

디지털 광원 처리 프린터로 제작된 임시수복용 레진의 후경화 기계에 따른 굴곡강도 연구

박영대, 강 월

대구보건대학교 치기공과

Comparative analysis of the flexural strength of provisional restorative resins using a digital light processing printer according to the post-curing method

Young-Dae Park, Wol Kang

Department of Dental Laboratory, Daegu Health College, Daegu, Korea

Article Info

Received October 30, 2020

Revised November 28, 2020

Accepted December 16, 2020

Corresponding Author

Wol Kang

Department of Dental Laboratory, Daegu Health College, 15 Yeongsong-ro, Buk-gu, Daegu 41453, Korea

E-mail: kw0411@dhc.ac.kr

https://orcid.org/0000-0002-1175-8170

Purpose: This study aimed to evaluate the effect of post-curing method on the flexural strength of provisional restorative resins produced by a digital light processing printer.

Methods: A total of 20 specimens were produced, with a length of 64 mm, width of 10 mm, and thickness of 3.3 mm using a digital light processing printer. Two types of provisional restorative resins made with different post-curing methods were investigated and divided into conventional and vacuum groups. For the flexural strength test, each group was prepared by each method according to ISO 10477, and the flexural strength was measured with a universal testing machine. For statistical analysis, data were analyzed by independent t-test and Mann-Whitney U test.

Results: The flexural strengths of the conventional and vacuum groups were 151.89 MPa and 131.94 MPa, respectively, showing a statistically significant difference ($p < 0.05$).

Conclusion: Within the limitation of this study, provisional restorative resins produced with vacuum demonstrated lower flexural strength than those produced with conventional post-curing method.

Key Words: Printing, Resins, Synthetic, Three-dimensional

INTRODUCTION

삼차원(three-dimensional, 3D) 프린터란 설계 데이터에 따라 목재, 금속, 고무 및 바이오, 액체, 합성수지 등의 재료를 적층 방식(layer-by-layer)으로 쌓아올려 입체물을 제조하는 기계이다[1]. 3D 프린터는 제조 방식에 따라 세계적으로 널리 통용되는 미국 ASTM F2792-12a를 기반으로 광중합 방식, 재료압출 방식, 접착제분사 방식, 재료분사 방식, 고에너지 직접조사 방식, 분말적층용 방식 및 sheet lamination 방식으로 총 7가지로 분류하고 있으며 이 기준은 국제 표준인 ISO TC261에서도 채택하고 있다[2].

치과산업에서는 주로 광중합 방식의 3D 프린터가 많이 사용되고 있으며 그중에서 stereo lithography apparatus (SLA)와 digital light

processing (DLP) 프린터가 임시수복용 레진을 제작하는데 많이 사용되고 있다[3]. SLA와 DLP 프린터 모두 고해상도의 자외선(ultraviolet, UV) (360~410 nm) 광을 광경화성 수지(protopolymer resin)에 투사하여 형상을 제작하는 방식이며 정밀도가 50~100 μm 로 우수하다. 특히, SLA 프린터는 출력모델의 크기와 수에 따라 제작시간이 늘어나는 반면 DLP 프린터의 경우 출력 제품의 높이가 같을 경우 출력시간이 일정하기 때문에 속도가 빠르다는 장점으로 치과기공 산업에서 사용이 증가하고 있다[4].

DLP 프린터는 구강 스캐너나 모델 스캐너로 파일을 취득한 후 전용의 디자인 프로그램을 이용하여 디자인을 한다. 디자인이 완료된 파일은 슬라이서 프로그램을 거쳐 액상의 수지에 자외선 빛을 면(surface) 단위로 조사하여 출력하게 된다. 출력 후에는 후경화와 후처리 과정을

거쳐야 비로소 임시수복용 레진으로 사용할 수 있다[5].

임시수복용 레진은 치아의 정출이나 경사를 방지하는 역할을 하며 최종보철물이 장착될 때까지 삭제된 치아의 치수를 보호하는 역할을 한다[6]. 임시 수복물의 사용기간은 일반적으로 일주일 내외이지만 임플란트의 경우 사용기간이 짧게는 2개월, 길게는 6~7개월까지 증가되고 있는 추세이다[6]. 최근에는 이러한 임플란트 시술이 보편화되고 증가하면서 임시수복물의 사용빈도 역시 증가하였다. 따라서 임시수복용 레진에 점차 높은 파절강도와 굴곡강도가 요구되고 있다[5].

