

3D 프린터를 이용한 임펠러 출력물의 치수 특성

공정리*, 김해지**,#

*한국폴리텍대학 로봇캠퍼스 로봇기계과, **경상국립대학교 자동차공학과

Dimensional Characteristics of Impeller Output Using 3D Printers

Jeong-Ri Kong*, Hae-Ji Kim**,#

*Department of Robotics Machinery, Robot campus of Korea Polytechnic,

**Department of Automotive Engineering, Gyeongsang National University

(Received 29 April 2022; received in revised form 06 May 2022; accepted 12 July 2022)

ABSTRACT

This study analyzed the output precision of 3D printing methods. The inner impeller of the centrifugal compressor was printed in as a sheet with 100% packing density using two methods: field deposition modelling and stereolithography. Dimensional differences between the initial CAD and printed models were evaluated using a 3D scanner. To investigate the dimensional characteristics of the 3D printed impeller, 3D dimension analysis and point dimension analysis were performed. The point dimension analysis was divided into 3D and 2D for comparative analysis.

Keywords : FDM Method 3D Printer(FDM방식 3D프린터), SLA Method 3D Printer(SLA방식 3D프린터), Impeller(임펠러), Dimension Characteristics(치수 특성), 3D Dimensional Verification(3D 치수검증)

1. 서 론

4차 산업혁명분야의 기술발달로 인하여 3D프린팅 기술을 활용한 시제품 제작 및 치수 검증 측면에서 다양한 응용 기술이 적용되고 있다^[1-3]. 3D 프린팅 기술로는 재료의 종류와 적층하는 방식에 따라 다양한 기술의 유형들이 존재하고 이를 통해 발전해 왔으며, 적층방식에 따라서 구분하면 압출, 광조형, 소결, 적층, 고에너지 조사 등의 분류 방식이 있다^[4]. 폴리머 계열에서는 재료 압출 방식(Material Extrusion, ME)의

FDM (Fused Deposition Modeling)방식과 광중합 방식(Photo polymerization, PP)의 SLA(Stereo Lithographic Apparatus), DLP(Digital Light Processing)등의 계열이 가장 활발하게 활용되어지고 있다.

FDM 방식은 3D프린터를 통해 생산된 출력물의 특성이 다양한 인자들에 의해 결정되며 FDM 방식 출력 재료인 PLA는 강도 유지기간이 6개월에서 1년으로 효소 및 미생물에 의해 큰 영향을 받지 않고 가수분해되어 강도를 오랜 기간 유지하여 보편적 용도의 분해성 플라스틱으로도 사용되고 있다^[5-6].

다양한 방식의 3D프린팅 기술 중에서 광경화성 액상 수지를 이용하는 SLA 3D프린팅 기술은 다른 3D프린팅 기술보다 정확하고 해상도가 높은 부품 제조

Corresponding Author : khji@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-3647, Fax: +82-55-772-3649

가 가능하며 대표적인 SLA 광경화 고분자 수지로는 아크릴레이트와 에폭시를 들 수 있다⁷⁻⁸⁾. SLA 3D프린팅 기술은 치수 정밀도 부분에서 표면조도가 우수하여 작고 유기적인 형상의 표현에 적합하고 우수하지만 적층 및 경화 과정에서 수축에 의한 변형이 발생한다⁹⁾.

시제품 제작 측면에서는 3차원으로 설계된 형상 제작에 3D프린터들이 사용되고 있어 제품 개발 과정을 크게 단축시키고 있으나 3D프린터로 제작된 출력물의 소재와 가공공정에 따른 치수의 변화로 조립공정에서 문제점으로 나타나고 있다¹⁰⁾. 조립공정에서의 문제점을 해소하기 위해 치수 검증 및 형상치수관리가 요구되고 치수검증 측면에서는 최근 3차원 설계형상을 3D프린팅하여 비접촉식 3D스캐너로 형상을 스캔한 후 실제 CAD 모델링 형상과 치수를 비교하여 정밀도를 분석하는 기술들이 적용되고 있다¹⁰⁻¹¹⁾.

