https://doi.org/10.14368/jdras.2026.42.3.222
ISSN 2384-4353 eISSN 2384-4272

Original Article

Effect of layer thickness on the flexural strength of digital light processing-printed provisional restorative resin

Ji-yeon Hong[1], Seon-Ki Lee[1,2]*
[1]Department of Prosthodontics, College of Dentistry, Wonkwang University, Iksan, Republic of Korea
[2]Wonkwang Dental Research Institute, College of Dentistry, Wonkwang University, Iksan, Republic of Korea

Purpose: This study aimed to investigate the effect of layer thickness on the flexural strength of provisional restoration resin fabricated using digital light processing (DLP) 3D printing and to compare it with self-curing polymethyl methacrylate (PMMA) provisional resin. **Materials and Methods:** Provisional 3D- printing resin specimens were fabricated using a DLP printer with three different layer thicknesses: 50, 100, and 150 μm. A self-curing PMMA resin group was used as the control. A total of 40 bar-shaped specimens were prepared, with 10 specimens in each group. Flexural strength was determined by means of a three-point bending test. The measured values were statistically analyzed using one-way analysis of variance, followed by Tukey's post hoc test. **Results:** The self-curing PMMA resin group showed the lowest flexural strength, and all 3D-printed groups exhibited significantly higher flexural strength than the PMMA group ($P < 0.001$). Among the 3D-printed groups, the highest flexural strength was observed in the 50 μm group, followed by the 100 and 150 μm groups. In particular, the 50 μm group demonstrated significantly higher flexural strength than the 150 μm group ($P = 0.017$). **Conclusion:** The DLP fabricated provisional 3D-printing resin showed higher flexural strength than the self-curing PMMA resin. In the 3D-printed groups, flexural strength tended to increase as the layer thickness decreased. Therefore, layer thickness should be considered an important printing parameter affecting the mechanical properties, including the flexural strength, of provisional 3D-printed resin. **(J Dent Rehabil Appl Sci 2026;42(3):222-30)**

Key words: temporary dental restoration; three-dimensional printing; flexural strength; acrylic resins; dental materials

서론

고정성 보철치료에서 임시 수복물은 최종 보철물이 장착되기 전까지 삭제된 치아와 주변 연조직을 보호하고, 심미성 및 저작 기능을 유지하며, 교합 상태와 치은 형태를 평가하는 데 중요한 역할을 한다.[1,2] 임시 수복물은 단기간 사용을 전제로 하더라도 우수한 변연 적합성, 표면 안정성, 심미성, 생체친화성 뿐 아니라 구강 내 기능 하중을 견딜 수 있는 충분한 기계적 물성을 갖추어야 한다.[1,3] 특히 임플란트 수복이나 전악 보철치료와 같이 임시 수복물의 사용 기간이 장기화되는 경우에는 재료의 물성 확보가 더욱 중요해진다.[1,3,4] 실제 임상에서는 지대치 삭제량과 교합 간격에 따라 임시 수복물의 두께가 다양하게 형성되기 때문에, 장기간 안정적인 기능을 유지하기 위해서는 충분한 굴곡강도의 확보가 필요하다고 보고되어 있다.[5] 임시 수복 재료의 기계적 성질 중 굴곡강도는 특히 중요한 평가 지표로, 3점 굴곡시험은 저작력과 측방력 등 구강 내에서 발생하는 복합적인 응력 환경을 간접적으로 반영하는 방법으로 널리 사용되고 있다.[3,6]

기존의 임시 수복물은 자가중합형 또는 광중합형 레진을 이용한 직접법이나 간접법으로 제작되어 왔다.[1,4] 그러나 이러한 전통적인 방법은 술자 숙련도에 따라 차이가

*Correspondence to: Seon-Ki Lee
Assistant Professor, Department of Prosthodontics, Daejeon Dental Hospital, Wonkwang University, 77 Doonsan-ro, Seo-gu, Daejeon, 35233, Republic of Korea
Tel: +82-42-366-1169, Fax: +82-42-366-1115, E-mail: sunki517@hanmail.net
Received: June 18, 2026/Last Revision: July 9, 2026/Accepted: July 14, 2026

Copyright© 2026 The Korean Academy of Stomatognathic Function and Occlusion.
©It is identical to Creative Commons Non-Commercial License.

발생하며, 중합 과정에서 발생하는 발열 및 기포 형성 등의 문제가 나타날 수 있다.[1,4] 또한 표면 거칠기 증가와 재료 물성의 불균일성과 같은 한계를 나타낼 수 있다.[1,4] 이를 보완하기 위해 CAD/CAM (Computer-aided design/computer-aided manufacturing) 기술을 이용한 절삭가공 방식이 도입되었으며, 재현성과 표준화 측면에서 기존 방법에 비해 개선된 결과를 보여주었다.[7,8] 그러나 절삭가공 방식은 재료 손실이 크고, 복잡한 내면 구조의 재현에 한계가 있으며, 공구 마모에 따라 정확도가 저하될 수 있다는 단점이 지적되어 왔다.[7,8] 최근에는 이러한 제한점을 극복하는 대안으로 적층 가공 방식인 3D 프린팅이 보철 영역에서 빠르게 확산되고 있으며, 임시 수복물의 제작에도 널리 적용되고 있다.[7,9,10]

