

복합기능 전극을 이용한 미세 전해가공

신홍식* · 김보현† · 김규만** · 정도관* · 주종남*

(2008년 8월 21일 접수, 2009년 2월 11일 수정, 2009년 3월 4일 심사완료)

Micro Electrochemical Machining Using a Multi-Function Electrode

Hong Shik Shin, Bo Hyun Kim, Gyu Man Kim, Do Kwan Chung and Chong Nam Chu

Key Words : Micro Electrochemical Machining(미세 전해가공), Multi-Function Electrode(복합 기능 전극), MEMS(미세전자 기계 시스템)

Abstract

In micro electrochemical machining(micro-ECM), it is important to measure and control the potential of a tool electrode and a workpiece electrode because electrochemical reaction rate depends on the potential of the electrodes. When the electrode potential was measured against a reference electrode, the error of measured electrode potential could be minimized by proper tool electrode design. In this paper, multi-function electrodes consisting of a tool electrode and a reference electrode was fabricated by micro fabrication techniques. The machining conditions in micro-ECM using multi-function electrodes, such as pulse voltage parameters and electrode potential, were investigated.

1. 서론

최근 금속의 우수한 기계적 특성 때문에 초소형 기계, 금형, 의료 산업에서 금속의 미세 가공 수요가 급격히 증가하고 있다. 금속에 대한 미세형상 가공 기술로는 이온빔 가공, 레이저 가공, 미세 방전가공, 미세 전해가공 등이 존재한다. 이들 특수가공 기술 중에서도 특히 미세 전해가공은 공구 전극의 마모가 전혀 없고 가공된 공작물 표면에 버(burr)가 발생하지 않으며, 잔류응력 및 열변형층 등이 발생하지 않아 표면조도가 매우 우수한 장점이 있어 미세부품 제작에 유용하게 쓰일 수 있다.

직류전압을 이용한 전해가공은 미세 형상 가공이 어려웠으나 감광막(photoresist film)을 이용한 마이크로 패턴을 이용하는 방법과 초단 전압 펄스

(ultrashort voltage pulses)를 이용하는 방법 등을 통해 미세 형상 가공이 가능하게 되었다. Datta⁽¹⁾는 감광막 마스크를 이용한 전해에칭을 통해 잉크젯 미세노즐 형상을 제작하였으나 가공이 2 차원 형상으로 제한되어 3 차원 미세 형상을 얻는데 한계가 있다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 Shuster 등⁽²⁾은 수 μs 의 펄스 주기를 갖는 초단 전압펄스를 이용하였으며 가공 간극을 수 μm 이내로 제한하여 3 차원 형상의 미세 구조물을 가공할 수 있음을 보였다. 그 뒤로 스테인리스강(stainless steel)과 같은 난삭재에 미세 형상을 가공하는 연구가 성공적으로 수행된 바 있다.^(3,4)

초단 전압펄스 전해가공에서는 공작물 표면의 산화막(oxide film) 발생을 억제하고 공구전극(tool electrode, TE)이 용해되지 않도록 하기 위해 전압 펄스 휴지기(pulse off-time) 동안에도 각각의 전극에 특정 전위를 일정하게 유지해야 한다. 이를 위하여 일반적으로 일정전위기(potentiostat)를 사용한다.^(5,6) Fig. 1은 일정전위기를 이용하는 경우 기준전극(reference electrode, RE), 대전극(counter electrode, CE), 공작물(workpiece electrode, WE)로 이루어진 '3 전극

† 책임저자, 회원, 안동대학교 기계공학부
E-mail : kimbh@andong.ac.kr
TEL : (054)820-6301 FAX : (054)820-6127

