https://doi.org/10.14368/jdras.2026.42.1.28
ISSN 2384-4353 eISSN 2384-4272

Original Article

Effects of light curing time on translucency change of composite resin

Sung-Joon Kim[1], Nayoung Oh[2], Jiyoung Song[1]*
[1]*Department of Dentistry, Jeju National University Hospital, Jeju National University College of Medicine, Jeju, Republic of Korea*
[2]*Department of Dentistry, Jeju National University Hospital, Jeju, Republic of Korea*

Purpose: This study aimed to measure and analyze the changes in translucency parameter (TP) of composite resins according to light-curing time in a time-series. **Materials and Methods:** Specimens (8 mm diameter, 2 mm thickness) of A2 shade Filtek Supreme Ultra, TPH Spectra, and Tetric EvoCeram composite resins were fabricated (5 specimens per group) and cured for four durations: 5 s, 10 s, 15 s, and 20 s. After initial measurements, specimens were stored in coffee solution and distilled water. TP was calculated after measurement using a spectrophotometer at 1, 2, 4, and 8 weeks. Statistical analysis was performed using repeated measures ANOVA and one-way ANOVA. **Results:** TP changes over time in coffee solutions were statistically significantly greater than those in distilled water for all materials. Longer curing times (≥ 15 seconds) showed more stable TP values over time, while shorter curing times resulted in greater translucency reduction. Filtek did not show a statistically significant interaction with curing time during distilled water storage ($P = 0.653$) but showed a significant interaction during coffee storage ($P < 0.001$). Tetric showed the greatest TP changes ($F = 969.624$) in coffee, responding most sensitively to curing time during storage period. **Conclusion:** Adequate light-curing of 15 seconds or longer is necessary for translucency stability of composite resins in the oral environment. Sufficient light-curing should be ensured for all materials, and nanohybrid composite resins require more thorough light-curing as they are most sensitive to curing conditions against staining. **(J Dent Rehabil Appl Sci 2026;42(1):28-38)**

Key words: composite resin; curing time; discoloration; polymerization; translucency

서론

치과 수복용 복합 레진은 자연치아와 유사한 투명도와 색조를 지니고 있어, 심미적인 수복이 필요한 다양한 임상 상황에서 널리 사용된다. 복합 레진의 광학적 성질은 심미적 수복의 성공을 좌우하는 핵심 요소로, 특히 투명도(translucency)와 색조 안정성(color stability)은 임상적으로 중요한 의미를 가진다. 투명도는 수복물이 자연치아의 외관을 모방하는 데 필수적인 광학적 특성으로, 재료 자체의 조성, 색조, 두께, aging 조건 그리고 광중합 시간과 같은 임상적 변수에 따라 변할 수 있고, 이러한 변화는 시간이 지남에 따라 광학적 안정성의 저하로 이어질 수 있어 환자의 만족도와 장기적인 임상 성공에 영향을 미친다.[1]

기존 연구에서 광중합 전 가열(45°C)이 복합 레진의 변색을 줄이는 것으로 나타났으며, 이는 중합도에 영향을 미쳤음을 시사한다.[2] 중합도와 관련하여 광중합 시간은 전환율(DC, degree of conversion)에 직접적인 영향을 미치며, 이는 색조 안정성뿐 아니라 투명도에 중요한 변수로 작용할 수 있다. 기존 연구[3]에서는 DC가 낮을수록 커피와 와인 침지 시 변색이 심해졌고, 중합시간이 광학적 안정성에 영향을 미쳐, 중합도가 높을수록 색조 안정성이 우수하다는 결과가 있었고, 이는 복합 레진 성분 차이와 연관이 있다. 불완전한 광중합으로 인한 잔류 단량

*Correspondence to: Jiyoung Song
Associate Professor, Department of Dentistry, Jeju National University Hospital, 15, Aran 13-gil, Jeju-si, Jeju-do, 63241, Republic of Korea
Tel: +82-64-717-1842, Fax: +82-64-717-1846, E-mail: 2460song@naver.com
Received: September 27, 2025/Last Revision: October 21, 2025/Accepted: November 9, 2025

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

체가 변색에 취약하다는 Costa 등[4]의 연구는 적절한 광중합이 복합 레진의 최적 기계적 및 광학적 성질을 얻기 위해 필수적임을 설명한다. 불완전한 중합은 잔류 미중합 단량체를 남겨 물 흡수 및 외부 물질 흡수를 증가시키고 구조적 변화를 야기하여 투명도 저하로 이어질 수 있다.[5] 복합 레진의 광중합 과정은 재료의 투명도 변화를 직접적으로 유발하고, 중합이 진행됨에 따라 레진 복합제는 투명해지는 경향이 있다.[6] 따라서 광중합 시간은 복합 레진의 중합도뿐만 아니라 투명도에도 직접적인 영향을 미쳐 수복물의 장기적인 심미적 성공에 매우 중요하다.

Costa 등은 네 가지 서로 다른 타입의 복합 레진을 분석하여 성분에 따른 색 변화 양상의 차이가 있다고 하였다.[4] 다른 연구에서 Micro-hybrid 복합 레진이 커피 착색에 대해 nano-hybrid 재료 보다 낮은 색 변화를 보였으며, 미백 시에도 Micro-hybrid 재료에서 미백 효과가 더 크게 나타나 resin matrix와 filler 성분 차이가 착색과 광학적 특성에 중요한 요인임을 나타냈다.[7] Paolone 등은 nano-hybrid resin 대상 실험의 착색 연구 설계에 따라 색 변화와 투명도가 모두 달라졌음을 보고하여, 재료와 임상 과정이 광학적 안정성에 큰 영향을 미친다고 하였다 [8].

Artificial aging 조건에 따라서 투명도 저하는 일관되게 보고되며, thermocycling 및 accelerated aging 후 임상 허용치를 초과하는 광학적 변화가 관찰되었고, 표면 광택 저하가 같이 발생한다고 하였다.[6,9] 연구에서는 착색 프로토콜이 연구마다 상이하다는 점을 지적하며, 색조와 투명도 평가 방법의 표준화 필요성을 강조하기도 했다.[10]

복합 레진의 수분 흡수와 용해도(solubility)가 높을수록 변색 증가와 함께 투명도 변화도 커진다고 하였다.[11] 수복물의 수분 흡수는 투명도 변화에 기여하는 요인으로, 레진 기질과 필러 계면의 결합을 약화시키고 미세 균열을 유도하여 구조적 균질성을 저해함으로써 투명도에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.[12] 따라서 적절한 광중합 시간을 통하여 최적의 DC를 확보하는 것은 복합 레진의 안정적인 투명도를 유지하고 장기적인 심미성을 보장하는 데 중요하다.

