

## 다이아몬드 터닝 머시인의 극초정밀 절삭공정에서의 시스템 규명 및 제어

### System Identification and Admittance Model-Based Nanodynamic Control of Ultra-Precision Cutting Process

정 상 화\*, °김 상 석\*\*, 오 용 훈\*\*

\* 조선대학교 기계공학과, 수송기계부품 공장자동화 연구센터  
\*\* 조선대학교 대학원 기계공학과

**Abstracts** The control of diamond turning is usually achieved through a laser-interferometer feedback of slide position. If the tool post is rigid and the material removal process is relatively static, then such a non-located position feedback control scheme may suffice. However, as the accuracy requirement gets tighter and desired surface contours become more complex, the need for a direct tool-tip sensing becomes inevitable. The physical constraints of the machining process prohibit any reasonable implementation of a tool-tip motion measurement. It is proposed that the measured force normal to the face of the workpiece can be filtered through an appropriate admittance transfer function to result in the estimated depth of cut. This can be compared to the desired depth of cut to generate the adjustment control action in addition to position feedback control. In this work, the design methodology on the admittance model-based control with a conventional controller is presented. The recursive least-squares algorithm with forgetting factor is proposed to identify the parameters and update the cutting process in real time. The normal cutting forces are measured to identify the cutting dynamics in the real diamond turning process using the precision dynamometer. Based on the parameter estimation of cutting dynamics and the admittance model-based nanodynamic control scheme, simulation results are shown.

**Keywords** Diamond Turning Machine, Admittance Model, Nanodynamic Control, Modulation, System Identification

## 1. 서 론

일반적으로 다이아몬드 터닝 머시인은 레이저 간섭계의 피드백 신호로 위치제어하고 있다. 이 제어기법은 피드백 신호가 공구와 가공공정에 부수되는 동적특성을 고려하지 않는 문제점을 가지고 있다. 공구가 진동이 없고 가공공정이 상대적으로 정적으로 간주된다면, 이 위치 피드백 제어기법으로 충분하다. 그러나 보다 정밀한 가공정도가 요구되어지고 가공형상이 복잡해짐에 따라 직접적인 공구 선단의 미세 변위 측정이 요구된다. 실제로 공구 선단의 운동 위치를 직접 측정하기는 매우 어렵기 때문에, 가공면에 수직인 미세한 절삭력을 측정하여 가공깊이를 예측하는 여러 가지 모델이 제안되고 있다. 이 예측된 가공깊이는 원하는 가공깊이와 비교되고, 위치피드백 제어에 부가하여 제어입력을 미세하게 조절할 수 있다. 이 모델을 설정하기 위하여 가장 중요하게 고려되어야 할 변수중의 하나는 가공공정에서 공구에 작용되는 공구 미세 절삭력이다. 이 미세절삭력으로부터 가공 공정 및 다이아몬드 공구 상태 그리고 공작물의 재질에 대한 정보를 얻을 수 있다. Moriwaki 와 Tlustý는 절삭 다이내믹스와 절삭공정의 기계적 구조에 대한 이론적 모델을 제안하였으며, 그러한 모델에 대해 실험적으로 증명을 하였다.<sup>(3,4)</sup> 다이아몬드 터닝 공정에 대해, Luttrell과 Dow는 최초로 간단한 스프링과 댐퍼로 이루어진 모델을 가정함으로써 상호 동적 관계에 대한 수학적인 모델을 제시하였으며, 공작물의 재질과 공구의 마모 상태를 다른 절삭조건에서 실험함으로써 절삭 공정 다이내믹스의 매개변수들을 실험에 의해 구하였다.<sup>(2)</sup> 그러나 표면 거칠기를 개선하기 위한

절삭력 기초(force-based) 제어에 대한 연구는 아직 수행되지 않았다. 그러므로, 본 연구의 목적은 절삭력에 기초한 피드백 제어 기법을 이용하여 극초정밀 터닝 작업의 표면 거칠기를 개선시키는 제어기법을 제시하는 것이다. 피드백 신호는 공구 끝부위에 힘 센서를 부착하여 측정되는 수직절삭력과 공구와 공작물사이의 위치정보에 의해 얻어질 수 있다. 미세절삭력 피드백 신호를 기존의 위치제어계에 부가하는 것은 단지 위치 제어 자체만으로 작동되는 시스템보다 표면 정밀도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 실제 다이아몬드 터닝 공정에서 정밀 다이내모미터(dynamometer)를 부착하여 미세 절삭력을 측정 후 절삭공정에서의 다이내믹스를 최소자승법(least-squares algorithm)을 써서 시스템을 규명하였으며, 미세절삭력을 이용한 나노다이내믹(nanodynamic) 제어의 첫 단계로서 오버랩핑 절삭조건이 고려된 어드미턴스 모델을 제시하였다. 또한 PI 제어기를 적용하여 표면 정밀도 향상에 대한 성능을 수치실험을 통하여 비교하였다.

