

소형 IoT 부품의 방수 케이스 제작을 위한 3D 프린팅 후공정의 최적화 방법 연구

안일혁*

동명대학교 기계로봇공학과 교수

A Study of Optimization of a 3D Printing Post Processing to Manufacturing a Waterproof Case for a Small IoT Device

Il-Hyuk Ahn*

Professor, Department of Mechanical and Robotics Engineering, Tongmyong University

요약 본 논문은 다양한 IoT 제품의 개발에 있어서 선행되는 시제품 제작에 있어서 최근에 가장 널리 활용되고 있는 3D 프린팅 기술 중에 하나인 용융적층 공정(Fused deposition modeling, FDM) 공정에 있어서 기계적 물성치 및 방수 기능을 향상할 수 있는 온간 등압 가압법(Warm isostatic pressing, WIP) 공정의 최적화 방안에 대하여 연구하였다. 최적화에 있어서 기존의 연구에서 하지 않았던, 온도 유지 시간 및 냉각 방식을 중요 변수로 하여 실험을 계획하였다. 시편의 제작은 WIP 효과가 가장 극적으로 나타는 방향으로 제작을 하였으며, WIP 공정의 효과를 알아보기 위하여 WIP 처리를 하지 않은 시편도 동일한 방식으로 제작하여 실험하였다. 실험 결과는 WIP 공정은 기계적 물성치 및 방수 효과 향상 시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 온도 유지 시간은 기계적 물성치에 영향을 주지 않으며 냉각 방식의 차이에 따른 기계적 변화는 5% 차이를 보여주었다.

주제어 : 사물인터넷, 방수 케이스, 공정 최적화, 온간 등압 가압법, 열용융 용착 모델링 공정

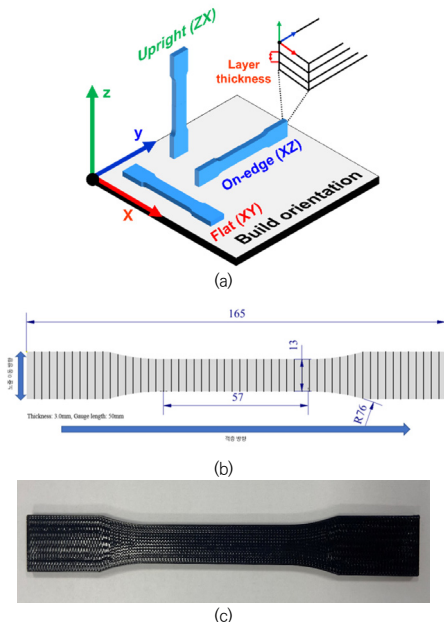
Abstract This paper studied the post-processing process of the fused deposition modeling (FDM) process, one of the most widely used 3D printing technologies recently, in prototyping, which is a leading step in the development of various IoT products. The proposed post-treatment process is warm isostatic pressing (WIP), which can improve the mechanical properties and waterproof function of parts made by the FDM process. There are various process parameters in the WIP process, but in this study, the experiment was planned with the holding time of temperature and cooling ways as important variables. The specimens were manufactured in a direction that showed the most dramatic WIP effect, and in order to determine the effect of the WIP process, specimens without WIP treatment were manufactured and tested in the same manner. The experimental results confirmed that the WIP process improved mechanical properties and waterproofing effects. In addition, the temperature holding time did not affect the mechanical properties, and the mechanical change due to the difference in cooling method showed a 5% difference.

Key Words : IoT device, Waterproof case, Process optimization, Warm isostatic press, Fused deposition modeling process

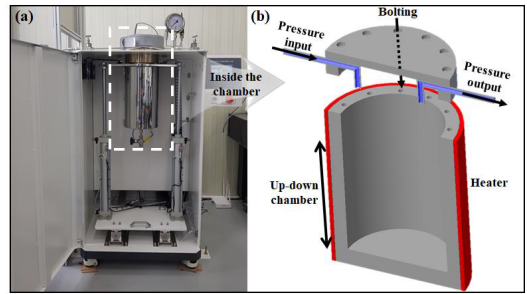
1. 서론

최근 소형 IoT 장치의 개발은 다양한 오픈소스 기반의 MCU(Microcontroller unit)를 활용하고 되고 있다. 이는 전용 제어 보드 개발에 필요한 시간 및 비용을 줄일 수 있다는 점에서 더 많은 관심을 받고 있다 [1,2]. 또한, 시제품의 기구를 개발하기 위해서는 3D 프린팅 기술이 많이 활용되고 있다 [3-5]. 이는 개발 단계에서 다수 수정 과정이 필요한 경우가 많고, 금형의 개발 및 수정 과정에는 큰 비용이 소요되기 때문이다.

