

Al₂O₃ 세라믹스 열충격에 미치는 냉각 조건의 영향

한봉석 · 이홍림 · 전명철*

연세대학교 세라믹공학과

*포항산업과학연구원 기능세라믹스팀

(1997년 6월 16일 접수)

Effect of Cooling Rate on Thermal Shock Behavior of Alumina Ceramics

Bong Seok Hahn, Hong Lim Lee and Myong Chuel Jun*

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

*Functional Ceramics Team, Research Institute of Industrial Sciences

& Technology at Pohang, Korea

(Received June 16, 1997)

요 약

세라믹스의 열충격 거동에 미치는 냉각 조건 변화의 영향을 알아보기 위하여 냉매로 사용되는 물의 온도를 변화시키면서 Al₂O₃ 세라믹스에 대한 열충격 실험을 하였다. 일체 열충격 온도차와 시편의 냉각 속도를 측정하고 냉매인 물의 온도와 냉각 속도가 알루미늄 세라믹스의 열충격 거동에 미치는 영향을 관찰하였다. 물의 온도가 0°C~60°C인 범위에서는 물의 온도가 증가하면 대류 열전달계수가 증가하므로 알루미늄 세라믹스의 최대 냉각속도가 증가하게 되고 이에따라 열용량이 증가하여 일체 열충격 온도차이는 275°C로부터 200°C까지 선형적으로 감소하는 현상을 나타내었다. 한편, 물의 온도가 80°C~100°C인 범위에서는 끓음현상(film boiling)으로 인하여 대류 열전달계수가 급격하게 감소하여 일체 열충격 온도차이가 200°C로부터 250°C까지 급격하게 증가하는 현상이 관찰되었다. 따라서 알루미늄 세라믹스의 열충격 거동은 물의 온도에 따른 시편 냉각속도에 크게 의존함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Thermal shock behavior of alumina ceramics were studied by quenching the heated alumina specimen into the water of various temperatures over 0~100°C. The critical thermal shock temperature difference (ΔT_c) of the specimen decreased almost linearly from 275°C to 200°C with increase in the cooling water temperature over 0~60°C. It is probably due to the increase of the maximum cooling rate which is dependent of the convection heat transfer coefficient. The convection heat transfer coefficient is a function of the temperature of the cooling water. However, the critical thermal shock temperature difference(ΔT_c) of the specimen increased to 250°C over 80~100°C due to the film boiling of the cooling water. The maximum cooling rate, which brings about the maximum thermal stress of the specimen in the cooling process, was observed to increase linearly with the increase in the quenching temperature difference of the specimen due to the linear relationship of the convection heat transfer coefficient with the water temperature over 0~60°C. The critical maximum cooling rate for thermal shock fracture was observed almost constant to be about $260 \pm 10^\circ\text{C/s}$ for all water temperatures over 0~60°C. Therefore, thermal shock behavior of alumina ceramics is greatly influenced by the convection heat transfer coefficient of the cooling water.

Key words : Thermal shock, Cooling rate, Thermal stress, Convection heat transfer coefficient.

1. 서 론

세라믹스가 고온 구조재료로 사용되기 위해서는 꺾임 강도, 파괴인성, 경도와 내화학성등의 물성이 우수해야 함은 물론, 이외에도 안정적인 고온 물성과 열충격 저항성을 가지고 있어야 한다. 이러한 특성들 중에서 열충격 저항성은 재료의 신뢰성이란 측면에서 고온 강도나 열적 안정성과 같은 고온 물성과 함께 매우 중요하다. 세라믹스의 열충격에 대한 연구는 Kingery등¹⁾을 시작으로 열충격 과정에서 발생하는 열응력의 크기와 세라믹스가 견딜수 있는 임계 열충격 온도차와 열충격 저항성에 대해서 중점적으로 연구되어왔다. 그러나, 고온 구조용 세라믹스가 실용화되기 위해서는 열적 사용 환경과 열충격 거동에 대한 직접적인 데이터가 필요하므로 재료 자체의 열충격 특성과 함께 열충격을 발생시키는 열적 환경에 대한 연구가 필요하다.

