Check for updates

Research Article

대한치과재료학회지 53(3) : 93-102, 2026
Korean Journal of Dental Materials (*Korean J Dent Mater*)
ISSN:2384-4434 (Print); 2384-3268 (Online)
Available online at http://www.kadm.org
http://dx.doi.org/10.14815/kjdm.2026.53.3.93

급속 소결된 5 mol% 이트리아 부분 안정화 지르코니아의 기계적 성질에 MgO 함량과 저온 열화가 미치는 영향

신혜정, 설효정*

부산대학교 치의학전문대학원 치과재료학교실

Effect of MgO Content and Low-Temperature Degradation on Mechanical Properties of Rapidly Sintered 5 mol% Yttiria-Stabilized Zirconica

*Hye-Jeong Shin, Hyo-Joung Seol**

Department of Dental Materials, School of Dentistry, Pusan National University, Beomeo-Ri, Mulgeum-Eup, Yangsan-Si, Gyeongsangnam-Do, Republic of Korea

This study evaluated the changes in mechanical properties of 5Y-PSZ, fabricated by adding 0.1, 0.5, and 1.0 wt.% of MgO to 5Y-PSZ powder, followed by rapid sintering and low-temperature degradation (LTD) treatment. The 5Y-PSZ powder and the MgO additive were ball-milled, dried, uniaxially press-molded, and pre-sintered at 950°C for 1 hour. The pre-sintered zirconia specimens were cut to standard dimensions, sequentially polished on both sides using SiC paper, and rapidly sintered at 1600°C with a 20-minute holding time. Additionally, a comparative group was prepared by subjecting the rapidly sintered specimens to LTD treatment at 135°C for 2 hours. To verify the mechanical properties of the specimens under both conditions, three-point flexural strength tests, hardness measurements, and microstructural analyses were performed. The highest flexural strength was observed in the specimens with 0.1 wt% MgO in both the rapid-sintering group and the rapid-sintering followed by LTD group. Exceeding this amount led to a decrease in flexural strength. At a given MgO content, LTD treatment after rapid sintering did not cause a reduction in flexural strength. Furthermore, as the amount of MgO increased, the grain size of the specimens tended to increase under both sintering conditions. This study demonstrated the potential of adding 0.1 wt% MgO to 5Y-PSZ to maintain favorable mechanical properties. In addition, the preservation of mechanical properties after low-temperature degradation may provide useful information for evaluating the long-term stability and durability of 5Y-PSZ prostheses.

Keywords : 5Y-PSZ, MgO, rapid sintering, low-temperature degradation treatment

Hye-Jeong Shin (ORCID: 0000-0001-7631-9964)

*Correspondence: Hyo-Joung Seol (ORCID: 0000-0002-6177-2616)
49 Busandaehar-ro, Yangsan-si, Gyeongsangnam-do, 50612, Republic of Korea
Affiliation: Department of Dental Materials, School of Dentistry, Pusan National University, Beomeo-Ri, Mulgeum-Eup, Yangsan-Si, Gyeongsangnam-Do, 50612, Republic of Korea
Tel: +82-51-510-8229, Fax: +82-51-510-8228
E-mail: seol222@pusan.ac.kr

Received: Aug. 12, 2026; Revised: Sep. 11, 2026; Accepted: Sep. 14, 2026

서 론

Y_2O_3로 안정화된 지르코니아는 높은 강도, 파괴인성 및 손상 저항성과 같은 우수한 기계적 특성을 나타내어 구조용 재료뿐만 아니라 광학적 특성과 심미성, 생체적합성이 요구되는 치과 수복재로도 널리 사용되고 있다 (1-4). 치과용 지르코니아는 복잡한 구강 환경에서 생체적합성, 항균 활성 및 무독성을 갖추어야 하며, 우수한 내식성과 장기적인 안정성을 유지할 수 있는 높은 성능이 요구된다 (5-7).

ZrO_2에 3-5 mol%의 Y_2O_3를 첨가하면 Y_2O_3 함량에 따라 기계적 특성이 달라지며, 우수한 물성과 함께 제조가 용이한 장점을 가진다 (2, 5, 6, 8-11). Y_2O_3 함량이 증가할수록 반투명도가 향상되는 것으로 알려져 있으며 (12-14), 특히, 5 mol% Y_2O_3로 부분 안정화된 지르코니아(5Y-PSZ)는 3 mol% Y_2O_3로 부분 안정화된 지르코니아(3Y-TZP)보다 입방정상(cubic phase)의 비율이 증가되고 정방정상(tetragonal phase)의 비율이 감소되어 상대적으로 우수한 광학적 특성을 나타낸다 (10, 15, 16). 즉, 입방정상은 광학적으로 등방정이므로 입방정상의 비율이 증가하면 정방정상의 복굴절(birefringence)에 의한 빛의 산란이 감소되어 반투명도가 향상되는 것으로 보고되고 있다 (10, 15, 16). 그러나, 줄어든 정방정상으로 인해 응력유기 상전이 강화(stress-induced transformation toughening) 능력이 저하되어 기계적 특성이 감소하게 된다 (17).

