



플라스틱 도금 기술에 대한 이해와 동향

노지왕, 배인경, 김현우, 김선규*

국립부경대학교 공업화학·고분자공학부 공업화학전공

Understanding and trends in plastic plating technology

Jiwang Noh, Ingyeong Bae, Hyunwoo Kim, Sunkyu Kim*

Department of Industrial Chemistry, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

(Received 05 June, 2024 ; revised 21 June, 2024 ; accepted 21 June, 2024)

Abstract

The plastic plating process refers to coating a thin metal film onto a plastic surface. This technique has become essential for replacing costly metal products while maintaining equivalent performance, making plastic plating a critical technology. This paper presents an overview of the methods and future prospects of plastic plating.

Keywords : Plastic plating; Electroplating; Electroless plating; 3D printing.

1. 서 론

1860~1900년대에 플라스틱은 생활 양상에 따라 문화적, 경제적, 및 상업적으로 다양하게 이용되어 왔다. 세계 대전 후 인류의 삶의 질은 윤택해졌고, 소비에 대한 욕구가 높아지면서 플라스틱에 대한 수요가 높아지기 시작했다. 이에 따라 대량 생산 체제로 산업의 방향성이 변경되었고, 그 결과 플라스틱은 19세기 초 산업 혁명이 시작된 이후부터 수많은 발전을 거치며 과학, 영화, 및 일상 등 다양한 방면에서 우리의 삶에 영향을 미치고 있다. 플라스틱 도금이란, 플라스틱 표면 위에 얇은 금속 막을 덮는 기술이다. 도금된 플라스틱은 금속 제품에 비해 가볍고 가격이 저렴하며 가공 측면에서 이점을 가지고 있다. 또한 무게를 증가시키지 않고도 금속과 동등한 외관을 가질 수 있

고, 금속 제품과 동등한 성능 향상을 기대할 수 있다. 게다가 도금되지 않은 플라스틱에 비해 물리 화학적 물성 및 내수성 등을 향상시킬 수 있다[1, 2]. 이를 바탕으로 플라스틱 도금은 자동차 산업, 전자 제품, 및 우주 항공 분야에서 다양하게 응용되고 있다. 본 논문에서는 이러한 플라스틱 도금의 배경을 바탕으로 플라스틱 도금의 여러 공정 방법과 전망에 대해 논의하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 전기 도금(Electroplating)

전기 도금이란 전기화학적 반응으로 금속 표면에 코팅하여 표면을 보호하는 방법이다. 이는 주로 마찰과 부식에 대한 저항성을 제공하고 미학적인 측면을 향상시키는 것을 목표로 한다[3]. 전기 도금은 저렴한 비용과 우수한 증착성, 및 높은 균일성을 가지기 때문에 플라스틱 도금을 하

*Corresponding Author : Sunkyu Kim
Department of Industrial Chemistry, Pukyong National University
Tel: +82-51-629-6443 ; Fax: +82-51-629-6429
E-mail: sunkyuk@pknu.ac.kr

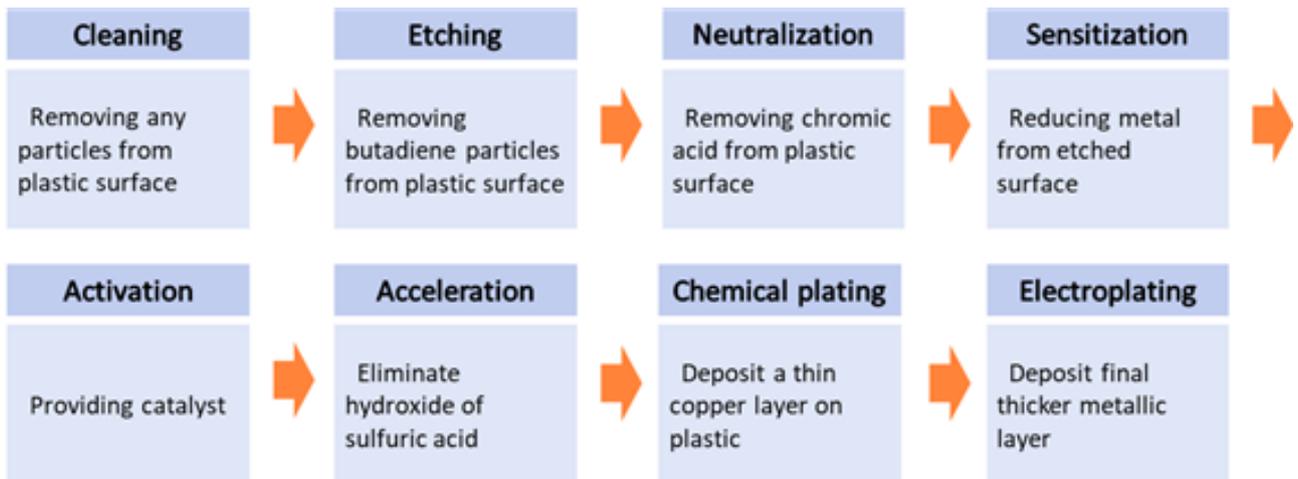


Fig.1 . Flowchart of the electroplating process.

