

알루미나 세라믹스의 기계적 특성 평가

임현진 · 조덕호 · 김무경 · 한상미 · 이와사 미키오*

요업기술원

*오사카공업기술연구소 재료물리부

(1995년 12월 13일 접수)

The Evaluation of Mechanical Properties for Alumina Ceramics

Hun-Jin Lim, Duk-Ho Cho, Moo-Kyung Kim, Sang-Mi Han and Mikio Iwasa*

Institute of Ceramic Technology

*Dept. of Mater. Physics, GIREO

(Received December 13, 1995)

요 약

알루미나를 대상소재로 하여 국산 3종 및 일산 1종의 고순도 알루미나 제품을 구입하여 꺾임강도, 비커스 경도, 압자압입법 및 압입강도법에 의한 파괴인성 등의 기계적 물성을 평가하였다. 꺾임강도 및 와이블 계수는 제조회사에 따라 각각 약 300~400 MPa, 5~15의 범위에서 큰 편차를 나타내었다. 압입하중 변화에 따른 경도시험시 탄성 회복의 영향을 무시할 수 있는 인계하중은 약 9.8N이었으며, 압입하중 98N에서의 알루미나의 경도는 약 15 GPa이었다. 파괴인성은 한 압입하중에서의 측정된 평균값으로 파괴인성을 구하는 것보다 압자압입법의 경우 압입하중과 균열길이, 압입강도법의 경우 압입하중과 꺾임강도와 관계식의 기울기로부터 각각 직선회기법으로 파괴인성을 구하는 것이 보다 신뢰성이 있으며, 알루미나의 파괴인성은 약 $4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 이었다.

ABSTRACT

Mechanical properties (flexural strength, hardness, fracture toughness) of alumina ceramics were evaluated. Alumina products of four companies were selected, and three of those were made in Korea and one of those was made in Japan. The large differences according to manufacturing companies had resulted from flexural strength and weibull modulus, which had a wide ranges of 300 to 400 MPa and 5 to 15, respectively. Critical indentation load which could be neglected the effect of elastic recovery was about 9.8N and Vickers' hardness were about 15 GPa. Fracture toughnesses were evaluated by IF and ISB method. It was more preferable to the average at one indentation load that fracture toughness were obtained from the slope of the relationship between indentation load and crack length in IF method and between indentation load and fracture load in ISB method, and fracture toughness was about $4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Key words: Alumina ceramics, Flexural strength, Vickers' hardness, Frature toughness

1. 서 론

산업시장이 급속하게 세계시장으로 이동함에 따라 표준(standards)의 중요성에 대한 인식이 어느 때보다 고조되고 있다. 표준은 과학과 공학에 있어서의 국제공통의 언어로서 세계 어느 곳의 생산자, 공학자, 수요자간의 명확한 의사 소통을 가능하게 하여, 제품의 품질과 성능에 대한 확신을 제공하는 기능을 한다¹⁾. 새로운 기술 집약형의 재료나 제품의 개발이 늘어남에 따라, 그들

물성을 평가하고 공정한 거래를 수행하기 위해서는 새로운 공업적 표준이 필요하다. 특히 최근에서야 비로소 실험실적으로 여러 분야에서 개발되었으나, 금속이나 플라스틱과 같은 기존재료와 경쟁해야 하는 기술집약형의 세라믹스에 있어서는 표준화는 더욱 시급한 실정이다²⁾.

파인 세라믹스는 높은 탄성을 및 저비중, 높은 고온 강도 및 경도, 화학적 안정성, 우수한 열적 저항성등을 가지고 있어서 현재 실용화 추세에 있으며 앞으로 구조재료로서-특히 고온에서-광범위한 응용이 기대되는

공업소재의 하나이다¹⁾. 그러나, 일반적으로 세라믹스는 금속재료나 고분자재료에 비해 매우 약한데, 즉 파괴에너지 또는 파괴인성이 낮으므로 그 기계적 특성은 재료 표면 또는 내부에 존재하는 미소결함에 예민하게 반응하여 파괴적인 파괴(catastrophic failure)를 일으키며 기계적, 열적 충격에 약하고 가공이 어렵다²⁾. 또한, 각종 특성이 제조공정에 의해 지배되는 미세구조에 크게 의존하여 변화하는 문제점이 있으므로, 세라믹스를 구조재료로서 널리 실용화하기 위해서는 신뢰성있는 세라믹스의 시험, 평가 기술의 표준화가 시급하다. 이는 신뢰성있는 파괴특성의 평가를 통하여 세라믹스가 구조재료 사용될 때 가해진 하중에 대한 안전성과 수명을 예측하여 예기하지 못한 파손에 따르는 피해를 방지할 수 있고, 보다 우수한 특성을 갖는 재료의 개발을 위한 자료를

제공받을 수 있기 때문이다³⁾

세라믹스의 기계적 물성의 평가에 있어서 기초항목으로는 꺾임강도, 경도, 파괴인성을 들 수 있다. 본 연구에서는 구조용 피인 세라믹스로 가장 널리 사용되고 있는 알루미나를 대상소재로 하여 각 파인 세라믹스 관련업체에서 생산하는 국산 3종 및 일산 1종의 고순도의 알루미나 제품을 구입하여 기계적 물성을 평가하였다. 꺾임강도는 각사의 시험편에 대하여 KSL 1591⁴⁾에 따른 꺾임강도 평가 및 와이블 통계 처리를 통한 신뢰성 분석을 하였다. 경도는 KSL 1603⁵⁾에 준하여 비커스 압자 압입법으로 각사의 알루미나에 대하여 평가하였으며, 압입하중에 따른 경도에 미치는 영향도 고찰하였다. 파괴인성은 KSL 1600⁶⁾에 준한 압자압입법 및 압자압입법과 시험방법이 유사한 압자강도법을 적용하여 시험방법에 따른 파괴인성값을 비교 평가하였다.

