 절삭속도가 제시되어 있다. 그러나 이러한 절삭속도는 공작물의 재질이 균일한 경우에 해당되며, 공작물의 재질이 복합강성인 경우는 가공중 절삭속도의 변경이 불가피하다. 또한 동일한 공작물에 구멍을 가공할 경우에도 가공구멍의 크기에 따라 드릴의 크기를 변경해야 하며 동시에 절삭속도도 변경해야 한다. 또한 절삭조건이 알려지지 않은 소재의 경우 시행착오에 의한 절삭조건 선정이 불가피하다.

이와같은 가공상의 문제들에 보다 능동적으로 대처하기 위하여 본 연구에서는 드릴가공시의 토크제어에 대한 연구를 수행하였는데 이와 관련된 연구로서 작은 구멍을 가공할 때 드릴에 발생하는 토크의 과부하 상태를 방지하여 일정한 절삭속도 영역에서 가공을 수행하도록 기계적 장치를 고안하는 것에 대한 연구들이 수행된 바 있다.^(1,2,3)

80년대에 들어서면서 부터 제어이론을 도입한 능동적인 절삭력 제어에 대한 연구가 수행되기 시작하였는데 이들은 주로 선삭과 밀링가공에 대한 내용들이었다. 이론적인 제어기법에 기초를 둔 초기의 절삭력 제어에 대한 연구들은 적응제어의 개념을 도입하여 절삭력 제어를 시도하였는데 이는 파라미터 적응제어의 초기단계로서 이론적으로 설계기법이 수식화되어 정립되지는 않았다.^(4,5) 이러한 절삭력 제어의 분야에 있어서 모델 규범형 적응제어의 이론적 배경⁽⁶⁾ 위에 밀링가공시의 절삭력을 파라미터 적응제어를 통하여 제어함으로써 절삭력 제어에 적응제어기법의 응용이 가능함을 입증한 연구결과⁽⁷⁾가 있으며, 이 이후에도 선삭과 밀링가공에 대한 연구들이 수행되었는데 주된 내용은 일정

절삭속도로 단면이 일정하지 않은 공작물을 가공하도록 절삭력 제어를 함으로써 가공효율을 증진시키기 위한 내용들이며,^(8~11) 절삭과정중의 공구온도 및 마모상태와 같은 물리적 파라미터를 고려하여 최적의 절삭을 수행하기 위한 연구도 수행되었다.⁽¹²⁾

드릴가공의 경우 절삭력 제어에 대한 연구는 선삭이나 밀링가공과 같이 활발하게 수행되지는 않았는데, 기하학적 관점에서 드릴과정의 축력을 동적 모델링하여 드릴이 공작물을 뚫고 나올때 발생하는 버(exit burr)를 축력제어를 통해 최소화시키기 위한 연구가 수행되었으며,⁽¹³⁾ 복합적삭강성 가공물을 드릴가공할 때 발생하는 축력의 변동을 능동적으로 제어함으로써 안정된 드릴공정과 가공시간의 단축에 관한 연구가 수행되었다.⁽¹⁴⁾ 그리고 드릴과정의 축력과 토크의 동적 모델링에 대하여 시계열 모델을 이용한 연구가 수행되었다.⁽¹⁵⁾

2. 정적인 관점에서 고려한 토크의 동적모델

드릴은 2개의 절삭날을 갖고 있으며 증척계수가 1인 드릴구조상 및 절삭과정상의 특징을 갖고 있다. 이러한 조건에 대하여 정적인 관점에서 절삭깊이 변화에 따른 토크의 동적모델을 구하기 위해, 임의의 시간 t 에서 다음과 같이 이송과 이송속도의 관계를 고려한다.

$$f_d = \frac{1}{30} \int_{t-T_b}^t f_r(t) dt \tag{1}$$

여기서 f_d 와 f_r 은 각각 이송(feed)과 이송속도(feedrate)를 의미하며 단위는 각각 mm/rev와 mm/min이다. 그리고 T_b 는 드릴의 1/2 회전시간에 해당하며 드릴의 1회전시간을 절삭날수로 나눈 값이다. 식(1)을 라플라스 변환하여 이송의 이송속도에 대한 관계를 구하면 다음과 같다.

