

◆특집◆ 하이브리드 프로세스

## 초정밀 평삭가공과 마이크로 펀칭가공을 위한 하이브리드 가공장비 및 공정기술 개발

김한희\*, 전은채\*,\*\*,#, 차진호\*, 이재령\*,\*\*\*, 김창의\*,\*\*\*\*, 최환진\*,\*\*\*\*,  
제태진\*,\*\*, 최두선\*

(\*KIMM, \*\*UST, \*\*\*고려대학교, \*\*\*\*부산대학교, #KIMM)

### Development of Hybrid Machining System and Hybrid Process Technology for Ultra-fine Planing and Micro Punching

Han-Hee Kim\*, Eun-chaee Jeon\*\*\*#, Jin-Ho Cha\*, Je-Ryung Lee\*\*\*\*, Chang-Eui Kim\*\*\*\*\*,  
Hwan-Jin Choi\*\*\*\*\*, Tae-Jin Je\*\*\*\*, Doo-Sun Choi\*

(Received 9 December 2013; received in revised form 17 December 2013; accepted 23 December 2013)

#### ABSTRACT

Ultra-fine planing and micro punching are separately used for improving surface roughness and machining dot patterns, respectively, of metal molds. If these separate machining processes are applied for machining of identical molds, there could be an aligning mismatch between the machine tool and the mold. A hybrid machining system combining ultra-fine planing and micro punching was newly developed in this study in order to solve this mismatch; hybrid process technology was also developed for machining dot patterns on a mirror surface of a metal mold. The hybrid machining system has X, Y, and Z axes, and a cam axis for ultra-fine planing. The cam axis and attachable and removable solenoid actuators for micro punching can make large and small sizes of dot patterns, respectively. Ultra-fine planing was applied in the first place to improve the surface roughness of a metal mold; the measured surface roughness was about 20nm. Then, micro punching was applied to machine dot patterns on the same mold. It was possible to control the diameter of the dot patterns by changing the input voltage of the solenoid actuator. Before machining, severe inhomogeneous plastic deformation around the machined dot patterns was also removed by annealing heat treatment. Therefore, it was verified that metal molds with dots patterns for optical products can be machined using a hybrid machining system and the hybrid process technology developed in this study.

**Key Words** : Hybrid machining system(하이브리드 가공장비), Hybrid process technology (하이브리드 공정기술), Ultra-fine planing(초정밀 평삭가공), Micro punching(마이크로 펀칭가공)

## 1. 서 론

디스플레이 및 조명 등의 광학산업 발달로 각각의 제품의 특성에 따라 광학적 역할을 수행할 수 있는 다양한 미세패턴의 설계와 가공에 관한 연구가 이루어지고 있다. 최근에 개발되는 광학제품들은 1차적으로 수치해석 및 시뮬레이션을 통해서 설계하는데, 이러한 설계는 제조공정 중에 나타나는 표면조도를 고려하지 않기 때문에 실제 제품과 설계치가 다른 문제가 나타난다. 따라서 제조공정에서 표면조도를 최대한 줄여야 하며, 이러한

\* Dept. of NanoManufacturing Technology, KIMM.

# Corresponding Author :

Dept. of NanoManufacturing Technology, KIMM.

E-mail : [jeonec@kimm.re.kr](mailto:jeonec@kimm.re.kr)

\*\* Dept. of Nano-Mechanics, UST

\*\*\* School of Elec. and Info. Eng., Korea Univ.

\*\*\*\* School of Mechanical Eng., Pusan National Univ.

문제점을 해결하기 위해 단결정다이아몬드 (Single Crystal Diamond)를 이용한 절삭가공(평삭, 선삭)기술이 적용되고 있다<sup>[1]</sup>.

