Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 44, No. 5, pp. 184~189, 2007.

Synthesis of Microcellular Cordierite Ceramics Derived from a Preceramic Polymer

In-Hyuck Song,† Young-Mi Kim, Hai-Doo Kim, and Young-Wook Kim*
Department of Materials Engineering, Korea Institute of Machinery and Materials, Chnawon, 641-010, Korea
*Department of Materials Science and Engineering, The University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea
(Received April 23, 2007; Accepted May 21, 2007)

Preceramic Polymer를 이용한 마이크로셀룰라 코디어라이트 세라믹스의 합성

송인혁† · 김영미 · 김해두 · 김영욱*
한국기계연구원 재료연구부
*서울시립대학교 신소재공학과
(2007년 4월 23일 접수; 2007년 5월 21일 승인)

ABSTRACT

In this study, a novel-processing route for producing microcellular cordierite ceramics has been developed. The proposed strategy for making the microcellular cordierite ceramics involves three steps: (i) fabricating ceramic-filled preceramic foams by heating a mixture of polysiloxane, expandable microspheres, talc, and alumina in a mold, (ii) cross-linking the foamed body, and (iii) transforming the body into microcellular cordierite ceramics by sintering. Cu jig was used for near net shaping in the foaming step. The experimental variables such as the shape of foaming jig and the content of expendable microsphere were investigated. By controlling the content of expendable microsphere, it was possible to make the porous cordierite ceramics with cell density of ~1.0 $\times 10^9$ cells/cm^3.

key words **: *Cordierite, Porous material, Foaming, Porosity***

1. 서 론

최근 들어 다공질 재료는 기존의 치밀한 재료가 갖지 못하는 특성을 부여할 수 있기 때문에 치밀한 재료와 더불어 산업적 중요성이 증대되고 있다. 특히 다공질 재료 기술은 filtration/separation 효과를 얻는 부분과 재료 내부에 개기공/폐기공의 크기, 형상, 배향성, 기공율, 분포 등을 제어하여 기존 재료가 갖지 못하는 새로운 특성을 창출할 수 있다. 그러므로 이와 같은 기공 특성을 이용하여 각종 고온용 경량 구조재료, 고온로용 치구(kiln furniture), 방탄재료, 충격흡수재, 단열재료, 내화물, 고온용 가스 필터(hot gas filter), 수질정화용 필터(water filter), 흡음재, 우주망원경용 경량 구조재, 복합재료용 프리폼(preform) 등 다양한 분야에 응용[1-3]이 가능하다.

특히 셀룰라 구조를 가지고 있는 다공질 재료는 기존의 다공질 재료에 비하여 기공 함량에 대한 비강도가 우수하여 향후 응용 범위가 점차 확대 될 것으로 예상된다. 그러나 기존에 상용화 되어지고 있는 셀룰라 구조를 가지고 있는 세라믹스 재료는 기공의 크기가 100 μm~2 mm 범위로 매우 조대한 기공크기를 가지며 기공의 밀도(단위부피당 cell의 개수)가 낮아서 우수한 기계적 특성을 기대하기 어렵다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 Kim[4-7] 등은 세라믹스로 변환 가능한 무기고분자를 이용하여 기공의 크기가 수십 μm이하이며, 기공밀도가 10^9 cells/cm^3 이상 되는 마이크로셀룰라 세라믹스라는 재료를 제조하였다.

무기고분자(preceramic polymer)를 이용한 세라믹스를 제조하는 기술은 무기고분자를 가교 및 열처리 공정을 통하여 세라믹스로 전환시키는 기술로서, 상기의 기술을 통하여 다양한 SiC, Si_3N_4, BN, AlN, TiC, B_4C 등의 세라믹스를 합성할 수 있는 기술이다. 특히 무기 고분자는 용해성과 용융성을 가지므로 점도 조절의 편리함, 우수한 젖음성(wettability)과 성형성, 분자 수준의 균일한 혼합이 가능하며 가교 반응을 거쳐서 비교적 저온에서 균일한 세라믹스를 얻을 수 있다. 더욱이 고분자의 분자 구조 제어를 통하여 세라믹스 생성물의 조성과 물성제어도 가능하다. 또한 열가소성, 열경화성 무기고분자 등을 유기 결합제 대신 혼합하여 casting, spinning 또는 molding 등과 같은 성형 공정을 활용하여 복잡한 형태를 가진 세라믹스를 제조할 수 있고 기존의 분말 공정상 문제점을 해결할 수 있다.[8-10]