$$f_d(s) = \frac{1 - e^{-sT_b}}{30s} f_r(s) \tag{2}$$

정상상태(steady-state)에서의 토크는 다음과 같은 이송의 지수함수형태로 표현된다.^(16,17)

$$\begin{aligned} T_t &= C_1 f_d^{C_2} D^{C_3} \\ &= (C_1 D^{C_3} f_d^{C_2-1}) f_d \\ &= K_t f_d \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 T_q 는 절삭토크이며 C_1, C_2, C_3 는 공구와 공

작물의 재질에 따라 결정되는 상수이다. 그리고 K_t 는 절삭강성으로서 이송의 지수함수형태로 표현되는 상수이다.

이송속도의 제어를 위해서 직류 서보모터와 이를 구동시키기 위한 서보컨트롤러를 사용하는데, 서보컨트롤러와 직류 서보모터의 응답시간은 절삭과정의 응답시간에 비해 상대적으로 작다고 가정하여 이송속도와 서보컨트롤러에 부가되는 입력전압을 다음과 같이 표현한다.

$$f_r = K_u u \quad (4)$$

여기서 K_u 는 상수이다.

이제 식 (2), (3), (4)와 공작기계의 콤플라이언스 $G_m(s)$, 부하의란(v), 측정잡음(e)을 고려하여 절삭과정을 블록선도로 제시하면 Fig. 1과 같다. 일반적으로 공작기계의 구조적 강성은 그 영향을 무시할 정도로 충분히 크므로 이를 무시하고, K_t 를 상수로 가정하여 절삭토크 T_q 의 서보 컨트롤러 입력전압 u 에 대한 전달함수 $G_p(s)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$G_p(s) = \frac{T_q(s)}{u(s)} = \frac{K_u K_t (1 - e^{-sT_D})}{30s} \quad (5)$$

식(5)를 이산시간계로 등가화시키는 과정에서 Padé의 근사⁽¹⁸⁾를 이용하여 시간지연 e^{-sT_D} 를 표현하면 다음과 같다.

$$e^{-sT_D} \cong \frac{1 - \frac{T_D}{2}s}{1 + \frac{T_D}{2}s} \quad (6)$$

따라서 식(5)는 다음과 같이 표현된다.

$$G_p(s) \cong K_u K_t \frac{1}{30s} \left(\frac{1 - \frac{T_D}{2}s}{1 + \frac{T_D}{2}s} \right) = \frac{K_u K_t T_D}{30(1 + \frac{T_D}{2}s)} \quad (7)$$

식(7)에 대하여 T_D 의 $1/n$ 배로 샘플링하여 이산화

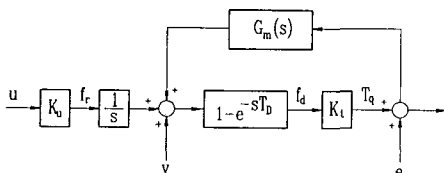


Fig. 1 Block diagram of the drilling process

시킬 경우, ZOH(zero order hold)를 포함시킨 펄스 전달함수 $G_p(z)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$G_p(z) = (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{K_u K_t T_D}{30s(1 + \frac{T_D}{2}s)} \right] = \frac{K_u K_t n T (1 - e^{-2/n})}{30(z - e^{-2/n})} \quad (8)$$

여기서 n 은 자연수로서 실제 제어시에는 2로 선정하였으며, T 는 샘플링 시간이며 $T_D = nT$ 이다. 그리고 지연연산자(delay operator) q^{-1} ($q^{-1} : y(k-1) = q^{-1}y(k)$)을 이용하여 식(8)에 대한 펄스 전달연산자 $G_p(q^{-1})$ 을 구하면 다음과 같다.

$$G_p(q^{-1}) = \frac{T_q(k)}{u(k)} = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} = \frac{b_1 q^{-1}}{1 + a_1 q^{-1}}$$

$$b_1 = \frac{1}{30} K_u K_t n T (1 - e^{-2/n})$$

$$a_1 = -e^{-2/n} \quad (9)$$

여기서 $A(q^{-1})$ 과 $B(q^{-1})$ 은 q^{-1} 에 대한 다항식이며, a_1 과 b_1 은 상수이다. 식(9)로 주어지는 계는 1차계이며, 계의 파라미터 a_1 은 샘플링 주기에만 의존하며, b_1 은 절삭강성에 따라 변하는 특성을 나타낸다. 즉 공작물의 재질이 균일하지 않은 구조로 된 경우 b_1 은 시변특성을 나타낸다.