## 2. Admittance Model-Based Feedback Control

실시간으로 Nanodynamic-level의 표면거칠기를 직접 측정할 수 없기 때문에, 어드미턴스 모델의 기본적인 개념은 미세절삭력의 피드백 신호로부터 표면거칠기를 추정하여 위치제어루프에 피드백신호로 이용하는 것이다. 피드백 경로에 있어서 어드미턴스 모델의 역할은 정확한 공구위치 오차신호를 구하기 위하여 미소 절삭력의 변화와 표면거칠기의 관계를 정립하는 것이다. 본 연구에서는 다이아몬드 터닝 머시인의 극초정밀 제어의 초기

연구로서 절삭방향과 수직인 Z-방향에 관한 오버랩핑(overlapping) 절삭에서의 어드미턴스 모델을 스프링-댐퍼 시스템에 적용하여 제안하였다

### 2.1 Overlapping Factor

일반적으로 절삭공정의 면가공 공정은 오버랩핑(overlapping) 절삭으로 이루어지며 Fig.1에 오버랩핑 절삭의 도식적 그림을 나타내었다.

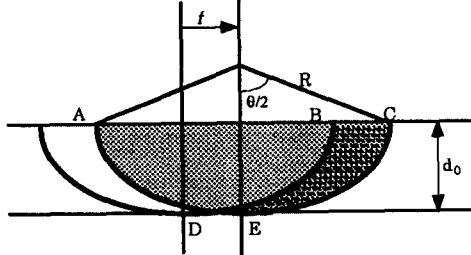


그림 1. 오버랩핑 절삭  
Fig. 1 Overlapping cutting

오버랩핑 계수  $\mu$ 는 다음과 같은 4개의 변수를 가진 함수 식으로 추론할 수 있다.

$$\mu = f(R, v_p, d_o, f_r) \quad (1)$$

여기에서 R은 공구 반지름,  $v_p$ 는 스피indle 속도,  $d_o$ 는 절삭깊이,  $f_r$ 은 피이드율(feed rate)을 나타낸다. 식 (1)을 고려하여 오버랩핑 계수  $\mu$ 는 Fig.1으로부터 다음과 같이 쉽게 결정할 수 있다.

$$\mu = \frac{\text{Area}(AEC) - \text{Area}(BCED)}{\text{Area}(AEC)} \quad (2)$$

### 2.2 Admittance Model with Overlapping Factor

어드미턴스 모델을 이용한 피드백 제어의 주요한 요소는 가공조건과 가공물의 재질 및 공구의 마모정도를 고려한 일반적인 어드미턴스 모델을 개발하는 것이다. 이 모델의 기본적 개념은 공구와 공작물 사이의 동적모델을 스프링-댐퍼 시스템을 가정하여 예측하며 내부 루프(inner loop)를 두어 제어하는 것이다. Fig.2에서 나타낸 바와 같이 k번째에서 가공될 칩 두께(uncut chip thickness)  $u(k)$ 는 미리 주어진 가공깊이(preset depth-of-cut)  $d_o$ , 외부 모듈레이션(outer modulation)  $x_o(k)$ 와 내부 모듈레이션(inner modulation)  $x_i(k)$ 로 인해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(k) = d_o + x_o(k) - x_i(k) \quad (3)$$

$x_o(k)$ 와  $x_i(k)$ 는 미지변수(unknown variables)이고  $x_i(k)$ 는 공구 선단의 운동을 나타낸다. 칩두께  $u(k)$ 와 절삭력  $F_z$ 의 관계가 바로 어드미턴스 모델이다. Z-방향  $F_z(k)$ 는 오버랩핑 절삭 요소에 의해 결정되는 공구 끝부분에서의 절삭 표면의 면적에 비례한다. 오버랩핑 절삭에서의 어드미턴스 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_z(k) = C [x_o'(k) - x_i'(k)](1 - \mu) + K [d_o + x_o(k) - x_i(k)](1 - \mu) \quad (4)$$