* 서울대학교 기계항공공학부

** 경북대학교 기계공학부

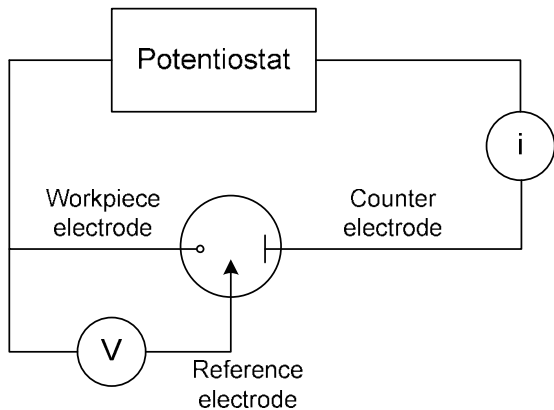


Fig. 1 Three electrode cell for micro electrochemical machining⁽⁶⁾

전해셀(three electrode electrochemical cell)’을 나타낸 것이다.⁽⁶⁾ 이때 공작물의 전위는 기준전극으로부터 측정되며 기준전극과 공작물 사이의 거리가 멀수록 전해수조 내의 용액 저항이 커져 전압강하가 발생한다. 전압강하는 실제 공작물의 전위와 측정된 전위 사이에 오차를 발생시므로 전위의 측정오차를 줄이기 위해서는 공작물과 기준전극 사이 거리를 최대한 근접시켜야 한다. 하지만 기존의 기준전극은 크기의 제약으로 인해 미소한 가공 영역에 위치시키는 것이 힘들었다. 따라서 보다 정밀하게 전위를 측정하기 위해 기준전극을 미세하게 제작하여 가공영역과 공작물에 근접하게 위치할 수 있도록 해야 한다.

미세 전해가공에서는 공작물과 공구전극 사이에 수 μm 이내의 가공 간극을 유지하며 가공을 진행한다. 그러므로 기준전극과 공구전극의 기능을 동시에 가지고 있는 전극을 이용하면 가공 시 기준전극을 가공 영역에 가깝게 위치시킬 수 있어 공작물 및 공구전극의 전위를 정밀하게 측정하여 전해가공을 안정적으로 수행할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 MEMS 공정 및 전주도금 공정을 복합적으로 적용하여 가공용 공구전극과 전극 전위 측정의 기준이 되는 기준전극을 동시에 내장하고 있는 다기능 미세 전극을 제작하였으며 이를 ‘복합기능 전극’이라 하였다. Fig. 2 에 복합기능 전극의 개략도를 나타내었다.

한편, 복합기능 전극을 이용한 미세 전해가공에서 안정적인 가공을 위하여 전극 전위, 전압펄스 조건 등의 가공조건을 선정하였다. 또한 제작된 복합기능 전극을 공구 전극 및 기준 전극으로 사용하여 미세 전해가공을 수행하였다.

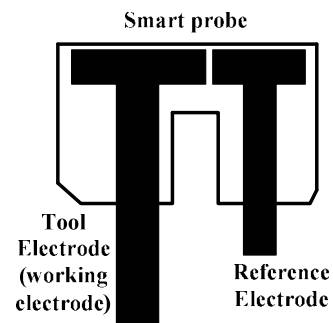


Fig. 2 Schematic diagram of multi-function electrode

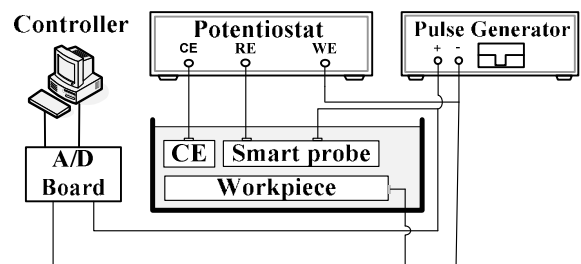


Fig. 3 Experimental system for micro electrochemical machining

2. 실험 장치

2.1 실험 장치

미세 전해가공 시스템은 Fig. 3 과 같다. 전극의 이송을 위해 $0.1 \mu\text{m}$ 의 분해능을 갖는 3 축 스테이지를 이용하였다. Z 축 스테이지를 이용하여 복합기능 전극을 정밀 이송하고, 공작물은 X-Y 축 스테이지를 이용해 이송하였다. 펄스 발생기를 사용하여 초단 전압펄스를 인가하였고, 전압펄스 및 전류의 파형은 오실로스코프를 이용하여 모니터링 하였다. 가공하는 동안 일정전위기를 사용하여 공작물 및 공구전극 전위를 유지하였다.

전해수조 내의 기준전극(RE)은 복합기능 전극전극 내의 니켈 전극을 사용하고, 대전극(CE)은 백금선을 사용하였다. 전해액으로는 0.1 M 황산 용액을 사용하였다. 공작물은 스테인레스강(304 STS)을 사용하였다.

