

PolyJet 적층재료의 파괴기준 설정을 위한 유한요소해석

김동범*, 이근태*, 이인환**, 조해용**,#

*충북대학교 대학원 정밀기계공학과, **충북대학교 기계공학부

Finite Element Analysis for Fracture Criterion of PolyJet Materials

Dong Bum Kim*, Geun Tae Lee*, In Hwan Lee**, Hae Yong Cho**,#

*Graduate School of Precision Mechanical Engineering, Chungbuk National University.

**School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University.

(Received 16 June 2015; received in revised form 17 June 2015; accepted 18 June 2015)

ABSTRACT

PolyJet technology is an additive manufacturing (AM) technology commonly used for modeling, prototyping, and production applications. It is one of the techniques used for 3D printing. The PolyJet technique is a process that joins materials to fabricate a product from 3D CAD data in a layer-by-layer manner. The orientation of a layer can affect the mechanical properties of the product manufactured by the PolyJet technique because of its anisotropy. In this paper, tensile and shearing tests of specimens were developed with the PolyJet technique in order to study the mechanical properties according to the orientation of a layer. The mechanical properties of the specimens were determined on the basis of true stress-strain curves from tensile and shearing tests. In addition, the tensile and shearing tests were simulated under the same conditions as those of experiment, and the experiment and simulated results were compared. Through this study, the fracture criteria could be established.

Key Words : Additive Manufacturing(AM 적층조형), 3D Printing(3D 프린팅), PolyJet(폴리젯), Tensile Test(인장 시험), Anisotropy(이방성), Fracture Criteria(파괴기준)

1. 서 론

PolyJet 기술은 조형원료인 액상재료를 출력헤드 부분에서 분사한 후 즉시 UV램프를 비추어 경화시켜 적층하는 기술이다. PolyJet 기술은 3D 모델링을 통하여 제품 성형이 가능하므로 시제품 제작부터 제품생산에 이르기까지 제조산업 등의 분야에 그 사용범위가 다양해지고 있다.^[1-5] 모든 제품이나 구

조물과 같이 PolyJet 방식으로 성형된 제품이나 구조물 등은 인장, 압축, 굽힘 하중과 같은 외력을 받을 때 미소변형 및 파손될 수 있다. 그러므로 PolyJet 방식으로 성형하는 제품을 설계 시 탄성계수, 인장강도, 변형률 등의 기계적 물성이 요구된다. 또한 PolyJet 기술로 성형한 구조는 이방성을 가지며, 그로 인하여 성형계획에 따른 적층방향을 고려해야 한다. 이와 관련되어 PolyJet 기술로 성형된 구조물의 기계적 물성에 관련된 연구가 진행되고 있다. 대표적으로 PolyJet 방식으로 폴리머 시험편을 제작하고 인장시험을 통하여 재료의 기계적 물성을 조사한 연구가 있다. 이때 적층방향을 기준

Corresponding Author : hycho@chungbuk.ac.kr

Tel: +82-43-261-2426

으로 시험편을 넓히거나 세워 성형하였다.^[6] 하지만 기존 연구에서는 적층방향만을 고려하여 재료의 기계적 물성을 조사한 연구가 대부분이며, 재료의 두께를 고려하여 기계적 물성을 조사한 연구는 미비하다. 또한 이방성 재료에 대한 기계적 물성에 대한 연구도 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 폴리머 재료를 이용한 적층가공 시 적층방향과 시험편의 두께에 따른 재료의 기계적 물성 영향을 파악하고자 하였다. PolyJet 방식으로 적층방향과 두께가 다른 시험편을 제작하고 인장시험을 통하여 기계적 물성을 조사하였다. 시험편의 형상은 ASTM D 638^[7] 을 참고하였다. 또한 이방성에 따른 기계적 물성에 관한 차이를 확인하기 위해 실험과 해석을 병행하여 연구하고자 하였다. 이때 인장시험으로 얻어진 재료의 기계적 물성을 해석에 적용하여 시뮬레이션 하였고, 전단시험 결과와 비교 분석하여 이방성 재료에 대한 파괴기준을 제시하고자 하였다.

2. 기계적 물성 조사

2.1 시험편 성형

본 연구에서는 폴리머의 적층 방향에 따른 재료의 강도를 조사하기 위해 PolyJet 방식을 이용하여 인장과 전단시험편을 제작하였다. 인장시험편은 ASTM D 638^[7] 규격의 TYPE 4 에 따라 제작되었으며, 시험편의 크기와 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 적층 방향에 따른 기계적 물성을 조사하기 위하여 Fig. 2와 같이 X, Y, Z 축을 기준으로 적층면은 X-Y 평면에 위치하고, 적층면인 X-Y 평면을 기준으로 인장하중방향이 0° 와 90° 가 되도록 시험편을 제작하였다. 그리고 각 적층방향의 시험편두께를 1, 2, 3 mm 로 하였다.