3. 적응형 PI 제어기

본 연구에서는 재질이 상이한 구조로 된 공작물을 드릴가공하거나 크기가 다른 드릴로 가공할 때 발생하는 토크의 변동과 절삭속도의 재설정 문제에 대해 능동적으로 대처하기 위해 상황변화에 관계없이 토크를 일정하게 안정화시킨 가운데 가공을 수행하도록 함을 목적으로 한다. 이를 위한 제어방법으로서 시변절삭강성을 실시간으로 예측하면서 제어를 수행하기 위한 적응형 PI(proportional-plus-integral) 제어기를 적용하도록 한다.

식(9)로 표현되는 1차의 단일 입출력계에 대해서 다음과 같은 일반적인 선형 제어기를 고려한다.

$$S(q^{-1})u(k) = T(q^{-1})r(k) - R(q^{-1})T_q(k) \quad (10)$$

여기서 $S(q^{-1}) = 1 + s_1 q^{-1} + s_2 q^{-2} + \dots$

$T(q^{-1}) = t_0 + t_1 q^{-1} + t_2 q^{-2} + \dots$

$R(q^{-1}) = r_0 + r_1 q^{-1} + r_2 q^{-2} + \dots$

이며 $r(k)$ 는 지령신호로서 목표 토크값이다.

이산시간계에서의 PI 제어기의 펄스 전달연산자 $G_{PI}(q^{-1})$ 은 다음과 같다.

$$G_{PI}(q^{-1}) = \frac{d_1 + d_2 q^{-1}}{1 - q^{-1}} \quad (11)$$

여기서 d_1, d_2 는 상수이다.

따라서 PI 제어기를 구성하기 위해서 식(10)의 다항식 $S(q^{-1}), T(q^{-1}), R(q^{-1})$ 은 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} S(q^{-1}) &= 1 - q^{-1} \\ T(q^{-1}) &= R(q^{-1}) = r_0 + r_1 q^{-1} \end{aligned} \quad (12)$$

PI 제어기로 구성되는 전체 폐루프계의 펄스 전달연산자 $G_{cl}(q^{-1})$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{cl}(q^{-1}) &= \frac{T_q(k)}{r(k)} \\ &= \frac{B(q^{-1})R(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})} \\ &= \frac{B(q^{-1})R(q^{-1})}{P(q^{-1})} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $P(q^{-1}) = 1 + p_1 q^{-1} + p_2 q^{-2}$

이제 식(13)의 폐루프계가 요구되는 레귤레이션 특성을 갖도록 폐루프계의 극점을 선정하여 다항식 $R(q^{-1})$ 의 계수를 선정하여야 하므로, 레귤레이션 특성을 나타내는 다항식을 식(13)에서 $P(q^{-1})$ 라 할때 식(13)이 성립되도록 $R(q^{-1})$ 의 계수를 구하면, 식(9), (10), (13)으로부터 제어기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + r_0(r(k) - T_q(k)) \\ &\quad + r_1(r(k-1) - T_q(k-1)) \\ r_0 &= (p_1 - a_1 + 1) / b_1 \\ r_1 &= (p_2 + a_1) / b_1 \end{aligned} \quad (14)$$

그런데 식(14)에서 b_1 의 값은 시변이득 특성을 갖으므로 이를 순환 파라미터 적응 알고리즘⁽⁶⁾을 이용하여 실시간으로 예측함으로써 가공중 공작물 재질특성에 따라 변하는 플랜트의 파라미터 b_1 을 예측하여 제어를 수행하도록 한다.

