

# FDM 3D Printer의 층간 충전율에 따른 강도변화

강용구\*, 권현규\*\*,#, 신근식\*\*\*

\*금오공과대학교 기계설계공학과, \*\*금오공과대학교 기계시스템공학과,  
\*\*\*금오공과대학교 대학원 기계설계공학과

## Strength Variation with Inter-Layer Fill Factor of FDM 3D Printer

Yong-Goo Kang\*, Hyun-Kyu Kweon\*\*,#, Geun-Sik Shin\*\*\*

\*Department of Mechanical Design Eng., KIT UNIV.,

\*\*Department of Mechanical System Eng., KIT UNIV.

\*\*\*Department of Mechanical Design Eng., Graduate School KIT UNIV.

(Received 27 November 2018; received in revised form 2 December 2018; accepted 5 January 2019)

### ABSTRACT

Recently, FDM-type 3D printer technology has been developed, and efforts have been made to improve the output formability and characteristics further. Through this, 3D printers are used in various fields, and printer technologies are suggested according to usage, such as FDM, SLA, DLP, and SLM. In particular, the FDM method is the most widely used, and the FDM method technology is being developed further. The characteristics of the output are produced by the FDM-type 3D printer, which is determined by various factors, and particularly the perspective of the Inter-Layer Fill Factor, which is the volume ratio of the laminated material that exerts a direct influence. In this study, the Inter-Layer Fill Factor is theoretically obtained by presenting the internal space between each layer according to the laminate thickness as a cross-sectional shape model, and the cross section of the actual laminated sample is compared with the theoretical model through experiments. Then, the equation for the theoretical model is defined, and the strength change according to each condition (tensile strength of material, reduction slope, strength reduction rate, and output strength) is confirmed. In addition, we investigated the influence on the correlation and strength between laminate thickness and the Inter-Layer Fill Factor.

**Key Words** : 3D Printer(3차원 프린터), Fused Deposition Modeling(FDM), Laminate Thickness(적층 두께), Inter-Layer Fill Factor(층간 충전율)

## 1. 서 론

4차 산업의 발전과 더불어 이와 관련된 아이템들이 주를 이루는 가운데 3D 프린팅 산업은 날로 성장하고 있으며 단순 초도품 생산뿐만 아니라 교육

및 단순 생산 및 디자인, 패션산업 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이뿐만 아니라 항공 우주공학 측면이나 복합소재 개발, 인체 친화적 소재를 통한 3차원 인공 부품 생산과 같이 고부가성이 짙은 산업으로 영역이 크게 확장되고 있다. 또한 단순 플라스틱에 그치지 않고 소재변환 및 비금속 재질을 이용한 제품 생산과 금속 생산을 통해 복잡한 형상을 금형이나 공작기계가 아닌 프린팅을 통해 제작

# Corresponding Author : [hyunkyu125@gmail.com](mailto:hyunkyu125@gmail.com)

Tel: 010-9856-8129

하는 등 금속 성형에 있어서 혁신적인 발전을 이루어져왔다 해도 과언이 아닐 것이다.

이처럼 3D 프린팅 기술이 발전해온 가운데 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식의 3D Printer의 경우 민간기업 및 세계시장에서 가장 큰 프린터 시장을 형성하였으며 국내뿐만 아니라 해외 업체들도 경쟁이 치열해지는 가운데 출력물의 성형성을 타제품보다 높이며, 출력물 특성을 향상시키고자 노력해 오고 있다.

FDM 방식 3D Printer를 통해 제품 생산 시 출력물의 특성은 다양한 인자들에 의해 결정되는데 Choi등의 FDM 방식에서 주로 쓰는 생분해성 친환경 소재인 PLA(Polylactic Acid)에 대한 물성치 연구<sup>[1]</sup>나 Kang 등의 일반 공업용 소재인 ABS 수지로 3D Printing 시 실험변수들이 출력물에 미치는 영향<sup>[2]</sup>, Park 등의 압출 적층 방식 중 출력 방향에 따른 3D 프린팅 조형물에서의 적층 강도에 대한 고찰<sup>[3]</sup>과 같이 다양한 연구가 진행되어 오고 있다. 특히 앞의 연구 내용들을 종합하면 적층 두께 및 적층 방향이 강도 변화에 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

