

치과용 DLP 3D Printer 가공체의 열특성 관찰

송준부, 박유진, 최성민

부산가톨릭대학교 치기공학과

Observation of thermal properties of dental 3D printer materials

Joon-Boo Song, Yu-Jin Park, Sung-Min Choi

Department of Dental Laboratory Science, Catholic University of Pusan, Busan, Korea

Article Info

Received May 10, 2021

Revised July 24, 2021

Accepted August 9, 2021

Corresponding Author

Sung-Min Choi

Department of Dental Laboratory Science,
Catholic University of Pusan, 57 Oryundae-ro,
Geumjeong-gu, Busan 46252, Korea

E-mail: smchoi@cup.ac.kr

https://orcid.org/0000-0001-6083-7732

Purpose: In this study, thermal properties were observed by measuring the extent of thermal expansion and the amount of thermal residue that appears upon burnout on a workpiece made by using a dental digital light processing (DLP) three-dimensional (3D) printer.

Methods: Thermal properties of workpieces manufactured by using two 3D printers were observed. The specimens were designed in cylindrical form with dimensions 10 mm in diameter and 10 mm in height. The control specimen was made of wax, and the experimental specimen was made of resin. The thermal expansion rate was measured by applying heat to three types of specimens, and burnout residue was measured.

Results: The thermal expansion rate of the wax pattern (WP) specimen was $0.93\% \pm 0.05\%$, of the RP1 specimen was $1.30\% \pm 0.08\%$, and of the RP2 specimen was $1.20\% \pm 0.09\%$. Measuring the recovered residue yielded residual amounts of 0.2% for the WP specimen, 1.1% for the RP2 specimen, and 1.8% for the RP1 specimen.

Conclusion: 1. From measurements of the workpieces manufactured by dental DLP 3D printing, the thermal expansion rate was found to be higher than that of wax.

2. As a result of measuring burnout residues on the workpieces manufactured by dental DLP 3D printing, the required summoning temperature to obtain suitable castings was determined to $>750^{\circ}\text{C}$.

Key Words: Digital light processing, Resin, Thermal expansion, Thermal property, Three-dimensional printer

INTRODUCTION

디지털 치과기공기술이 빠르게 발전하여 재료, 방법, 기자재 등 전반적인 부분이 영향을 받아 치과보철물의 제작에 활용되고 있다[1]. 기존의 치과용 주조체는 인상체를 토대로 제작된 구강모형상에서 납형을 조각한 후 매몰과 소환, 주조과정을 거쳐 최종 치과보철물로 완성된다[1]. 최근에는 주조체의 제작에 디지털 기술을 활용하기 위한 방법으로 CAD/CAM (computer-aided design/computer-aided manufacturing)을 활용한 PFM (porcelain fused metal) 금속하부구조물의 제작은 3차원 형태로 설계하고 왁스블록을 밀링한 후 가공체를 통법대로 주조하여 금속구조물을 완성하는 방법[2]과, 반소결된 금속을

밀링한 후 소결하여 사용하는 방법이 사용되고 있다[3]. 이러한 절삭가공은 디지털로 수치화된 정보를 활용하여 정확하게 가공할 수 있으나 [4], 가공범위의 한계와 절삭기구의 과도한 손실로 인하여 생산성이 떨어진다[5,6]. 이와 같은 절삭가공의 단점이 보완된 적층가공(additive manufacturing)은 필요한 위치에 재료를 쌓아 올려 복잡한 형태를 쉽게 가공할 수 있고, 불필요한 재료의 소모를 줄여 가공체를 완성함으로써 경제적 이점을 가진다[5,6].

