

80Al₂O₃-20Al 복합재료의 내열충격성: 실험과 유한요소 해석

김일수 · 신병철

동의대학교 신소재공학과, 부산시 부산진구 가야동 24, 614-714
(1999년 5월 15일 접수)

Thermal Shock Resistance of 80Al₂O₃-20Al Composites: Experiments and Finite Element Analysis

Il-Soo Kim and Byoung-Churl Shin

Department of Advanced Materials Engineering, Dongeui University
Gaya-Dong 24, Pusanjin-Gu, Pusan, Korea, 614-714

(Received May 15, 1999)

초 록

80Al₂O₃-20Al 세라믹-금속 복합재료와 단미 Al₂O₃ 알루미나 세라믹스의 내열충격성을 비교하였다. 시편을 급냉하고 4점 꺾임 강도를 측정하는 실험적인 방법과, 열충격시 시편내에 생기는 열응력의 유한요소해석을 병행하였다. Al₂O₃ 세라믹스의 꺾임강도는 200°C에서 0°C로 급랭하였을 때 급락하였다. 복합재료는 200~225°C 범위의 열충격 후 강도 저하가 있었으나 Al₂O₃ 세라믹스처럼 급작스럽지 않았다. 유한요소법으로 해석한 결과, Al₂O₃ 세라믹스의 임계온도차인 200°C의 열충격을 가했을 때 생기는 최대응력은 0.758 GPa로 계산되었다. 이 값과 같은 열충격 응력이 세라믹-금속 복합재료에 생기게 하려면 205°C의 정도의 온도 차로 급냉해야 함을 알았다.

ABSTRACT

Thermal shock resistance of 80Al₂O₃-20Al composite and monolithic alumina ceramics was compared. Fracture strength was measured by using a 4-point bending test after quenching. Thermal stresses of the ceramics and ceramic-metal composites were calculated using a finite element analysis. The bending strength of the Al₂O₃ ceramics decreased catastrophically after quenching from 200°C to 0°C. The bending strength of the composite also decreased after quenching from 200~225°C, but the strength reduction was much smaller than for Al₂O₃. The maximum thermal stress occurred in the monolithic alumina ceramics when exposed to a temperature difference of 200°C was 0.758 GPa. The same amount of stress occurred in the Al₂O₃-Al composite when the temperature difference of 205°C used.

Key words : Thermal shock resistance, Finite element analysis, Al₂O₃-Al composite, Monolithic alumina

1. 서 론

알루미나 세라믹스는 두루 뛰어난 물성을 갖고 있는 산화물 엔지니어링 세라믹스의 대표라 할 수 있다. 알루미나 세라믹스의 강도와 인성, 열전도성, 열충격성 등의 물성을 개선하기 위한 노력은 주로 복합재료를 만들거나, 미세구조를 조절하는 방식으로 이루어지고 있다. 고온 세라믹스로서 알루미나가 더욱 널리 쓰이기 위해서는 특히 내열충격성의 보완이 요구된다. 열충격 과정에서 발생하는 열응력이 파괴강도(σ_f)보다 크면 시편이 파괴되는데, 실제로 임계 열충격차에 놓이더라도 바로 파괴되지는 않고 곡강도의 급격한 저하가 일어난다. 세라믹스가 열충격에 견디는 온도차로 정의되는 임계온도차 ΔT_c 는 알루미나의 경우 200~250°C 정도로 알려져 있다.¹⁾ 적절한 제 2상이 들어갈 경우에 내열충격성이 개선될 수 있으나, 물성이 서로 다른 두 재료의 계면에서

열충격에 의한 응력으로 인해 파괴가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 Al 합금을 Al₂O₃-SiO₂계 섬유단열재에 반응침투시켜 만든 복합재료²⁾(Al₂O₃와 Al이 부피비로 약 80:20)와 시편되는 단미 알루미나의 내열충격성을, 시편을 급냉하고 4점 곡강도를 측정하는 방법으로 비교하였다. 이 때 시편내에 생기는 열응력을 유한요소법으로 해석하여, 실험적인 측정과 유한요소 해석법의 상관관계를 규명하고자 하였다. 또한 세라믹스의 열충격성을 가늠하고 예측하기 위한 유한요소해석법의 유용성에 관해서도 검토하였다.