그러나 강도 변화는 적층두께나 방향 등의 변화에도 영향을 받지만 전체 체적 중에서 적층 재료의 체적비율을 나타내는 층간 충전율(充填率)이 강도 변화에 직접적인 영향을 미친다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 층간 충전율(充填率)이 강도에 미치는 영향을 검토하고자 하였다. 우선 적층 두께에 따른 층간 충전율의 변화를 검토하기 위하여 일정한 노즐 구경에 따라 적층 두께를 변화시켰을 때 응고 후, 각 층간 내부의 빈 공간과 접촉면 적간 형상을 나타내는 단면형상모델을 제시하였다. 제시한 모델을 사용하여 적층두께를 변화시켰을 때 층간 충전율을 이론적으로 구하였으며 적층된 시료를 절단하여 층간 충전율을 계산하고 이론모델과 비교, 검토하였다. 또한 적층두께와 층간 충전율과의 상관관계 및 층간 충전율이 강도에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 적층두께에 따른 층간 충전율

### 2.1 적층단면형상 모델링

직경이 일정한 노즐을 사용하여 프린팅 시 적층 두께가 변하는 경우 적층되는 레이어의 단면형상을 도식화하여 Fig. 1에 나타내었다. 적층두께가 레이어 직경과 동일하면 적층초기의 단면은 원형을 유지하며 적층두께가 점차 작아지면 타원형으로 변화될 것으로 예상된다. 적층초기단면형상인 원형 또는 타원형을 응고 후에도 유지한다고 가정한 모델을 원형단면모델 또는 타원형단면모델이라 칭한다.

그러나 시간이 경과함에 따라 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 레이어 상부와 하부는 자중에 의해 원호 또는 타원 호를 유지하지 못하고 직선화되어 둥근 사각형단면으로 변화될 것으로 생각된다. 이때 적층 두께가 노즐구경과 같은 경우에는 직선화되는 구간이 짧고 적층두께가 작아질수록 직선부분이 긴 둥근 사각형단면으로 변화한다. 이 모델을 둥근 사각형단면 모델이라 한다.

둥근 사각형단면 모델에서는 적층 두께를 변화시켰을 때 레이어단면의 최종형상은 반원의 직경이 적층두께이며 상하 직선 부는 노즐직경에서 적층두께를 뺀 길이인 둥근 사각형의 단면이 된다.

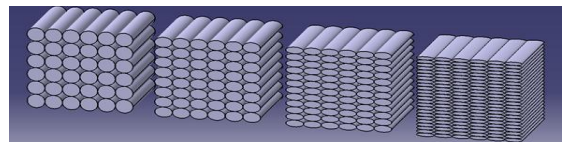


Fig. 1 Laminated thickness 3D Model (0.4~0.1mm)

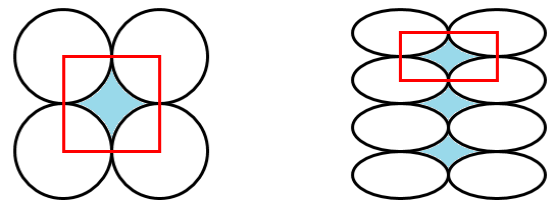


Fig. 2 Circular and elliptical cross section model

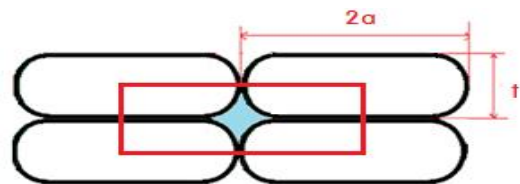


Fig. 3 Rounded rectangular cross section model

따라서 본 연구에서 제시한 등근 사각형 단면모델에서 적층 두께가 변화하면 적층단위면적당 Fig. 3에서 하늘색으로 표시한 층간 내부 빈 공간을 제외한 적층 재료면적의 비율인 층간 충전율 또한 변화되어 재료의 물성 치 및 특성이 달라질 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 세 가지 타입으로 제시한 각 모델별 층간 충전율을 이론적으로 구하고 실제 적층된 시료를 절단하여 층간 충전율을 계산한 뒤 이론모델과 비교, 검토하고자 한다. 또한 적층두께와 층간 충전율과의 상관관계 및 층간 충전율이 강도에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

## 2.2 적층단면 모델들의 층간 충전율

### 2.2.1 원형단면 및 타원형단면 모델

적층초기단면형상인 원형을 응고 후에도 그대로 유지한다고 가정한 모델인 원형단면모델에서의 층간 충전율을 구해 보자.

