

Color Change in Tooth Induced by Various Calcium Silicate-Based Pulp-Capping Materials

Jiyeon Jeon, Namki Choi, Seonmi Kim

Department of Pediatric Dentistry, School of Dentistry, Chonnam National University

Abstract

Color stability of pulp-capping material is considered vital to the final aesthetic result since the material is placed in the coronal area. The purpose of this study was to compare the color stability of various pulp-capping materials by analyzing color change of tooth over time.

A cavity was formed in the crown of the extracted premolar, and 4 types of pulp-capping materials were filled. Color assessment was performed with a spectrophotometer at different intervals: before placement; immediately after material placement; 1 day, 1 week, 2 weeks, 4 weeks, 8 weeks, 12 weeks, and 16 weeks after placement.

Proroot white MTA[®] and TheraCal LC[®] showed a significant decrease in the L* value and an increase in the ΔE^* value over time. In contrast, Biodentine[®] and Well-Root[™] PT showed no significant change in the L* value and maintained a steady ΔE^* value. The application of pulp-capping materials containing bismuth oxide as a radiopacifier may result in a color change of teeth. Long-term color stability of pulp-capping materials should be considered when treating teeth with thin enamel thickness or in aesthetically important area.

Key words : Color stability, Tooth discoloration, Pulp-capping, Calcium silicate, Spectrophotometer

I. 서 론

미성숙 영구치에서 깊은 치아 우식이나 외상 등의 원인으로 치수에 매우 근접하거나 이미 치수가 노출되었을 때 치수의 생활력을 유지하고, 미완성 치근의 지속적인 발육을 유도하는 생활치수치료가 행해지고 있다[1,2]. 생활치수치료 중 치수복조술은 적절한 적응증에서 치수 절단술 혹은 치수 절제술보다 치근의 성장에 있어서 바람직하다고 할 수 있다[1,3].

칼슘-실리케이트계 시멘트는 치근단 충전을 위해 개발되었으나 높은 항균성과 우수한 기계적 성질 및 생체활성적 특성으

로 치수 복조 및 치수 절단술 등의 분야에도 활용되고 있다[4]. Mineral trioxide aggregate (MTA)는 가장 많이 사용되고 있는 칼슘-실리케이트계 재료로 높은 생체 적합성과 우수한 밀봉 능력을 가지며 여러 연구에서 치수복조제로 사용했을 때 좋은 결과를 보고하고 있다[5-7]. 처음으로 상품화된 MTA는 Proroot gray MTA[®] (Dentsply, Tulsa, OK, USA; gMTA)로 재료 자체의 색깔이 어둡고 해당 치아와 인접 치은 변연에 색조 변화를 유발하는 단점이 있다[8]. 이 색조 변화를 개선하고 임상적으로 비슷한 성질을 가지는 Proroot white MTA[®] (Dentsply, Tulsa, OK, USA; wMTA)가 개발되었으나 이 또한 다양한 금속 산화물을 포함하

Corresponding author : Seonmi Kim

Department of Pediatric Dentistry, School of Dentistry, Chonnam National University, 33 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, 61186, Korea

Tel: +82-62-530-5660 / Fax: +82-62-530-5669 / E-mail: gracekim@jnu.ac.kr

Received December 24, 2020 / Revised March 18, 2021 / Accepted February 24, 2021

여 색조 변화를 일으킨다고 알려져 있다[9-11].

이러한 한계를 극복하기 위해서 다양한 칼슘-실리케이트 기반의 치수복조제들이 개발되어 전통적인 MTA와 함께 사용되고 있다. TheraCal LC® (Bisco Inc., Schaumburg, USA; TLC)는 기존의 MTA보다 빠른 경화 시간, 낮은 용해성, 높은 흐름성, 조작의 편리성 등을 특징으로 하는 광중합 레진 강화형 칼슘-실리케이트 재료로, 직접 및 간접 치수복조술을 위해 고안된 재료이다[12]. 상아질 대체재로 개발된 Biodentine® (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, France; BD)는 칼슘-실리케이트의 높은 생체 적합성과 생체 활성을 가지며 기존의 MTA보다 조작이 용이하고 경화 시간이 짧다는 장점이 있다[13,14]. Well-Root™ PT (Vericom Co., Chuncheon, Korea; PT)는 별도의 혼합 없이 즉시 사용이 가능한 바이오 세라믹 재료로 경화되는 동안 수축이 발생하지 않고, 우수한 압축 강도와 항균성을 보인다[15].

성공적인 치수복조술을 위해 치수복조제는 치수의 생활력을 유지 시킬 수 있어야 하며 생체친화적이면서 체적 안정성을 보여야 한다[16]. 또한 치수복조제는 치관부에 위치하기 때문에 심미적인 면도 고려되어야 하며, 오랜 시간이 지나도 치아 등의 조직에 색조 변화를 일으키지 않는 색 안정성을 지녀야 한다[17].

MTA와 BD의 색조 변화에 대한 많은 비교 연구가 시행되어왔으나 소아치과 영역에서 치수복조제로 많이 사용하고 있는 TLC와 비교적 최근에 개발된 재료인 PT의 색 안정성에 관한 연구는 아직 찾아보기 힘들다.

이에 이 연구는 wMTA, TLC, BD, PT를 치아의 와동 내부에 충전하고 레진으로 수복한 후, 분광광도계를 사용하여 시간에 따른 치관 색조 변화 정도를 비교 분석하여 수복재의 심미성 및 치아의 색 안정성에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

II. 연구 재료 및 방법

1. 연구 재료

1) 치아 준비

교정 치료를 이유로 발거된 75개의 소구치를 사용하였다. 치관의 형태 이상, 우식, 수복물, 파절, 마모가 있는 치아는 제외하였다. 이 연구는 전남대학교 치과병원 생명 의학 연구 윤리 심의 위원회의 심의 및 승인 하에 시행되었다(IRB No. : CNUDH-2020-016).

2) 연구 재료

4가지 종류의 치수복조제가 이 연구에 사용되었다(Table 1).

