https://doi.org/10.14368/jdras.2025.41.2.99
ISSN 2384-4353 eISSN 2384-4272

Original Article

Comparison of color stability of denture base resin fabricated by subtractive, additive manufacturing and heat-curing methods

Min-Young Jo, Jin-Han Lee*
Department of Prosthodontics, College of Dentistry, Wonkwang University, Iksan, Republic of Korea

Purpose: This study aimed to compare the color stability of denture base resins manufactured using subtractive manufacturing (SM), additive manufacturing (AM), and heat-curing (HC) methods, with respect to both fabrication method and staining duration. **Materials and Methods:** Specimens were prepared according to each fabrication method and immersed in coffee solution and distilled water for 12, 24, and 36 days. Color changes (ΔE^*) were measured using a spectrophotometer, and statistical analysis was performed with one-way ANOVA and repeated measures ANOVA. **Results:** The AM group showed significantly higher values than SM and HC groups at all evaluated intervals, whereas no significant differences were observed between SM and HC groups. All groups exhibited significant color changes after staining. In the AM group, values increased significantly with increased immersion time. However, in the SM group, a significant difference was only observed between the 12-day and 36-day intervals, and no significant difference was found in the HC group across durations. **Conclusion:** Additive manufacturing showed significantly lower color stability compared to subtractive manufacturing and heat-curing methods, while no significant differences were found between subtractive manufacturing and heat-curing methods. **(J Dent Rehabil Appl Sci 2025;41(2):99-109)**

Key words: CAD-CAM; denture base resins; color stability; staining; spectrophotometry

서론

의치는 무치악 환자의 상실된 저작과 발음 기능, 그리고 심미성을 회복하기 위한 보철 수복물이며, 환자의 전신 건강 유지와 삶의 질 향상에 중요한 역할을 한다.[1] 환자는 구강 내에서 장시간 의치를 사용하기 때문에 환자의 식이 습관과 구강 위생 상태는 의치의 색상과 물리적 특성에 영향을 미친다. 또한 저작하는 음식물의 성상에 따라 의치의 구성요소는 온도 변화, 화학적 자극, 기계적 힘과 같은 다양한 환경 요인에 노출된다. 의치에서 넓은 면적을 차지하는 의치상 레진은 이러한 환경 요인으로 의해 표면에 색 변화가 나타날 수 있다.[2] 색 변화는 시간이 지남에 따라 누적되고, 일정 수준 이상으로 진행될 경우 육안으로 인지될 수 있다. 이는 의치의 심미성을 저하시켜 환자의 착용 의지를 약화시키고 치료 결과에 대한 만족도를 감소시키는 요인으로 작용할 수 있다.[3]

의치상 레진의 제작 방식으로는 열중합 방식이 오랜 기간 사용되어 왔으며, 장기간의 임상 적용을 통해 그 안정성과 적합성이 입증되어 있다.[2] 그러나 최근 디지털 기술의 발달로, Computer-aided design- computer-aided manufacturing (CAD-CAM) 시스템을 활용한 절삭 가공(subtractive manufacturing)과 적층 가공(additive manufacturing) 방식의 사용이 점차 확대되고 있다. 디지털 제작 방식은 정밀도 향상, 제작 시간 단축, 반복 생산의 용이성 등의 장점을 가지고 있지만, 장기적인 색안정성 측면에서 기존 열중합 방식과 비교한 자료는 아직 부

*Correspondence to: Jin-Han Lee
Professor, Department of Prosthodontics, Daejeon Dental Hospital, Wonkwang University, 77 Doonsan-ro, Seo-gu, Daejeon, 35233, Republic of Korea
Tel: +82-42-366-1150, Fax: +82-42-366-1115, E-mail: dentist@empas.com
Received: April 29, 2025/Last Revision: May 7, 2025/Accepted: May 8, 2025

Copyright© 2025 The Korean Academy of Stomatognathic Function and Occlusion.
©It is identical to Creative Commons Non-Commercial License.

족하다.[4,5] 의치상 레진의 색안정성을 평가하는 방법은 객관적 방법과 주관적 방법으로 나눌 수 있다. 객관적 평가는 분광측색계(spectrophotometer)나 색차계(colorimeter) 등의 장비를 통해 색 변화를 정량적으로 측정하는 방식으로, 국제조명위원회(CIE, Commission Internationale de l'Éclairage)에서 제안한 CIE L*a*b* 색 공간을 기준으로 ΔE^*값을 산출하여 분석한다. 주관적 평가는 환자 또는 치과의사에 의한 육안 판별 또는 시각적 아날로그 척도(visual analog scale) 등을 통해 이루어진다.[6]

의치상 레진의 색안정성에 관한 선행 연구는 열중합 방식에서 많이 이루어져 왔고, 절삭 및 적층 가공 방식에 대한 비교 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 절삭 및 적층 가공 방식과 열중합 방식으로 제작한 의치상 레진을 커피용액에 착색시킨 후, 시간 경과에 따른 색 변화량을 측정하여 비교 분석하였다. 본 연구의 귀무가설은 절삭 및 적층 가공 방식과 열중합 방식으로 제작한 의치상 레진 간의 색안정성에는 유의한 차이가 없으며, 착색용액에 노출되는 기간에 따른 색 변화량에도 유의미한 차이가 없다는 것이다.

연구 재료 및 방법

실험군은 의치상 레진의 제작 방식에 따라 subtractive manufacturing (SM), additive manufacturing (AM)과 heat-curing (HC)으로 분류하였다. SM 군은 밀링 머신(DWX-52D, Roland DG Co., Shizuoka, Japan)과 CAD/CAM용 polymethyl methacrylate (PMMA) 블록(Ivotion denture disc, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein)을 사용하여 제작하였고, AM 군은 digital light processing (DLP) 방식의 3D 프린터(Phrozen Sonic Mighty Revo 14K, Phrozen Tech Co. Ltd.)와 광중합형 의치상 레진(Denture base, ODS, Incheon, Korea)을 이용하여 제작하였다. 그리고 HC 군은 열중합형 PMMA 의치상 레진(Lucitone 199, Dentsply Sirona, York, USA)을 사용하여 제작하였다. 사용한 각 레진의 상품명과 제조사는 Table 1에 정리하였다.

