

광중합 중 복합레진의 투과도 변화의 실시간 측정

오현진¹, 최고운¹, 이창하², 임범순³, 이인복^{1,*}

¹서울대학교 치의학대학원 보존과 및 치학연구소,

²서울대학교 치과병원 원스톱협진센터,

³서울대학교 치의학대학원 치과생체재료과학 교실

Real time measurement of the transmittance change of composite during light curing

Hyun-Jin Oh¹, Go-Woon Choi¹, Chang-Ha Lee², Bum-Soon Lim³, In-Bog Lee^{1,}*

¹*Department of Conservative Dentistry and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Korea*

²*One-stop Specialty Center, Seoul National University Dental Hospital, Seoul, Korea*

³*Department of Dental Biomaterials Science, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Korea*

The purpose of this study was to measure the transmittance change of composites during light curing in real time according to different shades and thicknesses. An instrument using pulse width modulation-curing light was developed to measure the transmittance of composites in real time. A micro-hybrid composite, Filtek Z250, was used for %transmittance measurement with five different shades (A1, A2, A3, A3.5, A4) and 4 different thicknesses (0.16, 0.5, 1.0, 1.5 mm). The maximum value of $d(\%Transmittance)/dt$ and peak time were used to observe polymerization kinetics. Attenuation coefficient was also compared between pre and post cured specimens. The transmittance increased in all specimens after polymerization. A2 showed the highest and A1 showed the lowest transmittance in both pre and post curing. The transmittance change and maximum rate of change were highest in A2 and lowest in A3.5, and the peak time, which ranged in 3.10 to 4.07, was not significantly different among shades. As the specimen became thinner, both the transmittance and rate of change increased, and the peak time was maximum at 1.5 mm thickness. The absolute value of attenuation coefficient decreased after polymerization in all specimens. In conclusion, the transmittance of composite increased after polymerization. Each shade showed different transmittance value for both pre and post curing state, and thinner specimen showed higher transmittance value. Polymerization kinetics could also be observed through the rate of transmittance change over time.

Key words : Attenuation coefficient, Composites, Light curing, Polymerization kinetics, Transmittance

Hyun-Jin Oh (ORCID: 0000-0002-1207-319X)

Go-Woon Choi (ORCID: 0000-0002-6421-4281)

Chang-Ha Lee (ORCID: 0000-0002-4623-1475)

Bum-Soon Lim (ORCID: 0000-0003-3112-0227)

Correspondence: In-Bog Lee (ORCID: 0000-0001-8083-1530)

Affiliation: Department of Conservative Dentistry and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul 03080, Korea

Tel: +82-2-2072-3953, Fax: +82-2-2072-3859

Email: inboglee@snu.ac.kr

Received: Jun. 19, 2020; Revised: Aug. 19, 2020; Accepted: Aug. 19, 2020

서론

복합레진은 치아 식체를 최소화하면서도 심미적으로 만족스러운 결과를 보여 치과 진료실에서 가장 많이 사용되는 직접수복 재료이다. 복합레진의 물성 개선을 위해 강도, 중합 수축, 색 안정성 등에 대한 연구가 진행되었으며 무기질 충전재의 조성 및 함량, 레진 기질의 성분비를 조절하는 방법 등을 통해 강도와 중합도의 향상과 더불어 중합수축을 줄이는 방향으로 복합레진이 개발되고 있다(1, 2).

복합레진을 이용한 심미 수복에서 복합레진의 투과도는 색상과 함께 중요한 고려 요소이다. 투명한 수복물은 구강 내의 어두운 배경을 투과시키기 때문에 실제 사용된 복합레진의 색상보다 어두워 보일 수 있다. 또한 복합레진이 광중합됨에 따라 투과도와 색상이 달라져 적절한 색조 선택에 어려움을 겪는 경우가 있다. Spectrophotometer를 이용해 비교한 연구에 따르면 대부분의 광중합 복합레진에서 중합 전과 후 상당한 색상 차이를 보였으며, 특히 밝고 채도가 낮은 색상에서 변화가 크게 나타났다. 또한 색상이 푸른빛을 띠도록 변화하는 경향을 보여 상대적으로 황색빛이 얻어졌다(3). 이를 극복하기 위해 진료실에서는 shade guide 또는 mock-up technique 등의 방법을 사용하고 있으나 여전히 중합 전후의 색상 및 투과도 변화를 예측하는 데에는 한계가 존재한다.

복합레진에 조사된 빛의 일부는 표면에서 반사되며, 일부는 내부에서 흡수되거나 산란하고, 나머지는 반대편으로 투과한다. 반사, 투과 및 산란되는 빛의 양에 따라 복합레진의 투과도가 결정되며, 이에 대한 정보는 자연치의 자연스러운 색과 투명도를 재현할 때 유용하다. 현재 시판되는 심미수복용 복합레진은 다양한 투명도를 나타내도록 제작되었다. Spectrophotometer를 이용해 total transmittance와 diffuse transmittance를 측정했을 때 두가지 모두 enamel shade에서 가장 높았고 regular body가 중간, dentin shade가 가장 낮은 transmittance를 보였으며, 색상에 따라서는 회색조에서 diffuse transmittance가 가장 높다고 알려졌다(4).

수복 전후 복합레진의 투과도에는 레진 기질의 종류, 무기질 충전재의 크기나 양, 레진 기질과 충전재의 굴절률 차이 등이 영향을 미치며, 특히 수복 이후의 투과도에는 표면의 연마도, 습도, 또는 미세 파절 등이 영향을 미친다(5, 6). 충전재 입자가 큰 microfilled 복합레진이 nanofilled 복합레진보다

투과도가 작다고 알려져 있으며, 충전재 입자의 크기가 조사되는 빛의 파장의 절반일 때 빛의 산란이 최대가 된다고 알려져 있다(7, 8).

복합레진의 투과도는 심미적인 측면뿐 아니라 중합역학적 측면에서도 중요하다. 광중합형 복합레진은 투과도에 따라 빛을 도달시키는 깊이가 다르며, 이에 따라 중합속도와 중합률이 달라진다. 복합레진의 색상이 어두울수록 중합 깊이가 얕다고 알려졌으나 색상 자체보다는 투과도가 중합 깊이에 영향을 미치는 인자임이 밝혀졌다(9). 또한 일정한 광도(550 lux) 이상에서는 총 광량과 상관없이 복합레진 자체의 감쇠력(attenuating power)가 중합 깊이를 결정하는 요인이라고 밝혀졌다(10).

