https://doi.org/10.14368/jdras.2022.38.3.127
ISSN 2384-4353 eISSN 2384-4272

Review Article

Effect of milling and sintering process on integrity of zirconia prosthesis: a literature review

Kiun Lee, Kyung-Ho Ko, Yoon-Hyuk Huh, Chan-Jin Park, Lee-Ra Cho*
Department of Prosthodontics and Research Institute of Oral Science, College of Dentistry, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea

Zirconia is fabricated through various processes. Each element in fabricating process can affect the physical properties of the definitive prosthesis. In particular, both the milling process and the sintering process can affect the final integrity of the zirconia prosthesis. Most of the milling machines adopt the ultra-precision 5-axis machining method, and the results vary depending on which milling method was used and how the milling equipment was managed. Milling blocks are selected according to cutting efficiency and aesthetic reproducibility. The sintering method can affect the grain growth and optical properties, and an accurate evaluation can be made only with additional research on the recent speed sintering procedure. Not only the sintering temperature but also the temperature holding time can affect the quality of definitive prosthesis. **(J Dent Rehabil Appl Sci 2022;38(3):127-37)**

Key words: milling block; milling machine; milling methods; sintering; speed sintering

서론

치과용 세라믹 신소재인 지르코니아(3 mol% yttria stabilized tetragonal zirconia, 3Y-TZP)는 우수한 기계적 강도를 지녔지만 불투명한 단점이 있어 이를 개선하기 위해 알루미나 함량을 줄이거나(2세대), 이트리아 비율을 증가시킴으로써(3세대) 강도와 심미성의 조화를 이루어 현재 치과재료로 널리 활용되고 있다.[1]

지르코니아 보철물은 여러 공정과정을 거쳐서 제작되고 있는데(Fig. 1), 각 요소가 모두 최종 보철물의 물성에 영향을 주게 된다. 최종보철물의 물성은 선택한 블록의 물성이 가장 큰 영향을 미치지만 제작과정도 영향을 줄 수 있는데 밀링과정과 소결과정이 그 대표적인 예이다. 밀링(milling)이란 CNC (computer numerical control) 기계가 CAD (computer aided design) 데이터를 가공하는 방식 중 하나이다. 밀링머신마다 밀링과정(milling process), 사용하는 기구(tool)와 방법, 밀링재료가 다르기 때문에 밀링과정은 보철물의 표면 완성도(surface integrity)와 기계적 물성에 영향을 미칠 수 있다. 표면 완성도란 제작된 결과물의 표면상태로 거칠기, 기공(porosity), 잔류응력과 같은 기하학적, 기계적 특성의 총칭을 의미하며,[2] 밀링과정을 거치면서 지르코니아의 물성이 변화할 수 있으므로 이를 잘 조절할 수 있어야 한다.

소결과정(sintering process)은 분말을 가열해서 단단하게 밀착된 치밀체를 만드는 과정으로, 입자크기가 성장하고 치밀화되는 과정에서 미세구조가 변화하면서 약 20%의 부피 수축을 야기한다.[3] 변화된 미세구조는 최종 보철물의 기계적 물성과 광학적 특성에 직접적인 영향을 주므로 온도나 시간과 같은 공정변수를 조절하여 보철물의 색조와 기계적 강도를 최적화해야 한다.

*Correspondence to: Lee-Ra Cho
Professor, Department of Prosthodontics and Research Institute of Oral Science, College of Dentistry, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung, 25457, Republic of Korea
Tel: +82-33-640-3153, Fax: +82-33-640-3103, E-mail: lila@gwnu.ac.kr
Received: July 5, 2022/Last Revision: August 3, 2022/Accepted: August 27, 2022

Copyright© 2022 The Korean Academy of Stomatognathic Function and Occlusion.
©It is identical to Creative Commons Non-Commercial License.

Fig. 1. Stage of manufacturing zirconia restoration. After making a block by pressing powdered zirconia, it is milled and then the definitive prosthesis is completed through a sintering process.

본 문헌고찰에서는 밀링과정에서 고려해야 할 밀링머신, 밀링방법, 밀링블록의 영향을 살펴 보고, 소결공정의 변화가 미치는 미세구조적 변화와 소결방법에 따른 차이에 대해 고찰해 봄으로써 보철물의 특성을 위한 최적의 지르코니아 제작방법이 무엇인지 알아보고자 한다.

문헌고찰

밀링과정

기존의 납형형성 및 주조과정을 거쳐 제작되는 전통적인 방식의 금관과 달리 지르코니아는 CAD데이터를 CAM (computer aided manufacturing)하는 이른바 CAD-CAM 과정으로 제작되는데, 이러한 과정이 보편화되면서 지르코니아 보철 사용이 확대되었다. 밀링과정이 최종 보철물의 물성에 지대한 영향을 끼치는 점은 분명한데도, 이러한 사실은 간과되고 있으며 밀링기계의 설정을 그대로 이용하는 경우가 많다. 따라서 밀링머신의 구조와 축구조에 따른 진실도(truness), 밀링기구와 블록의 접촉방법에 따른 표면 완성도, 그리고 밀링블록의 종류와 특성을 알아보고자 한다.

먼저 밀링머신의 구조를 살펴보면, 블록 또는 밀링기구를 회전시키는 스핀들(spindle)이 있는 주축대와 블록을 고정하는 테이블(table)이 있다. 두 가지 구조물의 관계에 의해 수직, 수평 밀링머신으로 나뉘는데, 수직, 수평을 둘 다 사용하는 만능 밀링머신이 치과영역에 주로 사용된다(Fig. 2). 기구의 움직임은 기본적으로 표준화된 직각(orthogonal) 좌표 시스템상에서 정의되며 기준이 되는 것은 직선축(X, Y, Z)과 회전축(A, B, C)이다(Fig. 3).[4] 4축, 5축 밀링머신은 X, Y, Z축을 움직이는 3축 밀링머신