이러한 적응제어 알고리즘을 적용함에 있어 a_1 은 기지의 값이므로 b_1 만을 예측하는 단일 파라미터 예측 알고리즘을 이용하였으며 예측 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{b}_1(k+1) &= \hat{b}_1(k) + f(k+1)u(k)\varepsilon^\circ(k+1) \\ f(k+1) &= \frac{1}{\lambda} \left[f(k) - \frac{f^2(k)u^2(k)}{\lambda + f(k)u^2(k)} \right] \end{aligned}$$

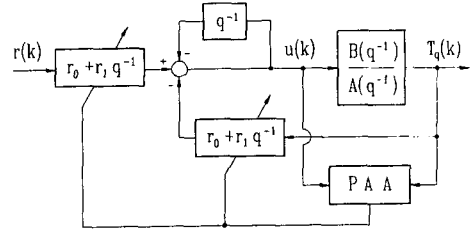


Fig. 2 Simplified block diagram of the adaptive PI controller

$$\begin{aligned} \varepsilon^\circ(k+1) &= T_q(k+1) - \hat{T}_q^\circ(k+1) \\ \hat{T}_q^\circ(k+1) &= -a_1 T_q(k) + \hat{b}_1(k)u(k) \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 f 는 $f(0) > 0$ 인 적응이득, ε° 는 예측오차, \hat{T}_q° 는 예측된 토크, λ 는 $0 < \lambda \leq 1$ 인 가중치이며 현재와 과거 데이터에 대한 중요도를 부과하는 척도가 되므로 플랜트의 특성에 따라 적절히 선정해야 한다. 이상으로 구성되는 전체 폐루프계의 블럭도가 Fig. 2에 제시되어 있으며 블럭 PAA(parameter adaptation algorithm)는 식(15)를 약식으로 표현한 것에 해당된다.

4. 시뮬레이션 및 실험

토크제어의 대상인 드릴과정은 Fig. 3와 같이 알루미늄(AL2024)과 강(S45C)으로 구성된 공작물을 직경 $\phi 10$ 과 $\phi 5$ 인 트윈스트 드릴로 가공할 경우에 해당된다. 실제로 이러한 공작물을 가공할 경우 재질의 절삭강성 특성에 따라 토크는 변동하게 되는 데 이에 대한 시뮬레이션을 위해 다양한 절삭속도

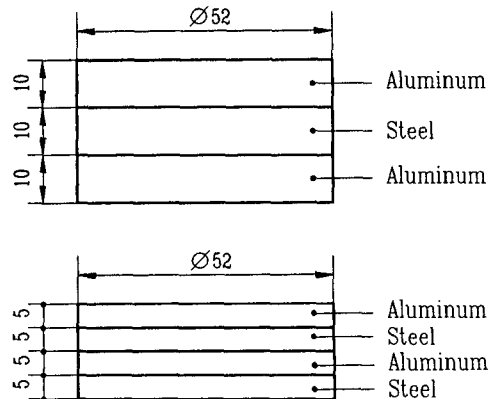


Fig. 3 Workpieces used in the experiments

로 알루미늄과 강을 가공할 경우 발생하는 토크에 대한 데이터를 수집하여 최소자승법을 이용하여 이송과 드릴직경의 지수함수 형태로 표현한 결과 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$T_q = C_1 f_d^{C_2} D^{C_3} \quad (16)$$

여기서 알루미늄(AL2024)의 경우 $C_1=17.79$, $C_2=0.35$, $C_3=1.21$ 이며 강(S45C)의 경우 $C_1=30.54$, $C_2=0.25$, $C_3=1.24$ 이다.

시뮬레이션시에는 식(16)을 이용하여 이송거리에 따른 공작물의 절삭강성변화를 고려하게 되는데, 드릴의 선단이 서로 다른 재질을 동시에 가공할 경우, 절삭강성의 변화는 드릴의 치즐끝과 마진까지의 구간에서만 변한다고 가정하여 변하는 절삭강성을 구하도록 한다. 이러한 절삭강성은 이송과 제어 입력의 지수함수형태로 표현되나, ⁽¹⁴⁾ 일차함수로 간주해도 양자 사이의 오차량이 작기 때문에 근사적으로 직선보간하였다. 따라서 식(3)에 제시된 절삭강성 K_s 를 구해 식(5)로 주어지는 플랜트의 계수를 구하는데 사용한다.

