

## 미세 절삭에 의한 금형 가공기술 개발

이응숙\* · 제태진\* · 이선우\*\* 이동주\*\*

# A Study on the Micro Machining Technology of Mold and Die

E. S. Lee, T. J. Je, S. W. Lee and D. J. Lee

### Abstract

미세 절삭에 의한 마이크로 형상가공 및 이를 이용한 미세금형 가공기술개발을 위하여 절삭 공구를 이용한 기계적 미세 가공법에 대한 고찰과 더불어 shaping, end-milling, drilling 등의 가공이 가능한 기계적 미세 가공시스템을 구성하고 이를 이용한 미세 치형 그루브와 미세 격벽 등 미세 형상 구조의 금형 개발을 위한 가공실험을 수행하였다.

본 실험에서는 먼저 shaping 방식으로 세 종류의 다이아몬드 바이트를 사용하여 알루미늄, PMMA, Nickel, 황동 등의 소재에 pitch 150 $\mu$ m, 높이 8 $\mu$ m 내외의 미세 치형의 금형 코어를 가공하였고, 다음으로 Z축에 air spindle을 설치하여  $\phi$ 0.2mm의 end-mill(WC)을 사용하여 황동 소재에 깊이 200 $\mu$ m, 폭 200 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 50 $\mu$ m, 30 $\mu$ m의 두께 변화를 주어 미세 격벽에 대한 가공실험을 하였다.

미세 구멍가공실험으로는 drilling 전용장비를 구성하여  $\phi$ 0.6~0.15mm의 drill공구로 SM45C와 세라믹(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN) 소재에 스텝이송방식에 의한 미세 구멍 가공 실험을 실시하였다.

**Key Words** : Milli-Structure, Micro Machining System, Manufacturing Technology, Micro-Drilling, Micro Endmilling, Micro Shaping.

### 1. 미세 가공 시스템 구성

최근의 광학, 광통신, PDP, LCD 등 첨단산업에 이용되는 여러 가지 기능성 부품들의 제작과정에 비용절감차원에서 기계적인 방법에 의한 미세 형상가공법이 요구되고 있다. 이러한 산업계의 요구에 부응하고자 본 연구에서는 단순 기계가공에 의해 마이크로 부품의 제작이

가능한 복합 마이크로 가공시스템을 구축하고자 관련 가공방법들에 대하여 고찰하였다.

Fig. 1은 Shaper(평삭)에 의한 마이크로 그루브 가공 방법을 나타낸다. 이 방식은 대부분 2차원 형상의 groove 가공에 이용되지만, 맨 우측그림과 같이 Z-축과의 복합가공으로 Hologram 렌즈와 같은 hybrid 구조의 비구면 형상 groove 가공도 가능하다.

\* 한국기계연구원 정밀가공그룹

\*\* 충남대학교 기계공학과

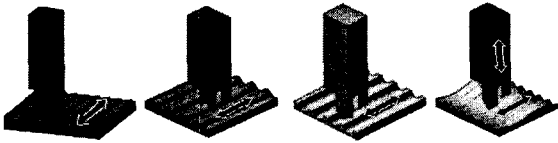


Fig. 1 Groove cutting method by shaping

Fig. 2는 회전공구에 의한 여러 가지 미세 그루브 가공 및 격벽가공 예를 보여주는 것으로서 end-milling 또는 fly cutting에 의한 가공방법들이 주가 된다.

Fig. 3은 micro lens array 형상을 end-milling 또는 fly-cutting 방법으로 가공하는 모습을 나타내고 있다.

