



## 선택적 전기화학 3D 프린터 기술 소개 및 PCB 양산공정 적용방식 고찰

김성빈<sup>1,\*</sup>, 유봉영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>애니캐스팅, <sup>2</sup>한양대학교 재료화학공학과

### Introduction of Selective Electrochemical Additive Manufacturing Technology and Consideration of Integration Method for PCB Mass Production Process

Sung-Bin Kim<sup>1,\*</sup> and Bongyoung Yoo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>AnyCasting Co., Ltd., B-16th FL., Woolim BLDG., 583 Yangcheon-ro, Gangseo-gu, Seoul, Korea 07547

<sup>2</sup>Dept. of Materials science and chemical engineering, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea 15588

(Received 17 June, 2021 ; revised 27 June, 2021 ; accepted 28 June, 2021)

#### Abstract

Some studies on electrochemical additive manufacturing of metals were summarized in this technical report, and development status of selective electrochemical 3D printing technology was introduced. In order to apply it to the PCB mass production process, essential considerations how to overcome the fundamental problems, such as the sizing, process sequence and PCB process design have been described.

**Keywords :** Copper, 3D printing, electroplating package

## 1. 서 론

본 연구의 목적은 최근 국내외에서 활발하게 개발되고 있는 선택적 전기화학 3D 프린팅 기술(Selective Electrochemical Additive Manufacturing)을 소개하기 위하여, 실험적인 연구수준으로부터 단일전극과 다중전극의 개발을 통한 PCB (Printed Circuit Board, 인쇄회로기판) 양산공정 적용을 목표로 하는 시제품 및 상용 장비의 개발 현황을 소개하고자 한다 [1]. 아울러, 이러한 장비가 PCB 공정에 접목되기 위

해서 필수적으로 수반되는 생산단위 크기(Sizing), 공정의 순서, 공정 설계 등의 고려사항에 대해서도 함께 다루고자 한다.

## 2. 금속의 전기화학 국부적층에 대한 연구

### 2.1 마이크로 피펫과 표면장력 방식

그림 1에서 보듯이 Jie Hu 등은 이온 빔으로 수  $\mu\text{m}$  직경 크기의 유리 마이크로 피펫을 제작한 후 여기에 표면장력을 활용하여 전해액을 유지시키고, 이를 양극으로 사용해서 하부 기판에 일종의 회로를 형성한 다음 전해액 속의 동(Cu) 이온을 전해도금(Electro Deposition)하는 방식으로서, 표면

\*Corresponding Author: Bong-Young Yoo  
Department of Materials and Chemical Engineering,  
Hanyang University  
Tel : +82-31-400-5278 ; Fax : +82-31-419-7203  
E-mail: byyoo@hanyang.ac.kr

장력에 의해 다양한 각도로 적층이 가능하고 선폭은 피펫의 직경 조정으로 달리할 수 있다[2].

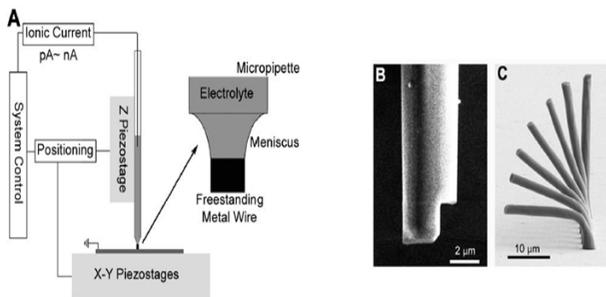
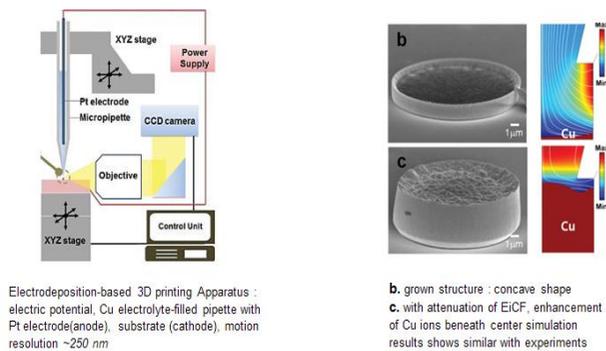


Fig 1. 표면장력 유지 방식의 전기증착 실험[2]



Electrodeposition-based 3D printing Apparatus : electric potential, Cu electrolyte-filled pipette with Pt electrode(anode), substrate (cathode), motion resolution ~250 nm

