



## 치과수복용 CAD/CAM 세라믹/고분자 블록의 기계적 물성

구승원<sup>1</sup>, 박종환<sup>1</sup>, 고영무<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>조선대학교 치의학전문대학원 치과재료학교실, <sup>2</sup>조선대학교 노인구강질환제어연구센터

〈Abstract〉

### Mechanical Properties of Ceramic/Polymer Blocks for CAD/CAM Dental Restoration

Seung-Won Ku<sup>1</sup>, Jong-Hwan Park<sup>1</sup>, Yeong-Mu Ko<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Dental Materials, School of Dentistry, Chosun University, Gwangju 61452, Republic of Korea

<sup>2</sup>Research Center for Oral Disease Regulation of the Aged,  
Chosun University, Gwangju 61452, Republic of Korea

The goal for restorative dentistry is to replace lost tooth substance by a restorative material whose properties are similar to a natural tooth. The increasing demand for esthetics, combined with health and environmental concerns about some metallic restorations, has stimulated research in metal-free restorations. For this purpose, CAD/CAM technology has been introduced in dentistry 3 decades ago and is rapidly becoming popular. It reduces the number of clinical sessions and increased quality in a shorter period of time. Furthermore, allows to extend the use of ceramics with life-like appearance, color stability, chemical stability, have good mechanical and optical properties, as well as excellent biocompatibility. Although ceramics has been widely used for dental CAD/CAM blocks, still experience a relatively high failure rate due to the brittleness. Another potential hazard is excessive wear of the opposing teeth due to the high hardness. Ceramic/polymer composite blocks, so called resin nanoceramics or hybrid ceramics have recently been introduced to the market. They improved the machinability and edge stability with suppressing the brittleness. They are easier to operate and repair if necessary. The mechanical properties of two commercially available dental CAD/CAM blocks, Polyglass (Vericom, Korea) and Enamic (Vita, Germany), were investigated in this study. Commercial blocks were cut into (4.0×1.2×17.0) mm to determine the flexural strength with a three-point bending test. The surface microhardness and fracture toughness were also measured. Weibull characteristics and elastic modulus were calculated. Polyglass consists of irregular-shaped ceramics in an organic resin matrix, while Enamic composes ceramic network infiltrated with cured polymers. Polyglass showed higher values in flexural strength (132.30±7.04 MPa), Weibull modulus (22.46) and fracture toughness (1.47±0.73 MPa√m) than those of Enamic (113.73±10.93 MPa, 12.72, and 1.21±0.51 MPa√m). In contrast, Enamic exhibited higher values in elastic modulus (7.0±0.4 GPa) and hardness (2.18±0.52 GPa) than those of Polyglass (5.1±0.8 GPa and 0.86±0.09 GPa).

*Key words* : Dental, Aesthetic restoration, CAD/CAM, Block, Composite resin, Ceramic, Strength, Weibull analysis, Fracture toughness, Hardness

\* Correspondence: 고영무 (ORCID ID: 0000-0002-6733-6073)  
(61452) 광주광역시 동구 필문대로 309번지,  
Tel: +82-62-230-6876, Fax: +82-62-226-6876  
E-mail: ymgo@chosun.ac.kr

## 1. 서론

CAD/CAM은 단시간에 우수한 품질의 수복물을 제작하여 환자의 만족도를 높일 수 있을 뿐 아니라, 노동력을 절감하여 비용의 효율성을 높일 수 있고, 가공 작업 중에 발생할 수 있는 실수 및 감염 가능성도 줄일 수 있다. 수복 후에 예기치 않은 문제가 발생할 경우에도 파일이 컴퓨터에 저장되어 있기 때문에 신속 정확하게 다시 만들 수도 있다. 또한 가공 작업에서는 사용하기 어려웠던 새로운 재료를 CAD/CAM에서는 용이하게 사용할 수 있어서 수복물의 물성을 향상시킬 수 있다 (Miyazaki 등, 2009).

이상적인 치과 수복을 위해서는 손상된 치아를 구조와 물성이 자연치와 유사한 재료로 대체하는 것이 바람직하며, 심미에 대한 관심이 높아지고, 아말감과 같은 금속 수복물의 건강과 환경에 대한 환자들의 관심이 연계되면서 금속 수복물의 수요는 줄어들고, 세라믹 수복물이 증가하고 있는 추세이다 (Albero 등, 2015; Miyazaki 등, 2009; Zahran 등, 2008).

세라믹은 생체 친화성이 우수할 뿐 아니라, 화학적 내구성과 색조 안정성이 좋고, 자연치와 유사한 색조를 띠는 특징이 있어서 이미 오래전부터 치과 수복재료로 사용되어 왔다. 그러나 취성이 있어서 깨지기 쉽고, 경도가 높아서 대합치의 마모가 심해서 교합의 불균형을 유발하며, 탄성율이 범랑질보다 매우 높아서 응력 차폐(stress shielding) 효과를 유발하기도 한다는 한계를 갖고 있다 (Albero 등, 2015; Miyazaki 등, 2009; Petrini 등, 2013). 세라믹은 전통적인 가공 과정으로도 제조가 가능하지만, CAD/CAM 기술로 훨씬 쉽게 제조가 가능해져 세라믹이 CAD/CAM 기술을 만나서 심미 수복을 실현하게 된 것이 바로 CEREC(Chairside Economical Restorations of Esthetic Ceramics)이다.

세라믹 블록의 시초는 Vita Mark, IPS Empress, Paradigm C 등의 장식계 루사이트 결정화 유리로 굴곡강도가 160 MPa에 불과하였고, 이후 굴곡강도가 229 MPa에 달하고 층상 구조를 갖는 운모를 결정화 유리하여 가공성을 향상시킨 Dicor도 출시되었으나 현재는 시장에서 사라졌다. 이후 리튬 다이실리케이트를 결정화시켜 굴곡강도가 450 MPa에 달하는 IPS e.max CAD가 출시되었고, 결정질 세라믹(알루미나, 스피넬, 지르코니아)을 다공체로 만들어 유리로 가공을 채운

InCeram(알루미나, 스피넬, 지르코니아)은 굴곡강도가 각각 600 MPa, 350 MPa, 700 MPa에 달한다. InCeram은 슬립 캐스팅이란 방법을 통해 전통적인 가공 과정으로 제조하는 제품이 CAD/CAM용으로도 출시된 것으로 슬립 캐스팅에 비해 균일하고 치밀한 블록이 가능하다. 슬립 캐스팅하여 제조하는 데는 14시간이 걸리지만, CAD/CAM으로 제조하면 가공하는데 20분 이내, 유리 침투하는데 40분~4시간이 걸려서 제작 시간을 10%로 단축시킬 수 있어서 CAD/CAM 기술의 큰 혜택이라고 할 수 있다. 결정질 세라믹 블록은 소결 수축을 정확하게 보상할 수 있어서 CAD/CAM 기술의 도입으로 사용이 빠르게 증가하였다. 알루미늄인 Procera AllCeram은 굴곡강도가 약 600 MPa에 달한다. 지르코니아는 단사정, 정방정, 입방정의 결정상이 온도에 따라 전이하면서 발생하는 부피 팽창을 이용하여 재료 내부에 압축 응력이 형성되게 하여 균열 전파를 억제하는 것이  $9\sim 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 높은 파괴 인성을 갖는 기전이며, 굴곡강도도 알루미늄의 2배인 900~1200 MPa에 달한다. 세리아(ceria), 마그네시아(magnesia), 칼시아(calcia), 이트리아(yttria)와 같은 안정화제의 첨가량을 조절하여 안정화 정도를 제어하여 부분안정화 지르코니아로도 제조할 수 있다 (Awad 등, 2015; Li 등, 2014; Liu, 2005; Miyazaki 등, 2009, 2013).

