https://doi.org/10.14368/jdras.2026.42.3.153
ISSN 2384-4353 eISSN 2384-4272

Review Article

Zirconia design, milling, and sintering process affecting the fit of restorations

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

Zirconia restorations are produced through sequential CAD design, milling, sintering, and cementation procedures. Each step can contribute to the marginal and internal fit of the definitive restoration. This narrative review summarizes the factors affecting the fit of zirconia restorations according to the design, milling, and sintering stages, based on the selected literature. The reported marginal gaps of zirconia crowns and fixed dental prostheses are generally within clinically acceptable ranges, although no universal threshold has been established. Cement spacer settings and restoration geometry are critical design factors. Milling-related variables include the zirconia block composition, bur diameter and wear, number of burs, number of milling axes, wet or dry machining mode, milling speed, and tool path strategy. During sintering, material-dependent shrinkage, layered structures, disk position, and sintering protocols may interact and induce dimensional changes or distortion. Because 3Y-, 4Y-, 5Y-, and multilayer zirconia respond differently to rapid or high-speed sintering, process parameters should be optimized according to the material and restoration form rather than applied as universal defaults. **(J Dent Rehabil Appl Sci 2026;42(3):153-65)**

Key words: zirconia; fit; CAD/CAM; milling; sintering

서론

지르코니아는 높은 강도, 생체적합성 및 CAD/CAM (Computer-aided design/Computer-aided manufacturing) 가공성으로 인해 단일관과 고정성 보철물에 널리 사용되며, 현재는 3 mol% yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal (3Y-TZP), 4 mol% 및 5 mol% yttria-partially stabilized zirconia (4Y-PSZ와 5Y-PSZ), 그리고 다층 구조 지르코니아 등 다양한 조성으로 제공된다. 이트리아 함량과 층별 조성의 차이는 결정상 구성, 가공성 및 소결 수축 거동을 변화시키므로, 동일한 설계와 소결 조건에서도 재료에 따라 최종 치수 변화와 변연 및 내부 적합도가 달라질 수 있다.[1-3] 따라서 지르코니아의 조성은 광학적·기계적 특성뿐 아니라 최종 적합도에 영향을 주는 공정 변수로 고려해야 한다.

적합도는 지르코니아 보철물의 장기 예후를 결정하는 핵심 요소이다. 변연 간격이 크면 시멘트 용해, 미세누출, 이차우식, 치수 및 치주 문제의 위험이 증가하고, 내부 간격이 과도하거나 불균일하면 유지와 저항, 교합력 분산 및 파절 저항성에 불리할 수 있다.[4-7] 적합도 평가는 변연 간격, 수직 변연 부적합, 수평 변연 부적합, 절대 변연 부적합 및 내부 간격 등 다양한 용어와 측정법으로 이루어지며, 연구 간 측정 위치와 방법이 달라 직접 비교에는 주의가 필요하다.[5-8] 임상적으로 허용 가능한 변연 간격에 대한 기준은 아직 합의되어 있지 않다. 일부 문헌에서 40 μm 전후의 작은 간격이 언급되기도 하지만, 이는 보편

*Correspondence to: Chan-Jin Park
Professor, Department of Prosthodontics & Research Institute of Oral Science, College of Dentistry, Kangwon National University, Jukheongil 7, Gangneung, 25457, Republic of Korea
Tel: +82-33-640-3153, Fax: + 82-33-640-3103, E-mail: doctorcj@kangwon.ac.kr
Received: June 30, 2026/Last Revision: July 22, 2026/Accepted: July 28, 2026

Copyright© 2026 The Korean Academy of Stomatognathic Function and Occlusion.
©It is identical to Creative Commons Non-Commercial License.

적인 임상적 허용 상한으로 확립된 기준은 아니며, 일반적으로는 100 - 120 μm가 임상적 허용 상한으로 인용된다.[5-7,29,31]

지르코니아 수복물의 적합도 문제는 어느 한 단계의 오류로만 설명되기 어렵다. 설계 단계에서 설정한 시멘트 공간이 실제 밀링과 소결 후 간격으로 그대로 재현되지 않을 수 있고,[9] 밀링 단계에서는 밀링 버(bur)의 직경과 마모, 공구 경로, 건식 및 습식 방식, 장비 축수 및 재료 경도가 영향을 줄 수 있다.[10-19] 소결 단계에서는 재료 조성, 디스크 내 위치, 소결 속도와 온도, 수복물의 길이 및 형태가 수축과 변형을 유발할 수 있다.[2,3,20-28] 즉, 보철물의 디자인, 밀링 및 소결은 순차적으로 진행되며, 각 단계에서 발생한 오차가 누적되어 최종 적합도에 유기적으로 영향을 미친다고 할 수 있다(Fig. 1).

이에 본 고찰에서는 지르코니아 수복물의 적합도에 영향을 미치는 요인을 디자인, 밀링 및 소결의 세 단계로 구분하여 검토하였다. 디자인 단계에서는 시멘트 공간과 수복물의 기하학적 형태를, 밀링 단계에서는 지르코니아 블록과 절삭 기구 및 가공 조건을, 소결 단계에서는 재료별 수축 특성과 소결 프로토콜을 중심으로 문헌을 고찰하고, 각 단계에서 고려해야 할 임상적 및 기공학적 관리 방안을 제시하고자 하였다.

문헌 검색 및 선정 방법

본 서술적 문헌고찰을 위해 PubMed를 이용하여 2026년 5월 14일까지 문헌을 검색하였다. 주요 검색어는 "zirconia," "fit," "marginal gap," "internal gap," "cement space," "design," "milling," "bur," "sintering," 및 "shrinkage"였으며, 검색어를 AND 또는 OR로 조합하였다. 지르코니아 수복물의 변연 또는 내부 적합도와 이를 직접적으로 좌우하는 디자인, 밀링 및 소결 변수를 평가한 원저와 관련 체계적 또는 범위 문헌고찰을 포함하였다. 지르코니아 이외의 재료만을 평가한 연구는 원칙적으로 제외하였으나, 밀링 기구나 가공 원리를 설명하는 데 필요한 경우 제한적으로 포함하고 그 적용 한계를 본문에 명시하였다. 표면거칠기, 파절강도 및 광학적 성질은 적합도와 동일한 결과변수가 아니므로, 제작 조건 선택의 상충관계를 설명하는 보조적 결과로만 제시하였다. 본 고찰은 서술적 문헌고찰로서 정형화된 비뚤림 위험 평가(risk-of-bias assessment)나 메타분석(meta-analysis)은 시행하지 않았다.

문헌 고찰

디자인

디자인 및 공정 변수의 영향을 해석하기에 앞서, 문헌상 보고된 적합도 기준과 부위별 평균값을 먼저 확인할 필요가 있다. Table 1과 같이 전통적으로 변연 간격 120 μm가 자주 사용되며, 최근 연구에서는 100 μm 이하 또는 75 - 90 μm 이하와 같은 더 엄격한 기준도 제시된다.[5-7,29]



Fig. 1. Schematic overview of the design, milling, and sintering processes and their cumulative and interrelated effects on the fit of zirconia restorations.

Table 1. Clinical acceptability thresholds and representative fit values reported for zirconia restorations

Evidence category	Restoration or outcome	Reported value	Interpretation
Proposed clinical threshold	Marginal gap	120 μm commonly cited; stricter thresholds of ≤ 100 μm or 75 - 90 μm[5-7,29]	No consensus; method- and cementation-dependent
Systematic review result	Zirconia single crowns and multi-unit fixed dental prostheses	Marginal/internal/total gaps: 83/111/101 μm; corrected manufacturing values: 59/61/53 μm[8]	Fit and manufacturing accuracy are distinct outcomes
Systematic review result	CAD/CAM-fabricated ceramic single crowns	Mean marginal gap: 78.9 ± 28.6 μm[5]	Pooled ceramic materials; high heterogeneity
Systematic review result	Zirconia single crowns	Mean marginal gap: 69.4 ± 34.2 μm[5]	Subgroup estimate; not a universal benchmark

CAD/CAM: computer-aided design/computer-aided manufacturing.