Hasselmann등²⁾은 열응력에 미치는 열전달 계수의 영향에 대해서 연구하는 과정에서 세라믹스의 열충격과 열전달 계수와의 관계를 수식화하는 연구를 하였으며 Becher등³⁾도 물의 온도에 따른 열충격의 영향에 대해서 연구하였다. 이밖에도 Nashikawa를 비롯한 연구자들^{4,5)}은 열충격의 열적 환경 요인인 열전달에 대해서 Biot number를 이용한 접근을 시도하였으며 최근에는 컴퓨터를 이용한 수치해석적인 방법도 여러 방면으로 시도되고 있다. 그러나 아직까지 열충격을 발생시키는 직접적인 원인인 시편의 냉각속도를 비롯한 냉매의 냉각 환경이 세라믹스의 열충격에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 세라믹스의 열응력은 시편의 냉각 속도와 같은 냉각 또는 가열 환경에 의해서 큰 영향을 받으므로 열적 환경 변화에 대한 세라믹스의 거동에 관한 연구는 세라믹스의 실용화를 위하여 중요한 기초 연구가 될 것이다.

본 연구에서는 Al_2O_3 세라믹스에 미치는 냉매의 대류 열전달 계수에 의한 영향을 알아보기 위하여 물의 온도를 변화시키면서 열충격 실험을 행하고 강도 저하가 발생하는 임계 열충격 온도차를 관찰하였으며, 그 결과를 물의 온도에 따른 대류 열전달 계수 변화와 함께 고찰하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 열충격에 의한 열응력

세라믹스의 열충격은 시편의 냉각 또는 가열 과정에서 일어나는 급격한 온도 변화에 의한 열응력에 의해 발생하며 열응력은 시편내부와 외부의 열전달 조건 차에 의한 온도구배에 기인한다. 세라믹스의 열충격 실험에

서는 고온으로 가열한 세라믹스 시편을 저온의 냉매 속으로 떨어뜨려서 냉각하는 급냉법이 많이 사용되며 냉매로는 상온의 물이 가장 많이 사용된다.

고온(T_1)의 시편이 저온(T_0)의 냉매에 의해 충분히 빠른 속도로 냉각되는 급격한 열변화 조건에서 발생하는 열응력(σ)은 일반적으로 Eq.(1)으로 나타내고 있다.⁶⁾

$$\sigma = \frac{Ea(T_1 - T_0)}{1 - \mu} \quad (1)$$

이때 E는 시편의 영률, a는 열팽창계수이며 μ 는 포아손 비이다. 열충격 과정에서 발생하는 열응력(σ)이 시편의 파괴 강도인 σ_c 보다 크면 시편이 파괴를 일으킬 수 있는 조건을 만족시킨다. 이때의 열충격 온도차는 시편이 견딜 수 있는 최대 열충격 온도차를 나타내며 이를 임계 열충격 온도차(ΔT_c)라고 부른다. 실제로 세라믹스의 열충격 실험에서는 시편이 임계 열충격 온도차 조건에서 열충격을 받더라도 직접적인 시편의 파괴가 일어나지는 않으므로 열충격 실험 후 꺾임강도 실험결과에서 급격한 강도 저하가 일어나는 온도차를 임계 열충격 온도차로 나타내고 있다.⁷⁾

열충격 실험 조건에서 시편이 일정한 속도로 냉각되는 경우에는 Eq.(1)에서 열충격 온도차를 표시하는 ($T_1 - T_0$)항 대신 시편의 냉각 속도를 표시하는 항을 대입하여 Eq.(2)와 같이 나타낸다.⁶⁾

$$\sigma = \frac{Ea}{1 - \mu} \frac{\phi \gamma_m^2}{3\alpha} \quad (2)$$

이때 ϕ 는 시편의 냉각 속도, γ_m 은 시편의 형상 계수, α 는 열확산계수이다.

2.2. 시편 냉각 속도와 열응력

세라믹스의 열충격 실험에서 시편의 온도(T_1)로부터 냉매의 온도(T_0)로 냉각될 때 시편의 표면 냉각은 냉매와 시편 사이의 대류 열전달 기구에 의해서 이루어지며 고체와 액체 사이의 계면에서 시편 표면으로부터 냉매에 전달되는 대류 열 흐름 속도(q)는 Eq.(3)에 의해서 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$q = h(T_1 - T_0) \quad (3)$$

이때 h는 액체 냉매의 대류 열전달 계수로 유체의 대류 형태에 영향을 미치는 모든 효과를 포괄하는 비례 상수를 나타낸다. 대류 열전달 계수 h의 값은 유체의 종류에 따라 일정한 값이 있는 것이 아니며 시편의 열충격 실험과 같은 열전달 형태를 가정할 때 시편의 표면 상태나 기하학적 모양과 크기, 냉매 안에서 시편과 유체의 상대적 이동 속도, 유체의 흐름과 같은 여러 가지 복잡

한 조건에 의해 결정되므로 실제 측정값이나 이론값을 구하기가 매우 어렵다.

