

Fracture Characteristics of NiCr/ZrO₂ Functionally Graded Material by Gas Burner Thermal Shock

Jun Hee Song[†]

The Research Center of Industrial Technology, Engineering Research Institute,
Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea
(Received February 9, 2006; Accepted March 20, 2006)

가스버너 열충격에 의한 NiCr/ZrO₂계 경사기능재의 열적 파괴특성

송준희[†]

전북대학교 공학연구원 공업기술연구센터
(2006년 2월 9일 접수; 2006년 3월 20일 승인)

ABSTRACT

Joining Yttria Stabilized Zirconia (YSZ) to NiCr metal was fabricated using YSZ/NiCr Functionally Graded Materials (FGM) interlayer by hot pressing process. Microscopic observations demonstrate that the composition and microstructure of YSZ/NiCr FGM distribute gradually in stepwise way, eliminating the macroscopic ceramic/metal interface such as that in traditional ceramic/metal joint. The thermal characteristics of this YSZ/FGM/NiCr joint were studied by thermal shock testing and thermal barrier testing. Thermal shock test was conducted by gas burner rig. Acoustic Emission (AE) monitoring was performed to analyze the microfracture behavior during the thermal shock test. It could be confirmed that FGM was the excellent performance of thermal shock/barrier resistance at above 1000°C.

Key words: Functionally graded materials, Thermal shock, Zirconia, Acoustic emission

1. 서 론

항공우주, 핵융합 분야와 같은 극심한 환경조건하에서 사용할 수 있는 신소재의 개발은 차세대 연구의 중요한 요소중의 하나로 주목받고 있다. 열차폐 코팅은 지난 30년동안 다양한 응용을 위해 개발되어 왔다. 그러나, 과도한 열응력으로 인한 코팅층의 탈락파괴는 기재인 금속을 노출시켜 재료 응용의 한계를 나타냈다. 열응력은 세라믹 코팅층과 금속 기재층의 열팽창 불일치에 의해 주로 유발된다. 따라서 최근 열차폐형의 새로운 개념인 경사기능재(Functionally Graded Material; FGM)가 등장하였다.¹⁻⁹⁾ FGM은 한면의 재료에서 반대쪽 다른 재료까지 점진적인 천이구조를 갖는 2개의 재료 상들이 조합된 형태이다. 이러한 천이는 어떤 기계적으로 취약한 접합 혹은 계면이 없기 때문에 다중 특성 혹은 복합기능의 생성을 가능하도록 한다. 더욱이, 특성의 점진적 변화는 다른 응용과 사용환경에 맞출 수 있도록 설계가 가능해진다. 이는 전통적인 단일재료에서 달성할 수 없는 특성의 조합을 얻는

데 이들 FGM 재료들은 가능하다. 이것이 많은 산업분야 적용에서 FGM을 선호하게 하는 것이다.

높은 열유동 환경에 사용되는 재료 개발은 단열성능과 TBC 구조간의 관계를 이해하는 것이 필요하다. 고열 유동하에서 코팅의 메커니즘과 파괴거동의 기본적인 지식은 기지재에서 코팅의 탈락을 방지하는데 매우 유용하다. 그러나, 지금까지 고열 유동하에서 TBC의 파손을 연구한 보고는 단지 몇몇에 지나지 않으며, 대부분은 단층 코팅의 열적 파괴에만 집중되어 있다. 고열 유동하에서 FGM 코팅의 열적 파손에 관한 연구는 상당히 충분하지 않다. 특히, TBC 구조와 단열성능간의 관계, 고열하에서 다양한 두께에 따른 FGM 코팅의 균열거동 뿐만 아니라 파괴 모드에 관한 연구는 거의 보고되지 않았다.

