

미세 펄스 전압을 이용한 마이크로 전해가공에 관한 연구

조창래*, 백승엽+, 이은상**

A study of electrochemical micromachining with voltage pulses

Chang-rae Cho*, Seung-yup Baek+, Eun-sang Lee**

Abstract

Electrochemical micromachining which is not normally considered as a precision process is presented in this paper. The application of voltage pulses between a tool electrode and a workpiece in an electrochemical environment allows the three-dimensional machining of conducting materials with micrometer precision. In this paper tool-electrodes(5 μ m in diameter, 1mm in length) are developed by electrochemical micromachining and micro holes are manufactured using this tool-electrodes we developed already. Micro holes are achieved the accuracy below 50 μ m in diameter using ultrashort voltage pulses(0.1-5 μ s).

Key Words : Electrochemical Micro-Machining(EMM,마이크로 전해가공), Ultrashort voltage pulse(미세 펄스 전압), Tool-electrode(공구 전극)

1. 서론

산업 기술이 발전함에 따라 고정밀의 부품 가공을 위한 미세 가공이 대두되고 있다. 부품의 소형화, 정밀화로 인하여 미세 가공법에 대한 관심이 높아지고 있으며 종래의 기계적 가공과는 다른 새로운 미세 가공기술이 등장하고 있다. 미세 가공기술로서 반도체 공정에 사용되는 리소그래피(Lithography), 방전가공, 초음파가공 등이 있으며 전해가공 역시 미세 가공기술 중의 하나이다.

전해가공기술(Electrochemical machining, ECM)은

전기 화학 반응을 이용하여 기계적 가공효과를 일으키는 특수 가공기술이다.

공작물을 산화전극(양극)으로 하고 환원 전극(음극)과 함께 전해액 속에 넣어 통전하면 전기 화학 작용에 의하여 대전 부분이 전해되어 제거되는 원리이다. 전해가공기술은 반도체 검사 장비용 미세 탐침이나 마이크로 축, AFM(Atomic force microscope), STM(Scanning tunneling microscope) 등의 미세 탐침을 제작하는데 많이 이용되어 왔다⁽¹⁾⁻⁽³⁾.

또한 최근에는 미세 탐침 제작뿐 아니라 마이크로 전

* 주저자, 인하대학교 대학원 기계공학과 (ccr0059@msn.com)
주소: 402-751인천시 남구 용현동 253
+ 인하대 기계공학과 대학원 기계공학과
++ 인하대 기계공학부

해가공법(Electrochemical micromachining)을 이용하여 서브미크론 단위의 형상을 가공하였다⁽⁴⁾. 마이크로 전해가공법이란 기존의 전해가공 기술을 응용한 가공법으로 전해가공의 본질적인 용도인 절단, 디버링, 편칭, 형조각 등의 벌크형 가공을 탈피하여 미세 형상의 가공을 달성하는 기술이다. 일반적인 전해 가공은 항공우주분야 및 터빈 블레이드, 로켓 엔진 부품에 사용되어 왔으나, 기술이 점점 발달해가면서 초미세 부품들이 요구되고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해서 최근에는 미세 펄스 전기화학가공기술을 이용하여 초미세 부품을 가공하는데 주로 사용되고 있다⁽⁵⁾. 또한 가공후의 표면 거칠기도 매우 중요한 변수이다. 표면 거칠기에 따라서 초정밀 가공품의 품질이 결정되기 때문이다.

미세 펄스 전기화학가공에서 직류전류보다는 펄스 전류를 공급함으로써 표면 거칠기가 향상되고, 동일한 전류효율의 조건에서는 펄스 주파수가 높을수록 상이한 전기조건에서는 전류효율이 높을수록 표면 거칠기가 향상되는 결과를 보고하였다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 전해에칭가공을 통하여 마이크로 탐침을 제작하고 제작한 마이크로 탐침을 이용하여 고주파 펄스 전원을 사용한 마이크로 전해가공기법을 통하여 미세 전해가공의 치수정밀도를 향상시키기 위한 실험 결과를 비교, 고찰한다.

