

추정된 절삭력 신호를 이용한 선삭력 제어

허건수*, 김재옥**

Turning Force Control Based on the Estimated Cutting Force

Kunsoo Huh*, Jaeok Kim**

ABSTRACT

While a cutting tool is machining a workpiece at various cutting depth, the feedrate is usually selected based on the maximum depth of cut. Even if this selection can avoid power saturation or tool breakage, it is very conservative compared to the capacity of the machine tools and can reduce the productivity significantly. Many adaptive control techniques that can adjust the feedrate to maintain the constant cutting force have been reported. However, these controllers are not very widely used in manufacturing industry because of the limitations in measuring the cutting force signals. In this paper, turning force control systems based on the estimated cutting force signals are proposed. A synthesized cutting force monitor is introduced to estimate the cutting force as accurately as a dynamometer does. Three control strategies of PI, adaptive and fuzzy logic controllers are applied to investigate the feasibility of utilizing the estimated cutting force for turning force control. The experimental results demonstrate that the proposed systems can be easily realized in CNC lathe with requiring little additional hardware.

Key Words : cutting force (절삭력), tool dynamometer (공구동력계), AC induction motor (교류유도전동기), PI controller (PI 제어기), variable-gain adaptive controller (가변이득적응제어기), fuzzy logic controller (퍼지제어기)

1. 서론

최근 CNC 가공 공정에서 생산성을 향상시킬 수 있도록 절삭조건을 조절하는 일정 절삭력 제어가 중요시 되고 있다. 절삭력 제어는 가공 정도와 치수 정확성 향상, 공구 수명의 연장, 기계의 효율성 증대 등 여러 가지 이유에서 매우 중요하다. 그러나 생산성을 향상시킬 수 있는 선삭 공정의 절삭력 제어기는 산업 현장에서 아직까지 실용화 되지 못하고 있다. 이는 다양한 절삭 공정의 비선형적인 특성과 절삭력 신호 측정의 한계 때문이

다. 공장 기계의 절삭력은 공구 동력계로 직접 측정이 가능하다. 그러나 거친 기계적 환경에서 견딜 수 있는 공구 동력계의 가격이 매우 고가이고 제한된 주파수 대역폭에 따른 센서 기술의 문제점, 그리고 공구 동력계 설치로 인한 강성의 감소로 떨림 현상과 치수 오차 발생에 따른 가공 품질의 저하 등으로 인해 절삭력 측정에 어려움이 있다. 따라서 Spiewak⁽¹⁾와 Spiraish, Aoshima⁽²⁾는 한계가 많은 절삭력 직접 측정 방법 대신에 모델에 근거한 추정 방법으로 절삭력을 간접적으로 추정했다. 위의 방법은 스피들 드라이브나 이송 드라이브에 특별한 센서가 요구되나 Huh, et al.⁽³⁾은 특별한 센

* 한양대학교 정밀기계공학과

** 한양대학교 대학원

서가 따로 필요 없는 또 다른 방법을 제시하였다. 이 방법은 기존의 CNC 공작 기계에 이미 장착된 기본적인 센서의 출력을 이용하였으며 절삭력은 스핀들 드라이브 모델의 외란으로 고려되고 역동역학에 근거하여 추정하였다. 본 논문에서는 추정된 절삭력 신호를 이용한 절삭력 제어 시스템을 개발하고 그 타당성을 증명하였다. 정상상태 뿐만 아니라 과도상태에서 정확한 절삭력 추정을 위해 합성된 절삭력 감지방법을 제안하고 절삭력 제어를 위하여 세 가지 제어 방법을 이용하였다. 첫째는 공칭 동역학 모델로 설계된 PI 제어기를 적용하였다. 두 번째는 추정된 절삭력을 사용한 가변 이득 적응제어기를 적용하였다. 이 경우 추정된 절삭력 신호는 실제 절삭력 신호와 같다고 가정하고 모델 파라미터 또한 실제 파라미터와 동일하게 사용된다. 절삭력과 이송속도 사이의 동역학적인 관계는 공칭 모델로 나타내기에 너무 복잡하므로 마지막 제어 방법으로 퍼지제어기를 이용했다. 퍼지제어 규칙은 여러 번의 절삭 실험을 통하여 구성하였으며 표준적인 퍼지 PI 제어기를 구성하였다. 합성된 절삭력 감지 시스템과 세가지 제어 방법에서 추정된 절삭력과 이송속도는 제어 입력과 출력에 따라 민감하게 조절되고 CNC 선반에 컴퓨터를 연결하여 구성하였다. 그리고 각각의 제어 방법을 이용하여 추정된 절삭력 신호를 이용한 제어 성능과 측정된 절삭력 신호를 이용한 제어 성능을 비교하였다.