치과용 3D 프린팅에는 stereolithography apparatus (SLA), digital light processing (DLP), liquid crystal display (LCD) 등 다양한 방식이 사용되고 있으며, 임시 수복물 제작에는 주로 SLA와 DLP 방식이 활용된다.[9,10] DLP 방식은 광원을 이용하여 한 층(layer) 전체를 동시에 중합시키는 방식으로, 높은 정밀도와 빠른 제작 속도를 장점으로 하여 임시 수복물 제작에 널리 이용되고 있다.[5,9] 3D 프린팅 임시 수복물은 재료 소모가 적고 복잡한 구조의 재현이 용이하며 디지털 워크플로우와의 연계가 편리하다는 장점이 있다.[7,9,10] 또한 굴곡강도, 탄성계수, 경도, 표면 거칠기, 색 안정성 등을 평가한 체계적 문헌고찰에서도 임시 수복물 제작에 적용 가능한 수준의 물성이라고 보고되었다.[10] 다만 동일한 재료라 하더라도 프린터 종류, 레진 조성, 레이어 두께, 출력 방향, 후중합 조건 등에 따라 물성이 달라질 수 있어 이에 대한 평가와 해석이 필요하다.[7,10,11]

3D 프린팅 재료의 물성은 레이어 두께, 출력 방향, 적층 각도, 후세척 및 후중합 조건 등 다양한 출력 매개변수에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다.[7,10-12] 이 중에서도 레이어 두께는 임상적으로 비교적 쉽게 조절할 수 있으면서 제작 시간과 기계적 성질 모두에 영향을 미치는 중요한 인자이다.[11,12] 레이어 두께가 얇아지면 층간 간격이 줄어들고 보다 균일한 구조가 형성되어 우수한 기계적 성질을 나타낼 가능성이 있는 반면에, 두꺼워지면 출력 시간은 단축되지만 층간 결합의 불균일성이나 적층 계면의 결함이 증가하여 물성이 저하될 가능성이 있다.[11,12]

현재까지의 선행연구는 주로 재료 간 기계적 성질을 비교하는데 초점을 두고 있으며, 레이어 두께, 출력 방향, 후중합 조건과 같은 출력 매개변수가 기계적 성질에 미치는 영향에 대한 체계적인 분석은 상대적으로 제한적이다.[7,10,11] 특히 임시 수복용 DLP 3D 프린팅 레진에서 레이어 두께 변화가 굴곡강도에 미치는 영향을 직접 비교한 연구는 아직 미흡하다.[11,12] 따라서 본 연구의 목적은 서로 다른 레이어 두께(50, 100, 150 μm)로 제작한 임시 수복용 DLP 3D 프린팅 레진 시편과 자가중합형 PMMA (polymethyl methacrylate) 레진 시편의 굴곡강도를 비교함으로써, 레이어 두께 및 제작 방식이 임시 수복물의 기계적 특성에 미치는 영향을 평가하고 임상적으로 적절한 출력 조건 설정을 위한 기초자료를 제공하는데 있다.[5,11,12] 본 연구의 귀무가설은 레이어 두께에 따른 임시 수복용 DLP 3D 프린팅 레진의 굴곡강도에는 유의한 차이가 없으며, 자가중합형 PMMA 레진과도 차이가 없다는 것이다.

연구 재료 및 방법

본 연구에서는 임시 수복용 광중합성 3D 프린팅 레진(C&B, ODS, Incheon, Korea, shade: A2, lot No.: OCB01250808-131)을 사용하여 시편을 제작하였다. 시편은 digital light processing (DLP) 방식의 3D 프린터(SEGA PRO 3D Printer, DentaFab, Istanbul, Turkey)를 이용하여 출력하였으며, 설정한 레이어 두께에 따라 50 μm군, 100 μm군, 150 μm군의 3개 실험군으로 분류하였다. 대조군은 기존의 전통적인 방식으로 제작한 자가중합형 PMMA 레진군(CON군)으로 설정하였다(Table 1).

시편 설계 및 제작

시편은 굴곡강도 측정을 위하여 국제표준규격 ISO 10477에 따라 바 형태로 설계하였으며, 크기는 길이(length) 25 mm, 폭(width) 2 mm, 높이(thickness) 2 mm로 하였다(Fig. 1).[5,6] 각 실험군 당 무작위로 10개씩 선별하여 총 40개의 시편을 준비하였다. 표본수의 적정성은 G*Power software (ver. 3.1.9.7; Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Germany)을 이용한 sensitivity power analysis로 검토하였다. 본 연구의 표본수는 전체 4군 간 비교에서 효과크기 f = 0.55 이상의 차이를 검출할 수 있는 수준으로 판단하였다.