2. 마이크로 탐침 제작

2.1 가공 원리

전해액에 담겨져 있는 두 전극에 전류를 흘려주면 양극에서는 금속이 전자를 잃으면서 금속이온의 형태로 변해 전해액으로 용해되는 산화 반응이 일어나고, 음극에서는 주변

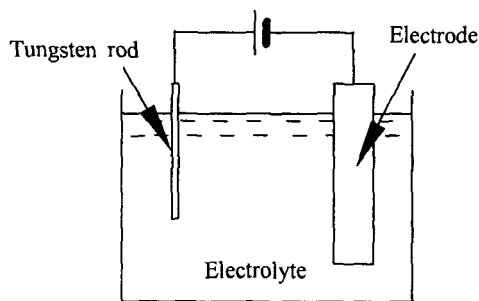
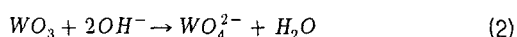
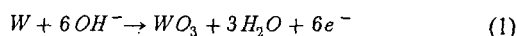


Fig. 1. Principle of electrochemical machining

의 이온이 전자를 얻어 원자나 분자 형태로 석출되는 환원 반응이 일어난다. 탐침 제작에 이용한 전해 에칭이라고도 불리는 전해가공법을 이용하여 마이크로 전해가공에 사용할 미세 전극을 제작하였다.

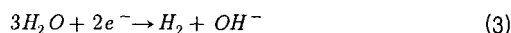
마이크로 전해 가공에서는 공구의 크기나 형상이 가공물에 전사되므로 전해 가공에 앞서 공구로 쓰일 전극을 먼저 제작하였다. Fig. 1은 탐침 제작 장치의 개략도이다. 펄스 전압을 이용하여 양극과 음극에 전원을 공급하고, 공작물은 직경 100 μ m의 텅스텐 봉을 사용하였으며 환원 전극은 백금 전극을 사용하였다. 텅스텐 가공의 전해액은 NaOH 수용액을 사용하였다.

텅스텐이 가공되는 반응식을 보면 텅스텐이 연결되어 있는 양극에서는 다음의 식과 같은 화학반응을 거쳐 텅스텐이 용해된다.



식(1)은 텅스텐 표면의 원자들이 주위의 수산화 이온들과 반응하여 텅스텐 산화물로 바뀌는 과정이고, 식(2)는 텅스텐 산화물이 다시 주변의 수산화 이온과 반응하여 이온으로 변하여 전해액으로 용해되는 과정이다.

음극인 백금전극에서는 다음과 같은 반응이 일어난다.



백금은 반응에 전혀 참여하지 않으며 물분자가 수소이온과 수산화 이온으로 분해 되면서 수소 이온들이 전자를 얻어 수소기체로 되는 반응이 일어난다. 생성된 수소기체들은 기포를 형성하며 음극 표면을 따라 올라오게 된다.

2.2 마이크로 탐침 가공

본 연구에서는 텅스텐의 전해에칭에 앞서 텅스텐 표면의 피막을 제거하기 위하여 30%의 황산 수용액에서 20초간 4V의 전압을 인가하여 전해 에칭을 위한 전가공을 하였다. 피막이 있는 텅스텐은 전해작용이 거의 발생하지 않았으며 피막을 제거한 후에는 전해가공을 할 수 있었다.

전해에칭에서 높은 전류밀도는 금속이 용해되는 속도가 금속이온이 떨어져 나가는 속도보다 크게 되어 텅스텐 주위에 확산층(Diffusion layer, DL)이 형성된다. 이 확산층 두께가 두꺼워질수록 이온의 이동속도가 떨어지며 금속이 용

해되는 속도가 더디게 된다. 확산층은 텅스텐의 아래 부분으로 갈수록 두께가 두꺼워진다. 이러한 원리를 이용하면 날카로운 탐침의 반대 형상을 얻을 수도 있다. 반대로 낮은 전류 밀도에서는 끝단 표면에서의 산화물 생성을 더디게 하여 서브미크론 단위의 끝단 반경을 갖는 날카로운 탐침도 제작할 수 있다.

