

## Ball-on-3 ball test에 의한 알루미나 세라믹스의 열충격 거동

이중현 · 박성은 · 한봉석 · 이홍림

연세대학교 세라믹 공학과  
(1999년 5월 28일 접수)

### Thermal shock behavior of alumina ceramics by ball-on-3 ball test

Joong Hyun Lee, Sung Eun Park, Bong Seok Han and Hong Lim Lee

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea  
(Received May 28, 1999)

#### 초 록

상은 25°C의 증류수에 단일 열충격을 시행한 후 ball-on-3 ball test로 강도를 측정하고 강도의 변화를 관찰하였다. 시편은 상용 알루미나 시편을 사용하였고, disc 형태의 시편에 대하여 열충격 후의 균열의 모양과 강도 시험 후의 균열의 모양을 잉크 침투법에 의해 관찰하였다. 통계적인 파괴 확률방법을 제시하였으며, thermal shock Weibull plot을 이용하여 3점 꺾임 강도와 비교하였다. ball-on-3 ball test 강도에 미치는 인자에 대해 통계학적인 접근을 통해 관찰한 결과, 시편중심에서 균열까지의 거리가 균열 밀도보다 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

#### ABSTRACT

The flexural strength distribution of alumina ceramics was observed using ball-on-3 ball test after thermal shock into the distilled water of 25°C. Crack distribution was also observed by dye-penetration after thermal shock test. Fracture probability of alumina ceramics by ball-on-3 ball test was studied and compared with that by 3-point bending test. The crack distance from the center of the specimen showed the stronger effect on the flexural strength by ball-on-3 ball test than the crack density.

**Key words :** Thermal shock, Ball-on-3 ball test, Bending strength

#### 1. 서 론

역학적 하중조건하에서 취성 재료의 통계학적 파괴 이론은 많이 연구되어 왔다.<sup>1)</sup> 반면에 열충격 후 강도 변화의 통계학적인 분석에 관해서는 아직까지 그렇게 많은 연구가 이루어지지 않았다. 또한, 열충격 후 시편의 강도 측정방법은 지금까지 3점 또는 4점 꺾임 강도 시험법으로 행해져왔다.<sup>2)</sup> 그러나, 이러한 일축 강도 측정 법에 의해서는, 시편에 평행한 균열들이 있을 경우에 강도 저하를 일으키지 않는 단점이 보고되어지고 있는데, 이러한 점은 정확한 강도를 측정하는데 많은 어려움이 있다.<sup>3)</sup> 이에 반해 이축 강도 측정에 있어서는 tangential stress와 radial stress의 두가지 응력이 시편에 작용함으로써 좀더 정확한 강도측정을 할 수 있으며, 모서리 파괴 등을 막을 수 있고, 실제 다축의 하중을 받게 되는 일반적인 재료의 해석에 적합하며 사용시편의 제작이 용이하다.<sup>4)</sup>

Fig 1은 3점 꺾임 시험과 이축 강도 시험 방법에서 시

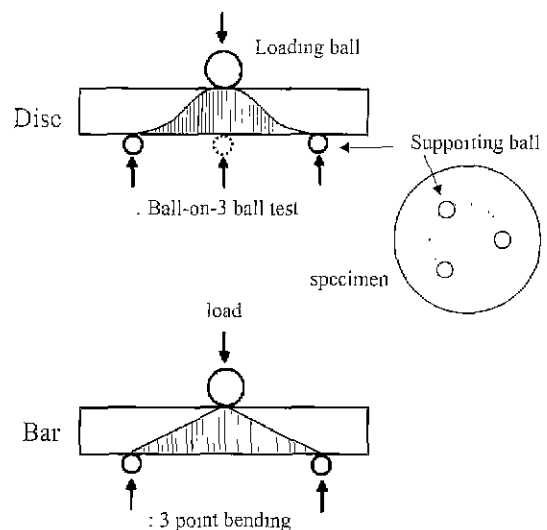


Fig. 1. Effective stress distribution for three-point bending and ball-on-3 ball test specimens.

