

## Effect of Template Size Ratio on Porosity and Strength of Porous Zirconia Ceramics

Su-Ho Chae, Young-Wook Kim<sup>†</sup>, In-Hyuck Song\*, Hai-Doo Kim\*, and Ji Soo Bae\*\*

Department of Materials Science and Engineering, the University of Seoul, Seoul 130-743, Korea  
\*Powder Materials Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon 641-010, Korea  
\*\*Young-Jin Ceramics Co., Ltd, Chonnam 525-813, Korea

(Received August 12, 2008; Revised August 29, 2008; Accepted September 3, 2008)

### 기공형성제 크기 비(ratio)가 다공질 지르코니아 세라믹스의 기공율과 강도에 미치는 영향

채수호 · 김영욱<sup>†</sup> · 송인혁\* · 김해두\* · 배지수\*\*

서울시립대학교 신소재공학과

\*재료연구소(KIMS)

\*\* (주)영진세라믹스

(2008년 8월 12일 접수 ; 2008년 8월 29일 수정 ; 2008년 9월 3일 승인)

#### ABSTRACT

Effect of template size ratio on porosity and mechanical properties of porous zirconia ceramics were investigated using two different size (~8  $\mu\text{m}$  and ~50  $\mu\text{m}$  in diameter) of polymethyl methacrylate-coethylene glycol dimethacrylate (PMMA) microbeads as sacrificial templates. Porosity of the porous zirconia ceramics increased with decreasing the template size ratio (8  $\mu\text{m}$  : 50  $\mu\text{m}$ ) whereas the compressive and flexural strengths of the porous zirconia ceramics increased with increasing the template size ratio. By controlling the template size ratio, sintering temperature and sintering time, it was possible to produce porous zirconia ceramics with porosities ranging from 57% to 69%. Typical flexural and compressive strength values of porous zirconia ceramics with ~60% porosity were ~37 MPa and ~85 MPa, respectively.

**Key words :** Porous ceramics, Zirconia, Template, Porosity

#### 1. 서 론

다공질 세라믹스는 기존의 치밀한 재료가 갖지 못하는 분리, 저장, 단열, 경량, 통기성, 높은 비표면적(specific surface area) 등의 특성을 가지고 있기 때문에, 각종 필터, 단열재, 내화판, 촉매 담체, 전극재료, 생체재료, 센서, 조습 타일 등 광범위한 분야에서 응용된다.<sup>1-8)</sup> 이러한 다공질 세라믹스의 물성과 성능은 기공의 크기, 형상, 기공율, 배향성 등, 다공질 소재의 기능에 영향을 주는 물성과 소재의 강도, 파괴거동, 열충격 저항성 등과 같은 내구성 및 신뢰성에 영향을 주는 물성에 의해 좌우된다.<sup>9-13)</sup>

다공질 지르코니아 세라믹스의 제조공정은 크게 세가지 방법으로 나뉘어지는데 복제(replica)법, 템플레이트(template)법 및 부분 소결(partial sintering)법이다. 복제법은 고분자 스폰지에 지르코니아 슬러리를 코팅하고, 건조 및 열처리공정을 함으로써 고분자 슬러리가 열분해 되어

기공을 형성하는 방법이고,<sup>14)</sup> 템플레이트법은 카본(carbon),<sup>15)</sup> 라텍스,<sup>16)</sup> 또는 고분자 미세구<sup>17)</sup> 등을 지르코니아 분말과 혼합하여 성형체를 만든 후 열처리 과정을 거쳐 템플레이트를 분해 또는 태워버려 기공을 형성하는 방법이며, 부분 소결법은 지르코니아 성형체를 소결할 때 최적의 소결조건에서 벗어난 조건에서 소결함으로써, 소결체 내에 인위적인 기공을 남겨 다공질 지르코니아 세라믹스를 제조하는 방법이다.<sup>18)</sup>

지금까지 템플레이트법을 사용하여 다공질 세라믹스를 제조하는 경우에, 대부분의 연구는 한 가지 크기의 템플레이트를 사용하거나, 단일 크기 분포(unimodal size distribution)를 갖는 템플레이트를 사용하여 제조하는 것이 대부분이었고, 이중 크기 분포(bimodal size distribution)를 갖는 템플레이트 첨가가 다공질 세라믹스의 기공율 및 강도에 미치는 영향은 거의 보고되지 않았다. 본 연구에서는 PMMA 미세구의 총 함량을 50 vol%로 고정하고, ~8  $\mu\text{m}$  및 ~50  $\mu\text{m}$  크기의 PMMA 미세구의 첨가 비율을 달리하여, 기공형성제 크기 비가 다공질 세라믹스의 기공율 및 강도에 미치는 영향을 고찰하였다.

