

초단펄스 응용 전해증착에 의한 마이크로 구조물 제작

박정우*, 류시형#, 주종남**

Microfabrication by Localized Electrochemical Deposition Using Ultra Short Pulses

Jung Woo Park*, Shi Hyoung Ryu# and Chong Nam Chu**

ABSTRACT

In this research, microfabrication technique using localized electrochemical deposition (LECD) with ultra short pulses is presented. Electric field is localized near the tool tip end region by applying a few hundreds of nano second pulses. Pt-Ir tip is used as a counter electrode and copper is deposited on the copper substrate in 0.5 M CuSO₄ and 0.5 M H₂SO₄ electrolyte. The effectiveness of this technique is verified by comparison with LECD using DC voltage. The deposition characteristics such as size, shape, surface, and structural density according to applied voltage and pulse duration are investigated. The proper condition is selected from the results of the experiments. Micro columns less than 10 μm in diameter are fabricated using this technique. The real 3D micro structures such as micro pattern and micro spring can be fabricated by this method. It is suggested that presented method can be used as an easy and inexpensive method for fabrication of microstructure with complex shape.

Key Words: Electrochemical deposition (전해증착), Ultra short pulses (초단펄스), Microfabrication (미세구조물 제작), Micro column (미세기둥), Micro spring (미세스프링), Micro patterning (미세패터닝)

1. 서론

마이크로/나노 기술이 21 세기 핵심 전략 기술로 인식되면서, 미세 구조물의 제작 기술 개발에 관한 연구들이 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 현재 미세 구조물의 제작 기술로서 가장 보편화 되어 있는 것은 리소그래피에 기반한 반도체 공정 응용 기술이다. 이 기술은 미세 형상의 대량 제작에 큰 이점이 있는 반면, 가공 형상이 근본적

으로 이차원으로 제한되고 실리콘 등 재료에 한계를 지니며 고가의 장비와 설비를 필요로 하는 등 문제점을 지니고 있다. 이 외에도 미세 엔드 밀링, 미세 드릴링을 이용한 미세 가공 기술이 연구되고 있으나 버의 발생, 공구의 마모 및 파괴 등의 문제가 해결되지 못하고 있다. 특수 가공을 응용한 미세 가공 기술로는 미세 방전 가공, 미세 초음파 가공, 레이저 빔 가공, 이온 빔 가공 등을 들 수 있다. 방전 가공은 전극이 마모되는 단점이 있고

접수일: 2004 년 4 월 20 일; 게재승인일: 2004 년 8 월 13 일

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

교신저자, 전북대학교 기계항공시스템공학부

** Email ryu5449@chonbuk.ac.kr Tel. (063) 270-2325

서울대학교 기계항공공학부

초음파 가공은 삼차원 금속 구조물 제작에 어려움이 있으며 레이저 빔 가공은 공작물에 열 변질층의 발생 및 정밀 형상 제어에 한계를 지닌다. 이온 빔 공정 및 AFM/STM 응용 기술은 극미세 구조물을 제조하는데 유리하나 제작 시간이 많이 소요되는 단점을 가지고 있다.

전해 공정은 금속의 부식 및 도금에 관한 기술로서 그 기원은 매우 오래되었다. 이 공정은 20 세기에 복잡한 형상의 금형을 가공하는 전해 가공 기술과 전해 연삭, 전기 도금 기술로 발전되었다. 1980 년대에 Bard 는 전해액 속에서 미세 탐침과 대상을 근접시킨 후 전압을 인가하여 양단 전극 사이의 전기적 신호로부터 대상물의 미세 구조를 관찰할 수 있는 SECM (scanning electrochemical microscopy) 방법을 제안하였다.¹

본 논문에서는 SECM 을 응용하여, 미세 탐침으로 금속 기판에 미세 구조물을 전해증착 방법으로 제작하는 연구를 수행하였다. 전해증착은 미세 탐침의 이송을 통하여 용이하게 삼차원 금속 구조물을 제작할 수 있으며 제작 시간과 비용면에서 여타 공정에 비해 월등한 장점을 가지고 있다. 또한 금속, 전도성 폴리머, 반도체 등 다양한 재료를 증착시킬 수 있어 다양한 분야에 응용 가능하다. 향후 미세 시스템이 일반화되어 다품종 소량의 미세 부품에 대한 수요가 급증할 경우 전해증착을 통한 미세 구조물 제작 방법의 효용성은 매우 커질 것으로 예상된다. 미세 탐침을 이용한 전해증착이 1995 년에 소개된 이래로 인가 전압, 전해액의 종류와 농도에 따른 증착물의 구조 및 특성 등에 대한 연구가 진행되었다.² 기존의 전해증착에서는 세라믹이나 왁스 등으로 미세 탐침을 절연하고, 직류 전원을 인가하여 여러 가지의 삼차원 구조물을 제작하고자 하였다.²⁻⁶ 미세 기둥 증착에 관한 연구들이 많이 보고되었는데 각종 유기물을 첨가하여 증착된 구조물 표면의 거칠기를 향상시키거나, 기둥의 직경을 줄이려는 시도를 하였으며,³ 초음파를 부가하여 기둥 표면의 다공성 구조를 개선하기도 하였다.⁵ Yeo 는 미세 전극을 회전시키면 속이 비어 있는 형태의 기둥이 만들어진다는 것을 발견하였고, 이를 통해 전해증착으로 마이크로 파이프를 제작하였다.⁶ 최근에 Schuster 는 미세 탐침 전극을 이용한 전해가공에서 직류 전원 대신 초단펄스 전원을 이용하여 전해 영역을 국부화 함으로써, 전해가공에서 마이크로 이하의 형상

