

## 마이크로 채널의 가공성에 관한 연구

홍민성\*, 김종민<sup>+</sup>

(논문접수일 2007. 10. 8, 심사완료일 2007. 11. 9)

### A Study on the Machinability of Micro-Channel

Minsung Hong\*, Jongmin Kim<sup>+</sup>

#### Abstract

Recently, the manufacturer of microscopic structures along with the development of technology to produce electronics, communication and semiconductors allows various components to be smaller in size, with higher precision. Therefore, preoccupancy of micro/nano-level machining technology in order to product micro/nano-components and parts is key issue in the field of manufacturing. In this study, machinability of micro machining was studied through the machining of aluminum, brass and steel workpiece. Inspection of the cutting force variation patterns of large numbers of micro machining indicated that characteristics of the workpiece. Surface roughness prediction methods were developed by considering the variation of the static part of the feed direction cutting force. The accuracy of the proposed approaches were tested with experimental data and the agreement between the predictions and actual observations are addressed.

**Key Words** : Micro Channel(마이크로 채널), Micro Machining(마이크로 가공), Surface Roughness(표면 거칠기), Cutting Force(절삭력)

#### 1. 서론

광학, 전자, 통신 및 반도체 분야 등의 첨단산업 부품은 각종 수요와 맞물려 초소형화, 초정밀화와 함께 높은 상품성이 요구된다. 이러한 초소형 고정밀 부품은 초소형 모터, 베어링, 휴대폰의 진동자, 초소형 비구면 렌즈 금형, 초소형

노즐(nozzle), 초소형 바늘, 의학 분석 장치 등의 부품들로 수요와 적용분야가 다양하다<sup>(1,2)</sup>. 이에 MEMS(Micro Electric Mechanical System)공정, AFM을 이용한 공정, 레이저 가공 공정 등 많은 기술이 개발되어 정밀부품의 생산에 이용되고 있으나 고가의 초기장비, 복잡한 공정, 디자인 변화의 어려움, 재료와 공정의 한계 등으로 마이크로/메조(Micro/Meso)

\* 아주대학교 기계공학부 (mshong@ajou.ac.kr)  
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지  
<sup>+</sup> 아주대학교 기계공학과

가공은 절삭 가공에 의한 미소 가공의 필요성이 제기되고 있다<sup>(3)</sup>.

21세기에는 소품종 대량생산의 개념이 쇠퇴해 가면서 소비 현장에 직결된 다품종 소량생산으로의 패러다임 전환을 위한 기술적 접근이 필요하다. 초소형 공작기계를 사용한 부품생산은 이러한 생산과 소비의 경향을 반영할 수 있는 생산 방식이다<sup>(4)</sup>.

최근 가공공구, 가공장비, 가공기술의 발전과 함께 공구의 정밀한 이송과 제어가 가능해짐에 따라 기존의 밀링머신으로는 가공이 불가능하였던 서브 마이크로 수준의 미소가공이 가능하게 되었다. 이러한 마이크로 절삭 가공기술은 높은 가공 정밀도를 구현할 수 있어 매우 효과적인 미소가공을 수행할 수 있다. 미소 절삭 기술을 이용하여 4자유도의 초정밀 가공기로 20 $\mu$ m 피치의 나사를 가공하기도 하였고, 100 $\mu$ m 반경의 다이아몬드 엔드밀을 장착한 초정밀 가공기를 이용하여 3mm 직경의 구리 봉의 단면에 200 $\mu$ m 높이의 얼굴형상을 가공하기도 하였다<sup>(5)</sup>.

이러한 일련의 연구는 기존의 미소가공이 MEMS공정, 레이저 공정 등을 이용하는데 공정이 한정되어 있기 때문에 생기는 재료나 형상의 한계를 극복하려는 연구로써 복잡한 표면의 미소 가공 기술의 개발이 향후의 미소 가공기술의 발전 방향이라 할 수 있다.

현재까지 진행되어 있는 마이크로 기계 가공의 주요특성은 최소 칩 두께 효과와 가공 재질의 조성에 따른 표면 거칠기의 변화가 있다고 알려져 있다. 또한 매크로 스케일에서 최적 설계되어진 모델의 크기 축소로 고안된 것들은 대부분 적용되지 않고 문제가 생기기도 한다. 매크로 스케일에서 무시할만한 인자들이 마이크로 스케일에서는 무시할 수 없는 중요한 변수가 되었기 때문이다<sup>(6)</sup>.

본 연구에서는 다양한 실험을 통하여 마이크로 기계 가공 조건, 그 외에 안정한 상태의 가공조건을 통하여 표면 형상의 가공성과 가공조건에 대한 연구를 진행하였다.

## 2. 마이크로 기계 가공(Micro machining)

우선 기본적으로 마이크로 기계 가공의 실험을 통해서 가공 조건과 가공성에 대해서 알아본다. 이를 위해 4가지 시편(알루미늄 2종-AL 6061, AL 5051, 황동-Bs, 인청동-PB)을 이용하여 여러 조건에서의 실험을 수행하여 가공조건과 표면 거칠기 간의 상호 작용을 알아보았다.

Fig. 1은 마이크로 기계 가공에 사용된 마이크로 밀링 머신이다. 3축 수평 밀링 머신으로 주축은 에어 스피ن들에 의해

서 회전한다. 일반적인 범용 밀링 머신의 경우 주축의 제어가 가능하지만 속도가 낮기 때문에 마이크로 밀링 머신은 대부분 에어 스피ن들을 이용하여 고속으로 주축을 회전시킨다. 본 마이크로 밀링 머신의 사양은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2에 사용된 마이크로 기계 가공 시스템을 설명하였다. 가공한 NC데이터를 제어기(Delta Tau UMAC controller)

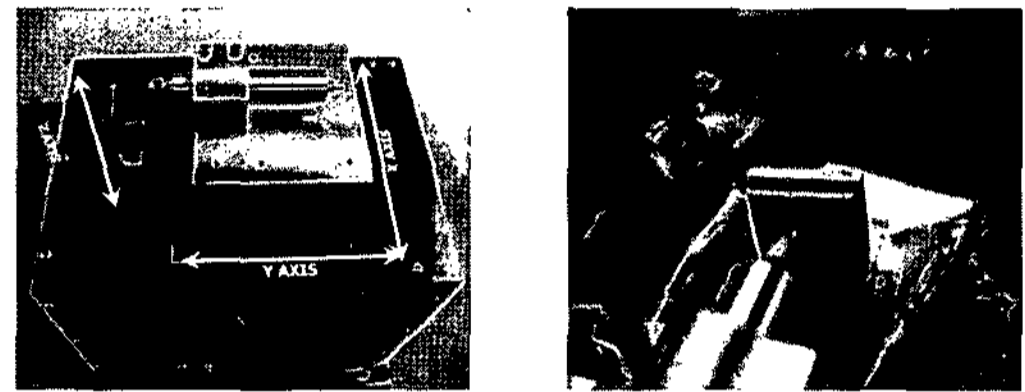


Fig. 1 Photograph of micro milling machine

Table 1 Specifications of micro milling machine

Type	Three Axis Horizontal Milling
Machine Envelope	300(L) $\times$ 200(W) $\times$ 250(H)
Effective Workspace	25mm $\times$ 25mm $\times$ 25mm
Spindle	Air Turbine-Roller Bearing
	120,000RPM

