https://doi.org/10.14368/jdras.2026.42.3.251
ISSN 2384-4353 eISSN 2384-4272

Original Article

Effects of post-curing irradiance on the degree of conversion and vickers hardness of 3D-printed denture base resin

I-Hwa Yun[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 evaluate the effects of post-curing irradiance on the degree of conversion and Vickers hardness of a 3D-printed denture base resin. **Materials and Methods:** Disc-shaped specimens were fabricated using a photopolymerizing denture base resin. The specimens were classified into a control group without post-curing and groups post-cured at irradiances of 200, 400, 600, and 800 mW/cm^2, with 10 specimens randomly assigned to each group for a total of 50 specimens. Post-curing was performed at 60°C for 14 minutes, with the irradiance varied for each experimental group. The degree of conversion was calculated from the absorbance ratio of the 1636 cm^{-1} and 1532 cm^{-1} peaks using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Vickers hardness was measured by applying a 0.49 N load for 30 seconds. For comparison among groups, one-way analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test as a post hoc test were performed (α = .05). **Results:** The degree of conversion increased progressively with increasing post-curing irradiance, being highest in the 800 mW/cm^2 group and lowest in the control group; however, no significant difference was found between the control and 200 mW/cm^2 groups (P > .05). Vickers hardness was significantly higher in all post-cured groups than in the control group, being highest in the 600 mW/cm^2 group but decreasing again in the 800 mW/cm^2 group (P < .05). **Conclusion:** Post-curing irradiance affected the degree of conversion and Vickers hardness of the 3D-printed denture base resin in different patterns, and the two properties did not reach their maximum values at the same irradiance. This suggests that the post-curing irradiance needs to be optimized according to the material and device. However, as this study evaluated a single resin and post-curing device, further research is needed for generalization. **(J Dent Rehabil Appl Sci 2026;42(3):251-9)**

Key words: 3D printing; denture base resin; post-curing irradiance; degree of conversion; Vickers hardness

서론

의치는 무치악 환자에서 상실된 발음 및 저작 기능, 그리고 심미성을 회복시키기 위해 제작되는 대표적인 치과 보철물이다. 이러한 기능을 장기간 구강 내에서 안정적으로 유지하기 위해서는 의치상이 충분한 기계적 물성과 생물학적 안정성을 모두 확보해야 한다. 열중합형 polymethyl methacrylate (PMMA)를 비롯한 레진계 의치상 재료의 기계적 물성과 생물학적 안정성은 단량체가 중합체로 전환된 비율, 즉 중합률(degree of conversion, DC)에 의해 크게 좌우된다.[1] 중합률이 낮을 경우 미반응 단량체가 의치상 내부에 잔존하여 고분자 기질을 약화시키며, 이로 인해 굴곡강도나 경도 등의 기계적 물성이 저하될 수 있다. 이는 일상적인 기계적 세척 과정에서의 표면 마모를 촉진할 뿐 아니라, 반복적인 저작 하중이나 예기치 않은 충격에 의한 파절의 위험성을 높일 수 있다. 한편 잔류 단량체는 타액을 통해 구강 내로 용출될 수 있으며, 이는 세포독성과 알레르기 반응을 유발하고 임상적으로는 구강 점막의 발적 및 미란, 혀의 작열감 등의 원인이 될 수 있다.[2] 특히 의치상은 구강 점막과 광범위하게

*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: July 14, 2026/Last Revision: August 3, 2026/Accepted: August 5, 2026

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

접촉하고 장기간 사용되는 보철물이므로, 잔류 단량체를 최소화하고 충분한 중합률을 확보하는 것은 재료의 임상적 안정성을 높이는 데 중요한 요소이다.

전통적인 열중합형 PMMA 의치상 레진은 비교적 높은 중합률과 양호한 기계적 물성을 나타낼 수 있으며, 가공이 용이하며 비용이 낮아 오랜 기간 의치상 재료로 널리 사용되어 왔다.[3] 그러나 열중합형 PMMA 의치상은 분말과 액의 혼합부터 매몰, 압축 성형, 열중합, 마무리에 이르기까지 여러 단계의 기공 과정을 거쳐 제작된다. 이러한 전통적인 제작 방식은 많은 시간과 노력을 요구하며, 결과의 재현성이 술자의 숙련도에 크게 영향을 받는 한계가 있다. 또한 각 단계에서 발생하는 기공 오차의 누적과 재료 고유의 중합 수축은 최종 의치상의 치수 정확도와 적합도에 영향을 줄 수 있으며, 이를 완전히 제어하기는 어렵다.

이러한 전통적인 제작 방식의 한계를 보완할 수 있는 대안으로서 computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) 기술이 주목받고 있으며, 의치상 제작에서도 디지털 방식의 적용이 확대되고 있다.[4] CAD/CAM을 통한 보철물 제작은 제작 방식에 따라 절삭 가공(subtractive manufacturing)과 적층 가공(additive manufacturing)으로 구분된다. 절삭 가공 방식은 고온·고압 환경에서 사전 중합된 레진 블록을 밀링하여 보철물을 제작하는 방식으로, 높은 중합률과 우수한 물성을 기대할 수 있다.[5] 그러나 밀링 버에 의해 재현 가능한 형태가 제한되고, 재료 손실이 크다는 한계가 있다.[6] 이에 반해 적층 가공은 디지털 데이터를 기반으로 재료를 층별로 적층하여 3차원 구조물을 제작하는 방식이다. 필요한 부분만을 적층하므로 재료의 소모가 적고, 복잡한 형상의 재현에 유리하고 생산 효율성이 높다.[7] 의치상 제작에 적용할 경우 기공 과정의 단순화와 제작 시간의 단축뿐 아니라 치수 정확도와 재현성의 향상, 그리고 구강 점막에 대한 우수한 적합도 확보가 가능한 것으로 보고되고 있다.[8]

