

# Micro EDM을 이용한 Lab-on-a-chip금형의 미세 패턴 제작에 관한 연구

신봉철<sup>#</sup>, 김규복<sup>1</sup>, 조명우<sup>2</sup>, 김보현<sup>3</sup>, 정우철<sup>4</sup>, 허영무<sup>4</sup>

## A Study on the Micro Pattern Fabrication of Lab-on-a-chip Mold Master using Micro EDM

B. C. Shin, K. B. Kim, M. W. Cho, B. H. Kim, W. C. Jung, Y. M. Heo

(Received December 27, 2010 / Revised January 4, 2011 / Accepted January 7, 2011)

### Abstract

Recently, analyzing system is studying for applying to biomedical engineering field, actively. Micro fluidics control system has been manufactured using LIGA (Lithographie Galvanoformung und Abformung), Etching, Lithography and Laser etc. However, it is difficult that above-mentioned methods are applied to fabrication of precision mold master efficiently because of long processing time and rising cost of equipments. Therefore, in this study, micro EDM and micro WEDG system were developed to analyze machining characteristics with tool wear, surface roughness and process time. Then, optimal machining conditions could be obtained from the results of analysis. As the results, mold master of staggered herringbone mixer which has a high mixing efficiency, one of passive mixer of Lab-on-a-chip, could be fabricated from micro pattern(< 50um) using micro EDM successfully.

**Key Words** : Micro Molding Method, Lab-on-a-chip, Wire Electro Discharge Machining, Electro Discharge Machining

### 1. 서 론

최근 급격한 기술 발전과 산업 발달로 인해 항공기, 자동차, 의료기기 등에 적용되는 부품의 미세화, 초정밀화 및 다기능화에 대한 수요가 증가하고 있다[1]. 또한 인간 평균 수명의 증가와 의료 및 생명 연구에 대한 관심 증대로 MEMS기술을 적용한 BioMEMS(Bio Micro Electro Mechanical System)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[2, 3]. BioMEMS를 기반으로 한 랩온어칩(lab-on-a-chip)은 생물학, 화학 및 의학 분야 등에서 실험 및 분석을 위한 여러 단계의 작업들이 하나의 칩(chip) 위

에 구현된 장치로 미세한 양의 시료투입만으로 기존의 전 과정을 대체 할 수 있어 화학, 제약 및 환경분야를 비롯한 다양한 분야로의 적용 및 응용 제품의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 마이크로 장치들은 내부에 다양한 미세 구조물과 다양한 패턴형상을 가지고 있어 이를 제작하기 위한 미세성형 기술에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 미세성형기술 중 미세사출성형 공정(Micro molding method)은 생산성 향상, 형상의 다양성, 자동화 및 공정비용을 줄일 수 있는 장점을 가진다. 고 정밀도 미세 패턴 구현을 위해 Lithography[4] 및 LIGA(Lithographie Galvanoformung

1. 인하대학교 기계공학과  
2. 인하대학교 기계공학과  
3. 숭실대학교 기계공학과  
4. 한국생산기술연구원 정밀금형팀  
# 교신저자: 인하대학교 기계공학과, kenny77b@empal.com

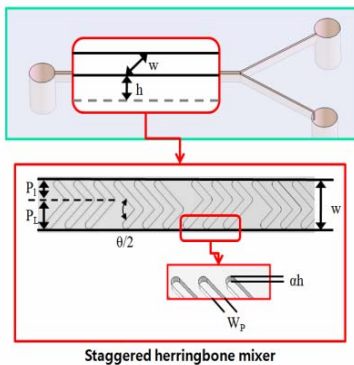
und Abformung) [5] 기술이 이용되고 있으나 패턴 형상 크기 및 3D형상 구현의 제한과 고가의 시설 비로 인한 제작비 상승 등이 문제가 되고 있다.

이로 인해 범용 공작기계를 기반으로 고 정밀 및 소형화된 마이크로 가공을 이용한 금형 제작이 부각되고 있다[6]. 마이크로 엔드밀을 이용한 기계적 절삭가공은 100 $\mu\text{m}$  이상의 큰 구조물에 대해 비교적 쉽게 구현 가능하나 공구 크기 및 시편의 강성에 따른 제약으로 인해 가공 정밀도의 문제가 제기되고 있다. 하지만 미세 방전가공은 기존의 범용 방전 가공기에 비해 1/100 정도로 방전에너지 작게함으로써 표면 조도 향상과 가공 정밀도 획득이 가능하고, 가공 후 버(Burr)가 발생하지 않으므로 후처리 공정이 필요없고 가공물의 기계적 특성에 상관없이 가공 정밀도가 우수하며 가장 활용도가 높다[7].