FGM은 우선적으로 고온환경을 위해 사용되도록 기대된다. 부재의 급격한 가열 혹은 냉각동안 생기는 열충격 조건은 매우 높은 응력을 초래할 수 있다. 만일 열적 천이가 충분히 극심하다면 요소에서 파괴가 발생할 것이다. 극심한 반복 열환경에 처해진 재료의 손상정도와 강도열화는 사용조건과 수명성능에 대해서 주요한 한계인자이다. 그러므로, FGM에서 내부 열응력을 분석하고 열충격과 같은 열적 하중에 대한 저항성을 평가하는 것이 선행 과제이다.¹⁰⁻¹³⁾ 주어진 열적 환경하에서 재료에 손상을 주

[†]Corresponding author : Jun Hee Song
E-mail : sjhee@chonbuk.ac.kr
Tel : +82-63-242-5827 Fax : +82-63-270-2460

지 않도록 열응력 수준을 찾아 제어하는 것이 연구의 평가에서 중요한 항목이라 볼 수 있다.

본 연구에서는 높은 열부하 환경에서 파괴거동과 단열 성능의 평가를 위해 $ZrO_2/NiCr$ 계 경사기능성 소결재를 제작하였다.¹⁴⁻¹⁸⁾ 극심한 열적 환경은 가스버너 장치를 통하여 조성하였고, 열충격 과정의 미시적인 파괴거동은 비파괴 평가법의 하나인 음향방출법(AE법)을 사용하여 조사하였다.¹⁹⁻²²⁾ AE 평가인자와 현미경 관찰을 통하여 파괴 형태를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시험편 제작

3 mol% Y_2O_3 로 부분 안정화된 PSZ(Partially Stabilized ZrO_2) 분말(일본 Tosho사, 평균 입경 $0.5 \mu m$)과 Ni 분말(평균 입경 $3\sim 7 \mu m$) 및 평균 입경이 $10 \mu m$ 인 Cr 분말을 출발물질로 사용하였다. Ni 분말에 20 wt% Cr 분말을 첨가한 혼합 분말을 금속분말로 사용하였다. FGM 제조를 위해 먼저 금속분말에 ZrO_2 분말을 20 vol%씩 증가시킨 4종의 혼합 분말을 ZrO_2 ball 및 에틸알콜을 폴리에틸렌 통에 넣고 24시간 혼합한 후 건조하고 분류시켰다. 이렇게 제조된 각각의 혼합 분말과 순수한 금속 및 ZrO_2 분말을 금형에 순차적으로 장입한 후 $80\sim 150 MPa$ 로 가압하여 압분체를 제조하였다. 상압 소결은 압분체를 $250\sim 350 MPa$ 의 압력으로 냉간 정수압 성형한 다음 $1250\sim 1350^\circ C$ 의 $10H_2\cdot 90N_2$ 분위기에서 3시간 유지하였다. 이러한 방법으로 제조된 FGM의 최종 크기는 직경 35 mm, 두께 6 mm의 원판형이었다.

따라서 열충격 실험에 사용된 상압 소결재는 탑코트(top coat)의 세라믹 원료분으로 부분안정화 지르코니아인 PSZ($ZrO_2\cdot 8 wt\% Y_2O_3$)를 사용하고 기재(substrate)의 금속 원료분으로는 NiCr 합금분을 사용하였다. 그러나, 제조상의 결함으로 시험편의 표면 및 측면에 다수의 작은 크랙이 존재하였다.

시험편은 이면온도의 측정과 체결을 용이하게 하기 위해 T자형의 단면을 갖는 원통형의 홀더를 소결에 의해 제조된 시험편과 납땜으로 부착시켰다. 이면온도 측정을 위해서 NiCr 100%층 아래의 홀더 상부, 즉 납땜 접합부로부터 3 mm 간격으로 3개의 열전대 구멍을 측면에 가공하였다. 열전대 구멍은 0.7 mm의 직경으로 중심까지만 가공하였다.

