

# 가스터빈 날개용 경사기능재료의 열충격 특성

임재규\* · 송준희\* · 김연직\*

(1997년 3월 25일 접수)

## Thermal Shock Characteristics of FGM for Gas Turbine Blade

Jae-Kyoo Lim Jun-Hee Song and Yon-Jig Kim

**Key Words :** Functionally Graded Material(경사기능재료), Thermal Shock(열충격), Gas Turbine Blade(가스터빈 날개), Thermal Barrier Coating(열차폐 코팅), Plasma Spraying(플라즈마 용사), Acoustic Emission(음향방출)

### Abstract

The development of a new material which should be continuously usable under severe environment of very high temperature has been urgently requested. The conventional thermal barrier coating(TBC) is a two layer coating, but a composition and a microstructure of functionally graded material(FGM) are varied continuously from place to place in ways designed to provide it with the maximum function of mitigating the induced thermal stress. The purpose of this study is to evaluate the heat-resistant characteristics by thermal shock of laser and furnace heating. The fracture behaviors of non-FGM(NFGM) and FGM were investigated based on acoustic emission(AE) technique during thermal shock test. Therefore, it can be concluded that FGM gives higher thermal resistance compared to NFGM by AE signal and fracture surface analysis.

### 1. 서 론

열효율이 높고 석유 대체가 가능한 열기관의 개발에 있어서 고효율화, 대용량화, 환경 대응 및 연료의 다양화 등이 다각적으로 요구되고 있다. 발전용 가스터빈 및 항공기용 제트엔진 등의 고온기기의 열효율 향상을 위해서는 터빈입구 가스온도의 고온화가 효과적이다. 현재로는 이 가스온도가 내열합금의 용점부근까지 상승하고, 많은 냉각가스의 사용으로 열효율이 낮게 작동하고 있는 상태이다. 이러한 고온의 사용환경때문에 종래의 재료계에서는 한계에 달해 있고, 내열성에 우수한 세라믹을 피복하는 열차폐 코팅(thermal barrier coating ;

TBC)재의 가스터빈 개발이 기대되고 있다.<sup>(1~3)</sup> 연소기기 또는 정익의 세라믹 코팅화는 실용단계까지 진전해 오고 있으며, 항공기용 가스터빈의 고압 1 단계 정익에 TBC를 시공한 것이 상용화되고 있다.<sup>(4)</sup> 그러나, 곡률반경이 작고 열부하가 높은 등익의 세라믹 코팅화에는 여러가지 과제가 남아 있다. 지금까지의 연구에서는 이러한 TBC계에 대한 파손과정의 지식이 매우 부족하며 성능예측 시험법의 개발이 급선무인 과제이다. 또한 TBC재료에서는 코팅에 탈락파괴의 발생이 용이하므로 열적 특성의 차이를 완화시켜 강력한 재료를 얻는다는 개념에서 경사기능재료(functionally graded material ; FGM)가 주목을 받고 있다.<sup>(5,6)</sup> FGM은 코팅층내에서 고온가스에 접하는 면에는 세라믹을 배치해서 내열성을 부여하고, 냉각을 행하는 면에는 금속재료를 배치해서 고열전도성과 기계적 강도를 부

\*회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차 신기술연구소

여해 그 사이에 조성, 조직분포를 연속적으로 제어함으로써 열응력을 적극적으로 완화시킨다는 것이다.<sup>(7~11)</sup>

본 연구는 열기관에 요구되는 개발과제의 하나인 고효율화에 공헌하는 내열재료의 평가법 개발을 행하는 것이다. 실기 가스터빈은 경험에 의하면 날개의 선단부가 운전중의 열부하에 가장 가혹하게 놓여지기 때문에 손상을 심하게 받고 있다.<sup>(12)</sup> 따라서 본 연구에서는 열부하에 가혹한 동익 선단부를 모의한 세라믹 코팅의 종래재와 경사재를 대상으로 레이저 가열 및 균일노내 가열법<sup>(13)</sup>에 의한 열충격 시험을 실시하였다. 또, 미시파괴를 비파괴적으로 검출하는 음향방출(acoustic emission ; AE)법<sup>(14~17)</sup>을 병용하여 시험중 코팅층의 크랙발생을 검출하였으며 AE의 발생거동에 의해 재료의 손상정도를 규정하는 것에 의해 탈락파괴의 발생을 예측하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편 형상 및 사양