Svanborg[8]의 체계적 문헌고찰에서는 지르코니아 단일관과 다수 치아의 고정성 보철물의 평균 변연 간격, 내부 간격 및 전체 간격이 각각 83, 111 및 101 μm로 보고되었으며, 사전에 설정된 시멘트 공간값을 차감하여 산출한 제조 정확도는 약 53 - 61 μm였다.

Dudley와 Farook[5]의 2025년 체계적 문헌고찰은 합착 전 세라믹 단일관을 대상으로 하였으며, CAD/CAM으로 제작된 세라믹 단일관의 평균 변연 간격은 78.9 ± 28.6 μm였다. 재료별 분석에서 지르코니아 단일관의 평균 변연 간격은 69.4 ± 34.2 μm로 보고되었다. 이러한 결과에 따르면 지르코니아 단일관의 평균 변연 간격은 문헌에서 제시된 여러 기준값과 비교할 때 대체로 낮은 수준이었으나, 임상적 허용 기준이 합의되지 않았으므로 이를 보편적으로 허용 가능한 값으로 단정하기는 어렵다.[5-7]

1. 시멘트 공간

시멘트 공간(cement space)은 보철물 내면과 지대치 사이에 시멘트층을 확보하기 위한 디자인상 지표이지만, 단순히 값을 크게 설정한다고 항상 적합도가 개선되는 것은 아니다. 시멘트 공간이 너무 작으면 내면의 조기 접촉, 축벽 마찰, 시멘트 배출 저항 및 수압(hydrodynamic pressure)으로 인해 보철물 안착이 방해된다.[30,32] 이로 인해 보철물이 완전히 안착되지 않으면 수직 변연 간격이 증가하여 변연 적합도가 저하될 수 있다.[30,32] 반대로 시멘트 공간을 적절히 증가시키면 축벽 마찰과 시멘트 배출 저항이 감소하여 안착과 변연 적합도가 개선될 수 있다. 그러나 시멘트 공간이 과도하면 실제 시멘트층과 내부 간격이 증가하여 내부 지지, 파절 저항성 및 유지력에 불리할 수 있으며, 변연 적합도의 추가적인 개선도 제한적일 수 있다.[32-35] 또한 CAD 소프트웨어에서 설정한 시멘트 공간값과 실제 밀링 후 형성된 내부 간격은 일치하지 않을 수 있으며, 특히 교합면은 해부학적 형태가 복잡하고 버 직경이 미세 형상을 완전히 재현하지 못해 설정값보다 큰 간격이 발생하기 쉽다.[9,30]

그러나 단일관에서 시멘트 공간 설정이 적합도에 미치는 영향은 연구마다 일관되지 않았다. Kale 등은 변연부 시멘트 공간을 25 μm로 고정하고 마무리선 1 mm 상방부터 내부 시멘트 공간을 30, 40 및 50 μm로 설정하였을 때 평균 수직 변연 부적합이 각각 85, 68 및 53 μm로 감소했다고 보고하였다.[32] 반면 Alkhallagi 등[34]은 30, 50 및 70 μm의 시멘트 공간을 적용한 단일구조 지르코니아 단일관 사이에서 수직 변연 부적합의 유의한 차이를 관찰하지 못하였다. Singh과 Kulkarni[35]도 60 μm와 80 μm 설정 사이에 유의한 차이가 없다고 보고하였다. 이러한 차이는 수복물의 재료와 형태뿐 아니라, 변연부 시멘트 공간 설정, 내부 시멘트 공간의 적용 시작 위치, 사용된 CAD/CAM 시스템 및 적합도 평가 방법의 차이와 관련될 수 있다.

적합도는 시멘트 공간 설정값뿐 아니라 후처리 및 합착 단계의 영향도 받을 수 있다. Kale 등[29]은 변연부 25 μm와 내부 50 μm의 시멘트 공간을 적용한 단일구조 지르코니아 단일관에서 평균 수직 변연 부적합이 소결 후와 글레이징 후 각각 38 μm로 유사했으나, 합착 후에는 60 μm로 유의하게 증가했다고 보고하였다. 반면 Singh과 Kulkarni[35]는 60 μm와 80 μm 설정 모두에서 글레이징 및 합착 후 변연 부적합이 증가했다고 보고하였다. 따라서 연구 결과를 비교할 때에는 소결 후, 글레이징 후 또

는 합착 후 중 어느 단계에서 적합도를 평가하였는지 구분할 필요가 있다.

교합면 시멘트 공간은 축면 시멘트 공간과 별도로 평가되어야 한다. Ibrahim 등[30]은 마무리선 1 mm 상방부터 적용되는 방사상 시멘트 공간을 80 μm로 고정하고 교합면 시멘트 공간을 80, 40 및 0 μm로 설정하였다. 교합면 설정값이 40 μm와 0 μm인 군은 80 μm 군보다 작은 변연 간격을 보였으며, 0 μm 군은 평가된 모든 부위에서 가장 작은 내부 간격을 나타냈다. 이러한 결과는 교합면의 해부학적 형태와 밀링 과정에서 설정값보다 큰 공간이 형성될 수 있으며, 교합면 시멘트 공간을 축면과 별도로 조절할 필요가 있음을 보여준다. 다만 이 연구는 하나의 구강스캐너, CAD 소프트웨어 및 밀링 장비를 사용한 실험실 연구이므로, 0 - 40 μm를 모든 시스템에 적용할 수 있는 일반적인 권장값으로 해석해서는 안 된다.

다수 치아의 고정성 보철물에 관한 근거는 단일관과 구분하여 해석해야 한다. Morsy 등[33]은 3본 및 4본 지르코니아 프레임워크에서 마무리선 1 mm 상방부터 30, 50 및 80 μm의 시멘트 공간을 적용하였다. 해당 연구 조건에서는 50 μm 군이 가장 우수한 적합도를 보였으며, 50 μm와 80 μm 군의 파절강도는 유사하고 모두 30 μm 군보다 높았다. 그러나 이 결과는 특정 재료와 CAD/CAM 시스템으로 제작된 프레임워크에 관한 것으로, 단일관이나 다른 지르코니아 시스템에 직접 일반화하기 어렵다.

종합하면, 지르코니아 수복물에 적용할 수 있는 단일한 시멘트 공간 권장값은 확립되어 있지 않다. 시멘트 공간의 효과는 설정값 자체뿐 아니라 적용 부위, 수복물 형태, 지대치 간 거리와 보철물 길이, CAD/CAM 시스템 및 소결·글레이징·합착과 같은 평가 단계에 따라 달라질 수 있다. 따라서 변연부, 축면 및 교합면의 설정값을 구분하여 기록하고, 사용 재료와 제작 시스템에 따라 실제 적합도를 확인하는 것이 필요하다. 문헌에서 평가된 수복물 유형별 시멘트 공간 설정과 주요 결과를 Table 2에 정리하였다.

2. 소결 수축을 고려한 디자인

대부분의 지르코니아 수복물은 예비소결 블록을 밀링한 후 최종 소결을 통해 치밀화되며, 이 과정에서 약 17 - 21% 수준의 선형 수축 또는 문헌상 약 20 - 30%로 표현되는 큰 수축이 발생한다.[3,8,22] CAD/CAM 소프트웨어는 수축을 고려하여 보철물을 확대 설계하지만, 실제 수축은 재료의 균질성, 디스크 위치, 수복물의 부피와 길이, 지르코니아 프레임워크의 만곡도, 다층 구조에 따라 균일하지 않을 수 있다.[3,27,28,36,37] 특히 장경간(long-span) 고정성 보철물은 단일관보다 수축 누적과 굽힘에 취약하다.