시편 제작

모든 시편은 직경 15 mm, 높이 2.1 mm의 디스크 형태로 설계하였으며, 각 군마다 20개씩 총 60개의 시편을 제작하였다(Fig. 1).

SM 군은 CAD software인 3Shape Dental System (3Shape A/S, Copenhagen, Denmark)과 Meshmixer (Autodesk Inc., San Rafael, USA)를 이용하여 디자인한 후, STL (stereolithography) 파일로 변환하여 밀링 머신(DWX-52D)을 이용해 PMMA 블록을 절삭하여 제작하였다. AM 군은 동일한 CAD software로 디자인한

Table 1. Materials of denture base resin

Group	Fabrication method	Product name	Material type	Manufacturer
SM	Subtractive manufacturing	Ivotion denture disc	CAD-CAM denture base acrylic resin	Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Liechtenstein
AM	Additive manufacturing	Denture base	Light-polymerized denture base resin	ODS, Incheon, Korea
HC	Heat-curing	Lucitone 199	Heat cured denture base acrylic resin	Dentsply Sirona, York, USA

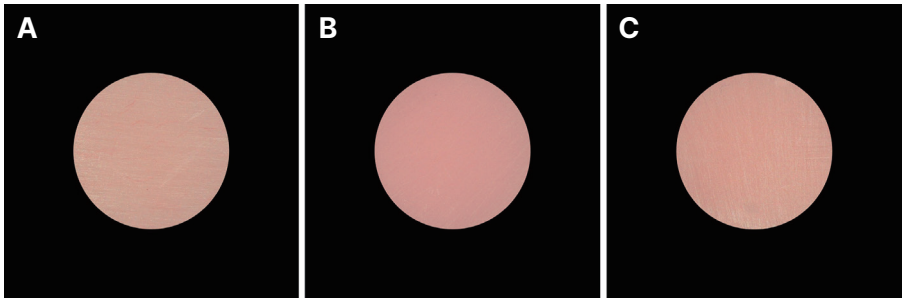

Fig. 1. Representative specimens from each experimental group. (A) SM group, (B) AM group, (C) HC group.

후, DLP 방식의 3D 프린터(Phrozen Sonic Mighty Revo 14K)와 광중합형 레진을 이용하여 출력하였다. 0° 각도, 50 μm의 적층 두께로 설정하여 출력하였으며, 이후 자외선 후중합기(Phrozen Cure, Phrozen Tech Co. Ltd., Hsinchu, Taiwan)를 사용하여 제조사의 지시에 따라 14분간 후중합을 시행하였다. HC 군은 기초상 왁스(Crystal Wax, Daedong Dental Co. Ltd., Seoul, Korea)로 직경 15 mm, 높이 2.1 mm의 디스크 형태의 납형을 제작하였으며, 의치용 플라스크함에 매몰하여 주형을 형성하였다. 고압세척기로 왁스를 제거한 뒤, 열중합형 PMMA 레진(Lucitone 199)을 제조사의 지시에 따라 혼합하여 주형에 전입하고 열중합을 시행하였다. 각 군마다 제작된 모든 시편은 #120, 220, 400, 600 grit의 실리콘 카바이드 연마지를 사용하여 표면 연마를 시행하였다. 연마 과정에서 디지털 캘리퍼스를 이용하여 직경과 높이를 확인하였으며, 최종 연마 후 직경 15 mm, 높이 2 mm의 균일한 표면을 갖는 각각의 시편을 완성하였다. 시편의 규격은 분광측색계 사용 시 측정 재현성과 광학적 안정성을 확보할 수 있고, 선행 연구들에서 사용된 디스크 형태의 디자인을 본 연구에 적용하였다.[7,8] 연마 후 초음파세척기(SD-251H, Mujigae Co. Ltd., Seoul, Korea)를 이용하여 증류수에서 20분간 세척하였다. 세척 후 37°C 증류수에서 24시간 보관하였다.

착색 전의 색 측정

24시간 동안 증류수에 보관하였던 시편들을 건조시킨 후 착색 전의 색 측정을 시행하였다. 분광측색계(CM-2600D, Konica Minolta Co. Ltd., Osaka, Japan)는 각 군간 표면 처리의 차이를 최소화하고 반사광을 포함한 총 색 변화량을 정량화 하기 위하여 specular component included (SCI) 모드로 설정하였다(Fig. 2). 측정 전, 분광측색계의 광학부에 흡광통을 놓고 영점 조정(zero calibration)을 한 후 표준 백색판(standard white reflector plate)을 이용하여 백색 조정(white calibration)을 수행하였다. 이후 시편을 광학부에 밀착시키고 흰색 배경에서 색을 측정하였다. 이 때 1명의 시험자가 positioning jig를 이용해 시편의 동일 부위에서 3회 반복 측정 후 평균값을 산출하였고, 각각의 L^*, a^*, b^* 값을 기록하였다.



Fig. 2. Spectrophotometer (CM-2600D, Minolta Co. Ltd., Osaka, Japan).

착색 과정

착색용액으로는 인스턴트 커피 분말(KANU Mild Roast Americano, Dong-Suh Food co. Ltd., Seoul, Korea)을 제조사의 권장 농도에 따라 200 ml의 물에 커피 분말 1.6 g을 녹여 커피용액을 제조하였다.