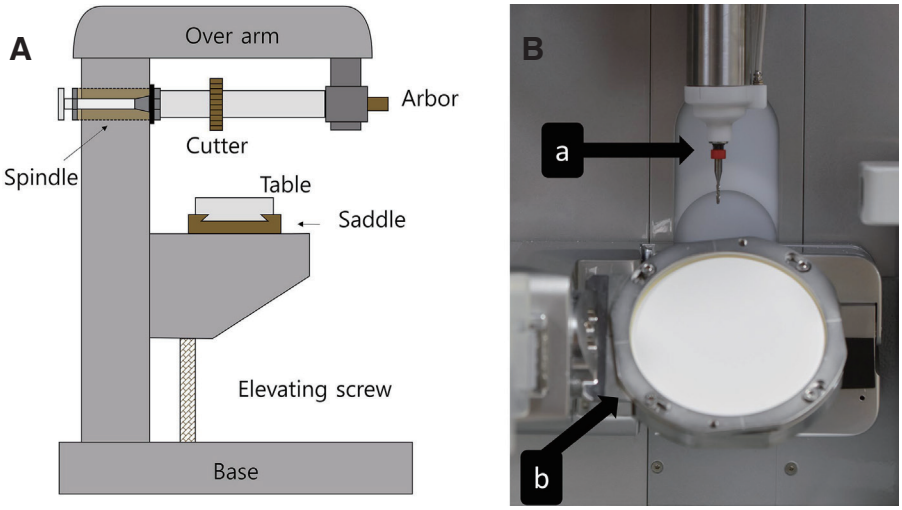

Fig. 2. Milling machine. (A) Schematic diagram, (B) Five-axis dental milling machine. a: Spindle and milling bur, b: Table and milling block.

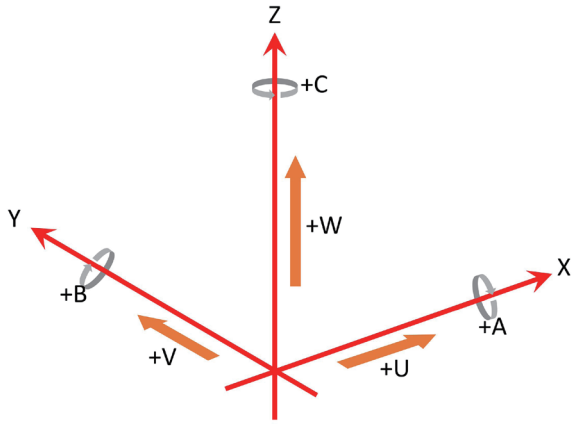

Fig. 3. Orthogonal coordinate system (reference system). With a 3D axis, there are 3 axes rotating around each axis, so in theory there could be 6 axes. Most milling machines use 5 of them because of their fixation.

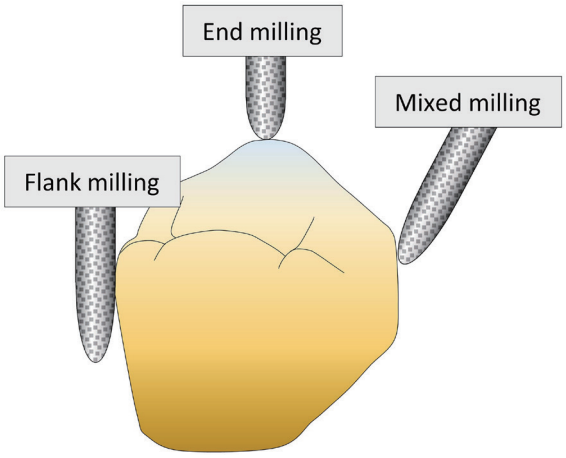

Fig. 4. Tool milling mode applied on a dental crown. Depending on the relationship between the milling tool or bur and the prosthesis surface, it can be called end milling when the tip is in contact, and flank milling when the body is in contact. Most of milling machine adopt a mixed milling method.

에 회전축이 추가된 가공방식이다. Bosch 등[5]은 여러 밀링처리 방법을 비교한 결과, 5축 밀링방식이 교합면과 내면에서 작은 오차를 가지므로 재현의 진실도(trueness)가 높다고 하였다. 이러한 5축 밀링머신도 크게 3+2축의 분할 5축 가공과 동시 5축 가공으로 나눌 수 있다. 3+2축은 3개의 직선축에 회전축이 추가되어 한쪽 면이 가공되고 필요한 시점에 원하는 각도만큼 회전축을 돌려 다른 면을 가공하는 방식이고, 동시 5축은 동시에 5개의 축을 제어하여 블록을 가공하는 방식이다. 이에 관하여 Sadílek 등[6]은 기구(tool)를 기울이는 방향을 밀링되는 방향과 수직되는 방향 두 가지로 나누어 밀링된 재료의 표면에 미치는 영향을 연구하였다. 5축 밀링이 3축과 3+2축 밀링보다 전반적으로 높은 정확성(accuracy)을 보이며 CAD 시스템의 예측 오류값과 크게 다르지 않았다고 하며 밀링축의 기울기가 달라지면 가공된 표면의 거칠기가 달라진다고 하였다. 초창기에는 3축, 4축 시스템이 사용되었으나, 현재 대부분의 지르코니아 제작과정에는 고가의 5축 밀링머신이 사용되고 있어 기계 자체의 정밀성은 높으며 이러한 밀링머신을 어떻게 활용하느냐에 따라 결과의 차이가 난다고 할 수 있다.

다음으로 밀링방법을 살펴보면, 밀링 시 기구(tool)와 보철물 사이의 접촉면적(크기 및 위치)은 보철물의 형태에 따라 첨점으로 가공하는 방식(end milling)과 측면가공(flank milling) 및 이를 혼합한 방식으로 나눌 수 있다(Fig. 4). 보철물의 축면형태를 만들 때는 주로 측면가공을 사용하지만 교합면은 형태의 복잡성 때문에 첨점가공을 사용하므로 보철물 제작과정은 혼합밀링이라고 할 수 있다. 이 때 밀링기구가 접촉하는 방식이 변화하면 보철물의 모양을 따라서 특히 형태가 변하는 부위의 잔류거칠기가 커질 수 있어 공정이 끝난 후 이 부위의 마무리를 추가적으로 해 줄 필요가 있다.