탐침 제작의 실험 조건은 Table 1에 나타내었다. 펄스 전압을 인가하였으며 주파수와 펄스 간격은 일정하게 하고 전압을 변화해 가며 탐침을 제작하고 형상을 비교하였다.

Table 1 Experimental setup

Voltage	0.8 V ~ 4V
Frequency	1 kHz
Electrode(cathode)	Pt
Workpiece(anode)	Tungsten rod
On/Off duty	50 %
Length	1 mm
Electrolyte	2M NaOH

2.3 실험 결과

전해에칭을 이용하여 미세 탐침을 제작한 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2는 전해에칭으로 제작한 미세 탐침과 머리카락과 비교한 것으로 직경 10 μ m 이하의 탐침을 제작하였다. 제작한 마이크로 전극 가공의 예는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 (a)는 나노 크기의 반경을 갖는 탐침의 끝단 사진이다. 작은 전압을 인가하여 낮은 전류밀도에서 가공을 한 것이다. (b)는 2단계의 다른 가공 조건에서 가공을 하였다. 처음 단계에서는 4V의 높은 전압을 인가하여 역테이퍼 형상을 얻을 수 있었으며 그 다음 0.8V의 낮은 전압을 인가하여 끝이 날카로운 형상을 제작하였다. (c)는 1.5V의 전압에서 1mm 길이의 일정한 직경을 가진 탐침을 제작하였다.

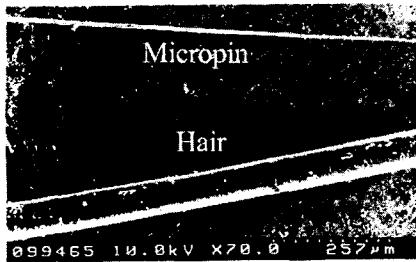
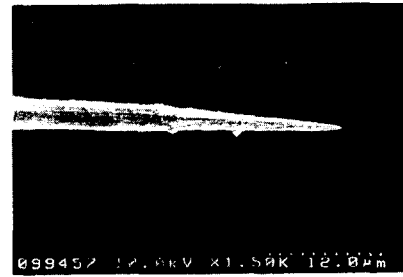
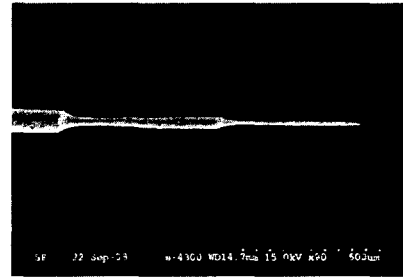


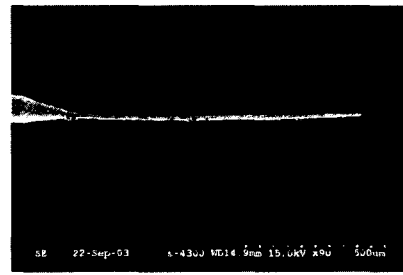
Fig. 2 Comparison of micro-pin with hair



(a) Tip of micro-pin



(b) Double step micro-pin



(c) straight micro-pin

Fig. 3 Examples of micro-pin

3. 마이크로 전해 가공

3.1 Electrochemical Micro-Machining(EMM)의 원리

공작물에는 양극의 전류를 인가하는 동시에 음극인 전극을 공작물에 이동시키면서 동시에 전해액을 공구와 공작물 사이로 주입시켜주면 전기 화학적으로 반응을 일으켜서 가공물 표면으로부터 금속이 석출되는 원리로서 전극에 새겨져 있는 특정한 형상이 공작물에 전사되고 미세한 구멍을 가공할 수 있는 비접촉식 가공법이다. 미세 전해 가공에서 가공에 영향을 미치는 인자들이 많은데, 특히 전류 밀도와 전극과 공작물의 간극이 매우 중요하다. 그 단편적인 예를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 공구인 전극과 공작물 사이이 작

은 간극 때문에, 간극 사이의 전류 밀도가 주위의 전류 밀도보다 더 높아진다. 따라서 공작물은 간극 사이의 영역에서 우선적으로 석출이 된다. 간극의 폭이 감소하면 전류 밀도 분포는 불규칙하게 증가하고, 이로 인해 석출 가공부의 부하가 증가하면서 가공이 일어나기 시작한다.