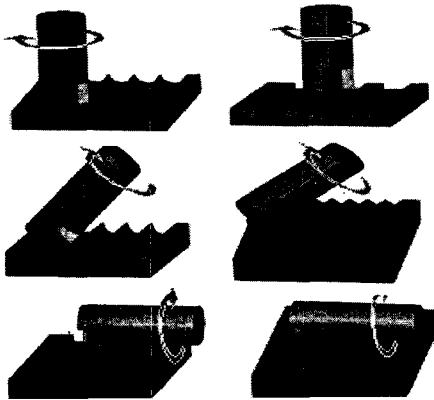


Fig. 2 Groove machining by fly cutting

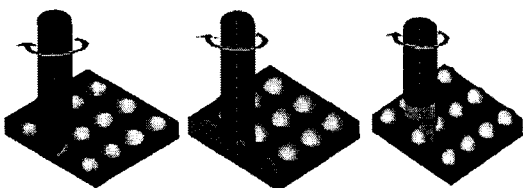


Fig. 3 Lens array cutting method using Z-axis

미세 형상의 금형 구조물 가공에서 대표적인 가공물의 형상과 응용가공법들에 대하여 살펴보면 평판형 회절 격자, 홀로그램렌즈, 도광판, PDP 격벽 등을 들 수 있고 이들은 주로 미세 그루브 형상을 하고 있으며 이의 가공법으로는 고정공구 및 회전 공구 모두가 적용 가능하다. 또, 각종 노즐과 같이 미세하고 깊은 구멍 가공에는 마이크로 드릴링에 의한 방법이 적용되고 있다.

본 연구에서는 이와 같이 다양한 미세 형상에 대응한 마이크로 절삭 가공기술개발을 위해 drilling, end-milling, fly-cutting, shaping, turning 등의 복합적인 절삭 가공이

가능한 기계적 미세 가공시스템을 구성하고자 하였다. 이 중 Fig. 4에 Z축을 이용한 가공시스템의 구성 개념과 대표적 적용분야를 나타내었다.

Motion type			
Cutting method	Shaping	Milling, Drilling, Boring, Fly-cutting, Grinding	Turning
Application	Grooving, Rulins, Scribing, Patterning	Groovins, Drilling, 3D, Aspherical, Array	Shaft, 3D structure

Fig. 4 Cutting methods using Z-axis spindle.

이러한 개념을 바탕으로 Fig. 5와 같은 4축 제어형 기계적 미세 복합가공시스템을 구성하였으며, 현재 shaping 및 end-milling에 의한 미세 가공장치가 완성되어 실제의 제품 가공에 적용되고 있고, 선삭용 장치도 구성을 완료하고 시험 가동 중에 있다.

Table 1에는 미세 가공기의 개략적인 제원을 나타내었다. 이하에 본 시스템의 구성 특성과 동작원리, 실제 가공 예 등에 대하여 설명한다.

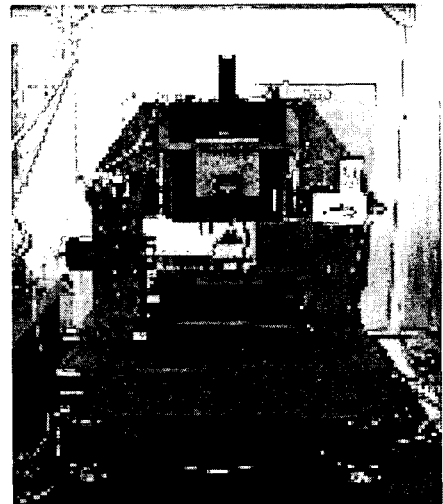


Fig. 5 Micro machining system

나아가 본 연구에서는 전용의 드릴링 공정을 확보하여 미세 구멍가공에 대응하고자 하였다. Fig. 6은 현재 구성되어져 있는 마이크로 드릴링 시스템으로 스텝핑 모터가 내장되어 미세 구멍 가공시 스텝이송 구동에 의한 정밀 가공이 가능하다. 주요 제원은 Table 2와 같다.

Table 1. Specification of micro-machining system

Item	Unit	Specifications	
Distance	X/Y/Z axis	mm	200 × 200 × 100
Milling main spindle	Turning speed	Rpm	Max 60,000
	Tool dimension	mm	0.1 ~ 6.0
Turning main spindle	Turning speed	Rpm	Max 6,000
	Turning rate	μm	: <0.05, Axis:<0.05
	Strength	N/μm	Radius:190, Axis:520
Table	Size	mm	220 × 220
	Allowable weight	N	890
Feed rate	X/Y axis	mm /min	Max. 45,000 mm/min
	Z axis	mm /min	Max. 45,000 mm/min
Straightness	X axis	μm	Horizontal : <0.5, Vertical:<0.6
	Y axis	μm	Horizontal : <0.5, Vertical :<0.6
	Z axis	μm	Horizontal :0.0025, V vertical :0.0025
Strength	X/Y/Z axis	μm/mm	Horizontal : <120, Vertical :250
Repeated precision	X/Y/Z axis	μm	<0.1

