

어드미턴스 모델을 이용한 다이아몬드 터닝머시인의 극초정밀 제어

Admittance Model-Based Nanodynamic Control of Diamond Turning Machine

정 상 화* (조선대 기계공학과), 김 상 석 (조선대 대학원 기계공학과)
Sanghwa Jeong (Chosun Univ.), Sangsuk Kim (Chosun Univ.)

Keyword : Diamond Turning Machine, Admittance Model, Nanodynamic Control, Modulation.

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. Based on the empirical data of the cutting dynamics, simulation results are shown.

1. 서 론

다이아몬드 터닝 머시인은 형상오차의 탁월한 제어기법으로 무른 재질의 거울같은 표면가공을 위하여 최근 십여년 동안 사용되어 왔다. 표면마무리와 모양의 정밀도는 다이아몬드 공구의 형상과 마모정도, 가공물의 재질, 축의 진격도와 직각도, 공작물의 동적 안정성에 따라 결정된다. 그러나, 이 공정의 접근방법으로는 형상 정밀도와 표면마무리를 향상시키는데 한계가 있다. 다이아몬드 터닝 머시인은 레이저 간섭계의 피드백 신호로 위치제어하고 있다. 이 제어기법은 피드백 신호가 공구와 가공공정에 부수되는 동적특성을 고려하지않는 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 측정이 요구된다. 실제로 공구 선단의 운동 위치를 직접 측정하기는 매우 어렵기

때문에, 가공면에 수직으로 미세한 절삭력을 측정하여 가공깊이를 예측하는 여러 가지 모델이 제안되고 있다. 이 예측된 가공깊이는 원하는 가공깊이와 비교되어지고, 위치피드백 제어에 부가하여 제어입력을 미세하게 조절할 수 있다.

이 모델을 설정하기 위하여 가장 중요하게 고려되어야 할 변수중의 하나는 가공공정에서 공구에 작용되는 공구 절삭력이다. 이 미세절삭력으로부터 가공공정, 다이아몬드 공구상태 및 공작물의 재질에 대한 정보를 얻을 수 있다. Moriwaki 와 Tlusty는 절삭 다이내믹스와 절삭공정의 기계적 구조에 대한 이론적 모델을 제안하였으며,^{[1][2]} 또한 그러한 모델에 대해 실험적으로 증명하였다. 다이아몬드 터닝공정에 대해, Luttrell과 Dow는 최초로 간단한 스프링과 감쇠기로 이루어진 모델을 가정함으로써 상호동적 관계에 대한 수학적인 모델을 제시하였으며, 공작물의 재질과 공구의 마모상태가 다른 조건에서 실험함으로써 절삭 공정 다이내믹스의 매개변수들을 구하였다.^[3] 그러나 표면 거칠기를 개선하기 위한 force-based 제어에 대한

연구는 아직 수행되지 않고있다.

그러므로, 본 연구의 목적은 forced- based 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 위치제어제에 추가하는 것은 단지 위치 제어 자체만으로 작동되는 시스템보다 표면 정밀도를 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 절삭력을 이용한 피드백 제어의 첫 단계로써 오버랩핑 절삭조건이 고려된 어드미턴스 모델을 제시하고, 기존의 두개의 제어기 (P, PI 제어기)를 적용하여 표면정밀도 향상에 대한 성능을 비교하였다.

2. Admittance Model-Based Feedback Control

실시간으로 Nanodynamic-level 표면거칠기를 직접 측정할 수 없기 때문에, 어드미턴스 모델의 기본적인 개념은 미세절삭력의 피드백 신호로 부터 표면거칠기를 산출하여 위치제어루프에 피드백시켜주는 것이다. 피드백 경로에 있어서 어드미턴스 모델의 역할은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 정확한 공구위치 오차신호를 구하기위하여 미소 절삭력의 변화와 표면거칠기의 관계를 정립하는것이다. 어드미턴스 블록으로 들어오는 입력은 고감도 힘 센서로 부터의 힘 측정신호이고, 이러한 종류의 어드미턴스 모델을 이용한 피드백 제어는 입력과 출력 외란과 측정 잡음의 감소에 주안점을 두고 있다. 본 연구에서는 다이아몬드 터닝 머시인의 극초정밀 제어의 초기연구로서 절삭방향과 수직인 Z-방향에 관한 어드미턴스 모델을 스프링-댐퍼 시스템에 적용하여 해석하였다.