따라서 본 연구에서는 랩온어칩 금형 코어 제작을 위해 미세 방전가공 기술을 이용한 미세 방전 가공기 개발과 방전가공에 필요한 가공조건 선정을 수행하였다. 또한 선정된 방전 조건을 이용해 랩온어칩의 믹서(Mixer) 중에서 Staggered herringbone mixer 패턴의 금형 코어 제작을 통해 가공성을 평가하였다.

## 2. 랩온어칩의 믹서 모델 선정

랩온어칩의 구성은 시료희석, 혼합, 반응, 분리 및 정량 등 모든 단계를 하나의 칩 상에서 구현되어야 한다. 랩온어칩의 단계 중 혼합은 칩의 성능을 좌우하는 중요한 요소 중 하나이며 전체 연구과정 및 제품개발단계에서 중요한 비중을 차지하고 있다.



Index	Unit( $\mu\text{m}$ )
W	300
h	200
h	50
PL	180
P1	120
Wp	50
$\theta/2$	45°

Fig. 1 Design of staggered herringbone mixer

미세유체 시스템에 포함된 마이크로 믹서(micro mixer)는 능동 믹서(active mixer)와 수동 믹서(passive mixer)로 분류 될 수 있다. 능동 믹서는 압력, 온도와 같은 외력에 의해 혼합 효율을 조절하는 방법이어서 제품의 구성과 제조 방법이 복잡해지고 제품 가격이 상승하게 된다. 반면에 수동 믹서는 유로 내부 구조의 변화로 유체가 혼돈류(Chaotic advection)를 발생하므로 구조가 간단하고 안정적이며 복잡한 시스템에 쉽게 통합할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 수동형 믹서들 중에서 최근 Stroock[8] 등에 의해 연구된 Staggered herringbone mixer를 선정하였다. 이는 유로 바닥에 물고기 뼈 모양의 홈을 적용하여 매우 효과적이며 빠른 유체 혼합을 얻을 수 있다고 알려져 있다. Fig. 1은 제시한 Staggered herringbone mixer 패턴 형상을 나타내고 있다.

## 3. 실험 장치 구성 및 조건

### 3.1 미세 방전시스템 개발

미세 방전에서는 기존의 범용에 비해 방전에너지가 작아 가공량이 작아지고 방전 간극이 짧아지게 된다. 따라서 적은 가공량에 따른 수 $\mu\text{m}$ ~수십 $\mu\text{m}$  단위로 전극의 이송이 가능해야 하고 정밀도를 유지할 수 있는 이송장치가 필요하다. 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 3축 이송 스테이지와 주축 회전부를 석정반 위에 구성한 미세 방전 시스템을 개발하였다. 주축은 방전 전류가 주축 모터에 영향을 없게 하기 위해 DC모터에 벨트를 이용하여 병렬로 구동하는 방식으로 제작하였다.