레진의 강도를 향상시키기 위한 방법으로는 가압 또는 진공을 통하여 기포를 제거하거나 질소 또는 물속에서 중합을 함으로써 표면의 oxygen inhibition layer가 형성되지 않게 함으로써 중합률을 높이는 방법이 있다고 보고하였다[7]. 강도를 측정하는 척도 중에서 수복물의 내구성을 가장 잘 평가할 수 있는 것은 굴곡강도이다. 다른 말로는 굽힘강도라 칭하며 실험하고자 하는 시편에 수직으로 하중을 가하여 시편이 파괴되기 전까지 견딜 수 있는 하중을 측정하는 방법이다[8].

DLP 프린터의 후경화는 대부분 광중합을 이용하는데 광중합은 적절한 파장대의 광에 의해서 생성된 라디칼에 의해 개시되어 반응이 진행된다[9]. 후경화 방법에 주로 사용되는 기술로는 UV, 질소 환경에서 사용하는 flashlight, light-emitting diode (LED), 진공 환경에서 사용하는 LED 등이 있다[10]. 이러한 후경화 방법 대부분은 온도나 광조사량 또는 광의 세기를 이용해 강도를 향상시키는 방법으로 현재까지 이루어진 후경화에 대한 연구로는 후경화에 따른 수축률 및 적합도, 강도, 세포독성에 관한 연구가 있다[11,12]. 그러나 DLP 프린터로 제작된 임시수복용 레진의 후경화 시 중합조건에 따른 강도를 비교한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 DLP 프린터로 제작된 임시수복용 레진의 UV 경화기계의 진공 유무에 따른 임시수복용 레진의 굴곡강도를 비교·평가해보고자 한다.



Figure 1. MP100 post-curing machine.

MATERIALS AND METHODS

1. 시편 제작

본 연구는 국제표준규격인 ISO 10477:2004 (Dentistry—polymer based crown and bridge materials) 기준에 의거하여 총 20개의 막대모양 시편을 제작하였다[13]. 시편 제작을 위하여 Fusion 360 (Autodesk, Mill Valley, CA, USA) 프로그램을 이용하여 가로 64 ± 0.2 mm, 세로 10 ± 0.2 mm, 두께 3.3 ± 0.2 mm 크기의 시편을 디자인 한 후 STL 파일로 변환하였다.

디자인이 완료된 STL 파일은 슬라이서 프로그램(ZENITH S/W; Dentis, Daegu, Korea)에서 한 개의 시편만 정렬하여 적층두께는 100 μ m로 설정하였다. 그리고 ZD200 DLP 프린터(ZD200; Dentis)에 전용의 레진용액(ZMD-1000B TEMPORARY; Dentis)을 사용하여 총 20개를 출력하였다. 출력이 완료된 시편은 Isopropyl alcohol (IPA) 용액(isopropyl alcohol cleaner; RS PRO, Kwai Chung, Hong Kong)에서 약 30초간 여분의 레진을 세척하고 초음파 세척기(SD-100H; Seongdong ultrasonic cleaner, Daejeon, Korea)를 이용하여 IPA 용액 내에서 1분간 추가 세척하였다. 세척이 완료된 시편은 로우 스피드로 지지대를 제거하고 규정된 시편 크기 및 평평한 표면을 위해 320 grit의 연마지를 이용하여 표면을 연마하였다.

제작이 완료된 시편은 물로 세척하고 건조시킨 후 두 가지 후경화기를 이용하여 최종경화를 진행하였다. 첫 번째는 출력대가 9 W인 UV 램프(MP100; Meong Moon Dental, Daegu, Korea)를 사용하여 파장대는 365~405 nm로 설정해 10분간 최종경화를 진행하였다(Fig. 1). 두 번째는 출력대가 12 W인 UV 램프(V cure; Yeonggyeong Sangsa, Yongin, Korea)를 사용하여 파장대는 365~405 nm로 설정하고 진공은 80 KPa 미만으로 하여 10분간 최종경화를 진행해(Fig. 2) 총 20개의 시편을 제작하였다(Fig. 3).

시편의 두께는 0.02 mm 단위로 측정이 가능한 vernier calipers (KOIKO, Guangzhou, China)를 이용하여 두께를 측정하였다. 시편은 세 부분으로 나눈 후 각 부분의 중간 지점을 무작위로 측정한 뒤 세



Figure 2. V cure post-curing machine.



