

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

어드미턴스 모델을 이용한 다이아몬드 터닝머신의 초정밀 진동 제어

정상화*, 김상석**

Admittance Model-Based Nanodynamic Control of Diamond Turning Machine

Sanghwa Jeong*, Sangsuk Kim**

ABSTRACT

The control of diamond turning is usually achieved through a laser-interferometer feedback of slide position. The limitation of this control scheme is that the feedback signal does not account for additional dynamics of the tool post and the material removal process. If the tool post is rigid and the material removal process is relatively static, then such a non-collocated 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.

Key Words: Diamond Turning Machine (다이아몬드 터닝 머신), Admittance Model (어드미턴스 모델),
Nanodynamic Control (초정밀 진동 제어), Modulation (굴곡), System Identification (시스템 동정)

* 조선대학교 기계공학과, 수송기계부품 공장자동화 연구센터

** 조선대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

다이아몬드 터닝 머신은 형상오차의 탁월한 제어기법으로 무른 재질의 거울같은 표면가공을 위하여 최근 십여년 동안 사용되어 왔다. 표면마무리와 모양의 정밀도는 다이아몬드 공구의 형상과 마모정도, 가공물의 재질, 축의 진직도와 직각도, 공작물의 동적 안정성에 따라 결정된다. 그러나 이 공정의 접근 방법으로는 형상 정밀도와 표면마무리를 향상시키는데 한계가 있다. 일반적으로 다이아몬드 터닝 머신은 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 미세변위 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 미세 절삭력으로부터 가공 공정 및 다이아몬드 공구 상태 그리고 공작물의 재질에 대한 정보를 얻을 수 있다. Moriwaki와 Tlusty는 절삭 다이나믹스와 절삭공정의 기계적 구조에 대한 이론적 모델을 제안하였으며, 그러한 모델에 대해 실험적으로 증명을 하였다.^(1,2) 다이아몬드 터닝공정에 대해, Luttrell과 Dow는 최초로 간단한 스포링과 멤퍼로 이루어진 모델을 가정함으로써 상호 동적 관계에 대한 수학적인 모델을 제시하였으며, 공작물의 재질과 공구의 마모 상태를 다른 절삭 조건에서 실험함으로써 절삭 공정 다이나믹스의 매개변수들을 실험에 의해 구하였다.⁽³⁾ 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 기준의 위치제어계에 부가

하는 것은 단지 위치 제어 자체만으로 작동되는 시스템보다 표면 정밀도를 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 실제 다이아몬드 터닝 공정에서 정밀 다이나모터(dynamometer)를 부착하여 미세 절삭력을 측정한 후 절삭공정에서의 다이나믹스를 최소자승법(least-squares algorithm)을 써서 시스템을 규명하였으며, 미세절삭력을 이용한 초정밀 진동(nanodynamic) 제어의 첫 단계로서 오버랩핑 절삭조건이 고려된 어드미턴스 모델을 제시하였다. 또한 PI 제어기를 적용하여 표면정밀도 향상에 대한 성능을 수치실험을 통하여 비교하였다.

2. Admittance Model-Based Feedback Control

싱글 포인트 다이아몬드 절삭가공(single-point diamond cutting)은 다이아몬드 공구와 공작물 사이의 상대운동의 결과로서 나타나는 복잡한 3차원 가공 공정이다. 공작물을 가공하는 공정은 Fig. 1에 나타내었으며, 다이아몬드 공구는 X축을 따라 이동하며 공작물은 Z축 주위를 회전한다. 다이아몬드 터닝 절삭 가공이 이루어지면 절삭면(cut surface)이 생성되며 이 절삭면이 표면거칠기를 형성하게 된다. 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 Fig. 2에 나타낸바와 같이 정확한 공구위치 오차신호를 구하기 위하여 미소 절삭력의 변화와 표면거칠

