

초정밀 가공을 위한 진동절삭 시스템의 Tool holder 개발 및 평가

이세윤*, 한준안+, 김지운+, 곽용길+, 강동배**, 안중환+

(논문접수일 2010. 12. 06, 심사완료일 2011. 01. 27)

Development on Tool Holder of Vibration Cutting System for Ultraprecision Machining

Se-Yun Lee*, Jun-Ahn Han+, Ji-Woon Kim+, Yong-Kil Gwak+, Dong-Bae Kang**, Jung-Wahn Ahn+

Abstract

In light guide panels, the PMMA sheet that is used in liquid crystal displays plays an important role in scattering the incident light and requires very fine machining as the sheet is directly related to the optical characteristics of the panels. High speed end milling(HSE) and high speed shaping(HSS) processes that are widely adopted and applied to the precise machining of light incident plane through vibration-assisted HSS for increasing the optical quality by minimizing the above-mentioned problems. The cutting tool and the tool post presented in this paper are designed by the authors to increase the magnitude of the cutting stroke by adopting the resonant frequency without weakening the stiffness and to reduce vibrations during even high speed feeding. The dynamic characteristics of the cutting tool and the tool post are evaluated through simulation and experiment as well. The results reveal very appropriate dynamic characteristics for vibration-assisted HSS.

Key Words : PZT(압전 소자), Tool Holder(공구 장착부), Vibration Cutting(진동절삭), High Speed Shaping(고속 가공)

1. 서론

최근 LCD 제조 공정에서 선명한 화질과 고해상도를 위한 BLU(Back light unit) 제품 개발이 중요시 되면서, BLU 제품의 핵심기술 중 하나인 도광판(Light guide panel) 입광부의 고정밀, 고속가공의 필요성이 대두되고 있다.

PMMA(Polymethyl-methacrylate) 시트는 LGP에 가장 중요한 요소로, PMMA의 한 면이 LIP(Light incident Plane)로 사용된다. PMMA는 가볍고, 가공성이 우수하며, 유리에 비해 투명도가 높아 최근 널리 사용되고 있다.

입광부 표면조도 향상을 위한 정밀가공 기술은 도광판 고회

도의 결정적인 요소를 좌우하는 중요한 기술로서 현재 LGP 생산업체에서는 입광부 Pattern의 재현성을 위해 수회에서 수 십회의 미세절입 및 반복가공을 통해 고정도의 정밀 가공을 필요로 한다.

하지만 도광판 재료의 종탄성 계수가 작아 변형되기 쉽고, 공구 인선의 형상 전사성이 좋지 못하기 때문에, 절삭 가공에 의해 광학부품으로서의 정도를 만족시키기 어렵다. 실제 램프의 빛을 받아들이는 도광판 수광부의 가공기술은 다이아몬드 Tool holder를 사용하여 단순한 절삭 가공을 하며 이로 인하여 미세절삭 가공에서 치수효과에 의한 절삭력 증가, 재료 결정입계의 영향 등에 의해 심한 소성변형과 재료의 탈락 등이

* 부산대학교 기계공학부 대학원
+ 부산대학교 기계공학부
++ 교신저자, 부산대학교 기계공학부 (dbkang@pusan.ac.kr)
주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30번지

유발되며, 버 및 가공형상의 찌그러짐에 의한 표면 조도 저하의 결과를 가져왔다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 고정도의 미세 가공기술에 초음파 기술을 이용하게 되었다. 고정도의 미세가공에 진동절삭을 이용하면 치수효과(Size effect)에 의한 비 절삭력의 증가와 그에 의한 큰 변형 및 마찰과 그에 의한 공구의 마모 및 절삭열의 발생을 극복할 수 있고, 진동절삭은 일반적인 절삭에 비해 1/5 ~ 1/10 정도의 절삭력만이 요구되며 마찰의 영향도 작을 뿐만 아니라 가공면의 표면 거칠기도 양호하여 미세 가공에 적합한 것으로 판단된다. 이에 적합한 것으로 PZT(Piezo electric transducer)가 있는데, PZT는 재료에 전압을 인가하면 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환시키는 역할을 한다. 이 PZT에 고전압, 고주파수를 인가하여 재료의 표면을 진동절삭 한다⁽¹⁾.