본 논문 연구에서는 FDM방식과 SLA방식의 3D프린터를 적용하여 가공한 임펠러의 치수의 정밀도를 고찰하였다. 5축 가공으로만 제작이 가능한 임펠러를 3D프린팅하여 치수의 특성을 고찰하여 대체 가능성을 찾기 위하여 3D프린터 출력물을 가공하고 3D스캐너 장치를 이용하여 출력된 임펠러를 스캔하여 치수 측정모델을 생성하였다. 생성된 치수측정모델과 실제 CAD 모델과 비교분석하여 출력물의 정밀도를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 모델 선정

연료전지 기술 향상으로 수소자동차의 상용화가 진행되었고 수소자동차의 성능은 수소와 산소를 공급하는 원심압축기 성능에 따라 결정되고 있으며 원심압축기 내부의 복잡한 유동 현상으로 임펠러의 형상 또한 기하학적이다. 기하학적인 임펠러 형상은 직선이승으로는 가공하기 어려우므로 일반적으로 5축 가공을 통하여 제작되고 있다¹²⁻¹³⁾.

본 연구에서는 3D프린팅으로 가공된 출력물의 치수 정밀도를 고찰하기 위하여 5축 가공으로 생산되는 임펠러를 선정하였으며 강도의 유지기간이 긴 FDM방식과 표면조도가 우수한 SLA방식을 선택하였다.

3D 프린팅을 수행하기 위하여 Table 1과 같이 직경

120mm, 높이 80mm, 블레이드 6개인 임펠러를 Fig. 1과 같이 임펠러의 3차원 형상을 설계하고 모델링하였다.

2.2 실험 장치

임펠러의 3차원 형상을 3D프린팅을 수행하고 3D스캐너 치수측정모델을 실제 CAD 모델과 비교분석하기 위하여 FDM 방식의 프린터인 Ultimaker S5와 SLA 방식의 3D프린터인 Form3를 사용하여 임펠러를 3D프린팅하였다. Fig. 2는 Ultimaker사의 Ultimaker S5와 Formlabs사의 Form3이다.

Table 1 Design specifications of the impeller

	(Unit, mm)
Impeller diameter	120
Impeller height	80
Number of main blade	6

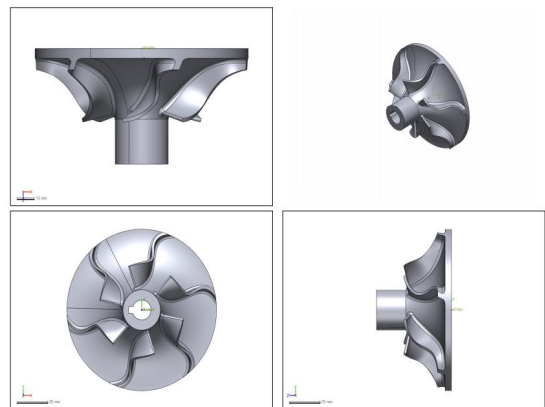


Fig. 1 Reference data model of the impeller

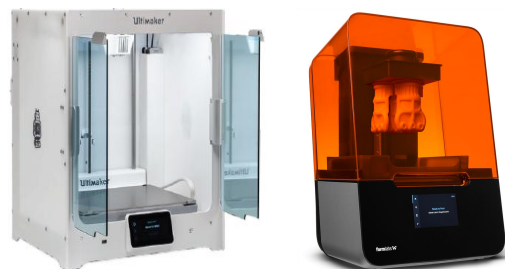


Fig. 2 FDM, SLA 3D Printer. Left FDM, Right SLA

2.3 실험 방법

FDM방식의 3D프린터는 원료인 필라멘트를 녹여 적층하면서 발생하는 표면의 층을 최소화하고 품질을 높이기 위하여 레이어 높이는 0.1mm, 두께는 3겹으로 1.0mm로 설정하였다. 밀도는 SLA방식과 동등한 조건으로 출력하기 위하여 100%로 설정하였으며 재료는 Ultimaker사의 PLA(직경 2.85mm, 노란색), 서포트는 PVA(직경 2.85mm) 수용성 서포트를 사용하였다. 출력물의 배치는 전용소프트웨어 CURA를 이용하여 임펠러의 출력물을 배치하였다. Table 2는 FDM방식의 3D프린터인 Ultimaker S5의 설정조건을 나타내고 있으며 Fig. 3에서는 임펠러의 FDM방식 3D프린팅을 위해 CURA 소프트웨어에서 0.1mm 적층높이로 Slicing후 출력까지의 과정을 나타내고 있다.