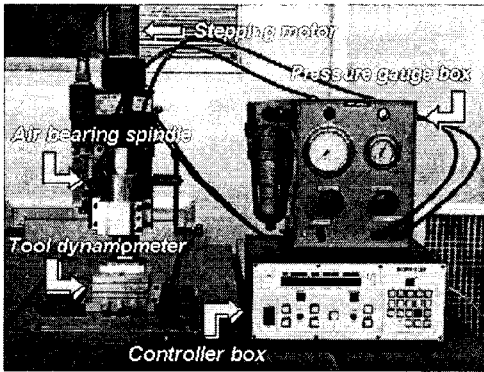


Fig. 6 Micro drilling system

Table 2. Specification of micro drilling system

Drilling ability	Φ0.1 ~ Φ2.0mm
Revolution	Max. 50,000 rpm
Torque	500gr·cm
Air pressure (Bearing)	5 kg/cm <sup>2</sup>
Step feed rate	0.01 ~ 99.99mm
Total stroke	75mm
Height to collet	From table surface 30 ~ 200mm
Size of machine body	300 × 350 × 600mm
Weight	25kg

## 2. 미세 그루브 가공실험

### 2.1 실험장치 및 방법

Fig. 7은 Z축에 고정 공구용 fixture를 장착하여 미세 groove를 가공하는 모습을 나타내었고, Fig. 8에 본 실험

에 사용된 천연 diamond 공구의 형상과 미세 groove의 가공원리를 나타내었다.

본 실험에서는 제품 용도에 따라 4가지 형태의 유사 형상을 가공하였다. 이에 따라 사용된 소재의 종류, 공구 형상, 가공물의 피치, 그루브 형상 등에는 다소의 차이가 있다. 그러나 전체적인 가공법 및 가공조건은 거의 유사하므로 이들의 가공조건을 종합하여 Table 3.에 나타내었다.

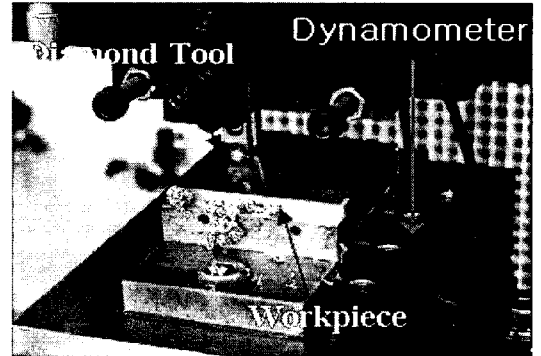


Fig.7 Cutting equipment by shaping

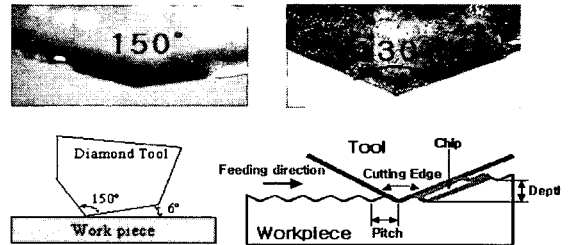


Fig. 8 Diamond tool and machining mechanism

### 2.2 130° 공구를 이용한 Si 가공실험

Fig. 9는 130° 공구로 Al 판재에 미세 groove를 가공한 형상이다. V형의 groove로서 피치가 큰 가공에서는 양호한 표면형상을 볼 수 있으나, 피치가 절입 보다 적은 영역에서는 비정상이다. 따라서 공구형상 및 가공조건이 조정되어야 미세 형상가공이 가능함을 알 수 있다.

수정가공으로 1μm 수준의 미세 선폭 가공이 가능하였고, 가공면의 표면조도 측정결과 평균 12.3nmRa의 초정밀로 가공되었음을 확인하였다.

Fig. 10은 각 피치에 대한 절삭력 결과를 보여주는 graph로써 pitch가 가장 클수록 절삭면적도 넓어지고 절삭력도 많이 작용함을 알 수 있다.

