

레이저 마스크와 직류전원을 이용한 선택적 전해도금

신홍식^{a*}, 김성룡^a

Selective Electrodeposition Using Laser Masking and DC Voltage

Hong Shik Shin^{a*}, Sung Yong Kim^a^a Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation,
50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk, 380-702, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	1	December	2014
Revised	29	December	2014
Accepted	5	January	2015

Keywords:

Laser masking
Electrodeposition
DC voltage
Copper layer
Micro patterns

ABSTRACT

This paper proposes a selective electrodeposition process that uses laser masking and a DC voltage. Selective electrodeposition using laser masking and a DC voltage is more efficient than that using laser masking and a pulse voltage. In other words, electrodeposition with a DC voltage allows for precise selective deposition without the limitation of the deposition region. Also, a selective electrodeposition method that uses laser masking and DC voltage can reduce the electrodeposition time. The characteristics of a copper layer deposited by laser masking and DC voltage were examined under various conditions. A selective copper layer with various micro patterns of 2 μm thickness was successfully fabricated.

1. 서론

전해도금(electrodeposition)과 레이저빔공정은 전자, 정보통신, 기계, 자동차 등 다양한 산업의 근간이 되는 기반 기술이다^[1-4]. 최근, 이동통신용 기기 및 휴대용 전자 기기의 각 종 부품에 정밀한 미세 패턴을 형성할 수 있는 도금 기술, 자동차 및 항공기에 사용되는 전장부품에 빠르고 정밀하게 도금할 수 있는 기술 등에 대한 수요가 증가하고 있다. 이와 같이, 다변화 되고 있는 수요를 충족시키기 위해서는 원하는 영역에 정밀한 미세 패턴을 갖는 도금층(deposited layer)을 효율적으로 제작할 수 있어야 한다.

정밀 미세패턴 도금층 제작을 위해 지속적인 연구가 진행되어 왔다. 특히, LIGA 공정 등을 이용하여 미세 패턴을 갖는 마스크를

제작한 후 공작물의 표면 위에 선택적으로 도금층을 제작한 연구들이 많이 진행되어 왔다^[5].

마스크를 이용한 방법은 패턴 형상에 따라 마스크를 새로 제작하기 때문에 많은 시간과 비용이 소요된다는 단점이 있다. Wee 등은 공작물을 도금액에 침지한 후 레이저빔을 전해액에 조사하여 마스크(mask) 없이도 도금층 패턴을 구현했지만, 형성된 도금 패턴은 정밀도가 균일하지 않았다^[6]. Cho 등은 레이저 마스크(laser masking)와 펄스전압을 이용한 전해도금을 통해 원하는 영역에 정밀한 패턴의 전해도금층을 제작하는데 성공하였다^[7]. 레이저 마스크와 펄스전압을 이용한 전해도금 기술은 마스크 없이 정밀한 미세 패턴을 구현할 수 있으나, 펄스전압을 이용함으로써 대전극이 이송하는 영역으로만 도금영역이 국한되고, 도금영역이 넓어지면 도금 시간도 길어진다는 문제점이 있다.

* Corresponding author. Tel.: +82-43-841-5287

Fax: +82-43-841-5280

E-mail address: shinhs05@ut.ac.kr (Hong Shik Shin).

본 논문에서는 레이저마스킹을 이용한 전해도금에서 펄스전압 대신 직류전압을 사용하여 대면적의 공작물에 정밀한 미세패턴을 갖는 도금층을 형성하는 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해 직류전압과 레이저마스킹의 각 조건에 따른 선택적 도금 특성에 대해 조사하였다.