또한 디스플레이 산업에서 중요한 비중을 차지하고 있는 LCD (Liquid Crystal Display)는 스스로 빛을 내지 못하고 후면에 광원 (BLU, Back Light Unit)을 필요로 한다. 이러한 LCD의 광원으로 기존에는 CCFL (Cold Cathode Fluorescent Lamp)을 많이 사용하였으나 최근에는 LED (Light Emitting Diode)를 후면 광원으로 많이 사용하고 있다. 선광원인 CCFL을 광원으로 사용하는 경우 프리즘 패턴 같은 선패턴이 유리하였다. 그러나 LED는 선광원이 아닌 점광원의 형태를 가지기 때문에 프리즘 같은 선패턴보다 마이크로렌즈어레이 (Micro lens array) 같은 점패턴이 유리하다<sup>[2-4]</sup>. 기존의 점패턴은 대부분 화학적 공정을 이용해 제작을 하기 때문에 공정이 복잡하고 패턴의 형상이 제한적인 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 압입경도 실험방법의 원리를 응용한 펀칭가공을 통한 점패턴 가공이 사용되고 있다. 펀칭가공의 경우 사용되는 공구의 형상에 따라 원형, 피라미드형, 삼각형 등 다양한 형상을 가공할 수 있으며 비교적 대면적에 패턴 가공을 실시할 수 있는 장점이 있다.

이에 본 연구에서는 초정밀 평삭가공과 마이크로 펀칭가공을 단일장비에서 모두 수행할 수 있는 하이브리드 가공기를 제작하였다. 또한 개발된 하이브리드 가공기를 사용하여 광학부품제조에 사용될 수 있는 점패턴을 갖는 금형을 가공하는 하이브리드 공정기술도 개발하였다. 또한 마이크로 펀칭가공 시 발생하는 점패턴 주변의 소성 변형을 줄이기 위한 공정기술도 개발하였다.

## 2. 하이브리드 가공 장비

평삭가공 후 점패턴 가공을 위해 별도의 펀칭가공기에 서 점패턴을 가공하면 장비와 금형 간의 평탄도가 틀어지고 절대좌표가 변경되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 초정밀 평삭가공과 마이크로 펀칭가공을 동일 장비에서 공구만을 교체하여 수행할 수 있는 하이브리드 가공장비를 제작하였다. 제작된 하이브리드 가공장비는 Fig. 1과 같이 수평방향의 X, Y축과 수직방향의 Z축으로 이루어져 있으며, 수직 방향축에

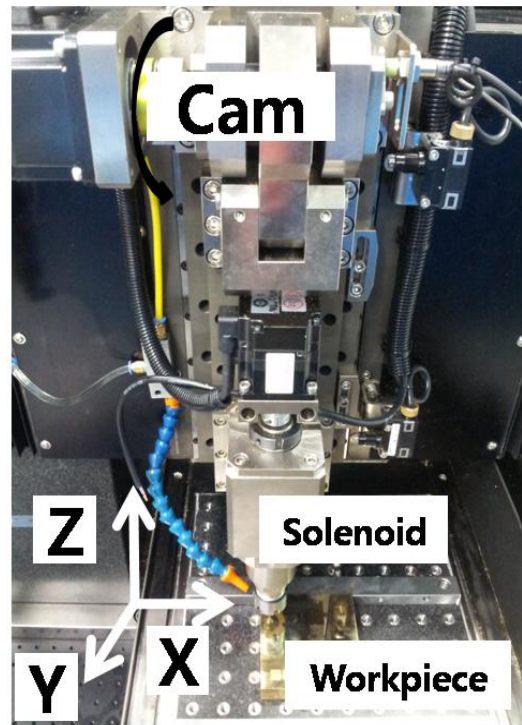


Fig. 1 A newly developed hybrid machining system of ultra-fine planing and micro punching

편심을 이용한 캠(Cam)축을 장착해 각도에 따라 Z축과는 별도로 최소 0 ~ 최대 1.2 mm의 움직임이 가능하도록 설계하였다. 초정밀 평삭가공을 위해 본 가공장비는 X, Y, Z축의 직선 정밀도 0.3  $\mu\text{m}$  이하, 각축의 분해능 3 nm 이하의 성능을 가지고 있으며, 가공 가능한 최대 면적은 200 mm $\times$ 200 mm이다. 초정밀 평삭가공 시 Z축이 반복적으로 움직이는 것이 아니라 캠축을 이용해 가공 시 가공각도(ex : 180°)를 유지하고 이송 시 복귀각도(ex : 0°)로 가공을 실시하여 Z축에 걸리는 부하를 줄이도록 하였다.