Table 1. Sintered Density of Each Alumina Specimen

Specimen	Sintered Density (g/cm ³)	Relative Density (%)
A	3.90	98
B	3.86	97
C	3.91	98
D	3.93	98

2. 실험방법

2.1. 알루미나 대상소재

현재 구조용 세라믹스로 가장 광범위하게 사용되고 있는 알루미나에 대하여 국내의 3개 회사 및 일산 1종을 구입하여 대상소재로 선택하였으며, 국산 3종에 대하여 A, B, C 일산 1종에 대하여 D라고 각각 명명하였다. Ta-

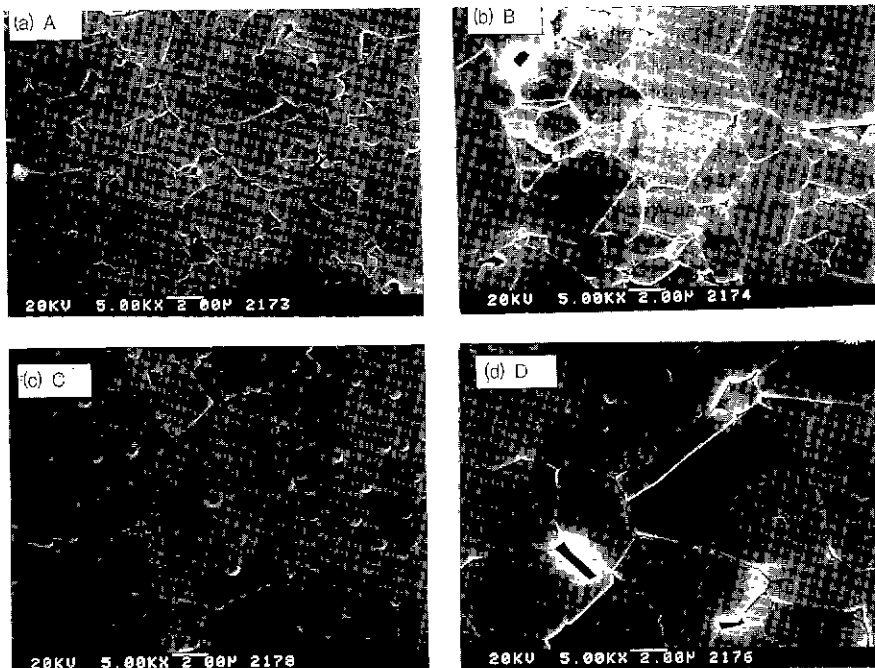


Fig. 1. Scanning electron micrograph of the polished surface for each alumina ceramics.

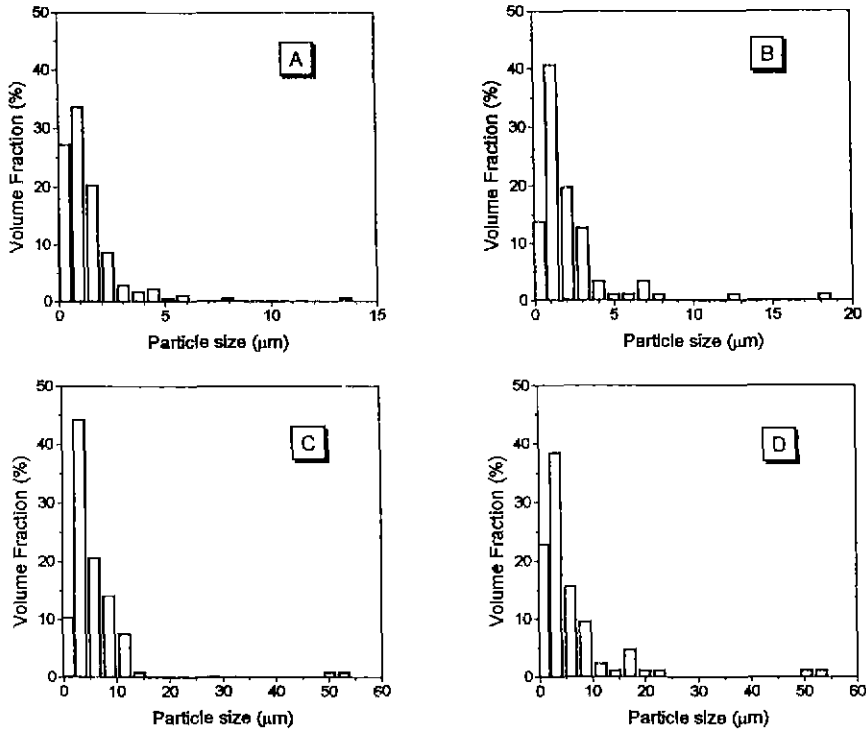


Fig. 2. Histogram of grain size distribution for each alumina ceramics.

