

Comparison of polymerization shrinkage of dual-cure core build-up resin according to shade and curing mode

Yoorina Choi^{1†}, Karl Lee^{2†}, and Hoon-Sang Chang^{3*}

¹Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Wonkwang University, Iksan, Republic of Korea

²Department of Dental Science, School of Dentistry, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

³Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

Polymerization shrinkage of composite resin is closely related to direct or indirect restoration failure. Many studies have reported that curing mode affects polymerization, but few studies have reported whether polymerization shrinkage is affected by the shade of the dual-cure core build-up resin. Therefore, the purpose of this study is to compare the polymerization shrinkage of a dual-cure core build-up resin according to shade and curing mode. A dual-cure core build-up resin (Dual Core, Vericom) was selected and the specimens were prepared using either natural (A3) or blue shade of 6 mm diameter and 0.5 mm thickness. The specimens were either light-cured or self-cured and polymerization shrinkage was measured using a modified bonded disc method for 1,800 seconds (n=7). Polymerization shrinkage data were analyzed using two-way ANOVA and Tukey honestly significant difference at $\alpha=0.05$. No statistically significant difference in polymerization shrinkage was observed between the natural shade (3.87%±0.31%) and blue shade (3.85%±0.37%). However, polymerization shrinkage in light-curing mode (4.10%±0.14%) was significantly higher than that in self-curing mode (3.63%±0.31%). In conclusion, polymerization shrinkage of the dual-cure core build-up resin tested in this study was not affected by shade but by curing mode.

Key Words: Color, Dual-curing of resin cements, Polymerization, Resin cements

© This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

복합레진을 이용하여 근관외동형성 부위를 수복할 때에는 직접 레진수복에 이용되는 적층충진을 하기보다는 한 번에 벌크 충전하여 수복시간을 절약하는데 그 이유는 대체로 코어수복이 최종수복이기보다는 전장관 형성을 위한 중간 단계이기 때문이다[1]. 코어용 복합레진은 치관부에서 치근분지부까지 다양한 깊이로 광범위하게 사용되기 때문에 자가중합형 또는 이중

중합형 복합레진이 사용된다. 자가중합형 복합레진은 중합광이 도달하기 어려운 부위에 주로 사용되며 중합개시제와 촉진제가 따로 공급되어 혼합과 동시에 중합이 개시된다[2]. 따라서 중합 깊이에 영향을 받지 않고 광중합기와 같은 장비가 요구되지 않는 장점이 있으나, 작업시간이나 경화시간을 조절하기 어렵고 [3] 변색이 잘 되는 단점이 있다[2]. 반면에 광중합형 복합레진은 직접수복용 또는 라미네이트 비니어 접착용으로 주로 사용되는데 이것은 혼합할 필요가 없어 사용이 간편하고 기포가 생

Received August 21, 2019; Revised October 25, 2019; Accepted October 26, 2019

*Corresponding author: Hoon-Sang Chang, Department of Conservative Dentistry, School of Dentistry, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Republic of Korea.

Tel: +82-62-530-5860, Fax: +82-62-530-5629, E-mail: condens@jnu.ac.kr

[†]These authors contributed equally to this work.

Copyright © 2019, Oral Biology Research Institute

길 가능성이 적으며, 작업시간이 길고 색 안정성이 높은 장점이 있다[4]. 하지만 중합광의 투과 한계로 인해 두께 2 mm 이상의 복합레진은 적절히 중합시킬 수 없고[5] 중합되지 않은 단량체에 의해 치수가 자극되는 단점이 있다[6]. 이중중합형 복합레진은 자가중합형과 광중합형 복합레진의 장점을 취하고 단점을 극복하고자 개발되었다. 이중중합형 복합레진을 코어수복에 사용할 경우 중합광에 충분히 노출되는 치관부는 광중합으로 중합되며 중합광이 도달하지 못하는 치근분지부는 자가중합으로 중합이 가능하다.