2. 레이저마스킹과 직류전원을 이용한 전해도금

2.1 직류전원을 이용한 선택적 전해도금의 원리

레이저마스킹과 직류전원을 이용한 선택적 전해도금은 Fig. 1과 같이 레이저마스킹, 전해도금, 초음파세척의 3단계를 통해 수행된다. 레이저마스킹 단계에서는 도금층을 형성하고자 하는 영역을 제외한 공작물 표면에 레이저빔을 조사(irradiation)하여 Fig. 1(a)와 같이, 수백 nm 두께의 재응고층을 형성시킨다. 전해도금 단계에서는 공작물과 대전극을 도금액에 침지하고 대전극과 공작물 사이에 직류전압을 인가한다. 직류전압이 인가되면 Fig. 1(b)와 같이 공작물의 전체 표면에 도금층이 형성된다. 전해도금을 하는 동안 공작물에서는 전해반응이 일어나는데, 이 때 수소 취화(hydrogen embrittlement)로 인해 공작물 모재와 재응고층과의 결합력이 약해진다⁷⁾. 전해도금 이후 초음파 세척을 하게 되면 모재와 결합력이 약해진 재응고층이 모재로부터 분리되며 제거된다. 이 순간 재응고층 위에 형성된 도금층도 함께 제거된다. 그러나, 재응고층이 형성되지 않았던 부분에 형성된 도금층은 모재와의 결합력이 강해 제거되지 않고 Fig. 1(c)와 같이 공작물의 표면에 남아있게 된다. 즉, 레이저마스킹과 직류전원을 이용한 선택적 전해도금은 공작물 표면에 형성시킨 재응고층을 희생층으로 이용하여 도금층과 함께 제거하고, 희생층이 형성되지 않은 영역에서만 도금층을 잔류시켜 선택적으로 도금층을 제작하는 공정이다.

전해도금 시 직류전원을 이용하면 펄스전원에 비해 도금되는 영역이 제한되지 않아 미세패턴의 도금층을 대면적에 정밀하게 제작할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 펄스전원에 비해 도금시간도 단축할 수 있다. 즉, 마스킹과 직류전원을 이용한 선택적 전해도금 공정

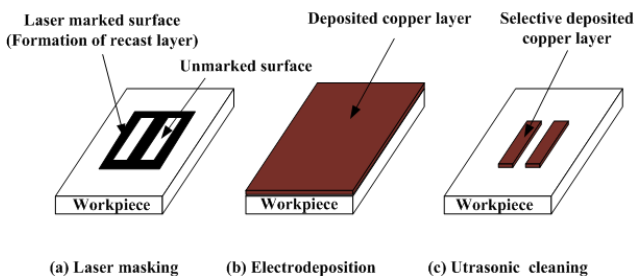


Fig. 1 Procedures for selective electrodeposition using laser masking

은 대면적 공작물 표면에 정밀한 미세패턴의 도금층을 효율적으로 제작할 수 있다.

2.2 실험 장치

레이저마스킹과 직류전압을 이용한 선택적 전해도금을 수행하기 위한 시스템 구성은 Fig. 2와 같다. 파장 1,064 nm, 100 ns 펄스 온-타임을 갖는 이터븀 펄스 레이저가 사용되었으며, 레이저빔의 초점을 맞추기 위해 레이저빔의 스캔헤드는 Z축 이송장치에 부착되었다. 공작물로는 15 mm × 15 mm × 1 mm 스테인리스강(AISI 304) 판(stainless steel plate)이 사용되었고, 대전극으로는 15 mm × 15 mm × 1 mm 구리판(copper plate)이 사용되었다.

공작물과 대전극을 침지시키기 위한 전해수조에는 0.5 M 황산과 0.5 M 황산구리를 혼합한 수용액이 사용되었다. 또한 공작물은 환원전극, 대전극은 산화전극으로 사용하여 직류전압을 인가하였다. 직류전압을 인가하기 위해 직류전원공급기(DC power supply)가 사용되었다.

Shin 등은 스테인리스강의 표면에 어블레이션(ablation)을 최소화 하고 수백 nm 두께의 재응고층을 형성하기 위한 레이저빔 조건에 대해 연구하였다⁸⁾. 스테인리스강의 표면에 수백 nm 두께의 재응고층을 균일하게 형성시키기 위한 펄스 레이저빔의 조건은 Table 1과 같다. Table 1의 조건을 이용하여 레이저빔을 중첩하여 스테인리스강 표면에 조사한 결과 수백 nm 두께의 재응고층이 형성되었다.

