

## 마이크로 3 차원 입체형상부품 제조기술 연구

제태진<sup>#</sup> · 최두선<sup>1</sup> · 이응숙<sup>1</sup> · 황경현<sup>1</sup> · 신보성<sup>2</sup> · 이종찬<sup>3</sup>

### A Study on Micro Manufacturing Technology for 3-Dimensional Micro Parts

J. T. Je, D. S. Choi, E. S. Lee, K. H. Whang, B. S. Shin, J. C. Lee

(Received November 16, 2006)

#### Abstract

Demands for micro parts have increased with recent advances in IT and machinery industries. However, the present technology leaves much to be desired to effectively produce parts with the volume of 1mm<sup>3</sup> and less by mechanical method in large quantities. This paper provides a method for efficient quantity production of complete micro 3D structure using micro end-milling cutting process. The possibility has proven via manufacturing experiment of a multistage micro complex gear structure of 500μm in length, 500μm in maximum external diameter and a volume of 1mm<sup>3</sup> and less.

**Key Words** : 3-Dimensional Micro Parts, Micro End-Mill, Micro Gear Structure, Manufacturing Process

#### 1. 서 론

최근 IT, 마이크로머신 등 첨단산업분야에서 마이크로 기어, 로우터, 샤프트 등 초소형 기계요소 부품의 수요가 급증하고 있다[1~2]. 이들 부품 중 전체 체적이 1mm<sup>3</sup> 또는 그 이하이고 외관은 수십에서 수 마이크로 사이즈의 미세형상들이 복합된 극소 체적의 마이크로 입체형상부품을 효율적으로 다량 제조하는 기술이 필요하다[3~6].

통상 기계적인 가공법으로 초소형 부품을 제조하는 데에는 방전성형가공, WEDM 등이 많이 활용되었다. 그러나 방전성형가공에서는 제품형상과 동일한 사이즈의 마이크로 전극을 여러 개 만들어야 하는 문제가 있으며, 측면가공과 상하 단면을 효율적으로 가공할 수 있는 방법이 없다. 또 WEDM의 경우 측면가공은 가능하나 상하 단면의 가공이 불가능한 단점이 있다.

이와 같이 기계적 방법으로 입체형상의 3차원 마이크로구조물 제조가 어렵기 때문에 많은 경우 Photo-lithography와 같은 반도체 식각기술, MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술 등 고에너지를 이용한 미세가공공정이 개발되어 활용되고 있다<sup>7-9</sup>. 그러나 이 방법들은 고가의 설비가 필요하며, 식각이 가능한 소재에 한정하여 제작이 가능하기 때문에 철, 동, 알루미늄 등의 고강성 소재를 이용한 미세 구조물의 효율적 가공은 불가능한 문제가 있다. 또한, 이들 공정은 바탕면을 기저로 식각 또는 증착 과정을 반복하며 구조물을 제조하는 것이기 때문에 형상은 3차원이지만 실제로는 한쪽이 구속된 2.5차원 구조물이라고 할 수 있다[5]. 본 연구에서는 마이크로 엔드밀링에 의한 미세절삭공정을 이용하여 완전 입체형상의 마이크로 3차원 구조물을 효율적으로 제조하는 방법을 제시하고, 실제적인 가공실험을 통하여 길이

1. 한국기계연구원 나노공정장비연구센터  
2. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소  
3. 금오공대 기계설계공학과  
# 교신저자: 한국기계연구원, jtj@kimm.re.kr

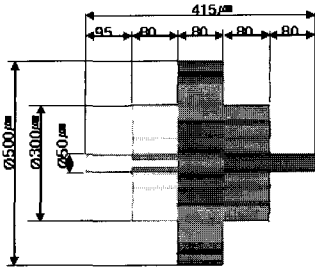


Fig. 1 Micro gear structure with steps

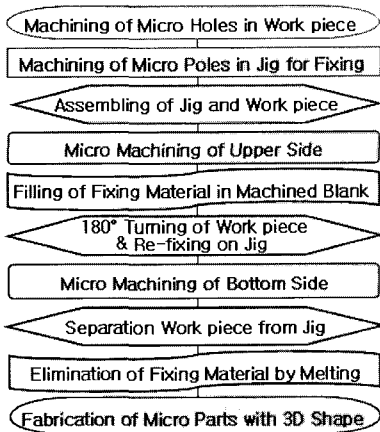


Fig. 2 Fabrication process for micro gear shaft structure

500 $\mu\text{m}$ , 외경 500 $\mu\text{m}$ , 체적 1mm<sup>3</sup> 이하인 일체형 다단 마이크로 복합 기어 구조물 시제품을 제작하여 다량 생산의 가능성을 입증하였다.

