

냉각속도가 지르코니아-도재 수복물의 전장도재 내 잔류응력에 미치는 효과에 관한 문헌고찰

장재승¹ · 김선재^{2*}

연세대학교 ¹용인세브란스병원 치과, ²강남세브란스 치과병원 치과보철과

The effect of cooling rate on the residual stresses in the veneer ceramics of zirconia-ceramic restorations: a literature review

Jea-Seung Chang¹, Sunjai Kim^{2*}

¹Department of Dentistry, Yong-In Severance Hospital, ²Department of Prosthodontics, Gangnam Severance Dental Hospital, College of Dentistry, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

Nowadays, dental zirconia is widely used as a framework material for a fixed dental prosthesis as well as a single restoration. However, clinical studies have reported high incidence of veneer chipping of zirconia-ceramic restorations compared to that of metal-ceramics. Several factors were raised as the possible causes of veneer ceramic chipping, however, it is still in debate. Recently, residual stresses in the veneer ceramics after cooling process gathers attention as one possible cause of chipping and many studies reported that the rate of cooling significantly influenced the types and the amount of residual stress. The purpose of current review was to briefly describe the effect of cooling rate on the residual stress in zirconia-ceramics. It was also described that the different behavior of residual stress between zirconia-ceramics and metal-ceramics following different cooling rate. (*J Korean Acad Prosthodont* 2014;52:136-42)

Key words: Zirconia, Veneer ceramic; Chipping; Residual stress; Cooling rate

보다 자연스럽고 아름다운 수복물에 대한 환자 및 치과의사의 요구도가 크게 증가하면서, 금속을 포함하지 않는 완전도재관이 단일 치아는 물론 고정성국소의치에까지 적용되고 있다.^{1,2} 금속-도재관과 비교해 완전도재관은 재료 자체의 투명도가 높아 보다 자연치아와 유사한 색조를 재현할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있으나, 금속 코어보다 낮은 물리적 특성으로 인해 그 적용범위에 있어 특별한 고려가 필요하다.

치과용 세라믹의 분류법은 그 기준에 따라 여러 가지가 있을 수 있으나 한가지 쉬운 분류법은 세라믹 구성성분의 특징에 따라 (1) predominantly glass materials, (2) particle filled glasses, (3) poly-

crystalline ceramic으로 구분하는 것이며,³ 이 중 polycrystalline ceramic은 치과용 캐드캠(computer aided design / computer aided manufacturing; CAD/CAM)의 발달과 함께 그 사용이 크게 증가하고 있는 추세이다.¹ 최근 가장 많이 이용되는 yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal (Y-TZP)는, 전치부 뿐 아니라 구치부 고정성국소의치의 코어재료로 3년 이상의 임상연구에서도 높은 생존율을 보이고 있다.^{4,6} 그러나 문헌고찰에 따르면 Y-TZP를 코어재료로 이용하여 수복한 완전도재 고정성국소의치는 코어의 파절빈도는 매우 낮으나 코어에 축성되는 전장도재의 높은 chipping 빈도로 인해 금속-도재 고정성국소의치보다 낮은 성공율

*Corresponding Author: Sunjai Kim

Department of Prosthodontics, College of Dentistry, Yonsei University
211 Eonju-ro Gangnam Severance Dental Hospital, Gangnam-gu, Seoul, 135-720, Republic of Korea

+82 2 2019 3568, e-mail, sunjai@yuhs.ac

Article history: Received March 14, 2014 / Last Revision April 10, 2014 / Accepted April 15, 2014

* 본 연구는 연세대학교 치과대학 2013년도 교수연구비에 의하여 이루어졌음(6-2013-0078).

© 2014 The Korean Academy of Prosthodontics

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 보인다고 발표된 바 있다.⁷ 현재까지 발표된 많은 임상연구에서 Y-TZP 코어를 이용한 완전도재 고정성국소의치는 낮게는 6.25%에서 많게는 28.8%까지의 chipping 빈도를 보이고 있다.^{5,8-10} Koenig 등¹¹은 147개의 지르코니아-도재 수복물을 최장 9년까지 관찰한 임상연구에서 지르코니아-도재 수복물이 실패하는 가장 큰 원인은 전장도재의 chipping이라고 보고하였다.

