

## 알루미나 세라믹스의 열충격 거동에 대한 통계적 해석

한봉석 · 이홍림  
연세대학교 세라믹공학과  
(1999년 5월 31일 접수)

### Statistical Analysis of Thermal Shock Behavior of Alumina Ceramics

Bong Seok Hahn and Hong Lim Lee

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea  
(Received May 31, 1999)

#### 초 록

열충격에 의한 알루미나 세라믹스의 파괴 거동을 통계적 방법으로 해석하고 세라믹스의 열충격 거동을 설명하기 위한 새로운 방법으로 열충격 와이블 선도(thermal shock Weibull plot)를 제시하였다. 물을 이용한 급냉 열충격 시험법을 이용하여 알루미나 세라믹스의 열충격 거동에 대한 실험 데이터를 얻고, 이 데이터를 이용하여 각각의 열충격에 대한 시편의 파괴 확률을 구하였다. 이 파괴확률을 와이블 분포 함수(Weibull distribution function)에 적용하여 본 연구에서 제시한 열충격 와이블 선도를 나타내었다. 열충격 와이블 선도는 열충격에 의한 재료의 파괴 확률을 나타낼 수 있으며 열충격 와이블 선도에서 열충격 와이블 계수(thermal shock Weibull modulus)를 구하면 열충격에 의한 재료의 파괴 거동도 나타낼 수 있다. 이러한 통계적 해석 방법은 기존의 임계 열충격 온도차에 의한 열충격 저항성 관찰법 보다 정확한 열충격 거동을 나타낼 수 있다

#### ABSTRACT

Thermal shock behavior of alumina ceramics was analyzed by statistical method and thermal shock Weibull plot was proposed as a new method to represent the thermal shock behavior of ceramics. Three point bending strength of alumina specimens was measured after quenching into the water of 20°C. Failure probability of the specimens was calculated at each thermal shock temperature difference. Weibull distribution function was adopted to represent the thermal shock Weibull plot. New thermal shock Weibull plot can represent the thermal shock failure probability and the thermal shock fracture behavior of ceramics. Thermal shock Weibull plot is more suitable to represent the thermal shock behavior of ceramics than the observation method of critical thermal shock temperature difference.

**Key words :** Thermal shock, Statistical analysis, Weibull plot, shape factor, Failure probability

#### 1. 서 론

세라믹스의 파괴 거동은 균일하지 못한 내부 균열 분포에 의해 결정되므로 정량화 하기 어렵다. 그러므로, 세라믹스의 파괴 거동을 정량화 하기 위해서는 통계적인 관점에서의 접근이 필요하다. 세라믹스의 파괴 거동에 대한 통계적 해석은 재료의 파괴를 일으키는 균열이 통계적 함수에 따라 분포한다고 가정하는데서 시작된다. 즉, 세라믹스 시편의 강도는 시편에 있는 결함 중 가장 큰 결함에 의해 지배되므로 결함의 크기 분포는 시편의 강도 분포를 나타낸다고 말할 수 있으며, 세라믹스 시편의 파괴 확률을 통계적 분포 함수를 이용해서 나타낼 수 있다.<sup>1)</sup>

세라믹스의 파괴 거동 분석에는 여러 가지 통계적 분

포 함수 중에서 Weibull distribution function<sup>2)</sup>이 주로 사용된다. 그 이유는 세라믹스의 파괴 거동을 결정하는 균열의 분포가 Weibull 분포 함수에 잘 일치하기 때문이다. 그러므로, 세라믹스의 파괴 거동은 Weibull의 파괴 확률 이론에 잘 일치하며 이를 이용해서 Weibull은 Weibull modulus로  $m$ 을 제시하였다. Weibull modulus인  $m$ 은 재료의 신뢰도를 나타내는 기준으로 사용될 수 있으며 크기가 다른 형상의 실용물의 신뢰도와 파괴 확률을 계산하는데 사용된다.<sup>2)</sup>

열충격에 의한 강도 저하 거동 역시 기본적으로는 기계적 응력에 의한 파괴 거동과 같이 내부 균열 분포에 의해 지배되므로 통계적인 방법에 의한 해석이 필요하다. 특히, 급격한 강도 저하를 일으키는 임계 열충격 온도차 부근에서 열충격 시험 결과 데이터는 일정한 값을 갖지

