

마이크로 밀링 EDM 머신 개발 및 가공특성 분석

김선호[#], 임한석^{*}

Development of Micro Milling EDM and Analysis of Machined Characteristics

Sun-Ho Kim[#], Han-Seok Lim^{*}

(Received 11 October 2010; received in revised form 23 December 2010; accepted 14 February 2011)

ABSTRACT

Micromachining is gaining popularity due to recent advancements in MEMS(Micro Electro Mechanical Systems). Using conventional micromachining, it is relatively difficult to produce moving components in the order of microns. Photolithography for silicon material has high accuracy machining, but it has low aspect ratio. X-ray lithography has ultra high accuracy machining, but it has expensive cost. Micro-EDM(electro discharge machining) has been gaining popularity as a new alternative method to fabricate micro-structures. In this study, Micro-EDM machine is developed available for fabricate micro-structures and two processes such as side cut EDM and milling EDM is proposed. Several sets of experiment results have been performed to study the characteristics of the machining process.

Key Words : Micromachining(미세가공), Micro-Structures(마이크로 구조물), EDM(방전가공), Micro-EDM(마이크로 방전가공)

1. 서 론

마이크로 머시닝은 마이크로 구조물 제작을 위한 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술의 요소기술로 주목 받고 있으며 다양한 연구들이 있어 왔다. 대표적인 연구는 실리콘 위에서 이루어지는 포토 리소그라피(Photolithography) 기술이라고 할 수 있다. 이 방법은 가공 세장비를 크게 할 수 없고 가공소재의 제한을 받는 단점을 가진다. X 레이 리소그라피(X-ray

lithography)의 경우에는 이러한 문제점을 해결할 수 있지만, 비용이 많이 들고 가공속도가 느린 단점을 가진다.^[1,2]

마이크로 구조물의 대량생산을 위해서는 마이크로 몰드 캐비티(Micro Mold Cavity)를 필요로 하는데 몰드의 경우에는 기계가공이 어려운 난삭재가 주로 사용된다. 소재의 경도가 높지 않다면 전통적인 기계가공법도 적용이 가능하지만, 소재의 경도가 높은 경우에는 경도의 영향을 받지 않는 EDM(Electro Discharge Machining)이 효과적인 가공법이 될 수 있다.

전극의 수직운동에 의해 형상가공이 이루어지는 EDM은 수직형 마이크로 구조물의 가공에 적합하다. 복잡한 수직형 구조물인 경우에는 별도로 전극을 제작

[#] 교신저자 : 동의대학교 메카트로닉스공학과
E-mail : sunhokim@deu.ac.kr

^{*} 하이브리드 정밀

하여 사용하지만 단순한 형상인 경우에는 일정한 직경을 갖는 실린더형 전극이 사용된다. 방사 노즐과 같이 직경이 작고 깊은 구멍가공이 필요한 경우에 적합한 EDM 기술도 연구되었다.^[34] 최근에는 미세 구멍가공의 형상정밀도를 높이기 위해 전자빔과 방전을 병행하는 연구도 이루어지고 있다.^[5]

프린터의 잉크 노즐, 섬유 생산용 방사 노즐, 반도체용 금형 등의 형상이 원형에서 장방형으로 복잡화됨에 따라 이러한 가공에 적합한 가공법의 개발이 요구되고 있다. 장방형 마이크로 구조물의 가공에는 와이어 EDM(Wire EDM)이 이용되기도 하지만 이는 판통 가공에 적합한 방법이라 할 수 있다.

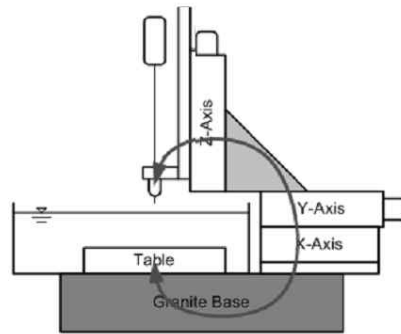
이러한 가공형상의 관점에서 보면 장방형 마이크로 구조물 제작에 가장 적합한 가공법은 밀링 EDM이라고 할 수 있다.^[6] 여기서 밀링 EDM은 수직방향이 아닌 수평방향으로 방전가공이 가능한 특성이 반영된 방전가공기로 정의한다.