세라믹과 고분자의 장점을 접목해서 우수한 심미성을 유지하면서 가공성을 향상시키고자 CAD/CAM 세라믹/고분자 복합재료 블록이 개발되었다 (Spitznagel 등, 2014). 세라믹은 심미성 뿐 아니라 기계적 강도도 우수하지만, 임상에서 사용하는 데 중요한 신뢰성과 파괴 인성이 단점으로 지적되며, 고분자는 가공성이 용이하고, 파괴인성이 높으므로 세라믹과 고분자를 복합화하면 심미성이 우수한 이상적인 CAD/CAM 블록이 되리라 기대하는 것이다 (Coldea 등, 2013; He와 Swain, 2011; Nguyen 등, 2014).

본 연구에서는 고분자 매트릭스에 세라믹 필러가 분산된 구조를 갖는 CAD/CAM 제품과 세라믹 매트릭스에 고분자를 침투시킨 구조를 갖는 CAD/CAM 제품의 굴곡강도, 와이블 특성강도 및 계수, 경도, 탄성율, 파괴인성 등의 기계적 물성을 비교 측정하여 세라믹과 고분자의 복합 형태에 따른 CAD/CAM 블록으로의 특성을 파악해보고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험재료

Fig. 1에 나타난 상용 CAD/CAM 블록인 Polyglass(베리콤, 한국)와 Enamic(Vita, 독일)의 두 가지 제품을 사용하였다. (4.0×2.1×17.0) mm의 크기로 절단한 후 1 μm의 다이아몬드 페이스트로 연마하여 각 31개씩 시편을 제조하였다.

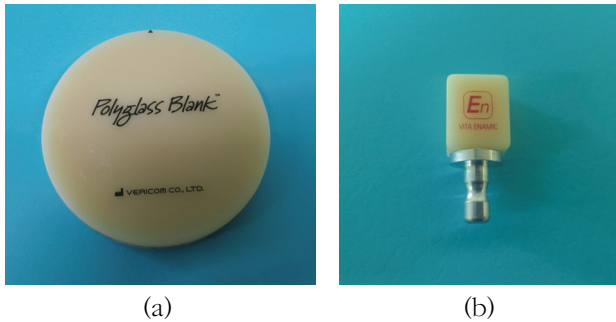


Figure 1. Commercial CAD/CAM blocks used in this study (a) Polyglass and (b) Enamic.

### 2. 실험방법

#### 1) 미세구조 관찰

표면주사전자현미경(SEM; JSM-6701F, Jeol, Japan)을 이용하여 CAD/CAM 세라믹/고분자 블록의 미세구조를 관찰하였다.

#### 2) 굴곡강도 측정

ISO 6872:2015 Dentistry - Ceramic materials에 따라 만능 시험기(3366, Instron, USA)을 이용하여 span 12 mm의 지지대에 시편을 올려놓고, 1.0 mm/min의 속도로 하중을 가하여 최대 하중을 구한 후 아래 식 (1)로 3점 굴곡강도를 계산하였다.

$$\sigma = 3PL / 2bh^2 \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 굴곡강도(MPa), P는 최대 하중(N), L은 span 길이(mm), b와 h는 각각 시편의 폭과 두께(mm)이다.

#### 3) 와이블 분석

ISO 6872의 Annex B. Weibull statistics에 따라 시행하였

다. 굴곡강도 데이터를 오름차순으로 정리하여 순위를 매긴 후에 아래 식 (2)에 따라 파괴확률을 계산하였다.

$$P_f = (i - 0.5) / N = 1 - \exp [ -(\sigma/\sigma_0)^m ] \quad (2)$$

여기서,  $P_f$ 는 파괴확률이고,  $i$ 는 오름차순으로 정렬한 순위,  $N$ 은 시편의 개수이다.

아래 식 (3)으로부터 와이블 계수(modulus)  $m$ 을 구하였다.

$$\ln \ln [ (1/1-P_f) ] = m \ln \sigma + b \quad (3)$$

#### 4) 탄성을 측정

ISO 13061-4:2014 Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 4: Determination of modulus of elasticity in static bending에 따라 굴곡응력-굴곡변형을 곡선으로부터 아래 식 (4)로 계산하였다.

$$E = PL^3 / 4bh^3f \quad (4)$$

여기서, E는 탄성율(MPa), P는 최대 하중(N), L은 span 길이(mm), b와 h는 각각 시편의 폭과 두께(mm), f는 최대 변형량(mm)이다.

#### 5) 표면미세경도 측정

ISO 14705:2008 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Test method for hardness of monolithic ceramics at room temperature에 따라 Microhardness tester (HV-1000Z, Pace Technologies, USA)를 사용하여 비커스 경도를 측정하였다. 4.903 N의 하중을 15초 압입한 후, 압흔의 대각선 길이( $d_1$ 과  $d_2$ )를 측정하여 아래 식 (5)로 표면미세경도를 계산하였다.

$$HV = 0.001854 F / d^2 \quad (5)$$

여기서, HV는 비커스 경도(GPa), F는 압입 하중(N), d는

압흔의 평균 대각선 길이(mm)이다.

### 6) 파괴인성 측정

KS L 1600 고성능 요업 제품의 파괴 인성 시험방법에 따라 Microhardness tester(HV-1000Z, Pace Technologies, USA)를 사용하여 9.807 N의 하중을 15초간 압입한 후, 균열의 길이를 측정하여 아래 식 (6)으로 파괴인성을 계산하였다.

$$K_c = 0.018 \sqrt{(E/HV)} (P/c^{3/2}) \quad (6)$$

여기서,  $K_c$ 는 파괴인성( $\text{Pa}\sqrt{\text{m}}$ ),  $E$ 는 탄성율(Pa),  $HV$ 는 비커스 경도(Pa),  $P$ 는 압입 하중(N),  $c$ 는 평균 균열 길이의  $\frac{1}{2}$ (m)이다.

### 7) 통계 분석

제품 간의 기계적 물성의 통계적 유의성은 유의수준 0.05에서 paired t-test를 이용하여 분석하였다.