2.2 복합기능 전극의 제작

미세 전해가공은 공구전극과 공작물 사이에 매우 작은 가공 간극을 유지하며 가공이 진행되고 공구전극의 형상이 공작물에 그대로 전사되기 때문에 미세형상 가공 시 그 크기에 적합한 미세 공

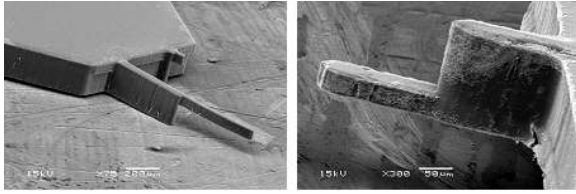


Fig. 4 Multi-function electrode for micro electro-chemical machining by MEMS process

구전극의 제작은 필수이다. 이러한 미세전극을 직접 제작할 수 있는 기술로는 미세 방전가공 및 전해에칭, MEMS 관련 공정, 전주도금(electroforming) 등이 있다. 미세 방전가공과 전해에칭의 경우 복잡한 형상의 공구전극 제작에는 한계가 있다. 그러나 MEMS 공정 및 전주도금 기술을 복합적으로 적용하면, 다양한 형상 및 크기의 전극을 제작할 수 있다.

실험 초기에는 MEMS 공정만을 통해 폴리머(polymer) 계열의 비전도성 재질인 SU-8 을 이용하여 복합기능 전극 형상을 Fig. 4 와 같이 제작하였다. 전해가공을 위해서 전극은 전도성을 가지고 있어야 하므로 복합기능 전극 표면 위에 전기화학적으로 안정한 백금(platinum)을 증착하였다. Fig. 5 는 백금으로 증착된 복합기능 전극을 이용한 미세 전해가공을 통해 가공된, 폭 10 μm , 높이 20 μm 의 미세 벽 형상이다. 그러나 백금이 증착된 복합기능 전극을 사용할 경우 증착 시킬 수 있는 백금의 두께에 한계가 있었다. 전극에 코팅된 백금의 두께가 약 1 μm 내외로 매우 얇기 때문에 가공 시 일어나는 단락(electric circuit) 및 공작물과의 물리적 접촉 등에 의해 백금이 복합기능 전극 표면으로부터 벗겨지게 되어 지속적인 전해가공이 불가능하였다.

전극 표면에 증착된 백금이 벗겨지는 문제점을 해결하기 위해서 MEMS 공정과 전주도금 기술을 조합하여 니켈로 이루어진 복합기능 전극을 Fig. 6(a)와 같이 제작하였다. Fig. 6(b)는 복합기능 전극에서 실제 가공에 쓰이는 공구전극과 기준전극 부분만을 확대한 사진이다. Fig. 6(b)에서 보이는 바와 같이 복합기능 전극은 2 개의 니켈 전극으로 구성 되어 있다. 긴 니켈 전극은 공구전극으로 사용되며 짧은 니켈 전극은 기준전극으로 사용된다. 이 복합기능 전극은 전극 자체가 니켈 금속으로 이루어져 있으므로 전해가공 시 전도성 물질이 벗겨지는 경우가 없어 안정적인 가공을 진행할 수 있다. 따라서 백금을 증착시킨 프로브 전극보다 니켈을 전주도금한 복합기능 전극이 미세 전해가공에 더 적합하다는 것을 확인하였다.

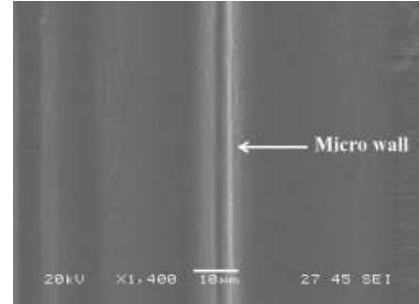


Fig. 5 Micro wall using platinum coated probe (applied voltage: 6.5 V, pulse period: 1 μs , pulse on-time: 120 ns, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4)

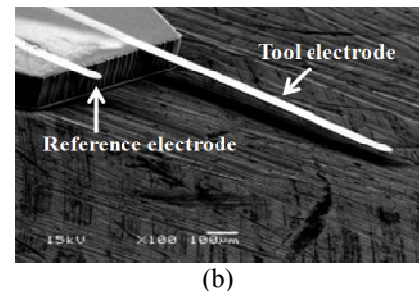
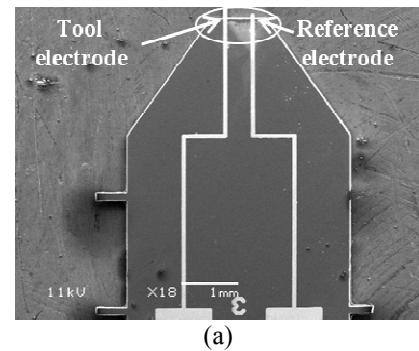