않으며 통계적 분포 함수에 따라 변화하므로 직접 강도를 관찰할 수 있는 기계적 파괴 거동에서보다 통계적 해석이 더욱 필요하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 알루미늄이나 세라믹스의 열충격 시험 결과를 이용하여 Weibull probability distribution function을 적용한 통계적 분석을 행하고 다른 재료의 열충격 거동에 대한 통계적 연구와 비교하여 열충격 파괴 확률을 통계적인 방법으로 표시할 수 있는 방법을 제안하였다.<sup>3,6)</sup>

## 2. 실험방법

열충격 시험에 사용한 시편은 상용 알루미늄 분말(AES-11, Sumitomo, Japan)을 출발물질로 하여 냉간 정수압으로 성형하고 1650°C에서 1시간 소결 후 가공하여 4 mm×4 mm×35 mm의 크기로 제작하였다. 제작한 시편은 표준적인 알루미늄 소결체의 특성을 가지며 소결 밀도는 98.2%, 3점 꺾임 강도 측정법으로 측정된 평균 강도는 448.54 MPa이었다.

시편을 고온으로 가열하고 액체 냉매로 급냉하는 열충격 시험은 자체 제작한 열충격 시험 장치를 사용하였다. 이 장치는 시편의 냉각과 가열을 ±2°C의 작은 오차 범위 내에서 제어할 수 있으며 자동으로 열충격 실험을 행할 수 있도록 제작하였다. 급냉을 위한 냉매로는 증류수를 20°C로 균일하게 유지하여 사용하였다. 열충격 시험에 사용한 시편의 가열 시간은 900초, 냉각 시간은 30초, 가열 위치에서 냉매까지의 낙하 시간은 2초이다. 열충격을 가한 시편은 열풍 건조기를 이용하여 수분을 건조한 후 만능 재료 시험기(H10K-C, Hounsfield, U.K.)를 이용하여 3점 꺾임 강도를 측정하였다. 꺾임 강도 측정에 사용한 crosshead speed는 0.5 mm/min, 지지 점간 거리는 30 mm이었다.

## 3. Weibull Failure Probability Distribution Function

Weibull failure probability distribution function은 세라믹스의 파괴 거동을 표현하는데 가장 널리 사용되는 분포함수이며 세라믹스의 파괴를 일으키는 원인인 단위 체적당 균열의 분포가 Eq. (1)과 같은 Weibull distribution function에 따라 분포한다고 가정한다.<sup>7)</sup>

$$f(x) = mvx^{m-1} \exp[-vx^m], (x \geq 0, v > 0, m > 1) \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 분포 함수의 형상 계수이며  $v$ 는 분포 함수의 크기 계수로 이 두 가지 계수는 Weibull distribution function의 모양을 결정하는 중요한 값이다. Weibull distribution function은 형상 계수  $m$ 에 따라 Fig. 1과 같은 형태로 나타난다. Weibull distribution function은

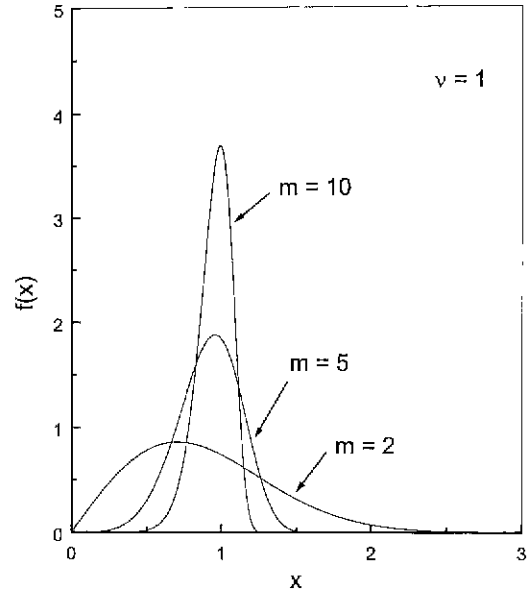


Fig. 1 Schematic diagram of the weibull distribution function.