Table 2. Grain Size of Each Alumina Specimen

Specimen	Max. Grain Size (μm)	Min. Grain Size (μm)	Ave. Grain Size (μm)
A	13.5	0.2	1.4
B	18.2	0.2	2.3
C	52.8	0.4	5.8
D	53.1	0.4	6.2

Table 1은 각 알루미나 제품의 소결밀도로서 알루미나의 이론밀도를 4.0 g/cm³으로 취하고 상대밀도를 계산하였을 때 각 대상소재의 상대밀도는 97% 이상을 나타내었다. Fig. 1은 각 알루미나 표면의 주사전자현미경 사진을 나타내었으며, 각 시험편의 80개 이상씩의 결정립에 대하여 화상해석법을 통하여 소결체 결정립의 입자크기를 구한 결과를 Table 2와 Fig. 2에 정리하였다. 평균입자 크기를 비교하여 보면 시험 A와 B의 입자크기가 약 2 μm이며, 시험 C와 D는 약 6 μm로서 입자크기가 크게 두 종류로 대별됨을 알 수 있었다.

2.2. 분석 및 측정

2.2.1. 꺾임강도 시험

구입한 알루미나 플레이트를 다목적 절단 연삭기(MX-833, MARUTO, Japan)를 사용하여 #600의 다이아몬드 연삭지석으로 연삭 가공하고, 두께 0.6 mm의 레진 본드 식 다이아몬드 블레이드(Diamond blade)를 사용하여 가공방향에 평행한 방향으로 각각 절단하여 3×4×40 mm의 시험편을 제작하였다. 이 시험편을 모서리 가공기(MG-401, MARUTO, Japan)를 사용하여 각 모서리를 45° 각도로 가공하여 꺾임강도 시험편을 제작하였다. 알루미나 꺾임강도 시험편을 만능재료시험기(Model 4202, Instron, JAPAN)를 사용하여 500 kgf 로드셀로 크로스헤드 속도 0.5 mm/min, 지지점간 거리 30 mm의 조건으로 상온에서 파괴하중을 구한 뒤 3점 꺾임강도를 계산하였다⁷⁾. 이때 꺾임강도값은 각각 30개의 시험편에 대하여 측정된 평균값으로 하였다.

2.2.2. 비커스 경도 시험

알루미나 시험편을 각각 3×4×4 mm의 크기로 절단하여 경면연마기(Buehler Co., Automat 2, U.S.A.)를 사

용하여 다이아몬드 현탁액 30, 6, 1 μm의 순서로 경면이 되게 연마한 후 비커스 경도를 측정하였다. 이때 압입 시험조건은 압입속도를 70 μm/sec, 유지시간을 30초로 하고, 압입하중을 0.245~196N의 범위에서 변화시키면서 압입하중에 따른 경도값을 구하였다⁹⁾. 측정은 5회 이상 하여 그 평균값을 경도값으로 하였다.

2.2.3. 압자압입법에 의한 파괴인성 시험

앞서의 경도 시험편과 동일하게 제작한 시험편을 사용하여 비커스 압자압입법에 의한 파괴인성 측정을 하였다. 이때 압입시험조건은 압입속도를 70 μm/sec, 유지시간을 30초로 하고 압입하중을 4.9~196N로의 범위에서 변화시키면서 압입후의 균열길이와 대각선 길이의 반의 비(c/a)가 2.5 이상인 조건을 만족하는 압입하중의 범위에서¹⁰⁾ Evans와 Charles¹¹⁾가 제시한 식을 이용하여 파괴인성값을 구하였다. 측정은 5회 이상하여 그 평균값을 파괴인성값으로 취하였다.

2.2.4. 압입강도법에 의한 파괴인성 시험

각 알루미늄나 대상소재를 꺾임강도 측정 시험편의 크기와 동일한 크기 및 제작방법으로 연마 절단한 후 꺾임시험시 시험편 인장면의 중앙부에 비커스 압자압입법으로 0.245~294N 범위의 압입하중으로 압흔을 생성시켰다. 이 시험편을 만능재료시험기를 이용하여 3점 꺾임법으로 파괴하중을 구한 후 식(1)에 대입하여 파괴인성을 구하였다¹²⁾.

$$K_{IC} = 0.88 (\sigma_f P^{1/3})^{3/4} \quad (1)$$

여기서, K_{IC} 는 파괴인성, σ_f 는 파괴하중, P는 압입하중이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 알루미늄나 세라믹스의 꺾임강도

각 알루미늄나 대상소재의 꺾임강도 시험결과로부터, $\sigma_u = 0$, $N = 30$ 으로 두고 파괴확률 P와 $\ln \sigma$ 의 관계를 플롯트한 결과를 Fig. 3에 나타내었으며, 최소자승법으로 Fig. 3의 직선의 기울기로 구한 와이블 계수 m을 꺾임강도값과 함께 Table 3에 정리하였다. Table 3으로부터 A사, B사, C사, D사의 순으로 꺾임강도 및 와이블계수 m이 높으며, 와이블계수가 작을수록 강도의 최소값과 최대값과의 차이 및 표준편차가 큼을 알 수 있었다. KSL 1591¹⁷⁾에는 꺾임강도 시험편의 크기를 3×4×36 mm로 규정하고 있으나, 이는 단지 시험편의 크기일 뿐 일반적으로 제품의 크기는 이와 다르며, 시험편의 크기에 따라 꺾임강도의 측정결과도 다르게 된다. 와이블 통계

