

# 구리 와이어-나일론 복합소재 필라멘트를 이용한 적층제조 공정에 관한 연구

김예진\*, 김석\*, 조영태\*<sup>#</sup>  
\*창원대학교 스마트제조융합협동과정

## A Study on the Additive Manufacturing Process using Copper Wire–Nylon Composite Filaments

Ye Jin Kim\*, Seok Kim\*, Young Tae Cho\*<sup>#</sup>

\*Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University  
(Received 16 March 2022; received in revised form 05 April 2022; accepted 11 April 2022)

### ABSTRACT

Fused deposition modeling (FDM), based on stacking a continuous filament of polymer or composite materials, is well matured and is thus widely used in additive manufacturing technology. To advance FDM-based 3D printing technology, the mechanical properties of additively manufactured composite materials must be improved. In this study, we proposed a novel FDM 3D printing process using metal wire–polymer composites, enabling enhanced mechanical properties. In addition, we developed a new type FDM filament of copper wire wrapped in nylon material for stable 3D printing without thermal damage during the printing process. After FDM printing of the copper wire–nylon composite filament, we conducted a tensile test to investigate the mechanical behavior of the printed composite materials. The experimental results confirmed that the tensile strength of the 3D-printed metal wire–polymer composites was higher than that of the conventional single polymer material. Thus, we expect that the FDM printing process developed in this study may be promising for high-load-bearing applications.

**Keywords** : Composites(복합소재), 3D Printing(3D 프린팅), Additive Manufacturing(적층 가공), Mechanical Properties(기계적 물성)

## 1. 서 론

제조업 기술 혁신의 하나인 3D 프린팅 기술은 기존 산업의 패러다임을 변화시켜 제조 공정 혁신 및 신시장 창출을 위한 핵심기술로 대두되고 있다. 3D 프린팅은 다품종 소량 생산과 개인 맞춤형

제작이 용이한 산업으로, 경제의 규모와 저임 노동비 우위를 가진 전통적인 방식과 다른 형태의 생산/유통/소비 방식을 탄생시키고 있다.<sup>[1]</sup> 3D 프린팅 기술은 액체, 분말, 고체 형태의 특정 물질을 한 층씩 쌓아 올려 3차원 형태의 입체물을 제조하는 것으로 적층 방식에 따라 광조형, 압출형, 분사형, 소결형 등이 있고,<sup>[2,3]</sup> 본 연구에서는 공정 단가가 저렴하고 구조가 단순하여 사용하기가 편리하여 현재 가장 널리 사용되는 압출형인 Fused

# Corresponding Author : ytcho@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-581-2239, Fax: +82-55-213-2859

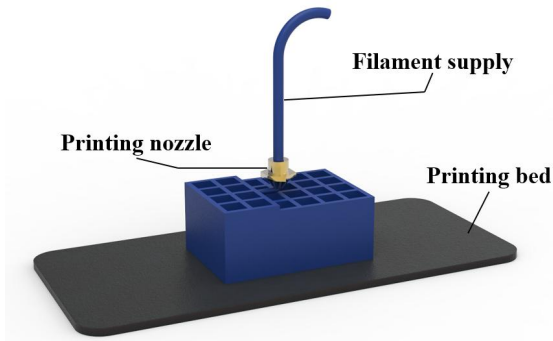


Fig. 1 Schematics for FDM 3D printing process

Deposition Modeling(FDM) 방식의 3D 프린팅을 채택하였다. FDM 방식은 Fig. 1과 같이 가열된 노즐 헤드를 통해 재료가 용융/압출되어 나오면서 경화된 층을 쌓는 방식이며, 절삭가공으로는 제작하기 어려운 복잡한 형상을 손쉽게 출력할 수 있는 장점이 있다.<sup>[4]</sup>

현재 플라스틱 수지를 이용한 3D 프린팅 기술은 급격한 기술 고도화로 인해 기술적으로 충분히 성숙해 있으나, 기존 기술에 있어서 대부분의 플라스틱 3D 프린팅을 통해 제조된 부품은 강도를 확보하지 못하여 무게나 하중 인가를 버텨야 하는 기능성 부품으로 활용할 수 없는 단점이 있다. 이러한 이유로 현재 플라스틱 수지가 아닌 금속재료를 사용한 3D 프린팅 기술에 대한 연구가 주목받고 있지만 금속 분말 등을 사용한 금속 적층은 금속을 녹일 수 있을 만큼 충분히 높은 온도의 노즐 히팅 장치와 아크 발생 등 고려해야 할 점이 많기 때문에 접근성에 있어 제약이 있다.