Figure 3. Two types of specimens made with different post-curing.

부분 값의 평균을 계산하였다.

2. 굴곡강도 측정

굴곡강도를 측정하기 전에 시편은 37°C의 증류수에 24시간 보관한 후 진행하였다. 3점 굴곡강도 시험용 지그가 장착된 universal testing machine (Instron 5942; Instron, Norwood, MA, USA)의 지지대에 시편을 위치시킨 후 하중속도를 1 mm/minute으로 설정하여 90° 각도로 시편이 파절될 때까지 하중을 가하였다(Fig. 4). 이 때 지지대 사이의 거리는 20.0 mm로 설정하였으며, 시편에 가해지는 최대 하중(단위: N)을 측정하여 아래의 공식에 대입한 후 3점 굴곡강도(MPa)를 계산하였다.

굴곡강도 측정 후 시편에 파절이나 크랙이 발생한 양상을 관찰하였다.

$$\sigma = 3FI/2bh^2$$

σ : 굴곡강도(MPa), F: maximum applied load (단위: N), l: 지지대 사이의 거리(단위: mm), b: 시편의 폭(단위: mm), h: 시편의 높이(단위: mm)

3. 통계분석

수집된 자료는 통계 분석 소프트웨어(IBM SPSS Statistics 22.0; IBM, Armonk, NY, USA)를 이용하여 분석하였으며 자료 처리를 위해 사용한 통계분석 방법은 다음과 같다. 시편의 두께가 일관성을 가지는지 알아보기 위하여 진공이 들어간 후경화 기계와 진공이 들어가지 않은 후경화 기계로 중합시킨 두 그룹을 Shapiro-Wilk로 정규성을 검정한 후 정규성 값이 유의확률인 0.05보다 작게 나타나 비모수 통계방법인 Mann-Whitney U test를 실시하였다. 굴곡강도에 따른 그룹 간 비교를 위해 Shapiro-Wilk로 정규성을 검정한 후, 독립표본 t-test를 실시하였다.

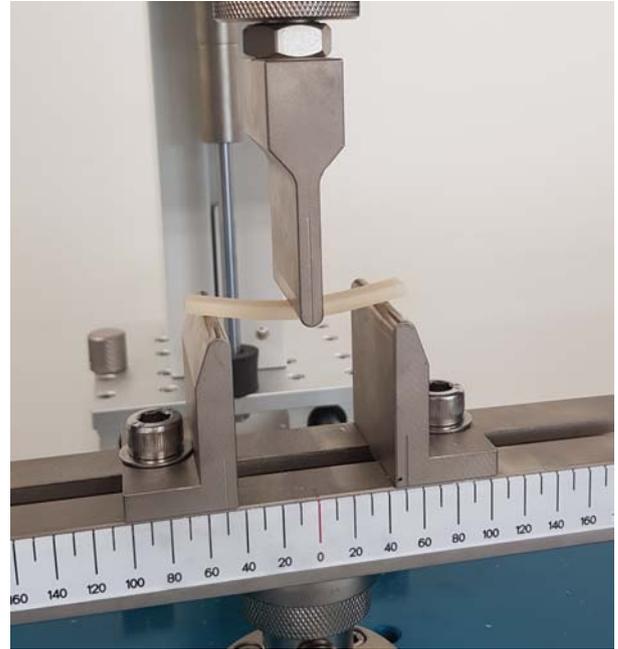


Figure 4. Universal testing machine.

Table 1. Mean of specimens thickness (unit: mm)

No.	No vacuum	Vacuum
1	3.34	3.20
2	3.34	3.34
3	3.34	3.34
4	3.32	3.38
5	3.20	3.36
6	3.30	3.36
7	3.38	3.38
8	3.26	3.36
9	3.22	3.32
10	3.30	3.34
Maen (SD)	3.30 (0.06)	3.34 (0.05)

SD: standard deviation.

