

알루미나 세라믹스의 열피로 수명 예측

정우찬 · 한봉석 · 이홍립
연세대학교 세라믹공학과
(1999년 5월 15일 접수)

Prediction of Thermal Fatigue Life of Alumina Ceramics

Woo Chan Jung, Bong Seok Hahn and Hong Lim Lee

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749 Korea
(Received May 15, 1999)

초 록

느린 균열 성장 기구 이론을 이용하여 알루미나 세라믹스의 열피로 거동을 분석하고, 열피로 수명과 임계 열충격 온도차를 계산할 수 있는 이론 식을 유도하였다. 이론 식은 균열성장지수 n 의 함수로 나타내어진다. 반복 열충격을 이용한 열피로 실험 결과, 열충격 온도차 175, 187, 200°C에서 반복 열피로 수명은 각각 180, 35, 7회로 나타났으며 균열 성장 지수 n 은 24.32로 나타났다. 이론식을 이용한 열피로 수명 계산 결과는 각각의 온도차에서 172, 35, 7회로 계산되었으며 이는 실제 열피로 실험 결과와 잘 일치하였다. 유도한 열피로 수명 예측 이론식을 단일 열충격에 대하여 적용한 결과, 218°C의 임계 열충격 온도차를 계산할 수 있었으며 이것은 실제 실험 결과의 임계 열충격 온도차 225°C와 잘 일치한다.

ABSTRACT

Theoretical equation to calculate thermal fatigue life was derived, in which slow crack growth theory was adopted. The equation is a function of crack growth exponent n . Cyclic thermal fatigue tests were performed at temperature differences of 175, 187 and 200°C, respectively. At each temperature difference, critical thermal fatigue life cycles of the alumina ceramics were 180, 37 and 7 cycles. And theoretical thermal fatigue life cycles were calculated as 172, 35 and 7 cycles at the same temperature difference conditions. Therefore, thermal fatigue behavior of alumina ceramics can be represented by derived equation. Also, theoretical single cycle critical thermal shock temperature difference can be calculated by this equation and the result was consistent with the experimental result well.

Key words : Critical temperature difference, Thermal fatigue, Slow crack growth, Lifetime prediction

1. 서 론

세라믹스는 급격한 온도 변화에 취약하며 일정한 열충격 온도차 이상에서 급격한 강도 저하를 일으키는 임계 열충격 온도차를 나타낸다.¹⁾ 그러나, 세라믹스는 임계 열충격 온도차 이하의 열충격 온도차에 있어서도, 반복되는 열충격에 의하여 급격한 강도 저하를 일으키는 열피로 거동을 나타낸다.²⁾ 이러한 열피로 거동은 반복되는 응력 하중에 의한 기계적 피로와 마찬가지로 세라믹스의 중요한 피로 현상중의 하나이다. 그러나, 정확한 인가응력의 정량화가 가능한 기계적 피로 현상과는 달리 열충격과 열피로는 재료에 가해지는 열응력의 정량화가 매우 어려우므로 피로 거동의 관찰이나 수명 예측에 대한 보고가 매우 제한되어 있다.

세라믹스의 기계적인 하중에 의한 정적 및 반복피로

에 대한 수명 예측에 대해서는 이미 여러 연구자들에 의한 연구가 진행되어 왔으며 임계 하중에 의한 강도 저하 현상이나 피로의 수명 예측에 대하여 여러 가지 연구 결과들이 발표되고 있다.³⁻⁶⁾ 그러나, 열충격으로 인한 열피로 현상에 대해서는 아직까지 정량적인 연구 결과에 대한 보고가 부족하며 그것은, 정확한 응력을 알 수 있는 기계적 피로의 경우와는 달리, 열충격의 피로 원인인 열응력을 정량적으로 정의하거나 측정하기 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 열충격 실험을 통하여 알루미나 세라믹스의 열피로 현상을 관찰하고 이를 주기적인 응력 변화를 갖는 반복 피로로 가정하고 열피로를 받은 시편의 잔류 강도 변화 값을 이용하여 단일 열충격의 임계 열충격 온도차와 반복 열충격의 열피로 수명을 표현할 수 있는 이론식을 유도하였다.

