

# 세라믹스에 있어서 균열성장과 파괴

李 弘 林

연세대학교 요업공학과 교수



● 1946년 4월 20일생  
● 구조용 세라믹스의 합성 및 열적·기계적 성질 등에 많은 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

세라믹스(ceramics)란 옛날부터 도자기, 유리, 내화물, 시멘트 등이 주체가 되는 제품 또는 그 재료를 일컬어 왔으며 그것을 이루고 있는 주성분은 **산화염(SiO<sub>2</sub> 화합물, 즉 silicate)**이었다. 이를 세라믹스는 금속에 비교하면 부서지기 쉬운 성질, 즉 취성(脆性, brittleness) 때문에 그 사용범위가 한정되어 왔다. 그러나 오늘날 급진하는 공업기술과 더불어 세라믹스의 취성이 많이 개선되었다. 특히 세라믹스의 원료분말의 합성기술, 조성개발, 공정기술, 소성기술, 가공기술, 평가 및 비파괴시험기술, 설계 및 응용기술 등에 있어서 연구개발이 국가적 차원에서 전세계적으로 진행되고 있으며 종래의 전통세라믹스(conventional ceramics)에서 부터 기계기구산업, 항공우주산업, 스포츠·레저산업, 전기·전자산업, 에너지관련산업, 의료산업, 정보산업, 금속공업, 화학공업 등 그 사용범위가 매우 넓어지고 있다. 따라서 세라믹스가 속명적으로 가지고 있는 이 취성을 극복하지 않으면 안 되는 것이 오늘날 세라미스트(ceramist)들이 직면한 가장 중요한 과제중의 하나이다. 이를 위해서는 세라믹스에 있어서 균열의 성장과 파괴현상을 논하는 것은 중요한 일이 아닐 수 없다.

세라믹스가 금속에 비해서 부서지기 쉬운 것은 근본적으로 화학결합이 다르기 때문인 것

이다. 자유전자로 결합되어 있는 금속재료와는 달리 세라믹스는 方向性이 있는 매우 강한 이온결합 및 공유결합으로 되어 있기 때문이다. 또한 세라믹스는 용점이 높고, 화학적으로 안정하며, 경도가 커서 마찰과 마모에 강하며, 크립(creep)에 강하고, 탄성율(Young's modulus)이 크며, 고온강도가 큰 등의 장점을 가지고 있는데 이것 역시 화학결합에 기인하고 있다.

## 2. 세라믹스에 있어서 균열성장

금속의 경우에는 반복하중 하에서 균열이 성장하는데 대해서 세라믹스의 경우에는 일정한 하중하에서도 수분의 영향으로 화학적인 반응에 의해서 균열이 성장하게 된다. 이들 현상을 그림 1에 나타내었다.

세라믹스의 파괴는 재료의 표면 또는 내부에 존재하는 미소균열(microcrack)의 성장에 의해서 발생한다. 이 때 파괴는 Griffith의 파괴조건인 식 (1)에 따라서 일어난다.

$$\sigma_f = \frac{1}{Y} \left( \frac{2E\gamma_i}{C} \right)^{1/2} = \frac{1}{Y} \frac{K_{IC}}{C^{1/2}} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_f$ 는 파괴강도,  $Y$ 는 형상계수,  $E$ 는 탄성율,  $\gamma_i$ 는 파괴에너지,  $C$ 는 균열의 크기,  $K_{IC}$ 는 임계응력 확대계수 즉 파괴인성이다.

