

## 3D 프린팅 센서 연구 동향 소개-전왜성 변형/로드셀 센서 중심으로

조정훈<sup>1,\*</sup> · 문현우<sup>1,\*</sup> · 김성용<sup>1</sup> · 최백규<sup>1</sup> · 오광원<sup>1</sup> · 정관영<sup>2</sup> · 강인필<sup>1,+</sup>

### A review of 3D printing technology for piezoresistive strain/loadcell sensors

Jeong Hun Cho<sup>1,\*</sup>, Raymond Hyun Woo Moon<sup>1,\*</sup>, Sung Yong Kim<sup>1</sup>, Baek Gyu Choi<sup>1</sup>,  
 Gwang Won Oh<sup>1</sup>, Kwan Young Joung<sup>2</sup>, and In Pil Kang<sup>1,+</sup>

#### Abstract

The conventional microelectromechanical system (MEMS) process has been used to fabricate sensors with high costs and high-volume productions. Emerging 3D printing can utilize various materials and quickly fabricate a product using low-cost equipment rather than traditional manufacturing processes. 3D printing also can produce the sensor using various materials and design its sensing structure with freely optimized shapes. Hence, 3D printing is expected to be a new technology that can produce sensors on-site and respond to on-demand demand by combining it with open platform technology. Therefore, this paper reviews three standard 3D printing technologies, such as Fused Deposition Modeling (FDM), Direct Ink Writing (DIW), and Digital Light Processing (DLP), which can apply to the sensor fabrication process. The review focuses on strain/load sensors having both sensing material features and structural features as well. NCPC (Nano Carbon Piezoresistive Composite) is also introduced as a promising 3D material due to its favorable sensing characteristics.

**Keywords :** 3D printed sensor, Nano carbon composite, Loadcell, Piezoresistivity, Strain sensor.

#### 1. 서 론

3D 프린팅 기술은 4차 산업혁명의 핵심기술 중 하나로서 제조업에 혁신을 불러올 것으로 관심을 받아왔다. 그러나 실제 산업 현장에서는 대량생산에 적합하지 않다는 이유로 당초 기대에 부응을 못하고, 시제품을 만드는 제한적 용도로 사용이 되어 기술적 가치가 절하되고 있었다. 3D 프린팅은 다른 제조 기술과 달리 다양한 소재를 활용할 수 있으며, 일반 공장의 제조 과정보다 저가의 장비를 활용하여 간단히 원하는 제품을 생산할 수 있다는 우수한 특징을 지니고 있다. 최근 이러한 제조 특징

을 부각시킬 수 있는 관련 기술의 발달로 그 수요가 자동차, 항공과 같은 전통적인 기계 제조 분야를 넘어서 점차 의류 및 음식과 인공 장기 등 다양한 분야로 확장되고 있다 [1].

앞서 기술한 3D 프린팅 제조 기술 특징이 센서 공학 분야로 적용될 경우 여러 소재로 개발되는 센싱부(sensing part)를 비롯하여 다양한 형상을 요구하는 센서 구조부(sensing structure) 제작에도 활용될 수 있을 것이다. 3D 프린팅 제작 특징은 MEMS(micro-electro mechanical systems)가 주를 이루었던 센서 개발 분야에 활용되어 [3], 기존 반도체 공정보다 비용이 저렴한 장비와 다양한 소재를 활용하여 센서를 현장에서 실시간으로 제작할 수 있을 것이다. 또한, 센서 설계 파일과 소재를 개방형 플랫폼(open platform)으로 제공한다면, 누구나 사용자가 원하는(customized) 센서 제품을 on demand 수요에 맞추어 저렴하게 제작할 수 있다. 그러므로 최근 다양한 수요를 요구하는 센서 시장 특성에 부합하므로 센서 연구자들의 관심이 필요하다고 사료된다.

센서 제작에 활용될 수 있는 3D 프린팅 공정은 인쇄 기법을 중심으로 다음 Fig. 1과 같이 대표적인 다음 3가지 방식으로 구분될 수 있다.

열가소성 수지를 롤 형태로 가공한 필라멘트를 이용하여 출력하는 FDM(fused deposition modeling) 방식 [2, 4-7], 빛을 이용하여 광경화성 수지에 조형하고자 하는 형상을 투사하는

<sup>1</sup> 부경대학교 기계설계공학부(Department of Mechanical & Design Engineering, Pukyong National University) 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

<sup>2</sup> 한국생산기술연구원 (Innovative Smart Manufacturing R&D Department, KITECH) 89, Yangdaegiro-gil, Ijjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea

\*These authors contributed equally to this work

<sup>+</sup>Corresponding author: ipkang@pknu.ac.kr

(Received: Oct. 20, 2021, Revised: Nov. 19, 2021, Accepted: Nov. 23, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

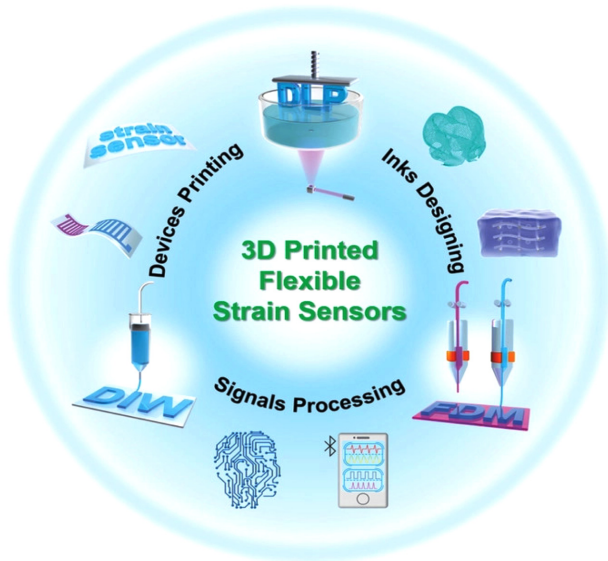


Fig. 1. Overview of 3D Printed Flexible Sensors Fabrication Process [2].

