

## 반복 동적하중에 의한 알루미나 세라믹스의 피로거동

이규형 · 박성은 · 이홍림

연세대학교, 세라믹공학과

(1998년 3월 25일 접수)

### Fatigue Behavior of Alumina Ceramics under the Repeated Dynamic Loading

Kyu Hyoung Lee, Sung Eun Park and Hong Lim Lee

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University

(Received March 25, 1998)

#### 요 약

알루미나 세라믹스의 동적피로 시험을 4점 격임법에 의해 상온에서 수행하였으며 노치를 주지 않은 시편과 0.5 mm의 노치를 준 시편에 대하여 down speed제어를 통한 동적피로강도를 구하여  $n$ 값을 계산하였고 동적피로수명을 측정하였다. 또한 down speed를 각각 0.001, 0.0005 mm/min의 속도로 하여 노치를 주지 않은 경우와 0.5 mm의 노치를 준 경우에 대하여 동적하중을 평균 inert strength의 0-105%까지 인가한 후의 재료의 잔류강도를 측정하였고, 0.5 mm의 노치를 준 경우에 대하여 하중 0의 상태에서부터 본래강도(inert strength)의 평균값의 95%까지 동적하중을 가하는 것을 반복한 후의 재료의 잔류강도를 측정하였다. 상수 A는 초기균열길이가 비슷한 경우 하중형태나 down speed에 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며 이론적으로 계산한 강도값들은 실험에서 측정한 값들과 잘 일치하였다.

#### ABSTRACT

The dynamic fatigue behavior of alumina ceramics was observed at room temperature using four-point bending method. Dynamic fatigue fracture strength was observed as functions of down speed and notch length. The crack growth exponent of the specimens was calculated from the fracture strength and lifetime in dynamic fatigue test. After loading the stresses in the range of 0% to 105% compared with the average inert strength, the value of residual fracture strength was measured for unnotched and 0.5 mm notched specimens at the 0.001 and 0.0005 mm/min down speed, respectively. After the 95% stress of the average inert strength was applied repeatedly, the value of residual fracture strength was measured for 0.5 mm notched specimens at the 0.001 and 0.0005 mm/min down speed, respectively. The material constant A was found to be almost the same and not to depend on the loading mode or the down speed for unnotched and notched specimen. The value of fracture strength with time calculated from the constants  $n$  and A was in good agreement with the measured value.

**Key words :** Dynamic fatigue, Crack growth exponent, Stress rate, Inert strength

#### 1. 서 론

세라믹스는 일반적으로 인성이 낮아 파괴가 급격히 일어나는 취성파괴현상을 보여준다. 따라서 세라믹스내의 균열의 생성과 성장의 해석을 통한 균열전파의 제어와 관련된 파괴역학적 고찰은 구조세라믹스의 응용을 위하여 선결되어야할 과제이다.

지금까지 대부분의 세라믹스 파괴특성에 관한 파괴역학적 검토는 균열성장이론이 잘 적용되는 유리를 이용한

정적 또는 반복피로에 의한 것이 많았다.<sup>1,2)</sup> 그러나 동적 피로시험은 많은 수의 시편이 필요하다는 단점은 있지만 다른 피로시험방법에 비해 매우 적은 시간이 소요되므로 피로에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 인자들에 대한 다양한 실험을 행할 수 있다는 장점이 있다.<sup>3)</sup> 그럼에도 불구하고 지금까지 반복적인 동적하중을 가하여 재료의 피로거동을 관찰한 연구결과는 거의 없으며, Park 등에 의해 알루미나 세라믹스에 대한 정적, 반복피로수명에 대한 연구에서 어떠한 임계 인가하중량까지는 재료의 강도

저하가 거의 발생하지 않고, 그 임계값 이상에서 재료의 잔류강도가 급격히 저하됨이 보고되었다.<sup>4,5)</sup>

본 연구에서는 알루미늄 세라믹스에 대하여 4점 격입법을 이용하여 서로 다른 down speed에서의 피로강도를 측정함으로써 동적피로 거동을 관찰하였다, 또한 단순한 동적하중과 반복적인 동적하중에 의해 재료의 잔류강도가 어떠한 영향을 받는지를 측정하여 그 거동을 관찰하고 실제 사용을 위하여 안전한 재료의 수명을 예측하고 재료상수를 구하는 보다 정확한 방법을 제시하고자한다.

