

## 다층 지르코니아 블록 종류와 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 기계적 특성 비교

강재민, 김원영, 정인성, 전병욱  
부산가톨릭대학교 보건과학대학 치기공학과

### Comparison of Mechanical Properties of Zirconia Copping by multi-layered zirconia blocks and Design locations

Jae-Min Kang, Won-Young Kim, In-Sung Chung, Byung-Wook Jeon

Department of Dental Laboratory Science, College of Health Science, Catholic University of Pusan

#### [Abstract]

**Purpose:** This study was investigated the effect of multi-layer zirconia block type and design location on the mechanical properties of zirconia copings.

**Methods:** Three kinds of multi-layered zirconia blocks (Snow princess multi layered block, Multi cherry, Dental zirconia pre-shaded blank) were used to identify the effects of the kinds of multi-layered zirconia blocks, design locations on mechanical characteristics of zirconia copings. 150 Zirconia copings were fabricated and fracture strength, hardness and microstructure were compared and evaluated.

**Results:** Dental zirconia pre-shaded blank(2,256.9N) had the highest fracture strength of zirconia copings on all the design locations, and it was followed by Snow princess multi layered block(2,107.5N) and Multi cherry(917.0N). Snow princess multi layered block(1,949.7Hv) had the highest hardness of zirconia copings on all the design locations, and it was followed by Dental zirconia pre-shaded blank(1,671.7Hv) and Multi cherry(1,383.7Hv). The cervical layer had the highest fracture strength and hardness of zirconia copings in all the blocks, and it was followed by the cervical+gradation layer, the enamel layer, the enamel+gradation layer, and the gradation layer.

**Conclusion:** It was found that the fracture strength and hardness were different according to the kinds of multilayer zirconia block and design location, and it was confirmed that it is lower than the fracture strength of white zirconia.

◉ **Key words:** Multi-layered zirconia block, Location of design, Fracture strength

Corresponding author	Name	김 원 영	Tel.	055-284-1795	E-mail	92por@hanmail.net	
	Address	경상남도 창원시 성산구 완암로 50 메카동 805호					
Received	2019. 5. 8		Revised	2019. 8. 29		Accepted	2019. 8. 27

## I. 서론

심미성과 내구성이 우수한 지르코니아를 이용한 전부 도재관의 제작이 증가하고 있다 (Raigrodski, 2004).

지르코니아는 산화 지르코늄 (zirconium oxide)의 층칭으로 우수한 내식성과 뛰어난 기계적 물성, 단열성, 내열성을 지니고 있어 여러 분야에 적용되어 왔다. 특히 높은 화학적 안정성과 생체친화성으로 의료용 재료로 널리 사용되고 있으며, 현재 치과 보철물 제작 재료로 다양하게 사용되고 있다 (Miyazaki et al., 2009).

치과용 지르코니아는 백색과 유색, 다층 지르코니아 블록 형태로 공급되고 있다 (Park, 2016).

지르코니아의 색상은  $CeO_2$ ,  $Bi_2O_3$ ,  $Er_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  등의 금속 산화물 첨가로 표현되며, 이 금속 산화물 중  $Fe_2O_3$ 가 가장 많이 사용되고 있다 (Spyropoulou et al., 2015). 그리고  $Fe_2O_3$ 가 0.020wt.% 첨가된 유색 지르코니아 블록은 250 MPa 정도의 굴곡 강도 감소를 보인다는 보고가 있다 (Zhao et al, 2013).

다층 지르코니아 블록 (multi-layered zirconia block)은 법랑질, 상아질 등의 색상층을 갖고 있어 유색 지르코니아 (pre-shaded zirconia) 블록보다 색조재현성이 우수하나, 금속산화물의 첨가와 소결조건에 따라 기계적 특성에서 차이가 있다고 보고된 바 있다 (Spyropoulou et al, 2015; Ueda et al, 2015). 백색 지르코니아 블록 (Han, 2010; Jo et al, 2014; Nah, 2017; Chung et al, 2017)과 유색 지르코니아 블록 (Lee, 2013; Seo, 2015)의 기계적 특성 및 색조에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 다층 지르코니아 블록에 관한 연구로는 높은 투명도의 다층 지르코니아 일수록 이축굴곡강도는 낮아진다는 보고 (Gabriel et al, 2018)와, 백색 지르코니아와 유색 지르코니아의 파절강도가 다층 지르코니아의 강도보다 높게 나타났다는 보고 (Park, 2016)가 있다. 하지만 다층 지르코니아 블록 종류와층 구조를 고려한 설계위치에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 다층 지르코니아 블록 종류와 설계 위치가 지르코니아 코핑의 기계적 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 Snow princess multi layered block,