전단 시험편은 이방성 재료의 기계적 물성을 조사하기 위해 제작하였다. 시험편의 적층방향이 Z 축방향일 때 판재의 전단 시 편치와 맞닿는 면의 방향은 X-Y 평면에 위치하도록 적층하였고, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 판재의 두께는 2 mm 이며, 지그로 충분히 고정 시킬 수 있도록 제작하였다.

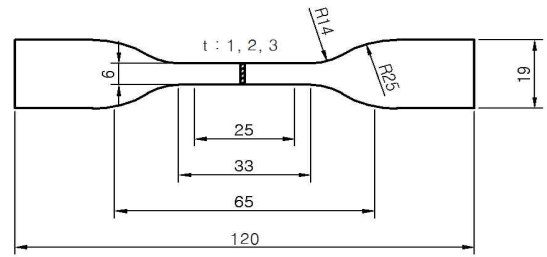


Fig. 1 Tensile test specimen of ASTM D 638 TYPE 4 (Unit : mm)

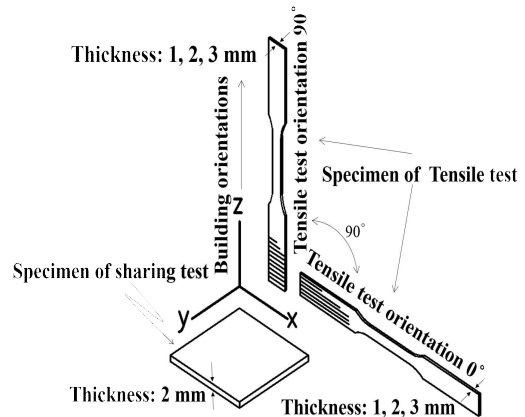


Fig. 2 Two Orientations and thickness of specimens devised for tensile and shearing test

2.2 인장시험 결과 및 고찰

인장시험에는 INSTRON® 사의 8801 장비를 사용하였으며, ASTM D 638^[7] 을 준수하여 인장시험 하였다. 인장시험 시 시험편의 연신율을 측정하기 위하여 INSTRON® 사의 2620 Series 연신율계를 사용하였다. 인장속도는 5 mm/min 이며^[7], 실내온도는 20℃ 에서 시험하였고, 각 적층방향의 시험편 두께 별 3 회씩 실시하였다.

적층면을 기준으로 인장하중방향이 0° 인 시험편의 두께에 따른 응력-변형률 선도를 Fig. 3에 나타내었다. 인장하중방향이 0° 인 시험편의 기계적 물성을 Table 1에 정리하였다. 시험편의 두께

가 1 mm 일 경우 최대인장강도와 탄성계수, 항복강도는 각각 46.47 MPa, 1393.42 MPa, 43.58 MPa 로 조사되었고, 연신율은 13.13% 로 조사되었다. 시험편의 두께가 두꺼워 질수록 최대인장강도와 탄성계수, 항복강도, 연신율 모두 증가하는 경향을 보였다. 또한 그래프의 형상은 금속재료의 연성재료의 응력-변형률선도와 유사한 경향을 나타냈다. 따라서 인장하중방향이 0° 인 시험편의 기계적 물성은 각 두께 별로 큰 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4는 적층면을 기준으로 인장하중방향이 90° 인 시험편의 두께에 따른 응력-변형률 선도이다. 인장하중방향이 90° 인 시험편의 기계적 물성을 Table 2에 정리하였다. 시험편의 두께가 1 mm 일 때 최대 인장강도 및 탄성계수, 항복강도, 연신율은 각각 13.61 MPa 과 1416.32 MPa, 13.61 MPa, 0.94% 로 조사되었다.

