

다이아몬드 터닝의 미세 절삭력 측정을 위한 tool holder 설계 및 절삭력 측정

정상화*, 김상석**, 도철진***, 홍권희***, 김건희***, 유병주***

Tool Holder Design and Cutting Force Measurement of Diamond Turning Process

S. H. Jeong, S. S. Kim, C. J. Do, K. H. Hong, G. H. Kim, B. J. Rui

Key words : Tool Holder System(공구지지대), Piezo-electric Transducer(압전소자 트랜스듀서), Diamond Turning Machine(DTM, 다이아몬드 터닝 머시인), MSC/PATRAN, MSC/NASTRAN

ABSTRACT

In this work, tool holder system has been designed and built to measure cutting forces in diamond turning. This system design includes a 3-component piezo-electric transducer. Initial experiments with tool holder system included verification of its predicted dynamic characteristics as well as a detailed study of cutting parameters. Tool holder system is modeled by considering the element dividing, material properties, and boundary conditions using MSC/PATRAN. Mode and frequency analysis of structure is simulated by MSC/NASTRAN, for the purpose of developing the effective design. Many cutting experiments have been conducted on 6061-T6 aluminum. Tests have involved investigation of velocity effects, and the effects of depth and feedrate on tool force. Forces generally increase with increasing depth of cut. Increasing feedrate does not necessarily lead to higher forces.

1. 서 론

다이아몬드 터닝머시인(DTM)은 단결정 다이아몬드 공구를 사용하여 초정밀 부품을 경면 가공하는 공작기계이다. 최근에 다이아몬드 터닝머시인은 절삭공정의 미세 동역학 규명과 가공 정밀도를 높

이기 위한 새로운 기법이 개발됨에 따라 초정밀 산업에 필요한 광학부품, 정밀기계부품, 전자부품들의 영역에 널리 적용되어지고 있다.⁽²⁾⁽³⁾

다이아몬드 터닝 공정에서 공구 미세 절삭력을 측정하여 미세가공의 동적모형을 규명하는 것은 가공공정을 이해하고 제어하기 위해 필수적인 것이다. 다이아몬드 터닝의 절삭력 측정 연구는 많은 연구자들에 의해 다양한 방법으로 수행되어 왔다.⁽⁶⁾ 몇몇 연구자들은 광학 부품을 가공할 때 고려되어지는 절삭속도 및 피이드율 그리고 절삭속도와 같은 절삭성분에 대한 영향을 고찰하기

* 조선대 기계공학과

** 조선대 기계공학과 대학원

*** 한국기초과학지원연구원

위해 절삭력 측정실험을 시도하였다.

본 연구에서는 다이아몬드 터닝 공정에서 발생 되는 공구 미세 절삭력을 측정하기 위해 정교한 힘 센서를 이용하여 공구지지시스템을 설계하였다. 이 공구지지시스템을 이용하여 6061-T6 알루미늄을 경면 가공할 때 미세가공 공정에 가장 중요한 영향을 미치는 변수인 절삭깊이와 피이드율을 변화시키면서 미세절삭력을 측정하였으며, 미세절삭력에 미치는 각 변수들의 영향을 평가하였다.

2. Tool Holder Design

2.1 Sensor Calibration

먼저 본 연구에 사용된 미세절삭력 측정용 힘 센서의 보정을 수행하였다. 센서 보정은 표준과 학연구소에서 제작, 검증된 1g-100g까지의 분동을 이용하여 실험하였다. 실험방법은 Fig. 1에서 나타내었다. Fig. 2는 z축 센서 보정 결과값을 나타낸 그림이다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 하중에 대해 작용하는 센서의 신호가 매우 선형적이며, 이것은 센서의 보정이 만족스러움을 알 수 있다.