따라서 다양한 소재와 접근 방법을 이용하여 FDM 3D 프린팅 방식에서 기계적 물성을 향상시키기 위한 연구는 현재에도 활발하게 진행되고 있다.<sup>[5-12]</sup> 본 연구에서는 연속 섬유 형태의 금속 와이어가 삽입된 나일론 복합소재 기반의 필라멘트를 이용하여 기존 단일 플라스틱 소재 방식에 비해 기계적 강성과 강도를 향상시킬 수 있는 복합소재 FDM 3D 프린팅 기술을 제안하고자 한다. 필라멘트의 기계적 특성 향상을 위해 기존의 복합소재 필라멘트와는 달리 구리 와이어를 나일론 필라멘트로 감싸 연속적인 구리 와이어가 내부에 삽입된 복합소재 필라멘트를 제작하여 플라스틱 필라멘트의 기계적 물성을 향상할 수 있다.

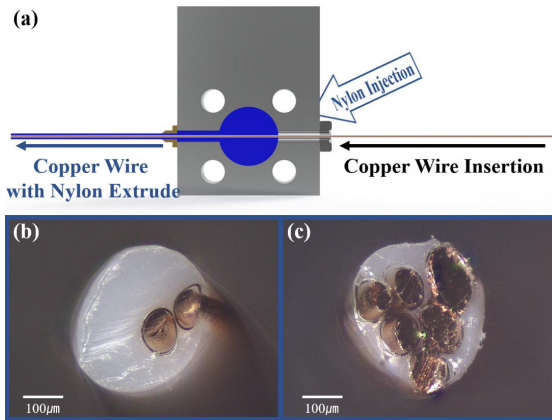
또한 particle 등을 필라멘트와 융합하여 복합소재를 제작하는 기존의 연구와는 다르게 연속적인 구리 와이어를 삽입하여 제작한 필라멘트의 적층 공정은 필라멘트 전체를 용융하여 적층하는 방식과는 차이가 있다. 본 연구에서는 내부에 삽입된 구리 와이어를 녹이지 않은 채로 와이어를 감싼 나일론을 접착제 역할을 할 수 있도록 적층하는 방식을 사용하였다. 최종적으로 제작된 구리 와이어 나일론 복합소재 필라멘트를 FDM 3D 프린터를 통해 적층하여 인장 시험을 통해 기계적 물성을 측정하였고, 그 결과를 나일론 필라멘트 단일 소재 적층 시편의 시험 결과와 비교하여 강도의 향상을 확인하였다.

## 2. 복합소재 필라멘트 제조

금속 와이어 폴리머 복합소재 필라멘트의 제조에 앞서, 이에 맞는 재료를 선정하였다. 복합소재를 구성할 재료 중 폴리머는 탄성과 강도가 우수하여 금속 와이어를 감싸는 공정에서 박리가 일어날 확률을 줄여줄 수 있는 나일론 필라멘트를 선택하였고, 내부에 삽입할 금속 와이어는 구하기 용이하고 가격이 저렴하며 장비의 손상 없이 절단 가능한 0.1mm 직경의 구리 와이어를 선택하였다. 사용한 구리 와이어는 약 0.85MPa의 인장강도를 가지고 있다.

필라멘트 제작 장치는 크게 용융 구간과 경화 구간, 인출 구간으로 나눌 수 있다.<sup>[13]</sup> 용융 구간은 압출 속도를 제어할 수 있는 모터, 필라멘트를 잘게 자른 형태인 펠렛을 삽입하는 호퍼, 펠렛을 천천히 밀어 넣을 수 있는 스크류 피스톤, 그와 연결되어 설정한 온도로 히팅할 수 있는 배럴, 스크류 피스톤의 끝 점과 연결되어 용융된 필라멘트와 외부 걸개에 걸린 구리 와이어를 합칠 수 있는 헤드로 나뉘어 있고, 경화 구간은 구리 와이어와 용융된 필라멘트를 경화시킬 수 있는 쿨링 팬과 필라멘트가 지나가는 부분에 흐르는 물로 필라멘트를 경화시킬 수 있는 수조로 구성되어 있다.

마지막으로 인출 구간은 경화 구간을 지나오며 경화된 필라멘트의 굵기를 실시간으로 측정할 수 있는 디지털 인디케이터, 고무로 감싸진 롤러 사이에 경화된 필라멘트를 끼워 설정한 속도로 당겨줄 수 있는 인출기, 일정한 속도로 당겨져 나온 필라멘트의 길이를 측정할 수 있는 카운트 롤러, 최종적으로 완성된 필라멘



**Fig. 2 (a) Manufacturing process for copper-nylon composite filament and manufactured filament cross section. (b-c) Cross-sectional image of copper-nylon composite filament with 2 and 6 copper wires**

트를 빈 틀에 감아주는 장치로 구성되어 있다.

