

저온열화가 치과 CAD/CAM용 다층 지르코니아 블록의 특성에 미치는 영향

서영빈^{1,2}, 김경남³, 권재성^{1,2,*}

¹연세대학교 치과대학 치과생체재료공학교실 및 연구소

²BK21 창의치의학융합 교육연구단

³경동대학교 치위생학과

Effect of low temperature degradation on multi-layered zirconia block for dental CAD/CAM

Young-Bin Seo^{1,2}, Kyoung-Nam Kim³, Jae-Sung Kwon^{1,2,}*

¹*Department and Research Institute of Dental Biomaterials and Bioengineering,
Yonsei University College of Dentistry, Seoul, Republic of Korea*

²*BK21 FOUR Project, Yonsei University College of Dentistry, Seoul, Republic of Korea*

³*Department of Dental Hygiene, Kyungdong University, Wonju, Korea*

Ceramic prosthesis fabrication using CAD/CAM has advantages such as high convenience, fast fabrication speed, and high esthetics, resulted in increasing use in clinical practice. Among them, the multi-layered zirconia block for dental CAD/CAM is a product that consists of a single block with layers of different shades, so that natural tooth color can be reproduced. However, research on the material is insufficient, and in particular, the study on the characteristics of low-temperature degradation, which is known to be important for zirconia-based medical devices, is required to evaluate the performance and safety of the material. In this study, in order to evaluate the effect of low-temperature degradation on the properties of multi-layered zirconia blocks, three-point flexural strength, fracture surface and phase changes before and after low-temperature degradation of three companies' dental CAD/CAM multi-layered zirconia block products were compared. As a result of this experiment, all products of the three manufacturers met International Standards, and there was no change in strength even after low-temperature degradation. However, it was found that there were differences in monoclinic content, three-point flexural strength, and the surface crystal structure for each zirconia block.

Keywords : Multi-layered zirconia, Low temperature degradation, Aging, Zirconia

Young-Bin Seo (ORCID: 0000-0003-1656-6765)
Kyoung-Nam Kim (ORCID: 0000-0002-1350-406X)

*Correspondence: Jae-Sung Kwon (ORCID: 0000-0001-9803-7730)
50-1 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Republic of Korea
Affiliation: Department and Research Institute of Dental Biomaterials
and Bioengineering, Yonsei University College of Dentistry, Seoul,
Republic of Korea
Tel: +82-2-2228-3081, Fax: +82-2-364-9961
E-mail: jkwon@yuhs.ac

Received: Oct. 12, 2021; Revised: Dec. 14, 2021; Accepted: Dec. 14, 2021

서론

사람들이 심미에 대한 관심이 증가하고 그에 따른 요구가 늘어남에 따라 치과에서도 자연치아 색과 유사한 수복물의 사용이 증가하고 있다. 세라믹은 대표적인 치과 심미 수복재로써 자연치아와 유사한 투명도와 색을 가지고 있어서 심미 보철을 원하는 환자들에게 적합한 재료이다(1). 그러나 세라믹은 취성(brittleness)을 가지고 있고 비교적 강도가 약하다는 단점을 가지고 있어서 교합력이 강한 부위나 관교의치(bridge)로는 제한적으로 사용되어왔다(2-4). 이러한 문제 때문에 우수한 기계적 성질을 가진 지르코니아가 점차 각광을 받고 있다. 특히, CAD/CAM을 이용한 지르코니아 보철물 제작은 높은 편의성, 빠른 제작 속도 등의 장점을 가지고 있어 임상에서의 사용이 증가하고 있다.

세라믹을 제외한 임상에서 많이 사용되는 보철물인 금이나 금속도재관보다 지르코니아가 더 심미적이지만 아직 자연치아를 완벽하게 재현하기에는 부족하다(5). 그렇기 때문에 지르코니아를 더욱 심미적으로 만들기 위한 다양한 방법들이 시도되었다(6, 7). 다층 지르코니아는 단일 색상으로 되어있는 기존의 지르코니아와는 달리 법랑질(enamel)층, 상아질(dentin)층, 그라데이션(gradation)층으로 구성되어 있어서 보철물의 치경부에서부터 교합면 부분까지 자연치아의 색과 투과도를 잘 표현해 낼 수 있다(8). 이러한 이유 때문에 절삭 후 별도의 색조 작업 없이 소결, 연마하면 바로 보철물을 완성할 수 있어서 만드는 과정과 시간을 단축할 수 있다.