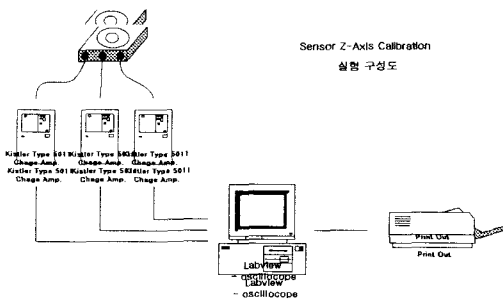


Fig. 1 Schematic Diagram of sensor calibration

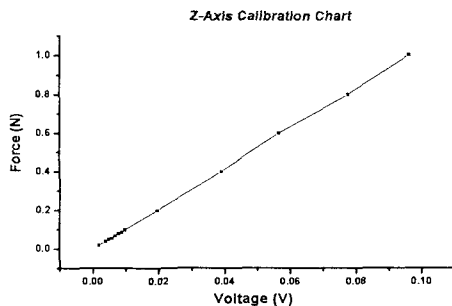


Fig. 2 Z-axis calibration chart of force transducer

2.2 Tool Holder Design

공구 지지대 설계의 중요한 요소는 강성과 민감도이다. 고강성과 고민감도의 두 요구사항 때문에 힘 센서는 압전 결정체(piezo-electric crystal)가 이상적이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 많이 사용된 z축의 강성이 1000N/ μm 이고 경계값이 0.01인 Kistler 9251A, 3축 트랜스듀서를 사용하였다. Fig. 3는 3축 트랜스듀서를 이용한 공구지지대 설치 방법을 나타낸 것이다.⁽⁴⁾

Fig.3(a)는 공작물에 연직방향인 z축 성분을 고려한 설계를 나타낸 것이다. Fig.3(b)는 공작물 면과 평행을 이루는 z축을 나타낸 그림이고, Fig.3(c)는 z축이 공작물 면과 평행이고 이송 방향과 일치하는 방향을 나타낸 그림이다.

Fig.3(a)와 같은 방향일 경우 z축에 대한 강성 및 민감도가 가장 크다. 따라서 본 연구에서는 이 방향을 기준으로 설계하였다.

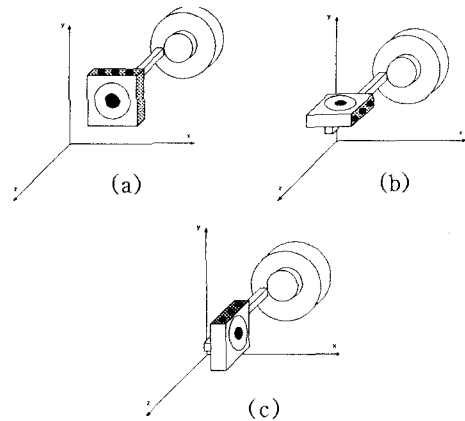


Fig. 3 Possible orientations for the transducer

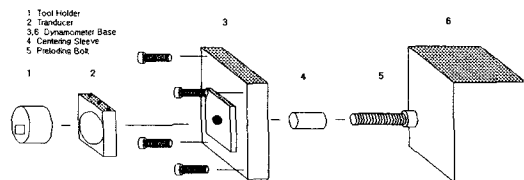


Fig. 4 Tool holder system

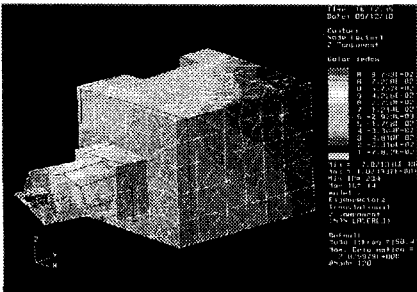
Fig.4는 본 연구에서 설계한 공구지지대의 개략도이다. 그림에서 보여진 바와 같이 예압 볼트는 수평방향 홀과 압전 트랜스듀서를 통과하여 홀더의 링 너트와 연결함으로써 원하는 예압을 조절할 수 있도록 설계하였다.

2.3 Dynamic Analysis

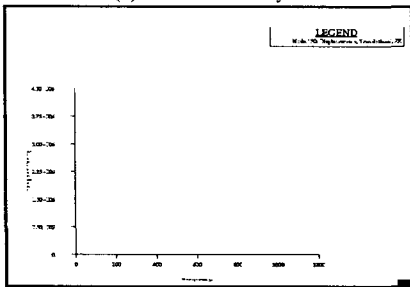
Fig.4와 같은 구조물을 제작하기에 앞서 다이아몬드 터닝시 측정되는 동적 절삭력이 구조물에 얼마나 영향을 미치는가 결정하기 위해 동적 해석을 하였다. 공구지지대에 대한 동적해석은 MSC/PATRAN, MSC/NASTRAN 구조해석 프로그램을 이용하여 수행하였고, Table.1에 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