복합레진이 중합될 때는 필연적으로 중합수축이 일어난다[7]. 레진 단량체 사이의 van der Waals 간격이 중합반응에 의해 공유결합으로 바뀌면서 분자 간의 거리가 줄어들고, 체적이 감소하게 된다. 복합레진의 중합수축에 의해 복합레진과 치아의 계면 사이에 틈새가 형성될 수 있으며[8] 이 틈새로 산이 침투하여 미세누출과 수복물 변연의 변색, 재발성 우식 등이 야기될 수 있기 때문에[9] 복합레진의 중합수축에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[1,7,10-13].

근래에 들어 이중중합형 코어레진은 다양한 색상으로 출시되고 있다. 일반적으로 치아색의 코어레진은 심미성이 우수하지만 치질과 구별하기 어려워 전장관 수복을 위한 치아형성을 할 때 변연(margin)을 확인하기 어려운 단점이 있다. 근래에 출시된 파란색 코어레진은 색상이 치질과 대비되어 치아형성 시에 변연을 확인하기 용이하지만 심미성이 좋지 않아 주로 구치부의 불투명한 전장관을 위한 코어수복 시에 사용된다. 복합레진의 색조는 광중합기의 중합광의 투과에도 영향을 미치는데 일반적으로 어두운 색조의 복합레진이 밝은 색조의 복합레진보다 중합광의 투과가 낮은 것으로 알려져 있다[10,14,15]. 그러나 복합레진의 색조에 대한 연구는 대부분 광중합형 레진에 집중되어 있고 이중중합형 복합레진의 색조에 대한 연구는 흔치 않아볼 수 없다. 따라서 이번 연구에서는 시중에 유통되고 있는 한 종류의 이중중합형 코어레진의 중합수축을 색조와 중합방법에 따라 측정하여 비교 분석하고자 하였다. 귀무가설은 '이 실험에 사용된 이중중합형 코어레진의 중합수축은 색상 또는 중합방법에 영향을 받지 않는다'이다.

대상 및 방법

레진시편 제작

치아색(natural 또는 A3)과 파란색(blue)의 이중중합형 코어레진인 Dual Core (Vericom, Chuncheon, Korea)를 이용하여 레진시편을 제작하였다(Table 1). 슬라이드글라스(Mariefeld, Lauda-Konigshofen, Germany)를 전자저울(FX-200i; A&D, Tokyo, Japan; d=0.001 g) 위에 올린 후 영점을 맞추고 슬라이드글라스 중앙에 이중중합형 코어레진을 약 0.030 g 올렸다. 레진을 중심으로 슬라이드글라스 위에 0.5 mm 두께의 금속 wire 2개를 약 20 mm 간격으로 위치시킨 후 가로 18 mm, 세로 18 mm 크기의 커버글라스로 덮고 또 다른 슬라이드글라스로 가압하여 직경 6 mm, 두께 0.5 mm의 레진시편을 둥근 형태로 제작하였다. Modified bonded disc method를 이용하여 레진시편의 축방향 중합수축(axial polymerization shrinkage)을 1,800 초 동안 실시간으로 측정하였다[11].

자가중합 방법에 의한 중합수축 측정

레진시편을 중합수축 측정기기(u-Biomechanics; IB Systems, Seoul, Korea)의 수평 금속판 위에 위치시키고 linear variable differential transformer (LVDT) probe를 시편을 덮고 있는 커버글라스의 중심에 위치시켰다. 마이크로미터를 조정하여 영점을 맞춘 후 중합수축 측정을 시작하였다. 중합수축 측정 개시 후 20초 동안의 데이터를 baseline 데이터로 설정하였다. 자가중합에 의해 레진시편이 중합되면서 중합수축이 일어나면 시편을 덮고 있는 커버글라스가 레진시편이 수축한 만큼 하방의 슬라이드글라스 방향으로 오목하게 휘어지게 되며, 그 휘어짐 정도를 LVDT probe가 감지하여 컴퓨터에 저장하게 된다. 중합수축은 10 data points/sec의 속도로 1,800초 동안 실시간으로 기록되었으며 이 실험은 26°C의 실온에서 행해졌다(n=7). 이후, 중합이 완료된 레진시편의 두께를 디지털 마이크로미터(Electronic Spline Micrometer #331-261; Mitutoyo, Kawasaki, Japan)로 측정하여 기록하였다. 측정된 중합수축 데이터를 이용하여 이중중합형 코어레진의 중합수축(%)을 다음과 같이 계산하였다[11].