DLP(digital light processing) 방식 [7], 잉크를 압축공기, 피스톤 또는 스크류 등으로 배출하여 출력하는 DIW(direct ink writing) 방식 등이 있다 [7,8].

이들의 제작 방식과 더불어, 3D 프린팅 센서 개발에서 출력 소재는 주요 연구 대상이며, 이러한 소재로써 광경화 수지 및 금속 입자를 포함하는 전도성 잉크 등이 연구 개발되고 있다. 더불어 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)와 그래핀(graphene) 등 탄소나노 동소체(isotopes)를 혼합한 전도성 복합소재 기반 소재가 최근 연구되고 있다 [9][10].

탄소나노 소재를 전도성 복합소재로 가공할 경우에는 전왜성(piezoresistivity)을 지닌 센싱 소재(sensing material)인 NCPC(nano carbon piezoresistive composite)를 얻을 수 있다. NCPC는 복합소재 내부에 전기 전도성을 지니는 탄소나노 동소체들이 복합소재 수지 재료(matrix)안에서 전도성 네트워크를 구성하게 한다. NCPC가 압축력을 받는 경우, 그 전도성 네트워크가 더 가깝게, 더 많이 이루어지게 되므로 전기 저항이 감소하며, 반대로 인장력을 주었을 경우, 충전체들의 간극이 커지며 전도성 네트워크가 뜰어지게 되어 전기 저항이 증가하게 된다 [11,12]. 이러한 NCPC는 3D 프린팅의 출력 소재로 활용될 경우 최적 형상과 기능을 지닌 스트레인(strain)과 힘/하중(load)을 측정하는 센서 개발이 가능하다 [13-16].

따라서 본 논문에서는 여러 센서 중에서 센싱 소재와 구조체가 조화를 이루어 제작이 되는 스트레인/로드셀(load cell) 센서를 중심으로 하여, 이들을 3D 프린팅 기술로 제작하여 연구한 사례와 그 특징을 고찰한다. 더불어 본 연구팀에서 개발하고 있는 NCPC를 활용한 3D 프린팅 로드셀 연구도 함께 소개한다.

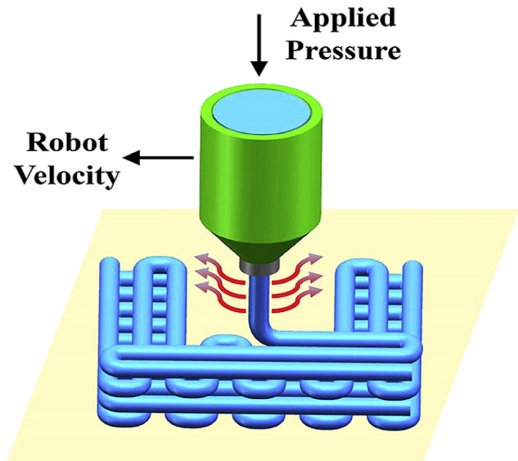


Fig. 2. DIW(direct ink writing) process [18].

## 2. DIW(Direct Ink Writing) 활용 센서

### 2.1 DIW 방식의 특성

DIW 방식은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 고농도 재료를 출력하기 위해 개발된 방식이므로, 기존의 잉크젯 프린터에서 잉크가 배출되어 인쇄되는 방식과 유사하다. 고점도의 내용물이 필라멘트 형태로 압출되면서 3D 프린팅 출력을 하는 방식으로써, 압축공기, 피스톤 또는 스크류 등으로 잉크의 배출 속도를 조절한다. 압출된 잉크는 겔화 및 증발에 의해 빠르게 고형화 되어 적층 된다 [17].

### 2.2 DIW 방식 센서 제작 연구

2019년 발표된 Wan의 논문에서는 PDMS 유연 고분자 수지와 그래핀 소재를 혼합하여 센서 제작을 위한 전도성 잉크를 제조하였고, 그 구조를 DIW 공정에 의해 격자로 쌓아 올려 출력시키면서 내부 다공을 통하여 센서 감도를 조절하였다. 이 연구에서는 3D 프린팅 구조 설계의 장점을 이용하여 이전 센서들과 달리 그 반복 특성을 개선할 수 있었다 [18]. Fig. 3는 10wt% CNT 잉크를 이용하여 다양한 구조를 인쇄한 것이다.

2018년 발표된 Li의 논문에서는 CNT/Ecoflex 잉크를 제조하여 DIW 방식으로 센서를 출력하였다 [17]. Fig. 4는 DIW방식으로 제작된 센서와 정전용량을 측정하였다.