Multi cherry, Dental zirconia pre-shaded blank 등 3 종류의 다층 지르코니아 블록과 블록의층 구조를 고려한 5개 설계위치에 따라 지르코니아 코핑을 제작한 다음 파절강도, 경도, 미세구조를 비교 평가하였다.

## II. 연구 방법

### 1. 실험재료

#### 1) 시편재료

다층 지르코니아 블록은 국산 제품인 Snow princess multi layered block (DK mungyo, Korea)과 Multi cherry (Dmax, Korea), 외국 제품인 Dental zirconia pre-shaded blank (Upcera, China) 25T를 사용하였다.

#### 2) 금속 치형 제작

치과용 임플란트 상부구조물 abutment lab analog (Snucone Implant, Korea)를 측면 경사도  $6^\circ$ , 높이가 5.0 mm로 제작하였다. 금속 치형의 선각은 스캔 작업을 위하여 복합레진으로 relief 하였다. Bevel 변연으로 디자인하고 측면 경사각 (occlusal convergence angle)은  $6^\circ$ 를 부여하여 30개의 실험용 금속 치형을 제작하였다 (Fig. 1).

#### 3) 지르코니아 코핑 제작

레이저 스캐너 (FREEDOM HD, DOF, Germany)를 이용하여 금속 치형을 스캔하고 코핑의 두께가 각각 1.0mm, 높이가 6.0mm가 되도록 디자인하였다. 코핑과 금속 치형 사이의 시멘트 공간은 0.03mm가 되도록 하였고, 각 그룹 당 10개씩 지르코니아 코핑을 밀링하였다. 그리고 CAD/CAM system 가공장비 (Ceramill Mikro, Amann Girrbach, Austria)의 전용 소환로에서 제조사의 지시대로 소결을 시행하였으며, 소결이 끝난 후 금속 치형에 변연 적합하여 지르코니아 코핑을 제작하였다.



Figure 1. Metal die.

시편 제작에 사용된 블록의 종류와 설계위치는 Table 1과 같다.

Table 1. Materials used in this study

Type of Material	Product Name	Manufacturer	Code	N
Multi-layered zirconia block	Snow princess multi layered block	DK mungyo, Korea	M1	10
			M2	10
			M3	10
			M4	10
			M5	10
Multi-layered zirconia block	Multi cherry	Dmax, Korea	D1	10
			D2	10
			D3	10
			D4	10
			D5	10
Dental zirconia pre-shaded blank		Upcera, China	U1	10
			U2	10
			U3	10
			U4	10
			U5	10

\* Position of crown in the block : cervical layer=1, cervical+gradation layer=2, gradation layer=3, enamel+gradation layer=4, enamel layer=5.

시편의 설계위치는 25T 다층 지르코니아 블록을 3개의 동일한 높이로 나누어 cervical층, gradation층, enamel층, 그리고 cervical과 gradation층 중앙, enamel과 gradation층 중앙 등 5개 위치에 설계하였다 (Fig. 2).

#### 4) 금속 치형에 지르코니아 코핑의 합착

지르코니아 코핑을 이중 중합 레진시멘트 Rely x unicem (3M ESPE, Germany)을 이용하여 금속 치형에 합착하였다. 합착 과정 동안 50 N의 힘으로 10분간 하중을 적용 하였으며 합착 후 37℃의 증류수에 24시간 보관하였다 (Fig. 3).