지르코니아 사용 시 반드시 고려되어야 하는 것 중 하나가 저온열화(low temperature degradation)이다. 저온열화는 지르코니아에 낮은 열을 지속적으로 가해주었을 때 자발적으로 정방정계에서 단사정계로 상이 변하게 되는데 정방정계보다 단사정의 결정크기가 더 크므로 체적증가가 일어나게 된다. 체적 증가가 일어나면 지르코니아의 표면에서부터 미세 균열이 발생하여 결론적으로 지르코니아의 강도가 저하되게 된다(9). 저온열화는 비교적 낮은 온도에서 발생하고 수증기압의 증가에 따라 노화가 가속화 된다. 구강은 타액으로 인하여 습윤하고 지속적으로 열과 응력이 가해지는 환경이기 때문에 구강 내에 지르코니아를 적용할 때 반드시 고려되어야 한다(10-12).

다층 지르코니아는 기존 지르코니아 보다 심미적이면서 기존 세라믹보다 강도가 강하기 때문에 임상에서의 사용이 증가하고 있으며 그에 따라 다양한 다층 지르코니아 제품들이 출시되고 있다. 하지만 지르코니아를 사용할 때 고려되어야 할 저온열화에 대한 연구는 아직 부족한 실정이다. 특히, 다층 지르코니아는 자연스러운 색조를 재현하기 위해 층마다 안료 성분의 함량의 차이가 있기 때문에 각각에 층에 대해서도 저온열화에 대한 영향이 고려되어야 하지만 그에 따른 연구는 많이 진행되어 있지 않다. 이에 본 연구는 저온열화가 다층 지르코니아의 특성에 미치는 영향을 평가하기 위해 세 종류의 다층 지르코니아 제품들의 저온열화 전후의 강도와 상 변화를 비교하였다.

재료 및 방법

1. 시편 제작

본 연구를 위해 국내·외에서 제작된 치과 CAD/CAM용 다층 지르코니아 블록을 사용하였다(Table 1). 굴곡강도 시편은 다층의 형태를 반영하기 위해 시편군 제품을 3 mm × 10 mm × 30 mm 크기로 절단한 후, 제조사에 의해 제시된 열처리 조건에 따라 소결하였다(Figure 1A). 모든 면을 30~40 μm의 연마재로 다듬고 굴곡강도 측정 시 하중을 견디는 면은 추가적으로 15~20 μm의 다이아몬드 연마재로 연마하였다.

상분석의 경우 제조사가 제시한 정보를 바탕으로 다층 지르코니아를 법랑질층(35%), 그라데이션 밝은층(15%), 그라데이션 어두운층(15%), 상아질층(35%)인 4단계의 층으로 구분하여, 각 층별로 일정한 크기(10 mm × 2 mm × 10 mm)로 절단하였다(Figure 1B). 제조사에 의해 제시된 열처리 조건(Table 1)에 따라 소결한 후 15~20 μm의 다이아몬드 연마재로 연마하여 시편을 준비하였다.

2. 저온열화 실험

저온열화 실험은 국제표준 ISO 13356호에 따라 진행하였다. 준비된 시편을 수열반응기(Kodam Co., Seoul, Korea)에 넣고 134 °C에서 0.2 MPa의 압력으로 5시간 동안 저온열화시켰다.

(A) 3-point flexural strength specimen



(B) XRD specimen

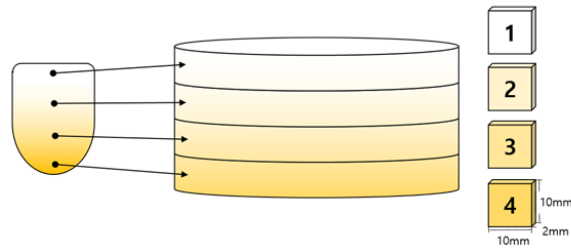


Figure 1. Specimen geometries of the multi-layer zirconia used in this study for (A) 3-point flexural strength and (B) phase analyses using X-ray diffractometer (XRD).