Table 1. Dual-cure core build-up resin used in this study

Composite resin	Manufacturer	Shade	Composition
Dual Core	Vericom, Chuncheon, Korea	Blue/natural (A3)	Barium aluminosilicate, Silica, Bis-GMA, TEGDMA, Additives, 72 wt% filler content

Axial shrinkage (%)= $\Delta h / (h + \Delta h) \times 100\%$

h=중합된 레진시편의 두께

Δh =LVDT probe에 의해 측정된 중합수축량

광중합 방법에 의한 중합수축 측정

레진시편을 위와 동일한 방법으로 세팅하여 baseline 데이터를 얻은 후, 중합수축 측정 개시 20초부터 40초 사이에 레진시편의 하방에서 중합수축 측정기에 내장된 light emitting diode (LED) 광조사기를 이용하여 광중합을 시행하였다. 중합수축은 위에서와 같은 방법으로 측정하였다(n=7).

레진시편을 투과하여 측정된 광조사기의 광강도 측정

코어레진의 색상이 중합광의 투과에 미치는 영향을 알아보기 위해 코어레진을 투과한 중합광의 광강도를 측정하였다. 슬라이드글라스 2장과 1.5 mm 두께의 와이어를 이용하여 두께 1.5 mm, 직경 15 mm 크기의 레진시편을 제작하였다(n=7). 레진시편을 휴대용 dental radiometer (Cure Rite; Kerr, Milford, MA, USA)의 광강도 측정부위에 위치시킨 후 광조사기(G-Light; GC, Tokyo, Japan; 광강도=1,070 mW/cm²)의 광조사 말단이 레진시편에 닿은 상태에서 광조사기를 작동시켜 레진시편을 투과한 중합광의 광강도를 측정하였다. 제조사의 지시에 따라 광조사 개시 10초 후의 광강도 값을 얻었다[16].

통계

실험에 의해 측정된 중합수축 값은 코어레진의 색조와 중합방법에 따라서 유의수준 0.05에서 이원배치 분산분석으로 통계 분석하였고, 각 실험군의 시간에 따른 중합수축은 유의수준 0.05에서 이원배치 분산분석으로 통계 분석하였으며, Tukey's honestly significant difference (HSD) test를 이용하여 사후 검정하였다. 레진시편을 투과하여 측정된 광조사기의 광강도는 유의수준 0.05에서 Student t-test를 이용하여 통계 분석하였다(SPSS ver. 21.0; IBM Corp., Armonk, NY, USA).

결 과

이중중합형 코어레진의 색상과 중합방법에 따른 중합수축을 이원배치 분산분석으로 통계 분석한 결과 색상은 중합수축에 영향을 미치지 않았으나 중합방법은 중합수축에 영향을 미쳤다. 또한, 두 변수 간의 교호작용은 관찰되지 않았다(Table 2). 색상에 따른 코어레진의 중합수축은 치아색 코어레진(3.87%±0.31%)과 파란색 코어레진(3.85%±0.37%) 사이에 통계적으로 유의한 차이가 관찰되지 않았으나(p>0.05). 중합방법에 따른 코어레진의 중합수축은 광중합법(4.10%±0.14%)이 자가중합법(3.63%±0.31%)보다 통계적으로 유의하게 크게 나타났다(p<0.05, Table 3). 시간에 따른 코어레진의 중합수축을 이원배치 분산분석으로 통계 분석한 결과는 광중합법의 경우 코어레진의 색상과 관계없이 600초 이후의 중합수축이 1,800초에서의 중합수축과 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으나 자

Table 2. Summary of two-way ANOVA for main factors (shade and curing mode) and their interaction for polymerization shrinkage of dual-cure core build-up resin