상대적인 미세 절삭력 변화량  $F_z(k)$ 가 측정되면,  $x_o(k) - x_i(k)$ 는 식 (4)의 어드미턴스 모델에 의하여 산출될 수 있다. 대부분의 면절삭 공정에서는,  $x_o(k)$ 는 바로 전의 절삭을 나타내므로 두 모듈레이션(modulation) 사이의 관계는 다음과 같다.

$$x_o(k) = x_i(k)z^{-d} \quad (5)$$

여기에서 d는 공구의 1회전 후의 time step 이다. 위의 두 식에 의하여  $F_z(k)$ 를 측정하면  $x_o(k)$ 와  $x_i(k)$ 를 산출할 수 있다.

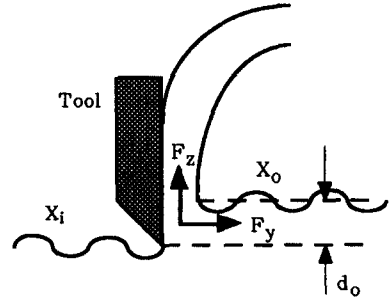


그림 2. 공구-공작물 접촉 영역 모델  
Fig. 2 Tool-workpiece interface model

### 2.3 온라인 패루프 제어

기존의 제어기를 포함한 어드미턴스 모델을 이용한 제어 구조는 Fig.3에서 나타내었다. PI 제어기의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$C(z^{-1}) = \frac{(k_p + k_i) - k_p z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (6)$$

여기에서,  $k_p$ 와  $k_i$ 는 각각 비례 제어 이득과 적분 제어 이득이다. 개루프 이득을 변화 시킴으로써 얻어지는 근 궤적 선도는, 만약 PI 제어기의 영점이 설정되어 진다면, 전달함수  $G_{open}(z^{-1}) = A(z^{-1})P(z^{-1})C(z^{-1})$ 에서 얻어질 수 있다. PI 제어기의 영점을 선정하면  $k_p$ 와  $k_i$  사이의 상대적 진폭을 결정할 수 있다. 근 궤적 선도와 시뮬레이션 실행을 기초로하여 PI 제어기의 영점은 0.6에 배치하였다. 일반적으로, PI 제어에서  $k_p$ 는  $k_i$ 보다 더 크다. 이러한 작업으로부터, PI 제어기의 비례이득을 10으로 선택하였다.

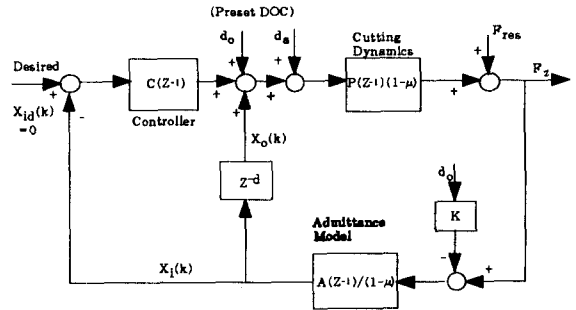


그림 3. Z축 어드미턴스 모델을 이용한 제어 기법  
Fig. 3 Z-direction admittance model-based control scheme

## 3. 반복 최소 자승법 (Recursive Least-Squares Algorithm)

다이아몬드 터닝머시인의 동적해석은 시간과 절삭조건에 의해 변화되므로 실시간에서 실제 절삭공정에 대한 좀더 정확한 모델을 얻기 위해서는 시변 매개변수를 시간에 따라 순환적으로 규명(identification)하는 것이 필요하다. 따라서 좀더 효율적인 어드미턴스 모델의 설계는 표편정밀도를 향상시키기 위해 나노다이 나믹(nanodynamic) 제어가 절실히 요구된다. 이 절에서는 exponential forgetting을 가진 순환 최소자승법<sup>(1)</sup> 기초로 하여 미세 절삭공정에서의 매개변수들에 대한 실시간상에서 시스템

동정에 대하여 설명된다. Fig.4은 exponential forgetting을 가진 추정기(estimator)를 이용한 시스템 동정의 블록선도를 나타내고 있다. 다이아몬드 터닝의 절삭공정은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$P(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} \quad (7)$$

