

알루미나 세라믹스의 동적피로거동

이홍림 · 이규형 · 박성은
연세대학교, 세라믹공학과
(1997년 7월 18일 접수)

Dynamic Fatigue Behavior of Alumina Ceramics

Hong Lim Lee, Kyu Hyoung Lee and Sung Eun Park

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749 Korea

(Received July 18, 1997)

요 약

알루미나 세라믹스에 대한 동적피로 시험을 4점 꺾임법에 의하여 상온에서 수행하였으며 0.24, 0.5, 1.0, 1.5 mm의 노치를 준 시편에 대하여 crosshead speed를 달리하여 동적피로 강도, 동적피로수명, 균열성장지수 n 과 재료상수 A 를 구하였다. 각 노치의 길이를 가진 시편에 대한 동적피로 강도와 동적피로 수명은 crosshead speed의 함수로 나타났으며, 이때 노치를 준 시편의 동적피로 강도는 노치를 주지 않은 시편의 동적피로 강도에 비하여 편차가 작았다. 균열성장지수 n 과 재료상수 A 는 노치의 길이에 대한 함수로 나타났다. 알루미나 시편에 대한 4점 꺾임강도는 각 시편의 노치길이를 균열크기로 할 경우에 대한 이론강도와 잘 일치하였다. 시편의 파단면은 crosshead speed의 크기에 따라 서로 다른 파괴양상을 나타내었다. 또한 알루미나 세라믹스에 대한 4점 꺾임강도, 파괴인성, 영율을 측정하여 각각 360 MPa, $3.91 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 159 GPa를 얻었으며, 꺾임강도를 Weibull plot하여 17.64의 Weibull 계수를 얻었다.

ABSTRACT

The dynamic fatigue behavior of alumina ceramics was observed at room temperature using four point bending system. The dynamic fatigue fracture strength and the dynamic fatigue lifetime were observed as a function of crosshead speed and the notch length. The notched specimen showed the smaller deviation in dynamic fatigue fracture strength than the unnotched specimen. The crack growth exponent n and the material constant A of the notched specimen could be represented as functions of the notch length. Fracture strength of the specimen calculated from the notch length, when the notch length was regarded as the crack size, was in good agreement with the measured 4 point bending strength. Fracture surface of the specimen showed the different fracture modes according to the crosshead speed. The four point flexural strength, fracture toughness, Young's modulus and Weibull modulus of the alumina were measured as 360 MPa, $3.91 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, 159 GPa, 17.64, respectively.

Key words : Dynamic fatigue, Crack growth exponent, Crosshead speed

1. 서 론

금속과 비교하여 세라믹스는 고내열성, 고경도, 저비중, 고내식성 등의 우수한 장점을 지니고 있어 금속을 사용할 수 없는 고온에서도 우수한 기계적 성질과 강도를 유지하지만 이온결합 및 공유결합에 의해 고체내의 원자나 이온이 움직이기 어려운 구조를 하고 있으므로 응력의 완화가 일어나기 힘들다. 때문에 작은 균열에 의해서도 급격히 파괴가 발생하는 취성(brittleness)으로 인하

여 구조재료로 사용할 때 예기치 못한 파괴에 따른 피해가 발생할 수 있다.¹⁾ 그러나 세라믹스는 고온작동을 함으로써 고효율로 에너지를 절감할 수 있고 Ni, Co, Cr 등의 내열금속을 대체 함으로써 자원을 절약할 수 있어 구조재료, 내열재료, 내식재료 등으로 실용화하는데 있어서 매우 유망한 재료이다.²⁾ 이 중 알루미나 세라믹스는 알루미늄과 산소의 강한 이온결합을 가지기 때문에 산화물 중에서 경도가 가장 높은 재료이다. 또한 화학적으로 대단히 안정하여 산이나 약품에 대해 우수한 내식성을

가지고 있으며 또한 우수한 전기절연성을 가진다. 알루미늄이나 세라믹스는 이상과 같은 우수한 물성을 가지고 있고 고밀도 소결체의 제조가 용이하기 때문에 구조재료로서 가장 널리 사용할 수 있는 재료이다. 이 외에도 전기 절연성을 이용하여 전자공업용과 광학용 재료로서도 널리 사용되고 있다. 지금까지 대부분의 파괴특성은 정적 피로에 의한 것이 많았고 동적피로시험은 파괴현상이 뚜렷한 유리세라믹스를 이용하거나 습도, 온도 등의 분위기에 의해 생기는 응력부식의 영향에 대한 연구가 많았다. 일반적으로 동적피로시험에서 신뢰성 있는 결과를 얻으려면 많은 수의 시편이 필요하다는 단점이 있지만 다른 피로시험방법, 즉 정적피로법(static fatigue), 반복 피로법(cyclic fatigue) 등에 비해 상당히 적은 시간이 소요되어 피로에 영향을 미치는 여러 인자들에 대한 다양한 실험을 행할 수 있다는 장점이 있다.³⁾