Fig. 6 Multi-function electrode for micro electro-chemical machining by MEMS and electro-forming process

3. 가공조건의 선정

미세 전해가공에서는 안정적인 가공을 위하여 공작물과 공구전극의 전위를 선정하여야 한다.⁽⁵⁾ 일반적으로 금속의 전위에 따라 전류의 크기를 측정하면 양전위로 갈수록 전류밀도가 증가하는 전위(active potential)가 나타나고, 이 전위를 지나면 전류밀도가 감소하여 실제적으로 전류밀도가 수 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 인 부동화 전위(passivating potential)에 도달한다.^(5,7) 이때 금속 표면에 부동화막(passive film)이 생성되며, 전위를 더욱 증가 시키면 부동화막이 파괴되고 다시 전류밀도가 증가하는 과부동화 전위(transpassive potential)가 나타난다.⁽⁷⁾ 공작물과 공구전극의 전위는 이러한 특성을 고려해 선정한다.

3.1 전극 전위의 선정

전해수조 내에서 전위를 측정하려면 전위 측정의 기준이 되는 기준전극이 필요하다. 가공하는 동안 기준전극의 전위는 안정적으로 일정한 전위를 유지하여야 한다. 일반적으로 사용되는 기준전극으로는 전기화학적으로 안정한 백금전극 혹은 염화제일수은(Hg_2Cl_2), 염화칼륨(KCl), 수은(Hg)으로 구성된 칼로멜 전극(calomel electrode) 등이 있다. 그러나 복합기능 전극에서 기준전극은 니켈로 구성되어 있으므로 전해가공이 진행되는 동안 니켈 기준 전극의 전위가 일정하게 유지되는지 검증해야 한다. 이를 위해 미세 전해가공을 수행하는 동안 복합기능 전극 내의 니켈 기준전극이 전기화학적으로 반응하지 않고, 전위가 일정하게 유지되는지 전압 및 전류 파형을 관측한 결과 가공 시작 전과 후 파형의 변화는 없었으며, 기준전극의 전위도 변함없이 유지하였다.

한편, 공구전극의 전위를 선정하기 위해서는 금속에 대한 분극곡선을 분석하여야 한다. 분극곡선은 열린 회로전위(open circuit potential)로부터 측정하였으며 양전위 방향으로 10 mV/s의 속도로 전위 변화를 주며 전류값을 측정하였다. Fig. 7(a)는 복합기능 전극 니켈 기준전극에 대한 복합기능 전극 니켈 공구전극의 분극곡선으로 전위에 따라 전류가 급격히 감소하는 부동화 전위는 약 +0.5 V_{Ni} 이다. 공구전극 전위는 공구 전극 표면 전체에서 산화가 일어나는 것을 피하도록 선정하여야 한다.⁽⁶⁾ 그러므로 복합기능 전극의 니켈 공구전극 전위는 Fig. 7(a)에 나타나는 바와 같이 활성화 영역이 끝나고 부동화 영역이 시작되는 부근의 영역인 +0.5 V_{Ni} 로 내외로 선정하였다.

공구전극인 니켈과 마찬가지로 공작물에 대해서도 스테인리스강의 분극곡선을 분석하였다. Fig. 7(b)는 복합기능 전극 니켈 기준전극에 대한 스테인리스강의 분극곡선으로 측정된 전위의 영역 내에서는 활성화 영역은 보이지 않고 전류밀도 값이 매우 낮은 부동화 영역과 과부동화 영역만이 관측된다. 과부동화 전위는 약 +1.2 V_{Ni} 이다. 공작물의 전위는 부동화 영역이 끝나고 과부동화영역이 시작되는 부근의 전위로 선정한다.⁽⁶⁾ 그 이유는 스테인리스강의 경우 두꺼운 산화막이 형성되는 전위에서는 가공이 불가능하고 또한 너무 높은 전위에서는 시편 전체에서 반응이 일어나 국부적인 가공이 불가능하기 때문이다. 그러므로 이를 고려하여 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 공작물의 전위는 +1.2 V_{Ni} 로 선정하였다.

