지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹의 특성과 임상적용

연세대학교 치과대학 치과보철과학교실
김 종 은, 김 지 환, 심 준 성, 박 영 범

ABSTRACT

Material properties and clinical application of zirconia-reinforced lithium silicate ceramics

Department of Prosthodontics, Yonsei University College of Dentisty
Jong-Eun Kim, Jee-Hwan Kim, June-Sung Shim, Young-Bum Park

The zirconia-reinforced lithium silicate ceramic material is a material in which lithium silicate glass contains about 10% by weight of zirconia oxide (zirconia oxide). This material has both the advantages of glass ceramics and zirconia, and it is attracting attention as a CADCAM material for single tooth restoration.

ZLS materials have improved strength compared to widely used e.max (lithium disilicate ceramic) materials. It can be used for single crown restoration and ensuring a thickness of 1.5 mm is very important for reliable treatment. In the case of Celtra Duo, heat treatment may be helpful in terms of strength and abrasion resistance. Hydrofluoric acid treatment is helpful for bonding and hydrofluoric acid for a short time may not help to improve the bonding strength.

Although zirconia-reinforced lithium silicate ceramic materials have been continuously conducted and published in the laboratory, reliable clinical studies are still lacking. Additional clinical studies will be a very important part of establishing a scientific basis.

Key words : zirconia reinforced lithium silicate, vita suprinity, celtra, CAD/CAM, digital technologies

Corresponding Author
박영범
주소 : 서울특별시 서대문구 신촌로 50-1
연세대학교 치과대학병원 치과보철과, 03722
Tel : 02-2228-3164, Fax : 02-312-3598, E-mail address : drybpark@yuhs.ac

Ⅰ. 서론

최근 몇 년 동안, 다양한 CAD/CAM 가공 세라믹 재료들이 개발되어 왔으며, 보철 수복을 통한 환자와 임상가의 심미적 필요를 충족시키는데에 많은 도움을 주었다[1]. 이런 지속적인 발전은 세라믹 재료의 물성 개선을 통해 이루어졌으며, 광학적 특성의 개선을 통한 심미적인 향상, 생체적합성, 마모저항성, 화학적

안정성 등의 개선이 이루어졌다[2].

메탈 대신에 코어 재료로써의 지르코니아의 활용이 최근에 높아지게 되었다[3]. 그러나 단일크라운의 수복이나 multi-unit 수복물을 위한 지르코니아 코핑은 심미적인 만족도를 얻기 위해 여전히 포세린의 비니어 과정이 필요한게 현실이다[4]. 최근에 많은 이슈가 되고 있는 것이 비니어링 세라믹의 chipping/delamin ation 이며 가장 흔한 빈도로 나타나는 complication 이다[4]. 지르코니아 코어와 veneering ceramic은 이종의 재료이며 화학적 결합의 문제, 기계적 결합, 열팽창계수의 불일치에 따른 계면응력 등이 이런 complication의 발생에 기여한다고 알려진 요소들이다[3].

이후, 단일 글래스 세라믹 재료가 개발되어 veneering을 따로 하지 않고도 심미적으로 개선된 결과를 얻어내고 있다[5]. 이런 재료는 하나의 단일한 조성으로 이루어져 있어, 구조적으로 안정적이면서, 따로 비니어링 세라믹을 필요로 하지 않고, 접착계면도 존재하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 글래스 세라믹의 기계적인 강도가 상대적으로 지르코니아에 비해 약한 것이 지적할 수 있는 단점이라 할 수 있다[5].

단일 글래스 세라믹 재료 중에 가장 널리 사용되고 알려진 것이 리튬디실리케이트(Lithium Disilicate) 세라믹이다[6]. 리튬디실리케이트 수복물은 열가압 방식 혹은 캐드캠 방식으로 제작이 가능하다[7, 8]. 투명도가 높은 장점을 통하여 리튬디실리케이트는 자연치의 색조와 유사한 결과를 얻을 수 있었다[9]. 밀링이 가능한 리튬디실리케이트 블록은 metasilicate phase로 구성되어 있어 파란색 빛을 띄고 있다. 밀링이 완료되고 나면 해당 재료를 결정화시키는 과정을 통하여 최종적인 리튬디실리케이트 수복물을 완성할 수 있다[10]. 그러나 아직까지 장기간 사용한 임상연구의 데이터가 부족하다[11].