본 논문에서는 장방형 마이크로 구조물 가공에 적합한 마이크로 방전가공기를 개발했다. 또한 개발된 가공기를 이용해 그루브 가공에 적합한 두 가지 가공 프로세스를 제안하고, 제안된 프로세스를 적용한 결과를 비교 분석하였다.

2. EDM 머신 개발

방전가공기와 같이 3축을 갖는 가공기에 있어서 서로 직교하는 3개의 축을 배치하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있지만, 테이블 위에 X, Y축을 설치하고 Z축을 컬럼에 고정하는 방식이 일반적이다. 본 연구에서 개발한 가공기는 Fig. 1과 같이 테이블이 베이스에 고정되고 Z축에 고정된 스피들은 Y축상부에 그리고 Y축과 직교하는 X축은 베이스에 고정시키는 구조를 적용했다. 이 구조는 공작물에서 공구 끝단까지의 역선(Force Line)이 짧아 가공기의 변형에 의한 정밀도 저하가 적으며, 방전액 탱크가 고정되어 있으므로 기계의 고속운전 시에도 방전액이 흘러넘치는 일이 발생하지 않는 장점을 가진다. 하지만 이 구조는 스피들 및 Z축의 하중이 Y축에 집중되어 무게중심이 변화하게 되는 단점이 있다. 따라서 Y축의 최대 이송거리를 제한

하고 리니어 가이드의 블록간 거리를 최대화 시키는 방법으로 그 영향을 최소화 했다. 개발된 기계는 가공범위가 150mm (X) x 70mm (Y) x 60mm (Z), 테이블 크기가 205mm (X) x 105mm (Y), 방전수조 크기가 350mm (X) x 170mm (Y) x 70mm (Z)이다.



(a) Structure of EDM machine



(b) Developed EDM machine
Fig. 1 Developed EDM machine

마이크로 가공에서는 미세한 전극의 사용이 필수적이다. 미세한 전극은 기계 외부에서 제작하여 가공기의 스피들에 장착할 경우 그 정도 유지가 곤란하므로 WEDG(Wire Electrical Discharge Grinding) 장치를 이용하여 기계 상에서 제작하여 사용하는 방법이 연구되고 있다. 그러나 이러한 방법은 전극가공에 많은 시간이 소요되어 가공 능률을 떨어뜨리는 요인이 된다.

본 연구에서는 가공 폭에 적합한 상용 실린더형 전극을 사용하여 전극 가공시간을 생략할 수 있는 방식을

적용했다. 그리고 소형 가공기의 제한된 공간 안에 전극 이송기구를 적용하기 위해 Fig. 2와 같이 하나의 직선 안내기구 상에 두 개 이동기구(Z축 및 W축)를 설치하는 방식을 고안하여 적용했다. 고안된 기구는 Z축과 W축의 중첩에 의한 높이 증가를 없앨 수 있어 스펀들의 과도한 오버행(Over Hang)을 피할 수 있다.

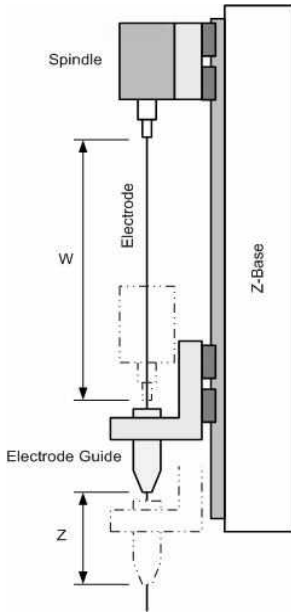


Fig. 2 Device of small diameter electrode supply

마이크로 부품을 방전가공을 이용하여 제작하는 경우, 사용하는 방전 펄스는 그 에너지가 극히 미세한 마이크로 펄스를 사용하여야 한다. 통상적으로 마이크로 펄스를 발생시키기 위해서는 저항과 콘덴서를 이용한 RC(Resistor Capacitor) 형 방전회로가 많이 사용된다. 그 이유는 트랜지스터를 이용한 방전 펄스 발생회로의 경우, Off Delay 시간이 비교적 긴 트랜지스터의 On/Off 특성상 어느 한도 이하의 짧은 펄스를 만들어 낼 수가 없기 때문이다. 마이크로 방전가공을 위해서는 이보다 펄스의 지속시간이 짧아야 하며, 보통 마이크로 세컨드 이하의 마이크로 펄스가 필요하다.

