광경화성 3D 프린팅 레진의 출력각도에 따른 굽힘 특성과 신뢰성 평가

임용운¹, 송두빈^{2,3}, 황성식¹, 김사학¹, 한만소²

¹경동대학교 치기공학과, ²대전보건대학교 치기공과, ³유정치과기공소

Evaluation of flexural properties and reliability with photo-curing 3D printing resin according to the printing orientations

Yong-Woon Im¹, Doo-Bin Song^{2,3}, Seong-Sig Hwang¹, Sa-Hak Kim¹, Man-So Han²

¹Department of Dental Technology, Kyungdong University, Wonju, Korea

²Department of Dental Lab Technology, Daejeon Health Institute of Technology, Daejeon, Korea

³Yu-Jeong Dental Lab, Anyang, Korea

Article Info

Received March 3, 2021

Revised March 19, 2021

Accepted March 22, 2021

Corresponding Author

Yong-Woon Im

Department of Dental Technology, Kyungdong University, 815 Gyeonhwon-ro, Munmak-eup, Wonju 26495, Korea

E-mail: iywoon9101@kduniv.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-9312-746X>

*This work was supported by a National Research Foundation (NRF) grants (2019R1G1A1006682) funded by the Ministry of Science and ICT.

Purpose: This study aimed to compare the flexural properties and perform the Weibull analysis of photo-curing three-dimensional (3D) printing resin.

Methods: Photo-curing temporary resin (3D polymer) was used as a printing resin. Specimens (65 × 10 × 3.3 mm³) were prepared following the ISO 20975-1 guidelines and according to the different printing orientations using a digital light processing 3D printer (D2 120; Dentium). The flexural strength (FS), flexural modulus, and work of fracture (WOF) were measured using a universal testing machine (Instron 3344; Instron) at a crosshead speed of 5 mm/min.

Results: In this study, the 0° orientation exhibited higher FS and WOF than the 45° orientation. Significant differences were found among the printing orientations (p<0.05). Specimens printed at the 0° orientation were the most accurate. In the Weibull analysis, 0° showed the greatest Weibull modulus (m), which represents a higher reliability.

Conclusion: 3D printing should be selected and used by considering flexural properties, size accuracy, and reliability.

Key Words: Flexural properties, Printing orientations, Size accuracy, Three-dimensional printer, Weibull analysis

INTRODUCTION

치과수복물은 전통적인 수작업 방식에서 디지털 장비를 활용한 방식으로 다양하게 제작되고 있다. 디지털 방식은 기본적으로 치과용 computer-aided design (CAD)을 이용하여 치아의 형태 및 교합을 3차원으로 설계한다. 그리고 치과수복물은 computer-aided manufacturing (CAM)을 이용하여 밀링하는 subtractive manufacturing (SM)방식과 3D 프린터를 이용하여 출력하는 additive manufacturing (AM)방식으로 구분할 수 있다. SM 방식은 수복물의 종류에 따라 심미성과 물성을 갖춘 반영구적 소재를 가공하여 완성한다. 하지만 가

공에 따른 장비의 과부하 및 수명단축, 재료의 낭비, 소재와 사용 툴 장착을 위한 처리 과정 등에서 발생하는 시간적 소요, 사용되는 버(bur)의 마모에 따른 가변적인 정확도 등의 문제가 야기될 수 있다[1]. 이에 반해 AM 방식은 치과용 3D 프린터를 이용하여 수복물을 제작할 수 있으며, 한번에 다량의 맞춤형 수복물을 동시에 출력하므로 시간 및 소재의 절감효과를 가져오는 등 우수한 장점을 가지고 있다. 3D 프린팅을 출력하는 방식은 다양하지만, stereo lithography apparatus (SLA)와 digital light processing (DLP) 방식이 치과 분야에 가장 많이 사용되고 있다[2,3]. SLA 방식은 광 조사 시 특정 부위를 집중 조사하는 방식으로 많은 양의 소재를 한번에 사용해야 하는 단점이 있다. 반면