2. 연구 배경

지난 20 년 동안 많은 다른 절삭력 제어 기법이 개발되었고 구속적응제어는 기준 절삭력을 유지하기 위하여 계속 연구되었다(4,5). 모델 기준 적응 제어기는 기하학적인 고려(6)와 이송 서보 드라이브에 근거하여(7) 제시되었다. 다양한 절삭깊이와 스핀들 속도에서 안정성과 강인한 성능을 향상시키기 위해 절삭 공정의 비선형 특성을 고려한 강인한 제어기가 개발되었다(8). 비선형성과 시변인 절삭 공정에 현대 제어 기법인 신경망 기법(9), 출력 민감도 함수(10), 퍼지제어 이론(11)이 적용되었다. 그러나 추정된 절삭력 신호를 이용한 절삭력 제어 기법은 보고된 바가 거의 없다.

3. 절삭력 감지 방식

절삭력 신호의 온라인 실시간 정보는 절삭력 제어에 있어서 가장 중요한 요인이다. 이전 연구에서는 AC 스핀들 드라이브 모델을 이용한 절삭력 감지 시스템을 개발하였고 AC 스핀들 드라이브의 동역학적 모델과 측정된 전동기 출력 신호를 이용하여 절삭력을 온라인으로 추정하였다(3). 절삭력 추정 결과 정상 상태에서 오차는 평균 3% 이내로 추정하였고 과도 상태에서는 약간의 시간 지연(약 0.3 초)이 발생하였다. 여기서 시간 지연을 가지는 제어 변수는 제어 성능에 심각한 한계를 가져왔다. 절삭력 신호에서 시간 지연의 주요 원인은 측정된 출력 신호의 시간 지연이다. 왜냐하면 AC 전동기의 토크는 전동기 출력을 전동기 속도로 나눠 간단히 계산하므로 결과적으로 전동기 출력이 시간 지연으로 나타난다. 이 장에서는 과도 상태에서 추정 성능을 향상 시킨 합성된 절삭력 감지 방식을 제안한다. 모터 출력의 부적당한 측정이 시간 지연의 주요 원인이므로 AC 전동기의 특성을 사용하여 전동기 토크를 빠르게 추정하였다.

3.1 전동기 토크계산

AC 유도 전동기는 고정자에 3 상 전압이 인가되고 회전자에 유도전압이 발생하여 전류가 흐르면 이때 토크가 발생하여 전동기가 회전하게 되는 것이다. 여기서 전동기 출력 토크 T_e 는 회전자의 입력과 동기 속도로 표현할 수 있다(11).

$$T_e = \frac{P_g}{\omega_s} \tag{1}$$

여기서 ω_s 는 유도 전동기의 동기 속도이다. 전동기 공급 전력 P_g 은 전동기 입력 P_i 에서 고정자 손실 전력 값을 빼 준 값으로 나타낼 수 있다(11).