2. 연구 방법

1) 치아 와동 형성

각 치아를 육안으로 검사한 후, 초음파 스케일러를 사용하여

Table 1. Pulp capping materials used in this study

Materials	Manufacturers	Composition	Setting time (min)
Proroot white MTA®	Dentsply, Tulsa, OK, USA	Portland cement 75% Bismuth oxide 20% Calcium sulfate dehydrate 5%	Initial 30 - 40 Final 140 - 170
TheraCal LC®	Bisco Inc., Schaumburg, IL, USA	Portland cement 45% Bismuth oxide 10% Barium sulfate < 3% Metacrylic resin 40% Hydrophilic thickening agent 5%	Light-polymerize for 20 seconds
Biodentine®	Septodont, Saint Maur des Fosses, France	Tricalcium silicate > 70% Dicalcium silicate < 15% Calcium carbonate > 10% Zirconium oxide 5% Iron oxide < 1%	10 - 12
Well-Root™ PT	Vericom Co., Chuncheon, Korea	Calcium aluminosilicate compound Calcium sulfate dihydrate Zirconium oxide Polyethylene glycol Polypropylene glycol	Initial 5 ± 2 Final 45 ± 5

유기물질이나 침착물, 외인성 색소를 제거하고 치아의 표면을 퍼미스와 물로 연마하였다. 치아의 백악-법랑 경계(Cemento-enamel junction, CEJ)에서 치근단 쪽으로 2.0 mm 부위를 다이아몬드 디스크를 이용하여 수평 절단한 후, excavator와 Hedström 파일(#50 - 70)을 이용해 치경부 절제 부위에서 치수 조직을 기계적으로 제거하였다[10]. 5% 차아염소산나트륨 용액에 치아를 10분 동안 담가 남아있는 유기물질을 제거한 후 생리 식염수로 여러 번 세척하고 연구에 사용할 때까지 인산 완충 식염수(phosphate buffered saline, PBS)에 담가 4°C에서 보관하였다.

준비된 치아의 교합면에 주수 하 고속엔진용 #245 카바이드 버를 사용하여 중심구를 기준으로 근원심폭 3.0 mm, 협설폭 5.0 mm, 깊이 3.0 mm 크기의 와동을 형성하였다(Fig. 1). 캘리퍼(Digital caliper, Hanco, China)를 사용하여 협측의 법랑질-상아질 두께를 2.0 mm로 표준화하였다[18]. 와동이 형성된 치아를 무작위로 각 군당 15개씩 배정하였다.

2) 와동 내 치수복조제 충전

각 재료를 제조사의 지시에 따라 혼합하고 치아의 와동 내에 1.0 mm 두께로 충전한 후, 95%의 상대 습도에서 wMTA는 40분[19,20], BD는 12분[21], PT는 25분[22] 동안 경화시켰다. TLC는 LED 광중합기(D-Lux, DiaDent, Korea)를 이용하여 1600 mW/cm²로 20초간 광중합하였다[12].

제조사에서 제시한 각 재료의 경화 시간이 지난 후 나머지 2.0 mm 깊이의 와동을 5세대 접착 시스템(Adper™ Single Bond 2, 3M ESPE™, USA)과 A2 shade의 복합 레진(Filtek™ Z350, 3M ESPE™, USA)을 사용하여 수복하고(Fig. 1), LED 광중합기를 이용하여 1600 mW/cm²로 20초간 광중합하였다.

대조군은 치수복조제 없이 3.0 mm의 깊이를 복합 레진으로

수복하였다. 모든 치아는 연구 기간 동안 개별적으로 PBS가 들어 있는 폴리에틸렌 튜브에 실내 온도로 보관하였다.

3) 치관의 색조 측정

측정의 일관성 및 재현성을 위하여 고무 인상재(Exafine Putty, GC Co., Japan)를 사용하여 각 치아를 고정하는 몰드(Fig. 2)를 제작하였다[23]. 치아의 색조 측정은 분광광도계(NF999, Nippon Denshoku, Japan)를 사용하였으며 자외선을 포함하여 평균 일광을 가장 잘 표현해주는 광원인 D65를 표준 광원으로 사용하였다[24].

치아 준비 후 재료를 넣기 전(T0), 재료를 넣은 즉시(T1), 재료를 넣고 1일 후(T2), 1주 후(T3), 2주 후(T4), 4주 후(T5), 8주 후(T6), 12주 후(T7), 16주 후(T8)에 측정을 시행하였다. 매 측정 전에 제조사의 백색 교정판을 이용하여 조절을 시행하였고, 1명의 술자가 CEJ의 2.0 mm 상방에서 치아의 협면에 수직으로 한 치아마다 3번씩 측정하여 그에 대한 평균을 구하였다. 모든 치아는 분광광도계로 촬영 직전 2.0 × 2.0 inch 거즈를 사용하여 잔존 용액을 20초간 건조한 후 측정하였고, 탈수에 따른 치아의 색조 변화를 막기 위해 측정 후 즉시 PBS가 담긴 폴리에틸렌 튜브에 보관하였다.

색조 측정은 1978년에 국제조명위원회(Commission International de l'éclairage, CIE)에서 제시한 L*a*b* system을 사용하였다. L*은 검정(0)에서부터 백색(100)까지 범위의 밝기, a*은 녹색(-80)에서 적색(+80), b*은 청색(-80)에서 황색(+80)의 채도를 나타낸다[25]. 측정된 L*, a*, b* 값으로 치아의 색상을 분석하고, 시간에 따른 총 색조 차이인 ΔE*를 계산하였다. 사람이 인지할 수 있는 색조 변화의 역치로 ΔE* ≥ 3.3을 이용하였으며[26,27], 색차(ΔE*)는 다음의 공식을 통해 산출하였다.

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

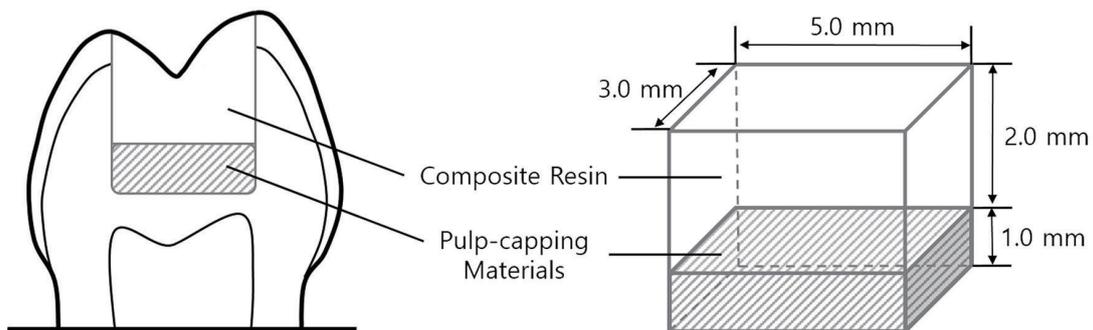


Fig. 1. Schematic illustration of the preparation of a specimen.