각 군의 시편 20개는 커피용액군과 대조군(증류수)으로 10개씩 나누어 밀폐 가능한 용기에 담긴 용액 내에 완전히 잠기도록 침전시켰으며, 37°C로 설정한 항온 수조에서 12일, 24일, 36일 동안 보관하였다. 선행 연구의 하루 평균 커피 섭취 시간을 참고하여 착색용액에 보관하는 기간은 각각 약 1년, 2년, 3년간의 누적 섭취에 해당하는 기간으로 설정하였다.[9] 용액의 증발을 방지하기 위해 덮개가 있는 용기를 사용하였으며, 오염과 농도 변화 방지를 위해 모든 용액은 48시간마다 새로 제조하여 교체하였다.

착색 후의 색 측정

시편은 착색 후 12일, 24일, 36일 경과 시점마다 보관용기에서 꺼내어 분광측색계로 색을 측정하였다. 각 측정 시점에서 시편들을 꺼내 흐르는 물에 세척하여 표면의 착색 잔여물을 제거한 후, 공기 중에서 건조하여 측정하였다. 색 측정은 착색 전과 동일한 조건 하에서 분광측색계를 이용하여 수행하였으며 L^*, a^*, b^* 값을 기록하였다. 측정 후, 시편은 동일한 용액에 다시 침전시켜 다음 측정 시점까지 보관하였다.

색 차이는 착색 전의 측정값과 비교하여 ΔE^* 값을 산출하였다. 색 차이를 나타내는 ΔE^* 값의 산출 공식은 다음과 같다.

$$\Delta E^* = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2}$$

통계 분석

통계 분석은 IBM SPSS Statistics 28 (IBM Corp., Armonk, USA) 프로그램을 이용하여 수행하였다. 수집된 자료의 정규성은 Shapiro-Wilk test로, 등분산성은 Levene test로 검정하였다. 제작 방식에 따른 ΔE^* 값을 비교하기 위하여 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 시행하였고, 사후 검정으로 Tukey test를 이용하여 신뢰수준 95%에서 각 군의 유의성을 검증하였다. 각 군의 착색 기간에 따른 차이는 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA)로 분석하였다.

결과

각각의 시편은 커피용액과 증류수에 침전시킨 후, 착색 기간에 따른 색 변화를 분광측색계를 이용하여 측정해 다음과 같은 결과를 얻었다(Table 2).

AM 군은 착색 후 12일, 24일, 36일 경과 시점 모두에서 가장 높은 ΔE^*값을 나타냈으며, SM 군 및 HC 군과 비교하여 통계적으로 유의한 차이를 보였다($P < .05$). 12일, 36일 경과 시점에서는 AM 군, HC 군, SM 군 순으로, 24일 경과 시점에서는 AM 군, SM 군, HC 군 순으로 높게 나타났으나, 세 시점 모두에서 SM 군과 HC 군 간의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(Fig. 3). 한편, 대조군에서는 SM 군, AM 군, HC 군 간에 유의한 차이가 관찰되지 않았다(Fig. 4).

착색 후 12일 경과 시점에서는 착색 전과 비교하여 SM 군, AM 군, HC 군 모두에서 ΔE^*값의 유의한 증가가 나타났다($P < .05$). 24일 시점에서는 AM 군에서 12일 시점 대비 통계적으로 유의한 ΔE^*값의 증가가 나타났으며($P < .05$), SM 군과 HC 군에서는 유의한 차이가 없었다. 36일 시점에서, SM 군은 12일 시점과 비교해 값이 유의하

Table 2. Mean (±SD) values of for denture base resins according to fabrication method and immersion condition (n = 10)

Group	Immersion time (days)	SM (Mean ± SD)	AM (Mean ± SD)	HC (Mean ± SD)
Coffee solution	12	1.60 ± 0.20	23.86 ± 3.79	1.69 ± 0.44
	24	1.77 ± 0.41	25.69 ± 3.03	1.72 ± 0.41
	36	1.93 ± 0.32	28.09 ± 2.48	1.95 ± 0.61
Distilled water	12	0.58 ± 0.09	1.15 ± 0.22	0.86 ± 0.35
	24	0.58 ± 0.16	1.20 ± 0.30	0.91 ± 0.23
	36	0.59 ± 0.14	1.19 ± 0.35	0.90 ± 0.35

* SD: Standard deviation; ΔE*: Color difference in CIE L*a*b*.
SM: Subtractive manufacturing; AM: Additive manufacturing; HC: Heat-curing.

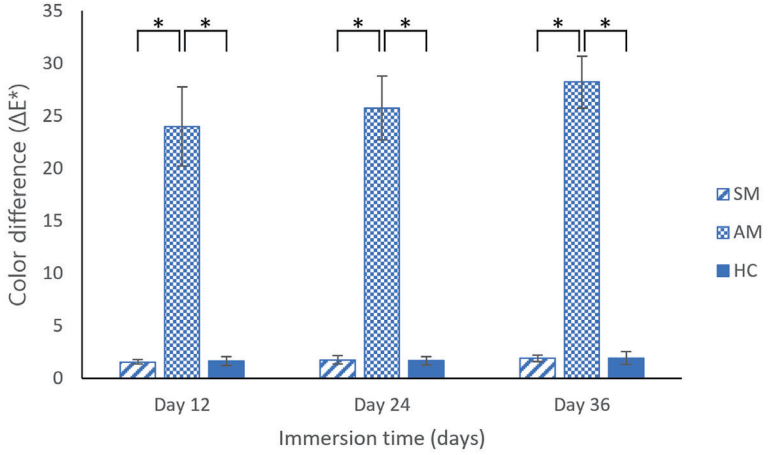

Fig. 3. Color difference (ΔE*) of denture base resins by manufacturing methods over time in coffee solution. Asterisk (*) indicates statistically significant difference between the groups.
SM: Subtractive manufacturing; AM: Additive manufacturing; HC: Heat-curing.