2. 실험방법

실험에 사용한 복합재료는 시편되는 7075 Al합금, SiO₂ 분말, 1400°C까지 사용가능한 섬유단열재, 성장억제제 Ca SiO₃를 차례로 올린 도가니를 1000°C에서 24시간 산화시켜

얻었다.³⁾ 비교에 사용한 단미 알루미늄 세라믹스는 독일 Friedrichsfeld사의 Type 23(기공률=0, 평균입경=20 μm)을 사용하였으며, 복합재료와 같은 크기, 같은 방법으로 가공하였다. 열충격성은 시편을 해당온도에서 0°C의 물에 급냉하고, 4점 곡강도를 재는 방법으로 측정하였다. 곡강도 시편의 크기는 5×5×50 mm³였다.

유한요소해석에 사용한 프로그램은 상용프로그램인 ANSYS였다. 열응력값을 해석하기 위해 2-D plane42의 요소형태를 선택하였다. 내부 평균응력값을 구하기 위해 Fig. 1과 같이 모델링을 하고, Al₂O₃ 바깥 둘레의 자유도를 구속시켰다. 물성치는 Table 1과 같이 주었다 유한요소법에 의해 해석된 열충격 거동을 실험에 의한 결과와 비교하였다. 열팽창계수, 탄성을 등 해석을 위해 필요한 물성치는, 알루미늄과 복합재료는 실제로 측정된 값을 사용하였으며, Al의 물성은 서적³⁾ 등에 있는 Al의 일반적 물성을 사용하였다. 이 값들을 대입하여 열충격저항계수를 계산하여 두 재료의 내열충격성을 비교, 가능하였다.

3. 결과 및 고찰

평균 10개씩 측정된, 상온에서의 또 각 온도에서 급냉 후의 단미 알루미늄과 복합재료의 평균 곡강도 값변화를 Fig. 2에 보였다. 알루미늄의 경우 200°C 이상의 온도차가 나면 급격히 곡강도가 저하되었다 이로서 이 온도가 ΔT_c임을 알

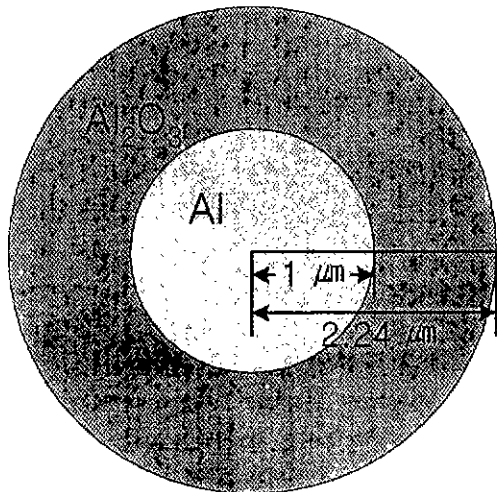


Fig. 1. A simple model of 80Al₂O₃-20Al composite.

수 있었다. 이와는 달리 복합재료는 초기강도는 그리 높지 않았으나, 200°C와 225°C에서 상대적으로 완만한 강도저하 특성을 보였다 소결 알루미늄과 같은 급격한 강도저하가 아니었고, 강도값 저하 범위도 적었다.