는 데 있어서 널리 사용되는 방법이다. 코팅하는 플라스틱은 아크릴로나이트릴 부타디엔 스타이렌(Acrylonitrile butadiene styrene, ABS), 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC), 폴리설펜(Polysulphone, PSF), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP), 폴리테트라플루오로에틸렌(Polytetrafluoroethylene, PTFE) 등이 있다 [1]. 이 중, 전기 도금에 가장 일반적으로 사용되는 플라스틱은 ABS이며 전기 도금하는 과정은 그림 1에 나와 있는 공정을 따른다.

2.1.1. 전처리 과정(Pretreatment process)

전기 도금을 하기 위한 첫 번째 과정은 ABS 표면에 묻어있는 먼지나 윤활유 등을 제거하기 위한 탈지 작업이다. 탈지 작업은 플라스틱을 계면 활성제에 넣은 이후 에칭하는 과정을 말한다. 에칭은 주로 설풀크롬산 용액($\text{Cr}(\text{SO}_4)_2$)을 사용하며, 에칭 작업 동안 폴리머 표면의 작용기가 축진되고 형태학적 변형이 발생한다[4]. 설풀크롬산 용액과 플라스틱의 반응으로 인해 카보닐 작용기가 영향을 받고 표면이 소수성에서 친수성으로 바뀌면서 표면에너지가 높아진다. 그 결과, 금속 코팅과 폴리머 표면 간의 접착력은 높은 성능을 보인다[5, 6].

그림 2는 언더 에칭(그림 2a), 최적 에칭(그림 2b), 오버 에칭(그림 2c)을 나타낸 것이다. 최적 에칭의 경우 ABS 표면의 부타디엔 입자가 효과적으로 제거되고 금속층과 ABS 표면의 우수한 기계적 결합을 도입할 수 있는 미세 기공들을 형성하게 된다. 언더 에칭의 경우 ABS 표면의 기공을 형성하는 부타디엔 입자를 효과적으로 제거하지 못하므로, 금속층과 ABS 표면 사이에 낮은 기계적 결합을 하게 된다. 이는 기계적 결합에 대한 특성을 거의 제공하지 못하므로 코팅된 금속층은 힘을 가하지 않아도 쉽게 벗겨진다. 오버 에칭의 경우 ABS 표면의 과도한 에칭으로 인해 접착 성능이 현저히 저하된다. 또한 ABS 전체를 약화시켜 궁극적으로는 접착 특성에 좋지 못한 영향을 미치게 된다. 즉, 산 에칭의 시간이 플라스틱 표면적에 기여하는 접착력보다 더 강한 인자이다[8, 9].

에칭이 완료되면 Cr^{6+} 는 인체와 환경에 매우 해로우므로 중아황산나트륨($\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$)을 이용하여 Cr^{6+} 를 Cr^{3+} 로 환원하는 중화 작업을 실시하게 된다[9, 10]. 그 후, 후속 코팅이 원활히 이루어지도록 촉매 역할을 하는 팔라듐(Pd)을 증착시킨다. 이를 SnCl_2 와 HCl 용액에 담그면 ABS 표면의 화학적 반응성이 커지게 되고 ABS 표면에 Sn^{2+} 가 형성된다. 그 후 여러 가지 활성화 공정을 거치면서 팔라듐이 플라스틱 표면의 기공에서 활성화된다. 이

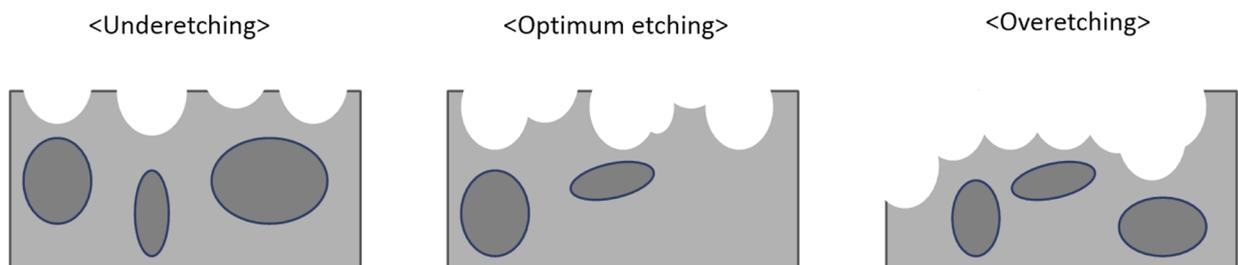


Fig.2. A through-thickness schematic of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) in (a) underetching, (b) optimum etching, and (c) overetching conditions.

때 도금된 금속층에 존재하는 Pd와 Sn의 비율은 약 7:1 정도로 알려져 있다. 최종적으로 ABS 표면에 Sn/Pd가 활성화되고 후속 코팅을 하기 전 단계가 마무리된다[2, 4, 7, 12-14, 16].