Kohorst 등[36]은 서로 다른 CAD/CAM 시스템으로 제작한 4본 지르코니아 고정성 보철물의 변연 적합도를 비교하였다. 완전 소결 및 열간등방압가압(hot isostatic pressing, HIP) 처리된 지르코니아를 최종 크기로 직접 밀링한 군의 평균 절대 변연 부적합은 58 μm였던 반면, 예비소결 지르코니아를 확대 밀링한 후 최종 소결한 세 군에서는 183 - 206 μm로 나타났다. 완전 소결 지르코니아는 후속 소결수축이 발생하지 않아 적합도 측면에서 유리할 수 있지만, 이 연구에서는 각 군에 서로 다른 CAD/CAM 시스템이 사용되었으므로 관찰된 차이를 지르코니아의 소결 상태에만 귀속하기는 어렵다. 또한 완

Table 2. Cement space settings and main outcomes reported in selected studies

Restoration type	Cement space setting	Main outcome
Single crown	Marginal 25 μm; internal 30, 40, or 50 μm	VMD: 85, 68, and 53 μm, respectively[32]
Single crown	30, 50, or 70 μm	No significant difference in VMD[34]
Single crown	60 or 80 μm	No significant difference between settings; VMD increased after glazing and cementation[35]
Single crown	Marginal 25 μm; internal 50 μm	VMD: 38 μm after sintering and glazing; 60 μm after cementation[29]
Single crown	Radial 80 μm; occlusal 80, 40, or 0 μm	Smaller marginal gaps with 40 and 0 μm; smallest internal gap with 0 μm[30]
3- and 4-unit zirconia frameworks	30, 50, or 80 μm	Best fit with 50 μm; higher fracture strength with 50 and 80μm than with 30 μm[33]

VMD: Vertical Marginal Discrepancy.

전 소결 지르코니아의 직접 밀링은 가공 시간이 길고 밀링 공구의 마모가 증가하는 한계가 있다.[36]

Komine 등[37]은 그린 또는 예비소결 상태의 지르코니아로 제작한 4본 전치부 고정성 보철물 프레임워크에서 직선형과 곡선형 배열을 비교하였다. 곡선형 프레임워크는 세 CAD/CAM 시스템 모두에서 직선형 프레임워크보다 수치상 큰 변연 부적합을 보였으나, 그 차이는 두 시스템에서만 통계적으로 유의하였다. 이는 보철물의 만곡된 배열이 최종 소결 중 변형과 관련될 수 있으나, 그 영향의 크기는 사용된 지르코니아의 가공 상태와 CAD/CAM 시스템에 따라 달라질 수 있음을 보여준다.

다층 구조 지르코니아에서는 디자인의 색조 위치와 수축 안정성이 충돌할 수 있다. Hirano 등[27]은 단일구조 지르코니아 블록을 사용한 4본 고정성 보철물에서 수직 밀링 영역에 따라 왜곡이 달라졌고, 다층 구조가 수축 변형에 영향을 준다고 보고하였다. 이후 유사한 연구에서도 관찰 영역에 따라 왜곡 방향이 달라지는 경향이 보고되었다.[28] 반면 Coldea 등[3]은 정방형 지르코니아를 이용한 수축량 분석에서 다층 구조의 상부, 중앙, 하부 사이에 전반적인 수축 차이가 유의하지 않았고, 재료 종류가 수축에 가장 큰 영향을 미쳤다고 보고하였다. 이 차이는 단순 시편에서는 수축이 균일해 보여도 실제 고정성 보철물의 기하학적 형태에서는 연결부와 길이, 비대칭 구조 때문에 왜곡이 증폭될 수 있음을 시사한다.

수복물 설계 단계에서는 단순 확대율만 적용할 것이 아니라 수복물 길이, 연결부, 수복물의 디스크 내 가공 위치, 지르코니아 프레임워크의 만곡도, 두께 및 밀링 시 디스크 위치를 함께 고려해야 한다. 장경간 또는 만곡을 가진 고정성 보철물에서는 균일하고 충분한 두께의 연결부를 확보하고, 가능한 한 비대칭 부피 분포를 줄여 소결 중 휨 스트레스를 감소시켜야 한다.[27,28,37] 다층 구조 지르코니아에서는 색조 재현을 위해 교합면 및 절단연에 위치시키는 결정이 기계적 강도와 수축 안정성에 영향을 줄 수 있으므로, 구치부 장경간 보철물에서는 심미적 위치만이 아니라 연결부와 함께 수복물의 조직면 쪽이 강한 강도를 갖도록 위치를 고려해야 한다.[3,27,28,38]

소결수축은 제조사가 제공하는 확대계수로 완전히 해결되는 단일 현상이 아니다. 단일관에서는 비교적 안정적으로 보상될 수 있지만, 길이가 길거나 만곡된 형태, 다층 구조, 큰 연결부와 가공치를 포함하는 보철물에서는 불균일한 수축과 왜곡이 적합도를 좌우한다. 따라서 장경간 또는 다층 구조 지르코니아 보철물은 디자인 단계에서부터 소결 후 형태 변화를 예측하는 보수적 설계가 필요하다.

밀링 시 고려사항

1. 블록의 선택

Table 3과 같이, 지르코니아 블록은 단순한 원재료가 아니라 소결수축, 기계적 강도, 반투명도 및 가공성을 동시에 결정하는 변수이다. 3Y-TZP는 대체로 3 mol% Y_2O_3와 소량의 Al_2O_3를 포함하며 높은 굴곡강도와 상변이 강화를 갖지만 불투명하다. 4Y-PSZ 및 5Y-PSZ는 이트리아 함량 증가로 큐빅상이 늘어 반투명도가 개선되지만, 상변이 강화는 감소하여 강도는 낮아질 수 있다.[1,2] 다층 구조 지르코니아는 색조 또는 조성 구배를 통해 심미

Table 3. Zirconia block characteristics and fit-related considerations

Block/material	Composition and microstructure	General material characteristics	Fit-related considerations
3Y-TZP	~3 mol% Y_2O_3; mainly tetragonal phase; Al_2O_3 ~0.05 - 0.25 wt%	High strength; transformation toughening	Higher shrinkage than 5Y; protocol- and magnification factor-dependent[2,3]
4Y-PSZ / 4Y-TZP	4 mol% Y_2O_3; tetragonal and cubic phases	Strength-translucency balance	Rapid sintering may increase overall, axial-intaglio, and marginal deviations[2,23,26]
5Y-PSZ	5 mol% Y_2O_3; increased cubic phase	High translucency	No protocol-related difference in one crown study; lower shrinkage than 3Y[2,3]
Multilayer zirconia	Shade/composition gradients, such as 3Y/5Y or 4Y/5Y	Improved shade and translucency	Distortion varies with layer structure, disk position, and restoration geometry[3,27,28]

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

성을 개선하지만, 층별 조성 차이가 수축 경향과 왜곡을 바꿀 수 있다.[3,27,28,38]

블록은 소결 상태에 따라 완전 소결된 블록과 예비소결된 블록으로 나뉜다. 완전 소결된 블록은 최종 크기로 밀링할 수 있어 추가 수축이 없지만, 높은 경도로 인해 밀링 시간과 기구의 마모가 증가하고 표면 손상 위험이 있다.[1,36] 예비소결된 블록은 빠른 밀링이 가능하고, 경제적이며 기구의 마모가 적지만, 최종 소결에서 큰 수축이 발생하므로 정확한 수축 보상이 필수이다.[3,8,36]

블록 선택은 심미성만이 아니라 수복물의 길이와 위치에 따라 달라져야 한다. 구치부 단일관 또는 장경간 고정성 보철물에서는 높은 강도와 안정적인 수축 보상이 가능한 3Y 또는 고투명 3Y 계열이 유리할 수 있고, 전치부 단일관 또는 심미 요구가 높은 부위에서는 4Y/5Y 또는 다층 구조 지르코니아가 선택될 수 있다.[1,2,38] 다만 4Y, 5Y 및 다층 구조 지르코니아의 소결 반응은 서로 동일하지 않다. 단일관 연구에서 신속 소결은 4Y 지르코니아의 전체, 축면 내면 및 변연부에서 3차원 편차를 증가시킨 반면, 5Y 지르코니아에서는 표준 소결과 신속 소결 사이에 유의한 차이가 없었다.[2] 또한 표준화 시편 연구에서 단일층 3Y와 5Y 지르코니아의 선형 수축률은 각각 18.6 - 18.8%와 17.6 - 18.2%였으며, 다층 구조 지르코니아의 수축률은 재료와 측정법에 따라 약 17.7 - 21.1%로 나타났다.[3] 따라서 제조사 및 배치별 확대계수와 각 재료에 대해 검증된 소결 프로토콜을 확인해야 한다.