$$P_g = P_i - P_s = i_s^T v_s - i_s^T R_s i_s \tag{2}$$

- 여기서 P_i : 전동기 입력 전력
- P_s : 고정자 손실 전력
- i_s : 고정자 전류 = $[i_u \ i_v \ i_w]^T$
- v_s : 고정자 전압 = $[v_u \ v_v \ v_w]^T$
- R_s : 고정자 저항
- $i_u \ i_v \ i_w$: u, v, w 상의 고정자 전류
- $v_u \ v_v \ v_w$: u, v, w 상의 고정자 전압

델타권선으로 구성된 전동기에서 상전압은 선

전압과 같고 상전류는 선전류를 $1/\sqrt{3}$ 배이다. 일반적으로 AC 전동기의 입력은 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$P_i = \sqrt{3}I_{line}V_{line} \cos \phi \quad (3)$$

여기서 $V_{line} = \sqrt{\frac{1}{3}(v_u^2 + v_v^2 + v_w^2)}$

$$I_{line} = \sqrt{\frac{1}{3}(i_u^2 + i_v^2 + i_w^2)}$$

$\cos \phi$: 선전류, 선전압 사이의 위상차($\phi = \pi/6$)

절삭이 시작될 때를 제외하고 스핀들 모터가 정상 상태에서 일정한 속도로 회전할 경우 슬립율은 매우 작은 값이므로 0 이라 가정하면 (1)식은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$T_e \approx \frac{P_g}{\omega_M} \quad (4)$$

여기서 ω_M 은 전동기 속도이다. 절삭이 시작될 때 식 (2)에서 계산된 전동기 입력 값은 슬립율이 급격히 증가하므로 식 (4)로 대신하여 사용할 때 고려해야 한다.

3.2 절삭력 추정

AC 전동기의 출력 토크를 계산한 후 절삭력을 얻기 위한 추정 절차는 이전에 연구된 방법과 동일하고 자세한 설명은 Huh, et al.에 나와있다⁽³⁾. 3상 유도 전동기의 스핀들 드라이브의 모니터링 모델은 기계적인 부분(주축 드라이브)과 전기적인 부분(교류 유도 전동기)으로 구성되며 기본적인 모델식은 식(5)와 같다.

$$J \frac{d\omega_M}{dt} + B\omega_M = T_e - T_t \quad (5)$$

여기서 J : 모터에 의한 총 등가 관성 모멘트

B : 등가 감쇠 계수

T_t : 모터에 가해지는 총토크

위 방정식을 ZOH 를 적용하여 이산화 된 식으로 표현하면 총외부 토크 추정 알고리즘은 다음의 이산 방정식에 의해 구해진다.

$$\hat{T}_t(i) = T_e(i) - \frac{1}{b} \{ \omega_M(i) - \omega_M(i-1) \} - B\omega_M(i) \quad (6)$$

여기서 h 는 샘플링 시간(0.05 초)이고 b 는 모델 파라미터 $(= (1 - e^{-Bh/J})/B)$ 이다. 등가의 감쇠 계수는 온도의 변화에 민감하다고 알려져 있으므로 공구가 공작물에 닿기 바로 직전에 자동적으로 계산하도록 하였다⁽³⁾. 추정된 총외부 토크는 공작물에 작용하는 절삭 토크뿐만 아니라 스핀들 베어링의 비선형 마찰 토크도 포함한다.

$$\hat{T}_t = T_{fco} + \delta T_f + \hat{T}_c \quad (7)$$

여기서 \hat{T}_t : 모터에 가해지는 총토크

T_{fco} : 무부하시 쿨롱 마찰 토크

δT_f : 절삭 부하에 의한 마찰 토크 증가량

쿨롱 마찰 토크 T_{fco} 는 절삭을 하지 않는 무부하 정상 상태에서 결정할 수 있다. 추정된 총 외부 토크로부터 절삭 토크를 구하기 위하여 비선형 마찰 토크의 상세한 정보가 필요하므로 δT_f 와 \hat{T}_c 사이에 동역학적인 관계가 없다고 가정하면 비선형 마찰 토크는 다음과 같이 모델링 된다.