Table 1. Multi-layered dental ceramic block materials investigated in this study.

Manufacturer / Model Name	Code	Heating Rate	Final Temperature	Cooling Time
HASS / Zirtooth	HZ	4 °C/min	1450~1500 °C Holding: 2 h	6 °C/min or Room temperature
DENTALMAX / LUXEN	DL	9 °C/min	1000~1450 °C Holding: 2 h	9 °C/min or Room temperature
NORITAKE / KATANA	NK	10 °C/min	1100~1500 °C Holding: 2 h	10 °C/min or Room temperature

3. 3점 굴곡강도 측정

저온열화 전과 후의 굴곡강도를 측정하기 위해 각 시험군 및 대조군 당 9개의 시편을 국제표준 ISO 6872호에 명시된 3점 굴곡강도 방법에 따라 진행하였다. 만능시험기(Model 5942, Instron, Norwood, MA, USA)의 지지부의 거리를 20 mm로 하고 시편을 지지대 중앙으로 위치시킨 후에 하중 속도 1 mm/min로 시편 장축에 수직으로 하중을 가하여 시편이 파절될 때까지의 최대강도를 측정하였다. 밝은 층의 면을 임상에서 교합면 부분으로 사용하고 어두운 층의 면을 치경부로 사용하기 때문에 굴곡강도 측정 시 지그에 맞는 시편의 면은 밝은 색을 가진 층으로 하였다.

4. 파절면 관찰

굴곡강도 측정 후 파절된 양상을 확인하기 위해 시편의 파절면을 전계방출형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscopes; FE-SEM, Merlin, Zeiss, Land Baden-Württemberg, Germany)으로 관찰하였다.

5. X-선 회절을 이용한 상 분석

지르코니아의 상 변화를 분석하기 위해 X-선 회절 분석 장비인 XRD (X-ray Diffractometer; Ultima IV, Rigaku, Tokyo, Japan)를 사용하여 단사정상과 정방정상의 회절

피크가 명확히 보이도록 20~40°의 회절 각에 대해 1°/min의 속도로 스캔하여 상을 측정하였다. 측정된 결과로부터 단사정상의 함량을 식(1)에 따라 계산하였다.

$$X_m = \frac{I_m(\bar{1}11) + I_m(111)}{I_m(\bar{1}11) + I_m(111) + I_l(111)} \times 100 \quad (1)$$

X_m 은 단사정상분율, $I_m(111)$ 은 단사정상($2\theta = 28.2^\circ$)의 강도, $I_m(\bar{1}11)$ 은 단사정상($2\theta = 31.3^\circ$)의 강도, $I_l(111)$ 은 정방정상($2\theta = 30.2^\circ$)의 강도를 나타낸다.

6. 통계분석

통계처리는 SPSS (Statistical Package for Social Science 23.0, IBM Korea Inc., Seoul, Korea)를 사용하여 분석하였다. 저온열화 전 후의 굴곡강도의 평균과 표준편차를 계산하고, 각 제조사별 저온열화 전 후 비교는 독립표본 T검정을 통해 분석하였다. 본 논문에서 사용된 모든 통계는 95%의 유의수준에서 검정하였다.

결 과

1. 굴곡강도

저온열화 전의 굴곡강도 실험 결과 NK군이 836.3 ± 63.7 MPa, HZ군이 858.8 ± 79.0 MPa, DL군이 900.5 ± 1.2 MPa 순서로 굴곡강도가 높았고, 저온열화 후의 굴곡강도 실험 결과도 마찬가지로 NK군이 831.0 ± 81.0 MPa, HZ군이 851.8 ± 74.5 MPa, DL군이 887.0 ± 35.3 MPa 순서로 높은 값을 나타내었다(Figure 2). 저온열화 전과 후의 강도에 유의한 차이가 나타나지 않았으며 그룹 간에도 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$).