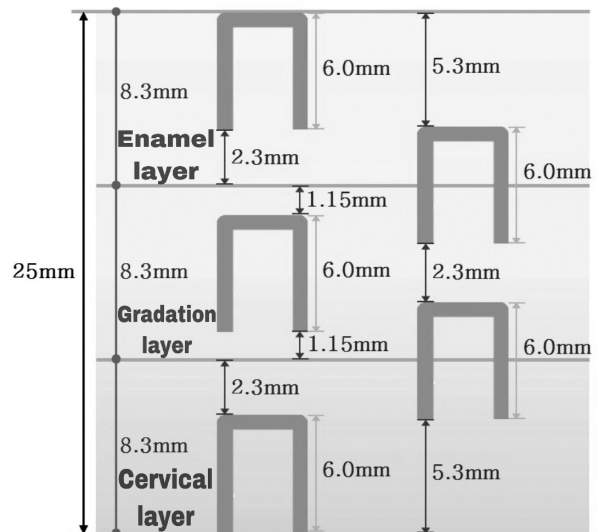


Figure 2. Design position of zirconia coping.



Figure 3. Cemented zirconia coping

## 2. 기기분석

### 1) 파절강도 측정

파절강도는 만능시험기 (Universal testing machine model 6022, Instron Co., USA)를 사용하여 측정하

였다. 선단에 위치한 금속 지그를 금속 치형의 장축과 평행되도록 시편을 위치시키고 지르코니아 코핑의 중앙에 하중을 가하였다. 만능시험기의 시험속도는 분당 0.5mm로 코핑이 파절될 때까지 하중을 가하였다.

### 2) 경도 측정

경도 시험을 위해 다층 지르코니아 블록의 설계위치에 2mm 정육면체 시편을 제작하였다. 마이크로 비커스 경도계 (HM-122, Mitutoyo Co., Japan)를 사용하여 표면을 하중 1 kgf, 부하시간 10초의 조건으로 5번을 측정하여 평균을 경도 값으로 하였다.

### 3) 미세구조 관찰

다층 지르코니아 블록의 종류와 설계위치에 따른 미세 구조를 관찰하기 위하여 2mm 정육면체 시편의 표면을 금 코팅하고 가속전압 20 kV의 조건에서 전계방출 주사전자현미경 (JSM-6400, JEOL, Japan)으로 관찰하였다.

### 4) 통계분석

실험 결과 Data는 SPSS Ver.23.0 (SPSS Inc, Chicago, IL, USA)을 이용하여 일원배치 분산분석 (one-way ANOVA)을 시행하였다. 사후검정으로 Tukey's test를 시행하였으며, 유의 수준은 0.05로 설정하였다.

## III. 결 과

### 1. 파절강도

다층 지르코니아 블록의 종류와 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 파절강도 결과는 Table 2와 같다.

다층 지르코니아 블록의 종류에 따른 지르코니아 코핑의 파절강도는 Dental zirconia pre-shaded blank가 2,256.9 N으로 가장 높게 나타났으며, Snow princess multi layered block (2,107.5 N), Multi cherry (917.0 N) 순으로 나타났다 ( $P < 0.01$ ).

Snow princess multi layered block 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 파절강도는 cervical층 (M1)이 2,107.5 N으로 가장 높게 나타났으며, cervical과 gradation층 중앙 (M2) (1,951.0 N), enamel층 (M5) (1,856.9 N), enamel과 gradation층 중앙 (M4) (1,727.9 N), gradation층 (M3) (1,464.4 N) 순으로 나타났다 ( $P < 0.01$ ).

Multi cherry 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 파절강도는 cervical층 (D1)이 917.0 N으로 가장 높게 나타났으며, cervical과 gradation층 중앙 (D2) (835.7 N), enamel층 (D5) (807.2 N), enamel과 gradation층 중앙 (D4) (714.5 N), gradation층 (D3) (704.4 N) 순으로 나타났다 ( $P < 0.01$ ).

Dental zirconia pre-shaded blank 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 파절강도는 cervical층 (U1)이 2,256.9 N으로 가장 높게 나타났으며, cervical과 gradation층 중앙 (U2) (1,978.4 N), enamel층 (U5) (1,910.4 N), enamel과 gradation층 중앙 (U4) (1,811.8 N), gradation층 (U3) (1,496.3 N) 순으로 나타났다 ( $P < 0.01$ ).