E. M. Rockar 등은 생체재료로의 적용을 위해 알루미늄이나 세라믹스에 대해서 입경, 기공률, 분위기에 대한 동적 피로거동에 관한 연구를 보고 하였다.⁴⁾ Y. Yamauchi 등은 고온에서(800-1500°C) Si_3N_4 와 SiC 의 동적피로거동에 대한 연구에서 균열성장지수가 온도의 증가에 따라 감소함을 보고하였다.⁵⁾ S. R. Choi 등은 압입을 한 Al_2O_3 를 이용 동적, 정적, 반복피로시험을 행하여 각각의 피로시험에서의 균열성장지수를 구하였다.⁶⁾ K. K. Smyth 등은 결정화유리의 응력부식에 의한 동적피로거동을 파괴시간과 응력속도의 함수로 고찰하였다.⁷⁾ 또한 Lee 등^{8,11)}은 알루미늄이나 세라믹스에 대한 정적 및 반복피로에 대한 연구를 수행하고 정적피로 및 반복피로에 의한 알루미늄 세라믹스의 피로수명을 예측한 바 있다.

본 연구에서는 알루미늄이나 세라믹스에 대하여 4점 꺾임법을 이용하여 동적피로 거동을 측정하고자 crosshead speed값을 변화시키면서 이에 따르는 응력속도의 변화를 만능재료시험기로부터 읽고, 파괴거동과 피로수명을 관찰함으로써 다양한 하중속도하에서 알루미늄 세라믹스의 기계적인 동적피로(dynamic fatigue)에 의한 상온에서의 파괴거동을 관찰하여 실제 사용환경하에서 안전한 최대 사용수명의 예측을 가능하게 하고 구조재료로서의 실용화를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다. 또한 세라믹스를 구조재료로 사용할 때 발생할 수 있는 급작스런 파괴에 의한 피해를 막고 SiC 와 Si_3N_4 를 비롯한 모든 구조 세라믹스의 사용에 있어서의 재료설계 또는 피로수명을 평가하는 기준을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경

세라믹스의 피로수명은 느린균열성장(slow crack growth) 기구에 의해 지배되며, 느린균열성장속도(slow

crack growth rate) V 는 다음 Eq.(1)과 같이 나타낼 수 있다.¹²⁾

$$v = \frac{da}{dt} = AK_I^n \quad (1)$$

여기서 a 는 균열길이, t 는 시간, A 는 상수, K_I 는 응력 확대계수(stress intensity factor), 그리고 n 은 균열성장지수이다. 응력확대계수는 Eq.(2)와 같이 정의된다.

$$K_I = \sigma Y a^{1/2} \quad (2)$$

여기서 σ 는 응력(stress), Y 는 형상계수(geometrical factor)이다. Eq.(2)를 Eq.(1)에 대입하면 다음 Eq.(3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = A \sigma^n Y^n a^{n/2} \quad (3)$$

시편의 초기균열 크기 a_0 는 다음의 Eq.(4)로부터 구할 수 있다.

$$a_0 = \frac{K_{IC}^2}{S^2 Y^2} \quad (4)$$

여기서 S 는 느린균열성장장이 일어나지 않는, 즉 파괴까지 걸리는 시간이 0인 조건에서의 파괴강도(inert strength)이다.

한편, 초기균열 크기가 a_0 인 시편에 응력 σ 를 가해준 시점인 시간 0으로부터 파괴가 일어나는 순간인 시간까지 걸린 피로시간 t_f 까지 적분하면, 최종 균열 크기 a_f 가 초기균열크기 a_0 에 비하여 훨씬 크고, 균열성장지수 n 값 역시 세라믹스에 대해서는 일반적으로 2 보다 훨씬 큰 것을 고려할 때, 파괴가 일어나는 시간인 동적피로수명 t_f 에서의 파괴강도 σ_f 와 응력속도 $\dot{\sigma}$ 와의 관계를 Eq. (5)과 같이 유도할 수 있으며 양변에 대수를 취하면 Eq.(6)을 얻을 수 있다.