블록은 색조와 강도만의 문제가 아니라 적합도의 출발점이다. 동일한 CAD 디자인과 밀링 기계를 사용해도 블록 조성, 예비소결 정도, 수축량 및 다층 구조에 따라 최종 간격이 달라질 수 있다. 따라서 블록 선택은 수복물 위치와 길이, 필요한 강도, 심미 요구, 제조사 권장 소결 프로토콜을 함께 고려하여 결정해야 한다.

2. 밀링 버의 선택 및 관리

버는 밀링 공정의 직접 절삭 도구이므로 직경, 형상, 입자 크기(grit size), 재료와의 조합 및 마모 상태가 크라운의 표면거칠기, 내면 재현성, 변연의 치핑 및 실제 시멘트 공간에 영향을 준다.[10-15] CAD 설계 상의 날카로운 선각이나 교합면 구는 버 직경보다 작을 수 있고, 이 경우 밀링 장비는 해당 부위를 과삭제하거나 둥글게 처리하여 실제 내면 간격을 변화시킨다.[9,30] 반복 사용으로 버가 마모되면 절삭 효율이 감소하고 표면거칠기가 증가하며, 일부 세라믹 수복물에서는 변연 간격 증가와 내면 시멘트 공간 감소가 보고되었다.[14]

버 마모의 영향은 재료와 함께 해석해야 한다. Lebon 등[10]은 기구-재료 간 영향 연구에서 기구 마모와 밀링된 표면의 거칠기에 영향을 주며, 재료 경도와 입자 크기가 거칠기를 결정하는 핵심 변수라고 보고하였다. Corazza 등[13]은 동일 다이아몬드 버 세트로 Y-TZP 재료의 하부 구조를 밀링했을 때 밀링 과정과 거칠기 사이에 유의한 상관이 있었지만 최대 파절 강도에는 유의한 영향이 없다고 보고하였다. Al Hamad 등[12]은 제조사 권장 수명 내에서 예비소결된 지르코니아 크라운을 밀링한 경우 버 마모와 표면거칠기의 상관이 작다고 보고하였다. 즉, 버 마모는 적합도와 표면 품질에 영향을 줄 수 있지만, 권장 사용 횟수 내에서는 재료와 시스템에 따라 영향이 제한적일 수 있다.

버의 개수와 직경도 부위별 재현성에 영향을 준다. Kim 등[11]은 직경 2.0 mm와 1.0 mm의 ball-end mill 버를 사용한 2-버 방식과, 여기에 직경 0.6 mm 버를 추가한 3-버 방식을 비교하였다. CAD 설계 데이터와 밀링된 수복물의 스캔 데이터 간 일치도를 나타내는 정확도(trueness)를 평가한 결과, 전체 내면과 변연부를 제외한 내부면에서는 두 방식 사이에 유의한 차이가 없었다. 외면에서는 3-버 방식의 정확도가 높았으나, 변연부에서는 오히려 2-버 방식의 정확도가 높았다. 직경 0.6 mm의 버는 외면의 미세한 구와 선각을 재현하는 데 유리할 수 있지만, 변연부의 재현성을 반드시 향상시키는 것은 아니며 밀링 시간과 비용을 증가시킬 수 있다. 다만 이 연구에서는 지르코니아가 아닌 폴리우레탄 블록을 사용하였으므로, 결과를 지르코니아 수복물에 직접 적용하는 데에는 한계가 있다.

또한 임상 또는 기공 과정에서의 소결 후 삭제는 지르코니아 표면의 단사정상(monoclinic phase)의 증가, 거칠기 증가 및 강도 변화 가능성을 동반한다.[15] Lee 등[15]은 지르코니아 전용 삭제용 버가 삭제 시간을 줄이면서 굴곡강도에 유의한 악영향을 주지 않았지만, 모든 삭제 후에는 표면거칠기가 증가하므로 연마가 필요하다고 하였다.

버의 관리는 몇 개의 블록을 밀링했는지가 아니라 재료, 삭제 부피, 공구 경로 길이, 밀링 방식 및 버 직경을 함께 고려해야 한다.[10,14] 밀링 과정에서 버 표면은 마모되고 잔사가 축적될 수 있다(Fig. 2). 제조사 소프트웨어의 버 수명 표시를 기본으로 하되, 변연부의 치핑(chipping), 과사용, 표면거칠기 증가, 안착 저항과 같은 임상적 신호가 나타나면 권장 수명 이전이라도 교체를 고려해야 한다.

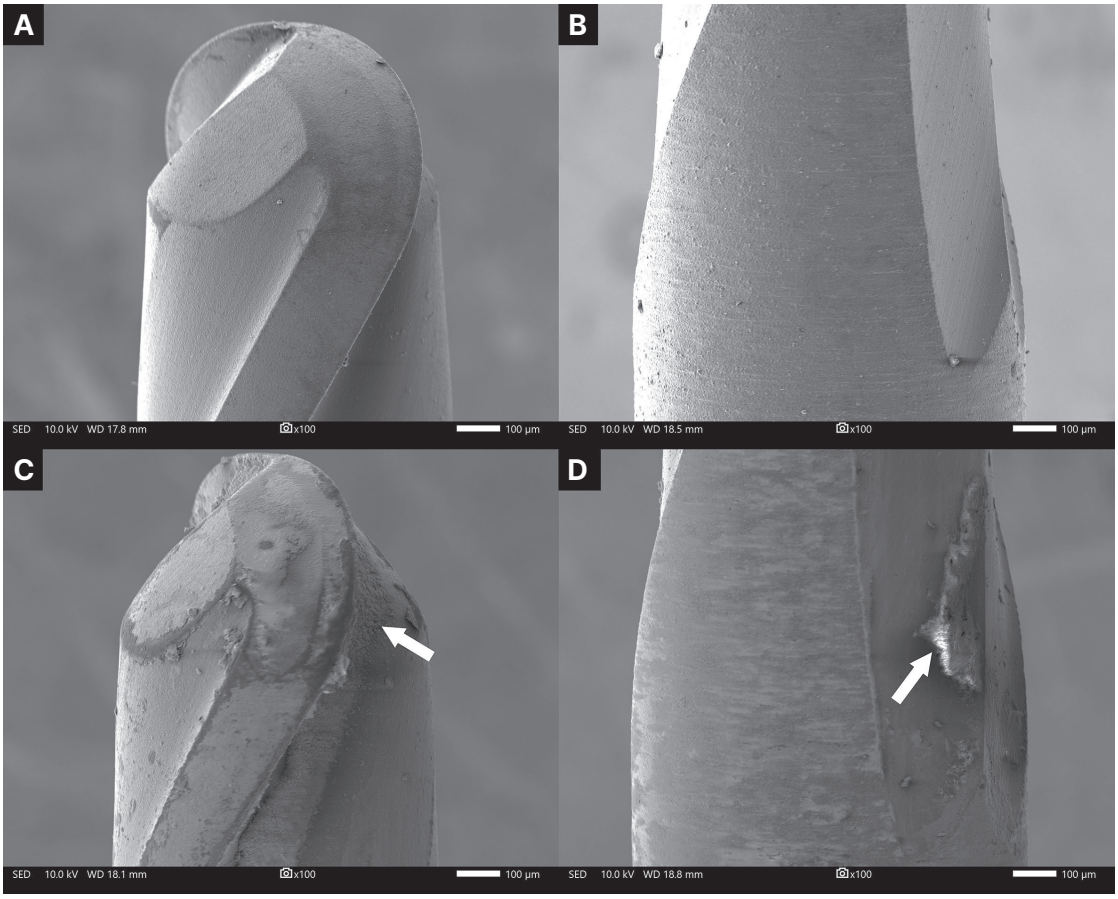

Fig. 2. Representative scanning electron microscopy images acquired by the authors before and after zirconia milling (×100). (A) Bur head before milling. (B) Bur neck before milling. (C) Bur head after use to the manufacturer-recommended limit; the arrow indicates zirconia debris. (D) Bur neck after use to the manufacturer-recommended limit; the arrow indicates tool wear.