적층가공방식은 소재와 출력방식에 따라 분류된다. 고분자 또는 세라믹을 적층하는 방법은 출력 방식에 따라 광경화수지조형방식 (stereo-lithography apparatus, SLA), 마스크투영이미지경화방식 (digital light processing, DLP), 폴리트방식(Polyjet), 압출적층조형

방식(fused deposition modeling, FDM) 등으로 분류된다[7]. 그리고 합금분말을 레이저로 적층하는 방법은 합금분말을 용융하는 선택용융 가공법(selective laser melting, SLM)과 합금분말을 소결하는 선택소결가공법(selective laser melting, SLS) 등으로 분류된다[8].

치과용 three-dimensional (3D) printer로 보편화된 DLP 방식은 복잡한 구조를 가진 알고리즘을 빔 프로젝트의 빛으로 조사하면 자외선(ultraviolet, UV)의 강한 에너지가 광중합 개시제(photopolymerization initiator)에 반응하여, 수조에 담긴 액상의 광경화성수지(photo-curable resin)가 고체인 폴리머(polymer)로 변화하여 한 면씩 적층되면서 가공체가 완성된다[9-11]. 치과용 3D printer로 출력된 광경화성수지 가공체는 강도가 부족하여 치관보철의 경우 최중 보철물보다 임시수복물의 제작에 주로 사용되며 납형과 같은 주조용 소재로 사용할 수 있다. 그러나 3D 프린팅된 광경화성 수지는 매몰과 소환의 과정에서 불완전 연소로 인한 잔류물을 남기고, 가스와 표면부 오염, 크랙 등이 발생되어 특정온도 범위에서 가열에 의한 팽창과 수축이 일어나, 외형이 변형되는 문제점이 관찰되었다[12]. 소환시 납형의 변형에 의한 매몰재 균열은 주조실폐의 주원인이 되므로 납형의 열팽창량과 소환잔류물량의 관찰을 통해 매몰재 및 소환 온도의 조절이 필요하다. 현재 출시되는 3D 프린팅 주조용 소재는 매몰과 소환스케줄 등의 작업공정 및 주조기술이 명확히 제시되어 있지 않고 정보가 부족하여 치과 주조 보철물 제작에 많은 어려움이 발생하고 있다[13]. 따라서 본 연구에서는 치과용 DLP 3D printer로 제작된 레진 가공체의 소환시 발생하는 열팽창률과 소환 잔류물량을 측정하여 열특성을 관찰하고, 매몰재의 혼수비 조절 및 소환 조건을 결정하기 위한 기준자료를 제시하고자 한다.

MATERIALS AND METHODS

1. 실험 재료

본 실험에서는 다음과 같은 실험장비와 소재를 사용하여 치과용 DLP 3D 프린팅 가공체의 열특성을 관찰하였다. 실험에 사용된 가공체는 치과용 CAD/CAM (Ceramill Motion 2; Amann Girrbach, Koblach, Austria) 장비를 이용하여 가공된 왁스(Casting Wax Block; Bukwang, Busan, Korea) 1종과 치과용 DLP 3D printer인

W11 (Nextdent, Soesterberg, Netherlands)와 DIO PROBO (DIO, Busan, Korea)를 이용하여 가공된 레진 2종을 실험에 사용하였다. 레진은 각 장비에 적용되는 전용의 광경화성수지를 사용하였다(Table 1).

2. 시편 제작

치과용 DLP 3D printer로 제작된 가공체의 열팽창률을 측정하고 소환잔류물을 관찰하기 위한 시편은 직경 10 mm, 높이 10 mm의 원기둥 형태로 AutoCAD 2019 (Autodesk, San Rafael, CA, USA)를 이용하여 설계하였다(Fig. 1). 시편은 치과용 CAD/CAM으로 절삭가공된 1종의 왁스(wax pattern, WP)와 2종의 치과용 DLP 3D printer로 적층가공된 레진(RP1 [resin pattern 1], RP2)을 이용하여 준비하였다(Table 2). 각 시편은 10개씩 제작하였다.