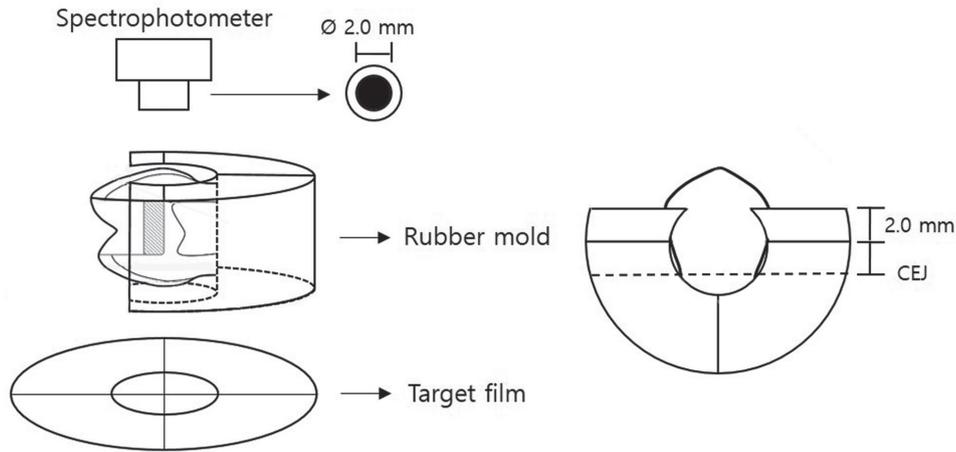


Fig. 2. Schematic illustration of mold used in this study.

3. 통계 분석

결과는 SPSS® 20.0 (Statistical Package for Social Sciences, IBM Corp., USA)를 이용하여 분석 및 통계처리 하였다. Two-way repeated measurements ANOVA을 이용하여 각 재료에서의 L*, a*, b* 값과 ΔE*을 비교하였으며, 시간에 따른 통계적 유의성 및 상호관계를 분석하고 Bonferroni's method을 시행하였다.

Ⅲ. 연구 성적

모든 실험군에서 재료를 넣기 전에 집단 간 L*, a*, b* 값에 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 시간에 따라 대조군과 BD, PT는 L* 값의 유의한 차이가 없었다. wMTA와 TLC는 시간이 지날수록 점차 L* 값이 감소하였는데, 처음과 비교하여 wMTA는 2주 후 (p = 0.000)부터, TLC는 8주 후(p = 0.028)부터 더 어두운색으로 변화를 보였다(Table 2). 대조군과 비교했을 때 wMTA은 대조군

Table 2. Mean and standard deviation of L* values of the control and experimental groups at different time points

	Mean (SD)									p value
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
Ctrl	68.59 (3.95)	69.74 (3.59)	68.02 (2.39)	68.57 (2.75)	69.71 ^a (2.81)	68.18 ^a (3.57)	68.72 ^a (3.07)	67.63 ^a (2.07)	67.11 ^a (2.10)	0.177
wMTA	72.36 ^A (3.19)	70.90 ^A (1.91)	70.49 ^A (3.40)	68.41 ^{AB} (3.53)	65.22 ^{bBC} (2.72)	63.10 ^{bCD} (1.95)	61.31 ^{bDE} (3.13)	59.75 ^{bE} (1.57)	59.11 ^{bE} (2.18)	0.000
TLC	71.57 ^A (3.18)	71.06 ^{AB} (3.95)	69.21 ^{AB} (2.98)	69.15 ^{AB} (3.94)	68.90 ^{AB} (1.93)	68.29 ^{AB} (3.35)	68.00 ^{AB} (2.57)	67.72 ^{AB} (3.99)	67.68 ^{AB} (2.22)	0.007
BD	70.89 (2.88)	70.63 (3.32)	70.61 (2.82)	70.34 (3.37)	70.30 ^a (2.51)	70.28 ^a (2.56)	69.91 ^a (2.34)	69.90 ^a (2.98)	69.31 ^a (2.34)	0.858
PT	69.13 (3.28)	70.30 (3.45)	69.15 (2.75)	68.03 (3.12)	69.08 ^a (3.15)	67.96 ^a (3.86)	68.00 ^a (3.16)	67.56 ^a (1.90)	68.81 ^a (1.59)	0.349
p value	0.069	0.908	0.256	0.582	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	

p value from Two way repeated measurements ANOVA

a,b : Same superscript letters indicate non significantly different between groups

A,B,C,D,E : Same superscript letters indicate non significantly different between time points

Ctrl = Control, wMTA = Proroot white MTA®, TLC = TheraCal LC®, BD = Biodentine®, PT = Well-Root™ PT

T0 = before placement, T1 = immediately after placement, T2 = 1 day after placement, T3 = 1 week after placement, T4 = 2 weeks after placement, T5 = 4 weeks after placement, T6 = 8 weeks after placement, T7 = 12 weeks after placement, T8 = 16 weeks after placement

과 2주 후($p = 0.005$)부터 차이를 보이기 시작하여 16주 후($p = 0.000$)까지 통계적으로 유의한 L^* 값의 차이를 보였다. TLC, BD, PT는 대조군과 유사한 밝기를 나타내었다(Table 2).

a^* , b^* 값은 대조군과 실험군 모두에서 시간의 경과에 따른 통계적인 유의성이 관찰되지 않았다(Table 3, 4).

각 집단 내에서 총 색조 차이인 ΔE^* 값을 비교하였을 때, 시간에 따라 wMTA는 2주 후($p = 0.000$)부터, TLC는 12주 후($p =$

0.039)부터 처음과 유의한 차이를 보였다. 대조군과 BD, PT는 일정한 범주의 값을 나타내었다(Table 5). 대조군과 비교했을 때 wMTA는 2주 후($p = 0.004$)부터, TLC는 16주 후($p = 0.029$)부터 유의한 ΔE^* 값의 차이를 보였다(Table 5). BD, PT는 대조군과 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

대조군을 제외한 모든 실험군에서 재료를 넣고 하루 후부터 인지할 만한 색조 변화를 관찰할 수 있었다(Fig. 3).