본 논문에서는, 광학부품으로 사용되는 PMMA를 진동절삭을 위한 PZT tool holder 개발 및 절삭 조건을 구하였고, 진동절삭과 일반절삭을 비교 실험하였다.

2. 진동절삭 가공법

2.1 가공 원리

Fig. 1은 절삭공구가 Tool post에 고정되어 있고, PMMA는 절삭을 위해 이송되는 HSS(High speed shaping) 과정을 보여준다. 절입깊이는 X방향으로 적용되고 재료는 PMMA의 전진 행정 도중에 절삭되고, 반환행정에는 절삭공구는 원래 위치로 이동하고, 그 다음의 전진행정의 절삭공구는 추가적인 절입깊이를 가지고 전진한다.

HSS의 적용 후, 물결모양과 가장자리 파손 현상은 제거되었지만 여전히 LIP의 직진도에 문제가 있음을 보여준다. Tool plate의 진동을 유발하는 HSS 시작시의 충격, 가공하는 동안 PMMA 시트의 편향을 유발하는 큰 절입깊이와 절삭공구와 공작물 간의 높은 마찰력은 LIP의 직진도 특성에 문제를 발생

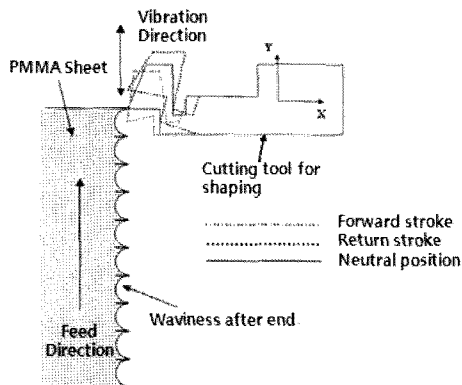


Fig. 1 HSS process of LIP

시키는 원인이 된다.

Fig. 2(a)는 현저 구조의 절삭공구에 PZT를 삽입한 것을 보여준다. PZT는 X방향으로 움직이며, PZT가 움직이는 동안 힘은 X방향으로 적용하고, Tool tip은 Y방향으로 움직인다. PZT 힘과 변위는 인가되는 전압으로 조절이 가능하다. Steel ball은 PZT의 예압을 주는데 사용된다.

Fig. 2(b)는 진동절삭과 관련이 있는 절삭 변수를 나타내며, 절삭속도 및 진폭은 다음과 같이 설명이 된다.

$$X = asin wt \quad (1)$$

$$X = asin 2\pi ft \quad (2)$$

$$Vt = 2\pi fa \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

$$(Vt)_{min} = 0 \quad (4)$$

$$(Vt)_{max} = 2\pi fa \quad (5)$$

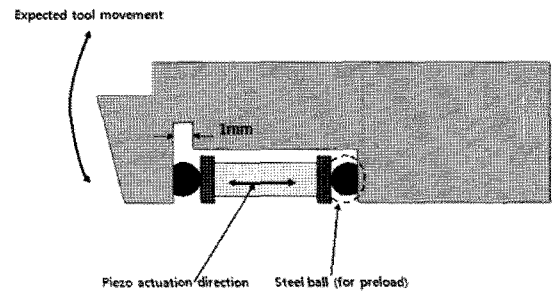
여기서

Vt = 절삭 속도.

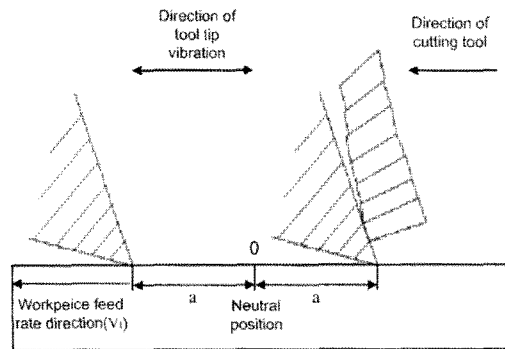
a = 절삭공구의 절삭 행정.

f = 적용된 주파수.

그러므로 식(3)을 통해 절삭 속도, 진폭과 적용된 주파수가



(a) Mechanism of actuator setting in vibration cutting tool.