DIW 방식은 동시에 다양한 재료를 출력하여 제작할 수 있다는 점에서 큰 이점을 가진다. 또한 상온에서 조작이 간편하고 실용성이 높다. 하지만 노즐 막힘 현상이 빈번하게 발생하므로 잉크의 점도가 높지 않아야 하고, 원치 않는 변형을 방지하려면 점도가 낮으면 안된다. 따라서 DIW 방식은 원하는 센서 형상을 정확하게 얻기 위해 적절한 출력 잉크의 점도 확보가 매우 중요하다. 점도 확보를 위한 유동과 밀도 등 소재 제조 변수와

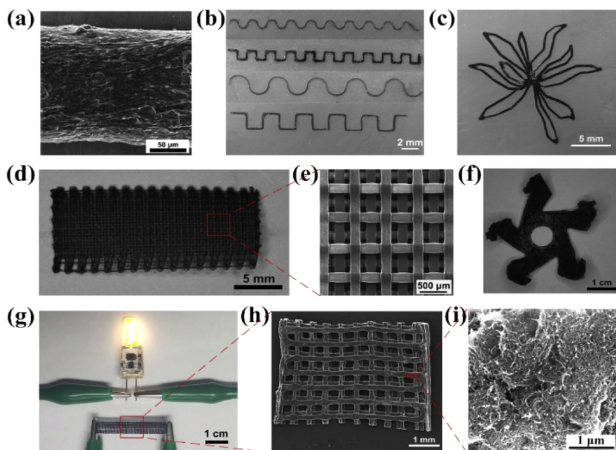


Fig. 3. Various sensor structures and their SEM images printed by DIW using 10wt% CNT ink [18].

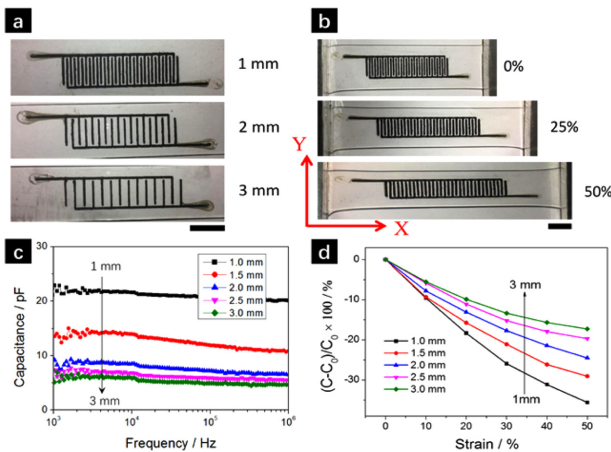


Fig. 4. 3D printed stretchable capacitive sensors via DIW processing [17].

인쇄를 위한 노즐 직경, 출력물 공간 간격, 출력 속도 등 공정 변수가 복합적으로 작용하므로 원하는 센서를 정확하게 얻기 위한 제어에 어려움이 있다.

또한, 최종 출력 형태를 일정하게 유지하기 위해서는 담금(soaking), 소결(sintering), 가열(heating), 경화(curing)을 포함한 프린팅 된 패턴에 대한 후처리 과정이 필수적이다 [8][17].

### 3. DLP(Digital Light Processing) 활용 센서

#### 3.1 DLP 방식의 특성

DLP 방식은 마스크의 이미지를 빛을 이용하여 광경화성 수지에 투사하여 경화시켜 형상을 제작하는 방식으로, DIW방식이나 FDM 방식 등의 적층 프린팅 방식과 달리 고품질 출력이 가능하고, 노즐을 사용하지 않아 3D 프린팅에서 흔히 나타나는

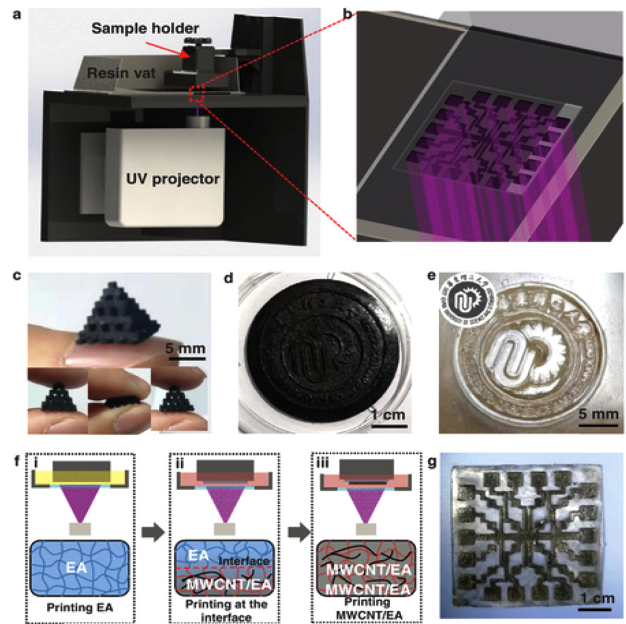


Fig. 5. DLP (digital light processing) process and strain sensor array [20].

문제인 노즐 막힘이 발생하지 않는다 [6,19].

#### 3.2 DLP 방식 센서 제작 연구

2020년 T. Xiao은 Fig. 5와 같이 DLP 기반 3D 프린터 다이 어그램과 MWCNT (multi-walled carbon nanotube)/EA(elastomer) 전도성 복합소재로 변형을 센서 어레이를 제작하였다. 이 연구에서는 센서를 구성하는 기초 구조물을 EA를 활용하여 Fig. 5(f)와 같이 우선 제작한 후, 추가적으로 MWCNT/EA를 덧씌워 제작하는 방식을 활용하여 Fig. 5(g)와 같은 복잡한 어레이 구조를 지닌 변형을 센서를 제작하였다 [20].