일반적으로 사용되는 ZrO_2의 상안정화제로는 Sc_2O_3, CaO, MgO와 같은 희토류 산화물 및 알칼리토의 금속산화물이 있으며 (18, 19), 그 중 지르코니아 블록 제작에 첨가되는 무기 바인더인 MgO는 대표적인 염기성 산화물로 고온 내식성이 우수하다는 보고가 있다 (2, 3, 20). 또한, MgO는 우수한 생체적합성을 가지며 (3, 4), 고온에서 입계에 액상을 형성하여 세라믹의 치밀화를 촉진하고 소결 온도를 낮출 수 있어 소결 보조 첨가제로 널리 사용되고 있다 (21, 22). MgO는 ZrO_2의 정방정상 및 입방정상을 상온에서 안정화시키며, 0.05 - 2 wt.% 첨가 시 소결 온도를 효과적으로 감소시키는 것으로 보고되었다 (21, 22). 지르코니아에 이트리아 대신 마그네슘이 첨가된 경우 우수한 기계적 및 열적 특성, 저온열화 처리(LTD; Low-temperature degradation)에서의 우수한 안정성을 보인다는 연구결과들도 있다 (2, 5, 6, 23-25).

ZrO_2는 소결 조건에 따라 미세구조, 기계적 특성, 저온열화 현상에 영향을 받을 수 있다 (2, 25-29). ZrO_2의 급속 소결과 관련된 연구들은 대부분 대량 생산된 기성품 지르코니아 블록을 대상으로 하여 다양한 소결 조건으로 소결하고 기계적 성질을 평가하고 있다 (25-32). 특히, 급속 소결을 시행할 경우 보철물 제작에 소요되는 작업 시간을 단축시킬 수 있다는 장점이 있으나, 짧은 소결 시간으로 인해 소결이 충분히 이루어지지 않아 투명도나 기계적 성질이 저하되는 경우가 발생하기도 한다 (2, 32, 33).

본 연구에서는 5Y-PSZ ZrO_2 분말에 MgO를 0.1, 0.5 및 1.0 wt.% 첨가하여 제작한 지르코니아 블록을 급속 소결한 후 저온열화 처리를 수행하여, MgO 함량에 따른 기계적 특성 변화를 평가하고자 하였다. 본 연구의 귀무가설은 MgO 함량의 차이와 저온열화 처리가 급속 소결 된 5Y-PSZ의 기계적 특성에 유의한 영향을 미치지 않는다는 것이다.

재료 및 방법

1. 시편 준비

Table 1의 조성을 기준으로 20-30 nm 크기의 5Y-PSZ ZrO_2 분말(Yttria-Stabilized Zirconia Nanoparticles, Skyspring Nanomaterials Inc, USA)과 첨가제를 미량 저울로 계량하여 150 rpm으로 24시간 볼밀(Desktop ball mill; LM-BD4530, LKLAB Korea)하였다. 볼밀을 끝낸 혼합된 분말을 40℃ 드라이 오븐에서 72시간 이상 건조 후 체질(Standard testing sieve aperture 100 ㎛, Saehwa testing Co., Korea)하였다. 체질 후의 분말을 성형 몰드에 넣어 일축 가압성형하여 그린바디(green body)를 제작하고, 이를 950℃에서 1시간 동안 가소결하고 실온으로 자연 냉각하였다.

가소결 된 지르코니아 시편을 3점 굴곡강도시험을 위해 치과 보철용 지르코니아에 적용되는 표준 ISO 6872 기준으로 시편을 절단하여 SiC paper (1000, 2000, 3000 및 5000 grit)를 이용하여 순차적으로 양면을 연마 후 모따기를 시행하고, Table 2에 따라 1600℃에서 20분간 유지하여 급속 소결을 진행하였다. 최종 시편의 크기는 19.05 (± 2.55) × 3.46 (± 0.31) × 1.56 (± 0.30) mm^3의 바 형태로 제작되었다. 이후 각 시편을 저온열화 처리하였다. 저온열화는 ISO 13356에 근거하여 압력용기를

이용한 수열처리(hydrothermal aging)로 135℃에서 2시간 동안 시행하였다.

2. 3점 굴곡강도 변화 관찰

급속 소결 군과 급속 소결 후 저온열화 처리한 군으로 구분하여 만능시험기(Instron 3366, Instron, USA)를 사용하여 3점 굴곡강도를 측정하였다(n=7/group). 이때 cross-head speed를 0.5 mm/min, span 길이를 12 mm로 하였다.

3. 표면 경도 변화 관찰

급속 소결 군과 급속 소결 후 저온열화 처리한 군에 대해 비커스(Vickers) 경도 측정기(Mitutoyo HM-200, Mitutoyo Co., Japan)를 이용하여 각 시편당 1 Kgf (9.8 N)의 하중과 10초간의 부하시간 조건으로 각각의 시편에 대하여 경도를 측정하여 5개의 압흔을 형성하고 생성된 압흔의 크기로부터 평균 경도 값을 얻었다(n=5/group).

4. 미세구조 분석 (FE-SEM; Field Emission Scanning Electron Microscope)

급속 소결 군과 급속 소결 후 저온열화 처리한 군에 대해 미세구조를 분석하기 위해 백금(Pt) 코팅을 70초간 시행하여 시편을 표면 처리하고, 전계방출주사전자현미경(JSM-7900F, JEOL, Akishima, Japan)을 사용하여 가속전압 15 kV의 조건으로 결정립의 크기 및 형상을 관찰하였다(n=1/group).