또한 기존 펀칭가공기에선 X, Y축 스테이지와 공구간의 간섭으로 인해 패턴이 밀리는 현상이 발생하는 경우가 있다. 이는 공구가 금형을 펀칭하는 동안 스테이지가 움직이기 때문에 발생된다. 이러한 밀리는 현상을 제거하기 위해 펀칭가공 시 공구축과 스테이지를 동기화하여 공구가 금형을 펀칭하는 동안 스테이지가 정지하도록 제작하였다. 고속 마이크로 펀칭가공을 위해 솔레노이드 액츄에이터 (solenoid actuator)를 사용하였으며, 솔레노이드 액츄에이터의 종류와 인가전압 변경에 따라 점패턴

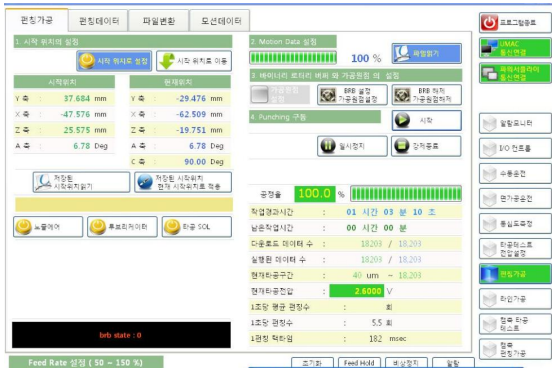


Fig. 2 A screenshot of operating software having graphic user interface for the developed hybrid machining system

크기를 제어할 수 있다. 또한 가공 가능한 점패턴 크기 범위를 넓히기 위하여 솔레노이드 액츄에이터로 가공이 힘든 큰 점패턴의 경우에는 캠축의 편심을 이용하여 점패턴을 가공하도록 하였다. 이러한 궁구축의 하이브리드화를 통해 수 마이크로에서 수 밀리미터의 지름을 가지는 점패턴의 가공이 가능하다. 또한 Fig. 2와 같이 직관적이고 사용하기 쉬운 그래픽 인터페이스를 적용한 구동소프트웨어도 개발하였다.

### 3. 하이브리드 가공 공정

#### 3.1 초정밀 평삭가공

점패턴을 가공하기 전에 금형이 광학제품으로 사용할 수 있는 표면조도를 가지게 하기 위해 초정밀 평삭가공 기반 평탄화가공을 수행하였다. 평탄화가공을 수행하기 위해 Fig. 3과 같이 반지름 50 mm를 가지는 단결정다이아몬드 공구를 사용하였고, 금형 표면조도 향상을 위해 황삭, 중삭, 정삭으로 나누어 가공을 실시하였다. 황삭은 DOC(Depth of cut) 10  $\mu\text{m}$ 에 pitch 100  $\mu\text{m}$ 로 5회 실시하였으며, 중삭 DOC 5  $\mu\text{m}$ 에 pitch 100  $\mu\text{m}$ 로 3회, 정삭 DOC 2  $\mu\text{m}$ 에 피치(Pitch) 50  $\mu\text{m}$ 에 2회 실시하였다. 가공 시편의 소재는 100 X 100 mm 64 brass이며 일반 시편과 열처리한 두 가지 시편을 사용하였다. 이는 평삭가공 후 수행할 펀칭가공 시에 점패턴 주변에 불균일한 소성변형현상이 발생하여 가공품질을 저하시키는데, 기존 연구들<sup>[2,5-7]</sup>에서 풀림열처리를 할 경우 이러한 소성변형현상을 줄일

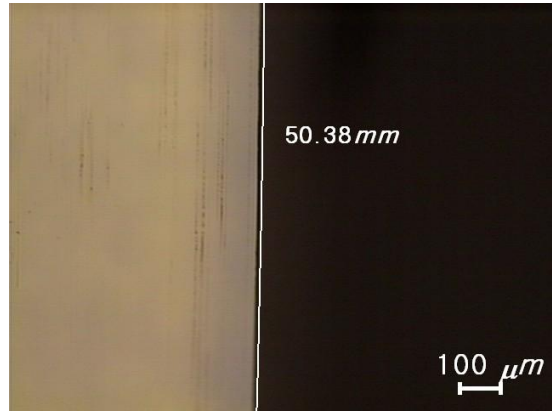


Fig. 3 A single crystal diamond tool (R50 mm) for ultra-fine planing

Table 1 Details of ultra-fine planing conditions

Cutting tool	Diamond tool radius 50 mm
Workpiece	64 brass, 100 mm × 100 mm (normal and annealed)
Pitch	100 $\mu\text{m}$ , 50 $\mu\text{m}$
Depth of cut	10 $\mu\text{m}$ × 5, 5 $\mu\text{m}$ × 3, 2 $\mu\text{m}$ × 2
Axis	X, Y, Z
Cutting oil	ISOPAR-H Mist

수 있다고 보고한 것에 따른 것이다. 이때 열처리하는 보통 풀림열처리를 의미하기 때문에 일반적인 64brass의 풀림 열처리 조건에 따라 575°C에서 6시간동안 유지한 후 노냉 조건으로 생각하는 열처리를 실시하였다. 자세한 초정밀 평삭가공조건은 Table 1에 나타내었다.