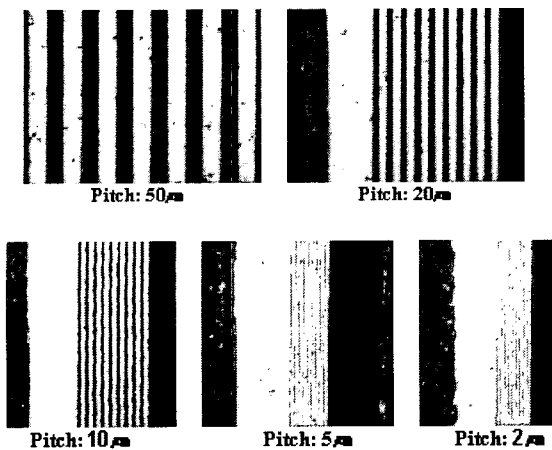


Fig. 9 Machining surface of workpiece(depth 5 $\mu$ m)

Table 3. Specifications of machining system

Cutting tool	Single crystal natural diamond tool 130°, 139°, 150°
Work piece	Al, Acryl(PMMA), Nickel, Brass
Cutting speed	35mm/sec
Depth of cut	20 - 3 $\mu$ m
Groove Pitch	150 - 2 $\mu$ m
Cutting oil	kerosene

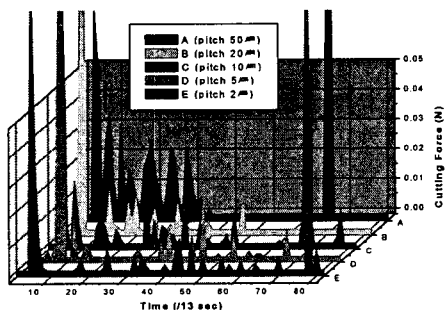
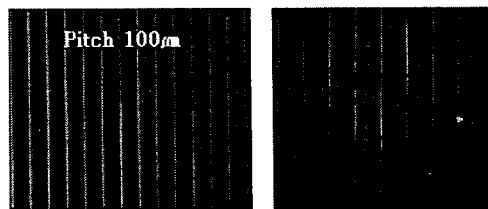


Fig. 10 Cutting force vs. pitch (depth 5 $\mu$ m)

### 2.3 PMMA 가공

Fig. 11은 PMMA 가공면의 표면확대사진과 칩 형상을 나타낸 것이다. 150° 공구를 사용하여 100 $\mu$ m 피치의 미세 groove를 가공한 것으로서 양호한 가공 표면과 나쁜 표면을 동시에 나타내었다. 우측의 굽힘 흔적은 공구 끝단의 chatter에 의한 것으로 shaper 방식에 의한 미세 표면

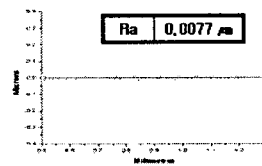
가공시에 가장 주의가 필요한 부분으로 고려되고 있다. 가공면의 거칠기는 최고 7.7nmRa까지 달성하였다.



(a) Surface



(b) Chip formation

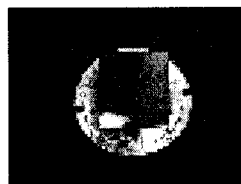


(c) Surface roughness

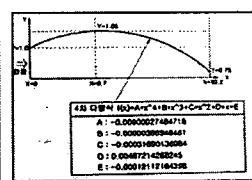
Fig. 11 Machining surface, chip formation and surface roughness of acryl

### 2.4 Nickel mold 가공

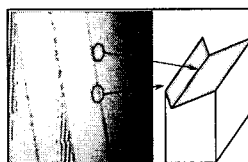
실제 제품적용을 위해 Nickel 소재를 사용하여 LCD 도광판 용의 사출성형용 금형 코어를 가공하였다. Fig. 12에 가공물의 전체 형상, Ni 가공표면, 가공표면의 측정 예를 나타내었다. 본 제품의 특징은 전체 형상을 비구면 구조로 가공한 것으로, shaping 방식에 의해서도 hologram lens 와 같은 hybrid 구조의 미세 groove 가공이 가능한 것을 확인할 수 있다. 가공표면의 거칠기는 6.6nmRa를 달성하였다. Fig. 13은 150° 공구를 사용하여 피치 150 $\mu$ m, 절삭속도 35mm/s로 가공시의 절삭력 측정 결과이다.