여기에서,  $a_1$ ,  $b_0$  와  $b_1$ 은 미지의 매개변수들이고 플랜트 입력과 실제 측정된 절삭력 데이터를 이용하여 순환 최소자승법으로부터 결정되어질 수 있다. forgetting factor( $\lambda$ )을 고려한 순환 최소자승법(recursive least-squares method)은 다음과 같다.<sup>(1)</sup>

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + m(k)e(k) \quad (8)$$

$$m(k) = p(k-1)\Phi(k)(\lambda I + \phi(k)p(k-1)\Phi(k))^{-1} \quad (9)$$

$$p(k) = (I - m(k)\Phi^T(k))p(k-1) / \lambda \quad (10)$$

$$e(k) = Fz(k) - \Phi^T(k)\hat{\theta}(k-1) \quad (11)$$

여기에서  $p(k)$ 은 이득행렬(gain matrix)이고,  $I$ 는 단위행렬,  $m(k)$ 는 식에 사용되는 변수,  $e(k)$ 는 측정치와 추정치 사이의 에러이고,  $\Phi$ 는 측정값으로부터 얻어진 regressor vector이다. 식(7~11)로부터 미세 절삭가공 공정에서의 매개변수인  $\hat{\theta}(k) = [a_1 \ b_0 \ b_1]^T$ 를 규명할 수 있다.

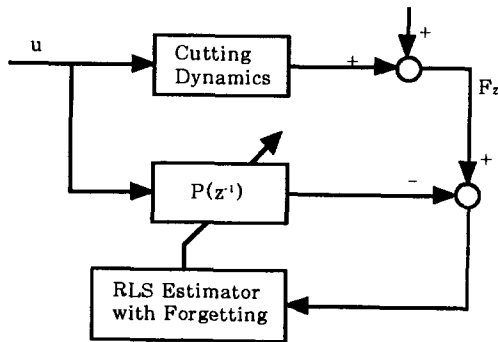


그림 4. 시스템 규명의 블록 선도  
Fig. 4 Block diagram of system identification

#### 4. 실험을 통한 절삭공정 시스템 규명

다이아몬드 절삭 공정의 시스템 규명(system identification)을 위하여 삼성전자가 설치되어 있는 다이아몬드 터닝 머시인을 이용하여 정밀 다이내모미터(dynamometer)로부터 실제 절삭공정에서 미세 절삭력을 측정하였다. 실험에 사용된 장비 및 기기는 Table 1에 나타내었다.

표 1. 실험 장비 및 기기

Table 1. Specification of apparatus and instruments

Apparatus	Model
Diamond Turning Machine	RTH Nano Form 300
Dynamometer	KISTLER 925713
Charge Amp.	KISTLER Multi Channel Charge Amp. 5019A
FFT Analyzer	Hp 35670A
조도측정기	Ikegami PM-930A

본 연구에서 사용되어진 실험 절삭조건을 Table 2에 나타내었다.

그림 2. 절삭조건

Table 2. Basic set of cutting conditions

Material : Copper	Cutting Speed : 774mm/sec
Spindle Speed : 17.2 rps	Starting Radius of workpiece : 45 mm
Cutting Depth : 6 $\mu$ m	Feed Rate : 100 $\mu$ m / sec
Infeed Rate : 5.8 $\mu$ m / rev	Tool Radius : 0.8 mm
Overlapping factor : 0.98	Residual force ( $F_{res}$ ): 0.08 N
d : 174 time step	

Table 2의 절삭조건에서 미세 절삭력을 측정하여 절삭공정의 전달함수를 식 (7~11)으로부터 MATLAB 프로그램으로 구하였으며, 매개변수의 추정된 값들은 Fig.5에 나타내었다. Fig.5에서  $\lambda=0.9$ 일때 계산된 매개변수들은 매우 빠르게 수렴함을 알 수 있으며, 1차 모델에서의  $b_0$ 는 Fig.5에서 보여지는 것과 같이 regressor vector의 초기값의 특성으로부터 다른 매개변수들보다 더 빨리 수렴함을 알 수 있다.