대류에 의한 시편 표면 온도의 냉각 속도는 냉매와 시편 표면 사이의 열흐름 속도에 의해서 결정되므로 열충격 조건에서 발생하는 열응력(σ)과 열흐름 속도(q) 사이에는 Eq.(4)와 같은 관계가 성립한다.

$$\sigma \propto q = h(T_s - T_0) \quad (4)$$

따라서 Eq.(1), Eq.(2), Eq.(3) 및 Eq.(4)로부터 여러 가지의 열충격 조건에서 세라믹스 표면에 발생하는 열응력은 냉각 속도, 냉매와 시편 사이의 대류 열전달 계수 및 온도차이에 비례함을 알 수 있다.

2.3. 물에 의한 열충격 조건 변화

열충격 실험의 냉매로 가장 널리 사용되는 물은 다른 액체들에 비해 높은 열전달 계수를 가지고 있다. 그러므로 물을 이용한 열충격 실험은 급격한 냉각으로 분류되어 열응력 계산에 냉각 속도를 고려하지 않는 Eq.(1)을 적용한다. 그러나, 물은 높은 열전달 계수를 가지고 있는 액체이지만 h 가 온도에 따라 큰 변화를 보이며 고온의 시편이 물과 접촉할 경우에는 끓음 현상이 일어나므로 매우 복잡한 열적 환경 변화를 나타낸다.⁹⁾

고온의 시편이 저온의 물에 의해 급냉되는 경우에 시편에 작용하는 물의 대류 열전달 계수 h 의 변화는 여러 연구자에 의해 연구되었으며 Fig. 1에 나타난 바와 같이 다음과 같은 3가지 영역으로 구분될 수 있다.⁹⁾

Region I : Free convection 영역

이 영역에서는 물의 온도가 올라가면 물의 밀도, 비열, 열전달 계수의 변화에 따라 대류가 일어나며 대류 열전달 계수 h 값이 증가한다.

Region II : Nucleate boiling 영역

이 영역에서는 끓는점에 도달한 액체가 시편의 표면에서 끓음 핵인 기포를 발생시키며 끓음 현상에 의한 기포 상승으로 활발한 대류 현상이 발생하여 h 값이 더욱 증가한다.

Region III : Film boiling 영역

이 영역에서는 활발한 끓음 현상에 의해 시편 표면에 일시적인 기포의 막이 생성되며 기포의 막은 시편과 액체와의 열교환을 방해하므로 대류 열전달 계수 h 값이 감소한다.

Fig. 1의 대류 열전달 계수 변화는 시편과 물의 온도차에 따라서 나타낸 것이지만 열충격 온도차를 일정하게 유지하는 경우에는 물의 온도에 따라 변화하는 값으로 나타낼 수도 있다.

물을 냉매로 이용하는 세라믹스의 열충격 실험에서 물의 대류 열전달 계수 h 가 Eq.(1)을 적용할만큼 충분

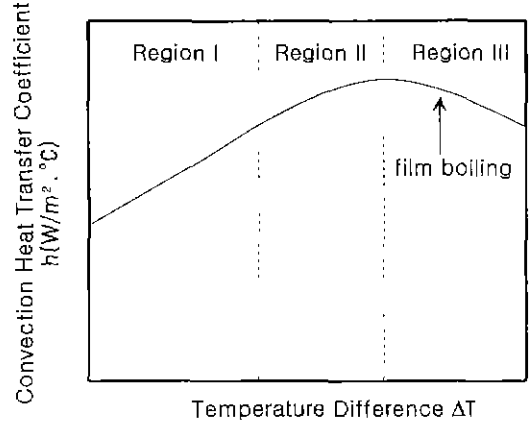


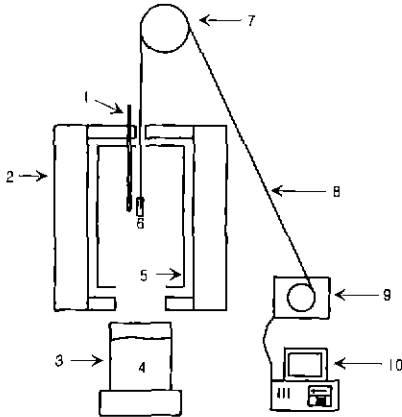
Fig. 1. Convection heat transfer coefficient as a function of temperature difference.