에 DLP 방식은 한번에 모든 면을 조사하고, 치과용의 적은 소재만으로도 출력이 가능하다. 출력 소재로는 금속, 세라믹, 레진 등 다양한 치과용 소재가 가능하며, 3D 프린팅으로 크라운에서 총의치 수복물에 이르기까지 다양한 치과수복물을 제작할 수 있다[4-6]. 하지만 금속분말에 레이저를 이용한 용융(melting) 시 출력되는 selective laser melting (SLM) 방식은 다공성의 기포를 완전히 제거할 수 없어 기술적 한계가 있다[7]. 또한 세라믹 출력은 임상적 수준의 색상과 응축 과정에서 발생하는 기포로 인한 불완전한 보철물을 야기시킬 수 있으므로 보완이 필요한 실정이다[8]. 따라서 3D 프린팅을 이용한 치과용 수복물은 광경화성 레진이 널리 사용되고 있다. 하지만 출력 시 광도, 적층 두께(layering thickness), 출력각도 등의 조건에 따라 물리적 특성의 변화가 심하여 반영구적 사용을 위한 연구가 필요하다.

치과수복물은 구강 내 다양한 응력 때문에 우수한 물리적 특성이 요구되며, 재료의 결함으로 치과수복물의 빈번한 실패가 발생되고 있다[9,10]. 특히 3D 프린팅 레진은 일반적으로 광도에 영향을 받으며 광도에 따라 출력 후 낮은 물성을 극복하기 위해 UV를 이용한 후경화 처리를 한다. 하지만 UV 시간 등에 프린팅 구조물의 모양 왜곡이 동반될 수 있다[11]. 물성 극복을 위해 적층 두께를 25 μ m, 50 μ m, 100 μ m로 구분하여 사용할 수 있으나 적층 두께가 낮을수록 출력 시간은 길어지기 때문에 임상 적용 시 제한점이 있다.

3D 프린팅을 위한 출력각도는 일반적으로 플랫폼 위에 수평으로 설정할 수 있지만 다양한 치아의 모형과 크기에 따른 출력 방향이 상이하여 출력 시 물성 변화에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 3D 프린팅 레진은 출력 광도, 적층 두께, 출력각도에 따라 출력 보철물의 물리적 특성에 영향을 준다[12-14]. 특히 출력 각도는 정확한 구강 내 보철물을 수복하는 관점에서 물성에 영향을 주는 중요한 요소이다[12]. 그러므로 출력 플랫폼을 기준으로 0°, 45° 및 90°의 조건에 따른 굽힘 특성과 출력 시 크기 정확도를 평가하여 출력방향에 따른 보철물의 영향을 분석하고자 하였다.

이에 본 연구에서는 DLP 방식의 광경화성 3D 프린팅 레진의 출력각도에 따른 굽힘강도, 굽힘 탄성계수, 파절에너지 등 굽힘 특성을 분석하였다. 또한 출력에 따른 크기 정확도(size accuracy)를 평가하였으며, 와이불(Weibull) 분석으로 신뢰성을 평가하여 최적의 수복물 출력

에 대한 임상적 정보를 알아보려 하였다.

MATERIALS AND METHODS

1. 시편 설계 및 출력

본 연구에서는 광경화성 3D 프린팅 레진(3D-polymer; Myeong Moon Dental, Daegu, Korea)을 이용하여 굽힘 특성을 평가하기 위해서 ISO 20795-1에 따른 길이 65 mm, 폭 10 mm, 두께 3.3 mm의 시편을 오토캐드(Fusion 360; Autodesk, San Rafael, CA, USA)로 디자인하여 STL 파일로 저장하였다[15]. Build processor (BP; Dentium, Seoul, Korea)을 이용하여 시편의 출력각도를 0°, 45°, 90°로 설정하여 지지부(supporting pin)를 설치하였다.

출력한 3D 프린팅 레진(n=4)은 DLP 방식의 3D 프린터(Dental 3D Printer-P; Dentium)를 이용하여 100 μ m로 적층하여 출력하였다(Fig. 1). 출력 후 미중합된 광경화성 표면 레진은 알코올이 담긴 초음파 세척기(K-3; Taeheung, Seoul, Korea)를 이용하여 3분간 세척 후 자연 건조하였다. 건조된 시편은 UV (PCM100; Dentium)를 이용하여 10분 동안 후경화 처리를 시행하였다(Table 1). 후처리된 시편은 전용 기구(handpiece)에 텐처 버(D079E; Dedeco, Long Eddy, NY, USA)를 이용하여 원래의 시편에 손상이 가지 않도록 지지부의 표면을 깨끗하게 제거하였다. 시편은 37°C의 증류수에서 48시간 보관한 후 5.0 mm/min의 하중속도로 만능 재료 시험기(Instron 3344; Instron, MA, USA)를 이용하여 측정하였다.