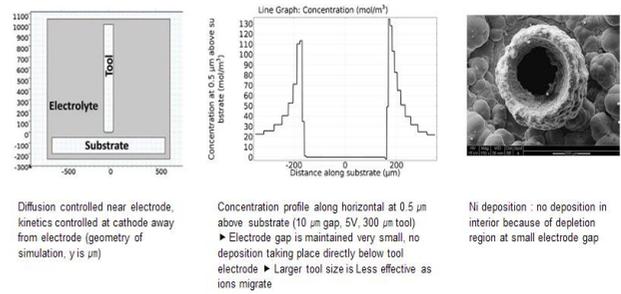
b. grown structure : concave shape  
c. with attenuation of EICF, enhancement of Cu ions beneath center simulation results shows similar with experiments

Fig 2. 표면장력 방식의 전기증착 및 전류량 조절 실험[3]

그림 2에서는 마이크로 피펫과 표면장력을 사용하여 전해액 속의 구리 이온을 전해도금하는 것은 동일하지만, 피펫과 기판 사이의 전류흐름과 전해액 유동을 상용 S/W로 시뮬레이션하였고, 전류량을 조절하면서 시편 내부의 적층을 좀 더 유도하기 위한 연구를 SK Seol 등이 진행했다[3].

## 2.2 침지 전극에 의한 국부적층 방식

그림 3에서와 같이 A Kamaraj 등은 제작한 전극을 전해액에 침지하고 다양한 형상을 적층했으며, 전극 하부의 금속이온 농도가 확산 방식으로 공급된다는 가정 아래 상용 S/W를 통해서 시뮬레이션함으로써, 전극의 크기와 전극과 기판 사이의 거리 등에 따른 금속이온 농도의 변화를 관찰하면서 적층 형상 중앙부에서 발생하는 공동현상(Cavitation)의 원인을 분석하고자 했다[4].



Diffusion controlled near electrode, kinetics controlled at cathode away from electrode (geometry of simulation, y is μm)

Concentration profile along horizontal at 0.5 μm above substrate (10 μm gap, 5V, 300 μm tool)  
► Electrode gap is maintained very small, no deposition taking place directly below tool electrode ► Larger tool size is less effective as ions migrate

Ni deposition : no deposition in interior because of depletion region at small electrode gap

Fig 3. 전해액 침지 전극 사용한 금속 적층 실험[4]

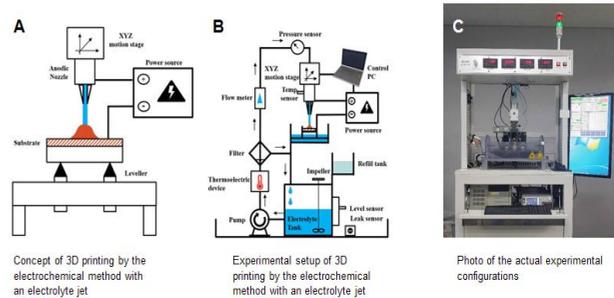


Fig 4. 노즐 유체역학 방식의 금속적층 및 장비 개발[5]

## 2.3 전해액 노즐 유체역학 방식

그림 4에서 보듯이 YK Kim 등은 금속 적층속도를 산업적인 수준까지 높이고 중앙부 적층이 늦어지는 현상을 보완하기 위하여, 전해액을 노즐로 분사하면서 이를 양극으로 사용하는 적층방식을 개발했고, 이러한 공정을 시제품 장비로 제작하여 노즐과 기판의 간격, 전해액 유량, 전류량, 전해액의 조성 등을 조절하면서 다양한 형상의 금속 적층물을 제작했다[5-7].

## 3. 선택적 전기화학 3D 프린터 개발

### 3.1 침지전극 및 노즐 유체역학 복합 방식

그림 5에서 볼 수 있듯이 침지전극과 노즐 유체역학 장점을 복합하면, 금속의 적층품질을 향상시키면서도 PCB 업계에 적용 가능한 높은 전류밀도를 얻을 수 있으며, 구리, 니켈, 은을 기준으로 국부적으로 약 150~400 ASD(Amp/dm<sup>2</sup>)까지 도금(적층)속도를 증가시킬 수 있다.

이러한 방식의 적층장비는 구리, 니켈, 은, 금, 주석과 같이 도금이 가능한 금속은 모두 프린팅이 가능할 뿐만 아니라, 금속을 이온 단위로 적층하기 때문에 전기전도도가 거의 순금속에 가까운 정도로 높으며, 구리 기준으로 약 5.96x10<sup>7</sup> S/m 수준을 달성하였다.