편에 미치는 응력 분포를 모식적으로 나타낸 그림이다. 실제 구조재료로서의 세라믹스는 다축 하중을 받기 때문에 실제 강도 측정에서도 다축 강도에 대한 실험과 그 결과의 고찰이 요구되는 것은 당연한 일이다. 이러한 장점을 가진 이축 강도 측정방법에는 ball-on-ring, piston-on-3 ball, ring-on-ring 등 3가지 측정방법이 주로 연구되어 왔는데<sup>6)</sup> 이러한 방법들 중 이번 실험에서는 ball-on-3 ball test를 사용하여 알루미늄 시편의 열충격 후 강도를 측정하여 강도변화를 측정하여 보았다. 강도 측정 후 강도의 분포를 살펴본 결과, 그 분포는 일반적으로 열충격 후 측정되는 알루미늄 세라믹스 강도가 보여주는 일반적인 분포<sup>7)</sup>를 보여주지만, 급격한 강도 저하가 일어나는 부근에서도 온도차를 적게하여 강도의 분포를 살펴본 결과 평균 강도의 단계적인 저하가 일어남을 관찰할 수 있었다. 따라서, 초기 강도를 유지하는 영역(region I), 시편들의 평균 강도가 단계적으로 감소하는 영역(region II), 그리고, 전체 측정 시편들의 강도가 모두 저하된 영역(region III) 등으로 나눌 수 있는데, 강도의 저하가 현저하게 나타나는 region II를 관찰하는 것은 매우 흥미로운 일이다.

국내에서는 disc형 시편을 통해 ball-on-3 ball test로 강도시험을 하는 것은 아직 보편화 되어 있지 않으므로, disc형 시편에서 강도에 미치는 여러 가지 영향을 고려해 보는 것은 앞으로 새로운 강도 테스트로서의 ball-on-3 ball test를 채택하는데 있어서 기본적인 특성 평가로서 의의가 있다고 생각된다. 이번 연구에서는 이 영역에서 disc 시편의 열충격 손상정도와 균열 등을 관찰하였고, ball-on-3 ball test로써 강도를 측정 후 강도에 미치는 영향 중 시편 중심에서부터 가장 가까운 균열까지의 거리와 균열밀도의 영향을 고찰해 보았다. 또한, 통계적인 파괴 확률법을 제시하여 3점 꺾임 강도 측정법과 비교 하였다.

## 2. 실험방법

이번 열충격 실험에는 상용 알루미늄 분말(AES-11, Sumitomo, Japan)을 이용하여 1600°C 1시간 소결하여 두께 2.06 mm, 지름 20 mm의 disc형 시편을 제작하였으며 이 시편의 물성은 Table 1에 나타내었다. 또한 3점 꺾임 강도측정에 사용된 시편은 4×4×35 mm의 직육면체형 시편을 사용하였고, span 길이는 30 mm이었다. 시편을 고온으로 가열하고 액체 냉매로 냉방하는 열충격 시험은 자체 제작한 열충격 시험 장치를 사용하였다.<sup>8)</sup> 급냉을 위한 냉매로는 25°C의 증류수를 사용하였다. 실험에 사용한 열충격 장치는 시편의 냉각과 가열을 ±2°C의 작은 오차범위 내에서 제어 할 수 있으므로 기존의 연구

Table 1. The Properties of Alumina Ceramics

Property	Value
Four Point Bending Strength	360±23 MPa
Fracture Toughness	3.91±0.15 MPa·m <sup>1/2</sup>
Density	3.91±0.01 g/cm <sup>3</sup> (98.2%)
Grain size	2.3 μm
Elastic Modulus	330±29 GPa

브로그들보다 훨씬 짧은 온도간격인 10°C의 온도차를 증가시켜 가면서 잔류 강도의 변화를 ball-on-3 ball test로써 측정하였다. 각 열충격 실험에서 시편의 가열 시간은 15 분, 냉각 시간은 2분으로 하였다. 열충격을 가한 시편은 열풍 건조기를 이용하여 수분을 건조한 후 탄능 재료 시험기(H10K-C, Hounsfield, U. K.)를 이용하여 ball-on-3 ball test를 행하였다. Down speed의 결정은 ASTM 표준 그래프에 의거하여 결정하였다.<sup>9)</sup>

열충격을 가한 시편에 발생한 균열을 관찰하기 위하여 1406 kgf/cm<sup>2</sup> (20000 psi) 압력의 냉간 정수압 형성법으로 시편에 염료를 침투시켜 광학 현미경으로 관찰하는 염료 침투법을 사용하였다. 이것은 주사 전자 현미경이나 광학 현미경의 직접 관찰과 같은 기존의 균열 관찰법으로는 균열의 발생 및 성장 양상을 확인할 수 없었기 때문이다.