이러한 복합소재 필라멘트 제작 장치를 이용하여 구리 와이어-나일론 필라멘트를 제작하게 된다. 제작 방법은 우선 호퍼에 펠렛 상태의 나일론 필라멘트를 채워 넣고 용융 구간의 외부 겉개에 직경 0.1mm의 구리 와이어를 걸고 그 와이어를 Fig. 2-(a)의 화살표 방향으로 통과시킨다. 그 후 배럴 및 헤드를 충분히 히팅 시키고 압출 모터를 켜고 속도를 지정한다. 압출 속도는 용융된 나일론을 밀어내는 속도로 설정한 속도대로 압출 모터가 동작하기 시작하면, 펠렛은 스크류 피스톤을 통해 히팅 된 배럴에서 용융되어 헤드의 뒷면을 통해 내부에 채워지게 되고, 헤드를 관통해있던 구리 와이어를 감싸며 천천히 압출된다. 헤드에는 스크류 피스톤과 연결되어 용융된 나일론이 채워지는 뒷면과 구리 와이어를 관통시키는 부분이 연결되어 있는데, 필라멘트가 압출되는 출구 방향에는 압출되는 필라멘트의 직경을 0.4mm 이하로 조절하기 위해 출구 직경 0.4mm의 노즐을 장착한다. 노즐을 통해 압출되어 나온 필라멘트는 일정하게 설정한 굵기대로 제작된다.

압출 속도를 일정 속도 이상으로 크게 설정할 경우 용융되는 나일론의 양을 감당하지 못해 구리 와이어를 삽입하는 방향으로 용융된 나일론이 역류하게 되고, 반대로 압출 속도가 너무 느릴 경우 충분한 양의 나일론

이 공급되지 않기 때문에 나일론이 코팅되지 않은 채 구리 와이어만 헤드를 통과해 나오기 때문에 압출 속도는 중요한 조건 중 하나이다. 실험을 통해 압출 속도를 2.6rpm - 3rpm으로 결정하였다.

이렇게 노즐을 통해 압출된 복합소재 필라멘트를 쿨링 팬을 통해 경화 시키게 되는데, 나일론 필라멘트가 수분에 아주 취약하기 때문에 수조를 사용하여 흐르는 물에 경화시키는 방식은 사용하지 않는다. 경화된 필라멘트는 실시간으로 디지털 인디케이터를 통해 직경을 확인하며 고무로 감싸진 롤러에 고정되고 인출기를 통해 속도를 지정한다. 인출 속도는 필라멘트를 고정시켜 일정한 속도로 당기는 기준이며 압출 속도와 마찬가지로 복합소재 필라멘트를 제작하는 중요한 조건이다.

인출 속도를 과하게 빨리 조절했을 경우 잡아당기는 힘을 견디지 못한 구리 와이어가 끊어지거나, 용융된 나일론이 구리 와이어에 고정되어 경화되는 시간이 부족하여 헤드를 통과한 후 구리 와이어에서 박리되는 현상이 일어나게 된다. 반대로 인출 속도를 느리게 설정하면 빠른 압출 속도를 설정한 것과 같이 압출되어 나오는 나일론을 전부 필라멘트로 제작할 수 없기 때문에 나일론이 구리 와이어가 삽입되는 방향으로 역류하게 되며 그 경우 역류한 나일론이 경화되어 구리 와이어의 삽입을 방해하게 된다. 실험을 통해 인출 속도를 12rpm - 16rpm 사이로 결정하였다. 이와 같이 일정한 속도로 당겨진 필라멘트는 마지막으로 둘레 200mm인 롤러를 지나 자동으로 감기게 되며 롤러의 회전수로 필라멘트의 길이를 측정할 수 있다. 이러한 방법으로 구리 와이어 개수를 각각 달리하여 제작된 결과물을 Fig. 2-(b)-(c)에서 보여주고 있다.

