

## 미세절삭력 측정을 위한 다이아몬드 Tool Holder 설계 Diamond tool holder design for cutting force measurement

정상화/조선대, 김상석\*/조선대 대학원, 도철진/기초과학지원연구소,  
김건희/기초과학지원연구소, 유병주/기초과학지원연구소  
Sanghwa Jeong/Chosun Univ., Sangsuck Kim\*/Graduate School, Chosun Univ.,  
Chuljin do/KBSI, Ghunhee kim/KBSI, Byungju yoo/KBSI

### ABSTRACT

A tool holder system has been designed to measure cutting forces in diamond turning. This system includes a 3-component piezo-electric transducer. In this research, 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. In addition, tool holder system is verified by vibration test using accelerometer. This system will aid to the development of Fast Tool Servo (FTS)

### 1. 서론

다이아몬드 터닝머시인은 단결정 다이아몬드 공구를 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 공작기계이다. 다이아몬드 터닝머시인은 주로 초정밀 광학렌즈 가공이나 초정밀 방위산업 관련부품을 가공하는데 이용된다. 70년대 중반이후 다이아몬드 터닝가공은 미국, 일본과 같은 선진국을 중심으로 상당한 연구가 진행되었다.<sup>(1)</sup> 특히 광학장치 가공에 있어서, 이 기술은 많은 생산비용의 절감과 가공부분의 정밀도를 향상시켜 왔다. 다이아몬드 터닝의 중요한 연구 과제는 가공면의 표면거칠기와 원하는 치수형상의 정밀도를 향상시키고 가공물의 새로운 재질에 응용하는 기술을 개발하는 것이다. 현재까지 다이아몬드 터닝가공의 정밀도를 높이기 위해 설계와 재질적인 면, 초정밀한 면의 측정기

술, 초정밀 제어등의 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(2)</sup> 근래에 와서는 노스캐롤라이나 주립대에 있는 초정밀 연구센터에서 공구의 마모 특성 연구와 재료 가공공정의 동적 특성 연구등 많은 연구가 수행중이며, STM (Scanning Tunneling Microscope)의 등장으로 아주 정밀한 표면에 오프라인 측정이 Augustrom(A)까지 가능하게 되었다.<sup>(3)(4)</sup> 또한 초정밀 공작기계의 동역학적 규명과 이 계의 새로운 기법이 개발됨에 따라 초정밀 산업에 아주 필요한 광학적, 기계공학적, 전자부품요소들의 가공공정등 넓은 영역에 적용되어지고 있다.

다이아몬드 터닝 공정에서 발생하는 공구 절삭력을 이용하여 나타낸 동적 모델은 가공공정을 이해하고 제어하기 위해 필수적인 것이다. 본 연구에서 설계된 공구지지 다이아몬드머시는 다이아몬드 터닝시 발생하는 공구 미세 절삭력을 측정하기 위해 정교한 힘 센서를 내장하여 설계하였다.<sup>(6)(7)</sup>

본 연구에서는 공구지지대(Tool Holder)를 제작하기에 앞서 MSC/PATRAN, MSC/NASTRAN을 이용하여 동적 해석을 수행하였다. 또한 제작된 시스템은 진동 실험을 수행함으로써 시뮬레이션을 통하여 예측된 시스템을 검증하였다.

본 연구를 통해 제작된 공구지지대는 향후 다이아몬드 터닝 공정의 동적모델 규명뿐 아니라 표면거칠기를 개선할 수 있는 제어기법과 급속공구서보(Fast Tool Servo) 개발에 이용될 것이다.

## 2. Tool Holder Design

### 2.1 Sensor Calibration

본 연구에서는 다이아몬드 터닝시 발생하는 절삭력을 측정하기 위해 Kistler 9251A를 사용하였다. Kistler 9251A transducer는 z-축 강성이  $1000\text{N}/\mu\text{m}$ 이고 threshold는  $0.01\text{N}$ 이다.

공구지지대 설계에 들어가기에 앞서 센서 보정 작업을 행하였다. 센서 보정은 표준과학연구소에서 제작된 1g-100g까지의 분동을 이용하여 실험하였다. 실험방법은 Fig. 1에서 나타내었다. Fig. 2는 z축 센서 보정치를 나타낸 그림이다.