전해가공기술을 이용하여 경면을 달성 시키고자 하는 연구에서 높은 전류 밀도에서는 가공 면이 경면에 가까운 결과를 나타내었으며 낮은 전류 밀도에서는 표면에 검은 부식층이 잔재하는 결과를 초래하였다. 그러나 낮은 전류 밀도에서는 표면의 치수정확도가 현저히 증가하고, 또한 펄스 전압(Pulses voltage)을 이용하면 20 μ m 깊이 이하의 미세 그루브에서도 정밀한 치수조절이 가능하며 검은 부식층이 다소 제거되어 진다⁽⁷⁾. 즉 펄스 전해가공기술을 적용하면 정밀한 표면 치수 제어와 부식층의 제거가 동시에 이루어져 효율성이 증대하고 정밀도가 증대함을 알 수 있다. 따라서 높은 정밀도의 마이크로 형상을 얻기 위해서는 초정밀 간극 제어 시스템과 초단파 펄스 전압을 사용이 필요하다.

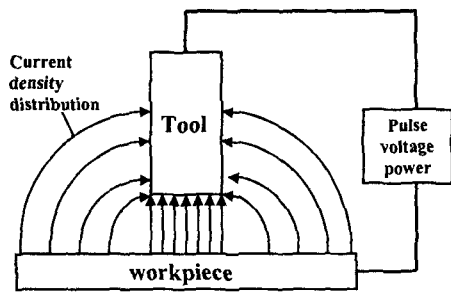


Fig. 4 Sketch of inhomogeneous current density distribution during EMM

3.2 실험 장치 및 방법

제작된 마이크로 탐침을 이용하여 미세 구멍이나 형상을 가공할 수 있는 미세 전해 가공 실험 장치의 기본 구조를 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 장비는 12.5 μ m 분해능을 가지는 마이크로 전극 이송 시스템으로 전극을 이송하였고 비전 시스템을 통해서 실시간으로 가공 상태를 확인하였다. 가공 중에 발생하는 신호들을 측정하기 위한 시스템과 미세 전해 가공을 하기 위한 펄스 전원 시스템, 화학적 반응을 일어나게 하는 전해액 공급 시스템으로 구성되었다. 먼저 미세 이송 시스템과 비전 시스템을 이용하여 전극과 공작물과의 간극을 100 μ m으로 고정시키고, 공작물과 전

극 사이에 0.5M의 HCl 수용액을 공급하였다. 앞서 가공한 텅스텐 전극과 공작물에 각각 (-), (+)전원을 인가하고 동시에 펄스 전원 컨트롤러를 통하여 펄스폭과 주파수를 조절함으로써 3차원 미세 구조물을 가공하였다.

Table 1에 미세 구조물을 가공할 때 사용되는 인가전압의 크기, 펄스 폭, 주파수, 전해액 등 대표적인 실험조건을 나타내고 있다.