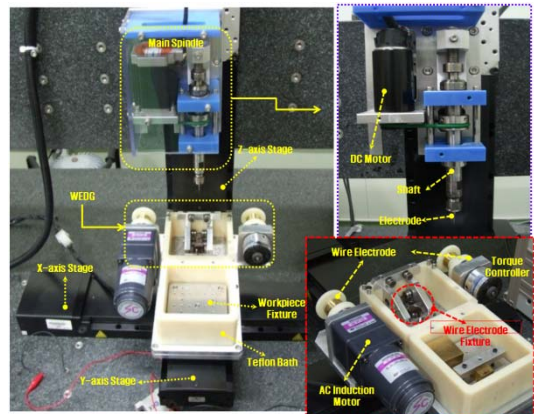


Fig. 2 Micro EDM system

또한 전극의 가공 및 런아웃(runout)을 최소화하기 위한 방법으로 WEDG(Wire Electro Discharge Grinding)를 제작하였다. WEDG는 미세 방전 가공기에 장착되어 다양한 크기의 전극을 제작할 수 있는 장치이며, 전극의 셋업오차(setup error) 및 런아웃을 최소화할 수 있는 시스템이다[9]. WEDG 시스템은 토크 컨트롤러를 이용하여 구리 와이어 전극을 일정 토크로 유지하고, AC 인덕션 모터를 사용하여 와이어의 이송속도를 조절할 수 있게 제작하였다. 이를 통해 전극 가공 시 와이어 전극의 마모로 인해 생길 수 있는 오차를 최소화 하였다. 미세 방전 가공기의 시스템의 이송 스테이지 3축과 주축 스핀들은 모션 컨트롤러(NI PXI 7354)를 사용하여 제어하였으며, 방전 간극은 데이터 수집 보드(NI DAQ 6221)를 이용해 방전 전압을 실시간 모니터링하여 조절하였다.

### 3.2 방전 회로

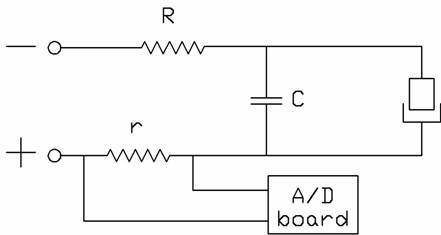


Fig. 3 RC circuit

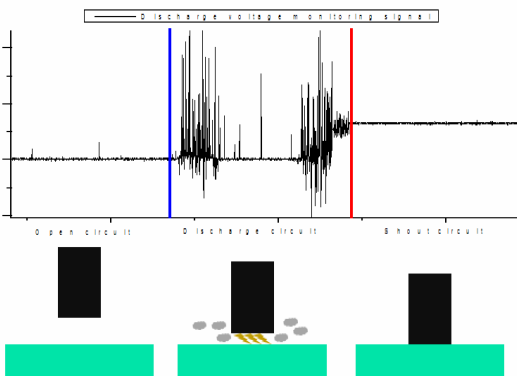


Fig. 4 Monitoring method

미세 방전 가공에서는 방전 에너지를 작게 하여 크레이터 크기를 줄이고, 가공 정밀도를 향상시키기 위해 펄스폭이 짧은 RC회로를 사용하였다. 이 회로는 콘덴서(capacitor)에 충전된 전하를 방전

하는 방식으로, 전류의 피크치가 높고 펄스폭이 짧은 전류를 얻을 수 있어 크레이터의 크기를 최소화 할 수 있다. Fig. 3은 개발된 미세 방전가공기에 사용한 회로를 나타내고 있다. RC 방전회로에서 전극과 공작물 사이에 간극을 측정하고 측정된 신호를 입력하여 단락을 피하고 가공 중 일정하게 간극을 유지할 수 있도록 구성하였다(Fig. 4).

### 3.3. 가공 조건

일반적인 방전가공에서의 전극재료는 전기 전도도가 높은 구리를 사용하고 있다. 하지만 구리를 미세 방전가공의 전극으로 이용하게 되면 기계적 강도가 낮아 전극과 공작물의 단락 발생 시 전극의 휨이 발생하게 되어 본 논문에서는 전극 재료로 기계적 강도가 우수한 초경(WC)을 사용하였다. 공작물은 미세 구조물에 적합한 SUS304를 사용하였다. 전극과 공작물은 전극을 음극, 공작물을 양극으로 하였다.

미세 방전가공에서는 콘덴서(capacitor)용량, 전압(voltage), 방전 절연액에 따라 크레이터의 크기 및 방전 간극의 크기를 결정하는 중요한 변수이므로 이 3가지 조건 변화에 따른 가공성 평가에 대한 분석을 수행하였다. 전압의 변화는 60~120V 사이에서 조절하였으며 콘덴서는 10pF, 100pF, 1000pF으로 선정하였다.

Table 1 Experiments condition of Micro EDM

Index	Specification
Discharge circuit	RC
Voltage (V)	60V ~ 120V
Resistance (Ω)	1000Ω
Capacitor (pF)	10pF, 100pF, 1000pF
Dielectric fluid	Kerosene, DI water(18MΩ <sup>cm</sup> )
Electrode	WC (Φ300 <sup>μ</sup> m)
Workpiece	SUS304, Copper

방전가공 실험은 전압과 콘덴서 용량을 변화하면서 전극의 마모와 가공량의 관계를 분석하였다. 또한 등유와 탈이온수를 이용한 절연액 변화에 따른 방전 상태 변화를 분석하였다. 실험 조건은 Table 1과 같다.