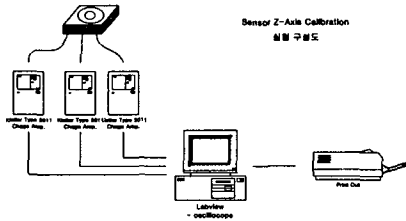


Fig. 1 Diagram of all the instrumentation for the sensor calibration

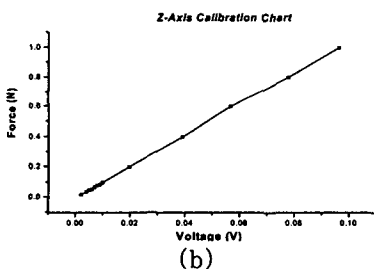
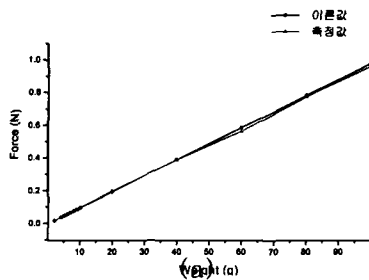


Fig. 2 Z-axis calibration chart of force transducer

Fig. 2에서 나타낸 (a)는 각각의 하중에 대한 힘의 이론값과 측정값을 비교해서 나타낸 그림이다. 그리고 (b)는 전압에 대한 힘의 양을 나타낸 보정치이다. Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 하중에 대해 작용하는 힘의 양이 비교적 선형함을 보여줌으로서 센서의 보정이 만족스러움을 알 수 있다.

### 2.2 Tool Holder Design

공구 지지대 설계의 중요한 요소는 견고한 상석과 민감도이다. 고강성과 고민감도의 두 요구사항 때문에 Force Sensor는 압전 결정체 (piezo-electric crystal)가 이상적이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 많이 사용된 Kistler 9251A, 3-component transducer를 사용하였다. Fig. 3은 3축 트랜스듀서를 이용한 공구지지대 제작시 가능한 방법을 나타낸 것이다.<sup>(8)</sup> 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. 트랜스듀서의 강성은 Fig. 3(a)와 같은 방향일 경우 z축에 대한 강성이 가장 크다. 또한 민감도 역시 이 방향일 경우 가장 크다. 따라서 본 연구에서는 이 축을 중심으로 설계하였다. DTM 슬라이드에 장착됐을 때, 조합 강성은 슬라이드 강성보다 높지 않을 수도 있다. DTM 슬라이드 강성은 수평, 수직방향으로 각각  $27\text{N}/\mu\text{m}$ ,  $101\text{N}/\mu\text{m}$ 이다. 전체 강성을 크게 하기 위해 공구지지대의 강성을 가능한 높게 하여야 한다.

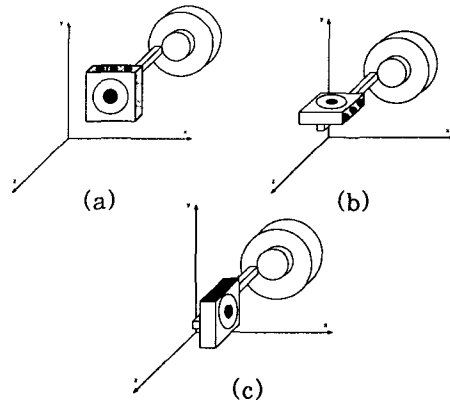


Fig. 3 Possible orientations for the transducer

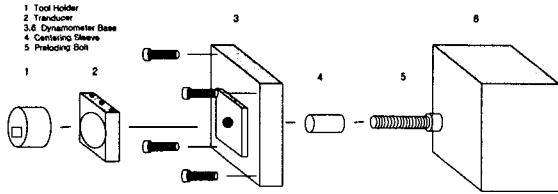


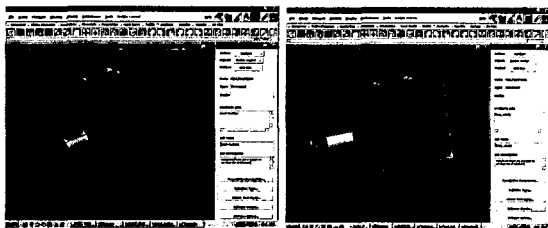
Fig. 4 Assembled tool holder system :  
Photograph and schematic drawing

Fig. 4는 본 연구에서 설계한 공구지지대의 개략도이다. 그림에서 보여진 바와 같이 예압 볼트는 수평방향 홀과 압전 트랜스듀서를 통과하여 홀더의 링 너트와 연결된다.

