

# V형 다이아몬드공구에 의한 연질소재의 미세절삭특성 연구

홍성민<sup>#</sup>, 제태진<sup>\*</sup>, 이동주<sup>\*\*</sup>, 이종찬<sup>\*\*\*</sup>

## Micro Machining Characteristics of V-shaped Single Crystal Diamond Tool with Ductile Workpiece

Sung-Min Hong<sup>#</sup>, Tae-Jin Je<sup>\*</sup>, Dong-Ju Lee<sup>\*\*</sup>, Jong-Chan Lee<sup>\*\*\*</sup>

### ABSTRACT

Recently, trends of TFT-LCD toward larger scale and thinner thickness continue. so, demands of Light Guide Panel (LGP) which is to substitute for prism sheet are appeared. Functions of LGP obtaining polarization of light of the prism sheet as well as the incidence and reflection of light are demanded. This prism type LGP to complete functions of the existing LGP and polarization at once must be supported by micro machining technology of LGP surface.

In this research, the machining characteristics of the various materials were analysed by shaping using V-shaped single crystal diamond tool. The characteristics are machined surface, machining force due to the variation of cutting depth. Used specimens are engineering materials, which are 6:4 brass, oxygen-free copper, Al6061, PC, PMMA. The FFT analysis of the measured cutting force was conducted. The cutting characteristics were analyzed and the optimum cutting conditions with materials were established.

**Key Words** : Prism Type LGP Mold (프리즘형 도광판 금형), Micro V-groove (미세 V 그루브), Cutting Force(절삭력), Diamond Tool (다이아몬드 공구)

### 1. 서 론

최근 들어 TFT-LCD Module의 크기가 증가하고, 두께는 감소되는 추세를 감안하여 프리즘 시트의 기능을 대체할 수 있는 도광판의 수요가 대두되었다<sup>[1]</sup>. 즉 기존의 빛의 입사 및 출사 역할을 넘어서서 프리즘

시트가 담당해오던 편광 기능까지 수행 하는 도광판의 성능이 요구되는 것이다<sup>[2]</sup>.

이러한 도광판의 패턴은 미세 V-groove를 기초로 하고 있다.

도광판 역할과 프리즘 시트의 역할을 동시에 수행 하는 프리즘형 도광판의 표면은 광학적 성능이 뛰어나야 하므로 금형 또한 고품질의 표면을 요구한다. 따라서 초정밀 V-groove 패턴의 가공기술 확보가 그 핵심이 되며 양산 공정에의 적용을 위해서는 가공속도, 패턴이나 가공면적의 크기, 가공결함 등의 문제 개선을 위한 기술 개발이 필수적이고, V-groove 가공시 나타나는 여러 절삭특성을 규명하지 않으면 안 된다<sup>[3]</sup>.

# 교신저자 : 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

E-mail : hsm1815@kimm.re.kr

\* 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

\*\* 충남대학교 기계공학과

\*\*\* 금오공과대학교 기계공학과

본 연구에서는 기계적 절삭 가공에 의한 미세패턴 가공 기초 기술개발<sup>[4]</sup>을 위해서 서로 다른 소재에 대하여 절삭 깊이, 절삭 속도 등에 따른 절삭력, 절삭력의 FFT, 가공면 품질 및 가공 형상 결과를 실험을 통해 분석하고 최적의 절삭공정 조건을 구하고자 하였다<sup>[5]</sup>.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 초정밀 미세 가공시스템은 X-Y-Z의 3축으로 이루어져있으며, X-Y 축은 일반적으로는 5nm의 정밀도를 가지며, Z축은 앤드밀, 드릴과 같이 회전스핀들에 공구를 장착하여 가공하는 방식 외에 단인공구를 고정 치구로 장착하여 세이핑 가공이 가능하도록 구성되어 있다.

시스템의 제어는 PC 기반의 Turbo PMAC board 를 사용하였고, 3차원 형상의 초소형부품 제작을 위하여 CAD/CAM 기능이 지원되는 PMAC-NC software 를 부가 설치하여 CAM 프로그램으로 생성된 NC-data 를 직접 받아 가공 할 수 있도록 하였다. 가공실험 중의 공정 모니터링을 위해서 공구 밑에는 0.002N 의 미세 절삭력을 측정할 수 있는 공구 동력계(Kistler, MiniDyn 9256A)를 설치하였다. 데이터의 수집은 Kistler 사의 5019 전하증폭기(Charge amplifier)를 통해 신호를 증폭하고 NI DAQ Card A/D 변환기를 통하여 PC에 저장되어진다. 데이터 분석은 DEWETRON 사의 DEWE SOFT PLUS 를 이용하였다. Fig. 1과 Table 1 에 초정밀 미세 가공시스템의 외관과 사양을 나타내었다.