히 크지 않거나, 또는 충분히 큰 h 를 갖는 냉각 조건에서도, 냉각 속도 ϕ 가 시편에 발생하는 열응력에 큰 영향을 끼친다면 열응력 계산에는 냉각속도가 적용되는 Eq.(2)를 적용해야 한다. 그러므로, 물을 냉매로 이용하는 열충격 실험에서, 열응력 계산에 적용되는 대류 열전달 계수 h 는 물의 온도에 따라 변화하므로 같은 열충격 온도차(ΔT)를 갖는 조건에서도 발생하는 열응력의 크기는 물의 온도에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 Fig. 1에서 영역 I과 영역 II의 대류 열전달 계수 h 를 각각 h_I 과 h_{II} 라고 하고, 열응력을 각각 σ_I 과 σ_{II} 라고 할 때 $h_{II} > h_I$ 이므로 Eq.(4)에 의해 발생하는 열응력의 크기는 $\sigma_{II} > \sigma_I$ 로 나타나게 된다. 발생하는 열응력이 크면 낮은 열충격 온도차에서도 임계 열충격 온도차가 나타날 수 있으므로 $h_{II} > h_I$ 인 냉각 조건에서 임계 열충격 온도차는 $\Delta T_{cr} > T_{cr}$ 로 나타날 수 있게 된다.

3. 실험 방법

열충격 실험에 사용한 알루미늄 시편은 상용 알루미늄 분말(AES-11, sumitomo, Japan)을 이용하여 냉간 정수압 성형법(cold isostatic pressing)으로 성형한 후 1600°C에서 1시간 소결하여 제조하였다. 소결한 시편은 적입강도 측정을 위해 4×4×40 mm의 크기로 절단하고 시편의 표면에 존재하는 균열을 제거하기 위하여 표면을 600#의 다이아몬드 연삭기로 연마한 후 모서리 부분을 45°로 가공하였다. 제조한 시편의 밀도는 3.91 g/cm³이며 평균 강도값은 449 MPa이다.

물의 온도 변화에 따른 임계 열충격 온도차의 변화를 알아보기 위하여 냉매로 사용되는 물의 온도와 시편의 가열 온도를 조절하여 열충격 실험을 행하였다. 물의 온도는 각각 0, 20, 40, 50, 80, 100°C로 조절하였으며 각



- 1. thermocouple
- 2. refractory wall
- 3. bath
- 4. water
- 5. steel wall
- 6. specimen
- 7. pulley
- 8. steel wire
- 9. pully controller
- 10. control computer

Fig. 2. Schematic diagram of the thermal shock test machine.

온도의 물에서 열충격 실험을 행하였다. 열충격 실험의 시편은 900초간 가열하였으며 열충격 온도차가 175°C~300°C인 범위에서 25°C의 간격으로 시편 가열 온도를 결정하였다. 열충격 실험은 정확한 가열 온도와 시편 이송 시간, 냉각 시간을 유지할 수 있도록 제작한 열충격 실험 장치를 이용하였으며 열충격 실험 장치의 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 열충격 실험을 거친 시편은 물의 온도에 따른 임계 열충격 온도차를 구하기 위하여 만능 재료 시험기(H10K-C, Hounsfield, U.K.)를 이용하여 span 길이 30 mm, cross head speed 0.5 mm/min의 조건으로 3점 꺾임 강도를 측정하였으며 각각의 조건에서 동일한 5개의 시편으로 강도값을 측정하였다.

물의 온도에 따른 알루미늄 시편의 냉각 속도를 알아보기 위하여 각 열충격 실험 조건에서 시편 중심의 온도 변화를 측정하였다. 냉각 온도 변화 측정을 하기 위하여 열충격 시편과 동일한 시편의 중심부에 직경 1 mm, 길이 10 mm의 구멍을 뚫어 열전대를 삽입하였다. Fig. 3에 냉각 온도 변화 측정을 위한 시편의 모양을 나타내었다.

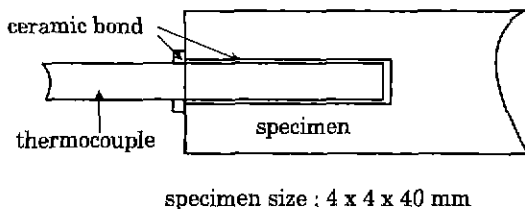


Fig. 3. Schematic diagram of the specimen used for cooling rate measurement.