## 4. 가공 실험

### 4.1 방전에너지에 따른 가공성 평가

개발된 미세 방전 가공기를 이용하여 전압과 콘덴서 용량을 변화하면서 가공량과 전극 마모를 측정하기 위해 100 $\mu\text{m}$  전극을 이용해 미세 구멍의 가공을 수행하였다. 절연액으로는 일반적으로 사용하는 등유를 사용하였다. Fig. 5은 10pF, 100pF, 1000pF일 때 전압 60V부터 120V까지 변화시키며 가공량을 분석한 그래프이다. 콘덴서 용량과 전압의 상승에 따라 가공량은 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

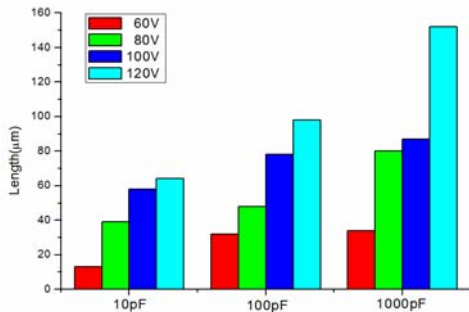


Fig. 5 The machined depth according to voltage

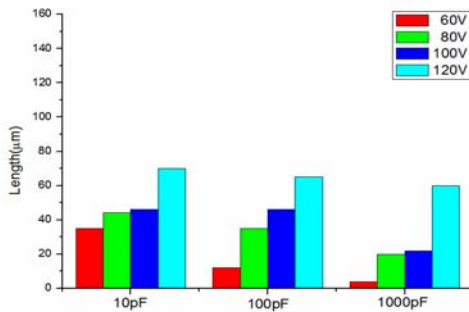


Fig. 6 The electrode wear according to voltage

Fig. 6은 앞 절에서와 같은 가공조건에서 전극의 마모를 나타낸다. 실험결과 전압이 증가함에 따라 전극 마모가 증가하였으나 콘덴서 용량의 증가에는 오히려 전극 마모가 감소하는 경향을 보였다. Fig. 5와 Fig. 6을 비교해 본 결과 10pF에서는 전압이 증가함에 따라 가공량과 전극의 마모가 비슷하게 발생하였지만, 1000pF에서는 전극 마모에 비해 가공량이 상대적으로 증가하였다. 물론 가공

표면만 본다면 10pF, 60V가 크레이터의 감소로 효과적일 수 있으나 가공 속도 측면에서는 1000pF, 120V가 가공 속도를 높이는데 효과적일 수 있다. 하지만 1000pF, 120V의 경우에는 가공 간극의 증가로 인한 정밀도 저하 및 크레이터 크기 증가와 높은 방전에너지로 인한 진입부의 버(burr)가 발생하는 문제점이 있어 본 실험에서는 1000pF, 100V의 조건을 선정하였다.

### 4.2 방전 절연액에 따른 가공 특성

절연액은 방전가공 시 공작물 표면에 발생하는 고온의 열을 냉각시켜 재응고 시키는 역할을 한다. 일반적인 방전가공에서의 절연액은 등유를 사용하지만, 미세 방전가공에서는 등유로 인해 발생한 탄화물이 공작물 표면에 고착되어 방전가공이 불안정해진다. 따라서, 본 연구에서는 방전 가공에서 전극의 마모를 감소시키고 형상 정밀도를 높이기 위한 방법으로 알려져 있는 탈이온수를 이용하였다[10]. Fig. 7과 같이 절연액인 등유와 비저항 계수 18  $M\Omega \cdot \text{cm}$ 인 탈이온수를 사용하여 ED-milling 가공을 수행하였다. 절연액에 따른 실험조건은 전압 100V, 콘덴서 용량 1000pF로 설정하였고, 전극 직경은 100 $\mu\text{m}$ 로 20분씩 100 $\mu\text{m}$  깊이로 SUS304를 가공을 수행하였다.