2. 파절면 관찰

저온열화전과 후 DL군과 HZ군의 표면에서는 작은 결정 (grain) 형태의 입자가 고르게 분포함을 알 수 있었고, NK군의 경우 부분적으로 다른 군과 비교했을 때, 비교적 크기가 큰 결정 형태의 입자가 관찰되었다(Figure 3).

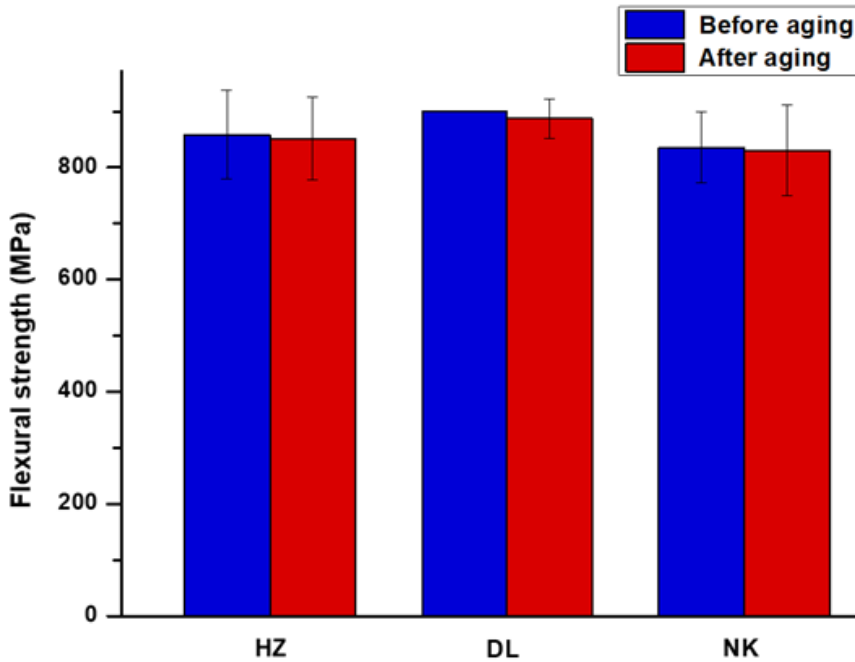


Figure 2. Comparison of flexural strength of each group before and after low temperature degradation.