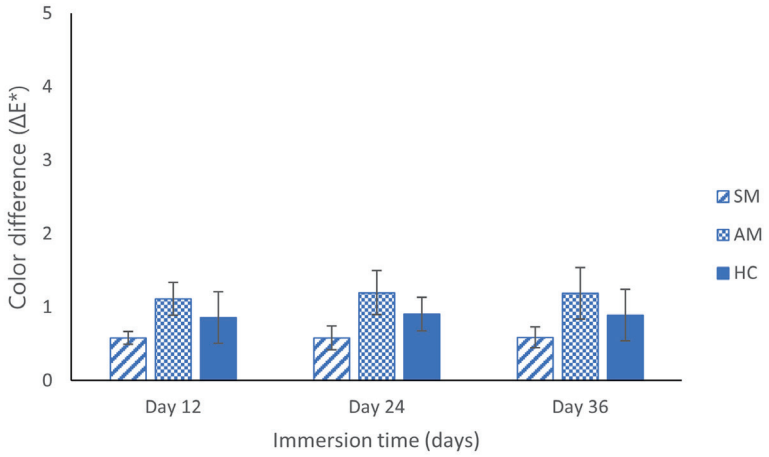

Fig. 4. Color difference (ΔE*) of denture base resins by manufacturing methods over time in distilled water.
SM: Subtractive manufacturing; AM: Additive manufacturing; HC: Heat-curing.

게 증가하였고, 24일 시점과 비교해서는 유의한 차이가 나타나지 않았다. AM 군에서는 12일 시점, 24일 시점과 비교해 모두 유의한 값의 증가가 있었다. HC 군에서는 시점 간 유의한 차이가 나타나지 않았다(Fig. 5). 대조군에서는 SM 군, AM 군, HC 군 모두에서 착색 전과 비교하여 유의한 ΔE^*값의 증가가 나타났으나, 착색 후 시점 간에는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Fig. 6).

고찰

의치상 레진은 구강 내에서 장기간 사용되는 보철 재료이기 때문에 습윤 환경에서 다양한 물리적 자극에 반복 노출되어 색 변화에 취약할 수 있다. 보철 수복물의 색 변화는 외부 색소 침착에 의한 착색(staining)과, 재료 자체의 화학적 변화에 따른 변색(discoloration)으로 나타날 수 있다. 착색은 주로 음식물, 음료, 흡연 등의 외부 요

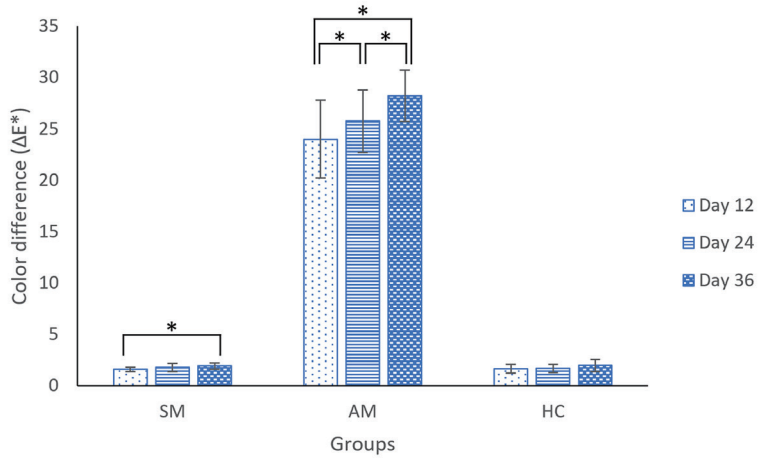

Fig. 5. Time-dependent color difference (ΔE*) of each denture base resin in coffee solution.
Asterisk (*) indicates statistically significant difference between the groups.
SM: Subtractive manufacturing; AM: Additive manufacturing; HC: Heat-curing.

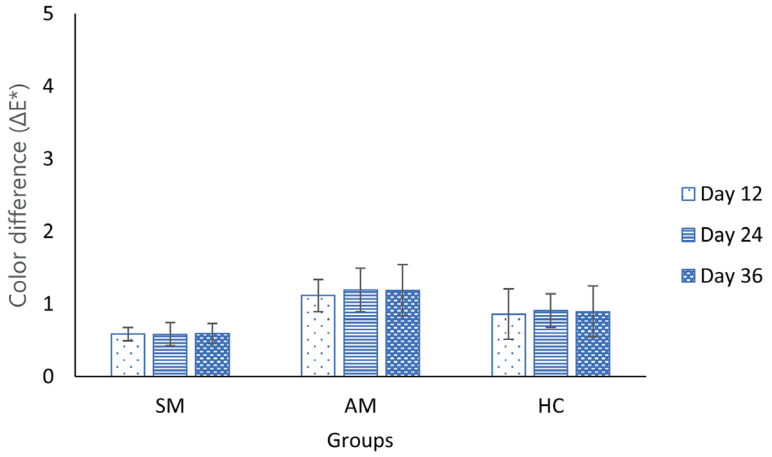

Fig. 6. Time-dependent color difference (ΔE*) of each denture base resin in distilled water.
SM: Subtractive manufacturing; AM: Additive manufacturing; HC: Heat-curing.