금속-도재 수복물과 비교하여 지르코니아-도재 수복물에서 전장도재의 파절이 높게 나타나는 원인을 규명하기 위해서 많은 실험연구가 진행되었다. 현재까지는 교합조정 후 잔존하는 표면의 결함,¹² 지르코니아 코어와 전장도재 간 약한 결합강도,^{13,14} 지르코니아 코어와 전장도재 간 부적절한 열팽창 계수 차이에서 기인하는 전장도재 내 잔류응력,¹⁵ 전장도재를 적절하게 지지하지 못하는 형태의 코어구조^{16,17} 등이 원인이라고 알려져 있다. 최근에는 전장도재 축성 후 냉각속도가 잔류응력에 영향을 미치는 중요한 요소임을 뒷받침하는 여러 실험논문들이 발표되고 있다.^{18,20} 본 고찰의 목적은 지르코니아-도재 수복물에서 도재 chipping의 원인 중 하나로 알려진 전장도재 내 잔류응력이란 무엇이며, 냉각속도가 잔류응력의 종류와 크기에 영향을 미치는 다양한 요소들이 무엇인지 알아보는 것이다.

1. 잔류응력이란?

지르코니아-도재 수복물의 제작 후 전장도재 내에 잔존하는 잔류응력이 어떻게 지르코니아-도재 수복물의 chipping 빈도에 영향을 미치는가 하는 점을 이해하기 위해서는 먼저 어떤 기전을 통해 잔류응력이 도재 내에 유발되는지를 이해해야 한다. 어떤 고체에 일정한 응력을 가하면, 가해진 응력을 제거한 후에도 고체내에 일정량의 응력이 잔존하는데 이것을 잔류응력(residual stress)이라고 한다. 전장도재는 소성 후 고온에서는 점탄성상(viscoelastic phase)으로 존재하나 냉각과정 동안 온도가 유리전이온도(glass transition temperature; Tg)를 지나면 고체상(solid phase)로 변화한다. 이 과정에서 다음의 2가지 기전에 의해 잔류응력이 유발된다.

첫번째 기전은 유리전이온도보다 낮은 온도에서 코어와 전장도재 두 재료간 열팽창계수 차이(coefficient of thermal expansion mismatch; CTE mismatch)에 의해 유발되는 잔류응력이다. 전장도재를 소성 후, 유리전이온도에서 상온에 도달하는 동안의 온도변화는 지르코니아 코어와 전장도재 간 열팽창계수의 차이로 인해 발생하는 열응력(thermal stress)에 가장 큰 영향을 미친다. 전장도재의 열팽창계수가 코어의 그것보다 높던 낮던 간에 코어와 전장도재 간 열팽창계수 차이가 10% 이상인 경우에는 실험적으로 파절이 유발되는 것으로 보고된 바 있다.²¹ 전장도재가 코어보다 열팽창계수가 현저히 크다면 도재 내에 주로 인장응력이 발생하기 때문에 도재 표면에서 crack이 발생하게 되며, 반대로 코어가 전장도재보다 열팽창계수가 현저히 큰 경우에는 냉각과정 동안에 박리(delamination)가 유발될 수 있다.

동일한 물질이라고 할지라도 온도 변화에 따라 열팽창계수

는 상이한 결과를 나타내는데, 이러한 이유로 전장도재를 소성 후 냉각하는 과정에서 발생하는 전장도재의 표면과 내부의 온도차이는 전장도재 내에 잔류응력을 유발한다. 전장도재가 고온에서 소성된 후 실온으로 온도가 감소하는 과정 중, 외기에 노출된 전장도재의 표면은 내부에 비해 상대적으로 빠르게 온도가 감소하기 때문에 전장도재 표면온도와 내부온도 사이에 차이가 발생하고 온도차이에 따라 열팽창계수도 달라지므로, 유리전이온도 전후에서 전장도재의 표면과 내부 사이에 열팽창계수 차이 효과가 발생하고 결과적으로 전장도재 내에 잔류응력이 발생한다.²²

2. 잔류응력을 측정하는 방법

현재까지 발표된 많은 연구들이 수학적인 계산이나 유한요소분석을 통해 잔류응력의 양을 측정하고자 하였다.^{23,25} DeHoff 등은 유한요소분석을 통해 지르코니아 코어와 전장도재 간 열팽창계수 차이를 이용하여 잔류응력의 크기를 계산하였고,²⁶ Swain²⁷은 코어와 전장도재의 두께 비율에 차이를 둔 모형상에서 수학적으로 코어와 전장도재 내에 발생하는 잔류응력을 비교하였다. 이 외에 전장도재 내 잔류응력의 양을 실험적으로 측정할 수 있는 방법에는 X ray diffraction technique, Vickers indentation technique, stress birefringence measurement, strain measurement by hole drilling 등이 있으나 각각의 방법마다 어느 정도의 한계성을 가진다.