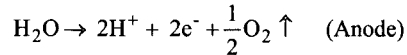
제어가 가능함을 보였으며 수 마이크로미터 크기의 금속 미세 물드를 제작하였다.⁷ Ahn 은 초단펄스 전해가공을 이용하여 스테인레스 스틸에 직경 8 μm 의 미세 구멍을 가공한 바 있다.⁸

본 논문에서는 이 초단펄스를 전해증착에 응용함으로써 미세 구조물의 크기, 형상, 구조, 표면 등에서 직류 전원을 사용하는 기존의 전해증착에 비해 특성이 우수한 삼차원 미세 금속 구조물을 제작하고자 하였다.

2. 초단펄스 응용 전해증착

2.1 전해증착의 원리

본 논문에서 사용한 미세 전극과 기판, 전해액을 기준으로 전해증착의 원리를 살펴보면 다음과 같다. 황산구리와 황산의 혼합수용액에서 백금-이리듐 전극에 + 전원을 연결하고, 구리 기판에 - 전원을 연결하면, 양극과 음극에서는 식 (1) 과 같은 화학 반응이 일어난다.



즉, 미세 전극에서는 물이 전기 분해되어 산소 기체가 발생하게 되고, 구리 기판에서는 구리 이온이 환원되어 기판에 증착된다. (Fig. 1)

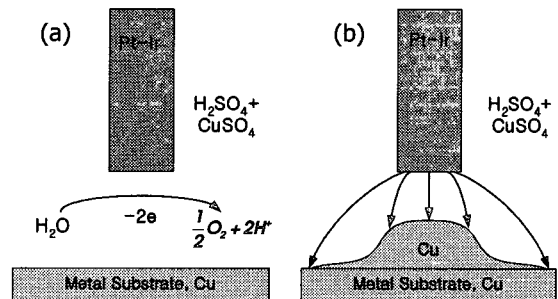


Fig. 1 Schematic diagram of electrochemical reaction at (a) micro electrode and (b) substrate

2.2 전기 이중층과 이온의 이동

Fig. 2 에서 보듯이, 전해액에서 공구 전극과 공작물의 양단에 전압이 인가될 때 공작물 쪽에

있는 전하와 용액 쪽에 있는 전하는 이온의 분포에 의해서 서로 마주하는 층을 이루게 되는데 이를 전기 이중층이라 한다.^{1,9} 용액 내에서 F^- 이온을 제외한 음이온들은 금속 표면과 화학적 상호작용으로 전극에 붙게 되며, 이렇게 특수 흡착된 음이온의 중심 궤적을 내부 Helmholtz 평면 (IHP) 으로 정의한다. 양이온은 주위에 물 분자의 쌍극자들이 붙어 수화되어 있으며 금속 표면에도 물의 단분자층이 있기 때문에, 양이온의 중심과 전극 사이는 대체로 물 분자 두 개 크기 정도의 거리가 떨어져 있는데 이렇게 전극에 최대한 접근할 수 있는 양이온의 중심 궤적을 외부 Helmholtz 평면 (OHP) 이라 한다. 전극 표면에서 OHP 까지를 조밀 이중층이라 하며 약 3 Å의 두께를 갖는다. OHP 에서부터 분극된 전극의 영향으로 용액 내에 전기적으로 분포하는 이온층까지를 확산 이중층이라 한다. 이러한 전기 이중층은 전기 회로에서 축전기와 같은 역할을 하며, 축전용량은 인가 전압에 따라 달라지는 특성을 갖는다.