Fig. 4는 실험장치의 개략도이다. 스피들 회전속도는 직류 서보모터로써 정속제어되며, 드릴의 이송속도 또한 직류 서보모터로써 제어되어 절삭속도를 제어한다. 가공시 발생하는 토크는 스트레인 게이지형 공구동력계(Shinkoh, AST-BH)와 증폭기(Kyowa, DPM-305B)로써 측정되며 이는 엔티에일

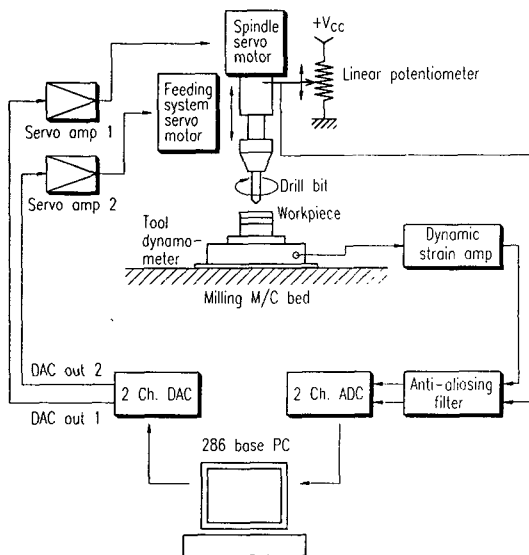
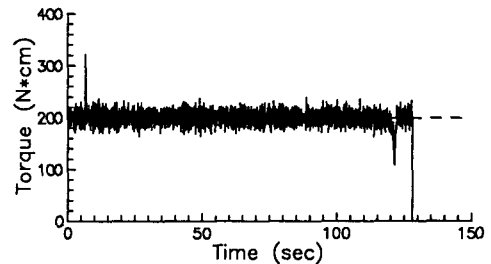
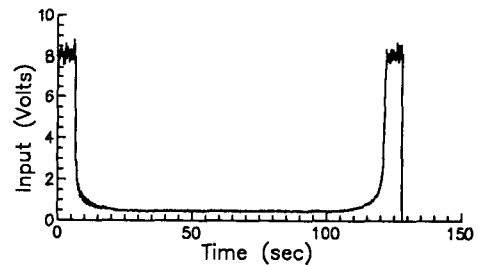


Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup

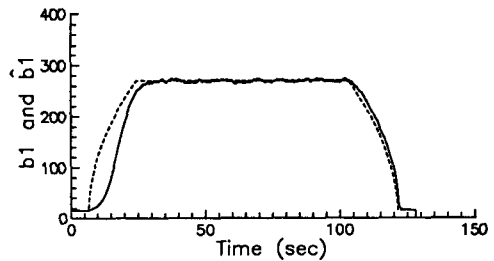
리어징(anti-aliasing) 필터를 거쳐 AD(analog to digital) 변환기로 입력되어 데이터 수집된다. 측정된 토크값과 제어력에 대한 정보를 이용하여 소프트웨어에 의한 디지털 제어가 구성된다. 계산된 제어입력은 DA(digital to analog) 변환기를 통하여 이송속도 제어용 서보콘트롤러에 추가되어 절삭속도를 변화시킴으로써 토크제어가 수행된다. 스피들 이송부에 장착된 직선운동형 포텐서미터는 제어시점과 가공중의 구멍깊이에 대한 정보를 제공하는