시편의 아랫부분에 인장응력이 걸리기 때문에 균열까지의 거리는 최대 인장응력이 걸리는 시편의 아래면 중심에서부터 가장 가까운 균열까지의 거리를 측정하여 계산하고, 균열밀도는 Mendelson<sup>12)</sup> 등에 의해 소개되었듯이, 시편표면에 일장간격(1 mm)의 선을 그은 후 그 선에 교차하는 균열의 개수를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. Ball-on-3 ball test를 통한 강도 시험

Fig. 2는 ball-on-3 ball test를 통한 강도 시험을 통해 분석한 강도의 분포를 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 온도차가 220°C까지는 시편들이 초기 강도를 거의 유지하는 것으로 나타났다. 그러나, 그 이상의 온도차에서는 온도차가 270°C가 될 때까지 단계적인 평균 강도의 저하를 보여주는 것을 볼 수 있다. 즉, 엄격히 초기 강도를 유지하는 영역 (region I)과 평균 강도의 단계적인 저하를 보여주는 영역 (region II), 그리고, 측정 시편 모두가 강도의 저하를 보여주는 영역 (region III)으로 명확히 구분되어짐을 알 수 있다. 이러한 강도의 분포는 일반적인 알루미늄 세라믹스의 열충격 거동 모습으로서 지금까지의 논문에서 보는 바와 같은 모습이다.<sup>4)</sup>

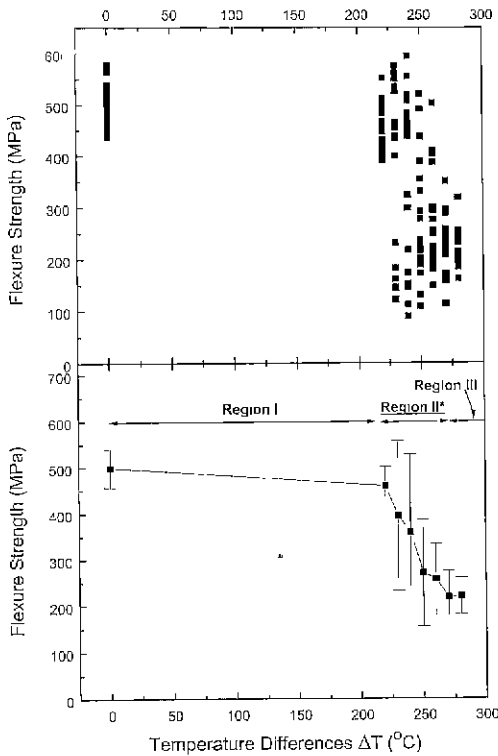


Fig. 2. Retained strengths after thermal shock test.

Fig 3는 region II에서의 강도 분포를 기초로 하여 각 온도차에 따른 Weibull distribution을 보여 준다. 온도차가 커짐에 따라 강도의 분포 폭이 커지다가 다시 온도차가 어느 정도로 커지면 되면 모든 시편의 강도가 저하되면서 그 강도폭도 좁아짐을 쉽게 확인 할 수 있다. 이 영역에서의 온도차에서 열충격은 시편의 일부분이 파괴되도록 하고, 그로 인해 평균 잔류강도가 감소함으로써 강도의 분포가 커지게 된다. 마지막으로 높은 온도차에서 모든 시편들은 열충격에 의해 파괴강도가 낮아지고 강도 편차 역시 적어진다. 열충격 파괴가 일어나는 온도(임계 열충격 온도차,  $\Delta T_c$ )는 분명하게 나타나지는 않는다. 따라서, 임계 열충격 온도차는 통계학적으로 정할 수가 있는데, Awaji등<sup>3)</sup>은 통계학적으로 이 온도를 결정할 바가 있다.