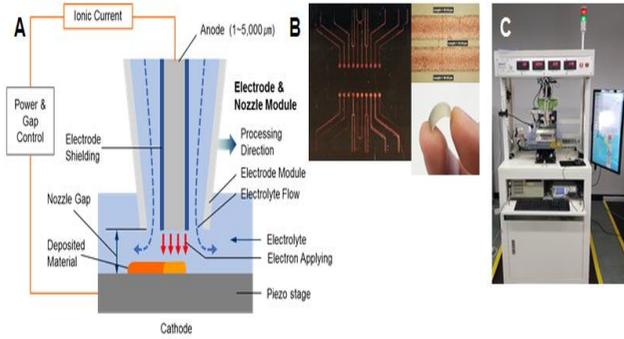
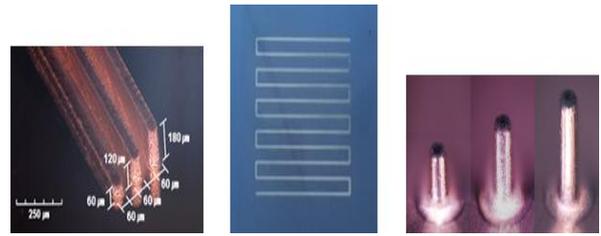


Fig 5. 침지전극과 노즐 복합방식 개발 및 제품 적층

량 조건을 소프트웨어 기반으로 최적화해야 하는 실험연구가 필요하다.



초고 중형비 회로 회로 연속배선 다양한 범프 적층

Fig 7. PCB 회로 및 범프 적층 사례

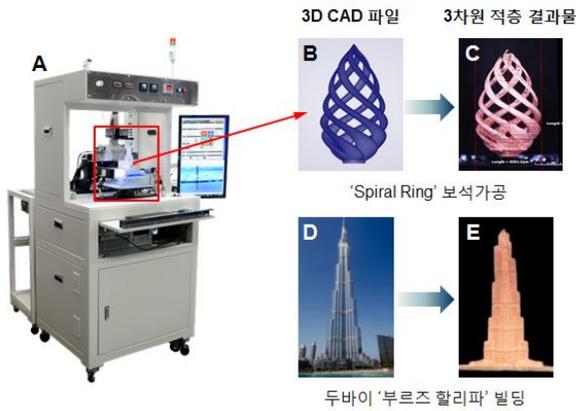


Fig 6. 전극노즐 방식 장비에서 3D CAD기반 적층조건 최적화

전자회로 적층에 있어서 선폭 20  $\mu\text{m}$ , 선 간격 20  $\mu\text{m}$ 이 가능할 뿐만 아니라, 회로 및 범프 등의 구조물의 중형비를 1:5 이상 높일 수 있고, 그림 5의 B에서 보듯이 투명 고분자 재료의 표면에 약 1  $\mu\text{m}$ 의 종자층(Seed layer)을 먼저 도금한 후 정밀회로를 성형하는 것이 가능하며, 같은 방식으로 절연재료(PSR, Photo Solder Resist) 위에 회로를 적층한 다음 적층되지 않은 나머지 종자층은 마지막에 청공정에서 제거하면 된다.

### 3.2 3D CAD 기반 3차원 적층조건 최적화

그림 6의 B~C와 D~E에서 볼 수 있듯이, 3차원 CAD 데이터를 근간으로 제품을 적층할 수 있기 때문에 일반 도금 공정에 비해서 높은 설계 자유도를 가질 수 있고, PCB 기판에 회로 또는 범프 등을 적층하는 경우 임의로 특정 부분의 높이를 자유롭게 조절하는 것이 가능하다.

금속이온 적층 방식이므로 적층 후에 잔류응력이 최소화 된다는 강점이 있고, 도금이 가능한 금속은 모두 3D 프린팅을 할 수 있다는 점이 높은 응용력을 기대하게 하지만, 3D 형상의 각 부위를 이동하는 전극의 경로에 따라서 전류 및 전해액 유



(b) MLB 양산순서 및 3D 프린터 위치

Fig 8. 일반적인 MLB 구조 및 양산순서와 3D 프린터 배치

그림 7 (a)에서는 동박 적층기판(CCL, Copper Clad Laminate) 위에 선 폭 60  $\mu\text{m}$  및 선 간격 60  $\mu\text{m}$ 으로 중형비 1:1, 1:2, 1:3의 구리 회로를 동시에 프린팅(적층)한 것이며, 선 폭과 선 간격은 각각 20  $\mu\text{m}$  이하가 가능하며 중형비는 1:5까지 시제품 제작이 이뤄지고 있다.