2.1 Overlapping Factor

일반적으로 절삭공정의 면가공 공정은 오버랩핑 (Overlapping) 절삭으로 이루어지며 Fig. 2에 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 R은 공구 반지름, v_p 는 스피indle 속도, d_o 는 절삭 깊이, f_r 은 피이드율(Feed rate)을 나타낸다. 식 (1)을 고려하여 오버랩핑 계수 μ 는 Fig. 2로부터 쉽게 결정할 수 있다.

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

여기에서,

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

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

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 공작물사이의 동적모델을 스프링-댐퍼 시스템을 가정하여 예측하며 극초정밀한 내부 loop에서 피드백 제어하는 것이다. Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 k번째에서 가공될 칩 두께(Uncut chip thickness) $u(k)$ 는 미리 주어진 가공깊이(Preset Depth-of-cut) d_o , 외부표면 거칠기(Outer modulation) $x_o(k)$ 와 내부표면 거칠기(inner modulation) $x_i(k)$ 등으로 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 미지변수이고 $x_i(k)$ 는 공구 선단의 운동을 나타낸다. 칩두께 $u(k)$ 와 절삭력 F_Z 의 관계가 바로 어드미턴스 모델이다. Z-방향 $F_Z(k)$ 는 오버랩핑 계수 μ 에 의하여 결정되는 절삭면적에 비례한다. 오버랩핑 계수 μ 는 바로 앞 전의 절삭 면적에 대한 현재 절삭에서의 중첩 면적의 비를 나타내며, 공구의 반지름, 스피indle 속도, 절삭 깊이, 이송속도에 따라 결정된다. 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 절삭력 변화량 $F_Z(k)$ 가 측정되면, $x_o(k) - x_i(k)$ 는 위의 어드미턴스 모델에 의하여 산출될 수 있다. 대부분의 면절삭 공정에서는, $x_o(k)$ 는 바로 전의 절삭을 나타내므로 두 거칠기(modulation)의 관계는 다음과 같다.

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

그러므로 위의 두 식에 의하여 $F_Z(k)$ 를 측정하면 $x_o(k)$ 와 $x_i(k)$ 를 산출할 수 있다.

2.3 On-Line Closed-Loop Control

기존의 제어기를 포함한 어드미턴스 모델을 이용한 제어 구조는 Fig. 4에서 나타내었다. PI 제어기의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다. ^[4]

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

여기서, k_p 와 k_i 는 각각 비례 제어 계수와 적분 제어 계수이다. 개루프 계수를 변화 시킴으로써 얻어지는 근 극적 선도는, 만약 PI 제어기의 영점이 설정되어 진다면, 전달함수 $G_{open}(z^{-1}) = A(Z^{-1})P(Z^{-1})C(Z^{-1})$, 에서 얻어 질

수 있다. PI 제어기의 영점을 미리 배치함으로써 k_p 와 k_i 사이의 상대적 진폭을 얻을수 있다. 큰 궤적 선도와 시뮬레이션 실행을 기반으로하여 PI 제어기의 영점은 0.6에 배치하였다. 일반적으로, PI 제어에서 k_p 는 k_i 보다 더 크다. 이러한 작업으로 부터, 각각의 제어기, P와 PI의 비례게인의 최대값은 각각의 제어기의 성능을 비교하기 위해 같도록 선택되었다.

3. 시뮬레이션 결과

이상과 같이 제안된 어드미턴스 모델을 이용한 제어 알고리즘을 기본으로, 다이아몬드 터닝의 오버랩핑 절삭공정을 Drescher^[6]와 Luttrell^[3]으로 부터 얻어진 실험 데이터를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 이 연구에서 사용되어진 절삭조건을 Table 1에 나타내었다.