2.2. 가스버너실험

가스버너 실험은 가열원으로 산소(O_2)와 아세틸렌가스(C_2H_2)를 이용하여 시험편 표면을 가열하고 이면은 시료 홀더에 체결되어 냉각장치에서 냉각된다. 냉각수로는 물을 사용하여 펌프에서 일정유속으로 순환시켰다. 가열의

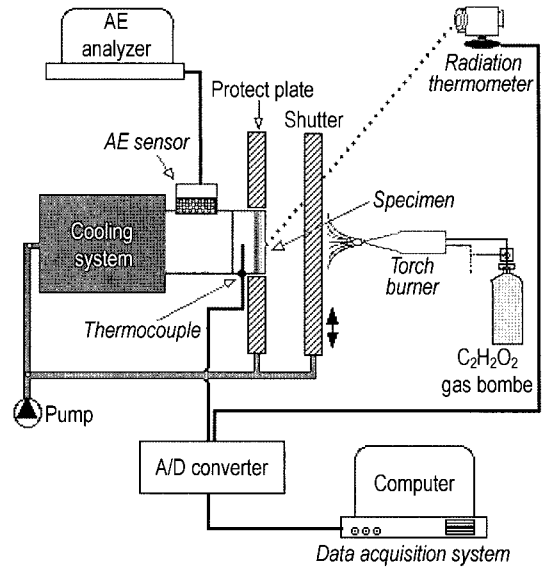


Fig. 1. The layout drawing of gas burner test system.

개시와 정지를 위해 시험편과 토치의 사이에 90° 회전 가능한 셔터를 설치하고 열원의 안정을 도모하기 위해 보호환을 설치하였다. 온도의 측정은 3개의 열전대와 표면 방사온도계를 사용하였으며 이때 열전대와 방사온도계에서 출력된 값들은 데이터 획득장치에 의해 분석 및 저장하였다. AE 측정을 위한 AE 센서는 가스버너 화염에 안전하고 신호의 감쇠를 줄이기 위해 시험표면부에 가깝게 위치하도록 홀더의 윗표면에 일정압력으로 고정하였다. 이들의 장치도를 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다.

본 실험에서 열전대의 가공위치는 3, 6, 9 mm 지점으로 기재 하단부터의 거리이다. 이들 지점의 온도를 측정하여 시험편의 이면온도(T_b)인 NiCr 100%층의 온도를 추정할 수 있다. 또한 T_s 는 방사온도계에서 측정된 표면온도를 지칭한다.

2.3. AE 실험

AE 실험은 Physical Acoustics Corporation(PAC)사의 8900 LOCAN AT Analyzer 장비를 사용하였다. AE 센서의 부착은 진공 그리즈(high vacuum grease)를 바른 후 클램핑(clamping)을 사용하여 일정압력을 가하였다. 센서가 부착되는 상단부는 부착이 용이하게 홈을 내고 사포 #1500 까지 연마하여 시험편 홀더의 상면에 센서를 부착하였다. 감지된 신호는 전치증폭기(pre-amplifier)에서 40 dB 증폭하여 잡음을 줄이기 위해 $100\sim 1200 kHz$ 의 대역 필터링을 한 후 AE 분석기에 입력되었다. 입력한 AE 신호는 주증폭기(main amplifier)에서 다시 40 dB 증폭하고 필터링한 후, 신호처리를 위해 A/D 변환기에서 디지털화하였다. AE 검출에 사용된 센서는 $150 kHz$ 의 공진주파수와 $50\sim 1000 kHz$ 의 광대역주파수 범위를 감지하는 압전형변환기(PZT)를

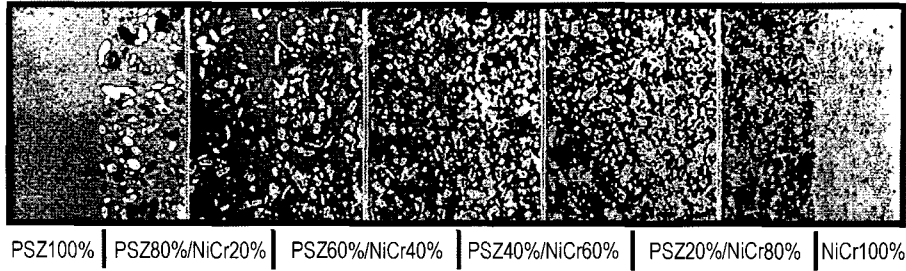


Fig. 2. Microstructure of FGM by sintering process.