세라믹스의 강도는 이와같이 식 (1)의 Griffith의 파괴조건에 의해서 결정되지만 세라믹스중의 균열이 Griffith의 파괴응력  $\sigma_f$ 이하

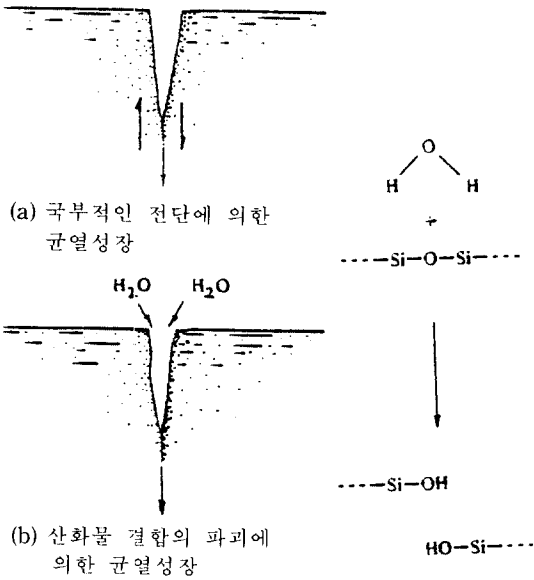


그림 1 (a) 금속과 (b) 세라믹스에 있어서 파괴의 비교

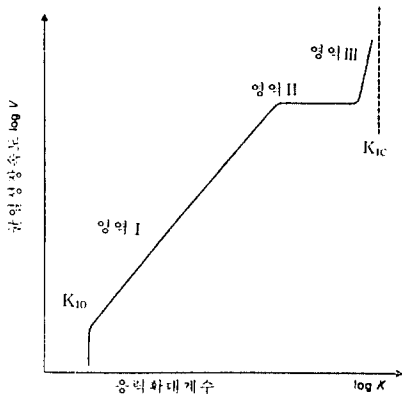


그림 2 세라믹스에 있어서 균열성장속도와 응력확대계수의 관계

의 응력하에서도 성장하는 것이 잘 알려져 있다. 이와같은 현상을 느린 균열성장(slow crack growth)이라고 한다. 세라믹스중의 균열성장속도  $V$ 와 응력확대계수  $K_I$ 의 관계를 그림 2에 나타내었다. 응력부식한계  $K_{I0}$ 로부터 임계응력확대계수  $K_{IC}$ 에 이르기까지 그 사이에 3개의 영역이 존재한다.  $K_I < K_{I0}$ 인 영역에서는 응력에 의해서 균열을 성장시키려는 힘

과 균열선단부의 표면에너지의 균형에 의한 억제력이 상쇄되어서 균열이 성장하지 않는다.

I의 영역에서는 균열성장이 일어나며 이 영역에서는 균열선단에 있어서 수증기에 의한 산화물의 결합(M—O, M: 금속, O: 산소)이 끊어지는 응력부식속도가 균열성장속도  $V$ 를 율속한다. 이 영역에서는 식 (2)가 성립하며 재료의 수명예측 등에 중요한 기초가 된다.

$$V = AK_I^N \quad (2)$$

여기서  $A$ 와  $N$ 은 상수이다.

II의 영역에서는 수분이 균열선단으로 향해서 확산하는 확산속도가 균열성장속도  $V$ 를 율속하는 단계이므로 균열성장속도는 응력확대계수에 상관없이 일정하다.

III의 영역에서는 부식반응에 재료의 內的 요소가 더해져서 파괴가 비교적 빠르게 진행된다. 이 영역이 존재하는 이유에 대해서는 여러가지의 해석이 제안되고 있으나 재료의 불균질로 인하여 생겨나는 파괴인성값  $K_{IC}$ 의 편차가 이 영역에 있어서의 균열성장기구에 기여하는 중요한 하나의 원인이라고 생각되고 있다.

마지막으로 응력확대계수값  $K_I$ 이 임계값 즉 파괴인성값  $K_{IC}$ 에 도달하게 되면 식 (1)의 파괴조건이 성립하여 급격한 파괴가 일어난다.

또한 고온에 있어서 세라믹스의 균열성장은 점성유동과 확산에 의해서 일어난다고 알려져 있다. 임계에 존재하는 유리상(glass phase)은 특히 점성유동을 일으키는 원인이 된다. 이때 이미 존재하는 균열이 성장하는 경우와 공공의 생성(cavitation) 및 그 결합에 의해서 균열의 생성과 성장이 일어난다<sup>(1)</sup>.