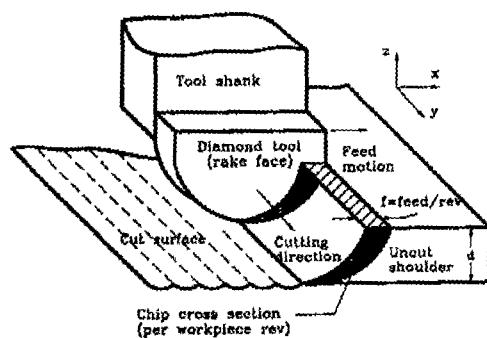


Fig. 1 Three-dimensional diamond cutting process

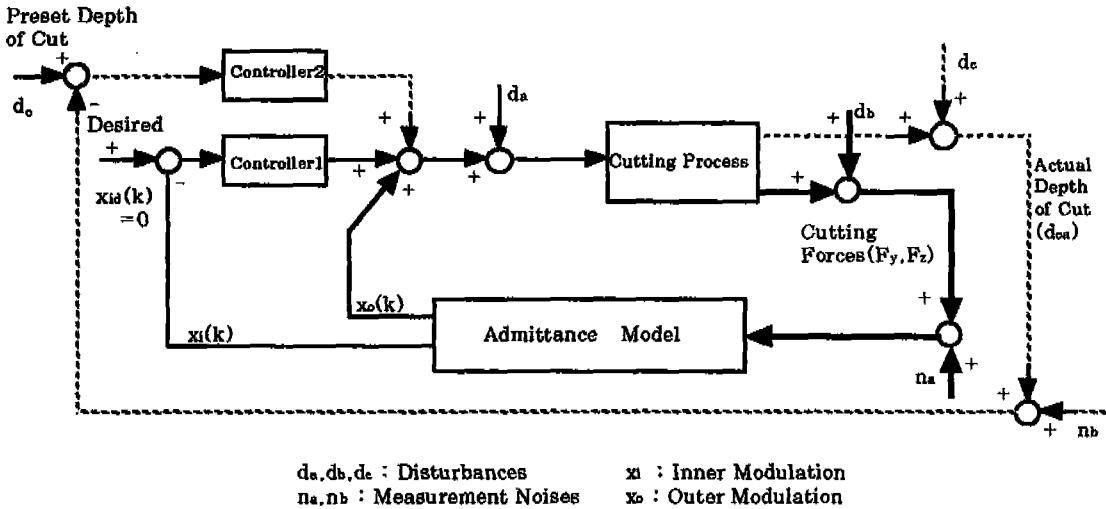


Fig. 2 Overall admittance model-based feedback control

기의 관계를 정립하는 것이다. 어드미턴스 블록으로 들어오는 입력은 고감도 힘 센서로부터의 절삭력 측정신호이고, 이러한 종류의 어드미턴스 모델을 이용한 피드백 제어는 입력과 출력 외란과 측정 잡음의 감소에 주안점을 두고 있다. 본 연구에서는 다이아몬드 터닝 머시인의 극 초정밀 제어의 초기연구로서 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.3에 오버랩핑 절삭의 도식적 그림을 나타내었다. 오버랩핑 계수 μ 는 다음과 같은 4개의 변수를 가진 함수 식으로 추론할 수 있다.

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

여기에서 R 은 공구 반지름, v_p 는 스펀들 속도, d_o 는 절삭깊이, f_r 은 피이드율(feed rate)을 나타낸다. 식 (1)을 고려하여 오버랩핑 계수 μ 는 Fig.3으로부터 다음과 같이 쉽게 결정할 수 있다.

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

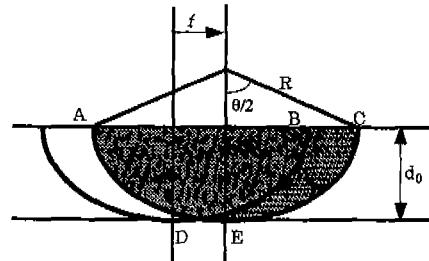


Fig. 3 Overlapping cutting
여기에서,

$$\text{Area}(AEC) = \frac{1}{2} R^2 \theta - R \cdot (R - d_o) \cdot \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\text{Area}(BCED) = d_o \cdot f$$

$$\frac{\theta}{2} = \cos^{-1} \left(\frac{R - d_o}{R} \right)$$

$$f = f_r / v_p; \text{Infeed rate} (\mu\text{m/rev})$$

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.4에서 나타낸 바와 같이 k번재에서 가공될 칩 두께(uncut chip thickness) $u(k)$ 는 미리 주어진 가공깊이(preset depth-of-cut) d_o , 외부 굴곡(outer modulation) $x_o(k)$ 와 내부 굴곡(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 $F_z(k)$ 의 관계가 바로 어드미턴스 모델이다. Z-방향 $F_z(k)$ 는 오버랩핑 절삭 요소에 의해 결정되는 공구 끝부분에서의 절삭 표면의 면적에 비례한다. 오버랩핑 계수 μ 는 바로 앞의 절삭 면적에 대한 현재 절삭에서의 중첩면적의 비를 나타내며, 공구의 반지름, 스피드 속도, 절삭깊이, 이송속도에 따라 결정된다. 오버랩핑 절삭에서의 어드미턴스 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_z(k) = C[\dot{x}_o(k) - \dot{x}_i(k)][1 - \mu] + K[d_o + x_o(k) - x_i(k)][1 - \mu] \quad (4)$$