$$\sigma_f = \left[\frac{2(n+1)}{(n-2)AY^n a_0^{(n-2)/2}} \right]^{1/(n+1)} \cdot \dot{\sigma}^{1/(n+1)} \quad (5)$$

$$\ln \sigma_f = \frac{1}{n+1} \ln \dot{\sigma} + \frac{1}{n+1} \ln \left[\frac{2(n+1)S^{n-2}}{(n-2)AY^2 K_{IC}^{(n-2)}} \right] \quad (6)$$

위와 같이하여 동적피로실험에서 파괴에 이르기까지 걸린 동적피로수명 t_f 와 응력속도 $\dot{\sigma}$ 와의 관계를 Eq.(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln t_f = -\frac{1}{n+1} \ln \dot{\sigma} + \frac{1}{n+1} \ln \left[\frac{2(n+1)}{(n-2)AY^n a_0^{(n-2)/2}} \right] \quad (7)$$

따라서 동적피로(dynamic fatigue)에서 균열성장지

수(crack growth exponent) n 과 상수 A 는 Eq.(6)으로부터 직선의 기울기와 절편으로부터 구할 수 있다.

3. 실험 방법

본 연구에서 사용한 시편은 상용 알루미나 분말(AES-11, Sumitomo, Japan)로부터 제작하였다. 분말을 17.3 g씩 칭량하여 45 mm×50 mm의 몰드에 넣고 일축 성형한 후 1.513×10^7 kg/m²(20,000 psi)로 냉간 정수압 성형(cold isostatic pressing)한 후 1600°C에서 1시간동안 상압소결하여 35 mm×40 mm×3 mm의 판상 시편을 얻었다. 이 판상 시편을 다이아몬드 표면연마기로 연마한 다음 3 mm×4 mm×35 mm의 4각 기둥 모양이 되도록 절단하고 모서리를 가공하였다. 동적피로실험을 하기전에 먼저 알루미나 시편에 대한 밀도, 꺾임강도, 파괴인성, 영율 및 Weibull 계수를 측정하였다.

꺾임강도는 외부 지지점간 거리가 30 mm이고 내부 지지점간 거리가 10 mm가 되도록 한 4점 꺾임법으로 측정하였으며 이때 crosshead speed는 0.5 mm/min로 하였다. 이들 꺾임강도의 측정값을 Weibull plot하여 Weibull 계수를 구하였다.

파괴인성(K_{Ic})은 SENB(Single-Edge Notched Beam)법을 사용하여 Eq.(8)에 의해 구하였다.

$$K_{Ic} = \frac{3 P l_1 Y z^{3/2}}{2 b d^2} \quad (8)$$

여기서 P 는 4점꺾임강도 측정에서의 하중, l_1 은 내부 지지점과 외부 지지점사이의 거리, z 는 노치길이, b 는 시편의 너비, d 는 시편의 두께, Y 는 형상계수(geometrical factor)로 Eq.(9)와 같다.¹³⁾

$$Y = 1.99 - 2.47 \left(\frac{z}{d}\right) + 12.97 \left(\frac{z}{d}\right)^2 - 23.17 \left(\frac{z}{d}\right)^3 + 24.80 \left(\frac{z}{d}\right)^4 \quad (9)$$

영율(Young's modulus) E 의 측정에는 3점 꺾임강도 측정법을 이용하여 Eq.(10)에 의해서 구하였다.

$$E = \frac{P l^3}{48 J y} \quad (10)$$

여기서 P 는 3점 꺾임강도 측정에서의 하중, l 은 지지점사이의 거리, y 는 시편의 휘어진 길이, J 는 횡단면의 관성모멘트로서 Eq.(11)과 같다.

$$J = \frac{b d^3}{12} \quad (11)$$

동적피로실험은 외부 지지점간 거리가 30 mm이고 내

부 지지점간 거리가 10 mm인 4점 꺾임 장치를 사용하였다. 이때 crosshead speed를 0.5, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0005 mm/min로 하였으며, 노치길이를 0, 0.24, 0.5, 1.0, 1.5 mm로 하여 각 조건당 5개의 시편에 대하여 동적피로실험을 하고 그 평균치를 구하였다. 노치가공에는 두께가 0.1 mm인 다이아몬드 날을 사용하였다. 동적피로실험에 의해서 파괴된 시편의 파단면은 SEM(Scanning Electron Microscopy)으로 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

알루미나 시편에 대한 밀도, 꺾임강도, 파괴인성, 영율, Weibull 계수 등을 측정하여 Table 1에 나타내었다.