균열의 성장과 더불어 응력확대계수값이 증가하는 현상이 세라믹스에 있어서 많이 관찰되고 있다<sup>(2~8)</sup>. 이와같이 균열의 성장과 더불어 응력확대계수값이 증가하는 R-curve 거동의 원인은 균열선단의 process zone의 확대로 인해서 발생하는 균열의 분枝와 새로운 균열의 생성 때문이라고 알려져 있다<sup>(3~5)</sup>. 어떤 보고에 의하면 이것은 균열표면에 있어서의 접촉력(adhesion forces) 때문이라고 한다<sup>(7)</sup>.

### 3. 세라믹스의 수명평가

#### 3.1 정적피로(Static Fatigue)에 의한 수명 평가

일정한 하중을 세라믹스에 걸어 줄 경우에 대한 최저파괴수명(minimum time to failure)  $t_f$ 는 보증시험(proof test)을 할 경우, 앞의 식(1)과 (2)를 사용하여 다음의 식(3)을 유도할 수 있다<sup>(9)</sup>.

$$t_f = \frac{2(K_{IC} \sigma_a / \sigma_p)^{2-N}}{\sigma_a^2 A Y^2 (N-2)} \quad (3)$$

여기서  $\sigma_a$ 는 작용응력(service stress),  $\sigma_p$ 는 보증응력(proof stress)이다.

한 가지 보기로서 절연용 자기(porcelain)에 대한 수명평가를 그림 3에 나타내었다. 즉,  $(\sigma_a / \sigma_p)$ 를 매개변수로 하고  $\sigma_a$ 에 대한  $t_f$ 의 관계를 나타낸 것이다. 작용응력이 10MPa일 때, 보증시험에서 작용응력의 2.5배에 해당하는 25MPa의 보증응력에 견디어 낸다면 최소한 40년 이상의 파괴수명을 가지게 된다.

또 Weibull통계를 써서 작용응력  $\sigma_a$ 하에서의 파괴수명  $t_f$ , 그리고 그 때의 파괴확률(probability of failure)  $P_f$ 의 관계는 다음의

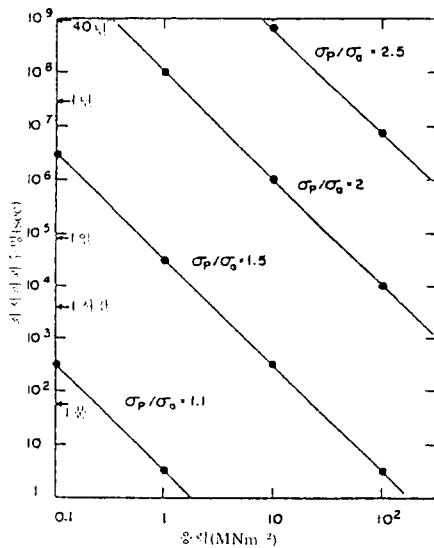


그림 3 세라믹자기에 대한 보증시험 결과

식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \ln \frac{1}{1-P_f} = m \ln \sigma_a + (m/N) \ln t_f + C \quad (4)$$

여기서  $m$ 은 Weibull계수이고  $N$ 은 식(2)에서의  $N$ 과 같으며  $C$ 는 상수이다. 따라서 식(3)과 식(4)를 함께 나타내면 일정하중하에서 세라믹스의 파괴수명과 파괴확률을 한꺼번에 예측할 수 있다.