음수의 값을 갖지 않으며, Gaussian distribution function에 비해 세라믹스의 강도 분포 형태를 잘 반영할 수 있다. 특히, 낮은 강도 값의 분포 영역에서 Gaussian distribution function은 이를 적절하게 반영하지 못하며 Weibull distribution function이 좀 더 정확한 균열의 분포를 표현할 수 있다.<sup>8)</sup>

세라믹스의 균열은 제조 과정에서 도입되는 입자의 결함(pore), 표면 손상(surface crack), 입계 균열(grain boundary inner crack) 등의 형태로 나타나며 세라믹스 파괴의 원인이 된다.<sup>9)</sup> 균열의 분포 결괴인 파괴 강도의 분포는 통계학적인 함수의 모양을 다르므로 균열의 분포 역시 통계학적인 분포 함수로 나타낼 수 있다. 그러므로, Weibull distribution function인 Eq. (1)에 따르는 균열 분포를 가진 재료의 파괴 확률  $P_f$ 는 Eq. (2)로 표현할 수 있다.<sup>8)</sup>

$$P_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (2)$$

이때  $\sigma$ 는 시편에 가해진 응력의 크기이며  $\sigma_0$ 는 파괴 확률이 0이 되는 응력,  $\sigma_0$ 는 normalizing factor이다. Eq. (2)는 Weibull의 파괴 강도 거동에 대한 실험식에서 유도되며 이를 이용해서 Weibull plot이라 불리는 파괴 확률 분포 그래프와 Weibull modulus  $m$ 을 구할 수 있다.<sup>10)</sup> Weibull modulus는 Weibull distribution function의 shape parameter이며 재료의 균열 분포에 따른 고유한 값이므로 실험에 의한 강도 분포 결과를 다른 실험 방법에 의한 강도 결과나, 체적이 다른 실용물의 강도를 예상하는데 사용될 수 있다.<sup>11)</sup>

4. 결과 및 고찰

각각의 열충격 온도차에서 열충격을 가한 후에 측정된 3점 꺾임 강도 시험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 각각의 열충격 온도차에서 측정된 시편의 개수는 20개 이상이다. Fig. 2의 (a)에는 시험 데이터를 모두 나타내었으며 (b)에는 각 열충격 온도차에 대한 평균과 표준 편차를 나타내었다. 일반적인 열충격 시험에서는 Fig. 2의 (b)와 같은 그래프를 이용하여 임계 열충격 온도차를 결정한다. Fig. 2의 (b)를 살펴보면 열충격 온도차 225°C 이후부터 강도가 저하하기 시작하며 열충격 온도차 250°C에서는 대부분의 시편의 강도가 열충격에 의해서 저하되었음을 알 수 있다. 따라서 정확한 임계 열충격 온도차를 결정하기가 곤란하며 관찰자에 따라서 서로 다른 임계 열충격 온도차가 결정될 수도 있으므로 Fig. 2와 같은 그래프를 이용한 임계 열충격 온도차의 결정은 세라믹스의 열충격 특성을 정확히 나타낸다고 말할 수 없다.

열충격에 의한 시편의 파괴 거동을 Weibull 분포 함수를 이용하여 분석하기 위해 각각의 열충격 온도에서 측정된 데이터를 Weibull plot<sup>12)</sup>의 형태로 Fig. 3에 나타내

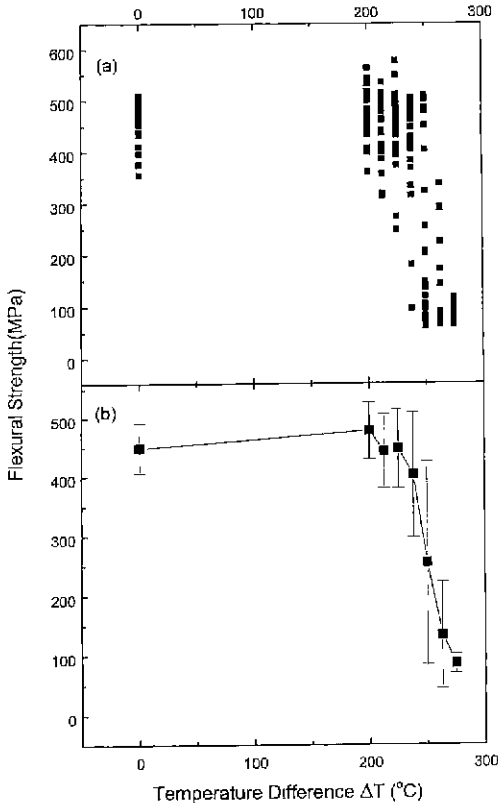


Fig. 2. Retained strengths of alumina specimens after thermal shock into the water of 20°C.