SLA방식은 광경화수지 적층방식으로 액체상태의 광경화성 수지가 담긴 수조안에 저전력, 고밀도의 UV 레이저를 투사하여 수지를 굳혀서 적층하는 방식으로 특성상 채움의 밀도를 100%로 설정하여 출력을 진행하였다. SLA방식의 3D프린팅 시 첫 레이어의 면적이 넓은 경우 빌드플레이트에서 분리되는 현상이 발생하므로 이를 방지하기 위하여 각도를 10° 기울여서 적층방향을 설정한 뒤 Formlabs의 Preform를 활용하여 서포트 설치를 위한 설정을 진행하였다. Table 3은 SLA방식의 설정 조건을 나타내고 있으며 Fig. 4는 SLA 3D프린터의 적층방향 설정을 나타내고 있다.

3. 임펠러의 3D스캐닝 및 치수정밀도

3.1 임펠러 스캐닝

본 논문에서는 FDM방식과 SLA방식의 3D프린팅 출력물의 치수특성을 분석하기 위하여 임펠러 형상을 각 방식별로 100%의 밀도로 프린팅 하였다. Fig. 5는 3D프린터 후 서포터를 제거한 임펠러를 나타내고 있으며 (a)는 FDM방식, (b)는 SLA방식으로 출력된 임펠러이다.

출력된 임펠러의 스캔을 위해 비접촉 이동형레이저 스캐너인 Artec社의 Space spider 3D스캐너를 사용하였으며, 사용된 Artec 3D스캐너는 1초당 최대 7장의 3D이미지를 포착하므로 작업 과정을 비디오 카메라로 촬영하듯이 대상물 주위를 이동하면서 스캐닝 작업을 수행하였다.

Table 2 Processing conditions of FDM type

Material	PLA(Yellow)
Print core	AA 0.4
Layer height	0.1mm
Wall thickness	1.0mm
Wall line count	3
Top thickness	1.0mm
Top layer	10
Bottom thickness	1.0mm
Bottom layer	10
Infill density	100%

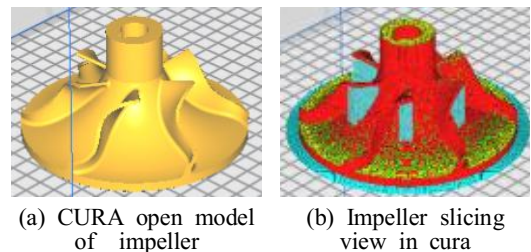


Fig. 3 FDM 3D printing process of impeller

Table 3 Processing conditions of SLA type

Material	Resin(Grey V4)
Print setting	Legacy
Layer thickness	0.1mm
Supports raft type	Full raft
Supports density	1.0
Supports touchpoint size	0.6mm
Flat spacing	5.0mm
Slope multiplier	1.0
Height above raft	5.0mm
Raft thickness	2.0mm
Infill density	100%

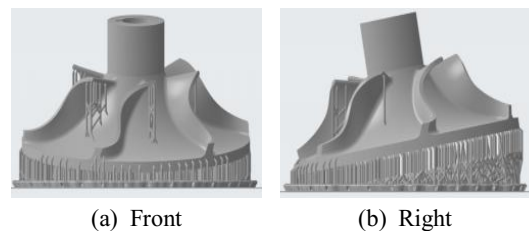
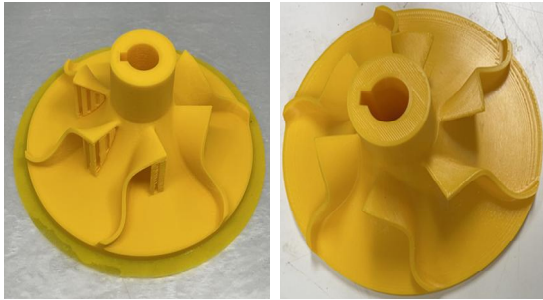
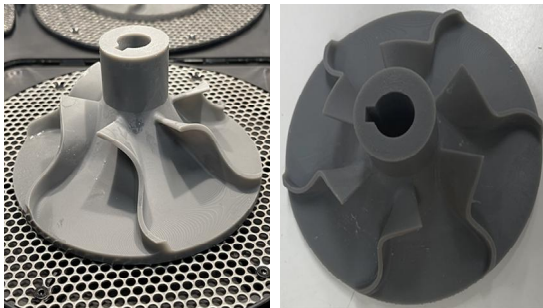