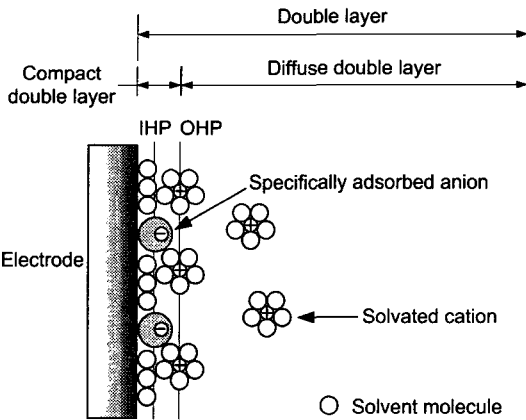


Fig. 2 Electrical double layer

구리 이온이 기판에 증착되는 과정을 살펴보면, 전해액 중의 구리 이온은 음으로 분극된 구리 기판의 영향으로 전기 영동 (electrical migration) 에 의해 확산 이중층까지 이동하게 되며, 다시 농도 차에 의한 확산에 의해 OHP 에 도달하게 된다. OHP 에 도달한 구리 이온은 활성화 에너지의 장벽을 넘어서 구리 기판에 환원 석출하게 된다. 이의 과정을 Fig. 3 에 개략적으로 나타냈다.

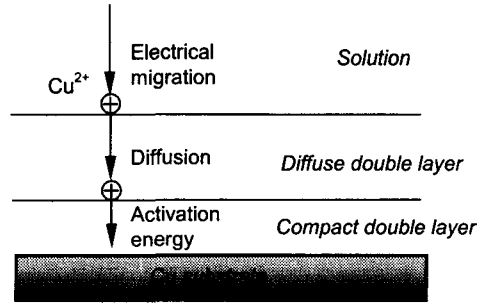


Fig. 3 Cu deposition process through electrical double layer

2.3 초단펄스 전해증착의 원리

증착 영역을 국부화하는 방법으로 크게 두 가지를 생각해 볼 수 있는데, 하나는 기존 연구자들이 사용하였던 것과 같이 미세 전극을 절연한 후 폴리싱 등으로 끝 부분의 절연 피막을 제거하여 전극 옆면으로 흐르는 전류를 차단하는 것이다.^{2,6} 그러나 이 방법은 절연 상태에 따라 증착 특성이 달라지므로 반복성을 기대하기가 어려우며 증착도중 증착물과의 간섭 등으로 절연막이 손상되는 경우가 발생한다. 또한 전극 끝부분의 노출량을 미세화 하는데 한계가 있다. 다른 하나는 초단펄스를 미세 전극과 금속 기판의 양단에 인가하여 증착 영역을 국부화시키는 방법으로 본 논문의 주요 연구 대상이다. 초단펄스를 전원으로 사용하면 축전기의 성질을 갖는 전기 이중층의 특성을 증착 영역의 국부화에 활용할 수 있다. 전해셀에서 전기 이중층의 충전 시정수는 축전용량과 용액저항의 곱으로 근사화 하여 나타낼 수 있는데, 미세 전극의 각 위치와 기판의 거리차에 의해 전극상의 각 위치에 따라 전기 이중층의 충전 시정수 값이 달라지게 된다. 이 충전 시정수 차를 고려하여 펄스 지속시간을 선정하면 전극 바닥과 가까운 기판 위치에서만 국부적으로 구리가 증착되게 할 수 있다. 따라서 미세 전극의 옆면을 절연하지 않더라도 증착의 국부화를 이룰 수 있다. 초단펄스 전해증착은 증착이 일어나는 초기 시점에 증착 영역의 국부화에 더욱 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 본 논문에서는 절연의 유무 그리고 직류 전원과 초단펄스 전원 등 모두 네 가지 조건에서 구리의 전해증착 특성을 살펴보았다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험 장치 및 실험 조건

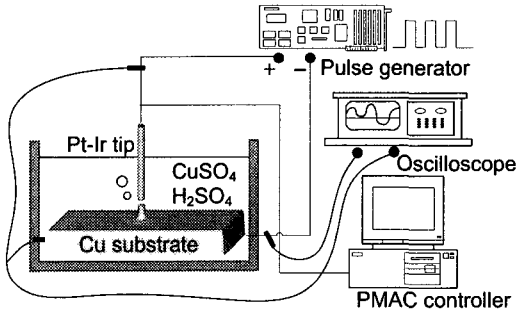


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up

실험 장치는 펄스 발생기, 이송 컨트롤러, 전해 셀, 모니터링 시스템으로 구성되어 있다. 증착 상태 파악과 이송 제어를 위하여 양단의 전압과 전류를 오실로스코프로 측정했으며, CCD 카메라로 증착 과정을 동시에 모니터링하였다. 증착물을 부착시킬 기판 (substrate) 은 순도 99.9 %, 두께 100 μm 의 구리 판을 사용하였고, 기판의 크기는 가로 20 mm, 세로 30 mm 이다. 미세 전극 (electrode) 으로는 백금-이리듐 STM (scanning tunneling microscopy) 팁을 사용하였고, 팁 끝단의 공칭 직경은 40 nm 이다. 미세 전극으로 사용한 팁의 사진은 Fig. 5 와 같다.