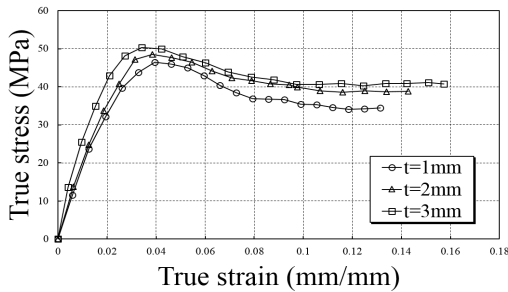


Fig. 3 True stress-strain curves of PolyJet materials for 0° build orientation and thickness of specimens

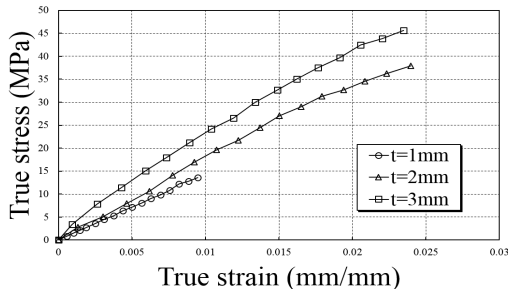


Fig. 4 True stress-strain curves of PolyJet materials for 90° build orientation and thickness of specimens

Table 1 Mechanical properties of PolyJet materials in 0° vertical build orientation

Built orientations	Longitudinal		
	Specimens thickness [mm]	1	2
Young's modulus [MPa]	1393.42	1613.97	1924.49
Tensile strength [MPa]	46.47	47.48	50.34
Yield strength [MPa]	43.58	48.50	48.71
Strain at break [%]	13.13	14.92	15.73

Table 2 Mechanical properties of PolyJet materials in 90° vertical build orientation

Built orientations	Vertical		
	Specimens thickness [mm]	1	2
Young's modulus [MPa]	1416.32	1802.21	2320.99
Tensile strength [MPa]	13.61	37.93	47.49
Yield strength [MPa]	13.61	37.93	47.49
Strain at break [%]	0.95	2.39	2.48

인장하중방향이 90° 인 시험편은 인장하중방향이 0° 인 시험편의 경향과 유사하게 시험편의 두께가 두꺼워 질수록 기계적 물성이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 적층면을 기준으로 인장하중방향이 90°로 시험편을 적층하였을 때 적층면 사이

의 계면에서 파단이 발생하였다. 따라서 시험편의 두께가 증가할수록 이러한 계면의 면적이 증가하게 되므로 기계적 물성에 영향을 있을 것으로 판단된다. 인장하중방향이 0° 인 시험편이 인장하중방향이 90° 인 시험편의 인장강도, 탄성계수, 항복강도 및 연신을 등이 더 높은 것으로 조사되었다. 이는 적층된 방향이 기계적 물성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 인장하중방향이 0° 인 시험편은 적층된 계면이 아닌 적층면에서 파단이 발생하므로 기계적 물성이 더 클 것으로 판단된다. 특히 기계적 물성 중에서 연신율이 차이가 큰 것을 알 수 있다. 또한 인장하중방향이 0° 인 시험편의 응력-변형률 선도를 보면 금속에서 일반적인 연성재료의 응력-변형률 선도와 유사하고 인장하중방향이 90° 인 시험편의 응력-변형률선도는 취성재료와 유사함을 알 수 있다. 따라서 적층면을 기준으로 인장하중방향이 0° 인 시험편의 기계적 물성은 일반적인 연성재료의 특성을 인장하중방향이 90°인 시험편의 물성은 일반적인 취성재료의 특성을 갖는 것으로 판단된다.

3. 전단시험 및 유한요소해석

3.1 전단시험 결과 및 고찰

전단 시험은 이방성 재료의 기계적 물성을 조사하기 위해 PolyJet 방식으로 제작된 시험편에 대하여 전단시험을 하였고, 이를 Fig. 5에 나타내었다. 이때 시험에 사용된 펀치의 직경은 20 mm 이고, 전단 속도는 2 mm/min 으로 시험하였다. 시험편을 고정하기 위해 시험편을 별도의 지그에 결합하고 INSTRON® 사의 8801 장비에 설치하였다. 시험에 사용된 전단 시험편을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6 (a) 는 시험전의 전단시험편을 나타낸 것이며, 총 4 개의 홀을 가공하였다. Fig. 5에 나타낸 것처럼 시험편의 홀에 나사를 넣고 지그를 결합하여 전단 시험 시 시험편을 고정하는 역할을 한다. Fig. 6 (b) 는 전단시험 후의 시험편을 나타낸 것으로 중앙의 펀치의 직경만큼 재료가 완전히 전단된 것을 확인할 수 있다. 전단시험 시 20°C 온도로 총 3 회 수행하였고, 전단시험을 통해 최대하중을 조사하였다.