5. 통계 분석

얻어진 데이터는 통계 프로그램인 SPSS 30.0 (Statistical Product and Service Solutions 30.0, IBM Co., Armonk, NY, USA)을 이용하여 이원배치분산 분석(Two-way ANOVA) 후 Scheffé로 사후 분석하였으며, 0.05의 통계적 유의 수준이 유의미한 것으로 간주하였다.

결 과

1. 3점 굴곡강도 변화

이원분산분석 결과(Table 3), 시편 종류는 처리 조건×시편 종류의 상호작용은 3점 굴곡강도에 유의한 영향을 미쳤으나 (p<0.05), 처리 조건과 처리 조건×시편 종류의 상호작용은 유의하지 않았다(p>0.05).

Table 1. Composition (wt.%) of MgO-added 5Y-PSZ zirconia specimens

Group	5 mol% Y_2O_3-ZrO_2+Al_2O_3+HfO_2 (wt.%)	MgO (wt.%)
MgO 0	100.00	0.00
MgO 0.1	99.90	0.10
MgO 0.5	99.50	0.50
MgO 1.0	99.00	1.00

Table 2. Rapid sintering schedule for MgO-added 5Y-PSZ zirconia specimens

Rapid sintering protocol	Heating or Cooling Rate (°C/min)	Temp. (°C)	Holding Time (min)
Heating 1	120	1450	0
Heating 2	10	1600	0
Holding	—	1600	20
Cooling	- 120	800	0

급속 소결 군과 급속 소결 후 저온열화 처리한 시편들의 굴곡강도는 MgO 함량에 따라 차이를 보였다(Table 4). 급속 소결한 시편 중에서는 5Y-PSZ ZrO_2 분말에 MgO를 첨가하지 않은 시편과 0.1 wt.% 첨가한 시편은 굴곡강도가 동일하였다. 또한, 5Y-PSZ ZrO_2 분말에 MgO 1.0 wt.% 첨가한 시편에서는 가장 낮은 굴곡강도가 확인되었으며, 이것은 MgO를 0.5 wt.% 첨가한 시편의 굴곡강도보다도 더 낮았으나 통계적으로는 서로 유의차가 없었다(p〉0.05). 따라서 5Y-PSZ에 MgO를 0.1 wt.% 첨가하여 급속 소결한 시편은 MgO가 무첨가 된 시편과 동일한 굴곡강도를 보였으며, 0.5 wt.% 이상의 MgO 첨가는 굴곡강도의 감소를 유발하였다.

급속 소결 후 저온열화 처리를 시행한 시편들의 굴곡강도를 측정한 결과 또한 급속 소결 한 시편과 유사하게 MgO를 첨가하지 않은 시편과 0.1 wt.% 첨가한 시편이 굴곡강도가 가장 높았다. 마찬가지로 MgO를 1.0 wt.% 첨가한 시편과 MgO를 0.5 wt.% 첨가한 시편은 통계적으로는 서로 유의차가 없었다. 한편, 시편의 MgO 함량이 동일한 경우에는, 저온열화 처리 유무와 상관없이 굴곡강도의 차이를 나타내지 않았다(p〉0.05). 따라서 5Y-PSZ에 MgO를 0.1 wt.% 첨가하여 급속 소결 후 저온열화 처리한 시편은 MgO가 무첨가 된 시편과 동일한 굴곡강도를 보였으며, 0.5 wt.% 이상의 MgO 첨가는 굴곡강도의 감소를 유발하였다.

2. 표면 경도 변화

Table 5에서 이원분산분석 결과, 처리 조건과 시편 종류는 비커스 경도에 유의한 영향을 미쳤으며, 처리 조건과 시편 종류 간에도 유의한 상호작용이 나타났다(모두 p〈0.001).

Table 6에서 급속 소결한 경우, 5Y-PSZ에 MgO를 0.1과 0.5 wt.% 첨가하여 급속 소결한 시편의 경도가 모든 시편 중 가장 높게 나타났으며, MgO를 1.0 wt.% 첨가한 시편은 모든 시편 중 가장 낮은 경도를 나타내었다(p〈0.05). 그러나 모든

Table 3. Results of two-way ANOVA for three-point flexural strength (MPa)

Source of variation	Type III Sum of Squares	*df*	Mean Square	*F*	*p*	*Partial* η^2
Corrected model	647268.132[a]	7	92466.876	13.142	〈0.001	0.667
Intercept	11964093.24	1	11964093.236	1700.450	〈0.001	0.973
Treatment (T)	5397.661502	1	5397.662	0.767	0.385	0.006
Specimen (S)	635683.1901	3	211894.397	30.116	〈0.001	0.619
T × S	6187.280277	3	2062.427	0.293	0.83	0.227
Error	337720.3741	48	7035.841		-	-
Total	12949081.74	56			-	-
Corrected total	984988.506	55			-	-

[a]. R 제곱 = .657 (수정된 R 제곱 = .607)

Table 4. Three-point flexural strength (MPa) of MgO-added 5Y-PSZ zirconia specimens (mean ± SD)

Treatment	MgO 0	MgO 0.1	MgO 0.5	MgO 1.0
Rapid Sintering	561.72 (133.97)^{Ab}	585.51 (113.89)^{Ab}	384.57 (35.03)^{Aa}	356.34 (82.71)^{Aa}
Low-temperature degradation after rapid sintering	567.56 (73.05)^{Ab}	559.97 (86.87)^{Ab}	334.03 (45.74)^{Aa}	348.04 (48.21)^{Aa}

The same lowercase letters indicate no statistically significant differences among MgO contents within each treatment, and the same uppercase letters indicate no statistically significant differences between treatments at a given MgO content.