Fig. 4(a) 사진은 이번 실험에 사용한 disc 시편의 열충격후 염료 침투법으로 균열을 관찰한 사진과 그 시편을 강도 실험 한 후의 모습이다. ball-on-3 ball test의 경우 시편의 중심이 가장 큰 하중을 받게 되는데,<sup>10)</sup> 강도 실험 후 균열의 시작도 시편의 중심에서 시작하여 열충격을 받아 형성된 균열을 따라 진행됨을 보여준다. (b)와 (c) 사진은 각각 일축 강도 실험 전 후의 막대형 시편들인데 시편의 강도 저하에 영향을 미치지 않는 중방향 균

요입확회지

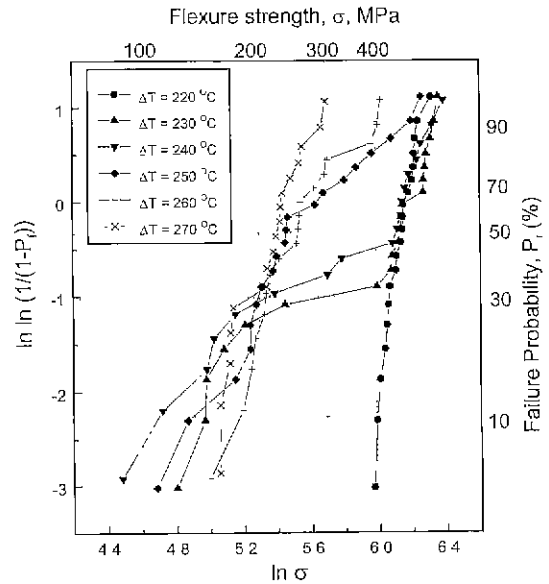


Fig. 3. Retained strengths of thermal-shocked alumina specimens at various temperature differences.

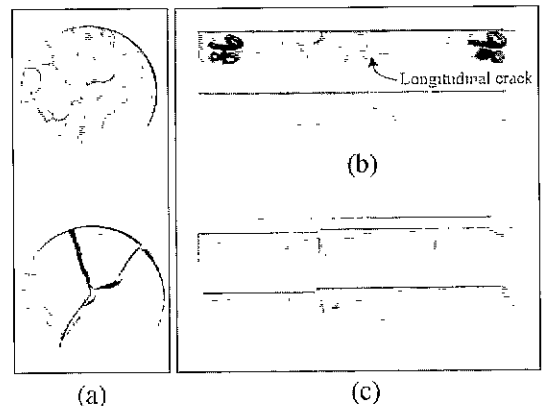


Fig. 4. Optical photographs of the thermal shocked specimens observed by dye penetration method : (a) disc-type specimen for ball-on-3 ball test, (b) bar-type specimens for 3 point bending test and (c) bar-type specimens fractured by 3point bending test.

열(longitudinal crack)을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 염료침투법에 의한 시편의 단면의 모양을 나타내고 있는데, 대부분의 시편의 경우 열충격 후 시편의 잔류강도에 영향을 주는 수직 균열(vertical crack)이 시편의 중심으로 약 1/3~1/4 만큼만 진행하고 있음을 볼 수 있었다. 이는 열충격에 의한 인장응력에 의해 시편의 균열이 진행되지만, 균열의 성장은 시편 내부에 형성되는 압축응력에 의해 그 이상 성장하지 못하고 멈추게 되기 때문이다. 시편내에서의 응력분포는 시편이 빠른 속

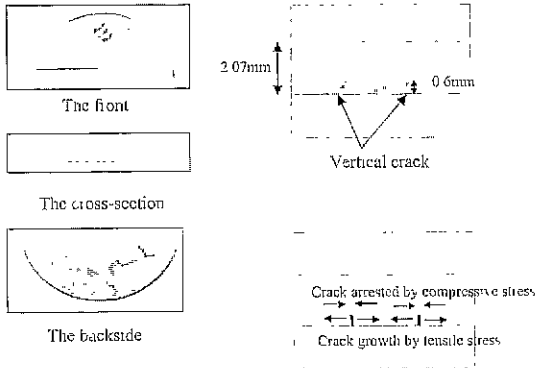


Fig. 5. Vertical crack growth induced by thermal shock. Retained strength was 257.4 MPa at  $\Delta T=270$ .