Table 2. Fracture strength of multi-layered blocks

Manufacturer	Groups	Mean ± SD (N)	P
Snow princess multi layered block	M1	2107.5 ± 48.3 <sup>a</sup>	0.000
	M2	1951.0 ± 60.8 <sup>ab</sup>	
	M3	1464.4 ± 92.7 <sup>d</sup>	
	M4	1727.9 ± 80.7 <sup>c</sup>	
	M5	1856.9 ± 86.6 <sup>bc</sup>	
Multi cherry	D1	917.0 ± 65.4 <sup>a</sup>	0.002
	D2	835.7 ± 49.4 <sup>ab</sup>	
	D3	704.4 ± 38.5 <sup>b</sup>	
	D4	714.5 ± 51.0 <sup>b</sup>	
	D5	807.2 ± 37.3 <sup>ab</sup>	
Dental zirconia pre-shaded blank	U1	2256.9 ± 75.9 <sup>a</sup>	0.000
	U2	1978.4 ± 84.9 <sup>b</sup>	
	U3	1496.3 ± 74.0 <sup>c</sup>	
	U4	1811.8 ± 54.1 <sup>b</sup>	
	U5	1910.4 ± 57.6 <sup>b</sup>	

## 2. 경도

다층 지르코니아 블록의 종류와 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 경도 측정 결과는 Table 3과 같다.

다층 지르코니아 블록의 종류에 따른 지르코니아 코핑의 경도는 Snow princess multi layered block이 1,949.7 Hv로 가장 높게 나타났으며, Dental zirconia pre-shaded blank (1,671.7 Hv), Multi cherry (1,383.7 Hv) 순으로 나타났다 ( $P < 0.01$ ).

Snow princess multi layered block 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 경도는 cervical층 (M1)이 1949.7 Hv으로 가장 높게 나타났으며, cervical과 gradation층 중앙 (M2) (1842.7 Hv), enamel층 (M5) (1627.7 Hv), enamel과 gradation층 중앙 (M4) (1584.3 Hv), gradation층 (M3) (1495.7 Hv) 순으로 나타났다 ( $P < 0.01$ ).

Multi cherry 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 경도는 cervical층 (D1)이 1383.7 Hv으로 가장 높게 나타났으며, cervical과 gradation층 중앙 (D2) (1337.7 Hv), enamel층 (D5) (1257.7 Hv), enamel과 gradation층 중앙 (D4) (1237.7 Hv), gradation층 (D3) (1174.0 Hv) 순으로 나타났다 ( $P < 0.01$ ).

Dental zirconia pre-shaded blank 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 경도는 cervical층 (U1)이 1671.7 Hv으로 가장 높게 나타났으며, cervical과 gradation층 중앙 (U2) (1585.2 Hv), enamel층 (U5) (1493.8 Hv), enamel과 gradation층 중앙 (U4) (1472.7 Hv), gradation층 (U3) (1421.3 Hv) 순으로 나타났다 ( $P < 0.01$ ).

## 3. 미세구조 관찰 결과

전계방출 주사전자현미경을 사용하여 다층 지르코니아 블록의 종류와 설계위치에 따른 미세구조 관찰 결과는 Fig. 4, 5, 6과 같다.

다층 지르코니아 블록 종류에 따른 미세구조는 Dental zirconia pre-shaded blank에서 가장 치밀하게 나타났으며, Snow princess multi layered block, Multi cherry 순으로 나타났다.

다층 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 미세구조는 모든 블록에서 동일하게 cervical층이 가장 치밀하게 나타났으며, cervical과 gradation층 중앙, enamel층, enamel과 gradation층 중앙, gradation층 순으로 나타났다.

Table 3. Hardness of multi-layered blocks

Manufacturer	Groups	Mean ± SD (Hv)	P
Snow princess multi layered block	M1	1949.7 ± 35.5 <sup>a</sup>	0.000
	M2	1842.7 ± 74.7 <sup>a</sup>	
	M3	1495.7 ± 39.4 <sup>c</sup>	
	M4	1584.3 ± 27.1 <sup>bc</sup>	
	M5	1627.7 ± 53.5 <sup>b</sup>	
Multi cherry	D1	1383.7 ± 15.9 <sup>a</sup>	0.001
	D2	1337.7 ± 60.4 <sup>ab</sup>	
	D3	1174.0 ± 57.2 <sup>c</sup>	
	D4	1237.7 ± 24.0 <sup>bc</sup>	
	D5	1257.7 ± 8.6 <sup>bc</sup>	
Dental zirconia pre-shaded blank	U1	1671.7 ± 25.4 <sup>a</sup>	0.000
	U2	1585.2 ± 51.0 <sup>b</sup>	
	U3	1421.3 ± 19.7 <sup>c</sup>	
	U4	1472.7 ± 13.1 <sup>c</sup>	
	U5	1493.8 ± 27.3 <sup>c</sup>	