Table 1 Mode analysis result of tool holder system

Mode No.	EIGENVALUE	CYCLES(Hz)	GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
1	1.555030E+06	1.984675E+02	1.000000E+00	1.555030E+06
2	2.692047E+06	2.611328E+02	1.000000E+00	2.692047E+06
3	3.662946E+06	3.046038E+02	1.000000E+00	3.662946E+06
4	5.476356E+06	3.724380E+02	1.000000E+00	5.476356E+06
5	8.258837E+06	4.573825E+02	1.000000E+00	8.258837E+06



(a) 1st mode analysis



(b) Frequency analysis

Fig. 5 Simulation result of 1st mode analysis and frequency analysis at z-axis

시뮬레이션 결과 1차 모드에 대해 가장 변형율이 심한 z축에 대한 값을 Fig. 5에 나타내었다. Fig.5(a)는 z축에 대한 1차 모드 해석 결과를 나타낸 것이고, Fig.5(b)는 변형이 가장 큰 노드 점 @120 지점에 0.5N 힘을 가해 z축에 대해 주파수를 분석한 것이다. 그래프에서 나타난 것과 같이 1차 모드 고유주파수인 198Hz에서 큰 진폭이 일어남을 알 수 있다.

3. Force Measurement in Diamond Turning

3.1 Experiment Set-up

압전소자 힘 트랜스듀서(Piezo-electric force transducer)의 전류 출력은 힘에 비례한다. 트랜스듀서로부터 나오는 신호는 전류증폭기에 의해 증폭되고 전압으로 변환된다. 그리고 저주파 필터를 통과하여 LabVIEW 프로그램을 이용하여 신호처리를 하였다. 출력장치에 의해 얻어낼 수 있다. Fig.6은 절삭력 측정을 위한 실험 장치 구성도를 나타낸 것이다.

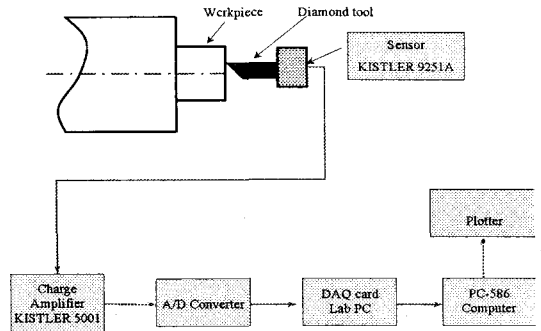


Fig. 6 Experimental setup

Figure. 7은 위에서 설명한 절삭력 측정시스템을 나타낸 것이다.

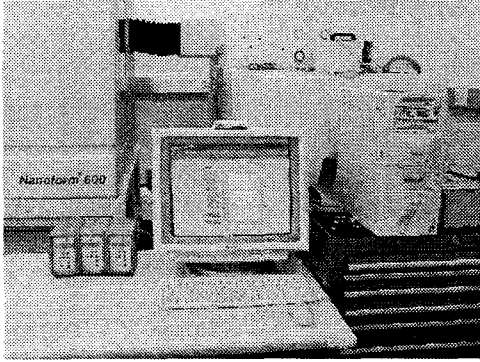


Fig. 7 Data acquisition System

3.2 Study of Parameters

절삭변수의 영향을 고찰하기 위해 피이드율을 각각 1.5, 3, 6, 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 로 일정하게 유지하고 절삭깊이를 2, 5, 8, 10 μm 까지 변화시키면서 절삭력을 측정하였다. 효과적인 데이터 수집을 위해 가공물을 같은 조건으로 3회 가공후 측정하였다. 공구는 곡률반경 0.5mm인 NCD(Natural Crystal Diamond)를 사용하였고, 스피들 속도는 1600rpm으로 일정하게 하였다. Table 2는 위에서 제시한 절삭조건을 나타낸 것이다.

Table 2 Basic set of cutting conditions

Material : 6061-T6 aluminum	Tool Radius : 0.5mm
Spindle speed : 1600rpm	Feedrate : 1.5, 3, 6, 12 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Depth of cut : 2, 5, 8, 10 μm	Radius of workpiece : 20mm

3.2.1 Influence of Depth of Cut

절삭깊이에 대한 영향을 고찰하기 위해 피이드율을 일정하게 유지하고, 절삭깊이를 변화시키면서 절삭 가공을 수행하였다. 피이드율은 6 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 이고, 절삭깊이는 2, 5, 8, 10 μm 으로 변화시켰다.