밀링방법 뿐 아니라 밀링의 질도 중요한데 밀링과정에 따라 표면거칠기, 경도, 변연부분파절(chipping), 기공(porosity), 내부응력 등이 결정된다. 보철물 제조 시 어려운 점은 상황마다 필요한 성질이 다르고 필요한 기능이 달라지므로 이에 맞추어 밀링변수를 선택하는 것이다. 따라서 원하는 결과물을 얻기 위해서는 밀링공정을 예측할 수 있어야 하고 결과물은 예측한 대로 제작되어야 한다.[2] Lebon 등[7]의 연구에 의하면 교합면이 다른 부분들에 비해 예측치와 가장 유사하며 부드러운 반면 다른 부분들은 예측치와는 차이가 있어서 후공정과정이 필요하다고 하였다. 이러한 결과가 발생하는 이유로 첨점가공은 이론적으로는 조개껍질형태의 이방성 표면이 생성되어야 하지만 기구의 앞뒤 움직임이 겹치면서 등방성 표면을 형성하기 때문이라고 하여 부드러운 표면을 얻기 위해서는 첨점가공방식을 선택해야 함을 알 수 있다. Benoit 등[8]

은 첨점가공과 측면가공방식은 재료에 따라 강도에 영향을 줄 수도 있고 주지 않을 수도 있기 때문에 재료에 맞는 가공방식을 선택해야 한다고 하였다. 현재 기공소에서 제작되는 지르코니아의 경우, 크기가 작고 높은 정밀도를 요구하는 지르코니아 보철 특성 상 첨점가공의 비중이 높긴 하지만, 어느 한 쪽의 가공방식을 택한다기 보다는 필요에 따라 가공방식을 혼용하는 혼합가공방식으로 제작되고 있다.

Lebon 등[9]은 기구의 형태와 재료를 달리하여 밀링 후의 표면거칠기를 비교하였다. 예상대로 다이아몬드 기구의 그릿(grit)이 클수록 밀링 후 표면은 거칠어지는 경향을 보였다. 하지만 블록을 움직이는 속도(feed rate)는 표면거칠기에 영향을 주지 않았으며 이 속도를 빠르게 할수록 밀링의 효율성이 높아질 수 있어 보철물의 질은 그대로 유지하면서 시간을 조절할 수 있는 변수라 할 수 있다. 재료에 따라서도 영향을 받는데, 높은 경도를 가진 장석계 세라믹은 기구의 마모를 유발하고 상대적으로 낮은 경도를 가진 레진나노세라믹은 기구가 마모되는 대신 기구의 그릿에 밀링된 재료가 남는 현상이 발생한다고 하였다. 이때, 마모나 들러붙는 양은 재료와 기구의 종류, 다이아몬드의 그릿밀도에 따라 달라진다. 같은 저자의 추가적인 연구에서도 재료와 기구가 달라질수록 표면거칠기가 영향을 받는다는 것을 확인하였는데 피로시험을 진행하거나 밀링횟수가 많은 기구일수록 결과물의 표면거칠기는 거칠어질 수 있으나 30회 정도의 밀링은 크게 영향을 주지 않는다고 하였다.[7] 밀링용 다이아몬드 버의 사용횟수에 따른 표면거칠기를 보면, 다른 기구-재료 조합으로 같은 밀링길이, 부피를 얻더라도 기구의 마모가 다르기 때문에 제조업체는 기구의 수명을 밀링블록을 사용한 수보다는 제거된 밀링재료의 양 또는 기구경로의 길이로 표시하여 조절하는 것이 기구관리에 더 효율적이라고 제안하였다. 따라서 밀링 횟수 내지는 시간에 따라 밀링기구의 교체를 고려하는 것이 최종 결과물의 물성 측면에서 유리할 것을 예상할 수 있지만, 현재 대부분의 기공소는 특정 횟수나 시간을 규정하고 기구를 교체하는 것이 아니라, 결과물에 형태적 결함이나 변연부분파절이 발생하였을 때 기구를 교체하고 있으며, 대략 100 - 120회 가량 사용한 뒤에 기구를 교체하고 있는 것이 현실이다. 이상과 같은 결과를 요약하면 밀링 시 재료와 밀링환경이 기구에 미치는 영향, 재료와 기구가 결과물에 미치는 영향이 다양하며 블록 자체의 경도에 따라서도 달라지므로 재료에 따라 가장 적절한 조건들을 찾아서 적용해야 함을 알 수 있다.

밀링에 사용되는 지르코니아 블록의 종류는 매우 다양하며(Table 1), 상황에 따라 선택한 블록이 치과보철물 제작에 사용되고 있다. 지르코니아 블록은 밀링머신에 따라 디스크형, 직육면체형, 원통형 등 그 종류가 다양하며, 초창기에는 단색의 지르코니아 블록만 공급되었으나 다중 및 다층의 색을 지닌 블록이 점차 공급되고 있다. 지르코니아 블록은 소결수준에 따라서 3가지 유

Table 1. Various zirconia blocks

Types	Brand name	Manufacturer
3Y-TZP	Zpex	Tosoh, Tokyo, Japan
	inCoris TZI	Dentsply sirona, Charlotte, USA
	Prettau zirconia	Zirkonzahn, Taufers, Italy
4Y-PSZ	Katana HT	Kuraray Noritake, Tokyo, Japan
	Zpex 4	Tosoh, Tokyo, Japan
	IPS e.max ZirCAD MT	Ivoclar vivadent, Schaan, Liechtenstein
5Y-PSZ	Zpex Smile	Tosoh, Tokyo, Japan
	DD cube X^2	Dental Direkt, Spenge, Germany
	Prettau 4 anterior zirconia	Zirkonzahn, Taufers, Italy
Multilayer block	Katana STML	Kuraray Noritake, Tokyo, Japan
	ZR lucent	Shofu, Kyoto, Japan
	IPS e.max ZirCAD Prime	Ivoclar vivadent, Schaan, Liechtenstein

3Y-TZP: 3 mol% yttria stabilized tetragonal zirconia, 4Y-PSZ: 4 mol% yttria partially stabilized zirconia, 5Y-PSZ: 5 mol% yttria partially stabilized zirconia.