Source of variation	Sum of square	df	Mean square	F	Significance
Shade	0.003	1	0.003	0.057	0.813
Curing mode	1.551	1	1.551	25.925	<0.001
Shade×Curing mode	0.025	1	0.025	0.411	0.527
Error	1.436	24	0.060		
Total	420.281	27			

Table 3. Polymerization shrinkage of dual-cure core build-up resin at 1,800 seconds according to color and curing mode

Polymerization shrinkage	Natural	Blue	Pooled average
Light cure	4.08±0.17Aa	4.11±0.10Aa	4.10±0.14a
Self cure	3.67±0.27Ab	3.58±0.35Ab	3.63±0.31b
Pooled average	3.87±0.31A	3.85±0.37A	

Values are mean±standard deviation (%).

Mean values followed by different capital letters (row) or small letters (column) are significantly different by Tukey's HSD test (α=0.05).

가중합법의 경우에는 치아색 코어레진은 900초 이후에, 파란색 코어레진은 1,200초 이후에 1,800초에서의 중합수축과 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p>0.05$, Table 4). 이는 Fig. 1에서도 확인할 수 있는데 광중합법의 경우 광중합이 시작되면서 급격한 중합수축을 보였으나 그 이후에는 매우 점진적인 중합수축이 관찰되었다. 자가중합법의 경우 중합이 개시되기까지 비교적 많은 시간이 소요되었으며, 중합개시 후부터는 비교적 가파른 중합수축이 관찰되었고 그 이후에도 완만하게 중합수축이 이루어지는 것이 관찰되었다. 각 시간대별 코어레진의 중합수축의 차이는 색조와 관계없이 광중합법이 자가중합법보다 높았다.

코어레진의 색상이 중합광에 영향을 미치는지 알아보기 위해 코어레진을 투과하여 측정한 광강도는 파란색 코어레진이 $308 \pm 17 \text{ mW/cm}^2$ 로 치아색 코어레진의 $241 \pm 10 \text{ mW/cm}^2$ 보다 더 컸다($p<0.05$, Table 5).

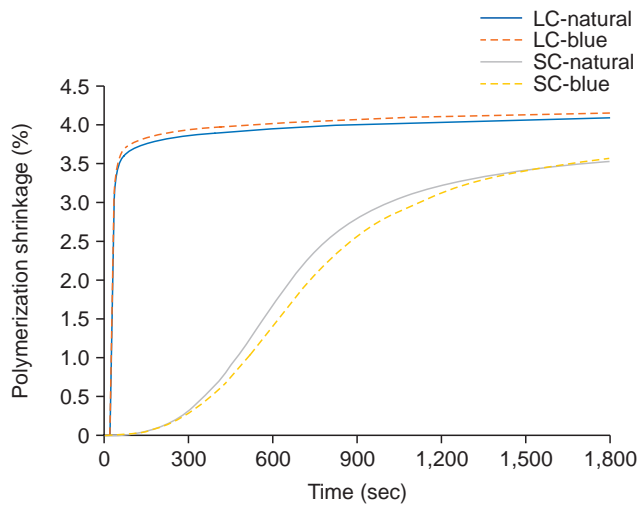


Fig. 1. Polymerization shrinkage curve of dual-cure core build-up resin according to color and curing mode. LC, light cure; SC, self cure.

Table 4. Polymerization shrinkage of dual-cure core build-up resin according to time

Polymerization shrinkage	Time (sec)					
	300	600	900	1,200	1,500	1,800
LC-Natural	3.80±0.12Ba	3.89±0.12ABa	3.94±0.13ABa	3.98±0.13Aba	4.00±0.13Aba	4.08±0.17Aa
LC-Blue	3.93±0.09Ba	4.02±0.09ABa	4.07±0.10ABa	4.11±0.11Aa	4.14±0.11Aa	4.11±0.10Aa
SC-Natural	0.39±0.24Cb	1.88±0.74BCb	2.95±0.52ABb	3.37±0.37Ab	3.55±0.30Ab	3.67±0.27Ab
SC-Blue	0.29±0.15Db	1.42±0.65Cb	2.56±0.77Bb	3.12±0.58ABb	3.41±0.44ABb	3.58±0.35Ab

Values are mean±standard deviation (%).