인에 의해 표면에 색소가 흡착되거나 침투하여 발생하며, 의치의 세척 과정 등을 통해 어느 정도 제거가 가능하다. 반면 변색은 의치상 레진의 불완전한 중합이나, 시간 경과에 따른 분해(degradation), 또는 수분 흡수 등으로 인해 재료 내부에서 나타나는 색 변화로, 일반적인 의치의 위생 관리 방법으로는 제거가 어렵다.[10] 본 연구에서는 이러한 색 변화 중에서도, 외부 환경에 의한 색소 침착을 확인하고자 하였으며, 착색에 따른 색 변화 정도를 중심으로 제작 방식 간의 차이를 비교하였다. 색 변화량을 평가하는 방법으로는, 환자나 치과의사에 의해 시각적으로 평가되는 주관적 평가 방식과, 측정기기를 활용하는 객관적 평가 방식이 있다. 본 연구에서는 보다 정량적이고 재현성 있는 분석을 위해 객관적 평가 방식을 채택하였으며, 색 변화량 측정을 위해 분광측색계를 사용하였다. 측정된 색 좌표 값 간의 거리 차인 ΔE^*값이 1.0 미만일 경우 육안으로 식별되지 않으며, $\Delta E^* = 2.7$은 일반적으로 관찰자의 50%가 색 차이를 인지할 수 있는 인지 역치(perceptibility threshold)로 나타났다. 그러므로 ΔE^*값이 3.3 이상일 경우에는 임상적으로 허용하기 어려운 수준의 색 변화로 간주되었다. ΔE^*값에 대한 이러한 기준은 다양한 색안정성 관련된 선행 연구에서 공통적으로 적용되었다.[11,12] 와인, 홍차 등 다양한 음료가 색소 침착을 유발할 수 있으나, 이들 용액은 pH나 성분 특성의 차이에 따라 레진 재료 자체의 물성에 영향을 미쳐 단순한 착색뿐 아니라 화학적 변화를 동반할 가능성이 있다.[13,14] 이에 본 연구에서는 착색 인자로서의 영향이 상대적으로 명확하고, 대중적으로 가장 많이 섭취되며, 재료 자체의 화학적 변화 가능성이 적은 커피를 착색용액으로 선택하였다. 착색 기간에 따른 선행 연구에서 커피의 하루 평균 섭취 시간은 약 48분으로 보고되었으며, 24시간 동안 착색 용액에 노출되는 시간은 약 1개월간의 누적 섭취에 해당되었다.[15] 본 연구에서 설정한 12일, 24일, 36일의 착색 용액의 침전 기간은 각각 1년, 2년, 3년 간의 누적 커피 섭취에 해당하는 조건을 반영한 것이다. 실험 기간 동안 착색용액의 변질을 방지하고 착색 인자의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 커피용액은 48시간 간격으로 새로 제조해 각 군에서 동일한 방법으로 교체하였다. 의치상 레진의 표면 상태는 색소의 흡착 및 침투에 직접적인 영향을 줄 수 있다.[9] 이에 따라 표면 상태에 따른 착색 영향을 최소화하기 위해, 모든 시편을 #600 grit의 실리콘 카바이드 연마지를 사용하여 동일한 조건으로 연마하였다. 다만, 적층 가공 방식의 경우 광중합 방식 특성상 층간 경계나 미세 기공이 잔존할 수 있으며, 이는 연마 이후에도 표면 상태에 영향을 줄 수 있다.[16] 본 실험에서는 연마 조건을 통일하였으나, 표면 조도(surface roughness)를 정량적으로 측정하지 못하였기 때문에, 각 제작 방식 간 표면 상태 차이의 영향을 완전히 배제하기는 어렵다. 따라서 결과 해석에 표면 상태에 의한 미세한 영향 가능성을 고려할 필요가 있다.

열중합 방식으로 제작한 의치상 레진의 색안정성에 대한 연구는 다양한 조건에서 활발히 이루어져 왔다. Vaddamanu 등[17]은 커피, 차, 강황 등 식품 색소에 열중합 레진을 침전시킨 결과 유의한 색 변화가 관찰되었으며, Trevalon® 레진이 상대적으로 높은 색안정성을 보였다

고 보고하였다. Altinci 등[15]은 다양한 음료와 열 순환 조건을 적용한 실험을 통해 이와 유사한 착색 경향이 시간·온도 변화 하에서도 유지됨을 확인하였다. CAD-CAM 시스템의 보편화로 절삭 및 적층 가공 방식이 의치상 제작에 활발히 도입되면서 제작 방식에 따른 색안정성을 비교한 연구들도 증가하고 있다. Dayan 등[8]은 절삭 가공 방식 레진이 열중합, 자가중합, 광중합 방식보다 더 우수한 색안정성을 보였다고 보고하였고, Takhtdar 등[18]은 절삭, 적층, 열중합 방식 간의 표면 거칠기 및 색 변화량 차이를 분석하여, 적층 가공 방식에서 가장 큰 색 변화량이 나타났다고 하였다. 또한 Çakmak 등[19]은 적층 가공 방식 레진이 모의 칫솔질 및 열 순환 조건에서 가장 낮은 색안정성을 보인다고 보고하였다. 이러한 선행 연구들은 제작 방식에 따라 색안정성에 차이가 있음을 시사하지만, 대부분 단기 착색 기간에서 평가되었기 때문에 임상에서의 장기 사용을 반영하는 데에는 한계가 있었다. 본 연구는 착색 기간을 12일, 24일, 36일로 설정하여, 각각 1년, 2년, 3년의 누적 음료 섭취를 모사함으로써 제작 방식에 따른 장기적인 색 변화 양상을 보다 임상적으로 유사한 조건 하에 평가하고자 하였다. 제작 방식에 따른 색 변화량 분석 결과, SM 군과 HC 군은 모든 시점에서 ΔE^*값이 2.0 미만으로 유지되어, 임상적으로 허용 가능한 범위 내에 있었던 반면, AM 군은 커피용액 착색 후 12일, 24일, 36일 시점 모두에서 ΔE^*값이 20 이상으로, 임상적 허용 기준인 3.3을 크게 초과하였다. 이러한 차이는 각 제작 방식의 구조적 특성에서 기인한 것으로 판단된다. 열중합 방식은 높은 중합도와 균질한 표면 구조로 인해 색소 침착에 강한 저항성을 보이는 것으로 해석되며, 이는 기존 문헌에서도 일관되게 보고되어 왔다.[20] 절삭 가공 방식은 사전 중합된 고밀도 블록을 기계적으로 가공하여 제작되므로, 표면 안정성이 우수하고 적층 가공 방식보다 낮은 흡착성을 갖는다.[21] 반면 적층 가공 방식은 불균일한 중합도와 층간 경계 구조로 인해 표면의 미세 기공이 많고, 이러한 표면의 불균질성은 표면 거칠기를 증가시키는 요인으로 작용한다. 거칠어진 표면은 미생물의 부착과 치태의 축적을 촉진시켜, 장기적으로 색소 침착에 취약한 환경을 만든다.[16] 실제로 의치상 재료의 표면 거칠기는 구강 내에서의 젖음성, 세균 접착력, 광학적 투과성 등에 영향을 주며, 임상적으로는 0.2 μm 이하의 표면 거칠기가 권장 기준으로 제시되어 있다. 이와 같은 기준을 초과하는 경우, 세균 잔존 및 색소 침착의 위험이 현저히 증가하는 것으로 알려져 있다.[22] 또한 적층 가공 방식은 층별로 레진을 중합하는 과정에서 산소 저해층(oxygen inhibition layer)이 형성될 수 있으며, 이는 층간 결합의 약화뿐만 아니라 표면 친수성 증가로 이어져 수분 및 색소 흡수에 영향을 미칠 수 있다.[23] 이러한 결과는 적층 가공 방식으로 제작한 의치상 레진의 장기적인 심미성 유지를 위하여 추가적인 표면 처리나 정기적인 유지 관리를 통한 착색 제거가 필요함을 시사한다. Gruber 등[24], Falahchai 등[25]의 연구에서도 적층 가공 방식이 절삭 가공 방식과 열중합 방식에 비해 낮은 색안정성을 보이는 것으로 보고되었으며, 이는 본 연구의 결과와 일치한다. 반면, Alfouzan 등[26]이 수행한 연구에서는 열중합 방식이 적층 가공 방식과 비교했을 때 색안정성이 떨어진다는 상충하는 결과를 보고했다. 저자들은 동일한 적층 가공 방식을 사용하더라도 재료의 특성 및 기타 출력 매개변수와 같은 다른 요인들이 레진의 수분 흡수율에 영향을 미칠 수 있다고 언급하며, 수분 흡수가 색안정성 저하의 기여 요인일 수 있다고 설명했다.[27]