투명도와 더불어 복합 레진의 변색 또한 임상적 심미성을 저해하는 주요 원인 중 하나이다. 변색은 외인성 요인(음료, 약물)과 내인성 요인(레진 기질, 필러, 중합도, 미중합 레진 변성) 모두에 의해 발생한다.[10] 변색과 투명도 변화는 복합 레진의 심미성에 복합적으로 영향을 미치므로, 광중합 조건이 두 가지 광학적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 이해하는 것이 중요하다. 기존 연구에서 불투명한 재료가 빛 투과를 방해하여 깊이와 관련된 중합 문제를 야기할 수 있다며, 광중합 시간 조절을 통해 레진의 중합 정도를 구별하여 투명도와 변색 양상의 연구 의미를 제시하였다.[13]

복합 레진 수복 재료에 대한 광중합 조건과 색조 안정성 연구는 임상적으로 심미적 결과를 예측하는데 기여한다.[10] 그러나 대부분의 연구는 색조 안정성을 주요 지표로 삼았으며, 투명도 변화는 부수적으로만 다루어졌다. 특히 광중합시간이 투명도 변화에 미치는 직접적 영향과 추이를 체계적으로 규명한 연구는 부족하다.

본 연구는 광중합 시간 차이에 따른 복합 레진의 투명도 변화를 시계열로 측정하여 그 변화 양상을 비교 분석하여 임상적 예측 가능성을 알아보고, 이를 통해 복합 레진 수복의 심미적 성공률을 높이는 데 기여하고자 한다.

연구 재료 및 방법

실험에 사용된 A2 shade의 복합 레진은 Nanofilled composite인 Filtek Supreme Ultra (Filtek, 3M, Saint Paul, USA), Micro-hybrid인 TPH Spectra (Spectra, Dentsply Caulk, Milford, USA)와 Nanohybrid 성분의 Tetric EvoCeram (Tetric, Ivoclar Vivadent, Amherst, USA)이었고, 세부 사항은 Table 1과 같다.

시편은 직경 8 mm, 두께 2 mm의 원형 disc 형태가 제작되는 Vinyl Polysiloxane mold에 대상 복합 레진을 채우고, 1 mm 두께의 slide glass를 압착하였다. 각 시편과 top 부위를 구별하기 위하여 mold 음형 측면에 index와 line을 형성하였다. 670 mW/cm^2 출력의 광중합기(Kerr Demi Plus; Kerr, USA)를 사용하여 각각 4가지 중합시간(5초, 10초, 15초, 20초)으로 중합하였다. 각 군별로 시편을 5개씩 제작하였으며, 중합 후 Enhance/Pogo system (Dentsply Caulk)을 사용하여 연마하였다. 모든 시편을 물로 세척 후, 착색 용액에 침지 전에 초기 색 측정을 시행하였다(0주). 이후 완전한 중합을 위해 37°C에서 24시간 증류수에 보관하였다. 분광 광도계(spectrophotometer)인 CM-700d (Konica Minolta, Tokyo, Japan)로 측정하였다. 3 mm 측정경, D65 (daylight), 2-degree standard colorimetric observer, SCE 모드를 설정하였고, 매 측정 전에 calibration을 시행하였다. 시편과 배경 타일 사이의 optical contact을 위해 증류수(refractive index of 1.33)를 매개물로 사용하였다.[14] 복합 레진을 침지, 보관하는 착색용액으로 커피(Nescafe

Table 1. Characteristics of the composite resins in the study

Composite	Type	Monomer*	Filler content		Manufacturer
			wt%	vol%	
Filtek Supreme Ultra	Nanofilled	Bis-GMA, UDMA, TEGDMA, Bis-EMA, PEGDMA	78.5	63.3	3M, Saint Paul, USA
TPH Spectra	Micro-hybrid	Urethane modified Bis-GMA resin, TEGDMA	75.5	54.6	Dentsply Caulk, Milford, USA
Tetric EvoCeram	Nanohybrid	Bis-GMA, Bis-EMA, UDMA	75.0	53.0	Ivoclar Vivadent, Amherst, USA

* UDMA, Urethane dimetacrylate; TEGDMA, Triethylene glycol dimethacrylate; Bis-GMA, Bisphenol A diglycidylmethacrylate; Bis-EMA, Bisphenol A polyethylene glycol diether dimetacrylate; PEGDMA, Polyethylene glycol dimethacrylate.

Clasico Dark Roast packets, Burbank, USA)를, 대조군으로 증류수를 사용하였다. 시편은 37°C, 빛이 차단된 환경에서 착색 용액에 8주간 보관하였으며, 1주마다 새 용액으로 교체하였다. 각각 1주, 2주, 4주, 8주 보관 시점에 각 레진 시편을 세척한 후, top의 중앙 부분으로 CIE (국제조명위원회; Commission Internationale de l' Eclairage) L*, a*, b* 측정값을 얻었다. 측정 배경판으로 백색 타일(L* = 90.51, a* = 0.05, b* = 2.00)과 흑색 타일(L* = 6.29, a* = 0.05, b* = -0.13)을 사용하였다. 재료의 Translucency Parameter (TP)는 다음 식으로 계산되었다.

$$TP = [(L_W^* - L_B^*)^2 + (a_W^* - a_B^*)^2 + (b_W^* - b_B^*)^2]^{1/2}$$

아래 첨자 W와 B는 각각 백색 배경과 흑색 배경에서의 측정값이며, 계산된 TP는 흑색과 백색 배경에서 시편의 색차를 의미하여 숫자가 클수록 투명함을 의미하고, 불투명 재료의 경우는 TP가 0이 된다.

각 재료(3개)와 보관용액(2개)에서 TP변화에 대한 중합 시간(4개)과 보관기간의 상호작용 효과(interaction effect)을 검증하기 위해 반복 측정 분산 분석(Repeated measures ANOVA)을 시행하였고, 사후분석은 Bonferroni test를 시행하였다. 동일 보관기간의 침지 용액에서 재료별의 TP차이는 one-way ANOVA로 분석하였고, Scheffe와 Dunnett T3로 사후검정 하였다. 유의수준 0.05에서 통계 프로그램(IBM SPSS statistics ver. 25.0, IBM Co. Armonk, USA)을 이용하였다.

결과

물과 커피에 보관한 각 복합 레진의 중합 시간과 보관기간에 따른 TP의 반복측정 분산분석 결과는 Table 2와 같다.