최근에는, 새로운 분류의 polymer-infiltrated ceramic network, resin nano ceramic, 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹 등도 단일 치아 수복을 위한 캐드캠 재료로 각광 받고 있다. 그 중 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 글래스 세라믹(Zirconia reinforced lithium silicate, ZLS)은 지르코니아가 함유되어 있으며, 제조사에서는 새롭게 개발된 차세대 글래스 세라믹으로 지르코니아 및 글래스 세라믹의 장점을 모두 가지고 있는 재료로 언급하고 있다. 지르코니아 입자는 크랙을 방해하여 세라믹을 강화시키는 역할을 한다[12]. 결정화 과정을 거치고 나면 물리적으로도 향상된 물성을 가지면서도 심미적으로 우수한 결과물을 얻을 수 있다. 다양한 색조를 가지고 있으며, 투명도 역시 우수하므로 단일 재료로 수복물을 제작할 수 있다[12].

본 리뷰의 목적은 최근에 개발되어 사용되고 있는 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 글래스 세라믹을 소개하고, 최근 발표된 관련 연구의 리뷰를 통하여 전반적인 재료의 특성과 임상적 적용 가능성을 소개하고자 하는 것이다.

Ⅱ. 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹의 특성과 임상적용

1. 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹의 종류와 재료의 조성

지르코니아 강화 리튬실리케이트 세라믹은 2가지 대표적인 재료로 시장에 나와있다. Vita suprinity (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Germany)와 Celtra duo(Dentsply sirona, Milford, DE, USA)는 대표적 재료로, 자세히 구성을 살펴보면 거의 유사한 재료로 볼 수 있다. 두 재료 모두 독일의 프라운호퍼 연구소 실리케이트 연구 그룹과의 합작으로 제작되었다는 것에서도 추정해 볼 수 있다[13]. 리튬 실리케이트 글래스에 산화 지르코니아(Zirconia Oxide)가 무게비로 10% 가량 포함되어 있으며 diphosphorus pentoxide(P_2O_5) 를 리튬 메타실리케이트의 결정화를 위한 핵제(nucleating agent)로 포함하고 있다[13]. 핵제란 폴리머의 결정화 속도를

촉진시키고 결정의 크기를 미세화 시켜서 수복물의 투명성을 향상시키고, 기계적 물성을 높이기 위한 첨가제 이다. Vita suprinity의 경우 제조사에서 pre-crystallized 상태로 재료를 제공하고 있으며 블록 재료가 매우 투명한 특징을 가지고 있다. 수복물의 밀링 과정을 진행한 후 결정화 과정을 거치게 되면 원하는 치아의 색조가 구현된다. Celtra Duo의 경우에는 결정화 전 재료인 Celtra CAD와 완전히 결정화 된 재료인 Celtra Duo로 나누어 시판하고 있다[14].

2. 기계적 특성

세라믹 재료의 강도 평가는 수복물의 수명을 예측하는데에 매우 중요하다. 새로운 세라믹 재료가 다양한 임상 케이스에서 사용되려면, 기존에 나와 널리 사용되고있는 수복물 재료를 평가한 데이터와의 적절한 비교가 필요하다. 임상에서 사용되기 전에 실험실 연구를 통해 데이터가 제안되어야 하기 때문에 다양한 실험실 연구 데이터가 소개되어 있다.

Celtra Duo는 열처리(Firing)를 옵션으로 수행하도록 제조사에서는 제안하고 있다. 재료가 이미 결정화 된 상태로 제공되기 때문에 열처리가 필수가 아니지만, 밀링만 시행하여 완성한 경우보다 열처리를 시행하는 경우에는 굴곡강도가 더욱 높아지는 것으로 알려져 있다[16, 17]. 처리 이전과 이후의 SEM 사진을 비교해 보면 미세 결정구조에 차이를 보이지 않는데, 이는 열처리를 통하여 추가적인 결정화가 일어나는 것은 아니라는 것을 확인할 수 있게 해준다. 그럼에도 불구하고 강도가 개선되는 것은 밀링과정에서 발생한 defect가 열처리 과정을 통하여 메워지는 등의 healing 과정이 일어나기 때문인 것으로 생각된다. 이전의 세라믹 연구에서도 열처리를 통한 defect 부위의 bridging 현상에 대해 보고된바 있다[17, 18]. E.max로 대표되는 리튬디실리케이트(Lithium disilicate) 재료의 경우에도 열처리를 통한 강도 개선이 보고된바 있다[19]. 결정화를 위한 firing 과정은