도로 냉각될 때는 미처 냉각되지 못하여 온도가 높은 내부에 의해 낮은 온도의 시편 표면의 수축이 방해되어 표면에는 인장 응력이 발생하며 내부에는 압축 응력이 작용하게 된다. 이러한 사실에 의해 Fig. 2의 region II와 region III에서 균열 밀도가 증가하여도 강도에는 큰 영향을 미치지 않는 시편이 많은 것을 보여준다고 할 수 있다.<sup>4</sup>

### 3.2. 시편의 중심에서 균열까지의 거리와 균열 밀도가 시편의 잔류강도에 미치는 영향

열충격 후 시편의 잔류강도에 미치는 영향은 균열밀도, 균열의 방향, 강도를 측정할 때 실험 분위기 등 여러 요소가 있겠지만, ball-on-3 ball test에서 시편에 미치는 응력분포를 유한 요소법으로 분석을 해 본 결과<sup>10)</sup> 가장 큰 하중을 받는 부분인 시편 중심에서부터 균열까지의 거리와, 균열 밀도 등이 가장 크게 시편의 잔류강도에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 이러한 요소들과 잔류강도와의 관계를 분석하는데, 통계학적인 방법으로 R-square(결정계수)를 도입하였다.<sup>12)</sup> 이 값은 종속변수(잔류 강도)가 독립변수(균열까지의 거리, 균열 밀도)에 선형적으로 영향을 미친다는 가정 하에 어느 정도 상관 관계를 가지고 영향을 미치는 지를 보여주는 값으로서, least square method로 결정된 직선에 강도의 분포가 어느 정도 따르느냐가 그 값을 결정해 주는 것으로서 결정 계수가 클수록 두 변수의 상관 관계가 크다고 할 수 있다.<sup>11)</sup>

Fig. 6의 (a)는 시편의 중심에서 균열까지의 거리가 시편의 잔류강도에 미치는 영향을 보여주는 그림으로서, 결정계수는 0.767로서 균열까지의 거리가 전체 잔류강도에 미치는 변수들의 영향 중 약 76%정도에 해당한다고 할 수 있다 이 직선에 대한 p-value 또한,  $8.78015 \times 10^{-3}$ 로써 유의 수준 0.05보다 훨씬 작은 값으로서 거의 선형적으로 영향을 미친다고 할 수 있다. 반면

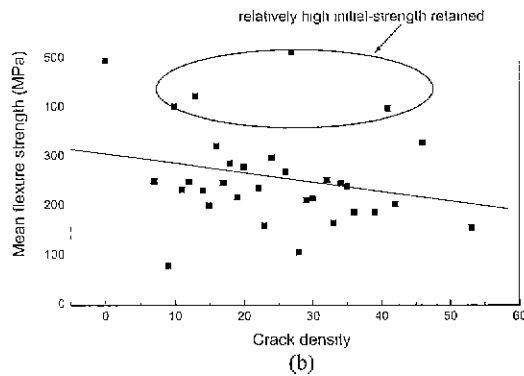
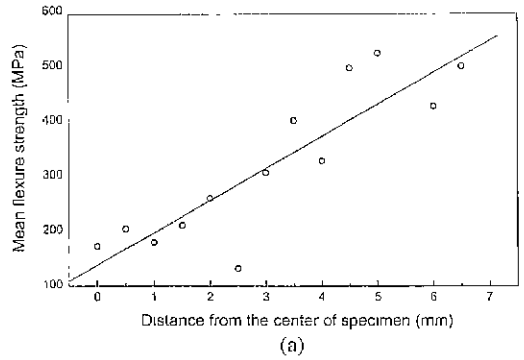
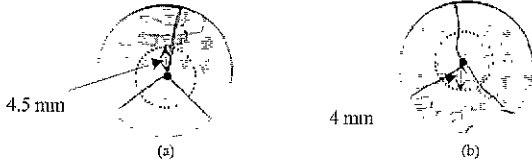


Fig. 6. Biaxial flexure strength as a function of (a) crack distance from the center of the specimen and (b) crack density.

에 (b)는 균열밀도<sup>12)</sup>가 열충격 후 시편의 잔류 강도에 미치는 영향을 보여주는 그림으로서, 균열 밀도의 증가가 강도에 영향을 거의 미치지 않음을 쉽게 알 수 있다. 균열 밀도가 상대적으로 많은 시편에서도 초기 강도를 유지하는 시편을 관찰 할 수 있었다 통계학적으로 구해본 결정 계수 값도 0.06(6%)으로서 균열까지의 거리 보다는 훨씬 적은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서, ball-on-3 ball test에서 열충격 후 잔류강도의 측정시 시편중심으로부터 균열이 어느 정도 떨어져 있느냐가 시편의 잔류 강도에 절대적인 영향을 미친다고 말할 수 있다. 주의할 것은 여기서 말하는 균열밀도라는 것은 균열이 존재하는 위치와 상관없이 한 개의 시편당 존재하는 평균 균열 밀도로서 균열의 위치는 고려되지 않은 값이고, 균열의 위치에 관한 관계는 위에서 논의한 바 있다.