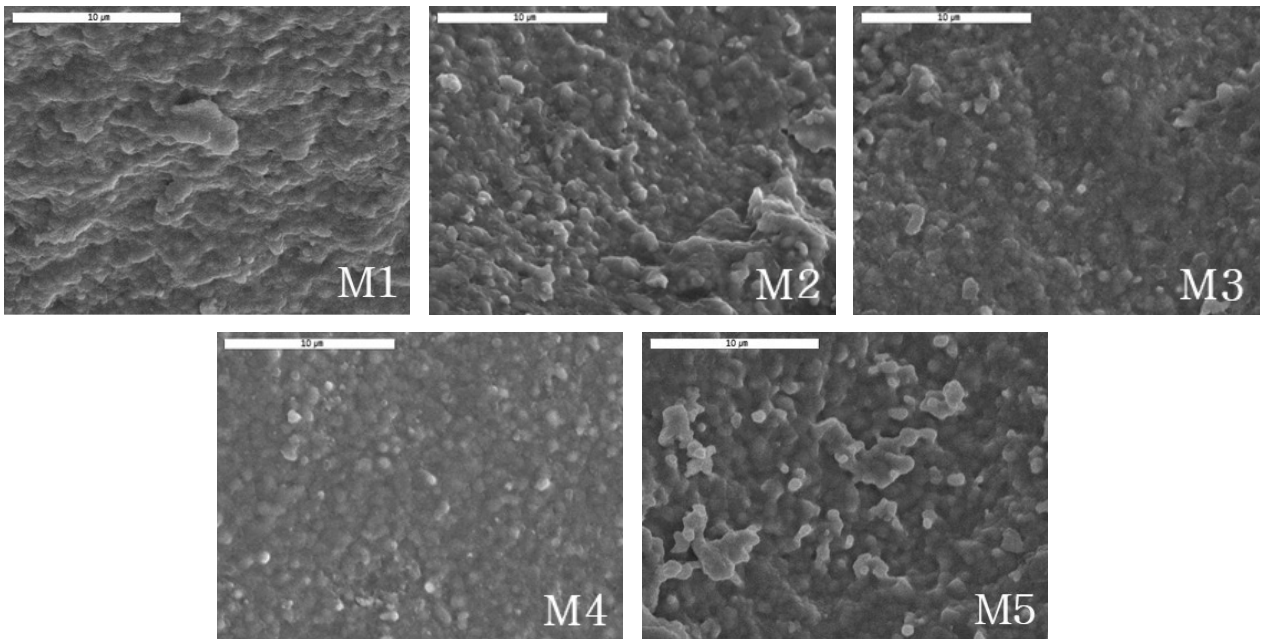


Figure 4. Microstructure SEM images of the Snow princess multi layered block specimens ( $\times 5,000$ ).  
M1: cervical layer; M2: cervical+gradation layer; M3: gradation layer; M4: enamel+gradation layer;  
M5: enamel layer