기준에 복합레진의 투과도와 중합역학을 연구한 논문에서는 시편을 광중합하는 동안의 투과도를 실시간으로 기록하지 못하고 spectrophotometer를 이용해 중합 전과 후를 단순 비교하거나, 시간 간격을 두고 측정하였다. 이는 중합 중간 과정에 대한 정보를 제공하지 못해 중합역학을 분석할 수 없는 한계를 가진다(11).

실시간으로 470 nm의 중합광을 이용해 복합레진 시편의 투과도를 radiometer를 이용해 측정한 연구도 선행되었으나 시편의 광중합을 시작함과 동시에 청색광에 대한 투과도를 측정하였기 때문에 복합레진의 광중합 깊이에 대한 정보는 제공하나 중합 전이나 후의 심미성에 영향을 미치는 다른 파장의 색에 대한 투과도에 대한 정보는 얻을 수 없다는 한계를 가진다(12, 13).

본 연구에서는 펄스 폭 변조(PWM, pulse width modulation) 광조사기를 이용해 복합레진 시편의 투과도를 측정할 수 있는 장치를 제작하여 복합레진이 광중합 되기 이전과 광중합 되는 동안, 그리고 광중합 이후의 투과도 변화를 실시간으로 측정하여 색상에 따라, 시편의 두께에 따라 비교하였으며, 시간에 따른 변화율을 계산해 광중합역학을 관찰하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실시간 투과도 변화 측정장치의 제작

광중합 중의 복합레진 시편의 투과도를 실시간으로 측정

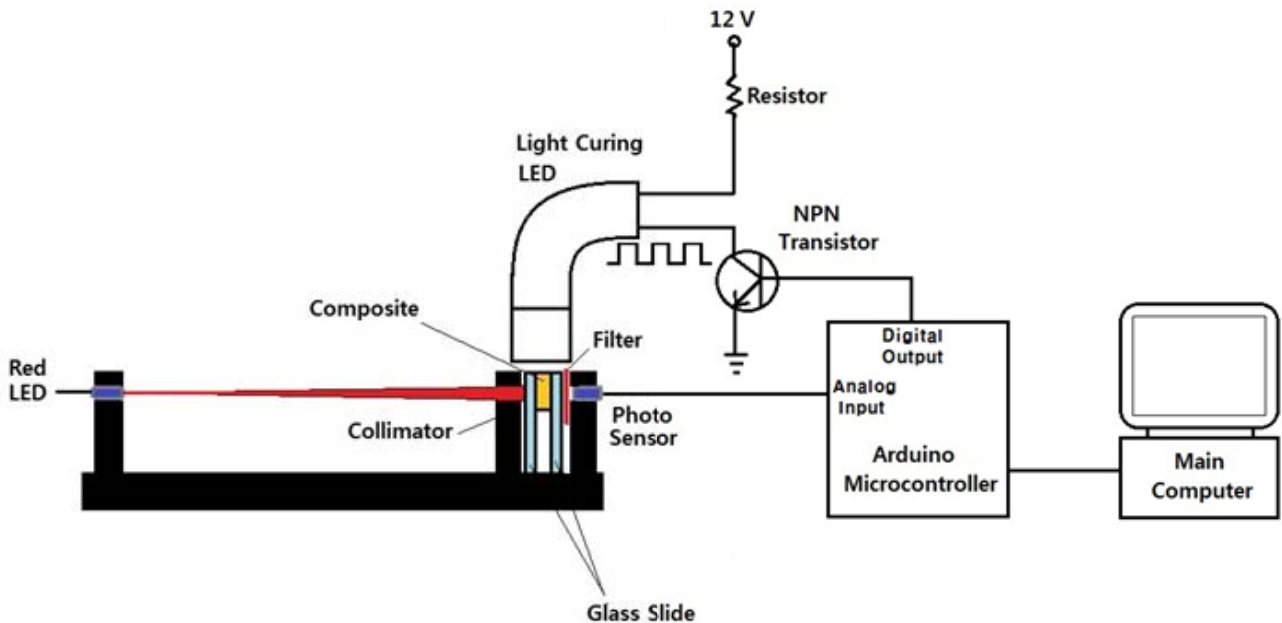
하기 위해 Figure 1A와 같은 장치를 제작하였다. 좌측의 적색 LED (640 nm)로부터 방사된 붉은색 광선이 시준기(collimator)를 거쳐 두 장의 글라스 슬라이드 내부에 위치한 복합레진 시편에 조사되며, 복합레진을 투과한 광은 필터를 거쳐서 가시광 적외광대역 감지 광센서에 의해 전압으로 변환된다. 변환된 전압은 Arduino microcontroller (Arduino, Torino, Italy)에 의해 디지털로 변환되어 컴퓨터에 저장된다.

복합레진 시편을 중합시키기 위해 펄스 폭 변조(PWM,

pulse width modulation) LED 광조사기를 제작하여 이용하였다. PWM은 microcontroller (Arduino UNO) 에서 출력된 디지털 신호를 이용해 NPN transistor를 On/Off시켜 설정해 둔 주기와 duty ratio에 맞춰 LED (B&Lite, B&L Biotech., Ansan, Korea)에 흐르는 전류를 On/Off 시킬 수 있다. Duty ratio란 트랜지스터가 On 되어 있는 시간을 주기로 나눈 값으로 On이 된 시간의 비율이다.

본 실험에서는 초당 10 Hz로 50% duty ratio를 설정하여 50 ms의 광조사와 50 ms의 휴지기를 반복하도록 설정하였

(A)



(B)

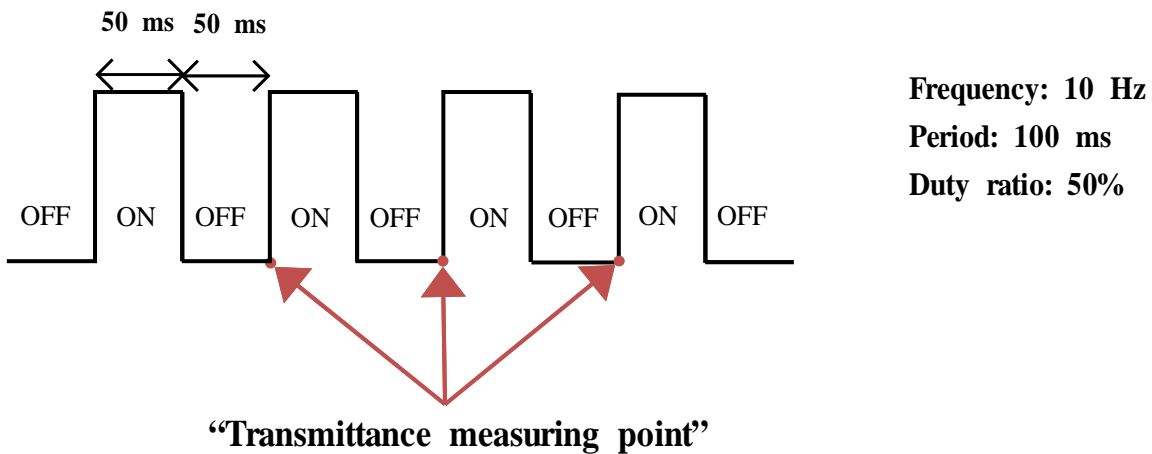


Figure 1. (A) Instrument for measuring transmittance, (B) Pulse width modulation of LED curing light with 50% duty ratio.