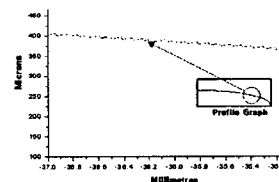
(a) Workpiece



(b) Surface profile



(c) Cutting surface(Ni)



(d) Surface pattern

Fig. 12 Surface profile and cutting surface

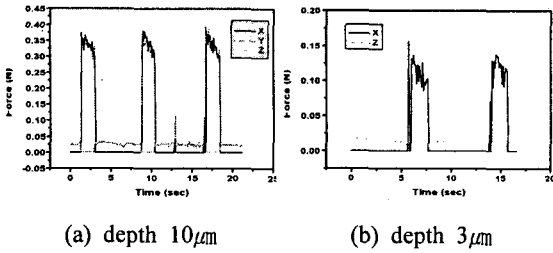


Fig. 13 Cutting Force(Ni)

### 2.5 Brass Mold 가공

Fig. 14는 황동 소재의 LCD 도광판용 금형 코어를 139° 공구(치 형성 각도 약 3.3°)를 이용하여 피치 150µm (치의 높이는 약 8µm)으로 가공한 것으로서 가공 표면 및 단면 형상을 나타내었다. 그림(b)의 양호한 가공표면의 거칠기는 약 9nmRa를 달성하였다. 그림(c)에는 가공 중 발생한 대표적 표면 결함을 나타내었는데 세로방향으로 그어진 줄(line) 형상은 구성인선 보다는 공구 결함에 의한 것이 대부분 이어서 공구의 인선 연마가 매우 중요하였으며, 물결 무늬 형상은 공구의 chatter에 의한 것으로서 shaper 작업시 공구의 처짐 및 진동 방지를 위한 대책이 필요한 것을 말해 준다.

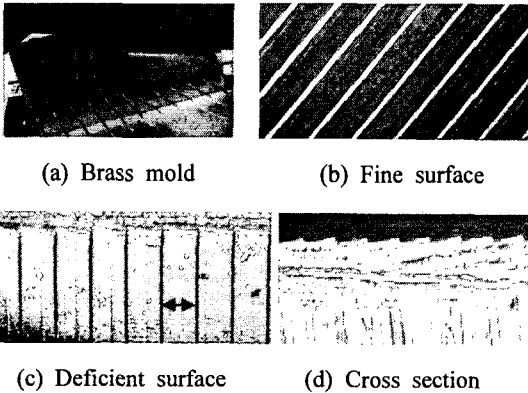


Fig. 14 Brass mold and molding product

### 3 미세 격벽 가공 실험

#### 3.1 실험 장치 및 방법

본 실험에서는 회전공구를 이용하여 PDP용 구조물과 같은 미세 격벽을 가공하고자 Fig. 15와 같이 Z축에 Spindle을 장착하고, Fig. 16과 같은  $\phi 200\mu\text{m}$ 의 micro flat

end-mill(WC) 공구를 사용하여 가공실험을 하였다. Table 4에는 본 실험에 사용된 황동 소재와 그 특성을 나타내었다.