## III. 연구 결과

상용 CAD/CAM 블록인 Polyglass와 Enamic의 미세구조를 주사전자현미경으로 관찰하여 Fig. 2에 나타내었다. 사진에서 상대적으로 밝은 부분이 세라믹이고, 상대적으로 어두운 부분이 고분자이다. Fig. 2(a)의 Polyglass는 고분자 매트릭스에 불규칙한 형태의 세라믹 필러가 분산되어 있는 형태라는 것을 볼 수 있으며, 수십  $\mu\text{m}$ 와 수십  $\text{nm}$ 가 섞여 있는 하이브리드 필러임을 알 수 있었다. Fig. 2(b)의 Enamic은 Polyglass와는 달리 세라믹이 연결되어 있고, 사이사이에 불규칙한 크기와 형태의 고분자가 존재하고 있다.

굴곡 하중 하에서의 응력-변형을 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 응력이 증가함에 따라 Polyglass와 Enamic 모두 변형이 직선적으로 증가하다가 파괴되는 양상을 나타내었다.

Fig. 3의 응력-변형을 곡선으로부터 파괴될 때의 최대 응력으로부터 굴곡강도를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. Polyglass의 굴곡강도가  $132.30 \pm 7.04$  MPa로 Enamic의  $113.73 \pm 10.93$  MPa보다 유의하게 높은 값을 나타내었다( $p < 0.05$ ).

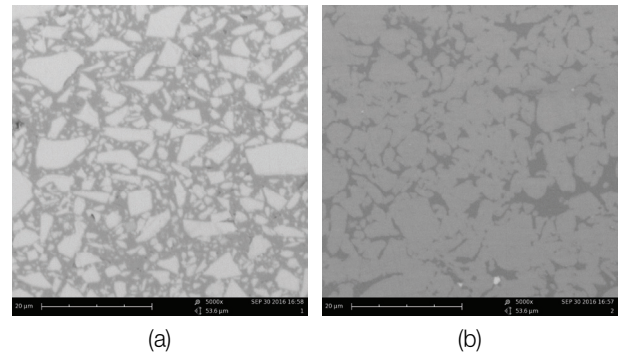


Figure 2. SEM photographs for (a) Polyglass and (b) Enamic.

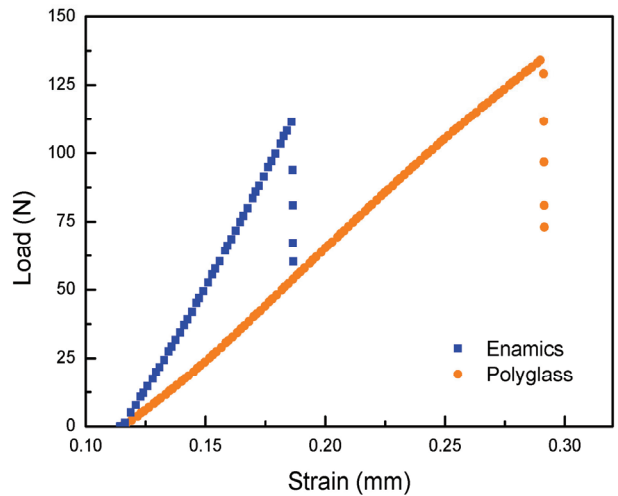


Figure 3. Typical stress-strain curves under flexural loading.

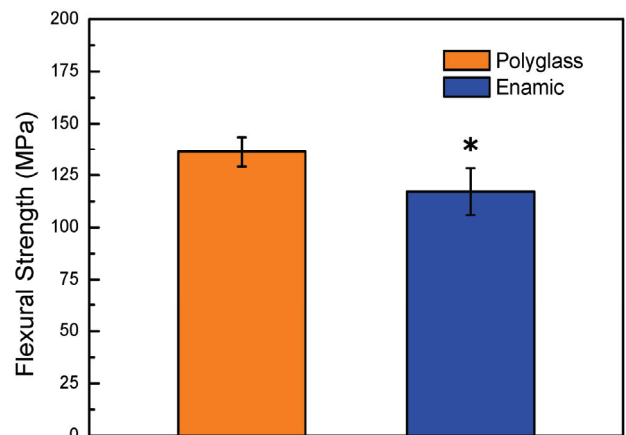


Figure 4. Flexural strengths determined by three-point bending test.

\* : Significant difference ( $p < 0.05$ )

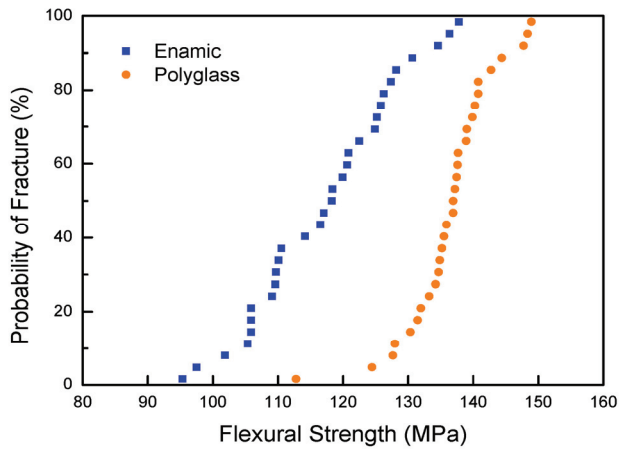
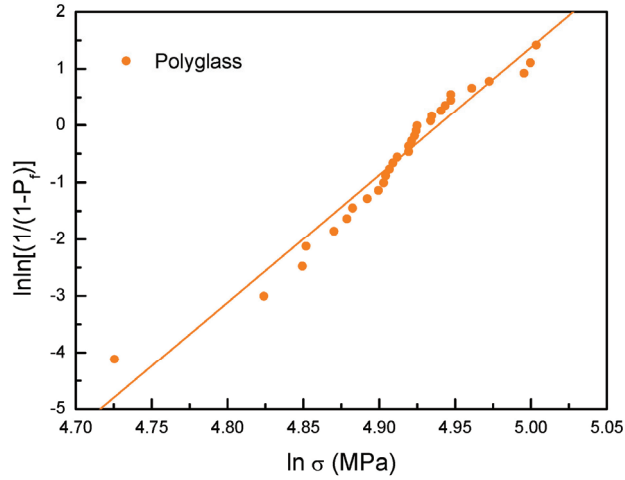
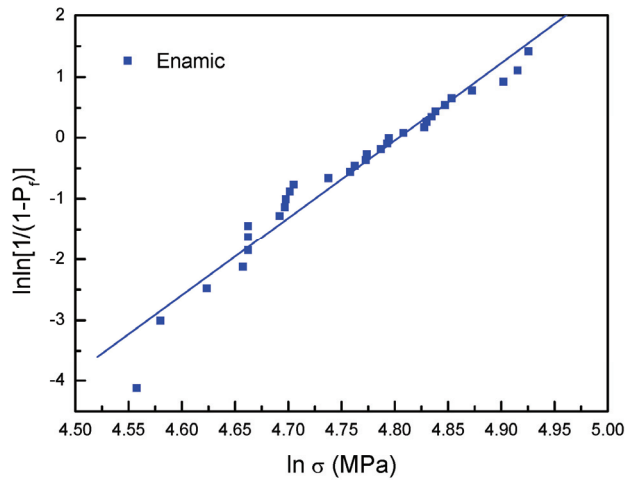


Figure 5. Probabilities of fracture according to the flexural strength,



(a)



(b)

Figure 6. Weibull distribution of flexural strengths.