#### 3.2 반복피로(Cyclic Fatigue)에 의한 수명평가

세라믹스에 최대응력  $\sigma_m$ 로써 반복피로를 주어서 파괴가 일어날 때까지의 사이클 수  $n$ 을 그 재료의 반복피로수명이라고 하며 식(5)로 나타낸다<sup>(10)</sup>.

$$\ln \ln \frac{1}{1-P_f} = (m/N) \ln n + m \ln \sigma_m + C \quad (5)$$

여기서  $P_f$ 는 파괴확률(probability of failure),  $C$ 는 상수이며  $N$ 과  $m$ 은 앞의 식(4)에서 정의된 바와 같다. 최대응력을  $\sigma_m$ 으로 하여 반복피로를 줄 경우 수명  $n$ 과 파괴확률  $P_f$ 의 관계를 예측할 수 있다. 실제로 질화규소( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )를 고온프레스(hot-pressing)한 세라믹스에 대하여 반복피로에 의한 수명을 예측하고 실험한 결과를 그림 4에 나타내었다. 실험결과와 계산에 의한 예측치가 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

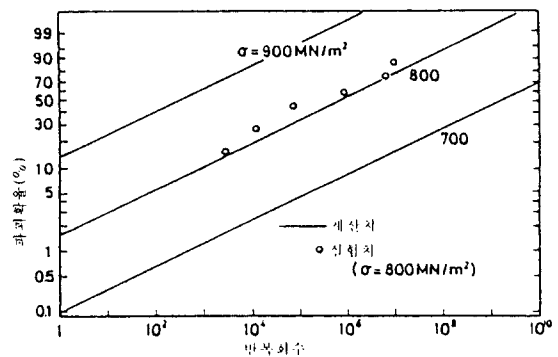


그림 4 고온프레스한 질화규소세라믹스에 있어서 반복응력하에서의 S-P-N선도

식 (5)에 재질이 균질하고 균열의 크기가 같은 재료에 대해서는 파괴확률이 같다는 원리를 적용시키면 식 (6)을 도출할 수 있다.

$$(n_2/n_1) = (\sigma_{m1}/\sigma_{m2})^N \quad (6)$$

식 (6)으로부터 어떤 시험편에 매우 큰 최대응력  $\sigma_{m1}$ 을 가하여 짧은 반복피로수명  $n_1$ 을 구하면 그 보다 작은 최대응력  $\sigma_{m2}$ 하에서의 긴 반복피로수명  $n_2$ 를 예측할 수 있다. 실제로  $N$ 이 20인 세라믹스에 1000MPa의 최대응력으로 반복피로를 주었을 때 수명이 10사이클이었다면 실제로 100MPa의 최대응력으로 반복피로를 주면 식 (6)에 의해서 계산하면

$$(n_2/10) = (1000/100)^{20} = 10^{20}$$

$$\therefore n_2 = 10^{21} \text{ 사이클}$$

반복피로수명이  $10^{21}$ 사이클이 됨을 예측할 수 있다.

#### 4. 세라믹스에 있어서 열충격 파괴

세라믹스에 있어서의 열충격 파괴저항  $R'$ 은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다<sup>(11)</sup>.

$$R' = \frac{\sigma_f(1-\mu)k}{E\alpha} \quad (7)$$

여기서  $\sigma_f$ 는 파괴강도,  $\mu$ 는 프와송비,  $k$ 는 열전도도,  $E$ 는 탄성률,  $\alpha$ 는 열팽창계수이다. 이 식 (7)에서 알 수 있는 바와 같이 세라믹스는 파괴강도와 열전도도가 금속에 비해서 일반적으로 작고, 탄성률은 비교적 크기 때문에 열충격파괴저항  $R'$ 이 작다. 따라서 열충격에 약한 것이 세라믹스의 단점이 되고 있다.