2. 굽힘강도 측정

후처리 완료된 시편은 표면 결함을 줄이기 위해 고풍력 연마를 위해 SiC #1200 연마지로 연마하였다. 만능재료시험기(Instron 3344;

Table 1. 3D printing materials and machines in this study

Products	Shade	Manufacture	Country
Dental 3D Printer-P		Dentium	Korea
3D-polymer	A2	Myeong Moon Dental	Korea
PCM100		Dentium	Korea

Figure 1. Specimens printed by Dental 3D Printer-P (Dentium, Seoul, Korea).

Instron)로 측정된 굽힘강도 데이터를 이용하여 다음의 공식을 적용, 굽힘강도와 굽힘 탄성계수, 파절에너지를 산출하였다.

$$(1) \sigma = 3PL/2bd^2$$

$$(2) E = L^3m/4bd^3$$

$$(3) WOF = U/(bd)$$

여기서 σ 는 굽힘강도(MPa), E는 탄성계수(GPa), P는 굽힘 최대 하중(N), L은 지지부 길이(mm), b는 시편의 폭(mm), d는 시편의 높이(mm), m은 기울기(slope of the modulus line, N/mm), U는 총 에너지(kJ/mm²)이다.

3. 와이블 분석

광경화성 3D 프린팅 레진의 출력각도에 따른 신뢰성을 비교 평가하기 위하여 2-변수 와이블(2-parameters Weibull)분석을 실시하였다. 각 시편의 데이터 값을 아래의 식에 대입하여 와이블 계수(m)를 구하여 비교하였다.

$$P_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

$$P_i = \frac{i-0.5}{N}$$

여기서 i는 재료의 순차, N은 시편의 개수, σ_0 은 σ (강도 값)에 대한 scale parameter이다. m은 와이블 계수(modulus)로 $\ln \ln[1/(1-P)]$ 과 $\ln(\sigma)$ 의 선형회귀 관계 직선 그래프 식($y=mx+b$)에서 기울기를 말한다.

4. 크기의 정확도 평가

광경화성 3D 프린팅 레진의 출력각도에 따라 출력 후 10분간 후 처리 중합을 시행한 뒤 출력 시편의 크기를 디지털 캘리퍼스(CD-10APX; Mitutoyo, Kawasaki, Japan)로 측정, 다음의 식을 적용하여 산출하였다.

$$\text{크기의 정확도} = 100 - [(\text{나중 길이} / \text{처음 길이}) * 100]$$

5. 통계분석

통계처리는 IBM SPSS 21.0 for windows (IBM, Armonk, NY, USA)를 이용하여 3D 프린팅의 출력 각도에 따른 굽힘강도 평균값들을 일원배치분산분석(one-way ANOVA) 및 Tukey's honestly significant difference 사후 검정을 실시하였으며, 유의수준 $p < 0.05$ 로 하였다.

RESULTS

광경화성 3D 프린팅 레진의 출력각도에 따른 굽힘강도, 굽힘 탄성계수, 파절에너지 등의 굽힘 특성 결과는 Fig. 2~4에 나타내었다. 본 연구에서 굽힘강도(FS)는 90° 그룹에서 84.65 MPa로 가장 높았으며, 0° 그룹과는 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$). 45° 그룹에서 74.58 MPa로 가장 낮았으며 0°, 90°와 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 굽힘 탄성계수(FM)는 90°, 0°, 45° 순으로 높았다. 파절에너지(WOF)는 0°, 45°, 90° 순으로 높았다. 굽힘강도에 의한 재료의 신뢰도를 나타내는 와이블계수(m)는 0°에서 가장 높은 신뢰성을 보였다.

Figure 3. Results of flexural modulus by printing orientations. The columns connected by bars were significantly different. The star indicate significantly different by groups ($p < 0.05$).

Figure 2. Results of flexural strength by printing orientations. The columns connected by bars were significantly different. The star indicate significantly different by groups ($p < 0.05$).

Figure 4. Results of work of fracture by printing orientations. The columns connected by bars were significantly different. The star indicate significantly different by groups ($p < 0.05$).

며, 45°에서 가장 낮았다($m < 16$). 와이블 분석(Fig. 5)에서 강도는 모두 ISO 20795-1에서 요구하는 강도보다 상회하였다(> 60 MPa). 크기 정확성은 0°에서 폭과 두께 모두 우수하였으며, 45°와 90°에서 10% 이상 높은 부정확성을 보였다(Fig. 6).