#### 3.2 마이크로 펀칭가공

앞서 평삭 공정으로 평탄화가공이 완료된 금형에 점패턴 제작을 위한 마이크로 펀칭가공을 진행하였다. 펀칭가공을 위한 공구는 Fig. 4와 같이 구형 형상의 반지름 25  $\mu\text{m}$ 를 가진 다이아몬드공구를 사용하였다. 마이크로 펀칭가공은 피치 100  $\mu\text{m}$ 를 가지는 10 X 10 어레이 점패턴을 가공하였고, 솔레노이드 액츄에이터 제어는 2.2V에서 3.0V까지 0.2V씩 상승시켜 공정을 진행하였다. 이러한 인가전압 변화를 통해 가공된 점패턴의 지름을 측정함으로써 마이크로 펀칭가공을 통해 점패턴 지름을 정량적으로 제어할 수 있는지를 검증하고자 하였다. 또한 앞서

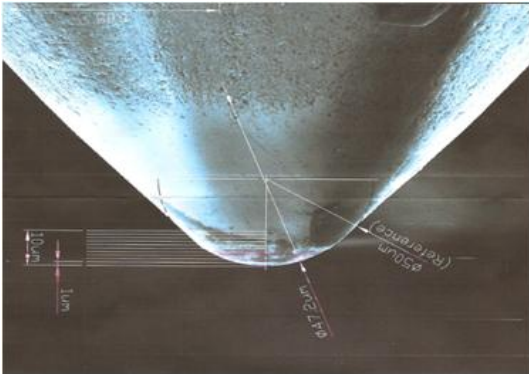


Fig. 4 A single crystal diamond tool (R25 $\mu$ m) for micro punching

Table 2 Details of micro punching conditions

Cutting tool	Diamond tool radius 25 $\mu$ m
Workpiece	64 brass, 100 mm $\times$ 100 mm (normal and annealed)
Pattern shape	Pitch 100 $\mu$ m 10 $\times$ 10 array (total 100 point)
Input voltage	2.2V, 2.4V, 2.6V, 2.8V, 3.0V
Actuator	Solenoid

초정밀 평삭가공 때와 마찬가지로 일반 시편과 열처리를 한 시편에 대해 마이크로 펀칭가공을 수행하여 기존 연구들에서 보고한 바와 같은 패턴 주변의 소성변형현상의 변화도 측정하고자 하였다. 본 연구를 통한 마이크로 펀칭가공의 자세한 공정조건은 Table 2에 나타내었고, 이를 통해 최종적으로 Fig. 5와 같은 하이브리드 공정을 진행하고자 하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 초정밀 평삭가공 결과

본 연구에서 개발된 하이브리드 가공장비를 이용하여 초정밀 평삭공정을 수행한 결과 Fig. 6과 같이 경면으로 가공된 금형을 얻을 수 있었다. 광학 제품으로 사용가능한 표면조도를 가지는지 확인하기 위해 Taylor Hobson사의 접촉식 프로파일러를 이용해 표면조도를 측정하였다.

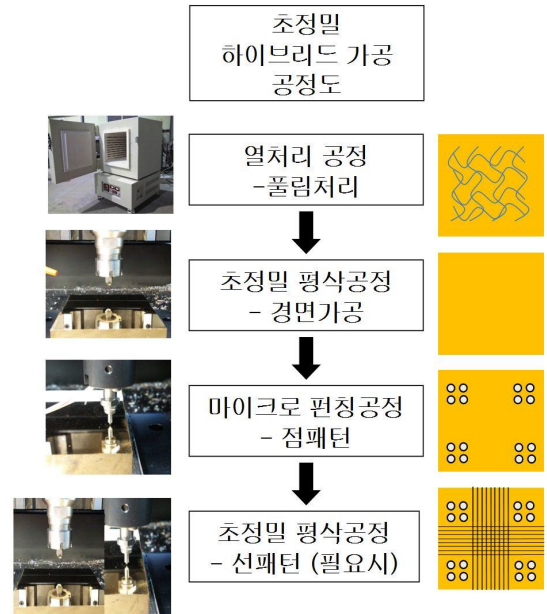


Fig. 5 A flow chart of hybrid process technology for ultra-fine planing and micro punching