코디어라이트($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$)재료는 내열성, 화학

†Corresponding author : In-Hyuck Song
E-mail : sih1654@kmail.kimm.re.kr
Tel : +82-55-280-3534 Fax : +82-55-280-3392

적 안정성 등이 우수하며 특히 열충격에 강한 특성을 보이고 있어서 내열식기, 전기공업용 등의 내열 충격성 재료로서 널리 사용되었으며, 또한 자동차 배기가스 정화용 촉매담체 등에 널리 쓰이고 있다. 또한 요즈음에는 낮은 열팽창계수, 낮은 유전율 그리고 높은 전기 절연성 때문에 집적회로 패키징 소재로 응용되고 있다.[11-13]

본 실험에서는 무기고분자로서 폴리실록산(polysiloxane)과 기공 형성제로서 팽창 가능한 중공형 미세구(expandable microsphere) 및 반응성 필러(filler)를 이용하여 다공성 코디어라이트를 합성하였으며, 중공형 미세구의 함량 및 공정 변화에 따른 다공성 세라믹스의 미세조직 및 기공률 변화에 대해 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1. 원료분말

다공성 마이크로셀룰라 코디어라이트를 합성하기 위한 원료 분말은 폴리실록산(YR3370, GE Toshiba Silicones Co., Ltd., Japan), 팽창 가능한 미세구(461DU40, Expancel, Sundsvall, Sweden), talc ($Mg_3(OH)_2Si_4O_{10}$, Samchun Pure Chemical, Korea), Al_2O_3 (AKP30 Sumitomo Chemical Co., Japan) 등을 사용하였다. 본 실험에서 기공형성제로 사용되는 expancel은 팽창 가능한 중공형 미세구로서 폴리메틸메스아크릴레이트(Polymethylmethacrylate)로 구성된 피막(Shell)과 피막 내부에 팽창의 매개체로서 이소부탄(Isobuthane) 또는 이소펜탄(Iospentane)을 포함하는 직경 9~15 μm의 구형 소재이고, 대기압에서 120~200°C로 가열하면, 폴리메틸메스아크릴레이트 피막은 연화되고, 내부의 이소부탄 또는 이소펜탄은 부피가 팽창하여 미세구의 부피를 증가시킨다.

2.2. 분말의 혼합 및 성형

Table 1은 마이크로셀룰라 코디어라이트 세라믹스를 합성하기 위해 사용된 조성을 정리한 것이다. 팽창 가능한 미세구의 함량을 주요 변수로 사용하였으며, 3 wt%~15 wt%로 3 wt%씩 변화를 주었다. 또한 폴리실록산, talc 및 Al_2O_3는 예비실험을 통하여 cordierite 조성이 되도록 칙량하였다.

사용된 원료 분말은 테프론 볼과 폴리에틸렌 용기를 이용하여 6시간 동안 혼합하였다. 혼합된 분말은 내부 용기가 64 cm^3(8×8×1 cm)인 Cu 용기에 60 g씩(packing density :0.94 g/cm^3) 장입하였다. 분말이 장입된 Cu 용기는 140°C까지 분당 2°C/min의 승온 속도로 오븐에 넣고 가열하였다. 온도가 증가함에 따라서 중공형 미세구는 팽창하였으며, 폴리실록산은 연화된다. 이와 같은 거동은 시편을 Cu 몰드의 부피에 도달할 때까지 팽창한다. 팽창되어진 시편은 공기 분위기에서 180°C까지 가교 공정을 거쳤으며, 이들 시편은 1325°C, 10시간 동안 공기 분위기에서 열처리를 실시하였다. 이때 열처리 공정에서 700°C에서 1시간 동안 등온 공정을 포함시켰으며, 분당 2°C의 승온 속도로 열처리하였다. 열처리 공정은 구형의 중공형 미세구를 분해시키며, 폴리실록산이 세라믹스로 전환이 가능하도록 열에너지를 제공하고, 반응성 필러(filler) 역할을 하는 Al_2O_3와 talc가 cordierite 합성 반응을 유도한다.