## 2. 마이크로 3-D 형상부품 제조방법

본 연구를 통하여 제조하고자 하는 마이크로입체형상의 대표적인 부품으로 Fig. 1과 같은 마이크로 복합 기어 구조물의 예를 나타내었다. 부품의 전장은 415 $\mu\text{m}$ 이고, 양측 축의 직경은 50 $\mu\text{m}$ , 양측의 작은 기어 직경 300 $\mu\text{m}$ , 중심의 메인 기어 직경은 500 $\mu\text{m}$ 인 5단 복합 기어 구조물이다. 이것은 입체형상 부품의 한가지 예로서 단면의 형상이나 사이즈 여러 가지로 쉽게 제작이 가능하다. Fig. 2에 Fig. 1의 마이크로 부품 제조를 위한 공정도를 나타내었다.

### 2.1 공작물과 고정 지그 준비

미세 엔드밀링을 이용한 입체형상의 마이크로 부품 가공을 위해서는 먼저 박판의 공작물과 공

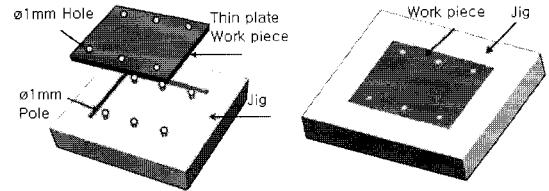


Fig. 3 Manufacturing of workpiece and fixture jig for micro machining

작물을 고정하는 지그를 제작하는 것이 필요하다. Fig. 3에 이 공정을 설명하는 그림을 나타내었다. 먼저 제조할 공작물의 크기를 고려하여 일정한 두께와 면적을 가진 박판 공작물을 준비한다. 지그와의 조립을 위해서 초정밀 미세 가공기에서 마이크로 엔드밀을 이용하여 일정한 간격으로 공작물 외곽에 다수개의 미세 홀(hole)을 가공한다. 이때의 공작물은 뒤집어서 설치해도 같은 위치와 간격이 되도록 가공되어야 한다. 박판 공작물을 고정할 지그는 가공할 공작물의 크기를 고려하여 준비하고, 미세 가공기의 스테이지 위에 고정한다. 공작물을 설치할 공간을 가공함과 동시에 조립을 위하여 지그의 외곽에 다수개의 마이크로 폴(pole) 구조물을 가공한다. 이때 폴 구조물은 공작물의 홀과 동일한 간격으로 정밀 가공되어야 하고, 조립공차를 고려한 정밀 직경으로 가공되어야 한다. 이렇게 제작된 공작물과 지그를 조립하면 가공준비가 완료된다.

### 2.2 상면부 형상 가공

지그에 고정된 공작물의 상면을 CAD/CAM에 의해 작성된 NC 가공프로그램에 따라 가공한다. 이때 가공되는 마이크로 부품의 위치는 공작물을 뒤집어서 설치해도 동일한 위치가 되도록 일정한 간격으로 가공되어야 한다. 가공되는 부품의 위치를 센터를 기준으로 상하좌우로 일정간격으로 배치하면 다수의 부품을 가공할 수 있다. Fig. 4에 상면부의 가공공정을 나타내었다. 중형비가 있는 마이크로 구조물 가공 시에는 중심부의 가장 미세한 부위부터 step-by-step 방식으로 가공하는 것이 필요하다. 본 실험에서는 Fig. 4(a)에서와 같이 제일 먼저 상면부의 직경 50 $\mu\text{m}$ 의 폴을 높이 95 $\mu\text{m}$ 으로 가공하였다. 다음에는 Fig. 4(b)와 같이 step-by-step 법으로 첫 번째 단의 마이크로 기어를 가공한다. 다음에는 같은 방식으로 Fig. 4(c)와 같이 중

