

Cracking Behavior Under Contact Stress in Densely Coated Porous Engineering Ceramics

Sang Kyum Kim, Tae Woo Kim, Do Kyung Kim,* and Kee Sung Lee[†]

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received July 11, 2005; Accepted July 18, 2005)

치밀층으로 코팅된 다공성 엔지니어링 세라믹스에서의 접촉응력에 의한 균열 거동

김상겸 · 김태우 · 김도경* · 이기성[†]

국민대학교 기계자동차공학부

*한국과학기술원 신소재공학과

(2005년 7월 11일 접수; 2005년 7월 18일 승인)

ABSTRACT

The engineering ceramic needs the properties of high strength, hardness, corrosion-resistance and heat-resistance in order to withstand thermal shock or applied nonuniform stresses without failure. The densely coated porous ceramics can be used for machine component, electromagnetic component, bio-system component and energy-system component by their high-performances from superior coating properties and light-weight characteristics due to the structure including pore by itself. In this study we controlled the porosity of silica and alumina, 8.2~25.4% and 23.4~36.0%, respectively, by the control of sintering temperature and starting powder size. We made bilayer structures, consisting of a transparent glass coating layer bonded to a thick substrate of different porous ceramics by a thin layer of epoxy adhesive, facilitated observations of crack initiation and propagation. The elastic modulus mismatch could be controlled using different porous ceramics as the substrate layer. Then we applied 150 N force using WC sphere with a radius of 3.18 mm by Hertzian indentation. As a result, the crack initiation in the coating layer was delayed at lower porosity in the substrate layer, and the damage in the coating layer was relatively smaller at the bilayer structure coated on higher elastic substrate.

Key words : Spherical indentation, Contact damage, Ceramic layer structure

1. 서 론

세라믹 다공질 소재는 높은 비강도, 낮은 밀도와 열전도도, 구조에 따른 경량화의 특징을 나타낼 수가 있으며, 특히 치밀층으로 코팅한 다공성 세라믹은 그 자체가 기공을 포함하는 구조체이기 때문에 경량화를 달성할 수 있을 뿐만 아니라, 코팅층의 특성발현으로 고성능화를 동시에 추구할 수 있어서 필터, 연료전지소재,^{1,2)} 의료용 생체 재료,³⁾ 단열재,⁴⁾ 등의 각종 기계부품, 전·자기 부품, 바이오시스템, 에너지 시스템에 많은 응용이 될 수 있는 기능성 높은 재료이다. 이러한 세라믹 다공질 소재의 경량화를 유지하면서 강도를 향상시키기 위해서 탄소첨가제 종류를 변화시킨 음극소재,²⁾ 충상재료형태의 구조 강도 평가 등의 연구가 활발하게 되고 있다. 그러나, 이러한 활발한 연구에 불구하고 아직까지 치밀층/다공층(코팅층/지

지층) 엔지니어링 세라믹의 성공적인 적용을 위해 더욱더 설계 변수에 대한 기능 향상이 필요한 것이 현실이다.

본 연구에서는 경량화를 유지하면서 강도를 향상시키기 위한 재료설계 변수를 조절하기 위한 방법을 제시하기 위해, 치밀층/다공층(코팅층/지지층) 형태의 세라믹 충상재료에 대한 접촉응력 하의 균열거동을 평가하고자 하였다. 다양한 방법으로 다공층의 기공률을 제어하여 그에 따른 탄성 계수를 달리하여 치밀층과의 탄성계수의 차이, 지지층의 탄성계수 및 지지층의 기공률이 치밀층/다공층 형태의 세라믹 충상재료의 코팅층의 손상거동에 어떠한 영향을 주는가를 고찰하였다. 즉, 다공층의 기공률과 탄성계수의 차이의 함수로서 세라믹 충상재료의 접촉 손상 거동을 평가하고자 하였다.

다공층인 지지층의 재료는 많이 연구되고 있는 알루미늄나(Al_2O_3)와 실리카(SiO_2)를 사용하였다. 즉, 알루미늄나와 실리카 세라믹스를 소결하여 다양한 기공률을 갖도록 하였고, 치밀한 코팅층으로는 균열관찰을 쉽게 할 목적으로, 현미경 관찰용으로 사용되는 투명한 커버 글라스를 사용하였다. 특히, 알루미늄나는 소결온도 $1300^\circ C$ 에서 $1600^\circ C$ 의

[†]Corresponding author : Kee Sung Lee

E-mail : keeslee@kookmin.ac.kr

Tel : +82-2-910-4834 Fax : +82-2-910-4839

조건에서 기공률을 약 25%에서 2%까지 구현할 수 있다는 기존의 연구⁵⁾와 기공률이 감소하나 기공의 크기는 증가하며 1600°C에서 기공의 크기가 가장 크다는 기존의 연구⁶⁾를 고려하여 1100°C에서 1400°C까지 소결온도 조건을 다양하게 변화시켜 기공률을 제어하였다. 실리카는 최근 연결 기공률의 경우 70% 이상까지 할 수 있는 방법이 연구되어 왔으나⁷⁾ 본 연구에서는 입자 크기가 다른 두 실리카를 혼합비를 다양하게 한 후에 1300°C와 1350°C의 온도로 소결하는 방법으로 기공률을 제어하였다.