<sup>†</sup>Corresponding author : Young-Wook Kim  
E-mail : ywkim@uos.ac.kr  
Tel : +82-2-2210-2760 Fax : +82-2-2215-5863

**Table 1.** Sample Designation and Batch Composition of Porous ZrO<sub>2</sub> Ceramics

Sample	Batch composition (wt%)			Remark PMMA ratio 8 μm:50 μm
	ZrO <sub>2</sub>	PMMA 8 μm	PMMA 50 μm	
PZ1	83.610	8.195	8.195	5:5
PZ2	83.610	6.556	9.834	4:6
PZ3	83.610	4.917	11.473	3:7
PZ4	83.610	3.278	13.112	2:8

## 2. 실험 방법

출발원료로 내화물용 ZrO<sub>2</sub> (ZC7F7, Universal America, Inc., USA) 분말을 사용했고, 기공형성제로 두 가지 크기를 갖는 PMMA 미세구 (poly(methyl methacrylate-coethylene glycol dimethacrylate, ~8 μm 및 ~50 μm, Sigma-Aldrich Inc, St. Louis, MO)를 사용하였다. 성형공정의 결합재로 polyethylene glycol (PEG)과 polyvinyl alcohol (PVA)을 각각 2%씩 첨가하였다.

원료조합은 Table 1과 같이 템플레이트로서 8 μm 및 50 μm 크기의 두 가지 크기의 PMMA 미세구를 사용하였고, PMMA 미세구 총 함량을 50 vol%로 고정시키고 8 μm 및 50 μm 미세구의 혼합비율을 부피비로서 다르게 하여 (8 μm:50 μm=5:5, 4:6, 3:7, 2:8) 총 4가지 원료조합을 준비하였다. 원료 혼합은 증류수를 용매로 사용하여, ZrO<sub>2</sub> 불과 폴리프로필렌 병을 사용하여 불밀링 하였고, 건조공정을 거친 후, 40 mm×8 mm×5 mm 크기의 시편으로 상온에서 50 MPa의 압력으로 일축가압성형 하였고, 이어서 120 MPa의 압력으로 냉간등축가압성형(cold isostatic pressing, CIP)하였다. 성형체는 전기로를 사용하여 공기분위기에서 3°C/min의 속도로 목표온도까지 가열하여 소결하였다. 소결조건은 다공질 지르코니아 세라믹스의 미세조직, 기공을 및 기계적 특성에 미치는 영향을 연구하기 위해 크게 두 가지 방법으로 진행하였다. 첫째는 소결시간의 영향을 알아보기 위한 실험으로 소결온도를 1550°C로 고정하고, 소결시간을 1~8시간 범위에서 변화시켰고, 두 번째는 소결온도의 효과를 고찰하기 위해 소결 시간을 8시간으로 고정하고, 1450~1600°C 온도 범위에서 온도를 변화시켜 소결하였다.

제조된 시편의 부피밀도(bulk density, D<sub>b</sub>)는 질량(g) 대 부피(V)비로부터 계산하였다.

$$D_b \text{ (g/cm}^3\text{)} = M \text{ (g)} / V \text{ (cm}^3\text{)} \quad (1)$$

기공율(P)은 부피밀도와 이론밀도(D<sub>th</sub>)를 가지고 아래와 같은 식을 이용해 계산하였다.

$$P \text{ (%) } = (1 - D_b / D_{th}) \times 100 \quad (2)$$

다공질 지르코니아 세라믹스의 미세조직은 주사전자현

미경(SEM, S-4300, Hitachi Co., Japan)을 사용하여 관찰하였고, 압축강도 및 곡강도는 만능시험기(Instron 4461, Norwood Co., USA)를 사용하여 측정하였다. 압축강도( $\sigma_{\text{compressive}}$ )는 0.5 mm/min의 cross-head 속도로 하중을 가하여 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_{\text{compressive}} \text{ (Pa)} = F \text{ (N)} / (d_1 \text{ (m)} \times d_2 \text{ (m)}) \quad (3)$$

여기서 F는 파괴하중을, d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>는 하중을 받는 시편의 가로 및 세로 길이를 나타낸다.

곡강도는 내부 span 10 mm, 외부 span 20 mm의 치구를 사용하여 0.5 mm/min의 cross-head 속도로 4점 곡강도를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 8 μm 및 50 μm 크기의 PMMA 미세구를 3:7 비율로 첨가하고, 1550°C에서 소결시간을 1시간에서 8시간까지 변화시켜 제조한 다공질 지르코니아 세라믹스의 파단면을 보여준다. 그림에서 보듯이 다공질 지르코니아 시편 내에 40~55 μm 크기의 기공과 6~10 μm 크기의 기공이 함께 존재하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 기공형성제로 첨가된 두 종류의 PMMA 미세구가 불밀링 및 성형 공정에서 손상되지 않고, 소결공정에서 PMMA의 분해온도까지 형상을 유지했음을 나타낸다. 소결시간이 1시간에서 8시간으로 증가함에 따라, 입자 성장이 관찰되었고, 기공 벽(strut) 부분은 치밀화가 진행되어, 기공 벽에 존재하던 작은 기공 중 일부는 소멸하고, 일부는 크기가 더욱 작아진 것을 관찰할 수 있다. 1550°C에서 1, 2, 4, 8 시간 동안 소결한 PZ3시편의 기공율은 각각 64.3%, 63.6%, 62.3%, 61.6%로서, 소결시간이 길어짐에 따라 기공율이 감소하였고, Fig. 1에서 관찰한 미세조직과 일치하는 결과를 나타냈다.