그림 1. 현재 시장에 나와있는 2종류의 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹. A) Vita Suprinity. B) Celtra Duo

표 1. 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹의 제조회사, 적응증 및 특성

재료명	제조사	분류[14]	임상 적응증[14]	Young's modulus[15]	Poisson's Ratio[15]
Celtra Duo	Dentsply DeTrey	완전 소결 리튬 실리케이트 / 포스페이트 글래스 세라믹	비니어, 인레이, 온레이, 전치부 및 구치부 크라운	107.9	0.222
Vita Suprinity	VITA Zahnfabrik	미소결 리튬 실리케이트 / 포스페이트 글래스 세라믹	비니어, 인레이, 온레이, 전치부 및 구치부 크라운	104.9	0.208

보철물의 적합도에는 영향을 주지 않았다[20]. Firing 전후를 비교하였을 때 크라운의 체적변화로 인한 marginal gap 및 internal fit 이 유의한 차이를 보이지 않았다. 이상으로 볼 때 Celtra Duo 를 수복재료로 사용할 때에는 적합도에 대한 염려없이, 강도의 개선을 위하여 firing 과정을 수행하는 것이 도움이 될 것이다.

Elsaka 등의 연구에서는 지르코니아 강화 리튬실리케이트가 리튬디실리케이트에 비하여 굴곡강도가 더욱 개선되었음을 보고한바 있다[12]. 이 연구의 결과는 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹에 함유되어 있는 지르코니아 필러가, 글래스 매트릭스에 단순하게 분산되어 있는 수준을 넘어서서 강도 개선의 역할을 함을 의미하는 것이다.

재료의 두께도 매우 중요한 요소이다. Zimmermann 등의 연구에서는 Celtra Duo 및 Vita Suprinity 재료로 다양한 두께의 크라운을 제작하여 파절강도를 평가한바 있다[21]. 1.5mm 의 두께로 수복물을 제작하였을 때는 밀링만 수행한 Celtra Duo, 열처리를 수행한 Celtra Duo, Vita Suprinity 모두 700N 이상의 파절강도를 보였으나, 1.0mm 두께로 제작하였을 때에는 533.6-615.0 N 정도의 파절강도를 보였다. 0.5mm 정도로 얇은 디자인을 하였을 때에는 실패율이 매우 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 임상적으로는 1.5mm 두께를 확보하는 것이 적절하다고 할 수 있다.

3. 광학적 특성

단일 조성의 크라운을 제작할 때에 보철물의 두께는 매우 중요하다. 특히 광학적 특성에 있어서는 얇은 두께의 수복물의 경우 치아의 자체 변색이 있는 경우 색조를 가리지 못할 수 있으며, 수복물 자체의 색조변화 저항성도 약화될 수 있다. 지르코니아 강화 리튬실리케이트의 경우에 0.5mm 두께로 제작된 수복물의 경우 임상적으로 영향을 줄 정도의 유의한 색조변화가 관찰되었음이 보고된바 있다[22].

재료의 투명도는 지르코니아 보다는 좋으나, 리튬디실리케이트 보다는 낮은 것으로 보고되어 있다. 리튬디실리케이트는 크리스탈 구조의 입자가 크고, 비율이 높음으로 인하여 가장 높은 투명도를 보이는 것으로 알려져 있으며[14], 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹의 경우, 지르코니아 입자가 포함되어 있어 2가지 다른 입자의 구조가 함께 있기 때문에 상대적으로 투명도가 부족한 것으로 알려져 있다[23]. 그러나 지르코니아의 투명도에 비해서는 매우 자연스러운 색조를 구현할 수 있기 때문에 매우 유용하게 사용될 수 있는 재료이다.