세라믹스에 있어서 열충격에 의한 균열의 발생과 전파에 관해서는 Hasselman에 의해서 제안된 열파괴통일이론으로 잘 설명된다<sup>(12)</sup>. 시료내부에  $N$ 개의 Griffith균열이 반지름  $\ell$ 인 원판상의 균열로서 분포하고 있으며 서로 인접하고 있는 균열 사이에 상호작용은 없다고 가정한다. 이와 같은 계에서 단위부피당 총에너지  $W$ 는 응력에 의한 탄성에너지와 균열의 표면에너지의 합으로서 식 (8)로써 나타낼 수 있다<sup>(12)</sup>.

$$W = \frac{3(\alpha\Delta T)^2 E}{2(1-2\mu)} \left[ 1 + \frac{16(1-\mu^2)N\ell^3}{9(1-2\mu)} \right] \ell^{-1/2} + 2\pi N\ell^2 \gamma \quad (8)$$

여기서  $\Delta T$ 는 온도차이고,  $\gamma$ 는 단위면적당의 표면에너지이며 나머지 기호는 앞에서 정의된 바와 같다. 이때 균열을 성장시키는데 필요한 임계온도차  $\Delta T_c$ 는 Griffith의 이론에 따라 에너지평형조건인  $dW/d\ell=0$ 에 의해서 식 (8)을 미분함으로써 다음 식 (9)를 도출해낼 수 있다.

$$\Delta T_c = \left[ \frac{\pi\gamma(1-2\mu)^2}{2E\alpha^2(1-\mu^2)} \right]^{1/2} \times \left[ 1 + \frac{16(1-\mu^2)N\ell^3}{9(1-2\mu)} \right] \ell^{-1/2} \quad (9)$$

여기서  $\Delta T_c$ 는 균열이 성장하기 시작하는 임계온도차이다. 식 (9)에  $\mu=0.25$ 라고 두고 정리하여  $\Delta T_c$ 와 균열크기  $\ell$  사이의 관계를 그림으로 나타내면 그림 5 중의 실선과 같다. 일정한  $N$ 값에 대하여 실선으로 나타낸 곡선에 있어서 임의의  $\Delta T_c$ 값과 만나는 점이 두 개 (점 A와 점 B) 존재한다. 이 두 개의 점에 대응하는 균열의 길이는 각각  $\ell_a$ 와  $\ell_b$ 이다. 그리고  $\ell_a < \ell < \ell_b$ 의 영역에서는 균열이 불안정하여 균열성장이 일어나는 영역이고  $\ell < \ell_a$ 와  $\ell > \ell_b$ 의 영역에서는 균열이 안정하여 균열성장이 일어나지 않는다. 처음 균열의 크기가  $\ell_a$ 인 균열이  $\Delta T_c$ 의 온도차에 의해서 성장하기 시작하여 불안정한 영역( $\ell_a < \ell < \ell_b$ )으로 들어가면 가속적으로 균열성장이 진행되어 動的파괴를 일으킨다. 동적으로 성장하는 균열  $\ell_b$ 에 도달하여도 여전히 운동에너지를 가지고 있으므로 균열은 더욱 성장한다. 균열성장이 멈추게 되는 점 C에 있어서 최종반지름( $\ell_f$ )는 식(8)에서  $W(\ell_a) = W(\ell_f)$ 라고 놓고 구하며 이렇게 하여 얻은 것을 그림 5 중에 점선으로 나타내었다.

급열 또는 급냉에 의한 강도저하의 양상은 재료에 따라서 다르지만 강도가 비교적 큰 재료(초기균열이 작은 재료)와 강도가 비교적 작은 재료(초기균열이 큰 재료)의 두 가지로 분류하여 균열성장 및 강도저하의 양상을 살펴보기로 한다.

(I) 초기균열의 크기가 작은 재료

그림 5에서 초기균열의 크기가  $l_a$ 이고 단위 부피당 균열의 수가  $10/2\pi$ 인 경우를 생각한다.  $\Delta T$ 가 점 A보다 작을 때에는 균열이 성장하지 않으므로 그림 6의 (A)와 (B)에서 알 수 있듯이 강도는 저하하지 않는다.  $\Delta T = \Delta T_c$ 에서 동적파괴가 시작되며 균열은 거의 순간적으로 점 C에 도달하여 균열의 크기는  $l_c$ 가 된