Table 1. Batch Composition of Microcellular Cordierite Ceramics

Designation	talc	Al_2O_3	polysiloxane	expancel
E3	38.4	30.9	27.7	3
E6	37.2	30.0	26.8	6
E9	36.0	29.1	25.9	9
E12	34.8	28.1	25.1	12
E15	33.7	27.1	24.2	15

마이크로셀룰라 구조의 코디어라이트 세라믹스의 밀도는 부피와 질량을 측정하여 계산하였으며, 전체 기공도는 측정된 밀도와 코디어라이트 세라믹스의 이론밀도(2.60 g/cm^3)로 부터 계산하였다. 또한 기공의 분포는 수은 함침법을 이용한 porosimeter(AutoPore IV Series, USA)를 이용하였다. 또한 기공구조는 주사전자현미경(SEM, Jeol, Japan)을 사용하여 관찰하였다. 기공밀도(cell density)는 미세조직 상에서 단위 면적당 기공의 개수를 측정한 후, 이를 3차원으로 변환하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1은 마이크로셀룰라(microcellular) 다공성 세라믹스를 제조하기 위한 공정의 개략도를 나타낸 그림이다. 공정은 3단계로 구성되며, (i) 세라믹스 전구체인 폴리실록산, 기공 형성제(foaming agent)로 중공형 미세구, 활성 filler로 talc와 Al_2O_3의 혼합물을 이용하여 금속 주형틀에서 온도를 가열하여 기공을 형성하는 공정, (ii) 세라믹스 전구체를 경화 시키는 공정 및 (iii) 열분해 공정을 거쳐 마이크로셀룰러 세라믹스를 제조하는 공정으로 구성된다. 이는 기존에 Kim 등[4,5]이 제안한 마이크로셀룰라 공정을 보완하여 혼합된 원료를 분말상태로 금속 주형틀에 장입하여 성형 발포함으로서, 단순히 일축 가압 프레스에 의하

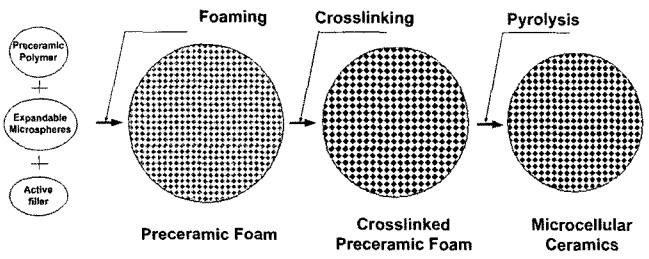

Fig. 1. Schematic representation of processing procedure fabricating for microcellular ceramics.

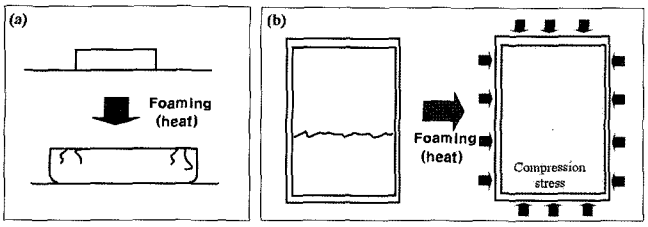

Fig. 2. Comparison between (a) the conventional foaming process and (b) the proposed jig foaming process fabricating for microcellular ceramics.