Fig. 5 Shearing test of PolyJet materials

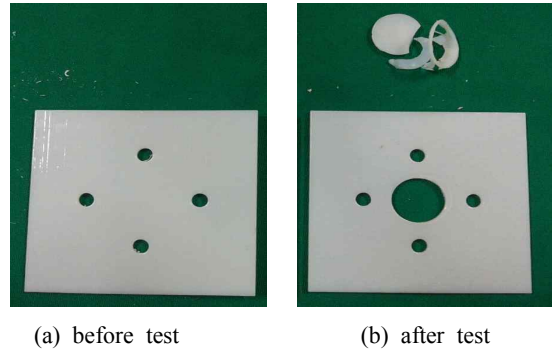


Fig. 6 Specimens for shearing test

전단 시험 결과로부터 얻은 하중-변위선도를 Fig. 8에 나타내었다. 전단 시 발생한 최대전단하중은 4627.2 N 으로 조사되었고, 전단하중과 시험편의 변위로부터 계산된 에너지는 4563.79 N-mm 이다. Fig. 8의 그래프에서 변위가 약 0.5 mm 영역에서 최대전단하중이 나타나며, 이후 변위가 1.2 mm 영역까지 전단하중은 급격하게 감소하는 것을 알 수 있으며 이후에는 판재 시험편이 완전하게 전단된 것으로 판단된다.

3.2 전단시험의 유한요소해석

이방성 재료의 기계적 물성을 조사와 PolyJet 적층재료의 파괴기준을 설정하기 위해 유한요소해석을 하였고, 전단시험과 비교하여 적절한 파괴지수를 제시하고자 하였다. 식 (1)에 나타낸 Kobayashi

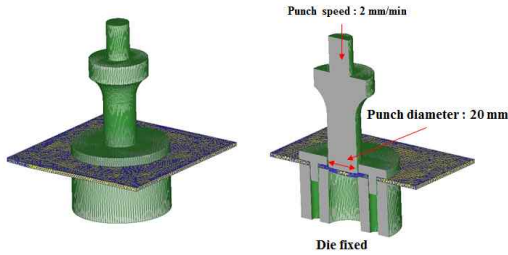


Fig. 7 Boundary condition for simulation

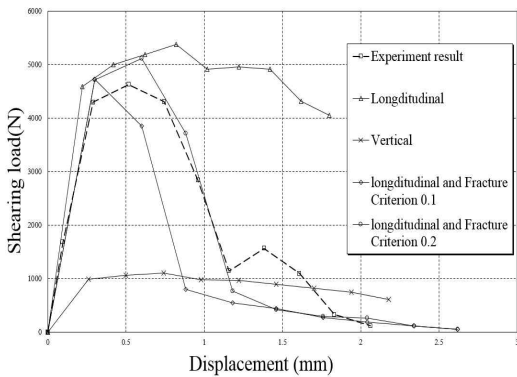


Fig. 8 Plot of shearing load-displacement curve for shearing test and simulation of PolyJet materials

의 파괴기준식을 이용하여 유한요소해석 프로그램을 통하여 파괴지수를 계산하였다. 또한 실제 전단 시험과 동일하게 유한요소해석을 구현하기 위해서 적층면을 기준으로 인장하중방향이 0°와 90°인 시험편의 인장시험을 통해 얻은 기계적 물성을 DEFORM-3D에 적용하였다. 전단시험의 유한요소해석을 위한 모델링을 하였다. 경계조건은 전단시험과 동일한 조건으로 설정하였고, 이를 Fig. 7에 나타내었다. 판재의 두께는 2 mm이다. 판재를 전단하기 위한 펀치의 직경은 20 mm이며, 전단 속도는 2 mm/min이다. 마찰상수는 0.12를 적용하였다. 판재는 강소성체로 적용하였고, 펀치와 다이는 강체로 설정하였다. 판재의 요소 수는 100,000개로 분할하였다.

전단 시험의 시뮬레이션 해석 결과 적층면을 기준으로 인장하중방향이 0°와 90°인 시험편의 기

Table 3 Maximum shearing load of simulation

Fracture Criterion of Kobayashi	0	0.1	0.2
Built orientation 0° [N]	5540.1	4925.2	5184.1