었다. 열충격 시험 결과에 대한 Weibull plot은 열충격 온도차가 증가함에 따라 두 개의 영역으로 분리된다. 열충격에 의해 손상을 받지 않은 열충격 온도차 조건( $\Delta T=0, 200, 213, 225^\circ\text{C}$ )의 시편들은 그래프의 오른쪽 영역에 표시되었으며 열충격 손상에 의해 강도가 저하된 열충격 온도차 조건( $\Delta T=275^\circ\text{C}$ )의 시편들은 그래프의 왼쪽 영역에 표시되었다. 또한, 250°C 부근의 열충격 온도차에 의해 시편의 일부만 손상을 받은 열충격 온도차 조건( $\Delta T=238, 250, 268^\circ\text{C}$ )의 시편들은 오른쪽에서 왼쪽으로 넓은 영역에 걸쳐 표시되었다. 그러므로, 열충격 온도차별로 표시한 Weibull plot은 열충격에 의한 시편의 손상 정도를 나타낸다고 말할 수 있으며,  $\Delta T=0^\circ\text{C}$ 인 그래프에 비해 낮은 강도 영역인 왼쪽에 치우쳐 있을수록 많은 손상을 받는 열충격 조건이라고 말할 수 있다. Fig. 4에 열충격 손상을 받지 않은 시편들의 Weibull plot을 나타내고, Fig. 5에  $\Delta T=275^\circ\text{C}$ 의 조건에서 열충격을 가하여 모든 시편이 열충격 손상을 받은 경우의 Weibull plot을 각각 나타내었다. 그러나, Fig. 3, 4, 5와 같은 그래프에 의해서는 시편의 열충격 손상에 대한 정량적인 데이터를 제시하지는 못한다.

Weibull plot은 Fig. 1과 같은 Weibull distribution function을 따르는 균열 분포를 갖는 재료의 응력에 따른 파괴 확률을 나타내기 위한 것이다 그러므로, 열충격 시험에서 발생하는 열응력에 의한 파괴가 기계적 응력에 의한 파괴와 마찬가지로 열충격에 의해 손상을 받은 시편

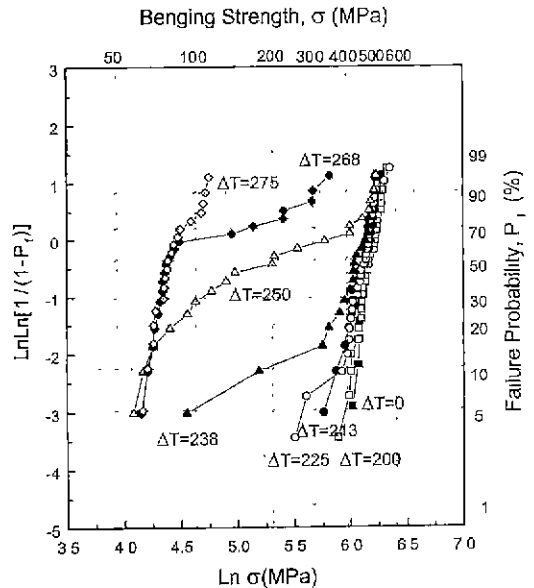


Fig. 3. Weibull plots of retained strength distribution after thermal shock test at various thermal shock temperature differences.

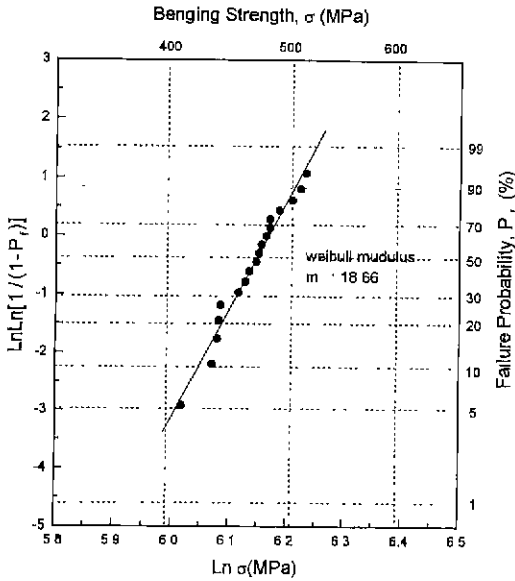


Fig. 4. Weibull plot of retained strength distribution of the specimens not thermally shocked.