커피 저장용액에서 Filtek 복합 레진의 보관 기간 주효과에 따른 TP차이는 통계적으로 유의하였다($F = 761.706$, $P < 0.001$). 물 저장에서의 결과($F = 4.968$, $P = 0.020$)와 비교하여 큰 통계적 유의성을 보였다. 중합 시간과 보관 기간의 상호작용효과 역시 통계적으로 유의하였다($F = 7.478$, $P < 0.001$). 이는 물 저장에서 상호작용이 없었던 것($P = 0.653$)과 다르게 나타나, 커피 환경에서는 중합 시간에 따라 보관 기간별 변화 양상이 통계적으로 유의한 차이가 있었다. Spectra에서는 보관 기간의 주효과에 따른 TP차이는 통계적으로 유의하였다($F = 254.365$, $P < 0.001$). 물 저장에서도 높은 F값(94.382)을 보였으나, 커피 환경에서는 더욱 증가하였다. 중합 방법과 보관 기간의 상호작용효과도 통계적으로 유의하였다($F = 8.959$, $P < 0.001$). Tetric에서 보관 기간의 주효과에 따른 TP차이는 통계적으로 유의하였다($F = 969.624$, $P < 0.001$). 물 저장용액에서의 결과($F = 5.765$)와 비교하여 더 통계적 차이를 나타냈다. 중합 시간과 보관 기간의 상호작용효과도 통계적으로 유의하였다($F = 12.564$, $P < 0.001$). 커피 저장용액에서의 반복측정 분산분석 결과는 물 침지와 비교하여 다음과 같은 차이를 보였다. 모든 재료에서 보관 기간에 따른 TP차이의 통계적 유의성이 물 대비 현저히 증가하였다. 특히 Tetric ($F = 969.624$)이 가장 큰 변화를 보였고, Filtek ($F = 761.706$), Spectra ($F = 254.365$) 순이었다. 물에서 상호작용이 없었던 Filtek도 커피에서는 유의한 상호작용($F = 7.478$, $P < 0.001$)을 보였다. Spectra와 Tetric에서는 기존 상호작용이 더욱 강화되었다(각각 $F = 8.959$, $F = 12.564$). 보관 기간 효과의 크기를 비교하면, Tetric이 커피 환경에 가장 민감하게 반응하였고(약 168배 증가), Filtek (약 153배 증가),

Table 2. Repeated measures analysis of variance for Translucency parameter changes according to curing time and storage period

		Source	SS	df	MS	F	*P*
Water	Filtek	Storage Period	7.141	1.630	4.381	4.968	0.020*
		Curing*Storage	2.852	4.889	0.583	0.661	0.653
		Error	22.997	26.075	0.882		
	Spectra	Storage Period	104.485	4	26.121	94.382	0.000***
		Curing*Storage	8.469	12	.706	2.550	0.008**
		Error	17.713	64	.277		
	Tetric	Storage Period	5.218	4	1.305	5.765	0.001**
		Curing*Storage	13.226	12	1.102	4.871	0.000***
		Error	14.483	64	.226		
Coffee	Filtek	Storage Period	1099.694	4.000	274.923	761.706	0.000***
		Curing*Storage	32.388	12	2.699	7.478	0.000***
		Error	23.100	64	.361		
	Spectra	Storage Period	642.275	2.381	269.792	254.365	0.000***
		Curing*Storage	67.868	7.142	9.503	8.959	0.000***
		Error	40.400	38.090	1.061		
	Tetric	Storage Period	1450.039	4	362.510	969.624	0.000***
		Curing*Storage	56.368	12	4.697	12.564	0.000***
		Error	23.927	64	.374		

*$P < 0.05$, **$P < 0.01$, ***$P < 0.001$ by Repeated measures ANOVA.

Spectra (약 2.7배 증가) 순이었다.

각 보관 용액에 각 중합 시간 별 보관 기간에 대한 복합 레진의 TP와 반복측정 분산분석의 사후분석 결과는 Table 3과 같다. 물에서 Filtek은 사후분석 시 모든 보관 기간에서 통계적으로 유의한 차이는 없었다. Spectra는 사후분석 결과, 5초 중합 시 0-1주, 2-4-8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 높아졌다. 10초 중합 시 0주, 1-2주, 4-8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 높아졌다. 15초 중합 시 0-2주와 1-4-8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 20초 중합 시 0-1-2주와 4-8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 높아졌다. Tetric은 사후분석 결과, 5초 중합 시 0-1-2-4주와 8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. 10초 중합 시 0-1-2-8주, 4주가 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 15초와 20초 중합 시에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다. Spectra와 Tetric의 TP는 중합 시간에 따라 그 변화 양상이 다르게 나타났다.

커피에서 Filtek은 사후분석 결과 5초 중합 시 0주, 1-2주, 4-8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. 10초 중합 시 0주, 1-2-4주, 8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. 15초와 20초 중합 시 0주, 1-2주, 4-8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. Spectra는 사후분석 결과, 5초 중합 시 0주, 1-2주, 4주, 8주가 각각 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. 10초와 15초 중합 시 0주, 1-2-4주, 8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. 20초 중합 시 0-1-2-4주와 8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. Tetric은 사후분석 결과, 5초 중합 시 0주, 1-2주, 4-8주가 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. 10초 중합 시 0주, 1주, 2주, 4-8주가 각각 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. 15초 중합 시 0주, 1주, 2-4주, 8주가 각각 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. 20초 중합 시 0주, 1-2주, 4주, 8주가 각각 통계적으로 유의한 차이를 보였고 TP는 낮아졌다. 중합시간에 따른 TP 차이는 각각 다양하게 나타났다(Fig. 1).

TP를 중합시간별로 one-way ANOVA와 사후검정을 시행한 결과는 Table 4와 같다. 물 저장시 Filtek은 2주 보관 이후부터 중합 시간별로 TP가 통계적으로 유의한 차이를 보였고, 중합 시간이 길수록 동일 시점에서 TP가 낮은 경향을 보였다. Spectra는 물에서는 중합 시간에 따른 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. Tetric은 4