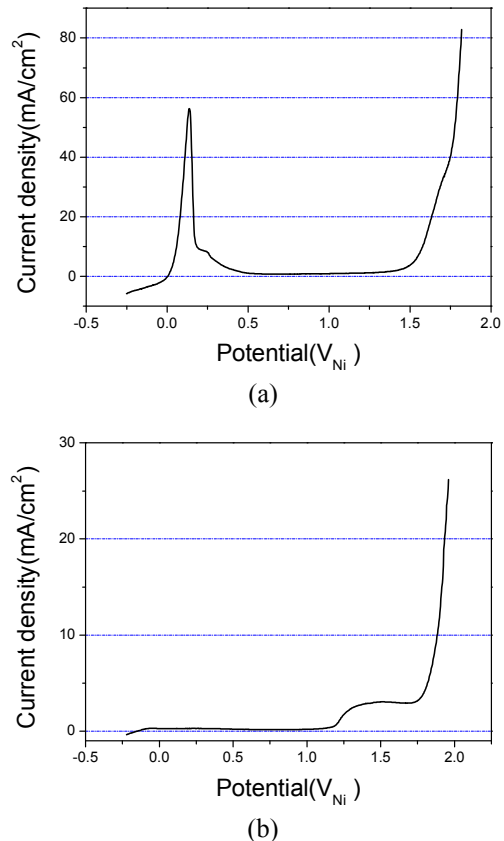


Fig. 7 Polarization curve (Electrolyte: 0.1 M H_2SO_4 , Scan rate: 10 mV/s) (a) RE: Ni, TE: Ni, (b) RE: Ni, WE: stainless steel

3.2 펄스 조건의 선정

전해가공에선 가공하는 동안 초단 전압펄스의 조건에 따라서 공구 전극과 공작물 사이에 가공 간극(machining gap)이 결정된다. 스테인리스강을 0.1 M 황산에서 가공하는 경우 일반적으로 공구전극과 공작물 사이에는 수 μm 의 가공 간극이 발생한다. 가공 간극은 일반적으로 인가 전압의 진폭이 클수록, 펄스 온-타임(pulse on-time)이 클수록 가공 간극이 증가한다.⁽⁸⁾ 복합기능 전극을 이용하는 경우 펄스 온-타임이 30 ns 이하, 인가전압이 5.5 V 이하에서는 공구전극의 이송속도보다 가공되는 속도가 느리게 되어 단락이 자주 일어난다. 가공하는 동안 단락이 많이 발생하게 되면 복합기능 전극이 손상되기 때문에 안정적인 가공을 할 수 없게 된다. 또한 펄스 온-타임이 150 ns 이상, 인가전압의 진폭이 7 V 이상인 경우는 가공 간극이 크게 늘어난다. 이를 고려하여 펄스 주기 1 μs , 펄스 온-타임 60 ~ 150 ns, 전압 진폭 6.5 V 내외로 전압 펄스 조건을 선정하여 실험을 수행하였다.

4. 실험 방법 및 결과

4.1 실험 방법

복합기능 전극을 이용한 실험은 Fig. 8 과 같이 2 가지 방법으로 수행하였다. 하나는 Fig. 8(a)에서 보여지는 바와 같이 직접 복합기능 전극을 가공물인 스테인리스강에 접근시켜 전해 반응을 일으켜 미세 형상을 가공하는 방법이다. 그러나 미세 전해가공에서는 가공 간극이 수 μm 이므로 10 μm 이내의 형상 가공이 쉽지 않다. 이러한 단점을 보완하고 더 작은 미세 형상을 얻기 위해 Fig. 8(b)와 같이 포토리소그래피 공정을 통해 공작물에 10 μm 이하의 미세 패턴 형상을 갖도록 감광막(photoresist film, PR)을 공작물 위에 도포한다. 공작물 위에 약 5 μm 의 간격을 두고 복합기능 전극을 위치시켜 초단 전압펄스 전압을 인가하였다. 이 방법의 경우 도포된 미세패턴을 갖는 공작물은 감광막에 의해 보호되지 않고 노출된 부위만 전기화학 반응에 의해 선택적으로 제거되므로 가공 전 패턴의 크기와 수 마이크로미터 이내의 차이를 갖는 10 μm 이하의 형상을 얻을 수 있다.