그러나 출력 직후의 3차원 프린팅 레진은 적층 과정에서의 광중합만으로는 중합 반응이 충분히 완료되지 않을 수 있으므로, 잔류 단량체의 추가 중합을 유도하고 안정적인 물성과 생체적합성을 확보하기 위해 후중합(post-curing) 과정이 필수적이다.[9] 후중합은 잔류 단량체의 감소와 고분자 네트워크 형성을 촉진하여, 최종 재료의 기계적 특성과 생물학적 안정성 향상에 기여할 수 있다.[10] 후중합의 효과는 조도(irradiance), 조사 시간, 온도, 파장 및 레진 조성 등 다양한 인자의 복합적인 작용에 의해 결정된다. 이 가운데 조도는 단위 시간 동안 재료에 전달되는 광에너지와 관련되므로, 중합 반응의 진행과 최종 재료의 중합률 및 기계적 특성에 영향을 줄 수 있다.[11] 후중합 효과를 평가한 기존 연구들은 주로 조사 시간이나 온도를 변수로 하였거나, 조도를 다루더라도 임시 수복용 레진 등 다른 재료를 대상으로 한 경우가 많았다. 또한 3차원 프린팅 의치상용 레진을 대상으로 후중합 조도를 독립변수로 설정하고, 중합률과 표면 경도를 함께 평가한 연구는 아직 제한적이다. 이에 본 연구에서는 후중합 조도가 3차원 프린팅 의치상 레진의 중합률과 비커스 경도에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 본 연구의 귀무가설은 후중합 조도에 따라 3차원 프린팅 의치상 레진의 중합률과 비커스 경도에 유의한 차이가 없다는 것이다.

연구 재료 및 방법

시편 제작

시편은 중합률 및 표면 경도 측정을 위해 원판형으로 설계하였으며,[12] CAD 소프트웨어인 SOLIDWORKS (Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, France)와 Meshmixer (Autodesk, San Rafael, USA)를 이용하여 직경 10.0 mm, 높이 3.0 mm의 원판형 시편을 설계한 후 standard tessellation language (STL) 형식으로 저장하였다(Fig. 1). 설계된 파일은 3차원 프린팅 소프트웨어 CHITUBOX (Shenzhen CBD-Tech Co. Ltd., Shenzhen, China)로 전송한 후, 광경화성 의치상 레진(Denture Base, ODS, Incheon, Korea)을 사용하여 제작하였다. 모든 시편의 출력 조건은 제조사 지시에 따라 설정하였으며, 노출 시간은 2초로, 405 nm 파장의 Liquid crystal display (LCD) 방식 3차원 프린터(Phrozen Sonic Mighty Revo 14K, Phrozen Tech Co. Ltd., Hsinchu,

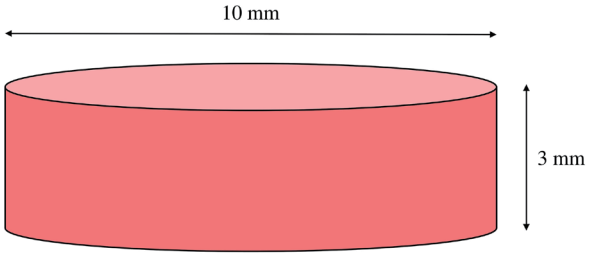

Fig. 1. Design of the final specimens.

Taiwan)를 사용하여 출력하였다. 적층 두께는 50 μm로, 출력 방향은 build plate를 기준으로 0도로 설정하였다. 출력이 완료된 시편은 90% 이소프로필 알코올(isopropyl alcohol)에서 3분간 세척하여 표면의 잔여 레진을 제거하고, 실온에서 충분히 건조하였다. 이후 #400, #800, #1200, #2000 실리콘 카바이드(silicon carbide) 연마지를 이용하여 순차적으로 표면 연마를 시행하였다. 연마 후 초음파 세척기(SD-251H, Mujigae Co. Ltd., Seoul, Korea)를 이용하여 증류수에서 10분간 세척하였다. 세척이 완료된 시편은 후중합을 시행하지 않은 대조군과 후중합을 시행한 4개 실험군으로 무작위 배정하였다. 각 군의 시편 수는 선행 연구를 참고하여 10개로 설정하였으며,[10] 총 50개의 시편을 사용하였다. 실험군은 후술된 조건에 따라 후중합하였고, 모든 군은 37°C 증류수에서 24시간 보관한 후 측정에 사용하였다.

후중합 조건 및 실험군 설계

후중합은 360 - 405 nm 혼합 파장을 사용하는 자외선 후중합기(UV Cure, UDENT, Daegu, Korea)를 이용하여 시행하였다. 후중합 시간은 제조사의 지시에 따라 14분으로, 온도는 60°C로 고정하였으며, 조도는 제조사에서 제시하는 공칭 설정값에 따라 200, 400, 600, 800 mW/cm^{2}의 4개 군으로 구분하였다. 조사 시간을 고정함에 따라, 각 군의 총 방사노출량(total radiant exposure)은 조도에 비례하여 200, 400, 600, 800 mW/cm^{2}군에서 각각 168, 336, 504, 672 J/cm^{2}로 산출되었다. 이러한 조도 조건은 실험에 사용된 레진의 권장 총 방사노출량 범위(244-487 J/cm^2)를 기준으로, 권장량 미만부터 초과 범위까지 단계적으로 포함되도록 설정하였다(Fig. 2).