Vickers indentation technique은 Marshall과 Lawn이 취성(brittle) 물질의 표면 잔류응력을 측정하기 위해 고안한 방법이다.²⁷ Diamond indenter를 이용하여 코어와 전장도재 같이 두가지 이상의 상이한 성분으로 구성된 stressed specimen (bilayered ceramic)과 unstressed specimen (monolithic)의 표면에 피라미드형태의 indentation을 형성한 후, 형성된 crack의 길이를 비교하여 표면 잔류응력의 양을 산출하는 원리이다. 아래 그림에서 왼쪽은 unstressed specimen이며 오른쪽은 stressed specimen이다. unstressed specimen의 경우는 피라미드 형태의 indentation에서 기시하는 네 방향 crack의 길이가 모두 같은데 비해 stressed specimen의 경우는 수평 방향 crack의 길이가 수직방향 crack의 길이보다 길다. 이러한 길이의 차이를 이용해 표면에 잔존하는 잔류응력의 양을 수학적으로 산출하는 것이 가능하다. 이 방법은 작고 불규칙한 형태를 가지는 치과수복물에 적용하기 좋다는 장점을 가지나, 적용을 위해서는 indenter를 적용할 표면이 매우 평활해야 한다는 단점이 있다.

Birefringence (double refraction) measurement는 광학산업분야에서 유리성분 내부에 존재하는 잔류응력의 유무와 그 정도를 측정하는데 흔히 이용되어온 방법이다. Birefringence measurement는 편광이 밀도가 균일하지 않은 투명한 물체를 통과하는 동안에 지연현상이 발생하는 광탄성의 기본원리를 이용한다. 도재내에 응력이 전혀 잔존하지 않는 경우 광학적으로는 등방성의 상태를 보이지만 잔류응력이 존재하는 경우에는 principal

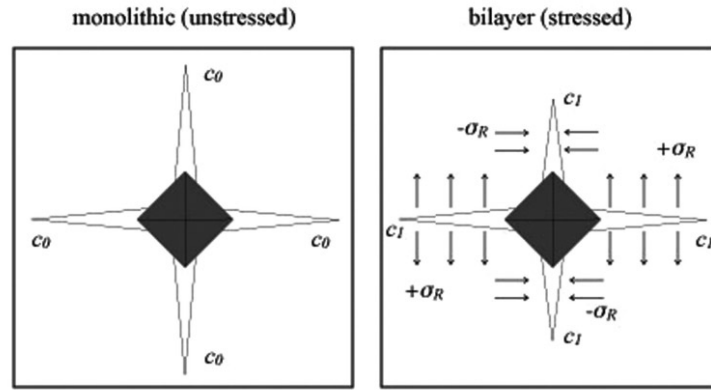


Fig. 1. Schematic representation of indentation mark on unstressed (left) and stressed (right) ceramic surfaces. The length of vertical and horizontal crack lines were identical in unstressed ceramic surface whereas those were different in stressed ceramics.

stress vector에 평행한 방향을 따라 처음 투과된 편광은 2개의 새로운 파장으로 분리되고, 이렇게 형성된 다른 파장 사이에 phase delay가 유발되어 birefringence material 내의 상이한 파장의 속도는 결국 2가지 상이한 정도의 굴절율을 나타낸다. 현대 영상측정장비들은 응력이 공간적으로 분포된 정도나 방향, 정도 등을 자동으로 정밀하게 측정하는 것이 가능하므로 birefringence method를 보다 효과적으로 사용할 수 있게 되었다. 하지만 birefringence measurement와 같은 광탄성기법에 기반한 측정법의 경우는 투명한 물질에만 적용이 가능하다는 한계성을 가진다.²⁸