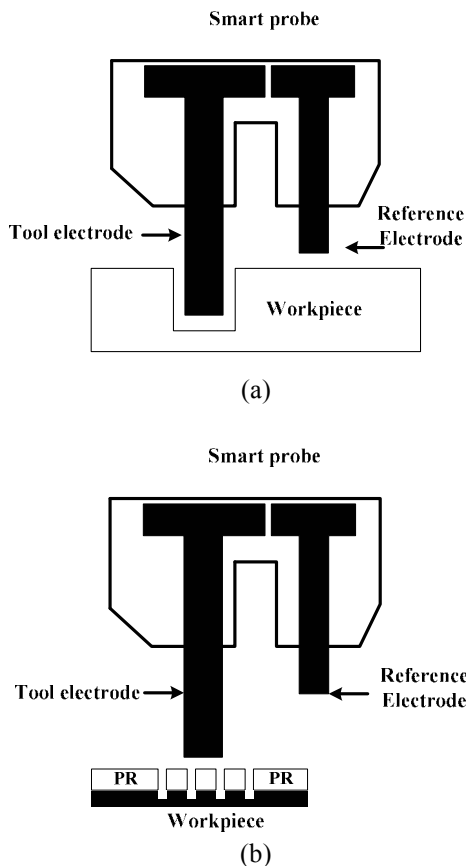


Fig. 8 Electrochemical machining using multi-function electrodes

4.2 실험 결과

Fig. 8(a)의 실험 방법으로 복합기능 전극을 공구 전극으로 이용하고 복합기능 전극을 직접 공작물에 접근시켜 왕복 이송하며 미세 전해가공을 수행하였다. 그 결과 Fig. 9 에서 보여지는 바와 같이 스테인리스강에 미세 홈(micro groove)을 가공하였다. 가공된 미세 홈의 폭은 약 80 μm 내외이다.

한편, Fig. 8(b)의 방법을 통한 전해가공을 수행하여 10 μm 이내의 형상을 가공하였다. Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)는 각각 304 스테인리스강 위에 미세 홈과 원형상의 패턴을 갖도록 감광막을 약 1 μm 두께로 도포한 것으로 가공 전의 사진이다. Fig. 11 과 Fig. 12 는 실제 Fig. 8(b)의 실험 방법을 통해 얻은 가공 후의 미세 홈과 원형 형상 사진이다. Fig. 11 에 보이는 바와 같이 가공된 미세 홈의 폭은 약 10 μm 내외이다. Fig. 12(a)는 지름이 약 10 μm 내외인 원형 형상이며, Fig. 12(b)는 지름이 약 5 μm 내외인 원형 형상이다.

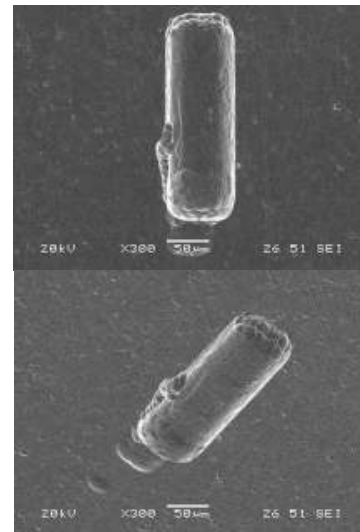


Fig. 9 Micro groove machining using multi-function electrode ($\Phi_{\text{work}} = 0.5 \text{ V}_{\text{Ni}}$, $\Phi_{\text{tool}} = 1.2 \text{ V}_{\text{Ni}}$, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 1 μs , pulse on-time: 80 ns, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4)