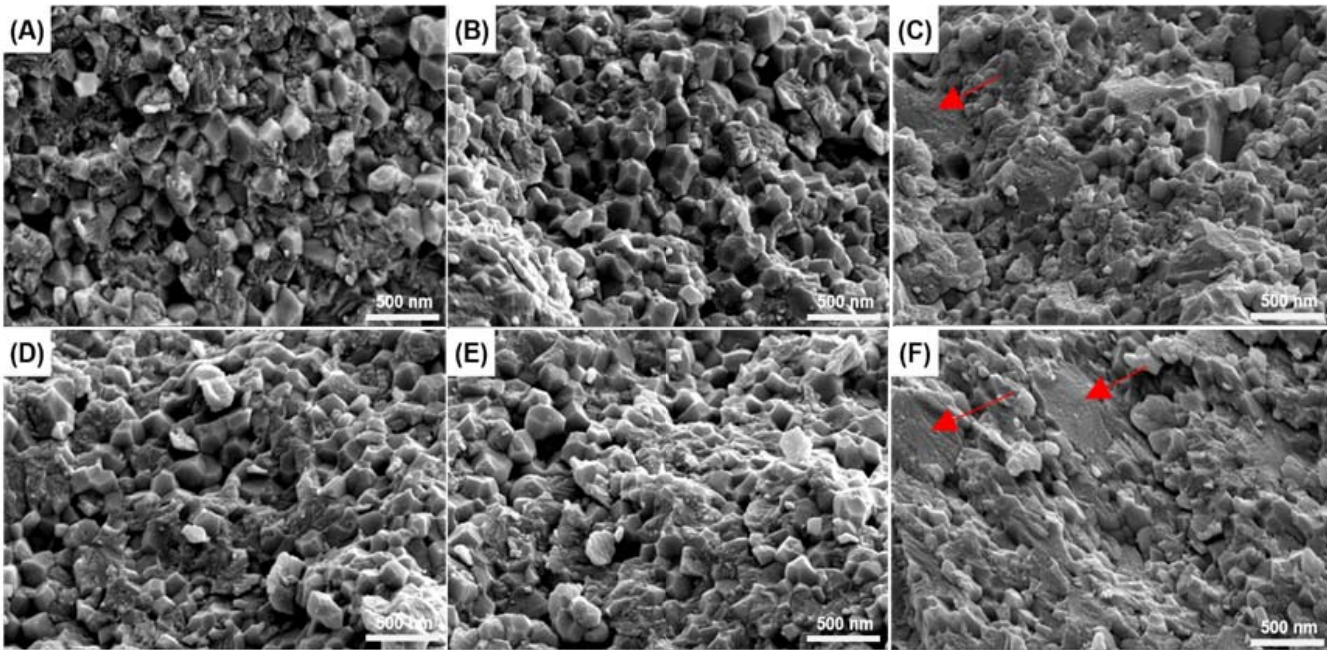


Figure 3. Field emission scanning electron microscope (FE-SEM) images of (A) HZ, (B) DL and (C) NK before low temperature degradation, Images after low temperature degradation for (D) HZ, (E) DL and (G) NK. Scale bar is 500 nm. Red arrow indicates relatively large size grain structure.

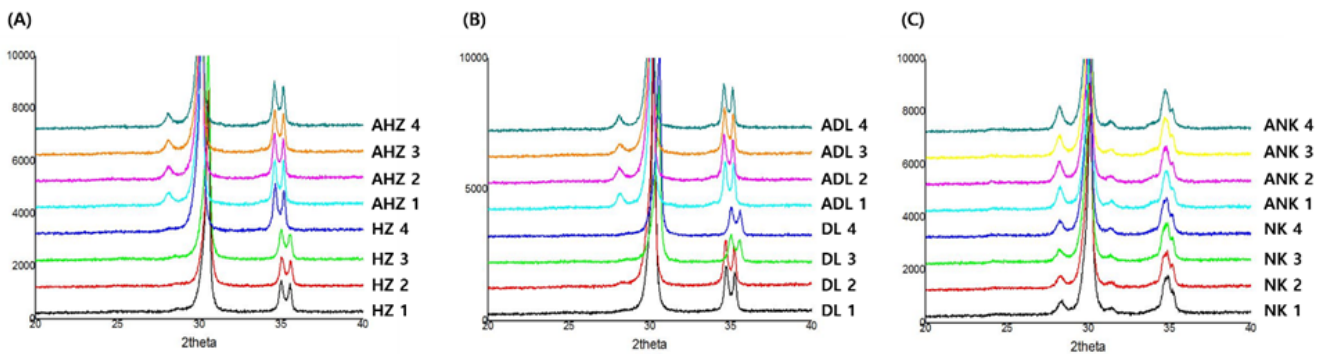


Figure 4. XRD patterns of the 4 different layers from each zirconia grade after hydrothermal aging at 134 °C for 5 h. (A) HZ groups, (B) DL groups, (C) NK groups; AHZ, ADL, ANK are groups after the aging (low-temperature degradation).

3. X-선 회절을 이용한 상 분석

Figure 4와 같이, XRD 분석 결과 저온열화 전의 평균 단사정상 함량은 HZ군이 3.61 ± 0.20 vol%, DL군이 3.56 ± 0.12 vol%이며, NK군이 10.41 ± 0.45 vol%로 가장 높았다. 또한, 저온열화 후의 평균 단사정상 함량은 HZ군이 8.56 ± 0.19 vol%, DL군이 7.59 ± 0.17 vol%이며, NK군이 15.14 ± 0.68 vol%로 가장 높았다. 저온열화 전과 후 모두

NK군이 HZ군과 DL군에 비교하여 높은 단사정상 양을 나타냈으며 HZ군과 DL군의 단사정상 양에는 유의한 차이가 없었다. 또한, 모든 군의 단사정계 비율이 저온열화 전과 비교하여 저온열화 후의 시편에서 유의차 있게 증가하였다 ($p < 0.05$). 그룹의 각 층마다 단사정상의 차이는 있었으며, NK군에서 각 층별로 가장 뚜렷한 차이가 나타났다. 가장 밝은 시편이 가장 낮은 단사정상 함량을 나타내었고, 색상이 진해질수록 단사정상 함량이 높아지는 경향이 나타났다.