Fig. 2와 3에 나타낸 바와 같이 적층이 된 경우 반복의 기본단위는 사각형 단면이다. 단면 내에서 하늘색으로 표시된 영역이 빈 공간을 의미한다. 따라서 층간 충전율(Inter-Layer Fill Factor, IFF)을 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$IFF = \frac{\text{Area Occupied by Material in Unit Area}}{\text{Repeated Unit Area}}$$

레이어의 반경이 r이라면

$$IFF = \frac{\pi r^2}{4r^2} = 0.785 \quad (1)$$

적층초기 단면형상인 타원형을 응고 후에도 유지한다고 가정한 모델인 타원형단면모델에서의 층간 충전율도 구해 보자<sup>[4]</sup>.

타원형화 된다고 가정하였을 때 층간 내부 빈 공간을 계산하기 위해 타원의 가로길이를 2a, 세로 길이를 2b라 하면

$$IFF = \frac{\pi ab}{4ab} = 0.785 \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 알 수 있는 바와 같이 원형단면 모델이나 타원형단면모델은 레이어 직경이나 레이어 장축 및 단축의 비가 변화하더라도 층간 충전율은 변화하지 않고 일정한 값 0.785를 유지함을 알 수 있다.

### 2.2.2 등근 사각형단면모델

실제 프린팅시의 적층 형상을 가장 잘 나타내는 모델은 등근 사각형 단면모델이다. 이 모델에서의 단면형상은 끝머리가 등근 사각형상이며, 이는 노즐끝단과 적층부인 베드 부 밑면에 닿게 되면서 평평함이 유지되기에 Fig. 3과 같은 형상을 나타낸다. 이 모델에서의 층간 충전율을 구해 보면 다음과 같다.

$$IFF = \frac{\frac{\pi t^2}{4} + (2a-t)t}{2at} \quad (3)$$

식 (3)은 원형단면 및 타원형단면모델과는 달리 노즐 구경 2a가 일정한 경우 적층 두께 t가 변화하면 층간 충전율이 변화함을 나타내며 Fig. 4에는 적층두께에 따른 세 가지 모델에 대하여 층간 충전율의 변화를 나타내었다.

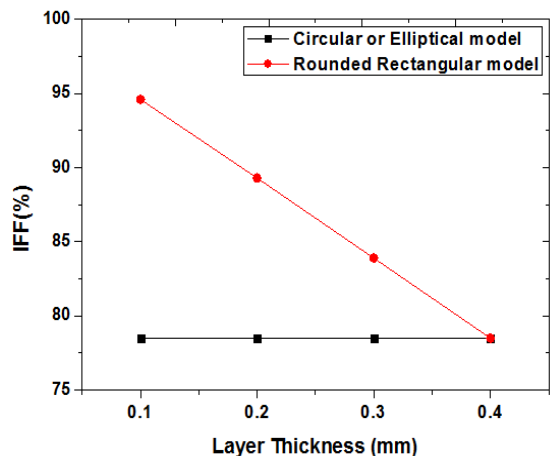


Fig. 4 Variation of IFF with layer thickness (2a=0.4mm)

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 실험장치 및 실험재료

일반적으로 말하는 3D Printer의 경우, 본 연구에서 사용한 프린터와 같이 플라스틱을 물리적으로 녹여 한 층씩 쌓아 올라가는 방식인 FFF(Fused Filament Fabrication) 또는 FDM 방식이라고 할 수 있다. 이 Printing 기법은 3차원 구동에 따라 종류가 달라짐을 알 수 있으며, 흔히 많이 사용하는 구동 방식은 재료가 출력되는 노즐부가 x축으로 이동하고 재료가 적층되는 베드부가 y, z축으로 이동하는 Direct Mendel 방식을 따른다.

