

이 인 환 충북대학교 기계공학부 교수 | e-mail : anxanx@chungbuk.ac.kr

1980년대 처음 세상에 등장한 3D프린팅기술은 시제품을 빠르고 경제적으로 생산하려는 초기의 목적에서 나아가 현재에는 직접 제품생산에 적용하려는 시도들이 이루어지고 있다. 하지만 이를 극복하기 위해서는 몇 가지 해결해야 할 문제들 또한 존재하는 것이 현실이다. 전자제품의 회로 제작에 3D프린팅기술을 적용하기 위한 기술들이 개발되고 있으며, 이는 기존의 플라스틱 재료를 이용하는 3D프린팅기술과 전도성 재료를 토출하여 도선을 성형하는 기술이 융합된 하이브리드 3D프린팅기술로 발전되고 있다. 입체전자기술로 알려지고 있는 이 기술은 단일 공정으로 다양한 소재를 사용하여 구동이 가능한 회로소자를 제작할 수 있기 때문에 주문형 회로소자, 웨어러블 디바이스 및 플렉서블 디바이스 등의 개발에 매우 유용하게 적용이 가능할 것으로 기대된다. 향후에는 복잡한 회로소자 제작기술로 발전할 것이며 따라서, 현재의 반도체 제작공정을 대체할 수 있는 기술로 발전이 가능할 것이다.

널리 알려진 바와 같이 3D프린팅기술은 재료를 한 층씩 적층하여 3차원 형상을 만드는 기술이다. 1980년대 중반 미국의 Charls Hull에 의해서 세상에 처음으로 등장한 이후, 최근까지 제조업 분야를 중심으로 시제품(prototype)을 경제적이면서도 빠르게 제작하기 위해서 널리 사용되어져 왔다.

2000년대 중반부터 3D프린팅기술은 두 분야로 뚜렷하게 나뉘어져서 발전하게 된다. 하나는 정밀도나 해상도가 상대적으로 낮기 때문에 산업 분야에서 직접 제품을 제작하기에는 어렵지만 제품의 개념설계, 기능성 시제품 제작 혹은 개인 취미용으로 사용되는 저가형 3D프린터와 관련된 기술이다. 이는 3D프린팅 관련한 주요 원천기술 특허들이 만료되고 있으며, RepRap 등과 같은 오픈소스(open source)들이 다수 등장하면서 확대되고 있다. 또 다른 하나는 항공우주, 자동차, 의료, 귀금속 등 다양한 산업분야에서 제품개발 시 필요한 시제품의 제작이나 혹은 직접 제품의 제

작에 적용이 가능하도록 할 수 있는 3D프린팅기술이다. 이 기술은 복잡한 형상을 가지면서 정밀도가 높은 제품을 제작할 수 있는 고성능의 장비들이 개발에 많이 적용되며, 대체로 이런 장비들은 높은 가격대를 형성하고 있다.

현재까지 개발된 3D프린팅기술은 많은 장점이 있음에도 몇 가지 이유 때문에 실제 제품생산에 직접 적용하는 데에는 일부 한계를 가지고 있는 것으로 여겨지고 있다. 즉, ① 전통적인 기계가공 등과 같은 제작방식에 비해서 상대적으로 느린 제작 속도로 인한 대량생산의 어려움, ② 금속가공이나 플라스틱 사출 성형 등에 비하여 낮은 표면조도, ③ 대형 제품 제작의 어려움, ④ 사용 가능한 재료의 한계, 그리고 ⑤ 하나의 공정장비로는 유사한 종류의 재료만 사용 가능하다는 것 등이 그 이유가 될 것이다. 이에 따라 이런 한계를 극복하기 위한 다양한 방법들이 제시되고 있다.