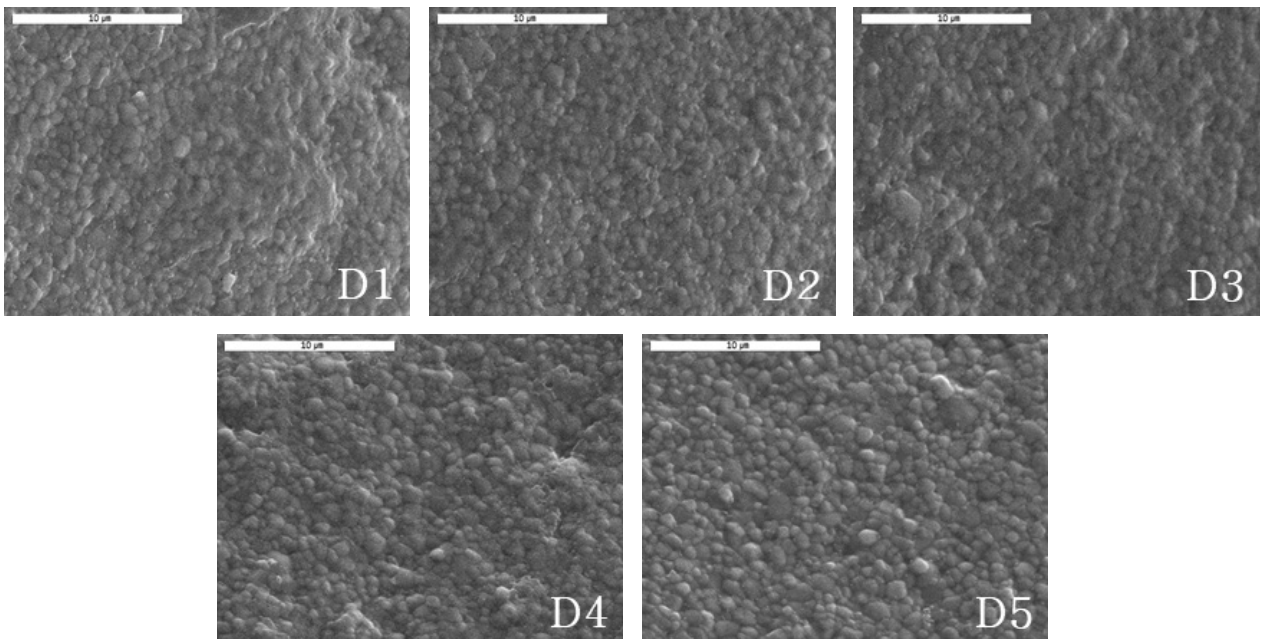


Figure 5. Microstructure SEM images of the Multi cherry specimens ( $\times 5,000$ ).  
D1: cervical layer; D2: cervical+gradation layer; D3: gradation layer; D4: enamel+gradation layer;  
D5: enamel layer.

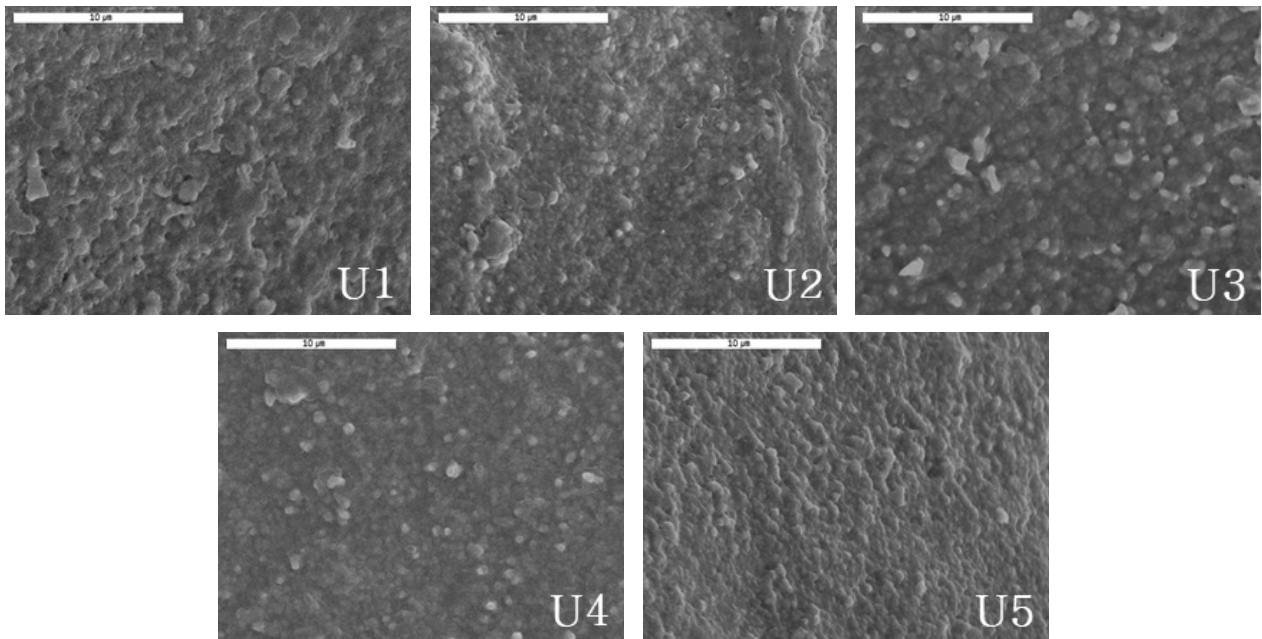


Figure 6. Microstructure SEM images of the Dental zirconia pre-shaded blank specimens (×5,000).  
 U1: cervical layer; U2: cervical+gradation layer; U3: gradation layer; U4: enamel+gradation layer;  
 U5: enamel layer.