### 2. 이론적 배경

세라믹스의 파괴는 대부분 느린균열성장(slow crack growth)기구에 의해 지배되며, 느린균열성장속도(slow crack growth rate)  $V$ 는 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>6)</sup>

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

여기서  $K_I$ 는 응력확대계수(stress intensity factor)이고  $a$ 는 균열길이,  $A$ 는 상수, 그리고  $n$ 은 균열성장지수(crack growth exponent)이다.

등가정적응력(equivalent static stress)  $\sigma_{es}$ 는 Eq. (2)와 같다.<sup>7)</sup>

$$\sigma_{es} = \left[ t^{-1} \int_0^t [\sigma(t)]^n dt \right]^{1/n} \quad (2)$$

한편, 응력확대계수  $K_I$ 는 다음의 Eq. (3)과 같이 정의된다.

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a} \quad (3)$$

여기서  $\sigma$ 는 인가응력(applied stress) 그리고  $Y$ 는 형상계수(geometrical factor)로 식 (13)과 같으며 이 값은 균열의 모양과 크기 그리고 하중 system에 의존한다.<sup>8)</sup>

파괴강도  $S$ 는 Eq. (3)로부터 유도되어 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{a}} \quad (4)$$

Eq. (4)를 시간  $t$ 로 미분하면 Eq. (5)와 같이 나타난다.

$$\frac{dS}{dt} = - \left( \frac{K_{IC}}{2Y} \right) a^{-3/2} \frac{da}{dt} = - \left( \frac{Y^2}{2K_{IC}^2} \right) S^3 V \quad (5)$$

Eq. (3)와 Eq. (4)를 Eq. (1)에 대입하면 Eq. (6)를 얻

을 수 있다.

$$V = AK_{IC}^n (\sigma/S)^n \quad (6)$$

Eq. (6)를 Eq. (5)에 대입하면 Eq. (7)을 얻을 수 있다.

$$\frac{dS}{dt} = - (AY^2 K_{IC}^{n-2}/2) (\sigma/S)^n S^3 \quad (7)$$

Eq. (7)을 시간 0부터  $t$ 까지 적분하면 Eq. (8)를 얻을 수 있다.

$$S_t = \left[ S_1^{n-2} - \frac{(n-2)AY^2 K_{IC}^{n-2}}{2} \int_0^t [\sigma(t)]^n dt \right]^{1/(n-2)} \quad (8)$$

여기서  $S_1$ 는 본래강도이고,  $S_t$ 는 하중을 시간  $t$ 까지 가한 후의 시편의 잔류강도이다.

Eq. (2)의 등가정적응력,  $\sigma_{es}$ 가 Eq. (8)의 경우에 가해지면 Eq. (9)을 얻을 수 있다.<sup>7)</sup>

$$S_t = \left[ S_1^{n-2} - \frac{(n-2)AY^2 K_{IC}^{n-2}}{2} \sigma_{es}^n \cdot t \right]^{1/(n-2)} \quad (9)$$

세라믹스의 경우 파괴거동은 응력-변형 곡선에서 직선적으로 나타나므로 동적피로의 경우에 응력속도(stress rate)  $\dot{\sigma} = \frac{\sigma}{t}$ 로 일정하며 따라서 동적인 하중형태에서 등가정적응력은 다음 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>9)</sup>

$$\sigma_{es} = \left( \frac{1}{n+1} \right)^{\frac{1}{n}} \sigma t \quad (10)$$

따라서 동적하중을 1회 가한 경우에 피로에 의해 파괴되기 전까지의 잔류강도의 변화를 나타내는 식은 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>9)</sup>

$$S_t = \left[ S_1^{n-2} - \frac{(n-2)AY^2 K_{IC}^{n-2} \sigma^n}{2(n+1)} t^{n+1} \right]^{1/(n-2)} \quad (11)$$

또한 반복적으로 동적하중을 가한 경우에 등가정적응력은 다음 Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{es} = \left( \frac{1}{n+1} \right)^{\frac{1}{n}} \sigma_{max} \quad (12)$$

따라서 반복적으로 동적하중을 가한 경우에 피로에 의해 파괴되기 전까지의 잔류강도의 변화를 나타내는 식은 Eq. (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_t = \left[ S_1^{n-2} - \frac{(n-2)AY^2 K_{IC}^{n-2} \sigma_{max}^n}{2(n+1)} t \right]^{1/(n-2)} \quad (13)$$

Eq. (11)과 Eq. (13)으로부터 시간  $t$  동안 하중을 가한 후의 재료의 잔류강도  $S_t$ 의 하중시간에 따른 이론적인 변화를 알 수 있다.