Table 3. Translucency parameter for each material according to storage period

Solution	Product	Curing time	TP by storage period (Mean ± SD)				
			0 w	1 w	2 w	4 w	8 w
Water	Filtek	5 s	14.70 ± 0.39^{a}	13.94 ± 2.44^{a}	15.13 ± 0.75^{a}	15.06 ± 0.74^{a}	14.94 ± 0.58^{a}
		10 s	14.01 ± 0.38^{a}	13.63 ± 0.83^{a}	14.20 ± 0.42^{a}	14.36 ± 0.56^{a}	14.50 ± 0.28^{a}
		15 s	13.84 ± 0.55^{a}	13.79 ± 0.43^{a}	13.71 ± 0.59^{a}	13.98 ± 0.40^{a}	13.91 ± 0.52^{a}
		20 s	14.28 ± 0.88^{a}	13.69 ± 0.75^{a}	14.49 ± 0.41^{a}	14.33 ± 0.38^{a}	14.68 ± 0.40^{a}
	Spectra	5 s	15.95 ± 0.90^{b}	16.82 ± 0.83^{b}	18.23 ± 0.95^{a}	19.03 ± 1.06^{a}	18.54 ± 0.60^{a}
		10 s	16.02 ± 0.41^{c}	17.13 ± 0.60^{b}	17.77 ± 0.83^{b}	18.74 ± 0.93^{a}	18.79 ± 0.94^{a}
		15 s	16.68 ± 0.48^{b}	17.09 ± 0.77^{a}	17.53 ± 0.88^{b}	18.09 ± 1.00^{a}	18.89 ± 1.02^{a}
		20 s	15.58 ± 1.13^{b}	17.43 ± 0.72^{b}	17.78 ± 0.50^{b}	18.72 ± 1.28^{a}	19.10 ± 0.66^{a}
	Tetric	5 s	17.43 ± 0.82^{a}	17.33 ± 1.21^{a}	16.67 ± 0.99^{a}	15.80 ± 0.74^{a}	15.59 ± 1.12^{b}
		10 s	18.04 ± 0.90^{a}	18.18 ± 0.80^{a}	17.90 ± 0.29^{a}	17.63 ± 0.71^{b}	17.32 ± 0.53^{a}
		15 s	17.42 ± 0.60^{a}	16.89 ± 0.93^{a}	17.40 ± 1.38^{a}	17.13 ± 1.33^{a}	17.33 ± 1.00^{a}
		20 s	17.50 ± 0.74^{a}	17.75 ± 0.97^{a}	17.47 ± 0.99^{a}	17.76 ± 0.99^{a}	17.92 ± 0.64^{a}
Coffee	Filtek	5 s	14.37 ± 0.74^{a}	6.39 ± 0.81^{b}	5.13 ± 1.15^{b}	3.76 ± 0.51^{c}	2.68 ± 0.99^{c}
		10 s	13.84 ± 0.31^{a}	7.05 ± 0.92^{b}	6.14 ± 0.58^{b}	5.29 ± 0.51^{b}	4.42 ± 0.44^{c}
		15 s	14.01 ± 0.59^{a}	8.87 ± 0.43^{b}	7.39 ± 0.33^{b}	6.22 ± 0.51^{c}	5.42 ± 0.41^{c}
		20 s	13.71 ± 1.00^{a}	9.08 ± 0.93^{b}	8.24 ± 0.72^{b}	6.76 ± 0.69^{c}	5.81 ± 0.49^{c}
	Spectra	5 s	16.34 ± 0.49^{a}	8.93 ± 0.74^{b}	7.69 ± 0.56^{b}	7.19 ± 0.61^{c}	5.74 ± 0.72^{d}
		10 s	16.57 ± 1.01^{a}	11.04 ± 1.03^{b}	10.27 ± 1.57^{b}	9.96 ± 0.64^{b}	8.46 ± 0.46^{c}
		15 s	15.38 ± 0.99^{a}	12.27 ± 0.87^{b}	10.81 ± 0.92^{b}	10.58 ± 1.03^{b}	9.58 ± 0.69^{c}
		20 s	15.57 ± 2.01^{a}	12.06 ± 0.84^{a}	11.99 ± 0.37^{a}	11.63 ± 0.56^{a}	10.79 ± 0.37^{b}
	Tetric	5 s	18.01 ± 0.53^{a}	9.53 ± 0.86^{b}	7.81 ± 1.16^{b}	5.40 ± 0.81^{c}	3.74 ± 0.70^{c}
		10 s	17.60 ± 0.60^{a}	11.60 ± 0.66^{b}	9.89 ± 0.93^{c}	7.96 ± 1.09^{d}	6.90 ± 1.49^{d}
		15 s	17.26 ± 0.46^{a}	11.83 ± 0.45^{b}	10.20 ± 0.57^{c}	8.82 ± 0.61^{c}	7.05 ± 0.61^{d}
		20 s	17.27 ± 1.10^{a}	12.74 ± 1.01^{b}	11.85 ± 0.58^{b}	10.09 ± 0.83^{c}	8.25 ± 1.04^{d}

SD, standard deviation.
Same superscript within a row means no significant difference (post-hoc test).

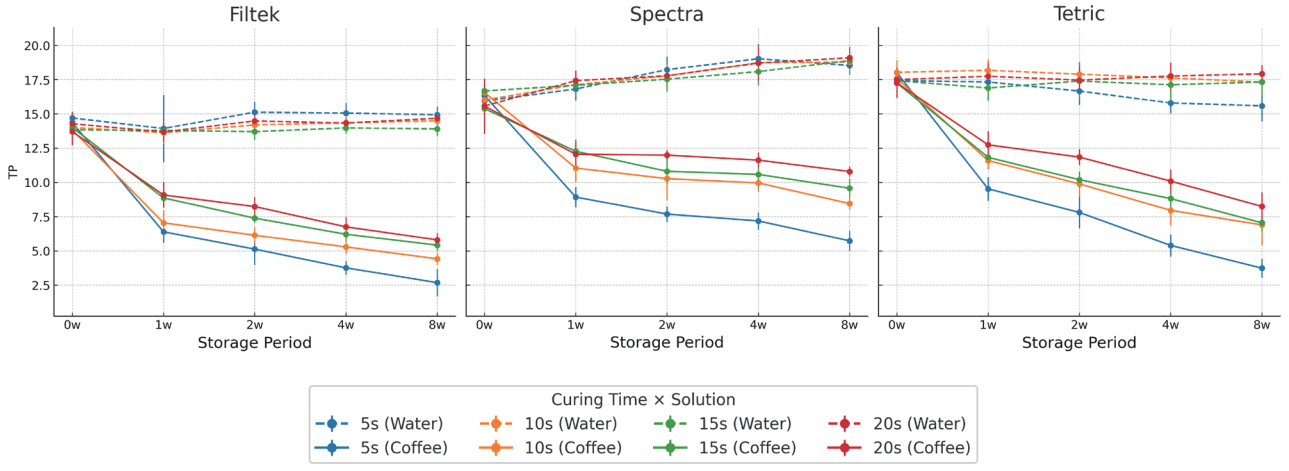


Fig. 1. Graph of TP changes over storage period.

Table 4. Translucency parameter for each material according to polymerization time