중합률 측정

중합률은 퓨리에 변환 적외선 분광기(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)(Nicolet iS50, Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA)를 이용하여 측정하였다. 감쇠전반사(attenuated total reflectance, ATR) 모드로 측정을 시행했으며, 각 시편의 스펙트럼은 측정 범위 400 - 4000 cm^{-1}, 분해능 4 cm^{-1} 조건으로 측정하였다. 획득된 스펙트럼은 OMNIC 소프트웨어(Thermo Fisher Scientific)를 이용하여 베이스라인 보정(baseline correction)을 시행하였다. 각 시편에서 10회 반복 스캔하였으며, 측정은 시편의 상부 표면 정중앙에서 시행하였다. 다중 스캔을 통해 무작위 잡음을 감소시켜 신호 대 잡음비를 향상시켰으며, 이를 평균하여 해당 시편의 대표 스펙트럼으로 사용하였다. 중합률 산출을 위한 반응 피크

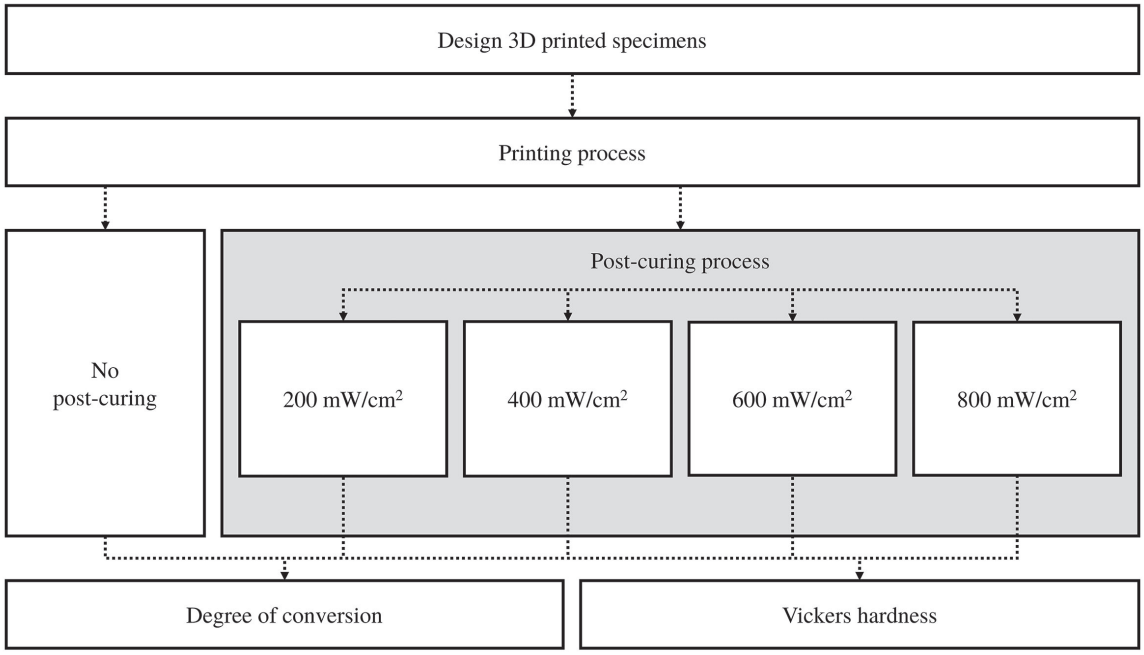

Fig. 2. Workflow of the overall experimental process, showing the post-curing conditions and experiment types.

는 methacrylate의 지방족(aliphatic) C=C 이중결합에 해당하는 1636 cm^{-1}의 흡수 피크로 설정하였고, 기준 피크는 중합 전후 상대적으로 안정적인 흡광도를 보인 1532 cm^{-1} 부근의 피크로 설정하였으며, 이는 urethane amide II band에 해당하는 것으로 판단하였다. 미중합 상태의 액상 레진 스펙트럼을 기준값으로 사용하였으며, 각 피크의 흡광도는 피크 높이(peak height)로 측정하였다. 중합률은 경화 전후의 1636 cm^{-1}와 1532 cm^{-1} 피크 흡광도 비를 이용하여 다음 식에 따라 계산하였다.

$$DC\ (\%) = 100 \times [1 - ((A_{1636}/A_{1532})_{cured} / (A_{1636}/A_{1532})_{uncured})]$$

비커스 경도 측정

비커스 경도는 비커스 경도시험기(VMT-X, Matsuzawa, Akita, Japan)를 이용하여 측정하였다(Fig. 3). 각 시편의 연마된 표면에 0.49 N의 하중을 30초간 가하였으며, 압흔 간 상호 간섭을 방지하기 위해 시편 가장자리에서 약 4 mm, 압흔 간 약 5 mm 간격을 두고 3개 지점에서 측정하였다. 각 압흔의 대각선 길이를 측정하여 비커스 경도(Vickers hardness number, VHN)를 산출하였으며, 각 시편에서 얻은 3회 측정값의 평균을 해당 시편의 대표 VHN 값으로 사용하였다.