3. 실험 방법

시편은 상용알루미나 분말(AES-11, Sumitomo, Japan)로 제작하였다. 분말을 17.3 g씩 칭량하여 45 mm × 50 mm의 몰드에 넣고 일축가압성형한 후 136.1 MPa의 압력으로 냉간 정수압 성형(CIP, cold isostatic pressing)하고 1600°C에서 1시간 동안 상압소결하여 35 mm × 40 mm × 3 mm의 판형 시편을 얻었다. 이 판형 시편을 정밀가공연삭기로 연마하고 3 mm × 4 mm × 35 mm의 4각 기둥모양이 되도록 절단한 후 절단으로 인한 모서리 부분의 흠을 제거하기 위해 모서리를 연마하였다.

동적피로시험은 외부 지지점간 거리를 30 mm로 하고 내부 지지점간 거리를 10 mm로 한 4점적임방법을 이용하였고 이때 down speed는 0.5, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0005 mm/min로 하였으며 노치길이는 0, 0.5 mm로 하였다. 노치가공에는 두께가 0.1 mm인 다이아몬드 날을 사용하였다. 피로시험에는 만능 재료 시험기(H10K-C, Housefield Test Equipment, UK)를 이용하였다.

노치를 주지 않은 경우와 0.5 mm의 노치를 준 경우에 대해 동적피로에 의해 파괴되기 전까지의 잔류강도의 변화를 고찰하기 위하여 본래강도의 50, 90, 95, 100, 105% 하중까지 0.001과 0.0005 mm/min의 down speed로 동적피로시험을 행한 후 시편의 잔류강도를 측정하였다. 0.5 mm의 노치를 준 경우에 대해 동적하중을 Fig. 1과 같은 형태로 반복적으로 가하여 파괴되기 전까지의 잔류강도의 변화를 고찰하였다. 0.001과 0.0005 mm/min의 down speed로 동적하중을 본래강도의 95%

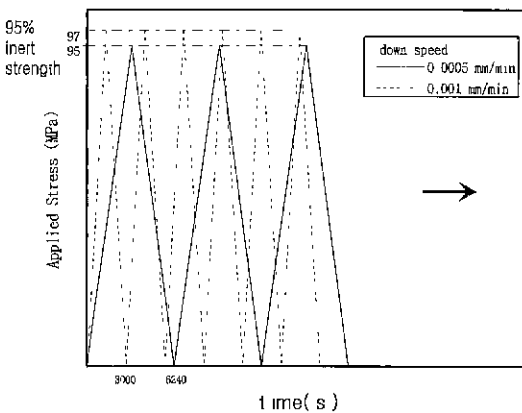


Fig. 1. Schematic diagram of repeated dynamic loading.

까지 가하고 다시 하중을 0으로 낮추는 것을 반복하여 파괴될 때까지의 반복회수를 측정하고 파괴회수까지를 세 구간으로 나누어 각 구간이 끝나는 회수까지 하중을 가한 후 시편의 잔류강도를 측정하였다. 본 실험에서의 응력속도(stress rate)는 down speed가 0.001 mm/min의 경우에는 0.065 MPa/s, 0.0005 mm/min의 경우에는 0.03 MPa/s로 얻어졌다.

4. 결과 및 고찰

알루미나 시편에 대한 밀도, 적입강도, 파괴인성, 영률 등의 기본물성을 측정하여 Table 1에 나타내었다. Fig. 2에는 각각 노치를 주지 않은 경우와 0.5 mm의 노치를 준 경우의 동적피로시험 결과를 나타내었다. 두 경우 모두 down speed가 느려지면 재료가 하중을 받는 시간이 길어져 강도값의 저하를 보이는 동적피로거동을 보였으며 0.5 mm의 노치를 준 경우에는 노치가 균일한 초기균열로 작용하여 강도값의 편차가 작았다. Fig. 2의 각 직