시험편은 가스터빈 날개 선단부의 곡률을 중공원통형으로 모의한 것이며, 기재로는 스테인리스강(STS304)을 사용했다. 본 실험에 이용한 플라즈마 용사재는 기재상에 중간 결합층(bond coat)으로서 Ni기 초합금(NiCrAlY)과 최상부 용사층(top coat)에는 세라믹으로서 8wt%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 부분안정화된 ZrO<sub>2</sub>(PSZ)를 대기압 플라즈마 용사법으로 코팅한 무경사재(NFGM)와 경사재(FGM)이다. 시험편 형상은 Fig.1에 나타나 있으며, 기재의 외경과 두께는 각각 8 mm, 2 mm이다. NFGM재의 NiCrAlY층 및

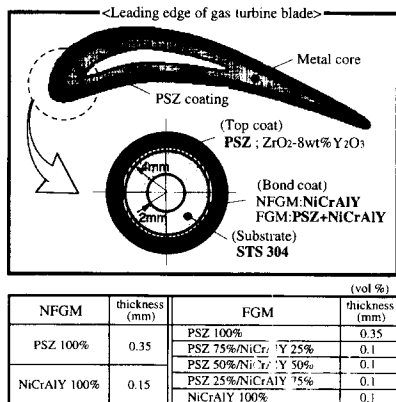


Fig. 1 Cylindrical specimen for thermal shock test.

PSZ 코팅층의 두께는 각각 0.15mm, 0.35 mm이다. FGM재는 용사전 PSZ와 NiCrAlY의 분말을 5단계의 혼합비로 변화시켜 단계 경사적층한 것이며 전체 코팅두께가 0.75 mm이다.

### 2.2 레이저 가열장치와 AE 계측장치

레이저 발진장치로서 일본과학 엔지니어링(株)製 탄산가스 레이저장치(NAL-50D型)를 이용했다. 사용 가스 및 혼합비는 CO<sub>2</sub>(6%), N<sub>2</sub>(14%), He(80%)이다. 레이저의 발진파장은 중심에서 10.6μ 이고, 발진형태는 연속형이다. 출력측정기(power meter)에 의해 측정되는 레이저 출력은 최대출력 및 최소 안정출력이 각각 50 W, 6 W이다. 실험장치의 개략도는 Fig.2에 보이며 가열부, 시편, 체결부, 냉각부, 온도계측부, AE 계측부로 구성되어 있다. 시험편 표면에 레이저 빔(laser beam)을 조사하고(beam 직경은 약 4 mm), 표면온도 및 이면온도가 임의의 온도조건에 달할 때에 차단기(chopper)로 시험편을 차단하여 실온까지 냉각했다. 냉각은 중공 원통 내부를 수냉에 의해 실시하였다. 수냉을 위해 이용한 유량은 1.6l/min이다. 표면온도의 측정은 600℃~3000℃의 측정 온도범위를 갖는 CHINO(株)製 방사온도계(IR-AHIS)에 의해 수행하고, 이면온도는 열전대(K형)에 의해 측정했다. 소요의 온도조건은 레이저 출력 또는 조사시간을 조절하는 것에 의해 달성하였다. AE 계측으로 레이저 가열 및 냉각과정에 걸쳐 AE 방출량을 조사하였다. 열충격시험 후에는 전자현미경에 의해 코팅층의 손상형태를 관찰하였다.

AE 계측에는 サン電子工業(株)製 크랙검출기(cracking monitor, MD1100S型)를 이용했다. 압전형 AE 센서는 시험편의 기재부분에 체결하고 얻어진 신호를 5~500 kHz의 대역여과(bandpass filter)

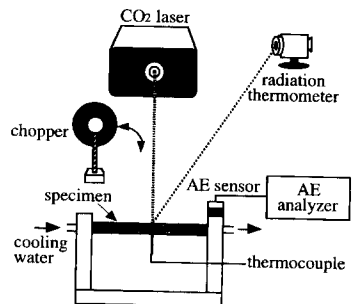


Fig. 2 Thermal shock testing system by laser heating.