Fig. 2는 소결시간을 8시간으로 고정하고, 소결온도를 1450°C에서 1600°C까지 변화시킨 다공질 지르코니아 세라믹스의 파단면을 보여준다. 소결온도가 1450°C에서 1600°C로 증가함에 따라 입자성장과 기공 벽(strut) 부분의 치밀화가 이루어졌고, 남은 기공은 더욱 커지는 기공 성장(pore growth) 현상도 관찰되었다. 이러한 현상은 다

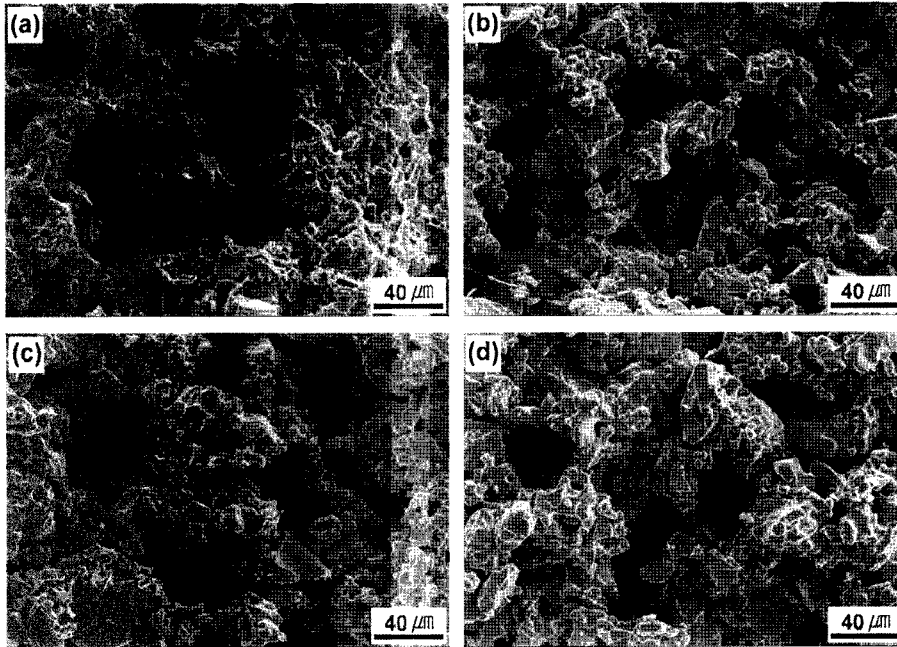


Fig. 1. Effect of sintering time on the microstructure of porous zirconia ceramics (PZ3) sintered at 1550°C for various times in air: (a) 1 h, (b) 2 h, (c) 4 h, and (d) 8 h (refer to Table 1).

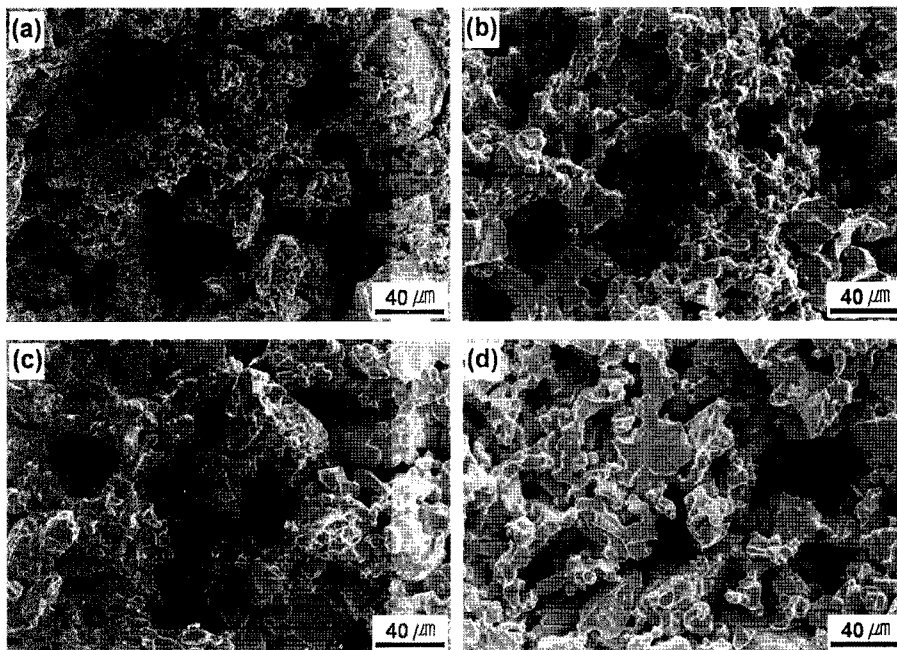


Fig. 2. Effect of sintering temperature on the microstructure of porous zirconia ceramics (PZ3) sintered at various temperatures for 8 h in air: (a) 1450°C, (b) 1500°C, (c) 1550°C, and (d) 1600°C (refer to Table 1).