Solution	Product	Period	TP by each curing time (Mean ± SD)				F-statistic	*P* value
			5 s	10 s	15 s	20 s		
Water	Filtek	0 w	14.70 ± 0.39[a]	14.01 ± 0.38[a]	13.84 ± 0.55[a]	14.28 ± 0.88[a]	2.048	0.148
		1 w	13.94 ± 2.44[a]	13.63 ± 0.83[a]	13.79 ± 0.43[a]	13.69 ± 0.75[a]	0.049	0.985
		2 w	15.13 ± 0.75[a]	14.20 ± 0.42[a]	13.71 ± 0.59[b]	14.49 ± 0.41[a]	5.540	0.008**
		4 w	15.06 ± 0.74[a]	14.36 ± 0.56[ab]	13.98 ± 0.40[b]	14.33 ± 0.38[ab]	3.525	0.039*
		8 w	14.94 ± 0.58[a]	14.50 ± 0.28[ab]	13.91 ± 0.52[b]	14.68 ± 0.40[ab]	4.549	0.017*
	Spectra	0 w	15.95 ± 0.90[a]	16.02 ± 0.41[a]	16.68 ± 0.48[a]	15.58 ± 1.13[a]	1.675	0.212
		1 w	16.82 ± 0.83[a]	17.13 ± 0.60[a]	17.09 ± 0.77[a]	17.43 ± 0.72[a]	0.578	0.638
		2 w	18.23 ± 0.95[a]	17.77 ± 0.83[a]	17.53 ± 0.88[a]	17.78 ± 0.50[a]	0.649	0.595
		4 w	19.03 ± 1.06[a]	18.74 ± 0.93[a]	18.09 ± 1.00[a]	18.72 ± 1.28[a]	0.680	0.577
		8 w	18.54 ± 0.60[a]	18.79 ± 0.94[a]	18.89 ± 1.02[a]	19.10 ± 0.66[a]	0.393	0.760
	Tetric	0 w	17.43 ± 0.82[a]	18.04 ± 0.90[a]	17.42 ± 0.60[a]	17.50 ± 0.74[a]	0.725	0.552
		1 w	17.33 ± 1.21[a]	18.18 ± 0.80[a]	16.89 ± 0.93[a]	17.75 ± 0.97[a]	1.546	0.241
		2 w	16.67 ± 0.99[a]	17.90 ± 0.29[a]	17.40 ± 1.38[a]	17.47 ± 0.99[a]	1.313	0.305
		4 w	15.80 ± 0.74[a]	17.63 ± 0.71[ab]	17.13 ± 1.33[ab]	17.76 ± 0.99[b]	4.231	0.022*
		8 w	15.59 ± 1.12[a]	17.32 ± 0.53[b]	17.33 ± 1.00[b]	17.92 ± 0.64[b]	6.897	0.003**
Coffee	Filtek	0 w	14.37 ± 0.74[a]	13.84 ± 0.31[a]	14.01 ± 0.59[a]	13.71 ± 1.00[a]	0.835	0.494
		1 w	6.39 ± 0.81[a]	7.05 ± 0.92[a]	8.87 ± 0.43[b]	9.08 ± 0.93[b]	13.903	< 0.001***
		2 w	5.13 ± 1.15[a]	6.14 ± 0.58[a]	7.39 ± 0.33[b]	8.24 ± 0.72[b]	16.471	< 0.001***
		4 w	3.76 ± 0.51[a]	5.29 ± 0.51[b]	6.22 ± 0.51[b]	6.76 ± 0.69[c]	27.117	< 0.001***
		8 w	2.68 ± 0.99[a]	4.42 ± 0.44[b]	5.42 ± 0.41[bc]	5.81 ± 0.49[c]	24.563	< 0.001***
	Spectra	0 w	16.34 ± 0.49[a]	16.57 ± 1.01[a]	15.38 ± 0.99[a]	15.57 ± 2.01[a]	1.055	0.396
		1 w	8.93 ± 0.74[a]	11.04 ± 1.03[b]	12.27 ± 0.87[b]	12.06 ± 0.84[b]	15.184	< 0.001***
		2 w	7.69 ± 0.56[a]	10.27 ± 1.57[b]	10.81 ± 0.92[b]	11.99 ± 0.37[b]	17.579	< 0.001***
		4 w	7.19 ± 0.61[a]	9.96 ± 0.64[b]	10.58 ± 1.03[bc]	11.63 ± 0.56[c]	33.392	< 0.001***
		8 w	5.74 ± 0.72[a]	8.46 ± 0.46[b]	9.58 ± 0.69[c]	10.79 ± 0.37[d]	68.794	< 0.001***
	Tetric	0 w	18.01 ± 0.53[a]	17.60 ± 0.60[a]	17.26 ± 0.46[a]	17.27 ± 1.10[a]	1.228	0.332
		1 w	9.53 ± 0.86[a]	11.60 ± 0.66[b]	11.83 ± 0.45[b]	12.74 ± 1.01[b]	15.336	< 0.001***
		2 w	7.81 ± 1.16[a]	9.89 ± 0.93[b]	10.20 ± 0.57[b]	11.85 ± 0.58[c]	19.265	< 0.001***
		4 w	5.40 ± 0.81[a]	7.96 ± 1.09[b]	8.82 ± 0.61[bc]	10.09 ± 0.83[c]	27.201	< 0.001***
		8 w	3.74 ± 0.70[a]	6.90 ± 1.49[b]	7.05 ± 0.61[b]	8.25 ± 1.04[b]	17.772	< 0.001***

SD, standard deviation.
*$P < 0.05$, **$P < 0.01$,***$P < 0.001$ by One-way ANOVA.
Same superscript within a row means no significant difference (post-hoc test).

주 보관 이후부터 중합 시간별로 TP가 통계적으로 유의한 차이를 보였고, Filtek과 달리 중합 시간이 길수록 동일 시점에서 TP가 높은 경향을 보였다.

커피 저장 시 Filtek은 1주 보관 이후부터 중합 시간별로 TP가 통계적으로 유의한 차이를 보였고, 보관 기간이 길어질수록 그 차이가 컸다. 물 저장과는 달리 중합 시간이 길수록 동일시점에서 TP가 높은 경향을 보였다. Spectra는 1주 보관 이후부터 중합 시간별로 TP가 통계적으로 유의한 차이를 보였고, 보관 기간이 길어질수록 그 차이가 컸으며 중합 시간이 길수록 동일시점에서 TP가 높은 경향을 보였다. Tetric 또한 1주 저장 이후부터 중합 시간별로 TP가 통계적으로 유의한 차이를 보였고, 보관 기간이 길어질수록 그 차이가 컸으나 8주차에는 감소하였고, 앞선 재료들처럼 중합 시간이 길수록 동일시점에서 TP가 높은 경향을 보이는 것은 일치하였다.

용액과 재료에 무관하게, 보관 기간 경과에도 안정적

으로 높은 TP 유지를 위해서는 15초 이상의 중합시간이 필요한 것으로 관찰되었다. 물 저장에서는 차이는 있으나 절대 변화 폭이 상대적으로 작았고, 커피 저장 조건에서 중합시간 효과가 더 크게 드러나며 중합시간이 짧을수록 감소 큰 감소폭을 보였다(Fig. 1).

고찰

다양한 종류의 복합 레진 수복 재료에 대한 광중합 시간과 색조 안정성 연구는 임상의가 장기적인 심미적 결과와 기대치를 예측하는 데 도움을 줄 수 있다.[10] 이는 복합 레진 수복물의 심미적 내구성을 예측하고, 환자의 만족도를 높이며 불필요한 수복물 교체를 줄이는 데 기여한다. 투명도 변화는 복합 레진의 심미성에 복합적으로 영향을 미치므로, 광중합 조건과 광학적 특성의 관계를 이해하는 것이 필요하다. 본 연구는 광중합 시간과 복합 레진의 투명도 변화의 관계를 파악하고자 수행되었다. 기존 연구들이 주로 색조 안정성에 초점을 맞춘 것과 달리, TP를 주요 지표로 하여 광중합 시간과 착색 환경의 상호작용을 시계열적으로 분석하였다.