그림 1 다양한 색상을 갖는 플라스틱 재료를 단일 공정에서 동시에 성형한 모습(미국, Stratasys사)

특히 현재 산업분야에서 상업적인 용도로 사용하고 있는 3D프린터는 상대적으로 공정장비가 고가임에도 불구하고 하나의 공정에서 사용하는 재료의 종류가 유사해야 한다는 한계가 있다. 따라서 단일 공정에서 서로 다른 성형특성을 갖는 재료를 동시에 이용하여 제품을 생산하기 위한 3D프린팅기술들이 최근 들어 활발히 제시되고 있다. 그 중에서 특히 전자회로를 제작하는 데 3D프린팅기술을 기반으로 하는 다중재료 하이브리드 성형기술들이 제안되고 있다. 이에, 이 글에서는 3D프린팅기술과 전도성 재료 토출을 동시에 적용하여 3차원 전자회로를 제작하는 하이브리드 3D프린팅기술인 입체전자회로 제작기술에 대하여 다루고자 한다.

다중재료 하이브리드 3D프린팅기술을 이용한 입체전자회로 기술의 등장

현재 상업적으로 구입이 가능한 3D프린팅 공정장비 중에서 두 가지 이상의 재료를 동시에 성형하여 3차원 형상의 제작이 가능한 것은 극히 일부분에 지나지 않는다. 그 중 대표적인 공정장비는 미국 스트라타시스(Stratasys)사의 폴리젯(Polyjet)기술이 적용된 공정장비 균이다. 폴리젯기술은 매우 미세한 구멍이 뚫려 있는 다수의 노즐을 통해서 광경화성 수지를 분

사하고, 이를 경화시켜 형상을 제작하는 것이다. 특히, 이 회사의 콘넥스(Connex) 시리즈 장비들은 각 노즐에서 서로 다른 특성(색 또는 기계적 성질)을 갖는 광경화성 재료를 분사하고 이를 경화시켜 다수의 다중재료로 이루어진 3차원 형상을 제작하는 것이 가능하다. 하지만, 사용 가능한 재료는 모두 빛에 의

해서 경화되는 광경화성 수지로서, 장비에 의해서 성형된 후에는 색이나 기계적 성질은 다르지만 모두 플라스틱과 유사한 성질을 갖는다.

한편, 미국 텍사스 주립대학 엘파소 캠퍼스(UTEP: University of Texas at El Paso)에 위치한 W. M. Keck Center for 3D Innovation(keck.utep.edu)에서는 2000년대 후반에 3D프린팅기술 중 수조 광경화(Vat photopolymerization)와 전도성 재료의 직접 주사(direct writing)기술을 결합하여 3차원 회로장치를 제작하는 입체전자회로(3D Electronics)기술을 발표하였다. 수조 광경화기술은 자외선에 의해서 굳어지는 성질을 갖는 액체상태의 광경화성 수지(photocurable polymer, photopolymer)에 자외선 빛을 주사하여 굳혀서 3차원 형상을 제작하는 기술이다. 이 기술은 앞서 언급한 미국 Charls Hull에 의해서 처음으로 상용화된 기술로서, 자외선 레이저 빛을 이용할 경우에는 매우 작은 초점을 갖도록 광학계를 설계하는 것이 크게 어렵지 않아 상대적으로 손쉽게 정밀한 구조물을 제작할 수 있다.

UTEP에서 제안한 초기 입체전자회로기술은 회로를 구성하는 전자부품과 이들 사이의 전기적 연결을 해주는 도선이 들어갈 자리인 홈들을 미리 제품의 표면에 성형되도록 설계한 후 이를 수조 광경화기술을 이용하여 성형하였다. 그리고 성형된 구조물에 전자