공질 SiC 세라믹스에서도 관찰된 바 있다.<sup>19)</sup> 한편, 입자 성장에 의해 40~55 μm 크기의 대형 기공의 형상이 구형에서 불규칙적인 형상으로 변화하였고, 1450°C, 1500°C, 1550°C, 및 1600°C에서 소결한 PZ3 시편의 기공율은 각각 65.8%, 62.9%, 61.6%, 60.3%로서, 소결 온도가 증가함에 따라 치밀화가 진행되어 기공율이 감소하였다.

Fig. 3은 소결조건(1600°C/8 h)과 총 PMMA함량(50 vol%)

을 고정하고, PMMA 미세구 8 μm:50 μm의 비율을 다르게 하여 제조한 다공질 지르코니아 세라믹스의 파단면을 보여준다. 첨가 된 PMMA의 8 μm:50 μm의 비율은 5:5, 4:6, 3:7, 2:8로서, 각각의 기공율은 58.1%, 59.3%, 60.3%, 61.1% 이었다. 50 μm PMMA의 함량이 증가할수록 기공율은 증가하였고 크기가 40~60 μm인 거대기공이 더 많이 관찰되었다. 첨가 된 PMMA 미세구의 총 함량이 동

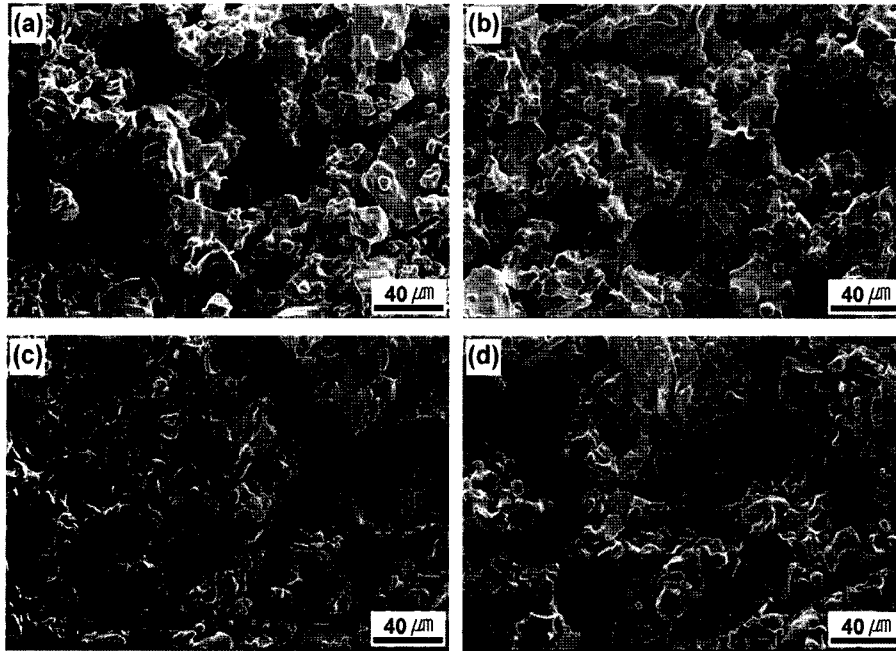


Fig. 3. Effect of template size ratio on the microstructure of porous zirconia ceramics sintered at 1600°C for 8 h: (a) 8  $\mu\text{m}$  : 50  $\mu\text{m}$  = 5 : 5, (b) 4 : 6, (c) 3 : 7, and (d) 2 : 8.

일하더라도 PMMA의 크기 비에 따라 다공질 지르코니아 세라믹스의 기공율이 변하는 것은 새로운 현상으로 50  $\mu\text{m}$  크기의 대형 PMMA 첨가에 의해 형성된 기공은 소결 공정 동안에 확산(diffusion)에 기초한 치밀화 공정으로 제거가 어려우나, 8  $\mu\text{m}$  크기의 PMMA 미세구에 의해 형성된 기공 중에 일부는 소결공정 동안에 치밀화되어 전체적인 기공율이 낮아지는데 기여한다고 판단된다.

