

## 3D 프린팅된 인장 시편의 인장강도 향상을 위한 머신러닝

김범수<sup>1</sup> · 한성열<sup>2,\*</sup>

국립공주대학교 광공학 · 금형공학과<sup>1</sup>  
국립공주대학교 디지털융합금형공학과<sup>2</sup>

### Machine Learning to Improve Tensile Strength of 3D-Printed Tensile Specimens

Bum-Soo Kim<sup>1</sup> · Seong-Yeol Han<sup>2,\*</sup>

Department of Optical Engineering and Metal Mold, Kongju National University<sup>1</sup>  
Department of Digital Convergence Metal Mold Engineering, Kongju National University<sup>2</sup>  
(Received February 15, 2024 / Revised March 26, 2024 / Accepted March 31, 2024)

**Abstract:** As the range of 3D printed applications expands, there is an increasing demand for the production of outputs with excellent durability and reliability. In this study, the highest tensile strength printing condition was identified by printing a tensile test specimen using PLA (Poly Lactic Acid) resin, considering various printing conditions. To determine the optimal combination of printing conditions, various machine learning algorithms were compared, and Stochastic Gradient Descent(SGD) demonstrated the best performance in predicting tensile strength. Using SGD, 3,000 sets of printing conditions were generated by combining various parameters, and the best printing condition set was selected. A tensile test specimen was then produced according to the selected printing conditions, and the subsequent tensile test yielded a measured tensile strength value of 41.86 N/mm<sup>2</sup>. The predicted tensile strength value by the SGD algorithm was 43.34 N/mm<sup>2</sup>, resulting in a prediction accuracy of 96.23%.

**Key Words:** Machine Learning, PLA, SGD, Tensile Strength, 3D Print

#### 1. 서론

3D 프린팅은 열로 녹인 수지를 한 층씩 적층하여 성형품을 만드는 것으로 현재는 항공 우주, 자동차, 생체 재료, 의료 장치 등의 다양한 분야에 사용되고 있다<sup>1-3)</sup>. 이러한 폭넓은 적용은 3D 프린팅에 관한 관심을 높여 산업 현장뿐만 아니라 일반 개인들에게도 쉽게 접할 수 있는 환경이 되었다.

3D 프린팅의 출력물이 많은 분야에 적용되면서 그 기능의 유지에 대한 신뢰성 높은 출력물의 요구가 계속해서 증가하고 있다<sup>4)</sup>.

3D 프린팅에 사용되는 재료 중에서 가장 많이 사용되는 것은 PLA(poly lactic acid)이다. 이 재료는 일

반적인 열가소성 플라스틱과 비교하여 환경친화적이나 일반적으로 기존의 열가소성 플라스틱보다는 기계적 물성이 낮다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 출력물의 출력조건과 형태를 개선하여 강도가 보장되도록 설계할 필요가 있다<sup>5)</sup>.

3D 프린팅의 출력을 위해서는 여러 가지 출력조건이 필요하다. 층별 밀도, 노즐 온도, 층별 높이 및 프린팅 속도 등이 필요한데 이들 조건의 적절한 조합을 통하여 신뢰도 높은 출력물이 만들어질 수 있다.

3D 프린팅 출력물의 강도와 관련한 연구에서 Woo 등은 인장 시편을 대상으로 적층 각도를 비대칭적으로 하였을 때 인장강도가 증가한다는 것을 알렸다<sup>6)</sup>. Na 등은 프린팅 패턴과 밀도에 대한 인장 시험을 진행하였다. 동시에 적층 패턴을 변경하면서 발생하는 시편의 중량과 출력 시간 변화를 측정하였다<sup>7)</sup>. Patro 등은 기계적 특성이 우수한 샌드위치

\* 교신저자: srhan@kongju.ac.kr

\* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

구조의 3D 출력물에 대하여 인장시험을 진행하였다. 이 시험을 통하여 샌드위치 구조 기반 출력물의 우수성을 증명하였다<sup>8)</sup>. Rajesh 등은 ABS, PETG, PLA 재료의 출력물에 대하여 경도, 표면 거칠기 및 미세 구조의 분석을 통하여 출력물의 출력 가이드 라인을 제공하였다<sup>9)</sup>. Kim 등은 레이어 방향과 레이어 높이에 대한 인장시험을 진행하였다. 이 시험을 통해서 적층 레이어의 높이가 감소할수록 인장 시편의 인장강도가 증가함을 증명하였다<sup>10)</sup>.