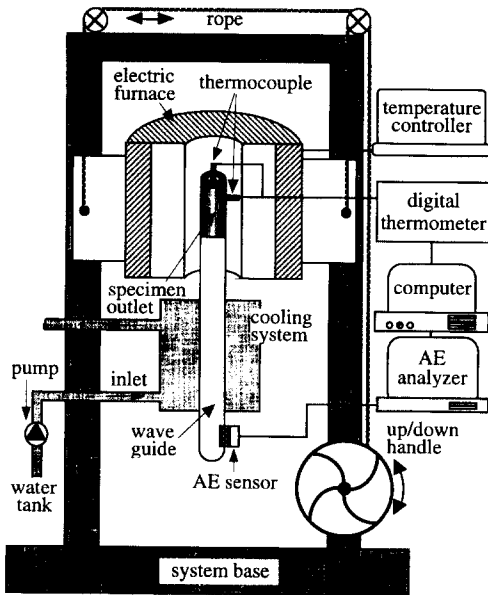
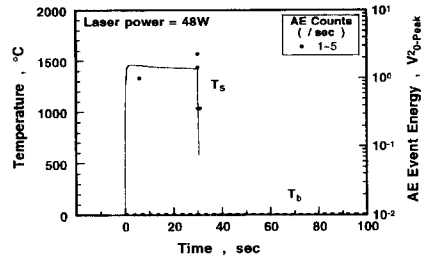


Fig. 3 Thermal shock testing system by furnace heating.

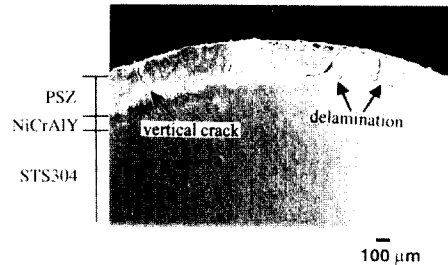
를 통과한 후 80 dB로 증폭했다. AE 신호는 그 진폭의 크기  $V_{0-Peak}$ 에 의해 8단계로 나뉘어 검출하고 AE 에너지(energy)값은 최대 진폭전압의 2승 ( $V^2_{0-Peak}$ )에 의해 평가했다. 더구나 외부잡음과 구별하기 위해 실험중에는 오실로스코프와 연결해 감시하였다.

### 2.3 균일노와 AE 계측장치

본 실험에 대한 장치도가 Fig. 3에 제시되어 있다. 고온 분위기는 4 kw용량의 최대온도 1200°C까지 상승시킬 수 있는 전기로를 사용하여 조성시켰다. 공기중에서 노를 밀폐시키고 온도조절기에 의해 가열속도(약 60°C/min)와 최대온도(600~1000°C)를 조건에 따라 조절하였다. 노내부의 온도는 K형의 열전대를 사용하여 검출하였다. 출력된 온도값은 AE 장비에도 동시에 저장하였다. 열충격시험은 조건에 따라 가열, 유지, 냉각의 3단계로 열변화를 시켜 실시하였다. 열이력에 따른 영향을 고려하기 위해 냉각방식을 다르게 행하였다. 냉각속도의 변화를 알아보기 위해 시험편을 상온에서 소정의 온도까지 가열하고, 5분 유지한 후 노냉 및 급냉하였다. 이때 NFGM은 600°C, 700°C, 800°C, 900°C의 온도에서 실험하였고, FGM은 800°C, 900°C, 1000°C의 온도에 대해서 실시하였다.



(a) Temperature history and AE behavior



(b) SEM photograph

Fig. 4 Thermal shock result by laser heating NFGM.