2.1.2. 구리 전기 도금

전기 도금을 하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 양극과 음극을 전해질 수조에 배치하고 전하를 흘려준다. 전기가 흐르면, 음이온은 양극으로 양이온은 음극으로 이동하며, 금속이 외관적으로 눈에 보이는 결함이 매우 낮고 박리가 발생하지 않은 얇고 균질한 도금층을 형성한다. 전기 도금은 쉽게 제어 가능하고 정교한 도금이 가능하므로 광택과 내식성을 높일 수 있다. 전기 도금에 사용되는 금속 소재는 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 구리(Cu), 철(Fe), 니켈(Ni), 아연(Zn) 등 여러 가지 금속이 사용되며 원하는 목적에 맞춰 금속을 선택할 수 있다. 구리는 가격이 상대적으로 저렴하고 플라스틱 표면과 우수한 접착성을 제공하여 주로 사용된다. 구리를 이용하여 전기 도금할 경우, 플라스틱 강도가 증가하고 전도도가 향상된다. 또한 인장 강도가 증가하기 때문에 형태적 측면에서 유연성을 가질 수 있고, 도금을 통해 부식에 대한 저항성을 얻을 수 있다. 전기 도금에서 가장 중요한 요소는 코팅의 두께와 이를 구성하는 금속의 함량이다. 구리 도금 중간층의 두께가 두꺼워질수록 내부의 응력이 증가하여, 외부의 하중을 받을 경우 균열이 생기기 쉽다. 그러므로 구리를 이용한 도금에서 도금층의 두께가 얇으면서 도금하는 금속을 50%~60%의 비율로 구성할 때, 전기 저항성이 증가하므로 원하는 목적에 맞게 도금층의 두께를 조절하는 것이 필요하다[15-17].

2.1.3. 니켈 전기 도금

니켈 전기 도금은 3단계를 거치며 이루어진다. 먼저 플라스틱에 전도성을 부여하기 위해 폴리피롤(Polypyrrole, PPy) 용액에 플라스틱을 교반시킨다. 그 결과, 폴리피롤이 플라스틱의 표면 위로 화학적으로 증착한다[15]. 플라스틱과 폴리피롤 용액 사이의 접착은 기계적 맞물림, 분자 확산, 정전기적 상호 작용 등으로 설명할 수 있다[3]. 폴리피롤 용액 속에서 플라스틱 표면에 대한 처리가 정상적으로 이루어졌다면, 물고기 비늘의 형태

를 띤다[18]. 하지만 표면 처리가 정상적으로 이루어지지 않으면 물고기 비늘 형태와는 다른 거친 형태를 띤다. 이를 통해 폴리피롤 용액이 플라스틱 표면에 거칠기를 유발한다는 것을 알 수 있다. FeCl₃를 첨가하면 산화에 의해, 검은색의 균일하고 접착력 있는 폴리피롤 필름이 플라스틱 위로 코팅이 된다. 두 번째 공정 단계는 폴리피롤 용액으로 처리한 플라스틱 표면에 구리를 전기 도금한다. 전기 분해 시간은 코팅 형태에 큰 영향을 미친다. 전기 분해 시간이 증가함에 따라 구리 입자는 4 μ m 정도의 크기부터 점점 증가하며 가장 안정한 형태인 입방체의 형태로 성장하여 구리 코팅이 매끄럽게 분산된 것을 확인할 수 있다. 또한 전기 분해 시간이 증가하면 폴리피롤이 플라스틱 표면에 균열이 생기지 않고 매끄럽고 촘촘한 질감을 형성하게 된다. 마지막 공정은 니켈을 구리 도금 위로 증착시킨다. 이 과정이 일어나기 전에 플라스틱 표면 위로 구리가 균일하게 도금되었으므로 니켈 코팅은 더 쉽게 진행된다[15, 18].

2.2. 무전해 도금(Electroless plating)

무전해 도금이란 용액에 존재하는 금속 이온을 전기적인 에너지를 가하지 않고 환원제를 이용하여 금속 이온을 환원시켜 표면에 석출시키는 방법을 말한다. 이 기술은 자가 촉매적인 환원 메커니즘을 사용하여 금속 특성을 부여하고 재료의 품질을 향상시킨다. 해당 기술은 상대적으로 낮은 온도에서 가공할 수 있으며, 비용이 저렴하고 처리 시간이 짧기 때문에 매력적인 도금 기술 중 하나이다. 또한 균일한 도금을 하는데 있어 무전해 도금이 전기 도금보다 상대적으로 효과적이다.

무전해 도금 공정은 다음의 공정을 따른다(그림 3)[2]. 일반적으로 무전해 도금욕에는 금속 이온 공급원(Metal ion source), 환원제(Reducing agent), 착화제(Complexing agent), 안정제(Stabilizer)가 포함된다. 이때 무전해 도금 공정을 실행하는데 매개변수는 도금욕 제어 온도와 pH이다. 먼저 시료를 용액에 담가 금속화 과정을 거치게 된다. 금속화를 달성하려면 적절한 침지 시간과 작업 온도가 필요하다. 첫 번째로 샘플 표면에 묻어있는 윤활제 및 먼지를 제거하는 작업을 실시한다. 다음으로 에칭을 실시하는데, 에칭 용액은 전기 도금과 마찬가지로 설펡크롬산 용액을 사용한다[19]. 하지만 무전해 도금에서 사용되

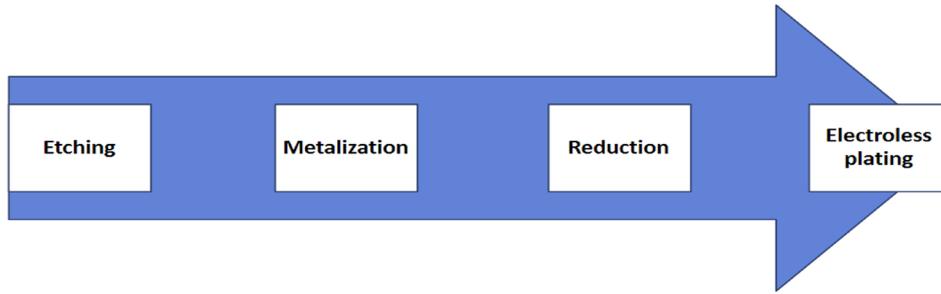


Fig. 3. Flowchart of the electroless plating process.