Material : Copper	Cutting Speed : 4 m /sec
Spindle Speed : 7.2 rps	Starting Radius of Workpiece : 90.17 mm
Cutting Depth : 6 μ m	Feed Rate : 58.42 μ m / sec
Infeed Rate : 8.1 μ m / rev	Tool Radius : 0.762 mm
Overlapping factor : 0.937	Residual force (F_m): 0.1 N
kd : 694 time step	

Table 1 : Basic set of cutting conditions

다이아몬드 터닝의 실험 데이터로부터 추정된 절삭공정 다이내믹스는 다음과 같이 1차식으로 주어진다.

$$P(z^{-1}) = \frac{0.7561 - 0.6953z^{-1}}{1 - 0.8593z^{-1}} \quad (7)$$

z축 미끄럼 구조 진동으로부터 온 입력 외란, d_n 는 67Hz, 87Hz, 그리고 134Hz에서 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. 각각의 제어, P와 PI에서의 최대 비례 게인은 10으로 선택하였다. 샘플링 주파수를 5KHz로 하였으며 이 산시간계 페루프 시스템에서의 응답은 각각의 어드미턴스 모델을 가진 비례제어(P Control)와 비례-적분 제어(PI Control) 시스템에 대하여 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시스템 입력이 외란이 있고 절삭 깊이 6 μ m 일때 Z 방향의 절삭력 F_z 과 내부표면 거칠기(inner modulation), x_n 는 Fig. 5에서 나타내었다. 점선은 개루프 응답을 나타내고, 실선은 PI로 제어된 시스템 응답을 나타내고 있다. Fig. 5는 어드미턴스 모델을 이용하여 정밀도가 향상되었음을 나타내고 있다. Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 바와같이 오버랩핑 절삭공정에서 어드미턴스 모델을 이용한 실시간 피드백제어 (P 및 PI)를 적용함으로써 표면 내부거칠기(inner modulation)의 RMS값과 P-V(Peak to valley)값은 현저하게 개선되었다. Fig. 6에서, 입력외란

(input disturbance)만 시스템에 작용할 때 RMS값이 페루프 제어를 통하여 27% 향상되었음을 나타내고 있으며, P-V 값은 약 40% 향상되었다. Fig. 7은 절삭공정에서의 입력이 입력외란이 있는 6 μ m의 절삭깊이로 주어질 때 RMS 값과 P-V값이 각각 41%와 70%로 향상되었음을 나타낸다.

4. 결 론

다이아몬드 터닝의 오버랩핑 절삭공정에서의 표면정밀도는 어드미턴스 모델을 이용한 On-line 페루프 제어의 적용함으로써 크게 향상됨을 알수 있다. 이 연구에서 제안된 어드미턴스 모델을 이용한 페루프 극초정밀 제어의 첫번째 시도으로써, 어드미턴스 모델에 의하여 유추된 표면거칠기를 측정하여 피드백 제어의 실현가능성을 보여주었다. 실제 실험 데이터로부터 추정된 가공공정 시스템에 어드미턴스 모델을 이용한 극초정밀제어의 시뮬레이션 결과, 이 새로운 알고리즘에 의한 제어 기법의 적용으로 표면정밀도가 크게 향상되었음을 보여주었다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] Moriwaki, T. and K. Iwata, "In-Process Analysis of Machine Tool Structure Dynamics and Prediction of Machining Chatter", Jour. of Engng. for Industry, pp. 301-305, 1976.
- [2] Thusty, J., "Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics", Annals of the CIRP, Vol 27 [2], pp. 583-589, 1978
- [3] 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.
- [4] 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
- [5] Drescher, J. D, "Tool Force Measurement in Diamond Turning", MS Thesis, North Carolina State University, 1989.
- [6] Yang, S. and M. Tomizuka, "Adaptive Pulse Width Control for Precise Positioning Under the Influence of Stiction and Coulmb Friction", Jour. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 110, pp. 221-227, 1988.