(a) Torque signal



(b) Control input to the servo controller of the feeding system

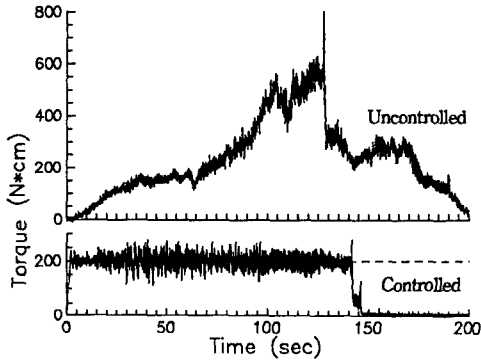


(c) Calculated (dotted line) and estimated (full line) value of b_1

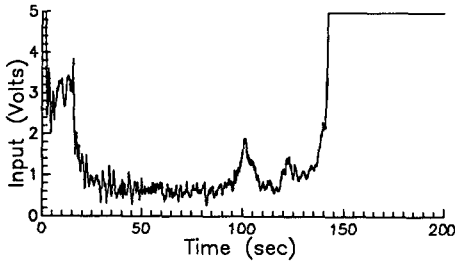
Fig. 5 Simulation results of the torque controlled drilling process in drilling a 3-layered workpiece($\phi 10$ twist drill, $\Omega=300$ rpm, ref. torque = 200 Ncm, $p(q^{-1}) = (1 - 0.6q^{-1})^2$, $f(0) = 100$, $\hat{b}_1(0) = 0.1$, $\lambda = 0.98$, output noise of $N(0, 100)$)

역할을 하며, 제어시의 샘플링 시간은 스피들의 1/4 회전시간으로 설정($n=2$)하였으며, 엔티앨리어징 필터는 주파수 대역이 샘플링 주파수의 1/2인 1차 필터를 사용하였다.

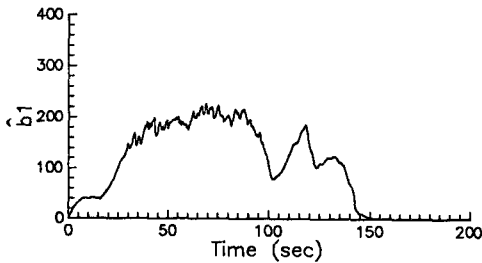
Fig. 5는 3층의 공작물을 $\phi 10$ 드릴을 사용하여 기준토크 200 Ncm, 출력토크에 평균 0, 분산 100의 정규분포를 갖는 잡음을 추가하여 토크제어를 통한 가공을 실시한 경우의 시뮬레이션 결과이다.



(a) Torque signal



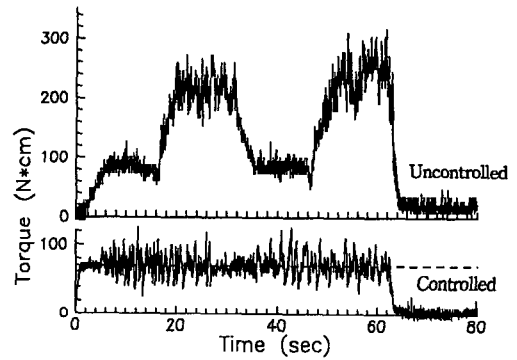
(b) Control input to the servo controller of the feeding system



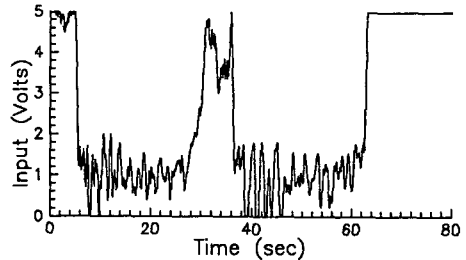
(c) Estimated value of b_1

Fig. 6 Experimental results of the torque controlled drilling process in drilling a 3-layered workpiece ($\phi 10$ twist drill, $\Omega=300$ rpm, ref. torque = 200 Ncm, $p(q^{-1})=(1-0.6q^{-1})^2$, $f(0)=100$, $\hat{b}_1(0)=0.1$, $\lambda=0.98$)

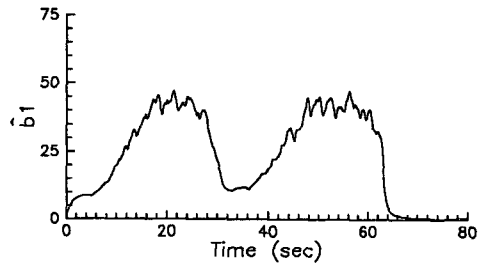
전체 페루프계의 동특성은 임계감쇠특성을 나타내도록 극점을 중근으로 선정하였다. 그림의 (a), (b)는 각각 토크, 이송속도 제어용 서보컨트롤러의 부가전압이며, (c)는 식(16)의 예측치 \hat{b}_1 (실선)과 식(16)을 이용해 구한 b_1 (점선)을 나타낸다. b_1 은 식(9)에서 절삭강성 K_s 와 관련된 상수이며 Fig. 3의 3층 공작물을 가공할때 (c)의 점선과 같이 그 값이 변화한다.