통계 분석

수집된 데이터의 통계 분석은 IBM SPSS Statistics 32 (IBM Corp., Armonk, USA)를 이용하여 시행하였다. 데이터의 정규성은 Shapiro-Wilk 검정으로, 등분산성은 Levene 검정으로 확인하였다. 후중합 조도에 따른 각 군 간 중합률과 비커스 경도 각각의 차이를 비교하기 위해 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 시행하였으며, 사후 검정으로 Tukey's honest significant difference (HSD) 검정을 사용하여 신뢰수준 95%에서 각 군 간의 유의성을 확인하였다.

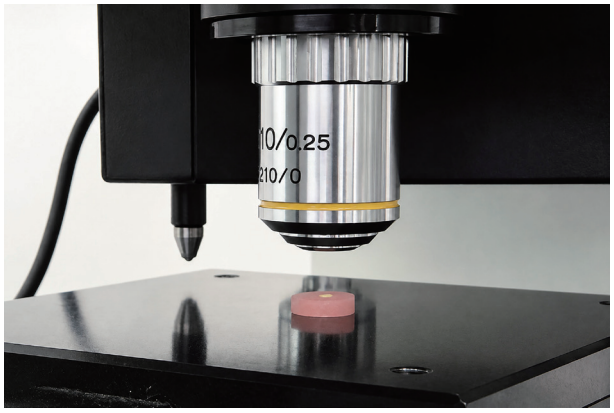

Fig. 3. Representative photograph of Vickers hardness measurement of the 3D-printed denture base resin specimen.

결과

Shapiro-Wilk 검정을 실시한 결과, 모든 군에서 정규성 가정을 만족하였으며($P > .05$), Levene의 등분산성 검정에서도 등분산성이 확인되었다($P > .05$). 이에 따라 일원배치 분산분석을 시행한 결과, 후중합 조도는 중합률($F(4, 45) = 65.888$, $P < .001$)과 비커스 경도($F(4, 45) = 398.917$, $P < .001$)에서 유의한 군 간 차이를 나타냈다. 효과크기(η^2)는 중합률에서 0.854 (95% CI, 0.749 - 0.889), 비커스 경도에서 0.973 (95% CI, 0.952 - 0.979)으로 나타나, 두 변수 모두에서 큰 효과를 보였다.

후중합 조도에 따른 각 군의 중합률 측정 결과는 Table 1과 같다. 중합률은 후중합 조도가 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였으며, 800 mW/cm^2군에서 50.77 ± 2.16%로 가장 높고 미후중합군에서 33.05 ± 3.59%로 가장 낮았다. 미후중합군과 비교했을 때, 400, 600, 800 mW/cm^2군의 중합률은 유의하게 높았으나($P < .05$), 200 mW/cm^2군과 미후중합군 사이에는 유의한 차이가 없었다($P = .160$). 후중합을 시행한 200, 400, 600, 800 mW/cm^2군 사이에서도 조도가 증가함에 따라 중합률이 단계적으로 증가하였다. Tukey HSD 검정 결과, 미후중합군 - 200 mW/cm^2군을 제외한 모든 군 간 차이가 유의하였다. 200 - 400 및 400 - 600 mW/cm^2군($P < .01$)과 600 - 800 mW/cm^2군($P < .001$)을 제외한 나머지 군 간 차이는 $P < .0001$ 수준이었다(Fig. 4).

후중합 조도에 따른 각 군의 비커스 경도 측정 결과는 Table 2와 같다. 비커스 경도는 200, 400, 600 mW/cm^2군에서 조도가 증가함에 따라 증가하여 600 mW/cm^2군에서 12.60 ± 0.26으로 가장 높은 값을 보였으나, 800 mW/cm^2군에서는 11.01 ± 0.21로 감소하였다. 미후중합군은 6.52 ± 0.53으로 가장 낮은 값을 나타냈다. 800 mW/cm^2군은 200 mW/cm^2군보다는 높았으나($P < .05$), 400 mW/cm^2군($P < .01$) 및 600 mW/cm^2군($P < .0001$)보다는 유의하게 낮았다. 그 외 모든 군 간 차이는 $P < .0001$ 수준에서 유의하였다(Fig. 5).

Table 1. Mean (± SD) values of degree of conversion (%) for denture base resins according to post-curing irradiance

Group	n	Degree of conversion (%) (Mean ± SD)
Control	10	33.05 ± 3.59
200 mW/cm²	10	35.92 ± 2.34
400 mW/cm²	10	40.56 ± 1.98
600 mW/cm²	10	45.36 ± 3.42
800 mW/cm²	10	50.77 ± 2.16

SD: Standard deviation.

Table 2. Mean (± SD) values of Vickers hardness (VHN) for denture base resins according to post-curing irradiance

Group	n	Vickers hardness (VHN) (Mean ± SD)
Control	10	6.52 ± 0.53
200 mW/cm²	10	10.51 ± 0.41
400 mW/cm²	10	11.68 ± 0.36
600 mW/cm²	10	12.60 ± 0.26
800 mW/cm²	10	11.01 ± 0.21

SD: Standard deviation; VHN: Vickers hardness number.