#### IV. 고찰

다층 지르코니아 블록 종류와 설계위치가 지르코니아 코핑의 기계적 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 Snow princess multi layered block, Multi cherry, Dental zirconia pre-shaded blank 등 세 종류의 다층 지르코니아 블록과 블록의층 구조를 고려한 5개 설계위치에 따라 지르코니아 코핑을 제작한 다음 파절강도, 경도, 미세구조를 비교 평가하였다.

본 연구 결과, 다층 지르코니아 블록의 종류에 따른 지르코니아 코핑의 파절강도는 Dental zirconia pre-shaded blank가 2,256.9 N으로 가장 높게 나타났으며, Snow princess multi layered block (2,107.5 N), Multi cherry (917.0 N) 순으로 나타났다. 경도는 Snow princess multi layered block이 1,949.7 Hv로 가장 높게 나타났으며, Dental zirconia pre-shaded blank (1,671.7 Hv), Multi cherry (1,383.7 Hv) 순으로 나타나 블록 종류에 따라 파절강도와 경도에 차이가 있는 것으로 나타났으나, 모든 블록에서 Craig (1989)의 대구치에서 발생할 수 있는 최대 교합력 565N이라는 보고 내용보다는 높은 수치를 보여 임상적용에는 문제

가 없는 것으로 생각된다. 그러나 제조회사에서 제공하는 기계적 특성에 대한 정보를 참고하여 제품을 선택할 필요가 있다고 생각한다. 그리고 백색 지르코니아 블록보다 다층 지르코니아 블록의 파절강도가 낮다는 것을 확인할 수 있었는데 이는 Park (2016)의 다층의 색상이 첨가된 지르코니아 블록은 기존의 백색 지르코니아 블록에 비해 파절강도가 낮게 나타났으나, 임상적으로 발생할 수 있는 구치부 교합력을 견딜 수 있는 충분한 파절강도를 보였다는 보고와 지르코니아 블록에 착색하는 방식은 굴곡강도의 감소에 영향을 준다는 Sceeram 등 (2007), Zhao 등 (2013), Hjerppe 등 (2008), Shah 등 (2008)의 보고와 일치하였다.

다층 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 지르코니아 코핑의 파절강도와 경도는 모든 블록에서 cervical층이 가장 높게 나타났으며, cervical과 gradation층 중앙, enamel, enamel과 gradation층 중앙, gradation층 순으로 나타났는데, 이는 크림색을 나타내기 위해 첨가된 CeO<sub>2</sub>, 진한 크림색을 나타내기 위해 첨가된 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 옅은 브라운색을 나타내기 위해 첨가된 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 금속산화물의 첨가량 차이에 의한 것으로 판단되며, 미세구조의 치밀도 비교에서 파절강도와 경도가 높게 나타난

cervical층이 가장 치밀하게 나타났으며, 파절강도와 경도가 가장 낮게 나타난 gradation층이 가장 치밀도가 낮게 나타난 결과와 일치한다.

본 연구에서는 다층 지르코니아 블록 종류에 따라 파절강도와 경도에 차이가 있는 것을 확인했으며, 백색 지르코니아의 파절강도보다 낮다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 다층 지르코니아 블록의 설계위치에 따라 지르코니아 코핑의 파절강도와 경도에 차이가 있음을 확인하였다. 이에 다층 지르코니아 블록 제조회사에서 제공하는 기계적 특성에 대한 정보를 분석하여 블록을 선택하고, 층 구조의 기계적 특성을 고려한 설계가 이루어진다면 임상적으로 파절강도에 강한 전부도재관을 제작할 수 있을 것으로 생각된다.

다층 지르코니아 블록의 층 구조의 따른 파절강도 차이에 대한 원인을 정확하게 규명하기 위한 추가적인 실험이 필요하다고 생각된다.