4. 마모 특성 및 경도

Celtra Duo의 경우, 열처리를 거친 재료가 밀링만 진행한 재료에 비하여 대합치의 마모를 덜 유발하는 것으로 알려져 있다[17]. 이는 열처리를 통해 세라믹 재료의 강도가 개선되면, 수복물 자체가 마모되어 표면의 거칠기가 유발되는 것을 최소화 할 수 있기 때문에 대합치의 마모 유발도 적어지는 것이다[16]. 같은 맥락에서 대합치의 마모를 적게 유발하기 위해서는 수복물 표면을 매끈하게 폴리싱 해주는 것이 매우 중요하다[24].

Celtra Duo의 경우, composite 레진에 비하여 경도가 높다. 경도가 높은 재료의 경우 밀링이 용이하다는 장점이 있는 반면에, 상대적으로 마진 chipping의 위험성은 증가할 수 있으므로 얇은 마진의 형성은 권장되지 않으며, 피하는 것이 좋겠다[25].

재료 자체의 마모를 비교한 연구에서는 밀링만 한 경우와 열처리까지 수행한 경우에 통계적으로 유의한 차이는 없었으나, 마모의 깊이 및 부피에서는 열처리를 시행한 지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹의 경우가 치아의 법랑질 및 금합금과 유사한 결과를 보여주었다[16]. 반면, 밀링만 시행한 경우에는 법랑질 및 금합급에 비하여 마모 저항성이 현저히 감소하는 결과를 보였다. 이런 결과로 볼 때 열처리 과정이 재료의

마모 저항성을 높이는 데에도 기여할 수 있음을 확인할 수 있다[16].

지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹 재료의 경우, 환자의 체크 내원시에 표면의 거칠기를 지속적으로 확인해 주는 것이 중요하다. 표면이 거칠어 질수록 대합치의 마모를 많이 유발하게 되는데, 구강 내에서 기능을 하면서 표면의 거칠기가 증가할 가능성이 높기 때문이다[26]. 그러므로 수복물을 최종적으로 delivery 하는 과정에서 fine한 표면을 얻을 수 있도록 정성스럽게 폴리싱 하는 과정도 매우 중요한 과정이다. 또한 잦은 구강 내 교합조정은 유해한 영향을 미칠 수 있다. 구강 내에서 오랫동안 사용되면서 생기는 표면의 거칠기에 비하여 더 많은 영향을 준다. 그래서 교합조정 이후의 폴리싱도 매우 중요하다.

5. 재료의 접착과정 및 표면처리

일반적인 글래스 세라믹은 낮은 강도를 보이기 때문에, 기계적 강도를 높이기 위하여 adhesive luting을 이용한 접착과정이 필수적이다[27]. 반면 지르코니아와 높은 강도의 리튬디실리케이트는 일반적인 luting 접착도 가능하다. 게다가 self-adhesive resin cement 는 과정이 간단하기 때문에 여러 단계를 거치는 adhesive system에 비하여 시간을 절약할 수 있고 덜 테크닉 sensitive 하다[28]. 실험실 연구에서는 리튬디실리케이트의 접착 과정이 파절강도에 유의하게 차이를 보이지 않았다는 결과가 보고된바 있다[28]. 따라서 리튬디실리케이트의 경우 adhesive cement나 conventional 한 cementation 이 유의한 차이가 없다. 누적생존율에서는 5년간 97%을 보였으며[29], 9년 기간동안 87%를 보였다[30].

지르코니아 강화 리튬실리케이트의 접착도 큰 어려움이 없이 진행 가능하다. 지르코니아 강화 리튬실리케이트 재료로 제작한 크라운도 adhesive luting 과정이 반드시 필요하지 않으며, GI, resin, resin-modified cement가 모두 적용가능하다.

지르코니아 강화 리튬실리케이트 수복물의 접착을 위한 불산 적용에 관한 연구가 있었다. 지르코니아 주변으로 글래스 matrix가 존재하므로 불산 에칭이 가능하며, matrix 가 선택적으로 용해되고 지르코니아 크리스탈이 노출되는 것을 확인할 수 있다[31]. 에칭 시간의 차이는 표면 패턴의 차이를 유발한다. 다양한 깊이와 너비의 defect를 생성할 수 있다[32]. 10% 불산을 30초만 적용하였을 때에는 표면의 불규칙성이 유발되기는 하였으나 cement가 그 gap을 메우기는 어려울 정도의 dimension을 보였으며, 에칭의 시간이 길어지면서 표면이 더욱 일관성 있는 형태가 되었다31. Lithium silicate와 zirconia 입자들이 노출되면서 더욱 resin cement가 침투하기 쉬운 환경이 되었다. 90초 정도의 불산을 적용하는 것이 cementation을 더욱 견고하게 하면서, fatigue strength도 증가하는 것을 확인할 수 있었다[33].