침전 과정의 초기에서 착색 인자가 레진의 표면에 흡착되면, 표면 거칠기가 증가하게 되어 추가적인 색소 침착이 더욱 용이해진다.[28] 특히 커피와 같이 산성을 띠는 용액은 레진의 표면 거칠기를 증가시키는 데 기여해 색소 침착을 가속화시킬 수 있다.[29] 이러한 복합적인 요인은 반복 침전에 따라 색 변화가 점진적으로 누적되는 원인으로 작용한다. 본 연구에서도 착색 기간의 증가에 따라 시편의 색 변화량은 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 제작 방식과 관계없이 착색 전과 후 사이에 모두 통계적으로 유의한 색 변화가 관찰되었으며, 모든 군에서 착색 전과 착색 후 12일 사이에 가장 큰 ΔE^*값의 변화가 관찰되었고, 이후에는 변화량이 점차 완만해지는 경향을 보였다. 그중에서도 AM 군은 착색 후 12일, 24일, 36일 시점 간에 모두 통계적으로 유의한 차이를 보여, 시간 경과에 따라 색소 침착이 지속적으로 누적될 수 있음을 시사한다. SM 군에서는 12일과 36일 간에만 유의한 차이를 보여, 색 변화가 일정하게 누적되기보다는 시점에 따라 불규칙하게 나타날 가능성을 보여주었다. HC 군에서는 전반적으로 ΔE^*값이 증가하는 경향은 있었지만, 착색 후 시점 간에는 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않아, 상대적으로 높은 색안정성을 보였다. 이러한 결과는 각 제작 방식에서 표면 구조나 중합 방식, 수분 흡수성 등의 물리적 특성뿐만 아니라, 시간 경과에 따른 색 변화의 속도와 반응 정도 또한 다르게 나타날 수 있음을 의미한다. 한편, 대조군에서도 착색 전과 착색 후 12일 사

이에 Δ*E**값의 유의한 증가가 관찰되었으나, 모든 군에서 2.0 미만으로, 임상적으로 인지되는 수준은 아니었다. 착색 후 12일 경과 시점과 24일, 36일 시점 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이러한 변화는 착색 인자에 의한 영향이 아닌, 수분 흡수로 인한 재료 내부의 변화로 해석되며, 주로 초기 침전 기간에서 나타나는 변화로 사료된다.[30] 본 연구에서는 제작 방식 및 착색용액에 따른 군 간의 색 변화량(Δ*E**) 차이를 분석하기 위해 일원분산분석(one-way ANOVA)을 사용하였으며, 동일 시편의 착색 기간에 따른 색 변화의 경향을 확인하기 위해 반복측정 분산분석(repeated measures ANOVA)을 병행하였다. 분석 결과, 제작 방식 및 착색 기간 모두에서 유의한 색 변화 차이가 확인되었으며($P < .05$), 이에 따라 설정된 두 가지 귀무가설 '절삭 및 적층 가공 방식과 열중합 방식으로 제작한 의치상 레진의 색안정성에 유의한 차이가 없다.'와 '착색용액에 노출되는 기간에 따른 색 변화량 또한 유의미한 차이가 없다.'는 모두 기각되었다. 특히 AM 군은 모든 시점에서 Δ*E**값이 임상 허용 기준인 3.3을 크게 초과한 반면, SM 및 HC 군은 모든 시점에서 Δ*E**값이 2.0 미만으로 유지되어, 제작 방식에 따른 색안정성 차이가 통계적, 임상적으로 모두 유의함을 확인할 수 있었다. 또한 착색 기간이 증가할수록 색 변화량 역시 누적되어, 착색 인자에 반복적으로 노출될 경우 발생할 수 있는 장기적 색 변화의 경향성을 실험적으로 확인하였다.