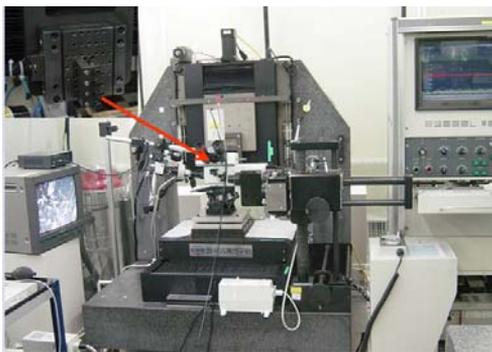


Fig. 1 Micro machining system.

Table 1 Specification for Experimental system

	Item	Unit	Specification
X-Y Axis Stage	Moving Stroke	mm	200×200
	Feeding Speed Range	mm/s	0.005-22
	<b>Min. Incremental Move</b>	<b>nm</b>	<b>5 (20000cts/mm)</b>
	Position Repeatability	μm	0.05-0.25
Z Axis Slide	Moving Stroke	mm	100 (LS1nm/rev)
	Feeding Speed Range	mm/s	0.005-22
	<b>Min. Incremental Move</b>	<b>nm</b>	<b>40 (25000cts/mm)</b>
	Position Repeatability	μm	0.3-0.5
Table	Size	mm	220 × 220
	Allowable Weight	N	890
Straightness	X Axis	μm	H<0.5, V<0.6
	Y Axis	μm	H<0.5, V<0.6
	Z Axis	μm	H,V : 0.0025
Repeated Precision (X/Y/Z Axis)		μm	< 0.1

### 2.2 가공원리 및 공구

세이핑(shaping) 방식에 의한 가공원리의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 세이핑 가공은 기본적으로 공구와 공작물간의 교차왕복운동으로 이루어진다. 공구나 공작물의 높이 변동이 없이 측면이송만 주면 동일 평면상에 패턴이 가공되고, 가공 중 공구나 공작물에 상하 운동을 주어 가공하면 비구면 또는 3차원 형상을 가공할 수 있다. 또한 세이핑의 기본원리는 공구 단면 인선형상의 복사이다. 즉 공구의 단면 형상에 따라 가공되는 그루브의 단면 형상이 결정된다. 본 연구에서는 단결정 다이아몬드 공구의 인선을 V형상으로 제작하여 5종의 피삭재를 세이핑 할 때 절삭 특성을 관찰 하였다.

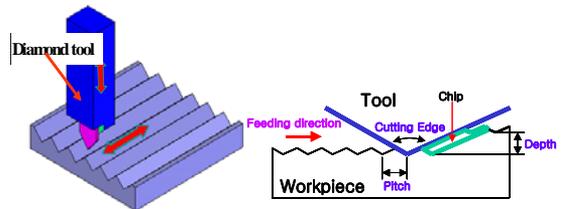


Fig. 2 Machining principle by 90° diamond tool

Fig. 3은 본 실험에 응용한 절삭 메카니즘이며, 5종의 피삭재를 절삭 깊이변화에 따른 절삭력과 표면 상

태를 분석하기 위한 가공 방법이다. 황삭  $5\mu\text{m/pass}$ 에서 프리즘렌즈 형상을 완성하고 정삭 가공을 통해 프리즘형 도광판 금형을 완성하여 절삭 깊이에 따른 가공 상태를 분석한 것이다.