시편에서 얻어진 경도값은 1200 HV이상의 높은 값을 보였다.

급속 소결 후 저온열화를 시행한 경우에도, MgO의 함량에 상관없이 경도 값은 1200 HV 이상의 높은 값을 보였으며, 서로 통계적 유의차는 보였으나 수치상 큰 차이는 나타나지 않았다. 이때, MgO를 1.0 wt.% 첨가한 시편은 모든 시편 중 가장 낮은 경도가 확인되었다(p〈0.05).

MgO 함량이 동일한 경우, MgO를 0.1, 0.5 wt.% 첨가한 시편은 저온열화 처리 후 경도의 유의한 감소가 확인되었다 (p〈0.05). 그러나 그 외의 시편에서는 저온열화 처리에도 경도의 유의한 차이가 관찰되지 않았다(p〉0.05).

3. 미세구조 변화

급속 소결한 시편들의 미세구조 관찰결과는 MgO 함량에 따라 차이를 보였다(Figure 1). 특히 MgO 함량이 많아질수록 결정립의 크기가 증가하는 경향을 보였다. 굴곡강도에서 동일한 결과를 보였던 시편인 MgO를 추가하지 않은 시편과 MgO를 0.1 wt.% 추가하여 급속 소결한 시편에서는 등축정 구조의 크고 작은 결정립이 혼재된 서로 유사한 미세구조를 나타냈으며, 이는 저온열화 처리 후에도 유지되는 경향을 보였다. 한편 낮은 굴곡강도를 보였던 시편인 MgO를 0.5와 1.0 wt.% 추가하여 급속 소결한 시편에서는 MgO 함량이 0.1 wt.% 이하인 시편에 비해 결정립의 성장이 뚜렷하였고, 이러한 큰 결정립은 저온열화 후에도 유지되는 경향을 보였다. 이때, MgO를 0.5 wt.% 추가하여 급속 소결한 시편에서 관찰되었던 작은 결정립은 저온열화 후에는 관찰되지 않았다.

고 찰

본 연구에서 얻어진 굴곡강도 결과(Table 4)는 이전 연구(34, 35)들과 마찬가지로 5Y-PSZ에 첨가되는 MgO의 함량이 늘어날수록 굴곡강도가 감소하는 경향이 확인되었다. 또한,

Table 5. Results of two-way ANOVA for Vickers hardness (HV)

Source of variation	Type III Sum of Squares	*df*	Mean Square	*F*	*p*	Partial η^2
Corrected model	379970.188[a]	7	54281.455	72.020	〈0.001	0.875
Intercept	134611222.4	1	134611222.411	178600.827	〈0.001	1.000
Treatment (T)	32558.41513	1	32558.415	43.198	〈0.001	0.375
Specimen (S)	269635.1814	3	89878.394	119.250	〈0.001	0.832
T × S	77776.59137	3	25925.530	34.398	〈0.001	0.589
Error	54266.311	72	753.699		-	-
Total	135045458.9	80			-	-
Corrected total	434236.4989	79			-	-

[a]. R 제곱 = .875 (수정된 R 제곱 = .863)

Table 6. Vickers hardness (HV) of MgO-added 5Y-PSZ zirconia specimens

Treatment	MgO 0	MgO 0.1	MgO 0.5	MgO 1.0
Rapid Sintering	1264.47 (21.10)^{Ab}	1410.52 (39.12)^{Bc}	1386.16 (22.51)^{Bc}	1208.22 (29.95)^{Aa}
Low-temperature degradation after rapid sintering	1291.57 (29.71)^{Abc}	1277.80 (33.98)^{Ab}	1325.38 (19.69)^{Acd}	1213.22 (15.03)^{Aa}

The same lowercase letters indicate no statistically significant differences among MgO contents within each treatment, and the same uppercase letters indicate no statistically significant differences between treatments at a given MgO content.