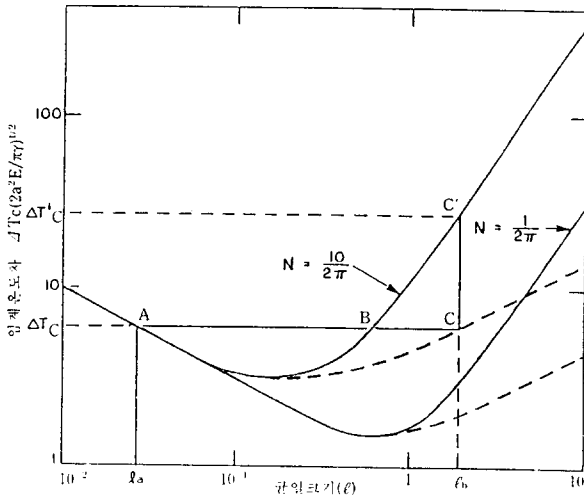


그림 5 균열성장을 일으키는데 요하는 열충격

다.  $l_c$ 인 균열이 더욱 성장하기 위해서는  $\Delta T$ 가 점  $C'(\Delta T_c')$ 보다 크지 않으면 아니된다. 따라서  $\Delta T_c < \Delta T < \Delta T_c'$ 의 범위에서 열충격을 받게 되면 균열크기  $l_c$ 는 더욱 성장하지 않으므로 그림 6의 (A)와 (B)에서처럼 강도 역시 일정한 값을 갖게 된다.  $\Delta T > \Delta T_c'$ 이 되어 점  $C'$ 보다 큰 온도차의 열충격을 받게 되면 균열은  $l_c$ 에서 실선의 곡선을 따라서 연속적으로 완만하게 성장하므로 강도 역시 연속적으로 완만하게 감소함을 그림에서 알 수 있다.

(2) 초기균열의 크기가 큰 경우

초기균열의 크기가 그림 5 중의 실선으로 나타낸 곡선의 오른쪽에 있을 경우, 보기를 들어서 점 B에 해당하는  $l_b$ 의 길이일 때에는  $\Delta T \leq \Delta T_c$ 의 경우에는 균열이 안정한 영역에 있으므로 균열성장이 일어나지 않아서 그림 6의 (C)와 (D)에서 알 수 있는 것처럼 강도의 변화도 없다. 그러나  $\Delta T > \Delta T_c$ 의 열충격에 대해서는 균열의 크기가  $l_b$ 로부터 실선을 따라서 연속적으로 서서히 성장하므로 강도 역시 연속적으로 서서히 감소하며 불연속적인 강도저하는 일어나지 않는다.

### 5. 세라믹스에 있어서 열피로에 의한 수명평가

고온에서 사용되는 세라믹스에는 온도의 구배가 원인이 되어 열응력이 생겨나고 이로 인해서 열피로파괴가 일어난다. 이 경우에도 시간적으로 일정한 열응력에 의한 피로 즉 靜的 열피로 (static thermal fatigue)와 변동하는 열응력에 의한 피로 즉 動的 열피로 (cyclic thermal fatigue)가 있다. 정적열피로는 爐壁 등에 생겨나고 동적열피로는 자동차의 배기가스 통로에 설치된 세라믹스 등에 일어난다.

열피로도 기계적 응력에 의한 피로와 본질적으로는 다를 바 없으나 온도에 의존하는 물성치의 변화를 고려하지 않으면 아니된다.