다. 광중합을 위해 조사되는 강한 청색광이 광센서에 미치는 영향을 최소화하기 위해 50 ms의 휴지기가 종료되는 시점에서 시편을 투과한 적색광에 의해 광센서로부터 출력된 전압을 Arduino microcontroller와 Processing3 (Processing.org, MIT, United States)으로 제작한 transmittance measuring software를 이용해 기록하였다(Figure 1B).

광조사기의 radiant emittance는 checkMARC (BlueLight Analytics, Halifax, Canada)로 측정시 50% duty ratio에서 1,440 mW/cm²였다.

2. 색상에 따른 투과도 변화 측정

A1, A2, A3, A3.5, A4 총 5가지 색상의 Filtek Z250 Universal Restorative (3M ESPE, USA)를 시편으로 사용하였다(Table 1). 가로 80 mm × 세로 25 mm 글라스 슬라이드 위에 0.15 mg의 복합레진을 올린 후, 같은 크기의 글라스 슬라이드를 위에 덮어 압착시켰다. 이때 두 슬라이드 양단 사이에 두께 1 mm의 정사각형 글라스를 끼워 복합레진의 두께가 1 mm가 되도록 압착하였다. 광센서 앞에 위치한 직경 3 mm의 light passing hole을 디스크 형의 복합레진 시편이 충분히 가리도록 슬라이드를 위치시키고 측정 기기에 고정하였다.

광조사기를 복합레진 시편의 2 mm 상단에 위치시킨 후, 0초부터 10초까지는 baseline voltage를 기록하였고, 그 후 PWM curing light를 50% duty ratio로 20초간 광조사를 시행하였다. 총 300초 동안 측정하였다(n=5).

측정된 전압으로부터 %Transmittance, $d(\%Transmittance)/dt$ 와 감쇠계수(attenuation coefficient)를 아래의 식을 이용하여 계산하였다. 복합레진 시편 없이 투명한 글라스

슬라이드를 빛이 통과한 전압을 V_0 , 두께 D의 복합레진 시편을 투과한 후 측정된 전압을 V_D 라 할 때 %Transmittance와 감쇠계수는 다음과 같다.

$$\%Transmittance = \frac{V_D}{V_0} \times 100 (\%)$$

$$Attenuation\ coefficient\ (\mu) = \ln\left(\frac{V_0}{V_D}\right) / D$$

V_0 : 복합레진 없이 글라스 슬라이드만을 빛이 투과한 전압

V_D : 복합레진 시편 두께 D를 빛이 통과한 후 측정된 전압

D: 시편 두께(mm)

3. 두께에 따른 투과도 변화 측정

Filtek Z250 Universal Restorative (3M ESPE, USA)의 A2 색상을 투과도 변화 측정과 같은 방법으로 시편을 준비했다. 80 mm × 25 mm 글라스 슬라이드 2장 사이의 간격이 0.16 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm가 되도록 글라스 사이에 spacer를 장착하고, 0.16 mm는 0.03 mg, 0.5 mm는 0.08 mg, 1.0 mm는 0.15 mg, 1.5 mm는 0.20 mg의 복합레진을 두 글라스 사이에 압착시켰다. 투과도 변화 측정과 같은 방법으로 한 두께당 5회 반복 측정하였다.

4. 통계 분석

복합레진의 색상 및 두께에 따른 투과도 차이 비교를 위해 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)를 이용하였으며, 동일한 색상 및 두께에서 중합 전과 후의 투과도 비교를 위해 독립표본 t 검정(student's t-test)을 이용하였다. 사후 검정으로는 Tukey's HSD post-hoc test를 이용하였다.

Table 1. Composites used in this study

Composite (code, shade)	Type	Filler	Resin matrix
Filtek™ Z250 Universal Restorative (Z250, A1, A2, A3, A3.5, A4)	Micro-hybrid Conventional Universal	82 wt% (60 vol%) Zirconia/silica (0.01-3.5 μm, average 0.6 μm)	Bis-GMA
			UDMA
			TEGDMA
			Bis-EMA

Abbreviations: Bis-GMA, bisphenol A diglycidyl ether dimethacrylate; UDMA, urethane dimethacrylate; TEGDMA, tri[ethylene glycol] dimethacrylate; Bis-EMA, bisphenol A polyethylene glycol diether dimethacrylate

결과

시간에 따른 %Transmittance의 변화 및 변화율($d(\%Transmittance)/dt$)의 대표적인 곡선은 각 Figure 2와 같다. 광중합 시작 후 모든 색상과 두께의 복합레진에서 %Transmittance가 증가했으며, 시간에 따른 %Transmittance의 변화율이 최대값을 나타낼 때의 시간을 peak time으로 설정하였다.

1. 색상에 따른 투과도 변화

색상별로 측정된 광중합 전과 후의 투과도는 Table 2와

Figure 3A와 같다. 중합 전 투과도는 5.84~7.54% 였고 중합 후에는 6.89~9.24%의 투과도를 보였다. 모든 색상에서 중합 전에 비해 중합 후의 투과도가 유의하게 증가했다($p < 0.05$). 색상별로 비교시 중합 전에는 $A2 > A3.5 \approx A3 > A4 > A1$ 의 순서로 감소했으며, A3.5와 A3 색상 간에는 유의할만한 차이가 없었다. 중합 후에는 $A2 > A3 > A3.5 \approx A4 > A1$ 의 순서로 감소했으며 A3.5와 A4 색상 간에는 유의할만한 차이가 없었다. 중합 전후의 투과도 변화량은 A2가 1.7%로 가장 컸으며, A3.5가 0.75%로 가장 작게 나타났다($p < 0.05$).

투과도는 광중합을 시작하고 3.10~4.07초 사이에 가장 크게 변화했으며 색상 별로 유의한 차이는 없었다($p > 0.05$).