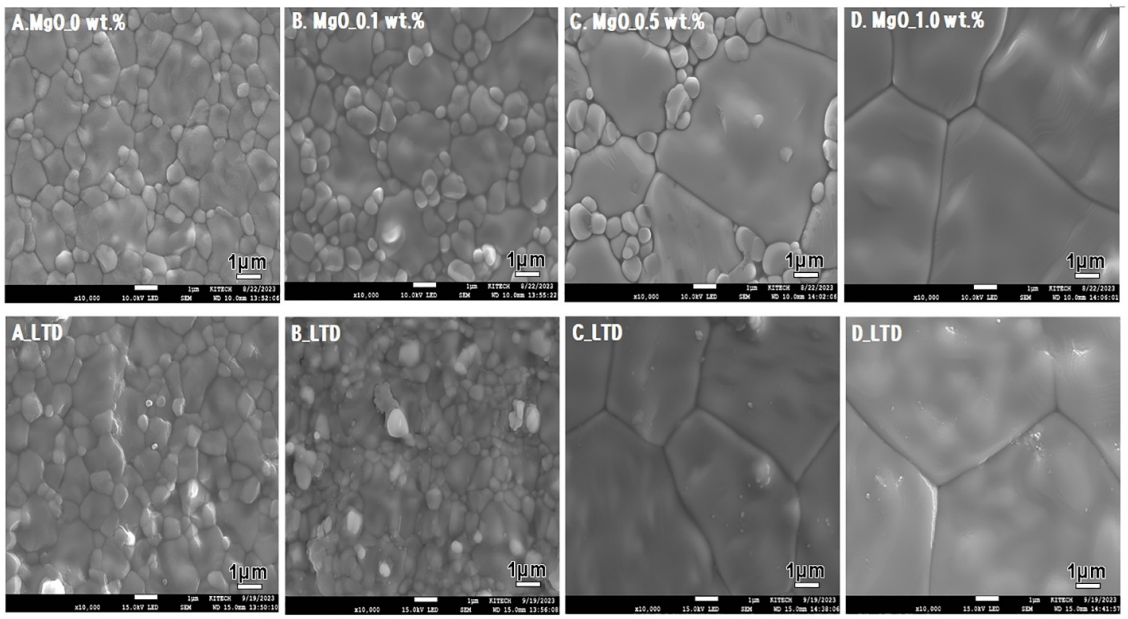


Figure 1. FE-SEM images of MgO-added 5Y-PSZ zirconia specimens (A, MgO 0; B, MgO 0.1; C, MgO 0.5; D, MgO 1.0; LTD, Low-temperature degradation after rapid sintering)

급속 소결한 경우와 유사하게 급속 소결 후 저온열화 처리한 경우에도 MgO를 0.1 wt.% 함유한 시편보다 MgO 함량이 더 높은 시편에서 더 낮은 굴곡강도가 유지되었다. 따라서 MgO 함량의 차이와 저온열화 처리가 급속 소결된 5Y-PSZ의 기계적 특성에 유의한 영향을 미치지 않는다는 귀무가설은 부분 기각되었다.

본 연구에서는 MgO를 0.1 wt.% 첨가한 시편의 경우는 MgO가 첨가되지 않은 시편과 동등하게 우수한 굴곡강도를 나타냈으나, MgO의 함량을 0.5 wt.% 이상으로 증가시킴에 따라 급속 소결 및 급속 소결 후 저온열화 처리를 시행한 경우 모두에서 지르코니아의 굴곡강도가 크게 감소하였다. 따라서, 다량의 MgO 첨가는 기계적 특성을 저하시킬 수 있음을 시사하였다. 이러한 결과는 MgO 첨가량이 증가할수록 소결 밀도가 저하됨에 따라 지르코니아의 기계적 특성이 저하됨을 보고한 기존의 연구들과 유사하였다 (34, 35). Kwon과 Lee (34)는 지르코니아 분말에 MgO 함량을 3, 5, 7 wt.% 첨가하여 소결 후 소결 밀도를 측정한 결과, MgO 함량이 증가할수록 소결 밀도의 감소와 함께 3점 굴곡강도의 감소가 나타났으며, 소결 온도가 1100℃에서 1300℃로 높아짐에 따라 소결 밀도와 3점 굴곡강도는 크게 향상됨을 보고하였다. 이들의 연구에서 MgO 함량변화에 따른 경도의 변화는 크지 않았으며 (34), 이는 본 연구 결과와도 일치하였다. 본 연구에서 얻어진 경도는 모든 군에서 약 1200 HV 이상의 높은 값을 유지하였으며, MgO 첨가량에 따른 경도값의 통계적 차이는 존재하였으나, 실제 수치의 차이는 미미하였다. 이는 경도가 표면의 국부적인 소성변형 저항성을 평가하는 특성인 반면, 굴곡강도는 시편 전체의 결함이나 균열 민감도의 영향을 크게 받으므로 두 시험이 서로 다른 특성을 평가하기 때문으로 생각된다.

문헌에 따르면 MgO를 첨가한 ZrO_2의 경도가 MgO를 첨가하지 않은 ZrO_2의 경도보다 증가하였으며, 이때 첨가량에 따라 경도가 비례하다가 일정 수준을 초과하면 다시 경도가 감소하는 것으로 보고되었다 (5). 본 연구에서도 이와 유사하게 급속 소결한 시편에서 MgO를 첨가하지 않은 시편보다 MgO를 0.1 wt.% 첨가한 시편에서 경도가 더 우수하였으며, 이를 초과함에 따라 다시 경도가 낮아지는 것이 확인되었다. 이것은 MgO를 다량 첨가하면 소결 밀도가 떨어지게 되는 기존 연구 결과와 비슷한 경향이라 할 수 있다 (34, 35). 그러나 앞서 언급한 바와 같이 본 실험에서 MgO 함량 차이에 따른 경도의 수치상의 차이는 크지 않았으며, 이는 지르코니아의 낮은 열전도도 특성상 내면과 표면의 치밀화의 속도차이가 발생함에 따라 내면에

비해 표면의 치밀화가 더 용이하게 발생하는 현상과도 관련된 것으로 생각된다 (36).