Fig. 6 Mirror surface obtained by ultra-fine planing using the developed hybrid machining system

측정은 100 $\times$ 100 mm 시편을 5구간으로 나누어 실시하였다. 측정된 프로파일은 Fig. 7과 같으며, 측정된 표면조도 값은 Table 3에 나타내었다. 측정 결과 평균 21.4nm로 매우 우수한 표면조도를 갖는 것으로 측정되었다. 또한 폴림열처리한 시편의 표면조도도 평균 23.3 nm로 일반 시편보다 표면조도가 조금 상승하였으나 절대값을 기준으로 우수한 표면조도를 나타내었다. 이를 통해 본 연구

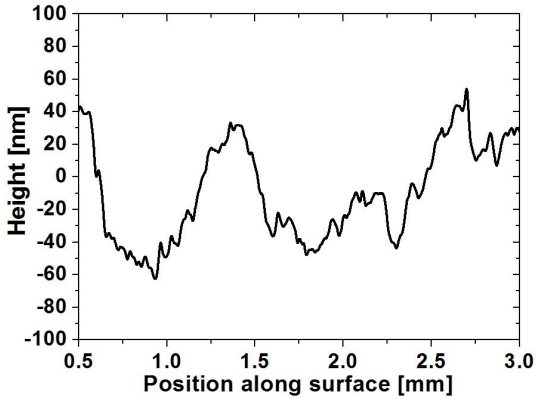


Fig. 7 Profile data of the mirror surface for measuring surface roughness

Table 3 Detailed data of measured surface roughness varied by annealing heat treatment

Material	Normal	Annealing
1st(nm)	24.8	21.6
2nd(nm)	21.8	22.6
3rd(nm)	23.5	20.2
4th(nm)	20.9	30.0
5th(nm)	16.1	21.9
Avg.(nm)	21.4	23.3

에서 개발된 하이브리드 가공장비를 이용해 초정밀 평삭가공을 수행한 금형이 광학 제품으로 사용 가능한 것을 확인하였다.

## 4.2 마이크로 펀칭가공 결과

### 4.2.1 인가전압에 따른 점패턴 크기 변화

초정밀 평삭가공이 끝난 두 시편에 대해 마이크로 펀칭공정으로 점패턴을 가공한 뒤 Fig. 8과 같이 광학현미경을 통해 형상을 측정하였다. 일반 시편의 경우에 인가전압이 커지면 평균 지름이 2.2V에서 13.57  $\mu\text{m}$ , 2.4V에서 20.02  $\mu\text{m}$ , 2.6V에서 24.03  $\mu\text{m}$ , 2.8V에서 28.81  $\mu\text{m}$ , 3.0V에서 30.49  $\mu\text{m}$ 로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 공구축