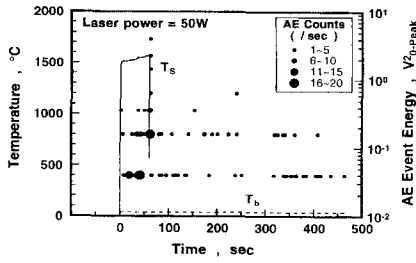
AE 시험은 Physical Acoustics Corporation(PAC)사의 8900 LOCAN AT 장치를 사용하였다. 신호는 전치증폭기에서 40 dB 증폭하여 100~1200kHz 대역에서 여과를 한 후 AE 분석기에 입력하였다. 입력한 AE 신호는 주증폭기에서 다시 40dB 증폭되어 총이득은 80 dB이다. AE 센서는 150 kHz의 공진주파수와 50~1000 kHz의 광대역주파수 범위를 감지하는 압전형 변환기를 사용하였다. AE 센서는 고감도이기 때문에 외부의 잡음에 대해 충분한 검토를 실시하였다. 본 연구의 AE 인자인 AE 에너지는 단위시간(duration)당의 진폭값에 대한 포락선 에너지(envelope energy)이므로 단위는 ‘dB’의 차원을 갖는다.<sup>(15)</sup>

## 3. 실험결과 및 고찰

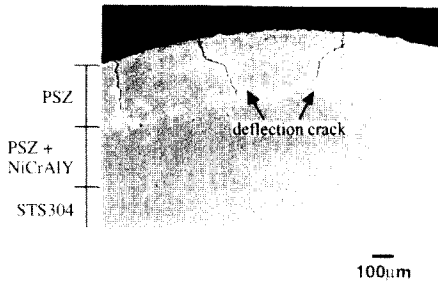
### 3.1 레이저 열충격실험

#### 3.1.1 NFGM재의 열충격거동

레이저 열충격시험에서 NFGM재에 관한 수냉환경하의 표면온도( $T_s$ ), 이면온도( $T_b$ ) 이력 및 AE 거동과 단면의 전자현미경(scanning electron microscopy, SEM) 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 검은 원은 AE energy 수준을 가리키며, 원의 크기는 1초간에 검출된 AE 신호의 count수를 나타



(a) Temperature history and AE behavior

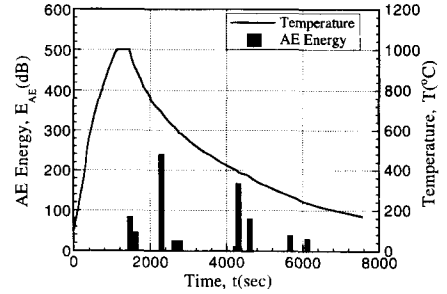


(b) SEM photograph

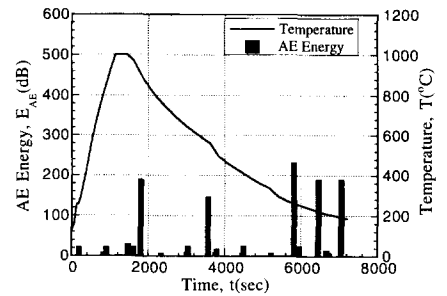
Fig. 5 Thermal shock result by laser heating in FGM.

내고 있다. 수냉시험에 있어서 이면의 온도상승은 없고 수온으로 유지되었다. 레이저 출력이 낮으면 AE는 검출되지 않지만 레이저의 출력을 높여 표면 온도가 1250°C 이상으로 되면 레이저의 차단 직후에 1회만 AE 신호가 검출되었다. 그 때의 크랙형태는 PSZ 코팅 표면에서 bond coat층 계면까지 수직크랙이 발생하였다. 더욱이, 표면온도가 높게 되어 Fig. 4(a) 처럼 1400°C를 넘으면 가열과정에서 표면 온도가 정상상태에 도달하며 수초 후에 AE 신호가 1회 검출되고 레이저 차단시에도 진폭이 큰 AE가 검출되었다. 이 때 크랙형태는 수직크랙 및 수직크랙의 편향과는 다르게 PSZ/bond coat 계면부근에 계면과 평행한 균열이 발생하고 있다(Fig. 4(b)).