여 예비 성형체(preform)를 제조하는 공정을 한 단계 줄이면서 실형상 제어를 가능하게 하였다. Fig. 2는 기존의 다공질 재료의 제조 시 발포 공정과 본 실험에 사용된 금속 주형틀을 사용하여 기공을 형성하는 공정을 비교한 그림이다. 기존의 발포(foaming) 공정의 경우 혼합 분말을 성형하고 온도를 증가시킴에 따라서 발포 시 부피팽창을 유발하며, 이때 시편의 변위 이동을 통하여 모서리 부분에서 크랙(crack) 등의 결함이 발생한다. 이와 같은 문제점을 해소하면서 발포 시 실형상 제어를 위하여 Fig. 2 (b)와 같이 금속 주형틀을 사용 하였다. 즉 혼합분말을 성형하지 않고 바로 금속 주형틀에 장입한 후 온도를 증가시키면 시편의 부피는 금속 주형틀 부피까지 증가하며, 이후 주형 틀의 벽과 맞닿아서 시편내부에 압축응력이 걸리면서 시편의 형상이 제어되고 결함이 억제된 다공성 성형체를 제조할 수 있었다. Fig. 3은 코디어라이트 형성을 위하여 폴리실록산, 팽창 가능한 미세구, talc, Al_2O_3 등의 혼합 분말을 사용하여 140°C에서 발포 성형된 시편의 모습이다. 무기고분자인 폴리실록산을 이용하여 적절한 foaming 온도를 얻기 위해서는 foaming시 성형성 증진을 위하여 폴리실록산의 연화온도(softening temperature)보다 높아야 하며, 또한 다공질 구조의 붕괴를 막기 위해서는 폴리실록산의 용융온도 보다는 낮아야 한다. 폴리실록산의 연화 온도와 용융온도는 각각 109°C와 약 155°C이다. 그러므로 Fig. 3에서와 같이 발포성형 온도가 140°C에 도달함에 따라서 혼합 분말 내에 포함된 미세구의 팽창으로 부피 증가가 발생하며, 무기고분자인 폴리실록산의 연화 현상으로 인하여 부피 증가시 결함이 억제된 다양한 형상의 다공질 성형체의 제조가 가능하였다.

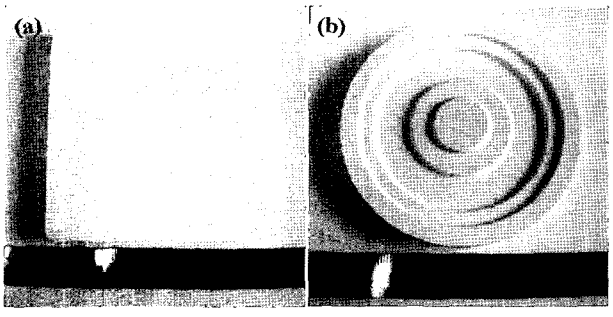

Fig. 3. Morphology of the various foamed prototypes fabricated by jig foaming process: (a) plate type (standard: 64.0 cm^3) and (b) atypical type.

또한 가교 공정은 마이크셀룰라 다공질 재료의 기지 조직의 견고함을 유지하기 위해서는 매우 중요하다. 즉 180°C의 온도에서 약 48시간 정도의 가교 공정은 후속 공정인 열처리(pyrolysis) 공정시 마이크로셀룰라 구조를 유지하게 해 준다. 이와 같은 예비 열처리동안에는 -OH group의 축합 반응에 의하여 Si-O-Si 결합이 형성되는 공정으로 이를 가교 공정이라 한다. 가교 공정 후 최종 다공질 코디어라이트를 제조하기 위하여 시편은 1325°C, 10시간 동안 공기 분위기에서 열처리를 실시하였다.

일반적으로 코디어라이트 세라믹스가 합성되는 과정을 살펴 보면 다음과 같다. 먼저 폴리실록산은 열분해 공정시 약 23%의 무게 감소[4]와 더불어 반응성이 뛰어난 SiO_2를 만든다. 또한 Goren[14]등의 보고에 의하면 talc는 900~975°C 온도범위에서 비정질 형태의 magnesium metasilicate(enstatite)와 비정질 SiO_2, 수분 등으로 분해된다고 보고하였다. 따라서 폴리실록산과 talc에서 생성된 반응성이 뛰어난 화합물들과 추가로 첨가한 Al_2O_3가 반응하여 코디어라이트 세라믹스가 합성되는 것으로 보인다. 이를 반응식으로 정리하면 다음과 같다.[14-16]

$$\text{Polysiloxane} + O_2 \rightarrow SiO_2 + CO_2 \uparrow \quad (1)$$

$$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \rightarrow 3(MgO \cdot SiO_2) + SiO_2 + H_2O \uparrow \quad (2)$$

$$9SiO_2 + 6Al_2O_3 + 6(MgO \cdot SiO_2) \rightarrow 3(2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2) \quad (3)$$