형으로 분류할 수 있다. 첫번째 그린상은 열가공 없이 단순히 세라믹 가루와 접합제가 압축된 상태(cold isostatic pressed state)를 의미한다. 소결이 진행되지 않았기 때문에 밀링 후 소결과정이 필요하며, 25%가량의 부피수축을 감안해야 한다. 작업이 용이하다는 장점이 있지만, 안정성이 떨어져 현재 시장에서 그린상을 사용하는 CAD-CAM 시스템은 드물다. 이러한 그린상 블록을 예비소결(pre-sintered)한 것을 화이트상이라고 하는데, 충분한 안정성을 가지면서도 작업이 용이한 장점을 가진다. 현재 사용하는 대부분의 블록이 이러한 예비소결을 거친 화이트블록이며, 최종소결 단계에서 20%가량의 부피 수축을 보상하기 위해 밀링은 최종 보철물보다 크게 제작한다. 밀링과정은 주수 하에 진행될 수 있지만 필수사항은 아니며, 주수 없이 카바이드 버만으로도 충분히 밀링이 가능하다.[10] 마지막으로 HIP (hot isostatic pressed)블록은 열간등가압압축이 완료된 것으로 이후의 소결과정이 필요없다. 따라서 밀링 시 요구되는 크기로 작업이 가능하며 추가적인 소결이 필요 없다는 장점이 있으나, 작업하기 어려운 높은 강도로 인해 밀링에 많은 시간이 소요되고, 냉각수와 함께 다이아몬드 버의 교체가 필요하다. 다이아몬드 버를 사용하더라도 잦은 마모로 인해 기구수명이 짧은 편이며, 비경제적이라는 치명적인 단점이 있다. 따라서 장단점이 분명하겠지만, 경제적인 이유로 HIP블록은 사용이 저조한 편이다.[11]

최근 등장한 멀티레이어블록(multilayer zirconia block)은 기존의 블록이 단일한 구조로만 되어 있어, 상아질과 법랑질과 같은 치아의 해부학적 구조를 재현하는데 한계가 있었던 점을 보완하기 위해 등장한 것으로 물성과 색조가 다른 다층으로 구성된 것이 특징이다. 초기에는 같은 세대의 지르코니아 분말에서 색조만을 변경시켜 동일한 굴곡강도를 지닌 레이어로 구성된 것이 특징이었으나, 이후에 3Y-TZP와 5Y-PSZ와 같이 다른 세대의 분말을 조합하여 각 세대 재료의 장점을 모두 취하도록 설계된 블록이 소개되고 있다.[12] 이러한 멀티레이어블록은 자연스러운 색조라는 장점을 가지지만, 일정하지 않은 구조로 인해 소결단계에서 결과물이 균일하게 수축되지 않을 가능성이 높아 최종 보철물에 대해 면밀히 평가할 필요가 있다. Rosentritt 등[13]은 3Y-TZP와 5Y-PSZ로 구성된 멀티레이어블록 3종을 이용하여 블록의 위치에 따른 3본 고정성보철물(3-unit fixed partial denture)의 기계적 물성을 평가하였는데, 블록의 상층부에서 유의하게 낮은 파절저항성을 가짐을 확인하였다. 이러한 결과는 블록의 상층부가 굴곡강도가 낮은 5Y-PSZ로 구성되기 때문이며, 이러한 결과를 적용하면 고정성보철물의 연결부(connector)가 블록의 중간층에 위치되도록 설정하는 것이 유리함을 알 수 있다. 한편 Suzuki 등[14]은 3본 고정성보철물에서 지르코니아 디자인, 시멘트 공간, 재료에 따른 적합도를 평가하였는데, 단일레이어블록에서 멀티레이어블록보다 좋은 적합도를 보였는데 그 원인으로 멀티레이어블록에서 레이어 별로 다소 상이한 구성성분으로 인해 소결과정에서 균일한 수축이 일어나지 못했던 점을 지적하였다. Ueda 등[15]은 멀티레이어블록을 이용하여 하부구조물(framework) 또는 전체보철물 형태로 제작했을 때의 적합도를 비교했는데, 상대적으로 부피가 작은 하부구조물 형태에서 유의하게 낮은 오차를 보였다고 하였다. 이것도 멀티레이어블록에서의 레이어 별로 다른 색상이 소결할 때 균등하지 못한 수축을 야기한 것이 원인이 될 것으로 보았고, Suzuki 등[14]과 같은 의견을 보였다. 따라서 단일치관이 아닌 고정성보철에 멀티레이어블록을 이용할 경우 세심한 조건설정이 필수적이라 사료된다.

이상의 내용을 정리하자면 소결단계에 따라 블록을 3종류로 나눌 수 있지만, 현재 치과에서 활용되는 블록은 대부분 화이트상 블록이며, 최근 멀티레이어블록이 자연스러운 해부학적 심미성 재현을 위해 많이 활용되고 있지만, 균일하지 않은 구성성분으로 인해 최종보철물의 적합도와 같은 요소에 대해 주의 깊은 평가가 필요하다고 할 수 있다.

소결과정

밀링을 거친 지르코니아는 고온의 소결로에서 장시간의 소결과정을 거쳐 치밀화된다. 이 때 미세구조의 변화를 통해 기계적 물성과 광학적 특성이 결정되므로, 소결과정에서의 변수 조절이 최종 지르코니아 보철물의 최종 완성도에 영향을 준다. 전통적인 소결변수로는 소결온도와 유지시간(holding time)이 있고 이를 조절하여 최종 보철물의 특성을 조절할 수 있어야 한다. 최근에는 소결로의 열생성 방식이 발전하여 열처리 과정의 속도가 빨라지게 되었다. 소결에 사용되는 소결로의 열생성 방법 중 가장 흔하게 사용되는 전통적 소결(conventional sintering)은 전기소결 방식으로 소결로 내부의 발열체(SiC, $MoSi_2$ 등)를 전기로 가열시키는 방식이다. 이러한 방식은 현재까지도 많은 기공소에서 활용되고 있는 방식

이지만, 느린 가열속도(10°C/min)로 인해 전체 소결과정에 장시간(8 - 12시간)이 소요된다는 치명적인 단점이 있다.[16] 최근 출시되는 대부분의 전기소결로는 기술의 발전으로 인해 고속소결(speed sintering)이 가능한 제품들이지만, 전통적 소결 수준의 열생성 과정도 선택할 수 있다. 한편 마이크로파(microwave)를 이용한 혼합가열 방식의 마이크로파 소결도 고속소결의 일종으로 소개되고 있으며, 짧은 소결시간과 입자성장 억제가 장점이라고 하고 있다.[17] 최근 전자기유도 및 자기장을 활용하는 초고속소결(super speed sintering)방법은 전용 소결로와 전용블록을 사용하면 분당 100 - 300°C의 가열속도로 30분이라는 짧은 시간 안에 전체 소결이 가능하다고 소개되고 있다.[18] 이처럼 다양한 소결방식이 제시되고 있는 것은 지르코니아 제작과정 중 가장 긴 시간을 차지하는 소결과정을 단축시키려는 노력의 결과이지만, 빨라진 소결방식이 초래하는 지르코니아 미세구조의 변화와 열충격에 대한 반응 및 지르코니아 보철물의 최종 완성도에 대해서도 연구할 필요가 있다. 따라서 소결온도, 유지시간, 소결방식(열처리 과정의 속도)에 따른 최종 보철물의 기계적 물성과 광학적 특성에 대해 평가하고자 한다.