이상의 수냉환경에 있어서 열충격시험의 결과에 의해 코팅 표면에서의 수직크랙은 표면온도가 약 1200°C를 넘으면 발생하였다. 또, 가열중의 표면, 이면의 온도낙차가 크게 되면( $\Delta T \geq$  약 1300°C) 수직크랙의 편향이 관찰된다. 온도낙차가 더욱 크게 되어  $\Delta T$ 가 약 1400°C를 넘으면 PSZ/bond coat 계면부근에 계면과 평행한 균열이 발생한다. 이처럼, AE 거동을 조사하여 코팅층에 생긴 미세파괴를, 즉각적으로 판정할 수 있었다.



(a) NFGM



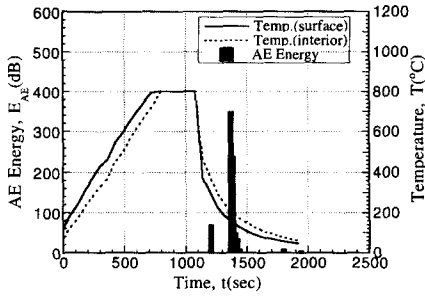
(b) FGM

Fig. 6 AE behavior and temperature history by furnace-cooling at 1000°C.

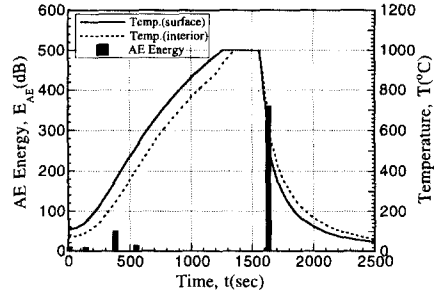
### 3.1.2 FGM재의 열충격 거동

본 절에서는 열응력 완화와 차열성능의 향상을 목적으로 만들어진 FGM재의 열충격 파괴특성에 대하여 조사하였으며, Fig. 5에 수냉시험의 대표적인 결과를 제시하였다. FGM재에 있어서도  $T_s = 1200^\circ\text{C}$  정도로 되면 레이저 차단직후에 AE가 검출되고 수직크랙의 손상이 발생하였다. 수직크랙의 규모는 최대의 것이 PSZ 코팅층을 관통하는 0.35 mm 정도이고, 이것은 NFGM재에 대한 수직크랙의 규모와 유사한 정도이었다. 더욱 더 표면온도를 높여  $T_s = 1400^\circ\text{C}$ 로 하면, NFGM재와 같은 형태인 수직크랙의 편향이 관찰되었다. 표면온도를 1600°C 까지 올리면 Fig. 5(a)처럼 가열에서 냉각과정에 걸쳐 최저 및 제2진폭 다수의 AE와 레이저 차단시 큰 AE가 검출되었다. 시험후에는 코팅층내에 수직크랙과 계면균열이 연결되어지는 계단상의 복잡한 균열이 관찰되었다(Fig. 5(b)). 균열은 PSZ 100% 층내에서 균열하고 균열선단은 PSZ 75%/NiCrAlY 25%층 계면까지 이르고 있다.

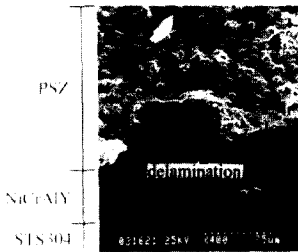
이상에 의해, FGM재에 대해서도 레이저 차단직후에 검출된 AE 신호는 코팅표면에서 수직으로 진전하는 수직크랙 혹은 수직크랙의 편향을 검출한



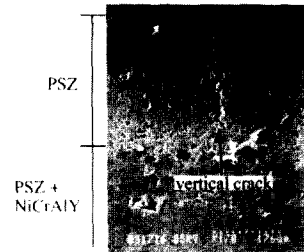
(a) AE behavior and temperature history



(a) AE behavior and temperature history



(b) SEM photograph



(b) SEM photograph

**Fig. 7** Thermal shock result by furnace heating NFGM at 800°C.

**Fig. 8** Thermal shock result by furnace heating FGM at 1000°C.

것이다. 가열에서 냉각과정에 걸쳐 저진폭의 AE와 레이저 차단시 큰 진폭의 AE 방출은 복잡 균열로 인해 발생하였다. 이처럼, FGM재에 대해서 계면에 평행한 균열을 포함한 복잡 균열은 발생했지만 1회만의 레이저 조사에서는 계면박리가 발생하지 않고 코팅의 경사화에 의한 열응력 완화에 의해 NFGM 재보다 내열충격 특성을 개선시킬 수 있음을 알았다.