### 3. 복합소재 필라멘트의 적층

본 연구에서 제작한 구리 와이어-나일론 복합소재 필라멘트는 연속된 구리 와이어를 나일론 필라멘트의 내부에 삽입하여 제작하는 방식이다. 이를 높은 온도를 이용하여 금속을 용융하여 적층하는 방식인 금속 3D 프린팅이 아닌 일반적인 FDM 프린터를 이용하여 적층하기 위해서는 조건이 필요하다. 적층에는 Markforged-Onyx Pro 장비를 사용하였다. Fig. 3의 커터가 내장된 듀얼 노즐을 사용하면 적층물을 제조할 때에 두 가지 필라멘트를 혼용할

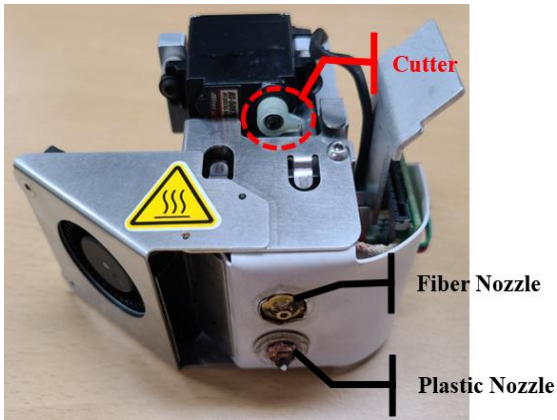


Fig. 3 Dual nozzle head with cutter

수 있고, 구리 와이어는 용융하지 않고 겹의 나일론 필라멘트만을 용융시켜 적층하는 구리 와이어 복합소재 필라멘트의 특성상 헤드에 내장된 커터로 적층 시 구리 와이어를 절단하며 제작된 필라멘트를 프린팅 할 수 있다. 프린트 헤드의 듀얼 노즐은 기본 플라스틱 필라멘트를 적층하는 0.4mm 직경의 일반 플라스틱 노즐과 Fiber glass를 적층하기 위한 커터가 내장된 0.9mm 직경의 파이버 노즐로 구성되어 있다. 이 중 0.9mm의 노즐의 익스트루더는 0.5mm 이하의 필라멘트만 지나갈 수 있도록 설계되어 구리 와이어 복합소재 필라멘트의 직경을 0.4mm로 설정하고 제작하였다. 0.4mm 직경의 일반 노즐은 1.75mm 직경의 기존 필라멘트를 전체적으로 용융하여 0.4mm 이하로 압출하여 적층하는 방식인데 반해 0.9mm 직경의 복합소재 노즐을 통해서 Fig. 4(a)와 같이 히팅 된 노즐을 통해 내부에 삽입된 구리 와이어는 모양을 유지한 채로 겹면의 나일론 필라멘트만을 용융하여 구리 와이어를 고정하는 접착제 역할을 하도록 적층하는 방식이다. 실험에 사용한 Markforged - Onyx Pro 장비는 파이버 노즐에서 출력되는 소재만을 이용하여 제품을 출력하는 것이 불가능하며, 프린팅을 진행하는 Plastic nozzle의 온도는  $270\pm 2^{\circ}\text{C}$ , Fiber nozzle의 온도는  $265\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 고정되어 있고 이를 변경할 수 없도록 설계된 장비이다. 적층에 있어서 복합소재 필라멘트의 비율을 최대한 높이기 위해 각각 1 레이어당 0.1mm의 두께를 가지는 바닥 레이어와 지붕 레이어는 3개, 1 레이어당 0.4mm의 두께를 가지는 벽면 레이어는 1개

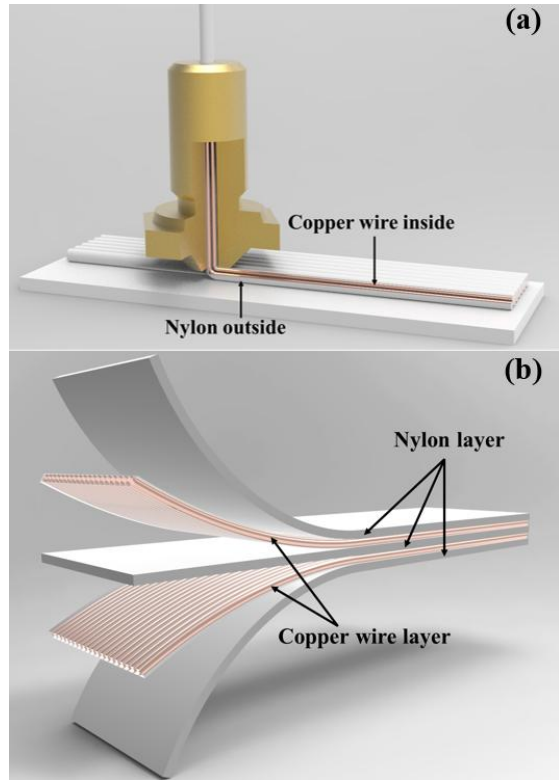


Fig. 4 (a) Schematic diagram of additive manufacturing of copper wire-nylon composite filaments, (b) Sandwich structures of copper wire-nylon composite filament

로 최소한의 레이어만 가질 수 있도록 설정하고, 복합소재 필라멘트에 사용한 것과 동일한 재료인 나일론 필라멘트로 적층하였다. 또한 솔리드 채우기로 내부 적층 비율을 100%로 설정하여 적층물 내부의 빈 공간을 최대한 줄였다.