그림 7 (b)는 다결정 실리콘 위에 선 폭 200  $\mu\text{m}$ , 두께 30  $\mu\text{m}$ 의 니켈(Ni) 회로를 연속 배선으로 제작한 것으로서, 구리 또는 은으로 임의의 회로를 프린트하거나, 세라믹 기판 또는 동박 적층기판 위에 고온 내열성을 지닌 은(Ag) 접합부를 제작하는 것이 가능하다.

그림 7 (c)에서 보듯이, 동박 적층기판 위에 직경 20~150  $\mu\text{m}$ , 두께 50~200  $\mu\text{m}$ 의 다양한 범프들을 제작한 샘플 사례를 보여주고 있으며, 수요 업체의 요구에 따라서 상·하단부 직경 허용편차, 상단부 모서리 곡률 허용, 수직 각도 허용편차 등을 만족시키도록 적층조건을 최적화하여 다양한 규격을 충족할 수 있다.

### 4. 3D 프린터 PCB 양산공정 적용

#### 4.1 MLB 양산공정에서 3D 프린터 배치

그림 8 (a)은 전형적인 MLB(Multi Layer Board)의 구조 및 비아홀(Via Hole)을 통한 각 층 간의 접속 방식을 보여 주고 있다. 그림 8 (b)에서 보듯이 MLB 양산공정은 내층의 가공, 적층, 외층의 3단계 가공 순서로 이뤄져 있으며, 수직 연속 도금장치 및 각종 가공공정의 생산성을 위한 표준화 크기가 통칭 판넬(Panel)로 칭하는 크기이기 때문에, 3D 프린터는 판넬을 스트립(Strip) 크기로 가공하는 외형가공 이후에 적용이 가능하다. 이에 대해서 4.2절에서 좀 더 구체적으로 고찰하고자 한다.

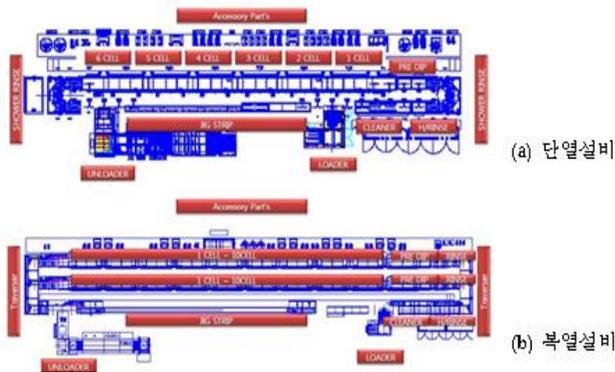


Fig 9. PCB 양산공정의 전형적인 수직 연속 도금장치 [8]

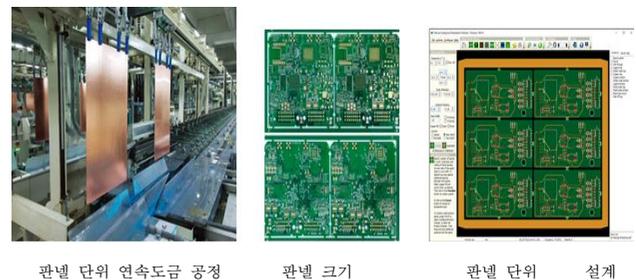
#### 4.2 생산단위 크기(Sizing) 고찰

그림 9는 국내 PCB 양산공정에서 많이 사용되고 있는 수직 연속 도금장치의 전형적인 레이아웃을 나타낸 것으로서, 그림 9 (a)는 수직 연속 구리도금 6개 셀 기준단열설비를 나타내고, (b)는 수직 연속 구리도금 복열설비를 나타내고 있다. 여기에 사용되는 생산단위의 표준 크기는 흔히 판넬 크기로 정의하며, 그림 10에서 보듯이 표준적으로 가공되는 등판 크기인 610 mm x 530 mm 이내에서 많은 업체가 570 mm x 490 mm을 판넬의 크기로 사용한다. PCB 양산공정에서 사용하는 페이스트 프린터, SMD Pick & Place 장비, Vapor Phase 솔더링 시스템 등에 따라서 판넬의 크기가 달라지기도 한다.