인덴테이션에 의한 특성 평가 방법은 금속뿐만 아니라 세라믹의 기계적 성질을 연구하기 위해 예전부터 자주 사용되어 왔다. 경화스틸볼과 탄성계수와 경도가 비교적 높은 텅스텐카바이드(Tungsten carbide, WC)의 구형압자에 의해 금속과 세라믹의 표면에 원추형 균열(*cone crack*), 방사형 균열(*radial crack*), 손상된 영역(*damage zone*)을 만들어 금속 재료의 응력 분석⁸⁾과 코팅된 세라믹의 층상구조의 평가방법⁹⁻¹¹⁾으로 이용되어져 왔다. 본 연구에서도 층상재료의 코팅층에 접촉하중으로 응력을 인가하는 구형압자에 의한 균열 및 손상영역을 관찰하는 헤르짜안 인덴테이션(Hertzian Indentation) 방법을 이용하였다. Fig. 1에 헤르짜안 인덴테이션의 모식도를 나타내었는데, 그림과 같이 이 방법은 탄성계수와 경도가 높은 반경 *r*의 구형압자를 하중 *P*로 편평한 시험편에 눌러 원추형상의 균열과 계면에서의 균열을 유도하는 방법이다.

2. 실험 방법

2.1. 코팅 엔지니어링 세라믹의 제작

본 연구에서 이용한 시험편은 다공층 재료로 알루미늄(Al_2O_3)과 실리카(SiO_2)를 사용하였고, 치밀층 재료로는 유리를 사용하여 서로 접합시켜 제작하였다. 치밀층의 재료인 유리는 160 μm의 두께의 현미경 관찰 용도인 커버 글

라스(Superior, marienfeld, Germany)를 사용하여 일정하게 한 반면에 다공층 재료인 알루미늄과 실리카는 기공률을 제어하기 위해서 각각 제작 조건을 달리 하였다. 알루미늄의 경우에는 시작 분말 크기를 9.8 μm, 5.5 μm, 1.22 μm로 하여 소결온도 1600°C로 소결하는 방법과 시작 분말 크기 0.4 μm 알루미늄의 소결온도를 1400°C 이하에서 달리하여 소결시 기공을 다르게 하는 방법으로 비교적 20% 이상의 높은 기공률을 얻을 수 있도록 하였다. 이는 필터, 연료전지의 전극, 멤브레인 지지체 등 다공성의 기능을 활용하기 위해서는 일반적으로 높은 기공률을 함유해야 하는 것이 일반적이기 때문이다. 또, 실리카의 경우에는 시작 분말 크기가 10 μm와 1 μm인 것을 서로 다른 비율(6대 4~9대 1)로 혼합한 후 1300°C와 1350°C 두 소결온도로 소결하여 기공률을 다양하게 하였다.

코팅하기에 앞서 다공 재료인 알루미늄과 실리카의 표면을 다이아몬드 페이스트로 1 μm까지 경면연마(*polishing*)하여 코팅할 때 계면의 기포로 인해 다공층과 치밀층간의 코팅에서 불량 발생이 생기지 않도록 하였다. 인덴테이션 특성 평가시 유리의 취성 특성으로 인해 급작스런 코팅층의 파괴를 억제하고 손상 영역의 관찰을 보다 용이하게 하기 위해서 유리 양면에 *abrasion*을 하여 균일한 분포의 결함(*flaws*)을 도입하였다.¹²⁾ *Abrasion*한 유리를 다공층 재료 알루미늄과 실리카에 에폭시 접착제(Harcos Chemicals, Helleville, NJ, USA)를 사용하여 접착방식의 방법으로 코팅하였다. 이 때, 바이스를 이용하여 12시간동안 일정한 압력을 가하여 접착력을 유지하면서 접착층의 두께가 최소화 되도록 제어하였다.

2.2. 코팅 엔지니어링 세라믹의 특성평가

서로 다른 조건으로 소결한 다공층의 기공률은 겉보기 기공률로 측정하였다. 겉보기 기공률은 식 (1)을 이용, 아르키메데스의 원리를 이용한 수중 침투법(ASTM C20, KS L3114)으로 구하였다.

$$P_o = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100[\%] \tag{1}$$

여기서 W_1 은 건조무게, W_2 는 현수무게, W_3 는 포수무게이다. 건조무게는 현수, 포수무게를 측정하기 전과 건조시킨 후 측정하여 평균하였다.