시편의 설계는 CAD (computer-aided design) software를 이용하여 수행한 후 stereolithography (STL) 파

Table 1. Materials of provisional restoration resin

Group	Fabrication method	Product name	Type	Manufacturer	N
CON	Conventional (self-curing)	Tokuso CureFast	Polymethyl methacrylates	Tokuyama Dental Corp., Tokyo, Japan	10
50 μm	Additive manufacturing (DLP)	C&B temporary	Light-curing acrylic based composite	ODS, Incheon, Korea	10
100 μm	Additive manufacturing (DLP)	C&B temporary	Light-curing acrylic based composite	ODS, Incheon, Korea	10
150 μm	Additive manufacturing (DLP)	C&B temporary	Light-curing acrylic based composite	ODS, Incheon, Korea	10

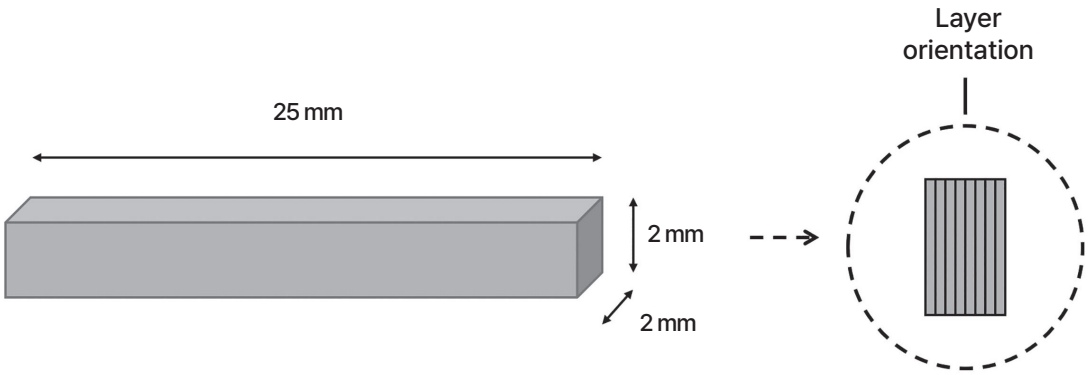

Fig. 1. Schematic illustration of the bar-shaped specimen and printing orientation. The specimen dimensions were 25 mm × 2 mm × 2 mm.

일 형식으로 저장하였다. STL 파일은 전용 슬라이싱 소프트웨어(Blueprint Studio)를 이용하여 출력용 파일로 변환하였으며, 모든 시편은 출력 과정에서 안정적인 적층을 위해 모든 시편에 동일한 조건으로 support를 부여하여 제작하였다. 각 레이어 두께군의 출력 조건은 제조사 권장값에 따라 설정하였으며, exposure time은 2초, 광원은 385 nm DLP projector를 사용하였고, XY resolution은 62.5 μm였다. 출력방향은 build platform 기준 0°로 설정하여 DLP 3D 프린터로 출력한 뒤, 90% isopropyl alcohol (IPA)에 5분간 세척하여 미중합 레진을 제거하고 자외선 광중합기(UV cure, UDENT, Daegu, Korea)에서 14분간 최종 후중합을 시행하였다. 본 연구에서는 레이어 두께 외의 다른 출력 변수가 결과에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 시편의 형상, 출력 방향, 후처리 조건 및 저장 조건을 모든 군에서 동일하게 통제하였다.

대조군인 CON군은 자가중합형 PMMA 임시 수복용 레진(Tokuso CureFast, Tokuyama Dental Corp, Tokyo, Japan)의 액과 분말을 제조사의 권장 비율인 1 : 2로 15초간 혼합하여 실리콘 몰드에 주입한 뒤 유리판으로 압접해 중합을 진행하였다. 레진이 완전히 중합된 후 몰드에서 분리하여 여분의 flash를 제거하고, #600 grit 사포를 이용하여 finishing을 시행한 뒤 시편의 최종 크기를 디지털 캘리퍼로 확인하였다.

모든 시편은 초음파 세척기(SD-251H, Mujigae Co. Ltd, Seoul, Korea)에 20분간 증류수를 담아 세척 후 37°C 증류수에서 24시간 보관하였다(Fig. 2).

굴곡강도 측정

굴곡강도는 만능재료시험기(universal testing machine, UTM)을 이용한 3점 굽힘시험(three-point bending test)으로 측정하였다. 시편은 두 개의 지지대 위에 위치시켰으며, 지지대 간 거리는 20 mm로 설정하였다. 하중은 시편 중앙부에 가하였으며, crosshead speed는 1 mm/min으로 설정하여 시편이 파절될 때까지 연속적으로 하중을 가하였다(Fig. 3). 파절 시점의 최대 하중(maximum load)