그림 11에서는 판넬과 스트립 단위 크기를 비교하면서, 스트립 내의 단위 유닛과 그 내부에 수 천 개 이상 형성되는 마이크로 범프의 직경을 개념적

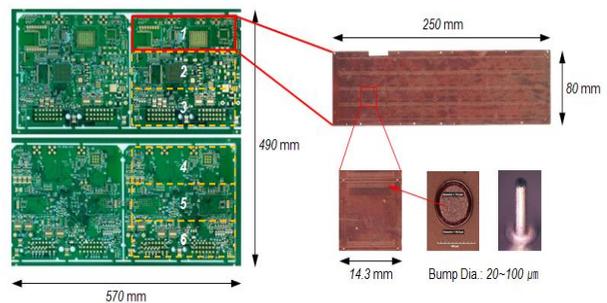
으로 나타내었다. PCB 기판을 스트립 크기로 가공한 이후 두께 방향 휨이 약 1~2 mm 발생하고 있으나, 만약 판넬 크기로 3D 프린팅을 진행한다면 판넬 두께 방향으로 약 1~4 mm 이상의 휨을 제어하면서도 직경 20~150 μm, 높이 50~200 μm의 범프를 ±1.0 μm 정확도로 프린트해야 하는 어려움이 발생한다.

판넬 단위 크기의 3D 프린팅은 상기와 같은 두께 방향의 휨 문제 발생, 제조사의 치수 공차의 증가, 정밀 치수의 반복 신뢰성이 현저히 감소할 뿐만 아니라, 판넬 단위 크기에 ±1.0 μm 정확도로 3D 프린팅 전극을 이동시키기 위한 3차원 구동부 및 초정밀 정반(Ultra-Precision Stage) 부품의 비용이 기하급수적으로 증가하여, 3D 프린터의 제조 비용을 산업적인 수준으로 유지할 수가 없게 된다.



판넬 단위 연속도금 공정      판넬 크기      판넬 단위      설계

Fig 10. 판넬 크기 단위의 PCB 제품 양산 및 설계



(a) 판넬 단위 크기      (b) 스트립(Strip) 단위 크기

Fig 11. 판넬 및 스트립 단위와 범프 직경 비교

#### 4.3 PCB 공정설계 및 3D 프린터 적용

그림 12에서 상부방향(Top View)에서 보듯이 판넬 단위 크기로부터 스트립으로 외형가공된 외곽 치수와 마이크로 범프가 프린트 될 위치가 항상 동일하지 않기 때문에, 매번 스트립을 3D 프린터로 로딩할 때마다 약속된 정합키(Alignment Key)를 기준으로 정확하게 정합을 이뤄지도록 해야 하고 이때 2개 이상의 스마트 비전 시스템이 필요하다.

그림 12의 정면방향(Front View)에서 보듯이 매번 스트립을 로딩할 때마다 클램프로 기판 외곽

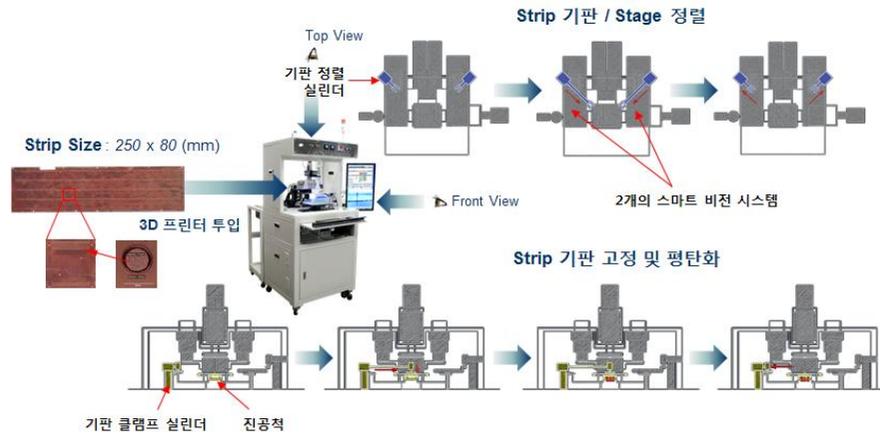


Fig 12. 3D 프린터에 스트립 로딩 후 정합 및 평탄화 방안

부를 잡고 기판의 고정 및 평탄화를 진행하면서, 위에서 서술한 전극의 초기 위치 정합을 동시에 달성해야 한다. 이렇게 정합이 이뤄진 스트립 위에서 산업적인 생산속도를 얻기 위해서는, 제작하고자 하는 범프들을 다중전극 모듈(Multi Electrode Module)로 적층하는 것이 필요하고 다중전극의 크기를 스트립의 1/4, 1/2, 전체 크기로 단계적으로 개발 및 검증하는 것이 수반되어야 한다.