### 2.3 Dynamic Analysis

본 연구에서는 Fig.6과 같은 구조물을 제작하기에 앞서 다이아몬드 터닝시 측정되는 동적 절삭력이 구조물에 얼마나 영향을 미치는가 결정하기 위해 동적 해석을 하였다. Fig.6의 구조물은 MSC/PATRAN을 이용하여 모델링을 하였으며, MSC/NASTRAN 구조해석 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 하였다.

Fig. 5는 MSC/PATRAN을 이용하여 모델링 된 Tool Holder를 나타낸 그림이다. Fig.5(a)는 정규 모드 해석을 수행하기 위해 모델링 된 그림이고, Fig. 5(b)는 주파수 해석을 위한 그림이다. 구속조건, 하중조건 및 물성치는 표.1에 나타난 바와 같다.



(a) Mode analysis (b) Frequency analysis  
Fig. 5 Tool holder modeling for analysis

·Finite Element	
Node ID : 1083	
Element ID : 4224	
Element Topology : Tet 4	
·Load/BCs	
Displacement Fixed (Fig. 4(a))	
0.5N의 하중 조건 설정 (Fig.4(b))	
- 20~1000Hz 만큼 20Hz 간격 가진 @120	
Damping Ratio : 3%	
·Material Property : Steel Alloy	
Elastic Modulus : 200000 N/mm <sup>2</sup>	
Poisson Ratio : 0.32	
Density : 7.84e-6 kg/mm <sup>3</sup>	
·Solution Type	
Normal Modes Analysis	
-Number of Disired Roots : 5	
Frequency Response Analysis	

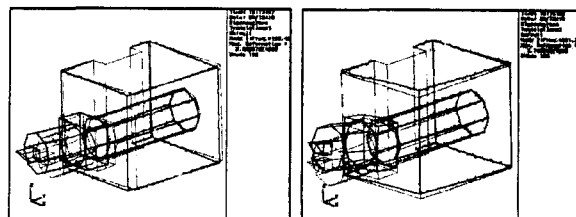
Table.1 Load/BCs for mode & frequency analysis

다음은 MSC/Nastran를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다.

#### REAL EIGENVALUES

MODE NO.	EIGENVALUE	RADIANS	CYCLES	GENERALIZED MASS	GENERALIZED STIFFNESS
1	1.555030E+06	1.247008E+03	1.984675E+02	1.000000E+00	1.555030E+06
2	2.692047E+06	1.640746E+03	2.611328E+02	1.000000E+00	2.692047E+06
3	3.662946E+06	1.913882E+03	3.046038E+02	1.000000E+00	3.662946E+06
4	5.476056E+06	2.340097E+03	3.724380E+02	1.000000E+00	5.476056E+06
5	8.258837E+06	2.873819E+03	4.573825E+02	1.000000E+00	8.258837E+06

위 해석 결과로부터 1차 모드 주파수가 약 200Hz 임을 알 수 있다. 다시 말해 앞서 설계한 시스템은 일반적으로 가공시 2000RPM의 스피들 속도로 가공한다고 볼 때 33.3Hz에서 공진으로 인한 진동이 일어난다고 예측 할 수 있다. 그러나 시뮬레이션 결과로 볼 때 200Hz 이하에서는 공진의 영향없이 정확한 절삭력 값을 측정할 수 있다. Fig. 6은 시뮬레이션 결과에 대한 1-4차 모드의 변형을 가시화 한 것이다.