사용하였다. 총이득(total gain)은 80 dB이며 문턱값(threshold)은 40 dB로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세 조직과 조성

Fig. 2는 소결된 FGM 시편의 단면에서 관찰한 각 층의 미세적인 조직 구조이다. 밝은 색은 NiCr 상이며, 어두운 색은 PSZ 상이다. 조성 함량에 따라 조직이 단계적으로 변화함을 관찰할 수 있다. NiCr 함유량이 많은 영역에서 금속상이 기지상으로 망상구조를 나타내었다. NiCr 함유량이 적어짐에 따라 금속상은 기지에서 분산상으로 천이하며, 역으로 PSZ 상은 분산상에서 기지상으로 변화한다. ZrO₂/NiCr계 재료는 소결에 의한 치밀화가 어려운 재료로 알려져 있는데 그림에서 역시 기공이 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. 더욱이 PSZ의 함량이 20%인 층에서 기공도가 가장 높았으며 이를 적절히 조절해야 한층 더 건전한 재료를 얻을 수 있을 것으로 여겨진다.

3.2. 가스버너 가열에 의한 열충격 특성

가스버너에 의한 열충격은 소정의 온도까지 가열, 냉각하는 단계로 실험하였다. 가스버너 가열에 의한 표면의 온도분포는 방사온도계로 측정된 값이며 600°C 이하의 온도가 측정불가능하다. 따라서 가열시와 냉각시 600°C 이하의 온도분포는 표시되지 않았다. 가열시에는 가스버너 화염에 의해 순간적으로 온도가 급상승하여 소정의 온도에 즉각적으로 도달하였으며 냉각은 차폐판을 닫음과 동시에 공기중에서 공랭하였기 때문에 실온까지 급강하하는 온도분포를 나타낸다.

열충격에 의한 재료의 파괴거동을 조사하기 위한 AE 시험의 AE인자로는 AE신호의 진폭(amplitude)과 시간(duration)의 면적을 적분한 값으로 AE energy를 사용하였다. AE energy 값은 장치의 특성상 단위시간당의 AE energy값을 나타내기 때문에 'dB'의 단위로 표시된다.

열충격실험의 표면가열 온도는 약 900~1200°C 근방의 최고온도까지 10초, 35초, 45초 정도로 가열한 것으로 표이면의 온도와 AE energy 분포를 시간에 따라 나타내었

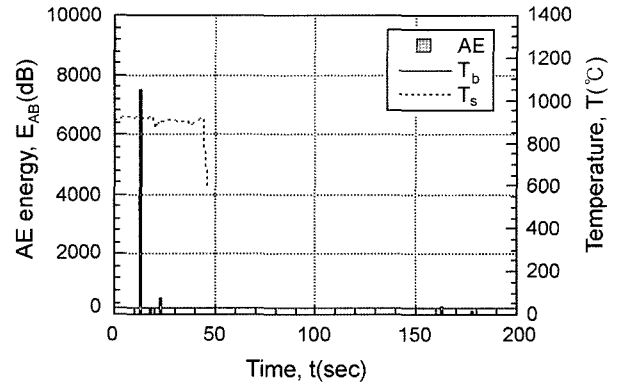


Fig. 3. AE behavior and temperature history by burner heating up to 926°C.

다. 그림에서 AE 거동은 막대그래프, 표면온도(T_s)는 점선, 이면온도(T_b)는 실선으로 각각 표시된다. 실온은 약 26°C이었다.

Fig. 3은 상압소결에 의해 제조된 ZrO₂/NiCr FGM(시험편 : N1)의 가스버너 열충격 거동으로 AE energy분포와 표이면의 온도이력을 함께 나타내었다. 표면온도는 926°C까지 급가열되었다가 상온으로 급냉되고 이면온도는 33°C까지 가열되고 냉각되어 표면온도에 큰 변화를 보이지 않았다. 이때 가열시간은 대략 44초였다. 최고온도에서 표면과 이면온도의 차인 온도낙차는 900°C이다. AE 거동은 주로 가열시 나타났고 7500 dB의 최대 AE energy 방출을 보였다. 즉, 이 시점에서 크랙이 발생하였을 것으로 추정된다. Fig. 4는 열충격 시험 후 시험편의 표면을 관찰한 것으로 가장자리 근처에 원주상의 약한 크랙과 가장자리의 원주부분에 전체원주의 1/4 크기로 탈락(spallation)이 관찰되었다. 이것은 제조시 시험편의 측면에 크랙이 발생했던 부분으로 파손이 용이한 영역이었다. 이 영역이외의 표면에서는 파괴가 발생하지 않았다.

