

공동골격을 가진 개방셀 세라믹스의 상대밀도와 압축강도 모델

정한남 · 현상훈*

포항산업과학연구원 박관주조연구팀

*연세대학교 세라믹공학과

(1997년 8월 18일 접수)

Models for Relative Density and Compressive Strength of Open-Cell Ceramics with Hollow Struts

Han-Nam Cheong and Sang-Hoon Hyun*

Strip Casting Research Team, RIST

*Department of Ceramic Engineering, Yonsei University

(Received August 18, 1997)

요 약

삼차원 망목구조를 가진 개방셀 세라믹스의 거시적인 구조와 파괴기구 해석으로부터 상대밀도와 압축강도를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 개방셀 세라믹스는 tetrakaidecahedron 단위셀이 규칙적으로 배열된 구조를 갖고 있으며, 단위셀은 삼각기둥 형태의 공동(hollow)이 중심부에 존재하는 원기둥 모양의 골격들로 이루어져 있다는 가정하에 개방셀 세라믹스의 상대밀도를 계산할 수 있는 식을 유도하였다. 또한 압축응력에 의한 개방셀 구조체의 파괴거동을 설명한 기존의 모델을 보완하여 공동골격의 취성파괴를 반영할 수 있는 압축강도 식이 유도되었다. 공동골격 모델에 의한 상대밀도와 압축강도는 골격의 길이에 대한 외경의 비와 골격 외경에 대한 내부공동 크기 비의 함수로 표시될 수 있었다. 개방셀 구조를 갖는 알루미늄-지르코니아 복합체의 상대밀도와 압축강도에 대한 모델의 예측값은 기존의 Gibson-Ashby나 Zhang의 모델들에 의한 것보다 훨씬 실험값과 잘 일치하였다.

ABSTRACT

A model for predicting the relative density and the compressive strength of open-cell ceramics with three-dimensional network structure was proposed through the interpretation of their macrostructure and fracture mechanics. The equation predicting the relative density was derived under the assumption that the open-cell structure was a periodic array of the tetrakaidecahedron unit cell consisting of cylindrical struts containing the internal hollow with the shape of a triangular prism. The model for compressive strength of open-cell ceramics with the hollow strut was also developed by modifying conventional model which based on fracture behavior of them subjected to the compressive stress. Both the relative density and the compressive strength were expressed in terms of the ratio of the strut diameter to the length together with the ratio of the hollow size to the strut diameter. The proposed model for the relative density and the compressive strength of the alumina-zirconia composite with open-cell structure were accorded well with the experimental values, whereas Gibson-Ashby and Zhang's model did not show such a good agreement.

Key words : Open-cell ceramics, Hollow-strut structure, Relative density model, Compressive strength model

1. 서 론

개방셀(open-cell) 세라믹스는 기둥모양의 세라믹 골격(strut)들이 연결되어 구성된 개방구조 단위셀들이 삼차원적으로 배열된 망목구조체로서 단위셀내의 골격을 제외한 모든 용적이 기공으로 존재하므로 전체 기공을

이 약 75% 이상 되는 다공체이다.¹⁾ 개방셀 세라믹스는 경량인 동시에 망목구조적인 특성과 세라믹재료 고유의 특성으로 인하여 단열/축열재료, 촉매담체, 용융금속 및 고온부식 개스의 여과체 등으로서 다양한 공업적 용도가 개척되고 있다. 개방셀 세라믹스는 일반적으로 발포법(foaming method)과 스폰지 코팅법(sponge coating

method)에 의하여 제조된다.^{2,3)} 스폰지 코팅법은 개방셀 폴리머 스폰지를 모재로 하여 세라믹 슬러리를 스폰지의 골격표면에 코팅하여 소결함으로써 스폰지와 동일한 형태로 복제하는 방법이다. 따라서 이 소결체는 폴리머 스폰지와 같은 개방셀 구조를 하며, 피복된 세라믹재는 골격을 형성하게 되고, 모재로 사용한 폴리머 스폰지는 소결 중에 열분해된다. 이와 같이 제조된 개방셀 세라믹스는 골격을 제외한 나머지 용적이 모두 연결된 기공으로 되므로 매우 높은 기공률을 갖는다.

일반적으로 구조용 세라믹스는 치밀한 구조임에 반하여, 자연적으로 생성된 나무나 뼈의 조직은 기공률이 높은 삼차원망목구조의 셀 구조를 하고 있으면서도, 치밀한 구조들에 비하여 비강도(strength-to-weight)가 크고 강성(stiffness)이 높다.⁴⁾ 이와 같은 다공질 조직의 특성을 인공재료에 응용한 샌드위치 패널(panel)은 내부에 금속 또는 폴리머 망목 구조체를 충전하여 경량이며 에너지흡수능이 뛰어나 완충재나 방음재료 등으로 이용되고 있다. 그러나 개방셀 세라믹스는 폴리머나 금속 재료에 비하여 강도와 파괴인성이 낮아 외부 응력이 비교적 적은 조건인 단열재료나 용융금속 또는 고온 가스 여과재료로서 이용될 뿐, 구조재료로서의 응용분야가 제한되고 있다. 이와 같은 개방셀 세라믹스의 응용상 문제점은 세라믹재료 고유의 취성으로 부터 기인될 뿐만 아니라 제조공정 중의 미세구조 결함도 중요한 요인이 되고 있다.¹⁾ 따라서 외부응력에 대한 적절한 내구력을 갖는 개방셀 세라믹스 재료를 설계하거나, 구조재료로서 응용분야를 확대하기 위해서는 개방셀 세라믹스의 구조와 기계적 거동에 대한 이해를 명확히 하고 강도 및 파괴인성의 저하요인을 제어할 필요가 있다. 이와 관련된 연구는 주로 폴리머재료에 대하여 활발히 진행되어 왔으며, 그 중에서도 Gibson-Ashby⁵⁾ 등이 재료의 특성에 따라 체계적으로 구조와 파괴에 관한 이론을 제시하였다. 이들은 미소기계학적(micromechanical) 모델을 통하여 기계적 거동을 해석하였으며 특히 단위셀의 구조해석을 통해 상대밀도와 기계적 거동간의 상관관계를 유도하였다.^{5,8)} 반면에 개방셀 세라믹스에 대하여는 아직 이와 같은 연구가 활발하게 진행되지 못하였으며, 단지 Gibson-Ashby(G-A) 모델에 기초하여 파괴거동에 관한 해석을 하였을 뿐이다.¹⁰⁻¹¹⁾ 개방셀 세라믹스에 적용한 모델은 대부분 단위셀의 구조를 정육면체로 단순화시킨 가정을 사용하고 있으며, 골격의 기하학적인 구조도 실제 보다 단순화된 가정을 통해 상대밀도 및 기계적 거동에 관한 해석을 하였다. 한편 Zhang⁸⁾ 등은 이론적인 접근방법을 통하여 개방셀 재료들에 대한 기계적 거동을 예측하여 기존 실험결과에 적용함으로써 모델의 타당성을 입증하였다. 그러나 Zhang의 모델도 골격구조

의 기하학적인 형상을 단순한 사각기둥 형태로 가정하여 개방셀 재료의 상대밀도와 기계적 거동을 묘사하였다. 따라서 본 연구에서는 개방셀 세라믹스가 갖는 실질적인 단위셀 및 골격의 구조적 특징과 파괴특성을 묘사할 수 있는 공동골격(hollow strut) 모델을 개발하여 상대밀도와 압축강도를 예측할 수 있는 모델 식들을 제시하였다. 또한 알루미늄-지르코니아질 개방셀 세라믹스의 상대밀도와 압축강도에 대하여 공동골격 모델과 기존 모델들에 의한 예측값들을 실험값과 비교하여 모델의 타당성을 평가함과 동시에 개방셀 세라믹스의 기계적 거동에 미치는 구조적 영향을 분석하였다.