1th mode: 198Hz

2th mode : 260Hz

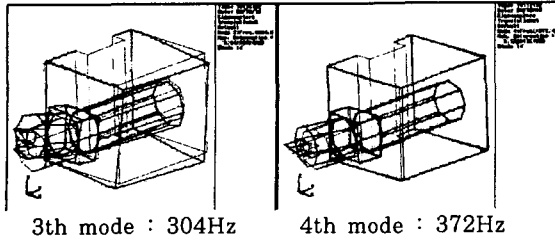
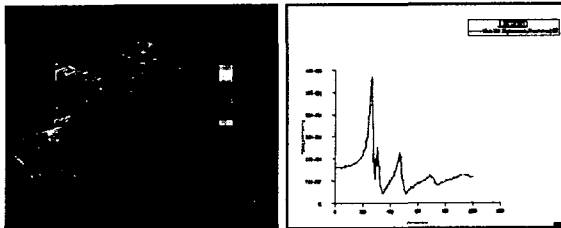


Fig. 6 1th-4th Modeshape of Tool Holder

시뮬레이션 결과 가장 변형율이 심한 z축에 대한 값을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 z축에 대한 1차 모드 해석 결과를 나타낸 것이고, Fig. 7(b)는 변형이 가장 큰 노드점 @120 지점에 0.5N 하중을 가해 z축에 대해 주파수 분석을 한 것이다. 그래프에서 나타난 것과 같이 1차 모드 고유주파수인 200Hz에서 큰 진폭이 일어남을 알 수 있다.



(a) 1th mode analysis (b) Frequency analysis  
Fig. 7 Simulation result of 1th mode of z-axis and frequency analysis at z-axis

## 2.4 Dynamic Characterization

본 연구에서는 앞 절에서 예견된 동적 시뮬레이션 결과를 증명하기 위해 실제 진동 실험을 수행하였다. 진동 실험은 가능한 한 절삭이 이루어지는 지점에 대한 다이내믹스를 측정하기 위해 공구 생크부를 16mm 정도를 깎아내고 가속도계를 공구 지지대에 부착하였다. 그리고 공구 지지대를 실제 절삭할 때와 동일한 방법으로 DTM에 고정시켰다. Fig. 10은 앞에서 제시한 실험 방법에 따라 진동 실험을 한 결과이다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 몇차례 가진 한 결과 신호가 급격히 튀는 곳은 545Hz였으며, 이는 tool holder의 고유진동수임을 알 수 있다. 앞 절에서 수행한 시뮬레이션 결과에서 예측된 200Hz에서 공진으로 고려할 만한 피크값이 관찰되지 않았다. 이는 DTM에 부착된 Tool Holder 시스템의 강성이 아주 높음을 의미한다.

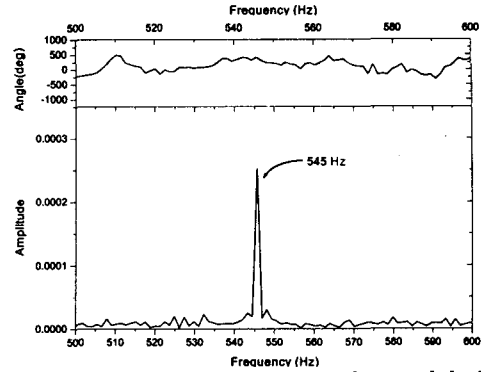


Fig. 8 Frequency spectrum for tool holder on DTM in the z-direction

## 3. Force Measurement in Diamond Turning

### 3.1 Experiment Set-up

본 연구에서는 Pneumo Nanoform 600 Diamond Turning Machine을 이용하여 절삭력 측정 실험을 하였다. 절삭력 측정을 위한 실험 장치 구성은 Fig. 9에 나타난 바와 같다. Photo. 1은 절삭력 측정을 위해 제작된 공구 지지대를 이용한 절삭 가공 모습을 보여주고 있다.

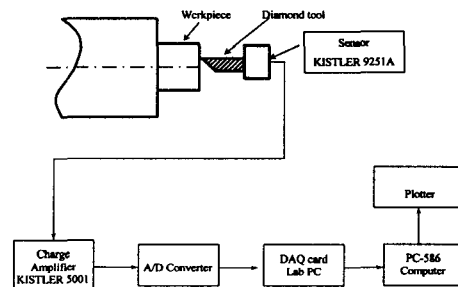


Fig. 9 Experimental setup

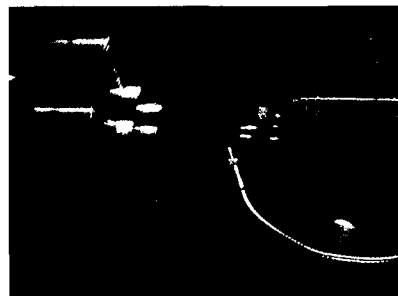


Photo.1 Cutting experiment apparatus

### 3.2 Experiment result

본 연구에서는 Tool Holder 설계 및 진동특성 연구에 그 목적이 있다. 따라서 본 연구에서는 단지 Tool Holder의 성능을 평가, 검증하고자 절삭력 측정 실험을 하고자 한다.