본 연구에서는 최상의 인장강도를 갖는 인장 시편의 출력을 위하여 여러 출력조건을 조합하여 최적의 출력조건을 구하였다. 최적의 출력조건을 조합을 위해서 머신러닝 기법을 적용하여 구하였으며, 실제 시편을 출력하여 머신러닝 기법으로 구한 출력조건의 유효성을 검증하였다.

## 2. 실험

### 2.1 인장 시편

본 연구에 출력된 인장 시편은 ASTM D638 Type 1의 규격으로 출력하였으며 폭은 13 mm, 두께는 3.2 mm, 표점거리는 50 mm이다. 인장 시편의 상세 치수는 Fig. 1과 같다.

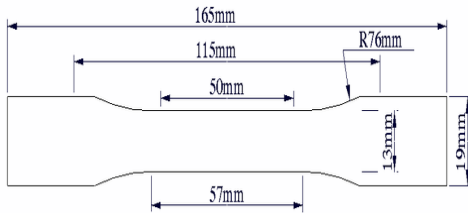


Fig. 1 Tension test specimen(ASTM D638 TYPE1)

Table 1 Physical and chemical properties of PLA

Property	Unit	Value	Remarks
Print temp.		205-220	-
Bed temp.	°C	25-70	-
Heat distortion temp.		52	at 0.45 MPa
Melt flow index	g/min	2/10	at 190°C/2.16 kg
Elongation at break	%	29	-
Tensile strength		60	-
Flexural strength	MPa	87	-
Flexural modulus		3,642	-
IZOD impact strength	KJ/m <sup>2</sup>	7	-
Density	g/cm <sup>3</sup>	1.24	-

인장 시편 출력에 사용된 소재는 Sindoh 사의 PLA 필라멘트를 사용하였다. 필라멘트의 직경은 Ø1.75 mm이다. PLA는 플라스틱과 비슷한 성질을 가지고 있지만, 옥수수전분이나 녹말에서 추출한 친환경 재료로 미생물에 의해 쉽게 분해되는 장점이 있다. 해당 소재의 기준 출력 범위와 기계적 물성은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 3D 프린터

인장 시편 출력에 사용된 3D 프린터는 Sindoh 사의 3DWOX-2X 모델을 사용하였고, 슬라이서 프로그램인 3DWOX를 사용하여 인장 시편을 출력하였다. Table 2에 사용한 3D 프린터의 사양을 나타내었다. Fig. 2는 연구에 사용된 3D 프린터이다.

Table 2 Specification of 3DWOX 2X

Specification	Unit	Value
Print technology	-	FFF
Print head	-	Dual nozzle
Nozzle diameter		0.4
Max size (W × D × H)	mm	490 × 466 × 573
Layer thickness		0.05 - 0.4



Fig. 2 Sindoh 3DWOX-2X 3D printer

## 2.3 학습데이터 생성

### 2.3.1 인장 시편 출력

인장 시편을 출력하기 위해 슬라이서 프로그램인 3DWOX에서 출력조건을 설정하여 인장 시편을 출력하였다. 여러 출력조건 중 제품을 프린팅 할 때 설정 빈도수가 많은 출력조건을 선정하였다. 선정한 출력조건은 레이어 밀도(layer density; LD), 적층 각도(Layer angle; LA), 노즐 온도(nozzle temp; NT), 레이어 높이(layer height; LH), 출력 속도(print speed; PS)로 총 5개로 하였다. 고정 조건으로는 베드 온도, 채움 형태이고 나머지 세부 설정 조건들은 프로그램에 설정된 기본값으로 설정하여 인장 시편을 출력하였다. 인장 시편의 자세한 출력조건 범위는 Table 3과 같다.