2. 이론적 고찰

일반적으로 세라믹스의 파괴거동은 치밀한 소결체에 서조차도 그 변화가 다양하고 현상의 해석이 명확하지 않다. 이와 같은 문제는 미세조직의 차이가 요인이 되며, 특히 기공의 영향이 매우 중요한 것으로 생각되고 있다. 미세조직내 기공이 강도에 미치는 영향에 대하여는 실험을 통한 많은 연구결과가 발표되었으며, 그 예로서 Duckworth¹²⁾는 알루미늄, 지르코니아 등의 재료에 대하여 재료의 강도는 기공률이 0일 때의 강도로 부터 기공분률이 증가됨에 따라 식 (1)과 같은 관계를 갖고 지수적으로 감소한다고 보고한 바 있다.

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-kP) \quad (1)$$

식 (1)에서 σ [kg/cm²]는 강도, σ_0 [kg/cm²]는 기공률이 0일 때의 강도, P는 기공분률 그리고 k는 상수이다. 그러나 개방셀 세라믹스는 일반적인 소결체와는 달리 미세기공 이외에 구조적으로 형성되는 조대기공이 존재하고 파괴거동도 상이하므로 식 (1)은 기계적 강도를 정확하게 나타낼 수가 없다. 따라서 개방셀 재료의 기계적 거동을 설명하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 이들은 대부분 단위셀에 대한 해석을 통하여 기계적 거동을 나타내고 있는 미소기계학적 모델들로서, 단위셀의 구조는 단순입방체로 부터 복잡한 pentagonal dodecahedron 및 tetrakaidecahedron까지 다양하게 고려되었다.^{7,8)} 최근 개발된 모델중의 하나인 Gibson-Ashby(G-A) 모델과 Zhang의 모델 등은 금속, 폴리머, 세라믹스 다공체들에 적용되고 있으며, 외력의 작용하에서 재료의 특성에 따라 골격들의 휨(bending), 좌굴(buckling)등과 같은 다양한 변형모드에 따른 파괴모델을 제시하였다.¹⁵⁾ G-A와 Zhang은 각각의 모델에서 단위셀의 기하학적 구조를 각각 Fig. 1(a)의 단순입방체와 Fig. 1(b)의 tetrakaidecahedron으로 가정하였으나, 단위셀을 구성하는 골격의 형태는 사각기둥으로 동일하게 가

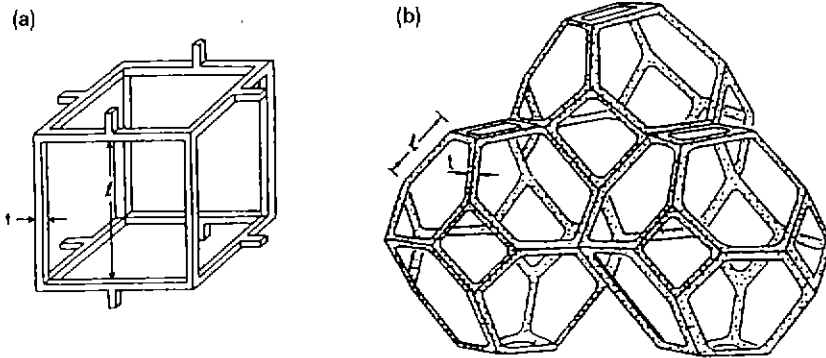


Fig. 1. Geometry of the unit cell structure for an open-cell model by : (a) Gibson-Ashby ; cubic and (b) Zhang ; tetrakaidecahedron.

정하였다. 이와 같은 단위셀 형태의 가정으로부터 이들의 모델은 다공체의 상대밀도(ρ/ρ_s)를 단위셀을 구성하고 있는 골격의 두께와 길이로 나타내었으며, 파괴거동에 대한 해석에서 G-A와 Zhang의 모델은 다소 가정의 차이가 있지만 탄성률, 압축강도와 같은 기계적 성질은 각각 골격재료의 탄성률, 꺾임강도와 상대밀도에 의존하며 다음과 같은 관계로 나타내었다.

$$\rho/\rho_s = C_0 (t/l)^2 \tag{2}$$

$$E/E_s = C_1 (\rho/\rho_s)^2 \tag{2}$$

$$\sigma_c/\sigma_s = C_2 (\rho/\rho_s)^{3/2} \tag{4}$$

식 (2)-(4)에서 ρ [g/cm³], E [kg/cm²] 및 σ_c [kg/cm²]는 각각 다공체의 밀도, 탄성률 그리고 압축강도를 나타내며, ρ_s [g/cm³], E_s [kg/cm²] 그리고 σ_s [kg/cm²]은 각각 골격을 구성하고 있는 재료의 밀도, 탄성률 및 꺾임강도이다. l 은 골격의 길이, t 는 골격의 두께를 나타내며 C_0 , C_1 및 C_2 는 다공체의 기하학적인 구조와 파괴거동에 의존하는 상수이다. 각 상수들은 실험적 또는 이론적인 계산에 의해 구해지는 값이며, 그 예로서 Table 1에 나타낸 바와 같이 연구결과에 따라 차이를 보여주고 있다. 따라서 기존의 모델들에 있어서 개방셀 세라믹스의 물

성은 다음과 같은 일반식으로 표시될 수 있다.¹³⁾

$$\frac{\text{Property}_{\text{open-cell ceramic}}}{\text{Property}_{\text{solid}}} = C_i (t/l)^{n_i} \tag{5}$$

식 (5)는 상수값 C_i 와 지수 n_i 를 이론적으로 계산하거나 여러가지 실험을 통하여 적정화함으로써 개방셀 세라믹스의 상대밀도나 파괴거동을 예측하고 있기 때문에 보편성이 있지만, 개방셀 세라믹스가 갖는 특유한 성질을 평가하기 위해서는 보다 정확한 기하학적인 형태와 파괴거동을 나타낼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 개방셀 세라믹스의 단위셀 및 골격의 구조적 특징을 반영하여 상대밀도에 관한 이론식을 제시하는 한편, 기존에 제시된 Zhang의 이론적 모델에⁸⁾ 기초하여 실제 개방셀 세라믹스의 구조에 근거한 압축강도 모델을 제시하고 개방셀 세라믹스의 물성에추에 대한 타당성을 조사하였다.

3. 개방셀 세라믹스 모델

3.1. 개방셀 세라믹스의 상대밀도

개방셀 세라믹스를 구성하는 단위셀의 형태는 여러가지로 고려할 수 있다. 이들중 본 연구에서는 개방셀 세라믹스의 단위셀 구조를 tetrakaidecahedron으로 가정하였다. tetrakaidecahedron 구조는 8개의 육각형과 6개의 사각형으로 구성된 평균 14개의 면(face)를 갖고 있으며, 단위셀당 동일한 크기의 36개의 골격들이 모서리(edge)를 이루고, 4개의 골격이 만나 형성된 꼭지점(vertex)은 단위셀당 24개로 이루어져 있다. 이와 같은 기하학적인 구조에 근거하여, 첫 단계로서 개방셀 비정질 카본(reticulated vitreous carbon, RVC)에 대하여 상대밀도를 계산하였다. RVC는 개방셀 폴리머스폰지를 탄화시켜 제조한 다공체로서^{13,14)}, Fig. 2와 같이 모재로

Table 1. Theoretical and Experimental Values of Constants and Exponents in the Equation (5) for Open-Cell Ceramics

Property in Equation (5)	Constant, C_i (exponent, n_i)		
	G-A	Zhang	Experimental ^{1,10,11)}
Relative density (ρ/ρ_s)	1 (2)	1.06 (2)	0.65 (1.9)
Crushing strength (ρ/ρ_s)	0.65 (3)	0.23 (3)	0.09 (1.05)

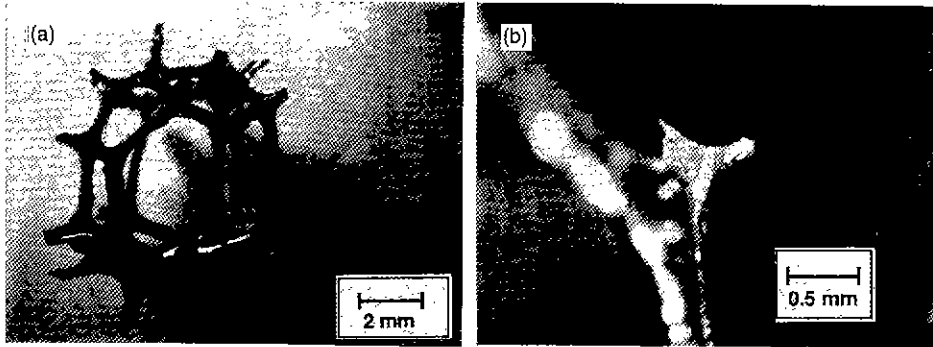


Fig. 2. Typical shape of the polymeric (polyurethane) sponge used to fabricate open-cell ceramics : (a) unit cell and (b) strut.