### 3.2 균일노 열충격실험

NFGM과 FGM을 1000°C까지 노냉한 열충격실험의 결과가 Fig. 6에 제시되어 있다. AE의 거동이 냉각시에 250 dB이하로 방출되고 있지만 파면 관찰에서 크랙은 발생하지 않았다. 즉, 노냉한 열충격은 낮은 열응력이 발생하여 AE의 방출량도 작았으며 재료의 파손에 영향을 주지 않았던 것으로 판단되었다.

Fig. 7은 800°C까지 가열하고 5분간 등온유지시킨 후 급냉한 것이다. 시험편의 표면온도와 내부온도는 그림에서 각각 실선과 파선으로 나타내었다. 열충격시험동안 발생한 AE 에너지의 총 발생량은 770 dB정도이고, 표면온도 160°C와 내부온도 210°C인 지점에서 350dB의 최대 AE 에너지 방출이 보였으며, 냉각기간 동안에만 방출이 보인 것도 주목

할만한 것이다. 즉, NFGM재에서 최대온도가 600°C, 700°C인 조건은 AE 에너지 분포가 미미한 것으로 보아 열충격에 의해 재료손상이 거의 없으며, 반면에 800°C이상에서는 AE 에너지가 커지며 300 dB 이상의 방출이 관찰되어 재료손상이 진행되는 것으로 추정되었고 파면관찰에서도 동일한 현상을 관찰할 수 있었다.

800°C, 900°C까지 열충격을 행한 FGM 시험에 대해서는 AE 에너지가 30~40 dB이하로 적은 방출을 보이고 있어 파손이 발생하지 않았다. Fig. 8은 1000°C에서 행한 FGM에 있어서 온도이력과 AE 에너지 방출거동을 나타낸 것이다. 발생한 총 AE 에너지는 445 dB이고, 표면온도가 480°C, 내부온도가 580°C인 지점에서 360 dB의 높은 방출거동을 나타내었다. 즉, 이전의 900°C까지는 코팅 공유면의 손상이 거의 없지만 1000°C의 온도조건에서는 다소 높은 AE가 발생하여 국부적인 파괴가 생기는 것으로 생각된다. 그러므로, 급냉한 열충격시험에서 파손발생의 개시온도는 NFGM이 800°C이고, FGM은 1000°C라는 사실을 알 수 있다.

### 3.3 열충격 파괴거동

열충격시험에 있어서 표면온도와 이면온도는 레

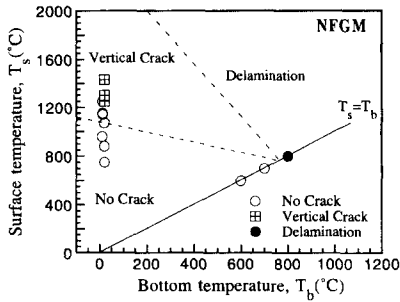


Fig. 9 Fracture behavior and temperature distribution in NFGM.