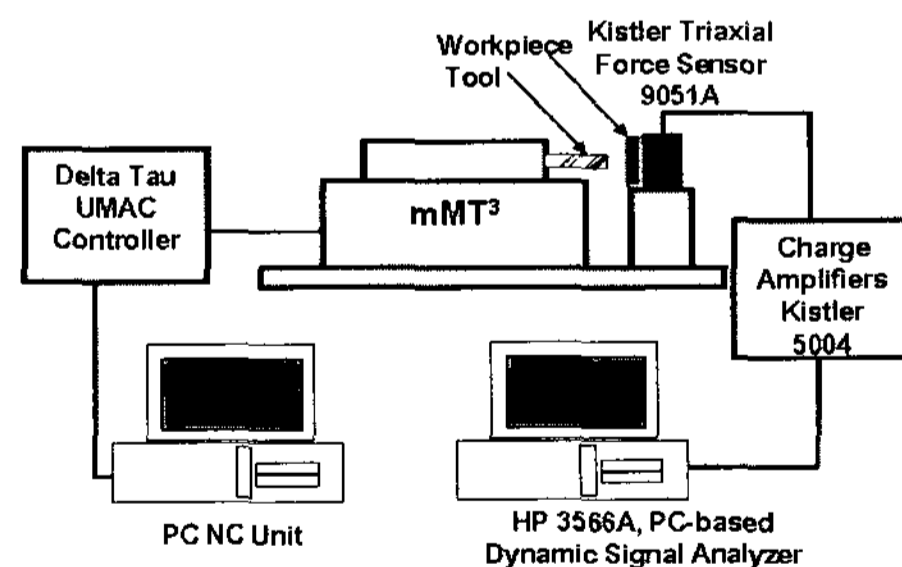


Fig. 2 Experimental setup for micro milling



Fig. 3 Photograph of micro-endmill

Table 2 Specifications of micro-endmill

End Mill Type	Flat endmill
Mill Diameter( $\mu\text{m}$ )	250
Mill Dia. Tolerance( $\mu\text{m}$ )	$\pm 0.25$
Number of Flutes	2

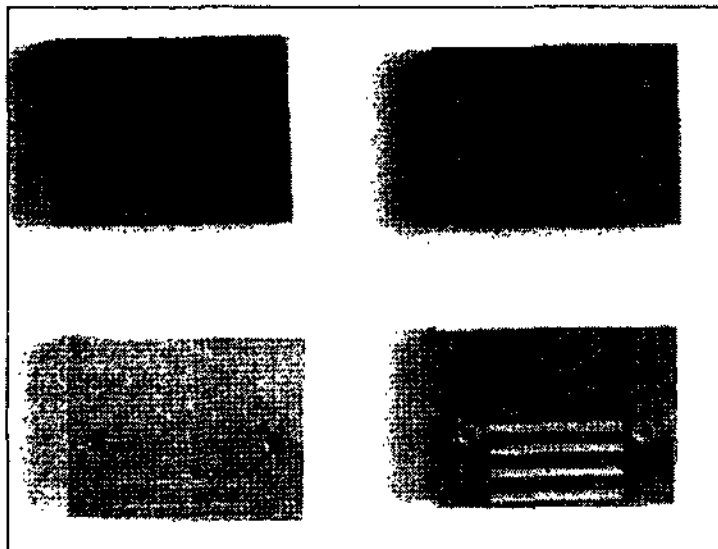


Fig. 4 Photograph of specimen

에 보내면 원하는 형상으로 가공되며, 절삭력을 측정하기 위해서 공구동력계(Kistler 9051A)를 사용하였다.

Fig. 3과 Table 2는 마이크로 기계 가공에 사용된 공구에 대한 정보이고, Fig. 4는 가공된 시편들이다.

표면거칠기 측정은 올림푸스사의 OLS3000 Optical scanner를 사용하였고, 가공 표면을 기준으로 3점 측정 후 평균값을 이용하였다. 이미지는 사진 중 1개를 선택하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 마이크로 가공 실험(1)

수행한 실험의 가공 조건은 다음과 같다. 우선 주축 속도는 110,000~105,000RPM, 이송 속도(feed rate)는 100, 150, 200, 250mm/min, 절삭 깊이(depth of cut)는 10, 25, 50 $\mu\text{m}$ 를 각각 택하였다. 다음의 표들은 각각의 시편들에 대해서 3번의 실험을 한 데이터의 평균값들이다. 먼저 Table 3에는 AL6061의 표면 거칠기의 평균값이다. 각 데이터들의 경향성은 Fig. 5에 도시하였다. Table 3의 값들을 점으로 표시하고, 각 절삭 깊이의 데이터를 선형 보간을 통해 표면 거칠기의 경향성을 알아보았다. 이송속도가 100 $\mu\text{m}$ 에서 250 $\mu\text{m}$ 로 커지면서 표면 거칠기가 작아지는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 기존의 절삭가공에서는 이송속도가 빨라질수록 표면이 거칠어지고 절삭속도가 빨라질수록 표면이 매끄러워진다. 본 논문의 AL6061 마이크로 밀링가공 실험에서는 실험 범위 안에서 이송속도가 빨라질수록 표면의 거칠기 값이 작

Table 3 Surface roughness data of AL 6061(Sa,  $\mu\text{m}$ )

Feedrate D.O.C	100	150	200	250
10	0.625	0.825	0.571	0.508
25	0.401	0.627	0.339	0.299
50	0.622	0.678	0.421	0.343

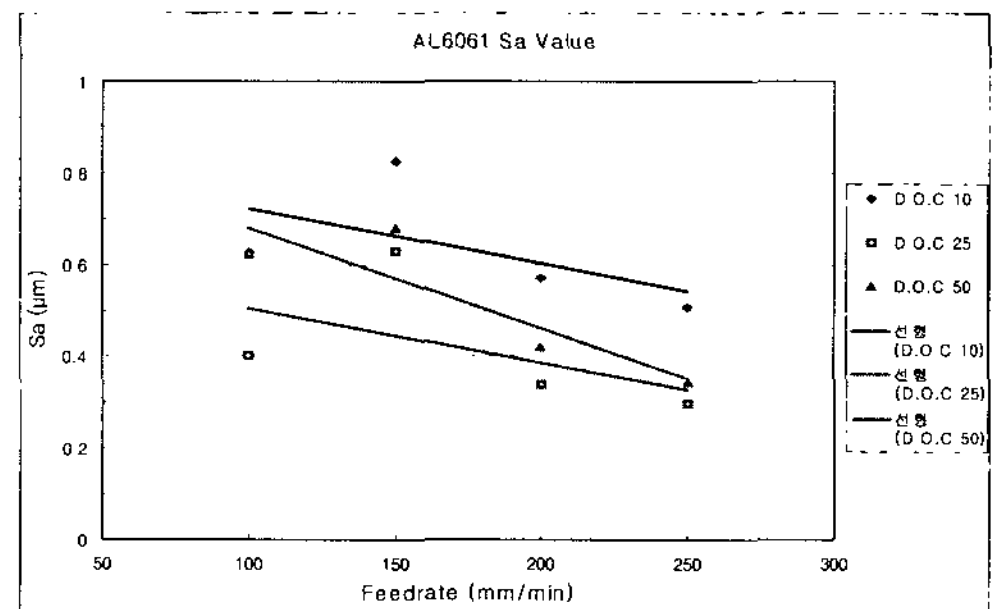


Fig. 5 Surface roughness(Sa) of AL6061

아지고 절삭 깊이(depth of cut)가 증가할수록 표면이 매끄럽지 못한 것으로 나타난다. 특히 10 $\mu\text{m}$ 의 절삭 깊이에서 Ra값이 더 큰 것은 최소 칩 두께 효과로 인해 공구의 날 반경보다 칩의 두께가 얇아서 발생하는 경작(plowing)현상과 연성을 갖는 재료의 특성으로 Fig. 6의 표면 형상처럼 벽면에 버(burr)가 많이 발생하고 바닥면의 거칠기도 거칠게 나타난다.