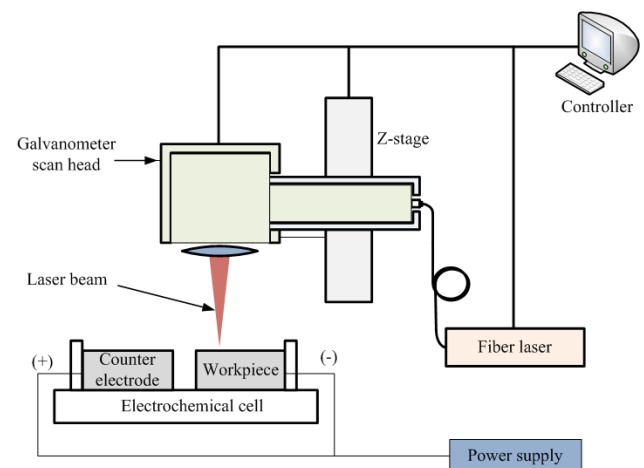


Fig. 2 Experimental set-up for selective electrodeposition using laser masking

Table 1 Laser masking conditions for electrodeposition

Average power (W)	2
Pulse repetition rate (kHz)	80
Marking speed (mm/s)	20
Line spacing (μm)	10

3. 선택적 전해도금

3.1 레이저 마스크

레이저 마스크 단계는 레이저빔 조건을 조절하여 수 백 nm 두께의 재응고층을 형성시키고 이를 전해도금 시 희생층으로 사용하는데 그 목적이 있다. 그러므로 레이저 마스크 단계에서 레이저빔에 의한 어블레이션(ablation)은 최소화하고 균일한 두께의 재응고층을 형성할 수 있어야 한다. Table 1의 레이저빔 조건을 이용하여 스테인리스강 표면에 Fig. 3(a)와 같이 레이저빔을 조사하였다. 레이저빔이 마스크된 영역은 레이저빔이 일정한 라인 간격으로 중첩되어 스테인리스강 표면에 조사되기 때문에 Fig. 3(b)에서와 같이 표면에 요철이 발생된다. 3D surface profiler를 이용하여 Fig. 3(a)의 AA'라인 단면의 단차를 측정해 본 결과 Fig. 3(b)와 같이 레이저 마스크된 영역의 요철의 평균선과 마스크되지 않은 영역의 표면 사이의 단차는 약 0.6 μm 내외로 측정되었다. 즉, 어블레이션으로 인한 재료제거율은 약 0.6 μm 내외로 최소화 되고 균일한 재응고층이 수 백 nm 균일한 두께로 형성되었다^[8]. 그러나, 평균출력이 6 W 이상으로 높은 경우 어블레이션에 의한 재료제거율은 2 μm 보다 커지고, 재응고층이 균일하게 형성되지 않는다. 그러므로 평균출력은 2~4 W 범위로 선정하였다.