Table 1. Properties of Alumina Ceramics

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

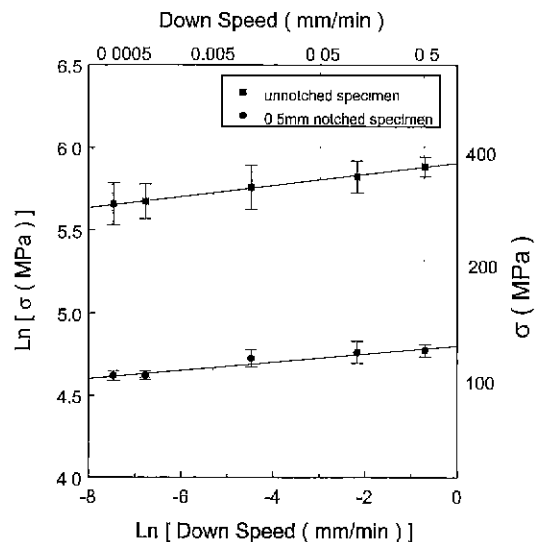


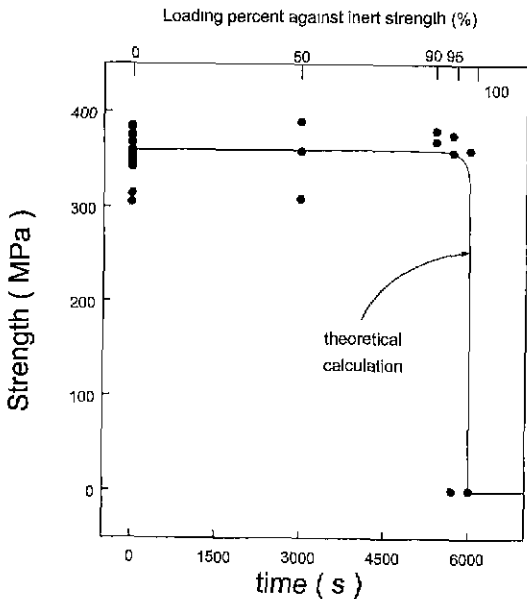
Fig. 2. Fracture strength of alumina ceramics as a function of down speed.

**Table 2.** The Variation of Constant n and A According to Notch Length

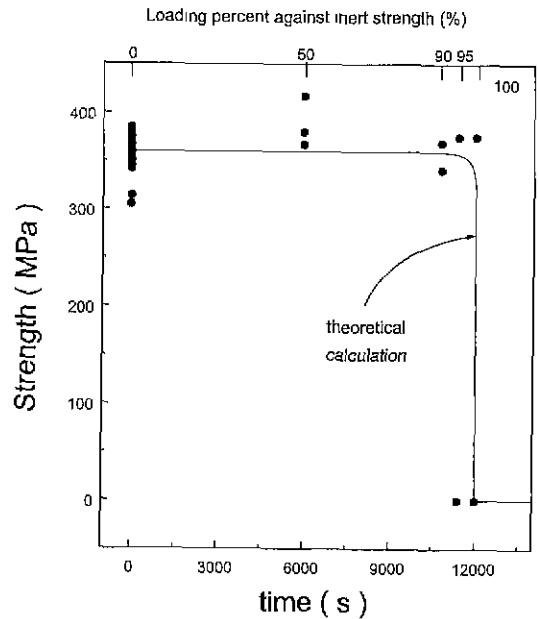
Notch Length(mm)		n	A	
			Down speed 0.001 mm/min	Down speed 0.0005 mm/min
0 (Unnotched)	Single Cycle	29.81	$1.73 \times 10^{-202}$	$1.25 \times 10^{-202}$
	Repeated		$1.92 \times 10^{-260}$	$6.78 \times 10^{-260}$
0.5	Single Cycle	38.76	$2.15 \times 10^{-259}$	$5.38 \times 10^{-259}$
	Repeated		$1.92 \times 10^{-260}$	$6.78 \times 10^{-260}$

선을 응력속도(stress rate)와 피로강도에 대해 다시 도시하고 각 점들을 연결한 직선을 구하면 이 직선의 기울기가  $1/(n+1)$ 이 되므로 균열성장지수 n을 구할 수 있다.<sup>10)</sup> 이러한 방법으로 구한 n값을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 3와 Fig. 4에는 노치를 주지 않은 시편에 각각 0.001 mm/min와 0.0005 mm/min의 down speed로 본래강도의 50, 90, 95, 100%까지 동적하중을 1회 가하고 하중을 제거한 후에 측정된 잔류강도를 나타내었다. 노치를 주지 않아 두 경우 모두 시편의 표면과 내부의 상태가 서로 크게 다를 수 있어서 평균 본래강도의 95%까지 하중을 가한 경우에도 파괴가 일어난 시편들이 존재하였고 100%의 하중에서도 파괴가 일어나지 않은 시편들도 존재하였다. 따라서 노치를 주지 않은 경우에는 시편마다 강도의 편차가 커서 하중%의 제어가 어려워 시



**Fig. 3.** Fracture strength of the unnotched alumina ceramics as a function of time under the single cycle dynamic loading with 0-100% inert strength at the down speed of 0.001 mm/min.