Fig. 4 SLA 3D printer stacking direction of impeller

3D 스캐너로 형상을 측정하여 초기 설계 모델과 측정모델을 실시간으로 자동 정렬된 데이터를 획득할 수 있다. Fig. 6은 FDM방식으로 가공된 출력물의 스캔 측정 모델을 나타내고 있으며 Fig. 7은 SLA방식으로 가공된 출력물의 스캔 측정 모델을 나타내고 있다.



(a) FDM method



(b) SLA method

Fig. 5 3D Printer Additive Manufacturing of Impeller

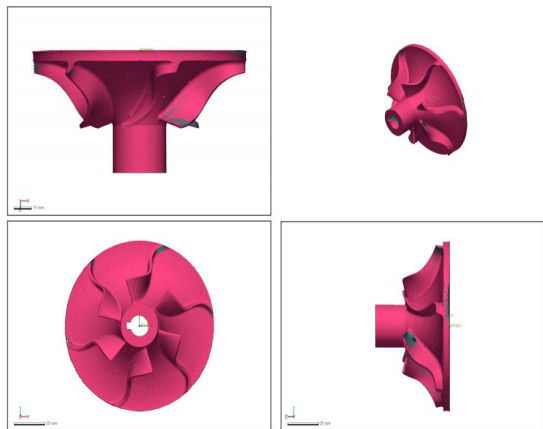


Fig. 6 Scan model of FDM 3D printed impeller

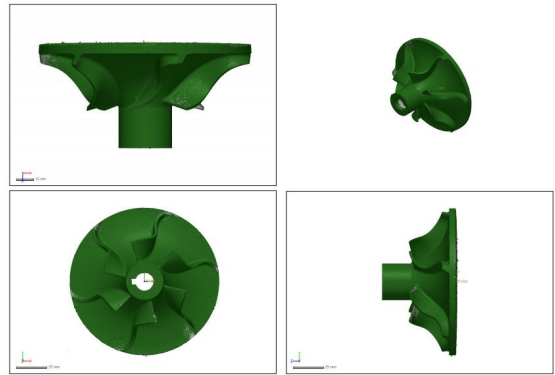


Fig. 7 Scan model of SLA 3D printed impeller

3.2 설계 모델과 스캔 모델의 정렬

임펠러의 설계 모델과 3D 프린팅 출력형상의 치수비교를 위해 임펠러의 설계 모델과 스캔 모델에 대하여 Geomagic Control X 소프트웨어를 사용하여 정렬을 진행하였다. 초기정렬 후 최적맞춤의 정렬을 진행하기 위해 정렬의 변환과정을 진행한다.

Fig. 8은 FDM방식으로 출력된 임펠러의 설계 모델과 스캔 모델의 초기 정렬을 나타내고 있으며 Fig. 9는 FDM방식 출력물의 최적맞춤 정렬을 나타내고 있다.