(b) Schematic of vibration cutting.

Fig. 2 Proposed mechanism of vibration cutting assisted HSS.

서로 관계가 있으며, 절삭속도는 한계절삭속도인 $(V_t)_{max}$ 보다 작아야 한다⁽²⁾.

3. 진동 공구 설계 및 해석

3.1 Tool holder 설계 및 해석

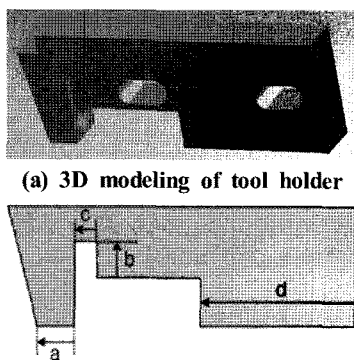
Fig. 3(a)은 유연 힌지구조를 이용하여 PZT tool holder를 3D로 모델링 한 것이다. 한 개의 Notch를 사용하여 형상을 모델링 하였으며, 3D 모델링은 Pro-Engineer를 사용하였다.

Fig. 3(b)는 형상에 대한 a, b, c, d 길이 변수를 나타내며, 각 변수의 수치를 조절 해가며 Tool holder를 설계하였다. 설계된 Tool holder를 Workbench 11.0을 이용하여 고유진동 해석 및 정적해석을 수행하였고, 진동절삭 가공에 적절한 주파수를 가지며 절삭방향으로 가진이 되는 모델 4개를 선정하였다. 절삭공구의 재료는 S45C를 사용하였으며, 다이아몬드 Tip을 부착하였다.

Table 1은 해석에 사용된 기계적 물성치이다. Fig. 4와 Table 2는 각 형상에 대한 변수의 수치 및 해석을 수행한 해석 결과이다. 선정된 4가지 모델에 대한 주 절삭 방향으로의 고유주파수는 각각 18.1, 17.6, 16.6, 17.3kHz가 됨을 알 수 있다.

Table 4는 선정된 4가지 모델에 대해 실험을 하여 얻어낸 결과이다. 본 연구에서는 주 절삭방향인 Y축과 비 절삭방향인 Y축의 Z/Y 변위비가 가장 작고 Z변위 또한 가장 작은 Model 4의 Tool holder를 사용하였다.

Table 3은 Model 4의 Mode 별 고유주파수를 나타낸 것이다.



(b) Geometric variables of tool holder

Fig. 3 Variable and 3D modeling of tool holder

Table 1 Mesh and mechanical properties

Mesh	Elements	19,570
	Nodes	10,989
Material property	Density (kg/m^3)	7,850
	Poisson's ratio	0.3
	Young's modulus (GPa)	20

3.2 Tool Post 설계

Fig. 5는 절입깊이를 제어를 위한 Tool post의 구조를 보여 준다. PMMA 시트가 진공으로 스테이지에 고정되어 있고, 이 스테이지는 모터에 의해 50, 100, 150, 200mm/s의 속도로 Y축 방향으로 이동된다. Tool post는 서보 모터와 두 개의 평행한 엄지나사로 작동된다. Tool은 X축으로 절삭 깊이가 적용되기 위해 움직인다. Tool post의 중요한 요소는 베이스, 모터

Table 2 Result of modal analysis

Model	Variable (mm) (a×b×c×d)	Natural frequency in cutting direction
1	4×2×1×26.5	18.1 kHz
2	5×2×1×25.5	17.6 kHz
3	5.5×3×0.5×25.5	16.6 kHz
4	5.5×1×0.5×26.5	17.3 kHz

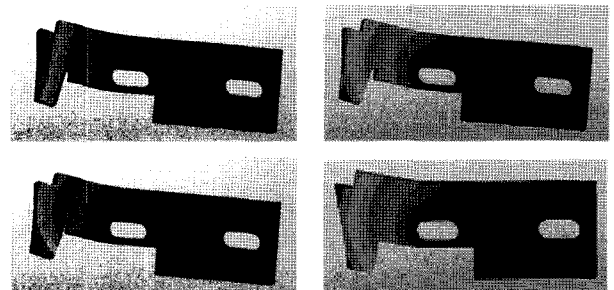


Fig. 4 Displacement of model 1, 2, 3, 4

Table 3 Natural frequency of analysis for model geometry

Mode	Frequency [Hz]
1	14338
2	17386
3	24085
4	39857
5	42585
6	51135

Table 4 Result of experiment for each model

Model	Experimental natural frequency (kHz)	Error (%)	Y-axis displacement (μm)	Z-axis displacement (μm)	Z/Y ratio
1	17	6.1	5.4	3.6	0.667
2	16.2	8	6	3.3	0.55
3	15.9	4.2	5	4.5	0.9
4	16	7.5	5.5	2.5	0.46