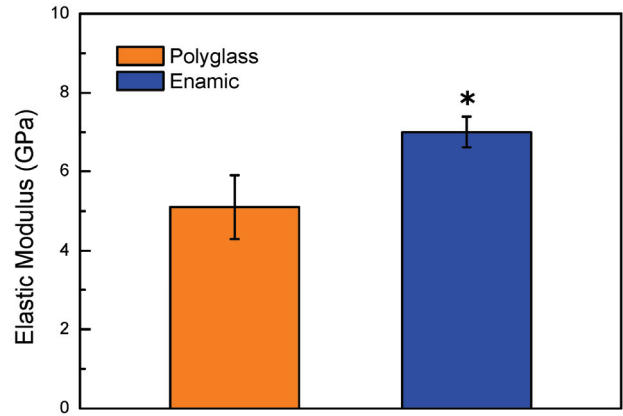


Figure 7. Elastic moduli determined by stress-strain curves, \* : Significant difference ( $p < 0,05$ )

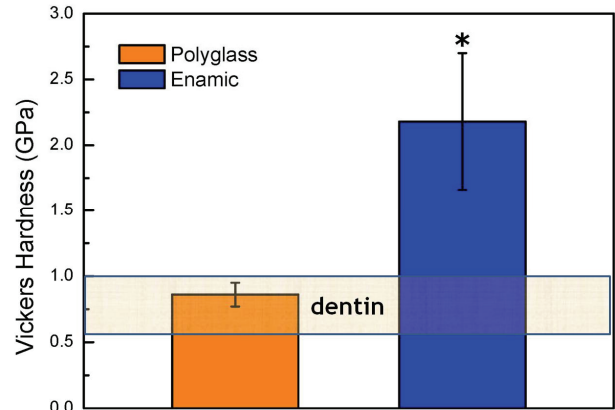


Figure 8. Surface microhardness determined by Vickers indentation, \* : Significant difference ( $p < 0,05$ )

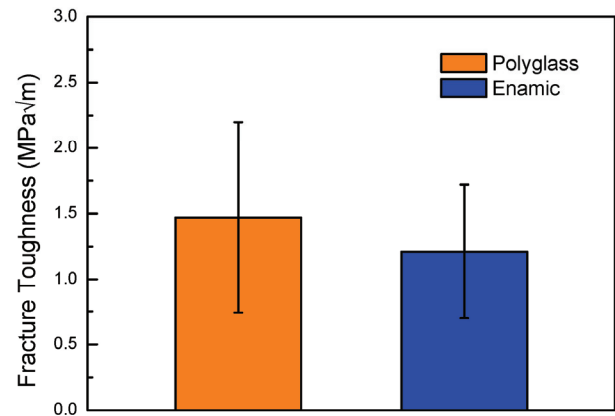


Figure 9. Fracture toughness determined by indentation fracture.

와이블 통계분석하여 굴곡강도를 파괴확률에 따라 도식화하여 Fig. 5에 나타내었다. 동일한 강도에서 Enamic이 Polyglass보다 파괴확률이 큰 것을 알 수 있으며, 파괴확률이 63.21%인 와이블 특성 강도는 Polyglass가 139.60 MPa이고, Enamic은 121.96 MPa이었다.

굴곡강도의 와이블 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 선형회귀 분석하여 기울기로부터 와이블 계수를 구하였는데, Polyglass가 22.46로 Enamic의 12.72보다 매우 높은 값을 나타내었다.

Fig. 3에 나타낸 응력-변형을 곡선의 기울기로부터 탄성율을 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. Enamic의 탄성율이  $7.0 \pm 0.4$  GPa로 Polyglass의  $5.1 \pm 0.8$  GPa보다 유의하게 높은 값을 나타내었다( $p < 0.05$ ).

비커스 경도를 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. Enamic의 경도는  $2.18 \pm 0.52$  GPa로 Polyglass의  $0.86 \pm 0.09$  GPa보다 유의하게 높은 값을 나타내었다( $p < 0.05$ ). Polyglass의 경도는 자연치의 상아질과 유사한 수준으로, Polyglass와 Enamic 모두 자연치의 범랑질보다는 매우 낮은 경도를 나타내었다.

압입 균열법으로 측정한 파괴인성을 Fig. 9에 나타내었다. Polyglass의 파괴인성은  $1.47 \pm 0.73$  MPa $\sqrt{m}$ 로 Enamic의  $1.21 \pm 0.51$  MPa $\sqrt{m}$ 보다 높은 값을 나타내었으나 유의차는 없었다( $p > 0.05$ ).

#### IV. 총괄 및 고찰

세라믹은 생체 친화성, 화학적 내구성, 색조 안전성이 우수하고, 심미성이 탁월하여 치과에서 오래 전부터 사용되어 왔으나, CAD/CAM 기술을 만나면서 제조가 복잡하여 오랜 시간이 걸리던 한계를 극복하면서 CEREC이라는 이름으로 대표되는 CAD/CAM 기술과 CAD/CAM 재료의 중심이 되었다. 세라믹은 결합 구조에 따라 비정질 세라믹과 결정질 세라믹으로 대별할 수 있고, 중간 형태인 결정화 유리도 있는데, 치과에서는 이러한 모든 형태가 다양하게 사용된다 (Shenoy와 Shenoy, 2010). 이렇게 다양한 형태가 사용되는 것은 결합 구조에 따라 심미성과 기계적 물성 등의 특성이 달라지기 때문이다. 세라믹의 고유 특성인 심미성은 비정질 세라믹이 결정질 세라믹보다 우수하지만, 기계적 물성은 반대이다. 이 둘의

중간 형태인 결정화 유리를 사용하는 것도 이러한 물성의 특성을 절충하기 위함이며, 이 둘을 복합화하는 것도 같은 이유이다. 전자는 Ivoclar Vivadent의 IPS 시리즈인 Empress와 e.max가 대표적이고, 후자는 Vita의 InCeram 시리즈인 InCeram 알루미늄, 스피넬, 지르코니아가 대표적이라 할 수 있다. 기계적 강도는 InCeram이 최대 700 MPa로 IPS의 최대치 450 MPa보다 우수하지만, 심미성은 IPS가 우위를 점하고 있다.

세라믹/고분자 복합재료는 50년 전부터 치과용 컴포짓 레진으로 사용되기 시작했으며, 컴포짓 레진의 물성은 레진 매트릭스, 필러의 종류, 형태 및 크기와 커핑링제에 의존한다 (Ferracane 등, 1998). 고분자는 최초로 사용되었던 bis-phenol A-glycidyl methacrylate (BisGMA)에서 큰 변화가 없는 반면, 필러는 다양하게 발전하여 필러에 따라 컴포짓 레진을 분류하고 있다.