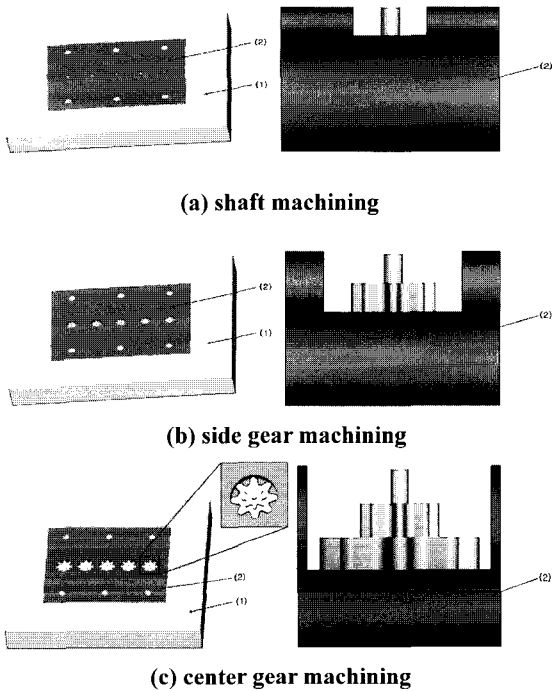


Fig. 4 Machining process of upper side for micro gear structure

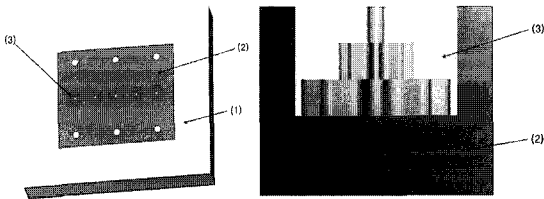


Fig. 5 Filling process for fixing of machined micro parts

심부 기어를 가공하여 상부의 가공을 완료한다. 본 실험에서는 각 기어 단의 가공 높이는 80 $\mu$ m이다.

### 2.3 충전 공정

Fig. 5에 가공된 공작물의 빈 공간(blank)에 충전 재료(filling material)를 채운 충전 공정을 나타내었다. 마이크로 부품의 고정용 충전 재료(3)를 이용하는 것은 매우 효과적인 공작물 고정 방법이 된다[3,7]. 특히 본 연구에서와 같이 미세 체적을 갖는 마이크로 구조물의 고정에는 다른 어떤 고정 지그도 사용하기 어렵기 때문에 아주 유용하게 활용될 수 있다.

이러한 충전 재료에는 다음과 같은 몇 가지 요구 조건이 따른다

- ① 충전 하기 쉬운 상(phase)으로 쉽게 변형 가능 할 것: 액상 또는 고상
- ② 충전 후에 공작물과 쉽게 접착 및 고화될 것
- ③ 고화 후 미세 절삭력과 진동에 견딜 수 있는 강성을 가질 것
- ④ 적절한 온도에서 용융되어 공작물과 쉽게 분리 될 수 있을 것

현재 적용 가능한 공작물 고정용 충전 재료로는 저융점 고체인 천연 왁스 또는 합성수지 왁스 등이 있고, 납, 은, 비스무스, 주석, 등 비철 금속 혼합물 계통도 있다(Table 1, Table 2)[7]. 충전재의 선택은 가공대상 공작물의 종류와 크기, 형상, 가공하는 힘의 크기, 공작물과의 접착력 등 상황에 따라 적정한 것을 선택한다.

Table 1 Examples of low melting materials-wax

Kinds of Wax			Melting Range(°C)
Natural Wax	Mineral	Paraffin Wax etc.	40 ~ 71
	Vegetable	Carnauba etc.	40 ~ 71
	Insect/Animal	Bee Wax etc.	63 ~ 70
Synthetic Wax	Chemical	Polyethylene Wax etc.	100 ~ 150

Table 2 Examples of low melting materials-nonferrous metal

	Melting Range(°C)	Tensile Strength(MPa)	Elongation(%)	Wetting Angle(°)
Sn-37Pb	183	19(20°C)	-	-
Bi-42Sn	139	41	20(20°C)	43 $\pm$ 8(195°C)
Sn-20In-2.8Ag	179-189	46.9	47	44 $\pm$ 8(220°C)
Sn-9Zn	199	64.8	45	37 $\pm$ 7(215°C)
Sn-5Sb	232-240	31(20°C)	25(20°C)	37(-)