Table 3. Mean and standard deviation of a^* values of the control and experimental groups at different time points

	Mean (SD)									p value
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
Ctrl	-0.01 (1.42)	-0.07 (1.41)	-0.10 (1.16)	-0.16 (1.32)	-0.25 (1.51)	-0.11 (1.31)	-0.31 (1.31)	0.05 (1.38)	-0.49 (1.57)	0.984
wMTA	0.07 (0.94)	0.23 (0.90)	0.53 (1.84)	-0.08 (2.16)	-0.20 (1.33)	-0.19 (1.17)	-0.12 (2.18)	0.18 (2.02)	0.48 (1.83)	0.733
TLC	-0.34 (1.24)	-0.43 (1.22)	-0.11 (1.40)	-0.21 (1.94)	-0.03 (1.77)	0.05 (1.28)	-0.12 (2.32)	0.06 (2.40)	-0.12 (3.70)	0.936
BD	0.21 (1.91)	0.19 (1.64)	0.55 (1.85)	0.28 (1.47)	0.09 (1.61)	-0.05 (1.63)	-0.01 (1.58)	0.33 (2.13)	0.24 (3.19)	0.940
PT	0.19 (1.17)	-0.11 (0.89)	0.13 (0.95)	0.31 (2.12)	0.42 (0.87)	0.57 (0.81)	0.02 (1.83)	0.58 (1.05)	0.21 (2.06)	0.735
p value	0.904	0.765	0.750	0.946	0.851	0.685	0.995	0.966	0.931	

p value from Two way repeated measurements ANOVA

Ctrl = Control, wMTA = Proroot white MTA®, TLC = TheraCal LC®, BD = Biodentine®, PT = Well-Root™ PT

T0 = before placement, T1 = immediately after placement, T2 = 1 day after placement, T3 = 1 week after placement, T4 = 2 weeks after placement, T5 = 4 weeks after placement, T6 = 8 weeks after placement, T7 = 12 weeks after placement, T8 = 16 weeks after placement

Table 4. Mean and standard deviation of b^* values of the control and experimental groups at different time points

	Mean (SD)									p value
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
Ctrl	4.11 (1.72)	3.48 (2.02)	3.32 (1.81)	3.58 (1.81)	3.05 (2.40)	3.17 (1.76)	3.27 (2.10)	3.50 (2.22)	3.54 (3.72)	0.609
wMTA	3.90 (3.51)	3.08 (3.54)	3.49 (3.61)	3.86 (3.03)	3.56 (3.98)	3.59 (3.97)	3.63 (2.96)	3.68 (3.65)	2.82 (3.75)	0.910
TLC	3.04 (3.40)	3.19 (3.68)	2.89 (3.38)	2.77 (3.91)	3.42 (3.76)	3.25 (3.84)	3.42 (3.99)	3.20 (1.92)	2.39 (3.71)	0.958
BD	3.36 (2.89)	2.94 (3.74)	3.33 (2.73)	3.30 (3.62)	3.49 (3.41)	3.97 (2.83)	3.78 (2.96)	3.25 (2.52)	3.19 (3.20)	0.986
PT	3.05 (1.48)	2.46 (2.47)	2.96 (2.42)	2.75 (2.11)	2.66 (2.21)	2.53 (2.85)	2.55 (2.71)	2.64 (2.77)	2.46 (2.37)	0.976
p value	0.863	0.967	0.987	0.899	0.968	0.885	0.906	0.928	0.934	

p value from Two way repeated measurements ANOVA

Ctrl = Control, wMTA = Proroot white MTA®, TLC = TheraCal LC®, BD = Biodentine®, PT = Well-Root™ PT

T0 = before placement, T1 = immediately after placement, T2 = 1 day after placement, T3 = 1 week after placement, T4 = 2 weeks after placement, T5 = 4 weeks after placement, T6 = 8 weeks after placement, T7 = 12 weeks after placement, T8 = 16 weeks after placement

Table 5. Mean and standard deviation of ΔE^* values of the control and experimental groups at different time points

	Mean (SD)								ρ value
	T1-T0	T2-T0	T3-T0	T4-T0	T5-T0	T6-T0	T7-T0	T8-T0	
Ctrl	2.78 (1.70)	2.57 (2.50)	3.04 (2.35)	3.25 ^a (2.13)	3.29 ^a (1.81)	2.79 ^a (2.11)	3.27 ^a (2.31)	3.17 ^a (2.37)	0.980
wMTA	3.20 ^A (2.85)	3.93 ^A (2.19)	5.17 ^A (3.07)	7.95 ^{bB} (3.64)	9.71 ^{bBC} (3.68)	11.56 ^{bCD} (3.40)	13.10 ^{bD} (3.27)	13.39 ^{bD} (3.50)	0.000
TLC	3.21 ^A (2.04)	3.80 ^{AB} (1.99)	3.94 ^{ABC} (3.82)	4.42 ^{abABC} (3.07)	4.88 ^{aABC} (2.30)	4.79 ^{aABC} (2.71)	6.13 ^{abc} (2.35)	6.16 ^{cc} (1.62)	0.017
BD	3.29 (1.84)	3.71 (0.69)	3.67 (2.68)	3.93 ^a (2.67)	3.69 ^a (1.74)	3.66 ^a (2.17)	3.94 ^a (2.02)	3.78 ^{ac} (1.24)	0.999
PT	3.25 (0.88)	3.76 (2.91)	3.39 (1.16)	3.39 ^a (1.84)	3.43 ^a (1.84)	3.33 ^a (0.85)	3.88 ^a (1.82)	3.75 ^{ac} (0.68)	0.994
ρ value	0.977	0.630	0.488	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	

ρ value from Two way repeated measurements ANOVA

a,b,c : Same superscript letters indicate non significantly different between groups

A,B,C,D : Same superscript letters indicate non significantly different between time points

Ctrl = Control, wMTA = Proroot white MTA®, TLC = TheraCal LC®, BD = Biodentine®, PT = Well-Root™ PT

T0 = before placement, T1 = immediately after placement, T2 = 1 day after placement, T3 = 1 week after placement, T4 = 2 weeks after placement, T5 = 4 weeks after placement, T6 = 8 weeks after placement, T7 = 12 weeks after placement, T8 = 16 weeks after placement