(a) Torque signal



(b) Control input to the servo controller of the feeding system



(c) Estimated value of b_1

Fig. 7 Experimental results of the torque controlled drilling process in drilling a 4-layered workpiece ($\phi 5$ twist drill, $\Omega=400$ rpm, ref. torque = 70 Ncm, $p(q^{-1})=(1-0.6q^{-1})^2$, $f(0)=100$, $\hat{b}_1(0)=0.1$, $\lambda=0.98$)

Fig. 6는 $\phi 10$ 드릴로 3층의 공작물을 가공한 경우의 실험결과이며 (a)는 PI 적응제어기로서 토크제어한 결과와 일정절삭속도(이송 : 0.033 mm/rev)로 가공한 경우의 토크변화특성을 나타낸다. 제어하지 않은 경우 가공된 구멍의 깊이가 증가해 갈수록 공작물 재질의 변화와 칩부스러기에 의한 마찰효과로 인한 토크의 변동이 나타남을 알 수 있다. 그러나 제어를 한 경우 공작물의 재질변화에 관계없이 일정토크로 가공이 가능하므로 드릴에 가해지는 토크의 변동을 방지하여 안정된 가공을 수행할 수 있다. 또한 가공시간의 면에 있어서도 강성이 작은 알루미늄의 가공시에는 절삭속도가 크게 부여되므로 약 30%의 가공시간의 단축효과가 있음을 알 수 있다. (b)와 (c)는 각각 제어입력과 예측치 \hat{h}_1 을 나타낸다. 제어입력의 최대치는 서보컨트롤러의 안전상 +5 Volts로 설정하였으며, 그림에서 140초 이후의 포화된 제어입력은 드릴이 공작물을 완전히 뚫고나와 최대의 이송속도로 이송됨을 나타낸다. 예측치 \hat{h}_1 은 공작물의 재질특성을 고려할 때 타당성이 있음을 알 수 있으나, 구멍의 깊이가 증가해 갈수록 마찰토크의 영향에 의해 재질의 절삭강성 특성과 다른 현상이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 $\phi 5$ 드릴로 4층의 공작물을 가공한 경우의 실험결과이며 (a)는 PI 적응제어기로서 토크제어한 결과와 일정절삭속도(이송 : 0.05 mm/rev)로 가공한 경우의 토크변화특성을 나타낸다. 제어를 통한 가공의 결과 토크의 급증현상을 방지하여 안정된 가공을 수행할 수 있다. 그리고 강(S45C)을 가공할 때의 절삭토크가 100 Ncm가 되기 위해선 이송을 작게 주어야 하며 이때에도 일정 절삭토크 100 Ncm으로 제어한 경우에 비해 가공시간이 증가될 것임이 명백하다. (b)와 (c)는 각각 제어입력과 예측된 값이며, 예측치 \hat{h}_1 은 재질의 특성을 고려할 때 타당함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 강성이 다른 재질로 구성된 공작물을 드릴가공할 때 발생하는 토크변동을 능동적으로 억제하여 안정된 가공을 수행하기 위한 것이며, 이를 위해 적응형 PI 제어기를 도입하였다. 제어대상인 드릴가공중의 토크는 이송속도를 제어하기 위한 제어력에 대하여 근사적으로 1차계로 모델링하였으며 이에 대한 제어기를 설계하여 적용하였다. 연구의

결과는 다음과 같다.

(1) 드릴가공중 토크의 이송속도(또는 제어력)에 대한 전달함수는 근사적으로 1차계로 모델링됨을 제시하였다.