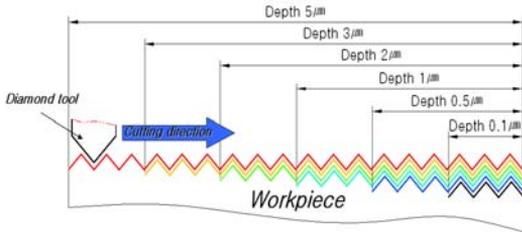


Fig. 3 Method to fabricate the V-groove

본 연구를 위해 설계 제작된 다이아몬드공구의 설계 도면을 Fig. 4에 나타내었다. 그 세부 치수로는 공구각  $90^\circ$ , 경사각  $0^\circ$ , 여유각  $3^\circ$ , 노즈 반경 약  $1\mu\text{m}$ 이며, 형상 정밀도 및 치수 정밀도에 대하여  $1\mu\text{m}$  이하의 고 정밀도를 요구 하고 있다. Fig. 5는 설계도면에 의해 제작된 공구상태를 SEM 촬영을 통해 경사면 (Rake face) 및 여유면 (Relief face)의 상태를 분석 하였다.

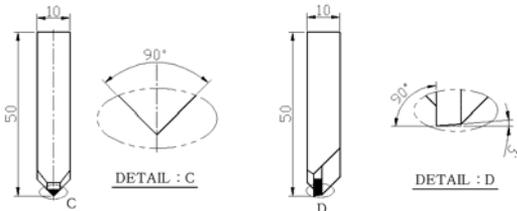


Fig. 4 Drawing of diamond tool with component angle  $90^\circ$

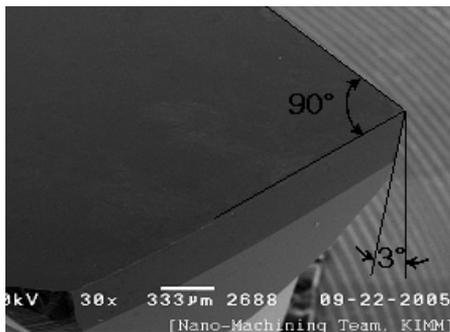


Fig. 5 Detail form of diamond tool

## 2.3 피삭재 및 절삭조건

실험에 사용된 피삭재의 종류는 6:4 황동(6:4 brass), 무산소동(oxygen-free copper), Al6061, PC(Polycarbonate), PMMA(Poly Methyl Meth Acrylate)등 5종류이다. 이중 6:4 황동은 기계 가공성이 뛰어나 Macro 가공에서도 많이 사용되어 지고, 무산소동은 경면가공성이 좋아 광학용 부품으로 다수 사용되어진다. Al6061의 경우 강도는 높으나 비중이 작아 비행기 재료로 사용되며 PC, PMMA는 절삭성 및 광학적 투명도와 균질성이 좋아 최근 광학용 부품으로 많이 사용되어 진다. Table 2는 5종의 피삭재에 대한 기계적 성질 과 비커스 경도를 나타 낸 것이다.

Fig. 6에 위의 재료들을 동일조건 상태를 유지하여 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 위하여 대형의 Vise에 5종의 피삭재를 평탄도  $1\mu\text{m}$  범위 내로 셋팅된 상태를 나타내었다.

Table 3은 본 실험에 적용한 절삭조건이다.

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Item	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (HV)
6:4 brass		25	55	135.3
Oxygen-free copper		22~25	49~60	83.7
Al6061		18~25	10~14	108.7
PC		5.5~6	90~140	13.3
PMMA		4.5	47	20.1

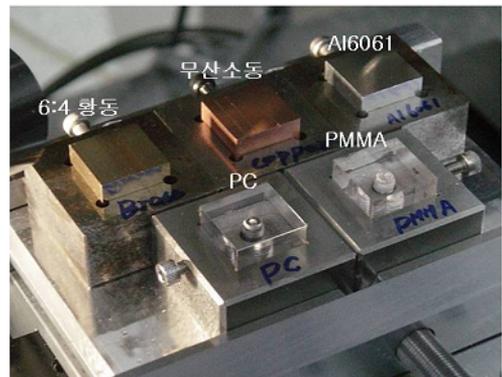


Fig. 6 Setting shape of materials

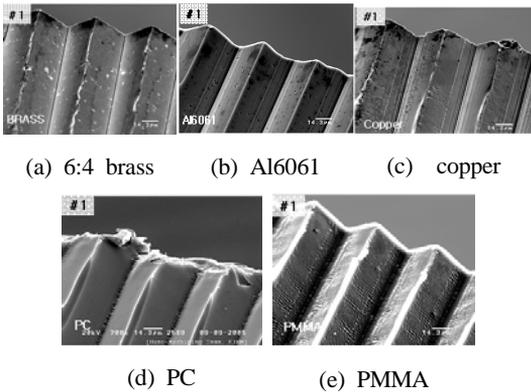
**Table 3 Cutting conditions of V-groove**