최초의 세라믹/고분자 CAD/CAM 블록은 컴포짓 레진을 중합하여 제조한 것으로 고분자 매트릭스에 세라믹이 분산된 구조이다. 3M ESPE는 컴포짓 레진인 Z100을 중합하여 제작한 CAD/CAM 블록을 MZ100이라는 제품명으로 출시한 이후, 필러가 발전하면서 Lava Ultimate을 레진 나노 세라믹이라고 출시하였으며, 국내에도 유사한 제품으로 베리콤의 Polyglass와 Mazic Duro가 있다. Vita에서는 InCeram과 유사한 공정으로 세라믹/고분자 복합재료를 개발하였다. 처음에는 알루미늄 나를 다공체로 만들어 메타아크릴레이트 단량체로 기공을 채운 후에 0.1 MPa에서 중합하였는데, 알루미늄과 메타아크릴레이트 단량체의 굴절률 차이가 커서 (알루미늄의 굴절률은 1.78이고, 메타아크릴레이트 단량체의 굴절률은 1.48~1.53) 불투명하고, 단량체가 중합하면서 내부에 응력이 발생하여 알루미늄과 고분자 간에 debonding이 발생하였다 (Sadoun, 2011). 그래서 알루미늄 대신 메타아크릴레이트와 굴절률이 비슷한 결정화 유리를 사용하여 투명성을 개선하고, 중합 시 압력을 높여 수축을 줄여서 내부 응력을 감소시켜 하이브리드 세라믹 또는 고분자 침투 세라믹 망목이라고 2013년 초에 Enamic을 출시하였다.

세라믹/고분자 CAD/CAM 블록은 버(bur) 한 세트 5~10개 밖에 가공할 수 없는 세라믹 CAD/CAM 블록에 비해 100개 이상이 가능할 정도로 가공성이 우수하고, 가공시 칩핑의 발생도 적으며, 가공후 추가 소결이 필요하지 않아서 치수 적합

도에서도 유리하고, 경도가 낮아서 저작시 응력이 낮으며, 대합치의 과다 마모를 방지할 수 있다는 장점이 있어서 (He와 Swain, 2011; Tsitrou 등, 2007) 사용이 증가하고 있다.

본 연구에서는 세라믹/고분자 CAD/CAM 제품인 Polyglass와 Enamic을 대상으로 기계적 물성을 측정하여 서로 다른 구조 형태와 기계적 물성의 관계를 규명해보고자 하였다. 기계적 물성은 국내의 표준 규격에 따라 굴곡강도, 와이블 분석, 탄성율, 경도, 파괴인성을 측정하였다. Fig. 2에 나타난 것과 같이, 주사전자현미경으로 관찰한 미세구조는 제조사에서 제시하는 것과 같이 Polyglass는 고분자 매트릭스에 불규칙한 형태의 세라믹 필러가 분산되어 있고, Enamic은 세라믹이 연결된 매트릭스에 고분자가 침투된 형태를 하고 있었다.

굴곡강도는 시편을 (4.0×1.2×17.0) mm의 크기로 제작한 후, span 길이를 12 mm로 하여 3점 굴곡강도를 측정하였다. 세라믹/고분자 복합재료이어서 약간의 소성 변형이 발생하고, 이로 인해 파괴인성이 증가할 것으로 기대하였으나 Fig. 2에 나타난 응력-변형을 곡선에서 볼 수 있는 것과 같이 Polyglass와 Enamic 모두 응력이 증가함에 따라 모두 변형이 직선적으로 증가하다가 파괴되는 거의 세라믹과 유사한 거동을 나타내었으며, Enamic이 Polyglass보다 훨씬 급한 기울기를 나타내었다. 이러한 기울기로부터 계산한 탄성율을 Fig. 7에 나타내었는데, Enamic의 탄성율이 7.0±0.4 GPa로 Polyglass의 5.1±0.8 GPa보다 유의하게 높았지만(p<0.05), 제조사 제시값인 30±2 GPa보다는 훨씬 낮았다. 복합재료의 물성은 분산상보다는 매트릭스에 주로 의존하기 때문에 Enamic의 탄성율이 Polyglass보다 높은 것이라고 설명할 수 있다. 탄성율이 높으면 저작시에 발생하는 응력이 균일하게 분포되고 (Ausiello 등, 2004; Ichim 등, 2007), 최대 1031 N 이하인 216~847 N에 이르는 구치부 교합력 (Esquivel-Upshaw 등, 2004; Helkimo 등, 1977; Waltimo와 Kononen, 1993; Waltimo 등, 1993)을 견디는 데에도 유리하다. 자연치의 탄성율은 상아질이 16.0~20.3 GPa (Coldea 등, 2013)로 25 GPa 이하 (Hayashi 등, 2010; Plotino 등, 2007; Vieira 등, 2012)이고, 법랑질은 48.0~105.5 GPa (Coldea 등, 2013)과 94 GPa (Bechtle 등, 2012; Ghavamnasiri 등, 2007)이라고 보고되어 있어서 본 연구에서 측정한 Enamic과 Polyglass의 탄성율은 모두 자연치의 탄성율보다 낮았다. Polyglass의 탄성율은 보

고된 바 없으나, 유사한 구조인 Lava Ultimate의 탄성율은 14.21 GPa라고 보고되었으며, Enamic의 탄성율은 16.4~28.1 GPa (Pest 등, 2002), 32.93~37.95 GPa (Bona 등, 2014), 26.54~31.72 GPa (Coldea 등, 2013)로 보고되어 본 연구에서 측정한 탄성율과 크게 달랐는데, 이는 측정 방법이 원인이라고 생각된다. 탄성율을 측정하는 방법에는 정적인 방법과 동적인 방법이 있는데, 정적인 방법은 본 연구에서 사용한 방법으로 만든 시험기를 이용해서 시편에 하중을 가하면서 스트레인 게이지로 변형량을 측정하여 탄성 범위에 해당하는 직선의 기울기를 구하는 방법이다. 정적인 방법은 하중을 가하는 방법에 따라서 차이가 발생하고, 동적이 방법에 비해 정밀성이 떨어지며 (Han과 Kim, 2004), 정탄성율에 비해 낮은 값을 나타낸다 (Han과 Kim, 2004)고 알려져 있다. 본 연구는 동적인 방법으로 측정을 시도하였으나 적절한 값을 얻을 수 없었는데, 복합 재료이어서 시편의 조성이 균일하지 않고, 미세한 기공이 존재하기 때문이라고 생각된다.