복합재료의 미세구조는 Fig. 3과 같다. 충전재를 쓰지 않고 금속상 산화 (DMO: Directed Metal Oxidation) 공정에 의해 제조한 복합재료의 미세구조는 본 연구에서 실험한 재료의 미세구조와 유사하다.⁶⁾ Fig. 3의 상분율을 조사한 결과 산화물(Al₂O₃) : 금속상(Al) : 기공=78.1 : 20.1 : 1.8 vol.%로 나타났다. 유한요소해석을 위해 간단히 채택한 모델(Fig. 1, Al₂O₃ : Al=80 : 20 vol%)로 소결 Al₂O₃의 곡강도가 현저하게 저하한 임계열충격 온도차(ΔT=200°C)에서 최대 내부 응력값을 구하였는데, 최대응력이 0.758 GPa로 나타났다(Fig. 4). 같은 온도에서 복합재료의 계면에서 발생하는 응력 크기는 0.750 GPa(Fig. 5(a))이었다. 값의 차이가 크지는 않으나 열충격시 복합재료의 Al₂O₃와 Al사이의 계면에서 발생하는 응력값이 소결 Al₂O₃에 생기는 응력보다 낮은 것을 알 수 있다. ΔT=200°C에서 Al₂O₃가 받는 응력과 꼭 같은 응력이 Al₂O₃/Al 계면에 발생하는 온도는 205°C임(Fig. 5 (b))을 알 수 있었다. 위와 같이 복합재료내의 열응력이 알루미늄 세라믹스보다 작은 경향은 다른 온도에서도 같았다. 결국 복합재료의 경우 열충격에 의해 미세한 결함이 생기고, 4점 곡강도 시험의 하중이 가해지면서 인장응력이 걸리는 시험편 중앙 아래면에 있던 미세 결함이 전파해 파괴되는 것으로 판단된다.

실제로 임계 온도이상의 열충격 후 생긴 열응력이 균열을 생기게 함으로서 세라믹스는 강도값이 급락한다. Hasselman 등^{4,5)}은 내열충격성을 균열생성에 대한 저항과 균열전파에 대한 저항으로 나누고, 전자를 제 1열충격저항변수, 후자를 제 5열충격저항변수로 아래와 같이 정의하였다.

$$R_1 = \{\sigma_B \cdot (1-v)\} / (\alpha \cdot E) \quad \text{: 제 1 열충격 저항 변수}$$

$$R_5 = (\gamma_0 \cdot E) / \{\sigma_B^2 \cdot (1-v)\} \quad \text{: 제 5 열충격 저항 변수}$$

여기서, σ_B =곡강도
 γ_0 =비표면 에너지 $[(K_{Ic}^2 \cdot (1-v^2)) / (2 \cdot E)]$

측정한 두 재료의 물성치를 위의 두 비표면 에너지 식에 대입해 계산한 것이 Table 2이다. 즉 복합재료는 균열생성에 대한 저항도, 전파에 대한 저항도 모두 크다. 특히 균열 전파에 대한 저항은 2배 이상 큰 것을 알 수 있다. 이것은

Table 1. Properties of Each Material

	E (GPa)	v	Thermal conductivity*	α (10 ⁻⁶ /K)	Density (g/cm ³)	K _{Ic} (MPa √m)	Fracture energy (J/m ²)
Al ₂ O ₃	350	0.25	46 W/m · K	8.12	3.9	3.7	18.1
Al*	75.7	0.33	238 W/m · K	24.6	2.7		
Al ₂ O ₃ /Al	223	0.31		8.23	3.6	4.8	44.0

Data from the Ref. 3

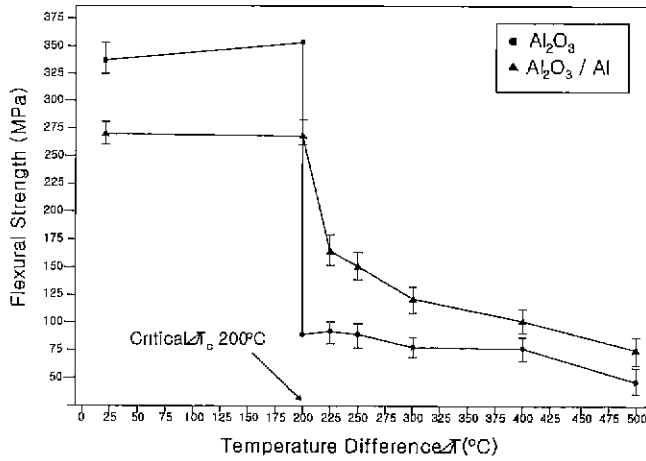


Fig. 2. Retained 4 point bending strength of specimens as a function of quenching temperature.