연구 결과, 광중합 시간이 15초 이상일 때 복합 레진의 투명도가 장기간 더 안정적으로 유지되었으며, 특히 커피 착색 환경에서 이러한 차이가 컸다. 이러한 현상은 복합 레진의 광중합 메커니즘과 밀접한 관련이 있다. 광중합 과정은 광개시제(camphorquinone)의 흡광→여기→자유라디칼 생성→이중결합 개환→공중합망 형성의 연쇄반응으로 일어나며 이 과정에서 조사량(J/cm² = 강도 × 시간)이 클수록 DC가 증가하며, 이는 투명도 유지에 직접적인 영향을 미친다.[15]

기존 연구[3]에서 DC가 낮을수록 커피와 와인 침지 시 변색이 심해졌고, 중합시간이 광학적 안정성에 영향을 미쳐, DC가 높을수록 색조 안정성이 우수하다는 보고가 있었다. 이는 복합 레진 성분 차이와 연관이 있고, 불완전한 광중합으로 인한 잔류 단량체가 변색에 취약하다는 Costa 등의 연구[4]는 적절한 광중합이 복합 레진의 최적 기계적 및 광학적 성질을 얻기 위해 필수적이라고 하였다. Howard 등[16]의 연구에서 보고한 바와 같이, 광중합 과정에서 DC가 증가할수록 복합 레진의 광학적 성질이 개선되며, 충분한 중합이 이루어지지 않을 경우 광 산란이 지속되어 투명도가 저하된다. 본 연구에서 관찰된 5초 및 10초 중합 시편의 급격한 투명도 저하는 불완전한 중합으로 인한 잔류 단량체의 존재와 관련 있다. 불완전한 중합은 잔류 미중합 단량체를 남겨 물 또는 외부 물질 흡수를 증가시키고 구조적 변화를 야기하여 궁극적으로 투명도 저하로 이어질 수 있다.[5]

복합 레진 색조 연구 관련 측색 표준은 확립되지 않아서 연구자 각자의 설계에 따라 수행되어 왔고, 색 변화 측정 기간의 기준 또한 명확히 정립되지 않았다.[10] 기간 경과에 따른 색조 변화와 연구 시 accelerated aging 방법으로 다수의 연구들이 이뤄졌는데, in vitro에서 24시간 동안 용액에 시편을 침지하는 것은 구강 내에서 1개월 정도의 기간효과가 있다고 하였다.[17,18] 다른 연구에서도 복합 레진을 커피에 24시간 침지하는 것은 임상에서 1개월 기간과 유사하였다.[19] 이는 다른 연구자들이 임상 기간 8년을 테스트하기 위해 99일 동안 재료를 커피에 침지 하였던 것으로 확인하였다.[20,21] 이러한 연구들을 근거로 침지 기간은 실제 임상에서 대략 30배 기간을 의미한다 할 수 있어, 본 연구의 1주는 30주의 임상 기간에 해당하고, 2주는 60주, 4주는 120주, 8주는 240주로 대략 5년 정도의 임상 기간으로 연관 지어 볼 수 있다.

반복측정 분산분석의 사후분석 결과에서 나타난 복합 레진의 aging 과정의 기간별 투명도 변화 패턴은 다양하게 나타났다. 커피 환경에서 대부분의 재료가 1주차부터 유의한 TP 감소를 보인 것은 착색 분자의 초기 침투가 매우 빠르게 일어남을 의미한다. 특히 중합 시간이 짧을수록 이러한 초기 변화가 더욱 급격하게 나타났으며, 이는 임상적으로 수복 후 초기 관리의 중요성을 강조한다. 반면 15초와 20초 중합 시편에서는 4주 이후 투명도 변화가 상대적으로 완만해지는 경향을 보였다. 이는 충분한 중합을 통해 형성된 안정적인 중합체가 장기간에 걸쳐 착색 분자의 영향을 줄였음을 의미한다. 복합 레진의 광중합 과정은 재료의 투명도 변화를 직접적으로 유발할 수 있으며, 중합이 진행됨에 따라 레진 복합제는 투명해지는 경향이 있다.[6] 따라서 광중합 시간은 복합 레진의 중합도 뿐만 아니라 투명도에도 직접적인 영향을 미쳐 수복물의 장기적인 심미적 성공에 중요하다. Silikas 등[22]은 광조사 강도와 중합 시간이 복합 레진의 DC에 미치는 영향을 보고하였으며, 불충분한 광중합이 재료의 물리화학적 안정성을 저해한다고 하였다. 본 연구 결과는 이러한 개념을 투명도 관점에서, 15초 이상의 충분한 광중합이 복합 레진 수복물의 광학적 안정성에 기여함을 보여주었다.

Filtek Supreme Ultra는 nanofilled composite로서 증류수 환경에서 Filtek은 중합 시간과 보관 기간의 상호

작용이 관찰되지 않았으나(P = 0.653), 커피 환경에서는 유의한 상호작용을 보였다(F = 7.478, P < 0.001). nanofilled 구조의 특징은 나노 크기 필러가 가시광선 파장(380 - 700 nm)보다 작을 때 Rayleigh 산란이 최소화되어 우수한 투명도를 제공하지만, 불완전한 중합으로 인해 레진 기질과 필러 간의 굴절률 불일치가 증가하면 이러한 장점이 상쇄되어 투명도가 저하되고, 착색 물질의 흡착은 미중합 단량체에 의해 가속되며, 이는 급격한 TP 감소를 설명한다.[23]

TPH Spectra는 전통적인 micro-hybrid 복합 레진으로, 본 연구에서 Spectra는 모든 조건에서 보관기간에 따른 유의한 변화를 보였으며, 특히 커피 환경에서 중합시간과 보관기간의 강한 상호작용을 나타냈다(F = 8.959, P < 0.001). 다른 연구에서 Micro-hybrid인 Filtek Z250이 커피 착색에 대해 nano-hybrid인 Filtek Z550보다 낮은 색 변화를 보였으며, 미백 시에도 Micro-hybrid 재료에서 미백 효과가 더 크게 나타내기도 했다.[7] Spectra가 다른 재료와 달리 증류수 환경에서 시간이 지남에 따라 TP가 증가하는 경향을 보인 것으로 micro-hybrid 필러 시스템의 특성과 관련 있을 수 있다. micro-hybrid에서는 표면 공극의 공기가 다른 착색 성분이 아닌 증류수로 잘 치환되어 산란율이 감소되어 투명도가 증가한 것으로 추정할 수 있으나, 이는 그 외 성분과도 연관되어 있을 수 있으므로 추가연구가 필요할 것이다.