Fig. 1에는 각 시편에 대한 4점 꺾임강도값을 Weibull plot한 것을 나타내었다.¹⁴⁾ Fig. 1에서 작용응력에 대한 파괴확률의 Weibull plot로부터 구한 기울기인 Weibull 계수 m 의 값은 17.64로서 매우 큰 값이 얻어졌다. 4점 꺾임법으로 측정하였으므로 비교적 큰 값을 얻을 수 있었다고 할 수 있으나 측정장치 또한 매우 정밀도가 높은 장치였다.

Table 1. Properties of Al₂O₃ Ceramics

Property	Mean Value	Standard Deviation
4 Point Bending Strength	360 MPa	23
K_{Ic}	3.91 MPa m ^{1/2}	0.15
Young's Modulus	159 GPa	11
Density	3.91 g/cm ³	0.01

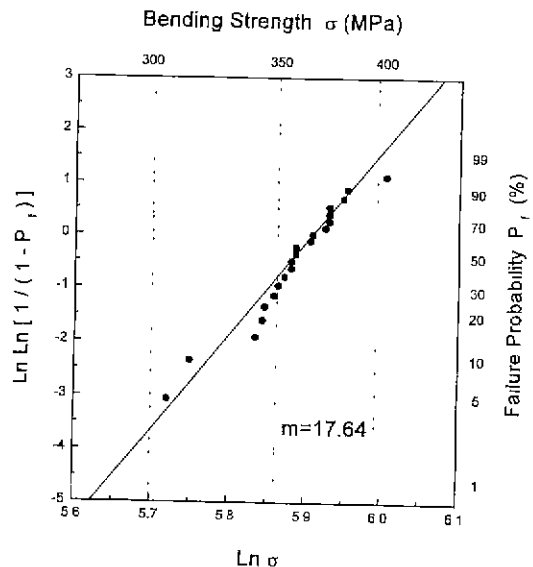


Fig. 1. Weibull plot of four point flexural strength of alumina ceramics.

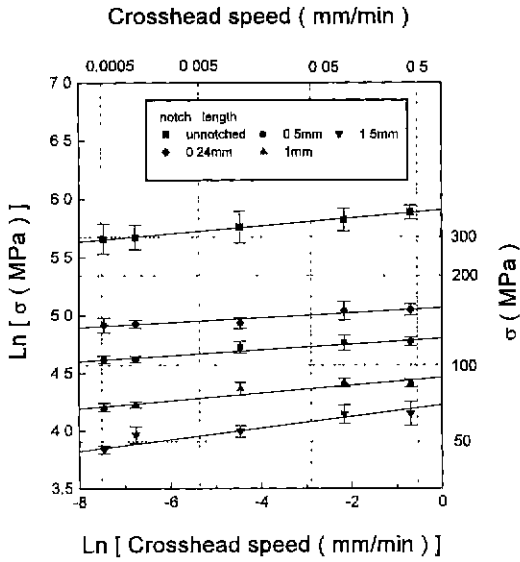


Fig. 2. Fracture strength of alumina ceramics as a function of crosshead speed.

Fig. 2에는 각 노치길이에 대한 동적피로거동을 나타내었다. 노치를 주지 않은 시편의 경우에는 crosshead speed가 감소함에 따라 하중시간이 길어져 재료의 강도가 저하되는 동적피로거동을 보였으나 시편내부의 상태 즉, 최대균열크기, 균열분포, 내부결함 등의 큰 차이에 의해서 피로파괴강도의 편차가 비교적 크게 나타났다. 이에 반하여 노치(notch) 길이가 0.24 mm에서부터 1.0 mm 까지는 전형적인 동적피로 거동을 보이고 있으며 노치의 크기가 증가함에 따라 강도값은 감소하고 있으나 초기균열의 길이가 각 노치의 크기로 일정하게 고정되어 있어서 피로파괴강도의 편차가 노치를 주지 않은 시편에 비하여 비교적 작은 것을 Fig. 2에서 알 수 있다. 그러나 노치길이가 1.5 mm인 시편의 경우에는 전형적인 동적피로거동을 보이고 있으나 시편의 두께가 4 mm에 대하여 초기균열의 크기에 해당하는 노치길이가 37.5%나 되는 큰 값을 가지므로 강도의 편차가 비교적 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이와같이 crosshead speed를 변수로하여 피로거동을 관찰한 것은 본 연구에서는 4점꺾임법을 사용하였으므로 3점꺾임법과는 달리 crosshead speed가 변형률속도(strain rate)와는 다르기 때문에 일반적으로 사용되는 변형률속도 대신에 본 연구에서는 crosshead speed를 매개변수로하여 시편의 파괴강도 및 피로수명을 관찰하였다.