고 찰

지르코니아는 크게 3종류의 결정상을 가지고 있는 동질이 상체(polymorphism)로 상온에서는 단사정계(monoclinic system)로 존재하고 열을 가하면 1170 °C부터 정방정계(tetragonal system), 2370 °C부터 입방정계(cubic system)의 결정의 상태로 존재하게 된다. 치과에서 일반적으로 사용하는 지르코니아는 Y-TZP (Yttria-stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystals)로 상안정화제인 이트리아(yttria)가 첨가되어 상온에서도 단단한 정방정상의 상태를 유지할 수 있는 부분 안정화된 지르코니아를 사용한다(13, 14).

지르코니아는 수분과 열의 영향을 받으므로 구강 내의 환경이나 고압증기멸균기 소독 과정의 수분과 열이 공존하는 상태에 노출되는 상황에서 정방정계의 지르코니아가 단사정계로 상 변화되어 지르코니아의 기계적 성질의 열화가 발생할 수 있다. 이전 연구에서 지르코니아를 5시간 동안 134 °C, 2 bar 압력에서의 열처리하는 생체 내에서 34년의 노화와 동일한 효과를 갖는 것을 보고하였다(15). 따라서 본 연구에서는 다층 지르코니아의 구강 내 노화를 실험실에서 평가하기 위해 134 °C에서 5시간 동안 열처리를 진행하여 저온열화 전후의 굴곡강도와 상변화를 비교하였다.

저온열화 전후의 상 변화는 XRD 측정을 이용하여 확인되었다. XRD 분석 결과 모든 군의 단사정계 비율이 저온열화 전과 비교하여 저온열화 후의 시편에서 유의하게 증가하였다. 다층 지르코니아의 각 층을 분리하여 실험한 결과 색상이 진해 질수록 단사정상 함량이 증가하는 경향이 나타났고, 저온열화 후에도 밝은 층보다 어두운 층에서 높은 단사정상 함량이 나타났다. 다층 지르코니아는 각 층이 다양한 색으로 이루어져 있는데, 안료의 종류나 첨가량의 차이로 인해서 색의 기울기가 생긴다. 따라서 각 층에 첨가된 금속산화물이 지르코니아 특성에 영향을 미칠 수 있다(7, 16). Putra(17)의 연구에서 서로 다른 4종의 지르코니아를 134±2 °C, 2 bar 에서 5, 50, 100시간 노화를 진행한 결과, 시간이 증가함에 따라 단사정계 비율이 최대 3.7 vol%에서 67.9 vol%증가하는 결과가 나타났다. 본 연구에서는 5시간 노화를 진행하였기 때문에 최대 3.26 vol%에서 8.41 vol%의 상변화만 관찰되었다. 본 연구에서 실험한 결과 모든 군이 저온열화 전에 단사정상의 양이 20% 미만이고, 저온열화 후에는 25% 미만

으로 국제표준 ISO 13356호에 부합하였다.