는 설포크롬산 용액의 크롬 농도는 전기 도금에서 사용하는 크롬 농도의 약 두 배로 매우 해로운 영향을 끼친다[13, 20]. 따라서 도금 과정에서 사용되는 주석, 팔라듐 그리고 크롬이 없는 공정과 귀금속을 재사용하는 방법이 연구개발 중이다[20, 21].

2.2.1. 무전해 증착의 기본 과정

무전해 금속 도금은 단순한 방법을 이용하여 높은 전기 전도도를 얻을 수 있으므로 플라스틱의 산화-환원 전위(Redox potential)를 이용하는 데 이는 Gibbs 자유에너지, 속도 상수 등 여러 매개변수를 고려하여 도금의 경향성을 예측할 수 있다[22].

2.2.2. 구리를 이용한 무전해 도금

구리의 무전해 증착의 경우 고려해야 할 중요한 요소는 구리 이온의 환원 반응을 효과적으로 촉진하는 촉매와 환원제 조합을 식별하는 것이다[23]. 일반적으로 환원제로는 포름알데하이드가 많이 사용된다. 포름알데하이드의 경우 독성 및 안정성의 문제가 있음에도 불구하고, 우수한 환원 특성과 고품질의 구리를 생산할 수 있기 때문에 여전히 사용량이 많다. 포름알데하이드의 환원 반응을 통해 구리 이온과 메틸렌 글리콜(Methylene glycol) 음이온으로 생성된다[22]. 메틸렌 글리콜 음이온은 촉매의 표면에서 탈수소화 반응을 하며, 알칼리 환경에서 수산화물 이온과 산화 반응을 한다. 이 과정에서 전자가 방출되고 구리 이온이 금속으로 환원된다. 다양한 역할을 하는 팔라듐 고체 촉매는 메틸렌 글리콜 음이온이 흡착되는 과정에서 분해될 때 수소를 상당량 흡착한다. 이로 인해 수소 산화 반응을 일으키며, 구리 금속의 증착을 촉진시킨다. 이렇게 형성된 무전해 구리 도

금층의 접착력은 필름의 고유 응력, 구조적 결함, 다공성과 같은 매개변수에 따라 달라진다. 도금된 구리의 접착력은 4~5N/cm 이상의 접착력을 나타내며, 이는 PCB(Printed circuit board) 산업에서 회로 제작 시 가해지는 열 응력을 견디기에 충분한 값이다.

2.2.3. 니켈-인을 이용한 무전해 도금

가장 일반적으로 많이 사용되는 무전해 도금의 구성은 니켈-인(Ni-P)이다. Ni-P 도금은 제조 원가가 낮고 적용하기 쉬워 광범위하게 개발되었다. 또한 내부식성, 내마모성, 연성, 경도 등이 뛰어나므로 실제 적용에 있어서 매우 유용하다[24]. 도금액 용액은 환원제로 보통 차아인산나트륨(NaH_2PO_2)이 사용된다. Ni-P를 이용한 도금에서는 인의 함량에 따라서 경도의 차이는 거의 발생하지 않는다. 일반적으로 Ni-P 무전해 도금하는 방법은 다음과 같다. 먼저 전처리 단계에서 금속 표면의 산화물층을 수산화나트륨(NaOH) 수용액으로 제거한 후, 염화수소(HCl) 용액에 담근다. 금속 표면은 에칭되고, 그 후 도금액에 침지한다. 도금액에서 황산니켈(NiSO_4)은 니켈 이온을 생성, 환원제로는 차아인산나트륨, 착화제로는 시트르산나트륨($\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)이 사용된다. 이후 산성 조건으로 유지하여 꺼낸 후, 증류수로 세척하면 일련의 과정을 마치게 된다[26].

2.2.4. 폴리아미드(PA)를 이용한 무전해 도금

플라스틱 소재에 무전해 크롬 코팅으로 소재 특성 향상에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 폴리아미드는 ABS에 비해서 열 안정성이 상대적으로 높다는 장점을 가지고 있다[7, 27, 28]. 폴리아미드와 같은 합성 폴리머는 천연 폴리머에 비해서 상대적으로 적은 표면 기능기를 가지는데, 이는

약한 부착력과 불균일한 표면 측면에서 좋지 못한 단점으로 이어진다. 따라서 무전해 도금과 같은 습식 화학적 방법을 통해서 금속 코팅을 시행할 시 부정적으로 작용하게 된다.

2.3. 3D 프린팅 도금

산업과 기술이 계속해서 발전하고 진보함에 따라, 금형 공정의 정교함으로는 제작할 수 없는 형상을 실현하기 위한 연구가 이루어지고 있다. 하지만 금형은 한번 제작하고 나면 결과를 수정하기가 어렵다. 따라서 현재 금형 공정의 기술을 뛰어넘음과 동시에 결과물을 수정 가능한 기술의 필요성이 제기되었다. 이에 3D 프린팅을 활용한 플라스틱 도금 방법이 대두되었다[29, 30]. 3D 프린팅을 이용하여 플라스틱을 도금하게 되면 현재의 금형 공정보다 발전한 정교함과, 디자인에 대한 자유도가 상승하여 원하는 요구에 맞춰 다양한 상품을 만들어 낼 수 있다. 3D 프린팅 기술은 물리적인 성형 원리와 성형 재료에 따라서 광중합 3D 프린팅(Photo-polymerization 3D printing), 압출 기반 3D 프린팅(Extrusion-based 3D printing), 파우더 기반 3D 프린팅(Powder-based 3D printing)으로 나눌 수 있다[31]. 일반적으로 플라스틱 도금에서 사용되는 3D 프린팅 기술은 AM(Additive modeling)이라 하며 특정 프로세스 형성 원리에 따라 용융 적층 모델링(Fused deposition modeling, FDM), 다중 광자 적층(Multiple photon

