

# 세라믹코팅재의 잔류응력 해석

한 지 원

호서대학교 공과대학 기계공학과  
(2008. 3. 11. 접수 / 2008. 6. 11. 채택)

## Residual Stresses Analysis of Ceramic Coating Materials

Ji-won Han

Department of Mechanical Engineering, Hoseo university  
(Received March 11, 2008 / Accepted June 11, 2008)

**Abstract :** In the present work, the measurement method of residual stresses in thermal barrier coatings(TBCs) which are received the thermal shock is performed numerically. For this, the internal residual stresses are predicted by commercial FEM software ABAQUS because the hole drilling strain gage method measures residual stresses only near the surface of a material. As the results of this study, the residual stresses are linearly increased when the surface temperatures are over 1,200°C. It is also found that the values of residual stress are increased as the coating thickness is thin.

**Key Words :** thermal barrier coatings, thermal shock, residual stresses, finite element method, hole drilling strain gage method

### 1. 서론

플라즈마 용사 열차폐코팅(Thermal barrier coatings)은 금속모재(Substrate)위에 산화막 생성과 열팽창 계수의 차이로 인한 열응력을 감소시키기 위한 NiCoCrAlY인 접착부(Bond coat)와 부분 안정화 지르코니아(PSZ  $ZrO_2$ )인 세라믹층(Top coat)으로 구성되어 있다<sup>1)</sup>.

Kokini 등<sup>2)</sup>은 세라믹층에 열충격을 가하면 세라믹 표면에 미세 표면균열이 생기고 균열의 개구부분이 열리면서 균열이 성장하여 접착부의 경계층 부근에 생기는 균열과 합체되어 세라믹 코팅이 파괴 되거나 분리되는 현상이 나타난다고 하였다. Na 등<sup>3)</sup>은 플라즈마 용사과정에서 세라믹 층에 생기는 잔류응력에 대해 유한요소법에 의한 평가 방법으로 잔류응력이 세라믹 표면에 미세한 표면균열을 발생하게 한다고 하였다.

이 같은 파괴 메카니즘은 아직 정확하게 규명되지 않았지만 세라믹 표면뿐만 아니라 두 접착재의 열팽창 계수 차이에 의한 접착부의 잔류응력도 주원인인 것으로 지적되고 있다<sup>4)</sup>.

잔류응력 측정방법은 여러 종류가 있으나<sup>5)</sup> 구멍

뚫기법이 측정원리나 과정이 비교적 간단하면서도 정확하게 측정할 수 있어 많이 사용되고 있다. 그러나 이 측정방법은 스트레인 게이지를 재료 표면에만 부착해야 하는 제약으로 재료내에 존재하는 잔류응력을 측정하는 것은 불가능 하다.

따라서 본 연구에서는 열충격을 받는 경우 열차폐코팅재의 접착부에 발생하는 잔류응력을 유한요소법으로 평가하고자 한다.

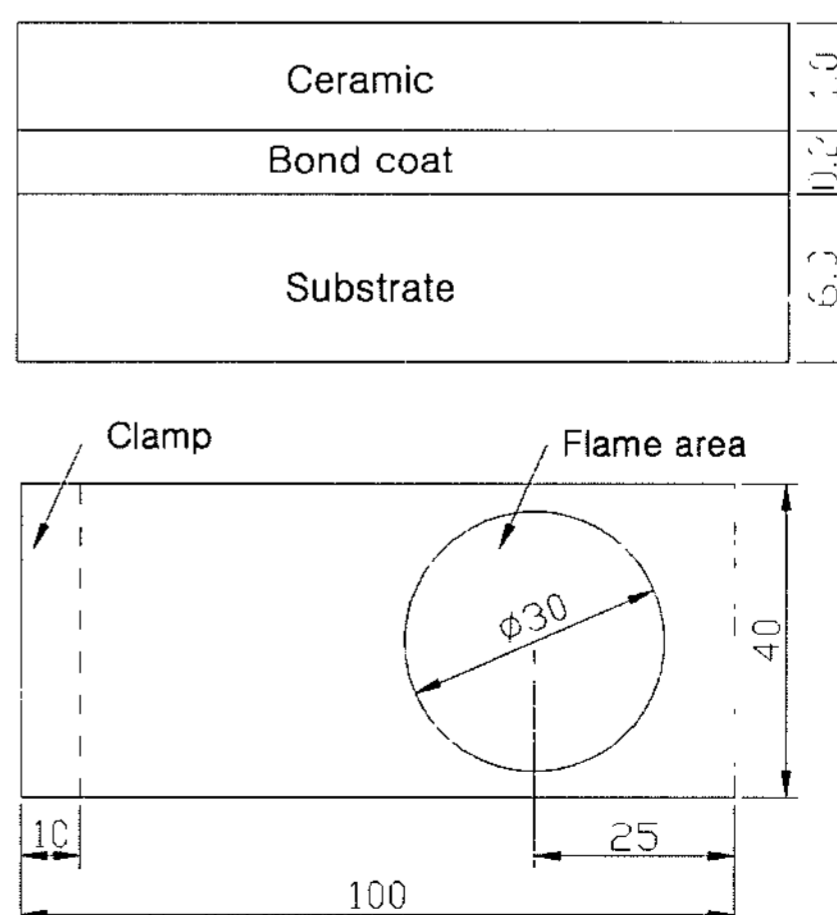


Fig. 1. Specimen geometry.