반응식 (1)은 폴리실록산이 산화분위기에서 열분해 및 산화되는 반응이며, 폴리실록산이 열분해 되면서 반응성이 뛰어난 비정질 SiO_2가 생성된다. 반응식 (2)는 talc가 열분해 되는 반응으로, talc는 탈수 반응과 함께 비정질상의 $MgO \cdot SiO_2$와 SiO_2를 합성한다. 반응식 (3)에서는 반응식 (1)과 (2)에서 생성된 화합물이 반응하여 코디어라이

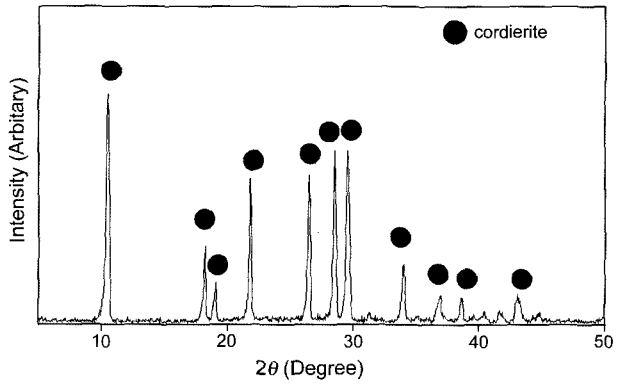

Fig. 4. XRD profile of microcellular cordierite after pyrolysis (specimen: E9).

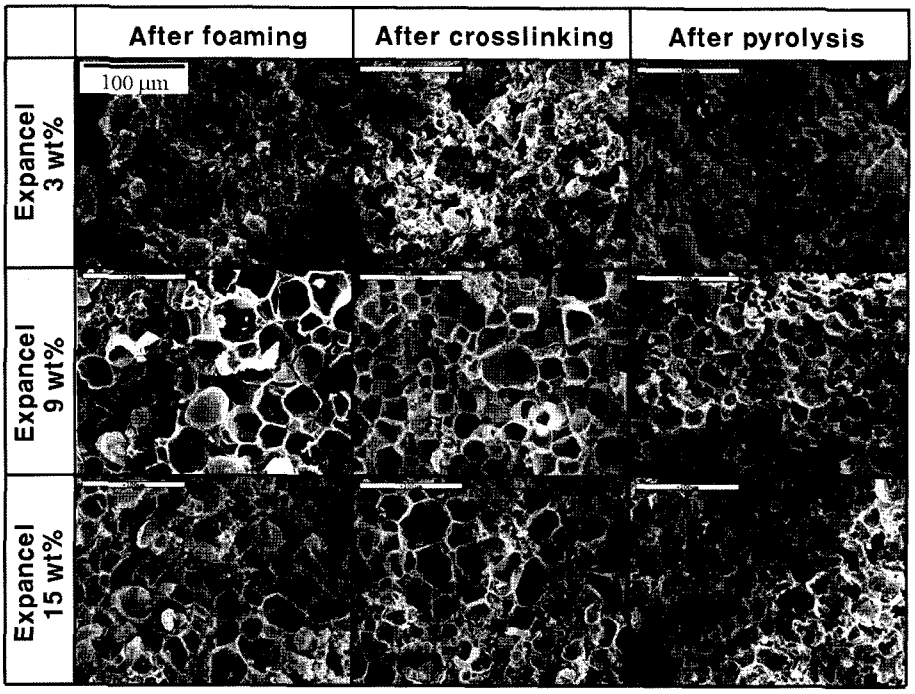

Fig. 5. Microstructure change during processing of microcellular cordierite ceramics with an initial packing density of 0.94 g/cm^3.

트가 생성되는 것을 나타낸다. 그리고 이와 같이 합성된 코디어라이트는 온도가 증가함에 따라서 일반적인 고상 소결 반응에 의하여 구조체의 치밀화가 촉진될 것을 예상할 수 있다.

Fig. 4는 이와 같이 1325°C에서 열처리 후 합성된 다공질 코디어라이트 세라믹스의 XRD 실험 결과이다. XRD 분석결과 미반응물이 관찰되지 않고, 전체적으로 코디어라이트 피크가 잘 관찰되었다.