2. 실험방법

2.1. 열피로 수명 예측의 이론적 유도

세라믹스의 파괴를 일으키는 균열의 성장은 느린 균열 성장(slow crack growth) 기구로 설명할 수 있으며 세라믹스의 느린 균열 성장 속도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.⁷⁾

$$V = \frac{da}{dt} = AK_I^n = A(Y\sigma\sqrt{a})^n \tag{1}$$

이때, σ 는 작용 응력, a 는 균열 길이, t 는 시간, A 는 물질 상수, K_I 은 응력 확대 계수, Y 는 시편의 형상 계수, n 은 균열 성장 지수(crack growth exponent)이다. 식 (1)을 응력을 가한 시점부터 파괴가 발생하는 시간 동안 적분하여 정리하면 식 (2)에 나타낸 바와 같이 인가된 응력과 파괴에 이르는 시간과의 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{2}{(n-2)AY^n a_i^{\frac{n-2}{2}}} = \sigma^n t \tag{2}$$

여기서 a_i 는 초기 균열 길이, t 는 파괴에 이르는 시간이다 식 (2)에서 열충격의 경우에 σ 는 열충격 과정에서 가해진 열응력이 되며 열응력의 크기는 열충격 온도차에 비례한다. 또한, 열충격이 반복되는 열피로의 경우에는 시간 t 에 반복 열충격 횟수 N 을 도입하여 생각할 수 있으므로 이를 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma \propto \Delta T, t \propto N, \sigma = k\Delta T, t = jN \tag{3}$$

$$\sigma^n t = k^n j \Delta T^n N \tag{4}$$

k 는 열응력에 대한 열충격 온도차의 비례상수이며 j 는 시간에 대한 반복 회수의 비례 상수이다. 또한, N 은 시편이 파괴를 일으키는 반복 열충격 횟수이다. 이들 상수 중, k 는 열충격 온도차에 의해 발생하는 열응력의 크기에 영향을 미치는 냉각 속도, 냉매의 대류 열전달 계수, 재료의 열전도도, 비열, 열팽창계수와 같은 환경 변수와 물질 상수를 통합한 상수이다. 그러므로, 정확한 k 의 값을 측정하거나 계산하는 것은 매우 어려우므로 산술적인 계산 과정을 통하여 정리하는 것이 편리하다. 식 (4)에서 물질 상수 A 와 비례 상수 k 와 j 등 세 가지 상수를 포괄적으로 나타낸 비례 상수 $B = k^n j A$ 로 정의하면 식 (2)를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{2}{(n-2)BY^n a_i^{\frac{n-2}{2}}} = \Delta T^n N \tag{5}$$

식 (5)에서 비례 상수 B 와 균열 성장 지수 n 을 제외

한 값들은 모두 실험을 통하여 측정할 수 있는 값이며 B 와 n 을 결정하면 반복 열피로에 의한 시편의 파괴 수명 N 을 계산할 수 있다.

상수 B 와 n 을 계산하기 위하여 식 (5)의 양변에 자연 로그를 취하면 식 (6)을 유도할 수 있다.

$$\ln N = -n \ln \Delta T + \ln \left[\frac{2}{(n-2)BY^n a_i^{\frac{n-2}{2}}} \right] \tag{6}$$

식 (6)을 이용하여 알고 있는 열피로 실험 데이터를 이용하여 $\ln \Delta T$ vs. $\ln N$ 의 그래프를 그리면 직선의 기울기로부터 n 을 구하고 절편으로부터 B 를 구할 수 있다. 따라서, 식 (6)을 이용하면 각각의 열충격 온도차에 따른 세라믹스의 열피로 수명을 계산할 수 있다.