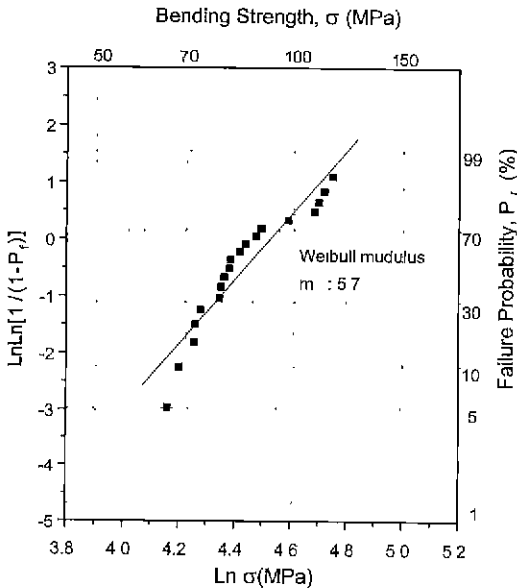


Fig. 5. Weibull plot of retained strength distribution of the completely shocked specimens at  $\Delta T=275^{\circ}\text{C}$ .

에 존재하는 균열의 분포에 의해 결정된다면 열충격 온도차에 따른 세라믹스의 열충격 거동을 Weibull plot을 이용해서 정량적으로 나타낼 수 있을 것이다.

기계적 응력에 의한 시편의 강도를 Weibull plot으로 그리기 위해서는 측정된 강도 값을 이용해서 파괴 확률  $P_f$ 를 구한다. 그러나, 열충격 시험에서는 열충격 온도차 순서나 시편의 강도 분포를 이용해서 파괴 확률로 정할

수 없으므로, 열충격 파괴 거동을 Weibull plot으로 그리기 위해서는 각각의 열충격 온도차에서 시편의 파괴 확률을 표시할 수 있는 새로운 파괴 확률을 구해야 한다. 각각의 열충격 온도차에 대한 시편의 파괴 확률을 구하기 위해서는 시편의 총 개수  $n$ 과 시편의 열충격 손상 지수를 이용한다. 시편의 손상 지수는 0, 0.5, 1의 세 가지 수치로 표시한다. 이중 손상 지수 0은 열충격에 의해 강도가 저하되지 않은 시편을 가리키며 0.5는 열충격의 영향을 받지 않은 시편의 평균 강도 값과 완전히 열충격을 받은 시편의 평균 강도 값 사이의 중간적인 강도 값을 갖는 시편들의 손상 정도를 나타낸다. 또한, 손상 지수 1은 열충격에 의해 완전히 강도가 저하된 시편들을 가리킨다. 중간적인 강도 값을 갖는 시편들의 손상 지수를 0.5로 정한 이유는 이 시편들의 강도 값이 쥐임 강도 시험의 쥐임 모멘트에 일치하지 않는 방향으로 성장한 균열에 의해 시편이 부분적으로 손상되었음을 나타내기 때문이다.<sup>13)</sup> 그러나, 이렇게 중간적인 강도 값을 갖는 시편들의 손상 지수를 얼마로 정할 것인가에 대해서는 좀더 연구할 필요가 있다.

시편의 열충격에 의한 손상의 기준이 되는 강도 값을 Weibull plot을 이용하여 결정하였다. Fig. 4에 나타난 열충격을 받지 않은 시편의 Weibull plot( $\Delta T=0^{\circ}\text{C}$ )에서 파괴 확률 5%의 강도인 403 MPa 이상의 강도 값을 갖는 시편들을 손상정도 0으로 정하였다. 이것은 열충격의 영향을 받지 않은 정상적인 시편인 경우 403 MPa 이하의 강도를 가질 확률이 5% 이하라는 의미이므로 403 MPa 이상의 강도를 갖는 시편들은 열충격에 의해 손상을 받지 않았다고 할 수 있다.