Mean values followed by different capital letters (row) or small letters (column) are significantly different by Tukey's HSD test ($\alpha=0.05$).

LC, light cure; SC, self cure.

고찰

이번 연구에서는 색조 또는 중합방법에 따라 이중중합형 코어레진의 중합수축을 측정하였다. 여러 연구에서 복합레진의 중합수축이 중합도와 강한 양의 상관관계가 있다고 보고한 것에 근거하여[12,13] 중합수축이 크면 중합도(degree of conversion) 또한 크다고 할 수 있다. 따라서 이번 연구에서 측정된 중합수축을 바탕으로 이중중합형 코어레진의 중합도를 간접적으로 측정할 수 있다.

이번 실험에 사용된 이중중합형 코어레진의 중합수축은 색상에 의해 영향을 받지 않았으나 중합방법에 의해서는 영향을 받았기 때문에 귀무가설은 일부 기각되었다. 복합레진의 색상에 대한 이전의 문헌을 고찰해보면 많은 연구들이 광중합형 복합레진의 색조에 따른 중합수축이나 중합깊이에 대해 보고하였는데 그 결과는 다양하다. Jeong 등[10]은 광중합형 복합레진의 색조에 따른 중합수축을 평가한 논문에서 Solitare 2는 색조에 따라 중합수축의 차이가 있었으나 Z250은 색조에 따라 중합수축의 차이가 없었다고 보고하였는데 복합레진마다 색조에 따른 중합수축의 차이의 유무는 각 복합레진의 충전재의 크기나 함량, 레진기질의 구성성분이나 비율, catalyst 또는 inhibitor의 함량의 차이 등으로 인한 것이라고 하였다. 이와 유사하게 Ferracane 등[17]은 광중합형 복합레진의 색조와 중합깊이에 대한 실험을 진행했는데 Prisma는 밝은 색조가 어두운 색조보다

Table 5. Power density of LED light curing unit measured through dual-cure core build-up resin specimens of 1.5 mm thickness

Color	Power density (mW/cm ²)
Natural	241±10a
Blue	308±17b

Values are mean±standard deviation (mW/cm²).

Mean values followed by different letters are significantly different ($\alpha=0.05$).

LED: light emitting diode.

중합깊이가 깊었던 반면에 Aurafill은 밝은 색조와 어두운 색조가 유사한 중합깊이를 보였다고 보고하였다. 이 논문에서는 복합레진마다 색조에 따른 중합깊이의 차이 유무는 색조 자체보다는 반투명도(translucency)와 같은 요인 때문일 수 있다고 하였다. 가령 색조가 다르더라도 반투명도(translucency)가 비슷할 경우 중합수축이 비슷할 수 있다는 얘기다. Swartz 등[15]은 어두운 색조의 복합레진이 밝은 색조의 복합레진보다 중합광의 투과가 낮아 중합깊이가 감소한다고 보고하였다. 이번 실험에서 레진시편을 육안으로 관찰했을 때 파란색 레진시편이 치아색 레진시편보다 어두워 보이지만 1.5 mm 두께로 제작한 레진시편을 투과하여 측정된 중합광은 오히려 파란색 레진시편이 치아색 레진시편보다 더 컸다(Table 4). Chang 등[16]은 A3 색조의 dentin shade (A3D)와 enamel shade (A3E)를 투과하여 중합광을 측정했을 때 상대적으로 더 투명한 enamel shade가 dentin shade보다 광강도가 유의하게 더 크다고 보고하였다. 이를 바탕으로 유추하면 파란색 코어레진이 치아색 코어레진보다 더 투명하다고 할 수 있을 것이다. 하지만 중합수축을 측정할 때 레진시편의 두께가 0.5 mm로 얇기 때문에 파란색의 코어레진이 치아색의 코어레진보다 중합광을 더 많이 투과시켰음에도 중합수축에는 유의한 차이가 없었던 것으로 생각된다. 또한, 레진시편을 자가중합법으로 중합했을 때에도 파란색이나 치아색의 코어레진은 색상 이외의 충전재 함량이나 레진기질의 구성성분이 동일하기 때문에 중합수축에 유의한 차이가 없었다고 할 수 있을 것이다.