**Fig. 4.** Fracture strength of the unnotched alumina ceramics as a function of time under the single cycle dynamic loading with 0-100% inert strength at the down speed of 0.0005 mm/min.

편에 초기균열로 작용할 수 있게 0.5 mm의 노치를 도입하여 강도의 편차를 줄여 하중%의 제어에 정확성을 기하였다. Fig 3와 Fig. 4에서의 실선은 시편의 잔류강도를 인가하중시간에 따라 Eq. (11)을 사용하여 계산한 결과를 plot한 곡선이다. 이 곡선에서 알 수 있듯이 동적하중을 가하면 어떠한 임계 인가하중량까지는 재료의 강도저하가 거의 발생하지 않았고 그 임계값 이상에서 재료의 강도가 급격히 저하됨을 알 수 있었고 Fig 3와 Fig. 4에서의 각 점들에 해당하는 실험값들도 이론적으로 계산한 잔류강도곡선과 잘 일치하였다.

Fig. 5와 Fig. 6에는 0.5 mm의 노치를 준 시편에 각각 0.001 mm/min와 0.0005 mm/min의 down speed로 동적하중을 본래강도의 50, 95, 100, 105%까지 1회 가하고 하중을 제거한 후에 측정된 잔류강도를 나타내었다.

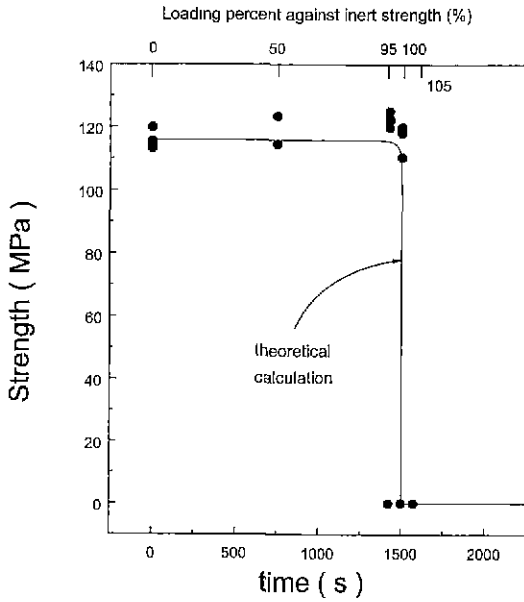


Fig. 5. Fracture strength of the 0.5 mm notched alumina ceramics as a function of time under the single cycle dynamic loading with 0-105% inert strength at the down speed of 0.001 mm/min.

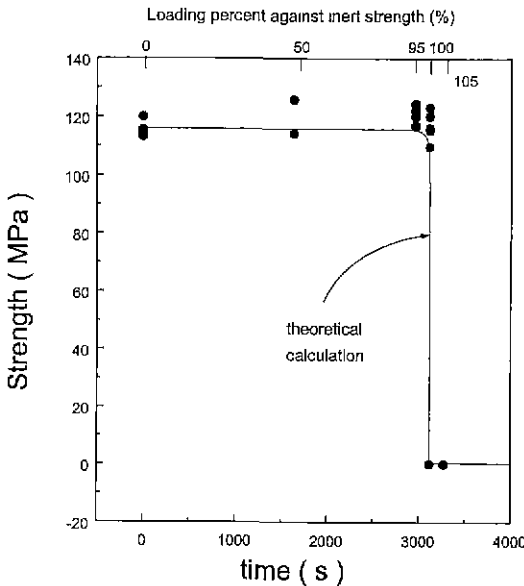


Fig. 6. Fracture strength of the 0.5 mm notched alumina ceramics as a function of time under the single cycle dynamic loading with 0-105% inert strength at the down speed of 0.0005 mm/min.