또한 150mm/min의 이송속도에서 표면 거칠기 값이 크게 나타나고 이송속도가 증가함에 따라서 표면 거칠기 값이 낮아진다. 빠른 주축회전수에 비해 낮은 이송속도에서는 공구의 날이 매번 칩을 만들지 못하고 이송궤적(feedmark)의 간격도 넓어지게 된다. 따라서 실험데이터에서 낮은 이송속도에서는 표면 거칠기 값이 상승하였다.

Table 4의 AL5052 표면 거칠기 데이터를 바탕으로 경향성을 Fig. 7에 도시하였다. AL5052의 표면 거칠기 경향성은 AL6061보다 완만한 모습이다. AL5052의 표면 거칠기 역시 이송속도가 증가할수록 좋아지는 경향을 보인다. 이는 Fig. 8의 사진을 통하여 확인할 수 있다. 150 $\mu\text{m}$ 에 해당하는 표면 거칠기 값은 100 $\mu\text{m}$ 의 것보다 크고 이후 이송속도가 증가할수록 표면 거칠기 값이 낮아진다.

Table 5와 Table 6에는 황동(Bs)과 인청동(PB)의 표면 거칠기 데이터 값이 있고 이 값들은 알루미늄 계열의 AL6061과 AL5052의 표면 거칠기 데이터 값보다 훨씬 작다. 인청동