사용한 스폰지와 동일한 단위셀과 골격 형태를 갖는다. 또한 RVC는 제조공정중에서 발생하는 셀의 박형, 골격의 불균일성이 적기 때문에 평가에 적합한 구조를 하고 있다.

RVC의 구조는 tetrakaidecahedron 단위셀의 배열이며, 단위셀을 구성하는 골격은 길이가 1인 삼각기둥이고, 길이에 수직한 골격의 단면은 높이가 t인 정삼각형으로 가정하였다. 또한 한개의 골격은 3개의 단위셀에 공유되고 재료는 모두 균일함을 가정하였다. 이와 같은 가정하에서 단위셀의 부피(11.31 l³)에 대한 골격들의 부피비로부터 RVC에 대한 상대밀도 계산식 (6)을 유도하였다.

$$\rho/\rho_s = \frac{(1/\sqrt{3}) \cdot t^2 \cdot 1 \cdot 36/3}{11.31 l^3} = 0.613 (t/l)^2 \quad (6)$$

RVC에 대하여서는 골격의 형태를 삼각기둥으로 가정한 반면, 스폰지 코팅법으로 제조된 알루미늄, 지르코니아 등의 일반적인 개방셀 세라믹스는 세라믹 슬러리의 피복공정에서 슬러리의 표면장력에 기인하여 원기둥 모양의 골격을 갖게 되며, 골격 중심에는 모재로 사용한 폴리머 다공체의 열분해에 의해 생성되는 삼각기둥 모양의 공동이 존재하는 것으로 가정하였다. 따라서 단위셀은 tetrakaidecahedron이며 골격은 원기둥 내부에 정삼각기둥의 공동이 존재한다는 가정으로부터 공동골격을 가진 개방셀 세라믹스에 대한 상대밀도 계산식을 유도하였다.

$$\begin{aligned} \rho/\rho_s &= \frac{\pi(D/2)^2 \cdot 1 \cdot 36/3 - \sqrt{3}/4 \cdot b^2 \cdot 1 \cdot 36/3}{11.31 l^3} \\ &= 0.833(D/l)^2 [1 - 0.551(b/D)^2] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 D는 골격의 외경, b는 골격 단면에 있어서 정삼각형 공동의 한 변의 길이이다. 또한 ρ_s는 공동을 포함시키지 않은 골격 재료의 밀도이다.

3.2. 개방셀 세라믹스의 압축강도

Gibson, Ashby, Maiti^{7,9)} 등은 개방셀 재료들에 대한 연구를 통하여 취성재료인 개방셀 세라믹스는 축 하중(axial load)하에서 골격이 휨변형을 하고 골격에 작용하는 인장응력이 골격의 강도를 넘게 되면 재료의 파괴가 발생됨을 제시하였다.^{7,9)} 비록 이들의 모델이 개방셀 세라믹스의 기하학적인 구조를 실제와는 다르게 단순입방체 단위셀과 사각기둥 형태의 골격으로 가정하였으나, 골격의 휨변형에 의해 취성파괴가 일어남은 여러 연구를 통하여 확인되었다.^{1,10,11)} 따라서 본 연구에서는 기존의 연구결과를 근거로 하여 압축하중하에서 개방셀 세라믹스의 파괴는 골격의 휨변형에 의해 발생됨을 가정하고, Zhang⁸⁾에 의해 시도된 바 있는 미소기계학적 접근 방법을 이용하여 tetrakaidecahedron 단위셀 및 공동골격을 갖는 개방셀 세라믹스의 압축강도에 대한 모델을 제시하였다.

개방셀 세라믹스의 단위셀 구조는 tetrakaidecahedron이며, 골격의 구조는 직경 D, 길이 1인 원기둥 내부에 한변이 b, 길이가 1인 정삼각기둥의 공동이 존재하는 공동골격을 가정하였다. 한편 Fig. 3과 같이 단위셀의 꼭지점에서 연결되는 4개의 골격들이 한 조를 이루어 하중방향(Z)에 대해 45° 각도를 갖는 경사보(inclined beam)를 형성하며, 하중의 작용하에서 골격은 순수굽힘(pure bending)에 의해 변형됨을 가정하여 골격의 꺾임강도와 다공체의 압축강도식을 유도하였다. 골격의 꺾임강도는 식 (8)에 나타난 공동골격에 작용되는 모멘트와 최대굽힘 모멘트의 관계로부터 식 (9)와 같이 골격의 치수에 대한 함수로 표시되었다. 개방셀 세라믹스의 압축강도는 Zhang⁸⁾의 연구에서 제시된 방법을 이용하여 다공체에 가해지는 압축하중에 의해 하중 방향에 평행한 골격에 작용되는 부분력(local stress) 및 이 힘이 작용되는 유효표면적(effective surface area)

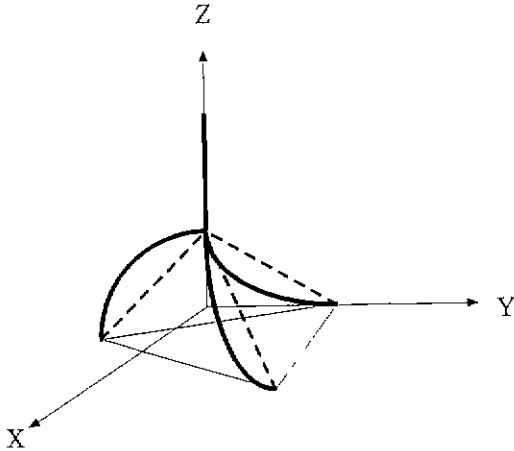


Fig. 3. The inclined four beam unit and assumed deformed shape of the beam under compressive loading.

의 관계로 부터 계산되었으며, 식 (10)과 같이 골격의 길이에 대한 함수로 나타내었다. 따라서 식 (9)와 식 (10)에 의해 공동골격을 갖는 개방셀 세라믹스의 압축강도는 식 (11)과 같이 유도되었으며, 골격재료의 강도와 골격의 길이에 대한 직경의 비(D/l) 그리고 직경에 대한 공동의 크기 비(b/D)에 의존함을 보였다.

$$M_b = \sigma_b \cdot \frac{\frac{\pi D^4}{64} - \frac{\sqrt{3} b^4}{96}}{(D/2)} = \frac{P_L l}{4} \quad (8)$$

$$\sigma_b = \frac{P_L l}{\frac{\pi D^3}{8} - \frac{\sqrt{3} b^4}{12 D}} \quad (9)$$

$$\sigma_c = \frac{P_L}{A_{cr}} = \frac{P_L}{3.8 F} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_c / \sigma_b &= 0.103 \left(\frac{D}{l} \right)^3 - 0.038 \left(\frac{b}{l} \right)^3 \left(\frac{b}{D} \right) \\ &= 0.103 \left(\frac{D}{l} \right)^3 \left[1 - 0.369 \left(\frac{b}{D} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (11)$$

식 (8)-(11)에서 M_b 는 골격에 작용되는 모멘트, σ_b 는 골격의 꺾임강도, σ_c 는 다공체의 압축강도, P_L 은 하중방향에 평행한 골격에 작용되는 부분력 그리고 A_{cr} 는 P_L 이 작용되는 유효표면적이다.