Fig. 7은 상대적으로 균열밀도가 큼에도 불구하고 초기 강도를 유지하는 시편을 보여준다. 이는 균열의 밀도 보다는 시편의 중심에서 가장 가까운 균열까지의 거리가 더 큰 영향을 미치고 있음을 보여준다. 따라서, 위에서 말한 결정 계수를 이용한 통계학적 방법 외에도 시편 중



**Fig. 7.** Optical photographs of the specimens having relatively high crack densities and maintaining the initial strength after thermal shock; (a) flexure strength was 514.7 MPa at  $\Delta T=240^\circ\text{C}$  and (b) flexure strength was 415.3 MPa at  $\Delta T=240^\circ\text{C}$ .

십에서의 거리가 멀어질수록 실제 시편에 미치는 응력의 분포와 시편의 파괴 확률을 비교해보는 것은 흥미로운 일이다.

Fig. 8은 응력분포<sup>10)</sup>와 파괴 확률과의 관계를 보여주는 데 어느 정도의 편차를 보여주는 하지만, 비슷한 경향을 보여준다 이 그림은 거리의 변화, 즉  $\sigma$ 의 변화에 따른 파괴 강도와 파괴 확률의 변화라고 볼 수도 있다. 여기에서 나오는 편차는 시편의 응력이 잔류강도에 미치는 영향 외에 시편 내에 상대적으로 존재할 수 있는 큰 결함등의 영향이라고 생각할 수 있다

**3.3. 열충격 와이불 선도 (Thermal shock Weibull plot)**

Fig. 2에서 보듯이 region I에 해당하는 시편들은 모두 초기강도를 유지하고 있다고 볼 수 있고, region III에 해당하는 시편들은 모두 열충격을 받아 잔류강도가 현저히 떨어진 것들이라고 말할 수 있지만, region II에서 시편의 잔류강도를 관찰해 보면 상대적으로 초기 강도를 유지하는 시편들도 있고 반면에 열충격을 완전히 받아

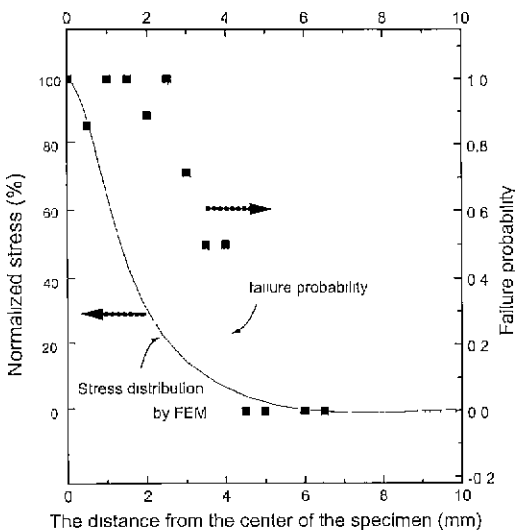
잔류강도가 매우 낮은 시편들도 있다. 따라서, 이 영역에서 각 온도차에 따라 어느 정도 파괴가 되었는지를 알기 위해서는 파괴 확률을 계산하는 것이 필요하다. 일반적으로 와이불 선도(Weibull plot)는 Weibull 분포함수를 따르는 균열 분포를 갖는 재료의 응력에 따른 파괴 확률을 나타내기 위한 것이다. 따라서, 시편이 열충격을 받은 후 열응력에 의해 발생한 균열들의 거동에 의해 시편이 파괴를 일으킨다면, 열충격 온도차를 이용하여 세라믹스의 열충격 거동을 와이불 선도를 이용해서 나타낼 수 있을 것이다.<sup>4)</sup>

시편의 기계적 응력에 따른 와이불 선도를 그리기 위해서는 측정된 강도 값을 이용해 파괴확률  $P_f$ 를 구하지만, 열충격 시험에서는 각 온도차 별로 파괴확률을 구하는데 통계적인 방법을 도입해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 다음의 파괴 확률을 구하는 방법을 통해 각 온도차에서의 파괴 확률을 계산하였다. 온도차의 범위는 평균 강도가 변하는 region II, 즉, 온도차 220~270°C 사이의 시편들의 강도 변화를 대상으로 하였다.