Fig. 4는 PMMA의 크기 비와 소결시간에 따른 다공질 지르코니아 세라믹스의 기공율을 보여준다. 1550°C에서 1시간 소결한 시편의 기공율은 62.5~65.7%의 기공율을 나타내고, 1550°C에서 8시간 소결한 시편의 기공율은

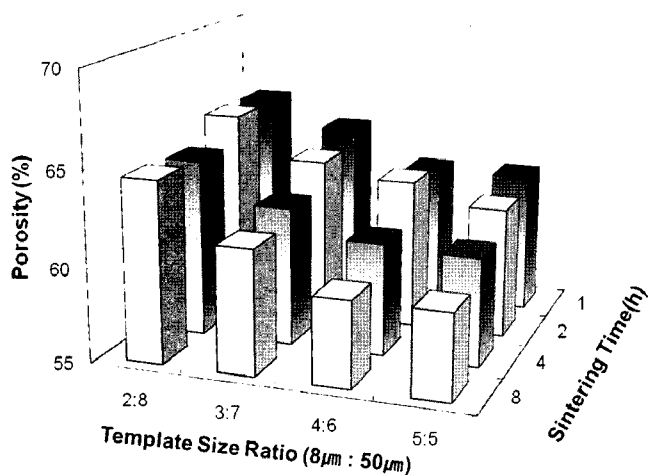


Fig. 4. Effects of template size ratio and sintering time on porosity of porous zirconia ceramics sintered at 1550°C in air.

59.5~64.6% 범위의 기공율을 갖는다. 동일한 소결시간에서 PMMA 미세구의 8  $\mu\text{m}$  : 50  $\mu\text{m}$  비율이 5 : 5, 4 : 6, 3 : 7, 2 : 8로 변화함에 따라 기공율이 증가하는 경향을 나타냈다. 즉 기공형성체의 함량이 동일하더라도 기공형성체의 크기가 큰 PMMA가 많이 첨가되면 기공율이 증가하였다. 이는 50  $\mu\text{m}$  크기의 대형 PMMA 첨가에 의해 형성된 기공은 8  $\mu\text{m}$  크기의 PMMA 미세구에 의해 형성된 기공보다 소결공정 동안에 제거되기 어렵기 때문이다.

동일한 PMMA 미세구의 비율에서는 소결시간이 길어짐에 따라 기공율은 감소하였다. 이러한 경향은 Fig. 1의 미세조직 설명에서도 언급했던 것처럼, 소결시간이 8시간 까지 길어짐에 따라 추가적인 치밀화가 일어나 기공율이 감소하기 때문이다. 상기 결과는 PMMA 미세구의 크기 비율과 소결시간을 제어함으로써 60~66% 범위의 기공율을 갖는 다공질 지르코니아 세라믹스를 제조할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 5는 소결 시간을 8시간으로 고정하고, PMMA 미세구의 크기 비율과 소결온도에 따른 기공율의 변화를 보여준다. Fig. 4와 마찬가지로 기공율은 50  $\mu\text{m}$  크기 미세구의 비율이 높아질수록 증가하였고, 소결온도가 높아질수록 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 원인은 Fig. 2의 미세조직 설명에서 언급했듯이 소결온도가 1600°C까지 높아짐에 따라, 입자의 성장도 일어났지만, 추가적인 치밀화도 일어났기 때문이다. 다른 온도와 달리 1450°C에서 소결한 시편에서는 PMMA 미세구의 크기 비 변화에 따른 기공율의 변화가 일정한 경향을 나타내지 않았는데, 이는 1450°C에서는 소결온도가 너무 낮아 소결이 충분히

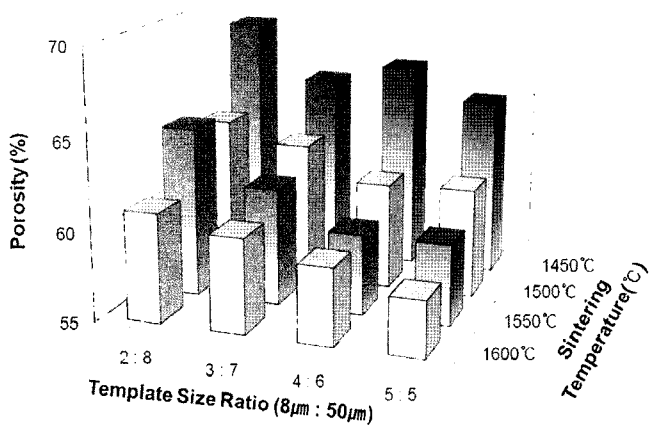


Fig. 5. Effect of template size ratio and sintering temperature on porosity of porous zirconia ceramics sintered for 8 h in air.

진행되지 않았기 때문이다. 현재의 결과는 소결시간을 8시간으로 고정하고, 소결온도와 PMMA 미세구의 크기비를 변화시킴으로써 기공율을 57~69% 범위에서 제어하는 것이 가능함을 나타낸다.