필라멘트를 개발할 당시 적층 최적 조건을 찾기 위해 구리 와이어를 각각 2가닥, 4가닥, 6가닥 삽입한 필라멘트를 제작하였으며, 적층 시 구리 와이어 6가닥을 삽입한 필라멘트를 적층한 제품의 단면에 빈 공간 없이 적층 되는 것을 확인하였기 때문에 6가닥을 초과한 경우는 시도하지 않았다. 구리 와이어를 6가닥 삽입한 필라멘트의 적층물은 구리 와이어의 밀도가 높은 대신 구리 와이어를 접촉시켜주는 역할을 하는 나일론의 함량이 매우 적었기 때문에 레이어끼리의 접착력이 떨어

지는 문제점이 발생하였다. 이 문제점을 해결하기 위해 적층 시 듀얼 노즐을 사용하여 구리 와이어 복합소재 필라멘트로 적층한 레이어 사이에 나일론 필라멘트 레이어를 한 층씩 삽입하는 샌드위치 구조로 적층을 진행하며 부족한 나일론 필라멘트를 보충해 주었고, 이는 Fig. 4-(b)에서 확인할 수 있다. 이러한 방식으로 구리 와이어 복합소재 필라멘트 레이어 사이에 충분한 나일론이 적층되며 레이어 면 사이의 접착력 문제를 해결하며 성공적으로 적층 공정을 수행하였다.

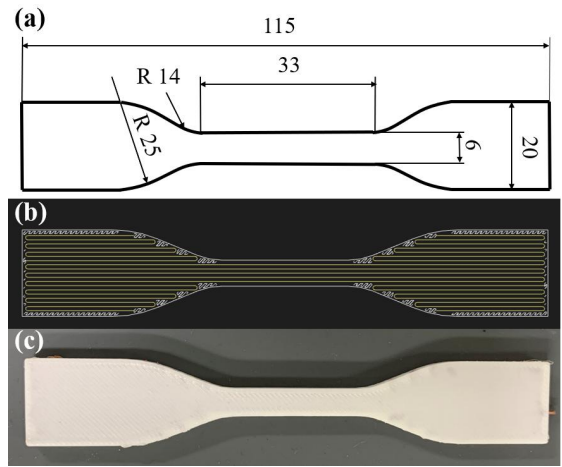
#### 4. 인장 시험

기본적인 인장 시험 방법으로는 도그본 시편 혹은 원통형 시편을 KS 규격이나 ISO 규격, 혹은 ASTM 규격에 맞게 절단하거나 제작하여 단면적을 측정된 후 인장 시험기의 상, 하부에 장착하여 시험을 진행한다. 또한 인장 시험을 진행할 때 표준 규격 선정이 매우 중요하다. Fig. 5-(a)는 본 실험에서 사용한 표준 시편의 도면이다. 복합소재 필라멘트에 사용한 재료는 폴리머와 금속 와이어이므로 인장 시험에는 폴리머를 대상으로 하는 ASTM-D638-IV Type의 인장 시편 규격을 사용하였다.<sup>[14,15]</sup>

우선 가장 강한 필라멘트를 선정하기 위해 필라멘트 적층 전 선행 실험으로 나일론 필라멘트와 구리 와이어 2가닥, 4가닥, 6가닥을 삽입한 필라멘트를 0.35±0.05mm 직경으로 제작하였고, 구리 와이어는 0.1mm로 복합소재 필라멘트 제작에 사용한 크기 그대로 사용하였으며 모든 재료를 각각 10회씩 반복 시험하였다. 정적 하중 재료시험기 Zwick/Roell-005TN를 사용하여 인장 시험을 수행하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다. 나일론 필라멘트의 평균 인장강도는 15.3MPa, 구리 와이어 2가닥, 4가닥, 6가닥이 삽입된 필라멘트의 인장

**Table 1 Tensile test results of filament**

	Nylon without copper wire	Nylon with 2 copper wire	Nylon with 4 copper wire	Nylon with 6 copper wire
Tensile strength [MPa]	15.3 ±10.0	84.5 ±3.5	109.6 ±5.2	122.4 ±10.3



**Fig. 5 (a) Standard tensile test specimen (ASTM-D638-IV), (b) Tensile specimen cross-section tool path, (c) Additive manufactured copper wire - nylon composite tensile specimen**