위와 같은 연구들과 같이 DLP 방식은 액상형 출력 소재를 활용할 수 있으므로, CNT를 활용하는 센서의 경우에는 액상형 공정을 활용하여 소재 특성과 그 구조 형상 제어를 동시에 이룰 수 있을 것이다 [21,22]. 하지만 DLP 방식은 출력물이 수직방향으로만 얻어지므로, 여러 축 방향의 구조를 지니는 센서 제작에는 한계가 있을 것으로 판단된다.

### 4. FDM(Fused Deposition Modeling) 활용 센서

#### 4.1 FDM 방식의 특성

FDM 방식은 PLA(poly lactic acid), ABS(acrylonitril butadiene styrene)와 같은 열가소성 수지를 필라멘트로 가공해 고온으로 가열한 후, Fig. 6와 같이 프린터 압출부에 연결된 노즐을 통해 사

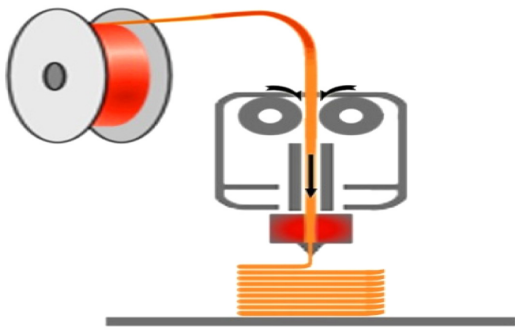


Fig. 6. FDM (fused deposition modeling) printing Technology [23].

출하여 적층하는 방식으로 구조물을 제작한다.

앞서 기술한 3D 프린팅 방식들은 주로 1축 또는 2축만의 적층 제어로 인해 재료를 출력할 수 있다. 반면에 FDM 방식은 열가소성 수지와 더불어 시멘트, 유리, 바이오 재료 등 다양한 재료들을 여러 노즐을 통해 동시에 3축 방향에서 출력이 가능하므로 타 방식 보다 복잡한 형상 구조 센서 제작에 유리할 수 있다. 그러나 출력물의 크기가 작은 경우 출력물의 품질이 낮은 단점이 있어 [17,24], 현재까지의 기술로는 소형 정밀 구조를 지닌 센서 제작에는 한계가 있을 것으로 판단된다.

다중 재료를 활용한 프린팅이 부상하고 있는 최근 추세에서 [24], 다양한 소재로 제작된 필라멘트를 다중 노즐로 동시에 출력할 수 있는 FDM의 특징은 다른 출력 방식에 비해 발전 가능성이 두드러진다. 또한, 전기 전도성을 지닌 필라멘트가 이미 상용화 되었으므로, 저가 FDM 프린터의 등장은 3D 프린팅 센서 기술 대중화를 선도할 것으로 기대된다.

### 4.2 FDM 방식 센서 제작 연구

센싱 소재를 필라멘트로 제작하는 공정 기술은 FDM 방식에서 제작의 중요 기술이다. CNT는 다양한 수지와 혼합하여 전도성을 지니는 센서 소재로 활용될 수 있으므로, 이를 열가소성 수지들과 혼합하여 필라멘트로 가공한다면 다양한 센서 제작이

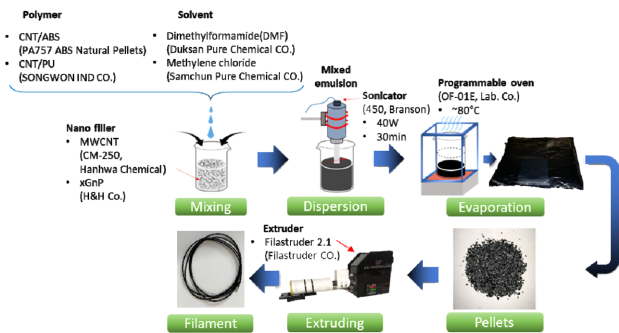


Fig. 7. Production process of CNT (carbon nanotube) filament [23].

가능할 것이다. Fig. 7은 본 연구 그룹에서 탄소나노 소재를 활용하여 FDM 필라멘트로 제작하는 과정을 도시하였다.

필라멘트를 제작하는 과정 중 CNT를 열가소성 수지와 혼합하는 경우 다른 수지에 비해 혼합이 어려워 수지 내에 CNT의 고른 분산성이 떨어진다. 결과적으로 전도성 필라멘트의 센싱 특성이 균일하지 못하여 출력 후 동일한 품질의 센서 성능을 얻기 힘든 문제가 있다. 또한, CNT가 포함된 필라멘트를 사용할 시 3D 프린터 출력 노즐의 손상과 막힘이 생긴다는 것은 CNT 필라멘트를 사용하는 센서제작의 가장 큰 문제이다 [10]. 다음은 이러한 문제와 관련하여 Gnana-sekaran의 연구 결과로서 Fig. 8(a), (b), (c)는 사용 횟수에 따른 노즐의 사진이고 Fig. 8(d)는 마모된 노즐의 SEM 사진이다.