시제품 기구의 제작에 있어서 활용되는 소재는 주로 플라스틱을 기반으로 하는 3D 프린팅 기술들이 활용되고 있다. 플라스틱을 기반으로 하는 3D 프린팅 기술은 다시 세 가지 형태로 나누어 볼 수 있다. 하나는 고상의 소재를 녹여 붙이는 방식, 고상의 소재를 바인더 소재(주로 액상)를 이용하여 결합하는 방식, 마지막으로 액상의 소재를 고형화시켜 붙이는 방식이 그것이다. 첫 번째 방식으로는 용융 적층 공정 (Fused deposition modeling, FDM), 선택적 레이저 소결(Selective laser sintering, SLS)이 있고, 바인더 소재를 활용하는 방식에는 결합제 분사방식(Binder jetting, BJ) 방식이 있으며, 마지막 방식으로는 광경화조형 방식(Stereolithography, SLA)가 있다 [6,7].



[Fig. 1] Build orientation (a) and the direction of the nozzle moving on a specimen plane (b), fabricated specimen (c)



[Fig. 2] Images of (a) the WIP equipment and (b) schematic of the WIP process

각자 방식에는 장단점이 있지만, 그중에서 용융 적층 방식(이하, FDM 방식)은 오픈소스 기반으로 한 저가의 장비와 사출 공정에서 사용 가능한 모든 소재를 활용할 수 있다는 점에서 가장 널리 활용되고 있는 방식이라 할 수 있다.

하지만, 이 방식을 이용하여 소형 IoT 기기의 기구를 제작에 있어 가장 큰 문제점은 바로 전자 기기에 가장 취약한 방수 기능이 부족하다는 점이다. 공정의 특성상 적층 소재 사이에 내부 기공이 다수 존재하고, 그로 인한 방수 기능의 저하는 비록 시제품 기구라도 IoT 디바이스의 개발에 있어 해결해야 할 문제점이라고 할 수 있다 [8,9].

본 연구에서는 소형 IoT 기구의 방수 기능을 부여하기 위한 후공정을 소개하고, 최적화를 방안을 제시하였다. 제시된 공정의 유효성을 시험을 통하여 검증하였다.

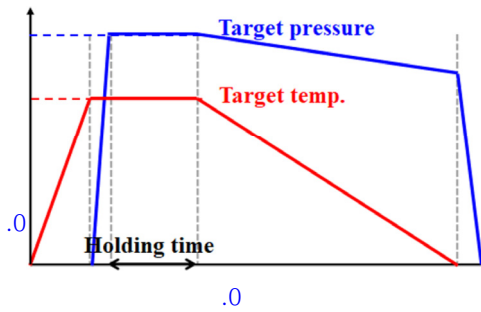
2. 시편 제작 및 실험

2.1 시편 제작

본 연구에 사용할 시편은 미국 Staratasy의 ABSplus 소재를 이용하여 제작하였다 [10]. 적층 제조 공정에서는 Fig. 1에 보이는 것과 같이 적층 방향에 따른 물성치 차이가 발생하는데, 본 연구에서는 WIP 공정 변수에 따라 물성치 변화가 클 것으로 예상되는 Upright (ZX) 방향으로 선정하였다 [8]. 시편 형상은 ASTM D638 규격에 따라서 제작하였다 [11]. 시편 제작 시에 단면 내 압출 방향은 Fig. 2에서 보이는 것과 같다.

2.2 온간 등압 가압 공정

온간 등압 가압법 (Warm isostatic press, 이하 WIP)은 밀폐된 공간의 내부 온도와 압력을 제어하여 내부 소



[Fig. 3] Profiles of temperature and pressure

<Table 1> Condition of post-treatment

Case No.	Post-treatment	Holding time (min)	Cooling
1	Without WIP	-	-
2	With WIP	60	Air
3		60	Furnace
4		30	Air
5		30	Furnace