Hole drilling technique 역시 산업영역에서 주로 이용된 방법으로 응력이 존재하고 있는 물질에서 일부분을 제거한 후, 남아있는 부분의 변형정도를 측정하여 응력의 정도를 계산하는 것이 기본 원리이다. 측정하고자 하는 시편의 표면에 strain gauge를 부착한 후 strain gauge에 인접하여 hole을 형성하면 hole 내의 잔류응력이 해소되므로 hole 주위에서는 약간의 변형이 유발된다. 이런 변형의 정도를 strain gauge를 이용하여 측정하면 이 값으로부터 원래의 잔류응력의 양을 계산하는 것이 가능하다. 흔히 hole을 형성할 위치 주위에 여러개의 strain gauge를 부착하여 변형의 정도를 측정하는 방법을 이용한다.²⁹ Hole drilling technique을 이용하는 경우 시편의 표면에서부터 시작하여 0.1 mm 단위로 1.2 mm 깊이까지 측정이 가능하다고 보고되고 있다. Hole drilling technique을 이용한 측정시에는 total stress 양에서 잔류응력의 정도를 구별하기 쉽지 않다는 단점이 있고 또한 매우 technique에 민감한 방법으로 알려져 있다.

3. 지르코니아-도재에서 온도변화와 열팽창계수의 영향

완전도재 수복물은 구성요소의 수에 따라 한가지 도재로만 구성된 단일성분 완전도재(monolithic ceramic)와 구조물을 형성

하는 코어에 전장도재를 축성하여 제작하는 다수 층으로 구성된 완전도재(multilayer ceramic)로 구분할 수 있다. 도재는 연화온도(softening temperature; T_s)에서 유리전이온도로 온도가 변화하는 동안에 분자구조의 재배열과 함께 물성에 큰 변화가 발생한다. 연화온도보다 높은 온도에서는 액체상으로 존재하나 온도가 더 낮아지면 보다 치밀한 구조로 변하면서 밀도가 높아지고 분자구조의 운동성이 제한되기 시작한다. 온도가 계속 감소하여 유리전이온도보다 낮아지면 분자의 운동은 극히 제한된다.¹⁵ 즉, 도재의 냉각과정동안 유리전이온도보다 낮은 온도에서의 열팽창계수는 연화온도보다 높은 온도에서의 열팽창계수보다 훨씬 작은 값을 나타낸다. 반대로 탄성계수는 유리전이온도보다 낮은 온도에서 연화온도보다 높은 온도에 비해 훨씬 큰 값을 나타낸다.¹⁵

유리강화기전(glass tempering procedure)이라고 알려진 과정은 도재를 소성한 후 급속도로 냉각시키는 과정을 통해 도재를 강화시킨다.³⁰ 급속한 냉각과정 중, 도재 내면보다 표면의 온도가 훨씬 빠르게 감소하므로 도재의 표면과 내면의 온도차이로 인해 열응력이 발생한다. 하지만 도재 내부는 아직 액체와 같은 점탄성상으로 존재하므로 발생한 열응력은 모두 상쇄되어 도재 내부에 잔류응력은 존재하지 않는다. 냉각과정이 진행되어 내부 도재의 고체화와 수축이 발생하면 이미 고체화가 일어난 표면은 내면보다 낮은 열팽창계수를 가지므로 도재 내부보다 수축이 작게 발생하고 결국 도재 내부가 수축하는 동안에 표면에는 압축응력, 내부에는 인장응력 형태의 잔류응력을 유발하게 된다. 도재에 외력이 가해질 때 도재가 파절되기 위해서는 표면에 형성된 인장응력을 통과해야 하므로 결과적으로 도재는 강화되는 효과를 가진다.^{15,22}

한가지 성분으로 구성된 단일성분 도재에서는 유리강화과정 중 도재의 양 표면 얇은 층에는 내부 인장응력의 약 2배에 해당하는 압축응력이 발생하여 도재를 강화시키는 효과를 가진다. 이와 달리, 지르코니아-도재 수복물과 같이 두가지 성분