Fig. 5는 본 실험에서 사용한 프린터(Anet A8)이며 Prusa Mendel i3 기종을 모티브로 제작되었다. 프린터(Anet A8)는 필라멘트(Filament) 형태의 열가소성물질을 익스트루더(Extruder)를 통해 Heating 부의 노즐 안에서 녹여 강제적으로 밀어주면서 얇은 필름 형태로 출력하는데 응용된 열가소성수지를 바닥부터 반복적으로 경화시켜 시험편 뿐만 아니라 최종 제품까지 제작한다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서 사용할 재질은 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) 및 PLA(Poly Lactic Acid) 수지로 일반적으로 많이 쓰이는 프린터 재료 중 하나이다.

Table 1에는 실험재의 물리적, 기계적 성질을 나타내었다.

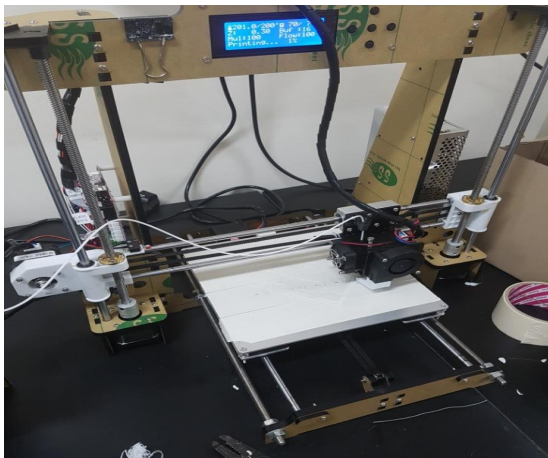


Fig. 5 3D Printer Model (Anet A8)

Table 1 Physical and mechanical properties of ABS & PLA (ESUN Industrial Co.)

Property	ABS Resin	PLA Resin
Print Temp.(°C)	220~260	190~210
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.04	1.24
Elongation at Break(%)	22	8
Tensile Strength(MPa)	43	60
Flexural Strength(MPa)	66	87

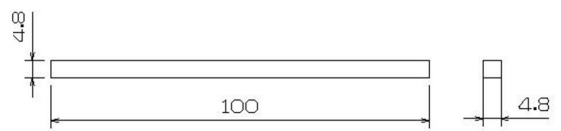


Fig. 6 ABS & PLA Specimen (Unit : mm)

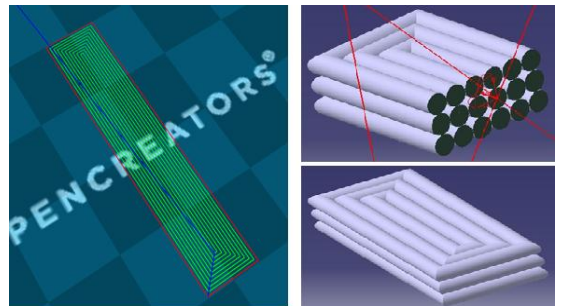


Fig. 7 Lamination shape (Slicing & 3D Modeling)

적층두께에 따른 강도 변화를 연구하기 위하여 x, z축 길이가 4.8mm, y축 길이가 100mm인 Fig. 6에 나타난 인장시험용 시험편을 제작하였다.

적층 형상은 층간 층진율이 강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 기존의 Check 형상이 아닌 직선형으로 Fig. 7에 나타난 바와 같이 적층하여 시험편을 제작하였다.

인장시험에 사용한 장비는 INSTON Model No. 8800이다.

#### 3.2 실험방법

본 실험에 사용한 3D Printer의 구동은 슬라이스 프로그램(Slice Program)을 사용하였다. 슬라이스 프로그램은 3D 모델링된 파일을 STL(Stereo Lithography) 확장자로 변형시킨 뒤 3D Printer가 인식할 수

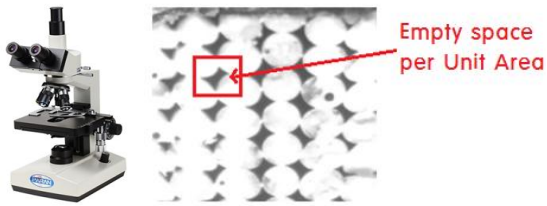


Fig. 8 Optical microscope and measuring range

있도록 G-Coding화 시키는 프로그램이라 할 수 있다. STL 파일은 삼각형의 정점 좌표와 벡터에 의해 정의된 패치의 집합으로 입체를 표현시킨 데이터이다. 이러한 파일은 대다수의 3D Printer에서 사용하고 있는 가장 표준화된 파일 형식이라 할 수 있다.