강도 평균은 각각 84.5MPa, 109.6MPa, 122.4MPa로 측정되었다. 그중 가장 평균 인장강도가 높게 측정되었던 구리 와이어 6가닥이 삽입된 필라멘트를 이용하여 인장 시편을 제작하였다. 비교를 위해 나일론 소재 인장 시편과 구리 와이어 복합소재 인장 시편을 각각 제작하여 3회씩 반복 실험을 진행하였다. 구리 와이어 복합소재 필라멘트를 이용하여 적층하는 경우에는 적층 중 발생할 수 있는 박리 문제를 해결하기 위해 실제로는 복합소재 필라멘트와 나일론 필라멘트를 교차하여 한 층씩 쌓는 방식으로 적층을 진행하였다. 또한 적층 공정에서 내부 채움 방식이 인장강도에 영향을 줄 수 있기 때문에 가장 인장강도를 크게 할 수 있는 솔리드 채움 방식으로 고정하여 모든 인장 시편을 제작하였다.<sup>[16]</sup>

3D 프린팅에 있어 기계적 특성은 방향에 따라 달라지므로 최대 인장강도를 얻기 위해 적층 경로는 Fig. 5-(b)에서 확인할 수 있듯이 인장 방향으로 고정하여 시편을 제작하였다.<sup>[17,18]</sup> 이와 같은 적층 경로를 이용하여 실제 제작한 인장 시편은 Fig. 5-(c)에 나타내었다.

인장 시험기의 이송 속도는 1.5mm/min으로 설정하였고, 실제 적층 제작한 표준 인장 시편의 표점 거리는 33mm, 도그본 시편의 두께는 4mm로 하였다. 이렇게 제작된 전체 시편의 초기 단면 넓이의 평균은 약

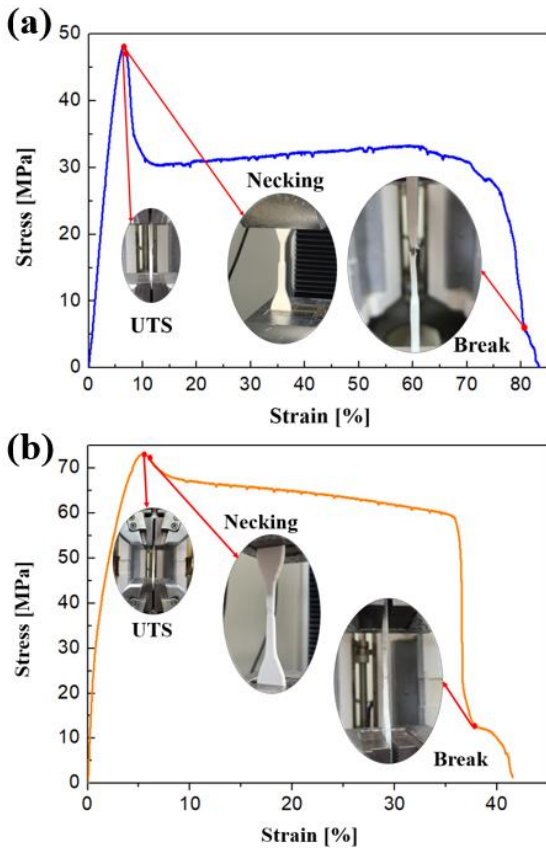


Fig. 6 Stress-Strain curve : (a) Nylon without copper wire specimen, (b) Nylon with copper wire composite specimen

26.3mm<sup>2</sup>이다. 적층 시 레이어 높이는 나일론 필라멘트와 구리 와이어-나일론 복합소재 필라멘트가 0.1mm로 동일하고, 총 40 레이어를 적층하였다. 지붕과 바닥 레이어는 각각 3개씩 나일론으로 적층하였고, 내부 채움 레이어는 복합소재와 나일론을 한 층씩 번갈아 적층하기 때문에 각각 17 레이어씩 적층 되게 된다. 총 나일론 레이어의 수는 23 레이어로 약 2.3mm 높이를 차지하고, 구리 와이어-나일론 복합소재 레이어는 17개로 1.7mm 높이를 차지한다.

선행 실험을 진행한 장비인 Zwick/Roell-Z005TN은 섬유 전용 지그를 장착하고 있어 도그본 시편을 고정할 수 없기 때문에 표준 ASTM 시편의 인장 시험 장비는 R&B-RB301 Unitech-T를 이용하여 진행하였다.