이저 출력과 조사시간에 의존하므로 레이저 출력을 설정해 이면의 온도상승을 계측하면서 조사시간을 결정하여 레이저를 차단시켰다. 이러한 실온까지의 냉각과정에서 AE가 검출되어지면 시험을 종료하고 SEM 관찰을 행하였다. NFGM재에 대해 얻어진 표면 및 이면의 각 온도조건과 크랙형태의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 그림 중  $T_s = T_b$  상의 값은 균일노 내에 있어서 시험편을 일정가열하고 노외에서 실온까지 냉각한 경우의 결과이다. 그림에서 수직 크랙은 이면온도가 상온일 때 표면온도가 높으면 발생하므로 주로 표면온도에 의존함을 알 수 있었다. 그러나 계면균열은 표면온도가 상대적으로 높지 않지만 이면온도가 상승된 영역에서 발생하고 있으므로 이면온도 또는 기재온도가 크게 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 수직크랙은 레이저 가열중의 고온도 및 코팅면 내의 압축응력에 의해 PSZ가 비탄성 변형을 하고 냉각시에 이것에 기인하여 발생하는 인장응력에 의해 생긴 것이라고 생각된다. 또, 수직크랙의 편향은 코팅층내의 온도구배(표면, 이면의 온도차  $\Delta T = 1300^\circ\text{C}$ )가 크고, 가열중의 코팅면내의 압축응력이 더욱 커지게 되어 PSZ의 비탄성 변형량이 증가해서 냉각시에 발생하는 인장응력 상태가 변화하기 때문이라고 생각되어진다. 또한, 가열중에 발생하는 계면균열은  $\Delta T = 1400^\circ\text{C}$ 로 되어 코팅층내의 온도구배가 더욱 크게 되어 발생하는 한층 큰 압축응력에 의해 발생한다고 생각되어진다. 이것에 대해 계면박리는 가열시의 PSZ 코팅에서 비탄성 변형이 원인으로 되고, 냉각과정에 있어서 기재금속의 수축에 의한 압축응력을 받아서 코팅이 좌굴하는 것에 의해 발생한다고 판단된다.

FGM재의 열충격시험에 의해 얻어진 표면, 이면

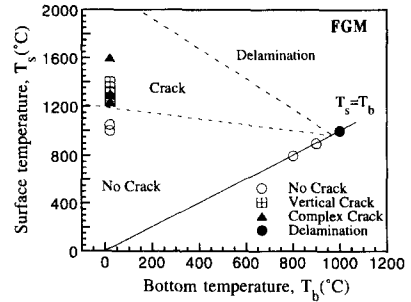


Fig. 10 Fracture behavior and temperature distribution in FGM.

의 각 온도조건과 코팅층의 손상형태에 대한 관계를 Fig. 10에 보인다. 그림 가운데  $T_s = T_b$  상의 점은 NFGM재와 마찬가지로 고온노에 의한 일정 가열시험의 결과이다. FGM재의 열충격시험 조건은 NFGM재에 비해 표면, 이면의 온도낙차가 크게 되는 경향이 있어 차열성이 향상되고 있음을 알았다. FGM재의 손상은 수직크랙과 손상이 없는 경계에 대해서는 NFGM재보다도 표면온도( $T_s$ )에서 약  $100^\circ\text{C}$  고온측으로 이동되었음을 알았다. 더욱이, 계면박리에 대해서는 노내 열충격시험의 결과로 하면 NFGM재에 비해  $200^\circ\text{C}$  정도 높은 영역에 있다고 여겨진다. 또, 계면과 평행한 균열을 포함한 복잡 균열은 수냉환경에서 표면과 이면의 온도낙차가 큰 온도조건( $\Delta T$  약  $1200^\circ\text{C}$ )에 있어서 발생하였다. 이것은 Fig. 5(a)의 AE 발생과정에서도 알 수 있는 것처럼 가열중 코팅층내에 손상이 발생하며 코팅층내의 온도낙차가 크게 되어 발생하는 열응력이 커져 발생한다고 생각된다. 이처럼, 코팅의 경사화와 차열성능의 향상에 의해 손상영역은 NFGM재에 비해 고온측으로 이동하여 내열충격 특성이 개선되었음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 가스터빈 날개용 신단부를 모의한 시험편을 제작하여 NFGM재와 FGM재의 열충격 파괴특성을 조사하였다. 열충격시험은 레이저 조사와 균일노내 가열법을 이용하여 실시하였고, 재료의 미시적인 파괴거동은 AE법을 병용하여 분석하였다. 시험후에는 전자현미경으로 파면을 관찰하여 파면형태를 고찰하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 가스터빈 날개 선단부의 곡물을 모의한 중공 원통형 시험편을 이용하여 레이저 조사와 균일노내 가열 조건하에서 NFGM재 및 FGM재에 대한 열충격 손상도를 얻을 수 있었다. FGM재는 NFGM재보다 표면온도가 100°C 정도 고온측에 있어 내열성이 우수하므로 열충격에 의한 탈락파괴의 발생 가능성이 낮았다.