$$\delta T_f = f(\omega_M) \times \hat{T}_c + g(\omega_M) \times \hat{T}_c^2 \quad (8)$$

여기서 $f(\omega_M)$ 와 $g(\omega_M)$ 은 선반에 따른 전동기 속도 함수이다. 식 (1)과 식 (8)을 이용하면 추정된 절삭력은 그림 1 과 같이 나타난다. 기존 연구와 비교하면 추정된 절삭력은 과도 상태에서 아주 작은 시간 지연을 나타내고 정상 상태에서 진동이 심함을 알 수 있다.

3.3 합성된 절삭력 감지 방식

이전 연구⁽³⁾에서는 주축 드라이브로부터 전동기 출력과 전동기 속도를 측정하여 절삭력을 추정하였으나 과도 상태의 시간지연으로 성능이 부족하였다. 3.1 절과 3.2 절에서는 두개의 전류, 세 개의 전압 신호를 더 측정하는 수정된 감지기법으로 과도 상태에서 성능을 향상시켰으나 정상 상태에서 진동이 심하였다. 이 절에서는 두 기법의 장점을 조합하여 합성된 절삭력 감지 방식을 제안한다. 절삭의 시작과 끝을 알기 위해 식(2)에서 계산된 출력과 측정된 출력 사이의 차를 토대로 두 기법을 스위칭하고자 한다. 만약에 두 값의 차가 양수이고 임계값을 초과하면 절삭력 추정은 수정된 기법을 사용하고 슬립율을 고려하기 위하여 약 0.2초 정도 일정한 보상 값을 곱해준다.

$$\left| \frac{P_g(i) - P_o(i)}{P_o(i)} \right| > \Delta_{th} \quad (9)$$

여기서 P_o 와 P_g 는 측정된 출력과 계산된 출력을 각각 의미하고 Δ_{th} 는 그 차이의 임계값을 설정한다. 합성된 감지 방식으로부터 추정된 절삭력이 측정된 절삭력과 함께 그림 2 에 나타나 있으며 추정 성능이 정상 상태에서 뿐만 아니라 과도 상태에서도 만족함을 보이고 있다.

4. 절삭력 제어

절삭공정에서 절삭력은 절삭깊이, 스피indle 회전수, 절삭 소재, 공구조건에 관계없이 기준 절삭력을 유지하도록 조절 되어야 한다. 절삭력은 쉽게 측정할 수 없기 때문에 3 장에서 얻어진 추정된 절삭력 신호를 이용하고 기준 절삭력과 추정 절삭력 사이의 오차를 최소화 하기 위한 세가지 제어 기법(PI 제어, 적응 제어, 퍼지 제어)을 통해 이송 오버라이드를 계산한다. 절삭력 제어 시스템의 블록선도는 그림 3 에 나타나 있다. 이 장에서는 제어 기법을 통하여 추정된 절삭력을 이용한 절삭력 제어의 타당성을 검증하였다. 그리고 추정된 절삭력을 이용한 제어성능은 측정된 절삭력을 이용한 제어 성능과 비교했다.

4.1 PI 제어

선반의 절삭공정에서 PI 제어기 설계를 위하여 이송속도와 절삭력 사이의 동역학적 모델식이 필요하다. 따라서 절삭공정을 일차로 모델식으로 나타내면 식(10)과 같다⁽¹²⁾.

$$\frac{F_c(s)}{f(s)} = \frac{K_s a}{\tau_p s + 1} \quad (10)$$

여기서 F_c 는 절삭력, a 와 f 는 절삭깊이와 이송속도를 나타내고 모델 파라미터 K_s 와 τ_p 는 소재 재질과 공구, 절삭조건에 따른 상수이다. PI 제어기는 공칭모델로부터 설계하고 Ziegler-Nichols 방법을 사용하여 게인 값을 선정한다. CNC 선반의 이송 오버라이드 범위가 0~255%로 제한되어 있으므로 계산된 오버라이드 값이 한계값을 넘어갈 경우 시스템의 응답성이 매우 나빠지므로 Anti-windup

기능을 사용하여 시스템의 응답특성을 향상시켰다. 그림 3 의 제어기 블록에 적용하여 시스템을 제어 할 수 있다.