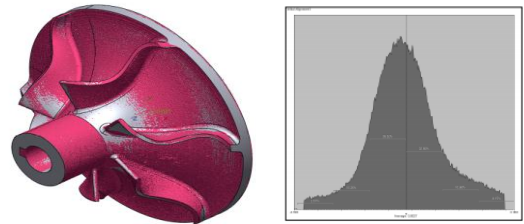


Fig. 8 Initial alignment of design model and scan model to FDM 3D printing method

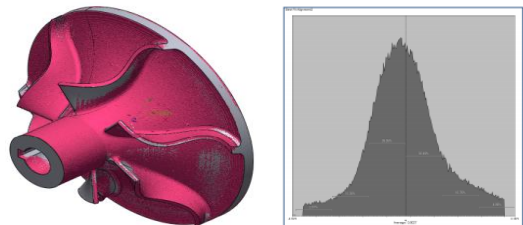


Fig. 9 Best fit alignment of design model and scan model to FDM 3D printing method

Fig. 10은 SLA방식으로 출력된 임펠러의 정렬 과정에서 초기 정렬을 나타내고 있으며 Fig. 11은 SLA방식 출력물의 최적맞춤 정렬을 나타내고 있다.

Geomagic Control X는 최적맞춤 정렬을 찾아내어 합치도와 표준편차를 측정하여 나타낸다. 설계 모델과 스캔 모델의 정렬 합치도의 상세 분석표는 Table 4와 같다.

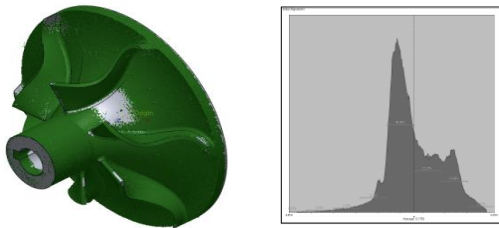


Fig. 10 Initial alignment of design model and scan model to SLA 3D printing method

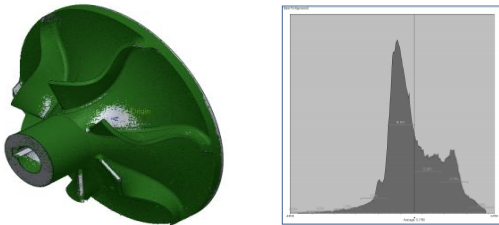


Fig. 11 Best fit alignment of design model and scan model to SLA 3D printing method

Table 4 Dimensional alignment analysis of design model and scan model

		(Unit, mm)	
Content	Tolerance	FDM	SLA
Min	±0.05	-0.1688	-0.7497
Max	±0.05	0.1688	0.7509
Avg.	±0.05	0.0027	0.1749
RMS	±0.05	0.0616	0.2767
Std. Dev.	±0.05	0.0616	0.2144
var.	±0.05	0.0038	0.0460
+Avg	±0.105	0.0506	0.2301
-Avg	±0.05	-0.0440	-0.1068

FDM방식으로 출력된 임펠러의 설계 모델과 스캔 모델의 표준편차는 0.0616mm로 나타났으며 SLA방식으로 출력된 임펠러의 설계 모델과 스캔 모델의 표준편차는 0.2144mm로 측정되어 나타났다.

3.3 3D치수 비교 분석

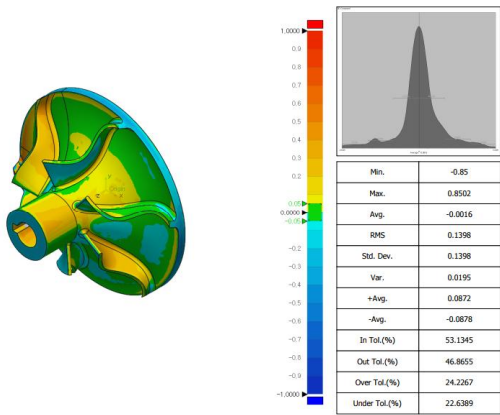
임펠러의 설계 모델과 스캔 모델의 최종 정렬 형상을 바탕으로 FDM, SLA 3D프린팅 방식에 따른 3D치수분석과 포인트 치수분석을 진행하여 치수특성을 분석하였다. Fig. 12는 3D 비교분석 결과 값을 색상과 그래프로 나타낸 것이며 (a)는 FDM방식, (b)는 SLA방식을 나타낸 것이다. 설계 모델과 스캔 모델을 허용오차 ±0.05mm를 만족하는 영역에서 3D 비교분석 결과 값은 Table 5와 같다. 허용오차 ±0.05mm를 만족하는 영역에서 FDM방식이 약 53%의 치수정밀도를 만족하고 SLA방식은 약 22%를 만족하는 치수정밀도를 확인할 수 있다.