노치가 시편의 초기균열에 해당하므로 강도의 편차가 작아 95%의 하중을 가했을 때 파괴가 일어난 시편은 거

요업학회지

의 없었고 105%의 하중을 가했을 때는 모든 시편이 파괴되었으며 100%의 하중을 가한 경우에는 파괴된 시편과 파괴되지 않은 시편이 비슷한 비율로 함께 존재하였다. Fig. 5와 Fig. 6에서의 실선은 시편의 잔류강도를 인가하중시간에 따라 Eq. (11)을 사용하여 도시한 곡선이다. 이 경우 역시 이론적으로 어떠한 임계 인가하중량까지는 재료의 강도저하가 거의 발생하지 않았고, 그 임계값 이상에서 재료의 강도가 급격히 저하됨을 알 수 있었으며 그 결과는 실험값과도 잘 일치하였다.

Fig. 1에는 실험에서 적용한 반복적인 동적하중의 형태를 나타내었다. Fig. 7과 Fig. 8에는 0.5 mm의 노치를 준 시편에 하중을 가하지 않은 하중0의 상태에서부터 시작하여 평균 본래강도의 95%까지 각각 0.001 mm/min와 0.0005 mm/min의 down speed로 동적하중을 반복적으로 가하여 시편이 파괴될 때까지의 반복한 회수를 측정하고 파괴될 때까지 반복한 회수를 3 가지로 나누어 각각의 반복회수까지 하중을 가한 후에 측정된 잔류강도를 나타내었다. down speed가 0.001 mm/min인 경우 동적하중을 82회 반복한 후에 시편이 파괴되었으며 40회와 70회의 반복을 가한 후의 시편의 잔류강도를 측정하였다. down speed가 0.0005 mm/min인 경우에는 58회 반복한 후에 시편이 파괴되었고 30회와 50회의 반복을 가한 후의 시편의 잔류강도를 측정하였다. Fig.

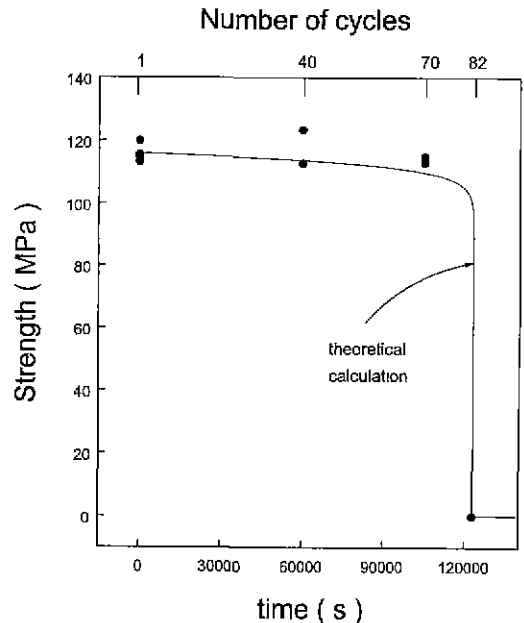


Fig. 7. Fracture strength of the 0.5 mm notched alumina ceramics as a function of time under the repeated dynamic loading with 95% inert strength at the down speed of 0.001 mm/min.

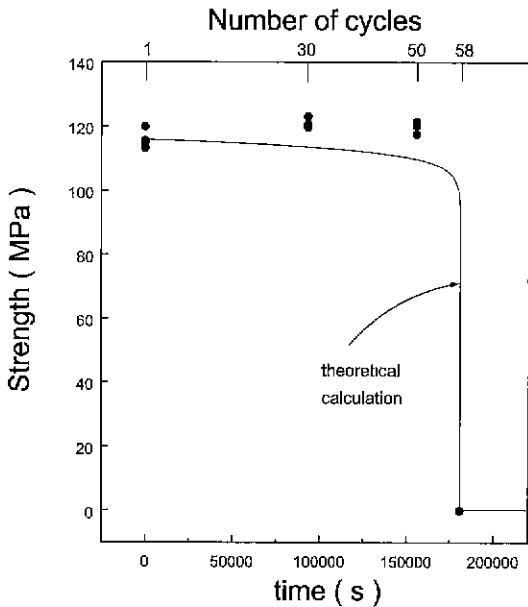


Fig. 8. Fracture strength of the 0.5 mm notched alumina ceramics as a function of time under the repeated dynamic loading with 95% inert strength at the down speed of 0.0005 mm/min.