(bilayer ceramic)으로 구성된 경우에는 냉각과정 동안 다음의 이유로 단일성분 도재보다 더 복잡한 양상의 응력이 발생한다. 첫번째는 냉각과정에서 코어와 전장도재의 두가지 물질 중 상대적으로 높은 열전도성을 가지는 구성성분이 상대적으로 낮은 열전도성을 가지는 구성성분보다 빠르게 냉각되기 때문이며, 또다른 원인은 전장도재보다 강한 지르코니아 코어가 냉각과정 동안에 전장도재의 수축에 대해 저항하는 효과를 가지기 때문이다. Bilayer ceramic의 냉각과정에서는 코어와 전장도재 간 열팽창계수의 차이가 중요한 역할을 하며, 현재까지 연구된 결과로는 지르코니아 코어의 열팽창계수가 전장도재의 열팽창계수보다 약간 큰 것이 유리하므로(이것을 positive mismatch라고 하며, 전장도재의 열팽창계수가 큰 경우를 negative mismatch라고 한다) 제조사에서는 지르코니아 코어와 전장도재 간 열팽창계수를 positive mismatch를 가지도록 제조하고 있다.²¹

지르코니아와 전장도재 사이에 positive mismatch가 형성되면 도재 표면을 둘러싸는 방향으로 압축응력이 유발되고, 결과적으로 결함(flaw)의 진행을 차단하여 도재를 강화시키는 효과는 단일성분 도재의 경우와 유사하다. 하지만 단일성분 도재와 달리 지르코니아-도재에서 고려해야 할 점은, 지르코니아 코어와 전장도재 간 열팽창계수의 positive mismatch는 도재의 유리전이온도보다 낮은 온도(흔히 상온)를 기준으로 제조사에서 도재와 코어의 열팽창계수 차이를 조절한다는 점이다. 냉각과정 중 온도가 전장도재의 유리전이온도보다 높은 경우에는 유리전이온도보다 낮은 온도에서와 비교하여 전장도재의 열팽창계수는 196-420% 증가하는 반면,¹⁵ 코어의 경우 전장도재 소성온도 범위 내에서는 열팽창계수가 큰 변화를 보이지 않는다. 그러므로 유리전이온도보다 낮은 온도에서 비록 지르코니아 코어와 전장도재 간 positive mismatch가 형성되었다 하더라도, 유리전이온도보다 높은 온도에서는 전장도재의 열팽창계수가 코어의 열팽창계수보다 큰 negative mismatch가 형성된다.²⁵

4. 냉각속도가 잔류응력에 미치는 영향

Meira 등²⁴은 유한요소모형을 이용하여 지르코니아-도재 간 negative mismatch의 조건하에서 negative mismatch의 크기와 냉각속도의 차이가 잔류응력에 어떤 영향을 주는지 비교하였다. Ts보다 높은 온도에서의 전장도재의 열팽창계수(α_L)와 유리전이온도보다 낮은 온도에서의 열팽창계수(α_S)의 차이($\Delta\alpha = \alpha_L - \alpha_S$)를 다양하게 설정하여 전장도재 내 발생하는 잔류응력의 양과 방향을 비교하였다. 급속냉각 시, 열팽창계수 차이가 작은 경우와 큰 경우가 전혀 다른 응력양상을 초래하였는데, 열팽창계수 차이가 작은 조건에서는 negative mismatch인 경우도 positive mismatch인 경우와 마찬가지로 전장도재 표면에는 압축응력이, 도재 내부에는 약한 인장응력이 형성되어 외부 결함의 진행에 저항하는 잔류응력이 형성되었다. 그러나 열팽창계수 간 차이가 큰 negative mismatch 조건에서는, 전장도재의 표면에 인장응력이 형성되어 교합면에서 기시하는 결함의 진

행을 촉진하는 것을 확인하였다. 이와 달리 서냉 조건에서는 온도가 유리전이온도보다 높은 경우에는 도재는 점성 또는 점탄성 상으로 존재하므로 이론적으로는 냉각과정에서 발생하는 응력은 모두 상쇄되므로, 도재가 액체상 열팽창계수와 고체상 열팽창계수의 차이에 의한 negative mismatch는 발생하지 않으며, 도재 내 발생하는 잔류응력은 유리전이온도보다 낮은 온도에서 코어와 전장도재의 열팽창계수 차이에 의한 영향을 주로 받게된다.