Table 2. %Transmittance, $d(\%Transmittance)/dt$, and Attenuation coefficient of composites with different shades at 1 mm thickness

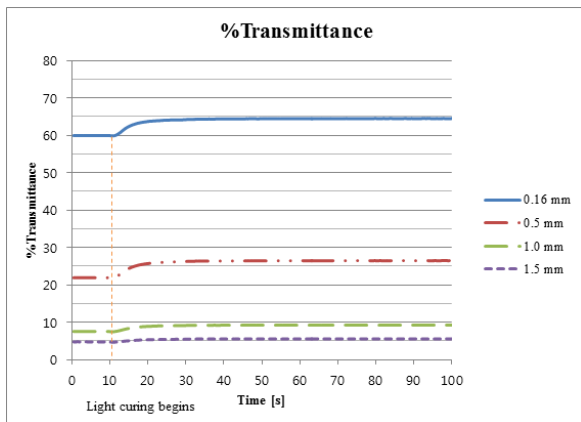
Shade	%Transmittance		Δ %Transmittance	$d(\%Transmittance)/dt$		Attenuation coefficient (μ)	
	pre-cure	post-cure		max	peak time [s]	pre-cure	post-cure
A1	5.84 (0.10) ^d	6.89 (0.14) ^{d*}	1.05 (0.04) ^c	0.18 (0.03) ^b	3.14 (1.32) ^a	-2.84 (0.02) ^{a*}	-2.68 (0.02) ^a
A2	7.54 (0.15) ^a	9.24 (0.24) ^{a*}	1.70 (0.10) ^a	0.27 (0.02) ^a	3.22 (0.41) ^a	-2.59 (0.02) ^{d*}	-2.38 (0.03) ^d
A3	6.69 (0.09) ^b	8.07 (0.15) ^{b*}	1.38 (0.15) ^b	0.22 (0.03) ^b	3.10 (0.51) ^a	-2.71 (0.01) ^{c*}	-2.53 (0.02) ^c
A3.5	6.78 (0.18) ^b	7.53 (0.18) ^{c*}	0.75 (0.05) ^d	0.17 (0.02) ^b	3.26 (0.45) ^a	-2.69 (0.03) ^{c*}	-2.59 (0.02) ^b
A4	6.32 (0.13) ^c	7.45 (0.17) ^{c*}	1.13 (0.17) ^c	0.18 (0.03) ^b	4.07 (0.87) ^a	-2.76 (0.02) ^{b*}	-2.60 (0.02) ^b

Standard deviations are in parenthesis.

Different superscript letters indicate significant differences among shades in same column ($p < 0.05$).

Asterisks indicate significant differences between pre-cure & post-cure ($p < 0.05$).

(A)



(B)

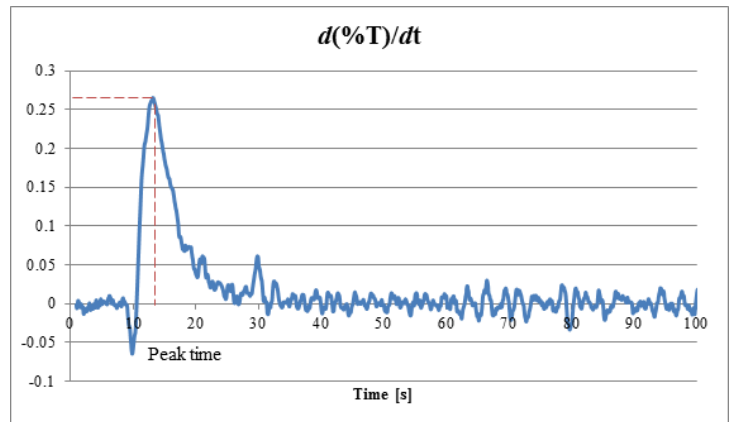


Figure 2. (A) %Transmittance vs. time with varying thicknesses of a composite (A2 shade). (B) $d(\%Transmittance)/dt$ vs. time of a composite (A2 shade, 1.0 mm thick).