Fig. 3에는 각 노치길이에 대한 동적피로수명(dynamic fatigue lifetime)을 나타내었다. 노치길이가 각각 0, 0.24, 0.5, 1.0, 1.5 mm인 시편의 모든 경우에 있어서 crosshead speed가 감소함에 따라 시편의 동적피로수명

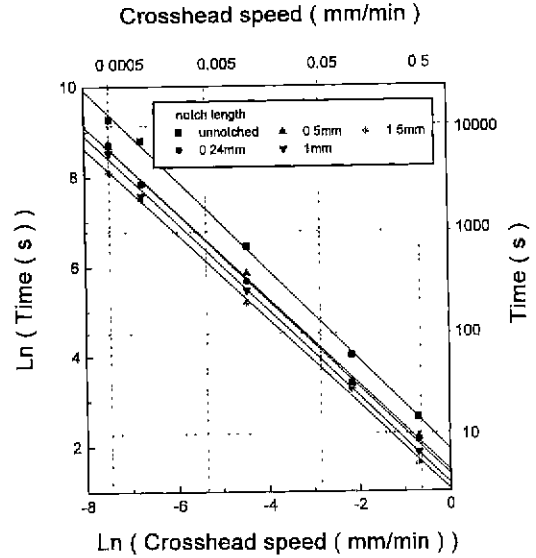


Fig. 3. Dynamic fatigue lifetime of alumina ceramics as a function of crosshead speed.

이 증가함을 보여주고 있다. 이 값은 동적 하중하에서 재료를 사용함에 있어서 재료의 수명을 예측하는데 중요한 자료가 될 것이다.

Fig. 4에는 응력속도(stress rate)에 대한 피로파괴강도를 나타내었다. 여기서 응력속도는 파괴하중을 시간으로 나눈값의 평균치이다. 4점 꺾임법을 사용하였으므로 crosshead speed로부터 응력속도를 환산하기가 용이하지 않으므로, 각각의 crosshead speed에서 시편의 파

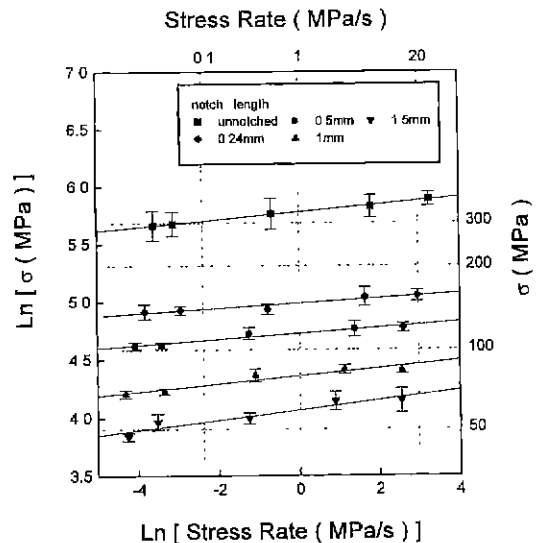


Fig. 4. Fracture strength of alumina ceramics as a function of stress rate.

Table 2. The Variation of Constants n and A According to Notch Length z

Notch length z (mm)	Crack growth exponent n	Constant A
0.24	46.24	1.97×10^{-42}
0.5	38.76	8.75×10^{-28}
1	28.35	1.31×10^{-21}
1.5	19.01	9.37×10^{-16}

피강도를 파괴되기까지 걸린 시간으로 나눈 값을 응력 속도로 하였다. 이렇게하여 얻은 Fig. 4에 나타낸 직선의 기울기와 절편으로부터 균열성장지수 n과 상수 A를 구하여 Table 2에 나타내었다. 또한 노치를 준 시편에 대하여 노치의 길이에 대한 균열성장지수값 n과 재료상수 A 값을 노치길이에 대하여 plot하여 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 이때 최소화방법에 의하여 균열성장지수 n과 상수 A 값을 노치길이 z의 함수로서 각각 Eq.(12)와 Eq.(13)으로 나타내었다.