3. 가공체의 열팽창률 측정

치과용 DLP 3D 프린팅 가공체의 열팽창률(CTE, coefficient of thermal expansion)을 분석하기 위하여 열팽창률 측정실험을 실시하였다. 3종의 시편을 열팽창률분석(TMA, thermomechanical analyzer)용 장비인 TMA-60H (Shimadzu, Kyoto, Japan)을 이용하여 상온에서 600°C까지 열을 가하여 열팽창률을 측정하였다.

4. 가공체의 소환 온도에 따른 잔류물 관찰

치과용 DLP 3D printer로 제작된 가공체의 열 특성을 관찰하기 위하여 소환잔류물의 관찰 및 측정을 실시하였다. 3종의 시편을 alumina

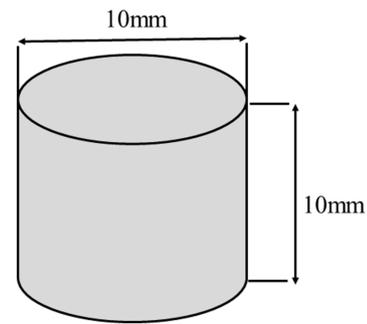


Figure 1. Thermal properties observation specimens; cylinder type.

Table 1. Equipment and materials of thermal properties observation

Group	Model	Spac	Materials
Control	Ceramill Motion 2 (Amann Girrbach, Koblach, Austria)	Processing method: 5 axis milling Precision: 10 μm	Casting Wax Block (Bukwang, Busan, Korea)
Experimental	W11 (Nextdent, Soesterberg, Netherlands)	Processing method: DLP Precision: 65 μm	Nextdent Cast (Nextdent)
	DIO PROBO (DIO, Busan, Korea)	Processing method: DLP Precision : 57 μm	DIO Navi Cast (DIO)

DLP: digital light processing.

Table 2. Classification of thermal properties observation specimens

Code	Shape	Specimens	N
WP	Cylinder type	Wax pattern	10
RP1		Resin pattern (Nextdent, Soesterberg, Netherlands)	
RP2		Resin pattern (DIO, Busan, Korea)	

boat에 담아 소환로(BEGO Miditherm MP; BEGO, Bremen, Germany)에서 분당 상승온도를 9℃로 설정하고 250℃ 승온 후 60분 계류, 450℃ 승온 후 40분 계류, 550℃ 승온 후 40분 계류하였다. 승온 이 후 250℃, 450℃, 550℃의 계류 온도에서 시편의 형상을 관찰하였다.

5. 가공체의 소환 잔류물량 측정

소환에 따른 잔류물량을 측정하기 위하여 열중량 분석기(thermos gravimetric analysis, TGA IQ500; TA Instruments, New Castle, DE, USA)를 이용하여 상온에서 750℃까지 온도를 상승시켜 각 시편의 소환 잔류물량의 측정을 실시하였다. 실험 결과는 TA Instrument software (Universal Analysis; TA Instruments)로 분석하였다.

RESULTS

1. 가공체의 열팽창률 측정

치과용 DLP 3D printer로 제작된 가공체의 열 특성을 관찰하기 위한 열팽창률의 측정 결과 WP 시편의 열팽창률은 $0.93\pm 0.05\%$ 로 측정되었고, RP1 시편은 $1.30\pm 0.08\%$, RP2 시편은 $1.20\pm 0.09\%$ 로 측정되었다(Table 3).

2. 가공체의 소환 온도에 따른 잔류물 관찰

치과용 DLP 3D 프린팅 가공체의 열특성을 관찰하기 위하여 소환 잔류물량을 측정하였다. 그 결과 250℃에서 WP 시편은 alumina boat에 형태 없이 용융되어 탄화된 형상이 관찰되었으며, RP1 시편과 RP2 시편은 원기둥 형태를 유지하였으나 탄화된 표면의 일부 파절이 관찰되었다(Fig. 2A). 450℃에서 WP 시편은 alumina boat에 형태 없이 소실되어 탄화물이 관찰되었다. 그리고 RP1 시편은 원기둥의 일부가 부풀어진 형상이 관찰되었고 RP2 시편은 원기둥 형태가 전부 부풀어 오른 형상으로 원래의 형태를 알아볼 수 없도록 변형되었다(Fig. 2B). 550℃에서 WP 시편은 미량의 탄화물만 관찰되었으나, RP1 시편과 RP2 시편은 탄화물 일부가 남아있는 것이 관찰되었다(Fig. 2C).