Fig. 5는 ZrO₂/NiCr FGM(시험편 : N2)의 열충격 시험 결과로서 표면온도는 1221°C까지 급가열되었다가 상온으로 급냉되는 분포를 갖으며 이면온도는 그다지 상승하지 않았다. AE 거동은 가열 개시후 23초인 표면온도 1155°C 지점에서 24000 dB의 최대 AE energy 방출을 보였다. 냉

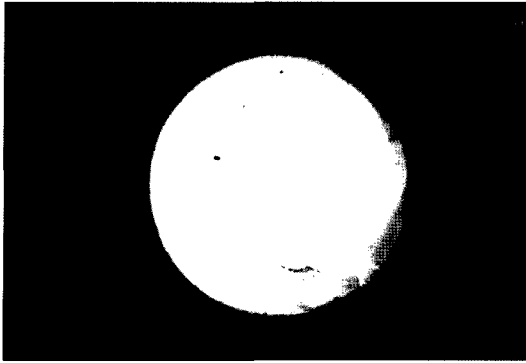


Fig. 4. Surface morphology after burner heating test up to 926°C.

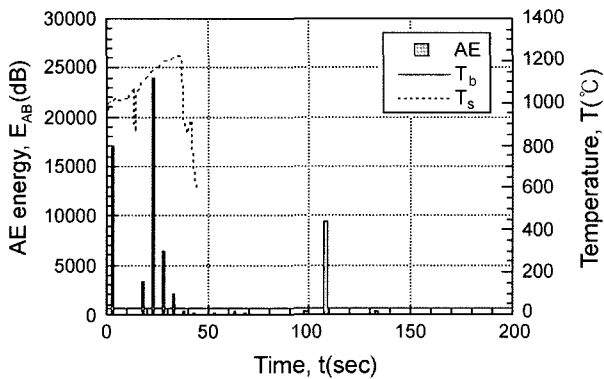


Fig. 5. AE behavior and temperature history by burner heating up to 1221°C.



Fig. 6. Surface morphology after burner heating test up to 1221°C.

각과정에서도 약간의 방출이 보였다. Fig. 6은 열충격 시험후 표면을 관찰한 사진으로서 미소한 크랙들과 방사상 크랙, 원주상 크랙, 직경을 횡단한 큰 크랙까지 표면(세라믹인 PSZ 부분)상에 다수 발생하였다. 그러나, 탈락(spallation)은 관찰되지 않았고 두께 방향으로의 수직크랙도 진전되었을 것으로 보여졌다.

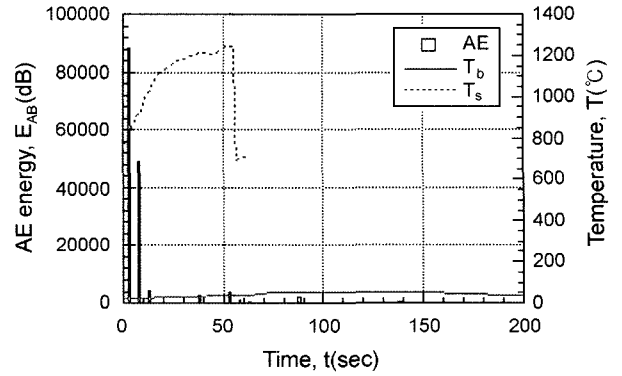


Fig. 7. AE behavior and temperature history by burner heating up to 1245°C.

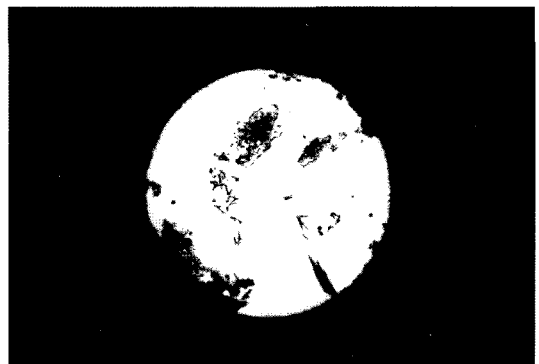


Fig. 8. Surface morphology after burner heating test up to 1245°C.