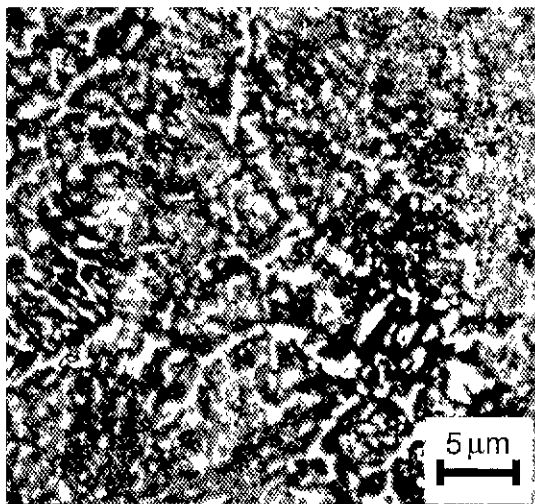
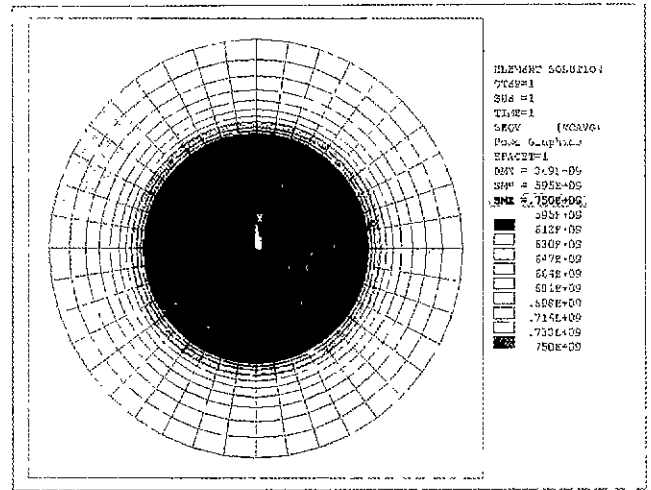
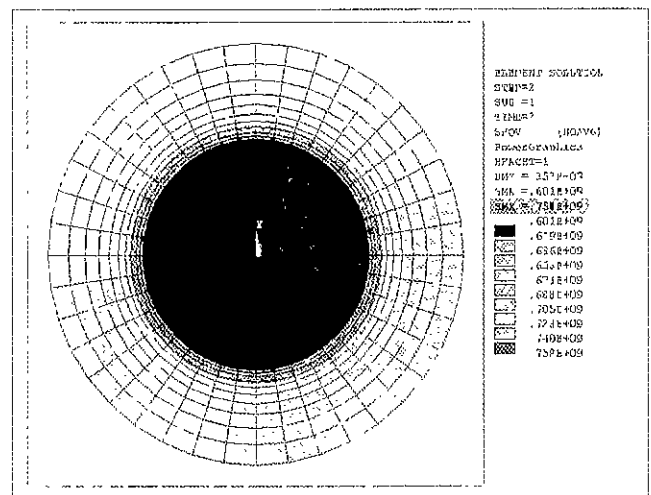


Fig. 3. Optical microstructure of fabricated composite.



(a)



(b)

Fig. 5. Internal stress in 80Al₂O₃-20Al composite. (a) at ΔT=200°C (b) at ΔT=205°C.

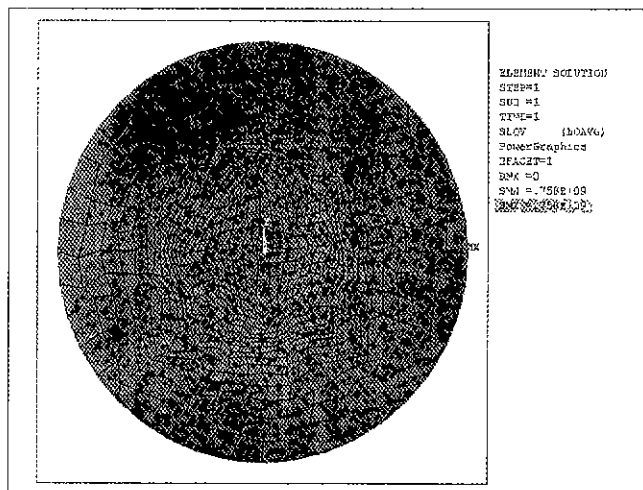


Fig. 4. Internal stress in sintered Al₂O₃ at ΔT=200°C.