$$failure = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^n N_i$$

여기서  $n$ 은 파괴확률을 측정하고자 하는 온도차에서 열충격 실험에 사용된 시편의 개수,  $i$ 는 시편의 번호,  $N_i$ 는 각 시편의 잔류 강도값에 따라 1, 0.5, 또는 0값을 가질 수 있다.  $N_i$ 는 다음의 방법으로 계산을 하였다. 초기 강도를 유지한다고 볼 수 있는  $\Delta T=220^\circ\text{C}$ 에서의 강도 분포를 Weibull plot 한 후 5%에 해당하는 강도를 구한 다음, 그 이상의 강도를 가지는 시편들은 초기 강도를 유지하는 시편들로 간주하여  $N_i$ 를 '0'으로 부여하고,  $\Delta T=270^\circ\text{C}$ 에서의 강도 분포를 Weibull plot을 한 후 95%에 해당하는 강도를 구한 다음, 그 이하의 강도를 가지는 시편들은 완전히 열충격을 받아 강도가 저하된 시편들로 간주하여  $N_i$ 를 '1'로 부여하고, 위에서 구한 두 강도값 사이의 강도를 가지는 시편들은  $N_i$ 를 '0.5'로 부여하여 각각의 온도차에서 파괴확률을 계산하였다.

Fig. 9는 이렇게 구한 파괴확률을 바탕으로 각 온도차에서 파괴확률을 구해 소위 열충격 와이불 선도(thermal shock Weibull plot)으로 나타낸 그림이다. 같은 시편을 대상으로 3점 꺾임 강도로 측정된 강도 값에 대해<sup>4)</sup> 위 방법으로 파괴확률을 구해 함께 나타내었다 그림에서 알 수 있듯이 모든 온도차 구간에서 ball-on-3 ball test의 경우가 3점 꺾임 강도 측정법의 경우보다 파괴확률이 높게 나오는 것을 볼 수 있다. 또한, 기울기인 열충격 와이불 계수,  $m_p$ 는 온도차의 변화에 따라 파괴확률의 변화의 정도를 나타내는데, ball-on-3 ball test의 경우 더 큰 값을 가졌고, 이는 3점 꺾임 강도 측정법에서



**Fig. 8.** Comparison of radial stress by the finite element model with failure probability by ball-on-3-ball test.

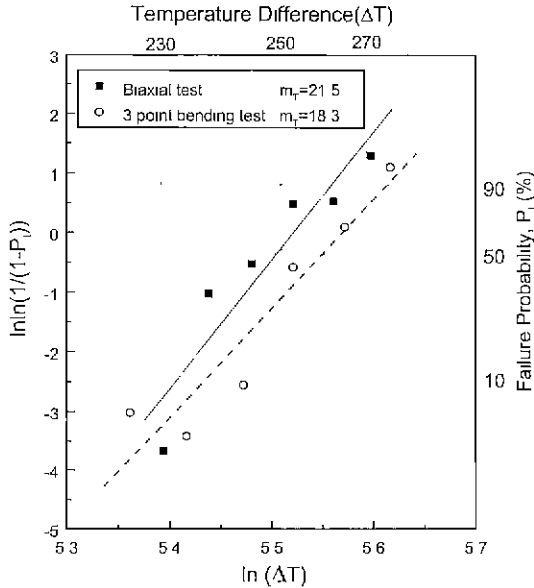


Fig. 9. Thermal shock Weibull plot for failure probability of thermal shock temperature difference.

보다 같은 시편을 사용했을 경우, 더 좁은 온도차의 범위에서 시편들이 완전히 열충격을 받아 강도가 완전히 저하되었음을 보여준다. 이는 시편에 응력이 이축으로 작용하는 biaxial test의 경우가 시편 내부의 균열을 잘 찾아내어 강도 저하에 기여시키고 있음을 증명하는 것이다. 더 나아가 강도 실험 장치로서의 신뢰성 여부로 볼 때, biaxial test의 우수성을 나타내는 증거라고 할 수 있다.