먼저 소결온도에 관한 내용을 정리하면 다음과 같다. 지르코니아의 전통적인 소결방법은 전기소결로를 이용하여 밀링을 거친 지르코니아를 천천히 가열시켜 최종온도에서 장시간 유지한 후 서서히 냉각시키는 과정이다. 이러한 과정에서 알 수 있듯이 소결온도와 유지시간에 대한 변수는 최종 보철물의 특성에 직접적인 영향을 끼친다. 지르코니아에서 소결온도의 영향에 대해 Stawarczyk 등[19]은 3Y-TZP에서 소결온도의 증가는 입자크기의 증가와 함께 명암비(contrast ratio, CR) 감소를 유발하며, 굴곡강도는 1550°C 까지는 증가하지만, 1600°C 이상의 조건이 되면 유의하게 감소한다고 하였다. Grambow 등[20]은 4Y-PSZ와 5Y-PSZ를 이용하여 소결온도에 따른 영향을 비교했는데, 온도가 상승함에 따라 입자크기의 증가와 굴곡강도의 감소는 Stawarczyk 등[19]과 일치하지만 명암비에서는 유의한 차이가 없다고 하였다. Too 등[21]은 3Y-TZP, 4Y-PSZ, 5Y-PSZ에 대해서 소결온도에 따른 영향을 비교했고, 온도증가에 따른 입자크기의 증가는 모든 재료에서 관찰되었지만, 반투명성은 다른 결과를 보인다고 하였다. 3Y-TZP는 반투명성이 유의한 차이가 없는 반면, 4Y-PSZ와 5Y-PSZ에서는 온도에 따라 반투명성이 증가하였고, 굴곡강도에 대해선 모든 재료에서 유의한 차이가 없다고 하였다. 이상과 같이 소결온도의 증가는 입자크기의 증가라는 미세구조의 변화를 야기하며, 반투명성의 증가와 기계적 물성의 감소를 나타낼 것이라고 예측할 수 있다.

소결과정에서 유지시간은 전통적 소결 방법에서 대부분 2시간을 권장하며, 제조사에서는 유지시간이 이보다 부족하거나 과다할 때 부정적인 결과를 야기할 수 있음을 경고한다. Kilinc 등[22]은 유지시간을 2시간과 5시간으로 나누어 비교했는데, 입자크기와 굴곡강도는 유의한 차이가 없었지만, 반투명성에서는 5시간의 유지시간에서 장기간 안정성이 감소한다고 하였다. 반면 Ebeid 등[23]의 연구에서는 유지시간을 증가시켰을 때 입자크기와 반투명성이 증가했지만, 굴곡강도에 대해선 유의한 차이가 없다고 하였다. Durkan 등[24]은 두 종류의 지르코니아에 대해서 유지시간에 따른 반투명성과 색조를 평가했을 때, 유지시간에 따른 유의한 차이는 없었으며, 재료에 따라서만 상이한 결과를 나타낸다고 하였다.

이상의 연구들을 종합해 보면 소결온도와는 달리 유지시간의 변화는 일관된 결과를 나타내지 않음을 알 수 있다. 따라서 소결변수인 온도와 유지시간에 대해서 제조사 지시에 맞지 않게 임의로 변경하는 것은 수복물에 부정적인 영향을 줄 수 있으므로 가급적 제조사에서 권장한 설정을 따를 것이 추천된다고 할 수 있다.

현재까지 가장 많이 쓰이고 있는 소결방식은 전통적 소결법이다. 현재 대부분의 최신 소결로가 고속소결 기능을 제공하고 있음에도 이러한 방식을 고수하는 이유는 여러가지가 있겠지만, 가장 큰 이유는 고속소결로 인한 수복물의 물성저하를 우려하기 때문이다. 실제로 지르코니아는 다른 치과재료에 비해 열충격에 취약한 것으로 알려져 있으며,[25] 이로 인해서 대부분의 지르코니아 블록은 느린 가열속도로 장시간 소결하는 것이 적절하다고 한다. 그럼에도 불구하고 장시간이 필요한 것에 대한 부담으로 고속소결에 대한 연구는 계속되어, 고속소결이 가능한 지르코니아 블록과 그에 맞는 권장 고속소결 프로그램이 소개되고 있다. 이러한 블록들을 고속소결했을 때의 지르코니아 물성이 어떤지에 대한 연구가 필요하다. Kaizer 등[26]은 3Y-TZP (inCoris TZI, Dentsply Sirona)를 이용하여 제조사의 지시에 따른 소결방법으로 전통적 소결과 고속소결에 따른 미세구조와 반투명성 및 경도를 비교하였다. 일반적으로 입자가 커지면 기계적 물성은 감소하고 입자가 작게 치밀화되면 기계적 물성은 증가한다. 짧은 소결시간으로 인해 고속소결을 했을 때 입자성장이 제한된 것이 관찰되었지만, 반투명성은 유

의한 차이가 없었으나 비커스 경도는 오히려 감소했다. Yang 등[27]은 4종류의 3Y-TZP와 1종류의 5Y-PSZ에 대해 연구를 진행했고, 3Y-TZP에서 고속소결 시 입자성장 제한을 보인 것에 대해서는 Kaizer 등[26]과 일치하지만, 한 종류의 3Y-TZP에서만 반투명성의 감소를 보였으며 굴곡강도는 소결방식에 따른 차이가 없다고 하였다. 이러한 결과는 Asaad와 Aboushahba[28]의 연구와도 일치한다.

정리하면 고속소결을 시행했을 때 입자성장은 제한되지만, 기계적 물성과 광학적 특성에 대해서는 일정한 양상을 보이지 않았다. 그럼에도 고속소결을 시행할 때 어느 한 요소에 대해 부정적인 영향을 피할 수 없다는 것은 분명하므로 프로그램 사용에 주의가 필요하다.