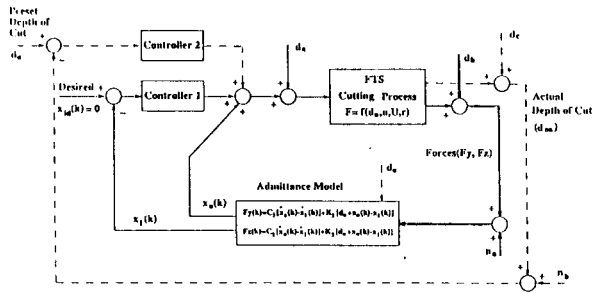


Fig. 1 Overall admittance model-based feedback control

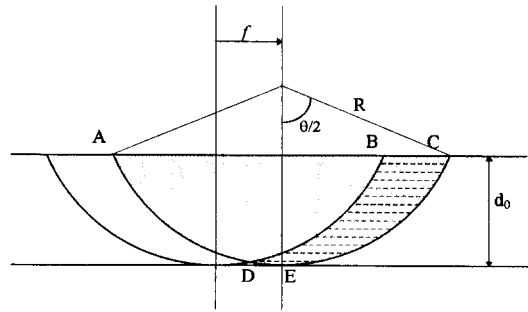


Fig. 2 Overlapping cutting

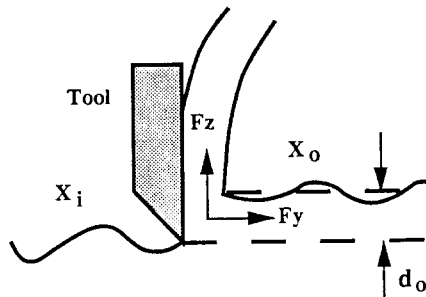


Fig. 3 Tool-workpiece interface model

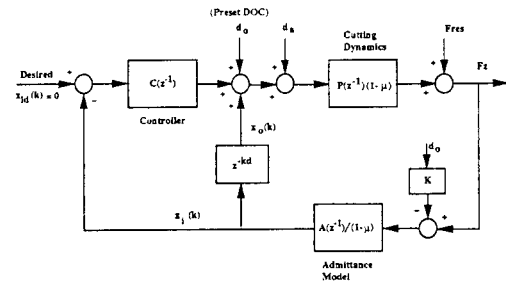


Fig. 4 Z-direction admittance model-based Control Scheme

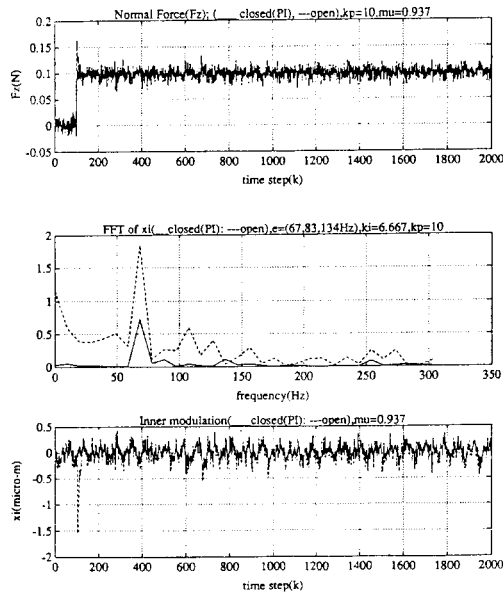


Fig. 5 Simulation responses of normal force and inner modulation for $6\mu\text{m}$ depth-of-cut and input disturbance

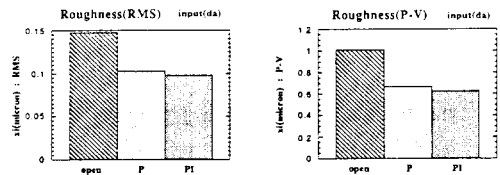


Fig. 6 Comparison of the surface roughness for input disturbance

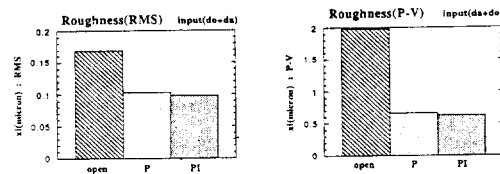


Fig. 7 Comparison of the surface roughness for input disturbance and $6\mu\text{m}$ depth-of-cut