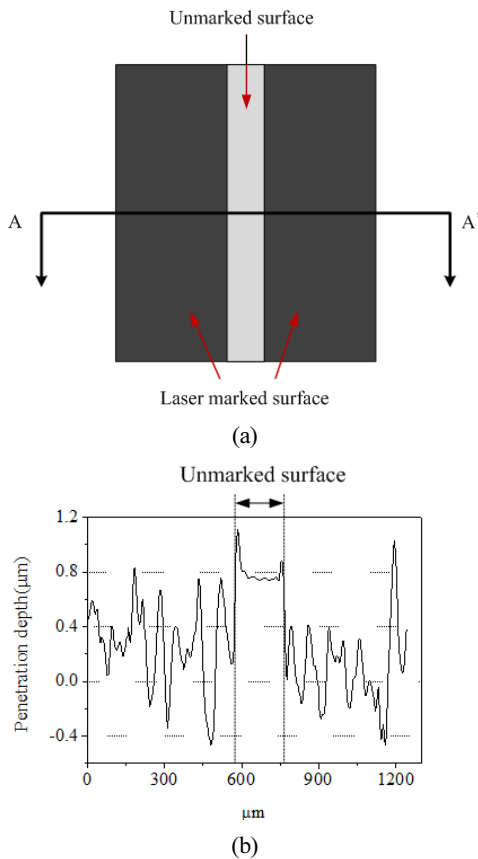


Fig. 3 Profile of laser marked surface after laser masking

3.2 직류전원을 이용한 선택적 전해도금

Fig. 4(a)는 레이저 마스크, 전해도금, 초음파 세척의 3단계 공정을 거친 후 선택적으로 구리층을 전해도금한 결과이다. 레이저 마스크된 영역은 초음파 세척 후 구리층과 함께 제거되고, 레이저 마스크가 되지 않은 영역에서만 선택적으로 구리층이 남아있는지 확인하기 위해 EDS(energy dispersive spectrometry)분석을 수행하였다. Fig. 4(b)에서와 같이 선택적으로 전해도금이 된 영역에서는 구리(Cu)원소가 주원소로 검출되었고, 재응고층과 함께 구리층이 제거된 레이저 마스크 영역에서는 Fig. 4(c)에서와 같이 구리 원소가 검출되지 않고, 스테인리스강의 구성 원소들만이 검출되었다. 이것은 초음파 세척 이후 선택적으로 원하는 영역에만 도금층이 잔존한다는 것을 의미한다.