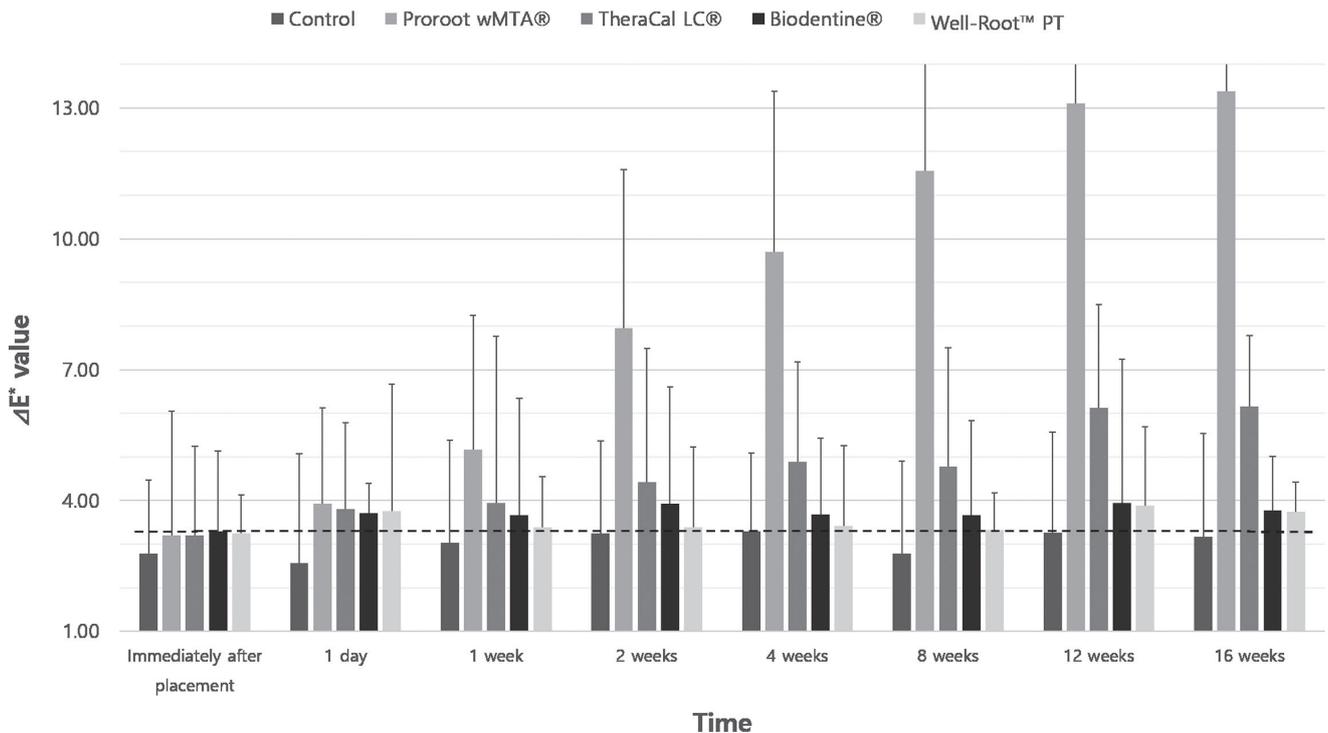


Fig. 3. Mean ΔE^* values at each time interval. The dotted line represents clinically noticeable discoloration of $\Delta E^* \geq 3.3$.

IV. 총괄 및 고찰

칼슘-실리케이트를 기반으로 하는 치수복조제는 생체친화적 이면서 생체활성적이고 뛰어난 항균성과 우수한 기계적 성질을 특징으로 한다[4,11]. 하지만 이전의 여러 연구에서 칼슘-실리케이트 시멘트를 사용한 후의 치아 색조 변화에 대해 보고한 바 있다[11,18].

재료에 의한 치아의 색조 변화를 평가하기 위해 여러 연구에서 CEJ 하방의 치근을 제거하고 재료를 역 충전하는 방법을 사용하였으나[9,10], 이 연구에서는 임상 과정을 재현하기 위하여 Shokouhinejad 등[28]의 논문과 같이 치관에 와동을 형성하고 재료를 수복하는 방법을 사용하였다.

색상의 변화를 평가하는 방법으로 육안으로 표준 색상과 비교하는 방법과 측정 장치를 사용하는 방법이 있다. 시각적 색채 결정은 치과에서 가장 빈번하게 적용되는 방법이지만 광원이나 배경색, 관찰자의 색 인지 능력 등에 의한 영향을 받을 수 있다[29,30]. 반면에 분광광도계와 같은 측정 장치를 사용하는 방법은 표본을 통한 빛의 투과나 반사를 정량적으로 측정할 수 있다[30]. 이 연구에서는 색상 평가와 관련된 이전의 연구[31-33]에서 사용한 것과 같은 분광광도계를 사용하여 표본의 L^* , a^* , b^* 값을 측정하고 총 색조 차이인 ΔE^* 값을 계산하였다.

ΔE^* 값은 상대적인 색 변화를 수치로 표현해주어 개별의 L^* , a^* , b^* 값보다 더 의미 있는 수치라고 볼 수 있다[34]. 이런 이유로 이 연구에서도 색조 변화의 정도를 평가하는 수치로서 ΔE^* 값을 사용하였다. Ruyter 등[26]은 임상 조건에서 사람의 눈으로 3.3 이상의 ΔE^* 을 인지 할 수 있다고 하였으며, Gross와 Moser[35]는 ΔE^* 값이 0 - 2이면 색조 변화를 인지할 수 없으나, 2 - 3이면 겨우 인지될 수 있는 정도이고, 3 - 8이면 보통 인지할 수 있으며, 8 이상이면 현저하게 인지할 수 있다고 하였다. 임상적으로 받아들일 수 있는 색상 차이를 의미하는 수용도(acceptability)의 역치는 $\Delta E^* = 2.7$ 에서 6.8의 값을 가진다고 알려져 있으며[36], 미국 공중 위생국의 표준인 $\Delta E^* \leq 3.3$ 이 널리 이용된다[27]. 이 연구에서도 수용도의 역치로 3.3을 이용하였다.

wMTA는 연구 2주 후부터 대조군과 통계적으로 유의한 L^* 값의 차이를 보였다. 또한, 재료를 충전하고 하루 후부터 인지할 수 있는 색조 변화를 보였으며, 시간이 지남에 따라 색조 변화가 심해졌다. 이러한 변화는 이전의 연구 결과[10,18]와 유사하였다.