4.2 적응 제어

실제 절삭공정에서 식(10)의 파라미터들은 절삭 조건, 가공소재, 절삭공구에 따라 시변이고 비선형이다. 따라서 고전적인 제어 방법은 안정적인 제어기 성능을 확신할 수 없다. 따라서 제어 한계를 극복하기 위해 많은 적응제어 기법들이 개발되었다^(4-7,9,12,13).

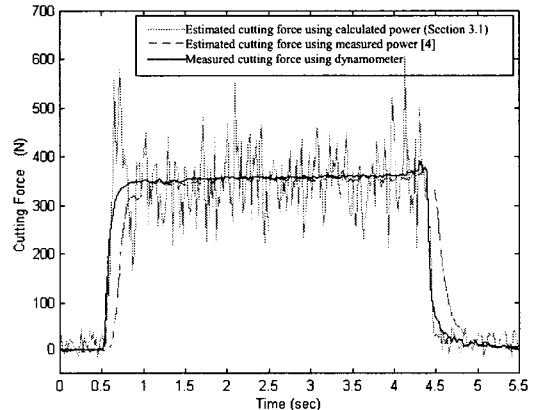


Fig. 1 Measured and estimated cutting force

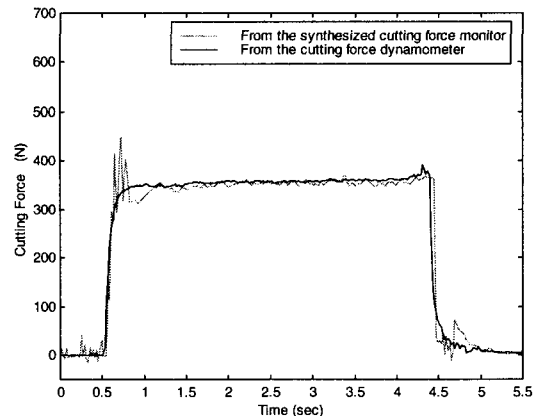


Fig. 2 Estimation from the synthesized monitor

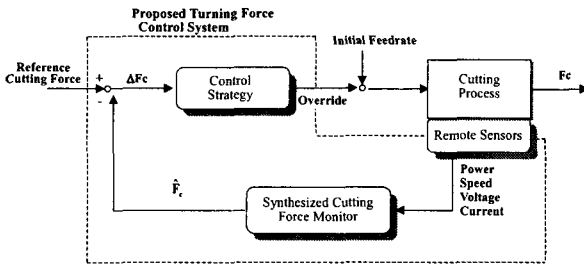


Fig. 3 The proposed turning force control system

이 논문에서는 추정된 절삭력을 사용한 절삭력 제어의 타당성을 검증하는 것이 목적이므로 추정된 절삭력을 사용할 수 있도록 Lin 과 Masory⁽¹³⁾가 제시한 가변이득 적응제어기를 약간 수정하여 사용하였다. 적응제어기는 기준 절삭력과 추정된 절삭력을 비교하여 절삭력 오차의 적분을 통해 이송 속도를 조절하는 피드백 루프로 구성하였다.

$$f(i) = f(i-1) + \bar{K}_c(i-1)h(F_r - \hat{F}_c(i)) \quad (11)$$

여기서 F_r 와 \hat{F}_c 은 기준 절삭력과 추정된 절삭력, h 와 \bar{K}_c 은 샘플링 시간과 가변이득 적응제어기 계인을 의미한다. 제어기 계인을 계산하기 위하여 추정된 절삭력이 실제 값과 같다는 가정하에 절삭공정의 정적인 계인들은 추정된다. 정적 계인이 추정된 후 제어기 계인 \bar{K}_c 는 일정한 개루프 계인을 따라가도록 조정되고 제어시스템의 안정과 최적화된 성능을 위해 제어 계인을 최적화된 변수로 추정하여 사용한다. 그림 3 의 블록선도에서 제어기 블록부분을 적응제어기로 대체하여 사용한다.