2012년에 발표된 Leigh의 전도성 필라멘트 제작 연구는 열가소성 소재 PCL(polycaprolactone)과 카본 블랙(carbon black)을 85:15 중량비로 혼합하였다. 그리고 Fig. 9와 같이 전도성 필라멘트를 개발하여 전도성 필라멘트의 개발 가능성과 응용 방향에 대해 제시하였다 [5].

이 연구에서는 제작된 필라멘트를 활용하여 Fig. 10과 같이 손가락 움직임을 감지하는 3D 프린팅 유연 센서를 제작하고, 손

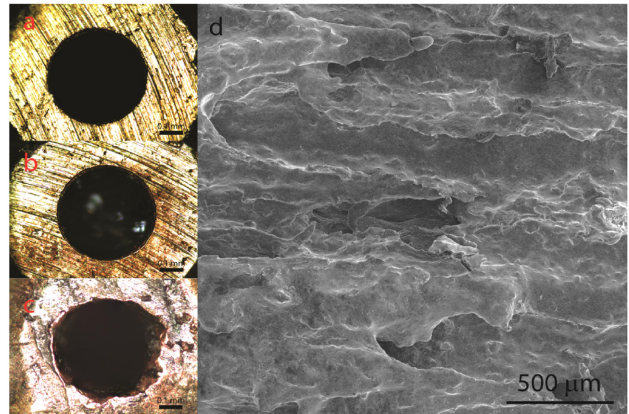


Fig. 8. Optical micrographs showing the surface of a 3D printing nozzle before and after printing [10].

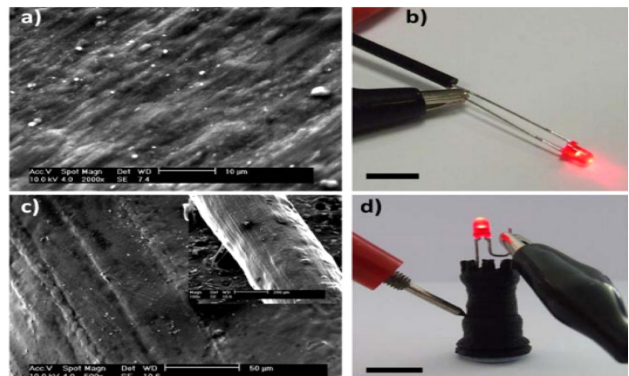


Fig. 9. Characterization of PCL (polycaprolactone)/CB (carbon black) conductive filament [5].

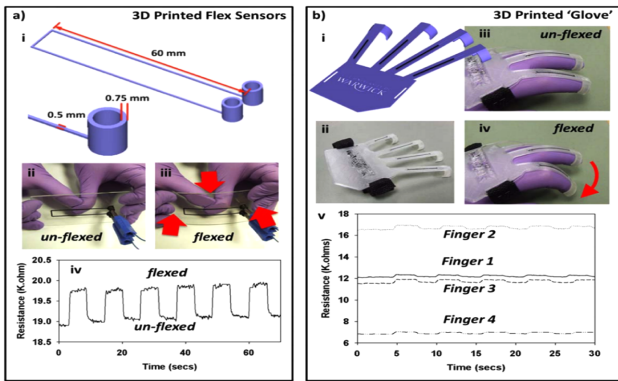


Fig. 10. 3D printing of flex sensors and glove [5].

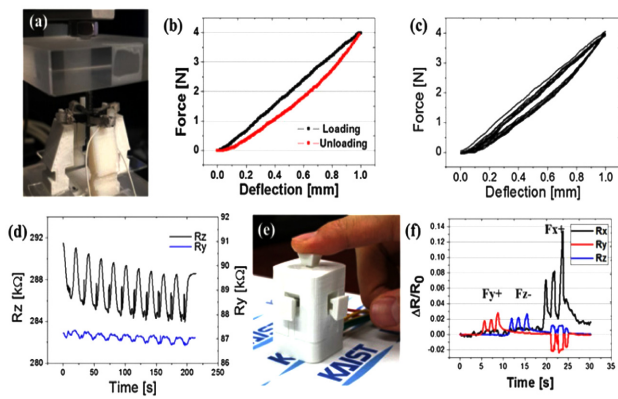


Fig. 11. 3D printing cubic force sensor using CNT (carbon nanotube)/TPU (thermoplastic polyurethane elastomers) filament and real-time resistance changes [27].

가락의 반복적인 움직임에 대한 저항 변화를 계측하였다 [5].

2017년 Christ는 TPU(thermoplastic polyurethane elastomer) 소재와 MWCNT를 복합재 필라멘트로 제작하였고 FDM 방식으로 인쇄하여 전왜성 복합재를 활용한 3D 프린팅 센서 기술 활용을 연구하였다. MWCNT와 TPU를 압출 트윈 스크류를 사용하여 복합재 필라멘트를 제작하였고 공정조건 별로 필라멘트의 전기-기계적 특성을 분석하였다. 그리고 3D 프린팅 구조물을 복합재 필라멘트로 제작하여 반복 스트레인에 대한 전왜 특성을 발표하였다 [26].