지속적으로 가해진 응력은 시간에 따라 세라믹스에 존재하는 결함을 균열로 성장시키며 균열은 세라믹스의 강도를 저하시킨다. 이때 인가된 응력과 시간에 따른 시편의 잔류강도는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.³⁾

$$S_t = \left[S_i^{n-2} - \frac{(n-2)AY^2 K_{IC}^{n-2}}{2} \int_0^t [\sigma(t)]^n dt \right]^{1/(n-2)} \tag{7}$$

반복 열충격을 가하는 열피로 실험에서 시편에 가해지는 열응력은 기계적 응력과 같은 형태이므로 식 (7)의 S_t 는 반복 열충격을 시간 동안 가해 준 이후의 파괴강도이고 S_i 는 초기강도이다. 또한, σ 는 열충격 과정에서 가해지는 열응력을 나타낸다.

주기적 피로의 경우에는 식 (7)에 나타낸 바와 같이 동일한 시간 동안 $\sigma(t)$ 와 같은 정적 응력을 등가 정적 응력(equivalent static stress, σ_{es})이라고 정의하고 이를 대표 응력으로 사용할 수 있다.⁸⁾ 그러므로, 식 (7)의 시간에 따른 응력 적분항에 등가 정적 응력을 적용하여 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_t = \left[S_i^{n-2} - \frac{(n-2)AY^2 K_{IC}^{n-2}}{2} \sigma_{es}^n t \right]^{1/(n-2)} \tag{8}$$

식 (8)에서 반복 열충격에 의한 열피로의 경우에는 σ_{es} 가 열응력이 되며 반복 열충격에 의한 강도 저하를 표시하기 위해서 식 (3)에서 정의한 상수들을 도입하여 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$S_t = \left[S_i^{n-2} - \frac{(n-2)BY^2 K_{IC}^{n-2}}{2} \Delta T^n N \right]^{1/(n-2)} \tag{9}$$

식 (9)를 이용하면 주어진 열충격 온도차에 대하여 각각의 반복 열충격 횟수에 따른 시편의 잔류강도를 이론적으로 구할 수 있다.

2.2. 열충격 및 열피로 실험방법

열피로 실험에 사용한 시편은 상용 알루미나 분말(AES-11, Sumitomo, Japan)을 이용하여 4 mm×4 mm×35 mm의 크기로 제작하였다. 제작한 시편의 특성은 표준적인 알루미나 소결체의 특성을 가지며 소결 밀도는 98.2%, 4점 꺾임 강도 측정법으로 측정된 평균 강도는 355 MPa이다.

시편을 고온으로 가열하고 액체 냉매로 급냉하는 열충격 실험은 자체 제작한 열충격 실험 장치를 사용하였다. 이 장치는 시편의 냉각과 가열을 ±2°C의 작은 오차 범위 내에서 제어할 수 있으며 자동으로 단일 열충격과 반복 열충격 실험을 행할 수 있도록 제작하였다. 급냉을 위한 냉매로는 40°C의 증류수를 사용하였다. 냉매의 온도를 40°C로 유지한 것은 반복 열충격에 의한 냉매 온도의 상승을 막고 정확한 열충격 온도차를 유지하기 위한 것이다.

각 열충격 실험에서 시편의 가열 시간은 15분, 냉각 시간은 2분으로 유지하였다. 열충격을 가한 시편은 열풍 건조기를 이용하여 수분을 건조한 후 만능 재료 시험기(H10K-C, Hounsfield, U.K.)를 이용하여 4점 꺾임강도를 측정하였다. 꺾임강도 측정시 사용한 crosshead speed는 0.5 mm/min, 외부 지지점간 거리는 30 mm, 내부 지지점간 거리는 10 mm이다. 열피로 실험은 단일 열충격 실험과 같은 방법으로 정해진 가열, 냉각 과정을 정해진 횟수까지 반복하여 진행하였으며 열충격 온도차 175°C, 187°C, 200°C를 이용하여 정해진 횟수의 반복 열충격을 가한 후 시편의 4점 꺾임 강도를 관찰하여 임계 반복 열충격 횟수를 결정하였다.