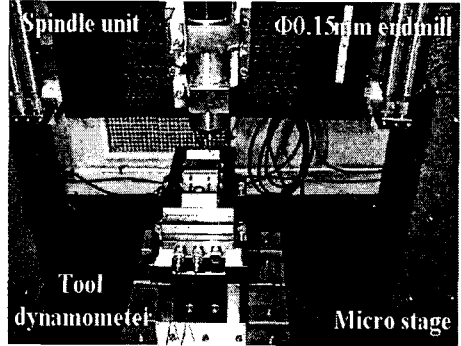


Fig. 15 Micro end-milling system

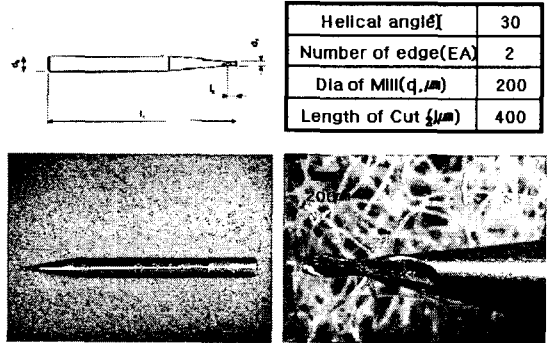


Fig. 16 Micro flat end-mill tool

Table 4. Mechanical properties and chemical compositions of workpiece

Symbol	Composition(%)		Tensile Strength (Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
BsC3	Cu62-66, Zn 잔부, Pb2.5, Sn1	불순물Fe, Ni, Mn, Al	18 dover	18 over

Fig. 17에는 미세 격벽 가공의 원리에 대하여 모식적으로 나타내었고, Table 5에는 실험에 적용된 가공조건을

나타내었다. 절삭유로는 백등유를 사용하였고, 공구회전수는 40,000rpm(절삭속도 25m/min), 테이블 이동속도는 5 mm/sec를 적용하였다. 가공 프로그램은 하나의 소재에서 200, 100, 50, 30 $\mu$ m의 4단계 격벽을 1루프로 하여 동시 성형 가공하는 형태로 하여 1회 가공시 절입 10 $\mu$ m씩 total 200 $\mu$ m 깊이 까지 20회 반복 가공하도록 programming 하였다.

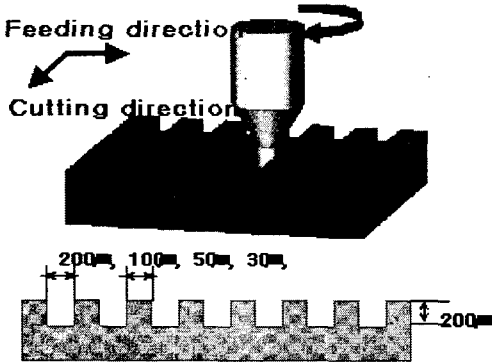


Fig. 17 Principal of micro wall machining.

Table 5. Cutting conditions

Cutting Tool	Carbides End-mill ( $\phi$ 200 $\mu$ m)
Spindle revolution	40,000rpm(25m/min)
Feed rate	5mm/sec
Depth	10 $\mu$ m/pass (Total Depth 200 $\mu$ m)
Pitch	200 $\mu$ m, 100 $\mu$ m, 50 $\mu$ m, 30 $\mu$ m
Cutting oil	kerosene

### 3.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 18에 각 격벽의 가공결과를 공구 진입부, 중간가공부, 끝단부의 순서로 정리하였다. 그림에서 보는 것과 같이 200, 100, 50 $\mu$ m 격벽까지는 매우 양호한 구조물이 가공되었고, 30 $\mu$ m의 격벽 가공에서는 구조물이 다소 기울어지는 현상이 나타났다. 30 $\mu$ m 격벽의 경우 격벽이 얇기 때문에 측면 절삭력에 의해 구조물이 밀려 나타난 현상도 있지만, 50 $\mu$ m 구조물에서 볼수 있는 것과 같이 공구가 기울어진 영향이 큰 것으로도 판단된다. 따라서 향후 보다 미세한 구조물의 가공을 위해서는 공구의 정밀 치구 및 절삭력을 최소화하는 가공조건의 정립에 대한 연구가 필요하다.

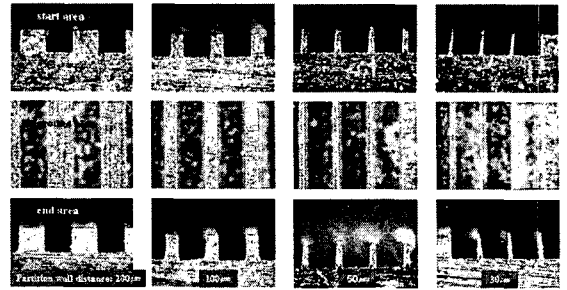


Fig. 18 Micro wall machining result (feed 5mm/sec)

한편, 격벽 Edge부에 미세한 burr가 많이 발생하고 있어 이의 대책도 필요하다. burr의 발생은 공구 진입부가 적고 가공 끝단 및 윗면 edge에서 많이 발생한다. 이의 방지를 위해서 향후에는 표면연마가 잘된 시편으로 최적의 가공조건을 유지하며 버 발생을 억제하는 가공법의 연구도 필요하다.