Tetric EvoCeram은 nanohybrid 복합 레진으로, 커피 환경에서 F = 969.624라는 매우 높은 값을 기록하여 착색 환경에서 중합 조건에 가장 민감하게 반응함을 보였다. 복합 레진의 수분 흡수와 용해도가 높을수록 변색 증가와 함께 투명도 변화도 커진다는 보고[11]와 연관하여 설명할 수 있다. 또한 레진 기질과 필러 계면의 결합을 약화시키고 미세 균열을 유도하여 구조적 균질성을 저해한 것이 투명도 변화에 영향을 준 것으로 보인다.[12] Tetric의 nanohybrid 구조는 40 nm의 Ba-Al-F-Si glass와 200 nm의 ytterbium trifluoride, 그리고 160 nm의 mixed oxide가 복합된 형태로, 이러한 다양한 크기와 조성의 필러들은 우수한 기계적 성질을 제공하지만, 불완전한 중합 시 과도한 불소 방출이 레진 기질을 약화시켜 투명도에 부정적 영향을 미칠 수 있다.[24]

세 복합 레진의 2 mm 중합 권장시간은 표준 광조사기를 사용하여 중합시 20초를, 고출력의 LED (> 1000 mW/cm^2)를 사용하여 중합시 10초를 권장하고 있다. 본 실험은 표준 광조사기를 사용하였으므로 중합시간 20초의 제조사 권장 사항과 비교해 볼 수 있다. 본 연구 목적인 투명도 관점에서는 15초 이상의 중합시간을 기준 삼을 수 있으나, 실제 임상에서의 중합 시간은 여러 물성의 최적화를 고려한 결정이 필요할 것이다.

본 연구는 여러 기존 연구들과 일치하는 양상을 보였다. Artificial aging 조건에 따라서 투명도 저하는 일관되게 보고되었는데, thermocycling 및 accelerated aging 후 임상 허용치를 초과하는 광학적 변화와 표면 광택 저하가 같이 발생한다고도 하였다.[6,9] Costa 등은 네 가지 서로 다른 타입의 복합 레진을 분석한 결과 Nanofilled composite resin은 일반적으로 색 변화에 강하지만 surface pre-reacted glass-based nanohybrid는 수분 확산 및 이온 방출 메커니즘으로 인해 높은 색상 변화를, nanohybrid 복합 레진은 높은 중합도와 우수한 색조 안정성을 보였고 Nanofilled Composite는 투명도 변화가 안정되어 성분에 따른 차이가 있다고 하였다.[4] Nurrohman 등[25]의 연구에서도 커피와 적포도주 착색 후 복합 레진의 TP가 유의하게 감소하였다고 보고하였으며, 이는 본 연구에서 관찰된 커피 환경에서의 TP 저하와 일치한다.

본 연구는 기존 연구들과 몇 가지 방법적 차이점을 보인다. 많은 선행 연구들[26,27]이 색상 변화(ΔE)에 주목한 반면, 본 연구는 투명도 변화를 대상으로 광중합 조건의 영향을 분석하였다. Yoon 등[28]의 연구가 서로 다른 광원의 영향을 비교한 것과 달리, 본 연구는 동일한 광원에서 중합 시간의 차이가 미치는 영향을 보고자 하였다.

복합 레진의 광중합 시간에 따른 투명도 관련 연구는 다음과 같은 한계점을 가지고 있다. 재료의 광학 연구 시 일부 재료는 제조사에서 필러 함량 등 상세 정보가 공개되지 않아 특성 분석에 한계가 있다.[4] Shin과 Rawls[29]의 연구에서 보고한 바와 같이, 복합 레진의 색조와 투명도는 재료의 조성과 밀접한 관련이 있어 광중합 반응에도 영향을 미칠 수 있다. 대다수 복합 레진의 광학 연구가 in vitro 연구로서, 구강 내 복잡한 환경을 완벽히 재현하는 데 한계가 있고, 장기적인 in vivo 연구와 차이가 있을 수 있다. 시간 경과에 따른 수복물의 표면 변화는 표면 산란을 증가시켜 TP에 직접적인 영향을 주므로, 광택도(gloss) 측정을 병행하지 못한 것 역시 본 연구의 한계점이다. 실험 설계상 3개 제품의 단일 색조(A2)를 대상으로 한 점은 일반화에 한계가 있다. 또한, 8주간의 실험 기간의 5년 정도의 구강내 환경 측정으로 장기적인 임상 결과를 예측하기에는 부족할 수 있다. 그러나 광중합 시간과 복합 레진의 투명도 변화를 시계열로 측정하여 분석하여

데 의의가 있다.

향후 인공지능 발전으로 광조사량, 재료 조성, 재료 두께, 표면 상태, 환자의 착색 음료 섭취 습관 등을 입력 변수로 하여 색차, TP, 광택도의 시계열 변화를 예측하는 예측 모델 개발이 가능한 시기가 오기를 기대해 본다.

결론

착색성 음료에 노출되는 구강 내에서 중장기적으로 수복물의 투명도 안정성을 위해 15초 이상의 충분한 광중합이 필요하다. Nanofilled composite이 상대적으로 안정적인 투명도를 유지하였으나, 모든 재료에서 충분한 광중합이 전제되어야 한다. Nanohybrid 복합 레진은 착색 환경에서 중합 조건에 가장 민감하여 더욱 충분한 광중합 과정이 필요하다. 적절한 광중합 시간을 통하여 중합도를 확보하는 것은 복합 레진의 안정적인 투명도를 유지하고 장기적인 심미성을 보장하는 데 중요하다.

본 연구를 통해 광중합 시간에 따른 복합 레진의 투명도 변화와 성분에 따른 차이를 확인하였다. 광중합 시간과 복합 레진의 투명도 변화를 기간 경과에 따라 측정하여 분석한 데 의의가 있다.

Acknowledgements

이 연구는 2023년도 제주대학교병원 연구비(2023-31)로 수행되었습니다.

ORCID

Sung-Joon Kim https://orcid.org/0000-0003-0603-4036
Nayoung Oh https://orcid.org/0000-0002-8981-5868
Jiyoung Song https://orcid.org/0000-0002-9500-6557

References

1. Zhang L, Yu Y, Li S, Yang F, Liang S, Xing W. Effect of staining solutions on color and translucency stability of resin-composite computer-aided design and computer-aided manufacturing blocks. J Am Dent Assoc 2024;155:1012-21.
2. Prodan CM, Gasparik C, Ruiz-López J, Dudea D. Color and translucency variation of a one-shaded resin-based composite after repeated heating cycles and staining. Materials (Basel) 2023;16:3793.
3. Woo J, Kim SJ. Staining of restorative composite resins at various light curing times. Oral Biol Res 2023;47:123-31.
4. Costa MP, Jacomine JC, Mosquim V, Santin DC, Zabeu GS, Agulhari MAS, Mondelli RFL, Honório HM, Wang L. Analysis of color stability and degree of conversion of different types of resin composites. Braz Oral Res 2024;38:e003.
5. Sobrinho LC, Goes MF, Consani S, Sinhoreti MA, Knowles JC. Correlation between light intensity and exposure time on the hardness of composite resin. J Mater Sci Mater Med 2000;11:361-4.
6. Fidan M. Accelerated aging effects on color change, translucency parameter, and surface hardness of resin composites. Biomed Res Int 2022;2022:6468281.
7. Korać S, Ajanović M, Džanković A, Konjhodžić A, Hasić-Branković L, Gavranović-Glamoč A, Tahmiščija I. Color stability of dental composites after immersion in beverages and performed whitening procedures. Acta Stomatol Croat 2022;56:22-32.
8. Paolone G, Mazzitelli C, Boggio F, Breschi L, Vichi A, Gherlone E, Cantatore G. Effect of different artificial staining procedures on the color stability and translucency of a nano-hybrid resin-based composite. Materials (Basel) 2023;16:2336.
9. El-Rashidy AA, Abdelraouf RM, Habib NA. Effect of two artificial aging protocols on color and gloss of single shade versus multi shade resin composites. BMC Oral Health 2022;22:321.
10. Paolone G, Formiga S, De Palma F, Abbruzzese L, Chirico L, Scolavino S, Goracci C, Cantatore G, Vichi A. Color stability of resin-based composites: staining procedures with liquids-a narrative review. J Esthet Restor Dent 2022;34:865-87.
11. Huang W, Ren L, Cheng Y, Xu M, Luo W, Zhan D, Sano H, Fu J. Evaluation of the color stability, water sorption, and solubility of current resin composites. Materials (Basel) 2022;15:6710.
12. Barutcigil Ç, Yıldız M. Intrinsic and extrinsic discoloration of dimethacrylate and silorane based composites. J Dent 2012;40 Suppl 1:e57-63.
13. Mills BAB, Sbardelotto C, Neto MC, Junior VOG,