세라믹 층상재료의 손상거동을 고찰하여 다공층의 적합 조건을 찾기 위해서 인덴테이션 실험을 실시하였다. 압입은 마이크로 하중기(Microload test system, Unitec., Korea)에서 반경 $r=3.18$ mm의 초경 구(WC, Tungsten Carbide: J & L Industrial Supply Co., Livonia, MI, USA)인 구형 압자를 이용하여 접촉 하중의 최대값 $P=150$ N으로 접촉 하중을 인가하였다. 이때, 압입을 가하는 속도는 0.09 mm/min가 되도록 하였다. 또한, 접촉 하중으로 인해 코팅층의 표

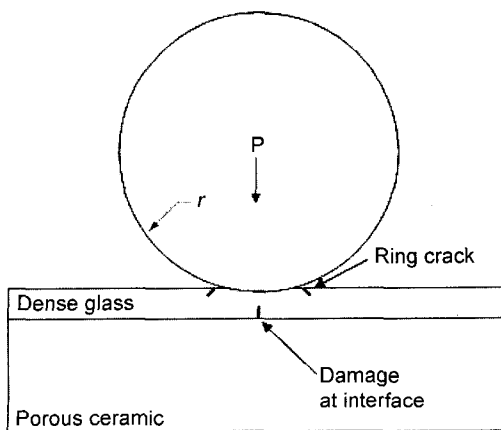


Fig. 1. The schematic diagram of Hertzian indentation test.

면 및 계면에서 발생하는 균열 및 손상영역 거동을 관찰하기 위해 다공층인 실리카 시편에 접촉하중 범위를 50 N부터 105 N까지 5 N의 간격으로 변화시키면서 여러 차례 인덴테이션 실험을 하였다.

접촉 하중을 가한 후에 광학 현미경을 사용하여 코팅층에서 일어난 균열과 손상 거동을 관찰하여 분석하였으며, 실험을 통해 발생한 코팅층의 압흔을 분석하기 위해 원점을 맞춘 접안렌즈의 자 눈금을 이용해서 압흔의 가장 바깥쪽에서 보이는 원형 균열(ring crack)의 직경을 측정하여 다공층의 기공률 혹은 코팅층/지지층 간 탄성 계수 차이에 대한 원형 균열의 직경 크기의 함수를 구하였다. 균열의 직경은 각각 다른 각도에서 측정한 둘 이상의 직경을 평균하여 구하였다. 이때, 탄성 계수 차이는 다음 식 (2)로 표현하였다.

$$\text{Elastic Modulus mismatch} = \frac{E_c/E_s(\text{Alumina})}{E_c/E_s(\text{Silica})} \quad (2)$$

여기서, E_c 는 코팅층인 유리의 탄성계수이고, E_s 는 지지층인 실리카 혹은 알루미늄의 탄성계수이다. 이때, 실리카와 알루미늄이 각각 유리보다 탄성 계수가 작고 크기 때문에 탄성계수의 차이가 1 보다 커지는 경우에 그 차이가 커지도록 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 코팅 엔지니어링 세라믹의 물성 평가

앞서 2.1절에서 제시한 조건으로 알루미늄과 실리카를 소결한 결과 알루미늄은 23.4%에서 36.0%, 실리카는 8.2%에서 25.4%까지의 범위의 기공률이 제어되었음을 알 수 있었다. Fig. 2는 알루미늄과 실리카의 소결 조건 및 초기 분말 크기에 따른 기공률을 보여주고 있다. 알루미늄이나 실리카 모두 소결온도가 높을수록 기공률이 감소함을

볼 수가 있다. 또 실리카의 경우 시작 분말 중 상대적으로 그 크기가 큰 10 μm의 분말이 많은 경우가 더 높은 기공률을 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

또한, 탄성 계수는 기공률에 따라 고립, 연결 기공 구조가 달라진다는 연구에 따라 구할 수 있었으며 Rice¹³⁾ 등에 의해 언급된 식 (3)으로 확인할 수 있었다.

$$E = E_o \exp(-bp) \quad (3)$$

여기서 E_o 는 기공률이 0일 때의 탄성계수, p 는 기공률, b 는 경험적인 상수이다. 본 연구에서는 b 를 기공률에 대해 경험적으로 2.73~4.08로 얻을 수가 있었다. Table 1은 실험으로 얻은 알루미늄과 실리카의 기공률과 위 Rice식에 의해서 얻은 탄성계수를 나타냈다. 이때 기공률이 0%인 경우 알루미늄의 탄성계수는 370 GPa, 실리카는 70 GPa로 하였다. Fig. 3은 위의 식으로 계산된 알루미늄과 실

Table 1. The Experimental Porosity and the Numerical Elastic Modulus of the Alumina and Silica

Ceramic	Apparent porosity (%)	Elastic modulus (GPa)
Al ₂ O ₃	0	370
	23.4	189.14
	28.53	139.86
	29.64	127.63
	30.79	122.01
	36.03	79.94
SiO ₂	0	70
	8.2	54.95
	11.2	47.95
	14.2	40.95
	15.4	37.10
	17.5	33.25
	20.2	29.89
	25.4	21.70