시편 시편에 삽입한 열전대를 컴퓨터에 장착된 A/D converter(ĐT2835, Data Translation, USA)에 연결하여 냉각 과정에서의 온도 변화를 데이터로 저장하고 이 데이터를 이용하여 시편의 냉각 속도를 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 열충격 실험

Fig. 4에 20°C의 물에 열충격 실험을 한 후 측정된 3점 꺾임강도 실험의 결과를 나타내었다. 꺾임강도 실험 결과는 전형적인 알루미늄 세라믹스의 열충격 실험 결과를 보이고 있으며 열충격 온도차(ΔT)가 250°C일 때 급격한 강도 저하를 나타내었다. 그러나, 모든 시편이 균일하게 열충격 온도차 250°C에서 강도 저하를 나타내지는 않으며 이것은 열충격 과정에서 파괴원으로 작용하는 시편 내부의 결함이 시편에 따라 위치와 크기가 조금씩 다르기 때문으로 생각된다. 본 실험에서는 급격한 강도저하를 나타내는 열충격 온도차를 임계 열충격 온도차(ΔT_c)로 정하였으며, 이에 따라 20°C의 물에 대한 임계 열충격 온도차는 250°C로 나타났다.

Fig. 5에는 물의 온도를 각각 0, 20, 40, 60, 80, 100°C로 유지하여 열충격 실험을 한 후 측정된 꺾임강도 실험 결과로부터 임계 열충격 온도차를 구한 결과를 나타내었다. 물의 온도가 0°C~60°C의 범위일 때 임계 열충격 온도차는 물의 온도가 올라감에 따라 감소하였다. 이것은 물의 온도가 높을수록 작은 열충격 온도차에서도 시편의 강도 저하를 일으킬 수 있는 충분한 크기의 임계 열충격이 발생했음을 나타낸다. 즉, 같은 열충격 온도차를 생각

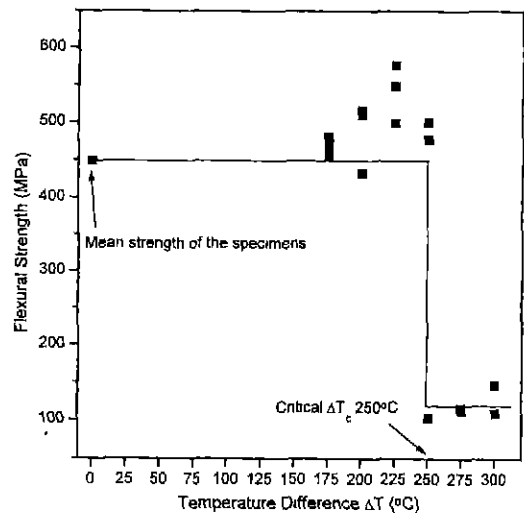


Fig. 4. Retained strength of the specimen after quenching into the cooling water of 20°C.

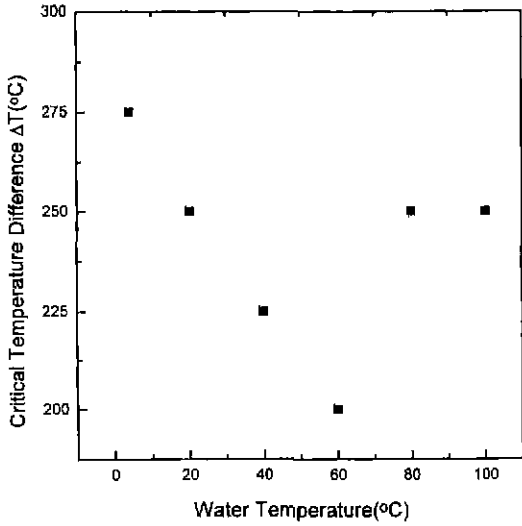


Fig. 5. Critical temperature difference of the alumina specimens quenched into the various temperatures of cooling water.

할 때 낮은 온도의 물보다 높은 온도의 물이 큰 열응력을 발생시킨다고 말할 수 있다. 만일 물에 의한 열충격 실험에서 발생하는 열응력이 열충격 온도차(ΔT)에만 의존한다면 열충격 온도차가 같을 경우에는 물의 온도에 관계 없이 같은 크기의 열응력이 발생해야 하며 임계 열충격 온도차 역시 물의 온도에 관계 없이 일정해야 하기 때문이다. 그러므로 물의 온도에 따라 임계 열충격 온도차가 다르게 나타난 것은 시편에 발생하는 열응력의 크기가 열충격 온도차 이외에 물의 온도에 따라 변하는 냉각 조건에 영향을 받고 있음을 나타낸다.