4.3 퍼지 제어

이송속도의 변화에 따른 절삭력의 특성은 매우 비선형적이고 시변이므로 퍼지 제어를 적용하였다⁽¹⁰⁾. 퍼지 제어기는 특별한 수학적 모델이 필요 없이 입출력 정보만 가지고 결정된다. 퍼지 제어기의 기본 구성은 퍼지화부, 퍼지제어 규칙부, 퍼지 추론부, 비퍼지화부로 되어 있다. 퍼지화는 측정된 데이터의 명확한 값을 퍼지집합론을 기본으로 하는 수치적인 입력 값으로 변화한다. $e, \Delta e, \Delta u$ 는 기준 절삭력과 측정 절삭력 사이의 오차와 오차의 변화량 그리고 이송 오버라이드이며 삼각형 소속 함수를 사용한다. 제어 입력인

e 와 Δe 를 퍼지화 대표값으로 바꾸어 주고 제어 출력인 Δu 를 비퍼지화 대표값으로 바꾸어 주기 위해 스케일 계수를 선정한다. 입력 변수와 출력 변수 사이의 관계를 퍼지 제어 규칙으로 구성하며 절삭력 오차와 오차의 변화율에 의해 이송 오버라이드의 크기가 결정된다. 퍼지 추론법으로는 만다니 퍼지 암시 방법⁽¹⁴⁾을 사용하고 있다. 비퍼지화는 퍼지값으로 되어 있는 출력값을 실제 적용할 수 있는 명확한 출력 값으로 바꾸어 준다. 비퍼지화는 만다니 추론법에서 주로 사용하는 무게 중심법을 사용하였다. 퍼지 제어기는 그림 3 의 제어기 블록에 적용하여 구성할 수 있다.

5. 성능 평가

선반의 절삭력 제어 시스템의 실험장치를 그림 4 에 간략하게 나타내었다. 절삭력 실험은 통일중공업의 TSL_6UM CNC 선반을 사용하였고 공구동력계는 Kistler 5019A 전하증폭기를 가진 Kistler 9121 모델로 실제 절삭력을 측정하는데 사용되었다. 절삭력 추정과 제어에 이용한 신호는 AC 전동기의 속도, 출력, 입력전류(i_u, i_v), 입력전압(v_u, v_v, v_w) 이고 모든 신호는 기존의 선반에 장착된 스피들 드라이브에서 직접 측정하였다. 모든 신호는 1kHz 의 샘플링과 100Hz 의 필터링을 하고 평균을 취해 20Hz 신호로 계산하였다. 이송속도 오버라이드는 8 비트 디지털 신호로 0~255%까지 1%단위로 제어된다. 기준 절삭력은 500N 으로 설정하고 절삭깊이를 1mm 로 가공하다가 중간에 깊이가 1.5mm 로 급격하게 변하는 경우 4 장에서 제시한 세가지 제어방법을 이용하여 제어된 절삭력 결과를 구했다. 이중에 4.2 절의 적응제어 결과는 그림 5, 6 에, 4.3 절의 퍼지 제어기는 그림 7, 8 에 각각 있으며 추정된 절삭력을 이용하는 경우와 측정된 절삭력을 이용하는 절삭력의 제어결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서 추정된 절삭력을 이용한 선반의 절삭력 제어 시스템은 측정된 절삭력 제어와 거의 같은 성능을 보여준다고 할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 선반에서 추정된 절삭력 신호를 이용하여 절삭력 제어의 타당성을 증명하였다. 정