Cutting tool	Natural diamond tool, 90°	
Workpiece	6:4 brass, Al6061, Oxygen-free copper, PC, PMMA	
Cutting speed	1,200mm/min	
Cut increment	Rough machining	Finish machining
	5μm/pass	3,2,10.5,0.1μm/pass
Cutting oil	Spindle oil (ISO VG8)	

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피삭재에 따른 절삭특성 고찰

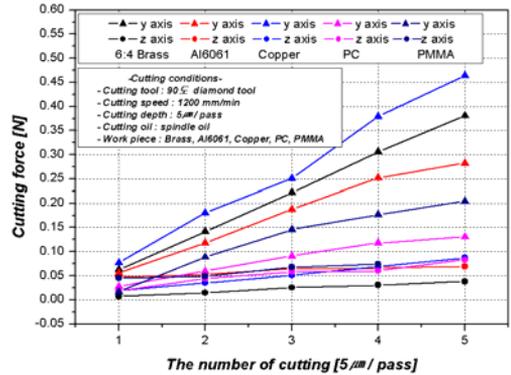
Fig. 7은 절삭특성중 가공된 표면특성을 보여주는 그림이다. 기계적 성질에 따라 그 가공결과 또한 다르게 나타남을 알 수 있다. 신율이 작은 6:4 황동과 Al6061의 표면에는 뜯기는 현상이 발생하지 않았고, 신율과 인장강도에서 모두 큰 수치를 나타낸 무산소동의 경우 에지부에는 버가, 표면에는 뜯긴 흔적이 나타났고, 플라스틱 재의 경우 가공중 온도상승에 의해 칩 배출이 불량해지고, 빌트-업 에지(Built-up Edge)가 생기며, chatter 진동이 발생하기 때문에 가공면에 뜯긴 흔적이 있음을 알 수 있다<sup>6)</sup>.



**Fig. 7 Machining results of each material**

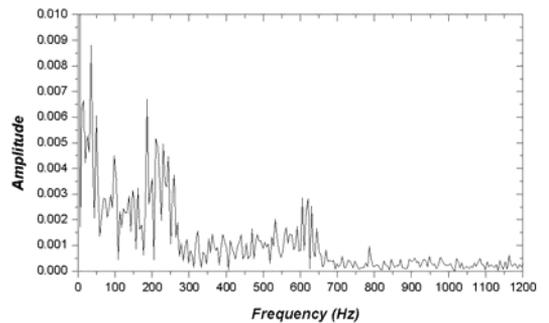
Fig. 8은 가공횟수별 절삭력을 보여준다. 경도가 높을수록 절삭력이 클 것으로 예상하였으나, 무산소동에서 가장 큰 절삭력이 관찰되었다. 그 이유는 불균

일한 절삭과 표면에서의 뜯김이 절삭력 상승을 초래한 것으로 보인다. 나머지 소재에 대해서는 경도의 크기에 따라 6:4 황동, Al6061, PMMA, PC 의 순서로 절삭력이 관찰되었다.



**Fig. 8 Cutting force vs the number of cutting**

Fig. 9는 6:4 황동소재의 절삭력 FFT분석 결과이며, 모든 소재의 FFT 분석결과 금속재료의 경우 300Hz이하의 저주파 영역에서 불규칙한 진폭이 발생 하였고, 플라스틱 재료의 경우 모든 주파수 영역에서 매우 작은 진폭의 성분들이 관찰되었다. 주파수 600Hz 부근에서 모든 소재에 대하여 진폭이 상승한 것을 관찰할 수 있으며, 세이핑 가공시 발생한 주파수로 사료된다.



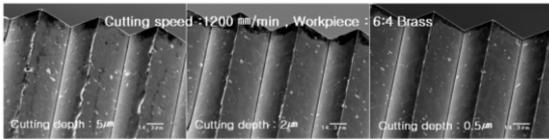
**Fig. 9 FFT analysis of 6:4 brass**

#### 3.2 절삭 깊이 변화에 따른 절삭특성

실험 장치를 이용하여 V-groove를 가공 할 때 가공 깊이를 각각 5μm, 2μm, 0.5μm, 0.1μm 로 달리하여 가공

하였을 때의 표면특성을 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12에서 보여 준다.