물의 온도가 80°C 이상이 되면 임계 열충격 온도차는 더 이상 감소하지 않고 20°C의 물에 열충격 실험을 한 경우에 해당하는 임계 열충격 온도차인 250°C로 다시 증가하는 것을 Fig. 5에서 관찰할 수 있다. 이것은 물의 급격한 끓음 현상에 의한 것으로 Fig. 1의 영역 III에 해당하는 대류 열전달 계수의 영향인 것으로 생각된다. 영역 III에서는 시편 표면의 끓음현상(film boiling)이 발생하여 수증기가 열전달을 방해하므로 같은 열충격 온도차에서도 시편에 작용하는 대류 열전달 계수 h가 낮아지게 된다. 따라서 영역 III에서는 시편의 냉각속도가 느려지고 발생하는 열응력이 작아지므로 이에 따라 상대적으로 임계 열충격 온도차가 커지게 된다.

4.2. 냉각 속도의 영향

본 연구에 사용한 물의 모든 온도에 대하여 시편의 냉각속도를 측정하였다. 측정 결과의 대표적인 경향을 살펴보기 위하여 20°C의 물을 이용하여 175°C의 열충격

온도차로 열충격을 주었을 경우에 시편 내부의 온도 변화를 시간의 변화에 따라 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었고, 온도 변화 데이터를 시간에 대하여 미분하여 냉각 속도로 계산한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 냉각속도는 냉각 초기에 급격히 증가하며 다시 감소한 후에는 거의 일정한 속도로 냉각이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

물의 온도에 따른 최대 냉각 속도 변화를 비교하기 위해 각 온도의 물에 열충격 온도차를 변화시키면서 측정

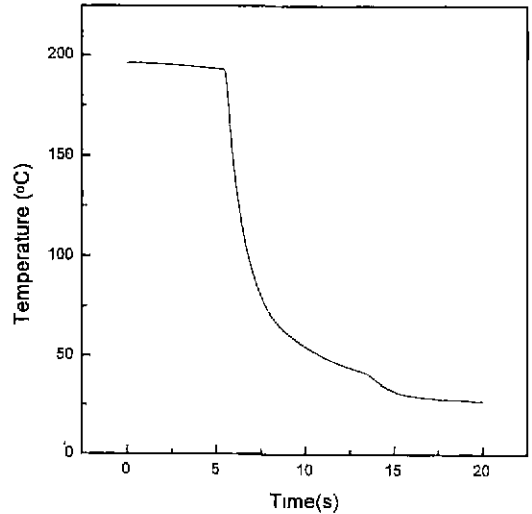


Fig. 6. Temperature variation of the specimen as a function of time, quenched from 195°C into the cooling water of 20°C.

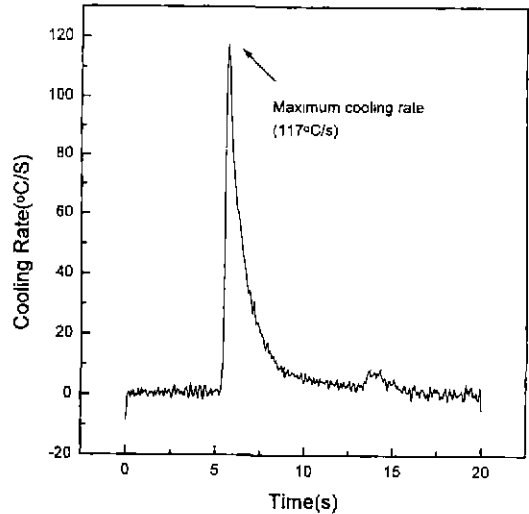


Fig. 7. Cooling rate of the specimen as a function of time, quenched from 195°C into the cooling water of 20°C.

한 최대 냉각 속도의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 0°C의 물과 20°C의 물에서는 Fig. 8에서 알 수 있는 바와같이 최대 냉각속도가 열충격 온도차의 증가에 따라 계속적으로 증가하였으나 40°C의 물에서 열충격 온도차가 225°C 이상인 경우에는 최대 냉각 속도가 더 이상 증가하지 않았으며, 60°C의 물에서 200°C 이상인 경우에는 불균일한 온도 변화로 인하여 정상적인 측정이 불가능하였다. 80°C와 100°C의 물에서는 표면끓음(film boiling)으로 인하여 모든 온도차 범위에서 정상적인 냉각 온도 측정이 불가능 하였다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이 0, 20, 40, 60°C의 물에대한 열충격 실험에서 최대 냉각속도는 열충격 온도차가 증가함에 따라 증가하였다. 또한, 시편의 냉각속도는 대류 열전달 계수 h 에 비례하므로 Fig. 8에서의 최대 냉각 속도는 열충격 온도차에 대신에 대류 열전달 계수 h 로 바꾸어 놓고 생각할 수도 있다. 그러므로 Fig. 8에서 열충격 온도차이에 대한 냉각속도의 관계는 Fig. 1에서 온도차이에 대한 대류 열전달계수의 관계와 그 경향이 일치하고 있음을 알 수 있다.