부품을 미리 만들어진 홈에 부착하였다. 또한 전자부품 사이의 전기적 연결을 위한 도선이 만들어지도록 미리 만들어진 홈 사이에 액체 상태의 전도성 재료를 분고 경화시켜 최종적으로 회로 구조물을 제작하는 기술을 제안하였다. 이후 수조 광경화뿐만 아니라 재료 압출(material extrusion)기술 기반 등의 다양한 3D프린팅 기반의 3차원 회로 성형기술을 제안하였다. 이들이 개발한 입체전자회로는 초소형 인공위성인 CubeSat에 탑재된 회로기판, FDM(Fused Deposition Modeling)을 기반으로 한 모터, 정전센서 등 다양하다. 또한 최근 들어서는 우주선이나 무인비행체 등에 적용이 가능한 복합소재 우주항공부품을 제작할 수 있는 3D프린팅기술을 개발하고 있으며, 향후에는 미세가공, 전자부품의 로봇 설치, 배선에 부품을 연결하는 기능 등을 개발할 계획으로 알려져 있다. 현재, W. M. Keck Center for 3D Innovation은 입체전자회로 기술뿐만 아니라, 3D프린팅 전 분야에 걸쳐 세계적으로도 규모가 매우 큰 연구센터로서 활발한 연구 활동이 이루어지고 있다. 한편, 국내에서도 충북대학교, 안동대학교 및 한국전자통신연구원 등에서 유사한 형태의 기술들이 활발하게 개발되고 있다.

회로도선 성형을 위한 직접주사기술

대부분의 전자회로들은 회로를 구성하는 전자소자들과 이들 사이를 전기적으로 연결하기 위한 도선 역할을 하는 구조물이 필요하다. 현재 널리 사용되는 평면형 인쇄회로기판(PCB: Printed Circuit Board)의 경우에는 플라스틱 등과 같은 평면형 구조물 위에 도선을 성형하기 위해서 구리 등의 전도성 재료 박판에 대한 노광/현상/부식/박리 등의 광학적 및 화학적 에칭 등의 방법들이 복합적으로 사용된다. 하지만, 입체전자회로를 구성하기 위해서 이런 방법들을 직접 적용하는 데에는 많은 문제점이 발생한다. 예를 들면 3

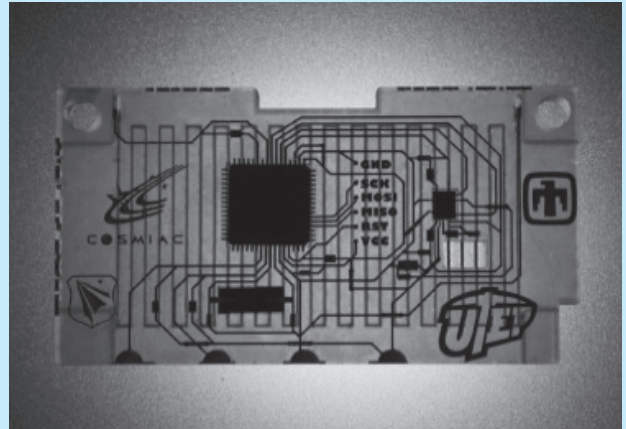


그림 2 입체전자회로기술로 제작된 회로기판(미국, W. M. Keck Center for 3D Innovation) - 수조 광경화기술과 직접주사기술이 사용되었다.

차원으로 배열된 회로소자들 사이의 전기적 연결을 기존 평면형 PCB에서와 유사하게 구리박판의 광학적-화학적 방법을 이용하기 위해서는 매우 복잡한 설계와 설비가 필요하게 된다. 따라서 3차원으로 배열된 회로소자들을 전기적으로 연결하기 위한 새로운 방법이 절실하게 필요하게 되었다.

일반적으로 입체전자회로기술에서 전도성 재료를 이용하여 회로소자들 사이의 전기적 연결을 구현하기 위해서는 직접주사기술이 많이 사용된다. 즉, 액체 상태의 전도성 재료를 적절한 선폭을 갖도록 3차원 형상 표면에 토출하고 이를 경화시켜 도선을 성형한다. 이때 전도성 재료는 은 등과 같은 높은 전기전도성을 갖는 입자들을 적절한 용재들과 혼합하여 액체 상태로 만든 것이 사용되는 것이 일반적이다. 이 액체 상태의 재료들은 다양한 방법으로 토출되어 3차원 형상 위에 성형되고, 가열 등을 통해서 용재가 증발되어 최종적으로는 전기전도성이 발현되게 된다.