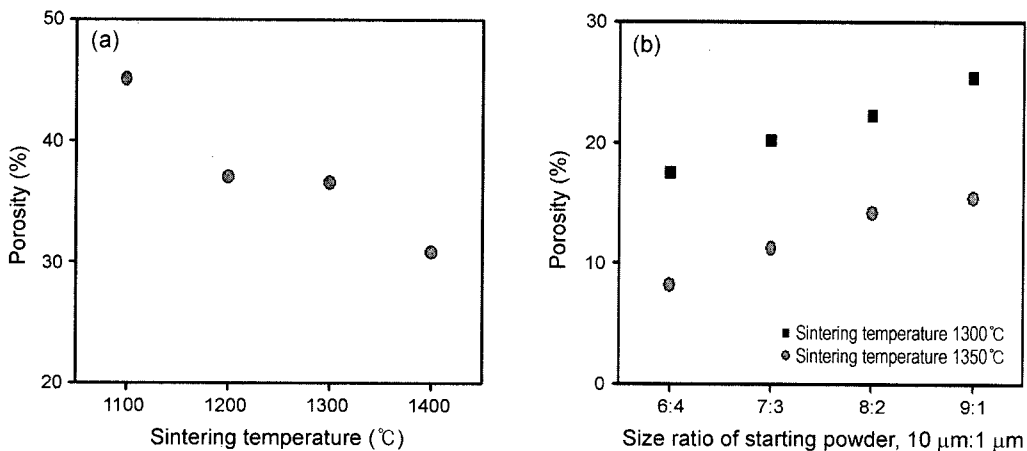


Fig. 2. The porosity of (a) Al₂O₃ as a function of sintering temperature and (b) SiO₂ as a function of the size ratio of starting powder.

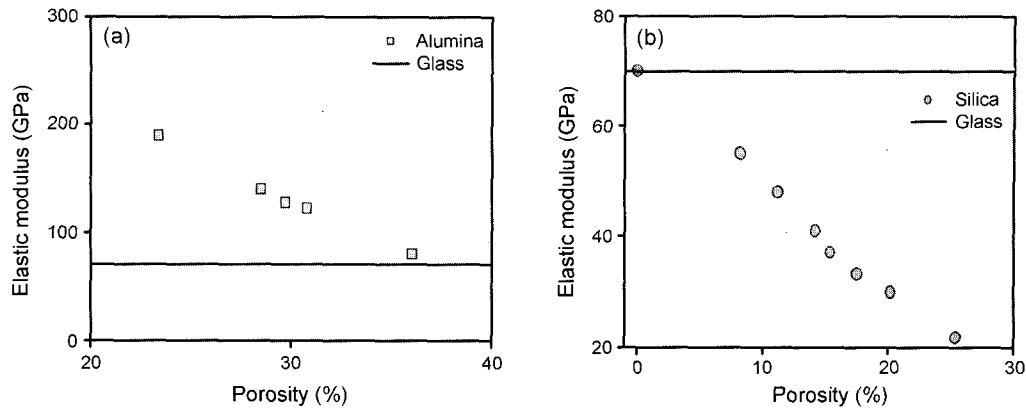


Fig. 3. The numerical elastic modulus as a function of the porosity of (a) Al_2O_3 and (b) SiO_2 . Note the elastic modulus of Al_2O_3 is higher than that of the coating layer, while that of SiO_2 is lower than the glass layer.

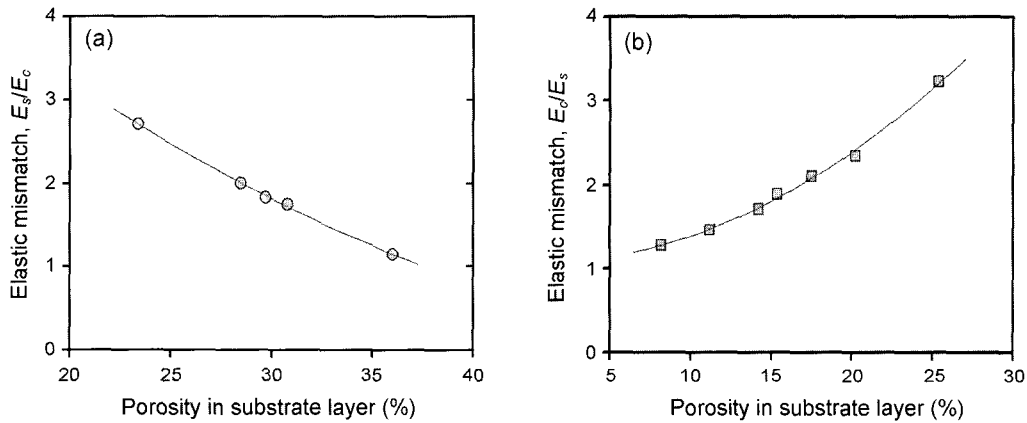


Fig. 4. The elastic mismatch for the porosity in the substrate layer of (a) Al_2O_3 and (b) SiO_2 . The elastic mismatch of Al_2O_3 is E_s/E_c , and that of SiO_2 is E_c/E_s .