40°C의 물에서 열충격 온도차가 225°C 이상일 때 최대 냉각 속도가 열충격 온도차에 비례하여 증가하지 않는 이유는 물의 끓음 현상으로 설명할 수 있다. 이 영역의 열충격에서는 Fig. 1의 영역 III에 해당하는 대류 열전달 계수가 적용되므로 최대 냉각 속도가 열충격 온도차에 비례하여 더 이상 증가하지 않았다고 생각된다.

물의 온도가 60°C이고 열충격 온도차가 200°C 이상인

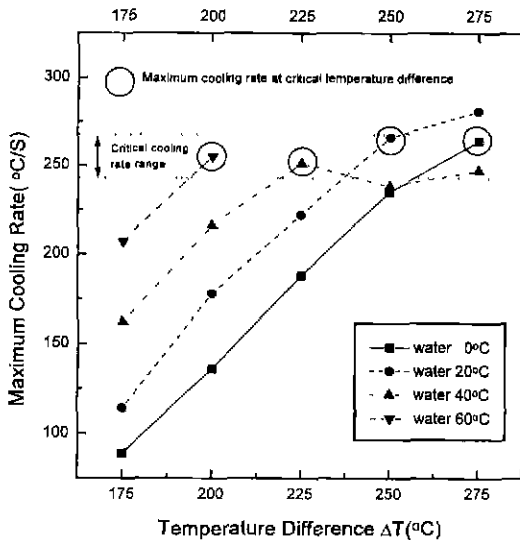


Fig. 8. Maximum cooling rate of the specimen as a function of the thermal shock temperature difference at various temperature of the cooling water.

경우와 80°C와 100°C의 물에 의한 열충격 실험에서는 냉각 온도 측정 결과가 매우 불균일하여 최대 냉각 속도를 측정할 수 없었다. 이것은 40°C의 물을 이용한 냉각 속도 측정에서 열충격 온도차가 일정 온도 이상일 때 최대 냉각 속도가 열충격 온도차에 비례하여 증가하지 않는 이유와 마찬가지로 물의 끓음 현상에 의한 불균일한 대류 열전도 때문으로 생각할 수 있다.

Fig. 5에서 물의 각 온도에 있어서의 임계 열충격 온도차를 Fig. 8의 최대 냉각속도와 비교해 보면 모든 온도의 물에 대하여 최대 냉각속도 $260 \pm 10^\circ\text{C/s}$ 부근에서 임계 열충격 온도차가 나타나고 있음을 알 수 있다. 약간의 실험 오차 범위를 고려하여 각 온도(T)의 물에서 임계 열충격 온도차(ΔT_c)를 나타내는 최대 냉각속도(ϕ_c)를 Eq.(5)와 같은 수식으로 나타낼 수 있다. Eq.(5)는 최대 냉각속도가 하나의 값 즉, 임계 냉각속도로서 시편의 열충격에 대한 임계 조건으로 작용하고 있음을 의미하고 있다.

$$\begin{aligned}\phi_c &= \phi_0(\Delta T_c = 275^\circ\text{C}) \\ &\approx \phi_{20}(\Delta T_c = 250^\circ\text{C}) \\ &\approx \phi_{40}(\Delta T_c = 225^\circ\text{C}) \\ &\approx \phi_{60}(\Delta T_c = 200^\circ\text{C})\end{aligned}\quad (5)$$

또한, 각 온도(T)의 물에 대한 열충격에서 임계 열충격 온도차(ΔT_c)를 나타내는 임계 열용력(c)의 크기는 Eq.(2)에 임계 냉각 속도(ϕ_c)를 대입함으로써 Eq.(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{Ea}{1-\mu} \frac{\gamma_m^2}{3\alpha} \phi_c \quad (6)$$

Eq.(5)와 Eq.(6)의 관계식으로부터 서로 다른 열충격 조건에서도 임계 열충격 온도차를 나타내는 임계 열용력(σ_c)의 크기는 Eq.(5)의 임계 냉각속도(ϕ_c)와 같이 서로 다른 열충격 조건에서도 모두 같다는 것을 알 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 Eq.(7)과 같다.