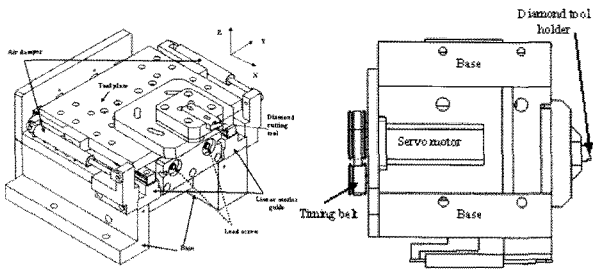


Fig. 5 Structure of the tool post for HSS

플레이트, 엄지나사, 그리고 선형 모션 가이드이다. 고속가공을 시작할 때의 충격으로 인한 진동을 줄이기 위해, 최대 압축 위치일 때 30N의 항력을 가지는 두 개의 공기 댐퍼가 사용된다. 절삭의 깊이는 AC 서보모터와 엄지나사로 인해 적용되며, 서보모터의 회전운동은 타이밍 벨트에 의해 리드 스크류로 전환된다. PMMA는 오직 전진행정에서만 절삭이 되고 반대 행정에서는 절삭 Tool이 원래 자리로 돌아온다⁽³⁾.

4. 예압 선정 및 시스템 구성

4.1 PZT tool holder 예압의 측정

PZT tool holder의 경우 PZT에 예압을 걸고 진동절삭을 시행하게 되는데, 이때의 예압의 크기에 따라 진동특성이 변화하게 된다⁽⁴⁾. 예압은 Torque driver 및 Flexible force 센서를 이용하여 측정하였다.

압전소자는 스프링 강성에 의해 변위의 크기가 변하며 외부의 힘에 의해 고유 진동수 또한 변한다. 진동절삭 기구에 사용된 PZT는 예압에 따라 변위 특성이 달라진다. 따라서 예압 볼트를 이용해 예압을 조절해가며 변위를 측정하였다. Fig. 6은 그 결과를 보여준다. 예압은 9.6, 14.4, 19.3, 24.8kgf로 4단계로 적용하였으며, 절삭 방향 및 공진 주파수 영역에서 최대 변위가 나타나는 최적 예압은 19.3kgf로 나타났다.

4.2 시스템 구성

다이아몬드 Tip이 부착된 Tool holder를 기구에 장착시키고, 레이저 센서(LK-GD500)를 Y축, Z축으로 설치한다. 레이저 센서에서 측정된 신호는 증폭기를 통해 DAQ(Wavebook)로 데이터를 수집 하였다. 가진 주파수는 1kHz~20kHz이고, 전압은 0~40V를 인가한 후, 각각의 경우 변위를 측정 하였다. PZT actuator는 PI사의 PL885.31을 사용하였다. Fig. 7는 진동절삭 시스템의 구성도이다.

가공 시 조건은 스테이지의 이송속도를 각 50mm/s, 100mm/s, 150mm/s 그리고 200mm/s로 주었으며, PZT에 인가한 전압은 0V, 10V, 20V 그리고 30V를 인가하였다