머신러닝을 위한 학습데이터 생성을 위해 Table 3의 조건 범위 내에서 랜덤으로 총 100개 출력조건을 생성하였다. 출력조건에 따라 인장 시편을 3개씩 출력하였다. 100개의 출력조건은 Table 4와 같다. 예를 들어 No. 1의 출력조건은 레이어 밀도가 72%, 레이어 각도는 28°, 노즐 온도는 217°C, 레이어 높이는 0.22, 출력 속도는 28 mm/sec를 의미한다. Fig. 3은 출력조건 1을 기준으로 출력한 인장강도 시편을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 4는 레이어 각도를 설명하는 것이다.

Table 3 Printing condition range

Printing conditions	Factor	Unit	Value
Fixed factor	Bed temp.	°C	60
	Infill pattern	-	line
Control factor	Layer angle	°	35 ~ 100
	Layer density	%	0 ~ 90
	Print speed	mm/sec	10 ~ 50
	Layer height	mm	0.1 ~ 0.3
	Nozzle temp.	°C	190 ~ 220

Table 4 Printing conditions for 100 specimens

No.	LD (%)	LA (°)	NT (°C)	LH (mm)	PS (mm/sec)
1	72	28	217	0.22	28
2	61	58	192	0.29	45
3	83	63	203	0.24	27
4	88	13	199	0.15	35
5	74	85	207	0.26	17
...	...	...	...	...	...
96	35	66	206	0.17	37
97	65	88	201	0.28	30
98	97	85	200	0.30	15
99	96	9	216	0.24	31
100	79	72	197	0.13	31



Fig. 3 Tensile specimen manufactured by FDM method

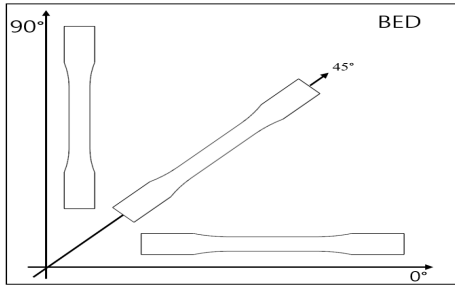


Fig. 4 Layer angle

### 2.3.2 인장시험

인장시험에 사용된 만능시험기는 Daeshin Test사의 DS-2000을 사용하였다. 인장시험 속도는 5mm/min으로 고정하여 상온에서 시험을 진행하였다. 1개의 출력조건당 3번의 인장시험을 진행하고, 인장강도의 평균값을 도출하였다. Table 5에 출력조건에 따른 시험 결과값을 나타내었다.

Table 5 Tensile test value for 100 specimens

No.	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
1	30.14
2	30.36
3	33.02
4	36.11
5	34.13
...	...
96	24.86
97	30.25
98	38.27
99	38.39
100	36.73

### 2.5 머신러닝 모델 학습 및 평가

본 연구에 사용된 머신러닝 툴은 Orange 3이다. Orange 3에 포함된 여러 머신러닝 기법에 앞서 측정된 인장시험 값을 학습시켰고, 학습된 머신러닝 모델을 평가지표인 RMSE(Root Mean Squared Error), MAE(Mean Absolute Error), MSE(Mean Squared Error), R<sup>2</sup>를 통해 가장 성능이 좋은 모델을 선정하였다. MSE, RMSE, MAE는 평가지표가 1에 가까울수록 모델의 성능이 우수하고, R<sup>2</sup>의 경우에는 0에 가까울수록 모델의 성능이 좋다는 것을 의미한다.

이에 따른 상위 5개의 모델의 결과를 Table 6에 나타내었다. 평가 결과, MSE: 6.990, RMSE: 2.664, MAE: 1.998, R<sup>2</sup>: 0.795로 SGD (Stochastic Gradient Descent)가 가장 좋은 성능을 나타내었기 때문에 해당 머신러닝 모델을 선정하였다.