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \phi_0(\Delta T_c = 275^\circ\text{C}) \\ &= \sigma_{20}(\Delta T_c = 250^\circ\text{C}) \\ &= \sigma_{40}(\Delta T_c = 225^\circ\text{C}) \\ &= \sigma_{60}(\Delta T_c = 200^\circ\text{C})\end{aligned}\quad (7)$$

또한, 냉각 속도는 냉매의 대류 열전달 계수 h 에 비례하므로 Eq.(2)와 Eq.(4)로부터 다음의 Eq.(8)과 같은 관계를 생각할 수 있다.

$$\sigma \propto \phi \propto h \quad (8)$$

이상의 결과에서 알 수 있듯이 시편에 발생하는 열용

력의 크기(σ)는 냉각속도(ϕ)에 크게 의존하므로 시편의 냉각 환경으로부터 결정되는 대류 열전달 계수(h)에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 서로 다른 종류의 냉매를 사용하는 열충격 실험에서도 시편에 작용하는 대류 열전달 계수의 크기가 같으면 임계 열충격 온도차 값이 같게 나타나며 같은 종류의 냉매를 사용하더라도 냉각 조건이 다르면 임계 열충격 온도차가 다르게 나타나게 될 것이다. 또한, 액체에 의한 급격한 냉각 조건에서도 시편의 냉각 속도는 세라믹스에 발생하는 열응력에 큰 영향을 주므로 시편의 열충격 저항성을 표시할 때도 임계 열충격 온도차보다는 임계 냉각 속도를 이용해서 나타내는 것이 보다 정확하다고 할 수 있으며 임계 열충격 온도차를 이용해서 시편의 열충격 저항성을 표시할 때는 시편의 냉각 조건을 표시해 주어야 할 것이다.

5. 결 론

여러 가지 온도의 물을 이용한 알루미늄 세라믹스의 열충격 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 냉매로서 0, 20, 40, 60°C의 물을 이용한 열충격 실험 조건에서 알루미늄 세라믹스의 임계 열충격 온도차는 물의 온도가 증가함에 따라 감소하였으며 이것은 물의 대류 열전달 계수가 물의 온도가 증가함에 따라 증가하여 냉각속도가 증가하였기 때문이다. 따라서 알루미늄 세라믹스의 열충격 저항성과 열응력을 계산할 경우에는 시편의 냉각 속도를 고려하여야 한다.
2. 80°C와 100°C의 물을 냉매로 이용한 열충격 실험에서는 표면 끓음(film boiling) 현상으로 인하여 대류 열전달 계수가 감소하여 냉각속도가 감소함으로써 열응력이 감소하게 되고 이에 따라 알루미늄 세라믹스의 임계 열충격 온도차는 급격히 증가하여 250°C로 나타났다.
3. 세라믹스를 이용한 열충격 실험에서 열응력과 열충격 저항성을 나타내는 지배 요소는 임계 열충격 온도차이로 알려져 있으나, 임계 냉각속도가 지배적인 요소로서

더욱 중요하게 작용하므로 열충격에서는 반드시 냉매의 냉각 조건, 특히 대류 열전달계수를 고려해 주어야 한다.

감사의 글

본 연구는 1997년도 한국과학기술원 재료계면공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

REFERENCE

1. W. D. Kingery, "Factors Affecting Thermal Stress Resistance of Ceramic Materials," *J. Am. Ceram. Soc.*, **28**(1) 3-15 (1955).
2. J. P. Singh, J. R. Thomas and D. P. H. Hasselman, "Analysis of Effect of Heat-Transfer Variables on Thermal Stress Resistance of Brittle Ceramics Measured by Quenching Experiments," *J. Am. Ceram. Soc.*, **63**(3-4) 140-144 (1980).
3. Paul F. Becher, "Effect of Water Bath Temperature on the Thermal Shock of Al₂O₃," *J. Am. Ceram. Soc.*, C-17-C-18 (1981)
4. T. Nishikawa, T. Gao, M. Hibi, M. Tatatsu, "Heat Transmission during Thermal Shock Testing of Ceramics," *J. Mat. Sci.*, **29**, 213-217 (1994).
5. J. C. Glandus, V. Tranchand, "Thermal Shock by Water Quench: Numerical Simulation," *Thermal Shock and Thermal Fatigue Behavior of Advanced Ceramics*, pp307-316. Kluwer Academic Publishers, 1992.
6. 이홍림, 내화물공학, pp94-100, 반도출판사, 1985
7. H. Wang, R. N. Singh, "Thermal Shock Behavior of Ceramics and Ceramic Composites," *Int. Mat. Reviews*, **39**(6) 228-244 (1994).
8. 이정오, 박희용 역, 열전달, pp21-24, 범한서적 주식회사, 1992.
9. M. Naccatözisik, *Heat Transfer a Basic Approach*, pp 491-493, McGraw-Hill 1985