복잡한 변연과 교합면 형태가 필요한 수복물에서는 마무리 버 또는 더 작은 버를 포함하는 프로토콜을 선택하고, 소결 후 삭제를 최소화하며 필요 시 지르코니아 전용 버와 충분한 연마를 병행해야 한다.[11,15]

버는 단순 소모품이 아니라 적합도를 결정하는 공정 변수이다. 권장 수명 내에서 마모 영향이 제한적인 경우도 있으나, 반복 사용은 표면거칠기와 변연 및 내면의 적합도 저하를 유발할 수 있다. Al Hamad 등[12]의 연구에서는 inLab MC X5의 가장 큰 직경의 버가 5Y-TZP 단일관 20개를 제작한 후 CAM 소프트웨어상 100% 마모에 도달하였으나, 버 마모율과 표면거칠기 사이의 유의한 상관은 관찰되지 않았다. Corazza 등[13]은 동일한 버 세트로 예비소결 Y-TZP 하부구조 30개를 가공하였으며, 두 버 세트에서 각각 24번째와 27번째 밀링 이후 표면거칠기 차이가 나타났지만, 30회 가공 후에도 주사전자현미경상 뚜렷한 버 열화는 관찰되지 않았다고 보고하였다. 따라서 현재 근거만으로 모든 재료와 장비에 적용되는 일률적인 교체 횟수를 제시하기는 어려우며, 제조사 또는 CAM 소프트웨어의 교체 알림과 함께 재료 종류, 삭제 부피, 공구 경로 길이 및 결과물의 표면과 변연 품질을 종합하여 교체 시점을 결정해야 한다.[14]

3. 밀링 시 조건

밀링 조건에는 밀링축 수, 건식 또는 습식 가공 방식, 연삭 및 밀링 방식, 밀링 속도, 디스크 내 수직 가공 위치, 공구 경로, 주축 회전속도(spindle speed) 및 공구 이송속도(feed rate) 등이 포함된다. 가공 프로토콜은 공구 경로, 공구 이송속도, 주축 회전속도, 사용 기구 및 냉각 방식 등 가공에 적용되는 조건의 조합을 의미한다. Pilecco 등[9]의 범위 문헌고찰은 계획한 시멘트 공간이 실제로 완전히 재현되지 않으며, 밀링 버의 개수·형태·입자 크기와 밀링 장비의 축수가 수복물의 정확도와 적합도에 영향을

줄 수 있다고 정리하였다. 5축 밀링 장비는 3개의 직선축과 2개의 회전축을 이용하므로 복잡한 곡면과 기하학적 형태를 가공하는 데 유리할 수 있다. 그러나 동일한 조건에서 3축, 4축 및 5축 장비를 직접 비교한 연구가 부족하고 일부 상반된 결과도 보고되어, 축수만으로 장비의 성능을 순위화하기는 어렵다.[9,19]

밀링축 수와 사용된 CAD/CAM 시스템 차이는 변연부 적합도에 영향을 준다. Hamza와 Sherif[19]는 5가지 CAD/CAM 시스템으로 제작한 단일구조 지르코니아 크라운이 모두 임상 허용 범위 내의 변연 적합도를 보였으나, 5축 밀링 기계가 가장 우수한 변연 적합도를 보였다고 보고하였다. Pilecco 등[9]의 문헌고찰에서도 5축이 3축 또는 4축보다 더 나은 적합을 보이는 경향이 제시되었다. 그러나 각 군에서 사용된 지르코니아 재료와 CAD/CAM 시스템 및 가공 조건이 서로 달랐으므로, 관찰된 차이를 밀링축 수에만 귀속하기는 어렵다.

가공 방식에 따라서도 다른 결과가 보고되었다. Kim 등[18]은 CEREC 시스템에서 동일한 예비소결 지르코니아를 연삭(grinding), 습식 밀링 및 건식 밀링의 세 방식으로 제작하여 비교하였다. 연삭은 다이아몬드 기구와 수냉을 사용하여 재료 표면을 마모시키는 방식이며, 습식 및 건식 밀링은 초경합금 기구를 사용하되 냉각수 사용 여부에 따라 구분된다. 습식 밀링 시 내면 정확도(trueness)가 가장 우수했고, 연삭군에서 습식 및 건식 밀링군보다 변연 간격이 컸으며, 가공·건조 및 소결을 포함한 전체 제작시간은 건식 밀링군에서 가장 짧았다. 이는 진료실 내 제작 과정에서 내면 정확도, 변연 적합도 및 제작시간을 함께 고려하여 가공 방식을 선택해야 함을 보여준다. Al Hamad 등[17]은 습식 경질 연삭으로 제작한 장석계 글라스 세라믹 단일관과 건식 연질 밀링으로 제작한 예비소결 지르코니아 단일관을 비교하였다. 글라스 세라믹군은 지르코니아군보다 높은 정확도를 보였으며, 지르코니아군은 CAD 설계 형상보다 과도하게 가공되는 경향을 나타냈다. 다만 두 군은 재료, 경도, 사용 기구 및 가공 방식이 모두 달랐으므로, 관찰된 차이를 건식·습식 조건 또는 특정 가공 방식의 영향으로만 해석할 수는 없다.

밀링 속도는 시간 단축을 가능하게 하지만 표면 품질과 변연 간격의 안정성에 영향을 줄 수 있다. Wallum 등[16]은 CEREC Primemill에서 super-fast, fine, extra-fine speed mode로 지르코니아 수복물을 밀링한 결과, super-fast mode에서 표면거칠기와 변연 간격 체적이 유의하게 증가했으나 변연 간격, 변연 오프셋 및 파절 강도에는 유의한 차이가 없었다고 보고하였다. 따라서 빠른 밀링이 항상 임상적으로 부적합한 것은 아니지만, 높은 표면 품질과 정밀한 변연 재현도가 필요한 경우에는 fine 또는 extra-fine 프로토콜이 더 안전할 수 있다.