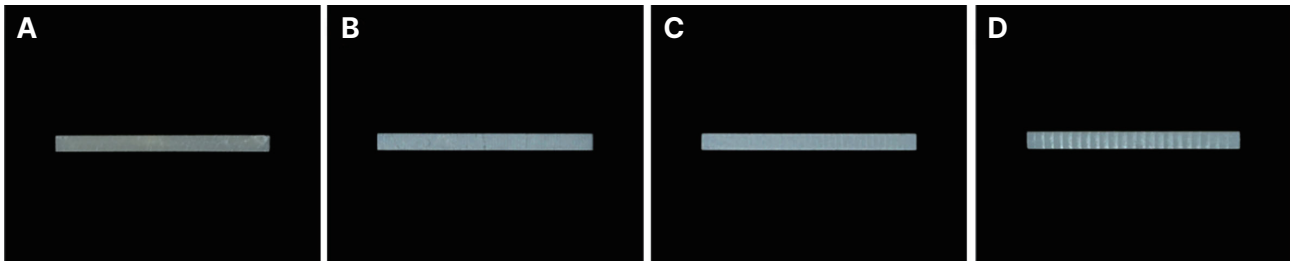

Fig. 2. Representative images of the bar-shpaed specimens prepared for the flexural strength test. (A) PMMA group, (B) 50 μm group, (C) 100 μm group, (D) 150 μm group.

을 기록한 후, 다음 식에 따라 굴곡강도(flexural strength, MPa)를 계산하였다.

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

σ: 굴곡강도(MPa)
F: 파절 시의 최대 하중(N)
l: 지지대 간 거리, span length (mm)
b: 시편의 폭(mm)
h: 시편의 두께(mm)

통계 분석

통계 분석은 SPSS 통계 소프트웨어(IBM SPSS Statistics for Windows, version 32.; IBM Corp., Armonk, USA)를 사용하여 시행하였다. 각 군(CON, 50 μm, 100 μm, 150 μm)의 굴곡강도 측정값은 평균 ± 표준편차로 제시하였다. 군간 굴곡강도의 차이를 비교하기 위하여 일원분산분석(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)을 시행하였으며, 사후검정(post hoc test)은 Tukey's honestly significant difference(HSD) test를 이용하였다. 모든 통계분석의 유의수준(α)은 0.05로 설정하였다.

결과

자가중합형 PMMA 레진을 이용하여 제작한 대조군(CON)의 굴곡강도는 평균 73.03 ± 9.40 MPa로 가장 낮았으며, 모든 3D 프린팅군과 비교하여 통계적으로 유의하게 낮은 값을 나타냈다($P < 0.001$). 3D 프린팅 군에서 50 μm군이 평균 124.72 ± 12.49 MPa로 가장 높은 굴곡강도를 보였으며, 100 μm군은 평균 116.77 ± 12.83 MPa, 150 μm군은 109.59 ± 7.31 MPa로 나타났다(Table 2). Levene의 등분산 검정 결과, 각 군의 분산은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않아 등분산성 가정이 충족되었다($P = 0.835$). 이에 따라 일원배치 분산분석을 시행한 결과, 군 간 굴곡강도 차이는 통계적으로 유의하였다($F = 45.182$, $P < 0.001$). Tukey HSD 사후검정 결과, PMMA군은 모든 3D 프린팅군과 유의한 차이를 나타냈

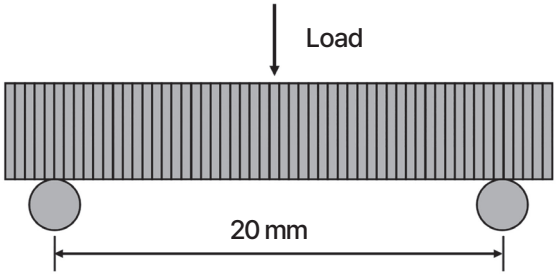

Fig. 3. Schematic illustration of the three-point bending test setup. A load was applied at the center of the specimen with a support span of 20 mm.

Table 2. Mean values and standard deviations of flexural strength in experimental groups (unit: MPa)

Group	Flexural strength		
	N	Mean	SD
CON	10	73.03	9.39
50 μm	10	124.72	12.48
100 μm	10	116.77	12.83
150 μm	10	109.59	7.31

SD: Standard deviation.

다($P < 0.001$). 한편 50 μm군은 100 μm군과 통계적으로 유의한 차이가 없었으며($P = 0.363$), 150 μm군은 50 μm군보다 통계적으로 유의하게 낮은 굴곡강도를 나타냈다($P = 0.017$). 100 μm군과 150 μm군 사이에도 유의한 차이가 존재하지 않았다($P = 0.452$). 반면 50 μm군은 150 μm군보다 유의하게 높은 굴곡강도를 보였다($P = 0.017$) (Fig. 4).

고찰

본 연구에서는 자가중합형 PMMA군(CON)과 서로 다른 레이어 두께(50, 100, 150 μm)로 제작한 DLP 방식의 임시 수복용 3D 프린팅 레진의 굴곡강도를 비교하였다. 그 결과 3D 프린팅 레진으로 제작한 모든 군이 PMMA군보다 높은 굴곡강도를 나타냈으며, PMMA군과 각 3D 프린팅 군 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다. 또한 3D 프린팅군 내에서는 50 μm군이 가장 높은 평균 굴곡강도 값을 나타낸 반면 150 μm군이 가장 낮은 값을 보였다. 사후검정 결과 50 μm군과 150 μm군 사이에서만 통계적으로 유의한 차이가 확인되었고, 50 μm군과 100 μm군, 100 μm군과 150 μm군 사이에서는 유의한 차이가 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 DLP 방식으로 제작한 임시 수복용 3D 프린팅 레진이 기존의 자가중합형 PMMA 레진 보다 우수한 굴곡강도를 나타낼 수 있으며, 레이어 두께가 3D 프린팅 임시 수복용 레진의 기계적 성질에 영향을 미칠 수 있는 출력 변수 중 하나일 가능성을 시사한다.[3,7,10]