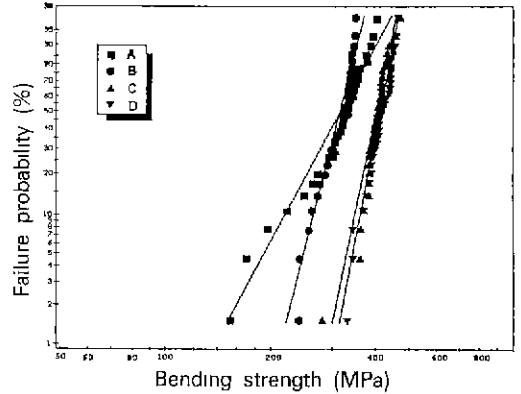


Fig. 3. Weibull probability plot for the flexural strength of each alumina ceramics.

Table 3. Flexural Strength and Weibull Modulus of Each Alumina Specimen

Specimen	Min. Strength (MPa)	Max. Strength (MPa)	Ave. Strength (MPa)	Weibull Modulus, m
A	151	394	308 ± 63	5.1
B	235	342	307 ± 33	10.8
C	275	460	391 ± 33	13.3
D	325	450	401 ± 33	14.5

처리를 함으로서 시험편 크기에 따른 꺾임강도 변화에 대한 중요한 정보를 얻을 수 있다. 즉, 다음 식(2)로부터 체적이 다를 경우의 강도값의 예측이 가능하다¹³⁾.

$$V_1 \cdot \sigma_{V1}^m = V_2 \cdot \sigma_{V2}^m \quad \text{또는} \quad (\sigma_{V1} / \sigma_{V2})^m = (V_1 / V_2)^{1/m} \quad (2)$$

만약, 40×50×100 mm의 판 또는 타일 제품을 만든다고 가정할 경우 식(2)로부터 각 알루미늄나의 강도는 A사 94 MPa, B사 176 MPa, C사 248 MPa, D사 265 MPa로 추정할 수 있다. A사와 B사의 꺾임강도는 Table 3에서 알 수 있듯이 거의 같으나, 체적이 40×50×100 mm로 증가하는 경우 와이블계수의 차이로 인하여 강도는 약 두배의 차이를 나타내고 있다. 세라믹스의 강도는 체적이 증가함에 따라 감소하며, 와이블계수가 작을수록 그 강도의 감소폭이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 세라믹스는 고강도를 나타내는 것도 중요하지만 와이블계수가 높을수록 더욱 신뢰할 수 있음을 알 수 있었으며, 이는 적절한 원료의 선정, 제조 및 가공공정을 최적화하여 강도에 영향을 미치는 제반인자들을 최소화함으로써 가능하다^{14,15)}.

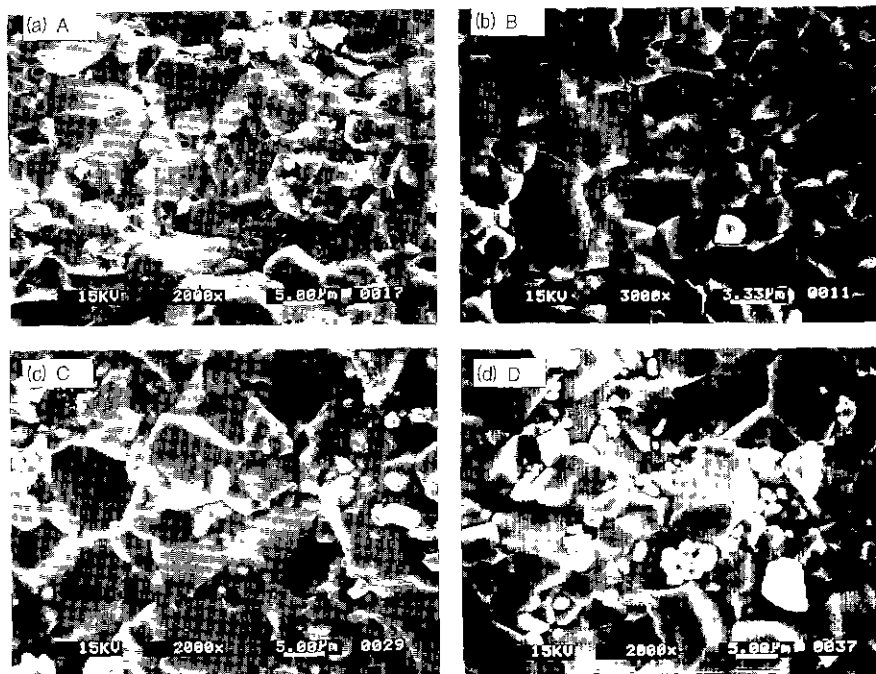


Fig. 4. Scanning electron micrograph of the fractured surface for each alumina ceramics.