리카의 기공률에 따른 탄성계수를 나타내고 있으며 알루미늄의 탄성계수는 치밀층인 유리의 탄성계수 70 GPa 보다 크고, 실리카는 상대적으로 작다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 4에서는 지지층의 기공률에 대한 코팅층과 지지층 간의 탄성계수 차이의 변화를 보여주고 있다. 여기서 층간 탄성계수 차이는 코팅층과 지지층의 탄성계수 비로 나타내었으며, 식 (2)와 같이 항상 1 보다 큰 탄성계수 차이로 표현하기 위해 알루미늄과 실리카의 탄성계수를 각각 분자와 분모로 놓아 탄성계수 차이를 계산하였다. 또한 이 때 코팅층으로 사용된 유리의 탄성계수는 $E=70$ GPa로 계산하였다. 그 결과 알루미늄은 지지층의 기공률이 작아질수록 코팅층과 지지층의 탄성계수 차이가 증가하는 반면에 실리카는 기공률이 커질수록 탄성계수 차이가 증가하였다.

3.2. 코팅 엔지니어링 세라믹의 접촉 손상 평가

본 연구에서는 코팅/지지층 사이의 상온접합을 위하여 에폭시 접착제를 사용하였으며, 코팅/지지층으로 구성된

이층구조만의 특성평가를 위하여 접착제 두께를 최소화 하였다. 접착코팅 후 시편의 길이방향을 따라 임의의 5군데 이상의 위치의 접착층의 두께를 측정된 결과 시편에 따라 동일하게 약 $10\ \mu\text{m}$ 의 균일한 두께를 나타내었다. 또 선행연구에 의하면 지지층을 폴리카보네이트에 유리를 접착시킬 때 접착제의 두께가 30 또는 $300\ \mu\text{m}$ 일 때 압입에 의한 파손입계강도 값은 접착제의 두께에 영향을 받지 않는 것으로 보고된 바 있다.¹⁴⁾ 또 세라믹/세라믹 시스템의 접촉하중 하에서의 코팅층의 파괴에 끼치는 접착제의 영향은 이미 연구되었으며,¹⁵⁾ 본 연구에서는 접착제의 영향을 동일하게 하기 위하여 접착제의 두께를 $0.01\ \text{mm}(10\ \mu\text{m})$ 으로 고정하여 실험을 진행하였다.

치밀질인 유리로 코팅된 다공성 엔지니어링 세라믹 층상재료의 손상거동을 평가하기 위해 반경 $r=3.18\ \text{mm}$ 의 초경 구형압자를 사용, 접촉하중 $P=150\ \text{N}$ 의 하중으로 압입하여 인덴테이션 실험을 하였다. 그리고 광학현미경으로 코팅층에 형성된 균열을 관찰한 결과 Fig. 5와 같이 여러 겹의 원형 균열과 수개의 방사형 균열이 관찰되었

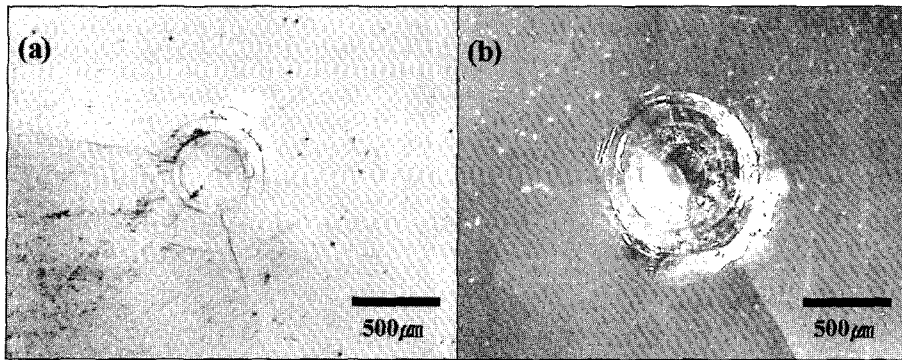


Fig. 5. Contact damages in the coating layer of the glass/SiO₂ bilayer from Hertzian indentation with WC sphere radius $r = 3.18$ mm at load 150 N. The porosity of the substrate layer is (a) 11.2% and (b) 25.4%.

다. 또, 지지층의 기공률이 클수록 Fig. 5(b)와 같이 상대적으로 기계적 손상(damage)이 크다는 것을 발견하였다.

취성재료가 인덴테이션 하중을 받을 때 구형 접촉에서 사실상 최대 주응력인 원주방향 응력이 표면에 수직인 접촉부분의 바깥 둘레 주위에 형성되는 원형 균열의 원인이 된다는 점⁸⁾에 착안하여 가장 바깥쪽에 보이는 원형 균열의 직경을 측정하여 시편의 접촉 손상을 비교하였다. Fig. 6은 유리에 비하여 상대적으로 큰 탄성계수를 갖는 알루미늄이나 또는 상대적으로 작은 탄성 계수를 갖는 실리카에 접촉된 유리의 치밀층 표면에 인덴테이션한 실험의 결과로서 관찰되는 손상 영역에서 가장 바깥쪽에서 보이는 원형 균열의 크기를 치밀층/다공층간 탄성계수 차이에 대해 나타낸 결과이다. 치밀층에 비해 상대적으로 큰 탄성계수를 갖는 알루미늄이 접촉된 층상재료는 Fig. 6(a)와 같이 탄성계수 차이가 커질수록 치밀층의 손상영역에 나타나는 원형 균열의 크기가 감소하는 현상이 보이는 반면에, 상대적으로 작은 탄성계수를 갖는 실리카는 Fig. 6(b)와 같이 탄성계수 차이가 커질수록 균열의 크기도 커지는 현상을 보였다.