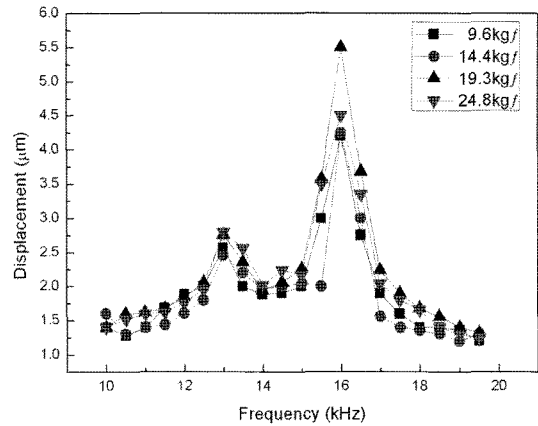


Fig. 6 Displacement of Y axis variations for pre-load

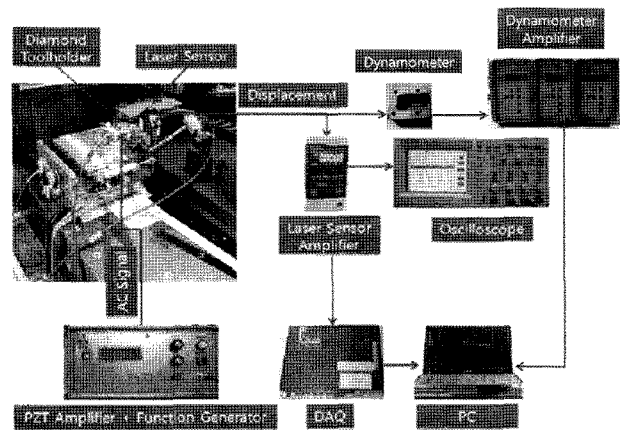


Fig. 7 Experimental setup

5. 실험 결과 및 고찰

Fig. 8은 선정된 Model 4의 Tool holder에 0~20kHz 사이의 범위 내에서 1kHz씩 증가시켜 주면서 10~40V 인가 시 2차 Mode에 대한 주 절삭 방향인 Y축의 변위를 나타내었다. 주 절삭 방향의 변위는 13.4kHz 부근에서 가장 큰 변위를 나타내었다. Y 방향에서의 30V 인가 시 약 $\pm 2\mu\text{m}$ 변위가 발생하였으며 40V 인가 시 PZT에 많은전류가 흐르기 때문에 수명과 안정성에 문제가 되므로 30V에서 진동절삭 가공이 가장 적합할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 50mm/s의 이송속도에 전압에 따른 주분력인 Y축 절삭력 값은 나타내었다. 모든 전압조건에서 진동절삭이 작용하였고 절삭력의 크기는 일반절삭에 비해 감소 하였음을 알 수 있다.

Fig. 10은 표면거칠기 측정 결과 중 일부분인 이송속도 50mm/s, 절입깊이 10um에 인가전압이 0V, 30V일 때의 조건을 나타내는 것이다.

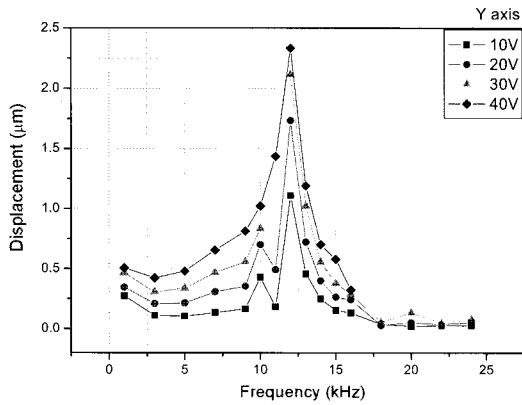


Fig. 8 Y-axis displacement of 2nd mode

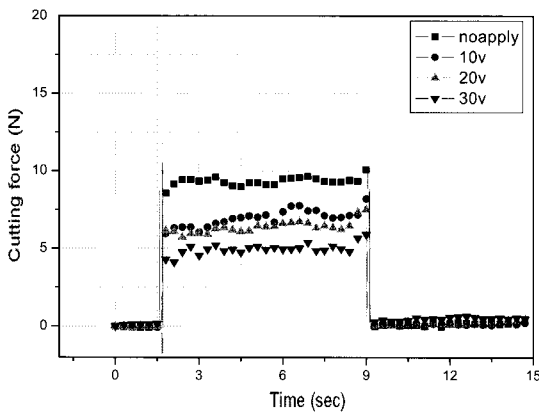
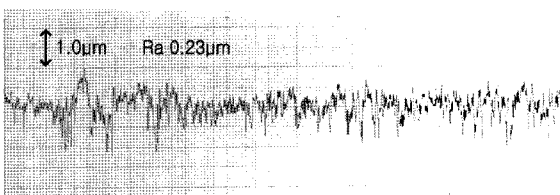
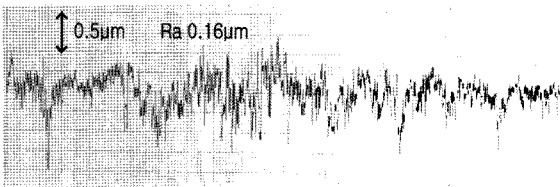