Fig. 7은 $ZrO_2/NiCr$ FGM(시험편 :N3)의 열충격 거동으로서 표면온도는 1245°C까지 급가열되었다가 상온으로 급냉되는 분포를 갖으며 이면온도는 약 50°C 정도로 상승하였다. AE 거동은 가열 개시 직후 표면온도가 800°C인 지점에서 88200 dB의 최대 AE energy 방출로 높았다. 냉각과정에서도 약간의 방출이 나타났다. 즉, 가열 초기에 크랙이 생성되었을 것으로 생각된다. Fig. 8은 열충격 시험후 표면 관찰로 중심에서 원주방향으로 방사상의 크랙이 관찰되었고 직경의 3/4까지 탈락(spallation)파괴한 부분도 나타났다. 탈락은 두께방향으로 약 2 mm정도 진전해 있었다. AE 결과와 비교해 보면 이같은 탈락파괴 발생시 높은 AE 방출이 나타났던 것으로 생각된다.

Fig. 9는 $ZrO_2/NiCr$ FGM(시험편 :N4)의 열충격 결과로 표면온도는 1062°C까지 급가열되었다가 상온으로 급냉되는 분포를 갖으며 이면온도는 약 50°C 정도로 상승하였다. AE 거동은 가열 개시 직후 표면온도가 840°C인 지점에서 83500 dB의 최대 AE energy 방출로 높았으며 냉각과정에서도 약간의 방출이 나타났다. 실험중에도 육안으로 표면의 탈락과 크랙이 관찰되는데 그 원인은 제조 중에 형성된 기공이나 큰 결함이 열충격하에서 파괴를 가속시

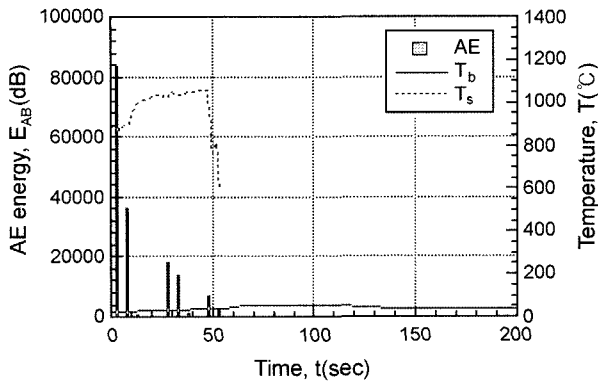


Fig. 9. AE behavior and temperature history by burner heating up to 1062°C.

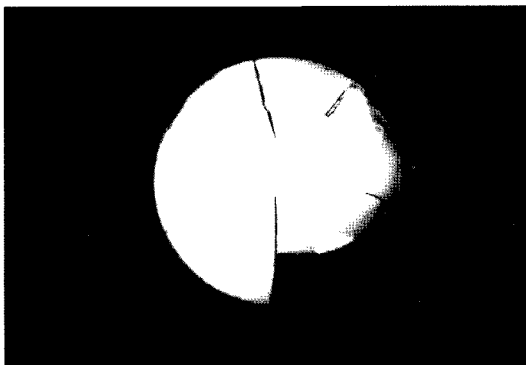


Fig. 10. Surface morphology after burner heating test up to 1062°C.

킨 결과라고 판단된다. Fig. 10은 열충격 시험 후 표면 관찰로서 방사상의 선명한 크랙이 발생하였고 탈락파괴의 정도도 극심하였다. 탈락파괴의 수준은 기재부분이 노출되는 정도였고 세라믹층의 열충격 파괴는 전형적인 취성 파괴의 형상으로 나타났다.