여기서 한가지 고려해야 할 사항은 이런 negative mismatch는 금속-도재 수복물에서도 발생하나 금속-도재 수복물에서는 전장도재의 chipping 빈도가 지르코니아-도재 수복물보다 현저히 낮다는 점이다. 또한 같은 완전도재 수복물인 알루미늄-도재 수복물의 경우 금속-도재 수복물과 비교해 높은 chipping 빈도를 보이지 않는다는 점이다.²² 지르코니아-도재를 금속-도재나 알루미늄-도재와 비교할 때 큰 차이점 중 하나는 지르코니아가 금속-도재용 합금이나 알루미늄보다 열확산도(thermal diffusivity)가 현저히 낮다는 점이다. 금속-도재용 귀금속 합금의 열확산도가 1.1×10^6 정도이며 비귀금속 합금은 약 1.0×10^6 , 알루미늄은 7.1×10^6 인 것에 비해 지르코니아의 열확산도는 0.74×10^6 , 전장도재는 $1.0 - 2.0 \times 10^6$ 라고 보고된 바 있다.²² 즉 코어가 지르코니아인 경우에는 귀금속합금인 경우에 비해 코어를 통해 전장도재가 냉각되는 속도가 현저히 떨어지게 되어 전장도재의 표면과 내부사이 온도차가 더욱 커지는 효과가 나타나 열응력은 증가하여 결과적으로 잔류응력의 정도와 양상이 바뀌는 것이다.²² 반면에 서냉을 하는 경우에는 지르코니아 코어를 통해 전장도재가 천천히 냉각되는 것이 마찬가지로 외기에 노출된 전장도재 표면의 온도 역시 서서히 감소하므로 열응력이 감소하여 결과적으로 단일성분 도재의 강화기전과 유사한 잔류응력의 양상이 나타나는 것이라 할 수 있다.

과거 발표된 여러 실험논문에서 지르코니아-세라믹 수복물에서 도재파절을 방지하기 위해서는 지르코니아 코어의 형태를 해부학적인 형태로 제작하여 지지를 받지 못하는 도재 unsupported ceramic)가 형성되지 않도록 해야 한다고 하였다.^{16,17} Tholey 등은 동일한 형태의 지르코니아-세라믹 수복물에서 0.7 mm의 일정한 두께를 가지는 코어와 1.0-1.3 mm의 해부학적 형태의 코어두께를 갖는 경우로 분류하여 모형을 제작하였다. 전장도재 소성 후 냉각과정에서 전장도재와 지르코니아 코어의 온도를 수복물의 다양한 부위에서 측정한 결과, 수복물의 내측과 외측 표면 간 온도차이는 지르코니아가 더 두꺼운 해부학적 형태의 코어를 가지는 모형에서 더 크다는 것을 확인하였다. 또한 천천히 냉각을 한 경우, 급속도로 냉각을 한 경우보다 수복물 내측과 외측 표면 간 온도차이는 작다고 하였다.²³ 이런 결과가 나온 원인 역시 지르코니아가 매우 낮은 열확산도를 가지기 때문이다. 즉 코어의 두께가 두꺼울수록 열확산은 더욱 감소하므로 해부학적 형태 코어에서 두꺼운 지르코니아와 인접한 부위 전장도재는 천천히 냉각되고 이에 따라 negative mismatch가 더 증가하게 된다. 소성 후 천천히 냉각을 시키는

경우에는 도재 내부와 외부의 온도차이가 급속도로 냉각을 한 경우에 비해 상대적으로 감소하므로 negative mismatch의 효과를 감소시킬 수 있게 된다.²⁴

결언

지르코니아-도재 수복물에서 금속-도재 수복물과 비교하여 높은 빈도로 보고되고 있는 전장도재 cohesive failure (chipping)의 원인요소들 중 최근 많은 연구가 진행되고 있는 냉각속도 차이에 따른 도재 내 잔류응력의 양상에 대해 간단히 살펴보았다. 지르코니아는 열확산도가 매우 낮기 때문에 합금이나 알루미늄 코어를 이용한 수복물에서 도재축성 후 전통적으로 사용된 급속냉각법이 전장도재 내에 인장응력을 증가시켜 파절의 진행에 유리한 양상으로 잔류응력이 형성된다는 것을 실험적으로 확인하였다. 유리전이온도보다 낮은 온도에서는 지르코니아와 전장도재 간 열팽창계수가 positive mismatch의 관계라고 할지라도 유리전이온도보다 높은 온도에서는 negative mismatch가 형성되는 점 또한 파절의 진행을 억제하지 못하는 방향으로 잔류응력을 형성하였다. 향후 전장도재의 chipping을 유발한다고 보고된 다른 요인들과 도재내의 잔류응력의 상호작용에 대한 연구가 추가로 필요하다고 여겨진다.