액체상태의 재료를 직접 3차원 표면에 주사하기 위해서는 재료를 가압하여 매우 작은 지름을 갖는 노즐로 토출하거나, 노즐을 통해서 분사하는 기술 등이 사용된다. 액체상태의 재료를 토출하거나 분사하기 위

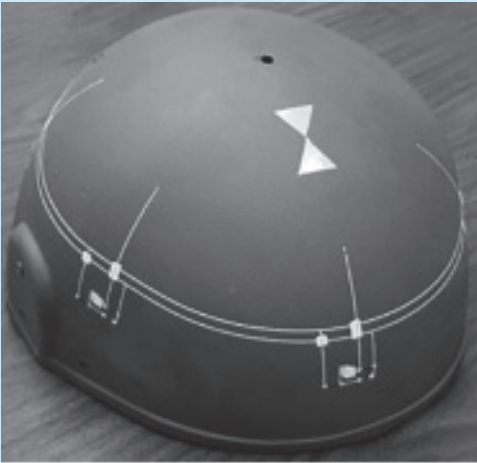


그림 3 직접주사기술로 헬멧 표면에 성형된 도선
(미국, nScript 사)

해서는 재료의 특성에 적합한 노즐 및 토출시스템의 개발이 필요하다. 미국 nScript 사는 공압으로 작동하는 초정밀 노즐 및 이송 시스템을 개발하였다. 이 회사의 노즐 토출 시스템은 액체재료가 수십 마이크로미터의 선폭을 갖도록 매우 정밀하게 토출하는 것이 가능하다. 이 회사는 이를 이용하여 자동화된 시스템으로 3차원 임의형상 표면에 액체상태의 전도성 재료를 토출하는 방식의 회로제작시스템을 개발하였다. 이 시스템은 전도성 소자의 토출뿐만 아니라 회로 소자의 장착에도 자동화된 시스템이 적용된다. 현재에는 nScript 사뿐만 아니라 매우 많은 기업이나 대학 혹은 연구소에서 전도성 재료를 3차원 형상 위에 성형하는 기술들이 개발되고 있다.

입체전자회로기술의 활용과 발전

현재까지 개발된 3D프린팅기술 기반의 입체전자회로 기술은 대부분 구조물이면서 절연체 역할을 하는 재료를 적층하면서 그 중간 혹은 표면에 전도성이 있는 재료를 토출하여 회로를 구성하는 방법을 채택하고 있다. 또한, 이를 응용하여 다양한 형태의 기술들이 제안되고 있으며, 일부 기술은 상용화되어 판매

되고 있다. 입체전자기술의 핵심인 다양한 재료의 적층기술, 액체재료의 초정밀 3차원 토출기술 등은 지속적으로 발전이 계속되고 있다.

입체전자기술이 적용된 3D프린팅 응용기술 사례 중 가장 널리 알려진 것은 아마도 Voxel 8(www.voxel8.co)일 것이다. Voxel 8은 하버드 대학의 Jennifer A. Lewis 교수팀이 주축이 되어 만들어진 회사에서 개발한 장비로서 처음으로 상업적으로 구매가 가능한 입체전자기술 기반의 3D프린터이다. 이 장비는 절연체 역할을 하는 열가소성 플라스틱으로 구조물 몸체를 만들고, 그 위에 은 입자로 구성된 높은 전도성을 가진 잉크를 통해 회로소자 사이를 전기적으로 연결해준다. 이때 사용된 전도성 잉크는 상온에서도 경화가 가능하며, 경화 후에도 높은 전기전도성을 갖는 것으로 알려져 있다. 이 회사에 따르면 Voxel 8을 이용하면 매우 적은 생산 규모에서 리튬이온 마이크로 전지, 신축성 회로소자, 센서 등의 전자회로 제작이 가능하다고 하며, 추후에는 새로운 기능성 물질이 적용된 시스템을 개발하려고 하고 있다.