이와같이 비슷한 온도이력의 열충격조건에서도 AE 방출의 특성은 재료에 따라 다르게 거동되었다. 가장 지배적인 원인은 제조시의 결함에 따른 영향으로 결함이 많았던 시편일수록 열충격에 취약한 것으로 판단되었다. 파괴특성을 잘 반영하는 최대 AE energy는 N3와 N4 시험편에서 가장 높아 파괴가 극심하였고 표면 가열온도 조건이 가장 낮은 N1 시험편이 최대 AE energy 방출량도 가장 낮았고 파괴수준도 제일 낮았다. 또한 모든 시험편들에서 이면온도의 상승은 50°C 이하로 낮았으므로 ZrO₂/NiCr FGM의 열에 대한 단열 및 차폐성능은 매우 우수함을 알 수 있었다. 표면의 관찰에서는 미소크랙, 방사상 크랙, 원주상 크랙, 수직크랙, 탈락파괴 등이 보여졌다. 시험편 N3와 N4는 파괴수준이 극심하여 열충격 파괴의 현상을 잘 반영시키고 있다. 또한 AE거동과 파괴수준이 대등하게 일치하고 있었다. 따라서, 환경이 열악한 고온 분

위기하에서 내열충격 특성 및 파괴현상을 조사하는데 있어서 AE법에 의한 평가가 유효한 인자임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고열부하 환경을 모의하기 위해 가스버너의 화염을 이용하여 열충격 평가를 실시하였다. 경사기능재료에 대한 열적 정상상태하에서 단열성능과 열충격 파괴저항에 관한 논의를 하였다. 열충격 과정의 미시적인 재료거동은 AE법으로 분석하고 광학현미경을 이용하여 각 시험편의 파괴경향을 조사하였다.

ZrO₂/NiCr계 FGM의 성형 및 소결거동은 조성에 따라 다르게 나타났다. PSZ 100%와 NiCr 조성의 층에서는 소결에 의한 치밀화가 이루어졌으나 중간층에서는 기공도가 높아 치밀화가 잘 일어나지 않았다. 특히, PSZ의 함량이 20%인 층에서 기공도가 가장 높았으며 이를 적절히 조절해야 한층 더 건전한 재료를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

ZrO₂/NiCr FGM의 가스버너 열충격 시험에서 표면온도와 통과된 이면온도로 온도낙차를 구할 수 있으므로 재료의 단열성 평가를 하였고, 이면온도의 상승이 50°C 이하로 작아 단열성능은 우수하였다. FGM의 열충격에 의한 재료의 미시적인 파괴과정은 최대 AE energy 방출 특성으로 파악할 수 있었으며 온도조건이 가혹해지면 최대 AE energy 방출량이 많아지는데 이는 크랙이나 탈락파괴가 가속되는 파괴수준의 정보를 제공하였다. 제조된 ZrO₂/NiCr FGM은 1000°C 이상의 열충격 극한환경을 극복할 수 있음을 나타내었다. 열충격에 의한 FGM의 표면인 세라믹층에서 많은 크랙들과 크랙의 합체에 의한 탈락파괴들을 관찰할 수 있었으며 층간 수축률 또는 기공률을 제어함으로써 건전한 재료를 제작하면 훨씬 우수한 내열충격 특성을 지닌 재료가 탄생할 수 있으리라 생각된다.

REFERENCES

1. M. Niino, T. Hirai, and R. Watanabe, "Functionally Gradient Materials as Thermal Barrier for Space Plane," *J. Jpn. Soc. Comp. Mater.*, **13** 257-64 (1987).
2. T. Hirai, "Functionally Gradient Materials and Nano-Composites," *Ceramic Transactions*, **34** 11-20 (1993).
3. A. Carpinteri and N. Pugno, "Thermal Loading in Multilayered and/or Functionally Graded Materials: Residual Stress Field, Delamination, Fatigue, and Related Size Effects," *International Journal of Solids and Structures*, **43** 828-41 (2006).
4. W. Szymczyk, "Numerical Simulation of Composite Surface Coating as a Functionally Graded Material," *Mater. Sci. and Eng. A*, **412** 61-5 (2005).
5. M. T. Tilbrook, R. J. Moon, and M. Hoffman, "Finite Ele-