References

1. Guess PC, Schultheis S, Bonfante EA, Coelho PG, Ferencz JL, Silva NR. All-ceramic systems: laboratory and clinical performance. *Dent Clin North Am* 2011;55:333-52.
2. Christensen RP, Ploeger BJ. A clinical comparison of zirconia, metal and alumina fixed-prosthesis frameworks veneered with layered or pressed ceramic: a three-year report. *J Am Dent Assoc* 2010;141:1317-29.
3. Kelly JR, Benetti P. Ceramic materials in dentistry: historical evolution and current practice. *Aust Dent J* 2011;56:84-96.
4. Molin MK, Karlsson SL. Five-year clinical prospective evaluation of zirconia-based Denzir 3-unit FPDs. *Int J Prosthodont* 2008;21:223-7.
5. Sorrentino R, De Simone G, Tetè S, Russo S, Zarone F. Five-year prospective clinical study of posterior three-unit zirconia-based fixed dental prostheses. *Clin Oral Investig* 2012;16:977-85.
6. Sailer I, Gottnerb J, Kanelb S, Hammerle CH. Randomized controlled clinical trial of zirconia-ceramic and metal-ceramic posterior fixed dental prostheses: a 3-year follow-up. *Int J Prosthodont* 2009;22:553-60.
7. Sailer I, Pjetursson BE, Zwahlen M, Hammerle CH. A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part II: Fixed dental prostheses. *Clin Oral Implants Res* 2007;18:86-96.
8. Rinke S, Gersdorff N, Lange K, Roediger M. Prospective evaluation of zirconia posterior fixed partial dentures: 7-year clinical results. *Int J Prosthodont* 2013;26:164-71.
9. Sax C, Hämmerle CH, Sailer I. 10-year clinical outcomes of fixed dental prostheses with zirconia frameworks. *Int J Comput Dent* 2011;14:183-202.
10. Burke FJ, Crisp RJ, Cowan AJ, Lamb J, Thompson O, Tulloch N. Five-year clinical evaluation of zirconia-based bridges in patients in UK general dental practices. *J Dent* 2013;41:992-9.
11. Koenig V, Vanheusden AJ, Le Goff SO, Mainjot AK. Clinical risk factors related to failures with zirconia-based restorations: an up to 9-year retrospective study. *J Dent* 2013;41:1164-74.
12. Aboushelib MN, Feilzer AJ, Kleverlaan CJ. Bridging the gap between clinical failure and laboratory fracture strength tests using a fractographic approach. *Dent Mater* 2009;25:383-91.
13. Aboushelib MN, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Effect of zirconia type on its bond strength with different veneer ceramics. *J Prosthodont* 2008;17:401-8.
14. Guess PC, Kulis A, Witkowski S, Wolkewitz M, Zhang Y, Strub JR. Shear bond strengths between different zirconia cores and veneering ceramics and their susceptibility to thermocycling. *Dent Mater* 2008;24:1556-67.
15. Göstemeyer G, Jendras M, Dittmer MP, Bach FW, Stiesch M, Kohorst P. Influence of cooling rate on zirconia/veneer interfacial adhesion. *Acta Biomater* 2010;6:4532-8.
16. Guess PC, Bonfante EA, Silva NR, Coelho PG, Thompson VP. Effect of core design and veneering technique on damage and reliability of Y-TZP-supported crowns. *Dent Mater* 2013;29:307-16.
17. Silva NR, Bonfante EA, Rafferty BT, Zavanelli RA, Rekow ED, Thompson VP, Coelho PG. Modified Y-TZP core design improves all-ceramic crown reliability. *J Dent Res* 2011;90:104-8.
18. Guazzato M, Walton TR, Franklin W, Davis G, Bohl C, Klineberg I. Influence of thickness and cooling rate on development of spontaneous cracks in porcelain/zirconia structures. *Aust Dent J* 2010;55:306-10.
19. Mainjot AK, Schajer GS, Vanheusden AJ, Sadoun MJ. Influence of cooling rate on residual stress profile in veneering ceramic: measurement by hole-drilling. *Dent Mater* 2011;27:906-14.
20. Rues S, Kröger E, Müller D, Schmitter M. Effect of firing protocols on cohesive failure of all-ceramic crowns. *J Dent* 2010;38:987-94.
21. Anusavice KJ, DeHoff PH, Hojjatie B, Gray A. Influence of tempering and contraction mismatch on crack development in ceramic surfaces. *J Dent Res* 1989;68:1182-7.
22. Swain MV. Unstable cracking (chipping) of veneering porcelain on all-ceramic dental crowns and fixed partial dentures. *Acta Biomater* 2009;5:1668-77.
23. Tholey MJ, Swain MV, Thiel N. Thermal gradients and residual stresses in veneered Y-TZP frameworks. *Dent Mater* 2011;27:1102-10.
24. Meira JB, Reis BR, Tanaka CB, Ballester RY, Cesar PF, Versluis A, Swain MV. Residual stresses in Y-TZP crowns due to changes in the thermal contraction coefficient of veneers. *Dent Mater* 2013;29:594-601.
25. Bonfante EA, Rafferty BT, Silva NR, Hanan JC, Rekow ED, Thompson VP, Coelho PG. Residual thermal stress simulation in three-dimensional molar crown systems: a finite element analysis. *J Prosthodont* 2012;21:529-34.