본 연구는 각 군당 시편 수가 10개로 제한되어 있고, 제작 방식별로 하나의 상용제품만을 기준으로 시편을 제작하였기 때문에, 다양한 상용 제품 간의 색안정성 비교에 한계가 있었다. 또한 착색용액으로는 커피용액만을 사용하였고, 열 순환 등의 조건을 포함하지 않아 실제 임상환경에서 착색에 관여하는 복합적 요소들을 충분히 반영하지 못하였다. 향후 연구에서는 홍차, 와인, 콜라 등의 여러 음료를 포함하고, 온도 변화, 세척, 기계적 자극 등의 임상 모사 조건을 반영하여 다양한 상용 제품의 비교실험이 필요하며 이를 통해 연구 결과의 임상적 적용성을 높일 수 있을 것이다. 또한 시편의 표면 상태가 색소 침착에 영향을 미치는 중요한 요인이지만, 본 연구에서는 표면 조도를 정량적으로 측정하지 못한 점도 제한점으로 작용한다. 이후 연구에서는 표면 조도 및 미세 구조 분석을 병행하여 색 변화와의 상관관계를 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 실험 조건을 단순화함으로써 제작 방식 자체에 따른 색 변화를 명확히 비교할 수 있었다는 점에서 의의가 있다. 이는 향후 보다 복합적인 조건 하의 후속 연구의 설계 기반을 마련하는 데 기여할 수 있고, 임상에서는 의치의 유지 관리에 참고할 수 있는 기초 자료가 될 수 있다. 일반적으로 의치는 6개월에서 1년 간격의 정기 검진 과정에서 관리되며, 치료 과정에서 표면 상태나 색상 변화를 함께 점검하는 것이 필요하다. 본 연구에서 확인된 바와 같이, 제작 방식에 따라서 초기의 짧은 시간에도 색 변화가 나타날 수 있기 때문에 치과의사는 환자의 정기적인 의치 유지관리 프로그램에서 착색에 대한 고려와 제거에 관한 관리 전략이 필요할 것으로 사료된다.

결론

적층 가공 방식으로 제작한 의치상 레진에서 색안정성이 가장 낮게 나타났으며, 절삭 가공 방식 및 열중합 방식과는 유의한 차이를 보였다. 절삭 가공 방식과 열중합 방식 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

착색 기간이 증가함에 따라, 적층 가공 방식은 12일, 24일, 36일의 모든 측정 시점 간에 유의한 차이가 있었고, 절삭 가공 방식은 12일과 36일 간에만 유의한 차이가 있었으며, 열중합 방식에서는 착색 기간 증가에 따라 유의한 차이가 나타나지 않았다.

ORCID

Min-young Jo https://orcid.org/0009-0007-2915-3683
Jin-Han Lee https://orcid.org/0000-0001-9360-0635

References

1. Bansod AV, Pisulkar SG, Dahihandekar C. Enhancing esthetics in a complete denture patient: optimizing results with different impression techniques. Cureus 2022;14:e27565.
2. Goiato MC, Nóbrega AS, dos Santos DM, Andreotti AM, Moreno A. Effect of different solutions on color stability of acrylic resin-based dentures. Braz Oral Res 2014;28:S1806-83242013005000033.
3. Gregorius WC, Kattadiyil MT, Goodacre CJ, Roggenkamp CL, Powers JM, Paravina RD. Effects of ageing and staining on color of acrylic resin denture teeth. J Dent 2012;20 Suppl 2:e47-54.
4. Tallarico M. Computerization and digital workflow