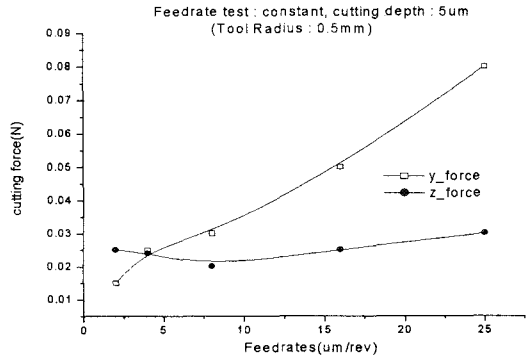


Fig. 8 Experimental data of cutting forces according to depth of cut

Fig. 8은 반경(R)이 0.5mm인 공구에 대한 절삭깊이의 함수로서 측정된 주분력(y_force)과 배분력(z_force) 값을 나타낸 것이다.

Fig. 8에 보여지는 바와 같이 모든 절삭깊이에 대해 측정된 값은 절삭깊이가 낮은 경우는 두 절삭력중 z-방향에 대한 절삭력이 y-방향에 대한 절삭력보다 크게 나타났으며, 절삭깊이가 깊어질수록 y-방향을 절삭력이 더 크게 나타났다.

3.2.2 Influence of Feedrate

두 번째 실험으로 피이드율에 대한 영향을 조사하였다. 피이드율은 2~25 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 까지 고려하였으며, 절삭깊이는 5 μm , 주축회전수는 1200rpm으로 일정하게 유지하였다. 피이드율 변화에 대한 절삭력 실험값은 Fig. 9에 나타내었다.

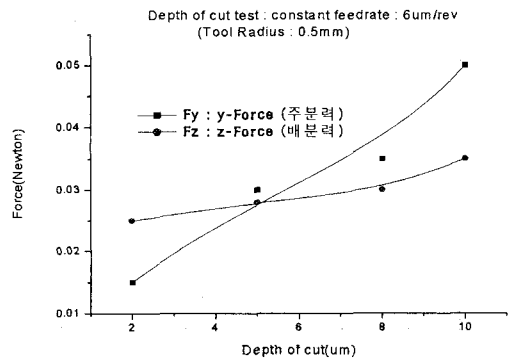


Fig. 9 Experimental data of cutting forces according to feedrates

Fig.9에 나타난 바와 같이 피드율이 증가함에 따라 y_절삭방향인 주분력은 매우 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. z_축 방향인 배분력은 피드율이 초기에 약 10 μ m/rev 까지는 절삭력이 감소하고, 그 이후로 완만하게 증가하는 경향이 나타났다.

3.2.3 Experiment Results

본 연구에서는 table 2에서 제시한 절삭조건을 기본으로 실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig.10,11에 나타내었다.

Fig. 10은 절삭깊이와 피드율에 대한 y_방향에 대한 절삭력 값을 나타낸 것이다. Fig.10으로 부터 절삭깊이가 커짐에 따라 절삭력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 피드율에 대해서는 1.5 μ m/rev을 제외한 피드율 3, 6, 12 μ m/rev은 피드율이 증가할수록 절삭력도 선형적으로 증가하였다. 1.5 μ m/rev에서는 절삭깊이가 증가하여도 절삭력은 거의 변화가 없음을 나타내었다.

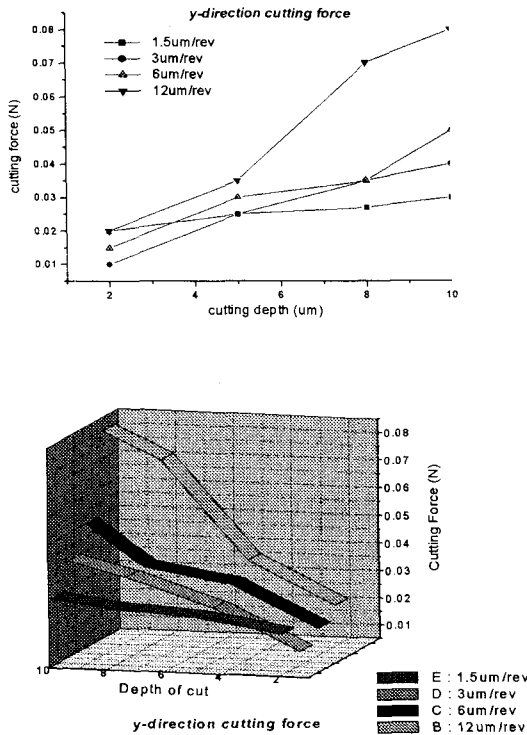


Fig. 10 Y-direction cutting forces according to variation of feedrate and depth of cut