소결온도를 1550°C로 고정하고, PMMA 미세구의 크기비와 소결시간의 변화에 따른 다공질 지르코니아 세라믹스의 압축강도 및 곡강도 변화를 Fig. 6에서 보여준다. 다공질 지르코니아 세라믹스의 압축강도와 곡강도는 비슷한 경향을 나타냈는데, PMMA 미세구의 크기 비가 2:8 (8µm: 50µm)에서 5:5로 증가함에 따라 또한, 소결시간이 1시간에서 8시간으로 증가함에 따라 증가하였다. 이는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 기공율과 정반대 경향으로서 다공질 지르코니아 세라믹스의 강도는 기공율이 낮아지면 증가하고, 기공율이 높아지면 강도는 낮아지는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 다공질 지르코니아 세라믹스의 강도는 주로 기공율에 의해 영향을 받는다는 것을 나타낸다. PMMA 미세구의 크기 비가 5:5 (8µm:50µm)이고 1550°C에서 8시간 소결한 시편의 압축강도는 87±6 MPa이었고, 곡강도는 37±7 MPa이었다.

Fig. 7은 소결 시간을 8시간으로 고정하고, PMMA 미세구의 크기 비와 소결온도에 따른 다공질 지르코니아 세라믹스의 압축강도 및 곡강도를 보여준다. 압축강도와 곡강도는 모두 PMMA 미세구의 크기 비가 2:8 (8µm:

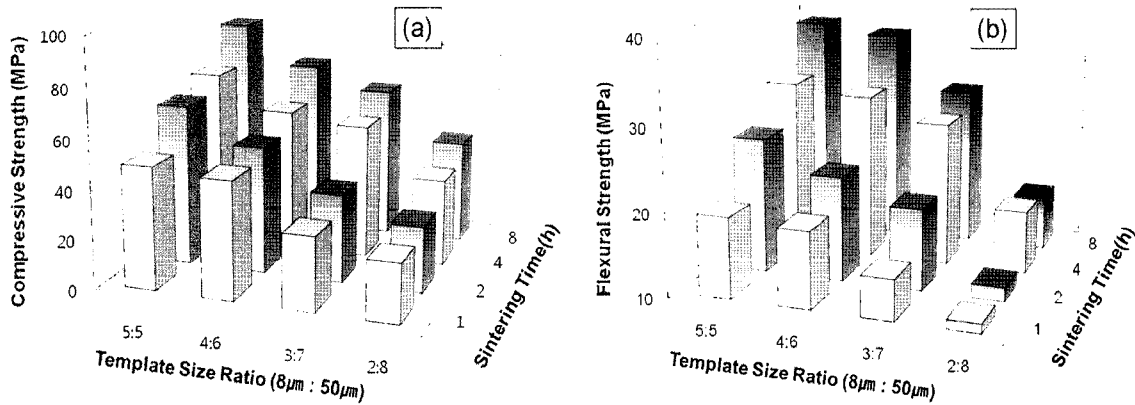


Fig. 6. Strength of porous zirconia ceramics sintered at 1550°C in air as functions of template size ratio and sintering time: (a) compressive strength and (b) flexural strength.

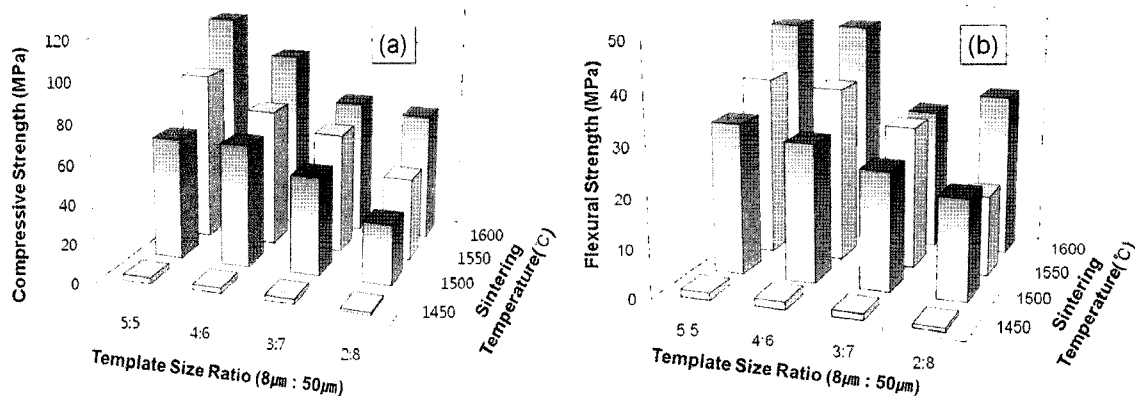


Fig. 7. Strength of porous zirconia ceramics sintered for 8 h as functions of template size ratio and sintering temperature: (a) compressive strength and (b) flexural strength.

50  $\mu\text{m}$ )에서 5:5로 증가함에 따라 또한, 소결온도가 1450°C에서 1600°C로 증가함에 따라 증가하였다. 이는 PMMA 미세구의 크기 비가 증가하고, 소결온도가 증가함에 따라 Fig. 5에서 보듯이 기공율이 감소하기 때문이다. PMMA 미세구의 크기 비가 5:5이고, 1600°C에서 8시간 소결한 시편의 압축강도와 곡강도는 각각  $112 \pm 6$  MPa과  $46 \pm 4$  MPa로서 연구된 공정조건 중에서 가장 높은 강도를 나타냈다.