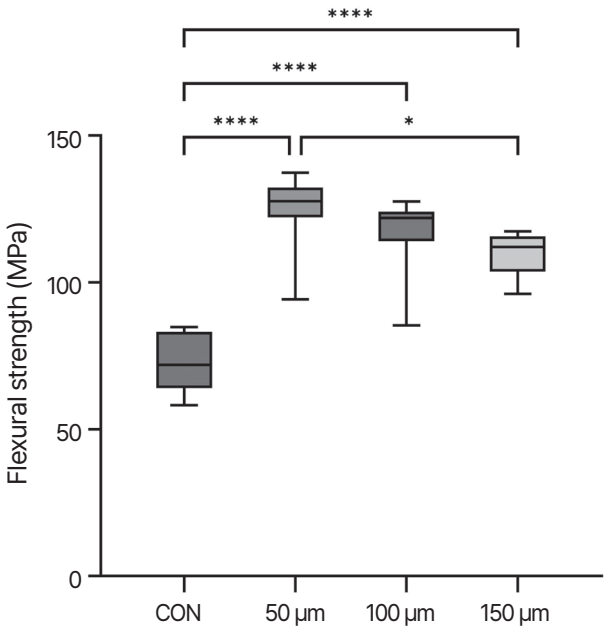

Fig. 4. Flexural strength (MPa) of the PMMA group and the 3D-printed provisional resin groups with different layer thickness. Bars represent mean values, and error bars indicated the minimum and maximum values. Asterisk (*) indicates statistically significant difference between the groups (* $P < 0.05$, **** $P < 0.0001$).

본 연구에서 PMMA군이 가장 낮은 굴곡강도를 나타낸 것은 자가중합형 PMMA의 재료적 특성과 관련이 있는 것으로 생각된다. 자가중합형 PMMA는 혼합 및 중합 과정에서 술자의 조작, 분말과 액의 혼합 상태, 중합 수축, 내부 기포 형성 등에 영향을 받을 수 있으며, 이러한 요인들은 재료 내부의 균질성과 기계적 성질에 영향을 미칠 수 있다고 보고되어 있다.[3,4] 반면 3D 프린팅용 광중합 레진은 층별 광중합과 후중합 과정을 통해 보다 균질한 구조를 형성할 수 있으므로 자가 중합 PMMA군보다 더 높은 굴곡강도를 나타냈을 가능성이 있다.[7,9,10]

3D 프린팅군 중에서는 50 μm군이 가장 높은 평균 굴곡강도를 보였으며, 150 μm군은 50 μm군보다 유의하게 낮은 굴곡강도를 나타냈다. 이러한 결과는 레이어 두께가 3D 프린팅 레진의 기계적 성질에 영향을 미칠 수 있다고 보고한 기존 연구들과 유사한 경향을 보인다.[9,11-13] DLP 방식의 3D 프린팅에서는 액상 레진층에 조사된 광에 의해 중합 반응이 일어나며, 레이어 두께, 광 조사 조건, 후중합 조건 등 다양한 출력 및 후처리 매개변수가 최종 물성에 영향을 줄 수 있다.[11,12,14] 선행 연구에서는 레이어 두께가 얇을수록 광중합 효율, 중합도, 층간 결합 특성 등이 달라질 수 있고, 이러한 요인들이 굴곡강도와 관련될 가능성이 있다고 보고하였다.[9,11-14] 또한 적층가공 재료는 층상 구조를 가지므로, 각 층의 중합 상태와 층간 계면 특성은 굴곡하중 하에서의 파절 거동에 영향을 줄 수 있다.[9,14,15]

그러나 본 연구에서는 중합도, 잔류 단량체, 내부 공극, 미세 결함 및 층간 결합 특성을 직접 측정하지 않았으므로, 50 μm군에서 관찰된 높은 평균 굴곡강도를 이러한 미세구조적 요인만으로 단정하여 설명하기에는 한계가 있다. 일반적으로 중합도와 잔류 단량체, 내부 결함 및 층간 계면의 특성은 광중합 레진의 기계적 성질과 관련될 수 있으나, 본 연구에서는 이러한 요인들을 분석 대상으로 포함하지 않았다. 따라서 본 연구 결과는 레이어 두께 변화에 따른 굴곡강도 차이를 보여주는 결과로 제한하여 해석해야 하며, 50 μm군의 높은 평균값은 얇은 레

이어 조건에서 기계적 성질이 향상될 수 있다는 가능성을 시사하는 수준으로 이해하는 것이 적절하다.