Cavalcante LM, Schneider LFJS. Translucency and polymerization ability of contemporary resin composites. Biomaterials Connect 2024;1:193183.
14. British Standards Institution. BS 5612:1978. British standard specification for dental porcelains for jacket crowns. London; British Standards Institution; 1978.
15. Par M, Spanovic N, Bjelovucic R, Skenderovic H, Gamulin O, Tarle Z. Curing potential of experimental resin composites with systematically varying amount of bioactive glass: Degree of conversion, light transmittance and depth of cure. J Dent 2018; 75:113-20.
16. Howard B, Wilson ND, Newman SM, Pfeifer CS, Stansbury JW. Relationships between conversion, temperature and optical properties during composite photopolymerization. Acta Biomater 2010;6: 2053-9.
17. Llena C, Fernández S, Forner L. Color stability of nanohybrid resin-based composites, ormocers and compomers. Clin Oral Investig 2017;21:1071-7.
18. Arocha MA, Mayoral JR, Lefever D, Mercade M, Basilio J, Roig M. Color stability of siloranes versus methacrylate-based composites after immersion in staining solutions. Clin Oral Investig 2013;17:1481-7.
19. Hafez R, Ahmed D, Yousry M, El-Badrawy W, El-Mowafy O. Effect of in-office bleaching on color and surface roughness of composite restoratives. Eur J Dent 2010;4:118-27.
20. Ardu S, Braut V, Gutemberg D, Krejci I, Dietschi D, Feilzer AJ. A long-term laboratory test on staining susceptibility of esthetic composite resin materials. Quintessence Int 2010;41:695-702.
21. Ertaş E, Güeler AU, Yüecel AC, Köprülü H, Güler E. Color stability of resin composites after immersion in different drinks. Dent Mater J 2006;25:371-6.
22. Silikas N, Eliades G, Watts DC. Light intensity effects on resin-composite degree of conversion and shrinkage strain. Dent Mater 2000;16:292-6.
23. Ozturk B, Cobanoglu N, Cetin AR, Gunduz B. Conversion degrees of resin composites using different light sources. Eur J Dent 2013;7:102-9.
24. Kim EH, Jung KH, Son SA, Hur B, Kwon YH, Park JK. Effect of resin thickness on the microhardness and optical properties of bulk-fill resin composites. Restor Dent Endod 2015;40:128-35.
25. Nurrohman H, Korkmaz-Ceyhan Y, Cevik P, Paravina RD. Staining- and aging-dependent changes in color, translucency, and gloss of cloud-shade and one-shade resin composites. Am J Dent 2024;37: 201-5.
26. Tango RN, Todorović A, Stamenković D, Karasan DN, Sailer I, Paravina RD. Effect of staining and aging on translucency parameter of CAD-CAM materials. Acta Stomatol Croat 2021;55:2-9.
27. Sly MM, Korkmaz-Ceyhan Y, Dini F, Escobedo RL, Abram E, Paravina RD. Aging and staining effects on optical properties of flowable composites. J Biomed Mater Res B Appl Biomater 2025;113: e35648.
28. Yoon TH, Lee YK, Lim BS, Kim CW. Degree of polymerization of resin composites by different light sources. J Oral Rehabil 2002;29:1165-73.
29. Shin DH, Rawls HR. Degree of conversion and color stability of the light curing resin with new photoinitiator systems. Dent Mater 2009;25:1030-8.

중합 시간에 따른 광중합 복합레진의 투명도 변화

김성준[1] 교수, **오나영**[2] 진료교수, **송지영**[1]* 부교수

[1]제주대학교병원 치과, 제주대학교 의과대학

[2]제주대학교병원 치과

목적: 본 연구는 광중합 시간에 따른 복합 레진의 투명도(Translucency Parameter, TP) 변화 양상을 기간 경과에 따라 측정 및 분석하고자 하였다.

연구 재료 및 방법: A2 색조의 Filtek Supreme Ultra, TPH Spectra, Tetric EvoCeram 복합 레진 시편(직경 8 mm, 두께 2 mm)을 각각 5초, 10초, 15초, 20초씩 중합하여 5개씩 제작하였다. 초기 측정 완료 후, 시편을 커피 착색 용액과 증류수에 보관하며 1, 2, 4, 8주 시점에 분광광도계를 이용하여 측정하고 TP를 계산하였다. 반복측정 분산분석과 one-way ANOVA로 통계 분석하였다.

결과: 모든 재료에서 기간에 따른 TP 변화는 커피에서 증류수 대비 통계적으로 유의하게 증가하였다. 중합 시간이 길수록(15초 이상) TP가 장기간 더 안정적인 경향이 관찰되었으며, 중합 시간이 짧을수록 투명도 감소 폭이 컸다. Filtek은 증류수 저장 시 중합 시간과의 상호작용이 관찰되지 않았으나, 커피 저장 시에는 유의한 상호작용을 보였다. 커피에서 Tetric은 보관기간에 가장 큰 TP 변화($F = 969.624$)를 보여 중합 시간에 가장 민감하게 반응하였다.

결론: 구강내 환경에서 복합 레진의 투명도 안정성을 위해서 15초 이상의 충분한 광중합이 필요하다. 모든 재료에서 충분한 광중합이 전제되어야 하며, Nanohybrid 복합 레진은 착색에 대한 중합 조건에 가장 민감하므로 더욱 충분한 광중합이 필요하다.

(구강회복응용과학지 2026;42(1):28-38)

주요어: 복합 레진; 광중합 시간; 변색; 중합; 투명도

*교신저자: 송지영

(63241)제주특별자치도 제주시 아란13길 15 제주대학교병원 치과

Tel: 064-717-1842 | Fax: 064-717-1846 | E-mail: 2460song@naver.com

접수일: 2025년 9월 27일 | 수정일: 2025년 10월 21일 | 채택일: 2025년 11월 9일