현재 개발된 3D 프린터로 각종 구리(Cu) 범프, 전력반도체 PCB의 은(Ag) 접합부, 마이크로 스페이서(Spacer) 등을 생산하는데 있어서, 산업적인 생산속도를 얻기 위한 멀티전극의 개발이 필수적이며 전력반도체 PCB의 은 접합부와 몇 가지 마이크로 스페이서와 같이 하부의 크기가 mm x mm 수준인 경우에는 이미 개발된 멀티전극으로 시작업 샘플들을 제조하고 있으나, 직경 20~150  $\mu\text{m}$  수준의 범프 제품군은 정밀 멀티전극의 제작기술을 신뢰성 있게 확보하는 것과, 단계적인 검증을 지속적으로 추진하고 있는 시점에 도달해 있다.

## 5. 고 찰

선택적 전기화학 3D 프린터의 생산속도 (150~400 ASD)는 상당히 빠른 편이지만 이는 국부적인 지역을 의미하고, 제작할 면적이 넓어지면 전극이 이동하는 횟수와 속도만큼 생산성이 떨어지게 된다. 따라서 멀티전극의 개발을 통해서 프린트할 전면 또는 분할 영역을 Z방향 움직임으로 한번에 적층하는 방식이 매우 효과적이며, 이를 위해서는 PCB 양산공정의 어느 지점에 배치할 것인지, 생산단위 크기(Sizing)의 선정, 로봇 이송을 포함한

공정의 설계와 관련하여, PCB 업체와 3D 프린터 설계·제작 업체 사이에 긴밀한 협력과 의사결정이 필요하다.

선택적 전기화학 3D 프린터는 PCB 양산공정에 맞춤형으로 개발하는 것이 필수적이며, 현재까지의 멀티전극 제작 기술로도 가능한 제품에 우선 적용하여 양산 경험을 선점하는 것이 기업 경쟁력에 도움이 될 것으로 판단된다. 이러한 측면에서 국내 PCB 기업들과 3D 프린터 설계·제작업체 사이의 협력 경험과 인프라를 신속히 갖추어서, 이것이 국내 PCB 기업들 및 공급망(Supply Chain)의 상부 국내 기업들이 글로벌 제품 개발 개념에서 성공을 거두도록 후방에서 지원하는 것이 가능하다고 예상된다.

## 6. 결 론

본 기술자료에서는 금속의 전기화학 국부적층에 대한 연구를 요약했고, 선택적 전기화학 3D 프린터의 개발 현황을 소개하고자 했으며, 이를 PCB 양산공정에 적용하기 위하여 필수적으로 수반되는 문제를 어떻게 협력적으로 극복할 것인지 고찰하고자 했다.

## Acknowledgment

본 연구는 중소벤처기업부의 기술개발사업 [S3106002]과 산업통상자원부의 글로벌주력산업품질대응부리기술개발[20016445]의 지원에 의한 연구임

## References

- [1] 김성빈 외, 전기화학 및 노즐 유체역학 방식의 3D 프린터 개발을 통한 금속 적층공정 특성 분석과 초미세 인쇄전자회로 제작, 대한금속재료학회, 3D 프린팅 심포지엄 (2021)
- [2] Jie Hu and Min-Feng Yu, Meniscus-confined three-dimensional electrodeposition for direct writing of wire bonds, *Science*, 329 (2010) 313.
- [3] SK Seol, et al., Electrodeposition-based 3D printing of metallic microarchitectures with controlled internal structures, *Small*, 11 (2015) 3896.
- [4] A Kamaraj, S Lewis and M Sundaram, Numerical study of localized electrochemical deposition for micro electrochemical additive manufacturing, *ScienceDirect*, 42 (2016) 788.
- [5] YG Kim, et al., The characteristics of selective 3D metal additive process using electrochemical deposition and nozzle fluid dynamics, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6 (2020) 1.
- [6] 김영국 외, 전기화학적 금속 3D 프린터의 적층 조건 연구를 통한 마이크로 코일 제작, 한국표면처리공학회지, 53 (2020) 138.
- [7] 박찬규 외, 선택적 금속 전착에 대한 전해질 온도 및 전류밀도 영향분석, 한국표면처리공학회지, 51 (2018) 400.
- [8] 홍순관 저, 새로운 PCB 제조기술 입문, 복두출판사, (2017)