Fig. 7은 유리를 알루미늄과 실리카에 접촉한 층상재료

의 코팅층에서 형성된 원형 균열의 크기를 지지층 세라믹의 기공률에 대해 나타낸 결과이다. Fig. 6에서의 경향과는 다르게, 치밀층인 유리보다 탄성계수가 큰 알루미늄의 경우나 상대적으로 탄성계수가 작은 실리카의 경우 모두 기공률이 커질수록 원형 균열이 커지는 현상이 나타남을 알 수가 있었다. 이는 $P=150$ N의 하중이 코팅층 뿐만 아니라 지지층에 영향을 주기 때문으로, 지지층의 항복(yield) 현상이 기공률의 함수이기 때문으로 생각되며 이에 대한 정량적인 평가 연구는 현재 수행 중에 있다. 한편 Fig. 7(a)의 데이터와 Fig. 7(b)의 데이터를 비교해 볼 때, 지지층의 탄성계수가 높을수록 동일한 기공률에서 코팅층에 형성된 균열크기가 상대적으로 작은 것을 발견할 수 있으며, 따라서 동일한 기공률을 갖는 경우 탄성계수가 높은 재료를 지지층으로 사용하는 것이 보다 높은 강도의 구조체 설계에 유리할 것으로 생각된다.

방사형 균열과 원형 균열의 개시 및 전파거동¹⁶⁾을 좀더 자세히 관찰하기 위해 기공률 20.2%의 실리카 다공층 시편에 접촉하중을 50 N부터 105 N으로 5 N의 간격을 두고 여러 차례 인덴테이션 실험을 하여 어떠한 종류의 균열이 먼저 발생하는지, 어떠한 거동을 보이며 균열이 성

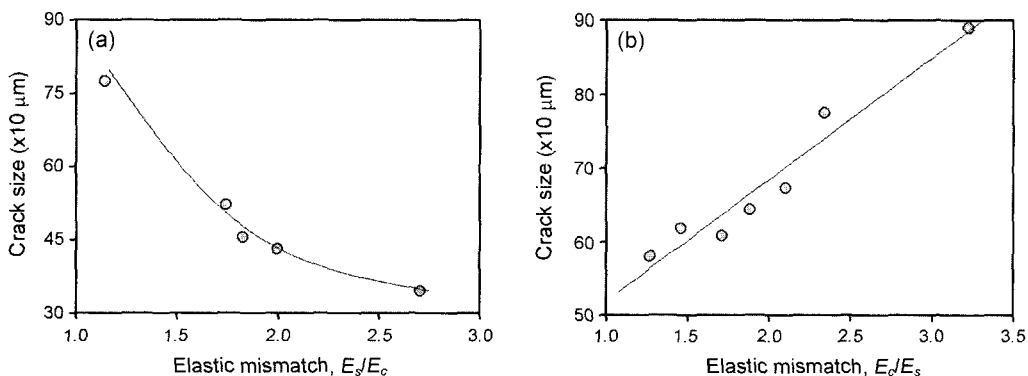


Fig. 6. Plot of crack sizes for ring crack produced using WC sphere radius $r = 3.18$ mm at load $P = 150$ N as a function of the elastic mismatch for dense glass coatings on (a) porous alumina and (b) porous silica.

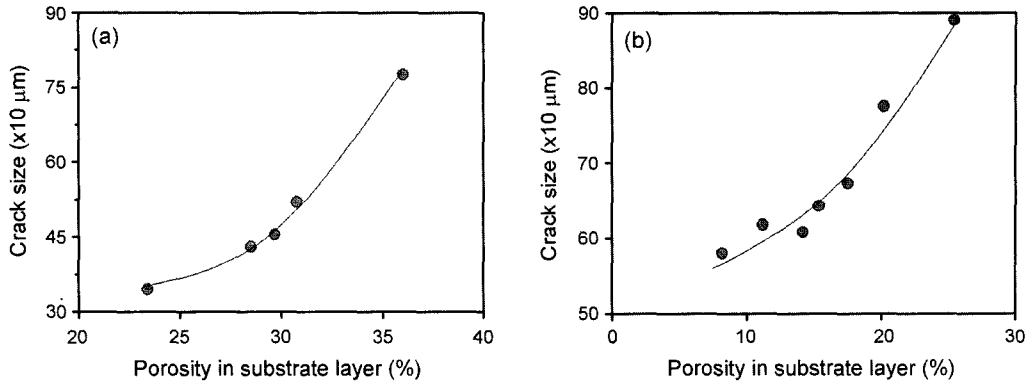


Fig. 7. Plot of crack sizes for ring crack produced using WC sphere radius $r = 3.18$ mm at load $P = 150$ N as a function of the porosity in substrate layer of (a) alumina and (b) silica.