본 실험에서는 파라핀계 왁스를 사용하였다. 이 충전재는 상온에서 고상(solid phase)으로 유연성을 가지고 있다가, 용융시키면 금속과 아주 양호한 접착성을 보이며 마이크로 구조물 가공에 필요한 충분한 접착강도를 발휘한다. 또한 왁스는 약 100°C의 온도에서 완전히 용융되므로 끓는 물을 이용해서도 쉽게 공작물을 분리 할 수 있다. 마이크로 엔드밀에 의한 가공에서는 고속회전과 미세 가공 조건에 의해 절삭력이 극히 작고(0.05N 이하)발열이 거의 없어 이 정도의 충전 재료로도 충분히 안정된 마이크로 공작물의 고정 및 가공이 가능하다.

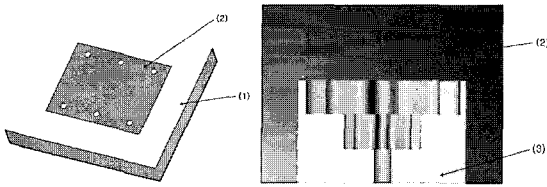


Fig. 6 180° turning and refixing process of workpiece

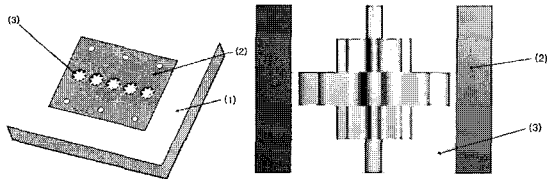


Fig. 7 Complete finish machining of bottom side for micro gear structure

### 2.4 공작물 전환 및 후면 가공

공작물을 뒤집어서 설치하고 하면을 완성 가공하는 모습을 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. 충전 공정은 지그 위에서 수행할 수도 있고 박판 공작물을 지그에서 분리해서 수행할 수도 있다. 어떤 순서로 진행하던 충전 재료가 완전히 고화되고 나면 공작물을 180° 뒤집어서 Fig. 3과 같이 다시 지그에 설치해야 한다. 이때 공작물의 홀과 지그의 폴이 정밀하게 가공되어 있다면 공작물을 뒤집은 후에도 마이크로 가공물은 정밀 위치로 재정렬된다.

공작물이 안전하게 조립되었다면 앞의 Fig. 4의 순서와 같이 step-by-step 방식으로 샤프트와 중간 기어를 차례로 가공하여 입체형상의 제품을 완성 제작 한다. 여기서 중간 기어의 마지막 절삭단계에서 하면의 충전 재료가 드러나게 되므로 주의 를 필요로 한다. 왁스 충전재가 견고한 고정력을 가지고 있더라도 절삭력이 과하면 마이크로 구조물이 흔들리기 쉽고, 금속과 수지가 동시에 가공되는 형태가 되므로 복합적인 가공 문제가 발생할 가능성도 있다.

### 2.5 마이크로 부품의 분리

이상과 같이 가공이 완료되면 충전 재료인 왁스에 고정되어 있는 마이크로 부품들을 분리함으로써 완전한 입체형상의 마이크로 부품 제조가 완료된다. 가공된 마이크로 부품을 왁스에서 분리하는 것은 왁스를 녹이는 열만 가하면 되므로 매

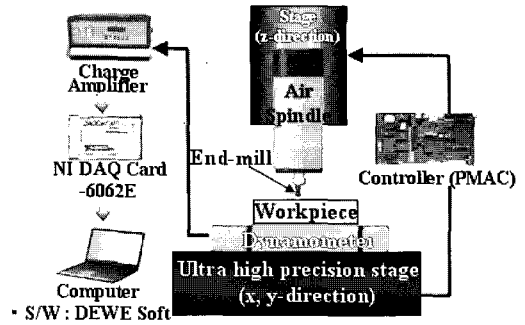


Fig. 8 Schematic of experimental set-up

Table 3 Specification of the micro machining system

	Item	Unit	Specification
X-Y Axis Stage	Moving Stroke	mm	200×200
	Feeding Speed	mm/s	0.005-22
	Min. Incremental Move	nm	5 (200000cts/mm)
	Repeatability	μm	0.05-0.25
Z Axis Slide	Moving Stroke	mm	100 (LS1mm/rev)
	Feeding Speed	mm/s	0.005-22
	Min. Incremental	nm	40 (25000cts/mm)
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)		μm	< 0.1