$$\ln n = -0.465 \ln z + 3.246 \quad (12)$$

$$\ln A = 20.494 \ln z - 45.712 \quad (13)$$

여기서, 균열성장지수 n과 상수 A는 일반적으로 알려진 것과 같이 재료상수이면서도 또한 노치길이와는 Eq.(12) 및 Eq.(13)으로 나타낸 바와 같이 함수적인 관계를 가지는 것을 알 수 있다. 상수 n과 A는 재료 및 균열

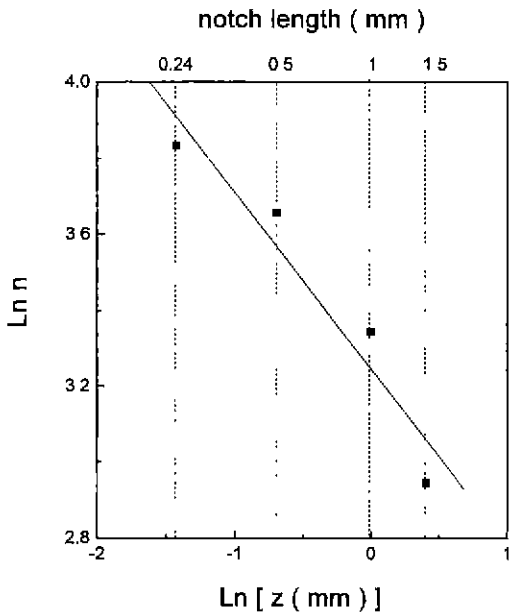


Fig. 5. Crack growth exponent n as a function of notch length z.

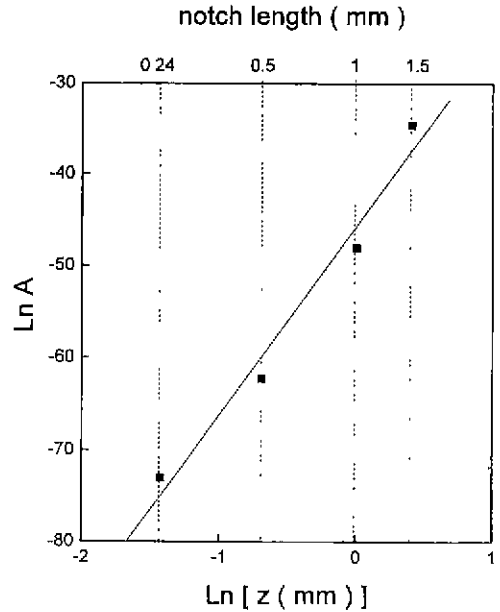


Fig. 6. Constant A as a function of notch length z.

의 모양과 실험조건에 따라 달라지는 값으로 알려져 있으나 아직 노치의 길이와의 관계에 대해서는 연구된 바가 없다. 노치를 주지 않은 시편에 대해서는 Eq.(4)로부터 명목상의 초기균열(nominal initial crack)값을 0.032 mm로 구할 수 있으나 이 명목상의 초기균열의 크기는 실제의 각 노치값들과는 아직 연관시킬 수는 없다. 이것은 노치를 주지 않은 경우의 실제의 균열에 작용하는 응

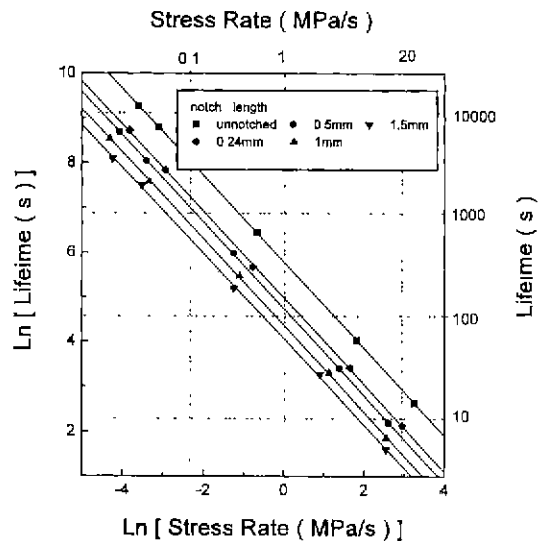
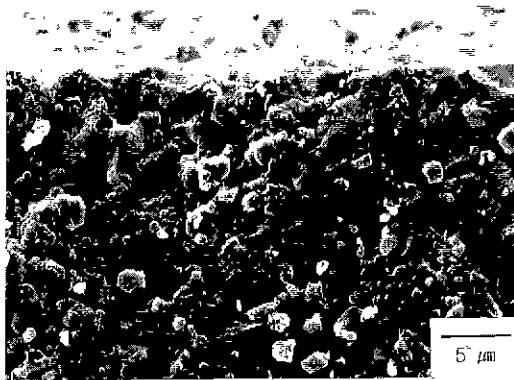


Fig. 7. Dynamic fatigue lifetime of alumina ceramics as a function of stress rate.