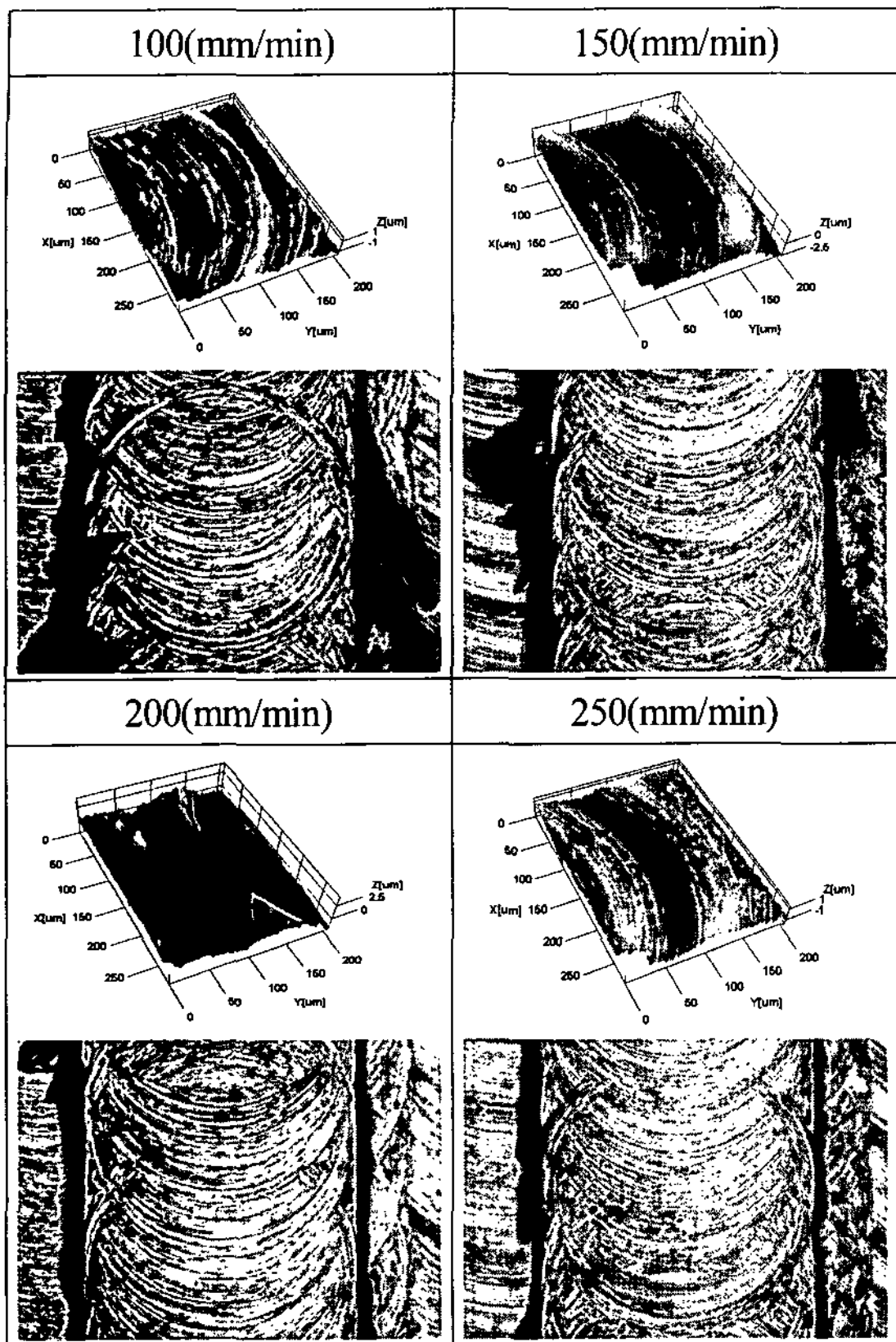


Fig. 6 Microscopy image of AL6061

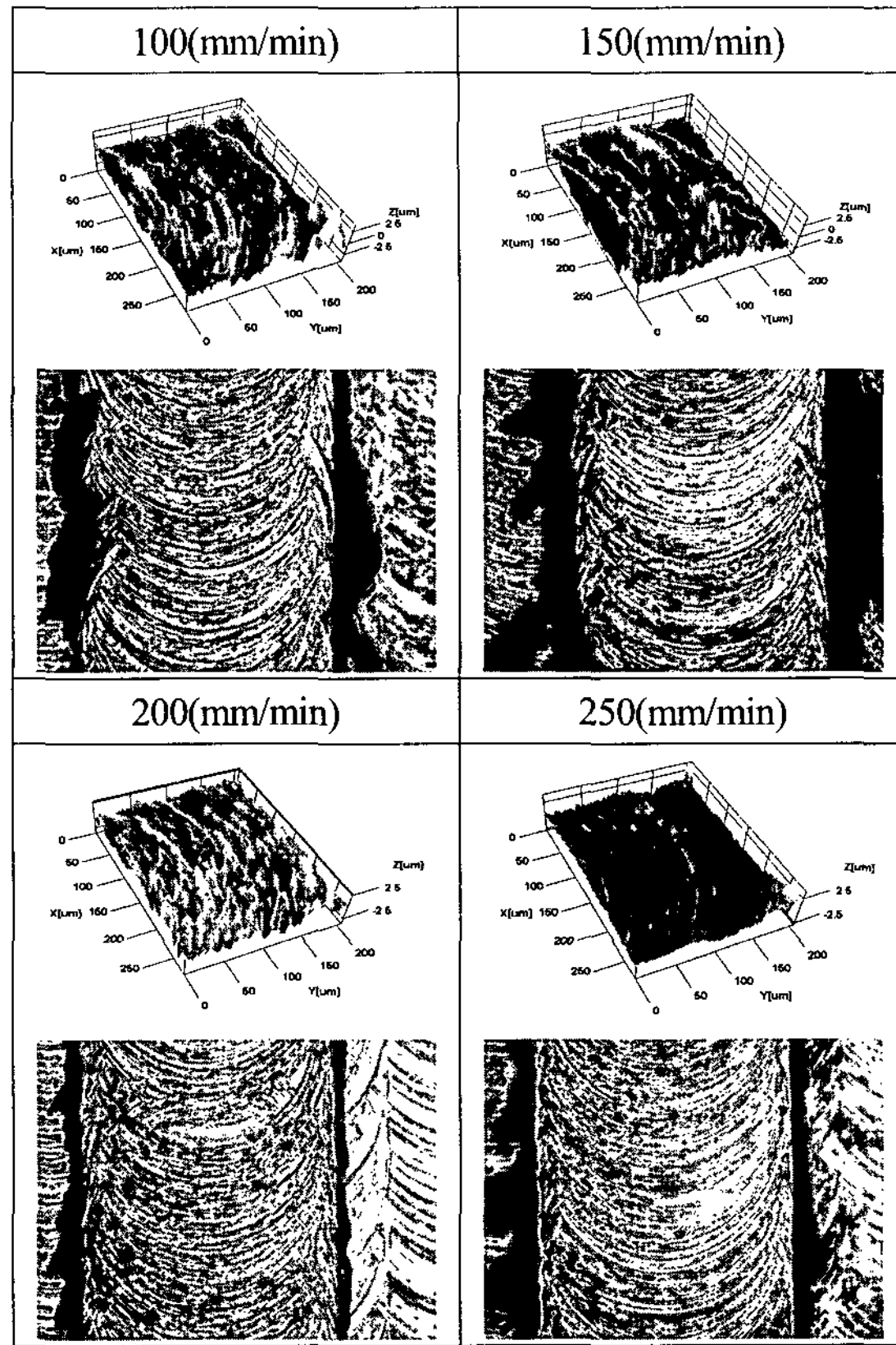


Fig. 8 Microscopy image of AL5052

Table 4 Surface roughness of AL5052(Sa, μm)

Feedrate D.O.C	100	150	200	250
10	0.758	0.801	0.868	0.865
25	0.564	0.688	0.837	0.518
50	0.947	0.956	0.674	0.793

Table 5 Surface Roughness(Sa) of Bs(μm)

Feedrate D.O.C	100	150	200	250
10	0.248	0.221	0.204	0.375
25	0.871	0.920	1.123	1.384
50	0.690	1.344	0.991	0.301