느린 균열 성장(slow crack growth) 기구에 기초하여 열피로 수명 예측 식을 유도하고 열피로 실험 결과를 유도한 이론식에 적용하여 이론식의 상수를 결정하였다. 이 이론식을 이용하여 알루미나 세라믹스의 열피로 수명과 임계 열충격 온도차를 계산하고 이를 실제 실험 결과와 비교 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 임계 열피로 수명

열충격 실험 결과, 제작한 시편의 임계 열충격 온도차는 225°C로 정할 수 있었다. 단일 열충격에 의한 강도 실험 결과를 Fig 1에 나타내었다. 반복 열피로 실험에서는 각각의 열충격 온도차에서 일정한 회수를 반복하여 열충격을 가한 시편의 강도 저하를 이용하여 임계 반복 열피로 수명을 결정하였으며 임계 열충격 온도차 이하의 열충격 온도차인 175, 187, 200°C의 반복 열피로 수명은 각각 180, 35, 7회로 나타났다. 열피로 수명은 임계 열

충격 온도차의 결정 방법과 같이 급격한 강도 저하를 일으키는 반복 횟수로 결정했으며 Fig. 2에 175°C의 피로 실험 후 강도 측정 결과를 나타내었다.

열피로 실험 결과를 식 (6)에 적용하여 $\ln\Delta T$ vs. $\ln N$ 을 plot 하고 그 기울기로부터 균열 성장 지수 n 을 구하였고 절편으로부터 비례 상수 B 를 결정하였다. Fig. 3에 그 결과를 나타내었다

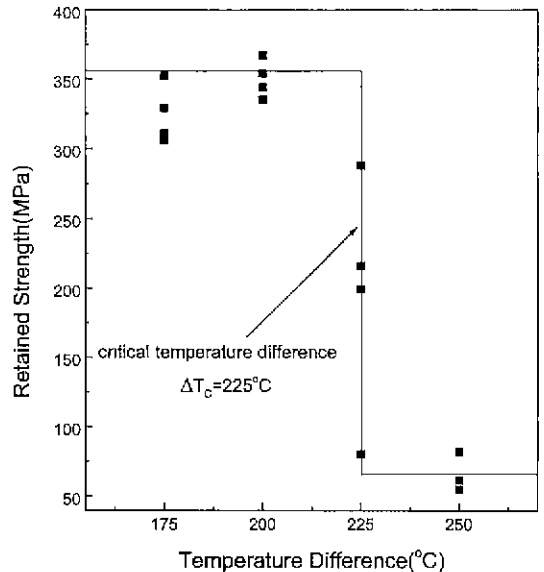


Fig. 1. Retained strength of the specimens after single cycle thermal shock test.

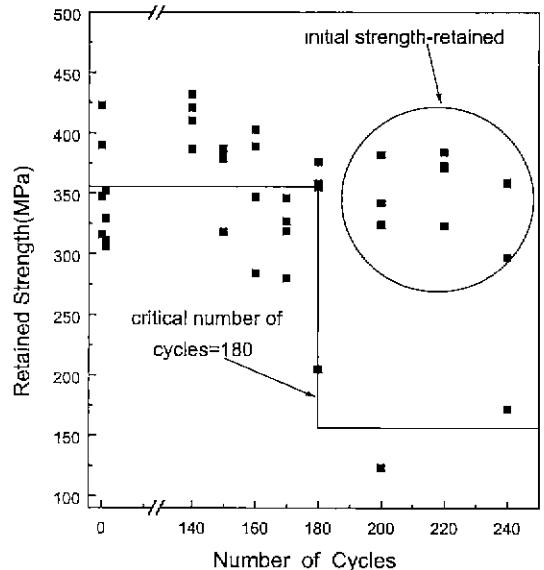


Fig. 2. Retained strength of the specimens as a function of number of cycles at $\Delta T=175^\circ\text{C}$