3점 굴곡강도결과 저온열화 전과 후의 강도에 유의한 차이가 나타나지 않았으며 그룹 간에도 차이가 없었다. 다층 지르코니아의 저온열화의 영향을 연구한 Ha(18)의 연구에서는 저온열화후의 단사정 분율 약 34 vol% 에서도 재료의 굴곡강도의 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이는 상변화가 외부 표면에서만 진행되었기 때문에 단사정상이 증가했음에도 굴곡강도 값이 감소하지 않았다고 하였다. 또한, Flinn(19) 연구에서 4종의 지르코니아를 134 °C, 2 bar 에서 5, 50, 100, 150, 200시간 노화를 진행한 결과, 이트리아 함량이 상대적으로 낮은 지르코니아 군에서 시간이 증가할수록 단사정 분율이 증가하고 강도가 감소하는 경향이 나타났는데 35 vol% 이하에서는 강도의 감소가 나타나지 않았다. 본 연구에서 단사정상분율을 측정된 결과 모든 군이 20 vol% 미만이었기 때문에 굴곡강도에서 유의한 차이가 나타나지 않았다. Kengtanyakich(20)의 연구에서는 이트리아 함량이 증가할수록 저온열화에 저항성을 나타내었으나, 본 연구에서는 이트리아 함량에 대한 실험을 진행하지 못했기 때문에 성분 함량에 대한 실험이 추가적으로 필요하며, 이는 실험실에서 진행한 체의 연구이기 때문에 실제 구강내에서의 거동에 대해서도 추가적인 연구할 것으로 사료된다.

결 론

본 실험 결과 국내외에서 제작된 3개사의 지르코니아 제품이 모두 국제표준에 부합하였으며 저온열화 후에도 강도의 변화가 없었다. 하지만 제조사마다 단사정상의 양, 3점 굴곡강도 평균 값, 표면 결정 구조의 차이가 있었음을 알 수 있었으며 본 연구를 기반으로 추후 치과 CAD/CAM용 다층 지르코니아의 임상적 적용을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것이라 사료된다.

사 사

This work was supported by the Technology Innovation Program (20009652, Technology on commercialization

and materials of Bioabsorbable Hydroxyapatite that is less than micrometer in size) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea)

참고문헌

1. Raigrodski AJJDC. Contemporary all-ceramic fixed partial dentures: a review. *Dent Clin North Am*. 2004; 48(2):531-44.
2. Quinn GD, Giuseppetti AA, Hoffman KH. Chipping fracture resistance of dental CAD/CAM restorative materials: Part I – Procedures and results. *Dent Mater*. 2014;30(5):e99-e111.
3. Raigrodski AJ, Yu A, Chiche GJ, Hochstedler JL, Mancl LA, Mohamed SE. Clinical efficacy of veneered zirconium dioxide-based posterior partial fixed dental prostheses: five-year results. *J Prosthet Dent*. 2012;108(4):214-22.
4. Raigrodski AJ, Hillstead MB, Meng GK, Chung K-H. Survival and complications of zirconia-based fixed dental prostheses: A systematic review. *J Prosthet Dent*. 2012;107(3):170-7.
5. Baldissara P, Llukacej A, Ciocca L, Valandro FL, Scotti R. Translucency of zirconia copings made with different CAD/CAM systems. *J Prosthet Dent*. 2010;104(1):6-12.
6. Zhang Y. Making yttria-stabilized tetragonal zirconia translucent. *Dent Mater*. 2014;30(10):1195-203.
7. Kolakarnprasert N, Kaizer MR, Kim DK, Zhang Y. New multi-layered zirconias: Composition, microstructure and translucency. *Dent Mater*. 2019;35(5): 797-806.
8. Ueda K, GÜTh J-F, Erdelt K, Stimmelmayer M, Kappert H, Beuer F. Light transmittance by a multi-coloured zirconia material. *Dent Mater J*. 2015;34(3):310-4.
9. Kelly JR, Denry I. Stabilized zirconia as a structural ceramic: An overview. *Dent Mater*. 2008;24(3):289-98.
10. Murase Y, Kato EJJotACS. Role of water vapor in crystallite growth and tetragonal-monoclinic phase transformation of ZrO₂. *J Am Ceram Soc*. 1983;66(3): 196-200.
11. Lange FF, Dunlop GL, Davis BI. Degradation during aging of transformation-toughened ZrO₂-Y₂O₃ materials at 250 °C. *J Am Ceram Soc*. 1986;69(3):237-40.
12. Kim SH, Choi YS. Changes in properties of monolithic and conventional zirconia during aging process. *Mech Mater*. 2019;138:103159.
13. Tong H, Tanaka CB, Kaizer MR, Zhang Y. Characterization of three commercial Y-TZP ceramics produced for their High-Translucency, High-Strength and High-Surface Area. *Ceram Int*. 2016;42(1, Part B):1077- 85.
14. Denry I, Kelly JR. State of the art of zirconia for dental applications. *Dent Mater*. 2008;24(3):299-307.
15. Chevalier J, Calès B, Drouin JM. Low-temperature aging of Y-TZP ceramics. *J Am Ceram Soc*. 1999;82(8):2150-4.
16. 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*. 2008;87(2):329-37.
17. Putra A, Chung KH, Flinn BD, Kuykendall T, Zheng C, Harada K, et al. Effect of hydrothermal treatment on light transmission of translucent zirconias. *J Prosthet Dent*. 2017;118(3):422-9.
18. Ha SR, Choi YS. Effect of hydrothermal aging on dental multilayered zirconia for monolithic restorations: An in vitro study. *Ceram Int*. 2021; 47(12):17057-68.
19. Flinn BD, Raigrodski AJ, Mancl LA, Toivola R, Kuykendall T. Influence of aging on flexural strength of translucent zirconia for monolithic restorations. *J Prosthet Dent*. 2017;117(2):303-9.
20. Kengtanyakich S, Peampring C. An experimental study on hydrothermal degradation of cubic-containing translucent zirconia. *J Adv Prosthodont*. 2020;12(5): 265-72.