여기서 노즐의 온도, 제작 속도, 내부 채움, 외벽 및 상 하단 두께, 적층 두께 등 입력 값을 통하여 조건 별 형상이 달라질 수 있다. 이를 통해 최종 제작 시간 및 사용량, 적층 예상 형상을 미리 확인 가능하며 성형 전 제품의 품질 및 생산성을 정하는 주요 프로그램이라 할 수 있다.

실제 3D Printer로 제작된 시험편에서의 층간 충진율을 구하기 위해서는 시험편의 단면을 자른 뒤 Fig. 8에 나타난 광학현미경과 Image J 프로그램을 사용해 측정할 면적에서 threshold 항목의 오차면적의 최소치를 선정한 뒤 검정색의 빈공간의 면적을 판별하여 해당 영역에서의 층간 충진율을 계산하는 방법을 사용하였다.

가로×세로 해상도는 96DPI로 1인치 당 96개의 점이 분포됨을 의미한다. 즉, 25.4mm당 96pixel이며 광학현미경을 사용하여 시험편보다 40배 더 크게 확대시킨 화면 내에서 pixel 수로써 단위면적당 빈공간이 차지하는 비율과 재료가 차지하는 비율인 층간 충진율을 구하였다<sup>6)</sup>.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 적층두께에 따른 강도 변화

두 가지 실험체에 대해 적층두께에 따른 인장강도변화를 조사하기 위하여 노즐직경은 0.4mm로 일정하게 유지하고 적층두께를 0.4mm, 0.3mm, 0.2mm 및 0.1mm로 변화시켰을 때의 인장강도변화를 구하

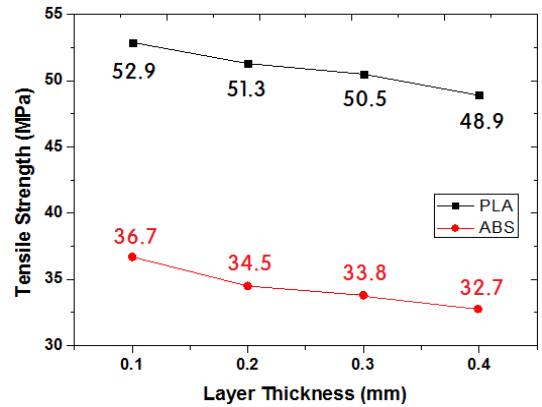


Fig. 9 Variation of Tensile Strength with Layer Thickness of ABS & PLA

여 Fig. 9에 나타내었다<sup>7)</sup>.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 가지 실험체 모두 적층두께가 증가하면 인장강도가 감소하는 경향을 나타낸다. 시험편은 모두 직선적으로 적층함에 따라 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 적층두께 변화에 따른 층간 충진율 변화라고 생각되며 층간 충진율과 인장강도와의 관계 또한 검토하고자 한다.

### 4.2 Printing 된 시험편의 층간 충진율

3D Printer로 제작된 시험편을 절단하여 광학현미경과 Image J 프로그램을 사용하여 앞에서 설명한 바와 같이 단위면적 내 적층 빈 공간의 면적을 pixel의 수로 구하여 Table 2에 나타내었다. ABS재, PLA재 모두 적층두께가 작아질수록 빈공간의 면적인 pixel의 수가 급격히 감소함을 알 수 있다. 이와 같이 빈 공간이 급속히 감소한다는 것은 층간 충진율이 상승함을 나타낸다.

이 빈 공간의 면적데이터를 사용하여 층간 충진율을 구하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 층간 충진율은 ABS 재료 기준으로 적층두께 0.4mm인 경우 79.9%이나 적층두께가 0.3mm, 0.2mm, 0.1mm로 감소함에 따라 83.4%, 89.2%, 94.8%로 증가한다.