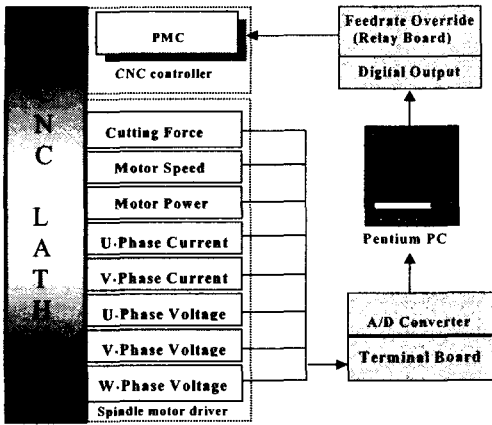


Fig. 4 Experimental set-up

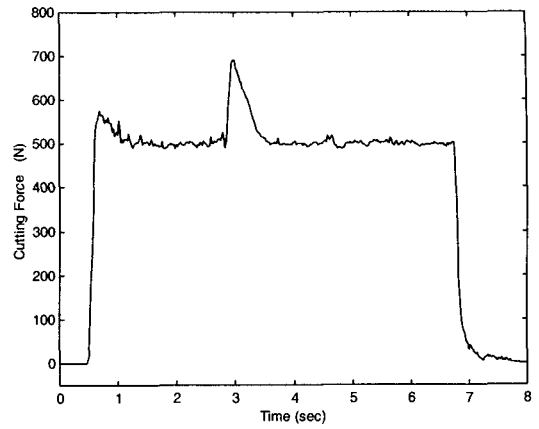


Fig. 7 Fuzzy logic control with the measured cutting force

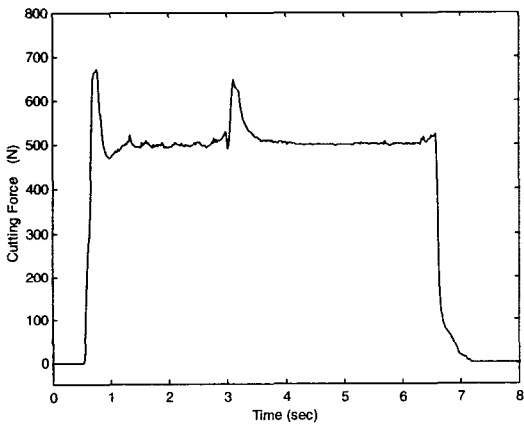


Fig. 5 Adaptive control with the measured cutting force

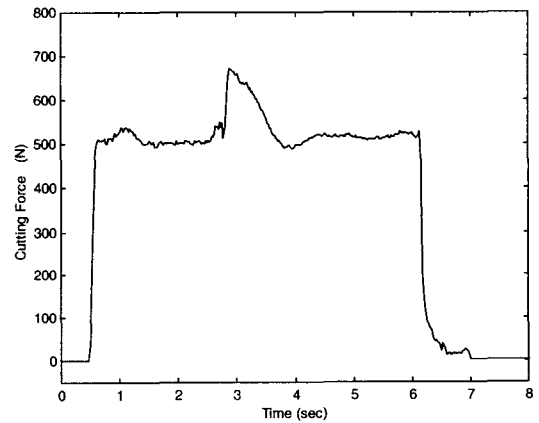


Fig. 8 Fuzzy logic control result with the estimated cutting force

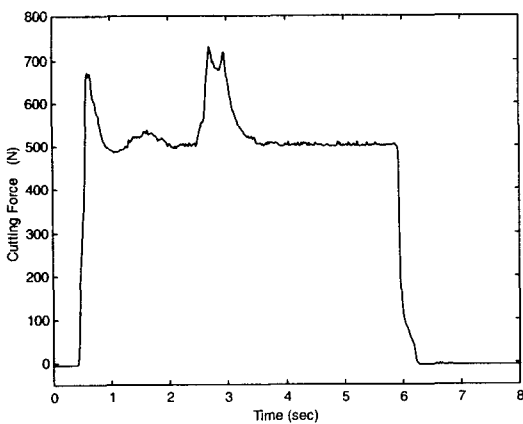


Fig. 6 Adaptive control with the estimated cutting force

상상태뿐만 아니라 과도상태에서 절삭력을 잘 추정하기 위해 합성된 절삭력 감지 방식을 제시하고 추정 절삭력을 이용하여 PI 제어, 적응제어, 퍼지 제어를 통해 기준 절삭력을 유지하도록 제어했다. 각 제어방법을 CNC 선반에 적용하고 측정된 절삭력을 이용한 제어성능을 비교하였다. 실험 결과 추정 절삭력 제어가 측정 절삭력 제어보다 오버슈트가 조금 크고 정착시간이 조금 긴 것으로 나타났다. 그러나 제안된 제어 시스템은 기존 선반에 장착된 것 외에 또 다른 하드웨어를 요구하지 않고 CNC 선반에서 온라인 실시간으로 쉽게 장착할 수 있다. 따라서 선반의 추정된 절삭력을 이용한 절삭력 제어 시스템은 가까운 미래에 쉽게 실용화

할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Spiewak, S.A., "Acceleration based indirect force measurement in metal cutting processes," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-17, 1995.
2. Shiraish, M. and Aoshima, S., "Sensorless in-process measurement of instantaneous depth of cut and cutting force in turning," *Proc. American Control Conf.*, pp. 155-159, 1997.
3. Huh, K., Jung, J. and Lee, K., "A Cutting Force Monitoring System based on AC spindle Drive," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 3013-3017, 1998.
4. Ulsoy, A. G., Koren, Y. and Rasmussen, F., "Principal developments in the adaptive control of machine tools," *ASME J. Dynamic Syst. Measurement and Control*, Vol. 105, No. 2, pp.107-112, 1983.