Fig. 3을 이용하여 구한 상수 B와 균열 성장 지수 n을 식 (9)에 적용하면 반복 열충격 횟수에 따른 시편의 이론적인 잔류 강도를 계산할 수 있다. 이때 사용한 각각의 물질 상수 값들을 Table 1에 나타내었다. 식 (9)를 이용하여 열충격 온도차가 각각 175, 187, 200°C일 때 반복 열충격 횟수에 따른 시편의 이론적인 강도 변화를 계산하고 이를 Fig. 4에 나타내었다. 계산된 이론 강도 값은 반복 열충격 횟수가 증가함에 따라 초기 강도를 유지하다가 임계 반복 열충격 횟수에서 갑자기 강도가 저하되는 거동을 보인다. 실제 반복 열충격을 이용한 알루미늄이나 세라믹스의 열피로 실험에서 시편의 잔류 강도는 0으로 감소하지 않고 항상 일정한 값을 갖는다. 이것은 시편 내부에 발생하는 압축 강도가 시편 내부로의 균열 성장을 방해하여 시편이 완전히 파괴되는 강도 0의 상태가 되는 것을 막기 때문이라고 알려져 있다.⁹⁾ 그러나, 이론적인 계산에서는 균열의 성장이 무한히 계속되는 것으로 계산되므로 최종적인 시편의 잔류 강도는 0으로 계산된다. 계산 결과에서 시편의 잔류 강도가 급격히 감소하

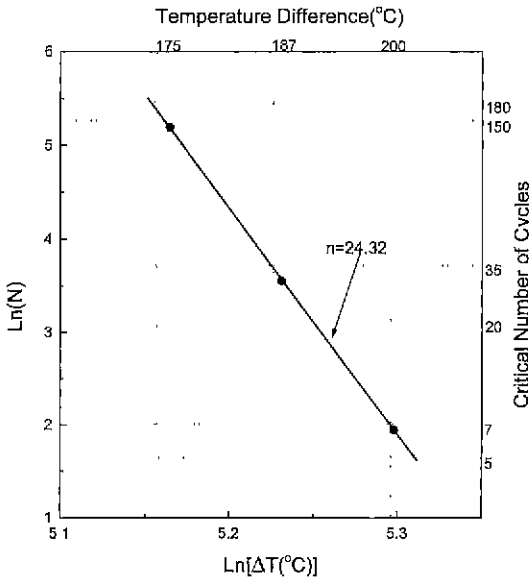


Fig. 3. Double logarithmic plots of critical number of cycles as a function of temperature difference.

Table 1. Material Constants of Alumina Specimens Used for Lifetime Prediction

K_{IC}	3 91 MPa · m ^{1/2}
B	2.21×10 ⁻¹⁵ m ^{-(n-2)/2n} °C ⁿ
Y	1 84
a _i	3.57×10 ⁻⁵ m
n	24.32

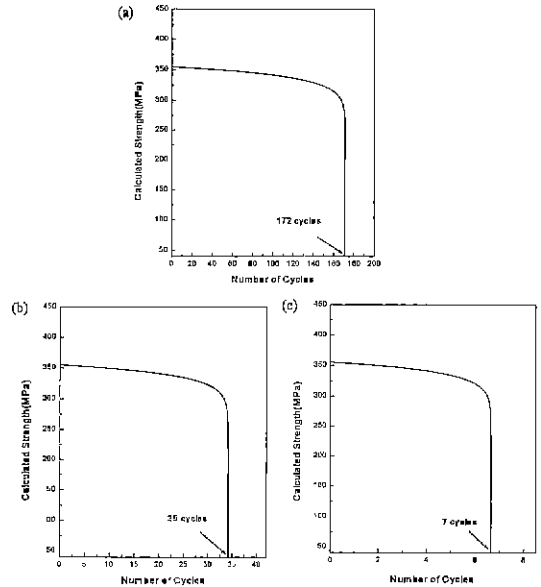


Fig. 4. Variation of the calculated strength as a function of number of cycles; (a) ΔT=175°C, (b) ΔT=187°C and (c) ΔT=200°C.