이번 연구에서 중합방법에 따른 코어레진의 중합수축은 광중합법이 자가중합법보다 더 크게 측정되어 중합도도 더 크다고 할 수 있다. 이는 많은 연구결과와 일치하는데 일반적으로 이중중합형 복합레진은 광중합 없이 자가중합만 할 때가 광중합이 동반될 때에 비해 중합도가 낮은 것으로 보고되었다[1,3,11,18-20]. 그 이유 중 하나는 자가중합반응이 일어나기 전에 작업시간을 충분히 부여하기 위해 자가중합 개시제의 함량을 제한하여 자가중합반응이 광중합반응에 비해 느리게 진행되기 때문이다[1,21]. 반면에 Karakis 등[22]은 Clearfil Dc Core Automix와 Grandio Core Dc 등 2종의 코어레진으로 실험한 결과 Clearfil Dc Core Automix의 경우 자가중합법에 의한 중합도가 광중합법에 의한 중합도보다 낮았지만 Grandio Core Dc의 경우 중합방법에 따른 중합도의 차이가 없었다고 보고하였다. 즉 이중중합형 코어레진의 중합방법에 따른 중합도는 각 제품의 구성성분에 영향을 받는다고 하였다.

또한 이번 연구에서 광중합법과 자가중합법은 이중중합형 코어레진의 중합수축 그래프에서도 뚜렷한 차이를 보였다. 색상에 관계없이 광중합법의 경우 광조사가 이루어지면서 급격한 중합수축을 보였다. 또한, 광조사가 끝난 후에도 조금씩 수

축이 진행되는 양상을 보였는데 이는 복합레진의 중합이 광조사가 끝난 이후에도 최대 24시간 동안 서서히 진행되기 때문이다[23]. 자가중합법의 경우 앞서 설명한대로 작업시간을 충분히 부여하기 위해 중합개시제까지 더 많은 시간이 소요되었다. 전체적으로 자가중합법은 광중합법에 비해 중합수축이 더 느리게 진행되었으며 1,800초에서의 최종 중합수축의 차이도 확연히 관찰되었다.

한 연구에서는 레진시멘트를 광중합한 후 600초에서의 중합도를 1,800초에서의 중합도의 백분율로 계산하여 비교하였다. 이는 임상에서 간접 수복물을 레진시멘트로 접착한 후 교합이 가해지기까지의 대략적인 시간과 레진시멘트의 중합이 충분히 이루어지기까지의 시간을 고려한 것이다. 전통적인 레진시멘트인 RelyX ARC는 97%, self-adhesive resin cement인 RelyX Unicem은 93%를 보였다[20]. Table 4의 중합수축 값을 이용하여 600초에서의 중합도를 1,800초에서의 중합도의 백분율로 계산해보면 광중합법에서의 치아색 코어레진은 95% ($3.89/4.08 \times 100$), 파란색 코어레진은 98% ($4.02/4.11 \times 100$)를 보였으며 자가중합법에서는 치아색 코어레진이 51% ($1.88/3.67 \times 100$), 파란색 코어레진이 40% ($1.42/3.58 \times 100$)를 보였다. 더욱이 600초에서 자가중합법에 의한 코어레진의 중합수축을 최대중합도를 보인 1,800초에서 광중합법에 의한 중합수축과 비교했을 때는 치아색 코어레진이 51%에서 46% ($1.88/4.08 \times 100$)로, 파란색 코어레진이 40%에서 35% ($1.42/4.11 \times 100$)로 더 감소하였는데 이는 자가중합했을 때 최대중합수축이 광중합했을 때의 최대중합수축의 90% (치아색, $3.67/4.08 \times 100$)와 87% (파란색, $3.58/4.11 \times 100$)로 낮았기 때문이다(Fig. 2). 접착용 레진시멘트와 달리 코어레진은 시멘