밀링 깊이는 다층 구조 지르코니아에서 주로 심미와 강도에 영향을 준다. Zengin 등[38]은 단일 구조 및 다층 구조 지르코니아 크라운을 디스크 내 상부, 중앙, 하부에서 밀링하여 비교했을 때 변연 간격 차이는 유의하지 않았지만 파절 강도는 재료와 층별 위치에 따라 달라진다고 보고하였다. 즉 밀링 깊이 자체가 항상 변연 적합도를 바꾸지는 않지만, 다층 구조 블록에서는 층별 위치가 기계적 안전성 및 소결 변형과 연결될 수 있다.[3,27,28,38]

복잡한 내면과 변연 재현이 중요한 수복물은 가능하면 5축 시스템과 정밀한 밀링 시스템을 선택하고, 진료실용 작업 과정에서는 건식 밀링의 시간 효율 장점과 습식 밀링의 정확도 측면에서의 장점을 상황에 따라 선택해야 한다.[9,18,19] Super-fast 밀링은 당일 수복에는 유용하지만, 표면거칠기와 변연 간격 체적 증가 가능성을 고려하여 교합 조정, 연마 및 변연 오차 검사를 철저히 해야 한다.[16] 다층 구조 블록에서는 밀링 깊이를 단순한 색조 위치로만 결정하지 않고, 보철물의 연결부 및 교합 접촉점 해당 부위가 더 강한 층에 위치하도록 설계해야 한다.[3,38]

밀링 조건은 적합도에 직접 영향을 주지만, 단일 조건이 모든 결과를 설명하지 않는데, 장비 축수, 건식 및 습식 방식, 버의 선택, 속도, 블록 조성 및 수복물 형태가 결합되어 최종 적합도를 결정한다. 임상적으로는 가장 빠른 프로토콜보다 재료와 형태에 맞는 프로토콜을 선택하고, 밀링 후 내면 및 변연 검사를 통해 실제 간격 재현성을 확인하는 것이 중요하다.

소결 시 수축

전통 소결(conventional sintering)은 보통 1350 - 1600°C 범위에서 수 시간 동안 가열, 유지 및 냉각하는 방식이며, 지르코니아 크라운 제작 과정에서 가장 긴 시간을 차지한다.[20,22] 신속 소결 또는 고속 소결은 당일 수복을 가능하게 하지만, 빠른 가열과 짧은 유지 시간(holding time)이 결정립 성장, 결정상 분포, 수축, 광학적 및 기계적 특성에 영향을 줄 수 있다.[1,20,22,26] 특히 고주파 유도 소결로는 10 - 15분 내 소결이 가능하지만, 모든 지르코니아와 모든 수복물 형태에 동일하게 안전하다고 단정할 수 없다.[22,26]

신속 소결 또는 고속 소결의 적합도 결과는 일관되게 불리하지는 않다. Kauling 등[21]은 3본 단일구조 지르코니아 고정성 보철물에서 고속 소결군이 전통 소결군보다 변연 및 교합면의 적합도가 같거나 더 우수하고 파절 강도에는 유의한 차이가 없다고 보고하였다. Lee 등[22]은 단일구조 지르코니아 크라운에서 고속 소결과 전통 소결을 비교하여 고속 소결군에서 변연 적합도 지표가 더 작았고 내면 적합도도 작았지만 내면 적합도의 차이는 유의하지 않았다고 보고하였다. 다만 이 연구의 변연 부적합은 디지털 표면망(mesh) 기반 최대거리 지표로 산출되어 기존 실리콘 레플리카나 현미경상 관측값과 직접 비교해서는 안 된다.[22] Antón 등[26]은 4Y-TZP에서 고속 소결이 특히 3본 고정성 보철물의 정확도를 저하시킬 수 있으나 변연 및 내면 적합도에 대한 임상적 영향은 크지 않다고 보고하였다.

소결 시간과 온도의 효과도 재료 및 평가항목에 따라 다르다. Ozden 등[23]은 고속 소결이 4Y-TZP 크라운의 변연 부적합을 증가시켰지만 전체 간격은 허용 범위 내였다고 보고하였다. Mohaghegh 등[24]은 1450°C와 1550°C에서 소결한 단일구조 지르코니아 크라운의 변연 간격 차이가 유의하지 않았으나, 1550°C 군의 압축 강도가 유의하게 높다고 보고하였다. Eraslan 등[25]은 다양한 소결 과정이 3본 단일구조 지르코니아 고정성 보철물의 적합도와 파절 강도에 임상적으로 유의한 차이를 만들지 않았지만, 색 변화에는 영향을 주었다고 보고하였다. Al-Haj Husain 등[20]의 체계적 문헌고찰에서는 고속 소결에서 변연·내부 적합도와 기계적 성질이 대체로 전통 소결과 유사하거나 더 우수할 수 있지만, 3Y-TZP에서는 반투명도가 감소할 수 있다고 정리하였다.

임상적으로는 제조사 권장 소결 프로토콜을 우선 적용하고, 시간 단축을 위해 임의로 온도, 가열 속도, 유지 시간을 변경하지 않는 것이 안전하다.[1,20] 고속 소결은 전용 블록과 소환로 프로그램이 제공되는 경우, 단일관 또는 짧은 길이의 보철물부터 적용하는 것이 타당하다.[20-22] 4Y 및 다층 구조 지르코니아, 장경간 고정성 보철물, 캔틸레버 디자인에서는 고속 소결을 적용하기 전에 해당 재료와 수복물 형태에 대한 적합도 및 정확도 자료를 확인해야 한다.[2,23,26,28] 대표적인 지르코니아 재료와 문헌에서 사용된 소결 조건을 Table 4에 정리하였다. 다만 제시된 온도와 시간은 특정 재료와 소결 장비에 적용된 연구 조건이므로, 다른 제품에 동일하게 적용할 수 있는 일반적인 권장값으로 해석해서는 안 된다.

체계적 문헌고찰과 실험실 연구들은 신속 또는 고속 소결이 적합도와 강도 면에서 항상 불리하지 않음을 보여주지만, 결과는 재료와 수복물 형태에 따라 달라진다.[20-23,25,26] 따라서 소결 프로토콜은 속도보다는 해당 재료와 수복물 형태에 대해 검증된 조건인지를 기준으로 선택해야 한다.[20,23,26]

임상 및 기공과정에서의 고려사항

지르코니아 수복물의 적합도는 설계, 밀링 및 소결 단계의 독립 변수보다 이들 변수의 누적 결과로 이해해야 한다. 예를 들어 CAD에서 50 μm 시멘트 공간을 설정하더라도 실제 내부 간격은 버의 직경, 공구 경로, 소결 왜곡 등을 거치며 달라진다.[9,29,30,32] 따라서 적합도 문제가

Table 4. Representative zirconia materials and sintering conditions reported in selected studies

Material and restoration	Conventional or standard protocol	Speed or high-speed sintering protocol	Main finding
3Y-TZP, 3-unit FDP	1510°C; hold 120 min; total ~4 h	1580°C; hold 2 min; total ~25 min	Smaller marginal and occlusal gaps; similar fracture load[21]
Monolithic zirconia single crown	1500°C; 10°C/min; hold 120 min; total ~8 h	1500°C; 300°C/min; hold 2 min; total 15 min	Smaller marginal-fit indicator; internal difference not significant[22]
3Y- and 4Y-TZP single crowns	1500°C; 10°C/min; hold 120 min; total ~7 h	1500°C; 40°C/min; hold 45 min; total ~2h	Marginal gap increased in 4Y but not in 3Y[23]
Multilayer 4Y-TZP, single- and 3-unit FDPs	1450°C; total ~10 h	1580°C; total ~20 min	Accuracy decreased in 3-unit FDPs; fit effect not clinically relevant[26]
Single-composition and layered zirconia, 4-unit FDP	1450 or 1500°C; hold 120 min	Not evaluated	Distortion varied with layer structure and vertical disk position[27]

3Y-TZP: 3 mol% yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal; FDP: fixed dental prosthesis; 4Y-TZP: 4 mol% yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal.