는 반복 열충격 횟수를 임계 열피로 수명이라고 할 때 열충격 온도차 175, 187, 200°C에서의 임계 열피로 수명은 각각 172, 35, 7회이다. 이 값을 실제 열피로 실험 결과와 비교해 보면 비교적 적은 오차 범위 안에서 일치한다. 그러므로, 그러므로, 식 (9)를 이용한 Fig. 4의 결과는 열충격 온도차에 따른 열응력을 정량적으로 정의하지 않고 비례 상수(B)를 도입함으로써 직접 실험하지 않은 임의의 열충격 온도차에 대하여 열피로 수명을 예측하는 것이 가능함을 나타낸다.

3.2. 임계 열충격 온도차 계산

세라믹스의 열충격 및 열피로 특성 평가에 있어서 임계 열충격 온도차는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 따라서, 임계 열충격 온도차를 수식으로 유도하려는 노력이 있었지만 기존의 연구들은 열충격 저항계수 범위에서 크게 벗어나지 못하였다.¹⁰⁻¹³⁾ 임계 열충격 온도차는 동일한 재료로 만들어진 시편들도 그 크기와 형태에 따라 달라지며 가열과 냉각 조건에 따라 상당한 차이를 보이기 때문에 임계 열충격 온도차를 열충격 저항계수 R만으로 설명하기는 어렵다. 실제로 본 실험에 사용한 알루미늄 시편의 임계 열충격 온도차를 열충격 저항계수 R에 의해 계산하면 188°C이다. 그러나, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 알루미늄 시편은 열충격 온도차가 200°C까지는 열충격 손상을 받지 않았고 열충격 온도차가 225°C일 때 열충격 손상을 받았다. 그러므로, 임계 열충격 온

도차를 엄밀하게 정의한다면 200°C와 225°C 사이의 값이 될 것이다. 이 결과는 열충격 저항계수 R에 의해 계산한 188°C와는 매우 큰 차이이다. 따라서, 열충격 저항계수 R은 임계 열충격 온도차를 정확하게 표현하지 못한다고 할 수 있다.

임계 열충격 온도차는 단일 열충격을 가했을 때 시편이 열충격 손상을 일으키는 온도차이다. 이것을 식 (9)에 적용하면 반복 열충격 횟수 N에 1을 대입했을 때 균열이 갑자기 성장하여 시편의 잔류강도 S_t 가 급격하게 저하되는($S_t \approx 0$) ΔT_c 가 임계 열충격 온도차라고 정의 할 수 있으며 식 (10)을 만족한다.

$$S_t^{n-2} = \sigma_i^{n-2} = \frac{(n-2)BY^2K_{IC}^{n-2}}{2} \cdot \Delta T_c^n \quad (10)$$

여기서 σ_i 는 열충격을 주지 않았을 때의 파괴강도이다. 식 (10)을 ΔT_c 에 대하여 정리하면 식 (11)로 유도된다.

$$\Delta T_c = \sqrt[n]{\frac{2\sigma_i^{n-2}}{(n-2)BY^2K_{IC}^{n-2}}} \quad (11)$$