SGD는 기존 Gradient Descent의 많은 시간과 비용이 소용되는 비효율적인 방법을 완화하기 위한 알고리즘이다. 경험적 위험도(Empirical risk)을 줄이기 위해 사용되는 알고리즘으로 확장성이 높고 견고하여 뛰어난 성능을 보인다. 그리고 Batch를 사용하는 Gradient Decent와는 달리 SGD는 Mini-Batch를 사용하는 방법으로 더 빠르게 같은 양의 데이터를 효율적으로 학습시킬 수 있다<sup>11-12)</sup>.

Table 6 Machine learning evaluation indicator results

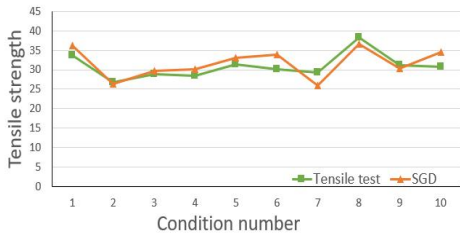
Model	MSE	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
SGD	6.990	2.644	1.998	0.795
Linear regression	7.097	2.664	1.985	0.792
Random forest	7.676	2.771	2.153	0.775
Gradient boosting	8.465	2.909	2.416	0.752
kNN	8.729	2.955	2.205	0.744

### 2.6 검증 데이터 세트 생성 및 비교

머신러닝 모델의 예측 신뢰성을 확인하기 위해 머신러닝이 예측한 인장강도 값과 실제 시험한 인장강도 값을 비교하였다. Table 3의 조건들을 기준으로 학습데이터와 겹치지 않게 랜덤으로 10개의 출력조건을 생성하였고, 생성한 검증 출력조건을 기준으로 3D 프린팅을 통해 인장 시편을 출력한 후 인장시험을 진행하였다. 각 조건마다 3번의 인장시험을 진행하였고 평균값을 도출하였다. 또한, 같은 조건으로 머신러닝 모델을 통해 예측을 진행하였고 조건별 머신러닝의 예측값과 인장시험 결과값을 Table 7에 나타내었다. 앞서 도출한 실제 인장시험의 결과값과 머신러닝 모델이 예측한 인장강도 값을 비교하여 머신러닝 모델의 예측률을 비교하였다. 각 조건 별 예측률은 Table 8에 나타내었고, 평균적인 예측률이 93.43%인 것을 확인하였다. 머신러닝 모델의 예측값과 인장시험의 결과값의 비교 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

**Table 7** SGD Prediction and Tensile Experiment Results

No.	LD (%)	LA (°)	NT (°C)	LH (mm)	PS (mm/sec)	Tensile test (N/mm <sup>2</sup> )	SGD (N/mm <sup>2</sup> )
1	81	26	204	0.14	16	33.72	36.10
2	44	70	205	0.12	19	26.87	26.32
3	48	9	212	0.13	16	28.89	29.65
4	51	2	208	0.24	39	28.51	30.13
5	76	43	204	0.19	24	31.43	33.08
6	71	11	193	0.16	23	30.22	33.84
7	46	58	206	0.26	33	29.25	25.88
8	88	69	203	0.11	25	38.26	36.60
9	62	62	195	0.18	25	31.27	30.36
10	76	66	219	0.27	12	30.81	34.61



**Fig. 5** Comparison graph of the predicted value of SGD and the tensile test result value

**Table 8** Predictive Rate of SGD

No.	Tensile test (N/mm <sup>2</sup> )	SGD (N/mm <sup>2</sup> )	Prediction rate (%)
1	33.72	36.10	92.95
2	26.87	26.32	97.96
3	28.89	29.65	97.38
4	28.51	30.13	94.32
5	31.43	33.08	94.76
6	30.22	33.84	88.01
7	29.25	25.88	88.46
8	38.26	36.60	95.68
9	31.27	30.36	97.08
10	30.81	34.61	87.69
Average			93.43

### 3. 결 과

#### 3.1 데이터 세트 생성 및 예측

최적의 인장 시편의 출력조건을 도출하기 위해 Table 3의 출력조건을 기준으로 랜덤하게 3,000개의 출력조건을 생성한 후 앞서 학습시킨 머신러닝 모

델을 통해 인장강도 값을 예측하였다. 3,000개의 출력조건과 예측값은 Table 9와 같다.