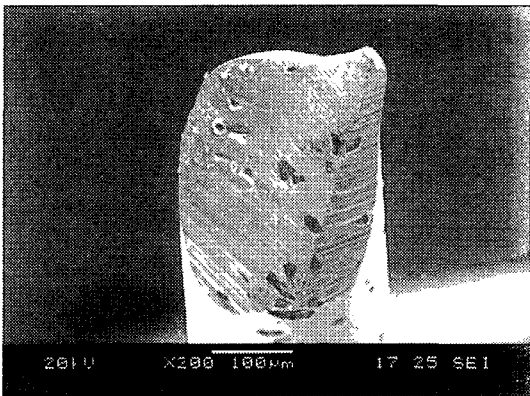


Fig. 5 Pt-Ir STM tip

El-Giar 등은 0.015 ~ 1.0 M 까지 황산구리의 농도를 변화시키면서 실험해 본 결과 황산구리의 농도는 증착 속도에 큰 영향을 미치지 않는다고 하였다.³ 그러나 0.125 M 이하에서는 증착된 구조물의 표면이 거칠고 울퉁불퉁하며, 다공성 구조가 만들어지고 나뭇가지 모양의 형상 (dendritic structure) 을 하는 경우가 많으며, 전체적으로는 황산구리의 농도가 감소함에 따라 기둥의 모양이 나빠진다고 보고하였다. 본 논문에서는 전해액의 조성도와 농도에 따른 증착 실험을 통하여 최종적으로 황산 0.5 M 과 황산구리 0.5 M 혼합 수용액을 전해액으로 선정하였다. 황산과 같이 pH 가 낮은 강산은 H^+ 이온 농도가 높아 전해액 중의 OH^- 이온이 Cu^{2+} 이온과 결합하여 구리 이온 농도를 감소시키는 것을 방지하므로 구리의 전해 증착에 좋은 조건을 형성한다.

전원의 형태, 전극의 절연 여부에 관계없이 증착 중에 미세 전극이 증착물과 달라붙는 현상이 계속 발생하였다. 증착 구조물이 성장하여 미세 전극과 달라 붙게 되면 단락 상태가 되고 이 때 전극을 증착물에서 멀어지는 방향으로 이송을 하더라도 단락 상태가 일정 구간 유지됨을 알 수 있었다. 이 때 양단의 전원을 차단하면 전극과 증착물이 서로 떨어짐을 확인할 수 있었다. 이와 관련하여 Jansson 등은 니켈 증착의 경우에 전류가 6 mA 를 넘게 되면 전극과 구조물이 달라붙으므로 이를 제한할 수 있는 전류 제한장치가 필요하다고 하였다.¹⁰ 본 실험에서는 단락이 발생할 때 전원을 차단할 수 있는 릴레이 장치를 만들어 사용하였다. 단락이 발생하여 오실로스코프에서 측정된 전압 값이 기준값에 비해 떨어지게 되면 PMAC 제어기와 연결된 A/D Converter 에서 신호를 받아서 릴레이를 작동하여 전원을 끊거나 켤 수 있게 하였다.

실험 과정을 요약하면 기판과 미세 전극 사이에 초기 간극을 설정하고 전압을 가한 후 증착물이 성장하여 미세 전극과 단락이 발생하면 전원을 끊고 다시 일정값 만큼 전극을 이송한 후 전원을 켜서 증착물을 전극 방향으로 성장시키는 방법을 반복하여 사용하였다.

3.2 직류 전원 실험

비절연 백금-이리듐 전극을 사용하고 직류 전원을 가했을 때에는 반응이 매우 격렬하게 일어난다. 전원을 가하는 순간 구리 판 전체에 증착이

일어나면서 판 전체가 구리로 덮이게 된다. 1.5 ~ 3.5 V 영역에서 0.5 V 간격으로 실험하였는데, 인가 전압이 2.5 V 를 초과하면 급속한 반응으로 인하여 증착 과정의 제어가 불가능하였다. 증착물의 성장 또한 급격히 이루어지기 때문에 릴레이로 전원을 끊어 주더라도 Z 축 이송량이 1 μm 일 때에는 증착물과 전극이 단락된 상태로 판단하는 경우가 있다. 이런 이유 때문에 직류 전원을 인가할 경우에는 Z 축 이송량을 1 스텝당 3 μm 로 하여 실험하였다.