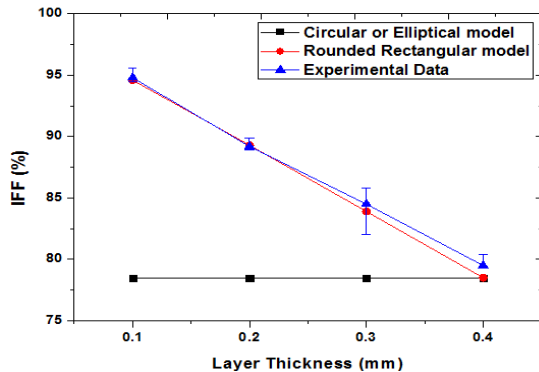
또한 Table 3에는 3가지 단면형상모형을 사용하여 이론적으로 계산한 층간 충진율도 병기하여 나

타내었다. 세 가지 이론모델 중 원형과 타원형모델은 적층두께에 상관없이 층간 충전율이 78.5%로 일정한 값을 나타내어 실험결과와 배치됨을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안한 둥근 사각형모델은 실험결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

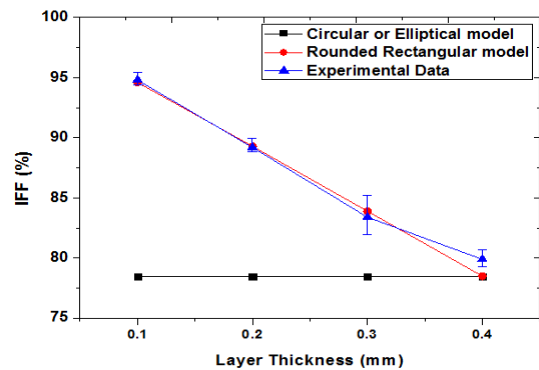
Fig. 10와 Fig. 11은 PLA재 및 ABS재의 적층두께에 따른 층간 충전율의 변화를 나타낸 그림이다.

**Table 2 Number of pixels in vacant site per Unit Area**

Layer Thickness	0.4mm	0.3mm	0.2mm	0.1mm
ABS1	676	476	191	50
ABS2	797	485	203	44
ABS3	722	402	194	46
PLA1	765	475	221	51
PLA2	683	415	237	43
PLA3	797	382	196	37



**Fig. 10 Variation of IFF with layer thickness for PLA**



**Fig. 11 Variation of IFF with layer thickness for ABS**

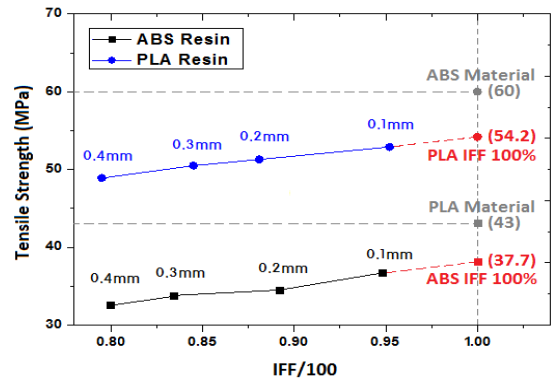
**Table 3 Vacant area rate and Inter-layer Fill Factor for three type model and experiment (Unit: %)**

	Layer Thickness	0.4	0.3	0.2	0.1
		mm	mm	mm	mm
Vacant Area rate	Circular or Elliptical model	21.5	21.5	21.5	21.5
	Rounded rectangular model	21.5	16.1	10.7	5.3
	ABS Resin Experiment	20.0	16.6	10.7	5.1
IFF	PLA Resin Experiment	20.5	15.5	11.9	4.8
	Circular or Elliptical model	78.5	78.5	78.5	78.5
	Rounded rectangular model	78.5	83.9	89.3	94.6
IFF	ABS Resin Experiment	79.9	83.4	89.2	94.8
	PLA Resin Experiment	79.5	84.5	88.1	95.2

### 4.3 층간 충전율에 따른 강도변화

앞 절에서 적층두께가 감소하면 층간 충전율과 적층 재료의 인장강도는 증가함을 알 수 있었다.

본 절에서는 층간 충전율과 인장강도와 상관관계를 직접적으로 규명하기 위하여 두 가지 실험체에 대한 실험결과를 층간 충전율과 인장강도관계데이터로 정리하여 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 PLA재 및 ABS재 모두 층간 충전율이 상승하면 인장강도는 선형적으로 증가한다. 또한 그림 상에는 비교를 위하여 적층 두께도 병기하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 인장강도는 적층두께보다는 면적 비에 해당하는 층간 충전율에 직접적으로 비례함을 알 수 있다.