3. 가공체의 소환잔류물량 측정

소환 잔류물량은 TA Instrument software (Universal Analysis; TA Instruments)를 이용하여 TGA의 결과를 변환하였다. 소환 잔류량 측정결과 WP 시편은 0.2 wt%의 잔류물이 측정되었다. 그리고 RP1 시편의 잔류물은 1.8 wt%로 가장 높게 측정되었고, RP2 시편의 잔류물은

Table 3. Result of thermal expansion (unit: %)

Specimens	CTE
WP	0.93±0.05
RP1	1.30±0.08
RP2	1.20±0.09

CTE: coefficient of thermal expansion, WP: wax pattern, RP: resin pattern.

1.1 wt%로 측정되었다(Table 4).

DISCUSSION

본 연구에서는 치과용 DLP 3D 프린팅 기술로 제작된 가공체의 소환 시 나타나는 열 특성을 관찰하기 위해 열팽창률과 소환에 따른 잔류물량을 측정하여 매물 및 소환 과정을 선택하기 위한 기준 자료를 제시하고자 하였다.

열 특성 관찰을 위하여 열팽창률을 측정하였다. 그 결과 WP 시편의 열팽창률은 $0.93\pm 0.05\%$ 로 나타났다. 그리고 RP1 시편의 열팽창률은 $1.30\pm 0.08\%$, RP2 시편의 열팽창률은 $1.20\pm 0.09\%$ 로 WP 시편보다 높게 나타났다. 따라서 3D 프린팅 가공체의 주조과정에서 매물재를 선택할 경우 시판되는 매물재의 혼합비율은 왁스의 팽창률에 맞추어 제시되고 있으므로 매물재의 혼수비와 소환온도를 조절하여 팽창률을 확인하고 그에 따른 최종 보철의 형태와 적합도를 확인하는 실험이 필요할 것으로 판단된다.

열 특성 관찰을 위한 소환잔류물 관찰실험에서 WP 시편은 100℃~150℃에서 용융되어 흐름성을 가지고 250℃에서 대부분 연소되었다. 그러나 RP1 시편과 RP2 시편은 300℃ 이상의 온도에서 탄화가 시작되었고 400℃ 이상의 온도가 도달했을 때 균열이 일어나면서 연소가 시작되었다. 그리고 450℃에서 WP 시편은 소실되어 미량의 탄화물이 잔류했으나 RP1 시편과 RP2 시편은 탄화되면서 불규칙한 형태로 과도한 팽창이 일어난 것을 관찰할 수 있었다. 선행연구[12]에서 특정온도 범위에서 팽창과 외형 변형이 발생하게 되는 문제점이 관찰된다고 하였는데 본 연구에서 사용된 시편에서는 450℃~500℃ 사이가 이러한 변형이 과도하게 발생하는 온도 범위인 것을 확인하였다. 또한 550℃에서 WP 시편은 대부분 소실되고 미량의 탄화물만 잔류했으나 RP1 시편과 RP2 시편은 일부 탄화물이 잔류해 있는 것으로 관찰되었다. Kim 등[14]은 소환 후 잔류 고형물은 0.5~1.0 wt% 이하일 때 적합한 주조물을 얻을 수 있다고 하였고, Ko [12]는 열 중량 측정 결과에서 잔류물