7과 Fig. 8에서의 실선은 시편의 잔류강도를 인가하중시간에 따라 Eq. (13)으로 plot한 곡선이다. Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 이론적인 시편의 잔류강도는 1회의 동적하중을 가한 경우와는 약간 달리 강도의 저하가 급격히 일어나는 임계하중량의 이전부근에서 완만한 강도의 저하를 보이는 것으로 나타났으나 실험적으로 그 차이를 관찰하기는 어려웠다. 이 경우에도 역시 측정된 잔류강도값은 이론값과 잘 일치하였다. 이러한 실험에서 얻은 실험치들을 Eq. (11)과 Eq. (13)에 대입하여 계산한 상수 A값을 Table 2에 나타내었다. 일반적으로 재료 상수 A는 동일한 초기균열길이를 갖는 동일한 형상의 재료에 대해서는 같은 값을 가지는 것으로 알려져 있으며 본 실험을 통해 계산한 값들도 노치를 주지 않은 시편과 노치를 준 시편의 초기균열크기가 비슷하므로(노치길이가 초기균열 길이로 작용) A값들이 하중형태나 down speed에 관계없이 각각 서로 비슷하였다. 이러한 결과로 볼 때 본 연구에서 도입한 이론식을 이용하면 실제 잔류강도를 예측하는데 있어서 상당히 정확한 정보를 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

1. 동적피로시험에서 알루미늄 시편의 피로강도는 어떠한 임계하중량까지는 강도의 저하가 일어나지 않았고

그 임계값 이상에서 강도의 저하가 급격히 발생하였다.

2. 0.001 mm/min의 down speed로 하중을 가하였을 때 상수 A의 값은 노치를 주지 않은 시편의 경우에는  $1.73 \times 10^{-202}$ 이었고, 0.5 mm의 노치를 준 시편의 경우에는  $2.15 \times 10^{-259}$ 이었고, 0.0005 mm/min의 down speed로 하중을 가하였을 때 상수 A의 값은 노치를 주지 않은 경우에는  $1.25 \times 10^{-202}$ 이었고, 0.5 mm의 노치를 준 경우에는  $5.38 \times 10^{-259}$ 이었다.

3. 0.001 mm/min의 down speed로 반복하중을 가하였을 때 상수 A의 값은  $1.92 \times 10^{-260}$ 이었고, 0.0005 mm/min의 down speed로 반복하중을 가하였을 때는  $6.78 \times 10^{-260}$ 이었다.

4. 상수 A는 하중형태와 down speed에 관계없이 초기균열과 시편의 형상에 영향을 받는 것으로 나타났다.

5. 상수 n과 A로부터 시간에 따라 계산한 이론적인 파괴강도 값들은 측정된 강도 값들과 잘 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국과학기술원 재료제면공학 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며 이에 감사드리는 바입니다.

REFERENCES

1. J. E. Ritter, JR. and C. L. Sherburne, "Dynamic and Static Fatigue of Silicate Glasses," *J. Am. Ceram. Soc.* **54**(12), 601-605 (1971).
2. Ramesh Thiruvengadaswamy and Ronald O. Scattergood, "Indentation-Cycling Tests on Soda-Line Glass," *J. Am. Ceram. Soc.* **76**(6), 1611-1614 (1993).
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. 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).
5. S. E. Park, B. S. Hahn and H. L. Lee, "Prediction of Static Fatigue Life in Ceramics," *J. Mater. Sci. Lett.* **16**, 1352-1353 (1997).
6. S. M. Wiederhorn, "Subcritical Crack Growth in Ceramics," pp.613-646 in *Fracture Mechanics of Ceramics*, **2**, Ed. by R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman, F F Lange, Plenum Press, New York, 1974.
7. H. L. Lee, S. E. Park and B. S. Hahn, "Stress Modeling for Cyclic Fatigue Life prediction of Alumina Ceramics," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **31**(10), 1141-1146 (1994).
8. 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.
9. J. Mcnck, "Strength and Fracture of Glass and Ceramics," pp.340-352. Elsevier, Amsterdam, 1992.
10. E. M. Rocker and B. J. Pletka, "Fracture Mechanics of Alumina in a Simulated Biological Environment," pp.725-735 in Fracture Mechanics of Ceramics, **4**. Ed by R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman, F. F. Lange, Plenum Press. New York, 1977.