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 굴곡(modulation) 사이의 관계는 다음과 같다.

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

여기에서 d 는 공구의 1회전 후의 time step이다. 위의 두 식에 의하여 $F_z(k)$ 를 측정하면 $x_o(k)$ 와 $x_i(k)$ 를 산출 할 수 있다.

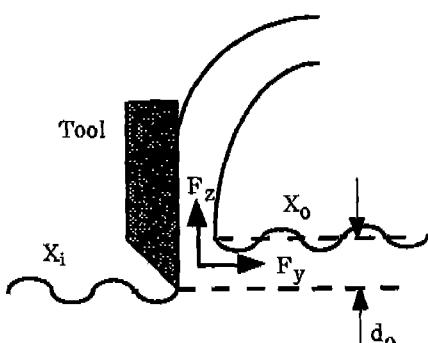


Fig. 4 Tool-workpiece interface model

2.3 온라인 페루프 제어

기존의 제어기를 포함한 어드미턴스 모델을 이용한 제어 구조는 Fig.5에서 나타내었다. PI 제어기의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

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

여기에서, k_p 와 k_i 는 각각 비례 제어 이득과 적분 제어 이득이다. 개루프 이득을 변화 시킴으로써 얻어지는 근궤적 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 설정하면 k_p 와 k_i 사이의 상대적 진폭을 결정할 수 있다. 근궤적 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.

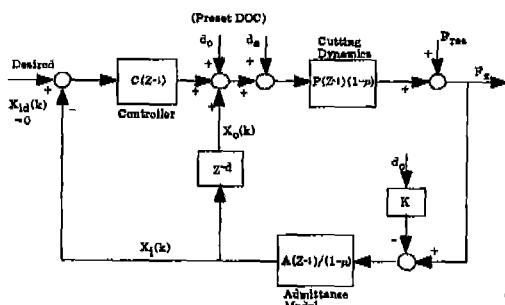


Fig. 5 Z-direction admittance model-based control scheme

3. 반복 최소 자승법

(Recursive Least-Squares Algorithm)

다이아몬드 터닝머시인의 동적해석은 시간과 절삭조건에 의해 변화되므로 실시간에서 실제 절삭공정에 대한 좀 더 정확한 모델을 얻기 위해서는 시변 매개변수를 시간에 따라 순환적으로 동정(identification)하는 것이 필요하다. 따라서 좀 더 효율적인 어드미턴스 모델의 설계는 표면정밀도를 향상시키기 위해 초정밀 진동(nanodynamic) 제어가 절실히 요구된다.

이 절에서는 exponential forgetting을 가진 순환 최소자승법을⁽⁵⁾ 기초로 하여 미세 절삭공정에서의 매개변수들에 대한 실시간상에서 시스템 동정에 대하여 설명된다.

Fig.6은 exponential forgetting을 가진 추정기(estimator)를 이용한 시스템 동정의 블록선도를 타내고 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 최소 자승법으로부터 결정되어질 수 있다. forgetting factor(λ)을 고려한 순환 최소자승법(recursive least-squares method)은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

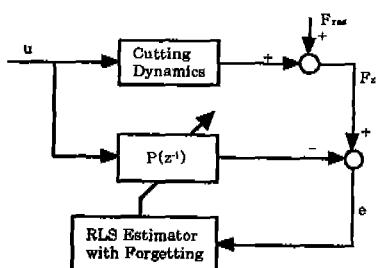


Fig. 6 Block diagram of system identification

4. 실험을 통한 절삭공정 시스템 동정

다이아몬드 절삭 공정의 시스템 동정(system identification)을 위하여 삼성전자에 설치되어 있는 다이아몬드 터닝 머신을 이용하여 정밀 다이나모터(dynamometer)로