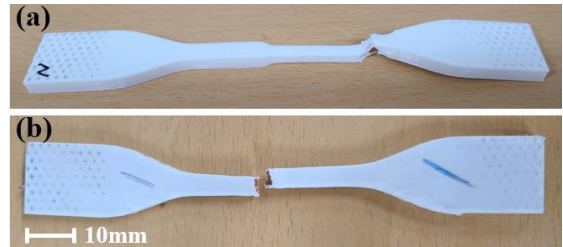


Fig. 7 Broken specimen after tensile test : (a) Nylon without copper wire, (b) Nylon with copper wire composite

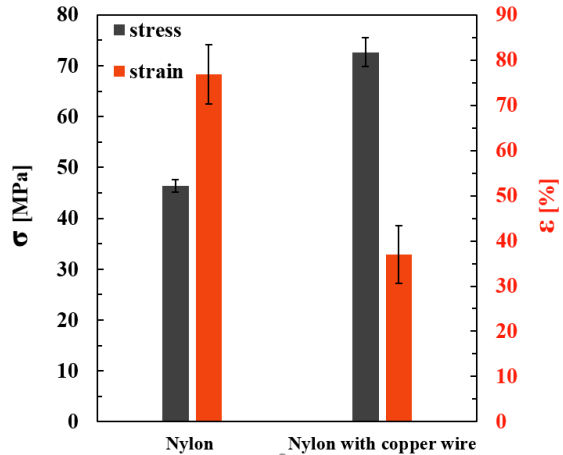


Fig. 8 Tensile test results of nylon with and without copper wire composite

실험 결과, 나일론 시편의 최대 인장강도는 46.3MPa로 측정되었고, 변형률 평균은 76.78%이다. 나일론 시편의 경우 탄성이 뛰어난 특성상 변형률이 크게 측정되었다.

그러한 특성으로 인해 Fig. 6-(a)에서 볼 수 있듯이 네킹이 넓은 거리에 걸쳐 일어났고, 모든 레이어가 한 번에 끊어지지 않고 순차적으로 끊어지는 섬유 복합재와 같은 특징을 보였다. 최종 인장 시험 이후에 시편 중 1개를 제외하고는 한 레이어는 파단되지 않은 채 연결되어 있는 모습을 확인할 수 있었는데, 그 모습은 Fig. 7-(a)에서 확인할 수 있다. 구리 와이어 나일론 복합소재 필라멘트 시편의 인장강도 평균 역시 72.67MPa로, 변형률 평균은 36.97%로 측정되었다. 구리 와이어 복합소재 필라멘트는 나일론 필라멘트보다 낮은 탄성으로 Fig. 6-(b)에서 보이는 Break 직전의

급격한 하강으로 유추할 수 있듯이 네킹이 일어난 후에도 인장강도를 일정 이상 유지하다가 거의 동시에 모든 레이어가 파단되는 모습을 보였다. 파단된 시편은 Fig. 7-(b)에서 확인할 수 있다.

Fig. 8은 모든 시편의 인장 시험 결과를 나일론 시편과 구리 와이어-나일론 복합소재 시편으로 나누어 비교한 결과 그래프로 인장강도와 변형률 평균이 표시되어 있다. 인장강도 평균은 나일론 시편에 비해 복합소재 시편이 26.34MPa 향상되었고 변형률 평균은 나일론 시편 76.78%에서 복합소재 시편 36.97%로 총 39.81% 감소하였다.

3회 반복 실험을 진행하여 측정된 결과의 평균을 비교한 결과 인장강도의 경우 나일론 필라멘트 시편을 기준으로 약 57% 상승한 결과를 확인할 수 있고, 변형률의 경우 나일론 필라멘트를 기준으로 약 52% 감소한 결과가 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 FDM 3D 프린팅 방식을 이용하여 출력하는 플라스틱 적층물의 기계적 물성을 향상하기 위해 플라스틱 필라멘트의 내부에 연속적인 구리 와이어를 삽입하여 복합소재 필라멘트를 제작하고 이를 이용한 적층 공정을 연구하였다. 나일론 화이트 필라멘트의 내부에 구리 와이어를 2가닥, 4가닥, 6가닥 삽입하여 필라멘트 자체의 인장강도를 시험한 결과 구리 와이어 6가닥을 삽입한 복합소재 필라멘트의 인장강도가 가장 크게 나타났다.

이를 바탕으로 나일론 - 구리 와이어 6가닥 복합소재 필라멘트를 이용하여 적층을 진행하였다. 복합소재 필라멘트만을 이용하여 적층 시 구리 와이어는 용융되지 않고 구리 와이어를 감싼 나일론을 용융하여 접착시키는 방식인데, 용융되는 나일론의 양이 부족하여 적층이 잘 진행되지 않아 구리 와이어의 결속을 강화하기 위해 복합소재 필라멘트와 나일론 필라멘트를 Z 축 방향으로 한 layer 씩 번갈아가며 적층하였다.