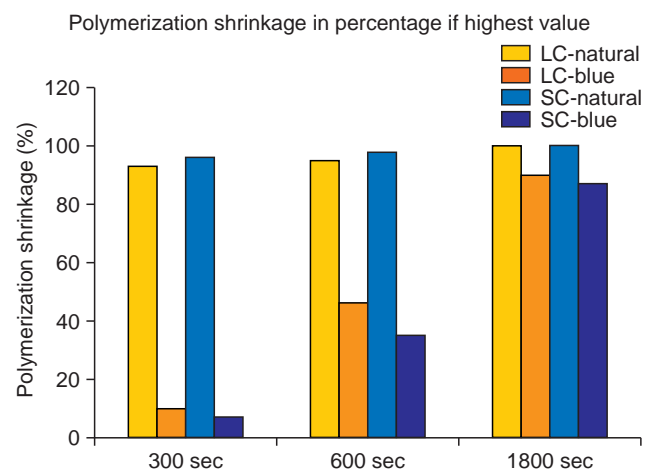


Fig. 2. Polymerization shrinkage of dual-cure core build-up resin in percentage of the highest polymerization shrinkage measured at 1,800 seconds in light curing mode. LC, light cure; SC, self cure.

트 잔사 처리 등의 과정이 없기 때문에 더 빨리 교합압에 노출되거나 전장관을 위한 치아형성이 이루어질 수 있다고 가정하여 300초에서의 중합수축을 1,800초에서의 중합수축과 비교할 경우, 광중합법에서는 치아색 코어레진이 93%, 파란색 코어레진이 96%를 보였으나 자가중합법에서는 치아색 코어레진이 11%, 파란색 코어레진이 8%를 보여 중합이 매우 낮음을 보여주었다 (Fig. 2). 따라서 이중중합형 코어레진으로 근관와동을 수복할 경우에는 자가중합보다는 광중합이 추천된다.

결론적으로, 이번 연구에서는 치아색과 파란색으로 시판되는 한 종류의 이중중합형 코어레진을 이용하여 색상과 중합방법이 이중중합형 코어레진의 중합수축에 미치는 영향에 대해 알아본 결과 색상은 중합수축에 유의미한 영향을 주지 않았으나 중합 방법은 광중합법이 자가중합법보다 중합수축이 유의하게 더 컸기 때문에 궁극적으로 중합도가 더 높았다고 할 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper was supported by Wonkwang University in 2019.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare that they have no competing interests.