RC형 방전회로에서는 방전시간이 극히 짧은 나노 세컨드 오더의 펄스를 만들어 낼 수 있다. 방전 에너지는 식 (1)과 같이 정의한다.

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

이 경우 가공에 사용되는 방전 에너지는 사용하는 콘덴서의 용량 및 사용하는 전압에 의해 선택이 가능하다. Fig. 3에 본 연구에서 적용한 방전회로를 나타내었다.

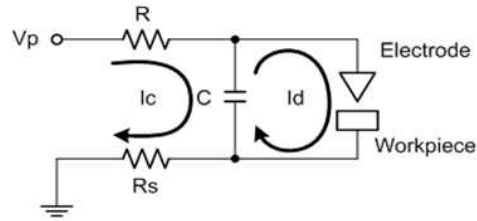


Fig. 3 Electric circuit for EDM

또한 펄스의 주기는 사용하는 저항과 콘덴서로 주어지는 방전회로의 시정수 T로 정의한다.

$$T = R \cdot C \quad (2)$$

이론적으로는 방전 펄스의 주기도 자유롭게 바꿀 수 있지만, 사용하는 전원공급회로의 용량, 전류 및 전압 검출 회로 등에 의해 제한이 될 수 있다. 본 연구에서는 사용하는 최대 충전 전류 및 전원 용량을 고려하여 방전펄스 발생회로에 사용하는 저항 값을 1kΩ으로 고정하였다.

Table 1에 본 연구에서 개발한 방전회로의 사양을 정리하였다.

Table 1 Specification of Electric circuit for EDM

Parameters	Description	Range	Step
Vp	Output Voltage	25V~200V	1V
R	Resistor	1kOhm	Fixed
C	Capacitor	C0: 0pF C1: 33pF C2: 100pF C3: 1000pF C4: 10nF	
Rs:	Current Sensing Resistor	10hm	Fixed

본 연구에서는 마이크로 방전가공이 가능한 전용 모션 제어기를 개발하였다. Fig. 4는 개발한 모션 제어기의 블록도를 표시한다. 사용된 CPU는 8비트의 C8051F120이며 대부분의 명령을 1 머신 클럭에 실행이 가능하여 최대 100 MIPS의 실행이 가능하다. CPU에 PC 및 주변 기기와의 통신이 가능하도록 인터페이스를 구축하고 전용의 BIOS(Basic Input Output System) 프로그램을 개발하여 모션 제어 프로그램을 수시로 업그레이드 가능하도록 하였다. 모션 제어를 위해서는 모션 제어 전용 LSI인 MCX314AS를 적용하였다. 본 LSI는 최대 4축의 이송축 제어가 가능하고 동시 3축의 직선보간, 그리고 임의의 2축을 택하여 원호보간이 가능하여 대부분의 표준 NC 코드(G 코드)의 실행이 가능하다. 한편 본 모션 제어 칩의 출력을 프로그램 가능한 멀티플렉서에 입력하여 필요에 따라 Z축 및 W축의 연동제어가 가능하도록 회로 설계를 하였다.

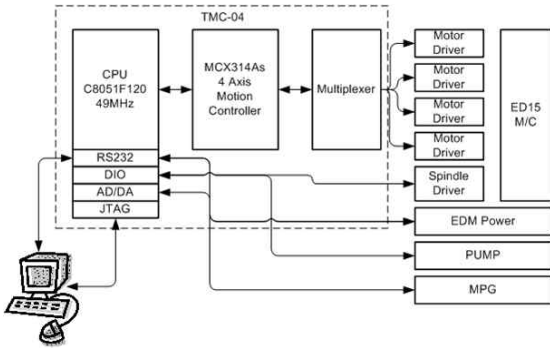


Fig. 4 Block diagram of developed NC

본 가공기를 제어하기 위한 사용자 인터페이스를 개발하였다. 사용자 인터페이스는 장비 운영자가 손쉽게 사용할 수 있도록 화면의 좌측에는 기계위치 표시창 및 기계상태 표시창을 설치하였고, 화면의 하단에는 작업 중 사용자가 수시로 입력 가능한 Override 입력키 및 Start, Stop 버튼 등을 배치하였다. 이를 Fig. 5에 나타내었다.

NC 소프트웨어는 다음과 같은 기능을 가진다.