4. 실험방법

본 연구에 있어서는 모델의 가정에 대한 타당성 검토와 평가를 위하여 기존 연구들에서 발표된 개방셀 세라

믹스의 물성값을 인용한 동시에, alumina-zirconia 개방셀 세라믹스(이하 AZ-2로 표기함)의 상대밀도 및 압축강도 그리고 골격의 특성을 측정하였다. AZ-2는 셀의 크기가 각각 8, 13 및 20 PPI(pores per linear inch)인 통상의 제품을 이용하였다. 각각의 AZ-2 다공체를 20×20×24 mm 시편으로 가공하였으며, 모재의 두께방향을 시편의 높이방향으로 하였다. 각 시편에 대하여 치수와 중량측정에 의해 부피비중을 구하고, 골격의 길이 및 외경 그리고 골격내부에 존재하는 공동의 삼각형 단면의 변 길이를 광학현미경으로 측정하여 30개 이상의 측정값에 대한 평균값을 취하였다. 한편 골격의 비중 및 기공률은 수은압입법에 의해 측정하였다. 한편 골격재료의 꺾임강도를 구하기 위하여 AZ-2 다공체를 알루미늄나 ball로 48시간 습식 불밀하여 얻은 분쇄물을 건조한 후 다시 24시간 건조분쇄 하였으며, 이 분말을 프레스 성형한 후 2 톤의 압력으로 CIP하여 성형체를 제조하였다. 성형체는 전기로에서 1100-1650°C 사이의 온도별로 소성하였으며, 각 소결체에 대하여 아르키메데스 법에 의한 기공률을 측정하고 4점 꺾임강도를 구하였다. 압축강도는 셀 크기별로 20×20×24 mm 시편 각 15개 이상에 대하여 정사각형 단면을 가압면으로 하여 0.01 mm/s의 속도로 압축하중을 가하면서 하중변화를 기록하고 그 결과로부터 계산하였다. 압축강도 측정시 다공체 표면의 평탄도 불균일에 의한 국부적 응력집중을 방지하기 위하여 0.2 mm 두께의 teflon sheet를 시편의 상하면에 부착하고 압축하중을 가하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1. 개방셀 alumina-zirconia의 특성

본 연구에서 실험에 사용한 개방셀 알루미늄-지르코니아(AZ-2)는 셀의 크기가 각각 8, 13 및 20 PPI의 것을 사용하였으며 이들의 화학조성은 Table 2에 주어진 것과 같이 약 89 wt.% 알루미늄과 10 wt.%의 지르코니아가 주성분이고, 광물상은 XRD 분석결과 α-Al₂O₃와 monoclinic ZrO₂였다. AZ-2의 셀 구조는 Fig. 4의 현미경 사진에서 보이는 바와 같이 관찰방향에 따라 셀 형상의 차이와 셀의 막힘정도에 차이가 있었다. 셀 길이 및 형태의 이방성은 개방셀 세라믹스의 제조에 사용되는 폴리머 스폰지의 이방성으로 부터 기인된 것으로서, 폴리

Table 2. Chemical Composition of the Open-Cell Alumina-Zirconia(AZ-2) Specimen Used in This Study

Material	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	CaO	MgO
wt %	89.16	9.60	0.43	0.24

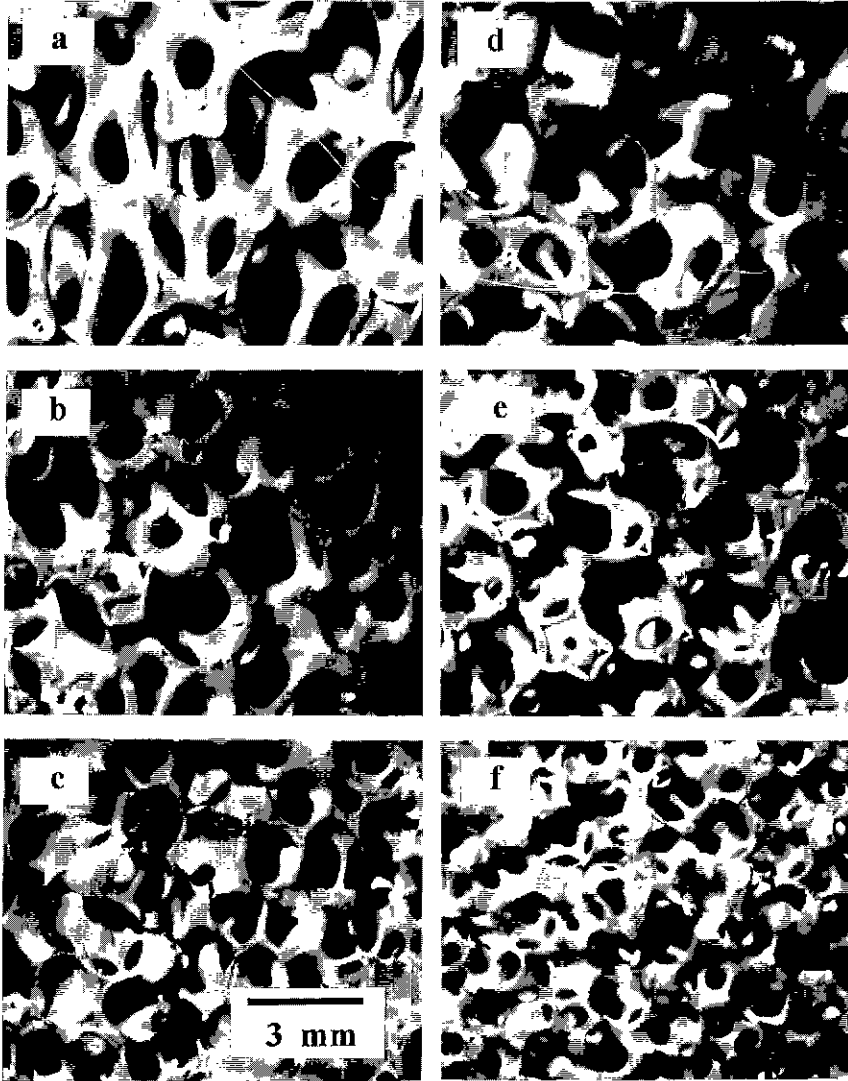


Fig. 4. Typical microstructures of the alumina-zirconia(AZ-2) specimen : (a) and (c) 8 PPI, (b) and (e) 13 PPI, (c) and (f) 20 PPI cell size ; (a-c) longitudinal and (d-f) cross-sectional direction.

며 스폰지의 제조과정 중에서 스폰지의 발포방향에 평행하게 배열된 골격은 신장되고, 발포방향에 수직인 골격은 길이가 짧게 되는 것으로 생각된다. 한편 셀의 크기가 작은 경우는 폴리머 스폰지를 세라믹 슬러리내에 함침시킨 후 잉여 슬러리의 제거과정에서 셀 내부의 잉여 슬러리를 완전히 배출시키기 어렵기 때문에 골격간의 격벽이 막히는 빈도가 높아지는 것으로 예상된다.

골격의 구조를 관찰한 결과에 따르면 Fig. 5의 골격단면 사진에 나타난 바와 같이 원기둥의 중심에 삼각기둥의 공동이 존재하는 공동골격임을 알 수 있었다. 이는 AZ-2 다공체가 스폰지 코팅법에 의해 제조되었음을 의

미하며, 제조과정에서 세라믹 슬러리의 표면장력에 의해 원기둥 형태의 골격을 이루고 내부는 스폰지의 분해에 의해 삼각기둥의 공동을 갖게 된다. 이와 같은 골격의 형상은 개방셀 알루미늄 등에 관한 연구¹⁵⁾에서도 관찰된 바 있었다. 각 골격의 치수는 현미경 사진으로 부터 골격의 길이(l)와 외경(D) 그리고 골격단면의 삼각형 공동의 변 길이(b)를 측정하여 평균값을 구하고 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

셀의 크기가 다른 3 종류의 AZ-2 다공체에 대하여 수은압입법에 의해서 골격내의 기공분포를 측정된 결과, 모두 Fig. 6과 같이 평균기공경이 약 $150\text{-}10\ \mu\text{m}$ 와 0.5-

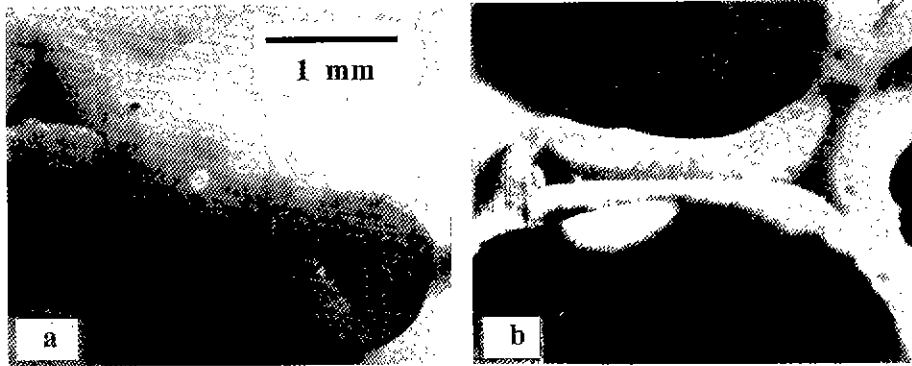


Fig. 5. Typical shapes of the hollow strut for the open-cell alumina-zirconia(AZ-2) specimen with the cell size of 8 PPI : (a) normal and (b) parallel cross section to the length of strut.