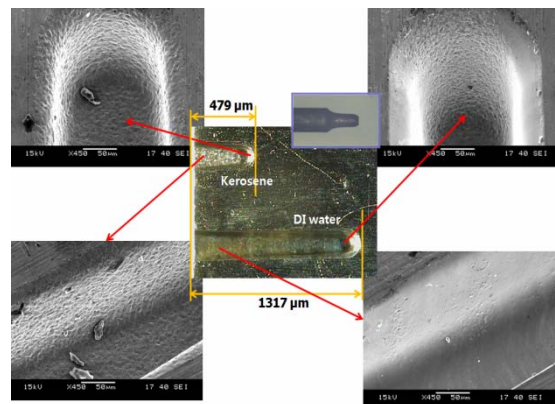


Fig. 7 Surface using ED-milling with kerosene and DI water

실험 결과 가공 폭은 등유에 비해 탈이온수가 가공 간극이 크게 발생하였지만 가공 길이의 경우 등유가 479 $\mu\text{m}$  가공한 것에 비해 탈이온수가 1317 $\mu\text{m}$ 로 가공하여 3배 이상 가공 속도가 빨라지는 현상을 보이고 있다. 방전전극의 마모 또한 등

유에 비해 탈이온수가 2배 이상 감소하였다.

가공 표면은 탈이온수의 경우 크레이터가 생겼으나 등유를 사용했을 때 보다 작았고 가공 후 전극이 지나간 부분에서는 전해 현상으로 표면에 크레이터가 없는 매끄러운 표면을 유지하여 절연액을 탈이온수로 이용하는 것이 보다 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

#### 4.3 Herringbone mixer 패턴가공

기초 실험에서 선정된 가공 조건을 이용해 ED-milling으로 herringbone Mixer의 패턴형상을 가공하게 되면 전극 마모로 인한 형상의 절입량 변화로 정밀도에 영향을 주게 된다. 따라서 본 연구에서는 패턴 전극을 역방전(Reverse EDM)으로 제작하여 일정 간격으로 방전을 수행하였다(Fig. 8).

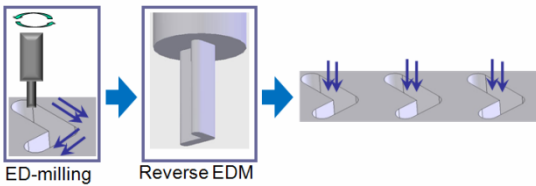


Fig. 8 The method of micro pattern using EDM

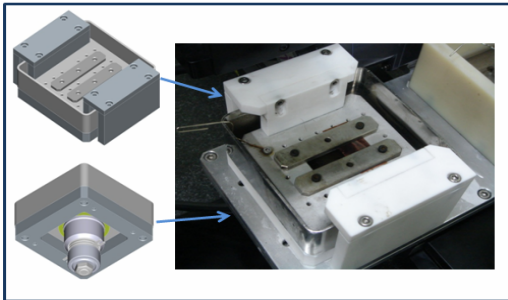


Fig. 9 Ultrasonic vibration system

역방전(Reverse EDM)은 넓은 표면을 이용해 형상을 방전하는 방식으로 전극의 회전을 수행할 수 없어 방전 시 슬러리 배출 문제가 발생하게 된다. 슬러리 배출이 원활히 이루어지지 않으면 단락이 발생하고 불안정한 방전이 발생하여 가공 품질이 좋지 않다. 따라서 슬러리 배출과 가공 효율성을 높이기 위해 Fig. 9과 같이 테프론 베스에 50W, 28kHz의 초음파 진동자를 설치하여 슬러리 배출을 용이하게 하여 가공을 수행하였다. 마이크로 믹서 패턴은 두께 200 $\mu$ m 구리판과  $\Phi$ 50 $\mu$ m 초

경 전극을 사용하여 ED-milling으로 단일 패턴을 제작하였다. 이 형상을 다시 초음파를 부가하여 슬러리 배출을 용이하게 한 상태에서  $\Phi$ 1mm 구리 전극으로 역방전을 이용하여 패턴형상을 갖는 전극을 제작하였다. 이렇게 제작된 패턴전극으로 방전가공을 수행하여 Fig. 10와 같은 staggered herringbone mixer의 패턴을 제작하였다.