**Fig. 12 Relation between tensile strength and IFF (ABS & PLA)**

또한 실험데이터를 선형 회귀분석을 통해 층간 층진율 100% 때의 인장강도를 추정해보면 ABS의 경우 37.7MPa로 적층 전 인장강도에 비해 12.2%, PLA의 경우 54.2MPa로 9.6%가 낮게 추정되었다. 이는 하중을 받는 실단면적을 감소시키는 빈 공간의 존재와 빈 공간 존재에 따른 응력집중, 적층 시 대기 중 불순물, 수분 및 열 변형으로 인한 기존 물성치의 변화에 따라 인장강도의 감소총량이 약 10.9%(±1.3%)에 달함을 의미한다. 본 논문에서는 이를 기본감소율이라 칭한다.

따라서 적층에 따라 단면에 빈 공간이 존재하는 일반적인 3D Printing재에서의 인장강도의 경우 기본소재에 비해 기본감소율이 약 11%라 볼 수 있으며, 강도의 감소 기울기 Y는 ABS의 경우 25.13, PLA의 경우 25.10로 거의 일치함을 볼 수 있다.

다음은 적층 재료에 따른 강도저하의 차이를 조사하기 위하여 두 가지 특성이 다른 실험재를 사용한 Fig. 12를 강도 비와 층간 층진율의 관계 그림으로 변환하여 Fig. 13에 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 강도 비를 사용하여 정리하면 Fig. 12에서 나타난 재료에 따른 차이점이 사라져 두 가지 실험재를 사용한 관계데이터들이 중심선 기울기가 0.50인 좁은 밴드 내에 수렴함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 프린팅재료에 관계없이 응력 비와 층간 층진율을 사용하여 정리하면 적층된 재료의 강도를 추정할 수 있음을 의미한다. 따라서 3D 프린팅 된 적층재의 강도를 추정할 간편식을 제안하면 다음과 같다.

$$\frac{\bar{\sigma}}{\sigma} = (1 - C_1) - Y(1 - 0.01 IFF) \quad (4)$$

여기서  $\bar{\sigma}$ : 적층된 재료의 인장강도 (MPa)  
 $C_1$ : 적층소재의 강도기본감소율  
 $Y$ : 감소 기울기  
 $\sigma$ : 원 재료의 인장강도(MPa)

위 식을  $\bar{\sigma}$ 로 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = (1 - C_1 - Y + 0.01 Y * IFF) \sigma \quad (5)$$

또한 본 연구에서 PLA재 및 ABS재를 사용하여

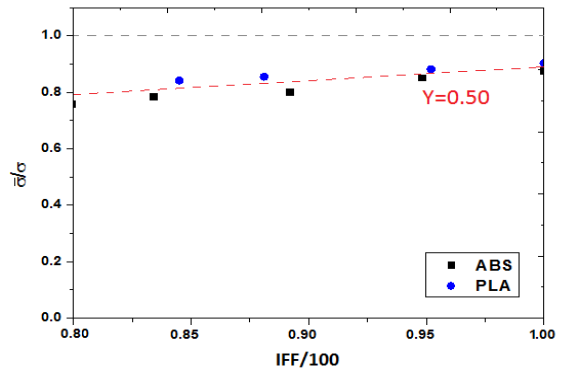


Fig. 13 Relation between strength ratio and IFF (ABS & PLA)

구한  $C_1=0.11$ ,  $Y=0.5$ 의 값을 적용하면 적층재료의 인장강도는 층간 층진율과 원 재료의 인장강도의 함수로 다음과 같은 간편식으로 최종 정리된다.

$$\bar{\sigma} = (0.39 + 0.005 * IFF) \sigma \quad (6)$$

Table 4에는 간편식 (6)을 사용하여 추정한 인장강도와 실험결과를 비교를 위하여 동시에 나타내었다. 두 가지 실험재의 적층두께에 따른 층간 층진율과 원 재료의 인장강도 값을 사용하여 추정한 적층재의 인장강도는 실험값과 오차범위 4.20% 이내로 잘 일치함을 보여 주고 있으며, 이는 적층된 재료의 인장강도를 간편식으로 사용하여 정확하게 추정할 수 있음을 나타낸다.