Table 3. Average Strut Dimensions and Properties of the Alumina-Zirconia(AZ-2)

Material	l (mm)	D (mm)	b (mm)	ρ (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	σ (Kg/cm ²)	σ_s (Kg/cm ²)	P
8 PPI	1.768	1.188	0.699	0.644	3.477	27.13	1595.8	0.107
13 PPI	0.762	0.477	0.216	0.655	3.230	22.54	1451.2	0.140
20 PPI	0.503	0.213	0.122	0.629	3.356	15.46	1545.6	0.118

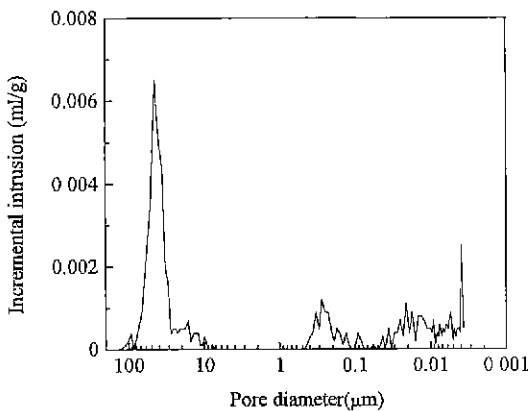


Fig. 6. Pore size distribution for the structure of the alumina-zirconia(AZ-2) specimen with the 20 PPI cell size.

0.004 μm의 두 영역에서 기공분포를 보였으며, 전자의 기공분포 영역은 셀 크기가 감소됨에 따라 기공경이 작은 쪽으로 이동되는 경향을 나타내었다. 따라서 이 영역의 기공은 Fig. 5에서 관찰된 바와 같이 폴리머 스폰지의 분해에 의해서 골격내에 생성된 공동을 의미하며, 후자의 영역이 실제 골격재료의 미세구조내에 존재하는 기공의 분포를 나타내는 것으로 생각된다. 이를 근거로 하여 골격재료의 밀도 및 기공률은 평균 기공경 10 μm 이하의 범위에서 측정된 기공분포로부터 계산되었으

며, Table 3에 주어진 결과와 같이 골격재료의 기공률은 10.66-13.98%이며, 부피비율은 3.23-3.48로서 셀 크기에 따라 약간 차이를 보였다.

한편 AZ-2의 파괴거동을 평가하기 위하여 골격의 강도와 다공체의 압축강도를 측정하였다. 대부분의 개방셀 세라믹스는 골격의 길이가 2-3 mm 이하로 짧고, 형상이 복잡하기 때문에 일반적인 쥐임강도 실험방법으로는 골격의 강도측정이 곤란하다. 따라서 기존 연구^[4]에서는 다공체의 골격에 강선을 걸고 골격에 수직인 방향으로 인장을 가하여 골격이 파괴될 때의 하중으로부터 골격의 강도를 계산하는 방법을 사용하였었다. 그러나 이와 같은 방법은 실제 골격의 강도를 측정한다는 장점은 있으나, 동일한 재료에서 측정된 강도의 편차가 수천 kg/cm² 이상으로 크게 나타나는 문제가 있었다. 그러므로 본 연구에서는 AZ-2 다공체를 미분쇄하여 얻은 분말로 성형한 시편을 소성온도조건을 변화시켜 각각 기공률이 다른 소결체 시편으로 제작하고 이 시편들의 기공률과 쥐임강도를 측정하여 식 (1)에 의해 Fig. 7과 같이 기공률의 변화에 따른 쥐임강도의 표준선(standard curve)을 작성하였으며, 이 표준선에 의해 Table 3에 주어진 AZ-2 다공체들의 골격 기공률로부터 각 골격의 강도를 계산하였다. 기공률에 의해 간접적으로 유추된 AZ-2 다공체들의 골격강도는 1451(13 PPI)-1596(8 PPI) kg/cm²로서 셀의 크기에 따른 강도 차이는 크지 않았다. 이와 같은 방법으로 구한 골격 강

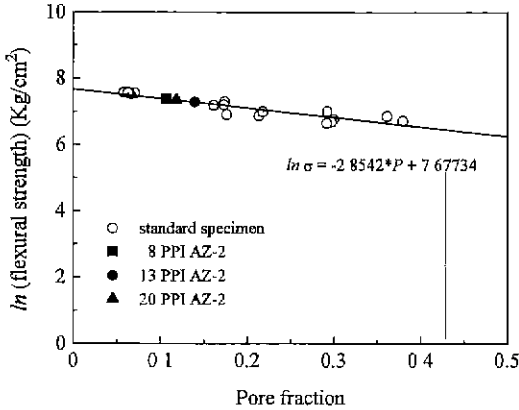


Fig. 7. Standard plot for the flexural strength of the alumina-zirconia standard specimen as a function of pore fraction and the strut strength of the open-cell alumina-zirconia ceramics(AZ-2) calculated from this plot.

도는 골격내에 존재하는 미세기공 및 결합의 분포와 형태 차이 등에 의하여 실제 골격의 강도와는 다소 차이가 있을 것으로 생각되지만, 측정상의 편차가 적고 용이하게 골격의 강도를 구할 수 있었다. 따라서 실제 다공체를 제조한 출발원료를 사용하여 시편을 제조하고 강도를 구한다면 보다 정확한 골격강도를 구할 수 있을 것으로 예상된다.

압축강도 측정실험에 있어서 AZ-2 다공체는 Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 압축하중의 증가에 따라 탄성변형을 하다가 초기파괴 이후에는 각 골격이 순차적으로 파괴됨을 나타내었으며 이와 같은 개방셀 세라믹스의 압축파괴거동에 대하여서는 기존에 많은 연구보고가

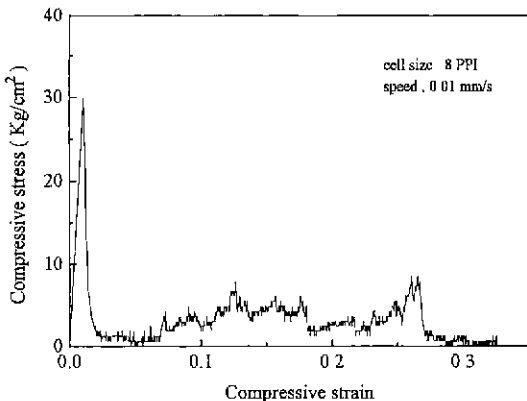


Fig. 8. Compressive stress-strain curve for the open-cell alumina-zirconia specimen with the cell size of 8 PPI.

있었다.^{5,11)} 본 연구에서는 파괴이력 중 초기 탄성한계를 나타내는 최대응력값으로 부터 AZ-2의 압축강도를 계산하였다. 개방셀 AZ-2의 압축강도 측정값은 Table 3에 주어진 바와 같이 8 PPI의 경우는 평균 약 27 kg/cm²이고 20 PPI는 15 kg/cm²로서 셀의 크기가 클수록 강도가 높은 경향을 보였다.