Fig. 9는 강도의 분포를 보여주고 재료의 신뢰성을 나타내는 와이블 선도(Weibull plot)과는 다르게 해석되어야 하므로 이를 "열충격 와이블 선도"이라 하였다. 이 그림을 통해 온도차에 따라 파괴확률의 변화를 계산할 수 있다 또한, 실험 재료를 달리 하였을 경우에도 그 재료의 region II에서의 고유 특성을 보여 줄 수 있는 그림으로서, 열충격 와이블 계수,  $m_T$  등을 물질 특성 값으로 간주 할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

알루미늄 시편을 열충격 후 잔류강도를 측정해 오던 기존의 방법인 일축 쥘임 강도 측정 방법과는 달리 이번 실험에서는 이축강도 측정법인 ball-on-3 ball test를 사용하여 시편의 잔류 강도를 측정하였다.

온도차의 간격을 10°C로 하였을 경우 강도 분포의 모습을 보면 온도차 220°C와 270°C사이에서 일반적으로 보여주는 강도의 점진적인 저하를 보여주었고, 그 이후

의 온도에서 시편은 열충격을 완전히 받아 강도가 저하되었다. Ball-on-3 ball test에서 disc형 시편의 열충격 후 잔류강도에 영향을 미치는 요소를 통계적으로 분석한 결과, 하중을 가장 많이 받는 시편 중심에서부터 가장 가까운 균열까지의 거리의 영향이 가장 크게 작용함을 알 수 있었고, 균열 밀도는 잔류강도에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

또한, 각 온도차 별로 파괴확률을 통계적으로 계산하여 열충격 와이블 선도를 제시하였고, 이를 바탕으로 3점 쥘임 강도법과 비교한 결과 ball-on-3 ball test의 경우가 3점 쥘임 강도법에 비하여 region II의 모든 온도차에서 파괴확률이 높게 나타났고, 기울기,  $m_T$ , 또한 더욱 큰 값을 나타내었다.

이로서 3점 쥘임 강도 측정법으로 측정할 때보다 ball-on-3 ball test에 의해서 상대적으로 보다 작은 온도차 범위에서 열충격을 완전히 받아 잔류강도의 분포가 낮아짐을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 1999년도 한국과학기술원 재료계면공학 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. A. G. Evans, "A General Approach for the Statistical Analysis of Multiaxial Fracture," *J. Am. Ceram. Soc.*, **61**(7), 355-358 (1978)
2. D. P. H. Hasselman, "Strength Behavior of Polycrystalline Alumina Subjected to Thermal Shock" *J. Am. Ceram. Soc.*, **53**(9), 490-495 (1970).
3. H. Awaji, S. Honda and T. Nishikawa, "Statistical Approach to Strength Degradation Analysis during Water Quenching," *J. Ceram. Soc. Japan*, **106**(6), 551-554 (1998).
4. 한봉석, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹스의 열충격 파괴거동과 열응력 해석" 박사학위논문, 연세대학교, 1997.
5. K. C. Radford F. F. Lange, "Loading(L) Factors for the biaxial Flexure Test," *J. Am. Ceram. Soc.*, **61**(5-6), 211-213 (1977).
6. D. K. Shetty, A. R. Rosenfield, P. McGuire, G. K. Bansal, and W. H. Duckworth "Biaxial Flexure Tests for Ceramics," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **59**(12), 1193-1197 (1980).
7. D. P. H. Hasselman, "Strength Behavior of Polycrystalline Alumina Subjected to Thermal Shock," *J. Am. Ceram. Soc.*, **53**(9), 490-495 (1970).
8. 정우찬, 한봉석, 이홍림, 이형직, "알루미늄 세라믹스의

- 열피로 거동,” *요업학회지*, **35**(10), 1094-1100 (1998).
9. ASTM standard F394-78. pp. 466-490 in ASTM Annual Book of Standards Vol. 15.02, section 15. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1996).
  10. 박성은, 이중현, 이홍림, “Ball-on-3-Ball 시험에서 이축강도의 결정.” *요업학회지*, **36**(3), 225-230 (1999)
  11. 성용현, 최영훈, 이승천, 박동련, 변종석, “STATISTICA를 이용한 통계정보분석.” pp. 210-238, 도서출판 탐진. (1998).
  12. M. I. Mendelson, “Average Grain Size in Polycrystalline Ceramics,” *J Am Ceram Soc.*, **52**(8), 443-446 (1969)