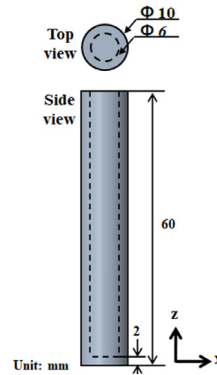
재의 거동을 제어하는 공정이다 [12]. Fig. 1은 본 연구에 사용한 WIP 장치와 개념도를 보여준다. 일반적으로 WIP 공정은 두 개의 소재 접착 공정에 많이 사용된다. Fig. 2의 WIP 장치는 최대 300 ℃와 100 bar 온도와 압력을 소재에 가할 수 있다. FDM 장비를 이용하여 만들어진 시편들은 Fig. 1 에서 WIP 장비를 이용하여 Fig. 3에서 보이는 온도 압력 프로파일을 따라서 후처리 되었다. 본 연구에서는 소재의 열적 거동을 고려하여 온도는 120℃, 압력은 90bar 설정을 하였다. 유지 시간 (Holding time, min) 과 냉각 방식은 공냉과 노냉 두 가지 방식을 제어 변수로 하여 후처리를 진행하였다. Table 1은 후처리 조건을 보여주고 있다. 예비 실험을 통하여 공냉과 노냉의 냉각 속도는 측정하였다.

2.3 인장 실험

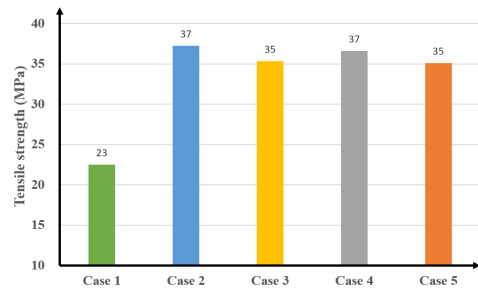
WIP 후처리 공정에 따른 효과를 정량적으로 평가하기 위하여 인장 실험을 수행하였다. 인장 시험은 인장 시험기 DTU-900 (대경테크, 대한민국) 제품을 통하여 수행하였다. 인장 실험 시 하중 작용 속도는 5mm/min 하였다.

2.4 누수 실험

WIP 후처리 공정의 유효성을 정성적으로 알아보기 위하여 본 연구에서는 방수 실험을 수행하였다. 실험용 시편은 Fig. 4에 보이는 형상으로 만들었으면, WIP 처리



[Fig. 4] Tightness test specimen



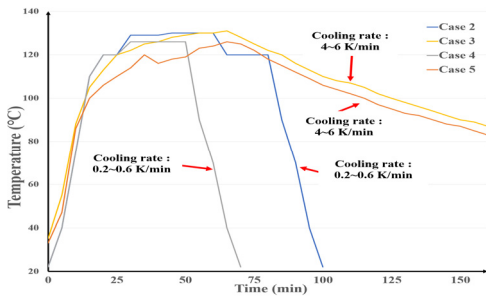
[Fig. 5] Results of tensile tests

후에 방수 실험을 수행하였다. 방수 실험에는 제작된 시편에 호스를 연결하고, 물이 담겨있는 비이커에 넣고 1 bar 압출 공기를 공급하여 버블의 생성을 통하여 누수를 검증하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 인장 실험

인장 실험 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 인장 실험의 결과는 WIP 수행은 인장 강도의 향상에 도움이 되고 있음을 알 수 있다. 인장 강도의 증가는 내부 기공의 감소로 인하여 출력 라인 사이의 접촉 면적 증가 때문이다. 본 연구에서 선택한 유지 시간(Holding time)과 냉각 방식은 WIP 공정 변수 중에 온도와 압력의 기계적 물성치에 대한 영향에 대한 연구의 후속 연구이다. Fig. 3에 보이는 것과 같이 WIP 공정에는 온도와 압력의 두 개의 변수가 가장 중요하다. 이는 폴리머의 유동성을 만들어 내는 중요한 인자이기 때문이다. 하지만, 유지 시간은 폴리머에 공급되어 지는 에너지 총량, 냉각 방식의 소재의 결정화 시간을 의미하기에 기계적 물성치에도 영향을 미친다.



[Fig. 6] Cooling rate with cases

이를 알아보기 위한 실험은 수행이 되었으며 그 결과는 Fig. 5에 나타냈었다. 유지 시간에 대한 (30~60min) 두 경우 모두 기계적 물성치는 차이가 없다. 이 결과는 비결정성 폴리머인 ABS의 기계적 물성치는 시간 변화에는 영향을 받지 않기 때문인 것으로 볼 수 있다. 하지만, PA와 같은 결정성 수지의 경우는 분해(Degradation)로 인하여 기계적 물성치가 변화할 수도 있다 [13-15].