Apiezon Wax 로 절연한 백금-이리듐 전극을 사용했을 때에는 절연 물질 때문에 반응이 폭발적으로 일어나지는 않는다. 그러나 평균 3 회 정도 실험을 실시하고 나면 절연한 끝부분이 떨어져 나가는 현상이 발생했다. 특히 3.5 V 이상에서는 1 회 실험 이후에 전극을 계속 교체해야 했다. 위의 비절연 전극을 사용했을 때와 결과를 비교해 보면, Figure 6 에서 보듯이 같은 2.5 V 에서 실험한 기둥에서 직경은 38 ~ 60 μm 로써 비절연 전극 사용시의 기둥 직경 100 ~ 110 μm 의 38 ~ 54 % 이다. 이로부터 절연 전극을 사용하면 더 작은 직경의 증착물을 만들 수 있음을 확인할 수 있다.

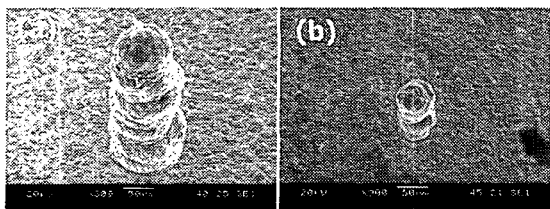


Fig. 6 Cu columns deposited at DC 2.5 V using Pt-Ir tip (a) without and (b) with insulation

비절연 조건에서는 전원을 가하는 즉시 금속 기판 전체에 구리가 넓게 퍼져 증착 되었으나, 절연 조건에서는 기둥 하나 정도가 만들어질 정도의 시간이 흘러야 전체에 구리가 증착 되고 그 표면도 비절연 조건에서 보다는 거칠지 않다.

3.3 초단펄스 실험

초단펄스 조건에서 비절연 전극과 절연 전극을 사용하여 전해증착할 때 전해조건에 따른 증착 구조물의 크기, 형상, 미세 조직, 표면 등을 관찰하였다. 비절연 백금-이리듐 전극을 사용하여 인

가 전압과 펄스 지속시간을 변화시키면서 증착 특성을 살펴보았다. 미세 전극의 Z 축 이송량은 한 스텝당 1 μm 을 사용하였으며, 총 25 μm 를 이송하였다. 인가 전압은 3.0 ~ 4.5 V 에서 0.5 V 간격으로, 펄스 지속 시간은 250 ~ 600 ns 에서 50 ns 간격으로 증가시키며 실험하였으며, 펄스의 주기는 1 μs 이다. 각 조건마다 세 번씩 실험하였으며, 동일한 조건에서 증착된 미세 기둥의 크기 및 조직 등의 반복성은 매우 좋음을 확인할 수 있었다. 실험 결과를 Table 1 에 나타냈다. 표에서 □ 기호로 표시한 조건에서는 구리판 전체에 구리가 퍼진 형태로 증착되었으며, 기둥 윗 부분에 비해 아랫 부분의 직경이 커서 증착된 형상이 원뿔 형태를 가짐을 볼 수 있었다. △ 기호 영역에서도 역시 구리판 전체에 구리가 퍼져 증착되었으며, 기둥의 형태는 이루고 있으나 보통 둘 또는 셋으로 쪼개진 형상이었고, 기둥도 크게 덩어리진 울퉁불퉁한 형태로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다. ◎ 기호 영역에서는 바닥에 구리가 많이 퍼지지 않았다. 그러나 기둥의 표면이 조금 거칠고, 형태가 똑바르지 못하다. ● 기호 영역에서는 증착된 기둥의 표면 조직이 확연하게 좋아졌음을 볼 수 있고, 바닥 면에도 구리가 많이 쌓이지 않았다.

Table 1 Deposition characteristics according to applied voltage and pulse duration using non-insulated tip

	3.0 V	3.5 V	4.0 V	4.5 V
250 ns	N/A	N/A	N/A	□
300 ns	N/A	□	□	△
350 ns	N/A	□	◎	△
400 ns	□	◎	◎	◎
450 ns	□	●	●	△
500 ns	□	◎	◎	△
550 ns	□	◎	△	△
600 ns	◎	△	△	△
□	Radius of column base is too big. Copper grains are widely dispersed.			
◎	Copper grains are dispersed a little.			
△	Column is formed with lumpy grains.			
●	Proper condition			

가 기둥의 직경도 아랫 부분과 윗 부분의 직경이 큰 차이가 없다. N/A 는 기둥이 생성되지 않았음을

나타낸다.

Figs. 7, 8로부터 알 수 있듯이 인가 전압 3.5 ~ 4.0 V, 펄스 조건이 450 ns/ 1 μs 일 때 증착된 기둥의 직경이 가장 작고, 표면이 매끈하며, 바닥에도 구리가 적게 퍼져있어 가장 적합한 증착 조건인 것으로 생각된다.