본 연구에서 측정한 굴곡강도는 Polyglass는 132.30±7.04 MPa이고, Enamic은 113.73±10.93 MPa으로 Polyglass가 Enamic보다 유의하게 높은 값을 나타내었으나(p<0.05), 둘 다 제조사 제시값에는 미치지 못하여 Polyglass는 제조사 제시값(208.3 MPa)의 63.5%, Enamic은 제조사 제시값(150~160 MPa)의 71.1~75.8%에 불과하였다. Polyglass의 굴곡강도에 대해 보고된 논문은 찾을 수가 없었으며, Enamic은 낮게는 144.44~158.53 MPa (Coldea 등, 2013)로부터 높게는 Lava Ultimate의 164.3±33.3 MPa보다 높은 180.9±42.2 MPa이라는 보고 (Albero 등, 2015)도 있으나, 본 연구에서는 이보다 훨씬 낮고, Polyglass보다 낮은 값을 나타내었다.

세라믹은 외부에서 힘이 가해지면 응력이 결합에 집중되어 파괴가 시작되는 취성 재료이므로 재료에 존재하는 결합에 매우 민감하여 강도의 분포가 넓기 때문에 평균값을 안다고 해도 실제 강도를 예측하기에는 무리가 있다. 그래서, 일정한 응력에서 파괴가 일어날 확률을 구하는 와이블 통계분석이 세라믹의 신뢰성을 구하는데 널리 사용된다. 와이블 계수가 크면 결합이 균일하게 분포되어 있어서 강도의 분포가 작은 것이고, 작아질수록 강도의 분포가 커져 신뢰도가 낮다는 것을 의미한다 (Albero 등, 2015; Gonzagaa 등, 2011). 본 연구에서 측정한 와이블 계수는 Polyglass가 22.46, Enamic이



12.72를 나타내었다. Polyglass는 제조사에서 와이블 계수를 제시하지 않고 있는데, 본 연구에서 22.46으로 매우 높은 값을 나타내었으며, 이는 일반적으로 신뢰성 있다고 하는 20 이상의 높은 값이다. Enamic은 제조사에서 Lava Ultimate의 13보다 높은 20이라고 제시하고 있으나, 기존의 보고된 값은 20 (Coldea 등, 2013), 20.19 (Lise 등, 2014)의 제조사 제시값과 유사한 보고가 있는 반면, 4.99로 Lava Ultimate의 5.98보다도 낮다 (Albero 등, 2015)는 보고도 있다. 본 연구에서는 Polyglass보다 낮은 12.72를 나타내었으며, 이는 치과용 컴포ジット 레진이 약 13이라는 보고 (Dirxen 등, 2013) 및 Lava Ultimate이 13.32이라는 보고(Lise 등, 2014)와 유사한 값이다.

비커스 경도는 Enamic이  $2.18 \pm 0.52$  GPa로 Polyglass의  $0.86 \pm 0.09$  GPa보다 유의하게 높았다( $p < 0.05$ ). 자연치의 경도는 상아질이 0.6~0.92 GPa (Sakar-Deliormanli, 2006; Willems 등, 1993; Xu 등, 1998)로 1보다 낮고 (Hayashi 등, 2010; Plotino 등, 2007; Vieira 등, 2012), 법랑질은 3~5.3 GPa으로 평균 3.5 GPa로 (Sakar-Deliormanli, 2006; Willems 등, 1993; Xu 등, 1998) 6보다 낮다 (Hayashi 등, 2010; Plotino 등, 2007; Vieira 등, 2012)고 보고되어 있어서 Polyglass의 경도가 자연치의 상아질과 유사한 수준이고, Polyglass와 Enamic 모두 자연치의 법랑질보다는 매우 낮은 값을 알 수 있었다.

치과 수복재료의 임상 사용시 강도보다 더 중요한 물성은 균열 전파에 저항해서 급격한 파괴를 방지하는 능력인 파괴인성이다 (Bona 등, 2014). 세라믹의 파괴인성을 측정하는 방법으로는 단일 에지 노치 빔(single edge notched beam) 방법, 쉘브론 노치 빔(chevron notched beam) 방법, 이중 비틀림(double torsion) 방법, 이중 균열 천공 압축(double-cleavage-drilled compression)법, 압입 강도(indentation strength)법, 압입 균열(indentation fracture)법 등 매우 다양한 방법이 사용되고 있으며 (Coric 등, 2016; Fischer와 Marx, 2002; Fischer 등, 2008; Gong 등, 2002; Gonzaga 등, 2009, 2011; Kruzic과 Ritchie, 2003; Kruzic 등, 2009; Lawn과 Marshall, 1979; Lee와 Tomozawa, 1999; Lise 등, 2014; Quinn과 Bradt, 2007; Rizkalla와 Jones, 2004; Rocha-Rangel, 2011; Sakar-Deliormanli와 Guden, 2006; Scherrer 등, 1998, 1999; Yana 등, 2006), 측정 방법이 다르면 평균값 뿐 아니라 분산도 달라진다고 알려져 있

다. 이중 가장 정확하고 신뢰성이 있으며 재현성이 있어서 국제 표준규격에서 추천되는 방법은 단일 에지 노치 빔 방법이다 (ISO 6872). 그러나, 단일 에지 노치 방법, 쉘브론 노치 빔 방법, 이중 비틀림 방법, 이중 균열 천공 압축 방법과 같이 노치를 만들어야 하는 경우에 시편이 급격하게 파괴되지 않도록 하면서 균일한 크기로 만드는 것은 쉽지 않고, 노치의 곡률반경에 따라서도 결과치가 달라지게 된다 (Fischer 등, 2008).

본 연구에서는 특별한 형태의 시편이 필요하지 않아서 가장 널리 사용되고 있는 방법인 압입 균열법으로 측정하였다. Polyglass가  $1.47 \pm 0.73$  MPa $\sqrt{m}$ 로 Enamic의  $1.21 \pm 0.51$  MPa $\sqrt{m}$ 보다 높았으나 유의차는 없었다( $p > 0.05$ ). Enamic의 제조사 제시값은  $1.5$  MPa $\sqrt{m}$ 이지만, 단일 에지 노치 빔 방법으로 측정된 값은  $(1 \sim 1.51) \pm 0.04$  MPa $\sqrt{m}$ 이고, 압입 강도법으로 측정된 값은  $1.41 \sim 1.89$  MPa $\sqrt{m}$ 으로 (Coldea 등, 2013), 압입법으로 측정된 값이 단일 에지 노치 빔 방법으로 측정된 값보다 높다 (Scherrer 등, 1998)는 보고와도 일치하는 보고부터  $1.46$  MPa $\sqrt{m}$  (He와 Swain, 2011),  $1.8$  MPa $\sqrt{m}$  (Nguyen 등, 2014),  $1.85 \pm 0.10$  MPa $\sqrt{m}$  (Lise 등, 2014)으로 제조사 제시값보다 높다고 보고도 있다. Lava Ultimate도 마찬가지로 제조사 제시값은  $2.02$  MPa $\sqrt{m}$ 이지만, 압입 강도법으로 측정하면  $2.73 \pm 0.25$  MPa $\sqrt{m}$ 이라고 보고(Lise 등, 2014)되어 유사한 구조인 MZ 100의  $0.8$  MPa $\sqrt{m}$  (Nguyen 등, 2012),  $0.9$  MPa $\sqrt{m}$  (Thornton과 Ruse, 2014),  $1.4$  MPa $\sqrt{m}$  (He와 Swain, 2011)보다는 매우 높았다. 치과용 컴포ジット 레진의 파괴인성은  $0.8$  MPa $\sqrt{m}$  이하 (Ruse와 Sadoun, 2014),  $1.1 \pm 0.2$  MPa $\sqrt{m}$  (Quinn과 Quinn, 2010),  $1.3 \sim 1.5$  MPa $\sqrt{m}$  (Rodrigues Jr 등, 2008)이라고 보고되었다. 자연치 상아질의 파괴인성은  $2.2 \sim 3.1$  MPa $\sqrt{m}$  (Coldea 등, 2013)과  $3.08$  MPa $\sqrt{m}$  (El Mowafy와 Watts, 1986), 법랑질은  $0.7 \sim 1.37$  MPa $\sqrt{m}$  (Hassan 등, 1981)과  $0.6 \sim 1.5$  MPa $\sqrt{m}$  (Coldea 등, 2013)이라고 보고되어 Enamic과 Polyglass 모두 법랑질과 유사하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 치과용 CAD/CAM 세라믹/고분자 블록 상용 제품인 Polyglass(베리콤, 한국)와 Enamic(Vita, 독일)의 기계