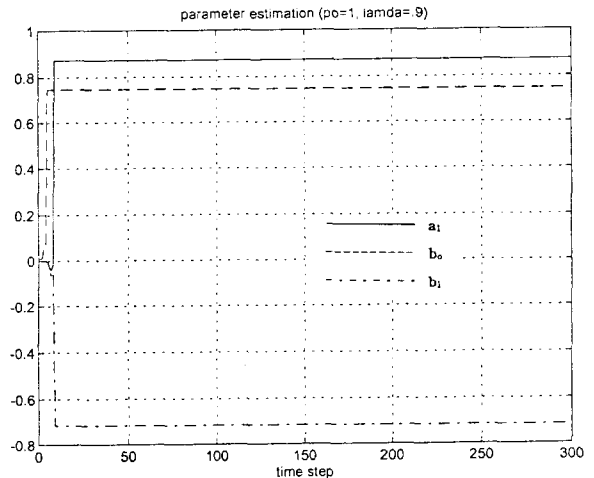


그림 5. RLS 규명기를 이용한 매개변수 추정  
Fig. 5 Parameter estimation using RLS identifier

#### 5. 수치실험 결과 및 고찰

다이아몬드 터닝의 오버랩핑 절삭공정을 삼성전자가 실험한 실험 데이터를 이용하여 시스템을 규명하고, 제안된 어드미턴스 모델을 이용한 극초정밀 제어 알고리즘을 MATLAB을 이용하여 수치실험하였다. 다이아몬드 터닝의 실험 데이터로부터 추정된 절삭공정 다이내믹스는 Fig.5에서 구한 매개변수 값으로부터 다음과 같이 1차식으로 주어진다

$$P(z^{-1}) = \frac{0.7470 - 0.7164z^{-1}}{1 - 0.8725z^{-1}} \quad (12)$$

$z$ 축 미끄럼 구조 진동으로부터 온 입력 외란,  $d_n$ 는 17Hz, 52Hz, 86Hz, 113Hz 그리고 120Hz에서 지배적인 주파수를 가지고 있는 colored 저주파수 잡음으로 가정하였다. 작은 진폭을 가지고 있는 랜덤 white noise를 실제 절삭 공정에 좀더 근접한 모델을 구하기 위하여 colored 잡음에 첨가하였다. PI제어기에서의

최대 비례 게인은 10으로 선택하였다. 샘플링 주파수를 5KHz로 하였으며 이산시간계 페루프 시스템에서의 응답은 각각의 어드미턴스 모델을 가진 비례-적분 제어(PI Control) 시스템에 대하여 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시스템 입력이 외란이 있고 절삭 깊이 6 $\mu$ m일때 Z 방향의 절삭력  $F_z$  과 내부 모듈레이션(inner modulation),  $x_i$ 는 Fig.6에서 나타내었다. 점선은 개루프 응답을 나타내고, 실선은 PI로 제어된 시스템 응답을 나타내고 있다. Fig.6는 어드미턴스 모델을 이용하여 정밀도가 향상되었음을 나타내고 있다. Fig.7과 Fig.8에 나타낸 바와같이 오버랩핑 절삭공정에서 어드미턴스 모델을 이용한 실시간 피드백제어를 적용함으로써 표면 내부 모듈레이션 (inner modulation)의 RMS 값과 P-V (peak to valley)값은 현저하게 개선되었다. Fig.7에서, 입력외란(input disturbance)만 시스템에 작용할 때 RMS값이 페루프 제어를 통하여 34% 향상되었음을 나타내고 있으며, P-V 값은 약 33% 향상되었다. Fig.8은 절삭공정에서의 입력이 입력외란이 있는 6 $\mu$ m의 절삭깊이로 주어질 때 RMS 값과 P-V값이 각각 51%와 72%로 향상되었음을 나타낸다.

## 6. 결 론

다이아몬드 터닝의 오버랩핑 절삭공정에서의 표면정밀도는 어드미턴스 모델을 이용한 On-line 페루프 제어를 적용함으로써 크게 향상됨을 알 수 있다. 이 연구에서는 어드미턴스 모델을 이용한 페루프 극초정밀 제어의 첫번째 시도으로써, 어드미턴스 모델에 의하여 유추된 표면거칠기를 추정하여 피드백 제어의 실현가능성을 보여주었다. 실제 실험 데이터로부터 추정된 가공공정 시스템에 어드미턴스 모델을 이용한 나노다이나믹 제어의 시뮬레이션 결과는 이 새로운 알고리즘에 의한 제어 기법의 적용으로 표면 정밀도가 크게 향상되었음을 보여주었다.