- 수동 운전 입력창 모드
- 기계와 PC와의 통신 설정 및 펌웨어 업그레이드
- 기계 원점 복귀

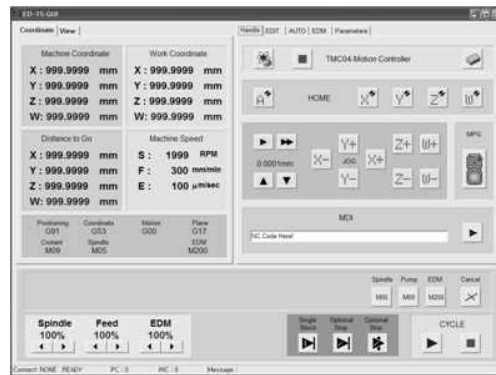


Fig. 5 MMI of developed NC

- 수동 JOG 입력 버튼
- MPG 활성화 버튼
- MDI 입력창
- 작업 파일 편집 모드
- NC 코드 파일의 편집, 저장, 불러오기 등
- 자동 운전 모드
- NC 코드 파일 불러오기 및 실행
- 방전 전원 파라미터 입력창
- 방전 전원의 전압, 콘텐서, 극성 선택
- HOLD, CONTINUITY, RETURN 시간 설정
- 방전 전원의 ON/OFF 버튼 등
- 기계 파라미터 입력창
- 기계의 각 파라미터 설정 및 변경
- 사용자 좌표 원점의 설정 및 표시

3. 방전가공 프로세스

EDM 밀링을 수행하기 위해서는 전극의 이송과 갭 제어가 동시에 이루어져야 하는데, 이러한 경로제어의 방법으로 Fig. 6에 보인 바와 같이 2가지 방법을 제안한다.

Fig. 6 (a)는 전극을 일정 가공깊이 만큼 수직 이송한 후, 전극의 측면을 이용하여 방전가공을 하는 사이드 컷 방전가공법(Side Cut EDM)의 원리를 나타낸다. Fig. 6 (b)는 수직방향으로 미세한 깊이를 이송한 후 일정속도로 전극을 수평 이송시키고 갭의 제어는 이전 가공경로에서의 방전가공 상태에 따라 전극 높이를 제어하는

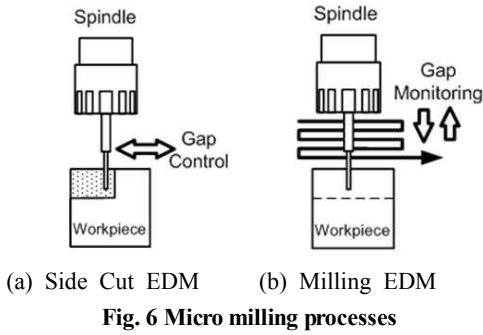


Fig. 6 Micro milling processes

밀링 EDM(Milling EDM)의 원리를 나타낸다.
전극과 공작물이 연속적으로 방전을 발생시키기 위한 전극 이송 제어방법은 다음과 같다.

(a) 사이드 컷 EDM

전극의 이송속도는 전극과 공작물사이에서 발생하는 전압에 따라 식 (3)과 같이 제어한다.

$$F_x = k \cdot \text{sign}[V_{gap} - V_{th}] \quad (3)$$

여기서, F_x 는 전극의 이송속도, V_{gap} 은 전극과 공작물 사이의 전압, V_{th} 는 갭 제어를 위한 스레시홀드 값을 의미한다. k 는 갭 속도제어를 위한 파라미터를 의미한다.

(b) 밀링 EDM

하나의 경로이송이 끝난 후 이전 경로에서의 방전상태에 따라 Z축의 위치는 식 (4), (5)와 같이 제어한다.

$$\text{단락 발생시} : P_{z+1} = P_z + \Delta Z \quad (4)$$

$$\text{단락 비발생} : P_{z+1} = P_z - \Delta Z \quad (5)$$

여기서, P_z 는 수직축의 위치, ΔZ 는 수직축 증분량을 나타낸다.

이송속도, Resistance, Capacitance, 갭 제어 파라미터 k 등은 가공조건에 따라 적절히 변화시킨다. 실험에는 텅스텐 전극을 이용하였다.