(2) 복합강성 공작물을 가공할 경우 토크의 변동과 관계되는 파라미터를 실시간으로 예측하면서 제어를 수행한 결과 일정한 절삭속도로 가공할 경우에 비해 과대한 토크의 변동없이 안정된 가공을 수행할 수 있으므로 드릴가공시 공작물의 재질특성 및 가공할 구멍의 크기에 따른 절삭속도의 재설정 문제를 해결한 가공방법을 제시하였다.

(3) 절삭속도의 제어를 통하여 공작물의 재질특성에 따라 절삭속도의 유연한 자동변경으로 가공시간의 단축을 기할 수 있다.

참고문헌

- (1) Tverskoi M.M. and Poletaev, V.A. 1968, "Automatic Torque Stabilization When Drilling Deep, Small, Holes," *Machine & Tooling*, Vol. 39/8, pp. 37~39.
- (2) Tverskoi, M.M. and Zakamaldin, V.I. 1972, "Drilling Small Deep Holes with Torque Stabilization," *Machine & Tooling*, Vol. 43/8, pp. 15~16.
- (3) Tepinkichiev, V.K. and et al., 1972, "Over-Load Protection Device for Small Diameter Drills," *Machine & Tooling*, Vol. 43/12, p. 36.
- (4) Ulsoy, A.G. and et al., 1983, "Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools," *Trans. ASME, J. of Dyn. Sys. Meas. and Cont.*, Vol. 105, pp. 107~112.
- (5) Masory, O. and Koren, Y. 1985, "Stability Analysis of a Constant Force Adaptive System for Turning," *Trans. ASME, J. of Engr. for Ind.*, Vol. 107, pp. 295~300.
- (6) Landau, I.D. and Rozano, R. 1981, "Unification of Discrete Time Explicit Model Reference Adaptive Control Design," *Automatica*, Vol. 17, No. 4, pp. 593~611.
- (7) Tomizuka, M. and et al., 1983, "Model Reference Adaptive Control of the Milling Process," *The Winter Annual Meeting of the ASME*, Nov., pp. 55~63.

- (8) Kim, K. and Huang, S.D. 1992, "Implementation of Pole Placement Adaptive Controller of Non-Minimum Phase End Milling Operations," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 32/4, pp. 619~627.
- (9) Lauderbaugh, L.K. and Ulsoy, A.G. 1989, "Model Reference Adaptive Force Control in Milling," *Trans. ASME, J. of Engr. for Ind.*, Vol. 111, pp. 13~21.
- (10) Chen, B.S. and Chang, Y.F. 1991, "Robust PI Controller Design for a Constant Turning Force System," *Int. J. of Mach. Tools Manufact.*, Vol. 31/3, pp. 257~272.
- (11) Daneshmend, L.K. and Pak, H.A. 1986, "Model Reference Adaptive Control of Feed Force in Turning," *Trans. ASME, J. Dyn. Sys. Meas. and Cont.*, Vol. 108, pp. 215~222.
- (12) Watanabe, T. 1986, "A Model-Based Approach to Adaptive Control Optimization in Milling," *Trans. ASME, J. of Dyn. Sys. Meas. and Cont.*, Vol. 108, pp. 56~64.
- (13) Lee, G.B. 1989, *Digital Control for Burr Minimization in Drilling*, Ph. D Dissertation, UCB.
- (14) 김중배, 1992, 복합절삭강성 가공물의 드릴가공시 디지털 제어에 의한 일정축력제어, 박사학위논문, 연세대학교.
- (15) Furness, R.J. and et al., 1992, "Dynamic Modeling of the Thrust Force and Torque for Drilling," *Proc. of the 1992 American Control Conference*, pp. 384~390.
- (16) Armarego E.J.A. and Brown, R.H. 1969, *The Machining of Metals*, Prentice-Hall, pp. 189~200.
- (17) Wiriyaol, S. and Armarego, E.J.A. 1979, "Thrust and Torque Prediction in Drilling from a Cutting Mechanics Approach," *Annals of CIRP*, Vol. 28/1, pp. 87~91.
- (18) Franklin, G.F. and et al., 1986, *Feedback Control of Dynamic Systems*, Addison-Wesley, pp. 183.