3.4 포인트 치수 비교 분석

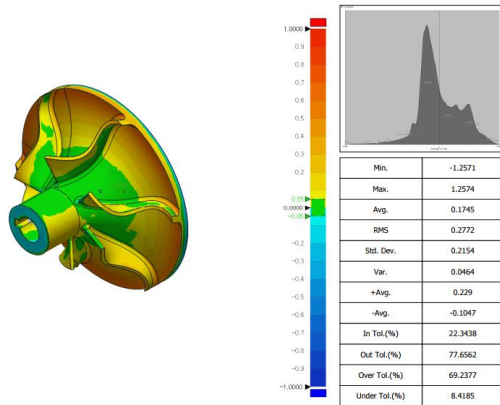
포인트 치수분석은 3D 비교분석과 2D 비교분석으로 나누어 진행하였으며 3D 포인트 치수분석은 상면 11개의 포인트를 허용오차 ±0.1mm를 기준으로 진행하였다. Fig. 13은 3D 포인트 치수분석의 상면 11개 포인트를 나타내고 있다.

3D 포인트 치수분석의 결과로 FDM 방식은 상면 11개의 포인트 중 8개 포인트가 허용오차 ±0.1mm를 만족하였고 SLA 방식은 상면 11개의 포인트 중 4개의 포인트가 허용오차 ±0.1mm를 만족하는 것을 확인하였다. 2D 포인트 치수분석은 총 17개 포인트를 허용오차 ±0.1mm를 기준으로 진행하였으며 2D 포인트 치수분석결과로는 FDM방식은 17개의 포인트 중 11개 포인트가 허용오차 ±0.1mm를 만족하였고 SLA방식은 4개의 포인트가 허용오차 ±0.1mm를 만족하는 것을 확인하였다.

SLA방식의 출력물인 임펠러 하단부분의 오차가 크게 나타나고 있다. 적층의 기울임 각도와 허용오차와의 연구 및 적층 및 경화 과정에서 일어나는 수축에 의한 변형을 고려한 환경적 변화에 대한 연구가 필요하다.



(a) 3D comparative analysis result of FDM method



(b) 3D comparative analysis result of SLA method

Fig. 12 Dimension 3D comparison analysis result with design model and 3D printed model

Table 5 Dimension 3D comparison result with design model and 3D printing model

(Unit, mm)

Content	Tolerance	FDM	SLA
Min	±0.05	-0.8500	-1.2571
Max	±0.05	0.8502	1.2574
Avg.	±0.05	-0.0016	0.1745
RMS	±0.05	0.1398	0.2772
Std. Dev.	±0.05	0.1398	0.2154
var.	±0.05	0.0195	0.0464
+Avg	±0.05	0.0872	0.2290
-Avg	±0.05	-0.0878	-0.1047

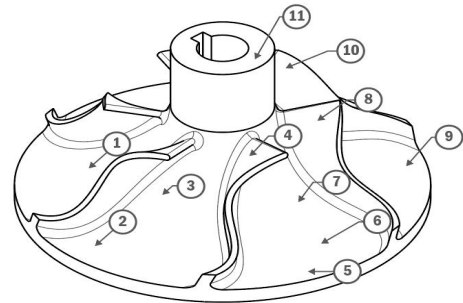


Fig. 13 Point dimension measurement of Impeller

4. 결론

본 연구는 FDM방식과 SLA방식에 따른 3D프린팅 출력물의 정밀도를 얇은 판형형상인 임펠러 형상으로 고찰하였다. FDM방식과 SLA방식에 따른 3D프린팅 출력물의 치수분석은 설계 모델과 출력된 임펠러 형상을 3D스캔하여 진행하였다. 소프트웨어를 이용하여 설계 모델과 스캔한 모델을 정렬하여 3D치수분석과 포인트 치수분석을 진행하였다. 3D치수분석과 포인트 치수분석의 결과는 다음과 같이 도출되었다.