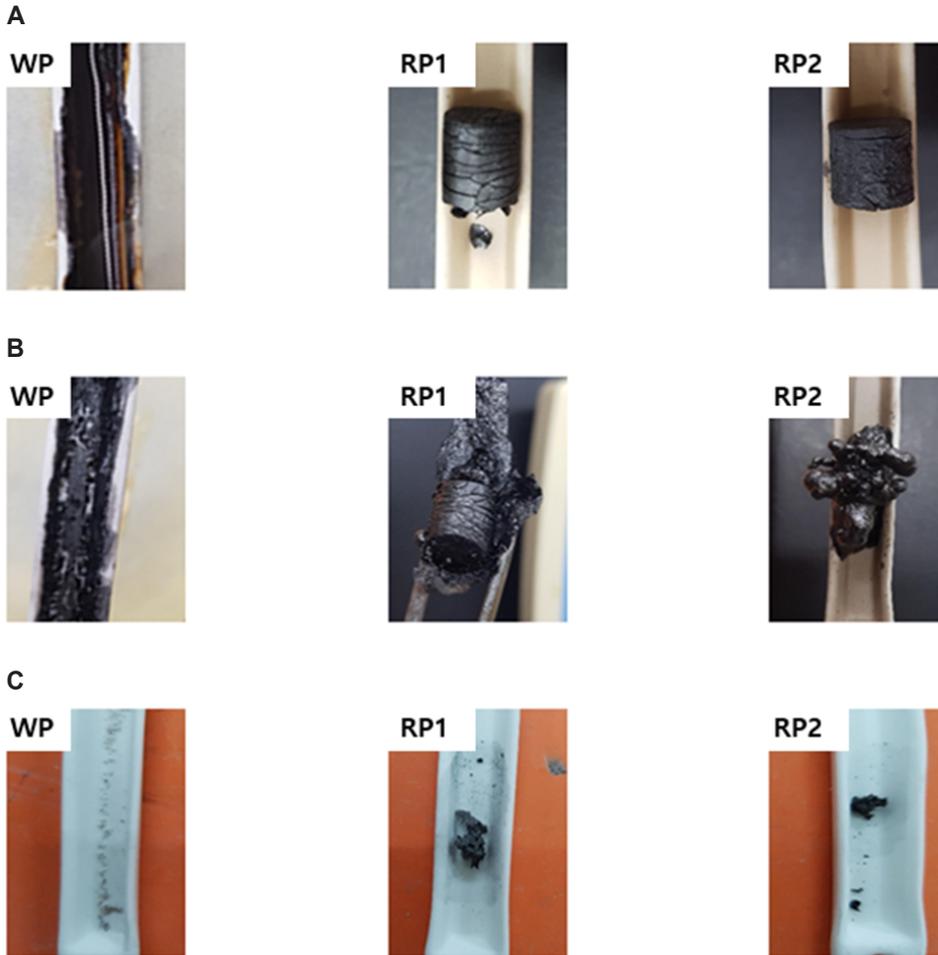


Figure 2. Thermal residue of specimens. A: 250°C, B: 450°C, C: 550°C.

Table 4. Thermo gravimetric analysis of specimens (unit: wt%)

Specimens	TGA
WP	0.2
RP1	1.8
RP2	1.1

TGA: thermo gravimetric analysis, WP: wax pattern, RP: resin pattern.

이 1% 이하이면 잔류물 없음이라고 하였고, 1% 이상이면 주조용 가공체로 사용할 수 없는 것으로 보고하였다. 본 연구의 소환잔류물량 측정 실험결과 WP 시편은 0.2 wt%로 선행연구의 허용범위에 포함되었고, RP2 시편은 1.1 wt%로 1%에 근접한 결과를 나타내었으나 RP1 시편은 1.8 wt%로 1%의 범위를 넘는 결과를 나타내어 잔류물을 남기는 것으로 나타났다. 본 실험에서는 최종소환온도 750°C에서 소환잔류물량을 관찰하였으나 소환온도를 800°C 이상으로 조절한다면 잔류물량을 1% 이내로 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다. 소환온도를 높일 경우 석고 결합 매물재의 경우 700°C 이상의 온도에서는 심하게 수축되어 석고의 분해가 일어나므로 고온용으로 사용할 수 없으며, 800°C~950°C까지 안정성을 가지는 인산염 결합 매물재나 1,000°C 이상에서 안정성을 가지는 이산화규소 결합 매물재를 합금의 종류에 따라 선택

해서 사용해야 할 것이다[15].