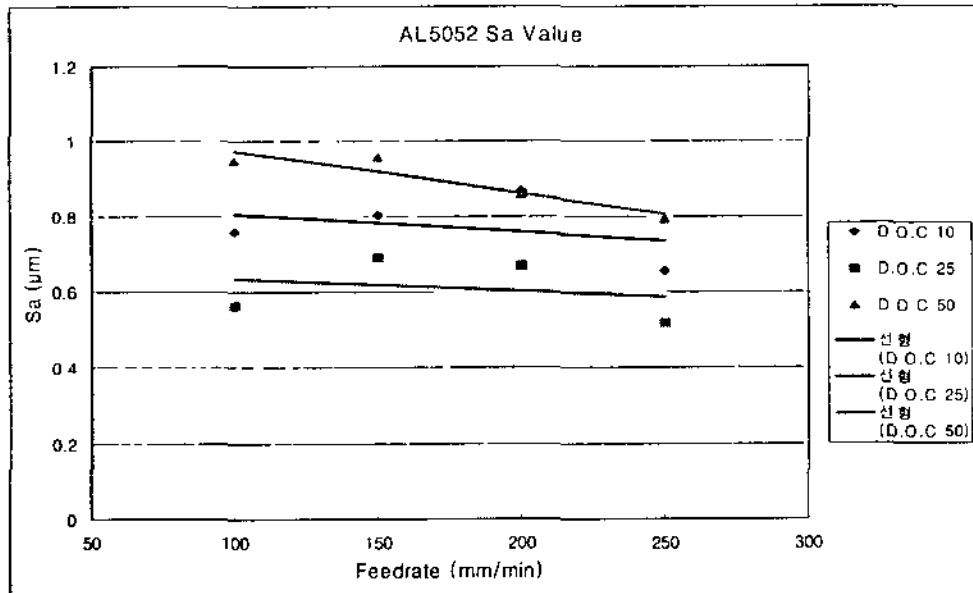


Fig. 7 Surface roughness(Sa) of AL5052

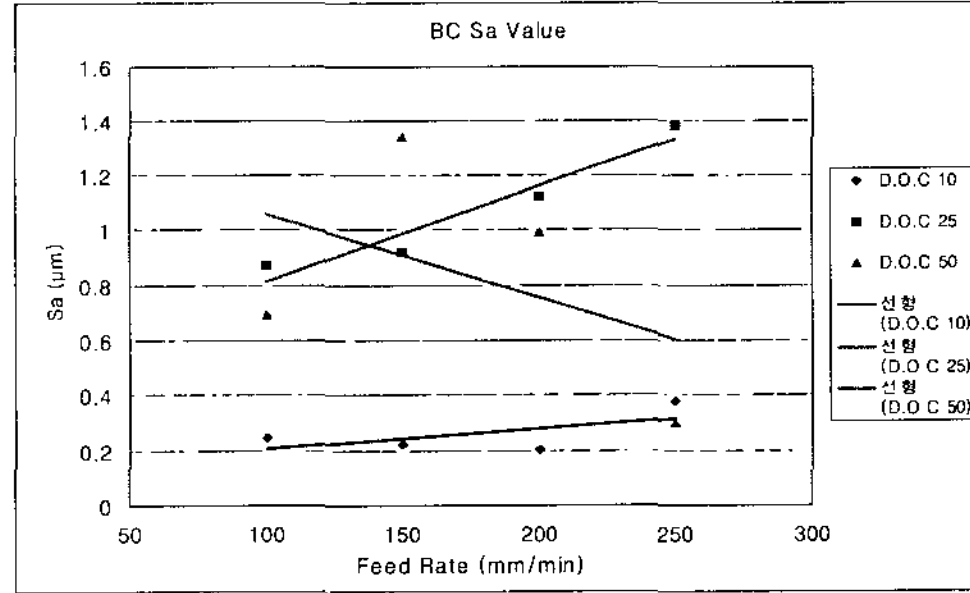


Fig. 9 Surface roughness(Sa) of Bs

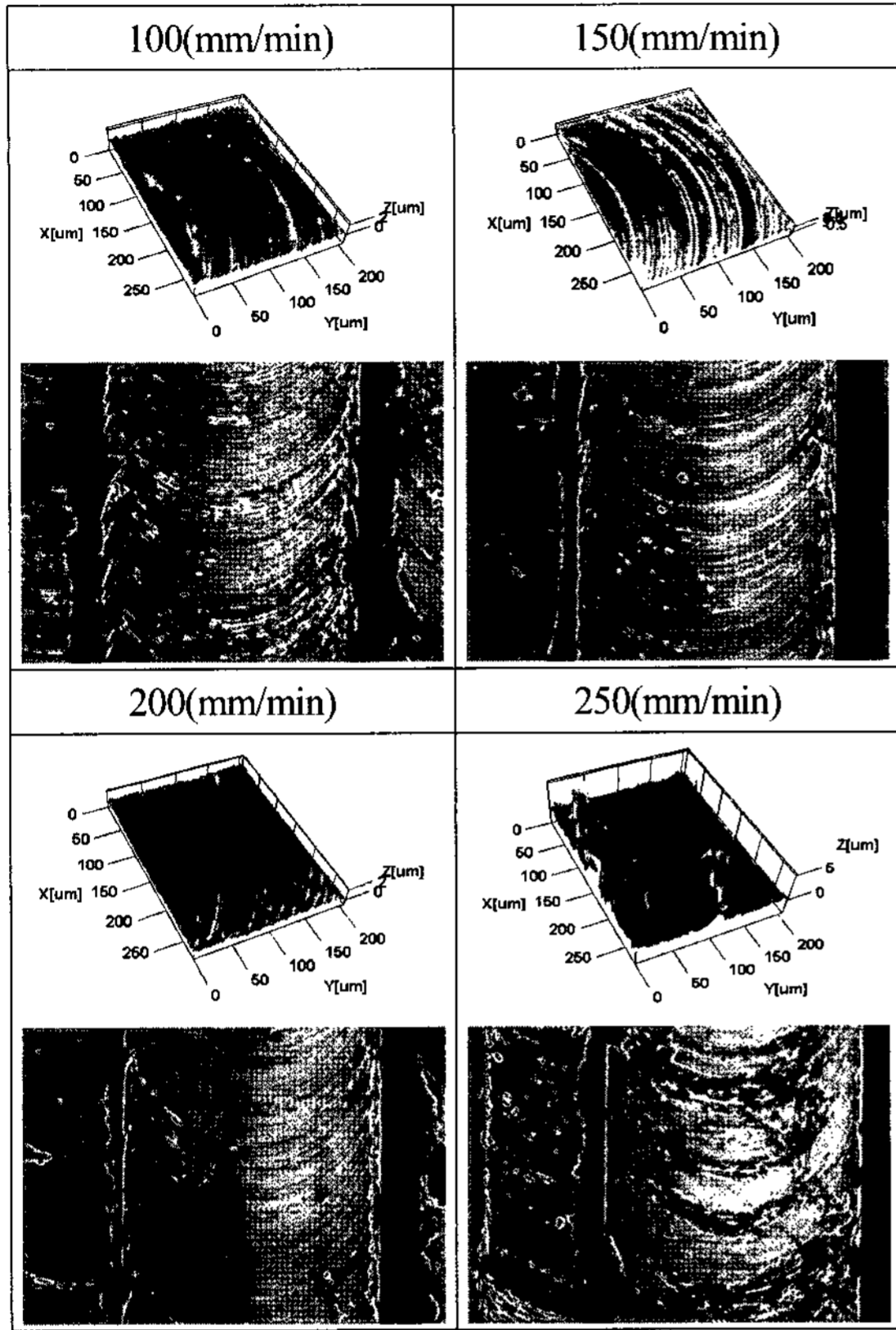


Fig. 10 Microscopy image of Bs(10µm)

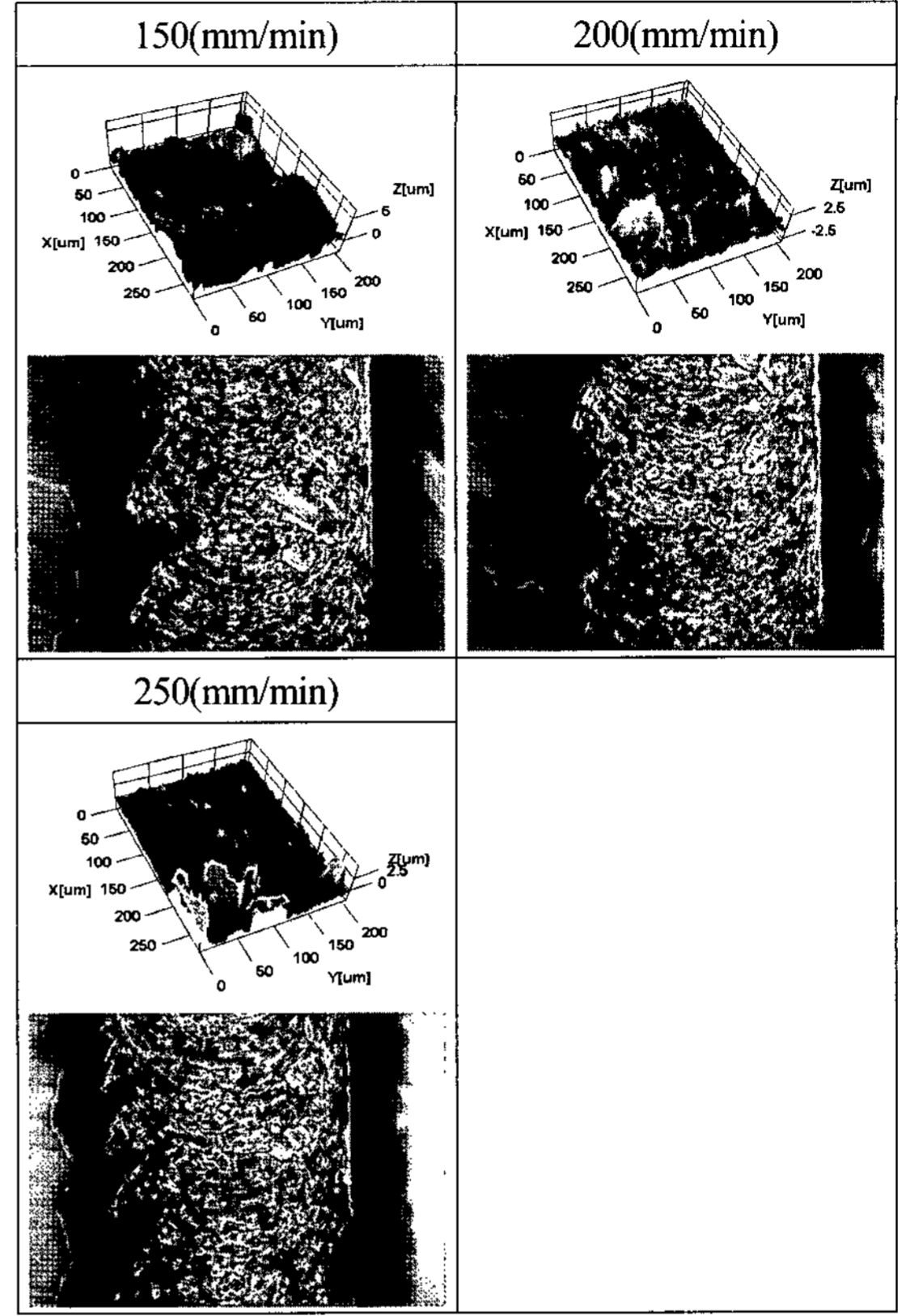


Fig. 11 Microscopy image of PB(25µm)