Fig. 5에 나타난 열충격에 의해 강도가 완전히 저하된 시편들의 Weibull Plot( $\Delta T=275^{\circ}\text{C}$ )에서 파괴 확률 95%의 강도인 115 MPa 이하의 강도 값을 갖는 시편들의 손상 정도를 1로 정하였다. 이것은 열충격에 의해 손상을 받은 시편이 115 MPa 이하의 강도를 가질 확률이 95%라는 의미이며 열충격에 의해 완전히 강도가 저하되지 않았을 확률이 5% 이하라는 의미이다. 그러므로, 115 MPa 이하의 강도 값을 갖는 시편들은 열충격에 의해 완전히 손상되었다고 말할 수 있다. 또한, 열충격 시험 결과, 115 MPa과 403 MPa 사이의 강도 값을 갖는 시편들은 손상 정도를 0.5로 정하였으며 이것은 시편의 부분적인 손상을 나타낸다. 손상된 시편의 강도 기준 결정에서 강도가 저하된 시편들의 파괴 확률 95%와 강도가 저하되지 않은 시편들의 파괴 확률 5%는 통계학적인 관점에서 오차의 유의수준을 0.05로 고려하여 결정하였다.<sup>14)</sup> 이와 같이 고려한 시편의 손상 정도 값을 Eq. (3)에 적용하면 각각의 열충격 온도차 조건에서 시편의 파괴 확률을 결정할 수 있다.

$$P_f = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n N_i \quad (3)$$

Eq. (3)에서  $n$ 은 각각의 열충격 온도차에서 시험한 시편의 총 개수(또는 시편 번호)이며  $N_i$ 는 해당 열충격 온도차 조건에서  $i$ 번째 시편의 손상 지수이다.

Fig. 6에 이상과 같은 방법으로 계산한 파괴 확률을 이용하여 열충격 온도차와 파괴 확률을 Weibull plot으로 나타내었다. 이 그래프를 이용하면 각 열충격 온도차에 따른 시편의 파괴 확률을 구할 수 있다. 예를 들어, 열충격 온도차 250°C에서 시편이 열충격에 의해 손상 받을 확률은 48%이며, 열충격 온도차 200°C에서 시편이 열충격에 의해 손상 받을 확률은 3%이다. 그러므로, Fig. 6을 이용하면 시험하지 않은 열충격 온도차에 대한 시편의 열충격 손상 확률을 구할 수 있다. 이와 같은 형태의 열충격 거동 표현 방법은 아직 다른 연구에서 제시된 바 없으며 본 연구에서는 열충격 와이بل 선도(thermal shock Weibull plot)로 이를 제시한다.

열충격 와이블 선도에서 구해지는 그래프의 기울기는 열충격 시험 과정에서 시편의 단계적 손상 정도를 나타낸다. 이 값은 썩임 강도 분포에 의한 일반적인 와이블 계수(Weibull modulus)와 통계적 의미는 같지만 재료의 초기 균열 분포가 아닌 열충격에 의해 성장한 균열의 분포를 나타내며 같은 재료라 할지라도 기계적 강도에 의한 와이블 선도(Weibull plot)의 와이블 계수와는 다른 값을 갖는다. Fig. 7에 Rogers 등의 연구에 의해 발표된 결과<sup>4)</sup>를 본 연구에서 제시한 열충격 와이블 선도에 의하

여 분석하고, Fig. 6과 같은 형태로 재구성하였다 Fig. 7의  $m$  값은 문헌에 보고된 각 재료들의 와이블 계수이고  $m_T$ 는 열충격 와이블 선도에서 구한 형상 계수로 본 연구에서는 열충격 와이블 계수(thermal shock Weibull modulus)라고 칭한다.

각각의 재료에서 열충격 와이블 계수는 기계적 강도값에 의한 와이블 계수와 값이 다르다. 그러나, 통계학적인 의미로 단위 체적 안에 들어있는 파괴원(균열)의 분포를 나타낸다는 점에서는 같으므로, 열충격 와이블 계수는 세라믹스가 열충격에 의해 강도가 저하될 때 얼마나 급격한 파괴를 일으키는가를 나타낸다고 할 수 있다. 그러므로, 열충격 와이블 계수가 큰 재료는 열충격에 의해서 급격한 강도 저하를 보인다고 말할 수 있으며, 열충격 와이블 계수가 작은 재료는 넓은 범위의 열충격 온도차에 의해 단계적으로 강도가 저하된다고 말할 수 있다.