5. 김기대, 권원태, 주종남, "주축모터 전류를 통한 절삭력의 간접 측정 및 절삭력 추종 제어," *한국정밀공학회지 제14권 제10호*, pp.15-27, 1997.
6. Tomizuka, M. and Zang, S., "Modeling and conventional / adaptive PI control of a lathe cutting process," *ASME J. Dynamic Syst. Measurement and Control*, Vol. 110, No. 4, pp. 350-354, 1988.
7. Daneshmend, L.K. and Pak, H.A., "Model reference adaptive control of cutting force turning ," *ASME J. Dynamic Syst. Measurement and Control*, Vol. 180, No. 3, pp. 215-222, 1986.
8. Hwang, C.L., "Adaptive turning force with optimal robustness and constrained feed rate," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 33, No. 3, pp. 483-493, 1993.
9. Huang, S. and Chiou, K., "The application of neural networks in self-tuning constant force control," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 36, No. 1, pp. 17-31, 1996.
10. Carillo, F.J. and Rotella, F., "A robust adaptive controller for constant turning force regulation," *Control Eng. Practice*, Vol. 5, No. 12, pp. 1673-1682, 1997.
11. Hsu, P. and Fann, W., "Fuzzy adaptive control of machining processes with a self-learning algorithm," *ASME J. Manufact. Sci. Eng.*, Vol. 118, No. 4, pp. 522-530, 1996.
12. Nassa, S.A. and Unnewehr, L.E., *Electromechanics and Electric Machines*, 2th Ed., John Wiley and Sons, 1983.
13. Koren, Y., "Control of Machine Tools," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 749-753, 1997,
14. Lin, S.B. and Masory, O., "Gains Selection for a Variable Gain Adaptive Control System for Turning," *ASME J. Eng. Industry*, Vol. 109, No. 4, pp. 399-403, 1987.
15. Lin, C.T. and Lee, C.S.G., *Neural Fuzzy systems*, Prentice Hall, 1996.