Fig. 10은 6:4 황동의 표면특성이며, 절삭 깊이가  $5\mu\text{m}$ 에서 버가 다량 발생하였고, 절삭 깊이가 감소함에 따라 버의 발생도 감소하여 절삭 깊이가  $0.5\mu\text{m}$ 에서는 버가 존재하지 않는 매끄러운 표면이 생성 되었다.

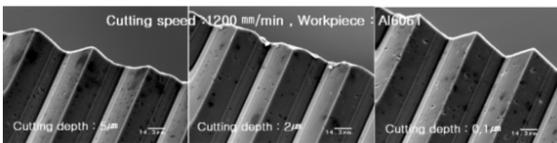


(a) depth: $5\mu\text{m}$  (b) depth: $2\mu\text{m}$  (c) depth: $0.5\mu\text{m}$

Fig. 10 The variation of machined surface of 6:4 brass

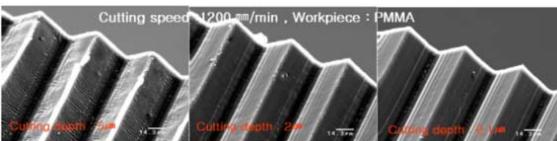
Fig. 11은 무산소동의 표면특성이다. 절삭 깊이가  $5\mu\text{m}$ 에서 가공표면에 버와 표면의 뜯김 현상이 공존하고 있으며, 절삭 깊이가  $0.1\mu\text{m}$ 에서 뜯김 현상과 에지부의 버가 감소한 것을 볼 수 있다. 절삭 깊이가 감소할수록 가공면의 품위는 개선되었으나, 현 상태에서 광학용 부품으로 사용하기 위해서는 가공조건의 개선이 요구 된다.

Fig. 12는 PMMA 표면특성을 나타내었다. 절삭 깊이가  $5\mu\text{m}$ 에서는 에지부의 버와 표면의 뜯김 흔적을 관찰 할 수 있다. 이러한 현상은 인장강도, 경도, 신율이 다른 피삭재 보다 매우 작아 표면강도에 영향을 줌으로써 많은 양의 절입에 의해 표면에 뜯김 현상을 일으킨 것



(a) depth: $5\mu\text{m}$  (b) depth: $2\mu\text{m}$  (c) depth: $0.1\mu\text{m}$

Fig. 11 The variation machined surface of Al6061



(a) depth: $5\mu\text{m}$  (b) depth: $2\mu\text{m}$  (c) depth: $0.1\mu\text{m}$

Fig. 12 The variation machined surface of PMMA

으로 사료된다. 표면의 뜯김 현상은 절삭 깊이가  $2\mu\text{m}$ 과  $0.1\mu\text{m}$ 에서 보는 바와 같이 절입 양이 줄어들수록 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 13은 각각의 소재에 대하여 절삭력 데이터를 분석한 결과이다. 무산소동의 경우 절삭 깊이가  $0.1\mu\text{m}$ 에서 약  $0.06\text{N}$ ,  $5\mu\text{m}$ 에서 약  $0.46\text{N}$ 의 절삭력이 발생하였으며, 절삭 깊이가 증가에 따른 절삭력의 증가폭이 매우 크다. PC의 경우 절삭 깊이가  $0.1\mu\text{m}$ 에서 약  $0.06\text{N}$ ,  $5\mu\text{m}$ 에서 약  $0.14\text{N}$ 의 절삭력이 발생 하였으며, 절삭 깊이가 변화에 따른 절삭력의 증가 폭이 미비함을 알 수 있다.