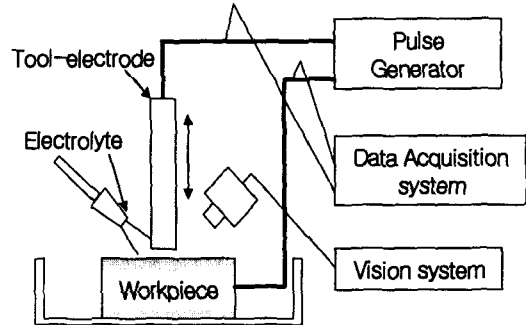


Fig. 5 Schematic diagram of electrochemical process

Table 1 Experimental condition

Applied voltage	1.5V ~ 3V
Applied frequency	10KkHz ~ 1MHz
Electrode(cathode)	Tungsten
Workpiece(anode)	STS420 Disc
Pulse duration	100ns ~ 5 μ s
Electrolyte	HCl (0.5M)

4. 결과 및 고찰

일반적으로 펄스 전원을 사용할 경우에는 각각의 가공 조건을 구분하기 위해 duty factor를 적용하는데 이는 다음과 같이 정의된다.

$$Duty\ factor = \frac{\tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (4)$$

그러나 펄스를 이용한 미세 전해 가공에서 있어서 duty

factor에 따라 가공 특성이 결정되는 것으로 인식될 수 있으나 실제 가공 시에는 duty factor를 가지는 전원조건인데도 불구하고 서로 다른 결과를 보임을 알 수 있다.

Fig. 6은 동일한 duty factor에 따라서 가공 깊이가 다르게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 33.3%의 동일한 duty factor를 가지지만 펄스 on, off time은 다르다. 즉, 펄스를 이용한 미세 전해 가공에 있어서 duty factor에 따라서 가공 깊이가 결정되는 것이 아니라, 펄스 on, off time에 의해서 가공 깊이가 달라지는 것을 알 수 있다. 따라서 펄스 전원을 적용한 미세 전해 가공에 있어서는 on-time의 증가에 따라 전해 용출량이 급격히 증가하므로 정밀한 제어를 위해서는 펄스 off-time의 수치를 적절히 조절하는 것이 효율적이며 초단 펄스 전압을 사용함으로써 가공부의 표면 거칠기와 정밀도가 높은 형상을 얻을 수 있다.

Fig. 7은 전압에 따라서 각기 다른 미세 구멍을 보여주고 있다. 본 연구에서 만들어진 마이크로 핀을 이용하여 조건을 달리하면서 미세 구멍을 가공하였다. 동일한 1 μ s의 펄스 지속 시간에서 전압이 증가할수록 가공 깊이가 커지는 것을 알 수 있다.

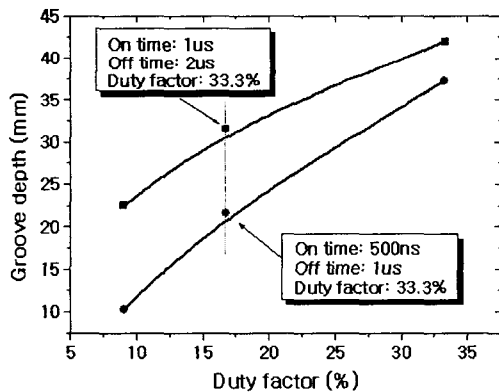
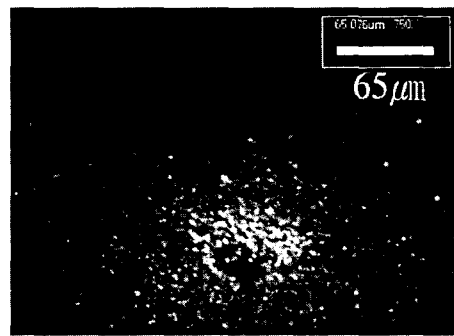


Fig. 6 Acomparison of groove depth for same duty factor but different pulse duration