Fig. 5는 마이크로셀룰라 코디어라이트를 합성하기 위하여 기공형성제인 팽창가능한 중공형 미세구(expancel)의 함량 변화에 따른 미세 구조 변화를 각각의 공정단계인 발포공정 후, 가교 공정 후, 열처리 공정 후로 구분하여 나타낸 것이다. 이때 코디어라이트 다공질 재료를 제조하기 위한 원료 분말의 packing density(혼합분말의 질량(60 g)/금형 틀의 내부 부피(64 cm^3))는 0.94 g/cm^{3}으로 동일하게 하였다. 이는 이미 Song[16] 등이 보고한 연구에서 packing density는 높을수록 기공도(porosity)는 감소하나 셀 벽 구조체(strut structure)의 치밀화로 인하여 특성이 향상된다는 보고에 기반을 둔 것이다. 이는 충분히 높은 밀도의 혼합분말을 장입시 기공의 형성 거동을 비교하기 위한 것으로서 packing density 0.94 g/cm^{3}는 성형하지 않고 쉽게 분말 상태로 장입할 수 있는 최대 양에 해당한다. Fig. 5에서 나타난 바와 같이 기공형성제인 팽창 가능한 중공형 미세구의 양이 3 wt%인 경우에는 발포 공정 후 셀룰라 기공 구조가 미약하게 관찰되었으며, 열처리 후에는 셀룰라 기공구조를 관찰 할 수 없었다. 그러나 기공형성제인 중공형 미세구의 양이 9 wt%와 15 wt% 등으로 증가함에 따라 발포 공정 후 비교적 건전한 셀룰라 기공구조를 형성함을 관찰 할 수 있었다. 또한 이와 같은 기공구조는 열처리 후에도 유지되어 최종적으로 마이크로셀룰라 구조의 코디어라이트 다공질 소재를 얻을 수 있었다. 이때 기공형성제의 양이 9 wt%(E9)인 경우 기공 밀도도 약 1.0×10^9 cell/cm^{3}의 건전한 기공 구조를 형성하였다. 기공형성제인 미세구의 양이 3 wt%인 경우에는 형성되는 절대적인 기공의 양이 적을 뿐만 아니라 부피 팽창 시 금속 금형 내에서 압축응력이 형성되지 못하여 건전한 기공 구조를 유지하지 못하였다. 그러나 기공형성제인 미세구의 양이 증가됨에 따라 형성되는 기공 밀도가 증가되며, 또한 Fig. 2에 나타낸 바와 같은 압축 응력으로 인하여 기지 조직이 강화되고 건전한 셀룰라 미세 구조를 형성하게 된다. 기공 형성제인 중공형 미세구의 양이 15 wt%인 경우 가교 공정후의 파단 조직을 보여 준 그림이다. 즉 중공형 미세구의 양이 많이 첨가된 경우 시편 내에 과도한 압축 응력이 형성되어 실제 기공의 형상이 찌그러지는 경향을 보여 주고 있다.

Fig. 6은 중공형 미세구의 양이 9 wt%인 경우 각 공정단계별로 수은 함침공정을 통하여 측정된 기공 크기 분포를 나타낸 결과이다. 발포 공정 후 그리고 가교 공정 직후에 측정된 평균 기공크기는 약 1.1 μm의 기공 분포를 보여 주고 있다. 이는 Fig. 5에서 관찰 된 바와 같이 가교 공정 까지는 대부분 형성된 셀의 형태가 닫힌 기공(closed pore)임으로 수은이 셀안으로 들어가지 못하고 셀

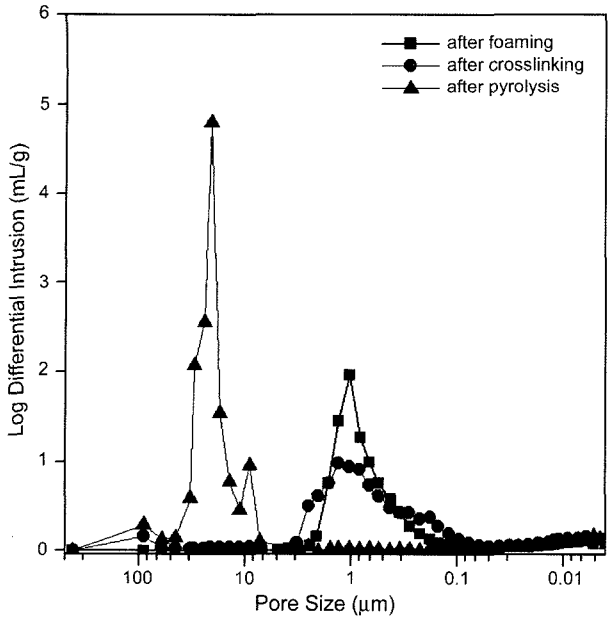

Fig. 6. Results of pore size distribution of microcellular cordierite (specimen : E9).