본 연구에서 미세구조 관찰결과 MgO를 첨가하지 않은 시편과 MgO를 0.1 wt.% 첨가한 시편에서는 작은 결정립과 큰 결정립이 혼재된 비교적 균일한 등축정 미세구조를 나타낸 반면, MgO를 0.5 및 1.0 wt.% 첨가한 시편에서는 큰 결정립이 뚜렷하게 관찰되었다(Figure 1). 따라서, MgO 함량이 증가함에 따라 결정립 크기가 증가하는 경향이 확인되었다. 일반적으로 5Y-PSZ는 3Y-TZP와 달리 응력유기 상전이강화(stress-induced transformation toughening) 효과가 제한적이며 (17), 결정립 크기가 상대적으로 더 커서 균열이 입계를 따라 우회하기보다 상대적으로 쉽게 전파될 수 있으며, 결과적으로 굴곡강도가 낮게 나타난다 (30). 따라서 본 연구에서와 같은 MgO 첨가량에 따른 결정립 크기의 증가는 굴곡강도 감소에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 한편, 여러 연구에서 입자크기는 상 변이 억제로 인한 저온열화 지연과 관련되어 있다고 보고되었다 (37-39). 본 연구에서도 결정립 크기가 큰 시편들이 상대적으로 낮은 굴곡강도를 보였으나, 저온열화 처리 후의 굴곡강도의 감소는 전혀 일어나지 않았다. 미세구조 관찰결과, MgO를 0.5 wt.% 첨가한 시편의 경우, 급속 소결 후 존재하던 미세 결정립이 저온열화 처리 이후 거의 관찰되지 않았다. 이러한 변화에 대한 원인을 파악하기 위해서는 결정립 크기의 정량 분석과 상 분석 등의 연구가 필요하며 향후 이에 대한 추가 검증이 필요하다.

본 연구는 다음과 같은 몇 가지 한계점을 지닌다. 첫째, MgO 첨가 및 소결 조건 변화에 따른 반투명도 변화 등의 광학적 특성에 대한 평가가 이루어지지 않았다. 둘째, MgO 첨가량의 범위를 제한적으로 설정하여 우수한 기계적 특성을 나타내는 최적의 첨가량을 결정하는 데는 한계가 있었다. 셋째, 급속 소결 조건과의 명확한 비교 분석을 위한 일반 소결 (conventional sintering) 대조군과의 비교 평가가 포함되지 않았다. 따라서, 향후 연구에서는 다양한 MgO 농도 조건에서 광학적 특성 평가 및 일반 소결 군과의 비교 분석을 포함한 종합적인 검증이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구의 임상적 의의는 5Y-PSZ에 0.1 wt.%의 MgO를 첨가하여 우수한 기계적 특성을 확보할 수 있는 가능성을 제시하였다는 데 있다. 이러한 결과는 심미성과 기계적 특성을 모두 고려한 5Y-PSZ 보철물 제작을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 0.1 wt.% MgO가 첨가된 5Y-PSZ가 저온열화 후에도 우수한 기계적 특성을 유지한 것은 장기간 구강 내 사용을 위한 재료의 안정성과 내구성 측면에서 임상적 활용 가능성을 뒷받침한다.

결 론

본 연구결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 5Y-PSZ에 MgO를 0.1 wt.% 첨가하여 급속 소결한 시편과 급속 소결 후 저온열화 처리한 시편은 MgO가 무첨가된 시편과 동일한 굴곡강도를 보였으며, 0.5 wt.% 이상의 MgO 첨가는 굴곡강도의 감소를 유발하였다.
2. 시편에 첨가된 MgO 함량이 동일한 경우에는, 급속 소결 후 저온열화 처리는 굴곡강도의 감소를 유발하지 않았다.
3. MgO의 첨가량이 많아질수록 급속 소결한 시편과 급속 소결 후 저온열화 처리한 시편의 결정립의 크기가 증가하는 경향을 보였다.

사 사

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-00271063).

참고문헌

1. Deirmina F, Pellizzari M. Mechanical properties and tempering resistance of an ultrafine grained Tool Steel-PSZ composite fabricated by high energy mechanical milling and spark plasma sintering. Mater Sci Eng A. 2020;786:139428.
2. Soylemez B, Sener E, Yurdakul A, Yurdakul H. Fracture toughness enhancement of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystalline ceramics through magnesia-partially stabilized zirconia addition. J Sci Adv Mater Devices. 2020;5(4):527-534.