Fig. 9 Cutting forces for voltage (Y-axis), 50mm/s



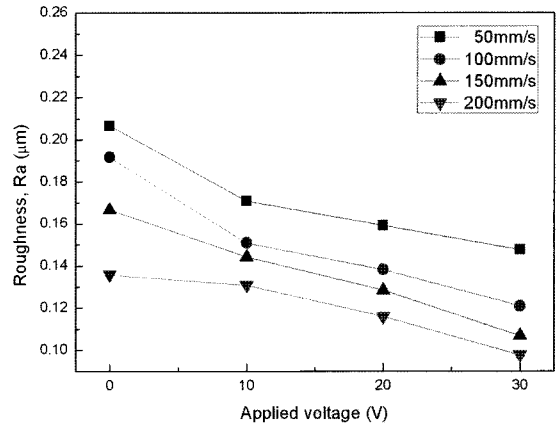
(a) 0V, 10 μ m, 50mm/s condition



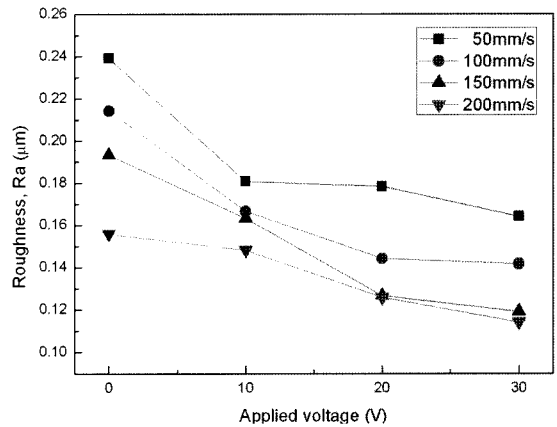
(b) 30V, 10 μ m, 50mm/s condition

Fig. 10 Surface roughness

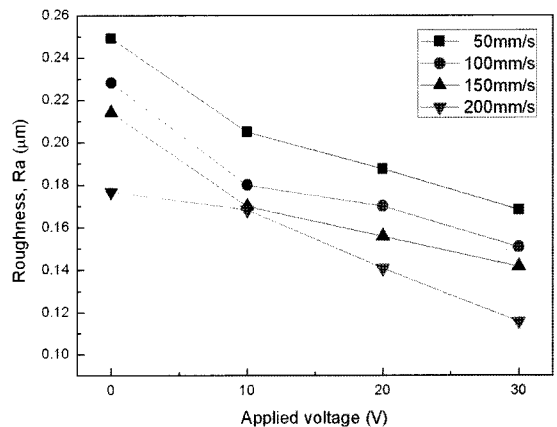
Fig. 11은 이송속도가 50, 100, 150, 200mm/s 이고, 절입깊이가 5, 10, 15 μ m 일 때, 전압조건에 따른 표면거칠기를 나타낸 것이다. 각 이송속도마다 전압을 인가하지 않은 경우, 표면거칠기가 가장 크고, 인가하는 전압이 커짐에 따라 대체적으로 표면거칠기가 작아지는 것을 알 수 있다.