RESULTS

1. 시편의 두께

진공이 들어간 후경화 방법과 진공이 들어가지 않은 후경화 방법으로 중합시킨 임시수복용 레진 두께의 정규분포를 확인하기 위해 Shapiro-Wilk 검정한 결과, 유의확률이 0.001보다 작게 나타나 정규성은 가정되지 못하였다. 따라서 시편의 두께가 일관성을 가지는지 알아보기 위하여 진공이 들어간 후경화 방법과 진공이 들어가지 않은 후경화 방법으로 중합시킨 임시수복용 레진의 두께를 Mann-Whitney U test를 이용하여 두 군에 차이가 있는지 비교하였다(Table 1). 비교 결과, 유의확률은 0.059로 나와 유의수준 0.05보다 크므로 시편의 평균 두께 사이에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

2. 굴곡강도

실험 후 굴곡강도의 평균값과 표준편차는 Fig. 5, Table 2와 같았다. 진공이 들어가지 않은 후경화 기계로 중합시킨 임시수복용 레진의 굴곡강도 값의 평균은 151.89 MPa로 진공이 들어간 후경화 기계로 중합시킨 임시수복용 레진의 평균 굴곡강도 값인 131.94 MPa보다 높게 나타났다. 진공을 가하지 않은 임시수복용 레진의 굴곡강도 최소값은 143.36 MPa, 최대값은 163.63 MPa로 나타났으며 진공을 가한 군은 최소값이 112.48 MPa, 최대값은 144.87 MPa로 나타났다. 진공이 들어간 후경화 기계와 진공이 들어가지 않은 후경화 기계로 중합시킨 임시수복용 레진의 굴곡강도가 정규분포를 나타내는지 확인하기 위해 시행한 Shapiro-Wilk 검정의 결과, 유의확률이 0.27로 유의수준 0.05보다 크므로 정규성은 가정되었다. 두 군의 굴곡강도에 평균에 차이가 있는지 알아보기 위해서 독립표본 t-test를 실시한 결과 유의확률은 0.001보다 작게 나타나 유의수준 0.05보다 작으므로 굴곡강도의 평균에는 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

3. 시편 파절 단면

시편의 파절된 단면을 살펴보면 진공을 가하지 않은 그룹은 진공을 가한 그룹보다 단면에 균열이 상대적으로 많이 일어나 있는 것을 볼 수 있다. 또한 진공을 가한 그룹은 파절 단면이 진공을 가하지 않은 그룹보다 매끈한 것을 확인할 수 있다(Fig. 6, 7).

DISCUSSION

3D 프린터 관련 특허가 만료됨에 따라 치과용 DLP 프린터가 급속

히 발전되고 개량되고 있다[14,15]. DLP 프린터로 레진 수복물을 제작하는 방법은 전통적인 방법에 비해 제작 시간을 단축시킬 수 있고 납형 제작을 생략할 수 있는 데다가 최종 보철물의 제작 시 기존 파일을 사용할 수 있다는 장점 때문에 전통적인 방법을 대체하는 수단으로 각광 받고 있다[16]. 따라서 DLP 프린터로 제작한 임시수복용 레진의 물리적 특성에 대한 연구가 필요한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 진공이 들어간 후경화 기계와 진공이 들어가지 않은 후경화 기계로 중합시킨 임시수복용 레진의 굴곡강도를 비교하고자 한다.

ISO 10477에서 제시하고 있는 레진의 굴곡강도는 최소 50 MPa 이상이 나와야 한다[13]. 적층 가공법으로 제작한 임시 수복물의 물리적 특성을 평가한 선행연구에서 100 μm 의 적층두께가 가장 높은 강도를 가졌다는 연구를 참고해서 본 연구에서도 적층 두께를 100 μm 로 설정하였다[17]. 두 군의 굴곡강도 평균값은 151.89 MPa, 131.94 MPa로 나타나 최소 굴곡강도 값을 충족하는 것으로 나타났다. 다른 제조사의

Table 2. Fracture strength values of tested group (unit: MPa)

No.	No vacuum	Vacuum
1	150.81	128.31
2	143.36	144.87
3	150.93	138.30
4	148.67	134.28
5	153.77	129.60
6	152.79	139.54
7	157.33	112.48
8	163.63	136.00
9	146.87	114.23
10	150.78	141.75
Maen (SD)	151.89 (5.61)	131.94 (11.03)

SD: standard deviation.