**Table 9** 3000 printing conditions and predicted tensile strength by machine learning

No.	LD (%)	LA (°)	NT (°C)	LH (mm)	PS (mm/sec)	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
1	52	8	190	0.12	30	29.71
2	38	75	209	0.29	42	24.12
3	64	52	205	0.24	45	30.54
4	65	81	202	0.15	11	33.37
...	...	...	...	...	...	...
235	99	85	201	0.3	34	38.25
236	100	8	217	0.11	10	41.71
237	48	23	194	0.29	13	27.29
...	...	...	...	...	...	...
2997	40	7	191	0.13	44	26.28
2998	67	11	191	0.18	16	32.93
2999	52	81	205	0.27	29	28.12
3000	90	77	216	0.14	24	38.76

#### 3.2 최적 조건 도출

머신러닝 모델이 예측한 3,000개의 데이터세트 중 인장강도가 가장 높은 조건을 도출하였다. 3,000개의 조건들 중 236번째가 인장강도가 41.71 N/mm<sup>2</sup>으로 가장 높게 확인되었다. 그에 따른 출력조건은 밀도 100%, 적층 각도 8°, 노즐 온도 217°C, 레이어 높이 0.11 mm, 출력 속도는 10 mm/sec인 것을 확인하였다. 머신러닝 모델에 의해서 가장 높은 인장강도를 나타내는 출력조건과 예측된 인장강도 값은 Table 10에 나타내었다.

**Table 10** Optimal conditions for prediction of tensile strength by machine learning

No.	LD (%)	LA (°)	NT (°C)	LH (mm)	PS (mm/sec)	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
236	100	8	217	0.11	10	41.71

#### 3.3 머신러닝 모델이 예측한 최적 조건 검증

머신러닝이 예측한 3,000개의 랜덤 출력조건 중 인장강도가 가장 높았던 236번째를 기준으로 3D 프린팅을 진행하고, 인장강도 시험을 진행하였다. 시험 결과, 인장강도는 43.34 N/mm<sup>2</sup>인 것을 확인하였

다. Table 11은 인장시험의 결과값과 머신러닝 모델의 예측값을 비교한 것이다. 머신러닝 모델의 예측률은 96.23%이었다. Fig. 6은 인장강도 값이 가장 높은 출력조건을 적용하여 출력한 시편의 인장강도 시험 후 파단된 시편을 나타낸 것이다.

**Table 11** Prediction rate of SGD for optimal conditions

No.	Tensile test (N/mm <sup>2</sup> )	SGD (N/mm <sup>2</sup> )	Prediction rate (%)
236	43.34	41.71	96.23



**Fig. 6** Specimen broken after the tensile strength test of the specimen output by applying the printing condition with the highest tensile strength value

#### 4. 결 론

3D 프린팅으로 출력한 인장강도 시험편의 인장강도를 최대화하는 연구를 진행하였다. 인장강도의 최대화를 위해서 머신러닝 기법을 적용하여 연구의 실효성을 향상시키고자 하였다.

연구에서 100가지 출력조건을 적용한 시험편을 출력하여 머신러닝의 학습데이터를 확보하였다. 여러 머신러닝 기법을 학습데이터로 학습시킨 후 인장강도를 가장 잘 예측하는 알고리즘은 SGD이었다.

확보된 SGD 알고리즘에 대하여 3,000개의 출력조건을 입력하여 최적의 출력조건으로 출력할 경우, 예측된 인장강도 값은 41.71 N/mm<sup>2</sup>이었다. 이를 검증하기 위해서 최적의 출력조건을 적용하여 실제로 출력한 시험편의 인장강도 값은 43.34 N/mm<sup>2</sup>이었다. 따라서 SGD 알고리즘의 인장강도 예측률은 96.23%로 나타났다. 증하기 위해서 최적의 출력조건을 적용하여 실제로 출력한 시험편의 인장강도 값은 43.34 N/mm<sup>2</sup>이었다. 따라서 SGD 알고리즘의 인장강도 예측률은 96.23%로 나타났다.