5.2. 개방셀 세라믹스의 단위셀 구조

개방셀 세라믹스에 관한 상대밀도 및 강도 예측모델에 있어서 다공체의 단위셀 구조와 골격의 형태를 적절하게 가정하는 것이 중요하다. G-A model은 개방셀세라믹스의 구조를 사각기둥 골격으로 된 정육면체 단위셀의 배열로 가정하였고, Zhang의 모델은 tetrakaidecahedron 단위셀과 사각기둥 골격으로 가정하였다. 그러나 개방셀 세라믹스의 제조에 이용되는 폴리머 스폰지의 구조관찰을 통하여 단위셀의 면과 골격의 갯수를 측정된 결과 Fig. 2와 같이 단위셀은 tetrakaidecahedron과 유사한 구조를 하고 있었으며, 골격은 단면이 삼각형인 구조를 하고 있었다. 이와 같은 관찰결과에 근거하여 폴리머스폰지와 동일한 구조를 하고 있는 것으로 알려진 RVC에 대하여 기하학적인 구조로부터 상대밀도를 계산하였다.

RVC의 상대밀도에 관한 식 (6)은 기존 모델에서 제시된 식 (2)와 동일한 형태를 하고 있으나, 상수값(C₀)은 0.613으로서 Table 1에 주어진 G-A 또는 Zhang의 모델에 비하여 작은 값을 나타내었다. 이와 같은 상수의 차이는 단위셀 구조와 골격의 형태를 기존 모델에서 가정한 것과 달리 삼각기둥 형태의 골격으로 이루어진 tetrakaidecahedron 단위셀 구조로 가정함으로써 기인된 것이다. 기존 모델들과 본 연구에서 계산한 RVC의 상대밀도를 Fig. 9와 같이 각각 (t/l)²의 함수로서 나타내고 Brezny¹³⁾에 의해 발표된 실험결과를 인용하여 각 모델들의 상대밀도 예측결과를 비교하였다. 그 결과 t/l

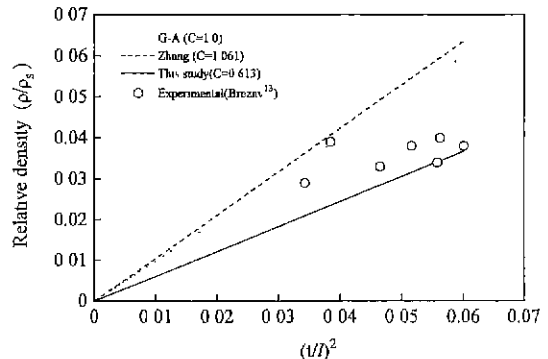


Fig. 9. Relative density of RVC predicted by theoretical models as a function of strut parameter of (thickness/length)².

이 작은 경우는 G-A 모델이 실험값에 가장 근접하고 있으나, t/l 이 0.2 이상에서 기존 모델들은 실험값 보다 매우 높은 상대밀도를 예측한 반면 식 (6)에 의하여 계산된 값은 실험값에 비교적 잘 일치되었다. Brezny¹³는 RVC의 상대밀도 실험결과에 대하여 상수(C_0)를 0.75로 적정화 하였으며, 실제 개방셀 재료는 기하학적으로 변형된 단위셀들이 불균일분포를 하고 있기 때문에 한가지 형태의 단위셀 배열로는 지나치게 단순화 될 수 있음을 발표하였다.

본 연구에서 식 (6)에 의해 계산된 결과는 t/l 이 작은 경우를 제외하고는 전반적으로 실험값들에 대해 비교적 잘 예측하고 있었으며 한 가지 형태의 단위셀 구조를 가정한 모델로서는 실험값에 가장 근접되었다. 따라서 RVC의 상대밀도 예측에 관한 식 (6)의 유도에 적용된 가정과 Fig. 2에서 관찰된 폴리머 스폰지의 형상으로부터 RVC의 기하학적 구조는 삼각기둥 골격을 가진 tetrakaidecahedron 단위셀의 배열로 단순화하는 것이 적절한 것으로 평가되었다. 또한 RVC의 구조에 대한 해석으로부터 스폰지 코팅법으로 제조되는 일반적인 개방셀 세라믹스는 RVC와 동일한 tetrakaidecahedron 단위셀 구조를 하고 있음을 예측할 수 있었다.

5.3. 공동골격 모델의 상대밀도

RVC의 상대밀도 모델식 (6)에 적용된 단위셀 구조의 가정 및 이에 대한 평가 결과를 근거로 하여, 일반적인 개방셀 세라믹스의 단위셀 형상은 RVC와 동일한 tetrakaidecahedron으로 가정하였다. 한편 스폰지 코팅법으로 제조된 개방셀 alumina-zirconia(AZ-2)의 골격 구조를 관찰한 결과, Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이 원기둥 골격의 중심에 삼각기둥 형태의 공동이 존재하는 공동골격의 특징을 갖고 있었다. 따라서 AZ-2와 같이 공동골격을 가진 개방셀 세라믹스에 대하여 tetrakaidecahedron 단위셀과 공동골격 구조를 가정한 모델로부터 상대밀도식 (7)을 유도하였다.

식 (7)에 있어서 상대밀도는 골격의 크기, 즉 $(D/l)^2$ 에 비례하는 동시에 골격 내부의 공동의 번 길이(b)에 따라서 $[1 - 0.551 (b/D)^2]$ 의 비율로 감소되는 공동골격의 특징을 나타내었다. 한편 b/D 는 D/l 와 무관하게 재료에 따라 다른 독립변수이기 때문에 상대밀도와 $(D/l)^2$ 와의 관계는 기존 모델들과 같이 선형적인 관계로 나타낼 수 없고 공동의 크기에 따라 영향을 받게 된다. 따라서 공동골격모델로부터 유도된 식 (7)에 대하여 골격내 존재하는 공동의 영향을 평가하기 위하여 b/D 의 증가에 따른 상대밀도의 변화를 조사하였다. 이 결과에 의하면 Fig. 10과 같이 골격외경에 대한 공동의 크기비(b/D)의 증가에 따른 상대밀도의 감소는 D/l 이 클수록 그 영향이

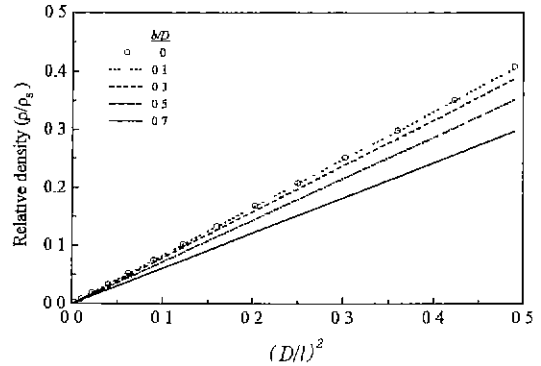


Fig. 10. Effects of the hollow size on the relative density described by the hollow strut model as a function of ratio of the strut diameter to length.

커지며, b/D 가 약 0.3 이상에서는 공동이 없는 경우($b=0$)에 비해서 상대밀도가 크게 감소하였다. 식 (7)은 골격내부에 공동이 없는 경우는 기존 모델들과 동일한 식 (2)로 표시 될 수 있으나, 상수값(C_0)은 0.833으로서 Table 1에 주어진 G-A(1.0) 및 Zhang(1.06)의 모델에 비하여 작았다. 상수값의 차이는 다공체의 구조를 tetrakaidecahedron 단위셀과 원기둥 골격으로 가정한 것에 기인한다.