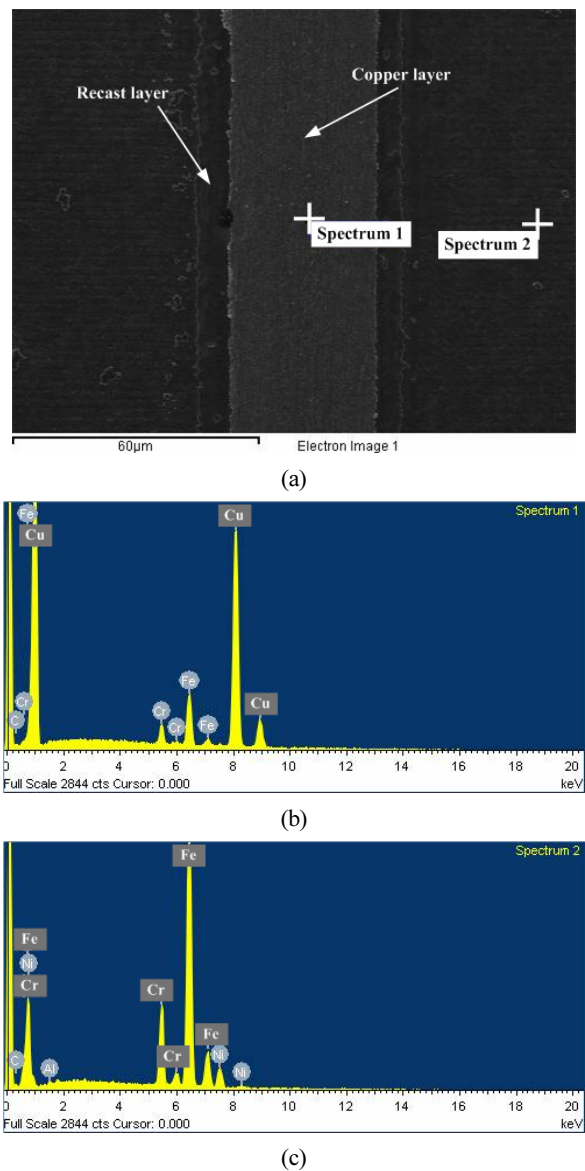


Fig. 4 EDS analysis after selective electroplating using laser masking

4. 전해도금 조건에 따른 도금 특성 및 결과

4.1 직류전압과 전해도금 시간에 따른 도금 특성

레이저 마스크를 거친 후 공작물을 전해수조에 침지하고 공작물과 대전극 사이에 직류전압을 인가하면 전기화학 반응에 의해 공작물 표면 전체에 구리층(copper layer)이 형성된다. 직류전압을 이용한 전해도금에서는 직류전압의 크기와 전해도금 시간에 따라 도금 특성이 결정된다. Fig. 5는 직류전압 변화에 따라 선택적으로 전해도금 된 구리층 SEM 사진이다. Fig. 5(a)와 (b)는 초음파 세척 이후 레이저 마스크가 되지 않은 영역에만 구리층이 선택적으로 남아있는 것을 보여준다. 그러나 Fig. 5(c)에서 보이는 바와 같이, 전압 1.6 V에서는 전해도금 된 구리층 경계 부분의 진직도가 저하되고 불균일하게 형성되었다. 또한, 1.8 V에서는 레이저마스크가 되지 않은 영역에 남아있던 구리층이 모재인 스테인리스강 표면으로부터 박리되거나 손상된 것을 확인할 수 있다. 이는 전압이 증가함에 따라 모재 표면 전체에 적층된 구리층의 두께가 과도하게 두꺼워지기 때문이다. 즉, 임계 이하 두께를 갖는 구리층이 형성된 경우, 레이저마스크 되지 않은 영역에서는 모재와 구리층 사이의 접착력이 강하므로 초음파 세척 시 모재와 접착력이 약해진 재용고층과 그 위에 형성된 구리층만이 제거된다. 그러나, 구리층 두께가 두꺼워지면 구리층 간의 결합력이 레이저마스크 되지 않은 영역에 적층된 구리층과 모재 사이의 결합력보다 강해지기 때문에 구리층이 전체적으로 모재로부터 박리되거나 찢기는 현상이 발생한다.

Fig. 6은 전해도금 시간에 따른 선택적 전해도금 특성을 보여주는 SEM 사진이다. Fig. 6(a)~(c)에서는 선택적으로 레이저 마스크

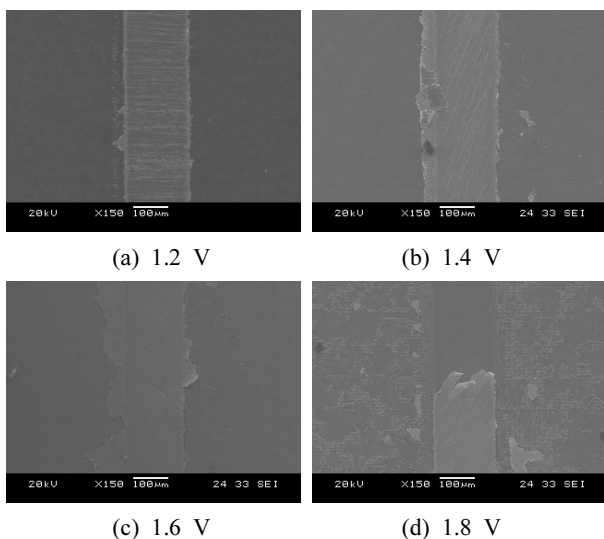


Fig. 5 Electrodeposition according to DC voltage (electrodeposition time: 80 sec, electrolyte: 0.5 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 0.5 M H_2SO_4)

킹이 되지 않은 영역에만 구리층이 남아있는 것을 확인할 수 있다. 직류 전압이 증가하는 경우와 마찬가지로 전해도금 시간이 길어질수록 스테인리스강의 전체 표면에 적층된 구리층의 두께가 증가하게 된다. Fig. 5(d)에서와 같이 전해도금 시간이 80초 이상인 경우는 초음파 세척 시 레이저 마스크 된 영역의 구리층과 함께 모재로부터 들리거나 불균일하게 찢기는 현상이 발생한다.

Fig. 7은 직류전압과 전해도금 시간에 따라 도금된 구리층의 두께 변화에 관한 그래프이다. 직류전압과 전해도금 시간이 증가함에 따라서 전해 도금된 구리 도금층의 두께가 약간 증가하는 경향을 보인다. 이는 직류전압이 증가하면 전해셀 내에서 반응전류가 커지고 이로 인해 구리 이온이 공작물 표면에서 더 많은 환원반응을 일으키기 때문이다. 또한, 전해도금 시간이 길어지면 구리가 환원 반응할 수 있는 시간이 길어지게 되어 구리층 두께가 증가한다.