Fig. 7을 살펴보면 기계적 강도에 의한 와이블 계수가 높은 재료의 경우에는 열충격 와이블 계수가 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 좁은 분포의 균일한 균열 분포를 가진 재료의 경우에는 각각의 균열들이 열충격에 의해 동일하게 성장하므로, 열충격 시험에서 급격한 강도 저하를 일으킨다는 것을 나타낸다.

본 연구에서 제시한 열충격 와이블 선도는 아직 연구 단계이므로 몇 가지 보완해야 할 점을 가지고 있으며, 이를 다음과 같이 요약하였다.

1. 정확한 열충격 파괴 확률을 구하기 위해서 각각의 열충격 온도차에 대하여 Weibull plot에서 요구하는 최소

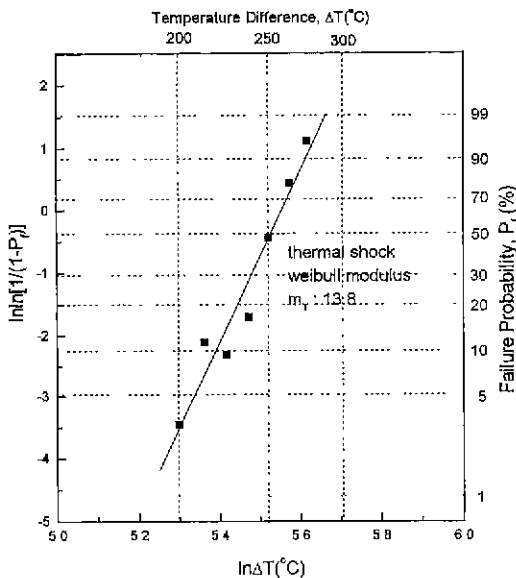


Fig. 6. Thermal shock weibull plot representation of failure probability for thermal shock temperature difference.

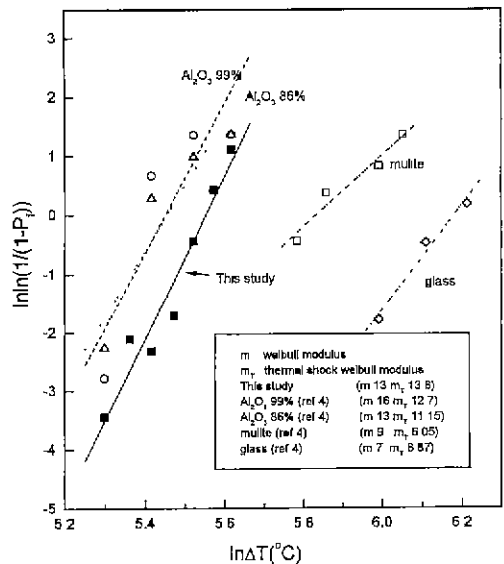


Fig. 7. Thermal shock weibull plot representation of failure probability for thermal shock temperature difference of various materials.

시편 개수 이상의 시편으로 열충격 시험을 행하여야 한다. 시편 개수가 작은 경우에는 정확한 열충격 파괴 확률을 구할 수 없다.

2. 열충격 시험에 사용할 온도차 조건은 좁은 것이 좋다. 정밀한 열충격 시험 장치가 사용되지 않는다면 실험 장치에 의한 오차를 줄이기 위하여 25°C 정도로 할 것을 권장한다. 본 연구에서는 정밀한 온도 조절이 가능한 열충격 시험 장치를 사용했으므로 13°C로 하였다.

3. 단계적인 강도 저하가 있는 시편의 중간 강도 값의 거동을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 초기 강도의 5% 이하의 파괴 확률을 갖는 강도와 열충격에 의해 저하된 시편 강도의 95% 이상의 파괴 확률을 갖는 강도를 이용해서 중간 강도값 범위의 손상 지수를 0.5로 정하였지만 유리와 같이 단계적인 강도 저하를 일으키는 시편의 경우에는 이를 반영할 수 있는 손상 지수 결정 방법이 필요하다. 손상 지수를 결정하는 방법중의 한가지는 열충격에 의해 발생한 균열의 길이를 확인하는 것이다. 균열의 길이는 꺾임 강도 시험 결과 보다 직접적인 증거가 된다. 하지만 대부분의 재료에 있어서 열충격에 의한 표면 균열을 확인하기가 어려우며  $Al_2O_3$ 와 같이 급격한 강도 저하를 일으키는 재료에 있어서는 균열 확인법과 꺾임 강도 시험법의 결과에 큰 차이가 없다

## 5. 결 론

$Al_2O_3$  세라믹스를 이용하여 급냉법에 의한 열충격 실험을 행하고 통계적 방법으로 해석하여 열충격 온도차에 따른 파괴 확률을 구하는 방법으로 열충격 와이블 선도를 제시하였다.