additive manufacturing, MPAM), 액상 광경화(Stereolithography, SLA), 선택적 레이저 소결 (Selective laser sintering, SLS), 전자 광선 용융(Electron beam melting, EBM), 하이브리드 적층 제조(Hybrid additive manufacturing, HAM) 등으로 분류할 수 있다[32, 33]. 그림 4는 3D 프린팅 도금의 기술체계를 나타낸 것이다.

2.3.1. 용융 적층 모델링(FDM)

FDM은 용융된 열가소성 수지를 반복적인 층으로 증착하는 3D 프린팅 기술 중 하나이다. FDM은 저렴한 비용과 편리한 유지 보수, 소규모 생산을 위한 복잡한 구성의 고품질 폴리머 부품을 얻을 수 있다는 점에서 많이 활용되는 기술이다[23]. FDM은 하나 이상의 플라스틱 재료가 녹고, 층층이 압출되어 구조물을 형성한다. 이때, FDM은 동시에 두 가지 이상의 플라스틱 재료를 융합하여 프린팅할 수 있어야 하며, 부품을 손상시키지 않고 용해될 수 있는 재료를 사용해야 한다[30]. 공정 방법으로는 먼저 필라멘트 형태의 플라스틱 소재를 가열시켜 녹인다. 이후 압출기 헤드를 통해 포인터에 제공한다. 헤드는 미리 입력된 장소로 이동하고 3D 모델의 레이어 위에 다른 레이어가 층층이 압출되어 표면을 형성한다. 그 후 표면에 금속을 압출하여 도금하게 된다[34]. FDM 기술은 미적 가치를 상승시킬 뿐만 아니라 더 나은 강도와 내화학성을 제공한다. 하지만 층 뒤틀림이라는 문제점은 3D 프린팅에서 아직 해결되지 못한 문

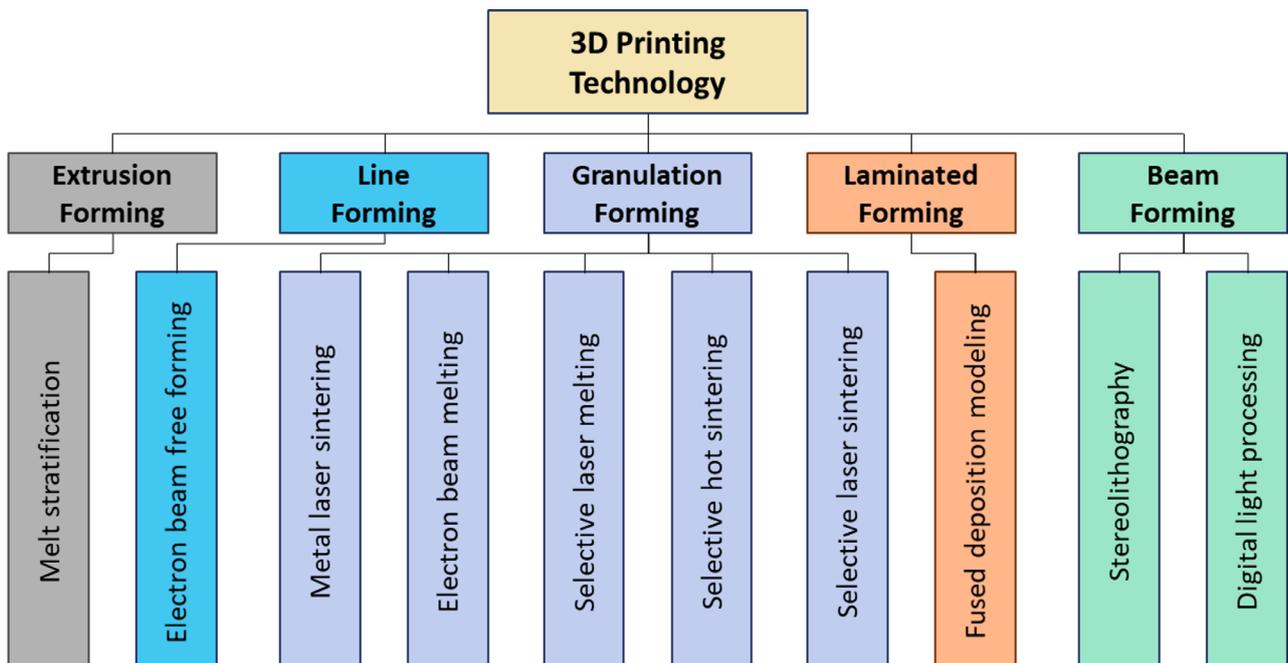


Fig. 4. A technology tree for 3D printing technology.