발생했을 때에는 시멘트 공간과 같은 단일 설계값만 조정하기보다, 설계값이 실제 밀링 과정에서 재현되는지, 밀링 후 수복물의 내면과 변연이 적절하게 가공되었는지, 그리고 소결 후 수축이나 변형이 발생하였는지를 단계별로 확인하고 보정해야 한다. 디자인 단계에서는 시멘트 공간, 변연 적합도, 장경간 보철물의 기하학적 형태 및 다층 구조 디스크 위치를 고려하는 것이 핵심이다. 밀링 단계에서는 5축 밀링 시스템, 적절한 버 세트와 교체 기준, 정밀한 밀링 전략, 건식 또는 습식 가공 방식과 밀링 속도가 중요하다. 소결 단계에서는 재료의 수축 요인, 제조사가 제시한 소결 프로그램, 소결 및 합착 후 적합도 확인이 필요하다.[2,3,9,18,20,30,33,38]

문헌 간 결과가 서로 다른 이유는 첫째, 측정법이 다르기 때문이다. 직접 현미경 측정법, 단면 절단법, 표본추출 방법, 3차원 중첩법은 서로 다른 간격 정의와 표본 추출 방법을 사용한다.[4-8] 둘째, 수복물 형태가 다르다. 단일 크라운, 3본 및 4본 고정성 보철물 및 캔틸레버 디자인은 같은 재료라도 수축과 왜곡이 다르다.[21,26-28,36,37] 셋째, 지르코니아의 세대와 다층 구조에서 층별 조성이 다르다. 3Y, 4Y, 5Y는 고속 소결에 대한 체적 변화가 다르고, 같은 다층 구조라 하더라도 제조사와 층별 조성에 따라 결과가 달라진다.[2,3,23,38]

따라서 임상 또는 기공 작업 과정에서 권장되는 접근은 다음과 같다(Table 5). 첫째, 단일관에서는 변연 주변의 과도한 시멘트 공간을 피하되, 내면에는 안착을 허용할 수 있는 충분한 시멘트 공간을 부여한다. 둘째, 교합면 시멘트 공간은 축면 시멘트 공간과 별도로 조절해야 한다. 특정 단일 시스템을 이용한 실험실 연구에서는 0 - 40 μm의 교합면 설정이 80 μm보다 유리한 결과를 보였으나, 이를 모든 재료와 CAD/CAM 시스템에 적용되는 일반적인 권장값으로 해석해서는 안 된다.[30] 셋째, 한 실험실 연구에서는 3본 및 4본 지르코니아 프레임워크에 50 μm를 설정한 군이 가장 우수한 결과를 보였으나, 이는 특정 재료와 제작 시스템에서 얻어진 결과이다. 따라서 장경간 고정성 보철물에서는 고정된 시멘트 공간값을 적용하기보다 연결부의 크기, 지르코니아 프레임워크의 형태, 디스크 내 위치 및 소결 후 실제 적합도를 함께 확인해야 한다.[27,28,33,37] 넷째, 버는 재료별로 관리하고, 권장 수명 내라도 적합도 이상 또는 치핑이 보이면 교체한다.[10,14] 다섯째, 고속 소결은 전용 블록과 검증된 프로토콜에서 사용하고, 4Y 및 다층 구조 지르코니아 또는 장경간 보철에서는 신중하게 적용한다.[2,20,23,26]

결론

문헌에 보고된 지르코니아 단일관과 고정성 보철물의 평균 변연 간격은 일반적으로 인용되는 기준값보다 낮은 경우가 많았으나, 측정법과 평가 시점 및 임상적 허용 기준이 서로 달라 단일한 기준값을 제시하기는 어렵다. 시멘트 공간의 효과는 적용 부위와 수복물 형태 및 CAD/CAM 시스템에 따라 달랐으며, 밀링 결과 역시 장비의 축수나 건식·습식 방식과 같은 하나의 조건만으로 설명할 수 없었다. 소결에 따른 치수 변화와 적합도는 지르코니아의 조성, 수복물의 길이와 형태 및 소결 프로그램에 따라 다르게 나타났다. 현재 근거의 대부분은 서로 다른 재료·장비·측정법을 사용한 실험실 연구에 기반하므로,

Table 5. Clinical or laboratory recommendations for improving the fit of zirconia restorations

Factors	Condition	Recommendation
Overall fit	Generally acceptable fit with method-dependent variation	Interpretation by measurement method, restoration type, cementation status, and threshold
Cement space	Improved seating with adequate internal space; unfavorable effect of excessive occlusal space	Separate marginal, axial, and occlusal spacer settings
Design for sintering shrinkage	Distortion influenced by span, curvature, connectors, wall thickness, and disk position	Uniform thickness and adequate connector design, especially for curved or long-span FDPs
Milling process	Fit affected by block, bur wear, machine axes, wet/dry mode, speed, and strategy	Bur wear control; intaglio surface, margin, and seating inspection
Sintering process	Material-dependent response to rapid/high-speed sintering in 3Y, 4Y, 5Y, and multilayer zirconia	Material-specific protocol adherence; avoidance of arbitrary protocol changes
Glazing	Fit change after glazing and cementation	Workflow verification through final delivery

FDPs: fixed dental prostheses.

특정 수치나 제작 조건을 보편적인 임상 지침으로 일반화하는 데에는 한계가 있다. 따라서 임상 및 기공 과정에서는 재료와 수복물 형태 및 CAD/CAM 시스템에 대해 검증된 조건을 적용하고, 밀링과 소결 및 최종 합착 단계에서 안착과 적합도를 단계별로 확인하는 것이 중요하다.

ORCID

Sun-Ho Kim https://orcid.org/0009-0000-6572-9837
Kyung-Ho Ko https://orcid.org/0000-0002-1260-8844
Yoon-Hyuk Huh https://orcid.org/0000-0003-4072-5199
Lee-Ra Cho https://orcid.org/0000-0003-3989-2870
Chan-Jin Park https://orcid.org/0000-0003-4734-214X

References

1. 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.
2. Noor Mohd MS, Tan KBC, Teoh KH, Quek CEY, Lee FKF. Comparison of 3D changes of 3Y, 4Y, and 5Y zirconia single crowns under different sintering protocols. J Prosthet Dent 2026;135:613.e1-e11.
3. Coldea A, Meinen J, Hoffmann M, Elsayed A, Stawarczyk B. Shrinkage behavior of strength-gradient multilayered zirconia materials. Materials 2025;18:3217.
4. Ahmed WM, Shariati B, Gazzaz AZ, Sayed ME, Carvalho RM. Fit of tooth-supported zirconia single crowns-A systematic review of the literature. Clin Exp Dent Res 2020;6:700-16.
5. Dudley J, Farook TH. Marginal gap measurement of ceramic single crowns before cementation: A systematic review. J Prosthet Dent 2025;133:1145-56.
6. Papadiochou S, Pissiotis AL. Marginal adaptation and CAD-CAM technology: A systematic review of restorative material and fabrication techniques. J Prosthet Dent 2018;119:545-51.
7. Contrepois M, Soenen A, Bartala M, Laviole O. Marginal adaptation of ceramic crowns: A systematic review. J Prosthet Dent 2013;110:447-54.e10.
8. Svanborg P. A systematic review on the accuracy of zirconia crowns and fixed dental prostheses. Biomater Investig Dent 2020;7:9-15.
9. Pilecco RO, Machry RV, Baldi A, Tribst JPM, Sarkis-Onofre R, Valandro LF, Kleverlaan CJ, Scotti N, Pereira GKR. Influence of CAD-CAM milling strategies on the outcome of indirect restorations: A scoping review. J Prosthet Dent 2024;131:811.e1-e10.
10. 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.
11. Kim CM, Kim SR, Kim JH, Kim HY, Kim WC. Trueness of milled prostheses according to number of ball-end mill burs. J Prosthet Dent 2016;115:624-9.
12. Al Hamad KQ, Al Quran FA, Jwaied SZ, Al-Dwairi ZN, Al-Rashdan BA, Baba NZ. Effect of CAD/CAM bur deterioration on the surface roughness of ceramic crowns. J Prosthodont 2022;31:320-5.
13. Corazza PH, de Castro HL, Feitosa SA, Kimpara ET, Della Bona A. Influence of CAD-CAM diamond bur deterioration on surface roughness and maximum failure load of Y-TZP-based restorations. Am J Dent 2015;28:95-9.
14. Liu X, Cameron AB, Haugli KH, Mougios AA, Heng NCK, Choi JJE. Influence of CAD/CAM diamond bur wear on the accuracy and surface roughness of dental ceramic restorations: A systematic review. J Mech Behav Biomed Mater 2025;161:106813.
15. Lee KR, Choe HC, Heo YR, Lee JJ, Son MK. Effect of different grinding burs on the physical properties of zirconia. J Adv Prosthodont 2016;8:137-43.
16. Wallum AJ, Raimondi C, Lien W, Hoopes WL, Vandewalle KS. Effect of milling speed on the properties of zirconia restorations. J Clin Exp Dent 2024;16:e84-9.
17. Al Hamad KQ, Al-Rashdan RB, Al-Rashdan BA, Baba NZ. Effect of milling protocols on trueness and precision of ceramic crowns. J Prosthodont 2021;30:171-6.
18. Kim JH, Lee H, Son SA, Hong SJ, Park JK. Evaluation of the intaglio surface trueness and fit of zir-