실제 개방셀 세라믹스의 상대밀도에 대한 공동골격 모델의 예측결과를 평가하기 위하여 Fig. 11과 같이 기존의 연구결과^{1,10}로부터 인용된 값들과 본 연구에서 실험한 AZ-2의 상대밀도 측정결과에 식 (7)을 적용하는 한편, 기존의 G-A모델 및 Zhang의 모델과 비교하였다. 기존 모델들은 Fig. 11(a)와 같이 $(D/l)^2$ 의 값이 0.2 이하가 되는 범위에서는 A, HPA 그리고 AZ-1의 상대밀도를 비교적 잘 예측하고 있지만 전반적으로 실험값들에 비해 높은 값으로 예측하며, 특히 $(D/l)^2$ 이 0.2 이상 되는 경우는 크게 높은 값을 나타내었다. 한편 공동골격 모델은 Fig. 11(b)와 같이 AZ-1을 제외하고는 A, HPA, AM 및 AZ-2에 대하여 넓은 범위에 걸쳐서 전반적으로 잘 예측하였다. AZ-1과 HPA의 일부는 Brezny¹¹에 의해 설명된 바와 같이 제조과정에서 셀의 격벽(cell wall) 및 내부가 슬러리로 막힘에 의해 실제 골격 이외의 중량이 추가되어 밀도가 높게 측정되기 때문에 기존 모델 및 공동골격모델이 예측하는 것에 비해 다소 높은 값을 나타내는 것으로 생각된다. 또한 AZ-2의 경우도 Fig. 4(c)에서 관찰된 바와 같이 셀의 크기가 작은 20PPI는 격벽이 상당수 막혀있기 때문에 D/l 은 작지만 상대밀도 측정값은 공동골격 모델에 의해 예측된 결과보다 높은 것으로 확인되었다. 한편 A는 $(D/l)^2$ 이 0.3 이상에서는 상대밀도가 감소되고 모델의 예측값과 차이가 컸으며, AZ-2도

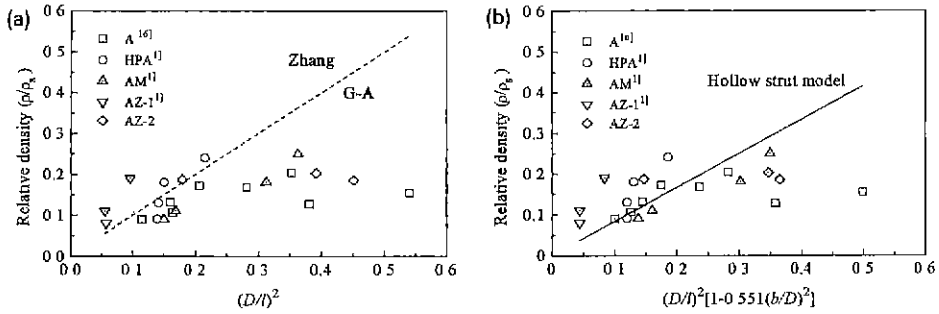


Fig. 11. Predicted relative densities of open-cell ceramics as a function of strut dimension : (a) conventional models and (b) hollow strut model.

마찬가지로 상대밀도의 증가가 거의 없거나 감소되는 경향이 있었다. D/l이 큰 A의 경우는 단위셀이 매우 작은 다공체로서 골격이 작기 때문에 다공체내의 골격결합이 많고 따라서 상대밀도가 낮은 것으로 예상된다. 한편 Fig. 4의 AZ-2 구조에서 나타난 바와 같이 D/l값이 큰 8 PPI의 AZ-2는 관찰방향에 따라 단위셀의 이방성을 보이고 있으며, 그 결과 측정방향에 따라서 골격크기가 다르게 되어 상대밀도의 예측에 미치는 오차가 증가되는 것으로 생각된다. 또한 골격의 두께가 두꺼워짐에 따라 골격이 연결되는 단위셀의 꼭지점 부피가 증가되어 상대밀도에 미치는 영향이 커지며, 이와 관련하여 Gibson 등은 꼭지점의 영향을 고려한 high density model을 제시하였다.⁷⁾ 따라서 단위셀이 크고 골격의 길이에 대한 두께의 비(D/l)가 큰 경우는 high density model이 보다 적합할 것으로 예상된다.

5.4. 공동골격 모델의 압축강도

공동골격 모델에 의해 유도된 개방셀 세라믹스의 압축강도 식 (11)은 기존 모델식 (4)와 마찬가지로 골격의 길이에 대한 직경 또는 두께의 비(D/l)의 세제곱과 골격강도(σ_b)에 의존하나 공동 골격의 영향을 반영한 $[1 - 0.369(b/D)^4]$ 의 보정항이 추가되었으며, 골격의 기하학적 형태를 다르게 가정함에 따라 비례상수도 0.103으로서 Table 1에 주어진 기존모델들에 비해 매우 낮은 값을 갖는 것으로 계산되었다. 식 (11)에 대하여 골격내부 공동의 크기가 압축강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 Fig. 12와 같이 b/D의 증가에 따른 압축강도의 변화를 나타내었다. 그 결과 골격내 공동의 비율을 나타내는 b/D는 $1 - 0.369(b/D)^4$ 으로 영향을 주므로 상대밀도에 관한 식 (7)에 비해서는 덜 민감한 영향을 나타내지만 b/D가 0.5 이상 부터는 현저한 압축강도의 감소를 보였다.

식 (11)과 기존모델들과의 특성을 비교하기 위해 Orenstein¹⁶⁾등의 연구 결과에서 인용한 alumina(A)와 본 연구에서 측정된 AZ-2의 실험결과를 Fig. 13에 표시

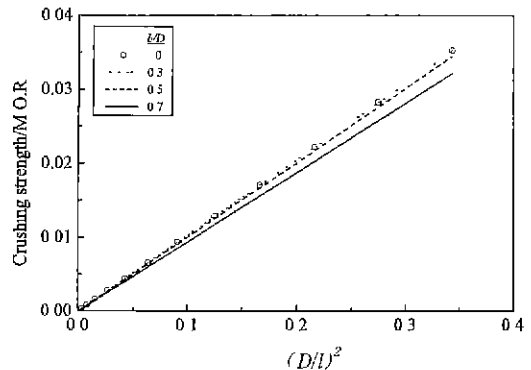


Fig. 12. Effect of the hollow size on the crushing strength/M.O.R. described by the hollow strut model as a function of the ratio of the strut diameter to length.

하고, G-A 및 Zhang의 모델들과 비교하였다. Fig. 13(a)에 나타난 바와 같이 G-A model은 A와 AZ-2의 실험결과에 비하여 전반적으로 매우 높은 값을 예측하여서 크게 벗어나 있었으며, Zhang의 모델은 D/l이 0.5 이하에서는 비교적 실험값에 잘 일치되었으나 그 이상에서는 높은 압축강도를 예측하고 있었다. 한편 Fig. 13(b)의 공동골격 모델은 대부분의 압축강도 실험값들에 대하여 비교적 잘 일치되었으나, D/l이 증가될수록 실험치에 비하여 다소 높은 강도를 예측하였다. 특히 A에 있어서 $(D/l)^3 \cdot [1 - 0.369(b/D)^4]$ 이 0.23 이상인 경우, 다공체는 골격강도에 대한 압축강도의 비가 오히려 감소되는 경향을 보였으며, 식 (11)이 예측하는 값에 비하여 매우 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 특징을 나타낸 일부의 A 다공체들은 셀의 길이가 약 1 mm 정도로 작은 다공체들로서, D/l 값은 크지만 상대밀도가 낮고 실제 골격이 작고 가늘기 때문에 골격의 결합이 많고 불균일한 것으로 예상된다.

한편 공동골격모델에 있어서 개방셀 세라믹스의 압축강도와 상대밀도의 관계는 앞에서 유도한 상대밀도 식

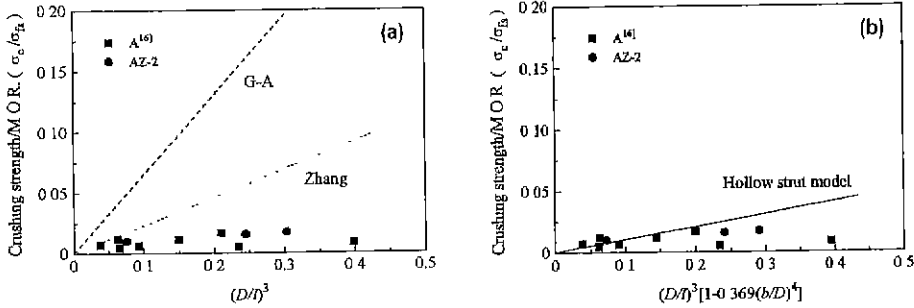


Fig. 13. Predicted compressive strength/M.O.R. of open-cell ceramics as a function of strut dimension : (a) conventional models and (b) hollow strut model.