MTA의 색조 변화의 원인에 대한 몇 가지 가설 중에 MTA의 구성성분 중 하나인 산화 비스무트(Bismuth oxide)가 색조 변화의 주요 원인으로 알려져 있다. 산화 비스무트는 산소가 없는 환경에서 빛에 노출될 경우 환원 반응에 의해 어두운 색의 금속 비스

무트 결정체와 산소로 분리되고 이 금속 결정체가 색조 변화의 원인으로 작용하는 것으로 알려져 있다[23]. 혐기성 환경에서 5개의 칼슘-실리케이트 물질의 색조 변화를 평가한 Vallés 등[11]의 연구에 의하면 산화 비스무트를 포함하지 않는 포틀랜드 시멘트는 색 안정성을 보였으나, 포틀랜드 시멘트에 산화 비스무트를 첨가한 경우에는 색조 변화가 나타났다고 하였다. 따라서 치수복조술 후에 수복물 하방에 생성되는 혐기성 환경은 MTA의 색조 변화를 촉진할 것으로 사료된다.

Marciano 등[17]은 산화 지르코늄 또는 칼슘 텅스텐과 혼합한 포틀랜드 시멘트로 채워진 소 치아의 색상을 평가한 결과, 산화 지르코늄과 칼슘 텅스텐이 색 안정성을 나타냄을 발견하였다. 이 두 방사선 불투과성 물질은 산화 비스무트와 달리 콜라겐이나 레진과 접촉 시 색 변화를 보이지 않았으며, 화학반응 후에 검은 침전물을 생성하지 않았다고 하였다. Yun 등[37]은 소의 치아를 사용한 색 안정성 연구에서 wMTA가 치아와 접촉했을 때에는 상아질 계면에서 색조 변화가 관찰되었으나, 산화 지르코늄이 상아질과 접촉했을 때는 색 안정성을 보였고 시간이 지나도 색 변화가 관찰되지 않았다고 하였다. 이처럼 색조 변화를 나타내지 않는 다양한 방사선 불투과성 물질을 산화 비스무트의 대체재로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

TLC는 시간에 따른 색조의 변화가 나타나 12주 후에 처음과 차이를 보였으며, 16주 후에는 대조군과 유의한 차이를 나타내었다. 이러한 결과 또한 TLC의 구성성분 중 하나인 산화 비스무트의 영향인 것으로 사료된다. wMTA와 TLC는 각각 20%와 10%의 산화 비스무트를 포함하고 있으며, 이 연구에서 TLC보다 wMTA에서 ΔE^* 값의 변화가 더 컸던 것은 색조 변화의 주요 원인인 산화 비스무트의 양과도 관련이 있을 것으로 사료된다.

BD와 PT는 하루 후부터 인지할 수 있는 색조 변화가 나타났으나, 그 이후로 일정한 범주의 ΔE^* 값을 유지하며 시간에 따른 유의한 색조 변화가 관찰되지 않았다. 이는 BD의 색 안정성에 관한 이전 연구의 결과와 유사하였다[28,38]. 그러나 PT는 색조 변화와 관련된 연구가 드물어 이후 추가적인 연구를 통한 색 안정성에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

칼슘-실리케이트 시멘트의 색조 변화를 평가한 이전의 연구들은 30일[17]부터 16주[23]까지 다양한 연구 기간을 설정하여 색조 변화를 관찰하였고 연구 기간 내에 유의한 색조 변화를 관찰하였다고 보고하였다. 하지만 Ramos 등[39]의 연구에 따르면 BD 대부분의 색조 변화는 1년 후에 인지되었으며, 이 색조 변화의 정도는 이전의 연구[28,38,40]에서 보고한 6개월 후의 ΔE^* 값보다 훨씬 컸다. 이것은 BD의 색조 변화가 6개월에서 1년 사이에 발생할 수 있음을 의미한다. 이 연구에서도 16주의 연구 기간 동안 wMTA와 TLC의 유의미한 색조 변화를 관찰할 수 있었지만,

BD와 PT의 색 안정성을 확인하기에는 기간이 충분하지 않았을 수 있다. 추후 연구에서는 이러한 점을 고려하여 1년 이상의 장기적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

이 연구에서는 치수복조제 없이 레진으로만 수복한 대조군에서도 ΔE^* 값의 변화가 관찰되었다. 다양한 복합 레진의 색 변화와 투명도에 대한 레진 두께의 영향을 알아본 Jung 등[41]의 연구에 따르면 복합 레진의 두께가 증가함에 따라 색의 차이가 발생할 수 있으나 그 변화 정도는 임상적으로 인지할 수준은 아니며, 레진의 종류와 관계없이 대부분의 레진에서 두께가 증가할수록 밝기와 반투명도(Translucency)가 감소하는 경향을 보였다고 하였다. 이번 연구에서 처음과 비교하여 ΔE^* 값의 변화가 있었던 이유도 레진의 수복 두께에 따른 반투명도의 감소로 인한 것으로 사료된다.

이전의 연구와 비교했을 때 대조군의 ΔE^* 값이 크게 측정된 이유에 대하여 몇 가지 요인을 고려할 수 있다. 재료의 색을 측정하기 위해서는 배경색의 영향을 받지 않아야 하는데[42], 이 연구에서는 색조 측정 시에 배경판의 적절성이나 조명의 일관성을 고려하지 못해 색상 측정에 중요한 변수로 작용하였을 수 있다. 측정 기구로 사용한 NF999는 측정 구의 직경이 3.0 mm, 측정 범위의 직경은 2.0 mm로써 좁은 영역과 굴곡면의 측정이 가능하도록 제작된 기기이나[43], 연구에 사용된 소구치의 표면 굴곡이 평면의 시편을 측정하는 것보다 재현성과 정확도가 떨어졌을 가능성 또한 고려할 수 있다[44]. 이후의 연구에서는 측정부의 형태와 크기, 치아 외형의 굴곡을 보상할 수 있는 방법 등을 고려하여 연구를 설계해야 할 것으로 사료된다.