사용한 방전회로는 마이크로 EDM에 적합한 RC 방전회로를 사용하였다. 이러한 방전회로를 사용하

여 방전상태를 모션 제어기에 전달하기 위해서 본 연구에서는 방전상태, 단락상태를 나타내기 위해 두 개의 디지털 신호를 사용한다. 그 중 하나는 홀드(Hold) 신호로서 방전이 일어날 경우 전극의 위치를 현상태로 유지시키는 신호이며, 다른 하나는 리턴 신호(Return)로서 전극이 단락 상태일 때, 전극을 후퇴시키는 신호로 사용한다. 이러한 신호를 생성하기 위해 본 연구에서 사용한 방전회로는 고속의 마이크로프로세서를 사용하였으며, 그 동작 개념을 Fig. 7에 나타낸다.

개발된 마이크로 방전가공기에서 단순 그루브 가공을 통해 상기의 2가지 EDM 가공법을 비교해 보았다.

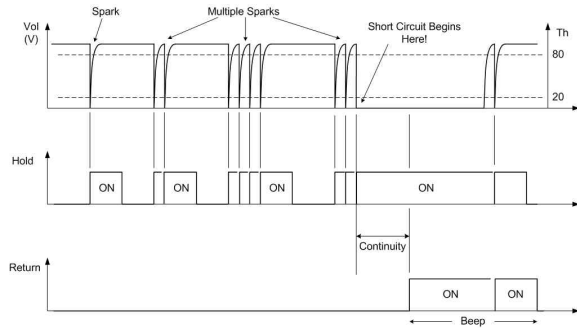


Fig. 7 EDM gap control concept

(a) 사이드 컷 EDM

Fig. 8은 사이드 컷 EDM에 의해 가공된 홈을 전극의 진입방향(a)과 진출방향(b)에서 단면을 관찰한 것이다. 그림에서 보이듯이 가공된 홈은 출구측이 입구 측에 비해 그 폭이 작아졌음을 알 수 있다. 100mm 가공 후 진입방향 가공 폭과 진출방향 가공 폭을 현미경으로 측정된 결과 진출방향 가공 폭이 진입방향 가공 폭에 비해 7%의 작아졌음을 확인했다. 이러한 오차는 방전가공 중에 전극이 마모되기 때문이다. 한편 전극의 끝부분은 방전가공 자체에 기여하는 양이 적으므로 홈의 깊이는 측면의 치수변화에 비하여 상대적으로 적음을 알 수 있다. 사이드 컷 EDM은 황삭, 중삭, 정상으로 가공을 구분하고 각각의 공정에 새로운 전극을 사용함으로써 그루브 폭의 정밀도를 개선할 수 있다.

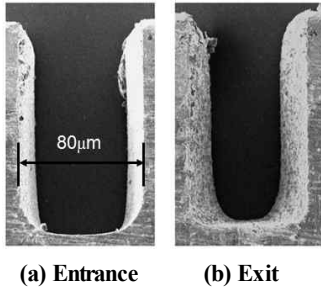


Fig. 8 Micro groove using side cut EDM

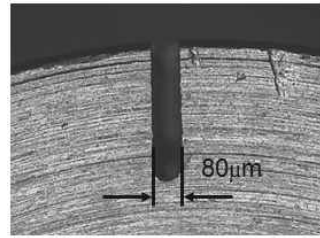
(b) 밀링 EDM

밀링 EDM은 사이드 컷 EDM에 비해 비교적 정밀한 단면형상을 얻는 것이 가능하였다. Fig. 9 (a)는 밀링 EDM에 의한 미세 그루브 가공의 예를 나타낸다. 단면형상이 비교적 양호하고 홈의 바닥도 비교적 일정한 폭을 유지하고 있음을 알 수 있다.

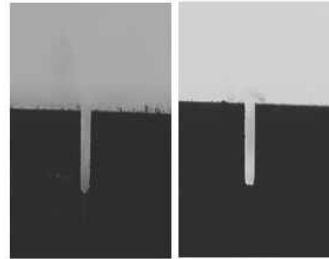
Fig. 9 (b)는 밀링 EDM에 의해 가공된 홈을 전극의 진입방향과 진출방향에서의 단면을 관찰한 것이다. 120mm 가공 후 진입방향 가공 폭과 진출방향 가공 폭을 현미경으로 측정된 결과 진출방향 가공 폭이 진입방향 가공 폭에 비해 1%의 작아졌음을 확인했다. 이러한 가공결과는 밀링 EDM에 있어서는 전극의 끝부분이 주로 방전가공에 사용되어 측면의 치수변화가 발생하지 않기 때문이다.