Table 6 Surface roughness(Sa) of PB(µm)

Feedrate	100	150	200	250
D.O.C				
10	0.213	0.224	0.247	0.207
25	0.225	0.189	0.220	0.189
50	0.324	0.329	0.277	0.173

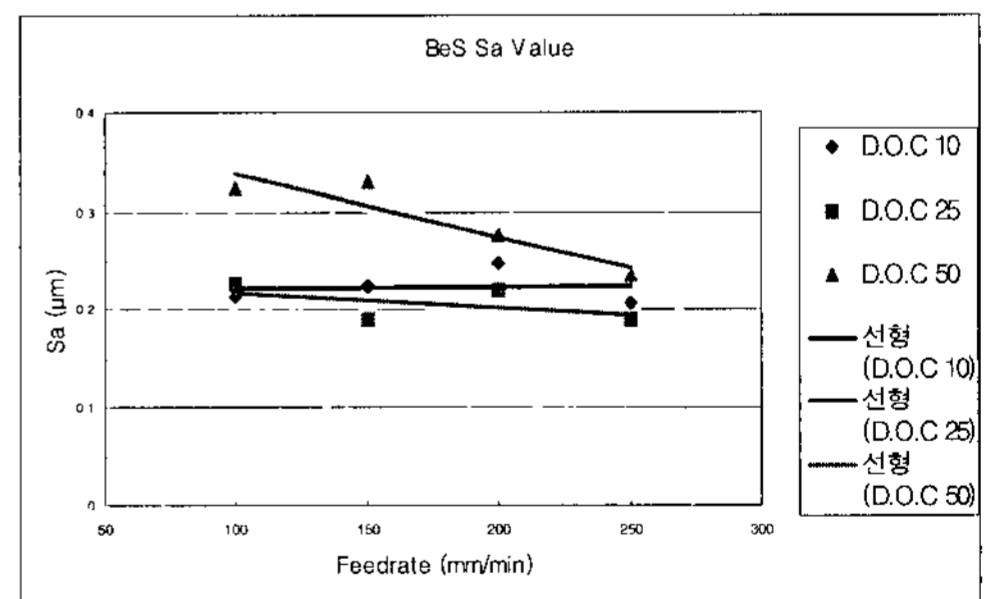


Fig. 12 Surface roughness(Sa) of PB

은 250mm/min의 이송속도, 50µm의 절삭 깊이에서 0.2µm 정도의 평균 표면 거칠기를 갖는다. 이는 AL5052의 표면 거칠기 값보다 훨씬 낮은 평균 표면 거칠기 값이다. 상대적으로 연성이 강한 알루미늄보다 경도가 높은 황동과 인청동의 표면 거칠기 값이 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9와 10, 11에는 그래프와 황동의 표면 거칠기 사진이 나타나있다. 황동의 표면 거칠기 값은 절삭 깊이가 25µm일 때 이송속도가 증가할수록 커지는 경향을 보이고, 절삭 깊이가 50µm일 때 표면 거칠기 값이 훨씬 낮아지는 경향을 보인

다. 가공 절삭 깊이 10µm에서는 낮은 표면 거칠기 값을 가지고 매끄러운 표면 사진을 확인할 수 있지만 25µm의 절삭 깊이로 가공했을 때는 Fig. 11과 같이 표면에 발생한 흠을 많이 발견할 수 있다. Fig. 11에서 경작(plowing)현상으로 인하여 표면이 고르지 못함을 확인하였고, 조직 입자가 가장 작은 황동에서 마이크로 구조 현상에 의하여 절삭력이 바뀌