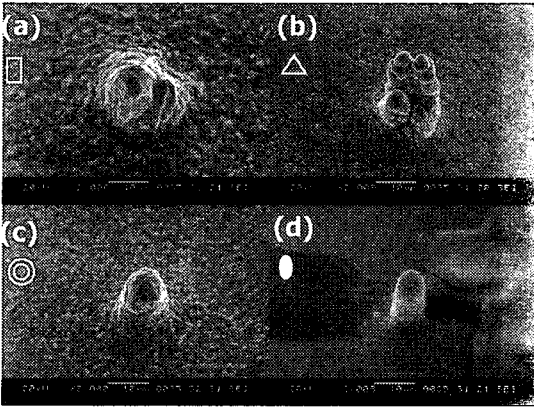


Fig. 7 Columns made at various conditions:
 (a) 3.0 V, 400 ns/ 1 μs (b) 4.5 V, 450 ns/ 1 μs
 (c) 4.0 V, 400 ns/ 1 μs (d) 3.5 V, 450 ns/ 1 μs

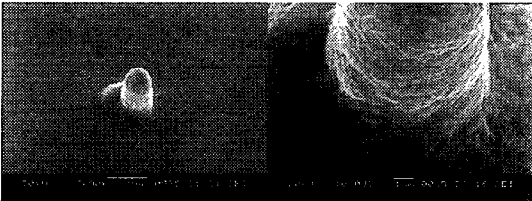


Fig. 8 Column fabricated with 4.0 V, 450 ns/ 1 μs

절연 백금-이리듐 전극을 사용하고 초단펄스를 가했을 경우에 대해서 실험하였다. 비절연 전극을 사용했을 때와 같은 증착 조건을 사용하였고, 각 조건당 세 개씩의 기둥을 만들어 반복성을 검증하였다. 단, 성장 속도를 감안하여 한 스텝당 Z 축 이송량은 1 ~ 3 μm 까지 변화를 주었다. 실험 결과는 Table 2 에 정리하여 나타냈다. Table 2 에서 보듯이 절연한 전극을 사용하였을 때에는 비절연 전극의 경우와는 달리 적절한 증착 조건을 찾을 수 없었다. Fig. 9 에 나타냈듯이 기둥의 직경 면에서만 본다면 인가전압 2.0 V, 펄스 지속시간 400 ~ 500 ns 일 때가 가장 작았으며, 전체적으로 절연

전극으로는 표면이 매끈한 구조물을 만들기가 어려웠다. 이것은 직접 전극을 절연한 관계로 절연면이 균일하지 못하고, 전극 끝의 노출 부분이 일정하지 않아서 생긴 결과로 보인다. 이 경우에도 바닥에는 구리가 거의 퍼지지 않았다. 따라서 절연 전극은 기둥과 같이 끝고 표면이 매끈한 구조물 제작에는 적합하지 않으나, 전극 옆면의 영향을 받을 수 있는 일반적 삼차원 구조물의 제작에는 유효하다고 생각된다.

Table 2 Deposition characteristics according to applied voltage and pulse duration using insulated tip

	1.5 V	2.0 V	2.5V	3.0V
200 ~ 350 ns	N/A	N/A	△	△
400 ns	N/A	◎	△	△
450 ns	N/A	◎	△	△
500 ns	△	◎	△	△
◎	Copper grains are dispersed a little.			
△	Column is formed with lumpy grains and its shape is dendritic.			

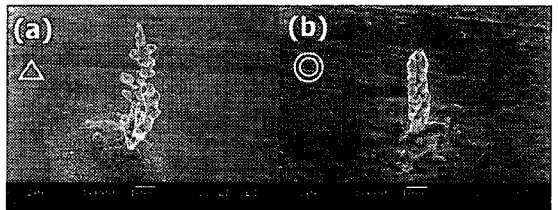


Fig. 9 Columns made with (a) 3.5V, 200 ns/ 1 μs (b) 2.0 V, 450 ns/ 1 μs

4. 초단펄스 전해증착의 응용

4.1 마이크로 기둥

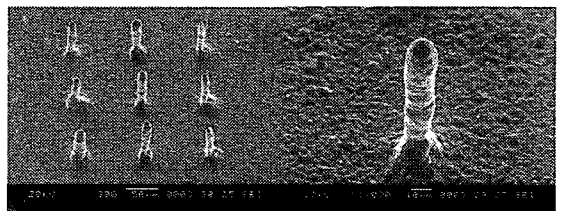


Fig. 10 Column array with 3.5 V, 350 ns/ 1 μs

Fig. 10 은 앞 장의 실험 결과를 바탕으로 인가 전압 3.5 V, 펄스 지속시간을 350 ns 조건에서 마이크로 기둥 배열을 제작한 사진이다. 비교적 반복 정밀도가 우수하며 증착된 기둥의 형상도 균일함을 볼 수 있다. 제작된 기둥의 직경은 15 μm 이며 기둥의 높이는 80 μm 이다.