우 쉽다. 그러나 가능하면 깨끗하게 왁스를 제거하기 위한 방법이 필요하다. 본 연구를 통하여 확인한 결과 끓는 물에 넣어서 왁스를 녹여내는 방법이 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

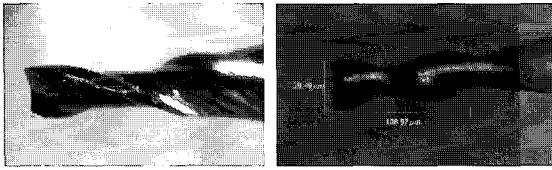
## 3. 입체형상 구조물 제조실험

### 3.1 실험장치 구성

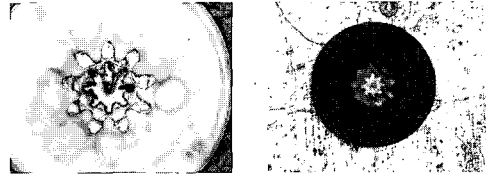
Fig. 8은 실험에 사용된 초정밀 미세가공 시스템 장치의 개략도이며, 그 사양은 Table 3과 같다. 본 시스템은 X-Y-Z 기본 3축 에어베어링 구조의 CNC 가공시스템이며, 70,000rpm의 에어스핀들이 장착되었다. 공작물 하면에는 절삭력측정 및 가공감시를 위한 공구동력계가 설치되었다.

### 3.2 공구 및 공작물

Fig. 9에 마이크로3D 형상부품 가공을 위한 공구를 나타내었다. Fig. 9(a)는 Ø200μm의 Flat 앤드밀



(a) Ø200µm flat end-mill (b) Ø40µm flat end-mill  
Fig. 9 Cutting tools



(a) machining of upper side (b) wax filling  
Fig.10 View of machining surface

Table 4 Mechanical properties and chemical composition of Brass

Symbol	Composition (%)		Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
	BsC3	CU 62-66 Zn 30-34 Pb2.5, Sn1.0	Impurity Fe, Ni, Mn, Al	18 over

이며, 황삭 가공에 사용하였고 Fig. 2(b)는 Ø40µm의 Flat 엔드밀로써 황삭 가공 후 형상 완성을 위한 정삭 공구로 사용하였다. 이들 마이크로 엔드밀의 특징은 직경에 비해 Flute 부의 길이가 짧은 특징을 가지고 있다.

본 실험에 사용된 공작물 재료는 고강도 황동 (brass) 주물 소재로서 그 기계적 특성 및 화학적 조성을 Table 4 에 나타내었다. 고강도 황동소재는 주성분인 Cu 와 Zn 함량에 따라 64 황동, 73 황동으로 나뉘어 지며, Zn 의 함량이 증가하면 인장강도는 커지고 연신율이 낮아진다. 본 실험에서는 주로 64 황동을 사용하였다.

### 3.3 가공실험 및 결과

Fig. 10에 마이크로기어 구조물의 가공모습을 나타내었다. Fig. 10(a)는 상면의 마이크로 축(직경 50 µm)과 중간의 소형기어(외경 0.3mm) 및 외곽의 대형기어(외경 0.5mm) 구조물 가공을 완료한 모습이고, Fig. 10(b)는 가공된 블랭크 공간에 고정재로서 왁스재를 충전 한 모습이다.

가공 조건들은 Table 5와 같다. 본 실험에서는 절삭시간 단축을 위하여 제거량이 많은 미세 축의 황삭 가공에는 비교적 직경이 큰 Ø200µm공구를 사용하고, 정삭 및 미세 기어 치형의 성형가공에는 Ø40µm의 공구를 사용하였다. 공구 회전속도는 50,000rpm을 적용하였고, 이송속도는 Ø200µm

Table 5 Machining conditions for fabrication of micro gear structure

Contents	Rough machining	Finish machining
Cutting tool	Ø200µm Flat end-mill	Ø40µm Flat end-mill
Tool revolution	50,000rpm	
Feed rate	60 mm/min	20 mm/min
Depth of cut	10µm	10µm
Workpiece	Brass	
Cutting oil	Spindle oil	
Filling material	Wax	