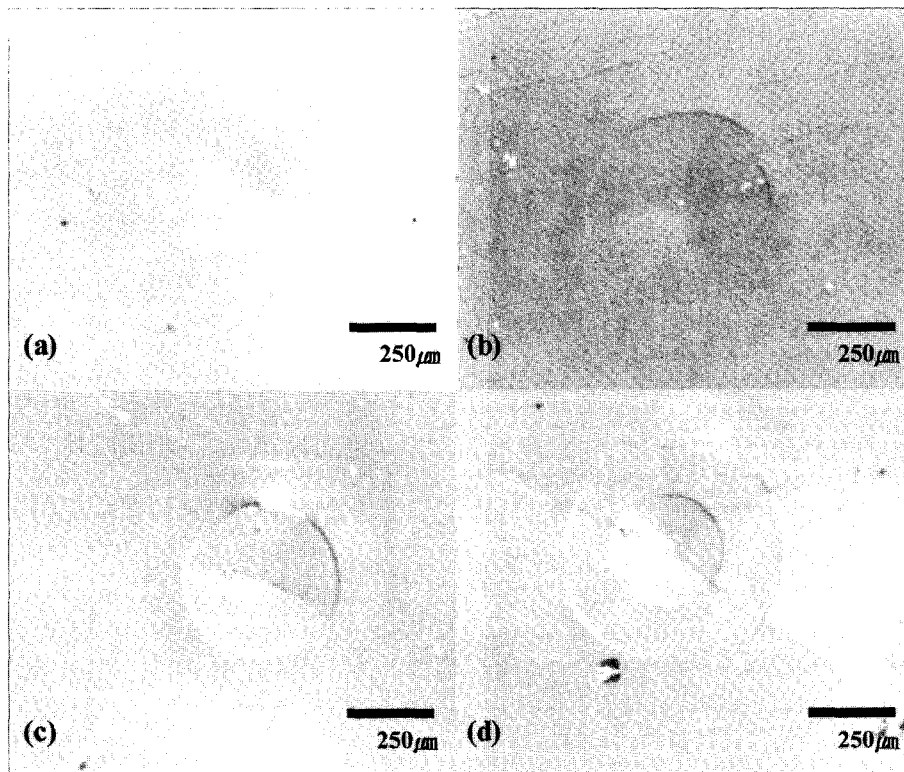


Fig. 8. Damage behavior in glass/SiO₂ bilayer (the porosity of silica is 20.2%) from Hertzian indentation with WC sphere radius $r = 3.18$ mm at load (a) 50 N, (b) 55 N, (c) 60 N, and (d) 75 N.

장하는지를 관찰하였다. Fig. 8은 그 중 초기 균열을 보이기 시작하는 접촉하중의 손상거동을 보여주고 있다. 사진에서 볼 수 있듯이 처음에는 치밀층/다공층간 계면 부근에서 손상이 시작되는 것으로 보이며(Fig. 8(a)), 치밀층 표면에서 원형균열이 그 다음으로 나타나고(Fig. 8(b)), 방사성 균열이 점차 코팅층으로 진행되어(Fig. 8(c)) 표면의 방사성 균열을 야기하고(Fig. 8(d)), 상대적으로 높은 하중에서 원형균열의 밀도가 증가함(Fig. 8(d))을 관찰할 수 있었다. 이는 코팅에 의한 적층형태의 소재에서 최대인장응

력 영역이 계면층에 처음 나타나고 그 다음으로 코팅층 표면으로 이동된다는 기존의 연구¹⁷⁾와 같은 원인에서 기인된 결과로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 치밀층/다공층(코팅층/지지층)의 층상형 엔지니어링 세라믹 소재에서 지지층인 다공 세라믹에 대해 기공률을 제어하여 결과적으로 탄성계수를 변화시킬

으로써 이에 의한 코팅층의 균열거동을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다공층의 탄성계수에 비해 치밀층의 탄성계수가 높은 경우와 낮은 경우, 인덴테이션 평가에 의한 손상영역을 관찰해보면 탄성계수 차에 대해 각기 다른 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 유리/알루미나와 같이 탄성계수가 치밀층보다 다공층이 높은 경우는 탄성계수 차이가 클수록, 그리고 유리/실리카와 같이 탄성계수가 치밀층보다 다공층이 낮은 경우는 탄성계수 차이가 작을수록 더욱 우수한 층상재료의 강도 특성을 갖게 될 것으로 예상된다. 이로부터 층간 탄성계수 차가 세라믹 층상재료의 강도에 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

2. 탄성계수가 치밀층보다 다공층이 큰 경우와 작은 경우 모두 다공층의 기공률이 작을수록 더욱 우수한 층상재료의 강도 특성을 보였다. 위와 같은 사실로 경량화나 기공의 활용을 위해서 기공률이 지나치게 큰 다공소재를 사용하는 것은 중량을 줄일 수는 있더라도 소재의 강도에는 좋지 않은 영향을 줄 것이며, 기공률이 큰 소재를 사용하여 층상재료를 제조할 경우 탄성계수가 큰 다공성 소재를 지지체로 사용하는 것이 상대적으로 유리함을 본 연구를 통해 제시할 수 있다.