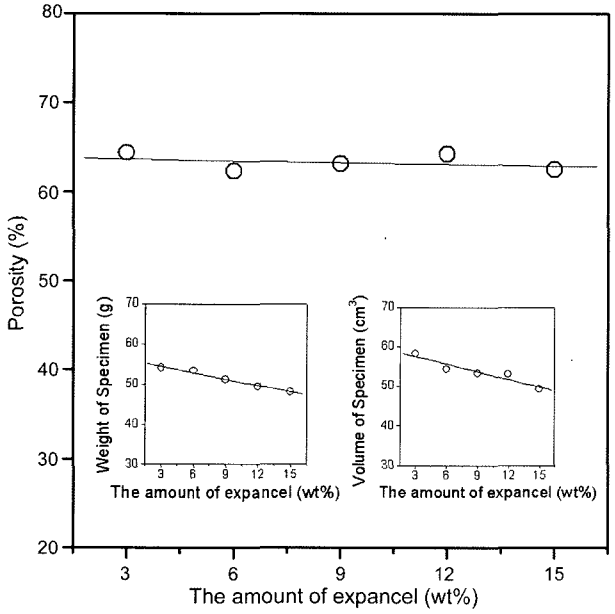

Fig. 7. Porosity of the microcellular cordierite ceramics as a function of the amount of expandable microsphere.

사이의 일부 미세 기공들이 측정된 결과이다. 그러나 열처리 공정이 끝난 후의 기공 크기는 15 μm에서 강한 피크가 관찰되었으며, 이는 소결 공정에서 셀과 셀사이를 연결시켜주는 작은 open pore가 측정된 결과이며 실제 이 기공을 통하여 대부분의 수은이 기공의 셀 내부로 장입됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 기공 형성제인 중공형 미세구의 첨가량 변화에 따른 기공도 변화를 보여 준다. 기공도(porosity)는 중공형 미세구의 양과 관계없이 약 60~65%의 분포를 보여주고 있다. 이는 열처리시 중공형 미세구의 양이 증가함에 따라 시편의 부피와 질량이 비례적으로 감소하기 때문에 전체적인 기공율의 변화가 관찰되지 않고 있기 때문이다. 즉 packing density가 비교적 높고 일정한 경우에는 중공형 미세구의 양 변화가 기공율 변화에 크게 기여하지 못한 것으로 판단된다.

본 실험에서는 기공형성제인 중공형 미세구(expancel)의 함량 변화에 따른 마이크로셀룰라 코디어라이트 세라믹스의 합성 거동에 대하여 고찰하였다. 특히 발포 공정에서 near net shaping을 위하여 금속 금형 용기를 사용하였으며, 무기고분자인 폴리실록산이 세라믹스로 전환이 가능하도록 열에너지를 제공하고, 반응성 필러(filler) 역할을 하는 Al_2O_3와 talc를 이용하여 코디어라이트 합성 반응을 유도하였다.

4. 결 론

무기고분자로서 폴리실록산(polysiloxane)과 기공 형성제로서 팽창 가능한 중공형 미세구(expandable microsphere) 및 반응성 필러(filler)로서 Al_2O_3, talc를 이용하여 마이크로셀룰라 다공성 코디어라이트를 합성하였다. 구체적인 공정은 (1) 일정한 형태의 금속 용기 안에서 기공 형성제가 포함된 혼합 분말을 팽창시켜 기공을 형성하는 공정, (2) 세라믹스 전구체를 가교 시키는 공정 및 (3) 열분해 공정을 거쳐 다공성 세라믹스를 제조하는 공정으로 구성된다. 특히 발포 공정시 다공질 성형체 내부에 압축응력을 유발하여 결함을 억제하고 기계적 특성을 증진시키기 위하여 금속 지그 틀을 사용하였다. 본 공정을 통하여 제조된 다공성 코디어라이트 재료는 혼합분말의 packing density가 0.94 g/cm^3, 중공형 미세구의 양이 9 w%인 경우 기공도가 64%, 기공 밀도가 약 1.0×10^9 cell/cm^{3}의 건전한 기공 구조를 형성하였다.