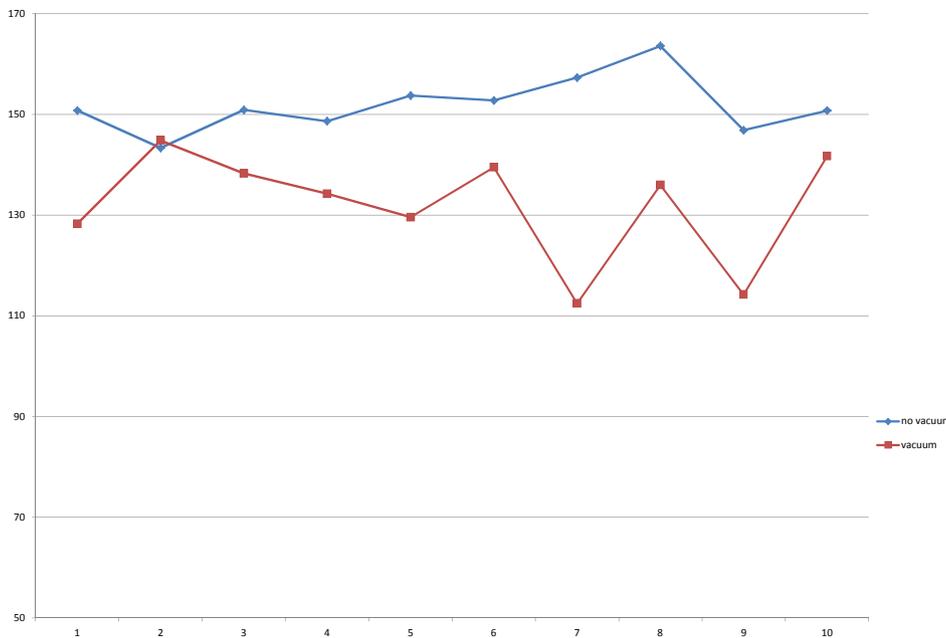


Figure 5. Fracture strength values of tested group (unit: MPa).

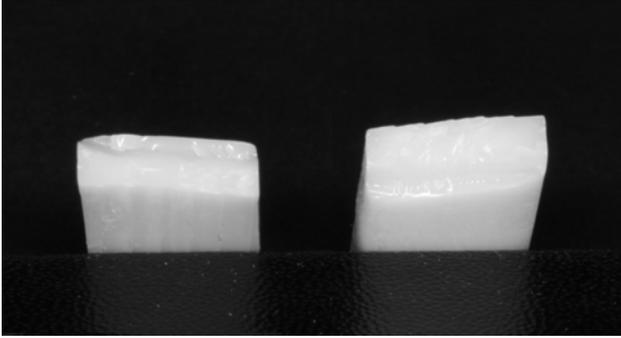


Figure 6. Fracture cross section of a specimen manufactured by conventional methods.

DLP 프린터를 사용하고 후경화를 15분 동안 진행했던 임시수복용 레진의 굴곡강도가 114~129 MPa 나왔던 것과 비슷한 결과를 보여주었다[18].

임시 수복용 레진의 물리적 강도는 재료의 고유한 물성뿐만 아니라 실험조건에 따라서도 달라진다. 즉, 미세구조 이외에도 제작과정과 실험환경 및 파괴기전 등이 함께 고려되어야 할 때 물리적 강도가 가지는 값이 의미가 있을 것이다[19]. 본 연구에서는 진공을 가한 임시수복용 레진이 진공을 가하지 않은 그룹보다 굴곡강도가 낮게 나타났다. 이러한 결과는 진공의 세기와 관련이 있을 것으로 생각된다. Che 등[20]은 진공이 낮을수록 가교된 사슬이 길어진다고 보고하였고, Wang 등[21]은 가교된 긴 사슬들로 인해 박리강도 증가한다고 하였다. 본 연구에서 사용한 진공은 제조회사에서 권장하는 80 KPa 미만이었지만 Che 등[20]의 연구에서 사용한 진공은 20 KPa 미만이었다. 이러한 이유로 중합체 내에 미반응 단량체가 남았을 것으로 생각된다. Pearson과 Longman [22]도 단량체가 복합체로 불완전 전환될 때 강도가 증가한다고 보고하였다. 진공을 가한 임시수복용 레진은 진공의 세기로 인해 진공을 가하지 않은 임시수복용 레진에 비해 상대적으로 많은 양의 미반응 단량체를 남기게 된 것으로 보인다. 이러한 미반응 단량체 내의 탄소 이중결합은 분해반응에 민감하게 작용함으로써 파괴인성이 낮아진 것으로 생각된다. 선행연구에서도 중합률이 낮은 레진은 중합률이 높은 레진에 비해 상대적으로 많은 양의 미반응 단량체가 남게 되었다고 보고했다[23]. 이러한 미반응 단량체는 레진의 강도에 영향을 미치게 된다[24]. 파괴인성이 낮은 재료가 파괴인성이 높은 재료에 비해 변연 파괴 및 마모저항성이 취약했다는 선행연구를 살펴볼 때, 본 연구에서 진공을 가한 임시수복용 레진의 파괴인성지수가 낮아짐으로써 균열을 견디지 못한 것 보인다[25-27].