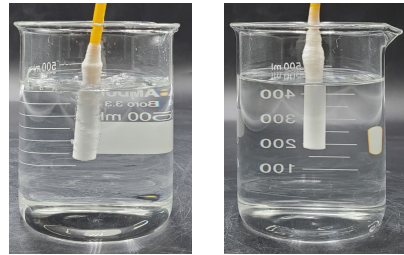
이에 반해서, 냉각 방식에 따른 기계적 물성치에는 작은 차이를 보인다. 공냉(Cases 2, 4) 경우가 로냉(Cases 3,5)에 비해서 5% 정도 높은 인장 강도를 보인다. 이는 냉각 속도가 빠름에 따라서 결정화 강도가 증가하였기 때문으로 생각된다 [16]. Fig. 6에서 각 경우에 대한 시편의 냉각 온도를 표현한 그래프를 통해서 알 수 있다. 이는 ABS와 같은 비결정 폴리머의 경우는 WIP 처리 후의 인장 강도가 냉각 속도에 더 영향을 받음을 알 수 있다. WIP 공정의 최적화에 있어서 소재의 성질(결정성, 비결정성)에 따라서 냉각 속도에 대한 고려가 되어야 함을 보여주고 있다.

3.2 누수 실험

누수 실험은 WIP 공정에 의한 내부 기공의 감소를 정성적으로 확인하기 위하여 수행하였다. Fig. 7은 WIP처리 전후의 시편에 대한 누수 실험 결과를 보여주고 있다. WIP 처리 이후에는 누수가 발생하고 있지 않음을 확인할 수 있다.

3.3 논의

본 연구에서는 FDM 방식의 3D프린터를 이용하여 개발용 기구 시제품을 제작할 경우, 기계적 물성치 개선 및 방수 성능 향상을 위한 WIP 공정을 소개하였으며, 기존의 연구에서 미진했던 최적화가 필요한 공정 변수 연구를 수행하였다. WIP 공정에서 가장 중요한 공정 변수는 온도 및 압력이다.



[Fig. 7] Results of tightness test without (a) and with (b) WIP process

이에 대한 선행연구는 연구자가 이전에 수행하였으며, 중요 변수 선정에 대한 방법도 제시하였다. 본 연구에서는 그 두 중요 변수 외에 온도 유지 시간 및 냉각 방식에 따른 연구를 수행하였다. 유지 시간의 기계적 물성치에 크게 영향을 주지 않으면, 냉각 시간은 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 이런 결과는 본 실험에서 사용한 ABS (비결정성 폴리머)의 경우에 해당한다고 할 수 있다. 앞에서 언급한 것과 같이 비결정 소재의 경우는 유리전이 온도(Tg) 및 용융 온도(Tm)이 서로 상이하며 그 사이에서는 온도에 비례해서 기계적 물성치가 변화한다. 시간에 따른 변화가 존재하지는 않는다. 즉, 하나의 냉각 방식에 있어서 유지 시간이 차이가 나도 크게 기계적 물성치에는 영향을 주지 않음을 의미한다. 결정성 수지의 경우에는 상변화가 발생하는 동안에 폴리머가 흡수하는 총열량에 따라서 분해가 발생하여 기계적 물성치가 변화한다 [17]. 이는 결정성 폴리머를 대상으로 WIP 공정을 최적화 할때는 온도 유지 시간도 중요한 인자가 될 수 있음을 의미한다. 이와 동시에 냉각 방식도 동시에 고려가 필요로 하다.

4. 결론

본 연구에서는 비결정 소재에 대한 WIP 공정 변수 최적화 방안에 대하여 연구하였다. 비결정 소재의 경우 온도 유지 시간은 중요 변수가 아니며, 냉각 방식에 따른 결정화 속도가 기계적 물성치에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. WIP 공정을 통하여 출력물이 기계적 물성치 및 방수 성능 향상도 확인할 수 있었다. 이를 통하여 FDM 방식의 3D 프린팅 기술에 있어서 WIP 공정의 유효성을 다시 한번 확인할 수 있었다.

이후의 연구에서는 결정성 소재에 있어서 WIP 공정 변수의 최적화에 대하여 연구하고자 한다.

REFERENCES

[1] D.G.Kim, H.S.Lee, T.W.Kim and H.W.Lee, "LBS/GPS based Bicycle Safety Application with Arduino," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.2, No.1, pp.7-15, 2016.