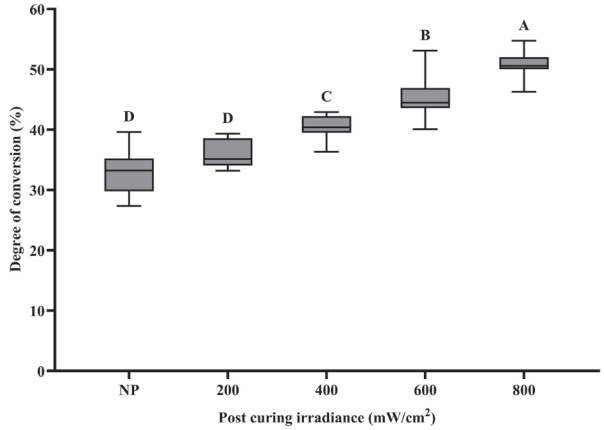

Fig. 4. Degree of conversion of the 3D-printed denture base resin according to post-curing irradiance. Different uppercase letters indicate statistically significant differences between groups according to Tukey's HSD test. Among the significant pairs, all differences were significant ($P < .0001$), except 200 - 400, 400 - 600 ($P < .01$) and 600 - 800 ($P < .001$).
NP: no post-curing.

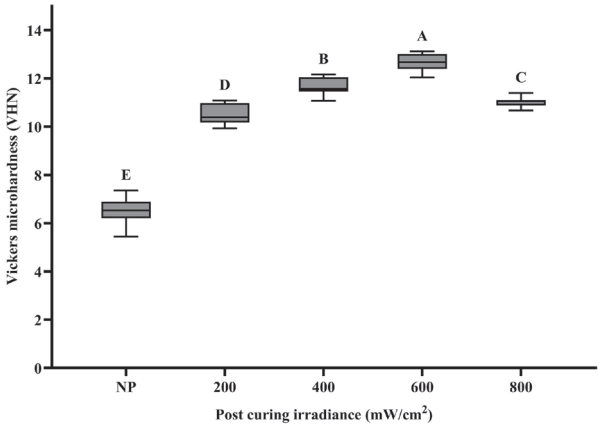

Fig. 5. Vickers hardness of the 3D-printed denture base resin according to post-curing irradiance. Different uppercase letters indicate statistically significant differences between groups according to Tukey's HSD test. All pairwise differences were significant ($P < .0001$), except 200 - 800 ($P < .05$) and 400 - 800 ($P < .01$).
NP: no post-curing.

고찰

본 연구에서는 시편의 중합률을 평가하기 위해 퓨리에 변환 적외선 분광법(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)을 사용하였다. 3차원 프린팅 레진은 중합 전 메타크릴레이트계 단량체의 지방족 C=C 이중결합을 가지며, 중합이 진행되면 단일 C–C 공유결합으로 전환된다. FTIR은 반응 피크의 중합 전후 변화를 비교하여 중합률을 산출하는 데 사용될 수 있다. 일반적으로 반응 피크는 지방족 C=C 이중결합에 해당하는 피크(약 1636 cm^{-1})가 사용되며, 기준 피크로는 중합 전후 흡광도 변화가 적은 피크가 선택된다. 치과용 3차원 프린팅 레진의 중합률을 평가한 기존 연구에서는 방향족(aromatic) C=C 이중결합에 해당하는 1608 cm^{-1} 피크가 사용되어 왔다.[13] 다만 urethane dimethacrylate (UDMA)나 triethylene glycol dimethacrylate (TEGDMA)와 같이 방향족 고리가 없는 단량체의 비중이 높을 때에는 1608 cm^{-1} 피크가 약하게 나타나거나 검출되지 않아 이를 기준 피크로 사용하기 어려울 수 있다.[14] 본 연구에서도 미중합 및 중합 후 스펙트럼에서 1608 cm^{-1} 피크는 뚜렷하게 관찰되지 않았다. ODS denture base 레진은 제조사에서 구체적인 조성을 공개하지 않았으나, FTIR 분석 결과 1297, 1320, 1378, 1450, 1532, 1636 cm^{-1} 부근에서 뚜렷하고 높은 피크가 확인되었으며, 이는 UDMA 계열 레

진에서 보고된 스펙트럼 특성과 부합하는 것으로 판단된다.[15] 또한 1532 cm^{-1} 피크는 UDMA 기반 레진에서 amide II band에 해당하는 피크로서, 중합 전후에도 상대적으로 안정적인 흡광도를 보였다. 또한, Guerra 등은 UDMA 기반 레진에서 amide II band를 중합률 산출의 내부 기준으로 사용하는 것이 타당함을 보고하였다.[16] 따라서 본 연구에서는 이를 중합률 산출을 위한 내부 기준 피크로 설정하였다. 다만 본 연구에서 산출된 중합률은 1608 cm^{-1} 피크를 내부 기준으로 사용한 연구 결과와 절대값을 직접 비교하는 데 제한이 있다.

본 연구에서는 후중합 조도가 중합률뿐만 아니라 실제 표면 기계적 특성에도 영향을 미치는지 확인하기 위해 비커스 경도를 함께 평가하였다. 비커스 경도는 기계적 압입이나 마모에 의해 유발되는 소성 변형에 대한 저항을 정량적으로 반영하는 지표로서 임상적으로 중요한 의미를 가진다. 의치는 저작이나 칫솔질과 같은 기계적 하중에 지속적으로 노출되므로, 표면 경도가 낮을 경우 마모 및 표면 손상에 취약할 수 있다.[17] 이러한 표면 손상은 의치의 표면 거칠기를 증가시켜 심미성을 저하시킬 뿐만 아니라, 미생물 부착을 촉진하여 의치성 구내염과 같은 임상적 문제와 관련될 수 있다. 따라서 의치상 레진의 충분한 표면 경도는 장기적인 내구성과 위생적 유지에 중요한 요소이다.[18] 또한 표면 경도는 일반적으로 중합률과 밀접한 관련이 있어 중합률이 증가할수록 함께 증가하는 경향을 보이는데,[19] 이는 후중합이 충분히 이루어질수록 잔류 단량체가 감소하고 보다 조밀한 고분자 네트워크가 형성되기 때문이다. 이러한 점에서 비커스 경도는 중합률과 상호 보완적으로 후중합 효과를 평가하는 지표로 활용될 수 있다.