## 2. 실험

### 2.1. 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 Inconel 601인 모재에 접착부를 0.2mm 두께의 NiCoCrAlY로, 그 위에 부분안정화 지르코니아 세라믹을 1.0mm 코팅한 판재에서 CNC에 부착된 워터젯을 이용하여 100×40mm의 크기로 잘라 준비 하였다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다.

Table 1은 FEM해석을 위한 재료의 물성치를 나타낸 것이다.<sup>6)</sup>

Table 1. Thermophysical and elastic material properties used for the FEM

Property	Unit	Top coat	Bond coat	Substrate
Thermal conduct	Wm <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup>	0.4384 + 12.78 · 10 <sup>-4</sup> T	8.75+0.01143T	20.9
Specific heat	Jkg <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup>	566.0 + 6.123 · 10 <sup>-2</sup> T-1.143 · 10 <sup>7</sup> T <sup>2</sup>	488.9	448.0
Density	kgm <sup>-3</sup>	5780	6668	8370
CTE	k <sup>-1</sup>	10.8 · 10 <sup>-6</sup>	12.5 · 10 <sup>-6</sup>	1.22E-5
Young's Modulus	Gpa	27.6-876 · 10 <sup>-3</sup> T	80	186

### 2.2. 잔류응력 측정 실험

시험편에 열충격을 가하는 실험은 아세틸렌가스 연소 열충격 실험기(Fig. 2)를 이용하여 그림의 노즐A에서 30초 가열하고, 자동으로 노즐B로 이동하여 압축공기로 30초 냉각시키는 방법을 5회 반복한 후 공기 중에서 상온까지 냉각시켰다.

열충격 동안 세라믹 표면의 최고온도는 1000℃가 되게 하였으며, 온도측정은 적외선 온도측정기(Ircon 사, model UX709)를 이용하였다.



Fig. 2. Thermal shock test system.

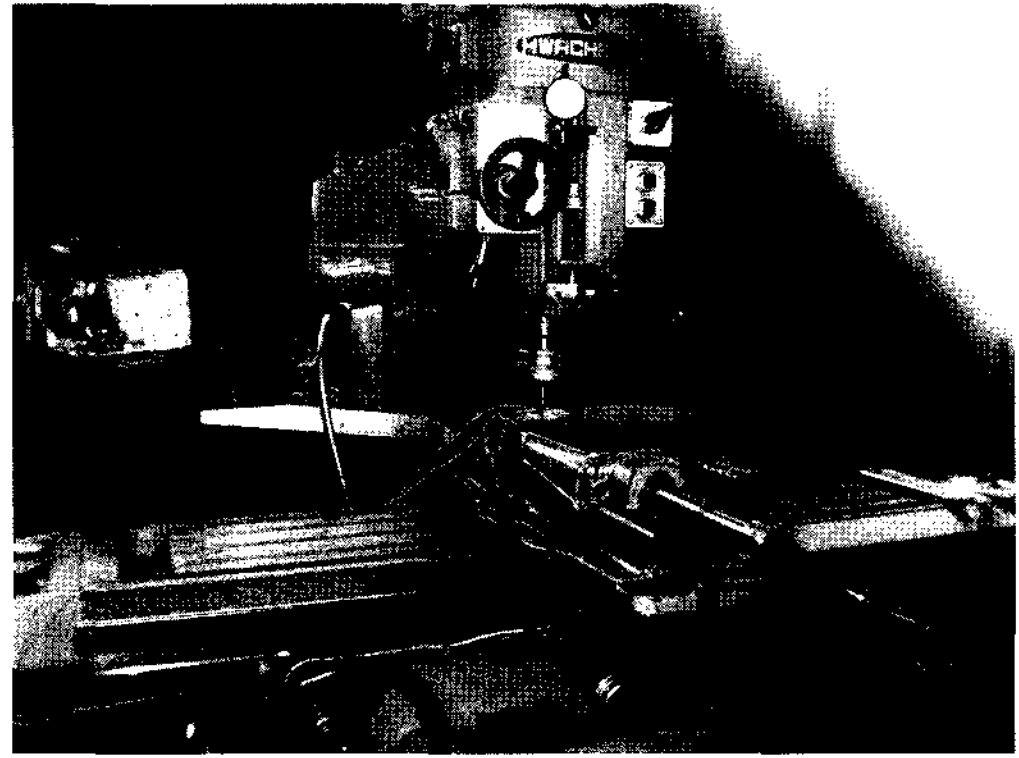


Fig. 3. Residual stress measurement system.