3. 인덴테이션 평가에 의한 손상거동을 보면 초기 손상은 치밀층/다공층간 계면에 나타났으며 이 후에 접촉하중이 커짐에 따라 계면의 손상이 치밀층 표면으로 성장함을 볼 수가 있었으며 치밀층 표면에는 원형 균열과 방사형 균열이 차례로 개시, 성장함이 관찰되었다.

감사의 글

실험에 도움을 주신 KAIST 김영구 박사, 하장훈 군에게 감사드리며, 본 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원(KRF-2004-003-D00002)에 의하여 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. J. M. Bae and Y. S. Yoo, "Technical Trend of Fuel Cell System," *Ceramist*, **6** [4] 19-31 (2003).
2. K. S. Lee, D. W. Seo, J. H. Yu, and S. K. Woo, "A Study on the Improvement of Strength in NiO-YSZ Porous Anode Material for Solid Oxide Fuel Cell(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [3] 241-48 (2003).
3. H. H. Jung, D. J. Kim, J. S. Han, and D. Y. Lee, "Mechanical Properties of (Y,Nb)-TZP/Alumina Composites for Dental Implant Abutments(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **41** [7] 508-12 (2004).
4. W. Beele, G. Marinjinissen, and A. van Lieshout, "The Evolution of Thermal Barrier Coatings-Status and Upcoming Solutions for Today's Key Issues," *Surf. Coat. Tech.*, **120-121** 61-7 (1999).
5. M. Asmani, C. Kermel, A. Leriche, and M. Ourak, "Influence of Porosity on Young's Modulus and Poisson's Ratio in Alumina Ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **21** 1081-86 (2001).
6. M. Jeandin, S. Rupp, J. Massol, and Y. Biennenu, "Structural Study and Image Analysis of Rapidly Cooled Super-solidus-Sintered Astroloy," *Mater. Sci. and Eng.*, **77** 139-47 (1986).
7. Y. S. Han and J. K. Park, "Preparation of Porous Silica Support and TiO₂ Coating by Sol-Gel Method(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **41** [7] 548-54 (2004).
8. F. B. Abudaia, J. T. Evans, and B. A. Shaw, "Spherical Indentation Fatigue Cracking," *Mater. Sci. and Eng.*, **A391** 181-87 (2005).
9. K. S. Lee, S. K. Lee, and D. K. Kim, "A Study on the Coating Fracture in Silicon Nitride Bilayer : I. Effect of Elastic/Plastic Mismatch(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **34** [12] 1268-74 (1997).
10. K. S. Lee, S. K. Lee, and D. K. Kim, "A Study on the Coating Fracture in Silicon Nitride Bilayer : II. Effect of Coating Thickness(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **35** [1] 48-54 (1997).
11. B. R. Lawn, "Indentation of Ceramic with Spheres : A Century After Hertz," *J. Am. Ceram. Soc.*, **81** [8] 1977-94 (1998).
12. P. Miranda, A. Pajares, F. Guiberteau, F. L. Cumbreira, and B. R. Lawn, "Role of Flaw Statistics in Contact Fracture of Brittle Coatings," *Acta. Mater.*, **49** 3719-26 (2001).
13. J. H. Ha, J. H. Kim, and D. K. Kim, "Elasticity and Thermal Conductivity of Porous Ceramics with Controlled Pore Structure," *J. Jpn. Ceram. Soc.*, **112** [5] 1084-88 (2004).
14. H. Chai, B. R. Lawn, and S. Wuttiphan, "Fracture Modes in Brittle Coatings with Large Interlayer Modulus Mismatch," *J. Mater. Res.*, **14** [9] 3805-17 (1999).
15. J. H. Kim, P. Miranda, D. K. Kim, and B. R. Lawn, "Effect of an Adhesive Interlayer on the Fracture of a Brittle Coating on a Supporting Substrate," *J. Mater. Res.*, **18** [1] 222-27 (2003).
16. S. K. Kim, T. W. Kim, C. Kim, T. H. Shin, I. S. Han, S. K. Woo, and K. S. Lee, "Indentation of YSZ/Al₂O₃ Layered Systems Prepared by Nano-Coating(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **42** [1] 43-9 (2005).
17. K. S. Lee, S. Wuttiphan, X. Z. Hu, S. K. Lee, and B. R. Lawn, "Contact-Induced Transverse Fractures in Brittle Layers on Soft Substrates : A Study on Silicon Nitride Bilayers," *J. Am. Ceram. Soc.*, **81** [3] 571-80 (1998).