저온열화가 치과 CAD/CAM용 다층 지르코니아 블록의 특성에 미치는 영향

서영빈^{1,2}, 김경남³, 권재성^{1,2,*}

¹연세대학교 치과대학 치과생체재료공학교실 및 연구소

²BK21 창의치의학융합 교육연구단

³경동대학교 치위생학과

CAD/CAM을 이용한 세라믹 보철물 제작은 높은 편의성, 빠른 제작 속도, 높은 심미성 등의 장점을 가지고 있어 임상에서의 사용이 증가하고 있다. 이 중 치과 CAD/CAM용 다층 지르코니아 블록은 서로 다른 색조의 층이 한 개의 블록으로 구성되어 있는 제품으로 이를 통해 자연스러운 치아색조를 재현할 수 있도록 하고 있다. 하지만 해당 재료에 대한 연구는 미미하여, 특히 지르코니아 기반 의료기기에서 중요하다고 알려진 저온열화에 따른 특성에 대한 연구는 재료의 성능 및 안전성 평가에 있어 매우 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 저온열화가 치과 CAD/CAM용 다층 지르코니아 블록의 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 3개사의 치과 CAD/CAM용 다층 지르코니아 블록 제품들의 저온열화 전·후의 강도, 형태 및 상변화를 비교하였다. 3점 굴곡강도는 모든 제품이 국제표준 ISO 6872호에 부합하였고 저온열화 전과 후의 강도에 유의한 차이가 나타나지 않았으며 시험군 간에도 차이가 없었다($p>0.05$). XRD 분석 결과 3개사 모두 저온열화 전에 단사정상의 양이 20% 미만이었으며, 저온열화 후에는 25% 미만으로 국제표준 ISO 13356호에 부합하였다. 모든 제조사 제품의 단사정계 비율이 저온열화 전과 비교하여 저온열화 후의 시편에서 유의차 있게 증가하였다 ($p<0.05$). SEM 분석 결과 저온열화전과 후 DL와 HZ의 표면에서는 결정형태의 입자가 고르게 분포함을 알 수 있었고, NK의 경우 부분적으로 비결정 형태의 표면이 있음을 알 수 있었다. 따라서, 본 실험 결과 국내·외에서 제작된 3개사의 제품 모두 국제표준에 부합하였으며 저온열화 후에도 강도의 변화가 없었다. 하지만 제조사마다 단사정상의 양, 3점 굴곡강도 평균 값, 표면 결정 구조의 차이가 있었음을 알 수 있었으며 본 연구를 기반으로 추후 치과 CAD/CAM용 다층 지르코니아의 장시간의 저온열화와 임상적 적용을 고려한 추가적인 연구가 필요할 것이라 사료된다.

색인단어 : 다층 지르코니아, 저온열화, 노화, 지르코니아