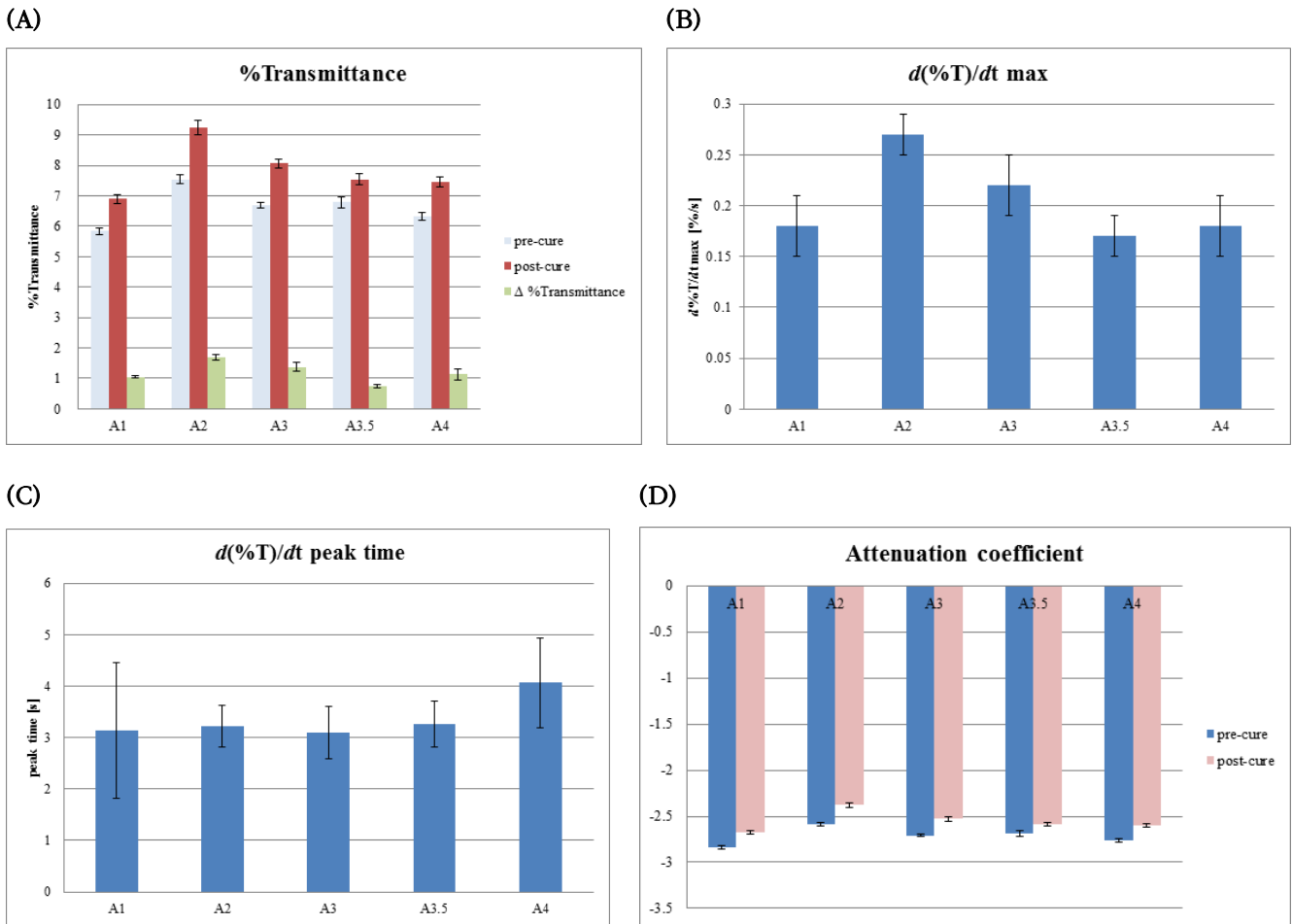


Figure 3. (A) %Transmittance for pre and post cure of composites with different shades, (B) Maximum value of $d(\%Transmittance)/dt$ of composites with different shades, (C) Peak time of $d(\%Transmittance)/dt$ of composites with different shades, (D) Attenuation coefficients for pre and post cure of composites with different shades,

$(d(\%Transmittance)/dt)$ 의 최고값은 0.17~0.27%/s로 나타났는데, A2에서 최고값을 나타냈고 A3.5에서 최저값을 나타냈다($p < 0.05$) (Figure 3B, Figure 3C).

감쇠계수의 절대값은 모든 색상에서 중합 전에 비해 중합 후에 감소했으며 중합 전은 -2.84~-2.59, 중합 후에는 -2.68~-2.38로 나타났다(Figure 3D). 색상별로는 중합 전후에서 모두 A1의 절대값이 가장 컸으며 A2의 절대값이 가장 작았다.

2. 두께에 따른 투과도 변화

Table 3 및 Figure 4A는 두께에 따른 중합 전후의 %Transmittance와 시간에 따른 변화율($d(\%Transmittance)/dt$)을 나타낸다. 0.16 mm의 경우 투과도는 중합 전 59.93%, 중합

후 64.48%를 보였고 1.5 mm의 경우 중합 전 4.75%, 중합 후 5.56% 투과율을 나타냈다. 복합레진 시편의 두께가 얇을수록 중합 전과 후에서 모두 높은 %Transmittance를 보였으며 중합 전후의 투명도 차이도 큰 경향을 보였다. 단 0.16 mm와 0.5 mm 그룹간의 Δ %Transmittance는 유의한 차이를 보이지 않았다. 투과도가 가장 크게 변한 peak time은 중합 시작 후 2.77~4.33초로 나타났으며, 1.5 mm 두께 시편에서 유의하게 큰 값을 나타냈고, 나머지 세 두께는 비슷한 값을 보였다. 변화율은 시편이 두꺼워질수록 감소했으나 0.16 mm와 0.5 mm간에는 유의할만한 차이가 없었다 (Figure 4B, Figure 4C).

감쇠계수는 중합 전에 -3.21~-2.06에서 중합 후에 -2.75

Table 3. %Transmittance, $d(\%Transmittance)/dt$, and Attenuation coefficient of a composite (A2 shade) at varying thicknesses

Thickness [mm]	%Transmittance		$\Delta\%Transmittance$	$d(\%Transmittance)/dt$		Attenuation coefficient (μ)	
	pre-cure	post-cure		max	peak time [s]	pre-cure	post-cure
0.16	59.93 (2.23) ^a	64.48 (2.10) ^{a*}	4.56 (0.15) ^a	0.83 (0.06) ^a	3.15 (0.23) ^b	-3.21 (0.23) ^{a*}	-2.75 (0.20) ^a
0.50	22.02 (0.85) ^b	26.53 (0.92) ^{b*}	4.52 (0.08) ^a	0.90 (0.08) ^a	2.77 (0.47) ^b	-3.03 (0.08) ^{a*}	-2.66 (0.07) ^a
1.0	7.54 (0.15) ^c	9.24 (0.24) ^{c*}	1.70 (0.10) ^b	0.27 (0.01) ^b	3.22 (0.41) ^b	-2.59 (0.02) ^{b*}	-2.38 (0.03) ^b
1.50	4.75 (0.04) ^d	5.56 (0.04) ^{d*}	0.81 (0.01) ^c	0.14 (0.01) ^c	4.33 (1.02) ^a	-2.06 (0.01) ^{c*}	-1.95 (0.00) ^c

Standard deviations are in parenthesis.

Different superscript letters indicate significant differences among thickness in same column ($p < 0.05$).

Asterisks indicate significant differences between pre-cure & post-cure ($p < 0.05$).