Table 4 Comparison of estimated and experimental values (ABS & PLA)

IFF (%)	ABS		Error (%)
	Estimated Strength (MPa)	Experimental Value (MPa)	
79.9	33.9	32.7	3.82
83.4	34.7	33.8	2.67
89.2	35.9	34.5	4.20
94.8	37.2	36.7	1.23
IFF (%)	PLA		Error (%)
	Estimated Strength (MPa)	Experimental Value (MPa)	
79.5	47.3	48.9	3.37
84.5	48.8	50.5	3.47
88.1	49.8	51.3	2.87
95.2	51.9	52.9	1.78

## 5. 결 론

본 연구에서는 층간 충전율(充填率)이 강도에 미치는 영향을 검토하고자 적층두께에 따른 층간 충전율의 변화를 해석할 수 있는 단면형상모델을 제시하였다. 제시한 모델을 사용하여 적층두께를 변화시켰을 때 층간 충전율을 이론적으로 구하였으며 실험결과와 서로 비교 검토하였다. 또한 적층두께와 층간 충전율과의 상관관계 및 층간 충전율이 인장강도에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 적층 시 용융되어 쌓이는 재료의 단면형상을 해석할 수 있는 등근 사각형 단면모델을 제안하고 해석 결과와 Image J로 실제 분석한 실험 데이터를 비교한 결과 ABS 및 PLA 재질에 관계없이  $\pm 1\%$  내외로 매우 잘 일치하였다. 그러나 적층 두께 0.4mm에서는 해석 값에 비해 실험값이 1% 이상 차이가 남을 알 수 있다. 이는 0.4mm의 경우에는 자중에 의해 완전한 원형단면이 되지 못했기 때문으로 분석된다.
2. 적층 두께가 감소함에 따라 강도가 증가하는 원인을 층간 충전율의 변화로 해석하였으며 실험의 결과와 잘 일치하였다.
3. 적층 두께 감소에 따라 층간 충전율이 증가함을 이론적, 실험적으로 입증하였다. 실험데이터를 사용하여 선형 회귀분석으로 층간 충전율 100% 시의 인장강도를 추정한 결과, 실제 재료의 물성치보다 ABS의 경우 12.2%, PLA의 경우 9.6%로 작게 나타났다. 이는 하중을 받는 실 단면적을 감소시키는 빈 공간의 존재와 빈 공간 존재에 따른 응력집중, 적층 시 대기 중 불순물, 수분 및 열 변형으로 인한 기존 물성치의 변화에 따른 것으로 추정된다.
4. 적층에 따라 단면에 빈 공간이 존재하는 일반적인 3D 프린팅 재료의 인장강도를 층간 충전율을 사용하여 추정할 수 있는 간편식을 다음과 같이 제안하고 효용성을 검증하였다.

$$\bar{\sigma} = (0.39 + 0.005 * IFF) \sigma$$

## 후 기

“본 연구는 금오공과대학교 교수연구년제에 의하여 연구된 실적물임”

## REFERENCES

1. Choi, W., Woo, J. H., Jeon, J. B., Yoon, S. S., “Measurement of Structural Properties of PLA Filament as a Supplier of 3D Printer,” Journal of Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 57, No. 6, pp.141~152, 2015.
2. Kang, Y. G., Lee, T. W., Shin, G. S., “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.
3. Park, S. J., Park, J. H., Lee, K. H., Lyu, M. Y., “Deposition Strength of Specimens Manufactured Using Fused Deposition Modeling Type 3D Printer,” Polymer(Korea), Vol. 40, No. 6, pp.846~851, 2016.
4. Shin, G. S., Kweon, H. K., Kang, Y. G., “Analysis of Interlayer Filling Rate by Layer Thickness of FDM 3D Printer,” Proceedings of the KSMPE Spring Conference, pp.183~183, 2018.
5. Seol, K. S., Shin, B. C., Zhang, S. U., “Fatigue Test of 3D-printed ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 3, pp.93~101, 2018.
6. Shin, G. S., Kweon, H. K., Kang, Y. G., “The Influence of Experiment Variables on DLP 3D Printing using ART Resin,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 6, pp.101~108, 2017.
7. Shin, G. S., Kweon, H. K., Kang, Y. G., “Strength Change of FDM 3D Printer Material according to Layer Contact Surface,” Proceedings of the KSMPE Spring Conference, pp.184~184, 2018.