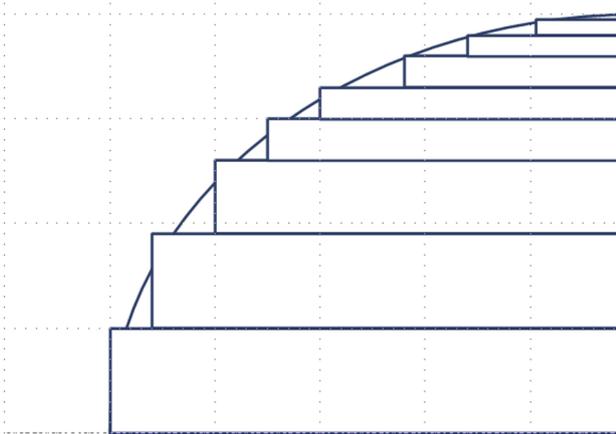


Fig. 5. A schematic diagram of the stair step effect.

제로 남아있다. 또한 제작되는 부품은 계단 효과 (Stair step effect)로 인해서 매우 거친 표면을 가진다. (그림 5)

거친 표면은 코팅 금속과 플라스틱 사이의 접착력을 약화시키므로 표면을 매끄럽게 만들기 위해 추가적인 공정이 필요하다. 또한 주로 사용되는 재료인 ABS는 비전도성 및 취약성 등 본질적인 한계가 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위해, 탄소 나노튜브나 산화 그래핀과 같은 탄소 기반의 충전재를 도입하면 플라스틱의 기계적 강도나 구조적 안정성, 저항성 방지하고 도금이 이루어지는 플랫폼 사이의 접착력을 높이면 층 뒤틀림을 방지할 수 있다 [15, 29].

2.3.2. 다중 광자 적층 제조(MPAM)

MPAM은 자석성을 가지는 분말 소재를 활용하여 다중 프로세스 적층 제조를 하는 기술이다[35]. 또 다른 정의는 금속이나 세라믹으로 구성된 다중 재료 구성 요소를 하나의 통합 부품으로 생산 및 제조하는 방법이다. MPAM은 FDM과 화학 증착 및 전기 도금 과정을 결합한 기능이 내장된 3D 프린팅을 가능하게 한다는 특징을 가진다. MAPM 방법에 대한 실험 수행은 다음 과정을 거친다. 먼저 ABS를 FDM 기술을 이용하여 3D 프린팅을 수행한다. 그 후 ABS 필라멘트를 압출하고 사포를 이용하여 후처리를 실시한다. ABS 샘플과 금속 간의 화학적 증착 이후 전기 도금을 수행하면 MPAM을 제조하는 일련의 과정이 마무리된다. 하지만 위의 제조 공정으로 생산된 플라스틱 장치는 금속-폴리머 경계면의 낮은 접착력으로 인해 구조적으로 안정하지 못하므로 수명이 짧다는 문제가 존재한다.

2.3.3. 하이브리드 적층 제조(HAM)

HAM이란 기존 AM의 기술을 더욱 경쟁력 있게 발전시킨 하이브리드 적층 제조 방법으로, 통신 장치, 마이크로 로봇 등 다양한 3D 전자 장치에 이용되고 있다[30]. HAM은 재료를 이용한 3D 프린팅 방법과 선택적 표면 처리의 두 가지 방식이 있다. 이 중 재료를 이용한 3D 프린팅은 3D 구조를 도금 불가능한 재료와 도금 가능한 재료로 인쇄하여 도금 가능한 재료만을 선택적으로 금속화하는 방법이다. 선택적 표면 처리에서는 레이저를 이용한 방법은 비용이 저렴하고 시간적 효율성, 고해상도 3D 패터닝 기능으로 인해 우수한 기술이다. 레이저 활성화 기반의 HAM은 사전에 확인된 기판을 촉매로 3D 프린팅한 다음, 기판 표면을 레이저 조사를 통해 선택적으로 활성화시켜 도금 시드(seed)를 생성하는 방법이다.

2.3.4. 선택적 레이저 소결(SLS)

SLS는 레이저를 이용하여 선택적으로 기판 표면을 소결시키는 방법이다. 이 방법에서 사용되는 재료는 용점이 낮은 금속이나 고분자를 혼합한 분말을 주로 사용한다. 가공하는 동안 용점이 낮은 물질은 녹지만 용점이 높은 물질은 녹지 않는 것이 이 방법의 특징이다. 용융된 재료는 접착이나 성형에 사용되게 되는데, 이때 개체에 기공이 발생하게 되어 개체의 기계적 특성이 낮아진다. 이러한 기계적 특성을 보완하기 위해 나온 방법이 액상 광경화이다. 이 방법은 레이저 소결 방법과 다르게 선택적으로 분말을 완전히 용융시키는 것이 특징이다. 액상 광경화는 바인더가 필요하지 않으며, 레이저 소결 방법에 비해서 성형 정확도와 기계적 성질이 우수한 것이 특징이다[29].