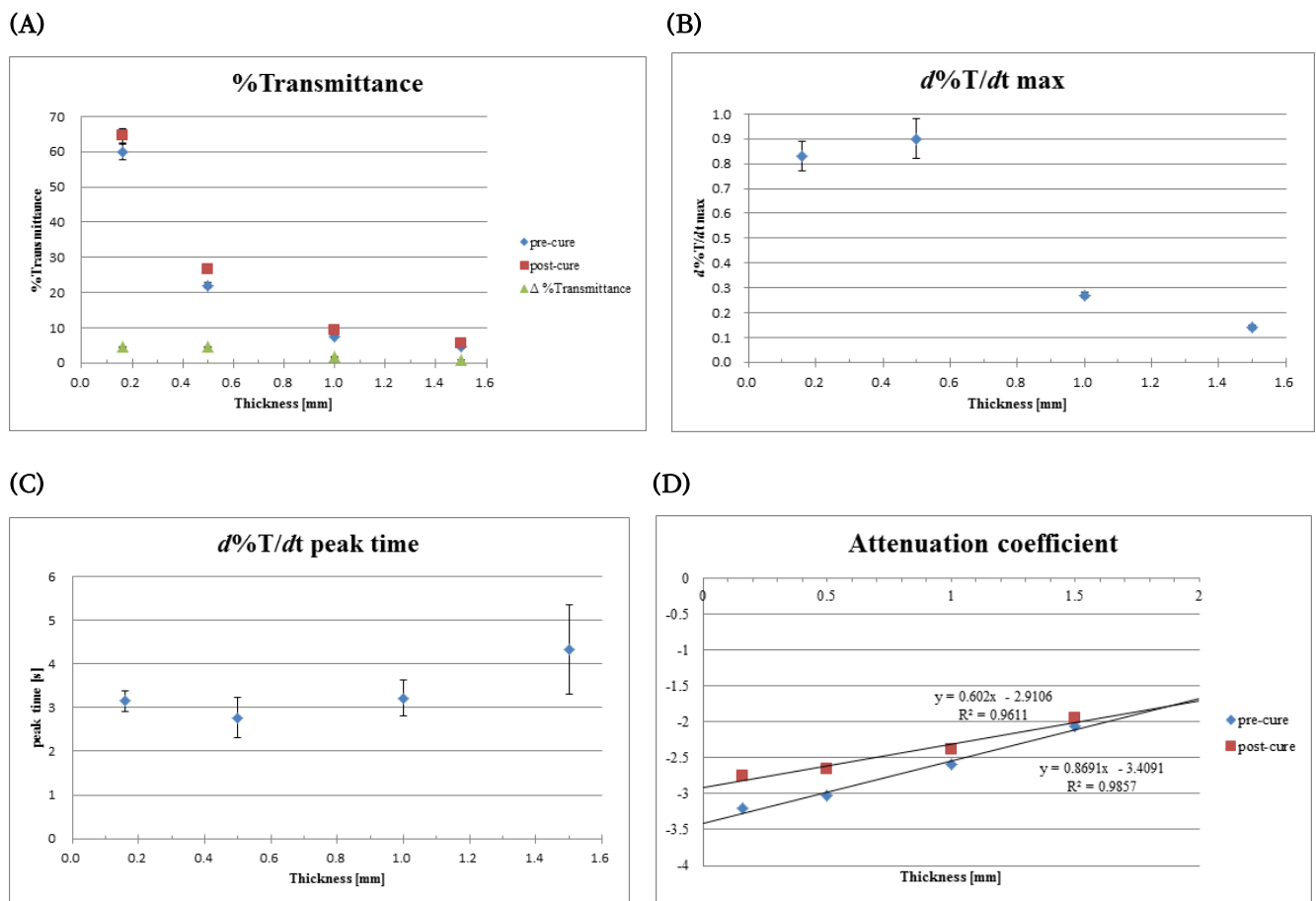


Figure 4. (A) %Transmittance of a composite (A2 shade) at varying thicknesses, (B) Maximum value of $d(\%Transmittance)/dt$ of a composite (A2 shade) at varying thicknesses, (C) Peak time of $d(\%Transmittance)/dt$ of a composite (A2 shade) at varying thicknesses, (D) Attenuation coefficients for pre and post cure of a composite (A2 shade) at varying thicknesses.

~1.95로 모든 두께에서 절대값이 감소했다. 시편의 두께가 증가할수록 감쇠계수의 절대값이 유의하게 감소하였으나 0.16 mm와 0.5 mm 간의 차이는 없었다(Figure 4D).

고 찰

본 연구는 복합레진의 투과도를 실시간으로 측정함으로써 중합 전, 중합 동안, 그리고 중합 후의 투과도 변화를 관찰할 수 있으며, 이를 바탕으로 중합역학에 관한 정보를 얻을 수 있다는 점에 의의를 갖는다.

모든 시편에서 중합 전에 비해 중합 후에 투과도가 증가했는데, 이는 광중합을 거치면서 복합레진을 구성하는 레진 기질의 굴절률이 변했기 때문이다(14, 15). Interferometry를 이용해 레진 기질이 광중합되는 동안의 굴절률을 실시간으로 측정했을 때, 굴절률은 점차 증가했으며 기질의 점도가 낮을수록 초기 굴절률은 낮았으나 광중합을 거치며 큰 폭으로 증가했다(16). 중합 이전의 복합레진은 레진 기질과 무기질 충전재의 굴절률 차이에 따라 일정한 투과도를 보인다. 중합이 시작되면 레진 기질의 굴절률이 증가하여 그 차이가 변화하게 되는데, 무기질 충전재와 굴절률의 차이가 줄어들수록 투과도가 증가하고, 커질수록 투과도가 감소한다(17).

본 실험에서는 색상별로 투과도를 비교했을 때 중합 전후 모두 A2가 가장 큰 값을 보였으며 A1이 가장 작은 값을 보였다. 대체로 중합 전에 투과도가 높은 색상에서 중합 후에도 투과도가 높았으며, 투과도가 가장 큰 A2색상에서 중합 전후의 투과도 변화량도 가장 컸다.

기존 연구에서 복합레진의 명도가 밝을수록 투과도도 증가하는 경향이 있었으나 완벽히 일치하지는 않았는데, 이는 투과도가 단순히 CIE L*a*b* 색 공간에서 단순히 명도 L*에만 영향을 받는 인자가 아니라 색상 요소인 a*와 b*값의 영향을 받기 때문이다(13). 본 실험 역시 색상이 A1에서 A4로 변화함에 따라 어떠한 경향성을 띄지 않아 명도 외에 다른 인자들이 투과도를 결정하는 데에 관여할 것으로 생각된다.

시간에 따른 투과도 변화율인 $d(\%Transmittance)/dt$ 의 최대값은 A2색상에서만 유의하게 높고 나머지 색상은 모두 비슷했으며, peak time은 색상에 따라 유의한 차이가 없었

다. 즉 색상의 차이는 투과도 변화를 이용한 중합역학 평가 시 별다른 영향을 주지는 않는다고 해석될 수 있다.

두께별로 측정된 투과도는 중합 전과 후 모두에서 시편의 두께가 얇을수록 증가했다. 이는 같은 종류, 같은 색상의 복합레진 내에서 두께가 얇을수록 투과도가 증가한 이전의 연구와도 일치한다(13). 이는 다음과 같은 Lambert-Beer 법칙으로 설명할 수 있다. 이 법칙은 어떤 물체 또는 물질 내를 빛이 통과할 때 흡광도가 빛을 흡수하는 물질의 두께와 농도에 비례한다는 법칙이며 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$I_T = I_0 e^{-\mu D}$$

$$\ln \frac{I_T}{I_0} = -\mu D$$

I_0 : 시편을 통과하기 전 빛의 세기

I_T : 시편을 통과한 후 빛의 세기

μ : 시편의 감쇠계수

D : 빛이 통과하는 거리, 즉 시편의 두께

두께별로 $d(\%Transmittance)/dt$ 의 최대값은 시편이 얇을수록 높았으나 0.16 mm와 0.5 mm 사이에는 유의한 차이가 관찰되지 않았다. Peak time은 1.5 mm에서만 유의하게 높은 값을 보였으며 나머지 1.0 mm이하의 두께에서는 별다른 차이가 없었다. 색상과 달리 두께는 두꺼워질수록 빛이 통과하는 거리가 늘어나기 때문에 중합역학에서 유의한 차이를 보인 것으로 생각된다. 시편이 두꺼워지면 광조사기로부터 도달하는 빛이 줄어들며, 이에 따라 중합 속도가 느려지고, peak time은 증가한다. 이를 식으로 나타내면 아래와 같다(18).