100 μm군은 50 μm군보다 평균 굴곡강도는 낮았으나 통계적으로 유의한 차이는 없었고, 150 μm군보다 평균 굴곡강도는 높았으나 역시 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 이러한 결과는 100 μm가 본 연구 조건에서 50 μm와 150 μm 사이의 중간적인 평균 값을 보이는 조건으로 해석될 수 있다. 특히 본 연구에 사용된 3D 프린팅 레진의 제조사 권장 레이어 두께가 100 μm라는 점을 고려하면, 100 μm는 재료의 안정적인 출력 조건과 제작 효율성을 함께 고려한 조건일 가능성이 있다. 실제 임상 및 기공 과정에서는 단순히 가장 높은 기계적 성질만을 기준으로 출력 조건을 결정하기보다, 재현성 있는 출력 품질과 제작 시간, 작업 편의성까지 함께 고려하게 된다. 이러한 점에서 100 μm는 본 연구 조건에서 50 μm군과 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않으면서도 제조사 권장 조건에 해당하므로, 초기 굴곡강도와 제작 효율성 사이의 균형을 고려할 때 실용적인 출력 조건으로 평가될 수 있다. 다만 본 연구는 단순 제작 후 초기 굴곡강도만을 평가하였으므로, 100 μm 조건의 장기적 임상 안정성까지 직접적으로 판단하기에는 제한이 있다.

본 연구에서 100 μm를 기준 레이어 두께 조건으로 설정한 것은 제조사 권장값이자 실제 임상 및 기공 과정에서 보편적으로 적용 가능한 조건이기 때문이다. 그러나 본 연구의 목적은 권장 조건 하나의 성능만을 확인하는 데 있지 않고, 레이어 두께 변화가 굴곡강도에 미치는 영향을 평가하는 데 있었으므로, 100 μm를 중심으로 보다 얇은 50 μm와 보다 두꺼운 150 μm를 함께 비교하였다. 이러한 실험 설계는 실제로 사용 가능한 권장 조건을 기준으로 레이어 두께 변화가 초기 기계적 성질에 미치는 영향을 평가하고, DLP 방식의 임시 수복용 3D 프린팅 레진 제작 시 출력 조건 설정을 위한 기초자료를 제공하는 데 의의가 있다.[9,11,13]

본 연구 결과는 레이어 두께가 감소할수록 더 높은 굴곡강도를 나타낼 수 있다고 보고한 일부 선행 연구와 유사한 경향을 보인다. AlRumaih 등[13]은 25 μm 및 50 μm 조건이 100 μm보다 더 높은 굴곡강도를 보였다고 하였고, Gad 등[16]도 50 μm와 75 μm가 100 μm보다 유의하게 높은 값을 나타낸다고 보고하였다. 이러한 결과는 본 연구에서 50 μm군이 가장 높은 평균 굴곡강도를 보인 결과와 부분적으로 일치한다. 반면 모든 선행연구가 본 연구와 동일한 결과를 보인 것은 아니다. Alshamrani 등[11]은 100 μm가 25 μm와 50 μm보다 더 높은 굴곡강도를 나타냈다고 보고하였다. 이러한 상반된 결과는 사용된 프린터 종류, 레진 조성, 출력 방향, 후중합 방법, 저장 조건, 열순환 여부 및 시편 형상 차이에서 기인할 수 있다.[9,11,14,17] 따라서 레이어 두께가 기계적 성질에 미치는 영향을 일반화하기보다는, 사용된 재료와 출력 시스템의 특성을 함께 고려하여 해석할 필요가 있을 것으로 생각된다.

또한 3D 프린팅 재료는 레이어 두께 뿐만 아니라 출력 방향과 하중 방향의 관계에 의해서도 영향을 받을 수 있다.[6,18] 적층가공 재료는 층층이 쌓여 형성되는 구조적 특성상, 재료 내부가 균질한 등방성 구조를 보이기보다 방향에 따라 물성이 달라질 수 있는 이방성 재료의 특성을 나타낼 수 있다.[9,19] 특히 레이어 방향과 하중 방향의 관계는 굴곡시험 결과에 영향을 미칠 수 있으며, 굴곡 시 발생하는 인장응력이 층간 계면에 작용하는 방식에 따라 파절 양상이 달라질 수 있다. 하중 방향에 대해 수직으로 설정하는 경우, 굴곡 시 발생하는 인장응력이 층간 계면에 보다 직접적으로 작용하게 되어 적층 구조의 취약성과 층간 결합의 영향을 더 민감하게 평가할 수 있다.[6,15,18] 즉, 수직 조건은 재료 자체의 강도 뿐 아니라 층간 결합이 기계적 성질에 미치는 영향을 확인하기 위한 상대적으로 불리한 조건으로 이해할 수 있다.[6,15] 실제 임상 환경에서는 교합하중이 항상 레이어에 유리한 방향으로만 작용하는 것이 아니므로, 수직 조건에서의 평가는 적층가공 재료가 불리한 하중 조건에서 어느 정도의 기계적 안정성을 유지할 수 있는지를 확인한다는 점에서도 의미가 있다.[6,18]