한편 기존 소결의 단점을 보완하기 위해 등장한 마이크로파소결의 경우도 고속소결의 일종으로 볼 수 있다. 발열체의 가열을 통해 열전도방식으로 소결체를 가열하는 기존 전기소결로는 열충격에 취약한 지르코니아에 느린 가열속도를 적용할 수 밖에 없지만, 외부의 열감지기(susceptor)를 통한 발열과 내부의 마이크로파를 통한 직접 가열로 혼합가열이 진행되는 마이크로파 소결은 에너지 절감과 소결시간의 단축뿐 아니라 입자성장도 효과적으로 억제하는 장점을 보인다. 하지만 현재 마이크로파 소결로를 사용하는 기공소는 드문데 이는 미세한 온도조절의 어려움과 그에 따른 수복물의 품질저하로 보편화에 어려움을 겪은 탓이다.[29] 이를 나타내듯 마이크로파 소결을 다룬 문헌은 많지 않다. Monaco 등[30]은 마이크로파 소결이 3Y-TZP를 충분히 소결시킬 수 있는지에 대해 미세구조적 평가를 진행하여, 기존소결법에 비해 더 낮은 온도와 짧은 시간에도 충분한 밀도를 가진 구조를 얻을 수 있음을 보여주었다. Ramesh 등[31]의 연구도 비슷한 결과를 보이며, 같은 시간 소결을 진행했을 때 마이크로파 소결에서 더 높은 기계적 물성을 나타낸다고 하였다. 이는 전기소결에 비해 마이크로파 소결에서 충분한 치밀화를 얻을 수 있음을 의미한다. 한편 Luz 등[17]은 마이크로파 소결을 진행한 3Y-TZP에서 기포형성이 관찰되며, 이로 인해 반투명성이 낮아진다고 보고하였다.

정리하면 마이크로파 소결이 지르코니아에 적용될 수 있는지에 대해선 여전히 회의적이다. 하지만 현재 시장에서 찾을 수 있는 대부분의 지르코니아 블록들은 전기소결을 기준으로 소결 프로그램이 제시되어 있기 때문에 기공소에서 마이크로파 소결을 기피하는 가장 큰 이유가 된 것으로 보인다. 따라서 지르코니아 블록 제조사가 적절한 마이크로파 소결에 대한 프로그램을 제공하지 않는다면 마이크로파 소결의 보편화는 향후에도 불투명할 것으로 전망된다.

최근 구강스캐너와 CAD-CAM 기술의 발전으로 지르코니아 수복물의 당일 장착이 가능해진데 큰 공헌을 한 것은 초고속소결의 등장일 것이다. 이러한 초고속소결로는 전용블록만 사용할 것을 권장하고 있다. 초고속소결용 블록이 다양하게 소개되고 있지만, 어떠한 요소가 초고속소결을 가능하게 한 것인지는 제조사에서 공개하고 있지 않아 연구에 부족함이 있다. 그럼에도 불구하고 많은 문헌들에서 초고속소결에 따른 지르코니아의 물성에 대해 연구를 진행했고, 본 문헌고찰에서는 초고속소결에 따른 기계적 물성과 적합도에 대해 고찰해 보았다.

Cokic 등[32]은 3Y-TZP와 5Y-PSZ에서 소결방법에 따른 기계적 물성을 비교했는데, 초고속소결을 시행해도 3Y-TZP는 입자크기에 큰 차이가 없었고 굴곡강도와 비커스경도는 초고속소결에서 증가하는 결과를 보였다. 반면 5Y-PSZ에서는 초고속소결에 따라 입자크기의 증가와 기계적 물성의 감소가 나타났는데, 소결온도의 차이가 크지 않았음에도 입자크기에 큰 변화가 있었던 것에 대해서는 초고속소결용 블록이 3%가량 더 치밀하게 제작되어 소결과정에서 입자성장이 활발하게 이루어졌고, 이러한 입자크기의 변화가 기계적 물성에 영향을 준 것으로 해석하였다. 이와는 반대로 Liu 등[33]의 연구에서는 동일한 5Y-PSZ의 초고속소결에서 입자크기 감소와 함께 굴곡강도의 증가가 나타난다고 보고하였다. 같은 재료(Katana STML, Kuraray Noritake)를 사용했음에도 다른 결과를 보인 것에 대해서는 초고속소결 프로그램에서 30분 프로그램을 사용한 연구와 18분 프로그램을 사용하는 연구로 프로그램이 달랐던 것이 원인으로 보인다. Michailova 등[12]은 같은 5Y-PSZ 재료에 대해서 크라운 시편을 제작하여 파절하중과 마모양상을 비교하였을 때, 유의한 차이는 관찰되지 않았다고 하였다. 종합하면 초고속소결에 따른 기계적 물성은 일정한 경향을 나타내기보다는 다소 상반되는 결과를 나타낸다고 할 수 있다.

적합도는 보철물의 장기수명에 직접적인 영향을 주는 요소로, 소결과정을 통해 20% 가량의 부피수축이 동반되는 지르코니아 수복물의 경우 적합도에 관한 평가가 필수적이다. Ahmed 등[34]은 소결방법에 따른 지르코니아 보철물의 적합도에 대해 처음으로 평가하였고, 고속소결에서 더 큰 변연간격(marginal gap)을 보이는 것을 보고하였다. 이러한 결과가 나타난 이유에 대해선 고속소결에서는 고온에서 소결이 진행되어 지르코니아 보철물의

크리프(creep) 비율이 증가하기 때문이라고 해석하였다. Nakamura 등[35]은 기존 소결과 초고속소결에 따른 지르코니아 크라운의 내면과 변연적합도에 대해 평가를 진행하였는데, 변연적합도는 유의한 차이가 없었지만, 내면적합도에서 초고속소결 시 유의하게 큰 내면간격(internal gap)이 관찰된다고 하였다. Elisa 등[36]은 3본 고정성 보철물을 이용하여 초고속소결에 따른 적합도 평가를 시행하였고, 앞선 연구들과 달리 초고속소결에서 더 좋은 적합도가 나타난다고 보고하였다.

종합해 보면 예상과 달리 초고속소결이 기계적 물성이나 적합도에 대해서 뚜렷한 긍정적 결과나 부정적 결과를 내린다고 단언할 수 없다. 하지만 제조사에서 전용블록의 기술적 차이를 공개하지 않기 때문에 정교한 실험설계가 불가능한 상황으로 일관적인 실험의 결과를 도출하기 어렵다. 따라서 초고속소결로의 사용은 보다 신중하게 결정해야한다.