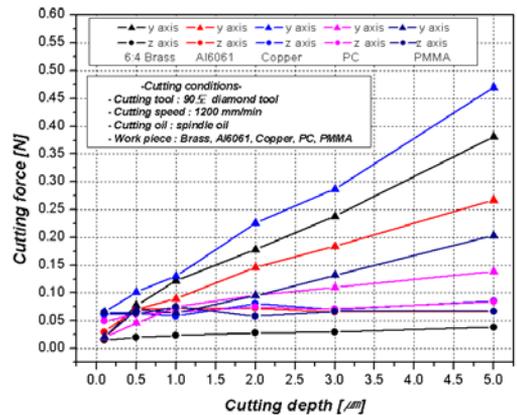


Fig. 13 Cutting force according to material properties and cutting depth variations

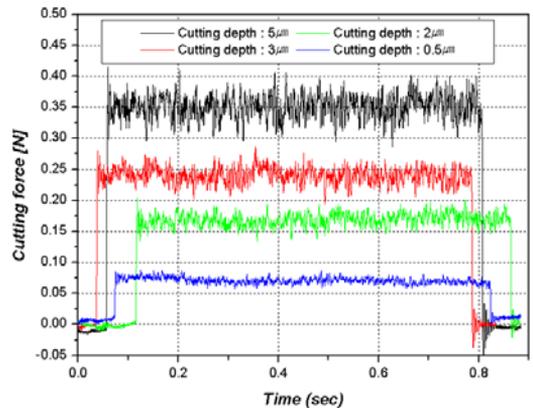


Fig. 14 Amplitude of cutting force of 6:4 brass according to cutting depth variations

Fig. 14는 6:4 황동소재에서 절삭 속도 1200mm/min, 절삭 깊이 5 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 2 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 에서의 동적 절삭력 파형을 분석하였다. 그림에서 보는 바와 같이 절삭 깊이가 감소할수록 파형의 폭이 감소하였고, 표면의 질이 향상됨을 알 수 있다.

또한 가공 중 실시간으로 절삭력을 감시하기 때문에 절삭력 파형의 폭으로써 가공면의 품질을 예측할 수 있으며, 모든 소재에서 이와 같은 현상을 관찰할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 6:4 황동, Al6061, 무산소동, PC, PMMA 소재를 V형상을 가진 단결정 다이아몬드 공구를 이용하여 절삭 특성을 파악하였다. 실험에 적용한 절삭조건으로는 절삭속도 1200mm/min, 절삭 깊이가 5 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 2 $\mu$ m, 1 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 0.1 $\mu$ m 으로서 절삭 깊이가 변화에 따른 표면 상태와 미세 절삭력을 측정하였다. 측정된 절삭력을 이용하여 FFT 분석을 수행하였고, 이러한 절삭 특성들을 분석하여 각 소재 특성에 맞는 절삭 조건을 확립 할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 피삭재에 따른 절삭특성 분석결과 신율이 작은 6:4 황동과 Al6061의 표면에는 뜯김이 발생하지 않았고, 신율과 인장강도가 큰 무산소동의 경우 뜯김과 버가 공존하였다.
2. 피삭재 경도가 증가 할수록 절삭력의 상승을 예측 하였으나 무산소동 에서 가장 크게 발생하였다.
3. 절삭력의 FFT 분석결과 금속재의 경우 300Hz 이하의 저주파 영역에서 불규칙한 진폭이 발생하였고, 플라스틱 재료는 모든 주파수 대역에서 작은 진폭이 발생하였다.
4. 모든 피삭재에서 절삭 깊이가 감소할수록 가공표면의 질이 향상되었다.

## 참고문헌

1. Choi, H. Y., Park, Y. P., "Design and Analysis of Diffractive Grating Imprinted Light- guide Plate for

LCD Illumination," Journal of Information Display, Vol. 5, No. 1, 2004.

2. 제태진, 이종찬, "마이크로 부품제조를 위한 미세 절삭공정 연구," 금오공대박사학위논문, 2004.
3. 제태진, 이종찬, 최 환, "다이아몬드 공구에 의한 미세그루브 금형 가공기술 연구," 한국기계가공학회 2003년도 추계학술대회 논문집 pp. 125-129.
4. 홍성민, 제태진, 최두선, 이응숙, 이동주, "다이아몬드공구에 의한 프리즘형 도광판 금형가공기술 연구," 한국정밀공학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp. 1597-1600, 2005.
5. 홍성민, 제태진, 이동주, 이종찬, "피삭재에 따른 V형 다이아몬드공구의 절삭특성 연구," 한국기계가공학회 2005년도 추계학술대회논문집, pp. 53-57, 2005.
6. 박순섭, 김대중, 이봉주, 김상석, 김정호, 유영문, 김주하, "광학용 플라스틱 (PMMA, PC)의 초정밀 절삭 특성," 한국기계가공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, pp. 66-69, 2003.