[2] B.Peng, I.R.U.Numonov, S.K.Yeo and T.K.Kim, "Implementation of IoT-Based Hydroponic Cultivation System," Journal of The Korea Internet of Things, Vol. 9, No.4, pp. 59-69, 2023.

[3] I.H.Ahn, "A study for the mechanical Properties with Infill Rate in FDM Process to Fabricate the Small IoT Device," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.6, No.3, pp.75-80, 2020.

[4] S.Y.Kim, "A Study of Design for Additive manufacturing Method for Part Consolidation to Redesign IoT Device," Journal of The Korea Internet of Things, Vol.8, No.2, pp.55-59, 2022.

[5] M.T.Birosz, L.Daniel and A.Matyas, "Effect of FDM infill patters on mechanical properties," Polymer Testing, Vol.113, pp.107654., 2022.

[6] B.Stucker, I.Gibson and D.Rosen, Additive manufacturing Technologies, 2nd ed., New York: Springer. 2015.

[7] T.Wohler, Wohlers report 2018, Wohlers Associates Inc. 2018.

[8] S.J.Park, S.J.Park, Y.Son and I.H.Ahn, "Reducing anisotropy of a part fabricated by material extrusion via warm isostatic pressure (WIP) process," Additive Manufacturing, Vol.55, pp.102841, 2022.

[9] S.J. Park, S.J.Park, Y.Son and I.H.Ahn, "Influence of warm isostatic press (WIP) process parameters on mechanical properties of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS) parts," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.122, No.7-8, pp.3311-3322, 2022.

[10] Stratasys, ABSplus, Srong, Intricated 3D Printed Parts With ABSplus, www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/polyjet-materials/abs-plus/#_ga=2.174591330.1780685185.1697619194-510809802.1697619194&_gac=1.114742517.1697619194.Cj0KCQjwhL6pBhDjARIsAGx8D5-FW1WwH18QGLbx10WRLYT7nRfY3zZPTd0lovKqpCJe6ghaahG4zkaAgqhEALw_wcB.

[11] ASTM D638-22, Standard Test Method For Tensile Properties Of Plastics, webstore.ansi.org/standards/astm/astmd63822.

[12] I.Anno, T.Wakamatsu, I.Ihara and M.Kanari, "Mechanical properties of copper phthalocyanine thin films densified by cold and warm isostatic press processes," Molecular Crystals and Liquid Crystals, Vol.653, No.1, pp.248-253, 2017.

[13] S.J.Park, H.G.Ju, S.J.Park, S.J.Hong, Y.Son and I.H.Ahn, "New possibilities in polymer binder jetting additive manufacturing via infiltration and warm isostatic pressing," Material&Design, Vol.231, pp.112045, 2023.

[14] N.Feng, X.Wang, D.Wu, "Surface modification of recycled carbon fiber and its reinforcement effect on nylon 6 composites: Mechanical properties, morphology and crystallation behaviors," Journal of Applied Physics, Vol.13, No.9, pp.2038-2050, 2013.

[15] Q.Meng, Y.Gu, L.Luo, S.Wang, M.Li and Z.Zhnag, "Annealing effect on crystalline structure and mechanical properties in long glass fiber reinforced polyamide 66," Journal of Applied plynmer Science, Vol. 134, No.23, pp.44832, 2017.

[16] K.Gupta, V.Fegade, J.Kittur, M.Ramachandran, S.Madhu, S.Chinnasami and M. Amudha, "A review of effect of cooling rate in fiber reinforced polymeric composites," AIP Conference Proceedings, Vol.2393, No.1, 2022.

[17] M.I.Tayouri, S.Estaji, S.R.Mousavi, S.S.Khasraghi, R.Jahanmardi, S.Nouranian and H.A.Khonakdar, "Degradation of polymer nanocomposites filled with graphene oxide and reduced graphene oxide nanoparticles: A review of current status," Polymer Degradation and Stability, pp. 110179, 2022.

안 일 혁(II-Hyuk Ahn)

[정회원]



- 1999년 2월 : 고려대학교 기계공학과(공학사)
- 2001년 8월 : 고려대학교 기계공학과(공학석사)
- 2010년 8월 : 고려대학교 기계공학과(공학박사)
- 2011년 1월 ~ 2014년 1월 : LG 전자 생산기술원
- 2014년 3월 ~ 2017년 2월 : Nanyang Technological University, Research fellow
- 2017년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>

3D printing, Product design, Manufacturing