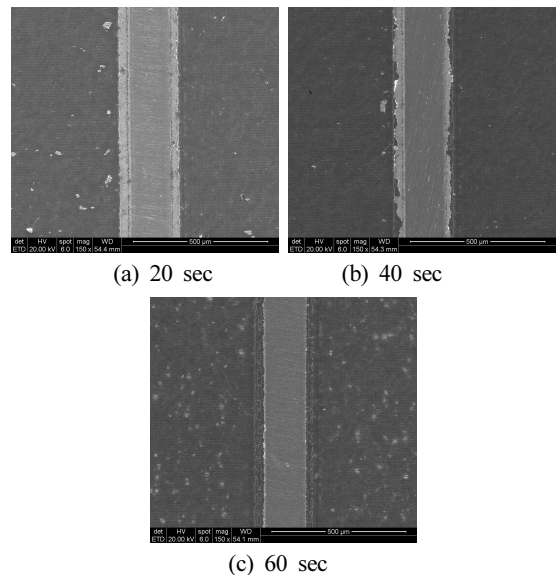


Fig. 6 Electrodeposition according to electroplating time (DC voltage time: 1.8 V, electrolyte: 0.5 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 0.5 M H_2SO_4)

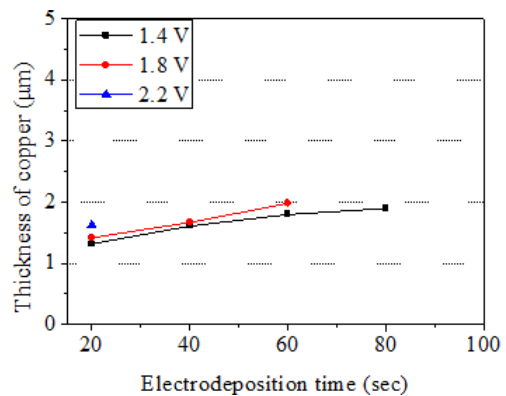


Fig. 7 Thickness of copper layer according to DC voltage and electroplating time (electrolyte: 0.5 M $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 0.5 M H_2SO_4)

Fig. 7에서 직류전압이 1.4 V, 1.8 V, 2.2 V인 경우 구리층 두께는 전해도금 시간이 각각 80초, 60초, 20초까지만 측정되었다. 이는 각 전해도금 시간이 과도히 증가하면 구리층의 두께가 증가하여 초음파 세척 시 레이저 마스크 되지 않은 영역에 적층된 구리층이 모재로부터 박리되거나 불균일하게 모재에 남아있기 때문이다.

선택적 전해도금의 균일도와 정밀도에 따른 상태를 Table 2에 정리하였다. 전해도금 조건에 따라 적층된 구리층의 임계 두께 이하에서는 선택적 전해도금이 잘 이루어지고, 임계 두께 이상에서는 불균일한 도금층이 형성되거나 레이저마스크가 되지 않은 영역에서의 구리층도 스테인리스강의 표면으로부터 박리 된 것을 확인할 수 있다. 약 2 μm 두께를 갖는 구리층이 선택적으로 균일하게 형성되었으며, 이 때의 전해도금 조건은 직류전압 1.8 V, 전해도금 시간 60 내외이다.

펄스전원을 이용한 경우 두께가 약 2 μm 내외인 구리층을 형성 시키기 위해서는 100초 이상의 전해도금 시간이 소요된다^[7]. 또한, 전해도금 영역이 넓어지면 대전극의 이송구간이 늘어나 전해도금

시간은 더욱 증가할 것이다. 반면, 직류전원을 이용한 선택적 전해도금 공정에서 전해도금 시간은 펄스전원을 이용한 경우에 비해 동일한 두께의 구리층을 형성할 시 시간을 단축할 수 있다. 또한, 직류전원을 이용한 전해도금에서는 도금 영역이 넓어지더라도 전해도금 시간의 큰 증가 없이 공작물 표면 전체에 선택적 전해도금을 할 수 있다는 장점이 있다.

4.2 결 과

레이저마스크와 직류전원을 이용한 선택적 전해도금에서의 도금 특성 분석을 바탕으로 대면적의 스테인리스강 표면에 미세 패턴을 갖는 선택적 전해도금을 Fig. 8과 같이 성공적으로 수행하였다. Fig. 8(a)~(c)의 전해도금 조건은 직류전압 1.8 V, 전해도금 시간 60초이며, 두께가 약 2 μm 내외이다. Fig. 8(d)의 전해도금 조건은 직류전압 1.8 V, 전해도금 시간 40초이다. 펄스전원을 이용한 경우 두께가 약 1.6 μm 내외 이다.