## 감사의 글

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME 95-D-16)에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

- [1] Astrom, K. J. and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison Wesley, 1989.
- [2] Luttrell, D. E. and T. A. Dow, "A Proposed Method for Identifying the Dynamics of Single Point Diamond

- Cutting", *Precision Engineering Center Annual Report*, Vol. 5, pp. 171-185, 1987.
- [3] Moriwaki, T. and K. Iwata, "In-Process Analysis of Machine Tool Structure Dynamics and Prediction of Machining Chatter", *Jour. of Eng. for Industry*, pp. 301-305, 1976.
- [4] Tlusty, J., "Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics", *Annals of the CIRP*, Vol 27 [2], pp. 583-589, 1978
- [5] Tomizuka, M. and S. Zhang, "Modeling and Conventional /Adaptive PI Control of a Lathe Cutting Process", *Trans. of the ASME*, Vol. 110, pp. 350-354, 1988.

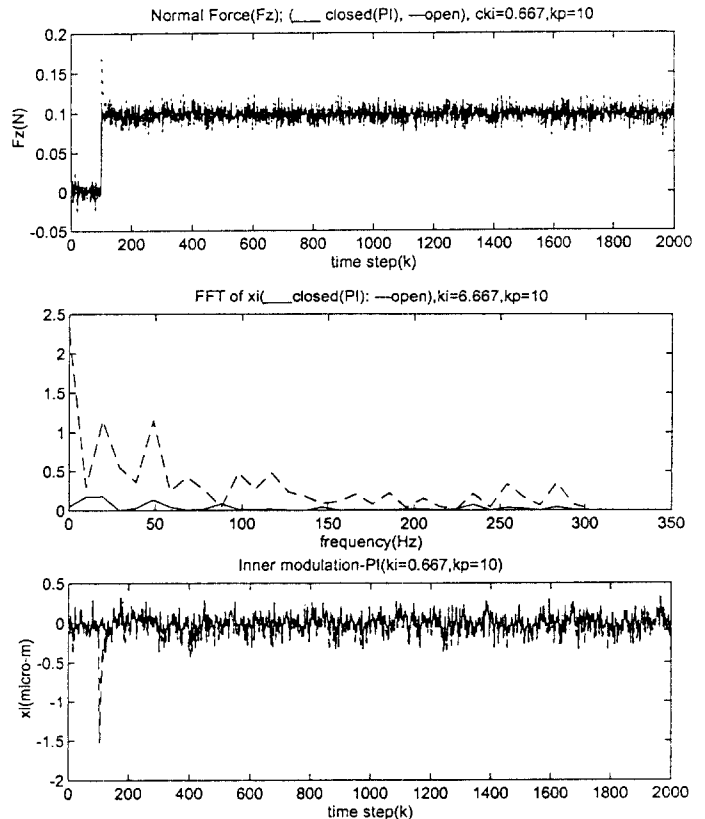


그림 6. 입력외란과 절삭깊이 6 $\mu$ m에서의 절삭력과 내부 모듈레이션의 응답

Fig. 6 Simulation responses of normal force and inner modulation for 6 $\mu$ m depth-of-cut and input disturbance

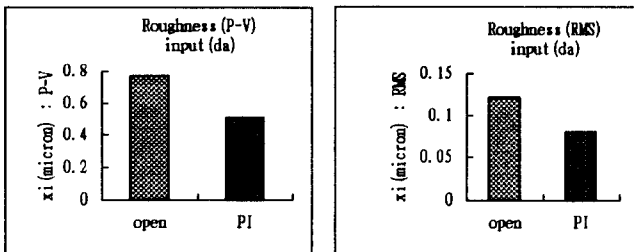


그림 7. 입력외란에 대한 표면거칠기의 비교  
Fig. 7 Comparison of the surface roughness for input disturbance

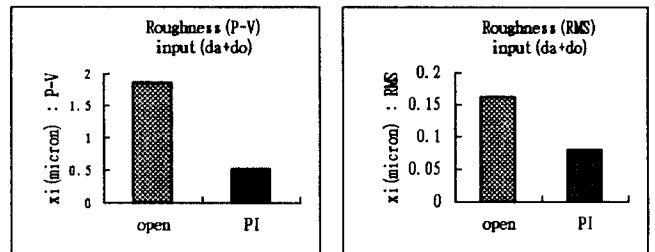


그림 8. 입력외란과 절삭깊이 6 $\mu$ m에 대한 표면거칠기의 비교  
Fig. 8 Comparison of the surface roughness for input disturbance and 6 $\mu$ m depth-of-cut