Table 2. Thermal Shock Resistance Parameters of Each Material

	Al ₂ O ₃ /Al	sintered Al ₂ O ₃
R ₁ (× 10 ⁻³)	101.5	87.4
R ₅ (× 10 ⁻³)	181.8	75.7

복합재료 내부에 균일하게 분포하고 있는 금속상이 균열의 진행을 막기 때문이다. 세라믹상의 임계치를 진행하던 균열이 금속상을 만나면 파괴에너지를 많이 흡수하면서 변형되고(Fig 6), 이러한 금속상의 변형으로 인해 알루미나에 비해 좋은 인성을 나타낸다.^{6,9)} 임계값 이상의 열충격을 받은 복합재료는 세라믹/금속 경계면에 균열이 발생하여, 균열 전파를 효과적으로 저지하지 못하므로 파괴강도값이 낮다. 그러나 알루미나 세라믹처럼 임계값 이상의 온도차에서 갑작스레 강도가 저하되는 현상은 나타나지 않았다.



Fig. 6. SEM photograph of a fracture surfaces of the fabricated composite.

4. 결 론

열충격에 의한 강도저하를 측정한 결과, 본 실험에서 사용한 소결 Al_2O_3 의 ΔT_c 는 $200^\circ C$ 로 나타났다. 복합재료는 $200\sim 225^\circ C$ 범위에서 강도 저하가 있었으나 소결 Al_2O_3 처럼 급작스럽지 않았으며, 임계온도 이상에서의 강도도 2배 정도까지 높았다. 유한요소법으로 해석한 결과, 소결 Al_2O_3 의 $200^\circ C$ 에서의 열충격 응력은 $205^\circ C$ 에서의 Al_2O_3 -Al 복합재료의 계면응력과 같았다. 이로서 복합재료의 열충격 저항이 좀 더 큰 것을 알 수 있었으며, 열충격저항계수를 비교한 결과도 복합재료는 균열생성과 균열전파에 대한 저항이 모두 크게 나타났다. 미세구조의 관찰결과 균열전파에 대한 저항은 금속상의 연성변형에 의한 것이다. 그러나 열충격에 의해 야기된 Al_2O_3 와 Al사이의 계면발생응력도 크므로, 열충격을 받은 복합재료는 파괴강도가 낮았다.

감사의 글

이 논문은 동의대학교 학술연구구성비(기간 1999. 3-2000. 2)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. 소가 나오히로 저, 한성목 역, "세라믹스원론," pp. 126-128, 반도출판사, 1994.
2. 김일수, "Al-합금의 단열섬유판 반응침투에 의한 Al_2O_3 -세라믹스의 형성," *요업학회지*, **34**(5), 483-490 (1997).
3. 이지환, 이정중, 김병일, 배차현, "비철금속재료," pp. 93-104, 원창출판사, 1998.
4. J. Nakajima, "Fracture Mechanics of Ceramics," Ed. by R. C. Brandt, **Vol.2**, pp. 759-765, Plenum, NY, 1974.
5. D. P. H. Hasselman, "Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Crack Propagation in Brittle Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **52**(11), 600-604 (1969).
6. A. K. Aghajarian, N. H. Macmillian, C. R. Kennedy, S. J. Luszc and R. Roy, "Properties of Microstructures Lanxide™ Al_2O_3 -Al Composite Materials," *J. Mat. Sci.*, **24**, 658-670 (1989).
7. I. S. Kim and H. W. Henicke, "용융산화법으로 제조한 Al_2O_3 -SiC 세라믹스의 미세구조와 기계적 성질," *요업학회지*, **31**(10), 1169-1175 (1994).
8. S. M. Pickard, E. Manor, H. Hi, A. G. Evans and R. Mehravian, "The Mechanical Properties of Ceramic Composites Produced by Melt Oxidation," *Acta metall.mat.*, **40**(1), 177-184 (1992).
9. B. D. Flinn, C. S. Lo, R. W. Zok and A. G. Evans, "Fracture Resistance Characteristics of a Metal Toughened Ceramic," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(2), 369-375 (1993).