(a) Depth of cut : 5 μ m



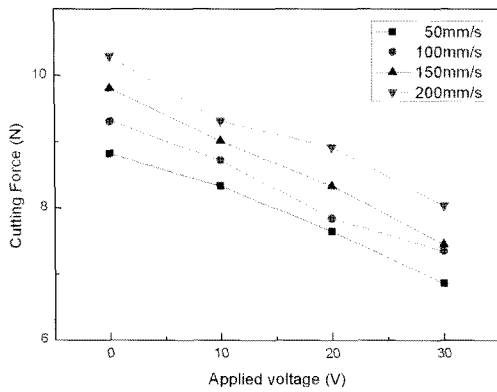
(b) Depth of cut : 10 μ m



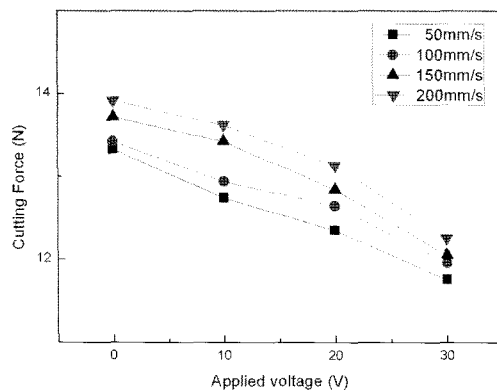
(c) Depth of cut : 15 μ m

Fig. 11 Roughness according to variable feed rate

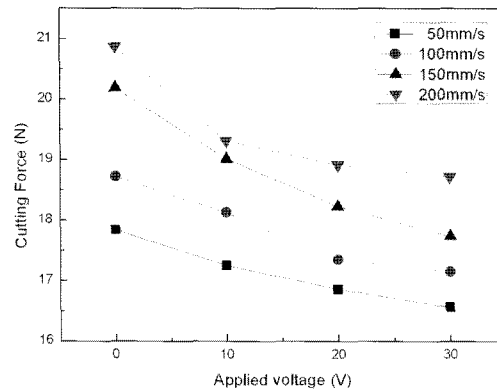
Fig. 12은 절입깊이가 5, 10, 15 μ m일 때, 전압조건에 따른 도광관에 가해지는 절삭력을 도광관의 이송속도가 50, 100, 150, 200mm/s로 설정한 실험에 대해서 나타낸 것이다. 절입깊이가 깊어짐에 따라 절삭력이 점차 커짐을 알 수 있다. 또한 인가하는 전압이 커질수록 절삭력은 줄어들고, 이송속도가 증가하게 되면 절삭력이 증가한다는 사실을 알 수 있다.



(a) Depth of cut 5μm



(b) Depth of cut 10μm



(c) Depth of cut 15μm

Fig. 12 Principal cutting force according to variable feed rate

6. 결론

본 연구에서는 광학부품 가공에서의 정밀도 향상을 위해 PZT actuator를 이용한 진동절삭 시스템을 구성 및 성능평가를 하였다. PZT tool holder를 Pro-Engineer로 설계를 하였고 Workbench 11.0을 통해 해석 후 제작 하였다. 제작된 Tool

holder의 성능평가를 위해 진동절삭 시스템을 이용하여 가공을 수행하였고, 표면거칠기와 절삭력을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- (1) Tool holder의 성능평가에서 모델 해석을 통한 고유진동수와 실험적으로 측정된 고유진동수와의 약 10%의 오차가 있었으나 대체적으로 비슷한 경향을 보였다.
- (2) Tool holder의 성능평가 수행시, 예압은 19.3kgf에서 가장 큰 진폭을 나타내었다.
- (3) 절삭 방향대비 비절삭 방향의 비율(Z/Y)을 우선적으로 고려하여 Tool holder를 선정하여 진동절삭을 시행한 결과, 이송속도 50mm/s 및 인가전압 30V에서 가장 나은 표면거칠기가 나타났다.
- (4) 절입깊이와 이송속도가 작을수록, 인가전압이 클수록 표면거칠기가 작아지는 것을 알 수 있었고, 절삭력 또한 작아짐을 알 수 있다.

후기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- (1) Shamoto, E., and Moriwaki, T., 1999, "Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 48, pp. 441~444.
- (2) Nath, C., and Rahman, M., 2008, "Effect of machining parameters in Ultrasonic Vibration Cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 965~974.
- (3) Mostofa, M. G., Noh, J. H., Kim, H. Y., Ahn, J. H., and Kang, D. B., 2010, "Tooling Device Design for Vibration-assisted High Speed Shaping of PMMA," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, pp. 1623~1629.
- (4) Noh, J. H., 2009, *Increasing the precision of optical part's surface quality using vibration cutting*, Thesis for the degree of Master of Science, Pusan National University, Republic of Korea.