$$R_p = k_p [M] \left(\frac{\Phi I_0 e^{-\mu D}}{k_t} \right)^{1/2}$$

R_p : 중합속도

k_p : propagation 속도 상수

k_t : termination 속도 상수

[M] : 단량체 농도

Φ : 개시반응을 위한 양자수득률
(quantum yield for initiation)

I_0 : 광의세기
 μ : 감쇠계수
 D : 시편의 두께

복합레진이 중합될 때 일어나는 중합수축이나 방출되는 열로 중합역학을 연구한 이전의 연구에서는 중합속도가 최대가 되는 peak time이 각각 1.44~2.24초, 3.3~3.8초로 나타났다(19, 20). 본 실험에서 측정된 peak time은 2.77~4.33초로 측정되었다. 중합속도는 광원의 종류, 광의 세기나 시편의 형태, 또는 측정방법에 따라 영향을 받으므로 절대적인 비교를 할 수는 없지만 투과도를 통해 중합역학을 관찰할 수 있다는 부분에서 의의를 갖는다.

감쇠계수의 절대값은 모든 색상에서 중합 과정을 거치며 감소했는데, 이는 복합레진 시편이 중합되며 투과하는 빛이 흡수되거나 산란하는 정도가 감소했음을 의미한다. 색상에 따라서는 중합 전과 후 모두 A1이 가장 크고 A2가 가장 작은 값을 보였다.

감쇠계수는 빛이 물질을 투과하는 정도를 결정하며 중합 깊이와 연관되어 있다. 본 실험에서는 A1을 제외하고는 감쇠계수가 A2에서 A4로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며 %Transmittance가 클수록 감쇠계수는 작은 값을 보였다.

또한 시편의 두께가 증가할수록 감쇠계수의 절대값은 선형적으로 일정하게 감소하는 결과를 보였다(Figure 4D). 같은 색상의 시편임에도 두께에 따라 값이 다른 것은 시편을 감싼 글라스 슬라이드의 표면에서 반사된 빛의 영향 때문인 것으로 생각된다. 시편의 두께가 얇을수록 복합레진에서 감쇠되는 빛보다 유리판에서 반사되는 빛의 영향이 커지므로 두께에 따라 감쇠계수가 변화하는 것으로 생각된다.

이상의 결과를 종합하면 복합레진은 중합 후 투과도가 증가하고 색상 또는 두께에 따라 그 차이가 달라지므로, 진료실에서 3급 또는 4급 와동 수복 시 복합레진의 색을 선택할 때에는, 치아표면을 접착제로 처리하기 전에 소량의 복합레진을 수복 부위에 놓고 광조사하여 중합시킨 후 치아와의 색상과 투명도를 비교하는 것이 더 정확한 색조 선택 방법이 될 수 있다.

본 연구에서는 펄스 폭 변조 LED 광조사기를 이용한 장비를 제작해 시편의 투과도를 실시간으로 측정하였다. 기존에 청색광을 이용해 시편을 광중합시키며 그에 대한

투과도를 측정한 연구는 중합을 시작하기 이전이나 종료된 이후의 투과도에 대한 기록이 불가능했다. 본 장치는 baseline으로 640 nm의 적색광을 시편을 향해 투과하도록 조사하여 중합 전, 중합 중, 그리고 중합이 완료된 후의 투과도를 기록할 수 있도록 제작했다. 강한 청색 중합광이 센서에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 광센서 앞에 필터를 사용해서 청색광의 영향을 줄였고, 또한 PWM 광조사기에서 50 ms의 청색광 조사기와 휴지기가 반복되므로 광중합 중에도 청색광이 꺼져있는 휴지기에 적색광에 대한 투과도를 측정하여 청색광의 잔상으로 인한 영향을 최소화할 수 있었다.

본 실험에서 사용된 광센서는 photodiode와 OP-Amp (operational amplifier)를 결합하여 광의 세기와 출력 전압이 선형적으로 비례한다. 따라서 실제 측정된 전압 V를 Lambert-beer 식에 적용된 광의 세기인 I_0 로 치환하여 %Transmittance와 감쇠상수를 계산하였다.

복합레진 시편이 광중합되면 미세하게 중합수축이 일어나 초기에 설정한 시편 두께보다 얇아질 수 있다. 시편의 두께는 투과도에 직접적인 영향을 주는 인자이므로 중합 후 두께가 얇아지면 실제보다 더 투과도가 증가한 결과가 나올 수 있으나 본 연구에서는 시편의 두께에 비해 선형수축량이 1% 이하이므로 고려하지 않았다(21).

복합레진 시편의 투과도와 중합 깊이는 빛의 흡수와 산란에 영향을 받으며, 산란은 충전재 입자의 크기가 조사되는 광 파장의 절반일 때 최대가 된다고 알려졌다. 조사된 광의 파장이 클수록 시편의 투과도도 증가된다고 보고되었다(22). 본 실험에서는 baseline으로 640 nm의 적색 LED를 사용하였으므로, 다른 파장의 LED를 사용할 경우 투과도가 달라질 것으로 예상된다.

Filtek Z250 외에 다양한 종류의 복합레진을 이용하여 충전재의 크기와 함량, 레진 기질의 조성에 따른 투과도를 비교 분석해볼 수 있다. 특히 최근에 출시된 bulk-fill 복합레진은 한번에 4 mm 두께까지 충전할 수 있도록 만든 제품으로 기존의 복합레진에 비해 투명하다(23). 대부분의 bulk-fill 제품들은 충전재의 양을 줄이거나 충전재의 크기를 조절해 레진 기질과의 굴절률 차이를 줄여 빛의 산란을 감소시키고 투과도를 높이는 방법을 사용한다고 알려져 있다. 그러나 상대적으로 투명한 bulk-fill 복합레진은 자연치의 투과도와

양립하지 못해 심미적으로 불리하다. 최근 이를 개선하여 중합 후 투과도를 감소시킨 bulk-fill 복합레진을 개발하였다고 주장하는 제품이 있어 이에 대한 검증이 필요할 것이다 (24). 또한 앞으로의 연구에서는 다양한 파장의 빛을 이용하여 여러 종류의 복합레진에 대한 투과도 변화를 측정하는 것이 필요하다 사료된다.

결론

중합 후 모든 복합레진은 투과도가 증가하였다. 색상에 따라 중합 전후의 투과도 및 그 차이는 모두 달랐으며 A1에서 A4으로 변함에 따라 어떠한 경향성을 보이지는 않았다. 두께가 얇을수록 투과도 및 중합 전후 투과도 차이는 증가하였고 시간에 따른 투과도 변화율을 통해 중합역학을 관찰할 수 있었다.