3. Rahaman MN, Li Y, Bal BS, Huang W. Functionally graded bioactive glass coating on magnesia partially stabilized zirconia (Mg-PSZ) for enhanced biocompatibility. J Mater Sci Mater Med. 2008;19(6):2325-2333.
4. Hadjicharalambous C, Mygdali E, Prymak O, Buyakov A, Kulkov S, Chatzinikolaidou M. Proliferation and osteogenic response of MC3T3-E1 pre-osteoblastic cells on porous zirconia ceramics stabilized with magnesia or yttria. J Biomed Mater Res A. 2015;103(11):3612-3624.
5. Yusuf D, Maryani E, Mardhian DF, Noviyanti AR. Evaluation of structural stability, mechanical properties, and corrosion resistance of magnesia partially stabilized zirconia (Mg-PSZ). Molecules. 2023;28(16):6054.
6. Wahyudi K, Maryani E, Arifiadi F, Rostika A, Yusuf D, Manullang RJ, et al. Low-calcination temperatures of magnesia partially stabilized zirconia (Mg-PSZ) nanoparticles derived from local zirconium silicates. Mater Res Express. 2021;8(4):045022.
7. Chevalier J, Gremillard L. Ceramics for medical applications: A picture for the next 20 years. J Eur Ceram Soc. 2009;29(7):1245-1255.
8. Luthardt RG, Holzhüter M, Sandkuhl O, Herold V, Schnapp JD, Kuhlisch E, et al. Reliability and properties of ground Y-TZP-zirconia ceramics. J Dent Res. 2002;81(7):487-491.
9. Lee K, Ko KH, Huh YH, Park CJ, Cho LR. Effect of milling and sintering process on integrity of zirconia prosthesis: a literature review. J Dent Rehabil Appl Sci. 2022;38(3):127-137.
10. Zhang Y, Lawn BR. Novel zirconia materials in dentistry. J Dent Res. 2018;97(2):140-147.
11. Kosmač. T, Oblak Č., Jevnikar P, Funduk N, Marion L. Strength and reliability of surface treated Y-TZP dental ceramics. J Biomed Mater Res. 2000;53(4):304-313.
12. Shin HJ, Kwon YH, Seol HJ. Effect of cooling rate during porcelain firing on the optical properties of 3 mol% yttria-stabilized zirconia. Korean J Dent Mater. 2021;48(4):269-280.
13. Cho YE, Lim YJ, Han JS, Yeo ISL, Yoon HI. Effect of yttria content on the translucency and masking ability of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal. Materials. 2020;13(21):4726.
14. McLaren EA, Maharishi A, White SN. Influence of yttria content and surface treatment on the strength of translucent zirconia materials. J Prosthet Dent. 2023;129(4):638-643.
15. Harada A, Shishido S, Barkarmo S, Inagaki R, Kanno T, Örtengren U, et al. Mechanical and microstructural properties of ultra-translucent dental zirconia ceramic stabilized with 5 mol% yttria. J Mech Behav Biomed Mater. 2020;111:103974.
16. Camposilvan E, Leone R, Gremillard L, Sorrentino R, Zarone F, Ferrari M, et al. Aging resistance, mechanical properties and translucency of different yttria-stabilized zirconia ceramics for monolithic dental crown applications. Dent Mater. 2018;34(6):879-890.
17. Wang L, Wang K, Sheng Y, Hao Z, Tang W, Dou R. The effect of phase contents on the properties of yttria stabilized zirconia dental materials fabricated by stereolithography-based additive manufacturing. J Mech Behav Biomed Mater. 2024;150:106313.
18. Borik MA, Bublik VT, Kulebyakin AV, Lomonova EE, Milovich FO, Myzina VA, et al. Phase composition, structure and mechanical properties of PSZ (partially stabilized zirconia) crystals as a function of stabilizing impurity content. J Alloys Compd. 2014;586:S231-S235.
19. Wang J, Chu D, Ma H, Fang S, Chen Q, Liu B, et al. Effect of sintering temperature on phase transformation behavior and hardness of high-pressure high-temperature sintered 10 mol% Mg-PSZ. Ceram Int. 2021;47(11):15180-15185.
20. Brito-Chaparro JA, Reyes-Rojas A, Bocanegra-Bernal MH, Aguilar-Elguezabal A, Echeberria J. Elucidating of the microstructure of ZrO_2 ceramics with additions of 1200°C heat treated ultrafine MgO powders: Aging at 1420°C. Mater Chem Phys. 2007;106(1):45-53.
21. Azhar AZA, Mohamad H, Ratnam MM, Ahmad ZA. The effects of MgO addition on microstructure, mechanical