한편 밀링 EDM에서는 전극의 마모가 전극의 끝단에 집중되므로 지령된 가공깊이보다 작은 깊이의 가공형상이 만들어질 수 있다. 이는 전극의 마모가 가공깊이에 영향을 미치기 때문이다. Fig. 10은 지령깊이에 대한 실제 가공깊이와 공구의 마모량을 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이 실제 가공깊이는 지령된 가공깊이에 도달하지 못하는 것을 알 수 있다. 하지만 지령된 가공깊이에 대한 공구의 마모량은 비례관계 가지고 있음을 알 수 있다. 전극이 마모된 부피(Tool Wear Rate)와 공작물이 제거된 부피(Material Removal Rate)의 비로 환산하면 식 (6)과 같이 일정함을 알 수 있다.

$$\text{전극 마모율} = \frac{TWR}{MRR} \approx 0.078 \quad (6)$$



(a) Groove section



(b) Entrance and Exit

Fig. 9 Micro groove using milling EDM

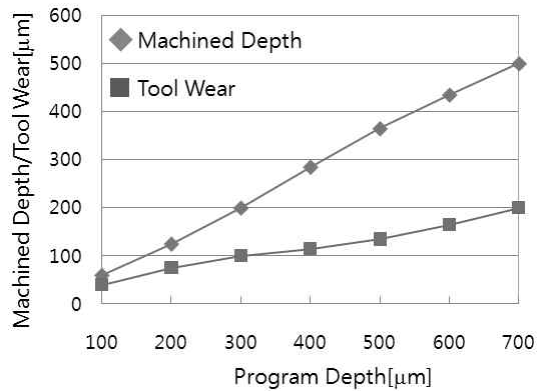


Fig. 10 Relation of program depth and machined depth

4. 결 론

본 논문에서는 마이크로 EDM이 가능한 방전가공기를 개발하고 그루브 가공이 가능한 두 가지 프로세스를 실험적으로 적용하고 그 결과를 비교 분석하였다. 연구를 통해 다음과 같은 몇 가지 결론을 얻었다.

- 장방향 마이크로 구조물 제작에 적합한 마이크로

방전가공기를 개발했다.

- 그루브 가공에 적합한 두 가지 프로세스를 제안했다.
- 사이드 컷 EDM에 있어서 전극의 마모는 주로 전극의 측면에서 발생하므로 가공깊이보다는 폭의 변화가 많이 나타난다.
- 밀링 EDM에서는 전극의 마모가 끝단에 집중되므로 지령된 가공깊이보다 가공된 깊이가 작아진다. 이는 전극의 마모에 의해 발생되는데 전극마모율은 보상이 가능하다.
- 제안된 두 가지의 프로세스를 적절히 이용한다면 장방향 마이크로 구조물을 효과적으로 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

6. Kim, S. H., Lim, H. S., Jang J. E. and Kim, D. H., "Machining Characteristics of EDM Milling for High Ratio Slot," Proceedings of KSPE conference, pp. 286-287, 2010.

후 기

이 논문은 2009학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2009AA165)

참고문헌

1. Lim, H. S., Kumar, A. S. and Rahman, M., "Improvement of form accuracy in hybrid machining of microstructures," J. of electronic materials, Vol. 31, No. 10, pp. 1032-1038, 2002.
2. Matsui, S., Kaito, T., Fujita, J., Ishida, M. and Ochiai, Y., "Three dimensional nanostructure fabrication by focused ion beam chemical vapor deposition," J. of JSPE, Vol. 67, pp. 1412-1415, 2001.
3. Masuzawa, T., Kuo, C. L. and Fujino, M., "Drilling of deep micro-holes by EDM," Annals of CIRP, Vol. 38, pp. 195-198, 1989.
4. Masuzawa, T., Kuo, C. L. and Fujino, M., "A combined electrical machining process for micronozzle fabrication," Annals of CIRP, Vol.43, pp. 189-192, 1994.
5. Kim, S. H., Chung, D. K., Kim, B. H., Oh, K. H., Jeong, S. H. and Chu, C. N., "Micromachining Using Hybrid of Laser Beam and Electrical Discharge Machining," J. of KSPE, Vol. 26, pp. 108-115, 2009.