또한 ZLS의 접착에서는 silanization이 중요하다. 장기간의 안정적인 접착을 위하여 매우 중요한 과정이며, 불산 에칭을 통해 만들어진 표면에 접착력을 향상시키기 위해서는 실란의 적용이 필수적이다[34]. 실란이 적용되어야 세라믹과 레진 시멘트 사이에 화학적인 결합이 가능하며, 같은 의미에서 실란을 함유하고 있는 universal adhesive 를 사용하는 것도 재료 사이의 화학적인 결합을 도모하는데에 도움이 된다[35].

Sato 등의 연구에서는 ZLS 재료에 대한 다양한 표면처리를 통해 전단결합강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다[32]. 불산 에칭이나 알루미나 파티클 샌드블라스트, 실리카가 포함된 샌드블라스트 과정이 모두 효과적으로 표면거칠기를 증가시켜 주었다. 그러나 thermocycling aging 과정을 거친 후에는 실리카 입자가 함유된 샌드블라스트 과정은 접착력이 현저하게 떨어진다고 보고하였다.

6. Polishing 및 finishing

ZLS 재료에 대한 폴리싱 방식을 테스트한 연구에

서는 30초 폴리싱을 시행한 그룹보다, 폴리싱과 finishing 과정을 60초 시행하고, glazing paste를 사용하는 것이 가장 효과적인 폴리싱 방법이었다[36]. 이 경우에 표면 거칠기가 가장 낮았다. 30초 폴리싱을 시행한 그룹에서는 약간의 불규칙한 표면이 남아있음이 확인되었다. 또한 e.max CAD에 비하여 VS가 더욱 표면의 폴리싱이 용이하고 표면광택이 우수함을 확인하였다[36]. 일반적으로 폴리싱의 기구보다 폴리싱 시간이 더욱 표면의 부드러움이나 광택에 영향을 주는 것으로 알려져 있다[37]. 리튬디실리케이트보다 ZLS의 표면이 더욱 부드러운 결과를 얻게 된 것은, LD의 크리스탈 입자는 1.5um 이며, ZLS의 입자는 0.5um 이라서, 표면의 폴리싱 과정을 통해 제거될 수 있는 세라믹 크리스탈의 입자가 표면의 특성에 영향을 주기 때문이다[38]. 그래서 입자가 작은 ZLS의 표면이 더욱 매끈한 것이다. 또한 산화지르코니아 성분이 표면의 효과적인 폴리싱을 도와주는 것으로 알려져 있으며[39], ZLS의 경우에 10% 무게비의 지르코니아를 함유하고 있어 폴리싱에 도움이 될 것으로 생각된다.

7. 임상연구 데이터

지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹 재료를 사용한 임상연구는 현재 거의 소개된 바 없으며, 해외학술지 중에서는 Quintessence international 저널에 2017년에 소개된 1년 추적 예비 임상연구가 있다. 구강 내 스캐너(CEREC Omnicam)를 이용하여 데이터를 취득하였으며, 67개의 보철물을 수복하고 12개월을 추적하였다. 그중 32개의 수복물은 Celtra Duo 재료를 밀링한 후 폴리싱만 수행하였으며, 28개의 수복물은 열처리까지 수행하였다. 12개월이 지난 후 수복물의 성공률은 96.7%로 보고되었다. 2개의 수복물은 파절로 실패하였으며, 실패율은 3.3% 였다. 폴리싱만 한 그룹과 열처리를 한 그룹간의 성공율이나, 평가요소에서의 차이는 존재하지 않았다.

Ⅲ. 요약

지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹 재료는, 현재 널리 사용되고 있는 e.max(리튬디실리케이트 세라믹) 재료에 비하여 더 개선된 강도를 지니고 있다. 단일 크라운의 수복에 사용될 수 있으며, 1.5mm 의 두께를 확보하는 것이 예지성 있는 치료를 위해 매우 중요하다. Celtra Duo의 경우 열처리를 수행하는 것이 강도나 마모 저항성 측면에서 도움이 될 것이다. 접착을 위해서는 불산의 처리가 도움이 되며, 너무 짧은 시간의 불산은 접착 강도의 개선에 도움을 주지 못할 수 있으므로 충분한 시간의 불산 처리가 필요하다.