DISCUSSION

3D 프린팅 레진의 출력각도에 따른 보철물의 굽힘 특성은 반영구적 수명 확보를 위해 매우 중요하다. 저작 시 발생하는 복합응력의 적용과 인장응력에 의한 보철물의 파절이 빈번하게 발생되므로 굽힘 평가법을 적용하였다. 치과용 수복재료의 경우, 국제표준규격(ISO 4049)에 의한 3점 굽힘 시험(3-point flexural test)으로 굽힘강도, 굽힘 탄성계수와 파절에너지 등의 굽힘 특성을 적용하여 빈번하게 평가되어 왔다[16,17]. 하지만 ISO 4049의 경우, 2 mm의 얇은 두께와 폭 때문에 프린팅 시편의 제거 시 변형이 심하고, 시편의 크기가 작아서 출력 후 후경화 공정에 따른 뒤틀림이나 말림현상을 일으킬 수 있다[18-20]. 따라서 이러한 문제로 인한 크기의 부정확성을 방지하고자 본 연구에서

Figure 5. Reliability of Weibull analysis by printing orientations.

는 ISO 20795-1에 따른 크기의 시편을 출력하여 광경화성 3D 프린팅 레진의 굽힘 특성을 평가하였다[15]. 굽힘 특성은 적층 두께, 레이저 광도, 출력각도 등에 영향을 받으며, 특히 출력각도는 우수한 물성을 얻기 위해 매우 중요한 요소이다[12-14]. 따라서 본 연구에서는 광경화성 3D 프린팅 레진의 출력각도에 따른 굽힘 특성을 분석하기 위해 3점 굽힘 시험법을 사용하였다.

광경화성 3D 프린팅 레진의 출력각도에 따른 굽힘강도, 굽힘 탄성계수, 파절에너지 등의 굽힘 특성 결과는 Fig. 2~4에 나타내었다. 본 연구에서 FS는 90° 그룹에서 84.65 MPa로 가장 높았으며, 0° 그룹과는 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$). 또한 FM은 90° 그룹에서 가장 높았으며 0°, 45° 순으로 높았다. Shim 등[21]의 연구결과에서 의치상용 3D 프린팅 레진의 굽힘강도는 90°에서 가장 높은 결과를 나타내었다. 이는 본 연구와 일치하는 경향을 보였지만 SLA 방식과 출력 조건, 시편 크기 등은 고려되어야 한다. 또한 Tahayeri 등[22]의 연구에서는 90°에서 높은 굽힘강도와 굽힘 탄성계수를 보였다. 하지만, Unkovskiy 등[23]은 90°에서 낮은 굽힘 특성을 보고하고 있으며, surgical guide 3D 프린팅 레진과 의치상용 3D 프린팅 레진은 90°에서 가장 낮은 굽힘강도와 굽힘 탄성계수를 보고하고 있다. 물론 surgical guide 3D 프린팅 레진과 출력방식이 SLA 타입으로 그 조건이 상이하다. 하지만 광경화성 레진의 출력각도의 적층 방향의 동일한 조건으로 볼 때 결과들을 무시할 수는 없다. 본 연구에서 사용된 광경화성 3D 프린팅 레진은 치과용으로 보철물의 용도 등에 따라 출력각도 선정에 주의를 기울여야 할 것으로 생각된다. 45° 그룹에서 굽힘강도는 74.58 MPa로 가장 낮았다. Shim 등[21]은 45° 그룹에서 낮은 굽힘강도를 보였으며, 이는 출력 시 사선 형태의 계단식 적층 구조로 인한 모서리 사이의 결함으로 인해 발생할 수 있다고 하였다.

3D 프린팅 레진이 파절될 때 하중에 의해 흡수한 에너지를 나타내는 파절에너지는 0° 그룹에서 가장 높았으며, 90° 그룹과 통계적으로 유의한 차이는 보이지 않았다($p < 0.05$). 또한 45° 그룹에서 가장 낮은 파절 에너지를 보였다. 광경화성 3D 프린팅 레진처럼 유연한(flexible) 소재는 응력-변형을 관계에서 곡선에 가까운 양상을 보이는 것으로 생각된다[24].

Figure 6. Error rate of (A) width and (B) thickness by printing orientations. The columns connected by bars were significantly different. The star indicate significantly different by groups ($p < 0.05$).