5. 결 론

레이저 마스크와 직류전원을 이용한 선택적 전해도금에서 조건에 따른 도금 특성을 분석하였다. 직류전압과 전해도금 시간이 증가함에 따라 도금된 구리층의 두께가 증가함을 확인하였다. 또한, 선택적 전해도금을 위한 임계 두께가 있음을 확인하였고, 최적의 전해도금 조건은 직류전압 1.4~1.8 V, 전해도금 시간은 40~60초 내외임을 확인하였다. 선정된 전해도금 조건을 바탕으로 미세 패턴을 갖는 구리층을 성공적으로 제작하였다.

직류전원과 레이저 마스크를 이용한 선택적 전해도금 공정은 기존의 펄스전원을 사용한 연구에 비해 전해도금 시간을 단축할 수 있다. 또한, 펄스전원을 이용하는 경우 전해도금 영역을 대전극이 왕복이송해야 하므로 도금하고자 하는 영역이 넓어지면 도금 시간이 급격히 증가한다. 반면 직류전원을 이용하는 경우는 도금 영역이 증가하더라도 전해도금 시간의 연장 없이 대면적 공작물 표면에 미세 패턴을 갖는 전해도금층을 효율적으로 제작할 수 있다는 장점이 있다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2012R1A1A1042971).

References

[1] Madou, M. J., 2002, Fundamental of Microfabrication, CRC Press LLC,

Table 2 The effects of electrodeposition parameters on deposited copper layer (O denotes the appropriate electrodeposition condition for selective deposition, X denotes the partially collapsed copper layer or separated copper layer)

	20 sec	40 sec	60 sec	80 sec	100 sec
1.4 V	O	O	O	O	X
1.6 V	O	O	O	O	X
1.8 V	O	O	O	X	X
2.0 V	O	X	X	X	X
2.2 V	O	X	X	X	X

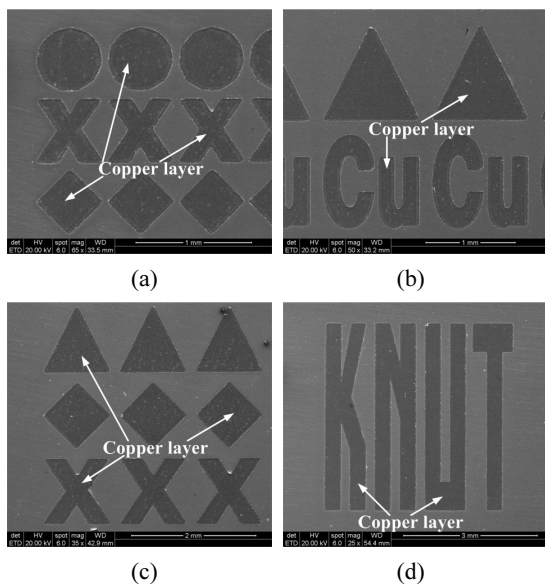


Fig. 8 Examples of selective copper deposition via electrodeposition using DC voltage and laser masking

- Boca Raton.
- [2] Paunovic, M., Schlesinger, M., 2006, Fundamentals of Electrochemical Deposition, John Wiley & Sons, NJ.
- [3] Schlesinger, M., Paunovic, M., 2010, Modern Electroplating, Wiley, NJ.
- [4] Paik, B. M., Lee, J. H., Shin, D. S., Lee, K. S., 2012, Development of Three Dimensions Laser Direct Patterning System, KSMTE. 21:1 116-122.
- [5] Romankiw, L. T., 1997, A path: from Electroplating through Lithographic Masks in Electronics to LIGA in MEMS, Microsyst. Technol., 42:20-22 2985-3005.
- [6] Wee, L. M., Li, L., 2005, Multiple-layer Laser Direct Writing Metal Deposition in Electrolyte Solution, Appl. Surf. Sci., 247:1-4 285-293.
- [7] Cho, C. H., Shin, H. S., Chu, C. N., 2013, Selective Electrodeposition of Copper on Stainless Steel using Laser Irradiation, Surf. Coat. Technol., 222:5 15-24.
- [8] Shin, H. S., Chung, D. K., Park, M. S., Chu, C. N., 2011, Analysis of Machining Characteristics in Electrochemical Etching using Laser Masking, Appl. Surf. Sci., 258:5 1689-1698.