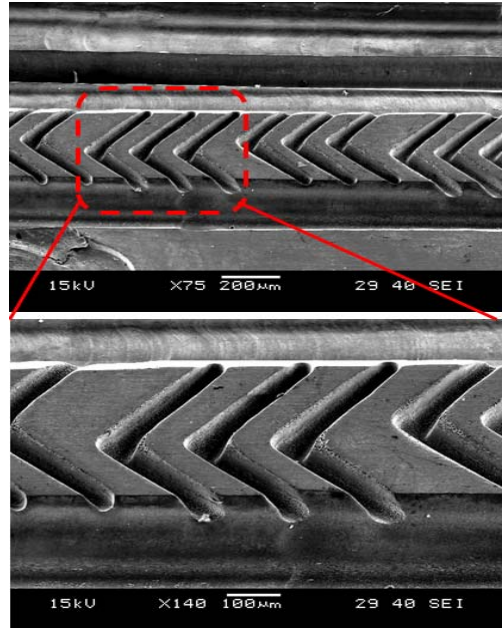


Fig.10 SEM image of micro pattern for staggered herringbone mixer

## 5. 결론

본 연구에서는 마이크로 구조물의 가공을 목적으로 미세 방전가공법을 이용한 가공 시스템을 개발하였고, 개발된 시스템을 이용하여 랩온어칩의 마이크로 믹서 패턴제작을 수행하였다. 본 논문에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 미세 방전가공법을 이용하여 다양한 미세 전극 제작 및 ED-milling으로 3D형상 가공이 가능한 미세 방전가공 시스템을 개발하였다.
- (2) 전압 및 콘덴서의 용량과 절연액 변화에 따른 방전 실험을 통해 전극 마모를 최소화 할 수 있는 효율적인 가공 조건을 선정하였다.
- (3) 미세 방전가공 기술을 적용하여 Staggered

herringbone mixer의 미세패턴을 가공하여 미세 금형 제작의 가능성과 타당성을 검증하였다.

차후 이렇게 제작된 금형 코어를 이용해 제품 사출에 관한 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 주관 전략기술개발사업 “마이크로 기능성 초정밀 핵심요소부품 제조기반 기술 개발”의 제 4세부 “기능성 초정밀 핵심 요소 부품 제조 초정밀 금형 기반기술 개발”에 의해 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] L. Alting, F. Kimura, H. N. Hansen, G. Bissacco, 2003, Micro Engineering, Annals of the CIRP, Vol. 52, pp. 635~657.
- [2] R. E. Ochterbroek and A. Van den Gerg, 2004, Lab-on-a-chip : Miniaturized system for (bio)-chemical analysis and synthesis, Clin. Chim. Acta, Vol. 343, p. 245.
- [3] O. Geschke, H. Klank, P. Telleman, 2004, Microsystem engineering of Lab-on-a-chip devices, 2nd ed.
- [4] R. Tang, B. R. Lu, J. Wan, S. Q. Xie, Y. Chen, E. Huq, X. P. Qu, R. Liu, 2009, Fabrication of micro/nano fluidic channels by nanoimprint lithography and bonding using SU-8, Micro-electronic, Vol. 86, pp.1379~1381
- [5] M. J. Madou, 2002, Fundamentals of Micro-fabrication, Seconded., CRC Rress, New York.
- [6] J. Chae, S. S. Park, T. Freiheit, 2006, Investigation of micro-cutting operations, Int. J. Machine Tool & Manufacture, Vol. 46, pp. 313~332.
- [7] Y. S. Lee, B. H. Kim, 2005, Fabrication of 3-D Micro Structure and Micro Tool Using MEDM, Trans. Mater. Process., VOL. 14, NO. 3, pp. 251~256.
- [8] Stroock, A. D, Dertinger S. K. W, Ajdari A, Mezic I, Stone, H. A. and Whiteside, G, M, 2002, Chaotic Mixer for Microchannels, Sci., Vol. 295, p. 64.
- [9] T. Masuzawa., M. Fujino and K. Kobayashi., 1985, Wire Elector-Dischage Grinding for Micro-Machining, Annals of the CIRP, Vol. 34, No.1, pp. 431~434.
- [10] B. H Kim, C. N. Chu, D. K. Chung, H. S. Shin, 2007, Micro Mold Machining Using EDM/ECM, Trans. Mater. Process., pp. 75~78.