결론

지르코니아 보철물의 밀링과정과 소결과정은 최종 보철물의 물성에 영향을 끼치는 중요한 과정이다. 밀링머신은 축구조에 따라 나눌 수 있지만 현재는 대부분의 기공소에서 5축의 만능 밀링머신을 사용하고 있어 밀링머신에 따른 정밀성의 차이는 크지 않으며, 이를 어떻게 활용하는지가 중요하다. 밀링방법에는 첨점가공과 측면가공이 있고, 가공방식이 변화할 때 보철물의 표면거칠기가 변화하기에 주의가 필요하다. 밀링기구는 소모품으로서 사용기간과 횟수가 증가할수록 절삭능력의 감소와 보철물의 변연부위파절을 야기할 수 있기에 교체시기에를 체계적으로 관리하는 것이 필요하다. 지르코니아 밀링블록의 경우 소결 수준에 따라 그린블록, 화이트블록, HIP블록으로 나뉘는데, 대부분 절삭효율이 좋은 화이트블록이 이용되고 있으며, 심미성을 재현하기 좋은 다층구조블록도 이용되는데, 균일하지 않은 구성성분으로 인해 물성이 달라질 수 있어 주의 깊은 평가가 필요하다.

소결방식은 전통적 소결법, 고속소결법, 마이크로파 소결법, 초고속소결법으로 나눌 수 있다. 고속소결을 했을 때 입자성장은 제한되었지만, 기계적 물성과 광학적 특성에 대해서는 일정한 양상을 보이지 않은 점은 유의해야한다. 마이크로파 소결 역시 입자성장을 제한시킬 수 있지만, 보편화되기에는 한계가 있다. 초고속소결은 현재 전용 블록과 전용 소결로에 한해 사용되고 있으나, 어떠한 요소가 초고속소결을 가능하게 하는지를 제조사에서 공개하고 있지 않아 연구가 부족하고, 기계적 물성이나 적합도에 대한 추가적 연구가 필요하다. 소결변수 중, 온도의 증가는 입자크기의 증가를 통해 반투명성의 증가와 기계적 물성의 감소를 나타내며, 유지시간의 변화는 온도에 비해 일관된 변화를 나타내지 않았지만, 이러한 소결변수의 변화가 곧 최종 보철물의 결과에 큰 영향을 끼칠 수 있으며, 가급적 제조사에서 권장한 설정을 따를 것이 추천된다. 이상과 같이 제작과정의 다양한 요소들이 최종 보철물에 영향을 끼칠 수 있으므로 제작과정에서 이러한 요소를 잘 고려하는 것이 필요하다고 사료된다.

ORCID

Kiun Lee https://orcid.org/0000-0002-4486-0163
Kyung-Ho Ko https://orcid.org/0000-0002-1260-8844
Yoon-Hyuk Huh https://orcid.org/0000-0003-4072-5199
Chan-Jin Park https://orcid.org/0000-0003-4734-214X
Lee-Ra Cho https://orcid.org/0000-0003-3989-2870

References

1. Zhang Y, Lawn BR. Novel zirconia materials in dentistry. J Dent Res 2018;97:140-7.
2. Lebon N, Tapie L, Vennat E. Influence of milling tool and prosthetic materials on roughness of the dental CAD CAM prostheses in end milling mode. Appl Sci 2020;10:2238.
3. Ahmed WM, Troczynski T, McCullagh AP, Wyatt CCL, Carvalho RM. The influence of altering sintering protocols on the optical and mechanical properties of zirconia: A review. J Esthet Restor Dent 2019;31:423-30.
4. Schweiger J, Kieschnick A. CAD/CAM in digital dentistry. Seoul; DaehanNarae; 2017. p. 91-108.
5. Bosch G, Ender A, Mehl A. A 3-dimensional accuracy analysis of chairside CAD/CAM milling processes. J Prosthet Dent 2014;112:1425-31.
6. Sadilek M, Poruba Z, Čepová L, Šajgalík M. Increasing the accuracy of free-form surface multiaxis milling. Materials (Basel) 2020;14:25.
7. Lebon N, Tapie L, Vennat E, Mawussi B. A computer-aided tool to predict dental crown prosthesis