계적 물성을 적용하였을 때 최대전단하중은 각각 5540.1 N, 1107.2 N으로 조사되었다. 이는 PolyJet 방식으로 성형된 제품에 있어서 이방성에 의한 것으로 생각된다. 시뮬레이션 결과와 전단시험 결과를 비교하였을 때 적층면을 기준으로 인장하중방향이 0°인 시험편의 기계적 물성을 적용한 시뮬레이션 결과가 더 근접한 것을 알 수 있다. 따라서 인장하중방향이 0°인 시험편의 기계적 물성을 이용하여 파괴지수를 제시하기 위한 시뮬레이션을 하였고, 유한요소 해석을 이용하여 계산하였다. 그 결과를 Table 3에 나타내었고, 전단시험과 파괴기준에 따른 하중-변위선도를 Fig. 8에 나타내었다. 유한요소해석의 결과에 대한 파괴기준이 0.1일 때 최대전단하중은 4925.2 N으로 조사되었다. 실제 전단 시험의 최대 전단하중과 비교하였을 때 약 300 N의 하중이 차이가 나며, 오차율은 약 6.44%로 대체적으로 잘 일치하는 것으로 판단된다.

$$\int_{\bar{\sigma}}^{\bar{\sigma}^*} \frac{\bar{\sigma}^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

4. 결론

본 논문에서는 적층 방향과 시험편의 두께에 따른 재료의 기계적 물성을 조사하고 시뮬레이션 결과와 비교, 분석하고자 하였다. 이를 위해 PolyJet 방식으로 시험편을 제작하고 인장 시험과 전단시험을 통하여 기계적 물성을 조사하였다. 이를 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D에 적용하였고 시뮬레이션 하였다. 또한 전단 시험과 시뮬레이션 결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론들을

얻었다.

1. PolyJet 방식으로 2 가지 적층방향을 적용하였고, 시험편은 각각 1, 2, 3 mm 의 두께로 제작하여 인장시험을 통해 기계적 물성을 조사하였다. 적층면을 기준으로 인장하중방향이 0° 와 90° 인 시험편들은 두께에 의한 기계적 물성이 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다.
2. 적층면을 기준으로 인장하중방향이 0° 인 시험편의 인장강도, 탄성계수 및 연신율 등의 기계적 물성이 인장하중방향이 90° 인 시험편의 기계적 물성보다 높은 것으로 조사되었다. 인장하중방향이 90° 로 적층하였을 때 발생하는 적층된 계면 사이에서 쉽게 파단 되기 때문이라 판단된다. 적층방향에 따라 다르게 제작된 시험편들은 기계적 물성에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 적층면을 기준으로 인장하중방향이 0° 와 90° 인 시험편들의 기계적 물성은 각각 일반적인 연성재료와 취성재료의 특성을 나타내는 것으로 판단된다.
3. 적층면을 기준으로 인장하중방향이 0° 인 시험편의 물성을 적용한 해석결과가 전단시험결과 잘 일치하였다. 따라서 전단에 대한 시뮬레이션에서는 인장하중방향이 0° 인 시험편으로 조사된 기계적 물성을 적용하였고, Kobayashi의 파괴기준식을 이용하여 유한요소해석으로 계산된 파괴기준은 0.1 일 경우 전단시험과 가장 유사하다. 따라서 이방성 PolyJet 구조의 해석에서는 인장하중방향이 0° 인 시험편의 기계적 물성과 파괴기준 0.1 적용하는 것이 바람직하다.
4. PolyJet 방식으로 성형한 제품에 대한 구조해석에서 적층 방향에 따른 이방성을 고려한 해석적 연구가 필요하다.

후 기

“본 연구는 산업원천기술개발사업 “Eco/Bio 산업의 기능성 부품 생산용 차세대 융복합 가공시스템 개발, No. 10039982”과제의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.”

REFERENCES

1. Gausemeier, J., Echterhoff, N. and Wall, M., “Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing-Exploring the Research Landscape”, University of Paderdom. pp. 17-35, 2013.
2. Kelly, D.(2014), “NASA Is Building the World's First 3D-Printed Space Cameras,” Retrieved 30, may., 2015, from <http://www.space.com>.
3. Clint, B.(2013), “Printing Out Barbies and Ford Cylinders”, Retrieved 14, may., 2015, from <http://www.wsj.com>.
4. Lee, I. H., Oh, S. T., Kim, H. C. and Cho H. Y., “Development of Hybrid Fused Deposition Modeling System for Three-Dimensional Circuit Device Fabrication”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 38, No. 8, pp. 869~874, 2014.
5. Kim, H. C. and Yun, H. Y., “Application of 3D Printing Technology in Nano/Micro field”, Journal of the KSME, Vol. 54, No.4, pp. 36~40, 2014.
6. Barclift, M. and Williams, C. B., “Examining Variability in the Mechanical Properties of Parts Manufactured via Polyjet Direct 3D Printing”, in Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 6-18, 2012.
7. ASTM D 638, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”, ASTM International, 2010.