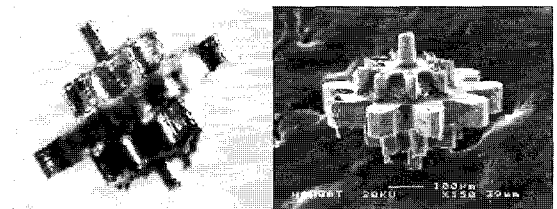


Fig.11 Complicated structure of micro pole and gear

Table 6 Specification of fabricated micro gear structure

Shaft 1	Ø50µm × L95µm
Small gear	D300µm × t50µm, tooth 8, module 3.7
Large gear	D500µm × t50µm, tooth 9, module 5.5
Shaft 2	Ø50µm × L80µm

공구에서는 60mm/min, Ø40µm 공구를 사용한 정삭 가공에서는 20mm/min을 적용하였다. 절삭 깊이는 1step당 10µm을 적용하여 step-by-step 방식으로 가공하였으며, 가공 중에는 spindle oil을 분무하며 가공하였다.

Fig. 11에 본 공정을 통하여 제조된 마이크로 복합 기어 구조물의 완성된 모습을 나타내었다. 정확한 제품의 사이즈는 Fig. 1과 같고 제작은 대략

0.5×0.5×0.5mm<sup>3</sup> 이하이다. 제조된 기어의 주요 사양을 정리하여 Table 6에 나타내었다. 완성된 마이크로 구조물은 매우 정밀하고 양호한 형상으로 제작되었음을 보이고 있어 본 공정의 유용성을 증명하고 있다.

## 5. 결 론

(1) 마이크로 엔드밀링 공정과 저융점 충진재를 이용한 공작물 고정방법 및 회전가공법을 이용하여 미소 체적의 3 차원 마이크로 입체 형상부품의 제조공정 기술을 개발하였고, 시제품 제조를 통하여 그 실용성을 입증하였다.

(2) 하나의 박판 공작물에서 다수, 다종의 마이크로 부품을 동시에 다량으로 제조할 수 있는 마이크로 부품 제조기술을 확립하였다.

(3) 기계적 가공으로 제도가 곤란하였던 마이크로 입체형상부품의 제조기술을 확보하였다. 이에 따라 향후 고강성 부품을 필요로 하는 마이크로 부품의 가공에 효과적 적용이 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 1995, Computer Aided Ultra-precision Micro-machining of Metallic Material Yoshimi TAKEUCHI, Kiyoshi SAWADA and Toshio SATA Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nagoya, pp. 67~72.
- [2] Yutaka Yamagata, Toshiro Higuchi, 1995, Micro Fabrication by Precision Technique, JSPE, Vol. 61, No.10, pp. 1361~1368.
- [3] 제태진, 지도교수 이종찬, 2004. 6, 마이크로 부품제조를 위한 미세 절삭공정 연구, 금오공대 박사학위논문.
- [4] T. Je, J. Lee, D. Choi, E. Lee, B. Shin, 2003, Development of a Micro Machining for Fabrication of Micro parts, Key Materials, Vol. 238-239, pp. 383~388.
- [5] T. J. Je, J. C. Lee, D. S. Choi, E. S. Lee, B. S. Shin, K. H. Whang, 2004, A Study of the Micro Pole Structure Fabrication and Application Technology by Micro End-Milling Process, KEY ENGINEERING MATERIALS, Vol. 257-258.
- [6] E. S. Lee, Y. J. Shin, J. H. Kang, T. J. Je, J. K. Lee, H. Y. Lee, 2000, Development of Micro Mold Machining Technology, Proceeding of Korea Society of Precision Engineering, p. 1047.
- [7] B. S. Shin, D. Y. Yang, D. S. Choi, E. S. Lee, T. J. Je, K. H. Whang, 2003, Rapid Manufacturing of 3D Shaped Products by Multi-face High-speed Key Engineering Materials, pp. 399~404.
- [8] 1996, Ultraprecision 3D Micromachining of Glass Yoshimi TAKEUCHI, Kiyoshi SAWADA, and Toshio SATA Annals of CIRP, Vol. 45/1, 401-404.
- [9] Y. Yamagata, 1997, Microfabrication by Ultra Cutting, RIKEN Symposium, Vol. 1.