1. FDM방식으로 출력된 임펠러의 설계 모델과 스캔 모델의 표준편차는 0.0616mm로 나타났으며 SLA 방식으로 출력된 임펠러의 설계 모델과 스캔 모델의 표준편차는 0.2144mm로 나타났다.
2. 3D 치수분석 결과 허용오차 ±0.05mm를 만족하는 영역에서 FDM방식이 약 53%의 치수정밀도를 만족하고 SLA방식은 약 22%를 만족하는 치수정밀도를 확인할 수 있다.
3. 3D 포인트 치수분석 결과로 FDM 방식은 상면 11개의 포인트 중 8개 포인트가 허용오차 ±0.1mm를 만족하였고 SLA 방식은 상면 11개의 포인트 중 4개의 포인트가 허용오차 ±0.1mm를 만족하였다.
4. 2D 포인트 치수분석결과로는 FDM방식은 17개의 포인트 중 11개 포인트가 허용오차 ±0.1mm를 만족하였고 SLA방식은 4개의 포인트가 허용오차 ±0.1mm를 만족하는 것을 확인하였다.
5. 향후, 임펠러 하단부분의 오차를 감소시키고 SLA 방식의 적층의 기울임 각도와 수축에 의한 변형을 고려한 환경적 요인을 고찰하여 임펠러 가공을 3D 프린터 가공물로 대체하기 위한 연구가 필요하다.

REFERENCES

1. Kim, H. J. and Kim, N. K., "Dimensional Characteristics according to Internal Density of Automotive Inner Ring in 3D Printing," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 11, pp. 96-102, 2019.
2. Kim, H. J., "3D Printing Characteristics of Automotive Hub using 3D Scanner and Reverse Engineering," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 10, pp. 104-109, 2019.
3. Won, S. H., "Test of Prototype Motor Characteristics using Magnetic Filament of 3D Printer," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 69P, No. 13, pp. 200-205, 2020.
4. Kim, Y. S., Hong, A. R., "The Analysis on Technology Acceptance Model for the 3D Printing Industry with the Social Economic Environment Converged Unified Theory Of Acceptance and Use of Technology Model," *Journal of Korea Technology Innovation Society*, Vol. 22, No. 1, pp. 119-157, 2019.
5. Kang, Y. G., Kweon, H. K., Shin, G. S., "Strength Variation with Inter-Layer Fill Factor of FDM 3D Printer," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 3, pp. 66-73, 2019.
6. You, D. H., "Optimal Printing Conditions of PLA Printing Material for 3D Printer," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 65, No. 5, pp. 825-830, 2016.
7. Song, S. Y., Park, M. S., Yun, J. S., "Dispersion Stability and Mechanical Properties of ZrO₂-CNF/photopolymer Composite Resins by Carbon Nanofiber Contents for SLA 3D Printing," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 27, No. 2, pp. 140-145, 2018.
8. Kim, H. S., Lee, F. H., Kang, H. J., "Enhancement of Impact Strength in Acrylate with Siloxane for SLA 3-D Printing," *Polymer-Korea*, Vol. 41, No. 6, pp. 973-977, 2017.
9. Kim, Y. S., Song, J. C., Baek, S. H., Kim, R. J. Y., "Effect of 3D print orientation and layer thickness on the accuracy of printed models by DLP and SLA printers," *Korean Journal of Dental Materials*, Vol. 49, No. 1, pp. 1-14, 2021.
10. Jung, M. H., Kong, J. R., Kim, H. J., "Dimensional Characteristics of 3D Printing by FDM and DLP Output Methods," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 66-73, 2021.
11. Jung, H. S., Park, S. J. and Yoo, J. H., "Analysis of Master Dimensional Shape Error Rate According to Reverse Engineering Technique," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 25, No. 5, pp. 393-399, 2016.
12. Hwang, J. D., Yun, I. W., "5-axis Machining of Impellers using Geometric Shape Information and a Vector Net", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp. 63-70, 2020.
13. Hong, S. B., Jeong, J. H., "Numerical Study on Vortical Flow Structures and Optimization for Centrifugal Compressor Impeller", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, 2021 Korean Society of Fluid Mechanics Winter Conference, pp. 306-307, 2021.