부터 다이아몬드 공구가 지배적으로 y축 방향으로 진행할 때 (Table 2 참조) 실제 절삭공정에서 z축 방향의 미세 절삭력을 측정하였다. 실험장치의 구성도는 Fig.7에 나타내었으며, 실험에 사용된 장비는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Specification of apparatus and instruments

Apparatus	Model
Diamond Turning Machine	RTH Nano Form 300
Dynamometer	KISTLER 9257B
Charge Amp.	KISTLER Multi Channel Charge Amp. 5019A
FFT Analyzer	Hp 35670A
초도측정기	Ikegami PM-930A

본 연구에서 사용되어진 실험 절삭조건을 Table 2에 나타내었다.

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 μm	Feed Rate : 100 $\mu\text{m} / \text{sec}$
Infeed Rate : 5.8 $\mu\text{m} / \text{rev}$	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 절삭 공정의 전달함수를 식 (7~11)으로부터 MATLAB 프로그램으로 구하였으며, 매개변수의 추정된 값들은 Fig.8에 나타내었다. Fig.8에서 $\lambda=0.9$ 일 때 계산된 매개변수들은 매우 빠르게 수렴함을 알 수 있으며, 1차 모델에서의 b_0 는 Fig.8에서 보여지는 것과 같이 regressor vector의 초기값의 특성으로부터 다른 매개변수들보다 더 빨리 수렴함을 알 수 있다.

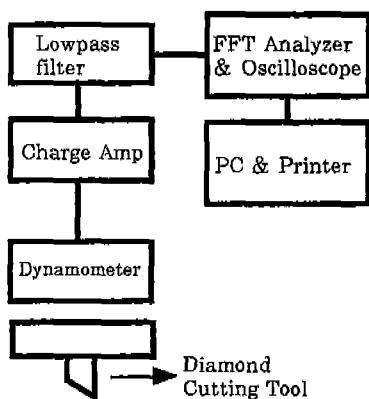


Fig. 7 Diagram of all the instrumentation for the cutting experiments and data acquisition.

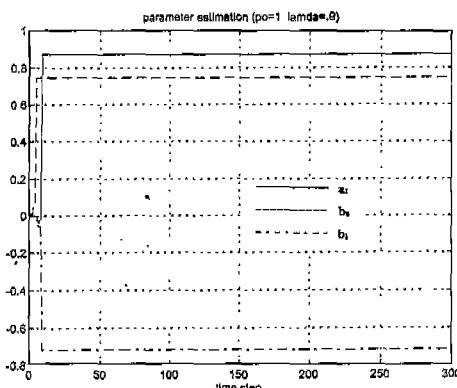


Fig. 8 Parameter estimation using RLS identifier

5. 수치실험 결과 및 고찰

다이아몬드 터닝의 오버랩핑 절삭공정을 삼성전자에서 실험한 실험 데이터를 이용하여 시스템을 규명하고, 제안된 어드미턴스 모델을 이용한 극초정밀 제어 알고리즘을 MATLAB을 이용하여 수치실험하였다. 다이아몬드 터닝의 실험 데이터로부터 추정된 절삭공정 다이나믹스는 Fig.8에서 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_a 는 17Hz, 52Hz, 86Hz, 113Hz 그리고 120Hz에서 지배

적인 주파수를 가지고 있는 colored 저주파수 잡음으로 가정하였다. 각 주파수에서의 크기는 측정치와 비교하여 각각 0.5, 0.4, 0.25, 0.25, 0.6으로 가정하였다. 작은 진폭을 가지고 있는 랜덤 백색잡음 (white noise)를 실제 절삭 공정에 좀더 근접한 모델을 구하기 위하여 colored 잡음에 첨가하였다. PI제어기에서의 최대 비례 계인은 10으로 선택하였다. 샘플링 주파수를 5KHz로 하였으며 이산시간계 폐루프 시스템에서의 응답은 각각의 어드미턴스 모델을 가진 비례-격분 제어(PI Control) 시스템에 대하여 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시스템 입력이 외란이 있고 절삭 깊이 6μm일 때 Z 방향의 절삭력 F_z 과 내부 굴곡(inner modulation), x_i 는 Fig.9에서 나타내었다. 절선은 개루프 응답을 나타내고, 실선은 PI로 제어된 시스템 응답을 나타내고 있다. Fig.9는 어드미턴스 모델을 이용하여 정밀도가 향상되었음을 나타내고 있다. Fig. 10과 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 오버랩핑 절삭공정에서 어드미턴스 모델을 이용한 실시간 피드백제어를 적용함으로써 표면내부 굴곡(inner modulation)의 RMS 값과 P-V (peak to valley) 값은 현저하게 개선되었다. Fig. 10에서, 입력외란(input disturbance)만 시스템에 작용할 때 RMS값이 폐루프 제어를 통하여 34% 향상되었음을 나타내고 있으며, P-V 값은 약 33% 향상되었다. Fig.11은 절삭공정에서의 입력이 입력외란이 있는 6μm의 절삭깊이로 주어질 때 RMS 값과 P-V값이 각각 51%와 72%로 향상되었음을 나타낸다.