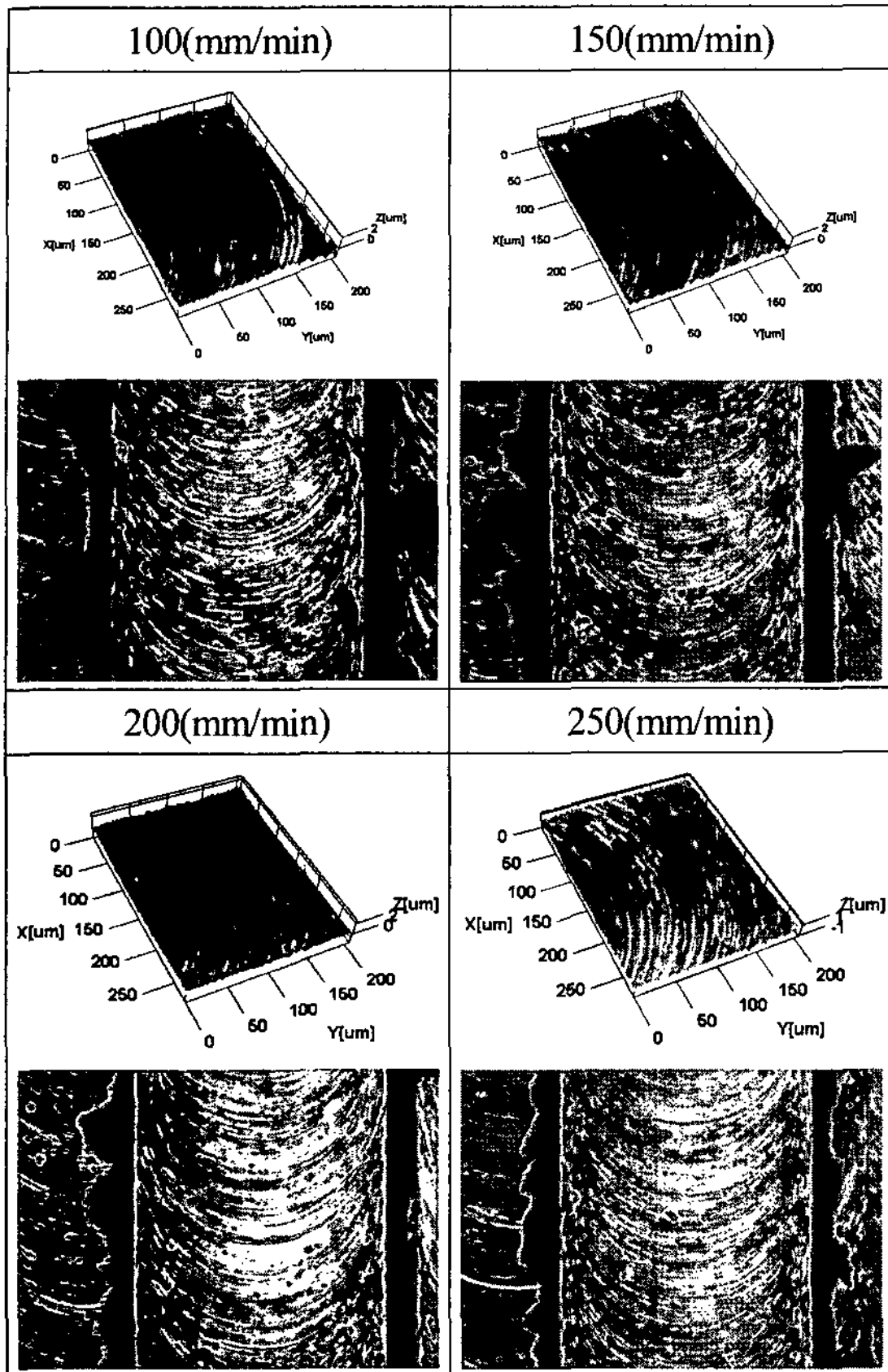


Fig. 13 Microscopy image of PB

고 그로인하여 표면 거칠기 값에도 영향을 준 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 12와 13에는 인청동의 표면 거칠기가 도시되어있다. 사진에서 보는 것과 같이 인청동의 표면 거칠기는 대체적으로 양호하다. 25 $\mu$ m와 50 $\mu$ m의 절삭 깊이에서는 이송속도가 빠를수록 양호한 표면 거칠기를 갖는 것으로 나타나있다.

### 3.2 마이크로 가공 실험(2)

두 번째 마이크로 채널 가공실험에서는 알루미늄(AL6061), 황동(Bs), 강(SM40C)을 시편으로 사용하여 이송속도의 범위를 넓히고 절삭 깊이의 폭도 넓혔다. 강은 300mm/min이 넘는 이송속도에서는 공구가 파손되므로 300mm/min의 이송속도 범위 내에서 실험을 진행하였다.

Fig. 14에서 Fig. 19에는 알루미늄, 황동, 강의 표면 거칠기 값과 절삭력에 관한 그래프를 도시하였다. AL6061 시편의 절삭력과 표면 거칠기 데이터에서 절삭 깊이가 100 $\mu$ m에