일반적으로 혼수비에 따라 경화팽창이 조절되고, 매물재의 소환시 240°C에서 380°C 사이, 550°C에서 650°C 사이의 온도구간에서 열팽창이 유도된다는 보고에 따라 계류온도를 설정하였다[16]. Kwon 등[17]은 일반적으로 왁스는 210°C~220°C에서, 광경화성수지는 450°C~500°C에서 충분한 시간 소환을 시켜야 한다고 보고하였다. 본 실험에서는 레진으로 제작된 시편의 열팽창률이 왁스 시편보다 높게 나타났고, 계류온도 450°C에서 부피의 팽창이 관찰되었으며 550°C에서 탄화물이 잔류하고 있는 것을 관찰할 수 있었다. 소환시 불완전하게 연소된 납형의 잔류물은 주조체의 표면이 거칠게 나타나는 주조결함으로 이어진다[12]. 선행연구에서는 광경화성수지의 소환온도를 450°C~500°C로 제안하였으나, 본 실험결과에서 과도한 팽창이 나타나 소환시 450°C보다 낮은 온도에서 충분한 계류시간을 부여한다면 과도한 팽창과 매물재의 균열을 방지할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 제안된 소환온도에서 탄화물의 잔류가 관찰되어 최종소환온도를 750°C보다 더 높게 설정하거나 계류시간을 더 길게 설정한 추가 실험을 이어 나가야 할 것으로 판단된다. Ryu와 Seo [13]는 매물재의 소환시 무수석고(CaSO₄)가 되면 매물재 석고 속에 수분이 없어지고 다공성을 가지게 되는데, 빨리 소

환될 수 있는 작고 얇은 광경화수지는 기포나 결함이 적은 반면 넓고 두꺼운 광경화수지는 무수석고 상태인 400℃에서 반응하기 때문에 매몰제가 파괴되는 결함을 일으킨다고 보고하였다. 그리고 광경화수지의 경우 450℃~500℃에서 1시간 동안 소성시켜 패턴을 제거하는 방법을 사용할 수 있다고 하였다. 본 연구에서 왁스 시편은 250℃로 승온시 용융되었고, 2종의 레진 시편은 250℃에서 계류 후 기화가 시작하여 450℃로 승온 중에 탄화가 시작되고 균열이 나타나기 시작했으며, 450℃~550℃로 승온 중에 부피 변화가 크게 나타났다. 3D printer로 가공된 레진계 가공체는 소성과정의 탈수지 과정에서 외력에 의하여 주형을 파괴시킨다고 보고되었다[13]. 이러한 결과는 소환시 매몰제의 파괴로 인한 주조 실패로 이어지게 되므로, 가공체와 매몰제 주형 간의 수축팽창에 의해 발생하는 외력에 파괴되지 않는 충분한 강도의 매몰제 개발이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 단순히 최종온도에서의 열팽창률과 소환잔류물을 확인하고 육안으로만 소환온도에 따른 형태변화를 확인하여 실제 임상에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 실험에서 확인된 왁스와 레진의 열팽창률의 차이를 매몰제의 혼수비 조절에 적용하여 주조 후 적합도 등을 비교하는 실험이 필요할 것이다. 그리고 본 연구결과에서 확인된 부피 변화의 온도범위를 확인하여 소환온도와 계류 시간을 조절하고 매몰제의 파괴를 방지할 수 있는 소환스케줄을 확인하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

CONCLUSIONS

본 연구에서는 치과용 DLP 3D 프린팅 기술로 제작되는 가공체의 소환과정에서 발생하는 열 특성을 관찰하기 위해 열팽창률과 소환에 따른 잔류물량을 측정하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 치과용 DLP 3D printer로 제작된 가공체의 열팽창률 측정 결과 RP1 시편은 1.30%±0.08%, RP2 시편은 1.20%±0.09%로 WP 시편보다 열팽창률이 큰 것으로 나타났다.
2. 치과용 DLP 3D printer로 제작된 가공체의 소환 잔류물량 측정 결과 RP1 시편은 1.8 wt%, RP2 시편은 1.1 wt%로 적합한 주조물을 얻기 위해서는 750℃보다 높은 소환온도가 요구된다.