진공을 가하지 않은 임시수복용 레진의 굴곡강도 표준편차는 5.61 MPa, 진공을 가한 임시수복용 레진은 11.03 MPa로 나타나 진공을 가하지 않은 군보다 2배 정도 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 진공을 가한 임시수복용 레진의 중합이 안정적으로 이루어 지지 못하고 있다는 것을 짐작할 수 있다. 또한 일부 시편 파절 단면을 살펴봤을

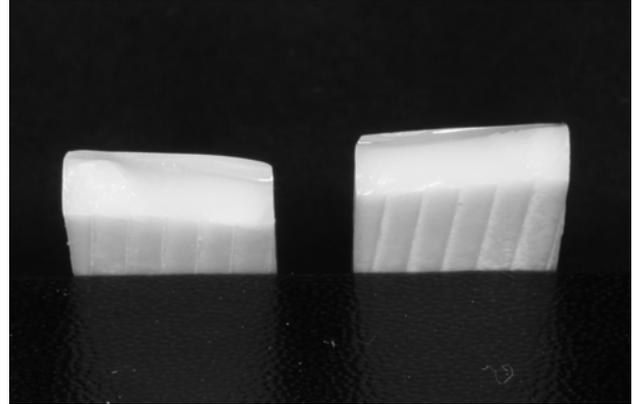


Figure 7. Fracture cross section of a specimen manufactured by vacuum method.

때, 진공을 가한 그룹의 표면이 진공을 가하지 않은 그룹의 표면보다 균열이 덜 발생하고 매끄러운 것으로 보아 이 또한 중합이 충분하지 못했다는 것을 유추할 수 있는 증거가 된다(Fig. 6, 7).

DLP 프린터로 제작한 임시수복용 레진의 물리적 성질은 레진 내 존재하는 모든 성분들의 상호작용의 결과로 나타나며 제작 환경을 통제할 조건하에서 단량체 시스템은 레진의 연구 결과에 영향을 미친다. 후경화 방법의 개발을 통해 미반응 단량체의 양을 줄일 수 있다면 DLP 프린터로 제작한 임시수복용 레진의 물리적 성질을 증가시킬 것으로 최종적으로 수복물의 수명을 연장할 수 있을 것이다[28]. 본 연구에서는 후경화 시 진공을 가한 시편의 굴곡강도 값이 상대적으로 적은 값을 나타냈지만 이를 일반화하기에는 한계가 있어 보인다. 또한 제조회사마다 다른 후경화기의 파장 세기가 연구 결과에 영향을 미칠 수도 있음을 배제할 수 없다. 따라서 추후 연구에서는 최적의 경화조건을 위해 진공의 세기를 심층적으로 분석할 필요가 있을 것이다. 본 연구는 이러한 연구의 일환으로 의의가 있다고 볼 수 있다.

CONCLUSIONS

본 연구는 DLP 프린터로 출력한 임시수복용 레진을 후경화 시 진공 유무에 따른 굴곡강도를 평가하였다. 후경화 방법에 따른 굴곡강도를 측정하고 비교함으로써 임시수복용 레진의 개발에 참고 자료로써 제시하고자 했다. 연구 결과에서는 진공을 가한 임시수복용 레진이 진공을 가하지 않은 임시 수복용 레진보다 굴곡강도 값이 낮게 나타났다. 이는 미반응 단량체의 양과 관계가 있을 것으로 풀이된다. 따라서 임상에서 DLP 프린터로 임시수복용 레진을 제작할 시 굴곡강도를 높이기 위해서 진공을 사용할 경우 방법에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