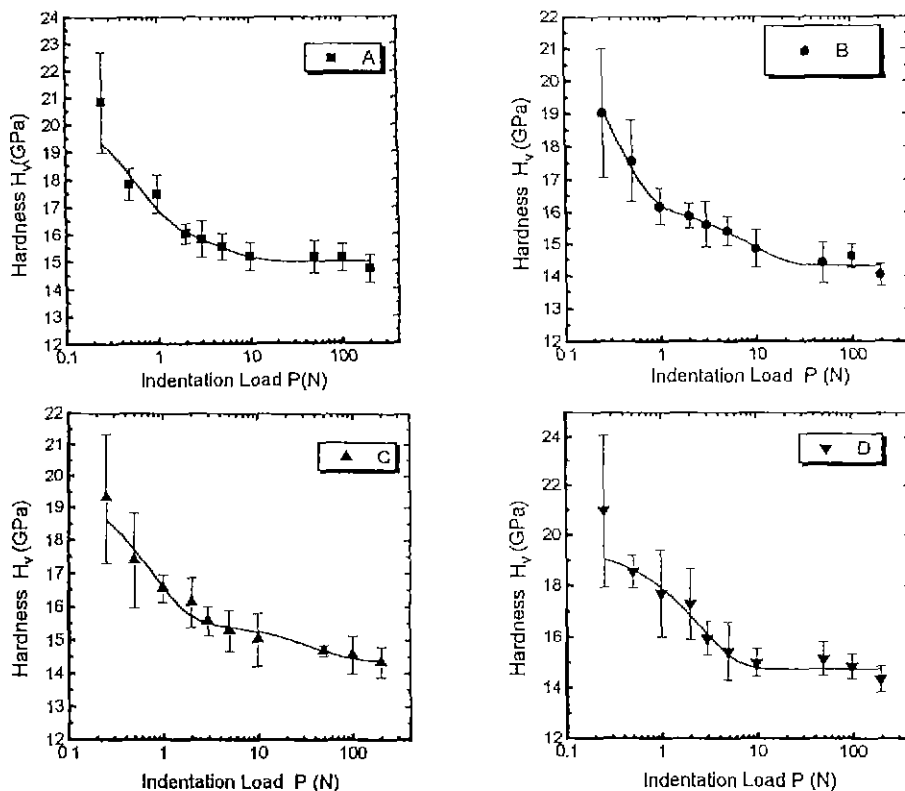


Fig. 5. Vickers hardness of each alumina ceramics as a function of indentation load.

각 알루미늄 시편의 꺾임시험후의 파단면의 주사전자현미경 사진을 Fig. 4에 나타내었는데, 각 조성 모두 결정립의 모양이 뚜렷이 관찰되고 있으며, 입자가 떨어져 나간 흔적도 관찰되었으므로, 입계파괴 양상으로 파괴가 진행되었음을 알 수 있다.

3.2. 알루미늄 세라믹스의 경도

Fig. 5에는 A, B, C, D사의 알루미늄 세라믹스의 압입하중 변화에 따른 비커스 경도 시험 결과를 나타내었는데, 각사의 시험편 모두 압입하중이 증가함에 따라 경도가 감소하다가 어느 하중 이상에서는 일정한 경도값을 나타내는 경향을 보임을 알 수 있었다. 일반적으로 정적 압자 압입법에 의한 경도시험시, 생성되는 압입흔적은 외부에서 가한 힘에 대한 재료의 소성변형(plastic deformation)의 응답성으로 정의되고 있다. 그러나, 압자 제거시에는 탄성회복(elastic recovery)이 일어나게 되며, 이 탄성회복이 경도값에 미치는 영향의 정도에 따라, 압입하중에 따른 경도 변화의 영역을 미소경도영역(압입하중 1N 이하), 저하중영역(압입하중 1~50N), 표준

경도영역(압입하중 50N 이상)의 세 영역으로 구분하고 있다¹⁶⁾. 즉, 가해진 압입하중이 작은 경우에는 압입시 소성변형되었다가 압자 제거시 탄성회복의 영향으로 경도값이 높게 평가되는 영역을 미소경도영역이라 하며, 탄성회복의 양이 소성변형 양에 비해 너무 작아 탄성회복의 양을 무시할 수 있는 영역을 표준경도영역이라 한다. 그리고, 탄성회복의 영향을 무시할 수 있는 임계하중을 나타내는 영역을 저하중영역이라 하는데, 각 재질에 따라 이 임계하중값은 다르다.

본 시험결과 각 시험편에서 9.8N 이상의 하중에서 일정한 경도값을 나타내므로 알루미늄 세라믹스의 경도시험은 적어도 9.8N 이상에서 시험하여야 정확한 경도시험 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 표준경도 영역중의 한값인 압입하중 98N에서의 각 시험편의 경도값을 비교하면, A사 15.1 ± 0.51 GPa, B사 14.6 ± 0.37 GPa, C사 14.6 ± 0.57 GPa, D사 14.9 ± 0.50 GPa이어서, 알루미늄 세라믹스의 경도는 약 15 GPa의 값을 가짐을 알 수 있었다.