1450°C에서 소결한 시편의 경우에 압축강도 및 곡강도가 1~3 MPa 및 1~2 MPa로서 다른 시편에 비해 현저히 낮은 강도 값을 나타냈는데, 이는 본 연구에 사용된 내화물용 지르코니아 분말의 소결온도로 1450°C는 너무 낮은 온도여서 입자 간에 결합이 충분히 일어나지 않았기 때문이며, 이러한 결과는 Fig. 5에서 1450°C 소결 시편의 경우에 PMMA 미세구의 크기 비에 따른 기공율이 일정한 경향을 나타내지 않는 것을 설명한다.

소결이 불충분한 1450°C에서 소결된 시편의 강도 값을 제외하고, 1500°C~1600°C에서 소결된 시편의 압축강도는 같은 조건에서 소결된 시편의 곡강도에 비해 2.0~2.5배 높은 값을 나타냈다.

본 연구에서 제조된 다공질 지르코니아 세라믹스의 압축강도와 곡강도는 기공율이 60%일 때, 각각 ~85 MPa과 ~37 MPa이었다. 한편, 선행 연구에서는 내화물용 지르코니아 분말과 20  $\mu\text{m}$  PMMA 미세구를 사용하여 다공질 지르코니아 세라믹스를 제조하였고, 기공율이 60%일 때, 다공질 지르코니아 세라믹스의 압축강도와 곡강도는 각각 ~60 MPa과 ~20 MPa이었다.<sup>20)</sup> 이러한 결과는 큰 미세구와 작은 미세구를 첨가한 이중분포(bimodal distribution) 미세구에서 큰 미세구에 의해 형성된 기공이 임계결함(critical flaw)으로 작용하기 때문에, 같은 총 함량의 미세구를 첨가했을 때 이중분포의 미세구 첨가의 경우에 큰 미세구에 의한 기공율은 단일분포(unimodal distribution)의 미세구에 의한 기공율보다 낮아져 다공질 SiC 세라믹스의 강도가 증가되는 것으로 판단된다. 즉 템플레이트법으로 다공질 세라믹스를 제조할 때에 기공형성제로서 단일분포 미세구를 첨가하기 보다는 이중분포 미세구를 첨가하는 것이 강도를 높이는데 더 효과적임을 나타낸다.

본 연구에서 1500°C~1600°C 온도 범위에서 소결온도가 다공질 지르코니아 세라믹스의 강도에 미치는 영향은 명확하지 않았고, 기공율에 크게 의존하였다. 한편, Gain 등은<sup>17)</sup> 70 nm 크기의 ZrO<sub>2</sub> 분말과 150~200  $\mu\text{m}$  크기의 PMMA를 출발원료로 사용하여 다공질 지르코니아 세라믹스를 제조하였고, 이렇게 제조된 다공질 지르코니아 세라믹스의 곡강도는 기공율이 약 53%일 때, 곡강도가 약 150 MPa로 매우 우수하였다. 이러한 결과는 다공질 지르코니아 세라믹스의 곡강도를 높이기 위해서는 출발원료의 입자 크기를 작게 하는 것이 매우 중요함을 나타낸다. 그러나

출발원료의 입자크기는 경제성과 직접 연관되므로, 용도에 따른 적절한 출발원료의 선택이 필요하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

지르코니아 분말과 두 가지 크기(8  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ )의 PMMA 미세구를 사용하여 1450°C~1600°C의 온도범위에서 1~8 시간 범위의 소결시간으로 57~69%의 기공율 범위를 갖는 다공질 지르코니아 세라믹스를 제조할 수 있었다.

PMMA 미세구의 함량을 50 vol%로 고정하였을 때, 1500°C~1600°C의 온도범위에서 제조된 다공질 지르코니아 세라믹스의 기공율은 PMMA 미세구의 8  $\mu\text{m}$ :50  $\mu\text{m}$  비가 감소할수록 증가하였고, 소결온도가 증가할수록 감소하였다. 그러나 압축강도 및 곡강도는 그 반대 경향을 나타냈다.

기공형성제로서 단일분포 PMMA 미세구를 첨가했을 때 보다 이중분포 미세구를 첨가했을 때, 같은 기공율에서 더 높은 강도를 나타냈다.

본 연구에서 제조된 다공질 지르코니아 세라믹스의 대표적인 압축강도와 곡강도는 기공율이 60%일 때, 각각 ~85 MPa과 ~37 MPa이었다.