임상적인 관점에서 관찰하자면, 본 연구 결과는 3D 프린팅 임시 수복용 레진이 자가중합 PMMA보다 우수한 굴곡강도를 나타낼 수 있음을 보여준다. 그러나 본 연구는 열순환, 장기 수중 보관, 반복 피로하중과 같은 aging 과정을 포함하지 않은 단순 제작 후 굴곡강도에 대한 평가이므로, 장기간의 임상 사용이나 교합하중이 큰 부위에서의 안정성을 직접적으로 예측하기에는 한계가 있다. 또한 50 μm군이 가장 높은 평균 굴곡강도를 보였으나 100 μm군과 유의한 차이를 보이지 않았다는 점, 그리고 제조사 권장 레이어 두께가 100 μm라는 점을 함께 고려하면, 임시수복용 3D 프린팅 레진의 출력조건은 굴곡강도뿐 아니라 출력 시간, 제작 효율성 등을 함께 고려하여 선택할 필요가 있다.[9,11,13] 반면 150 μm는 출력 시간 단축이라는 장점 있을 수 있으나, 본 연구에서는 50 μm군

보다 유의하게 낮은 굴곡강도를 나타내어 기계적 안정성 측면에서는 신중한 선택이 필요할 것으로 생각된다.

본 연구는 단일 종류의 3D 프린터와 단일 종류의 임시 수복용 레진 만을 사용하였고, 출력 방향과 후중합 조건을 고정한 상태에서 레이어 두께만을 변수로 하여 비교하였다는 점에서 한계가 있다. 또한 국제표준규격에 따른 바(bar) 형태의 시편을 사용하였으므로 실제 임시 치관이나 임시 고정성 보철물의 형상과 응력 분포를 완전히 반영하지 못한다. Aging 및 출력 방향이 기계적 성질에 영향을 미칠 수 있다는 선행 연구를 고려할 때,[15,17] 향후에는 다양한 재료 및 장비를 대상으로 여러 변수의 상호작용을 분석하고, 실제 임시 수복물 형상에서의 파절 저항성 및 장기적인 안정성을 평가하는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.[15,17,19]

결론

본 연구는 DLP 방식의 3D 임시 수복용 레진에서 레이어 두께(50, 100, 150 μm)가 굴곡강도에 미치는 영향을 평가하고, 이를 자가중합형 PMMA 레진과 비교하고자 하였다. 본 연구조건에서 50 μm, 100 μm, 150 μm 레이어 두께로 제작한 모든 3D 프린팅 레진군은 자가 중합형 PMMA 레진군보다 유의하게 높은 굴곡강도를 나타냈다. 3D 프린팅 레진군 내에서는 50 μm군이 가장 높은 평균 굴곡강도를 보였고, 150 μm군이 가장 낮은 평균 굴곡강도를 보였으며, 50 μm군과 150 μm군 사이에서만 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다. 따라서 DLP 방식으로 제작한 임시 수복용 3D 프린팅 레진에서 레이어 두께는 굴곡강도에 영향을 미칠 수 있는 출력 변수로 고려될 수 있으나, 본 연구 결과는 단순 제작 후 초기 굴곡강도 평가에 한정되므로 장기 임상적 내구성에 대한 해석은 제한적으로 이루어져야 한다.

Acknowledgements

본 연구는 2025년 원광대학교 교내 연구비 지원에 의해 이루어졌음.

ORCID

Ji-yeon Hong https://orcid.org/0009-0006-4949-8948
Seon-Ki Lee https://orcid.org/0000-0001-9590-9409

References

1. Burns DR, Beck DA, Nelson SK; Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the Academy of Fixed Prosthodontics. A review of selected dental literature on contemporary provisional fixed prosthodontic treatment: Report of the Committee on Research in Fixed Prosthodontics of the Academy of Fixed Prosthodontics. J Prosthet Dent 2003;90:474-97.
2. Christensen GJ. Provisional restorations for fixed prosthodontics. J Am Dent Assoc 1996;127:249-52.
3. Astrudillo-Rubio D, Delgado-Gaete A, Bellot-Arcis C, Montiel-Company JM, Pascual-Moscardo A, Almerich-Silla JM. Mechanical properties of provisional dental materials: A systematic review and meta-analysis. PLoS One 2018;13:e0193162.
4. Patras M, Naka O, Doukoudakes S, Pissiotis A. Management of provisional restorations' deficiencies: A literature review. J Esthet Restor Dent 2012;24:26-38.
5. Kim M, Lee JI. Comparison of flexural strength according to thickness between provisional restorations fabricated by subtractive and additive manufacturing. J Korean Dent Assoc 2022;60:548-55.
6. Derban P, Negrea R, Rominu M, Marsavina L. Influence of the printing angle and load direction on flexure strength in 3D printed materials for provisional dental restorations. Materials, 2021;14:3376.
7. Alzahrani SJ, Hajjaj MS, Azhari AA, Ahmed WM, Yeslam HE, Carvalho RM. Mechanical properties of three-dimensional printed provisional resin materials for crown and fixed dental prosthesis: A systematic review. Bioengineering 2023;10:663.
8. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. Br Dent J 2008;204:505-11.
9. Revilla-Leon M, Özcan M. Additive Manufacturing technologies used for processing polymers: current status and potential application in prosthetic dentistry. J Prosthodont 2018;28:146-58.
10. Jain S, Sayed ME, Shetty M, Alqahtani SM, Al Wadei MHD, Gupta SG, Othman AAA, Alshehri AH, Alqarni H, Mobarki AH, Motlaq K, Bakmani HF,

Zain AA, Hakami AJ, Sheayria MF. Physical and mechanical properties of 3D-printed provisional crowns and fixed dental prosthesis resins compared to CAD/CAM milled and conventional provisional resins: a systematic review and meta-analysis. Polymers 2022;14:2691.