4.2 마이크로 스프링

미세 전극을 나선 방정식을 따라 이송하면 전해증착으로 마이크로 스프링을 제작할 수 있다. 스프링은 증착 방향의 특성상 전극 옆면의 영향을 받기 쉬우므로 이 효과를 최소화하기 위하여 절연 전극을 사용하였다. 펄스 조건은 2.5 V 인가 전압, 450 ns 의 펄스 지속시간을 사용하였다. 스프링의 반경은 100 μm , 피치는 350 μm 가 되도록 전극을 이송하였다. 최종적으로 제작된 마이크로 스프링의 형상은 Fig. 11 과 같다. 스프링 코일의 두께는 10 ~ 12 μm 로 유지되었으며 전체적으로 균일한 형상으로 증착되었음을 확인할 수 있다.

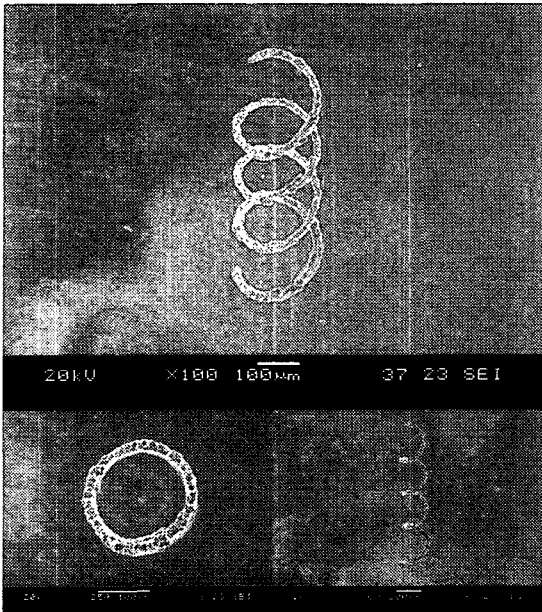


Fig. 11 Spring with 2.5 V, 450 ns / 1 μs

제작된 스프링의 스프링 상수를 알아보기 위하여, 이송 축을 이용하여 100 μm 까지 10 μm 간격으로 스프링을 변형시키면서 그 때의 힘을 해상

도가 1×10^{-5} g 인 초정밀 저울을 이용하여 측정하였다. 실험 결과를 Fig. 12 에 나타냈으며, 데이터를 선형화하였을 때 스프링 상수는 5.71 N/m 였다. 구리 재질의 스프링을 제작하였을 때 일반적 계산식에 의해 계산한 스프링 상수는 4.61 N/m 이다. 피치를 변화시키면서 실험해 본 결과 스프링 반경이 100 μm 일 때, 피치가 250 μm 인 스프링까지는 제작이 가능함을 알 수 있었다. 그러나 피치가 줄어들수록 전체적인 형상이 조금씩 나빠졌으며, 특히 스프링 코일이 균일하지 못하고 나뭇가지 모양(dendrite) 구조물이 생성되는 경우가 많았다. 위의 실험 결과로부터 마이크로 전해증착을 이용하면 임의 형상의 삼차원 마이크로 구조물을 쉽게 제작할 수 있음을 알 수 있었다.

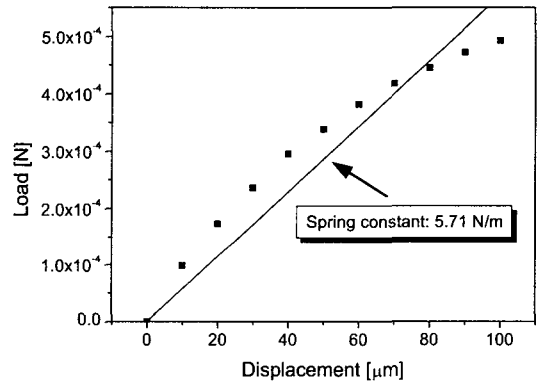


Fig. 12 Spring displacement according to load variation

4.3 마이크로 패터닝

초단펄스를 응용한 전해증착 기술은 마이크로 패터닝에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 미세 전극을 기관으로부터 수 μm 띄운 후 XY 평면상에서 이송시키면 원하는 형상의 마이크로 패터닝을 할 수 있다.

본 연구에서는 Figs. 13, 14 에서와 같이 나선 구조를 포함한 다양한 형상의 마이크로 패터닝을 완성하였다. 마이크로 패터닝에서는 증착물의 성장 방향과 전극의 이송 방향이 수직이어서 패터닝 시 중간 중간에 증착이 안된 구간이 나타날 우려가 있다. 따라서 기둥 및 스프링의 제작에서와 달리 증착물이 전극에 닿지 않도록 이송을 제어하였다.