Fig. 11은 절삭깊이와 피드율에 대한 z_방향에 대한 절삭력 값을 나타낸 것이다. Fig. 11에 나타난 z_방향에 대한 절삭력 값은 주분력에서 나타난 결과와 같이 절삭깊이가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였지만, 피드율에 대한 결과는 피드율이 증가할수록 절삭력 값은 감소하였다. 이러한 경향은 Fig.9에서 이미 설명되었다.

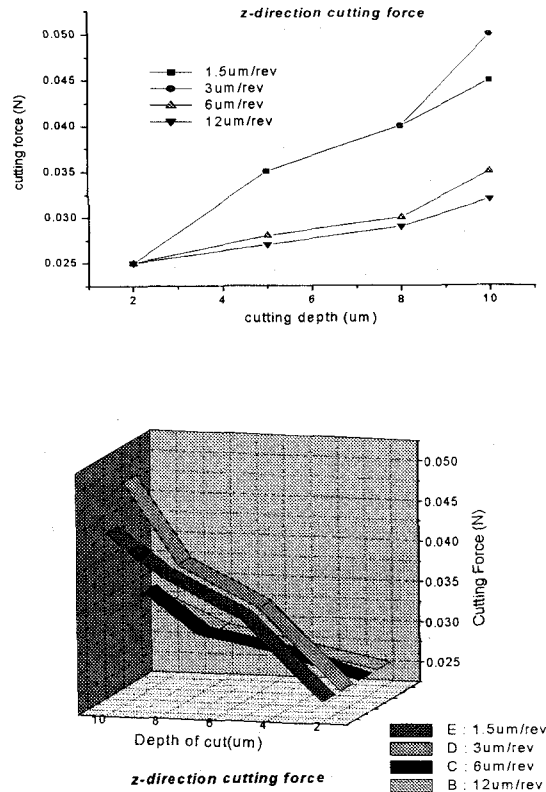


Fig. 11 Z-direction cutting forces according to variation of feedrate and depth of cut

4. 결론

본 연구에서는 다이아몬드 터닝시 발생하는 절삭력을 측정하기 위하여 공구 지지대 시스템을 설계하고 제작하였다. MSC/PATRAN, MSC/NASTRAN을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과 1차 고유진동수가 198Hz임을 알 수 있었다.

또한 6061-T6 알루미늄을 이용하여 절삭실험을 수행함으로써 절삭깊이와 이송속도에 대한 영향을 고찰하였다. 절삭매개변수가 공구 절삭력에 미치는 영향을 고찰하기 위해 절삭깊이와 피이드율을 변화시켜면서 절삭력을 측정하였다. 그 결과 절삭깊이의 변화에 따라 주분력, 배분력이 선형적으로 증가했지만 절삭깊이가 낮을 경우 배분력이 주분력보다 크게 나타났다. 피이드율의 변화에 따라 주분력은 선형적으로 나타났지만 배분력은 피이드율이 증가할수록 감소하는 경향이 나타났다.

참고문헌

1. Schrama R.J.P., Franse J., 1988, "The precision cutting process as a non-linear closed loop system" PE, Vol 10, pp.199~207
2. Kazuaki, Toshimich., 1987, Society of Manfg. Engineers
3. Furukawa, Moriwaki., 1988, "Effect of Material Properties on Ultra-precision Cutting processes" CIRP vol 37, pp.113
4. T. A. Dow, Joe Drescher, 1988, "Measurement of Tool Force in diamond Turning"
5. 정상화, 김상석, 2001, "다이아몬드 터닝 가공의 미세절삭력 측정을 위한 tool holder 설계" 정밀공학회 추계 학술 대회 논문집, pp.68~71,
6. Iwata, Moriwaki, Pkuda, 1987, "A Study of Cutting Temperature in Ultra-High precision Diamond Cutting of Copper", SME North American Manufacturing Research Conferenc Proceeding