적 물성을 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Polyglass는 고분자 매트릭스에 수십  $\mu\text{m}$ 와 수십 nm 크기의 불규칙한 형태를 갖는 세라믹 필러가 분산되어 있는 구조이고, Enamic은 세라믹 매트릭스에 불규칙한 크기와 형태의 고분자가 함침된 구조임을 확인할 수 있었다.

2. 굴곡하중에 따라 변형이 직선적으로 증가하다가 파괴되는 세라믹과 유사한 파괴 거동을 나타내었으며, 기울기로부터 계산한 탄성율은 Enamic이  $7.0 \pm 0.4$  GPa로 Polyglass의  $5.1 \pm 0.8$  GPa보다 유의하게 높은 값을 나타내었다( $p < 0.05$ ).

3. 굴곡강도는 Polyglass가  $132.30 \pm 7.04$  MPa로 Enamic의  $113.73 \pm 10.93$  MPa보다 유의하게 높은 값을 나타내었다( $p < 0.05$ ).

4. 와이블 계수는 Polyglass가 22.46로 Enamic의 12.72보다 매우 높은 값을 나타내었다.

5. 비커스 경도는 Enamic이  $2.18 \pm 0.52$  GPa로 Polyglass의  $0.86 \pm 0.09$  GPa보다 유의하게 높은 값을 나타내었으며( $p < 0.05$ ), Polyglass의 경도가 자연치의 상아질과 유사한 수준이었다.

6. 압입 균열법으로 측정된 파괴인성은 Polyglass가  $1.47 \pm 0.73$  MPa $\sqrt{\text{m}}$ 로 Enamic의  $1.21 \pm 0.51$  MPa $\sqrt{\text{m}}$ 보다 높았으나, 유의차는 없었다( $p > 0.05$ ).

굴곡강도, 와이블 계수, 파괴인성은 Polyglass가 높은 값을 나타낸 반면, 탄성율과 경도는 Enamic이 높은 값을 나타내서 고분자 매트릭스 구조인 Polyglass가 강도와 파괴인성에 유리하다는 것을 알 수 있었다. 그러나, Polyglass와 Enamic에 사용된 세라믹과 고분자의 성분이 다를 뿐 아니라, 함량과 크기도 달라서 지속적인 연구가 필요하다고 생각되며, 기계적 물성의 측정 방법을 달리한다면 결과가 달라질 수도 있을 것으로 생각되기 때문에 이에 관해서도 추가적인 연구가 기대된다.

## VI. 참고문헌

KS L 1600 고성능 요업 제품의 파괴 인성 시험방법.

3M Paradigm, Lava Ultimate, CAD/CAM Block, Technical product profile. 2011.

3M Paradigm, MZ100 Block, Technical product profile. 2000.

Awad D, Stawarczyk B, Ing D, Liebermann A, Ilie N, Ing D. Translucency of esthetic dental restorative CAD/CAM materials and composite resins with respect to thickness and surface roughness. J Prosthet Dent 2015;113:534-540.

Barba M, de Araujo MD, Fukushima KA, Yoshimura HN, Cesar PF, Griggs JA, Bona AD. Effect of the microstructure on the lifetime of dental ceramics. Dent Mater 2011;27:710-721.

Bobji MS, Biswas SK. Estimation of hardness by nanoindentation of rough surfaces. J Mater Res 1998;13:3227-3233.

Bona AD, Corazza PH, Zhang Y. Characterization of a polymer-infiltrated ceramic-network material. Dent Mater 2014;30:564-569.

Bull SJ, Page TF, Yoffe EH. An explanation of the indentation size effect in ceramics. J Philos Mag Lett 1989;59(6):281-288.

Coldea A, Swain MV, Thiel N. In-vitro strength degradation of dental ceramics and novel PICN material by sharp indentation. J Mech Behav Biomed Mater 2013;26:34-42.

Coldea A, Swain MV, Thiel N. Mechanical properties of polymer-infiltrated-ceramic-network materials. Dent Mater 2013;29:419-426.

Coric D, Remjo MM, Curkovic L, Zmak I. Indentation fracture toughness of Y-TZP dental ceramics. 16th International Conference on New Trends in Fatigue and Fracture. pp. 1-6, 2016. 5. 24-27. Croatia.

El Mowafy OM, Watts DC. Fracture toughness of human dentine. J Dent Res 1986;65:677-681.

Fischer H, Marx R. Fracture toughness of dental ceramics: comparison of bending and indentation method. Dent Mater 2002;18:12-19.