Acknowledgement

본 연구는 산업자원부 차세대소재성형기술개발사업단(Center for Advanced Materials Processing, CAMP)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. P. Sepulveda, "Gelcasting Foams for Porous Ceramics," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **76** [10] 61-5 (1997).
2. J. Saggio-Woyansky, C. E. Scott, and W. P. Minnear, "Processing of Porous Ceramics," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **71** [11] 1674-82 (1992).
3. W. Wu, T. Fujiu, and G. L. Messing, "Synthesis of Cellular

Inorganic Materials by Foaming Sol-Gels," *J. Non-Cryst. Solids*, **121** 407-12 (1990).
4. Y.-W. Kim, S. H. Kim, H. D. Kim, and C. B. Park, "Processing of Closed-Cell Silicon Oxycarbide Foams from a Preceramic Polymer," *J. Mater. Sci.*, **39** 5647-52 (2004).
5. Y.-W. Kim. Y. J. Jin, Y. S. Chun, I. H. Song, and H. D. Kim, "A Simple Pressing Route to Closed-Cell Microcellular Ceramics," *Scripta Mater.*, **53** 921-25 (2005).
6. Y.-W. Kim, H. D. Kim, and C. B. Park, "Processing of Microcellular Mullite," *J. Am. Ceram. Soc.*, **88** [12] 3311-15 (2005).
7. C. Wang, J. Wang, C. B. Park, and Y.-W. Kim, "Cross-linking Behavior of a Polysiloxane in Preceramic Foam Processing," *J. Mater. Sci.*, **39** 4913-15 (2004).
8. O. Delverdier, M. Monthioux, A. Oberlin, A. Lavedrine, D. Bahloul, and P. Goursat, "Thermal Behaviour of Polymer-derived Ceramics. II. Si-C-N System from a New PVSZ Precursor," *J. High Temp*, 139-49 (1992).
9. O. Delverdier, M. Monthioux, D. Mocaer, and R. Pailler, "Thermal Behavior of Polymer-derived Ceramics. I. Si-C and Si-C-O Systems from Both Commercial and New Polycarbosilane (PCS) Precursors," *J. Europ. Ceram. Soc.*, 27-41 (1993).
10. F. F. Lange and K. T. Miller, "Open Cell, Low-Density Ceramics Fabricated from Reticulated Polymer Substrates," *Adv. Ceram. Mater.*, **2** [4] 827-31 (1987).
11. Y. Dong, X. Liu, Q. Ma, and G. Meng, "Preparation of Cordierite-based Porous Ceramic Micro-filtration Membranes Using Waste Fly Ash as the Main Raw Materials," *J. Memb. Sci.*, **285** [1-2] 173-81 (2006).
12. A. Yamuna, S. Honda, K. Sumita, M. Yanagihara, S. Hashimoto, and H. Awaji "Synthesis, Sintering and Thermal Shock Resistance Estimation of Porous Cordierite by IR Heating Technique," *Micro. Meso. Mater.*, **85** [1-2] 169-75 (2005).
13. F. A. Costa Oliveira, "Elastic Moduli of Open-cell Cordierite Foams," *J. of Non-Crystalline Solids*, **351** [19-20] 1623-29 (2005).
14. R. Goren, C. Ozgur, and H. Gocmez, "The Preparation of Cordierite from Talc, Fly Ash, Fused Silica and Alumina Mixtures," *Ceram. Int.*, **32** [1] 53-6 (2006).
15. D. H. Jang, Y.-W. Kim, and H. D. Kim, "Processing of Porous Cordierite Ceramics with Controlled Porosity," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **115** [1] 52-8 (2007).
16. I. H. Song, M. J. Kim, H. D. Kim, and Y.-W. Kim, "Processing of Microcellular Cordierite Ceramics from a Preceramic Polymer," *Scripta Mater.*, **54** 1521-25 (2006).