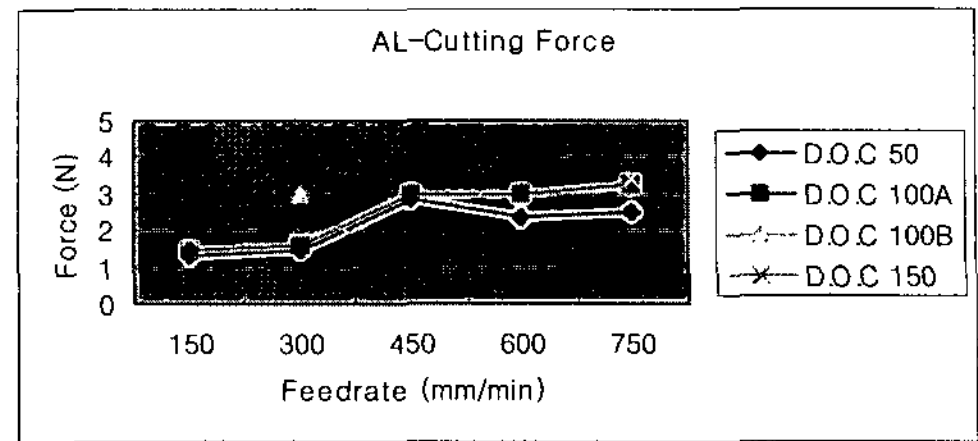


Fig. 14 Cutting force of AL6061

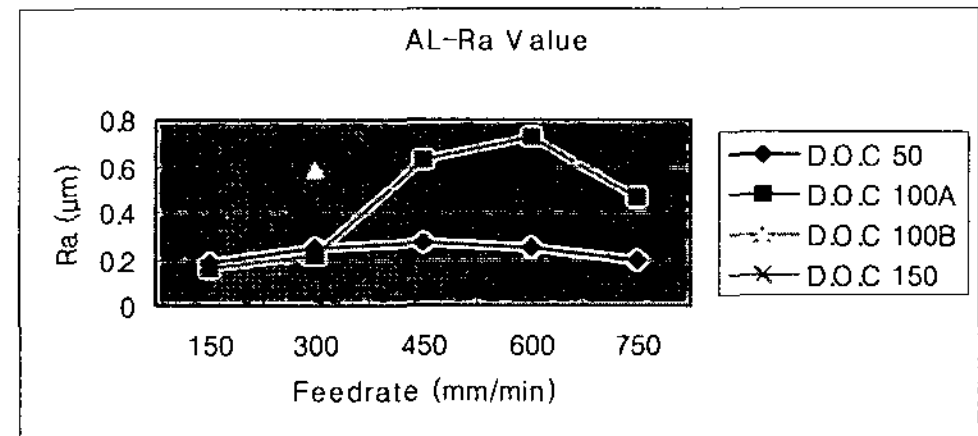


Fig. 15 Ra value of AL6061

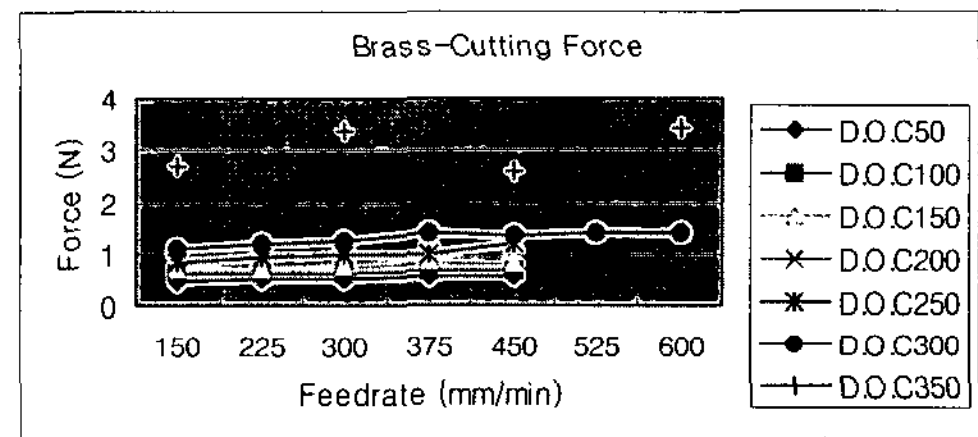


Fig. 16 Cutting Force of Bs

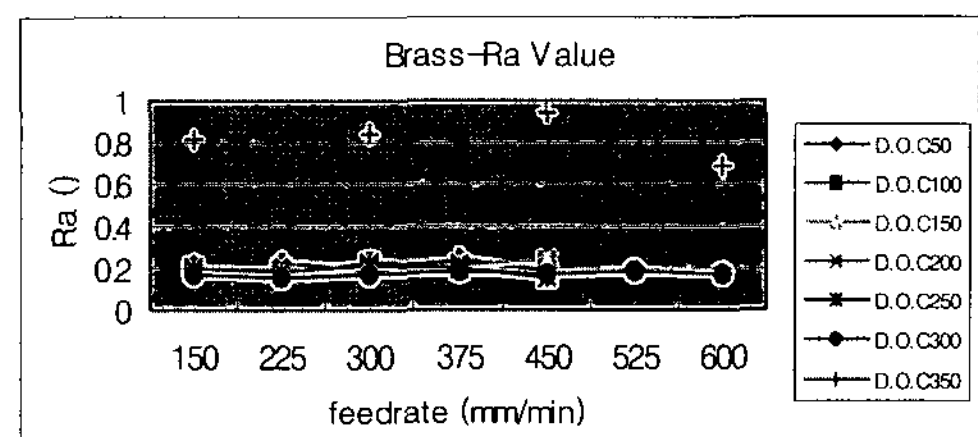


Fig. 17 Ra value of Bs

서 두 가지의 데이터를 획득할 수 있었는데, 50 $\mu$ m와 100 $\mu$ m의 일부 부분까지는 비교적 안정적인 절삭력과 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있었지만, 100 $\mu$ m의 어느 일정 부분이 지나면 불안정한 절삭력과 불량인 표면 거칠기 값으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이것은 실험 조건에서 한계 절삭 깊이가 100 $\mu$ m이고, 이 절삭 깊이를 넘어서면 나쁜 표면 거칠기와 절삭력을 갖게 됨을 알 수 있다.

Bs 시편의 절삭력과 표면 거칠기 값은 절삭 깊이 350 $\mu$ m

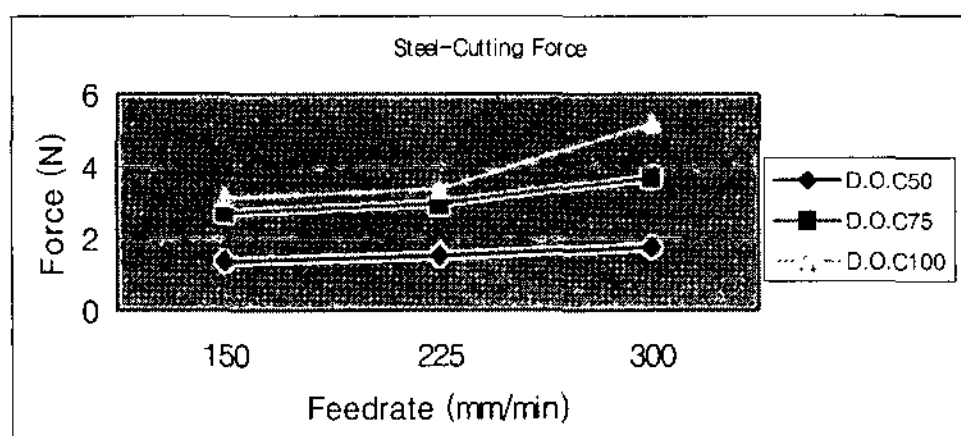


Fig. 18 Cutting force of SM40C

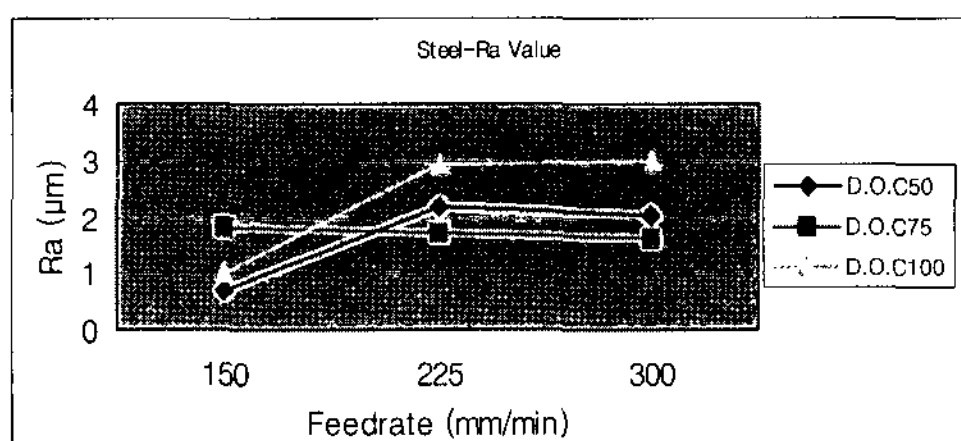


Fig. 19 Ra value of SM40C

에서 급속하게 악화됨을 알 수 있다. 경도가 알루미늄보다 강한 황동은 알루미늄의 한계절삭 깊이 보다 같은 조건에서 3배나 깊은 절삭 깊이에서도 안정적인 절삭력과 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있다. 이를 통해서 Bs의 한계 절삭 깊이는 350 $\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. SM40C의 경우에는 공구의 강도 한계 때문에 절삭 깊이를 100 $\mu\text{m}$ 까지로 제한하였고, 작은 절삭 깊이에서 양호한 표면을 얻을 수 있었다. 강은 절삭 깊이가 깊어질수록 불량 표면과 불안정한 절삭력을 갖게 됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

- (1) 본 실험을 통해서 살펴본 결과 마이크로 가공에서는 이송속도가 증가함에 따라 표면 거칠기 값이 일반적으로 낮아지는 경향이 있음을 알 수 있었다.
- (2) AL6061의 경우 선형성을 이루는 일반 밀링 머신과는

다르게 특정 이송 속도에서 표면 거칠기가 나빠지는 것을 알 수 있었다.

- (3) Bs의 경우 표면 거칠기가 나쁜 이유는 마이크로 기계 가공 시 재료의 특성과 경작현상이 발생하여 갈림과 물림 자국이 표면에 남게 되어 시뮬레이션 결과 값과의 오차가 크게 나타난 것으로 생각된다.
- (4) 각 시편에 해당하는 안정적인 상태의 가공조건을 알 수 있었다. 이는 향후 마이크로 가공에서 최적의 표면 형상과 안정적인 절삭을 하는데 많은 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

- (1) The Editorial Department, 1993, *Micro Machining*, Gijeon, pp. 1~5.
- (2) Kurt, P., 1996, "Biomedical Applications of MEMS," *International Electron Devices Meeting, IEEE*, pp. 239~242.
- (3) Lee, Y. S., Lee, S. K., and Hwang, K. H., 1995, "Micro Machining Technology," *Machinery and Materials*, Vol. 7, No. 4, pp. 16~28.
- (4) Yamagata, Y. and Higuchi, T., 1995, "Three-Dimensional Micro Fabrication by Precision Cutting Technique," *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 61, No. 10, pp. 1361~1364.
- (5) Takeuchi, Y., Nishie, M., Sawada, K., and Sata, T., 1996, "Machining of micro-parts by Ultra-precision Milling Machine," *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 62, No. 8, pp. 1132~1135.
- (6) Hong, M. S., Kim, J. M., and Jung, H. S., 2006, "The Effect of Surface Roughness on the Fluidity in a Micro-Machined Channel," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*, pp. 379~384.