#### 참고문헌

- 1) Quanjin, M., Sahat, I.M., Mat Rejab, M.R., Abu Hassan, S., Zhang, B. and Merzuki, M.N., "The energy-absorbing characteristics of filament wound hybrid carbon fiber-reinforced plastic/polylactic acid tubes with different infill pattern structures", *J. Reinf. Plast. Compos.* Vol. 38, Issue 23 - 24, pp. 1067 - 1088, 2019.
- 2) Ma, Q., Rejab, M., Hassan, S.A., Hu, H. and Kumar, A.P., "Potentiality of MWCNT on 3D printed bio-inspired spherical-roof cubic core under quasi-static loading", *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* Vol. 136, 105514, 2022.
- 3) Sun, B., Ma, Q., Wang, X., Liu, J. and Rejab, M., "Additive Manufacturing in Medical Applications: a Brief Review", in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2021.
- 4) Na, D.H., Kim, H.J. and Kim, H.J., "A Study on Tensile Strength Considering Weight and Printing Time of 3D Infill Patterns using 3D Printing", *Transactions of Materials Processing*, Vol. 32, No. 5, pp. 255-267, 2023.
- 5) Kim, K.A. and Han, S.R., "Evaluation of Mechanical Properties by Process Factors of ABS Specimens for 3D Printing", *J. Korean Soc. Mech. Technol.* Vol. 23, No. 2, pp. 300-305, 2021.
- 6) Woo, I.Y. and Lyu, M.Y., "Improvement of Tensile Strength through Asymmetric Tool Path in Material Extrusion-Type 3D Printing", *Polym. Korea*, Vol. 45, No. 4, pp. 649-653, 2021.
- 7) Na, D.H. and Kim, H.J., "A Study on Tensile Strength Dependent on Variation of Infill Pattern and Density of PLA+ Material Using 3D Printing", *Transactions of Materials Processing*, Vol. 31, No. 5, pp. 281-289, 2022.
- 8) Patro, P.K., Kandregula, S., Khan, M.N., Khan, S. and Das, S., "Investigation of Mechanical Properties of 3D Printed Sandwich Structures Using PLA and ABS", *Materials Today: Proceedings*, In Press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.366>
- 9) Durga Rajesh, K.V., Ganesh, N., Yaswanth Kalyan Reddy, S., Mishra H and Tekkali M.V.P.S Teja Naidu, "Experimental Research on the Mechanical Characteristics of Fused Deposition Modelled ABS, P

LA and PETG Specimens Printed in 3D”, Materials Today: Proceedings, In Press.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.343>

- 10) Kim, B.J., Lee, H.T., and Sohn, I.S., "A study of mechanical properties with FDM 3D printing layer conditions," The Korea Society Die & Mold Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 19-24, 2018.
- 11) Hardt, M., Recht, B., & Singer, Y., "Train faster, generalize better: Stability of stochastic gradient descent", In International conference on machine learning, pp. 1225-1234, PMLR, 2016
- 12) Vijayalakshmi, K., Vijayakumar, K. and Nandhakar, K., "Prediction of Virtual Generage Storage Capacity of the Air-Conditioner using a Stochastic Gradient Descent Based Artificial Neural Network", Electric Power Systems Research, 208, 107879, 2022.

## 저자 소개

### 김 범 수 (Bum-Soo Kim)

[학생회원]



• 2024년 2월 ~ 현재 : 국립공주대학교  
광공학금형공학과 석사

< 관심분야 >  
사출금형 설계 및 해석

### 한 성 열 (Seong-yeol Han)

[정회원]



• 2014년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 디지털융합금형공학과 교수  
• 2014년 3월 ~ 현재 : 글로벌금형기술연구소 회원  
• 2022년 3월 ~ 현재 : 한국금형공학과 총무이사

< 관심분야 >  
사출금형설계 및 해석, 구조해석