- ment Simulations of Crack Propagation in Functionally Graded Materials under Flexural Loading,” *Engineering Fracture Mechanics*, **72** 2444-67 (2005).
6. B. N. Rao and S. Rahman, “A Continuum Shape Sensitivity Method for Fracture Analysis of Orthotropic Functionally Graded Materials,” *Mech. of Mater.*, **37** 1007-25 (2005).
 7. K. Tohgo, T. Suzuki, and H. Araki, “Evaluation of R-Curve Behavior of Ceramic/Metal Functionally Graded Materials by Stable Crack Growth,” *Engineering Fracture Mechanics*, **72** 2359-72 (2005).
 8. R. C. Batra and B. M. Love, “Crack Propagation Due to Brittle and Ductile Failures in Microporous Thermoelastoviscoplastic Functionally Graded Materials,” *Engineering Fracture Mechanics*, **72** 1954-79 (2005).
 9. K. Y. Dai, G. R. Liu, X. Han, and K. M. Li, “Thermo-mechanical Analysis of Functionally Graded Material (FGM) Plates Using Element-Free Galerkin Method,” *Computers & Structures*, **83** 1487-502 (2005).
 10. C. Kastritseas, P. A. Smith, and J. A. Yeomans, “Thermal Shock Fracture in Unidirectional Fibre-Reinforced Ceramic-matrix Composites,” *Composites Sci. and Tech.*, **65** 1880-90 (2005).
 11. B.-L. Wang, Y.-W. Mai, and X.-H. Zhang, “Thermal Shock Resistance of Functionally Graded Materials,” *Acta Materialia*, **52** 4961-72 (2004).
 12. J. Zhao, X. Ai, J. Deng, and Z. Wang, “A Model of the Thermal Shock Resistance Parameter for Functionally Gradient Ceramics,” *Mater. Sci. and Eng. A*, **382** 23-9 (2004).
 13. B. Zhou and K. Kokini, “Effect of Surface Pre-Crack Morphology on the Fracture of Thermal Barrier Coatings under Thermal Shock,” *Acta Materialia*, **52** 4189-97 (2004).
 14. J. C. Zhu, Z. D. Yin, and Z. H. Lai, “Microstructure and Mechanical Properties of ZrO₂-Ni Functionally Gradient Material,” *J. Mater. Sci. Tech.*, **10** 188-92 (1994).
 15. H. Waki, K. Ogura, I. Nishikawa, and A. Ohmori, “Monotonic and Cyclic Deformation Behavior of Plasma-Sprayed Coatings Under Uni-Axial Compressive Loading,” *Mater. Sci. and Eng. A*, **374** 129-36 (2004).
 16. J. Q. Li, X. R. Zeng, J. N. Tang, and P. Xiao, “Fabrication and Thermal Properties of a YSZ-NiCr Joint with an Interlayer of YSZ-NiCr Functionally Graded Material,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, **23** 1847-53 (2003).
 17. H. Hamatani, N. Shimoda, and S. Kitaguchi, “Effect of the Composition Profile and Density of LPPS Sprayed Functionally Graded Coating on the Thermal Shock Resistance,” *Sci. and Tech. of Adv. Mater.*, **4** 197-203 (2003).
 18. J. Zhu, Z. Lai, Z. Yin, J. H. Jeon, and S. Y. Lee, “Fabrication of ZrO₂-NiCr Functionally Graded Material by Powder Metallurgy,” *Mater. Chem. and Phys.*, **68** 130-35 (2001).
 19. Q. Liu, X. Chen, and N. Gindy, “Investigation of Acoustic Emission Signals under a Simulative Environment of Grinding Burn,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46** 284-92 (2006).
 20. D. E. Lee, I. Hwang, C. M. O. Valente, J. F. G. Oliveira, and D. A. Dornfeld, “Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **46** 176-88 (2006).
 21. H. Moriya, T. Fujita, H. Niitsuma, J. Eisenblatter, and G. Manthei, “Analysis of Fracture Propagation Behavior Using Hydraulically Induced Acoustic Emissions in the Bernburg Salt Mine,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **43** 49-57 (2006).
 22. T. Chotard, D. Rotureau, and A. Smith, “Analysis of Acoustic Emission Signature During Aluminous Cement Setting to Characterise the Mechanical Behaviour of the Hard Material,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, **25** 3523-31 (2005).