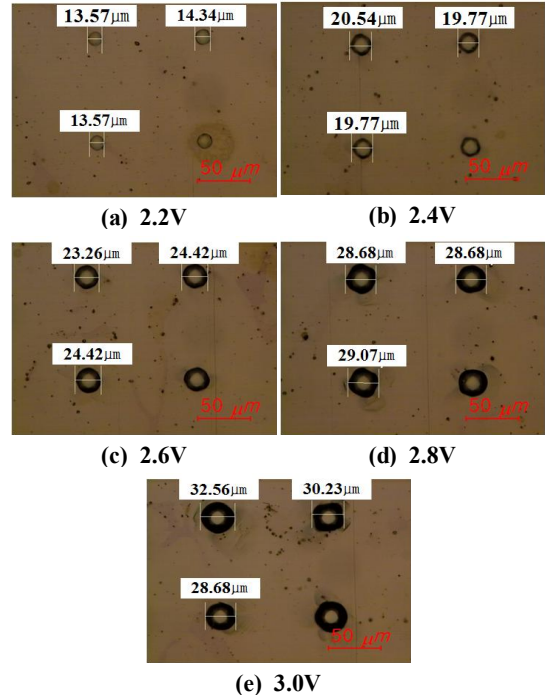


Fig. 8 Dot-type patterns machined by various input voltage

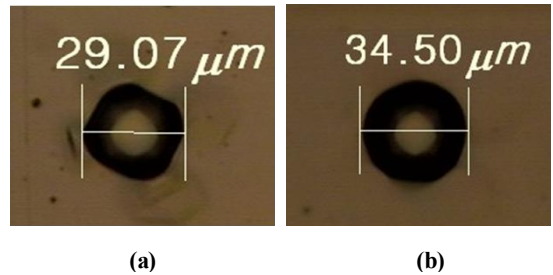


Fig. 9 Comparison of shape of machined dot-patterns on (a) a normal mold and (b) an annealed mold measured by optical microscope

과 스테이지 간의 동기화에 의해 밀림 현상이 없는 원형의 점패턴이 형성되었다. 이를 통해 Z축 액추에이터로 사용된 솔레노이드의 인가전압을 제어함으로써 패턴의 크기를 조절할 수 있으며, 공구와 동일한 형상의 점패턴을 가공할 수 있음을 확인하였다.

그러나 인가전압이 증가하여 점패턴의 지름이 커짐에

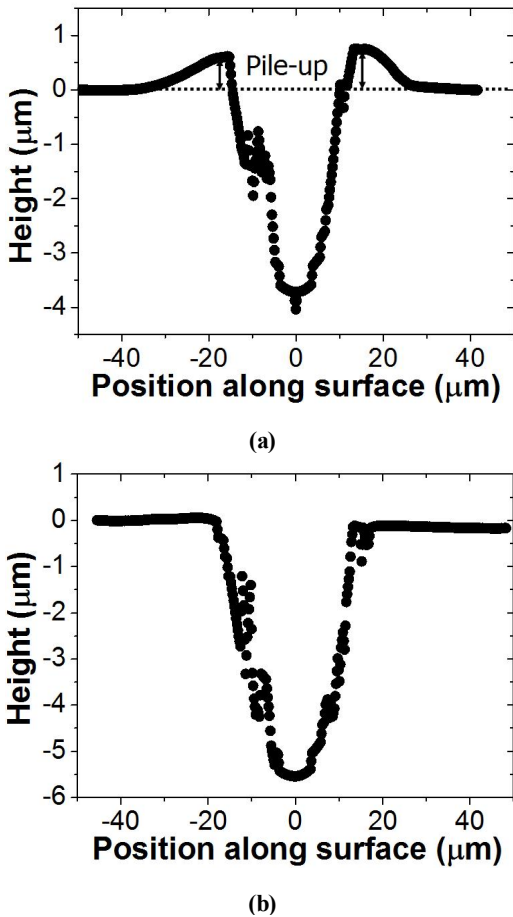


Fig. 10 Comparison of vertical profiles of machined dot-patterns on (a) a normal mold and (b) an annealed mold measured by white light interferometry

따라서 점패턴 주변에서 발생하는 소성변형이 심화되는 것이 관찰되었다. 이러한 소성변형은 pile-up 현상이라 불리며 점패턴 주변에 소성변형된 소재가 쌓인 높이 (pile-up 높이)를 측정하면 정량적으로 분석할 수 있다. 그러나 광학현미경을 통한 측정은 점패턴의 지름은 확인할 수 있지만, 점패턴의 깊이와 pile-up 높이를 측정하기 어렵기 때문에 백색광간섭계를 이용한 측정을 실시하였다. 열처리한 시편에 대해서도 동일한 측정을 수행하였으며 결과는 다음 절에 서술하였다.

#### 4.2.2 폴림열처리에 의한 점패턴 주변의 소성 변형현상 변화

앞서 밝힌 바와 같이 기존 연구들에 의하면 폴림열처리한 시편에서는 점패턴 주변 소성변형현상이 감소하는 것으로 알려져 있다. 이를 바탕으로 폴림열처리한 시편에 대해 일반 시편과 동일한 조건으로 마이크로 펀칭가공하여 형성된 점패턴을 광학현미경으로 측정하였다. Fig. 9의 패턴 크기를 보면 같은 인가전압으로 가공하여도 폴림열처리한 시편에 형성된 점패턴이 더 크게 나타났다. 이는 폴림열처리한 시편의 경도가 64 Hv로 일반 시편의 121 Hv보다 낮아졌기 때문이다.