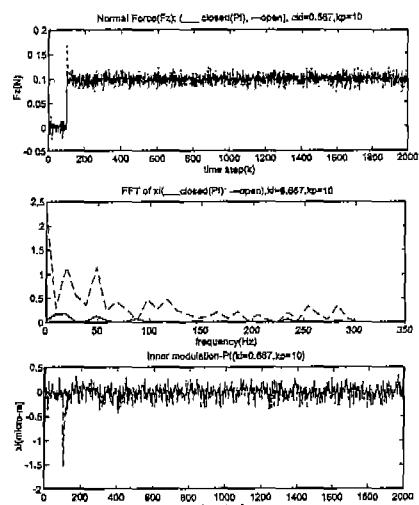


Fig. 9 Simulation responses of normal force and inner modulation for 6μm depth-of-cut and input disturbance

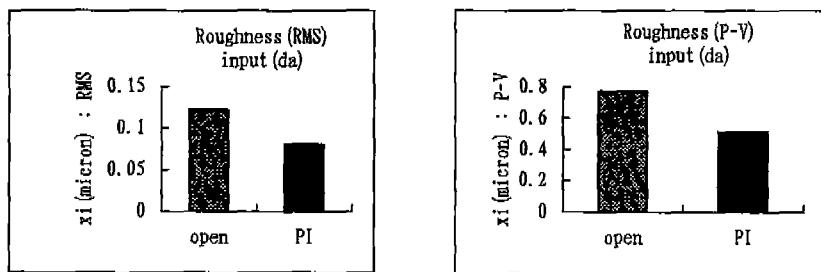


Fig. 10 Comparison of the surface roughness for input disturbance

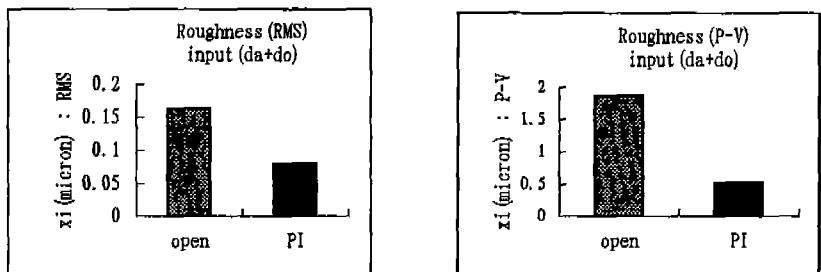


Fig. 11 Comparison of the surface roughness for input disturbance and 6 μm depth-of-cut

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 국초정밀 제어의 첫번 째 시도로써, 어드미턴스 모델에 의하여 유추된 표면거칠기를 추정하여 피드백 제어의 실현가능성을 보여주었다. 실제 실험 데이터로부터 추정된 가공공정 시스템에 어드미턴스 모델을 이용한 초정밀 진동 제어의 시뮬레이션 결과는 이 새로운 알고리즘에 의한 제어 기법의 적용으로 표면 정밀도가 크게 향상되었음을 보여주었다.

참 고 문 헌

- 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.
- Thusty, J., "Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics", Annals of the CIRP, Vol 27

[2], pp. 583-589, 1978.

- 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.
- 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.
- Astrom, K. J. and B. Wittenmark, Adaptive Control, Addison Wesley, 1989.
- Drescher, J. D. "Tool Force Measurement in Diamond Turning", MS Thesis, North Carolina State University, 1989.
- Yang, S. and M. Tomizuka, "Adaptive Pulse Width Control for Precise Positioning Under the Influence of Stiction and Coulomb Friction", Jour. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 110, pp. 221-227, 1988.