잔류응력측은 구멍뚫기법(Hole drilling strain-gage method)으로 ASTM E837(Standard test method for determining residual stresses by the hole drilling strain gage method)에 준하여 행하였다<sup>7)</sup>.

스트레인 게이지는 Kyowa사의 KFG-3-120-D28-11 (D = 11mm, D<sub>0</sub> = 4mm) 모델인 로제트 스트레인 게이지(Rosette strain gage)를 사용하여 냉각 후 가열 영역(Flame area)의 중심에 부착하였다. 구멍가공은 다이아몬드 분말이 부착된 직경 4mm 드릴을 0.1mm까지 미세 조절이 가능한 밀링머신에 장착하여 스트레인게이지의 중심에 구멍을 가공 하였다(Fig. 3).

잔류응력은 3개의 스트레인 게이지에서 측정된 스트레인을 이용하여 다음 식으로 계산하였다.

$$a_{\max, \min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_2)^2}$$

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 는 스트레인 게이지에서 측정된 값

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} a, B = -\frac{1}{2E} b$$

$\nu$ : 포와슨 비,  $E$ = 탄성계수

## 3. 유한요소법

### 3.1. 해석모델

시험편의 열충격을 받는 부위는 직경 30mm로 하였으며, 구멍뚫기법에 따라 시험편 전체규격을 3차원 모델로 구성하여 깊이 방향으로 구멍요소를 제거할 수 있도록 하였다. 모델링은 MSC/patram 프로그램을 이용하여 8절점 솔리드 요소(8-Node solid element)로 하였다.

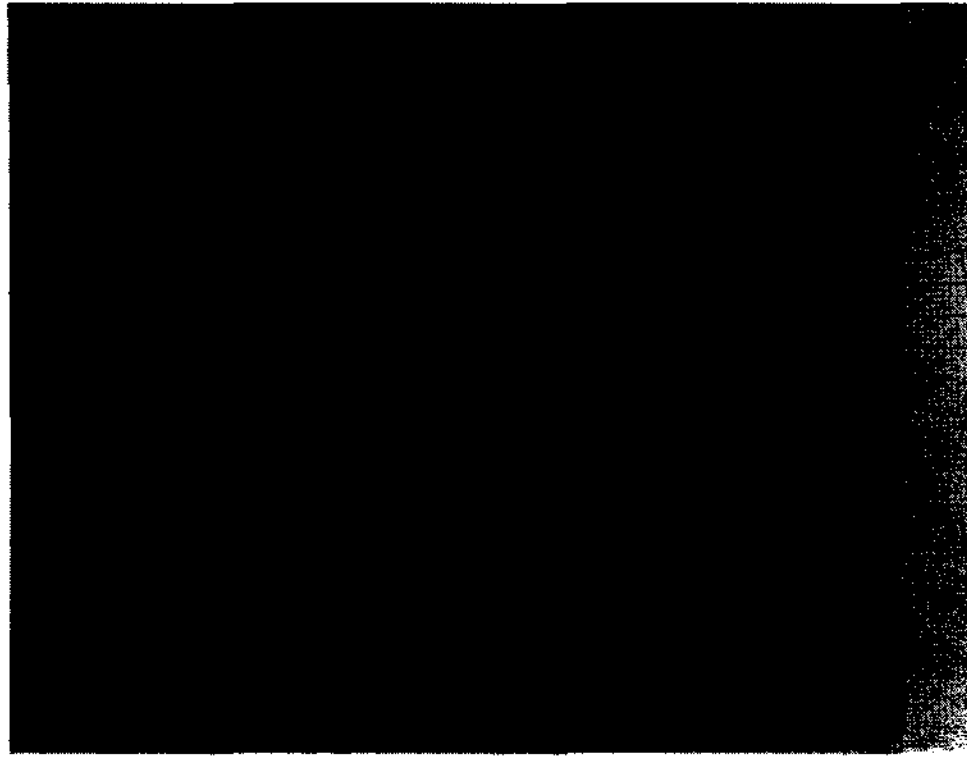


Fig. 4. Finite element model after drilling.