균열전파속도  $V$ 는 일반적으로 온도의 상승과 더불어 증가한다. 따라서 앞의 식 (2) 중의

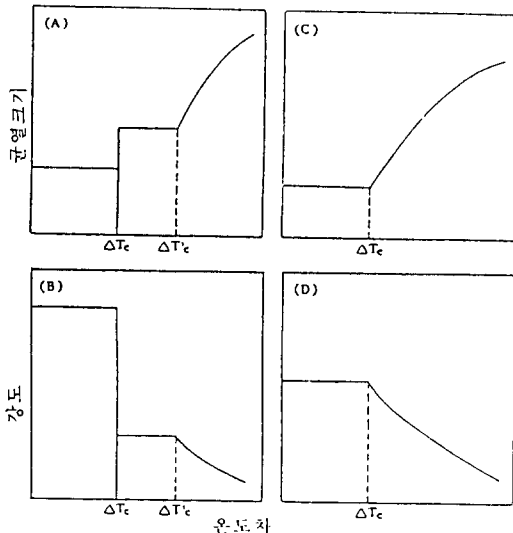


그림 6 열충격에 의한 균열크기 및 강도의 변화

상수  $A$ 는 다음 식 (10)과 같이 온도의 함수로 나타낸다.

$$A = A_0 \exp(-Q/RT) \quad (10)$$

여기서  $A_0$ 는 상수이고  $Q$ 는 활성화에너지이며 물질 및 균열전파기구에 의해서 결정된다.

(1) 정적열피로(static thermal fatigue)

식 (1), (2) 그리고 (10)을 사용하여 앞에서와 같은 방법으로 열피로에 의한 재료의 수명을 예측할 수 있는 수식들을 유도할 수 있다.

일정온도차  $T_i$ 하에 있어서 세라믹스의 열피로수명을  $t_i$ 라고 하고 일정온도차  $T_j$ 하에서의 열피로수명을  $t_j$ 라고 하면 식 (11)이 얻어진다.

$$t_i/t_j = (T_j/T_i)^N \quad (11)$$

여기서  $N$ 은 식 (2)에서 정의된 재료상수이다. 균질한 재료의 시험편을 제작하여 매우 높은 온도차의 열피로하에서 짧은 수명을 측정한 후 실제 가해주는 열피로하에서의 열피로수명을 쉽게 예측할 수 있다.

(2) 동적열피로(cyclic thermal fatigue)

정적열피로의 경우와 마찬가지로 하여 동적 열피로수명을 유도 할 수 있다.

$\Delta T_i$  및  $\Delta T_j$ 의 온도차의 반복열피로에 의한 세라믹스의 열피로파괴수명을  $n_i$  및  $n_j$  사이클이라고 하면 다음 식 (12)가 유도된다.

$$n_i/n_j = (\Delta T_j/\Delta T_i)^N \quad (12)$$

매우 큰  $\Delta T_j$ 값에 대한 작은 값의  $n_j$ 를 단시간에 구하고 실제 작용하고자 하는  $\Delta T_i$ 값에 대한 동적열피로수명  $n_i$ 사이클수를 구할 수 있다.

(3) T-SPT선도

T-SPT 선 도란 thermal shock-severity-probability-time diagram의 약자로서 앞의 식 (11)과 (12)에 Weibull통계를 적용시켜서 정적열피로의 경우에는 식 (13)이 유도되고 동적열피로의 경우에는 식 (14)가 유도된다.

$$\ell_n \ell_n \frac{1}{1-P_f} = (m/N) \ell_n t + m \ell_n T + C \quad (13)$$

$$\ell_n \ell_n \frac{1}{1-P_f} = (m/N) \ell_n n + m \ell_n \Delta T + C \quad (14)$$

여기서  $P_f$ 는 파괴확률,  $T$ 는 정적열피로에 있

어서의 온도차,  $t$ 는 정적열피로수명,  $\Delta T$ 는 동적열피로에 있어서의 온도차,  $n$ 은 동적열피로수명이며  $m$ 은 Weibull계수,  $N$ 은 식 (2)에서 정의된 물질상수이고  $C$ 는 상수이다. 이 식들을 이용하여 정적 또는 동적 열피로하에서의 열피로파괴수명과 파괴확률의 관계를 한꺼번에 알 수 있는 그래프를 얻을 수 있는데 이 그래프를 T-SPT선도라고 하며 세라믹스의 재료선택에 매우 유용하게 사용된다.