본 연구에서 후중합 조도는 3차원 프린팅 의치상 레진의 중합률과 비커스 경도에 유의한 영향을 미쳤다. 따라서 '후중합 조도에 따라 중합률과 비커스 경도에 유의한 차이가 없다'는 귀무가설은 기각되었다. 평균 중합률은 후중합 조도가 증가함에 따라 미후중합군(33.05%)에서 800 mW/cm^2군(50.77%)으로 갈수록 증가하였으나, 미후중합군과 200 mW/cm^2군 사이에서는 통계적으로 유의한 차이가 관찰되지 않았다. 비커스 경도는 미후중합군보다 모든 후중합군에서 유의하게 높았으나, 조도 증가에 따른 변화 양상은 중합률과 달랐다. 경도는 200 mW/cm^2군(10.51), 400 mW/cm^2군(11.68)을 거쳐 600 mW/cm^2군에서 12.60으로 가장 높았으며, 800 mW/cm^2군에서는 11.01로 감소하였다.

후중합 조도가 높을수록 중합률이 증가한 것은, 후중합 시 조사된 UV광이 잔존 광개시제의 분해와 자유라디칼 생성을 촉진하여 메타크릴레이트 단량체의 이중결합 전환을 추가로 유도하였기 때문이다.[9] 이러한 결과는 후중합 조도의 효과를 평가한 기존 연구들과 유사한 경향을 보였다. Kang 등은 3차원 프린팅 임시 수복용 레진을 서로 다른 조도로 후중합하여, 조도가 증가함에 따라 중합률과 비커스 경도가 함께 증가하였다고 보고하였다.[20] Sahrir 등 또한 3차원 프린팅 레진을 105, 210, 420, 840 mW/cm^2의 조도로 후중합하였을 때, 조도가 높을수록 압축강도와 중합 특성이 향상되었다고 보고하였다.[11] 본 연구에서도 후중합 조도가 증가함에 따라 중합률이 단계적으로 증가하였고, 200 - 600 mW/cm^2 구간에서는 비커스 경도 역시 증가하여 기존 연구들과 부분적으로 유사한 경향을 보였다.

다만 본 연구에서는 중합률과 비커스 경도가 모든 조도 조건에서 동일한 변화 양상을 보이지는 않았다. 먼저, 대조군과 200 mW/cm^2군은 중합률에서는 유의한 차이가 없었음에도 경도에서는 뚜렷한 차이를 보였다. 중합률은 시편의 화학적 이중결합 전환 정도를, 표면 경도는 형성된 고분자 네트워크의 기계적 강성을 반영한다. 경도는 단순한 이중결합 전환율이 아니라 고분자 네트워크의 가교 밀도에 더 직접적으로 의존하므로, 작은 중합률 변화도 경도에는 비교적 민감하게 반영될 수 있다.[21] 따라서 200 mW/cm^2의 비교적 낮은 조도에서도 표면층의 추가 중합이 진행되면서 비커스 경도는 유의하게 증가한 반면, 이중결합 전환 정도를 반영하는 중합률의 변화는 상대적으로 작게 나타났을 가능성이 있다.

또한, 가장 높은 800 mW/cm^2군에서는 중합률이 계속 상승하였음에도 경도가 오히려 감소하여 두 지표가 서로 다른 방향을 보였다. 200 - 600 mW/cm^2 구간에서 두 지표가 함께 증가한 것은 단량체 전환 증가가 고분자 네트워크 형성과 표면 경도 향상에 기여할 수 있다는 일반적 경향과 부합한다. 그러나 이러한 경향이 조도가 높아질수록 항상 유지되는 것은 아니다. Qiu 등은 365 nm 파장에서 후중합 조도가 증가함에 따라 중합률은 유의하게 상승하였으나, 굴곡강도는 800 W/m^2과 2000 W/m^2 사이 구간에서 유의한 차이를 보이지 않았다고 보고하였다.[10] 과도하게 높은 조도에서는 레진 표면에서 급속한 가교결합이 일어나면서 조사광의 내부 침투가 제한될 수 있으며, 이는 불균일한 고분자 네트워크 형성으로 이어져 높은 중합률에도 불구하고 기계적 물성의 향상이 제

한되는 원인으로 작용할 수 있다.[22] 이는 본 연구 조건에서 일정 수준 이상의 조도 증가가 추가적인 중합률 증가로 이어지더라도, 표면 경도 향상과는 반드시 비례하지 않을 수 있음을 시사한다.

Par 등은 고조도에서의 광중합이 복합레진의 미세기계적 물성에 미치는 영향을 연구하여, 통상적인 광중합 조건에 비해 높은 조도 하에서 광중합 시 미세경도가 11 - 48% 감소함을 보고하였다.[23] 이들은 이를 높은 개시율로 인해 다량의 자유라디칼이 동시에 생성되면서 이분자 종결 반응(bimolecular termination)이 증가하고 단량체의 이동성이 제한된 결과로 설명하였다. 따라서 본 연구의 800 mW/cm^{2}군에서 관찰된 비커스 경도 감소도 높은 조도 조건에서의 중합 반응 속도 변화나 고분자 네트워크 형성 양상의 차이와 관련되었을 가능성이 있다. 다만 Par 등의 연구는 직접 수복용 복합레진의 광중합 조건을 평가한 연구로, 본 연구의 3차원 프린팅 의치상 레진에 대한 후중합 조건과는 재료 조성, 조사 방식 및 조사 시간이 다르다. 따라서 해당 결과를 본 연구에 직접 적용하는 데에는 제한이 있다.