지르코니아 강화 리튬 실리케이트 세라믹 재료는 실험실 연구가 지속적으로 수행되고 출판되고 있지만, 아직 신뢰할만한 임상연구는 매우 부족한 실정이다. 추가적인 임상연구를 통해 과학적인 근거를 마련하는 것이 매우 중요한 부분이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. Coldea A, Swain MV, Thiel N. Mechanical properties of polymer-infiltrated-ceramic-network materials. Dent Mater 2013;29(4):419-26.
2. Salazar Marocho SM, Studart AR, Bottino MA, Bona AD. Mechanical strength and subcritical crack growth under wet cyclic loading of glass-infiltrated dental ceramics. Dent Mater 2010;26(5):483-90.
3. Thompson JY, Stoner BR, Piascik JR, Smith R. Adhesion/cementation to zirconia and other non-silicate ceramics: where are we now? Dent Mater 2011;27(1):71-82.
4. Ferrari M, Vichi A, Zarone F. Zirconia abutments and restorations: from laboratory to clinical investigations. Dent Mater 2015;31(3):e63-76.
5. Culp L, McLaren EA. Lithium disilicate: the restorative material of multiple options. Compend Contin Educ Dent 2010;31(9):716-20, 22, 24-5.
6. Kelly JR, Benetti P. Ceramic materials in dentistry: historical evolution and current practice. Aust Dent J 2011;56 Suppl 1:84-96.
7. Fasbinder DJ. Materials for chairside CAD/CAM restorations. Compend Contin Educ Dent 2010;31(9):702-4, 06, 08-9.
8. Giordano R. Materials for chairside CAD/CAM-produced restorations. J Am Dent Assoc 2006;137 Suppl:14S-21S.
9. Fasbinder DJ, Dennison JB, Heys D, Neiva G. A clinical evaluation of chairside lithium disilicate CAD/CAM crowns: a two-year report. J Am Dent Assoc 2010;141 Suppl 2:10S-4S.
10. Wiedhahn K. From blue to white: new high-strength material for Cerec--IPS e.max CAD LT. Int J Comput Dent 2007;10(1):79-91.
11. Pieger S, Salman A, Bidra AS. Clinical outcomes of lithium disilicate single crowns and partial fixed dental prostheses: a systematic review. J Prosthet Dent 2014;112(1):22-30.
12. Elsaka SE, Elnaghy AM. Mechanical properties of zirconia reinforced lithium silicate glass-ceramic. Dent Mater 2016;32(7):908-14.
13. Belli R, Wendler M, de Ligny D, et al. Chairside CAD/CAM materials. Part 1: Measurement of elastic constants and microstructural characterization. Dental Materials 2017;33(1):84-98.
14. Belli R, Wendler M, de Ligny D, et al. Chairside CAD/CAM materials. Part 1: Measurement of elastic constants and microstructural characterization. Dent Mater 2017;33(1):84-98.
15. Wendler M, Belli R, Petschelt A, et al. Chairside CAD/CAM materials. Part 2: Flexural strength testing. Dent Mater 2017;33(1):99-109.
16. D'Arcangelo C, Vanini L, Rondoni GD, De Angelis F. Wear properties of dental ceramics and porcelains compared with human enamel. J Prosthet Dent 2016;115(3):350-5.
17. Lawson NC, Bansal R, Burgess JO. Wear, strength, modulus and hardness of CAD/CAM restorative materials. Dent Mater 2016;32(11):e275-e83.
18. Denry IL, Holloway JA, Tarr LA. Effect of heat treatment on microcrack healing behavior of a machinable dental ceramic. J Biomed Mater Res 1999;48(6):791-6.
19. Hung CY, Lai YL, Hsieh YL, Chi LY, Lee SY. Effects of simulated clinical grinding and subsequent heat treatment on microcrack healing of a lithium disilicate ceramic. Int J Prosthodont 2008;21(6):496-8.
20. Zimmermann M, Valcanaia A, Neiva G, Mehl A, Fasbinder D. Digital evaluation of the fit of zirconia-reinforced lithium silicate crowns with a new three-dimensional approach. Quintessence Int 2017:9-15.
21. Zimmermann M, Egli G, Zaruba M, Mehl A. Influence of material thickness on fractural strength of CAD/CAM fabricated ceramic crowns. Dent Mater J 2017;36(6):778-83.
22. Subasl MG, Alp G, Johnston WM, Yilmaz B. Effect of thickness on optical properties of monolithic CAD-CAM ceramics. Journal of Dentistry.
23. Ilie N, Hickel R. Correlation between ceramics translucency and polymerization efficiency through ceramics. Dent Mater 2008;24(7):908-14.
24. Lawson NC, Janyavula S, Syklawer S, McLaren EA, Burgess JO. Wear of enamel opposing zirconia and lithium disilicate after adjustment, polishing