surface integrity after milling. Comput Aided Des Appl 2019;16:894-903.
8. Benoit A, Issaoui H, Lebon N. Impact of machining process on the flexural strength of CAD/CAM blocks for dental restorations. Comput Methods Biomech Biomed Engin 2020;23:S31-2.
9. Lebon N, Tapie L, Vennat E, Mawussi B. Influence of CAD/CAM tool and material on tool wear and roughness of dental prostheses after milling. J Prosthet Dent 2015;114:236-47.
10. Burgess JO. Zirconia: The material, its evolution, and composition. Compend Contin Educ Dent 2018;39:4-8.
11. Saridag S, Tak O, Alniacik G. Basic properties and types of zirconia: An overview. World J Stomatol 2013;2:40-7.
12. Michailova M, Elsayed A, Fabel G, Edelhoff D, Zylla IM, Stawarczyk B. Comparison between novel strength-gradient and color-gradient multilayered zirconia using conventional and high-speed sintering. J Mech Behav Biomed Mater 2020;111:103977.
13. Rosentritt M, Preis V, Schmid A, Strasser T. Multilayer zirconia: Influence of positioning within blank and sintering conditions on the in vitro performance of 3-unit fixed partial dentures. J Prosthet Dent 2022;127:141-5.
14. Suzuki S, Katsuta Y, Ueda K, Watanabe F. Marginal and internal fit of three-unit zirconia fixed dental prostheses: Effects of prosthesis design, cement space, and zirconia type. J Prosthodont Res 2020;64:460-7.
15. Ueda K, Watanabe F, Katsuta Y, Seto M, Ueno D, Hiroyasu K, Suzuki S, Erdelt K, Güth JF. Marginal and internal fit of three-unit fixed dental prostheses fabricated from translucent multicolored zirconia: Framework versus complete contour design. J Prosthet Dent 2021;125:340.e1-6.
16. Oghbaei M, Mirzaee O. Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications. J Alloys Compounds 2010; 494:175-89.
17. Luz JN, Kaizer MDR, Ramos NC, Anami LC, Thompson VP, Saavedra G, Zhang Y. Novel speed sintered zirconia by microwave technology. Dent Mater 2021;37:875-81.
18. Lawson NC, Maharishi A. Strength and translucency of zirconia after high-speed sintering. J Esthet Restor Dent 2020;32:219-25.
19. Stawarczyk B, Ozcan M, Hallmann L, Ender A, Mehl A, Hammerlet CH. The effect of zirconia sintering temperature on flexural strength, grain size, and contrast ratio. Clin Oral Investig 2013;17:269-74.
20. Grambow J, Wille S, Kern M. Impact of changes in sintering temperatures on characteristics of 4YSZ and 5YSZ. J Mech Behav Biomed Mater 2021;120: 104586.
21. Too TDC, Inokoshi M, Nozaki K, Shimizubata M, Nakai H, Liu H, Minakuchi S. Influence of sintering conditions on translucency, biaxial flexural strength, microstructure, and low-temperature degradation of highly translucent dental zirconia. Dent Mater J 2021;40:1320-8.
22. Kilinc H, Sanal FA. Effect of sintering and aging processes on the mechanical and optical properties of translucent zirconia. J Prosthet Dent 2021;126: 129.e1-7.
23. Ebeid K, Wille S, Hamdy A, Salah T, El-Etreby A, Kern M. Effect of changes in sintering parameters on monolithic translucent zirconia. Dent Mater 2014;30:e419-24.
24. Durkan R, Şimşek H, Deste Gökay G, Yilmaz B. Effects of sintering time on translucency and color of translucent zirconia ceramics. J Esthet Restor Dent 2021;33:654-9.
25. Sato T, Ishitsuka M, Shimada M. Thermal shock resistance of ZrO2 based ceramics. Mater Des 1988; 9:204-12.
26. Kaizer MR, Gierthmuehlen PC, Dos Santos MB, Cava SS, Zhang Y. Speed sintering translucent zirconia for chairside one-visit dental restorations: Optical, mechanical, and wear characteristics. Ceram Int 2017;43:10999-1005.
27. Yang CC, Ding SJ, Lin TH, Yan M. Mechanical and optical properties evaluation of rapid sintered dental zirconia. Ceram Int 2020;46:26668-74.
28. Asaad R, Aboushahba ME. Influence of different sintering protocols on translucency and fracture resistance of monolithic zirconia crowns. Egypt Dent J 2020;66:2649-60.

29. Kim KB, Kim JH, Lee KW. The influence of microwave sintering process on the adaptation of CAD/CAM zirconia core. J Dent Rehabil Appl Sci 2009;25:95-107.
30. Monaco C, Prete F, Leonelli C, Esposito L, Tucci A. Microstructural study of microwave sintered zirconia for dental applications. Ceram Int 2015;41:1255-61.
31. Ramesh S, Zulkifli NI, Tan CY, Wong YH, Tarlochan F, Ramesh S, Teng W, Sopyan I, Bang LT, Sarhan AAD. Comparison between microwave and conventional sintering on the properties and microstructural evolution of tetragonal zirconia. Ceram Int 2018;44:8922-7.
32. Cokic SM, Vleugels J, Van Meerbeek B, Camargo B, Willems E, Li M, Zhang F. Mechanical properties, aging stability and translucency of speed-sintered zirconia for chairside restorations. Dent Mater 2020;36:959-72.
33. Liu H, Inokoshi M, Nozaki K, Shimizubata M, Nakai H, Cho Too TD, Minakuchi S. Influence of high-speed sintering protocols on translucency, mechanical properties, microstructure, crystallography, and low-temperature degradation of highly translucent zirconia. Dent Mater 2022;38:451-68.
34. Ahmed WM, Abdallah MN, McCullagh AP, Wyatt CCL, Troczynski T, Carvalho RM. Marginal discrepancies of monolithic zirconia crowns: The influence of preparation designs and sintering techniques. J Prosthodont 2019;28:288-98.
35. Nakamura T, Nakano Y, Usami H, Okamura S, Wakabayashi K, Yatani H. In vitro investigation of fracture load and aging resistance of high-speed sintered monolithic tooth-borne zirconia crowns. J Prosthodont Res 2020;64:182-7.
36. Elisa Kauling A, Güth JF, Erdelt K, Edelhoff D, Keul C. Influence of speed sintering on the fit and fracture strength of 3-unit monolithic zirconia fixed partial dentures. J Prosthet Dent 2020;124:380-6.

밀링과 소결과정이 지르코니아 보철물의 완성도에 미치는 영향에 관한 문헌고찰

이기운 대학원생, **고경호** 부교수, **허윤혁** 부교수, **박찬진** 교수, **조리라*** 교수
강릉원주대학교 치과대학 보철학교실 및 구강과학연구소

지르코니아는 다양한 공정과정을 거쳐서 제작되며, 각각의 요소는 최종 보철물의 물성에 영향을 줄 수 있다. 특히 밀링과정과 소결과정이 모두 지르코니아 보철물의 최종 완성도(integrity)에 영향을 미칠 수 있다. 밀링머신은 대부분 초정밀 5축 가공방식을 채택하고 있으며 어떤 방식을 사용하고 밀링기구를 어떻게 관리하는가에 따라서도 결과가 달라진다. 밀링블록은 절삭의 효율성과 심미재현성에 따라 선택하는데 물성의 변화를 야기할 수 있음은 주의해야 한다. 소결방식은 입자성장과 광학적 특성에 영향을 미칠 수 있는데 속도를 조절하는 최근의 방식에 대해서는 추가적인 연구가 동반되어야 정확한 평가가 이루어질 수 있다. 소결온도 뿐 아니라 온도 유지시간도 최종결과물에 영향을 줄 수 있다.

(구강회복응용과학지 2022;38(3):127-37)

주요어: 밀링블록; 밀링머신; 밀링방법; 소결; 고속소결

*교신저자: 조리라
(25457)강원도 강릉시 죽헌길 7 강릉원주대학교 치과대학 치과보철학교실 및 구강과학연구소
Tel: 033-640-3153 | Fax: 033-640-3103 | E-mail: lila@gwnu.ac.kr
접수일: 2022년 7월 5일 | 수정일: 2022년 8월 3일 | 채택일: 2022년 8월 27일