이번 연구에는 결과에 영향을 미칠 수 있는 여러 한계점이 존재한다. 발거된 치아를 사용하였으나 연구 기간 동안 치아를 실내 온도로 보관하였기 때문에 실제 환자의 구강 환경을 재현했다고 보기 어렵다. 구강 환경과 재료의 색조 변화의 상관관계를 고려하기 위해 구강 환경과 비슷한 조건을 설정하였다면 더 나은 연구가 되었을 것으로 사료된다. 또한, 측정 시마다 표본의 사진을 촬영하였다면 시각적으로도 각 재료 간의 색조 변화를 확인 할 수 있는 참고자료가 되었을 것이다.

wMTA와 TLC는 치수복조제로 널리 사용되고 있는 재료임에도 불구하고 이번 연구에서 16주 후 wMTA는 13.39, TLC는 6.16의 ΔE^* 값을 보이며 심미성을 저해할 수 있는 색조 변화를 보였다[35]. 따라서 유치와 같이 법랑질의 두께가 얇거나 전치부와 같이 심미적으로 중요한 부위에 있는 치아의 치료에 이 재료를 사용할 경우 주의를 기울여야 할 것이다. 추후 치수복조제를 사용할 때 기능적인 면과 심미적인 면을 함께 고려하여 선택할 수 있도록 해야 할 것이다.

V. 결 론

이 연구는 시판되는 다양한 치수복조제의 색조 안정성을 평가하고자 치아의 교합면에 와동을 형성한 후 4종류의 칼슘-실리케이트 기반의 치수복조제를 충전하고 복합 레진으로 수복한 후 분광광도계를 이용하여 색조를 측정하였고 이를 L^* , a^* , b^* 로 기록하고 ΔE^* 값을 확인하였다.

Proroot white MTA[®]와 TheraCal LC[®]는 시간에 따라 치관 밝기의 감소 및 ΔE^* 값의 증가가 관찰되었고, 그 변화는 Proroot white MTA[®]에서 가장 크게 나타났다. Biodentine[®]와 Well-Root[™] PT는 대조군과 유의한 차이를 보이지 않았다. 이러한 색 안정성을 고려하여 법랑질의 두께가 얇거나 심미적으로 중요한 부위에 있는 치아의 치수복조제로 Biodentine[®]와 Well-Root[™] PT의 사용을 제안하는 바이다.

Authors' Information

Jiyeon Jeon <https://orcid.org/0000-0001-8543-3849>

Namki Choi <https://orcid.org/0000-0003-4830-8568>

Seonmi Kim <https://orcid.org/0000-0001-5103-767X>

References

1. Akhlaghi N, Khademi A : Outcomes of vital pulp therapy in permanent teeth with different medicaments based on review of the literature. *J Dent Res*, 12:406-417, 2015.
2. Ward J : Vital pulp therapy in cariously exposed permanent teeth and its limitations. *Aust Endod J*, 28:29-37, 2002.
3. He L, Zhong J, Mao JJ, et al. : Treatment of necrotic teeth by apical revascularization: meta-analysis. *Sci Rep*, 7:13941, 2017.
4. Gandolfi MG, Siboni F, Prati C : Calcium silicate and calcium hydroxide materials for pulp capping: biointeractivity, porosity solubility, and bioactivity of current formulations. *J Appl Biomater Funct Mater*, 13:43-60, 2015.
5. Aeinehchi M, Eslami B, Ghanbariha M, Saffar AS : Mineral trioxide aggregate (MTA) and calcium hydroxide as pulp-capping agents in human teeth: a preliminary report. *Int Endod J*, 36:225-231, 2003.
6. Ford TR, Torabinejad M, Kariyawasam SP, et al. : Using mineral trioxide aggregate as a pulp-capping material. *J Am Dent Assoc*, 127:1491-1494, 1996.
7. Maturo P, Costacurta M, Bartolino M, Docimo R : MTA ap-