또한, 본 연구에서는 조사 시간을 14분으로 고정한 채 조도만 달리하였으므로, 조도가 증가할수록 총 방사노출량도 함께 증가하였다. 따라서 관찰된 중합률과 표면 경도의 변화는 조도 단독의 효과가 아니라 조도와 총 방사노출량의 복합적인 영향을 반영한 것으로 볼 수 있다.

종합하면, 후중합 조도는 본 의치상 레진의 중합률과 표면 경도에 모두 영향을 미쳤으나 두 물성이 동일한 조도에서 가장 높은 값을 보이지는 않았다. 중합률은 800 mW/cm^{2}까지 지속적으로 증가한 반면 비커스 경도는 600 mW/cm^{2}에서 가장 높은 값을 보였으며, 이는 충분한 단량체 전환과 양호한 표면 경도를 함께 확보하기 위해 반드시 높은 조도를 적용하는 것이 항상 유리하지는 않을 수 있으며 조도 조건의 최적화가 필요함을 시사한다. 다만 본 연구는 단일 종류의 3차원 프린팅 레진과 UV 후중합기를 사용하였다는 한계가 있다. 중합률과 표면 경도는 조사 시간, 온도, 파장, 레진 조성 등 다양한 요인의 영향을 받으므로, 다른 레진이나 후중합 장비에서는 동일한 조건으로도 결과가 달라질 수 있다. 또한, 조도 값은 장비 공칭 설정값에 근거하였으므로, 향후 방사조도계를 이용한 실측 기반의 검증 연구가 필요하다. 또한, 중합률과 비커스 경도를 개별 시편 단위로 대응시켜 측정하지 않았으므로, 두 물성 간의 정량적 상관관계를 직접 분석하지는 못하였다. 한편 본 연구의 비커스 경도는 표준화된 디스크형 시편을 후중합 직후 측정한 값으로, 저작 하중, 기계적 세척, 열노화 등 구강 환경의 복합적 요소에 의한 변화는 반영하지 못하였다. 따라서 본 결과를 의치상 레진의 장기적 임상 내구성으로 직접 해석하는 데에는 주의가 필요하며, 향후 열순환·기계적 세척 등 임상 모사 조건을 반영한 다양한 상용 레진 및 후중합기의 비교 연구가 필요하다.

결론

본 연구에서 후중합 조도는 3차원 프린팅 의치상 레진의 중합률과 표면 경도에 서로 다른 양상으로 영향을 미쳤다. 이는 본 연구 조건에서 중합률 증가와 표면 경도 향상이 반드시 동일한 조도에서 나타나지는 않으며, 재료 및 장비에 따른 후중합 조도의 최적화가 필요함을 시사한다. 다만 본 연구는 단일 종류의 3차원 프린팅 레진과 후중합 장비만을 평가하였으므로, 이를 일반화하기 위해서는 다양한 재료와 조건에서의 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

ORCID

I-Hwa Yun https://orcid.org/0009-0002-1085-4045
Seon-Ki Lee https://orcid.org/0000-0001-9590-9409

References

1. Bayarsaikhan E, Lim JH, Shin SH, Park KH, Park YB, Lee JH, Kim JE. Effects of postcuring temperature on the mechanical properties and biocompatibility of three-dimensional printed dental resin material. Polymers 2021;13:1180.
2. Jorge JH, Giampaolo ET, Machado AL, Vergani CE. Cytotoxicity of denture base acrylic resins: a literature review. J Prosthet Dent 2003;90:190-3.
3. Perea-Lowery L, Gibreel M, Vallittu PK, Lassila LV. 3D-printed vs. heat-polymerizing and autopolymerizing denture base acrylic resins. Materials 2021;14:5781.
4. Sulaiman TA. Materials in digital dentistry - a review. J Esthet Restor Dent 2020;32:171-81.
5. Srinivasan M, Kalberer N, Kamnoedboon P, Mekki M, Durual S, Özcan M, Müller F. CAD-CAM com-