ORCID

Yoorina Choi

<https://orcid.org/0000-0001-6869-8562>

Karl Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7661-1658>

Hoon-Sang Chang

<https://orcid.org/0000-0002-3019-1528>

REFERENCES

1. Tauböck TT, Bortolotto T, Buchalla W, Attin T, Krejci I. Influence of light-curing protocols on polymerization shrinkage and shrinkage force of a dual-cured core build-up resin composite. *Eur J Oral Sci* 2010;118:423-429. doi: 10.1111/j.1600-0722.2010.00746.x.
2. Kwon TY, Bagheri R, Kim YK, Kim KH, Burrow MF. Cure mechanisms in materials for use in esthetic dentistry. *J Investig Clin Dent* 2012;3:3-16. doi: 10.1111/j.2041-1626.2012.00114.x.
3. Rueggeberg FA, Caughman WF. The influence of light exposure on polymerization of dual-cure resin cements. *Oper Dent* 1993;18:48-55.
4. Kawaguchi M, Fukushima T, Miyazaki K. The relationship between cure depth and transmission coefficient of visible-light-activated resin composites. *J Dent Res* 1994;73:516-521. doi: 10.1177/00220345940730020601.
5. Ahn MK, Jeong TS, Kim S. A study on the changes in polymerization of light-activated composite resin with various exposure time and distance. *J Kor Acad Pediatr Dent* 2001;28:293-299.
6. Jeon CM, Yoo HM, Kwon HC. Effect of pH and storage time on the elution of residual monomers from polymerized composite resins. *J Korean Acad Conserv Dent* 2004;29:249-266. doi: 10.5395/JKACD.2004.29.3.249.
7. Kwon Y, Lee IB. Polymerization shrinkage kinetics of silorane-based composites. *J Korean Acad Conserv Dent* 2010;35:51-58. doi: 10.5395/JKACD.2010.35.1.051.
8. Kim JH, Shin DH. Microleakage of the experimental composite resin with three component photoinitiator systems. *J Korean Acad Conserv Dent* 2009;34:333-339. doi: 10.5395/JKACD.2009.34.4.333.
9. Murray PE, Hafez AA, Smith AJ, Cox CF. Bacterial microleakage and pulp inflammation associated with various restorative materials. *Dent Mater* 2002;18:470-478. doi: 10.1016/s0109-5641(01)00072-0.
10. Jeong TS, Kang HS, Kim SK, Kim S, Kim HI, Kwon YH. The effect of resin shades on microhardness, polymerization shrinkage, and color change of dental composite resins. *Dent Mater J* 2009;28:438-445. doi: 10.4012/dmj.28.438.
11. Lee IB, An W, Chang J, Um CM. Influence of ceramic thickness and curing mode on the polymerization shrinkage kinetics of dual-cured resin cements. *Dent Mater* 2008;24:1141-1147. doi: 10.1016/j.dental.2008.03.015.
12. 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;32:304-314. doi: 10.1111/j.1365-2842.2004.01414.x.
13. Rueggeberg F, Tamareselvy K. Resin cure determination by polymerization shrinkage. *Dent Mater* 1995;11:265-268. doi: 10.1016/0109-5641(95)80060-3.
14. Cho KM. Transmitting ability of halogen light in different composite resin colors. *J Dent Rehabil Appl Sci* 2010;26:447-453.
15. Swartz ML, Phillips RW, Rhodes B. Visible light-activated resins--depth of cure. *J Am Dent Assoc* 1983;106:634-637. doi: 10.14219/jada.archive.1983.0140.
16. Chang HS, Lim YJ, Kim JM, Hong SO. Power density of light curing units through resin inlays fabricated with direct and indirect composites. *J Korean Acad Conserv Dent* 2010;35:353-358. doi: 10.5395/JKACD.2010.35.5.353.
17. Ferracane JL, Aday P, Matsumoto H, Marker VA. Relation-

- ship between shade and depth of cure for light-activated dental composite resins. *Dent Mater* 1986;2:80-84. doi: 10.1016/s0109-5641(86)80057-4.
18. Aguiar TR, Di Francescantonio M, Arrais CA, Ambrosano GM, Davanzo C, Giannini M. Influence of curing mode and time on degree of conversion of one conventional and two self-adhesive resin cements. *Oper Dent* 2010;35:295-299. doi: 10.2341/09-252-L.
 19. Chen L, Suh BI, Gleave C, Choi WJ, Hyun J, Nam J. Effects of light-, self-, and tack-curing on degree of conversion and physical strength of dual-cure resin cements. *Am J Dent* 2016;29:67-70.
 20. Moraes RR, Boscato N, Jardim PS, Schneider LF. Dual and self-curing potential of self-adhesive resin cements as thin films. *Oper Dent* 2011;36:635-642. doi: 10.2341/10-367-L.
 21. Moraes RR, Faria-e-Silva AL, Oglari FA, Correr-Sobrinho L, Demarco FF, Piva E. Impact of immediate and delayed light activation on self-polymerization of dual-cured dental resin luting agents. *Acta Biomater* 2009;5:2095-2100. doi: 10.1016/j.actbio.2009.01.030.
 22. Karakis D, Yıldırım-Bicer AZ, Dogan A, Koralay H, Cavdar S. Effect of self and dual-curing on degree of conversion and crosslink density of dual-cure core build-up materials. *J Prosthodont Res* 2017;61:210-216. doi: 10.1016/j.jpor.2016.05.002.
 23. Dewaele M, Truffier-Boutry D, Devaux J, Leloup G. Volume contraction in photocured dental resins: the shrinkage-conversion relationship revisited. *Dent Mater* 2006;22:359-365. doi: 10.1016/j.dental.2005.03.014.