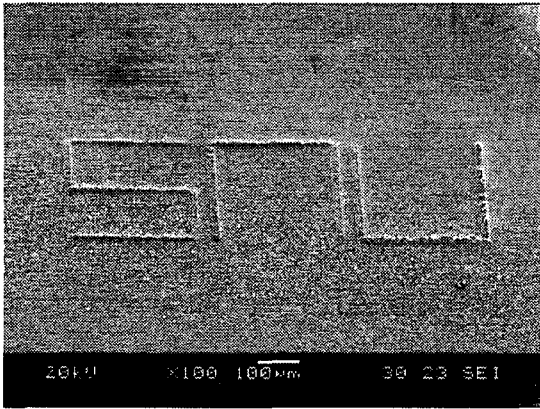


Fig. 13 Image of letters with 2.5 V, 450 ns/ 1 µs by micro patterning

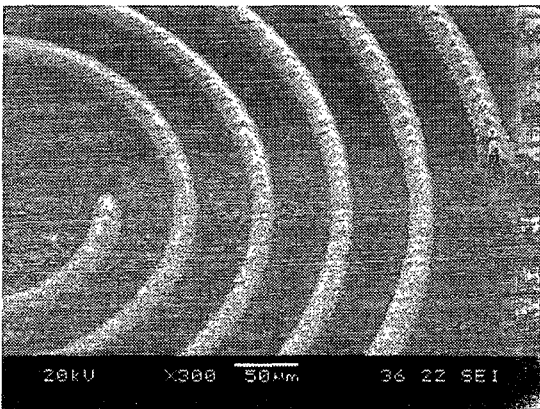


Fig. 14 Image of a spiral pattern with 2.5 V, 350 ns/ 1 µs by micro patterning

즉, 예비 실험에서 전극을 고정된 상태에서 증착물이 성장하여 전극과 닿기까지의 시간을 측정하여 이송 속도를 계산하였고, 패터닝에서는 이를 고려하여 이송 속도를 결정하였으며, 만약 단락이 되면 전원을 끊고 다시 이송한 후 증착시키는 과정을 반복하여 패터닝하였다. 제작된 증착물의 선 폭은 10 ~ 15 µm 였다.

5. 결론

마이크로 전해증착은 비교적 간단하게 3 차원 구조물을 만들어 낼 수 있고, 재료의 다양성, 경제성 측면에서 효과적인 미세 구조물 제작 방법이다.

본 논문에서는 이러한 전해증착에 초단펄스를 인가함으로써 전해영역의 국부화를 이루어 크기가 작고, 표면이 비교적 좋은 마이크로 구조물을 생성할 수 있었다. 기존 직류 전원을 사용한 전해증착과의 비교 실험을 통해 초단펄스 전해증착의 우수성과 필요성을 확인하였다. 황산과 황산구리 수용액을 전해액으로 사용하였으며, 반복적 실험을 통하여 초단펄스 전해증착에서의 적절한 전압 및 펄스 지속 시간을 선정하였다. 이를 바탕으로 마이크로 패터닝은 물론, 마이크로 기둥, 마이크로 스프링 등의 삼차원 미세 구조물을 제작하였다. 초단펄스 전해증착 방법은 향후 다품종 소량의 미세 부품 제작에 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 나노메카트로닉스 기술 개발사업의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bard, A. J. and Faulkner, L. R., *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2000.
2. Madden, J. D. and Hunter, I. W., "Three-Dimensional Microfabrication by Localized Electrochemical Deposition," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 5, No. 1, pp. 24-32, 1996.
3. El-Giar, E. M., Said, R. A., Bridges, G. E. and Thomson, D. J., "Localized Electrochemical Deposition of Copper Microstructures," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 2, pp. 586-591, 2000.
4. Said, R. A., "Microfabrication by Localized Electrochemical Deposition: Experimental Investigation and Theoretical Modeling," *Nanotechnology*, Vol. 14, pp. 523-531, 2003.
5. Yeo, S. H., Choo, J. H. and Sim, K. H. A., "On the Effects of Ultrasonic Vibrations on Localized Electrochemical Deposition," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, pp. 271-279, 2002.
6. Yeo, S. H. and Choo, J. H., "Effects of Rotor

- Electrode in the Fabrication of High Aspect Ratio Microstructures by Localized Electrochemical Deposition," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11, pp. 435-442, 2001.
7. Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," *Science*, Vol. 289, pp. 98-101, 2000.
 8. Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Localized Electro-chemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 8, pp. 213-220, 2003.
 9. Paik, W. K. and Park, S. M., *Electrochemistry: Science and Technology of Electrode Processes*, Cheongmoongak, Seoul, 2001.
 10. Jansson, A., Thornell, G. and Johansson, S., "High Resolution 3D Microstructures Made by Localized Electrodeposition of Nickel," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 147, No. 5, pp. 1810-1817, 2000.