## V. 결론

다층 지르코니아 블록의 종류와 설계위치가 지르코니아 코핑의 기계적 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 3개의 다층 지르코니아 블록과 5층의 설계위치에 따라 지르코니아 코핑을 제작하여 파절강도, 경도, 그리고 미세구조를 비교 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다층 지르코니아 블록의 종류에 따른 지르코니아 코핑의 파절강도는 모든 설계위치에서 Dental zirconia pre-shaded blank가 가장 높게 나타났으며, Snow princess multi layered block, Multi cherry 순으로 나타났다.
2. 다층 지르코니아 블록의 종류에 따른 지르코니아 코핑의 경도는 모든 설계위치에서 Snow princess multi layered block이 가장 높게 나타났으며, Dental zirconia pre-shaded blank, Multi cherry 순으로 나타났다.
3. 다층 지르코니아 블록의 설계위치에 따른 지르코

니아 코핑의 파절강도와 경도는 모든 블록에서 cervical층이 가장 높게 나타났으며, cervical과 gradation층 중앙, enamel층, enamel과 gradation층 중앙, gradation층 순으로 나타났다.

## REFERENCES

- Chung IS, Jeon BW, Kim WY, Kang JM. Comparison on marginal fitness and mechanical properties of copings with zirconia block and CAM type. *J KADT*, 39(2), 75–82, 2017.
- Craig RG. *Restorative dental materials*. St. Louis: CV Mosby, 65, 1989.
- Gabriel KR, Pereira, Luís FG, Kiara SD, Cornelis JK, Marília PR, Luiz FV. Mechanical reliability, fatigue strength and survival analysis of new polycrystalline translucent zirconia ceramics for monolithic restorations. *J Mech Behav Biomed Mater*, 85, 57–65, 2018.
- Han MS. *Hydrothermal synthesis and mechanical characterization of ZrO<sub>2</sub>-Xmol% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, PaiChai University, 2010.
- Hjerppe J, Närhi T, Fröberg K, Vallittu PK, Lassila LV. Effect of shading the zirconia framework on biaxial strength and surface microhardness. *Acta Odontol Scand*, 66(5), 262–267, 2008.
- Jo JH, Bae WT, Seo JI. The Effects of Sintering Temperature Influence on the Mechanical Property and Microstructure of Dental Zirconia Block. *J KADT*, 36(1), 9–15, 2014.
- Lee SM. *Fabrication and mechanical/optical properties of colored dental zirconia*, Seoul National University of Science and Technology, 2013.



- Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and fracture perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J*, 28(1), 44–56, 2009.
- Nah JS. Mechanical properties and color change according to sintering temperature of dental zirconia block. *J KADT* 39(3), 145–152, 2017.
- Park JW. A Comparative Study on the fracture strength of the multi coloured monolithic zirconia restoration. Kyungpook National University, 2016.
- Raigrodski AJ. Contemporary materials and technologies for allceramic fixed partial dentures: a review of the literature. *J Prosthet Dent*, 92, 557–562, 2004.
- Sceeram KJ, Srinivasan R, Devi JM, Nair BU, Ramasami T. Cerium molybdenum oxides for environmentally benign pigments. *Dyes Pigm*, 75(3), 687–692, 2007.
- Seo YJ. Effects of metal chloride addition on coloration and mechanical properties of zirconia Chonnam National University, 2015.
- Shah K, Holloway JA, Denry IL. Effect of coloring with various metal oxides on the microstructure, color, and flexural strength of 3Y-TZP. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 87(2), 329–337, 2008.
- Spyropoulou PE, Kamposiora P, Eliades G, Papavasiliou G, Razzoog ME, Bayne SC. Cyclic Loading Effect on Color Stability of Unshaded versus Shaded Zirconia. *J Esthet Restor Dent*, 28(2), 77–84, 2015.
- Ueda K, Gueth JF, Erdelt K, Stimmelmayer M, Kappert H, Beuer F. Light transmittance by a multi-coloured zirconia material. *Dent Mater J*, 34(3), 310–314, 2015.
- Zhao J, Shen Z, Si W, Wang X. Bi-colored zirconia as dental restoration ceramics. *Ceram Int*, 39(8), 9277–9283, 2013.