굽힘강도값의 분산을 통한 3D 프린팅 레진의 신뢰성을 와이블 분석법을 적용하여 평가하였다. 시편에 내재하는 결함의 정도에 따른 치과용 레진의 신뢰성 평가가 이루어져 왔다[10,25]. 기울기가 클수록 와이블 계수가 높고, 재료의 신뢰성은 우수하다. 3D 프린팅 레진 출력 시 결함의 여부에 따라 신뢰성은 달라질 수 있다. 본 연구에서 굽힘강도에 의한 3D 프린팅 레진의 신뢰성을 나타내는 와이블 계수는 0° 그룹에서 가장 높았으며, 45°에서 가장 낮았다. 0° 그룹에서의 높은 신뢰성은 DLP 출력 방식에서 적층 두께에 따른 출력 소요 시간과 우수한 굽힘강도와 굽힘 탄성계수를 고려할 때 임상적으로 추천될 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 3D 프린팅 레진에 대한 신뢰성의 평가지표로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

광경화성 3D 프린팅 레진의 출력 시 크기 정확도는 0° 그룹에서 폭과 두께 모두 우수한 정확성을 보였으며, 45°와 90° 그룹에서는 13% 이상 높은 부정확도(error rate)를 보였다. Tahayeri 등[22]은 폭과 두께의 경우 45°와 90°에서 15% 이상의 높은 부정확도를 보였으며, 본 연구와 일치하였다. 그리고 Shim 등[21]은 출력각도에 따른 폭, 두께, 길이 모두 6% 이상의 낮은 정확도를 보였지만, 본 연구에서는 0° 출력 시 폭과 두께에서 우수한 정확도를 나타내었다. 이는 출력각도가 크기 정확도에 영향을 미치므로 변연 적합도에 따른 보철물의 수명 예측과 정밀 수복물의 품질 향상을 위해서도 중요하게 고려하여야 할 것으로 생각된다.

그러므로 본 연구는 3D 프린팅 레진의 출력각도에 따른 굽힘강도, 굽힘 탄성계수, 파절에너지 등의 굽힘 특성을 평가하고, 와이블 계수를 통한 신뢰성 분석과 크기의 정확도를 평가함으로 광경화성 3D 프린팅 레진의 임상 적용 시 유용한 정보를 제공하기 때문에 실험적 의의가 크다고 할 수 있다.

CONCLUSIONS

본 연구에서 광경화성 3D 프린팅 레진을 이용하여 출력각도에 따른 굽힘 특성 및 출력 시 크기변화를 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 광경화성 3D 프린팅 레진의 굽힘강도와 굽힘 탄성계수는 90° 그룹에서 가장 높았으며, 45° 그룹에서 가장 낮았다.
2. 파절에너지는 0° 그룹에서 가장 높았으며, 90° 그룹에서 가장 낮았다. 통계적으로 0° 그룹과 45° 그룹 사이에 유의한 차이를 보였다($p<0.05$).
3. 출력 크기의 정확도는 0° 그룹에서 폭과 두께 모두 우수하였다. 45° 그룹과 90° 그룹은 모두 13% 이상의 부정확도를 보였다.
4. 와이블 계수는 0° 그룹에서 가장 높았으며 45°, 90° 그룹과 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p<0.05$).

따라서 DLP 방식의 광경화성 3D 프린팅 레진 출력에 의한 수복물을 제작할 경우 굽힘 특성과 신뢰성을 고려한 종합적 평가가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 우수한 굽힘 특성과 신뢰성이 높은 0° 그룹에서의

출력을 권장한다.

CONFLICT OF INTEREST

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

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 단국대학교 이해형 교수의 많은 도움을 받았으며 이에 감사드립니다.