(2) 균일노에 의한 열충격실험에서 NFGM은 800°C, FGM은 1000°C 온도를 기점으로 파손을 발생시켰으며, NFGM보다 FGM이 200°C 정도 개선된 열충격 특성을 보였다.

(3) AE법을 병용하는 것에 의해 코팅층에 생긴 미세파괴를 즉각적으로 판정하고 상대적인 AE 방출 크기와 빈도에 의해 재료의 손상형태 분류가 가능하여 열충격 실험에서 유효한 정보를 제공하였다.

(4) PSZ와 Ni기 초합금의 경사화에 의한 FGM재는 세라믹과 금속을 직접 코팅한 NFGM재에 비해 열응력의 완화로 내열충격 특성의 개선 가능성을 확보하였고 미소시험편이 얻어지는 개발의 초기 단계에서 효과적인 내열성능 평가방법임을 알았다.

## 참고문헌

- (1) Gill, B. J., and Tucker, Jr, R. C., 1986, "Plasma Spray Coating Process," *Materials Science and Technology*, Vol. 2, pp. 207~213.
- (2) Miller, R. A., 1987, "Current Status of Thermal Barrier Coating-An Overview," *Surface and Coating Technology*, Vol. 30, pp. 1~11.
- (3) 児島慶亨, 大高 清, 大中紀之, 1989, "減壓雰圍氣中溶射による熱遮へいコーティングの耐久性," *高温學會誌*, Vol. 15~5, pp. 217~226.
- (4) 竹田博光 外, 1985, "遮熱コーティングの耐久性に對する考察," 第13回 카스터ヒン定期講演會講演論文集, Vol. 6, pp. 47~51.
- (5) 未踏科學技術協會/傾斜機能材料研究會, 1993, "傾斜機能材料," 工業調査會.
- (6) 科學技術廣報財團, 1987, "複素化による機能發現と熱應力緩和のための基礎技術に關する調査報告書," 昭和61年度 科學技術振興調整費.
- (7) 송준희, 1997, "傾斜機能性 세라믹/金屬 複合材料의 破壞特性에 關한 研究," 박사학위논문 건국대학교.
- (8) 平井敏雄, 1992, "傾斜機能材料," 粉體および粉末冶金, 第39卷, 第4號, pp. 278.
- (9) 渡邊龍三, 川崎 亮, 1992, "粉末冶金法による傾斜機能材料の開發," 粉體および粉末冶金, 第39卷, 第4號, pp. 279~286.
- (10) 田中賢衛, 川崎 亮, 渡邊龍三, 1992, "SiC-AIN/Mo系超耐熱FGMにおける熱機械的性質," 粉體および粉末冶金, 第39卷, 第4號, pp. 309~623.
- (11) Iischner, B. and Cherradi, N., 1994, *3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials*, Lausanne, Switzerland, pp. 1~708.
- (12) 橋田俊之, 若菜健司, 高橋秀明, 1990, "ブラズマ溶射耐熱コーティング材料のレザ法による熱衝擊破壞評價," *日本機械學會論文集(A編)*, 第56卷, 第529號, pp. 1952~1956.
- (13) 송준희, 임재규, 1996, "경사기능성 세라믹/금속 복합재료의 열충격특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제7호, pp. 2134~2140.
- (14) Miller, R. K. and McIntire, P., 1987, "Nondestructive Testing Handbook," *American Society for Nondestructive Testing*, Acoustic Emission Testing Vol. 5.
- (15) PAC, 1988, "8900 LOCAN AT User's Manual," Physical Acoustics Corporation, Princeton, NJ 08543-3135.
- (16) Lord, A. E., Mason, W. P. and Thurson, R. N., 1975, "Physical Acoustics," Academic Press.
- (17) Liptai, R. G., Harris, D. O. and Tatro, C. A., 1971, "Acoustic Emission," *ASTM STP505* pp. 3~337.