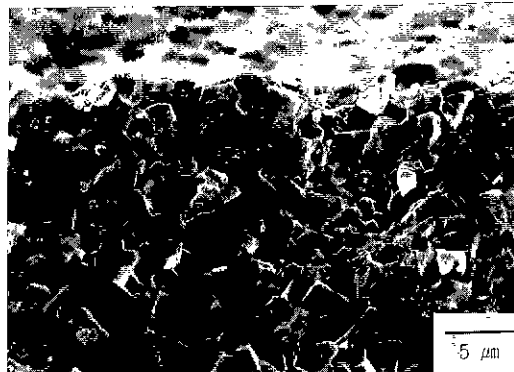
력집중의 크기와 노치에 대한 응력집중의 크기 사이의 관계를 각각 균열선단과 노치선단에 대한 곡률반경의 관계로써 연관지어야 하는 문제가 해결되어야 할 것으로 생각된다.

Fig. 7에는 각 노치길이에 대한 동적피로수명(dynamic fatigue lifetime)을 나타내었다. 노치길이가 각각 0, 0.24, 0.5, 1.0, 1.5 mm인 시편의 모든 경우에 있어서 응력속도가 감소함에 따라 시편의 동적피로수명이 증가함을 보여주고 있다. 이 값은 동적하중하에서 변동하중하에서 재료를 사용함에 있어서 재료의 수명을 예측하는데 중요한 자료가 될 것이다.

Fig. 8에는 동적피로시험에 의하여 파괴된 시편의 파단면에 대한 SEM 사진을 나타내었다. Fig. 8은 노치길이를 1 mm로 한 시편에 대하여 피로에 의한 파단면을 보여주는 것으로서 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 변형응력이



(a) notch length : 1 mm
strain rate : 0.5 mm/min



(b) notch length : 1 mm
strain rate : 0.0005 mm/min

Fig. 8. SEM photographs of the fracture surfaces of 1 mm notched alumina specimens fractured by dynamic fatigue test with the strain rate of (a) 0.5 and (b) 0.0005 mm/min.

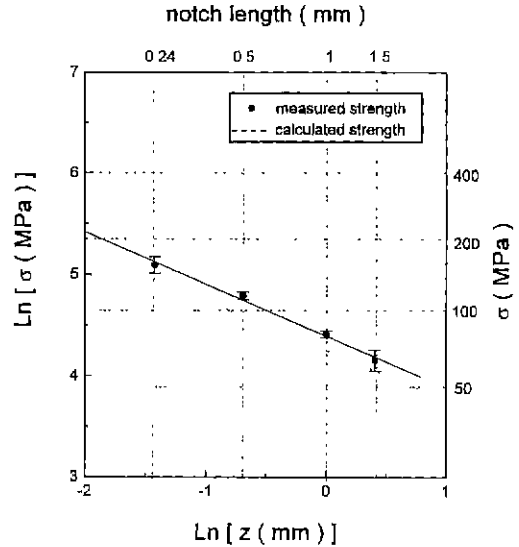


Fig. 9. The measured four point flexural strength of notched alumina specimens compared with the strength theoretically calculated from the notch length z , using the equation $K_{Ic} = Y \sigma z^{1/2}$.

가장 빠른 0.5 mm/min와 가장 느린 0.0005 mm/min의 경우에 대하여 각각 동적피로실험을 한 것을 나타내고 있다. Fig. 8(a)가 입계파괴를 보여주는데 비하여 Fig. 8(b)는 입내파괴를 보여주고 있다. Fig. 8(a)에 비하여 Fig. 8(b)는 느린 변형속도에 의하여 비교적 오랜 시간 동안 동적피로를 받은 시편의 경우를 보여주고 있으며 동적피로를 비교적 오랜 시간 동안 받은 쪽이 입내파괴 현상을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 변형속도가 느린 쪽이 입내파괴의 양상을 나타내고 있는 이유에 대하여는 앞으로 더욱 밝혀야 할 것이다.