본 연구에서 사용되어진 절삭조건은 표 2와 같다.

Material : Silicon	Tool Radius : 0.8mm
Spindle speed : 1500RPM	Feedrate : 8mm/min
Cutting Depth : 10 $\mu$ m	Radius of workpiece : 32mm

Table.2 Basic set of cutting conditions

본 연구에서는 절삭 가공후 표면거칠기는 비접촉식 표면조도기 Wyko NT2000을 이용하여 측정하였다. 측정 후 표면조도결과는 Fig. 10과 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 표면거칠기 Ra(nm)값이 1.65로 만족할 만한 값을 얻어냈다. 향후 서로 다른 가공조건에 따른 절삭력 값을 측정하여 최적의 절삭 가공 조건값을 얻어내고, 더불어 절삭공정 다이내믹스를 규명하고자 한다.

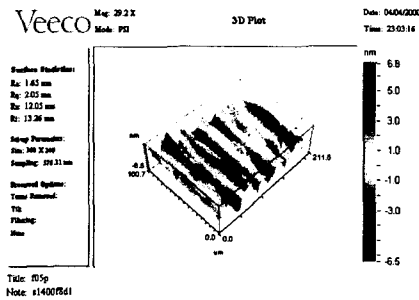


Fig. 10 Result of cutting process using tool holder system

### 4. 결론

본 연구에서는 다이아몬드 터닝시 발생하는 절삭력을 측정하기 위하여 공구 지지대 시스템을 설계하고 제작하였다. 본 연구에서는 위 시스템을 제작하기에 앞서 MSC/PATRAN, MSC/NASTRAN을 이용하여 공구 지지대에 대한 정규모우드 해석과 주파수 분석을 하였다. 시뮬레이션 결과 1차 고유진동수가 198Hz로 나왔으며, 이 결과로부터 트랜스듀서의 출력값은 약 200Hz 정도까지는 정확한 절삭력값

을 얻을 수 있음을 예측하였다. 또한 본 연구에서는 예견된 동적 시뮬레이션 결과를 증명하기 위해 실제 진동 실험을 수행하였다. 실제 진동 측정을 한 결과 측정값은 동적해석 결과보다 훨씬 크게 나왔으며, 이 결과로부터 이는 DTM에 부착된 공구 지지대 시스템의 강성이 아주 높음을 알수 있었다.

마지막으로 본 연구에서 개발된 공구 지지대 시스템을 이용하여 실제 가공물을 절삭함으로써 위 시스템의 성능을 평가, 검증하였다.

향후 본 연구에서는 개발된 공구 지지대 시스템을 이용하여 절삭시 고려되는 매개변수에 따른 영향을 연구할 것이며, Fast tool Servo를 개발하고자 한다.

### References

1. T. Moriwaki, and E. shamoto, "Ultra precision Diamond Turning of stainless steel by applying Ultrasonic vibration" annals of the CIRP, Vol. 40 pp.559-562, 1991
2. T. Moriwaki, "Effect of Cutting Heat on Machining Accuracy in Ultraprecision Diamond Turning", Annals of the CIRP, Vol.39, No. 1, pp.81-84, 1990
3. D. A. Grigg, P. E. Russel, and T. A. Dow, "Observations of Machined Surface using the Scanning Tunneling Microscope", Journal of ASPE
4. T. Moriwaki, 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
5. R.J.P. Schrama, J. Franse., "The precision cutting process as a non-linear closed loop system" PE, Vol 10, pp.199-207, 1988
7. Furukawa, Moriwaki., "Effect of Material Properties on Ultra-precision Cutting processes" CIRP vol 37, pp.113, 1988
8. T. A. Dow, Joe Drescher, "Measurement of Tool Force in diamond Turning"