2017년 Kim 역시 CNT와 TPU를 혼합한 CNT/TPU 필라멘트를 제작하였고 다축 하중을 감지할 수 있는 3D 프린팅 다축 하중 센서에 대한 연구를 발표하였다. 상용 로드셀은 내부의 복잡한 구조와 패키징에 의해 다축 하중 측정이 어렵다. 이 연구는 3D 프린팅의 제작 이점을 활용하여 Fig. 11(e)와 같이 3축의 하중을 분리하여 감지가 가능한 다기능의 3D 프린팅 센서를 제작하였다 [27].

## 5. NCPC(Nano-Carbon Piezoresistive Composite) 기반 3D 프린팅 센서 연구

앞서 언급한 문제점 중 NCPC 필라멘트 제작 공정과 이를 출력할 때 발생하는 프린터 노즐 손상 등을 회피하는 연구가 되고 있다. 본 연구 그룹에서는 센서 구조물만 3D 프린팅 공정으로 제작을 하고, 센싱부는 액상형 NCPC를 도포하여 3D 프린팅 센서를 제작하는 연구를 다음과 같이 수행하였다. 이 방식으로 센서를 제작할 경우 필라멘트를 만드는 과정이 생략되어 필요 장비가 대폭 줄어든다. 그리고 같은 NCPC를 다양한 재료로 만든 같은 형상의 센서 구조물에 도포하여 센서 사용 환경(민감도, 강도 등)에 맞춰 제작 가능하다.

2017년 Kim은 ABS를 기반으로 3D 프린터를 사용하여 외팔보 형태로 제작하여 NCPC를 도포하였다. 전왜성 외팔보를 센싱부로 하는 압력 센서를 Fig. 12(a), (b)와 같이 제작한 후, Fig. 12(c)와 같이 압력 교정 시스템을 활용하여 그 특성을 실험하였다 [13].

이 연구는 NCPC를 외팔보와 같은 특정 형상을 지닌 센서 구조로 활용하여 단순 벌크 형태의 전왜 특성만을 활용하는 압력 센서와 비교하였다. 그 결과 센서 측정범위 및 선형성이 크게

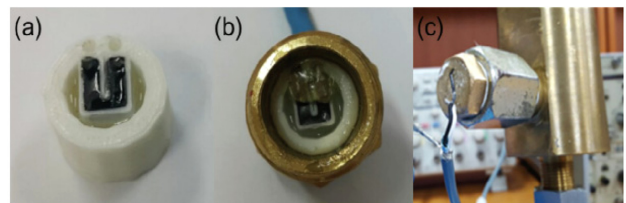


Fig. 12. The pressure sensor based on NCPC by using 3D printing: (a) cantilever sensor electrode filled with NCPC (black) in the ABS sensor body (white); (b) the sensor body plugged in the piper end cap; and (c) the sensor installation on a pressure standard jig on the calibrator [13].

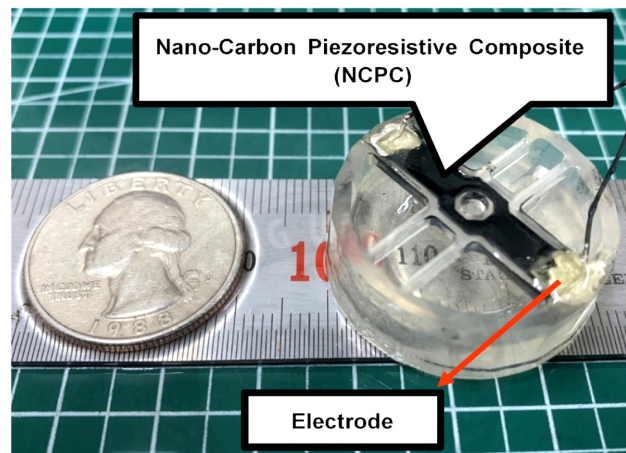


Fig. 13. 3D Printed Loadcell (PLC) using NCPC (nano-carbon piezoresistive composite) [14].

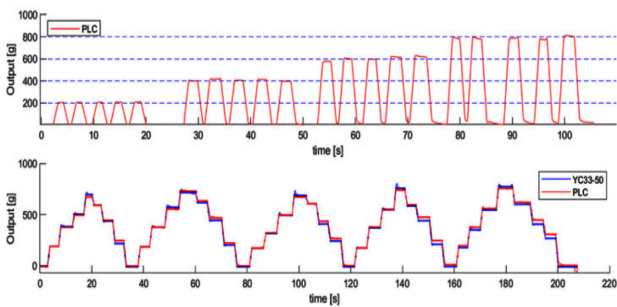


Fig. 14. A successive loading test of the PLC compared with YC-33 [14].

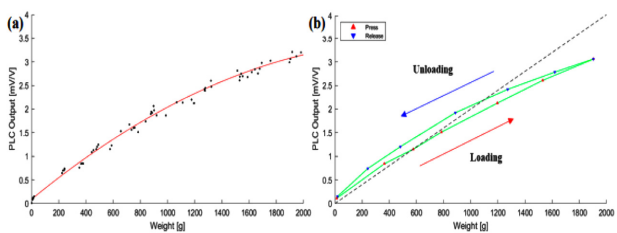


Fig. 15. Loading/unloading test of the PLC to the maximum analytical load, 2 kg: (a) hysteresis characteristic; and (b) 5 time measurements [14].

향상되는 결과를 얻을 수 있었고, 이를 NCPC 활용 센서 개발에 있어 센서 구조가 지니는 중요성을 실험 연구로 발표하였다.