또한 폴림열처리한 시편의 점패턴이 일반 시편의 점패턴보다 주변의 소성변형이 적게 발생하여 원형의 형상에 더 가까운 것을 볼 수 있다. 백색광간섭계를 이용해 측정된 pile-up 높이는 Fig. 10에서 보는 바와 같이 일반 시편에서 높게 형성된 pile-up이 폴림열처리한 시편에서는 거의 없음을 알 수 있다. 정량적인 값으로 비교하면 인가전압 2.8V에서 일반 시편에 가공된 점패턴의 pile-up 높이는 0.76  $\mu\text{m}$ 이지만, 폴림열처리한 시편에서는 0.061  $\mu\text{m}$ 로 대폭 감소하였다.

이를 통해 본 연구에서는 개발된 하이브리드 장비를 이용해 단일 장비에서 초정밀 평삭가공과 마이크로 펀칭가공의 하이브리드 공정을 이용하여 광학제품으로서의 표면조도와 점패턴을 갖는 금형을 가공할 수 있음을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 초정밀 평삭가공과 마이크로 펀칭가공을 단일 장비에서 수행할 수 있는 하이브리드 장비를 제작하고, 이 장비를 이용해 광학부품용 점패턴 가공 기술을 개발하여 아래의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수평방향 X, Y축, 수직방향 Z축, 편심 캠축을 이용한 평삭공정과 편심 캠축 및 슬레노이드 액츄에이터를 이용한 마이크로 펀칭공정을 단일 장비에서 가공할 수 있는 하이브리드 장비를 개발하였다.
2. 개발된 하이브리드 가공장비를 사용하여 실시한 초정밀 평삭가공을 통해 평균 표면조도 20nm 대를 가지는 광학용 금형을 가공하였다.

3. 마이크로 펀칭가공에서 슬레노이드 액츄에이터의 인가전압을 제어함으로써 점패턴의 지름을 정량적으로 제어할 수 있었다.
  4. 풀립열처리한 시편을 사용하여 점패턴 가공 시 발생하는 소성변형을 대폭 감소시킴으로써 고품위의 점패턴을 가공하였다.
  5. 이를 바탕으로 단일장비로 초정밀 평삭가공과 마이크로 펀칭가공을 이용해 광학제품으로 사용할 수 있는 표면조도를 가지고 소성변형이 적은 점패턴 금형을 가공할 수 있는 하이브리드 공정기술을 개발하였다.
- Area of a Hardness Indentation," J. Phys. D, Vol. 21, pp. 370-374, 1988.
7. Cheng, Y. T. and Cheng, C. M., "Effects of 'Sinking in' and 'Piling up' on Estimating the Contact Area Under Load in Indentation," Phil. Mag. Let., Vol. 79, pp. 115-120, 1998.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 “100 nm~100  $\mu\text{m}$  나노복합 구조물 응용제품 생산을 위한 금형가공 및 에너지 100% 절감 성형시스템 개발” 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Je, T. J., Choi, D. S., Jeon, E. c., Park, E. S. and Choi, H. J., "Trends of Flat Mold Machining Technology with Micro Pattern," J. of KSMPE, Vol. 11, pp. 1-6, 2012.
2. Jeon, E. c., Je, T. J. and Jang, S. h., "Development of Machining Technology for Non-continuous Pattern Removing Plastic Deformation Around Pattern," J. of KSMPE, Vol. 9, pp. 1-6, 2010.
3. Tsou, C., Chang, C., Lai, T. and Huang, C., "The Implementation and Performance Evaluation of a Silicon-based LED Packaging Module with Lens Configuration," Mircosystem Tech., Vol. 19, pp. 1851-1862, 2013.
4. Lee, K. H., Jee, S. H., Kim, S. H., Yoon, Y. S. and Kim, S. H., "Modeling for New Type Backlight Units," Kor. J. Opt. Photon., Vol. 21, pp. 41-45, 2010.
5. Taljat, B. and Pharr, G. M., "Development of Pile-up During Spherical Indentation of Elastic-plastic Solids," Inter. J. Solids and Struc., Vol. 41, pp. 3891-3904, 2004.
6. Chaudhri, M. M. and Winter, M., "The Load-bearing