## 6. 맺 음 말

세라믹스가 기계구조용 부품으로 사용되기 시작하고 있는 이 때에 원료분말의 합성으로부터 부품의 제조 및 가공에 이르는 기술도 중요하지만 그 부품의 신뢰성을 파악하기 위한 평가기술 역시 매우 중요하다.

세라믹스의 제조공정으로부터 평가기술에 이르기까지의 모든 과정은 결국 세라믹스의 균열 성장을 막고 파괴를 방지하려는 것에 그 최대의 목적을 두고 있다.

세라믹스는 당면 및 금후의 산업혁신의 관건을 쥐고 있으며 2000년대에는 하나의 기간산업으로 될 수 있을 것으로 전망된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이 홍림, 1986, "엔지니어링 세라믹스", 번역판, 170, 반도출판사.
- (2) D.J. Green, P.S. Nicholson and J.D. Embury, 1973, "Fracture Toughness of a Partially Stabilized ZrO<sub>2</sub> in the System CaO-ZrO<sub>2</sub>", J. Am. Ceram. Soc., 56, 619.
- (3) H. Hübner and W. Jillek, 1977, "Subcritical Crack Extension and Crack Resistance in Polycrystalline Alumina", J. Mat. Sci., 12, 117.
- (4) H. Hübner and W. Strobe, 1977, "Anwendbarkeit Bruchmechanischer Verfahren auf

- Keramische Werkstoffe", Ber. Dt. Keram. Ges. 54, 401.
- (5) F.W. Kleinlein and H. Hübner, 1977, "The Evaluation of Crack Resistance and Crack Velocity from Controlled Fracture Experiments of Ceramic Bend Specimens", in Fracture 1977, Proceedings of the 4th International Conference on Fracture, Waterloo, Vol. 3, p. 883.
- (6) R.F. Pabst, J. Steeb and N. Claussen, 1978, "Microcracking in a Process Zone and Its Relation to Continuous Fracture Mechanics", Fract. Mech. of Ceram., Vol. 4, p. 821.
- (7) U. Krohn, 1979, "Untersuchungen zum Bruchverhalten von Reiner Aluminiumoxidkeramik und deren Schichtverbindungen mit Niob", Dissertation Universität Stuttgart.
- (8) K. Kriz and F.W. Kleinlein, 1980, "Einfluß der Prüfgeschwindigkeit auf die langsame Rißausbreitung in Aluminiumoxid Unterschiedlicher Korngröße", Ber. Dt. Keram. Ges. 57, 22.
- (9) S.M. Wiederhorn, 1974, Fracture Mechanics of Ceramics, Vol. 2, p. 613, Plenum Press, N.Y.
- (10) Y. Matsuo et al., 1981, Progress in Nitrogen Ceramics, Martinus Nijhoff Publishers, p. 515.
- (11) 이홍림, 1985, 내화물 공학, 반도출판사.
- (12) D.P.H. Hasselman, 1969, "Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Crack Propagation in Brittle Ceramics", J. Am. Ceram. Soc., 52, 600.



■ 국제 학술대회 참가 안내 ■

6 th IFAC/IFIP/IFORS/IMACS

Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Technology

주 관 : 국제자동제어 연맹 (IFAC)

분 야 : 생산공정에 관련되는 연구테마로서 특히 CIM(컴퓨터 원용생산), 로봇응용, 생산공정의 Sensor 응용, 생산공정제어, AI와 전문가시스템, 생산공정을 위한 정보시스템, 생산공정 모델링 및 시뮬레이션, manufacturing net work

일 시 : 1989년 9월 29일~10월 1일 (5일간)

장 소 : 스페인 마드리드 (Madrid, Spain)

일 정 : 1988년 12월 15일 초록제출 마감  
 1989년 2월 15일 초록채택여부 통보  
 1989년 4월 15일 논문제출 마감

※ 기타 자세한 내용은 한국과학기술원 생산공학과 조형석 교수께 문의 바람.  
 전화번호 : (02) 967-0121 (交)3641