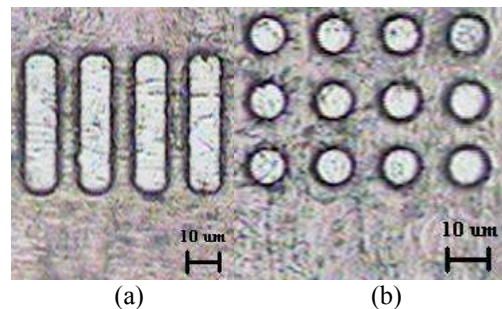


Fig. 10 Photoresist patterns on 304 stainless steel

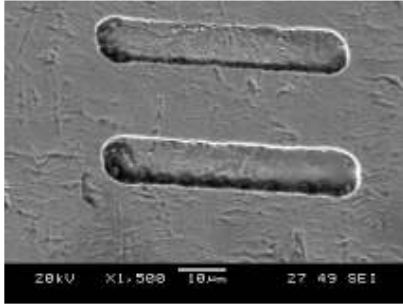
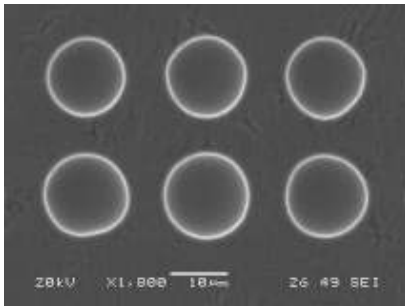
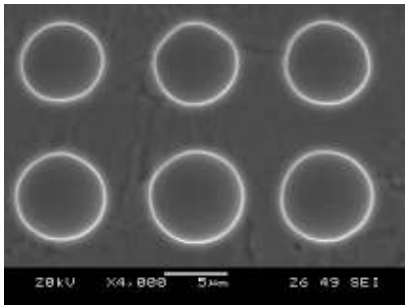


Fig. 11 Micro groove using multi-function electrode ($\Phi_{\text{work}} = 0.5 \text{ V}_{\text{Ni}}$, $\Phi_{\text{tool}} = 1.2 \text{ V}_{\text{Ni}}$, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 1 μs , pulse on-time: 80 ns, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4)



(a)



(b)

Fig. 12 Micro blind hole shape array using multi-function electrode ($\Phi_{\text{work}} = 0.5 \text{ V}_{\text{Ni}}$, $\Phi_{\text{tool}} = 1.2 \text{ V}_{\text{Ni}}$, applied voltage: 6.5 V, pulse period: 1 μs , pulse on-time: 80 ns, electrolyte: 0.1 M H_2SO_4) (a) Diameter: 10 μm (b) Diameter: 5 μm

5. 결론

미세 전해가공은 공구전극과 공작물 사이에 미세한 가공 간극을 유지하고 가공이 진행되며, 또한 공구전극의 형상이 그대로 공작물에 전사되기 때문에 미세한 형상 가공을 위해서는 미세한 크기를 갖는 공구전극이 필요하다.

기존 미세 공구전극 제작 방법의 경우는 다양한 크기와 형상을 갖는 공구 전극을 제작하는데 한계가 있었다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 MEMS 및 전주도금 공정 기술을 적용

하여 기준전극 및 공구전극을 동시에 갖는 복합기능 전극을 직접 제작하였다. 복합기능 전극은 기준전극과 공구전극의 역할을 하는 2 개의 니켈 전극으로 이루어져 있으므로 미세 전해가공 시 전위 측정 오차를 줄여 미세 전해가공을 안정적으로 수행 할 수 있음을 확인하였다.

복합기능 전극을 이용한 미세 전해가공에서 선정된 가공 조건을 바탕으로 미세홈을 가공하였다. 또한, 미세한 형상의 가공을 위한 다른 방법으로 감광막을 도포한 공작물과 복합기능 전극을 이용한 초단 전압펄스 전해가공을 통해 10 μm 폭을 갖는 미세홈 및 지름 5 ~ 10 μm 내외의 원 형상을 가공할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006 년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-311-D00020)

참고문헌

- (1) Datta, M., and Landolt, D., 2000, "Fundamental Aspects and Applications of Electrochemical Micro Fabrication," *Electrochimica Acta*, Vol. 45, pp. 2535~2558.
- (2) Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P., and Ertl, G., 2000, "Electrochemical Micromachining," *Science*, Vol. 289, pp. 98~101.
- (3) Kirchner, V., Cagnon, L., Schuster, R., and Gerhard, E., 2001, "Electrochemical Machining of Stainless Steel Microelements with Ultrashort Voltage Pulses," *Applied Physics Letters*, Vol. 79, No. 11, pp. 1721~1723.
- (4) Kim, B. H., Lee, Y. S., Choi, D. K., and Chu, C. N., 2005, "Taper Reduction in Micro Electrochemical Milling Using Disk Type Electrode," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 4, pp. 167~172.
- (5) Park, B. J., 2006, "Effects of Tool Electrode Size on Micro Electrochemical Machining Using Ultra Short Pulses," PhD Dissertation Seoul National University.
- (6) Bard, J. and Faulkner, Larry R., 2001, "Electrochemical Methods Fundamentals and Applications," John Wiley & Sons, INC.
- (7) Paik, W. K. and Park, S. M., 2001, "Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes," Cheongmoongak, Seoul.
- (8) Kim, B. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., 2005, "Micro Electrochemical Milling," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 124~129.