Fischer H, Waindich A, Telle R. Influence of preparation

- of ceramic SEVNB specimens on fracture toughness testing results. *Dent Mater* 2008;24:618-622.
- He LH, Fujisawa N, Swain MV. Elastic modulus and stress-strain response of human enamel by nano-indentation. *Biomaterials* 2006;27:4388-4398.
- He LH, Swain M. A novel polymer infiltrated ceramic dental material. *Dent Mater* 2011;27:527-534.
- ISO 6872:2015 Dentistry - Ceramic materials.
- ISO 13061-4:2014 Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 4: Determination of modulus of elasticity in static bending.
- ISO 14705:2008 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Test method for hardness of monolithic ceramics at room temperature.
- ISO 18754:2003 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Determination of density and apparent porosity.
- Lauvahutanon S, Takahashi H, Shiozawa M, Iwasaki N, Asakawa Y, Oki M, Finger WJ, Arksornnukit M. Mechanical properties of composite resin blocks for CAD/CAM. *Dent Mater J* 2014;33(5):705-710.
- Lee YK, Tomozawa M. Effect of water content in phosphate glasses on crack growth rate. *J Non-Cryst Solids* 1999;248:203-210.
- Li RWK, Chow TW, Matinlinna JP. Ceramic dental biomaterials and CAD/CAM technology: state of the art. *J Prosthodont Res* 2014;58(4):208-216.
- Marshall DB, Noma T, Evans AG. A simple method for determining elastic-modulus-to-hardness ratios using Knoop indentation measurements. *J Am Ceram Soc* 1982;65(10):c175-c176.
- 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* 2009;28(1):44-56.
- Nguyen JF, Migonney V, Ruse ND, Sadoun M. Resin composite blocks via high-temperature polymerization. *Dent Mater* 2012;28:529-534.
- Nguyen JF, Migonney V, Ruse ND, Sadoun M. Properties of experimental urethane dimethacrylate-based dental resin composite blocks obtained via thermo-polymerization under high pressure. *Dent Mater* 2013;29:535-541.
- Nguyen JF, Ruse D, Phan AC, Sadoun MJ. High-temperature-pressure polymerized resin-infiltrated ceramic network. *J Dent Res* 2014;91(3):62-67.
- Petrini M, Ferrantea M, Su B. Fabrication and characterization of biomimetic ceramic/polymer composite materials for dental restoration. *Dent Mater* 2013;29:375-381.
- Ruse ND, Sadoun MJ. Resin-composite blocks for dental CAD/CAM applications. *J Dent Res* 2014;93(12):1232-1234.
- Shenoy A, Shenoy N. Dental ceramics: an update. *J Conserv Dent* 2010;13(4):195-204.
- Shetty R, Shenoy K, Dandekeri S, Suhaim KS, Ragher M, Francis J. Resin-matrix ceramics - an overview. *Inter J Recent Sci Res* 2015;6(11):7414-7417.
- Thornton I, Ruse ND. Characterization of nanoceramic resin composite and lithium disilicate blocks. IADR 2014.
- Vita Enamic. Technical and scientific documentation, 2012.
- Vita Enamic. The concept, 2013.
- Wolf D, Bindl A, Schmidlin PR, Luthy H, Mormann WH. Strength of CAD/CAM-generated esthetic ceramic molar implant crowns. *Int J Oral Max Impl* 2008;23(4):609-617.
- Zahran M, El-Mowafy O, Tam L, Watson PA, Finer Y. Fracture strength and fatigue resistance of all-ceramic molar crowns manufactured with CAD/CAM technology. *J Prosthodont* 2008;17:370-377.

## 치과수복용 CAD/CAM 세라믹/고분자 블록의 기계적 물성

구승원<sup>1</sup>, 박종환<sup>1</sup>, 고영무<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>조선대학교 치의학전문대학원 치과재료학교실,

<sup>2</sup>조선대학교 노인구강질환제어연구센터

CAD/CAM 기술은 1980년대에 치과에 도입되어, 다양한 시스템이 현재 널리 사용되고 있다. CAD/CAM은 단시간에 우수한 품질의 수복물을 제작하여 환자의 만족도를 높일 수 있을 뿐 아니라, 노동력을 절감하여 비용의 효율성을 높일 수 있고, 기공 작업 중에 발생할 수 있는 실수 및 감염 가능성도 줄일 수 있다. 수복 후에 예기치 않은 문제가 발생할 경우에도 파일이 컴퓨터에 저장되어 있기 때문에 신속 정확하게 다시 만들 수도 있다. 또한 기공 작업에서는 사용하기 어려웠던 새로운 재료를 CAD/CAM에서는 용이하게 사용할 수 있어서 수복물의 물성을 향상시킬 수 있다. 이상적인 치과 수복을 위해서는 손상된 치아를 구조와 물성이 자연치와 유사한 재료로 대체하는 것이 바람직하며, 심미에 대한 관심이 높아지고, 아말감과 같은 금속 수복물의 건강과 환경에 대한 환자들의 관심이 연계되면서 금속 수복물의 수요는 줄어들고, 세라믹 수복물이 증가하고 추세이다. 세라믹은 생체 친화성이 우수할 뿐 아니라, 화학적 내구성과 색조 안전성이 좋고, 자연치와 유사한 색조를 띠는 특징이 있어서 이미 오래전부터 치과 수복재료로 사용되어 왔으나, 취성이 있어서 깨지기 쉽고, 경도가 높아서 대합치의 마모가 심해서 교합의 불균형을 유발하며, CAD/CAM 가공시 chipping이 발생하기 쉽다는 것이 한계로 지적되고 있다. 본 논문에서는 치과용 CAD/CAM 세라믹/고분자 블록 상용 제품인 Polyglass(베리콤, 한국)와 Enamic(Vita, 독일)의 기계적 물성에 관하여 연구하였다. 주사전자현미경으로 관찰하여 Polyglass는 레진 matrix에 세라믹 필러가 분산된 구조이고, Enamic은 세라믹 matrix의 기공에 레진이 침투된 구조임을 확인하였다. 기계적 하중에 의한 응력-변형 거동은 직선적으로 증가하다가 파괴되는 전형적인 세라믹의 거동을 나타내었다. 굴곡강도는 Polyglass ( $132.30 \pm 7.07$  MPa)가 Enamic ( $113.73 \pm 10.93$  MPa)보다 유의하게 높았고( $p < 0.05$ ), 와이블 계수도 Polyglass가 22.46으로 Enamic의 12.72보다 높았다. 탄성율은 Enamic이 Polyglass보다 약 2배 높고, 경도도 Enamic  $2.18 \pm 0.52$  GPa로 Polyglass ( $0.86 \pm 0.09$  GPa)가 보다 유의하게 높은 값을 나타내었으며( $p < 0.05$ ), Polyglass의 경도가 자연치의 상아질과 유사한 수준이었다. 압입 균열법으로 측정된 파괴인성은 Polyglass가  $1.47 \pm 0.73$  MPa $\sqrt{m}$ 로 Enamic의  $1.21 \pm 0.51$  MPa $\sqrt{m}$ 보다 높았으나, 유의차는 없었다( $p > 0.05$ ). 결론적으로 굴곡강도, 와이블 계수, 파괴인성은 Polyglass가 높은 값을 나타낸 반면, 탄성율과 경도는 Enamic이 높은 값을 나타내서 고분자 매트릭스 구조인 Polyglass가 강도와 파괴인성에 유리하다는 것을 알 수 있었으나, Polyglass와 Enamic에 사용된 세라믹과 고분자의 성분이 다를 뿐 아니라, 함량과 크기도 달라서 지속적인 연구가 필요하다고 생각되며, 기계적 물성의 측정 방법을 달리한다면 결과가 달라질 수도 있을 것으로 생각되기 때문에 이에 관해서도 추가적인 연구가 기대된다.

**주제어:** 치과, 심미수복, CAD/CAM 블록, 복합레진, 세라믹, 강도, 와이블 분석, 파괴인성, 경도