3. 결 론

산업 혁명 이후, 플라스틱 개발은 인류의 삶에 많은 변화를 가져왔다. 포장재, 의류뿐만 아니라, 경량화와 성능을 동시에 필요로 하는 우주 산업 및 자동차 산업 등의 분야에서 플라스틱의 수요가 높아졌다. 이러한 플라스틱은 더욱 발전하여 도금의 영역까지 확장되었다. 플라스틱 도금이라는 개념이 등장하고 난 후 여러 산업에서 적용되어, 더

많은 장점을 제공하였다. 1962년 ABS를 크롬산으로 처리하여 양호한 밀착성을 가지는 플라스틱 도금이 가능하게 되었다. 그 이후 주석-팔라듐 콜로이드를 이용한 전처리 방법이 개발되면서 전기 도금과 무전해 도금을 같은 장비에서 사용할 수 있게 되었다. 전기 도금은 균일한 도금 표면을 제공하고, 증착성이 좋다는 장점이 있다. 무전해 도금은 용액에 존재하는 금속을 전기적인 에너지를 가하지 않고 금속 이온을 플라스틱 표면에 석출시키는 방법으로, 단순하고 낮은 온도에서 가공이 가능하다는 점에서 매력적인 기술이다. 그러나 기존의 전기 도금과 무전해 도금에 사용한 설펡크롬산 용액은 환경에 매우 치명적인 영향을 끼친다. 또한 팔라듐, 주석 등 귀금속을 사용하기 때문에 비용적인 측면에서 부담이 되었고, 환경오염에도 악영향을 끼친다. 따라서 설펡크롬산이나 귀금속의 사용과 방출에 대한 영향을 줄이기 위한 접착 메커니즘에 대한 지식이 우선적으로 필요하다. 최근에는 3D 프린팅을 이용하여 플라스틱을 도금하는 방법들이 연구개발 중이다. 기존의 도금 방법에 비해 아직은 보완되고 연구되어야 할 부분이 많으나 기존 방법의 한계였던 복잡한 모형 제작이 가능해졌다. 또한 성형의 정확도와 기계적 성질 등 기존의 제품에 비해 월등히 높은 성능을 보인다. 앞으로도 친환경적이고 높은 정확도와 성능을 지닌 우수한 플라스틱 도금 방법이 연구 개발되어야 할 것이다.

Acknowledgment

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] R. Xiao, Z.L. Shen, P. Polaczyk, B.S. Huang, Thermodynamic properties of aggregate coated by different types of waste plastic: adhesion and moisture resistance of asphalt aggregate systems, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35 (2023).
- [2] R. Suman, D. Nandan, A. Haleem, S. Bahl, M. Javaid, Experimental study of electroless plating on acrylonitrile butadiene styrene polymer for obtaining new eco-friendly chromium-free processes, *Materials Today: Proceedings*, 28 (2020) 1575-1579.
- [3] D. Akhouri, D. Banrejee, S.B. Mishra, A review report on the plating process of fused deposition modelling (FDM) built parts, *Materials Today: Proceedings*, 26 (2020) 2140-2142.
- [4] R. Tao, L. Fatta, R. Melentiev, A.K. Tevtia, G. Lubineau, Contributions of chemical interactions and mechanical interlocking for the adhesion of electroplated copper to ABS in the Cr(VI) etching process, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 126 (2023) 103450.
- [5] R. Tao, H. Vovusha, X.L. Li, R. Melentiev, K.C. Zhu, M.R. Lanza, U. Schwingenschloegl, A.K. Tevtia, G. Lubineau, Characterizing ABS-copper chemistry-dependent adhesion: from the atomic to macro level, *Journal of Materials Research and Technology*, 29 (2024) 4384-4393.
- [6] L.A.C. Teixeira, M.C. Santini, Surface conditioning of ABS for metallization without the use of chromium baths, *Journal of Materials Processing Technology*, 170 (2005) 37-41.
- [7] A. Yudhanto, X.L. Li, R. Tao, R. Melentiev, G. Lubineau, Identifying adhesion characteristics of metal-polymer interfaces: recent advances in the case of electroplated acrylonitrile butadiene styrene, *Materials Today: Communications*, 35 (2023) 106218.
- [8] R. Melentiev, R. Tao, L. Fatta, A.K. Tevtia, N. Verghese, G. Lubineau, Towards decoupling chemical and mechanical adhesion at the electroplated metal/polymer interface via precision surface texturing, *Surface and Interfaces*, 38 (2023) 102875.
- [9] A. Trivedi, P.K. Gurralla, Investigation