Fig. 19는 공구가 지나간 경로를 확대한 모습이며, Fig. 20은 가공시 발생된 chip의 형태이다. chip의 경우 절삭에 참여하는 면적이 매우 미세하여 분말상태로 존재하며 유동형의 일정한 형태를 유지하고 있다. Fig. 21은 가공시 발생된 절삭력 graph로서 3분력 모두 비슷한 힘을 보이고 있다.

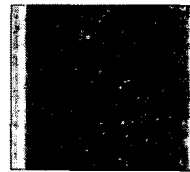


Fig. 19 Tool path

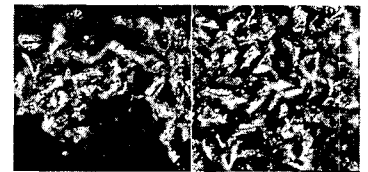


Fig. 20 Cutting chip

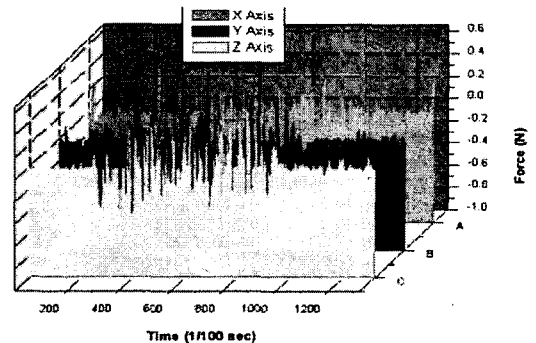


Fig. 21 Cutting force result

#### 4. 미세 드릴링 실험

##### 4.1 마이크로 드릴 가공조건과 공작물 Fixture

본 실험에 사용된 마이크로 드릴링 머신은 스텝핑모터가 내장되어 미세 구멍 가공시 스텝이송 구동을 할 수 있다. 이러한 구동방식에 의하여 스텝백(step back) 이송시 칩과 열의 배출을 용이하게 할 수 있다.

Fig. 22에 마이크로 드릴의 스텝이송 다이어그램을 나타내었으며, dynamometer 상에 공작물을 치부하는 방식의 고정 치구 개념도를 Fig. 23에 나타내었다.

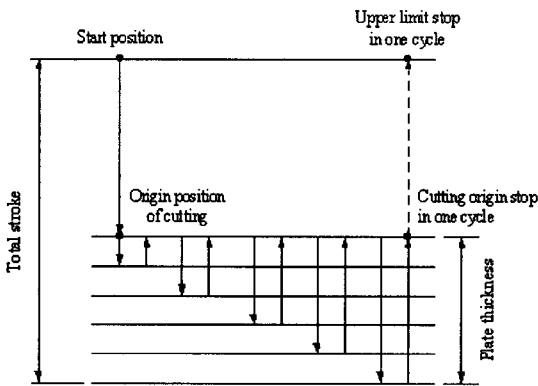


Fig. 22 Diagram of step feed

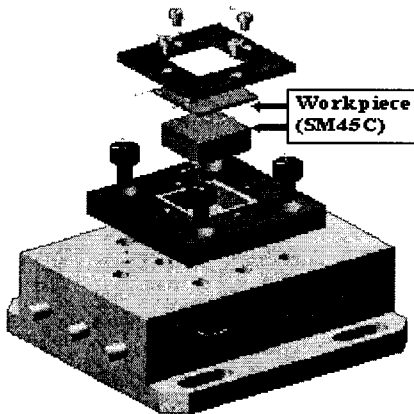
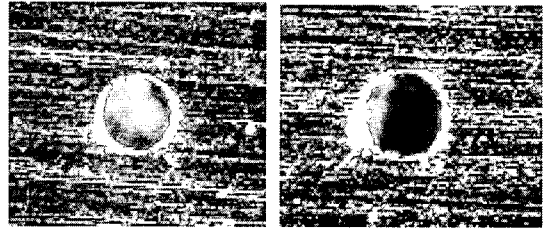