ASTM - D638 type IV 규격을 이용하여 시편을 제작하였고, 가장 강한 인장강도를 얻기 위해 적층 방향은 인장 방향으로 고정하여 적층하였다.

인장 시험 결과 나일론 - 구리 복합소재 필라멘트를 이용한 시편의 최대 인장강도가 약 57% 향상되었고, 변형률은 약 52% 감소하는 결과가 나타났다.

본 연구에서 제작한 새로운 형태의 필라멘트인 나일론 - 구리 복합소재 필라멘트를 이용하여 적층 시험을 진행하였고, 이때 커터가 달려있는 헤드를 이용함으로써 와이어는 커팅 되고 폴리머는 녹는 형태로 적층이 가능함을 보였다. 구리뿐만 아니라 다양한 금속과 폴리머를 이용해 제작한다면 그 종류에 따라 강도가 크게 상승하여 산업 전반에서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성(Grand ICT연구센터) 사업의 연구결과(IITP-2022-2016-0-00318)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1A5A8083201)”

## REFERENCES

1. Mpfou, T. P., Mawere, C., & Mukosera, M., “The impact and application of 3D printing technology,” *International Journal of Science and Research*, 2014.
2. Berman, B., “3-D printing: The new industrial evolution,” *Business horizons*, Vol. 55, No. 2, pp. 155-162, 2012.
3. Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R., “An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications,” *Procedia Manufacturing*, Vol. 35, pp. 1286-1296, 2019.
4. Yang, M. S., Jang, J. S., Kim, D. H., Sung, J. H., Kim, J. T., Cho, Y. C., & Lee, J. W., “Node Part Development of Vehicle Body with Space Frame Using Design Technology for Additive Manufacturing,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 5, pp. 45-52, 2020.

5. Dudek, P. F. D. M., "FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements," Archives of metallurgy and materials, Vol. 58, pp. 1415-1418, 2013.
6. Mazzanti, V., Malagutti, L., & Mollica, F., "FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties," Polymers, Vol. 11, pp. 1094, 2019.
7. Kim, G. D., "Comparison of Mechanical Properties and Form Accuracy in FDM 3D Printing Based on Building Conditions," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20 No. 8 pp. 52-59, 2021.
8. Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afarani, M., & Zahedi, A. M., "Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites," Composites Part B: Engineering, Vol. 175, pp. 107147, 2019.
9. Sezer, H. K., & Eren, O., "FDM 3D printing of MWCNT re-inforced ABS nano-composite parts with enhanced mechanical and electrical properties," Journal of Manufacturing Processes, Vol. 37, pp. 339-347, 2019.
10. Levenhagen, Neiko P., and Mark D. Dadmun, "Reactive processing in extrusion-based 3D printing to improve isotropy and mechanical properties," Macromolecules, Vol. 52, pp. 6495-6507, 2019.
11. Camargo, J. C., Machado, Á. R., Almeida, E. C., & Sousa, S. E. F. M., "Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 103, pp. 2423-2443, 2019.
12. Wickramasinghe, S., Do, T., & Tran, P., "FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments," Polymers, Vol. 12, pp. 1529, 2020.
13. Carrico, J. D., Traeden, N. W., Aureli, M., & Leang, K. K., "Fused filament 3D printing of ionic polymer-metal composites (IPMCs)," Smart Materials and Structures, Vol. 24, No. 12, pp. 125021, 2015.
14. Jeong, J. Y., Je, T. J., & Jeon, E. C., "Analysis of Mechanical Properties of Polymer Material for Clear Aligner using Uniaxial Tensile Test," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 5, pp.64-69, 2018.
15. Tanikella, Nagendra G., Ben Wittbrodt, Joshua M. Pearce., "Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing," Additive Manufacturing, Vol. 15, pp. 40-47, 2017.
16. Kang, Y. G., Lee, T. W., & Shin, "The Influence of Experiment Variables on 3D Printing using ABS Resin," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 2, pp. 94-101, 2017.
17. Song, Y., Li, Y., Song, W., Yee, K., Lee, K. Y., & Tagarielli, V. L., "Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA," Materials & Design, Vol. 123, pp. 154-164, 2017.
18. Yao, T., Deng, Z., Zhang, K., & Li, S, "A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations," Composites Part B: Engineering, Vol. 163, pp. 393-402, 2019.