CONFLICT OF INTEREST

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

ORCID

Joon-Boo Song, <https://orcid.org/0000-0002-7475-4820>

Yu-Jin Park, <https://orcid.org/0000-0001-8909-7416>

Sung-Min Choi, <https://orcid.org/0000-0001-6083-7732>

REFERENCES

1. Kim WS, Kim KB. An evaluation of marginal and internal gap of fixed dental prostheses printed by selective laser sintering. *Korean J Dent Mater.* 2017;44:141-149.
2. Kim CY, Chung IS. Evaluation of mechanical characteristic and biological stability of dental alloys by the manufacture method. *J Korea Contents Assoc.* 2011;11:293-301.
3. Kim DY, Sin CH, Jung ID, Kim JH, Kim WC. Evaluation of marginal and internal gap of cobalt-chromium sintering metal coping fabricated by dental CAD/CAM system. *J Dent Hyg Sci.* 2015;15:536-541.
4. Kim SK. Comparison of the workpiece by dental CAD/CAM system software and milling tool [master's thesis]. Busan: Catholic University of Pusan, 2017.
5. Kim MS, Song SH, Kim HI, Ahn SH. Hybrid 3D printing and casting manufacturing process for fabrication of smart soft composite actuators. *J Korean Soc Precis Eng.* 2016;33:77-83.
6. Lee S. Prospect for 3D printing technology in medical, dental, and pediatric dental field. *J Korean Acad Pediatr Dent.* 2016;43:93-108.
7. Stampfl J, Liska R. New materials for rapid prototyping applications. *Macromol Chem Phys.* 2005;206:1253-1256.
8. Choi S. Precision analysis of workpieces made with dental 3D printing technology. *J Korean Acad Dent Technol.* 2018;40:231-237.
9. Kim YH, Kim KE, Lee C. Accuracy improvement of output in projection stereolithography by optimizing projection resolution. *J Korean Soc Manuf Technol Eng.* 2015;24:710-717.
10. Cho H. A study about 3D printer classification and properties. *Proc Korean Inst Inf Commun Sci Conf.* 2015;19:371-373.
11. Jo HY. The manufacture of Fe-Cr-Co alloy using 3D printer [master's thesis]. Seoul: Hankuk University of Foreign Studies, 2015.
12. Ko YT. Preparation and characterization of UV-curing 3D printing precision casting resin [master's thesis]. Gwangju: Chosun University, 2017.
13. Ryu KH, Seo JH. Utilization of 3D CAD and 3D printer and UV curavle resin casting defect. *J Korea Converg Soc.*

- 2017;8:169-176.
14. Kim SC, Han MS, Choi BJ, Lee CJ, Lee HH. Internal fit of bridge patterns fabricated by a 3D printing technique. *Korean J Dent Mater.* 2014;41:239-244.
 15. Lee IG, Seong HK, Lee BK, Jung IS, Park HB, Park JH, et al. *Crown & bridge laboratory technology.* 5th ed. Seoul: Daihakseorim, 2016.
 16. Shin SA, Lim JS, Jeong CM, Jeon YC. A study for setting and thermal expansion of dental soldering investments. *J Korean Acad Prosthodont.* 1999;37:730-740.
 17. Kwon MH, Kim HC, Lee S, Lee SH. The technology development of investment casting using 3D printer pattern. *Proc Korean Soc Precis Eng Conf.* 2002;2:566-569.