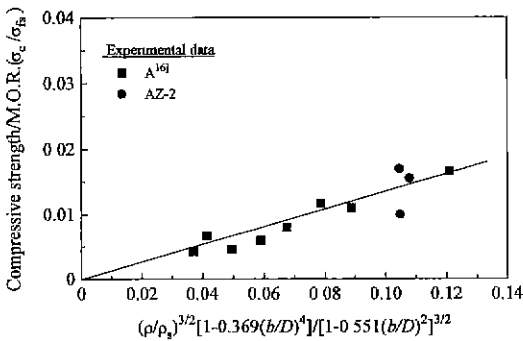


Fig. 14. Compressive strength of open-cell ceramics predicted by the hollow strut model as a function of relative density and hollow size of the strut.

(7)과 상대밀도식 (11)에 의하여 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c/\sigma_R = 0.135 (\rho/\rho_s)^{3/2} \frac{[1-0.369(b/D)^4]}{[1-0.551(b/D)^2]^{3/2}} \quad (12)$$

식 (12)에 의하여 A와 AZ-2에 대하여 실험적으로 측정된 상대밀도에 대한 압축강도의 변화를 나타내고 실험결과와 공동골격 모델의 예측결과를 Fig. 14에 비교하였다. 이 결과에 의하면 공동골격모델은 상대밀도와 공동의 크기로서 A 및 AZ-2의 골격강도에 대한 압축강도의 비율 매우 잘 예측하였으며, 상대밀도의 증가에 따라 압축강도가 증가됨을 나타내었다. A는 상대밀도 증가에 따라 압축강도가 증가되는 경향을 뚜렷이 나타내었으며 예측값과 거의 일치하였다. AZ-2의 경우는 Fig. 11과 같이 셀의 크기가 다른 각 다공체들의 상대밀도가 유사하여 압축강도도 유사할 것으로 예측되지만 실제 압축강도에서는 셀의 크기에 따라 다소 차이를 나타내었으며, 특히 20PPI 다공체는 상대밀도에 비하여 다공체의 강도비가 매우 낮았다. 이와 같은 이유는 Fig. 4(c)에서 알

수 있는 바와 같이 20 PPI의 AZ-2는 단위셀 격벽이 상당수 막혀 있기 때문이며, 셀의 막힘에 의해 다공체의 밀도가 증가된 경우는 상대밀도는 높게 되지만 다공체의 압축강도는 증가되지 않고, 따라서 개방셀 세라믹스의 압축강도는 골격강도와 골격밀도 증진에 의해서 향상시킬 수 있음을 시사하였다.

본 연구에서 제시한 공동골격모델은 개방셀 세라믹스의 거시적인 구조와 골격내 공동의 특징을 실제와 유사하게 반영함으로써 상대밀도와 압축강도 거동을 비교적 잘 예측할 수 있었다. 그러나 일반적인 개방셀 세라믹스는 제조과정중에서 셀의 막힘, 골격의 미세구조적 결함 및 셀의 이방성등이 존재하여 단순한 기하학적인 모델로서 실제 재료의 물성을 명확히 예측하기는 곤란하다. 따라서 본 연구에서 제시한 공동골격 모델과 같이 개방셀 세라믹스의 구조 및 기계적거동을 실제와 근접되도록 가정하고 이로부터 유도된 모델에 의해 물성을 예측함과 동시에 미세구조 및 결함과의 상관관계를 해석하면 개방셀 세라믹스의 물성에 미치는 변수들을 이해할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이와 같은 연구를 통하여 개방셀 세라믹스의 제조상 문제점 및 구조적인 결함을 해결하여 기계적인 물성을 향상시키고 적정재료를 설계하면 구조재료분야에서 개방셀 세라믹스의 이용이 확대될 것으로 기대된다.

6. 결 론

개방셀 세라믹스의 밀도와 기계적 거동을 예측하기 위한 공동골격(hollow strut) 모델의 개발과 분석에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 스폰지 코팅법으로 제조한 알루미늄-지르코니아계 개방셀 세라믹스의 단위셀 구조는 tetrakaidecahedron 이며 단위셀을 구성하는 원기둥 타입의 골격중앙에는 삼각기둥 형태의 공동이 존재한다는 가정하에 유도된 공동골격 모델에 의한 상대밀도는 $\rho/\rho_s = 0.833(D/l)^2 \cdot$

$[1-0.551(b/D)^2]$ 으로 표시될 수 있었다.

2. 압축응력에 의한 개방셀 구조체의 파괴거동을 설명한 Zhang의 미소기계학적 모델을 골격의 꺾임과 기하학적 구조의 영향을 반영할 수 있도록 보완한 공동골격 모델에 의해 유도된 개방셀 개방셀 세라믹스의 압축강도 계산식은 $\sigma_c/\sigma_{is}=0.103(D/l)^3 \cdot [1-0.369(b/D)^2]$ 이었다.

3. 본 연구에서 개발한 공동골격에 모델에 의한 상대 밀도와 압축강도 예측값은 기존의 Gibson-Ashby 및 Zhang의 모델에 의한 것보다 낮은 값이었다. G-A와 Zhang의 모델은 D/l이 낮은 영역에서는 개방셀 세라믹스의 실험치와 잘 일치 하지만 그 이상에서는 점차 높게 예측되는 경향이 있었다. 반면에 공동 골격 모델은 전반적으로 실험치와 잘 일치하는 결과를 보여 주었다.

4. 재료에 따라 모델에 의한 예측치와 실험결과와의 차이는 셀의 막힘, 골격의 불균일 등과 같은 미세구조적 결합에 기인된다고 할 수 있으며, 특히 골격의 길이에 비해 두께가 두꺼울수록 그 차이가 커짐을 알 수 있었다. 또한 개방셀의 미세구조와 기계적 거동과의 관계를 보다 명확히 할 수 있도록 공동골격 모델을 보완한다면 구조재료로서의 개방셀 세라믹스의 설계 및 제조조건 최적화에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. R. Brezny and D. J. Green, "Fracture behavior of open-cell ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(7), 1145-52 (1989).
2. W. P. Minnear, "Processing of foamed ceramics," *Ceram. Trans Vol. 26., Forming Science and Technology for ceramics*, 149-156 (1992).
3. J. S. Woyansky, C. E. Scott and W. P. Minnear, "Processing of Porous Ceramics," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **71**(11) 1674-1682 (1992).
4. M. F. Ashby, "The Mechanical Properties of Cellular Solid," *Metall. trans. A.*, **14A**, 1755-1769 (1983).
5. L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular solid, Structure and Properties*, Pergamon press, Oxford, UK, 1988.
6. L. J. Gibson and M. F. Ashby, "The Mechanics of Two-dimensional Cellular Materials," *Proc. R. Soc. Lond.*, **A382**, 25-42 (1982).
7. L. J. Gibson and M. F. Ashby, "The Mechanics of Three-dimensional Cellular Materials," *Proc. R. Soc. Lond.*, **A382**, 43-59 (1982).
8. J. Zhang and M. F. Ashby, *Theoretical Studies on Isotropic Foams*, Cambridge University Publication, UK, 1989.
9. S. K. Maiti, M. F. Ashby and L. J. Gibson, "Fracture Toughness of Brittle Cellular Solids," *Scripta Metallurgica*, Vol. 18, 213-217 (1984).
10. H. Hagiwara and D.J. Green, "Elastic behavior of Open-cell Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, **70**(11) 811-15 (1987).
11. C. Q. Dam, R. Brezny and D. J. Green, "Compressive Behavior and Deformation Mode Map of an Open cell alumina," *J. Mater. Res.*, **5**(1) 163-171 (1990).
12. 窯業協會, セラミツクの機械的性質, 窯業協會編輯委員會講座小委員會編, 33-34, 1990.
13. R. Brezny and D. J. Green, "Effect of Cell Size on the Mechanical Behaviors of Cellular Materials," *Acta Metall. Mater.*, **38**(12), 2517-2526 (1990).
14. R. Brezny and D. J. Green, "Characterization of Edge Effect in Cellular Materials," *J. Mater. Sci.*, **25**, 4571-4578 (1990).
15. R. Brezny and D. J. Green and C. Q. Dam, "Evaluation of strut strength in open-cell ceramic," *J. Am Ceram. Soc.*, **72**(6) 885-889 (1989).
16. R. M. Orenstein and D. J. Green, "Thermal Shock Behavior of Open-cell Ceramic Foams," *J. Am Ceram. Soc.*, **75**(7) 1899-1905 (1992).