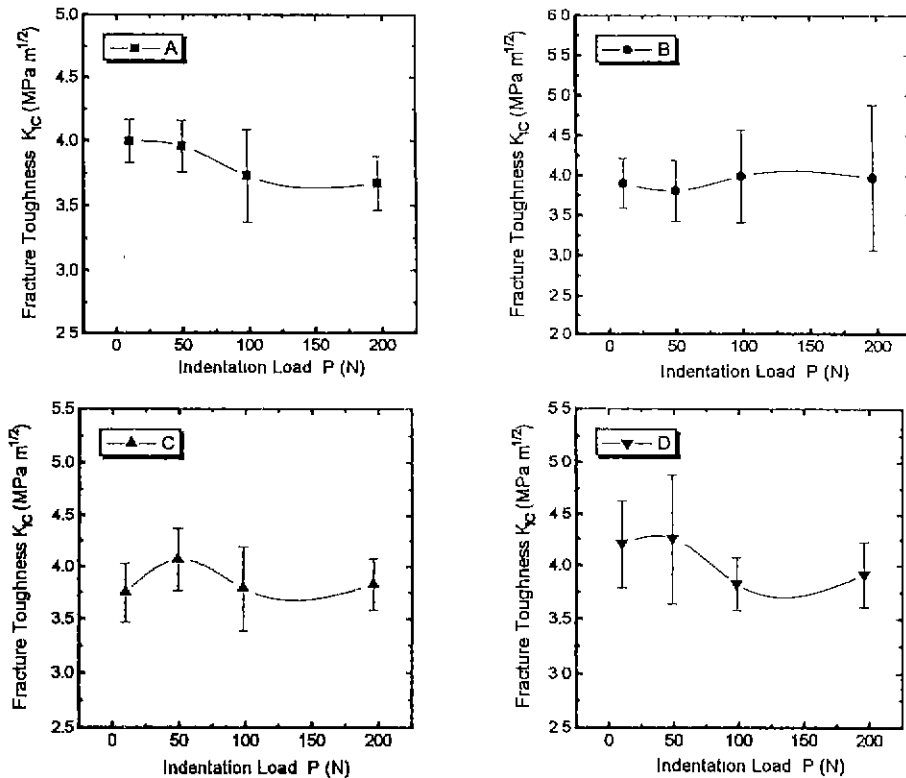


Fig. 6. Fracture toughness of each alumina ceramics as a function of indentation load.

3.3. 알루미나 세라믹스의 파괴인성

3.3.1. 압자압입법에 의한 파괴인성 평가

Fig. 6에는 A, B, C, D사의 알루미나 세라믹스의 압

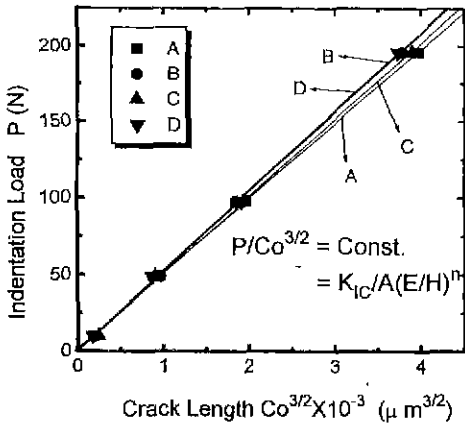


Fig. 7. The relationship of indentation load vs. crack length.

입하중 변화에 따른 압자압입법에 의한 파괴인성 시험 결과를 나타내었는데, 압입하중이 변하더라도 파괴인성 값은 9.8~196N의 파괴인성 시험범위에서 표준편차의 허용범위를 만족하는 일정한 파괴인성값을 나타내었다. 비록 압자압입법에 의한 파괴인성을 평가하는 경우 압입하중에 거의 무관한 경향을 나타내더라도 압입하중에 대한 파괴인성값은 실험자의 측정오차, 세라믹스 내부의 미세구조의 영향등에 의해 평가값에서 오차가 발생하게 되는데, Sakai등¹⁷⁾이 제시한 직선회기(linear regression)법을 이용하여 파괴인성값을 결정하면 실험오차를 줄일 수 있다. 즉, 압자압입법으로 파괴인성 평가시 압입하중과 균열길이는 식(3)의 관계식을 나타내므로, 압입하중(P)와 균열길이(C^{-3/2})간의 회기분석 플롯트의 직선의 기울기로부터 파괴인성값을 결정할 수 있다.