properties and wear performance of zirconia-toughened alumina cutting inserts. J Alloys Compd. 2010;497(1-2): 316-320.
22. Medvedovski E. Wear-resistant engineering ceramics. Wear. 2001;249(9):821-828.
23. Yoon S, Van Tyne CJ, Lee H. Effect of alumina addition on the microstructure and grain boundary resistance of magnesia partially-stabilized zirconia. Curr Appl Phys. 2014;14(7):922-927.
24. Decker S, Krüger L. Influence of high-energy ball milling on Mg-PSZ-reinforced TRIP steel-matrix composites synthesized by FAST/SPS. Mater Sci Eng A. 2019;761: 137974.
25. Jang JH, Lee J. Microstructure and Mechanical Properties of fine-grained magnesia-partially-stabilized Zirconia Containing Titanium Carbide Particles. J Am Ceram Soc. 2000;83(7):1813-1815.
26. Pecho OE, Ghinea R, Ionescu AM, de la Cruz Cardona J, Paravina RD, del Mar Perez M. Color and translucency of zirconia ceramics, human dentine and bovine dentine. J Dent. 2012;40:e34-e40.
27. Inokoshi M, Zhang F, De Munck J, Minakuchi S, Naert I, Vleugels J, et al. Influence of sintering conditions on low-temperature degradation of dental zirconia. Dent Mater. 2014;30(6):669-678.
28. Too TDC, Inokoshi M, Nozaki K, Shimizubata M, Nakai H, Liu H, et al. Influence of sintering conditions on translucency, biaxial flexural strength, microstructure, and low-temperature degradation of highly translucent dental zirconia. Dent Mater J. 2021;40(6):1320-1328.
29. Sanal FA, Kilinc H. Effect of shade and sintering temperature on the translucency parameter of a novel multi-layered monolithic zirconia in different thicknesses. J Esthet Restor Dent. 2020;32(6):607-614.
30. Kim HK. Effect of a rapid-cooling protocol on the optical and mechanical properties of dental monolithic zirconia containing 3–5 mol% Y_2O_3. Materials. 2020;13(8):1923.
31. Lee SY. Digital workflow of single visit full contour monolithic zirconia restoration with CEREC Omnicam intraoral scanner and fast zirconia sintering process. J Korean Acad Esthet Dent. 2016;25(2):79-87.
32. 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(14):10999-11005.
33. Shin HJ, Kwon YH, Seol HJ. Effect of superspeed sintering on translucency, opalescence, microstructure, and phase fraction of multilayered 4 mol% yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal and 6 mol% yttria-stabilized partially stabilized zirconia ceramics. J Prosthet Dent. 2023;130(2):254.e1-254.e8.
34. Kwon EJ, Lee GS. Effect of MgO addition affecting in zirconia-frit composites' sintering and properties of matter. J Tech Dent. 2010;32(1):9-16.
35. Lee KS, Lee CW, Lee CH. Effect of MgO addition in glass composition on the strength of zirconia-glass composites. J Tech Dent. 2007;29(1):23-34.
36. Prajzler V, Průša S, Maca K. Rapid pressure-less sintering of fine grained zirconia ceramics: explanation and elimination of a core-shell structure. J Eur Ceram Soc. 2019;39(16):5309-5319.
37. Kim MJ, Ahn JS, Kim JH, Kim HY, Kim WC. Effects of the sintering conditions of dental zirconia ceramics on the grain size and translucency. J Adv Prosthodont. 2013;5(2):161-166.
38. Casolco SR, Xu J, Garay JE. Transparent/translucent polycrystalline nanostructured yttria stabilized zirconia with varying colors. Scripta Mater. 2008;58(6):516-519.
39. Yang D, Raj R, Conrad H. Enhanced sintering rate of zirconia (3Y-TZP) through the effect of a weak dc electric field on grain growth. J Am Ceram Soc. 2010;93(10):2935-2937.

Research Article

급속 소결된 5 mol% 이트리아 부분 안정화 지르코니아의 기계적 성질에 MgO 함량과 저온 열화가 미치는 영향

신혜정, 설효정*

부산대학교 치의학전문대학원 치과재료학교실

본 연구에서는 5Y-PSZ 분말에 MgO를 0.1, 0.5 및 1.0 wt.% 첨가하여 제조한 5Y-PSZ를 급속 소결한 후 저온열화 (low-temperature degradation, LTD) 처리하여 기계적 특성의 변화를 평가하였다. 5Y-PSZ 분말과 MgO 첨가제를 볼 밀링한 후 건조하고, 일축 가압 성형한 다음 950℃에서 1시간 동안 가소결하였다. 가소결 된 지르코니아 시편을 규격에 맞게 절단하고 양면을 SiC 연마지로 순차적으로 연마한 후, 1600℃에서 20분간 유지하여 급속 소결하였다. 또한 급속 소결된 시편을 135℃에서 2시간 동안 저온열화 처리하여 비교군을 제작하였다.

두 조건에서 시편의 기계적 특성을 평가하기 위해 3점 굴곡강도 시험, 경도 측정 및 미세구조 분석을 시행하였다. 급속 소결군과 급속 소결 후 저온열화 처리군 모두에서 무첨가 및 0.1 wt.% MgO를 첨가한 시편이 가장 높은 굴곡강도를 나타냈으며, MgO 첨가량이 이를 초과하면 굴곡강도가 감소하였다. 동일한 MgO 함량에서 급속 소결 후 저온열화 처리는 굴곡강도의 감소를 유발하지 않았다. 또한 MgO 첨가량이 증가함에 따라 두 조건 모두에서 시편의 결정립 크기가 증가하는 경향을 나타냈다.

본 연구를 통해 5Y-PSZ에 0.1 wt.% MgO를 첨가함으로써 우수한 기계적 특성을 유지할 수 있는 가능성을 확인하였다. 또한 저온열화 후에도 기계적 특성이 유지된다는 결과는 5Y-PSZ 보철물의 장기적 안정성과 내구성을 평가하는 데 유용한 정보를 제공할 수 있다.

색인단어 : 5Y-PSZ, MgO, 급속소결, 저온열화처리