Fig. 9에는 알루미늄 시편의 4점 꺾임강도의 값을 각 시편의 노치길이에 대하여 plot하고, 또한 노치길이 z 를 균열의 길이로하여 Eq.(2)에서 응력확대계수가 임계값이 되는 경우의 식인 $K_{Ic} = Y \sigma \sqrt{z}$ 로부터 파괴강도를 계산하여 함께 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 노치길이를 균열의 크기로 할 경우에 대한 이론강도의 값과 4점 꺾임강도의 측정값이 비교적 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

각각 0, 0.24, 0.5, 1.0, 1.5 mm 길이의 노치를 준 알루미늄 시편을 상온에서 0.0005~0.5 mm/min의 cross-head speed 하에서 4점 꺾임강도 측정장치를 사용하여 동적피로실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동적피로실험을 하기 전에 먼저 사용한 알루미늄

세라믹스에 대한 4점 꺾임강도, 파괴인성, 영율을 측정하여 각각 360 MPa, 3.91 MPa.m^{1/2}, 159 GPa를 얻었으며, Weibull plot하여 17.64의 Weibull 계수값을 얻었다.

2. 노치를 준 시편은 노치를 주지 않은 시편에 비하여 피로파괴강도값이 보다 작은 편차를 나타내었다.

3. 균열성장지수 n과 상수 A는 노치길이의 함수로 나타낼 수 있었다.

4. 시편의 파단면은 crosshead speed의 변화에 따라서 다른 파괴양상을 보였다.

5. 노치길이를 균열의 길이로 하여 이론적으로 계산한 시편의 파괴강도는 4점꺾임 강도의 측정값과 잘 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 한국과학기술원 재료계면공학 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며 이에 감사드리는 바입니다.

REFERENCES

1. 조정목, 박병학, 백성기, "세라믹 : 파괴특성의 측정," *요업재료의 과학과 기술*, Vol.4, No.1, 2 49-58 (1989)
2. 이홍립, "엔지니어링 세라믹스," pp.1-7, 반도출판사, 1990.
3. Y. Hibino, S. Sakaguchi and Y. Tajima, "Crack Growth in Silica Glass under Dynamic Loading," *J. Am. Ceram. Soc.*, **67**(1) 64-70 (1984).
4. E. M. Rockar and B. J. Pletka, "Fracture Mechanics of Alumina in a Simulated Biological Environment," pp.725-735 in *Fracture Mechanics of Ceramics*, Vol.4 Ed. by R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman, F. F. Lange Plenum Press, New York, 1974.
5. Y. Yamauchi, S. Sakai, M. Ito, T. Ohji, W. Kanematsu and S. Ito, "Dynamic Fatigue Behavior of Ceramics at Elevated Temperatures," *日本セラミックス協會學術論文誌* 98(3) 250-256 (1990).
6. S. R. Choi, "Dynamic, static and cyclic fatigue of alumina with indentation-induced flaws," *J. Mater. Sci. Lett.* **14** 1286-1288 (1995).
7. K. K. Smyth and M. B. Magida, "Dynamic Fatigue of a Machinable Glass-Ceramic," *J. Am. Ceram. Soc.*, **66**(7) 500-505 (1983)
8. H. L. Lee, S. E. Park and B. S. Hahn, "Modelling of Cyclic Fatigue Stress for Life Prediction of Structural Ceramics," *J. Mater. Sci.*, **30**, 2521-2525 (1995).
9. S. E. Park, B. S. Hahn and H. L. Lee, "Static and Cyclic Fatigue Behaviour in Alumina Ceramics," *J. Mater. Sci. Lett.*, **14**, 1715-1717 (1996).
10. S. E. Park, B. S. Hahn and H. L. Lee, "Prediction of Cyclic Fatigue Life in Ceramics," *J. Mater. Sci. Lett.*, **15**, 662-663 (1996).
11. S. E. Park, B. S. Hahn and H. L. Lee, "Direct Determination of Crack Growth Exponent and Weibull Modulus from Strength-Probability-Time and Time-Probability-Strength Diagrams," *J. Mater. Sci. Lett.*, **15**, 1197-1199 (1996).
12. S. M. Wiederhorn, "Subcritical Crack Growth in Ceramics," pp.613-646 in *Fracture Mechanics of Ceramics*, Vol.2. Ed. by R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman, F. F. Lange, Plenum Press, New York, 1974
13. R. F. Pabst, "Determination of KIC-factors with Diamond-saw-cut in Ceramic Materials," pp 555-565 in *Fracture Mechanics of Ceramics*, Vol.2. Ed. by R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman, F. F. Lange, Plenum Press, New York, 1973.
14. D. W. Richerson, "Modern Ceramic Engineering," pp. 316-320, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel, 1982.