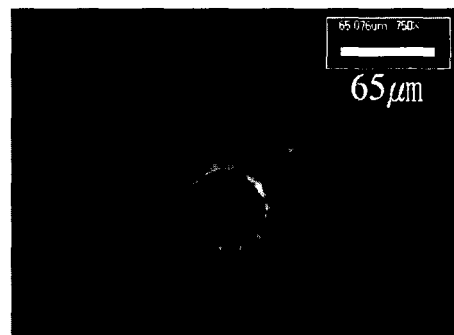


Fig. 7 Shapes according to different voltages

Fig. 8은 동일한 전기조건이더라도 펄스폭에 따라서 미세 구조물의 가공 정도에 많은 영향을 받음을 알 수 있다. Fig. 8의 (a)는 1.5V의 전압과 펄스 지속시간을 5 μ s를 인가했을 때 가공 표면의 형상을 보여주고 있다. 전극과 공작물과의 간극은 100 μ m이고, 0.5M HCl의 전해액을 사용하였다. 전극과 공작물 사이의 갭에 의해서 전류가 분산되고, 그 영향에 의해서 미세 구멍의 형상 정밀도가 나쁘게 나타났다. Fig. 8의 (b)는 1.5V의 전압과 펄스 지속시간을 100ns를 인가했을 때 가공 표면의 형상을 보여주고 있다. 마이크로 핀의 직경은 20 μ m이고, 공작물에 미세 구멍의 직경 크기는 약 40 μ m이다. 인가된 전압은 같지만 펄스 지속시간을 아주 미세하게 조절하여서 가공 형상 정밀도가 좋아진 결과를 얻었다. 따라서 마이크로 핀 전극에 전류 분산을 막고 정밀한 가공을 위하여 초단 펄스 전압을 조절함으로써 아주 좋은 가공 형상 정밀도를 얻을 수 있고, 미세 전해 가공에서 펄스 폭의 조절이 신중히 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다.



(a) 5 μ s pulse duration(applied 1.5V)



(b) 100 ns pulse duration(applied 1.5V)

Fig. 8 Photographs of micro hole in different pulse duration

5. 결론

본 연구에서는 전해 가공을 이용하여 미세 탐침과 마이크로 가공을 수행하였다. 텅스텐을 전해에칭하기 위해서 30%의 황산 수용액에서 전가공을 수행하여 텅스텐 표면의 피막을 제거하였다. 그리고 NaOH 전해액과 초단 펄스 전압 조절을 통해서 다양한 형상과 수 마이크로 크기의 탐침을 가공하였다. 본 연구에서 개발한 최소 탐침은 10 μm 이내의 직경을 가지며, 나노 크기의 끝단 반경을 가진다. 또한 본 연구에서 개발한 미세 탐침을 이용하여 마이크로 전해 가공을 수행하였다. 0.5M HCl 전해액을 사용하였고, 스테인리스 강판에 직경 40 μm 의 홈을 가공하였다. 향후에는 초단파 펄스 전압의 조절을 통해서 가공물의 표면 거칠기와 가공 형상 정밀도를 향상시키기 위한 연구가 필요하다.

참고 문헌

- (1) In, C. H., Kim, G. M., Chu, C. N., 2003, "Fabrication of Tungsten probe using Electrochemical Etching", *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 111 ~ 118.
- (2) Lim, Y. M., Lim, H. J., Kim, S. H., 2001, "Shape and Diameter Control of Microshafts in Electrochemical Process", *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 50 ~ 56.
- (3) Zhu, D., Xu, H. Y., 2002, "Improvement of electrochemical machining accuracy by using dual pole tool", *Journal of Materials Processing Technology*, 129, pp. 15 ~ 18.
- (4) Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P., Ertl, G., 2000, "Electrochemical Micromachining", *Science*, Vol. 289, pp. 98~101.
- (5) Chikamori, K., 1998, "Possibilities of Electrochemical Micromachining", *International Journal of JSPE*, Vol. 32, pp. 942 ~ 945.
- (6) Kim, D. H., Kang, J. H., Park, K. Y., 2000, "Relationship between Machining Characteristics & Current Efficiency in ElectroChemical Machining of Ni-Ti Shape Memory Alloy", *Preceedings of the KSMTE 2000 Fall Annual Meeting*, pp. 320 ~ 325.
- (7) Lee, E. S., Park, J. W., Moon, Y. H., 2003, "Machining of Micro Grooves using Hybrid Electrochemical Processes with Voltage pulses", *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 32 ~ 39.