conia crowns fabricated using different machining strategies with a chairside CAD/CAM system. Int J Comput Dent 2024;27:191-8.
19. Hamza TA, Sherif RM. In vitro evaluation of marginal discrepancy of monolithic zirconia restorations fabricated with different CAD-CAM systems. J Prosthet Dent 2017;117:762-6.
20. Al-Haj Husain N, Özcan M, Dydyk N, Joda T. Conventional, speed sintering and high-speed sintering of zirconia: A systematic review of the current status of applications in dentistry with a focus on precision, mechanical and optical parameters. J Clin Med 2022;11:4892.
21. Kauling AE, 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.
22. Lee S, Choi G, Choi J, Kim Y, Kim HK. Effect of high-speed sintering on the marginal and internal fit of CAD/CAM-fabricated monolithic zirconia crowns. Sci Rep 2023;13:17215.
23. Ozden YE, Guncu MB, Aktas G, Canay S. Effect of sintering time on the marginal and internal fit of monolithic zirconia crowns containing 3-4 mol% Y2O3. BMC Oral Health 2022;22:493.
24. Mohaghegh M, Baseri S, Kalantari MH, Giti R, Ghoraishian SA. Influence of sintering temperature on the marginal fit and compressive strength of monolithic zirconia crowns. J Dent (Shiraz) 2022;23:307-13.
25. Eraslan R, Sahin BS, Albayrak H, Ayata M, Temizkanli O. Effect of different sintering procedures on marginal and internal fit, color, and fracture load of monolithic zirconia fixed partial prostheses. Int J Comput Dent 2024;27:281-90.
26. Antón X, Stawarczyk B, Reymus M, Joda T, Liebermann A. Impact of high-speed sintering on accuracy and fit of 4 mol% yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystals (4Y-TZPs). Int J Prosthodont 2021;34:775-83.
27. Hirano M, Nomoto S, Sato T, Yotsuya M, Hisanaga R, Sekine H. Sintering distortion of monolithic zirconia in 4-unit fixed partial denture: Effect of layered structure and vertical milling area. J Mech Behav Biomed Mater 2022;128:105078.
28. Hirano M, Nomoto S, Sekine H. Sintering distortion in multi-composition-layered zirconia disks for dental prostheses: An experimental analysis. Materials 2025;18:4234.
29. Kale E, Yilmaz B, Seker E, Özcelik TB. Effect of fabrication stages and cementation on the marginal fit of CAD-CAM monolithic zirconia crowns. J Prosthet Dent 2017;118:736-41.
30. Ibrahim H, El Kateb M, Morsy N. Effect of modifying occlusal cement spacer on the fit accuracy of digitally manufactured zirconia crowns. J Prosthet Dent 2024;131:93.e1-e6.
31. Doğan DG, Yaluğ ÖS. Marginal and internal fit of zirconia crowns with varying yttria content and finish line configurations: An in vitro study. Appl Sci 2025;15:12440.
32. Kale E, Seker E, Yilmaz B, Özcelik TB. Effect of cement space on the marginal fit of CAD-CAM-fabricated monolithic zirconia crowns. J Prosthet Dent 2016;116:890-5.
33. Morsy N, Ghoneim MM, Ibrahim Y. Effect of cement spacer on fit accuracy and fracture strength of 3-unit and 4-unit zirconia frameworks. BMC Oral Health 2024;24:586.
34. Alkhallagi T, Alzahrani M, Alkathiri MA, Basunbul GI, Marghalani A. Vertical marginal discrepancy of a monolithic zirconia crown with different cement spaces. Int J Dent 2023;2023:6698453.
35. Singh P, Kulkarni RS. Effect of cement space on the marginal adaptation of monolithic zirconia crowns. Eur J Prosthodont Restor Dent 2025;33:130-5.
36. Kohorst P, Brinkmann H, Li J, Borchers L, Stiesch M. Marginal accuracy of four-unit zirconia fixed dental prostheses fabricated using different computer-aided design/computer-aided manufacturing systems. Eur J Oral Sci 2009;117:319-25.
37. Komine F, Gerds T, Witkowski S, Strub JR. Influence of framework configuration on the marginal adaptation of zirconium dioxide ceramic anterior four-unit frameworks. Acta Odontol Scand 2005;63:361-6.
38. Zengin G, Kanat-Ertürk B, Dündar-Çömlekoğlu M. Fracture strength and marginal gap comparisons of monolayered and multilayered monolithic zirconia crowns with various milling depths. J Adv Prosthodont 2025;17:304-14.

지르코니아 디자인, 밀링 및 소결 과정이 수복물의 적합도에 미치는 영향

김선호 전공의, **고경호** 부교수, **허윤혁** 교수, **조리라** 교수, **박찬진*** 교수
강원대학교 치과대학 치과보철학교실 및 구강과학연구소

지르코니아 수복물은 CAD 설계, 밀링, 소결 및 시멘트 접착의 연속 공정을 통해 완성되며, 각 단계의 작은 오차가 최종 변연 및 내부 적합도에 누적된다. 본 문헌고찰은 지르코니아 수복물의 적합도에 영향을 미치는 요인을 설계, 밀링 및 소결 과정으로 나누어 검토하였다. 문헌상 지르코니아 단일관과 고정성 보철물의 평균 변연 간격은 대체로 임상적으로 허용 가능한 범위에 속하지만, 허용 기준은 다양하게 제시되어 일치된 기준은 없다. 적합도에 영향을 주는 주요 설계 요인은 시멘트 공간 설정과 수복물의 길이 및 형태이며, 특히 시멘트 공간이 너무 작으면 장착이 어렵고, 너무 크면 시멘트층 증가와 강도 저하 가능성이 있다. 밀링 단계에서는 블록의 조성, 밀링 버(bur)의 직경·마모·개수, 밀링 장비의 축수, 건식 및 습식 방식, 밀링 속도 및 가공 전략이 적합도와 표면 완성도에 영향을 줄 수 있다. 소결 단계에서는 재료별 수축률, 다층 구조, 디스크 내 위치, 소결 시간·온도·속도가 상호작용하여 수축과 변형을 유발할 수 있으며, 특히 3Y, 4Y, 5Y 및 다층 구조 지르코니아는 동일한 소결 프로토콜에 대해 서로 다른 반응을 보인다. 따라서 지르코니아 수복물의 적합도 향상을 위해서는 단일 기본값에 의존하기보다 재료, 수복물 형태, 장비 및 소결 프로토콜을 통합적으로 조절하는 과정별 품질 관리가 필요하다.

(구강회복응용과학지 2026;42(3):153-65)

주요어: 지르코니아; 적합도; CAD/CAM; 밀링; 소결

*교신저자: 박찬진
(25457)강원특별자치도 강릉시 죽헌길 7 강원대학교 치과대학 치과보철학교실
Tel: 033-640-3153 | Fax: 033-640-3103 | E-mail: doctorcj@kangwon.ac.kr
접수일: 2026년 6월 30일 | 수정일: 2026년 7월 22일 | 채택일: 2026년 7월 28일