$$P \cdot C^{-3/2} = (\text{const.}) = (\text{const.}') K_{IC} \quad (3)$$

Fig. 7에는 A, B, C, D사의 알루미나 세라믹스의 압입하중(P)와 균열길이(C^{-3/2})간의 회기분석 플롯트 결과

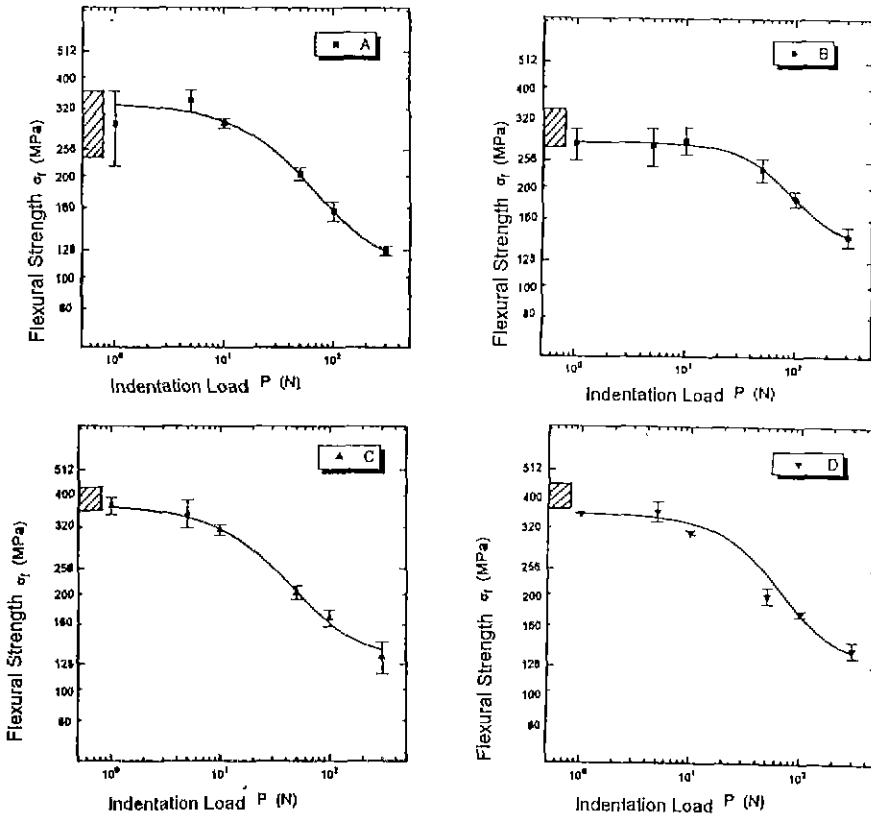


Fig. 8. Flexural strength of each alumina ceramics as a function of indentation load.

를 나타내었으며, 이 직선의 기울기로부터 구한 파괴인성값은 각각 A사 $3.8 \pm 0.06 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, B사 $3.7 \pm 0.04 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, C사 $3.9 \pm 0.03 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, D사 $3.9 \pm 0.05 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 이었다.

3.3.2. 압입강도법에 의한 파괴인성 평가

Fig. 8에는 A, B, C, D사의 알루미늄 세라믹스의 압입하중 변화에 따른 꺾임강도 변화를 각각 나타내었다. 식(1)에서 알 수 있듯이 압입하중 P 에 따라 강도의 1/3승의 법칙¹⁸⁾이 성립하여야 하나 압입하중이 작은 영역에서는 강도에 평탄한 부분이 나타남을 알 수 있다. 세라믹스의 강도는 세라믹스의 재질이 같을 경우 잠재자연결합의 크기에 좌우되는데, 압입하중이 충분히 작은 영역에서는 잠재자연결합이 파괴원으로 작용하므로 Fig. 8에서 강도에 평탄한 부분이 나타난다. 또한, 압입하중이 감소함에 따라 median/radial 균열로부터 Palmqvist 균열영역으로 전이하는 것도 생성 균열길이와 파괴원의 크기가 서로 경합하게 되므로 이 1/3승의 법칙에 위배되는 원인이 된다. 따라서, 압입강도법으로 신뢰할 수 있는 파괴인성값을 얻기 위해서는 이 강도의 전이영역을 피하여 충분히 높은 압입하중을 가할 필요가 있다. 그러나, 압입하중이 지나치게 높게 되면 lateral 균열이 발생하여 radial 균열 고유의 잔유응력을 완화시켜 다시 1/3 승칙이 성립하지 않는 것도 주의하여야 한다. 강도와 압입하중과의 관계식으로부터 파괴인성을 구하기 위하여 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 A, B, C, D사의 알루미늄 세라믹스의 꺾임강도(σ_f)와 압입하중($P^{-1/3}$)을 플롯트하여, 이 직선의 기울기로부터 앞서 파괴인성값을 결정한 결과 A사 $4.1 \pm 0.36 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, B사 $4.5 \pm 0.55 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, C사 $4.2 \pm 0.48 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, D사 $4.2 \pm 0.76 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 의 값

들을 나타내었다.

앞서의 압자압입법과 압입강도법의 파괴인성 시험결과를 비교하여 보면 압입강도법으로 측정된 파괴인성값이 다소 높은 값을 가지는 경향이 있다. 그러나, 현재로서는 “어느 시험법으로 측정된 파괴인성값이 더 그 재료의 파괴인성의 절대값에 근사하는가?”에 대한 신뢰성의 기준은 설정되어 있지 않으며, 파괴인성값 자체도 최근에 R-곡선 거동등이 제시되어 재료 고유의 물리적 성질이 아닌 것으로 보고되고 있다¹⁹⁻²²⁾. 파괴인성 평가의 기준은 “어느 방법으로 파괴인성을 시험하는 것이 여러 시험자가 측정하더라도 측정값의 차이가 작은가?”이며 압자압입법의 경우 균열의 길이를 직접 육안으로 식별 측정하는 방법으로 측정기기, 측정자에 따라 측정값에 오차를 나타낼 확률이 더 많이 잠재하는 시험방법이므로 생성 균열길이의 직접적인 측정을 피할 수 있는 압입강도법이 보다 측정오차를 줄일 수 있는 파괴인성 시험방법으로 생각된다. 압자압입법으로 파괴인성 평가시에는 Fig. 6에 제시한 압입하중과 균열길이의 플롯트로부터 파괴인성값을 결정하면 측정오차를 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 파괴인성값 자체가 재료의 고유 물성값이 아니므로, 측정방법에 따라 파괴인성의 측정값은 편차를 나타낸다. 따라서, 세라믹스의 파괴인성 평가시에는 측정값과 함께 측정방법을 명시하여야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

알루미늄을 대상소재로 하여 국산 3종 및 일산 1종의 고순도 알루미늄 제품을 구입하여 꺾임강도, 비커스 경도, 압자압입법 및 압입강도법에 의한 파괴인성 등의 기계적 물성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 알루미늄의 꺾임강도 및 와이블 계수는 제조회사에 따라 각각 약 300~400 MPa, 5~15의 범위에서 큰 편차를 나타내었다.
2. 압입하중 변화에 따른 경도시험시 탄성회복의 영향을 무시할 수 있는 임제하중은 약 9.8N이었으며, 압입하중 98N에서의 알루미늄의 경도는 약 15 GPa이었다.
3. 파괴인성은 한 압입하중에서의 측정된 평균값으로 파괴인성을 구하는 것보다 압자압입법의 경우 압입하중과 균열길이, 압입강도법의 경우 압입하중과 꺾임강도와 관계식의 기울기로부터 각각 직선회기법으로 파괴인성을 구하는 것이 보다 신뢰성이 있으며, 알루미늄의 파괴인성은 약 $4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 이었다.