Cartesian Co.(www.cartesianco.com)는 킥스타터(KickStarter)를 통하여 성공적으로 모금이 이루어진 스타트업 기업이다. 이 회사는 킥스타터에서 목표 금액의 458%인 \$137,356를 기금으로 모아서 잉크젯 프린팅 방식을 이용한 회로성형 장치인 Argentum을 \$2,099에 판매하고 있다. 특이하게도 이 장치는 전자회로를 종이나 천 위에 제작하는 것이 가능하다. 따라서 만들어진 전자회로가 자유롭게 구부러지거나 혹은 돌돌 말아지는 것도 가능하기 때문에 초보적인 수준의 웨어러블 디바이스를 아마추어들이 직접 제작하는 것도 가능하다.

미국 Southern Methodist University에서는 FEAM(Fiber Encapsulation Additive Manufacturing)기술을 개발하였다. 이 기술은 노즐을 통해서 가열된 플라스틱 재료가 압출될 때 이 안에 전도성 섬유를 삽입하여 동시에 성형하는 것이다. 이



그림 4 입체전자회로기술이 구현된 최초의 상업용 3D프린터인 Voxel 8과 이를 이용하여 제작된 쿼드콥터



맺는 글

제품을 생산하는 다양한 방법들 중, 전통적인 기계가공 방법들과 비교할 때 3D프린팅기술은 그 역사가 매우 짧다. 현재 상업적으로 구입이 가능한 3D프린팅 장비에 적용된 기술들은 대부분 동일

하게 되면 앞서 언급한 다른 기술들과는 다르게 회로 도선 구현을 위해 별도의 전도성 재료의 성형기술이 필요하지 않게 된다. 앞서 언급한 하버드 대학의 Lewis 그룹에서는 또한 높은 신축성을 가진 재료를 이용하여 임의의 형상을 갖는 3차원 스트레인 센서를 제작하였다. 이때 센서의 몸체 역할을 하는 탄성중합체가 담긴 수조 내부에 노즐을 이용하여 센서 역할을 하는 점탄성 잉크를 토출하고, 노즐이 지나간 자리는 충전재료가 저절로 채워지게 된다. 점탄성 잉크가 내장된 탄성중합체 몸체와 충전재료를 동시에 경화시키면 완전히 밀폐가 된 센서가 제작된다. 독일의 Neotech 은 저온에서 적은 비용으로 3차원 전자회로를 대량으로 생산할 수 있는 기술인 3DPE(3D Printed Electronics)기술이 적용된 상용 모델인 LBS 45XE를 출시하였다. 이 기술은 비 접촉식 광소결기술로서, 일반적으로 전도성 잉크로 많이 사용되는 은 잉크를 폴리머 재료 위에 도포하고 여기에 빛을 주사하여 국부적으로 가열함으로써 저온소결을 시킨다. 이렇게 소결된 은 잉크는 기저판 위에서 매우 높은 부착력을 가지게 된다.

하거나 매우 성질이 유사한 소재만을 사용할 수 있다. 이에 따라 다양한 특성을 갖는 재료를 동시에 성형할 수 있는 새로운 형태의 3D프린팅기술들이 지속적으로 개발되고 있으며, 그중 하나가 입체전자회로기술이다. 현재까지의 입체전자회로기술은 초기단계로서 정밀도나 성형기술 등이 일반적인 제품생산기술들에 비하여 부족한 것도 사실이다. 하지만 단일 공정으로 다양한 소재를 사용하여 구동이 가능한 회로소자를 제작할 수 있기 때문에 주문형 회로소자, 웨어러블 디바이스 및 플렉서블 디바이스 등의 개발에 매우 유용하게 적용이 가능할 것으로 기대된다.

세계적으로도 초기 단계인 입체전자기술은 3D프린팅 분야에서 선진기술을 확보할 수 있는 기술로 주목 받고 있다. 따라서, 지속적인 연구개발이 계속된다면 다수의 3D프린팅 관련 원천기술의 확보가 가능할 것이다. 또한, 단일 공정으로도 수 나노미터의 높은 정밀도나 해상도를 가진 복잡한 전자소자를 제작할 수 있을 것으로 기대되기 때문에 현재의 반도체 제작 공정을 대체할 수 있는 기술로 발전이 가능할 것이다.