참고문헌

- Ferracane JL, Greener EH. The effect of resin formulation on the degree of conversion and mechanical properties of dental restorative resins. *J Biomed Mater Res.* 1986;20(1):121-31.
- Tchorz JP, Wolkewitz RDM. Microhardness of composite materials with different organic phases in deep class II cavities: an in vitro study. *Oper Dent.* 2011; 36(5):502-11.
- Seghi RR, Grltz MD, Kim J, Angeles L. Colorimetric changes in composites resulting from visible-light-initiated polymerization. *Dent Mater.* 1990;6(2):133-7.
- Akbar HN, Moharamzadeh K, Wood DJ, Noort R Van. Relationship between color and translucency of multishaded dental composite resins. *Int J Dent.* 2012; 708032.
- Lee Y. Influence of filler on the difference between the transmitted and reflected colors of experimental resin composites. *Dent Mater.* 2008;24(9):1243-7.
- Queiroz RS, de Lima JPM, Malta DAMP, Rastelli AN de S, Cuin A, Porto Neto S de T. Changes on transmittance mode of different composite resins. *Mater Res.* 2009;12(2):127-32.
- Kawaguchi M, Fukushima T, Miyazaki K. The relationship between cure depth and transmission coefficient of visible-light-activated resin composites. *J Dent Res.* 1994;73(2):516-21.
- Ruyter IE, Oysaed H. Conversion in different depths of ultraviolet and visible light activated composite materials. *Acta Odontol Scand.* 1982;40(3):179-92.
- Ferracane JL, Aday P, Matsumoto H, Marker VA, Marker VA. Relationship between shade and depth of cure for light-activated dental composite resins. *Dent Mater.* 1986;2(2):80-4.
- Mccabe JF, Carrick TE. Output from visible-light activation units and depth of cure of light-activated composites. *J Dent Res.* 1989;68(11):1534-9.
- Watts DC, Cash AJ. Analysis of optical transmission by 400-500 nm visible light into aesthetic dental biomaterial. *J Dent.* 1994;22(2):112-7.
- Ogunyinka A, Palin WM, Shortall AC, Marquis PM. Photoinitiation chemistry affects light transmission and degree of conversion of curing experimental dental resin composites. *Dent Mater.* 2007;23(7):807-13.
- Hyun HK, Christoferson CK, Carmem SP, Felix C, Ferracane JL. Effect of shade, opacity and layer thickness on light transmission through a nano-hybrid dental composite during curing. *J Esthet Restor Dent.* 2017;29(5):362-7.
- Hirasawa T, Engineering D, Medicine D. Improvements to light transmittance in light-cured composite resins by the utilisation of low refractive index dimethacrylates. *Dent Mater Journal.* 1990;9(2):203-14.
- Taira M, Suzuki H, Toyooka H, Yamaki M. Refractive index of inorganic fillers in seven visible-light-cured dental composite resins. *J Mat Sci Lett.* 1994;13:68-70.
- Hadis MA, Tomlins PH, Shortall AC, Palin WM.

- Dynamic monitoring of refractive index change through photoactive resins. *Dent Mater.* 2010;26(11):1106-12.
17. Shortall AC, Palin WM, Burtscher P. Refractive index mismatch and monomer reactivity influence composite curing depth. *J Dent Res.* 2008;87(1):84-8.
 18. Odian G. *Principles of polymerization*, 4th edition, 2004;p.221-4.
 19. Ellakwa A, Cho N, Lee IB. The effect of resin matrix composition on the polymerization shrinkage and rheological properties of experimental dental composites. *Dent Mater.* 2007;23(10):1229-35.
 20. Kim MJ, Kim RJY, Ferracane J, Lee IB. Thermographic analysis of the effect of composite type, layering method, and curing light on the temperature rise of photo-cured composites in tooth cavities. *Dent Mater.* 2017;33(10):e373-83.
 21. Lee IB, Cho BH, Son HH, Um CM. A new method to measure the polymerization shrinkage kinetics of light cured composites. *J Oral Rehabil.* 2005;32(4):304-14.
 22. dos Santos GB, Alto RVM, Filho HRS, da Silva EM, Fellows CE. Light transmission on dental resin composites. *Dent Mater.* 2008;24(5):571-6.
 23. Bucuta S, Ilie N. Light transmittance and micro-mechanical properties of bulk fill vs. conventional resin based composites. *Clin Oral Invest.* 2014;18(8):1991-2000.
 24. "Filtek™ One Bulk Fill Restorative", 3M in the United States, https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~/Filtek-One-Bulk-Fill-Restorative/?N=5002385+3291248932&rt=rud.

광중합 중 복합레진의 투과도 변화의 실시간 측정

오현진¹, 최고운¹, 이창하², 임범순³, 이인복^{1,*}

¹서울대학교 치의학대학원 보존과 및 치학연구소,

²서울대학교 치과병원 원스톱협진센터,

³서울대학교 치의학대학원 치과생체재료과학 교실

본 연구는 복합레진의 광중합 전과 후의 투과도 변화를 실시간으로 측정하여 복합레진의 색상 및 두께에 따른 변화를 관찰하고자 하였다. 펄스 폭 변조(pulse width modulation) 광조사기를 이용해 실시간으로 복합레진의 투과도를 측정할 수 있는 장치를 제작하여 실험에 이용하였으며, 미세혼합형 Filtek Z250 복합레진의 5가지 색상(A1, A2, A3, A3.5, A4)에 따른 투과도와 4가지 두께(0.16, 0.50, 1.0, 1.5 mm)에 따른 투과도를 실시간으로 측정하였다. 투과도 변화율의 최대값과 peak time으로 중합역학을 관찰하였고, 중합 전과 후의 감쇠상수를 비교하였다. 중합 후 모든 시편에서 투과도가 증가했다. 색상에 따라서는 중합 전후 모두 A2가 최고, A1이 최저 투과도를 나타냈다. 중합 전 후 투과도 변화와 최대 변화율은 A2가 최고, A3.5가 최저였으며, peak time은 3.10~4.07초로 색상별로 유의한 차이는 없었다. 시편이 얇아질수록 투과도와 투과도 변화율 모두 증가했으며, peak time은 1.5 mm 두께에서 최대였다. 감쇠상수의 절대값은 모든 시편에서 중합 후에 감소했다. 결론적으로 복합레진은 중합 후 투과도가 증가하는데 색상에 따라 중합 전과 후의 투과도는 모두 다른 값을 보였고, 두께가 얇을수록 투과도가 증가하였다. 시간에 따른 투과도 변화율을 통해 중합역학 또한 관찰할 수 있었다.

색인 단어 : 감쇠계수, 복합레진, 투과도, 광중합, 중합역학