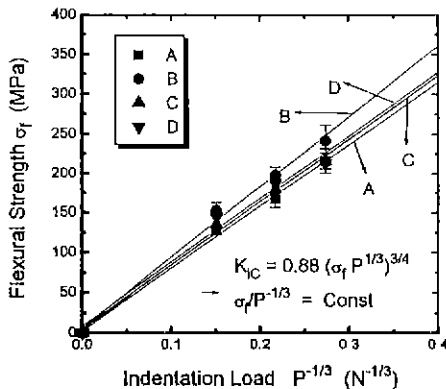


Fig. 9. The relationship of flexural strength vs. indentation load.

감사의 글

본 연구는 1994년 통상산업부 공업기반 기술개발 자금 지원에 의해 수행되었기에 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. D. Pearl, "Standards Need in Advanced Ceramics," pp. 21-24 in International Conference on the Promotion of Standardization for Fine Ceramics, ABTT-FC Nagoya, 1992.
2. M. Uenohara, "Synergy Effects of Standardization in High-Tech Industry," pp. 25-29 in International Conference on the Promotion of Standardization for Fine Ceramics, ABTT-FC Nagoya, 1992.
3. M.H. Voorde, "Perspectives of Structural Ceramics and Present R and D Efforts," pp. 1-20 in Designing with Structural Ceramics, Ed. by R.W. Davidge and M.H. Voorde, Elsevier Applied Science, Netherlands, 1990.
4. H. Abe, "Mechanical Properties of Engineering Ceramics," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **64**(12), 1594-1596 (1985).
5. S.W. Freiman, "Brittle Fracture Behavior of Ceramics," *Ibid.*, **67**(2), 392-402 (1988).
6. D.L. Hartsock and A.F. McLean, "What the Designer with Ceramics Needs," *Ibid.*, 266-270 (1984).
7. "고성능 요업제품의 굽힘강도 시험방법," 한국공업규격 KSL 1591, 한국공업표준협회, 1994.
8. "고성능 요업제품의 비커스경도 시험방법," 한국공업규격 KSL 1603, 한국공업표준협회, 1992.
9. "고성능 요업제품의 파괴인성 시험방법," 한국공업규격 KSL 1600, 한국공업표준협회, 1990.
10. B.R. Lawn, A.G. Evans, and D.B. Marshall, "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Median/Radial Crack System," *J. Am. Ceram. Soc.*, **63** (9-10), 574-581 (1980).
11. A.G. Evans and E.A. Charles, "Fracture Toughness Determinations by Indentation," *Ibid.*, **59**(7-8), 371-372 (1976).
12. P. Chantikul, G.R. Antis, B.R. Lawn, and D.B. Marshall, "A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: II, Strength Method," *Ibid.*, **64**(9), 539-543 (1981).
13. G.D. Quinn and R. Morrell, "Design Data for Engineering Ceramics: A Review of the Flexure Test," *Ibid.*, **74**(9), 2937-2966 (1991).
14. R.W. Rice, "Fractographic Identification of Strength-Controlling Flaws and Microstructure," pp. 32-45 in Fracture Mechanics of Ceramics Vol. 1, Ed. by R.C. Bradt, D.P.H. Hasselman and F.F. Lange, Plenum Press, New York, 1974.
15. F.F. Lange and M. Metcalf, "Processing-Related Fracture Origins: II, Agglomerate Motion and Cracklike Internal Surfaces Caused by Differential Sintering," *J. Am. Ceram. Soc.*, **66**(6), 398-406 (1983).
16. J.J. McColm, "Introduction and Overview," pp. 1-31 in Ceramic Hardness, Bradford, England, 1989.
17. "破壊力學 特性," セラミック先端材料, pp. 65-69, 日本セラミックス協會, 1991.
18. R.F. Cook, B.R. Lawn, and C.J. Fairbanks, "Microstructure-Strength Properties in Ceramics: I, Effect of Crack Size on Toughness," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68**(11), 604-615 (1985).
19. R.F. Cook and D.R. Clarke, "Fracture Stability, R-Curves and Strength Variability," *Acta metall.*, **36**(3), 555-562 (1988).
20. R.F. Krause, Jr., "Rising Fracture Toughness from the Bending Strength of Indented Alumina Beams," *J. Am. Ceram. Soc.*, **71**(5), 338-343 (1988).
21. A.G. Evans, "Perspective on the Development of High-Toughness Ceramics," *Ibid.*, **73**(2), 187-206 (1990).
22. B. Mussler, M.V. Swain, and N. Claussen, "Dependence of Fracture Toughness of Alumina on Grain Size and Test Technique," *Ibid.*, **65**(11), 566-572 (1982).