in medicine: focus on digital dentistry. Materials (Basel) 2020;13:2172.
5. Baba NZ, Goodacre BJ, Goodacre CJ, Müller F, Wagner S. CAD/CAM complete denture systems and physical properties: a review of the literature. J Prosthodont 2021;30:113-24.
6. Chu SJ, Trushkowsky RD, Paravina RD. Dental color matching instruments and systems. Review of clinical and research aspects. J Dent 2010;38 Suppl 2:e2-16.
7. Rutkunas V, Sabaliauskas V, Mizutani H. Effects of different food colorants and polishing techniques on color stability of provisional prosthetic materials. Dent Mater J 2010;29:167-76.
8. Dayan C, Guven MC, Gencel B, Bural C. A comparison of the color stability of conventional and CAD/CAM polymethyl methacrylate denture base materials. Acta Stomatol Croat 2019;53:158-67.
9. Berger JC, Driscoll CF, Romberg E, Luo Q, Thompson G. Surface roughness of denture base acrylic resins after processing and after polishing. J Prosthodont 2006;15:180-6.
10. Kolbeck C, Rosentritt M, Lang R, Handel G. Discoloration of facing and restorative composites by UV-irradiation and staining food. Dent Mater 2006; 22:63-8.
11. Paravina RD, Ghinea R, Herrera LJ, Bona AD, Igiel C, Linninger M, Sakai M, Takahashi H, Tashkandi E, Perez Mdel M. Color difference thresholds in dentistry. J Esthet Restor Dent 2015;27 Suppl 1:S1-9.
12. Ruyter IE, Nilnet K, Moller B. Color stability of dental composite resin materials for crown and bridge veneers. Dent Mater 1987;3:246-51.
13. Hersek N, Canay S, Uzun G, Yildiz F. Color stability of denture base acrylic resins in three food colorants. J Prosthet Dent 1999;81:375-9.
14. Bitencourt SB, Catanoze IA, da Silva EVF, Dos Santos PH, Dos Santos DM, Turcio KHL, Guiotti AM. Effect of acidic beverages on surface roughness and color stability of artificial teeth and acrylic resin. J Adv Prosthodont 2020;12:55-60.
15. Altinci P, Durkaya P. Effects of thermocycling and various drinks on the color stability of heat-polymerized acrylic resin. J Istanb Univ Fac Dent 2016; 50:15-20.
16. Gad MM, Alshehri SZ, Alhamid SA, Albarrak A, Khan SQ, Alshahrani FA, Alqarawi FK. Water sorption, solubility, and translucency of 3D-printed denture base resins. Dent J (Basel) 2022;10:42.
17. Vaddamanu SK, Vyas R, Pati SK, Thakkar R, Kumar A, Badiyani BK. Effect of food colorants on color of denture base acrylic resins. J Pharm Bioallied Sci 2021;13 Suppl 1:S664-6.
18. Takhtdar M, Azizimoghadam N, Kalantari MH, Mohaghegh M. Effect of denture cleansers on color stability and surface roughness of denture bases fabricated from three different techniques: conventional heat-polymerizing, CAD/CAM additive, and CAD/CAM subtractive manufacturing. Clin Exp Dent Res 2023;9:840-50.
19. Çakmak G, Molinero-Mourelle P, De Paula MS, Akay C, Cuellar AR, Donmez MB, Yilmaz B. Surface roughness and color stability of 3D-printed denture base materials after simulated brushing and thermocycling. Materials (Basel) 2022;15:6441.
20. Bartoloni JA, Murchison DF, Wofford DT, Sarkar NK. Degree of conversion in denture base materials for varied polymerization techniques. J Oral Rehabil 2000;27:488-93.
21. Abualsaud R, Gad MM. Flexural strength of CAD/CAM denture base materials: systematic review and meta-analysis of In-vitro studies. J Int Soc Prev Community Dent 2022;12:160-70.
22. Alouthah H, Lippert F, Yang CC, Levon JA, Lin WS. Comparison of surface characteristics of denture base resin materials with two surface treatment protocols and simulated brushing. J Prosthodont 2025;34:58-67.
23. Gojzewski H, Guo Z, Grzelachowska W, Ridwan MG, Hempenius MA, Grijpma DW, Vancso GJ. Layer-by-layer printing of photopolymers in 3D: how weak is the Interface? ACS Appl Mater Interfaces 2020;12:8908-14.
24. Gruber S, Kamnoedboon P, Özcan M, Srinivasan M. CAD/CAM Complete denture resins: an in vitro evaluation of color stability. J Prosthodont 2021;30:430-9.
25. Falahchai M, Ghavami-Lahiji M, Rasaie V, Amin M, Neshandar Asli H. Comparison of mechanical

properties, surface roughness, and color stability of 3D-printed and conventional heat-polymerizing denture base materials. J Prosthet Dent 2023;130: 266.e1-8.
26. Alfouzan AF, Alotiabi HM, Labban N, Al-Otaibi HN, Al Taweel SM, AlShehri HA. Color stability of 3D-printed denture resins: effect of aging, mechanical brushing and immersion in staining medium. J Adv Prosthodont 2021;13:160-71.
27. Shin JW, Kim JE, Choi YJ, Shin SH, Nam NE, Shim JS, Lee KW. Evaluation of the color stability of 3D-printed crown and bridge materials against various sources of discoloration: an in vitro study. Materials (Basel) 2020;13:5359.
28. Zoidis P, Polychronakis N, Lagouvardos P, Polyzois G, Ngo HC. Evaluation of a realistic cleansing protocol for preventing discoloration of denture resins. J Prosthodont 2019;28:e89-95.
29. Saraf S, Mishra SK, Agrawal B. Effect of beverages, denture cleanser and chlorhexidine gluconate on surface roughness of flexible denture base material: an in vitro study. Eur Oral Res 2024;58:76-82.
30. Jang DE, Lee JY, Jang HS, Lee JJ, Son MK. Color stability, water sorption and cytotoxicity of thermoplastic acrylic resin for non-metal clasp denture. J Adv Prosthodont 2015;7:278-87.

절삭 및 적층 가공 방식과 열중합 방식으로 제작한 의치상 레진의 색안정성 비교

조민영 전공의, **이진한*** 교수
원광대학교 치과대학 치과보철학교실

목적: 절삭 가공(SM), 적층 가공(AM) 및 열중합(HC) 방식으로 제작한 의치상 레진을 착색용액에 침전시켜 색 변화를 통해 색안정성을 비교하고자 하였다.
연구 재료 및 방법: 각각의 방식으로 제작한 시편을 착색용액인 커피용액에 12일, 24일, 36일간 침전시킨 후 분광측색계로 색 변화(ΔE^*)를 측정하고, 일원배치 분산분석 및 반복측정 분산분석으로 통계 분석하였다.
결과: AM 군은 착색을 시행한 후 모든 시점에서 ΔE^*값이 가장 높게 나타났으며, SM 군과 HC 군 간에는 유의한 차이를 보이지 않았다. 모든 군에서 착색 전후 유의한 색 변화가 관찰되었고, AM 군은 착색 기간의 증가에 따라 ΔE^*가 지속적으로 상승한 반면, SM 군은 12일과 36일 간 차이만 유의했으며 HC 군은 기간별 차이가 없었다.
결론: 적층 가공 방식은 절삭 가공 방식과 열중합 방식에 비해 색안정성이 유의하게 낮았다. 절삭 가공 방식과 열중합 방식 간에는 유의한 차이가 없었다.

(구강회복응용과학지 2025;41(2):99-109)

주요어: 캐드캠; 의치상 레진; 색안정성; 착색; 분광측색법

*교신저자: 이진한
(35233)대전광역시 서구 둔산로 77 원광대학교 치과대학 대전치과병원 치과보철과
Tel: 042-366-1150 | Fax: 042-366-1115 | E-mail: dentist@empas.com
접수일: 2025년 4월 29일 | 수정일: 2025년 5월 7일 | 채택일: 2025년 5월 8일