Fig. 23 Exploded view of the fixturing system

##### 4.2 실험 결과 및 고찰

SM45C의 마이크로 드릴가공에서 절삭유의 유무에 따라 가공면 거칠기가 달라지는 것을 알 수 있다. 이것

은 절삭유의 윤활, 반응착, 냉각 등의 작용에 따라서 구성날끝의 생성이 작게 되고 버니싱 효과가 크게 되기 때문이다. 위에서 언급한 것처럼 본 실험에서도 절삭유를 사용한 습식절삭이 건식절삭에 비해 가공면의 표면에서 일어나는 버어를 감소시켜 가공면 품질을 향상시켜 주는 것을 볼 수 있었다. 아래의 Fig. 24는 절삭유제의 사용유무에 따른 가공면의 형상을 보여 준다.



(a) Cutting oil supplied (b) Dried

Fig. 24 Comparison of micro deep hole form for a drill diameter of 0.2mm(SM45C)

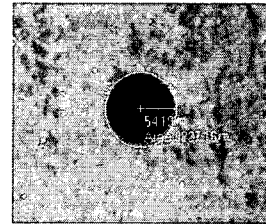


Fig. 25 micro hole of Dia. 0.15mm ( $Si_3N_4$ -BN)

Fig. 25는 마이크로 드릴을 이용하여 세라믹 ( $Si_3N_4$ -BN)시편에 가공한 사진을 보여주었다. 본 실험에 사용된 머시너블 세라믹은 h-BN 입자의 첨가량이 30vol%로서 굽힘강도 약 270 Mpa,  $390 \text{ kg/mm}^2$  정도의 경도를 가진 재료이다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 미세 금형 가공기술개발을 위하여 절삭에 의한 각종 미세 가공법을 고찰하고 shaping, end-milling, turning 등 복합가공이 가능한 미세 가공시스템 및 미세 드릴링 장치를 구성하고 이를 이용한 다양한 가공실험을 수행하였다. 가공결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 고정공구에 의한 절삭가공방식으로 Al, PMMA, Nickel, Brass 등의 여러 소재에 각도가 각각 다른 다이아몬드 바이트를 사용하여 미세 치형 그루브를 가공하였다. 그 결과 치의 pitch 140~150 $\mu\text{m}$ , 치 높이 8 $\mu\text{m}$  정도의 미세 그루브를 표면거칠기 10nmRa이하의 초정밀급으로 가공하는데 성공하고, 실제 제품에 적용할 수 있는 관련 기술을 축적하였다.

2) 고속스핀들과  $\phi 0.2\text{mm}$ 의 end-mill(WC) 공구로 폭 200~30 $\mu\text{m}$ , 깊이 200 $\mu\text{m}$ 의 미세 격벽 구조물을 가공하고 관련기술을 축적하였다. 30 $\mu\text{m}$  이하의 미세 구조물 가공을 위해서는 버 억제와 가공조건정립, 치공구 기술의 보완 연구가 필요하다.

3) 스텝이송방식으로  $\phi 0.15\text{mm}$ 까지의 미세 구멍을 SM45C와 세라믹( $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-BN}$ ) 소재에 가공하였으며 특히, 세라믹 소재에서 burr가 거의 없는 양호한 진원형상을 가공하였다.

## 참고문헌

- [1] 이응숙, 신영재, 강재훈, 제태진, 이재경, 이현용, “미세금형. 제작을 위한 가공기술개발”, 한국정밀공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp.1047~1050, 2000.
- [2] 제태진, 이응숙, 이재경, “초정밀 절삭 가공기술 현황”, 금형저널, pp.170~185, 2000.5
- [3] 제태진, 이응숙, 최두선, 이선우, “기계적 미세 가공 시스템 구성 및 응용 연구”, 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회, pp.934~937, 2001.
- [4] 이선우, 이동주, 이응숙, 제태진, “미세가공 시스템을 이용한 미세 그루브 가공실험”, 한국공작기계학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp.263~268, 2001.