ORCID

Yong-Woon Im, <https://orcid.org/0000-0002-9312-746X>

Doo-Bin Song, <https://orcid.org/0000-0003-0298-7673>

Seong-Sig Hwang, <https://orcid.org/0000-0003-1716-2594>

Sa-Hak Kim, <https://orcid.org/0000-0002-5893-6413>

Man-So Han, <https://orcid.org/0000-0001-9852-2162>

REFERENCES

1. Berman B. 3-D printing: the new industrial revolution. *Bus Horiz.* 2012;55:155-162.
2. Kattadiyil MT, AlHelal A. An update on computer-engineered complete dentures: a systematic review on clinical outcomes. *J Prosthet Dent.* 2017;117:478-485.
3. Abduo J, Lyons K, Bennamoun M. Trends in computer-aided manufacturing in prosthodontics: a review of the available streams. *Int J Dent.* 2014;2014:783948.
4. Al Mardini M, Ercoli C, Graser GN. A technique to produce a mirror-image wax pattern of an ear using rapid prototyping technology. *J Prosthet Dent.* 2005;94:195-198.
5. Sykes LM, Parrott AM, Owen CP, Snaddon DR. Applications of rapid prototyping technology in maxillofacial prosthetics. *Int J Prosthodont.* 2004;17:454-459.
6. Subburaj K, Nair C, Rajesh S, Meshram SM, Ravi B. Rapid development of auricular prosthesis using CAD and rapid prototyping technologies. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2007;36:938-943.
7. Anestiev LA, Froyen L. Model of the primary rearrangement processes at liquid phase sintering and selective laser sintering due to biparticle interactions. *J Appl Phys.*

- 1999;86:4008-4017.
8. Hwa LC, Rajoo S, Noor AM, Ahmad N, Uday MB. Recent advances in 3D printing of porous ceramics: a review. *Curr Opin Solid State Mater Sci*. 2017;21:323-347.
9. Im YW, Jun SK, Kim SC, Kim DA, Kim GR, Kim NS, et al. Standardized test methods for mechanical properties of dental prosthetic/restorative materials and their applications. *Korean J Dent Mater*. 2015;42:259-270.
10. Im YW, Hwang SS. Evaluation of flexural properties of indirect Gum-shade composite resin for esthetic improvement. *J Dent Hyg Sci*. 2015;15:407-412.
11. Wu D, Zhao Z, Zhang Q, Qi HJ, Fang D. Mechanics of shape distortion of DLP 3D printed structures during UV post-curing. *Soft Matter*. 2019;15:6151-6159.
12. Puebla K, Arcaute K, Quintana R, Wicker RB. Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography. *Rapid Prototyp J*. 2012;18:374-388.
13. Bhattacharjee N, Urrios A, Kang S, Folch A. The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics. *Lab Chip*. 2016;16:1720-1742.
14. Urrios A, Parra-Cabrera C, Bhattacharjee N, Gonzalez-Suarez AM, Rigat-Brugarolas LG, Nallapatti U, et al. 3D-printing of transparent bio-microfluidic devices in PEG-DA. *Lab Chip*. 2016;16:2287-2294.
15. International Organization for Standardization. ISO 20795-1: 2008 dentistry- base polymers- part 1: denture base polymers. Geneva: ISO, 2008.
16. International Organization for Standardization. ISO 4049: 2000 dentistry- polymer-based filling, restorative and luting materials. 3rd ed. Geneva: ISO, 2000. p. 15-17.
17. Jun SK, Kim DA, Goo HJ, Lee HH. Investigation of the correlation between the different mechanical properties of resin composites. *Dent Mater J*. 2013;32:48-57.
18. Moszner N, Salz U. New developments of polymeric dental composites. *Prog Polym Sci*. 2001;26:535-576.
19. Chandramohan D, Marimuthu K. Rapid prototyping/rapid tooling- a over view and its applications in orthopaedics. *Int J Adv Eng Technol*. 2011;2:435-448.
20. Park DR, Bae JM. Mechanical properties and biocompatibility of experimental 3D printing denture base resin. *Korean J Dent Mater*. 2019;46:253-262.
21. Shim JS, Kim JE, Jeong SH, Choi YJ, Ryu JJ. Printing accuracy, mechanical properties, surface characteristics, and microbial adhesion of 3D-printed resins with various printing orientations. *J Prosthet Dent*. 2020;124:468-475.
22. Tahayeri A, Morgan M, Fugolin AP, Bompolaki D, Athirasala A, Pfeifer CS, et al. 3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. *Dent Mater*. 2018;34:192-200.
23. Unkovskiy A, Bui PH, Schille C, Geis-Gerstorfer J, Huettig F, Spintzyk S. Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin. *Dent Mater*. 2018;34:e324-e333.
24. Lee HH, Lee JH, Yang TH, Kim YJ, Kim SC, Kim GR, et al. Evaluation of the flexural mechanical properties of various thermoplastic denture base polymers. *Dent Mater J*. 2018;37:950-956.
25. Rodrigues SA Jr, Ferracane JL, Della Bona A. Flexural strength and Weibull analysis of a microhybrid and a nanofill composite evaluated by 3- and 4-point bending tests. *Dent Mater*. 2008;24:426-431.