열충격 와이블 선도를 구하기 위해서는 각각의 열충격 온도차에서 시편들의 손상 지수를 구하고 이를 이용하여 열충격 온도차에 의한 재료의 파괴 확률을 구할 수 있다. 이때, 손상 지수는 재료의 강도 저하 거동에 따라 0, 0.5, 1의 값을 가지며 재료의 강도 저하 특성을 반영해야 한다. 제시한 열충격 와이블 선도를 이용하면 열충격 온도차에 의한 파괴 확률과 열충격 와이블 계수를 구할 수 있다. 본 연구에 사용한 알루미나 세라믹스의 열충격 와이블 계수는 13.8이었으며 이 계수는 열충격 시험에서 재료의 강도 저하 거동을 나타낸다. 열충격 와이블 계수가 큰 재료는 열충격에 의해 발생하는 균열들이 균일하

게 성장한다는 의미이며, 값이 작은 경우에는 균열의 불균일한 성장으로 단계적인 강도 저하 거동을 보인다는 것을 나타낸다. 이와 같은 열충격 와이블 선도를 이용하면 기존의 임계 열충격 온도차에 의한 열충격 저항성을 관찰하는 방법보다 더욱 정확하게 재료의 열충격 거동을 나타낼 수 있다.

## REFERENCES

1. W. Weibull, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *J. Appl. Mech.* **18**, 293-297 (1951).
2. 이준근, 세라믹스의 기계적 특성, pp. 67-70. 반도출판사 1994.
3. F. Sudream, C. Olangnon, G. Fantozzi and O. Leclercq, "A Retained Statistical Approach to Thermal Fatigue Life Prediction," *J. Mater. Sci.*, **27**, 5539-5546 (1992).
4. W. P. Rogers, A. F. Emery, R. C. Bradt and A. S. Kobayashi, "Statistical Study of Thermal Fracture Ceramic Material in the Water Quench Test," *J. Am. Ceram. Soc.*, **70**(6), 406-412 (1987).
5. D. Lewis III, "Thermal Shock and Thermal Shock Fatigue Testing of Ceramic with the Water Quench Test," *Fracture Mechanics of Ceramics*, Vol 6 edited by R. C. Bradt, Picnum, New York, 1983
6. J. R. Brockenbrough, L. E. Forsythe, and R. L. Rolf, "Reliability of Brittle Materials in Thermal Shock." *J. Am. Ceram. Soc.*, **69**(8), 634-637 (1986).
7. J. W. Barnes, *Statistical Analysis for Engineers and Scientist: A computer Based Approach*, pp. 79-81, McGraw-Hill, New York, 1994.
8. J. B. Watchman, *Mechanical Properties of Ceramics*, pp. 91-92, John Wiley & Sons, New York, 1996
9. 이준근, 세라믹스의 기계적 특성, pp. 35-36, 반도출판사, 1994.
10. W. D. Scott and A. Gaddipati, "Weibull Parameters and the Strength of Long Glass Fibers," pp. 125-142, *Fracture Mechanics*, Vol. 3, Plenum, New York, 1973.
11. 이홍립, 엔지니어링 세라믹스, pp. 210-213, 반도출판사, 1990.
12. J. B. Watchman, *Mechanical Properties of Ceramics* pp. 94-95, John Wiley & Sons, New York, 1996.
13. 한봉석, " $Al_2O_3$  세라믹스의 열충격 파괴거동과 열응력 해석" 박사학위논문, 연세대학교, 1998
14. 성용현, 최영훈, 이승천, 박동련, 변종석, "STATISTICAL을 이용한 통계정보분석," pp. 136-137, 도서출판 탐진, (1998).