- lications in pediatric dentistry. *Oral Implantol (Rome)*, 2:37-44, 2009.
8. Bortoluzzi EA, Araújo GS, Tanomaru JMG, Tanomaru FM : Marginal gingiva discoloration by gray MTA: a case report. *J Endod*, 33:325-327, 2007.
 9. Felman D, Parashos P : Coronal tooth discoloration and white mineral trioxide aggregate. *J Endod*, 39:484-487, 2013.
 10. Ioannidis K, Mistakidis I, Beltes P, Karagiannis V : Spectrophotometric analysis of coronal discolouration induced by grey and white MTA. *Int Endod J*, 46:137-144, 2013.
 11. Vallés M, Mercadé M, Roig M, *et al.* : Influence of light and oxygen on the color stability of five calcium silicate-based materials. *J Endod*, 39:525-528, 2013.
 12. Cantekin K : Bond strength of different restorative materials to light-curable mineral trioxide aggregate. *J Clin Pediatr Dent*, 39:143-148, 2015.
 13. Rajasekharan S, Martens LC, Cauwels RGEC, Verbeeck RMH : Biodentine™ material characteristics and clinical applications: a review of the literature. *Eur Arch Paediatr Dent*, 15:147-158, 2014.
 14. Butt N, Talwar S, Bali A, *et al.* : Comparison of physical and mechanical properties of mineral trioxide aggregate and Biodentine. *Indian J Dent Res*, 25:692-697, 2014.
 15. VERICOM Co., Ltd. : VERICOM PRODUCT CATALOG Rev.4. Available from URL: <https://vericom.co.kr/eng/cs/catalog.html?bmain=view&uid=2&language=ENG> (Accessed on January 13, 2021).
 16. Cohen BD, Combe EC : Development of new adhesive pulp capping materials. *Dent Update*, 21:57-62, 1994.
 17. Marciano MA, Costa RM, Duarte MA, *et al.* : Assessment of color stability of white mineral trioxide aggregate angelus and bismuth oxide in contact with tooth structure. *J Endod*, 40:1235-1240, 2014.
 18. Lenherr P, Allgayer N, Krastl G, *et al.* : Tooth discoloration induced by endodontic materials: a laboratory study. *Int Endod J*, 45:942-949, 2012.
 19. Dentsply Sirona : Medical device attachment library. Available from URL: <https://www.dentsplysirona.com/content/dam/flagship/korea/medical-device-attachments/endo/KR-Attachment-ENDO-SH04261-ProRoot-MTA.pdf> (Accessed on January 13, 2021).
 20. Islam I, Chng HK, Yap AUJ : Comparison of the physical and mechanical properties of MTA and portland cement. *J Endod*, 32:193-197, 2006.
 21. Septodont : Biodentine® - Bioactive Dentin Substitute. Available from URL: <https://www.septodontusa.com/products/biodentine> (Accessed on January 13, 2021).
 22. VERICOM Co., Ltd. : Product_Well-Root PT. Available from URL: <https://vericom.co.kr/eng/product/view.html?uid=14&mode=&depth1=18&depth2=21> (Accessed on January 13, 2021).
 23. Kang SH, Shin YS, Song JS, *et al.* : Color changes of teeth after treatment with various mineral trioxide aggregate-based materials: an ex vivo study. *J Endod*, 41:737-741, 2015.
 24. Hintz JK, Bradley TG, Eliades T : Enamel colour changes following whitening with 10 percent carbamide peroxide: a comparison of orthodontically-bonded/debonded and untreated teeth. *Eur J Orthod*, 23:411-415, 2001.
 25. Joiner A : Tooth colour: a review of the literature. *J Dent*, 32:3-12, 2004.
 26. Ruyter IE, Nilner K, Moller B : Color stability of dental composite resin materials for crown and bridge veneers. *Dent Mater*, 3:246-251, 1987.
 27. Son YJ, Hyun HK, Jang KT, *et al.* : Color stability of new silorane-based composite resin: an in vitro spectrophotometric study. *J Korean Acad Pediatr Dent*, 37:73-81, 2010.
 28. Shokouhinejad N, Nekoofar MH, Dummer PHM, *et al.* : Evaluation and comparison of occurrence of tooth discoloration after the application of various calcium silicate-based cements: an ex vivo study. *J Endod*, 42:140-144, 2016.
 29. Karamouzos A, Papadopoulos MA, Kolokithas G, Athanasiou AE : Precision of in vivo spectrophotometric colour evaluation of natural teeth. *J Oral Rehabil*, 34:613-621, 2007.
 30. Da Silva JD, Park SE, Weber HP, Ishikawa-Nagai S : Clinical performance of a newly developed spectrophotometric system on tooth color reproduction. *J Prosthet Dent*, 99:361-368, 2008.
 31. Park SJ, Lee HY, Hwang IN, *et al.* : The evaluation of color and color difference according to the layering placement of incisal shade composites on the body composites of the indirect resin restoration. *J Korean Acad Conserv Dent*, 36:37-49, 2011.
 32. Song YS, Kim JH, Hwang IN, *et al.* : Colorimetric comparison of single layered dental composite with double layered dental composite. *Restor Dent Endod*, 37:84-89, 2012.
 33. Eom AH, Kim DS, Choi KK, *et al.* : Optical Characteristics of Resin Composite before and after Polymerization. *J Korean Acad Conserv Dent*, 36:219-230, 2011.

34. Guler AU, Yilmaz F, Kurt S, *et al.* : Effects of different drinks on stainability of resin composite provisional restorative materials. *J Prosthet Dent*, 94:118-124, 2005.
35. Gross MD, Moser JB : A colorimetric study of coffee and tea staining of four composite resins. *J Oral Rehabil*, 4:311-322, 1977.
36. Hyun HK, Lee YK, Lee SH, *et al.* : Color distribution of maxillary primary incisors in Korean children. *Col Res Appl*, 35: 153-158, 2010.
37. Yun DA, Park SJ, Min KS, *et al.* : Tooth discoloration induced by calcium-silicate based pulp-capping materials. *Eur J Dent*, 9:165-170, 2015.
38. Vallés M, Roig M, Mercadé M, *et al.* : Color stability of teeth restored with Biodentine: a 6-month in vitro study. *J Endod*, 41:1157-1160, 2015.
39. Ramos JC, Palma PJ, Santos JM, *et al.* : 1-year In vitro evaluation of tooth discoloration induced by 2 calcium silicate based cements. *J Endod*, 42:1403-1407, 2016.
40. Palma PJ, Marques JA, Ramos JC, *et al.* : Six-Month Color Stability Assessment of Two Calcium Silicate-Based Cements Used in Regenerative Endodontic Procedures. *J Funct Biomater*, 10:1-11, 2019.
41. Jung JE, Jung KH, Park JK, *et al.* : Comparison of the color of composite resins with different thickness. *Korean J Dent Mater*, 41:85-96, 2014.
42. Hwang IN, Lee KW : Translucency of light cured composite resins depends on thickness & its influence on color of restorations. *J Korean Acad Conserv Dent*, 24:585-603, 1999.
43. Park SJ, Lee HY, Hwang IN, *et al.* : The evaluation of color and color difference according to the layering placement of Incisal shade composites on the body composites of the indirect resin restoration. *J Korean Acad Conserv Dent*, 36:37-49, 2011.
44. Park SJ, Noh EY, Hwang IN, *et al.* : Color difference of the dental composites measured by different color measuring instruments. *J Korean Acad Conserv Dent*, 34:199-207, 2009.

국문초록

수 종의 칼슘-실리케이트 치수복조제의 치관 색조 변화

전지윤 · 최남기 · 김선미

전남대학교 치의학전문대학원 소아치과학교실

치수복조제는 치관부에 위치하기 때문에 색 안정성이 최종적인 심미성에 영향을 미치는 중요한 요소로 간주된다. 이 연구는 시간에 따른 치관의 색조 변화를 분석하여 치수복조제의 색조 안정성을 비교해보고자 하였다.

발거된 소구치의 치관에 와동을 형성하고 4가지 종류의 치수복조제를 충전하였다. 색상 변화는 분광광도계를 사용하여 재료를 넣기 전, 재료를 넣은 즉시, 재료를 넣고 1일 후, 1주 후, 2주 후, 4주 후, 8주 후, 12주 후, 16주 후에 측정을 시행하였다.

Proroot white MTA[®]와 TheraCal LC[®]는 시간이 지남에 따라 지속적인 L* 값의 감소와 ΔE* 값의 증가를 보였다. 반면 Biodentine[®]과 Well-root™ PT는 유의한 L* 값의 변화가 없었고 일정한 ΔE* 값을 유지하였다. 방사선 불투과성 물질로 산화 비스무트가 포함된 치수복조제의 적용 시 치아의 색조 변화가 나타날 수 있으며, 법랑질의 두께가 얇은 유치의 수복이나 전치부의 심미 수복 시 치수복조제의 장기적인 색 안정성을 고려해야 한다.