CONFLICT OF INTEREST

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

ORCID

Young-Dae Park, <https://orcid.org/0000-0002-7130-9799>

Wol Kang, <https://orcid.org/0000-0002-1175-8170>

REFERENCES

1. Park SA. Protecting copyright by utilizing 3D printers-regarding the private use of work [master's thesis]. Seoul: Konkuk University, 2014.
2. Pei E. Standardisation efforts of ISO/TC 261 "Additive Manufacturing": Reports from 14th and 15th Plenary Meeting. *Prog Addit Manuf.* 2020;5:317-318.
3. Lee S. Prospect for 3D printing technology in medical, dental, and pediatric dental field. *J Korean Acad Pediatr Dent.* 2016;43:93-108.
4. Hazeveld A, Huddleston Slater JJ, Ren Y. Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2014;145:108-115.
5. Cho WT, Choi JW. Comparison analysis of fracture load and flexural strength of provisional restorative resins fabricated by different methods. *J Korean Acad Prosthodont.* 2019;57:225-231.
6. Park JS, Park MG. Effect of aging treatment on the flexural properties of polymer provisional restoration materials. *Korean J Dent Mater.* 2013;40:215-221.
7. Geum YH. Effect of polymerization methods on the flexural strength of indirect composite resin [master's thesis]. Busan: Catholic University of Pusan, 2013.
8. Kim DY, Park JY, Kang HW, Kim JH, Kim WC. Flexural strength of composite resin fabricated by various polymerization method. *J Korean Acad Dent Technol.* 2018;40:57-62.
9. Do HS, Kim SE, Kim HJ. Application of UV-curable materials: 2. photopolymerization kinetics. *J Adhes Interface.* 2004;5:23-28.
10. Reymus M, Lümekemann N, Stawarczyk B. 3D-printed material for temporary restorations: impact of print layer thickness and post-curing method on degree of conversion. *Int J Comput Dent.* 2019;22:231-237.
11. Shin DH, Park SM, Park SH. Correlation between UV-dose and shrinkage amounts of post-curing process for precise fabrication of dental model using DLP 3D printer. *J Korean Soc Manuf Process Eng.* 2018;17:47-53.
12. Kang SY. Effect of Post-curing on accuracy, strength, and cytotoxicity in 3D printed denture resin [master's thesis]. Seoul: Korea University, 2020.
13. International Organization for Standardization (ISO). ISO 10477:2004 Dentistry- polymer-based crown and bridge materials. Geneva: ISO, 2004.
14. Kang HD. Analysis of furniture design cases using 3D printing technique. *J Korea Contents Assoc.* 2015;15:177-186.
15. Kwon DH. Study on 3D printer suitable for character merchandise production training. *Cartoon Animat Stud.* 2015;41:455-486.
16. Mörmann WH, Brandestini M, Lutz F, Barbakow F. Chair-side computer-aided direct ceramic inlays. *Quintessence Int.* 1989;20:329-339.
17. 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.
18. Park SJ, Lee HA, Lee SH, Seok S, Lim BS, Kwon JS, et al. Comparison of physical properties of the various 3D printing temporary crown and bridge resin. *Korean J Dent Mater.* 2019;46:139-152.
19. Kelly JR. Perspectives on strength. *Dent Mater.* 1995;11:103-110.
20. Che J, Luan B, Yang X, Lu L, Wang X. Graft polymerization onto nano-sized SiO₂ surface and its application to the modification of PBT. *Mater Lett.* 2005;59:1603-1609.
21. Wang HS, Lee SH, Bu SH, Kim HD, Song KG. Effects of chemical structure of additives on adhesive property of photo-curable acrylate resin. *Polymer(Korea).* 2019;43:879-888.
22. Pearson GJ, Longman CM. Water sorption and solubility of resin-based materials following inadequate polymerization by a visible-light curing system. *J Oral Rehabil.* 1989;16:57-61.

23. Cho SK, Kim DJ, Hwang YC, Oh WM, Hwang IN. Surface hardness of the dental composite cured by light that penetrate tooth structure according to thickness of tooth structure, light intensity and curing time. *J Korean Acad Conserv Dent.* 2005;30:128-137.
24. Asmussen E. Restorative resins: hardness and strength vs. quantity of remaining double bonds. *Scand J Dent Res.* 1982;90:484-489.
25. Tyas MJ. Correlation between fracture properties and clinical performance of composite resins in Class IV cavities. *Aust Dent J.* 1990;35:46-49.
26. Mazer RB, Leinfelder KF, Russell CM. Degradation of microfilled posterior composite. *Dent Mater.* 1992;8:185-189.
27. Knibbs PJ, Smart ER. The clinical performance of a posterior composite resin restorative material, Heliomolar R.O.: 3-year report. *J Oral Rehabil.* 1992;19:231-237.
28. Peutzfeldt A. Resin composites in dentistry: the monomer systems. *Eur J Oral Sci.* 1997;105:97-116.