11. Alshamrani AA, Raju R, Ellakwa A. Effect of printing layer thickness and postprinting conditions on the flexural strength and hardness of a 3D-printed resin. Biomed Res Int 2022;2022:8353137.
12. Reymus M, Lumkemann 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: 231-7.
13. AlRumaih HS, Gad MM. The effect of 3D printing layer thickness and post-polymerization time on the flexural strength and hardness of denture base resins. Prosthesis 2024;6:970-8.
14. Hassanpour M, Narongdej P, Alterman N, Moghtadernejad S, Barjasteh E. Effects of post-processing parameters on 3D-printed dental appliances: a review. Polymers 2024;16:2795.
15. KEßLER A, Hickel R, Ilie N. In vitro investigation of the influence of printing direction on the flexural strength, flexural modulus and fractographic analysis of 3D-printed temporary materials. Dent Mater J 2021;40:641-9.
16. Gad MM, Alzaki FA, Abuwarwar FA, Alhammad A, Al Hussain M, Khan SQ, Nassar EA, Ayad NM. Impact of printing layer thickness on the flexural strength of nanocomposite 3D printed resins: An in vitro comparative study. Saudi Dent J 2024;36: 1307-12.
17. Scherer M, Al-Haj Husain N, Barmak AB, Kois JC, Özcan M, Revilla-León M. Influence of the layer thickness on the flexural strength of aged and non-aged additively manufactured interim dental material. J Prosthodont 2023;32:68-73.
18. Alharbi N, Osman R, Wismeijer D. Effects of build direction on the mechanical properties of 3D-printed complete coverage interim dental restorations. J Prosthet Dent 2016;115:760-7.
19. Yıldırım Ö, Yeşil Z, Hatipoğlu Ö. Effect of different 3D-printing systems on the flexural strength of provisional fixed dental prostheses: a systematic review and network meta-analysis on in vitro studies. BMC Oral Health 2025;25:82.

디지털 광원처리 방식으로 제작한 임시 수복용 3D 프린팅 레진의 레이어 두께가 굴곡강도에 미치는 영향

홍지연[1] 전공의, **이선기**[1,2*] 조교수

[1]원광대학교 치과대학 치과보철학교실

[2]원광대학교 치의학 연구소

목적: Digital light processing (DLP) 방식으로 제작한 임시 수복용 3D 프린팅 레진에서 레이어 두께가 굴곡강도에 미치는 영향을 평가하고, 이를 자가중합형 PMMA 임시 수복용 레진과 비교하고자 하였다.

연구 재료 및 방법: 임시 수복용 3D 프린팅 레진을 레이어 두께에 따라 50, 100, 150 μm군으로 구분하여 DLP 방식으로 시편을 제작하였고, 자가중합형 PMMA 레진을 대조군으로 설정하였다. 각 군당 10개씩 총 40개의 바(bar) 형태 시편을 제작하였으며, 3점 굽힘시험(three-point bending test)을 통해 굴곡강도를 측정하였다. 측정된 값은 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 통계 분석하였고, Tukey's test를 이용하여 사후검정을 시행하였다.

결과: 자가중합형 PMMA 레진군이 가장 낮은 굴곡강도를 보였으며, 모든 3D 프린팅군은 PMMA군보다 유의하게 높은 굴곡강도를 나타냈다($P < 0.001$). 3D 프린팅군에서는 50 μm군이 가장 높은 굴곡강도 값을 보였고, 100, 150 μm 순으로 나타났다. 특히 50 μm군은 150 μm군보다 유의하게 높은 굴곡강도를 보였다($P = 0.017$).

결론: DLP 방식으로 제작한 임시 수복용 3D 프린팅 레진은 자가중합형 PMMA 레진보다 높은 굴곡강도를 나타냈다. 또한 3D 프린팅 레진에서는 레이어 두께가 얇을수록 굴곡강도가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 임시 수복용 3D 프린팅 레진 제작 시 레이어 두께는 굴곡강도를 포함한 기계적 성질에 영향을 미치는 중요한 출력 변수로 고려되어야 한다.

(구강회복응용과학지 2026;42(3):222-30)

주요어: 임시 수복물; 3D 프린팅; 굴곡강도; 아크릴계 레진; 치과 재료

*교신저자: 이선기

(35233)대전광역시 서구 둔산로 77 원광대학교 치과대학 대전치과병원 치과보철과

Tel: 042-366-1169 | Fax: 042-366-1115 | E-mail: sunki517@hanmail.net

접수일: 2026년 6월 18일 | 수정일: 2026년 7월 9일 | 채택일: 2026년 7월 14일