2021년 Jung은 Fig. 13과 같이 UV 레진과 DLP 프린팅방식을 활용한 3D 프린팅 로드셀(Printed Loadcell, PLC)을 연구, 발표하였다. 3D PLC는 하중 변환을 위하여 단순한 보 구조를 센싱 구조체로 하였으며, NCPC를 그 구조체에 도포하여 변형을 감지하는 센싱부로 제작하였다 [14].

이 연구에서 3D PLC 성능 특성은 하중에 의한 전압 출력 특성 실험을 기반으로 평가되었다. 무부하 상황에서 체로 밸런스 전압 출력은 NCPC의 고유한 잡음 응답으로 인해 약간의 편차를 보였으나 안정적이었으며, 응답 속도는 상용 로드셀(YC33-50)과 유사하였다. PLC의 연속적인 하중 인가실험에서 드리프트 문제와 온도 민감도 특성이 있었으나, Fig. 14에서 보듯 전반적인 출력 사양은 상용 로드셀 수준으로 보상이 가능하였다. 다만, 고분자 로드셀이 지니는 문제인 비선형성, 반복성 및 히스테리시스는 Fig. 15에서 같이 상용 로드셀의 시장 수요 조건에는 미흡한 수준이었다 [14].

Jung의 연구를 통하여 3D PLC는 향후 기술과 제작 보완이 이루어질 경우, 새로운 로드셀 제작 방식으로 활용될 수 있는 기초 연구가 수행되었다. 향후 3D 프린팅 센서 OEM/design-in 센서 시장을 위한 유망한 솔루션이 될 수 있는 가능성을 실험적으로 제시하였다.

Table 1. Overall characteristics of the 3D printing types for sensor fabrication

Type	DLP	DIW	FDM
Cost	×	○	◎
Material variety	△	◎	◎
Reproducibility	◎	○	○
Printing resolution	◎	△	○
Fab. size	△	○	◎
Clogging	◎	×	○
Post process	○	△	○
Fab. Speed	○	○	◎
Fabrication suitability	△	○	◎

(Fabrication compatibility: High ◎ ○ △ × Low)

## 6. 고찰

3D프린팅 센서 제작 방식의 대표적 특징을 비용(cost), 재료의 다양성(material variety), 특성 재현성(rep-roductability), 출력 정밀성(printing resolution), 출력 크기(Fab. size), 출력 시 노즐 막힘(clogging), 출력 후처리 과정(post process) 및 출력 속도(Fab. speed) 등을 센서 제작 관점에서 분석하여 Table 1에 요약하여 도시하였다.

3D 프린터의 활용도가 높아짐에 따라 센서 공학 분야에서도 이를 활용한 연구 개발이 필요하다고 판단된다. 3D 프린팅 센서 제작 기술은 기존 MEMS 기술을 보완할 제작 기술이 될 수 있을 것으로 사료된다. 더불어 기존 반도체 공정보다 비용이 저렴한 장비와 다양한 소재를 활용하여 센서를 현장에서 실시간으로 제작할 수 있으며, 개방형 플랫폼(open platform) 기술과 접목하여 on demand 수요에 대응할 수 있는 센서 제작 기술로 기대된다.

끝으로, 3D 프린팅 기술의 다양한 재료를 사용하는 특성은 최근 활발히 연구되고 있는 센서 소재 연구와 연계하여 신속하게 새로운 센서를 제작할 수 있게 함으로써, 센서 개발 기술에 기여할 수 있을 것이다. 따라서 이와 관련된 연구와 관심이 필요할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 재원으로 학문후속세대양성사업 (2020R1A6A3A1307), 이공학개인지초연구지원사업 (2018R1D1A1B07048103), 이공분야학문후속세대양성사업 (2019R1A6A3A12031466)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## REFERENCES