26. DeHoff PH, Anusavice KJ. Viscoelastic stress analysis of thermally compatible and incompatible metal-ceramic systems. *Dent Mater* 1998;14:237-45.
27. Marshall DB, Lawn BR. An indentation technique for measuring stresses in tempered glass surfaces. *J Am Ceram Soc* 1977; 60:86-7.
28. Belli R, Monteiro S Jr, Baratieri LN, Katte H, Petschelt A, Lohbauer U. A photoelastic assessment of residual stresses in zirconia-veneer crowns. *J Dent Res* 2012;91:316-20.
29. Mainjot AK, Schajer GS, Vanheusden AJ, Sadoun MJ. Residual stress measurement in veneering ceramic by hole-drilling. *Dent Mater* 2011;27:439-44.
30. Anusavice KJ, Hojjatie B. Effect of thermal tempering on strength and crack propagation behavior of feldspathic porcelains. *J Dent Res* 1991;70:1009-13.
31. Coffey JP, Anusavice KJ, DeHoff PH, Lee RB, Hojjatie B. Influence of contraction mismatch and cooling rate on flexural failure of PFM systems. *J Dent Res* 1988;67:61-5.
32. Pjetursson BE, Sailer I, Zwahlen M, Hammerle CH. A systematic review of the survival and complication rates of all-ceramic and metal-ceramic reconstructions after an observation period of at least 3 years. Part I: Single crowns. *Clin Oral Implants Res* 2007; 18:73-85.

냉각속도가 지르코니아-도재 수복물의 전장도재 내 잔류응력에 미치는 효과에 관한 문헌고찰

장재승¹ · 김선재^{2*}

연세대학교 ¹용인세브란스병원 치과, ²강남세브란스 치과병원 치과보철과

최근 많이 이용되고 있는 지르코니아-도재 수복물은 그 적용범위가 점차로 증가하고 있다. 임상연구결과에서 지르코니아 코어는 매우 높은 성공율을 보이고 있으나 코어 위에 축성되는 전장도재는 기존에 이용되어온 금속-도재 수복물에 비해 높은 파절빈도를 나타내고 있다. 이러한 파절의 원인으로 여러가지 요소가 거론되고 있으나 아직 명확하게 설명하고 있지는 못하다. 최근 전장도재 축성 후 냉각과정에서 잔존하는 잔류응력이 전장도재의 파절에 영향을 미칠 수 있다는 연구결과가 속속 발표되고 있다. 본 고찰에서는 잔류응력이 무엇이며 도재 축성 후 냉각과정에서 어떤 기전을 통해 전장도재 내에 잔류응력이 발생하는지, 또한 기존의 금속-도재 수복물에서 발생하는 잔류응력과는 어떤 차이가 있는지 문헌고찰을 통해 살펴보고자 한다. (*대한치과보철학회지* 2014;52:136-42)

주요단어: 지르코니아; 전장도재; 파절; 잔류응력; 냉각속도

*교신저자: 김선재

135-720 서울 강남구 언주로 211 강남세브란스 치과병원

02-2019-3568; e-mail, sunjai@yuhs.ac

원고접수일: 2014년 3월 14일 / 원고최종수정일: 2014년 4월 10일 / 원고채택일: 2014년

4월 15일

© 2014 대한치과보철학회

© 이 글은 크리에이티브 커먼즈 코리아 저작자표시-비영리 3.0 대한민국 라이선스에 따라
이용하실 수 있습니다.