plete denture resins: an evaluation of biocompatibility, mechanical properties, and surface characteristics. J Dent 2021;114:103785.
6. Mai HN, Lee KB, Lee DH. Fit of interim crowns fabricated using photopolymer-jetting 3D printing. J Prosthet Dent 2017;118:208-15.
7. Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D printing in dentistry - state of the art. Oper Dent 2020;45:30-40.
8. Lourinho C, Salgado H, Correia A, Fonseca P. Mechanical properties of polymethyl methacrylate as denture base material: heat-polymerized vs. 3D-printed-systematic review and meta-analysis of in vitro studies. Biomedicines 2022;10:2565.
9. Kirby S, Pesun I, Nowakowski A, França R. Effect of different post-curing methods on the degree of conversion of 3D-printed resin for models in dentistry. Polymers 2024;16:549.
10. Qiu X, Mou Z, Fang Z, Qu Y, He B, Li Y, Li P, Huang J. Post-polymerization of 3D-printed denture base polymer: impact of post-curing light wavelength and intensity on surface characteristics, flexural strength, degree of conversion, and cytotoxicity. Dent Mater 2026;42:596-606.
11. Sahrir CD, Lin WS, Wang CW, Lin WC. Effects of post-curing light intensity on the trueness, compressive strength, and resin polymerization characteristics of 3D-printed 3-unit fixed dental prostheses. J Prosthodont 2024 Sep 12. doi: 10.1111/jopr.13951. Online ahead of print.
12. Artopoulou II, Pani E, Eliades G. Comparative laboratory study of 3D printed denture base resin materials. J Prosthet Dent 2025;134:1964.e1-9.
13. Rueggeberg FA, Hashinger DT, Fairhurst CW. Calibration of FTIR conversion analysis of contemporary dental resin composites. Dent Mater 1990;6: 241-9.
14. Delgado AHS, Young AM. Methacrylate peak determination and selection recommendations using ATR-FTIR to investigate polymerisation of dental methacrylate mixtures. PLoS One 2021;16: e0252999.
15. Lawson NC, Safadi Y, Alford A, Aggarwal H, Bora PV, Lawson TJ, Givan DA. Flexural strength, fracture toughness, translucency, stain resistance, and water sorption of 3D-printed, milled, and conventional denture base materials. J Prosthodont 2026; 35:553-60.
16. Guerra RM, Durán I, Ortiz P. FTIR monomer conversion analysis of UDMA-based dental resins. J Oral Rehabil 1996;23:632-7.
17. Aati S, Akram Z, Shrestha B, Patel J, Shih B, Shearston K, Ngo H, Fawzy A. Effect of post-curing light exposure time on the physico-mechanical properties and cytotoxicity of 3D-printed denture base material. Dent Mater 2022;38:57-67.
18. Altarazi A, Haider J, Alhotan A, Silikas N, Devlin H. Assessing the physical and mechanical properties of 3D printed acrylic material for denture base application. Dent Mater 2022;38:1841-54.
19. Al-Dulaijan YA, Alsulaimi L, Alotaibi R, Alboainain A, Alalawi H, Alshehri S, Khan SQ, Alsaloum M, AlRumaih HS, Alhumaidan AA, Gad MM. Comparative evaluation of surface roughness and hardness of 3D printed resins. Materials 2022;15:6822.
20. Kang MJ, Lim JH, Lee CG, Kim JE. Effects of post-curing light intensity on the mechanical properties and three-dimensional printing accuracy of interim dental material. Materials 2022;15:6889.
21. Barszczewska-Rybarek IM. A guide through the dental dimethacrylate polymer network structural characterization and interpretation of physico-mechanical properties. Materials 2019;12:4057.
22. Kardar P, Ebrahimi M, Bastani S. Influence of temperature and light intensity on the photocuring process and kinetics parameters of a pigmented UV curable system. J Therm Anal Calorim 2014;118: 541-9.
23. Par M, Marović D, Attin T, Tarle Z, Tauböck TT. The effect of rapid high-intensity light-curing on micromechanical properties of bulk-fill and conventional resin composites. Sci Rep 2020;10:10560.

후중합 조도에 따른 3차원 프린팅 의치상 레진의 중합률과 비커스 경도 변화

윤이화[1] 전공의, **이선기**[1,2*] 조교수

[1]원광대학교 치과대학 치과보철학교실

[2]원광대학교 치의학 연구소

목적: 후중합 조도가 3차원 프린팅 의치상 레진의 중합률과 비커스 경도에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

연구 재료 및 방법: 광경화성 의치상 레진을 이용하여 원판형 시편을 제작하였다. 시편은 후중합을 시행하지 않은 대조군과 200, 400, 600, 800 mW/cm^{2}의 조도로 후중합한 군으로 분류하였으며, 각 군에 10개씩 무작위로 배정하여 총 50개의 시편을 사용하였다. 후중합은 60°C 에서 실험군마다 조도를 달리하여 14분간 시행하였다. 중합률은 퓨리에 변환 적외선 분광법(FTIR)을 통해 1636 cm^{-1}과 1532 cm^{-1} 피크의 흡광도 비로 산출하였다. 비커스 경도는 0.49 N의 하중을 30초간 적용하여 측정하였다. 군 간 비교를 위하여 일원배치 분산분석과 사후 검정으로 Tukey's test를 실시하였다(α = .05).

결과: 중합률은 후중합 조도가 증가함에 따라 단계적으로 증가하여 800 mW/cm^2 군에서 가장 높았고 대조군에서 가장 낮았으나, 대조군과 200 mW/cm^2 군 간에는 유의한 차이가 없었다(P > .05). 비커스 경도는 후중합을 시행한 모든 군에서 대조군보다 유의하게 높았으며, 600 mW/cm^2 군에서 가장 높았으나 800 mW/cm^2 군에서는 다시 감소하였다(P < .05).

결론: 후중합 조도는 3차원 프린팅 의치상 레진의 중합률과 표면 경도에 서로 다른 양상으로 영향을 미쳤으며, 두 물성이 동일한 조도에서 최고값을 보이지는 않았다. 이는 재료 및 장비에 따른 후중합 조도의 최적화가 필요함을 시사한다. 다만 본 연구는 단일 재료와 후중합 장비를 평가하였으므로, 이를 일반화하기 위해서는 추가 연구가 필요하다.

(구강회복응용과학지 2026;42(3):251-9)

주요어: 3차원 프린팅; 의치상 레진; 후중합 조도; 중합률; 비커스 경도

*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 7월 14일 | 수정일: 2026년 8월 3일 | 채택일: 2026년 8월 5일