- on electroless metallized fused filament fabricated ABS parts, *Materials and Manufacturing Processes*, 38 (2023) 960–970.
- [10] A. Santis, O. Arbeláez, L.A. Cardenas, J. Castellanos, P. Velasquez, Optimizing Cr(VI) reduction in plastic chromium plating wastewater: particle size, irradiation, titanium dose, *Emerging Science Journal*, 8 (2024) 17–27.
- [11] S. Prasad, K.K. Yadav, S. Kumar, N. Gupta, M.M.S. Cabral-Pinto, S. Rezanian, N. Radwan, J. Alam, Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: a sustainable approach, *Journal of Environmental Management*, 285 (2021) 112174.
- [12] P. Sun, X.X. Shen, P. Xu, W. Huang, Q.J. Xu, Conductive polyaniline film synthesized through in-situ polymerization as a conductive seed layer for hole metallization of printed circuit boards, *Applied Surface Science*, 665 (2024) 159649.
- [13] R. Melentiev, R. Tao, X. Li, A.K. Tevtia, N. Verghese, G. Lubineau, Mapping the coating failure modes of electroless plated metal on ABS polymer with micro-nano structured interface, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 126 (2023) 103471.
- [14] V. Vitry, J. Hastir, A. Mégret, S. Yazdani, M. Yunacti, L. Bonin, Recent advances in electroless nickel-boron coatings, *Surface and Coatings Technology*, 428 (2022) 127937.
- [15] C.J.C. Nocheseda, L.I.M. Ballesteros, M.L.M.L. Grande, E.B. Caldoná, R.C. Advincula, Copper-nickel electroplating of 3D-printed acrylonitrile butadiene styrene for interference and radiation shielding applications, *Materials Chemistry and Physics*, 308 (2023) 128193.
- [16] D. Xie, W. Wu, J. Huang, X. Wang, Y. Zhang, Z. Wang, P. Jiang, L. Tang, F. Wu, Q. Wang, Effect of electrodeposited Cu interlayer thickness on characterizations and adhesion force of Ni/Cu/Ni coatings on polyetherimide composite substrates, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 129 (2024) 103580.
- [17] R. Melentiev, R. Tao, L. Fatta, A.K. Tevtia, G. Lubineau, Effect of actual surface area on adhesion strength of copper electroplated on ABS plastic micro-textured by hot embossing, *Procedia CIRP*, 108 (2022) 210–215.
- [18] M. Bazzaoui, J.I. Martins, E.A. Bazzaoui, A. Albourine, Environmentally friendly process for nickel electroplating of ABS, *Applied Surface Science*, 258 (2012) 7968–7975.
- [19] R. Melentiev, R. Tao, G. Lubineau, Greener electrochemical plating of ABS polymer with unprecedented adhesion via hierarchical micro-nanotexturing, *Journal of Materials Research and Technology*, 24 (2023) 3575–3587.
- [20] W. Yuan, C. Teng, Y. Zhao, Q. Huang, X. Wang, K. Cai, Q. Song, L. Zhang, J. Zhu, L. Xu, K. Zhu, W. Xiong, Efficient recycling of surface-plated metals from ABS plastic waste via ammonium persulfate system, *Separation and Purification Technology*, 326 (2023) 124796.
- [21] J. Wang, R.Y. Zhou, J.X. Yu, H.S. Wang, Q.Y. Guo, K.Q. Liu, H.D. Chen, R.A. Chi, Sequential recovery of Cu(II), Cr(III), and Zn(II) from electroplating sludge leaching solution by an on-line biosorption method with dosage controlling, *Journal of Cleaner Production*, 337 (2022) 130427.
- [22] S. Ghosh, Electroless copper deposition: a critical review, *Thin Solid Films*, 669 (2019) 641–658.

- [23] N. Lazarus, J.B. Tyler, J.A. Cardenas, B. Hanrahan, H. Tsang, S.S. Bedair, Direct electroless plating of conductive thermoplastics for selective metallization of 3D printed parts, *Additive Manufacturing*, 55 (2022) 102793.
- [24] M. Kumar, A. Sidpara, Precision finishing of nickel-phosphorus plated carbon fibre reinforced polymer, *Surface Engineering*, (2024) 310-319.
- [25] M. Kumar, A. Sidpara, V. Racherla, Improving surface finish and wear resistance of electroless nickel plating using flexible abrasive tool, *Wear*, 546-547 (2024) 205326.
- [26] R.K. Alhamad, A.K. Hussein, L.K. Abbas, Improved acrylonitrile-butadiene-styrene surface properties via electroless (NiP-SiC) nanocomposite coating, *Chemical Physics Impact*, 7 (2023) 100375.
- [27] R. Akay, H. Yazici, Chromium coating of wollastonite filled polyamide 6 and evaluation of thermal cycle strength, *Journal of The Turkish Chemical Society Section B: Chemical Engineering*, 6 (2023) 107-122.
- [28] M.J. Choi, J.M. Cho, Y.H. Choi, M.H. Choi, C.S. Lee, H.K. Sung, K.S. Lee, K.H. Park, S.J. Hwang, Development of paint-free metallic plastic material for automotive parts, *Korean Chemical Engineering Research*, 60 (2022) 295-299.
- [29] H. Krupova, K. Sternadelova, J. Mesicek, Q.P. Ma, J. Hajnys, Experimental evaluation of selectively laser sintered polyamide 12 surface treatment for direct electrodeposition, *Progress in Organic Coatings*, 186 (2024) 107968.
- [30] P.R. Wang, J. Li, L.S. Deng, S. Liu, G.Q. Wang, J.W. Huang, X. Tang, L. Han, Laser-activated selective electroless plating on 3D structures via additive manufacturing for customized electronics, *Advanced Materials Technologies*, 8 (2023) 2300516.
- [31] N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan, An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications, 2nd International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, 35 (2019) 1286-1296.
- [32] A.T.K. Perera, K.W. Song, S. Umezu, H. Sato, Recent progress in functionalized plastic 3D printing in creation of metallized architectures, *Materials and Design*, 232 (2023) 112044.
- [33] C. Essbach, D. Fischer, D. Nickel, Challenges in electroplating of additive manufactured ABS plastics, *Journal of Manufacturing Processes*, 68 (2021) 1378-1386.
- [34] K.W. Song, Y. Cui, T.N. Tao, X.Y. Meng, M. Sone, M. Yoshino, S. Umezu, H. Sato, New metal-plastic hybrid additive manufacturing for precise fabrication of arbitrary metal patterns on external and even internal surfaces of 3D plastic structures, *ACS Applied Materials and Interfaces*, (2022).
- [35] R. Melentiev, A. Logerweij, G. Lubineau, Multiprocess additive manufacturing via fused deposition modeling, chemical deposition, and electroplating with tough interfacial adhesion, *Smart Materials in Manufacturing*, (2024) 100043.