#### Acknowledgment

본 연구는 지식경제부의 21 세기 프론티어기술개발사업의 일환인 차세대소재성형기술개발사업단(the Center for Advanced Materials Processing, CAMP)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### REFERENCES

1. V. Biasini, M. Parasporo, and A. Bellosi, "Fabrication and Characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Porous Bodies by Hot Isostatic Pressing," *Thin Solid Films*, **297** 207-11 (1997).
2. Y. P. Jin and Y. T. Chou, "Thermal and Mechanical Properties of Porous Y-PSZ/Zircon Composites," *Mater. Res. Innovat.*, **1** 227-30 (1998).
3. J. W. Baek and D. J. Kim, "Ceramic Foams by the Self-Blowing of Polymer(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **41** [7] 555-59 (2004).
4. J. Adler, "Ceramic Diesel Particulate Filters," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, **2** [6] 429-39 (2005).
5. M. Fukushima, Y. Zhou, H. Miyazaki, Y. Yoshizawa, K. Hirao, Y. Iwamoto, S. Yamazaki, and T. Nagano, "Microstructural Characterization of Porous Silicon Carbide Membrane Support with and without Alumina Additive," *J. Am. Ceram. Soc.*, **89** [5] 1523-29 (2006).
6. S. H. Lee and Y.-W. Kim, "Processing of Cellular SiC Ceramics Using Polymer Microbeads," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **43** [8] 458-62 (2006).
7. Y.-W. Kim, S. H. Kim, C. Wang, and C. B. Park, "Fab-

- rication of Microcellular Ceramics Using Gaseous Carbon Dioxide," *J. Am. Ceram. Soc.*, **86** [12] 2231-33 (2003).
8. J. H. Eom, D. H. Jang, Y.-W. Kim, I. H. Song, and H. D. Kim, "Low Temperature Processing of Porous Silicon Carbide Ceramics by Carbothermal Reduction(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **43** [9] 552-57 (2006).
  9. D. H. Jang, K. Y. Lim, and Y.-W. Kim, "Effects of Additive Composition and Content on Sintered Density and Compressive Strength of Cordierite Ceramics(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **44** [4] 230-34 (2007).
  10. J. H. Eom and Y.-W. Kim, "Fabrication of Silicon Oxycarbide Foams from Extruded Blends of Polysiloxane, Low-Density Polyethylene (LDPE), and Polymer Microbead," *Met. Mater. Int.*, **13** [6] 521-25 (2007).
  11. B. H. Yoon, E. J. Lee, H. E. Kim, and Y. H. Koh, "Highly Aligned Porous Silicon Carbide Ceramics by Freezing Polycarbosilane/Camphene Solution," *J. Am. Ceram. Soc.*, **90** [6] 1753-59 (2007).
  12. Y.-W. Kim, S. H. Kim, I. H. Song, H. D. Kim, and C. B. Park, "Fabrication of Open-Cell, Microcellular Silicon Carbide Ceramics by Carbothermal Reduction," *J. Am. Ceram. Soc.*, **88** [10] 2949-51 (2005).
  13. Y.-W. Kim, J. H. Eom, C. Wang, and C. B. Park, "Processing of Porous Silicon Carbide Ceramics from Carbon-Filled Polysiloxane by Extrusion and Carbothermal Reduction," *J. Am. Ceram. Soc.*, **91** [4] 1361-64 (2008).
  14. I. K. Jun, Y. H. Koh, J. H. Song, S. H. Lee, and H. E. Kim, "Improved Compressive Strength of Reticulated Porous Zirconia Using Carbon Coated Polymeric Sponge As Novel Template," *Mater. Lett.*, **60** 2507-10 (2006).
  15. A. K. Gain and B. T. Lee, "Microstructure Control of Continuously Porous t-ZrO<sub>2</sub> Bodies Fabricated by Multi-Pass Extrusion Process," *Mater. Sci. & Eng. A*, **419** 269-75 (2006).
  16. B. Nait-Ali, K. Haberko, H. Vesteghem, J. Absi, and D. S. Smith, "Thermal Conductivity of Highly Porous Zirconia," *J. Europ. Ceram. Soc.*, **26** 3567-74 (2006).
  17. A. K. Gain, H. Y. Song, and B. T. Lee, "Microstructure and Mechanical Properties of Porous Yttria Stabilized Zirconia Ceramic Using Poly Methyl Methacrylate Powder," *Scripta Mater.*, **54** 2081-85 (2006).
  18. Z. Y. Deng, J. F. Yang, Y. Beppu, M. Ando, and T. Ohji, "Effect of Agglomeration on Mechanical Properties of Porous Zirconia Fabricated by Partial Sintering," *J. Am. Ceram. Soc.*, **85** [8] 1961-65 (2002).
  19. J. H. Eom, Y.-W. Kim, I. H. Song, and H. D. Kim, "Microstructure and Properties of Porous Silicon Carbide Ceramics Fabricated by Carbothermal Reduction and Subsequent Sintering Process," *Mater. Sci. Eng. A*, **464** 129-34 (2007).
  20. S. H. Chae, J. H. Eom, Y.-W. Kim, I. H. Song, H. D. Kim, J. S. Bae, S. M. Na, and S. I. Kim, "Porosity Control of Porous Zirconia Ceramics(*in Korean*)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **45** [1] 65-8 (2008).