- [1] [https://www.chosun.com/economy/tech\\_it/2021/10/14/QSUV6NPMOFASLOOR4ILWZ46FA4/](https://www.chosun.com/economy/tech_it/2021/10/14/QSUV6NPMOFASLOOR4ILWZ46FA4/)(retrieved on Oct. 18, 2021)
- [2] H. Liu, H. Zhang, W. Han, H. Lin, R. Li, J. Zhu, and W. Huang, "3D Printing Flexible Strain Sensors: From Printing to Devices and Signals", *Adv. Mater.*, Vol. 33, 8, pp. 2004782(1)-2004782(19), 2021.
- [3] T. Blachowicz and A. Ehrmann, "3D Printed MEMS Technology—Recent Developments and Applications", *Micro-machines*, Vol. 11, No. 4, pp. 434(1)-434(14), 2020.
- [4] A. Mora, P. Verma, and S. Kumar, "Electrical conductivity of CNT/polymer composites: 3D printing, measurements and modeling", *Compos. B. Eng.*, Vol. 183, pp. 107600(1)-107600(28), 2020.
- [5] S. J. Leigh, R. J. Bradley, C. P. Purcell, D. R. Billson, and D. A. Hutchins, "A Simple, Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors", *PLoS One*, Vol. 7, No. 11, pp. e49365(1)-e49365(6), 2012.
- [6] S. H. Oh, "3D printing of Ceramics: Introduction and the Feasibility in Dentistry", *J. Korean Dent. Assoc.*, Vol. 58, No. 7, pp. 448-459, 2020.
- [7] H. Guo, R. Lv, and S. Bai, "Recent advances on 3D printing graphene-based composites", *Nano Mater. Sci.*, Vol. 1, No. 2, pp. 101-115, 2019.
- [8] S. H. Ko and J. H. Kwon, "Printing for Micro/nano-fabrication", *J. KSME*, Vol. 59, No. 3, pp.22-43, 2019.
- [9] G. Postiglione, G. Natale, G. Griffini, M. Levi, and S. Turri, "Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling", *Compos. A*, Vol. 76, pp. 110-114, 2015.
- [10] K. Gnanasekaran, T. Heijmans, S. V. Bennekou, H. Woldhuis, S. Winjnia, G.D. With, and H. Friedrich, "3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling", *Appl. Mater. Today*, Vol. 9, pp. 21-28, 2017.
- [11] I. P. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, S. Shanov, and D. Shi, "A Carbon Nanotube Strain Sensor for Structural Health Monitoring", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, No. 3, pp. 737-748, 2006.
- [12] I. P. Kang, "A Study on Sensing Characteristics of Carbon Nanotube Smart Composite Nano Sensors Based on Electrical Impedance Measurement", *J. Korean Soc. Power System Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 65-71, 2009.
- [13] S. Y. Kim and I. P. Kang, "A Study on the Development of a Novel Pressure Sensor based on Nano Carbon Piezoresistive Composite by Using 3D Printing", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. – A*, Vol. 41, No. 3, pp. 187-192, 2017.
- [14] K. Y. Joung, S. Y. Kim, I. P. Kang, and S. H. Cho, "3D-Printed Load Cell Using Nanocarbon Composite Strain Sensor", *Sens.*, Vol. 21, No. 11, 2021.
- [15] J. F. Christ, N. Aliheidari, P. Pötschke, and A. Ameli, "Bidirectional and Stretchable Piezoresistive Sensors Enabled by Multimaterial 3D Printing of Carbon Nanotube/Thermoplastic Polyurethane Nanocomposites", *Polym.*, Vol. 11, No. 1, pp. 11(1)-11(16), 2019.
- [16] W. Huang, K. Dai, Y. Zhai, H. Liu, P. Zhan, J. Gao, G. Zheng, C. Liu, and C. Shen, "Flexible and Lightweight Pressure Sensor Based on Carbon Nanotube/Thermoplastic Polyurethane-Aligned Conductive Foam with Superior Compressibility and Stability", *ACS App. Mater. Interfaces*, Vol. 9, No. 48, pp. 42266-42277, 2017.
- [17] K. Li, H. Wei, and W. Liu, "3D printed stretchable capacitive sensors for highly sensitive tactile and electrochemical sensing", *Nanotechnol.*, Vol. 29 No. 18, pp. 185501(1)-185501(8), 2018.
- [18] X. Wan, F. Zhang, Y. Liu, and J. Leng, "CNT-based electro-responsive shape memory functionalized 3D printed nanocomposites for liquid sensors", *Carbon*, Vol. 155, pp. 77-87, 2019.
- [19] T. D. Ngo, A. Kashan, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges", *Compos. B. Eng.*, Vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [20] T. Xiao, C. Qian, and R. Yin, "3D Printing of Flexible Strain Sensor Array Based on UV-Curable Multiwalled Carbon Nanotube/Elastomer Composite", *Adv. Mater. Technol.*, Vol. 6, No. 1, pp. 2000745(1)-200745(10), 2020.
- [21] A. Cortés, X. F. Sánchez-Romate, and A. Jiménez-Suárez "Mechanical and Strain-Sensing Capabilities of Carbon Nanotube Reinforced Composites by Digital Light Processing 3D Printing Technology", *Polym.*, Vol. 12, No. 4, pp. 975(1)-975(15), 2020.
- [22] G. Gonzalez, E. Fantino, and V. Bertana, "Development of 3D printable formulations containing CNT with enhanced electrical properties", *Polym.*, Vol. 109, pp. 246-253, 2017.
- [23] <https://3dplife.tistory.com/100> (retrieved on Oct. 10, 2021)
- [24] M. G. A. Mohamed, H. Kumer, and Z. Wang, "Rapid and Inexpensive Fabrication of Multi-Depth Microfluidic Device using High-Resolution LCD Stereolithographic 3D Printing", *Manuf. Mater. Process.*, Vol. 3, No. 1, pp. 26(1)-26(11), 2019.
- [25] I. P. Kang, K. Y. Joung, B. K. Choi, S. Y. Kim, G. W. Oh, B. T. Kim, and W. K. Baek, "A Study on Load Cell Development by means of Nano-Carbon Piezo-resistive Composite and 3D printing", *J. Drive Control*, Vol. 17, No. 4, pp. 97-102, 2020.
- [26] J. F. Christ, N. Aliheidari, A. Ameli, and P. Pötschke, "3D printed highly elastic strain sensors of multiwalled carbon nanotube/thermoplastic polyurethane nano composites", *Mater. Des.*, Vol. 131, pp. 392-401, 2017.
- [27] K. Y. Kim, J. H. Park, J. H. Suh, M. S. Kim, Y. R. Jeong, and I.K. Park, "3D printing of multi-axial force sensors using carbon nanotube (CNT)/thermoplastic polyurethane (TPU) filaments", *Sens. Actuators A Phys.*, Vol. 263, pp. 493-500, 2017.