참 고 문 헌

and glazing. J Dent 2014;42(12):1586-91.

25. Tsitrou EA, Northeast SE, van Noort R. Brittleness index of machinable dental materials and its relation to the marginal chipping factor. J Dent 2007;35(12):897-902.
26. Fathy SM, Swain MV. In-vitro wear of natural tooth surface opposed with zirconia reinforced lithium silicate glass ceramic after accelerated ageing. Dent Mater 2018.
27. Bindl A, Luthy H, Mormann WH. Strength and fracture pattern of monolithic CAD/CAM-generated posterior crowns. Dent Mater 2006;22(1):29-36.
28. Al-Wahadni AM, Hussey DL, Grey N, Hatamleh MM. Fracture resistance of aluminium oxide and lithium disilicate-based crowns using different luting cements: an in vitro study. J Contemp Dent Pract 2009;10(2):51-8.
29. Gehrt M, Wolfart S, Rafai N, Reich S, Edelhoff D. Clinical results of lithium-disilicate crowns after up to 9 years of service. Clin Oral Investig 2013;17(1):275-84.
30. Toman M, Toksavul S. Clinical evaluation of 121 lithium disilicate all-ceramic crowns up to 9 years. Quintessence Int 2015;46(3):189-97.
31. Ramakrishnaiah R, Alkheraif AA, Divakar DD, Matinlinna JP, Vallittu PK. The Effect of Hydrofluoric Acid Etching Duration on the Surface Micromorphology, Roughness, and Wettability of Dental Ceramics. Int J Mol Sci 2016;17(6).
32. Sato TP, Anami LC, Melo RM, Valandro LF, Bottino MA. Effects of Surface Treatments on the Bond Strength Between Resin Cement and a New Zirconia-reinforced Lithium Silicate Ceramic. Oper Dent 2016;41(3):284-92.
33. Monteiro JB, Oliani MG, Guilardi LF, et al. Fatigue failure load of zirconia-reinforced lithium silicate glass ceramic cemented to a dentin analogue: Effect of etching time and hydrofluoric acid concentration. J Mech Behav Biomed Mater 2018;77:375-82.
34. Sattabanasuk V, Charnchairerk P, Punsukumtana L, Burrow MF. Effects of mechanical and chemical surface treatments on the resin-glass ceramic adhesion properties. J Investig Clin Dent 2017;8(3).
35. Tsujimoto A, Barkmeier WW, Takamizawa T, et al. Interfacial Characteristics and Bond Durability of Universal Adhesive to Various Substrates. Oper Dent 2017;42(2):E59-E70.
36. Vichi A, Fonzar RF, Goracci C, Carrabba M, Ferrari M. Effect of Finishing and Polishing on Roughness and Gloss of Lithium Disilicate and Lithium Silicate Zirconia Reinforced Glass Ceramic for CAD/CAM Systems. Oper Dent 2018;43(1):90-100.
37. Heintze SD, Forjanic M, Rousson V. Surface roughness and gloss of dental materials as a function of force and polishing time in vitro. Dent Mater 2006;22(2):146-65.
38. Al-Wahadni AM, Martin DM. An in vitro investigation into the wear effects of glazed, unglazed and refinished dental porcelain on an opposing material. J Oral Rehabil 1999;26(6):538-46.
39. Kou W, Molin M, Sjogren G. Surface roughness of five different dental ceramic core materials after grinding and polishing. J Oral Rehabil 2006;33(2):117-24.