식 (11)에 나타낸 바와 같이 임계 열충격 온도차는 균열 성장 지수의 함수임을 알 수 있으며 재료 상수 A에서 유도된 비례 상수(B) 항에는 임계 열충격 온도차에 미치는 시편의 크기, 시편의 형태 등의 효과가 포함되어 있다. 식 (11)을 이용하면 임계 열충격 온도차를 구할 수 있으며 217°C로 계산되었다. 이것은 열충격 저항계수를 나타낸 식 (1)에 의해 계산된 값 188°C보다 매우 정확한 값이며 200°C와 225°C 사이의 값이라는 실험 결과와도 잘 일치한다. 따라서, 본 고찰에 있어서는 임계 열충격 온도차는 비례 상수(B)를 도입하여 균열 성장 지수의 함수로 나타내는 것이 열충격 저항 계수 R로 표현하는 것보다 더욱 정확하다고 할 수 있다.

4. 결 론

느린 균열 성장(slow crack growth) 기구를 적용하여 반복 열피로에 의해 발생하는 시편의 잔류강도를 나타낸 이론식을 유도하여 알루미늄 시편의 열피로 수명과 임계 열충격 온도차를 계산하였다.

1. 열피로 실험 결과, 열충격에 의한 알루미늄 세라믹스의 균열 성장 지수는 24.32이었다. 열충격 온도차가 175, 187, 200°C일 때 임계 열피로 수명은 각각 180, 35, 7회였으며 이론식에 의한 계산 결과는 172, 35, 7회로 나타났다.

2. 임계 열충격 온도차를 균열 성장 지수의 함수로 나타낼 수 있었으며 이론적으로 구한 임계 열충격 온도차

는 217°C로 계산되었으며 이것은 열충격 저항계수 R에 의해 계산된 값보다 정확한 값이다.

3. 알루미늄 세라믹스의 열피로 거동은 느린 균열 성장 기구를 따르며 느린 균열 성장 기구에 의하여 비례 상수(B)를 도입하였다. 1, 2번의 결론은 비례 상수(B)를 도입하여 얻었다. 식 (9)를 이용하면 실제 실험하지 않은 열충격 온도차에 대해서도 피로 수명을 계산할 수 있으며 실제 재료의 비례 상수(B)를 정의하면 다른 세라믹 재료에 대하여도 열피로 수명, 임계 열충격 온도차 등을 계산할 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. W. D. Kingery, "Factors Affecting Thermal Shock Resistance of Ceramic Materials," *J. Am. Ceram. Soc.*, **38**(1), 3-15 (1955).
2. W. C. Jung, B. S. Hahn and H. L. Lee "Thermal Fatigue Behavior of Alumina Ceramics" *J. Kor. Ceram. Soc.*, **35**(10), 1094-1100 (1998).
3. 박성운, "알루미늄 세라믹스의 반복 피로거동" 석사학위논문, 연세대학교, 1995.
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. 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.
8. J. Mencik "Rationalized Load and Lifetime of Brittle Materials," *J. Am. Ceram. Soc.*, c-37-c-40 (1984).
9. 한봉석, "Al₂O₃ 세라믹스의 열충격 파괴거동과 열응력 해석" 박사학위논문, 연세대학교, 1998.
10. J. H. Schneibel, S. M. Sabol, J. Morrison, E. Ludeman and C. A. Carmichael, "Cyclic Thermal Shock Resistance of Several Advanced Ceramics and Ceramic Composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, **81**(7), 1888-1892 (1998).
11. T. Andersson and D. J. Rowcliffe "Indentation Thermal Shock Test for Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **79**(6), 1509-1514 (1996).
12. T. Sornakumar, V. E. Annamalai, R. Krishnamurthy and C. V. Gokularathnam, "Thermal Shock Resistance of Composites of Alumina and Partially Stabilized Zirconia," *J. Mater. Sci. Lett.*, **12**, 1253-1254 (1993).
13. A. Kaiser, R. Va en and D. St ver "Thermal-Shock Behavior of Si₃N₄/SiC Composites," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **16**(7), 715-719 (1996).