열해석을 위한 경계 조건으로 시험편의 측면은 면적이 작기 때문에 단열로 가정하였으며, 가열하는 동안에는 세라믹과 모재(Substrate)의 표면은 자연대류로, 냉각하는 동안에는 압축공기를 이용하였기에 세라믹 표면은 강제대류로 하였다. 열응력은 Abaqus 6.4를 이용하여 열해석 결과를 가지고 탄소성해석으로 하였다. Fig. 4는 구멍부분을 제거한 유한요소망을 나타낸 것이다.

### 3.2. 해석결과 및 검토

#### 3.2.1. 해석 모델 검증

유한요소법 해석을 위해 구성된 유한요소망의 타당성 검증은 실험에 의해 얻은 잔류응력 측정값과 컴퓨터 해석 값으로 비교하였다(Fig. 5).

세라믹코팅 표면의 온도가 1000°C인 경우에 대해 구멍 뚫기법에 의해 얻은 잔류응력은 9.1MPa이며, 유한요소법에 의한 잔류응력 값은 9.7MPa이다. 두 값에는 다소 오차가 있으나, 실험상의 오차를 고려한다면 유한요소법으로 잔류응력의 해석이 가능함을 알 수 있다.

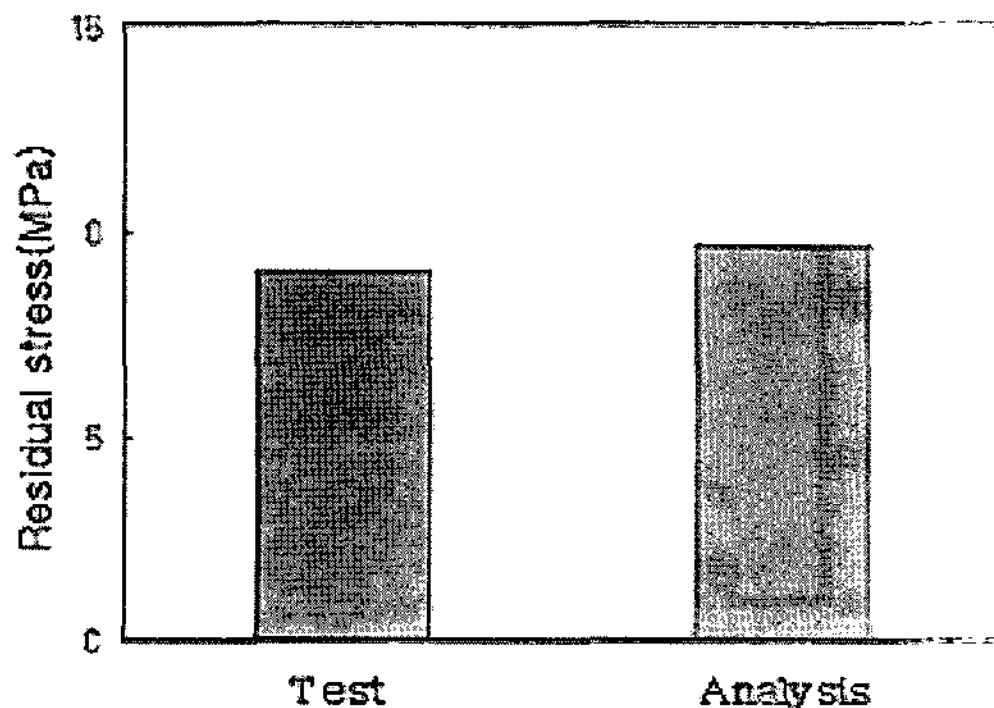


Fig. 5. Comparison of residual stress for test and analysis.

#### 3.2.2. 가열온도의 영향

Fig. 6은 1.0mm 세라믹 코팅재에 대해 표면온도 변화에 따른 세라믹과 접착부의 경계, 접착부와 금속재의 경계에 존재하는 잔류응력을 나타낸 것이다.

아래 그림에서 온도변화에 대해 두 경계부에서의 잔류응력의 차이는 거의 나타나지 않았다. 이는 접착부의 두께가 0.2mm의 박막 때문인 것으로 사료된다. 또 1200°C 이하에서는 잔류응력의 변화가 미미하나 1200°C 이상에서는 선형적으로 증가하고 있다. 이는 세라믹 코팅으로 1200°C 이하에서는 열의 차폐효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

#### 3.2.3. 세라믹코팅 두께의 영향

Fig. 7은 세라믹코팅 두께변화에 대해 경계부에 존재하는 잔류응력을 나타낸 것이다.

그림에서 0.5mm의 코팅두께의 경우, 가열온도가 증가함에 따라 잔류응력의 크기가 직선적으로 증가함을 보이나, 1.0mm의 경우에는 1200°C 이상에서 온도의 영향으로 잔류응력이 크게 증가함을 보이고 있다. 전체 온도 구간에서 0.5mm 코팅두께의

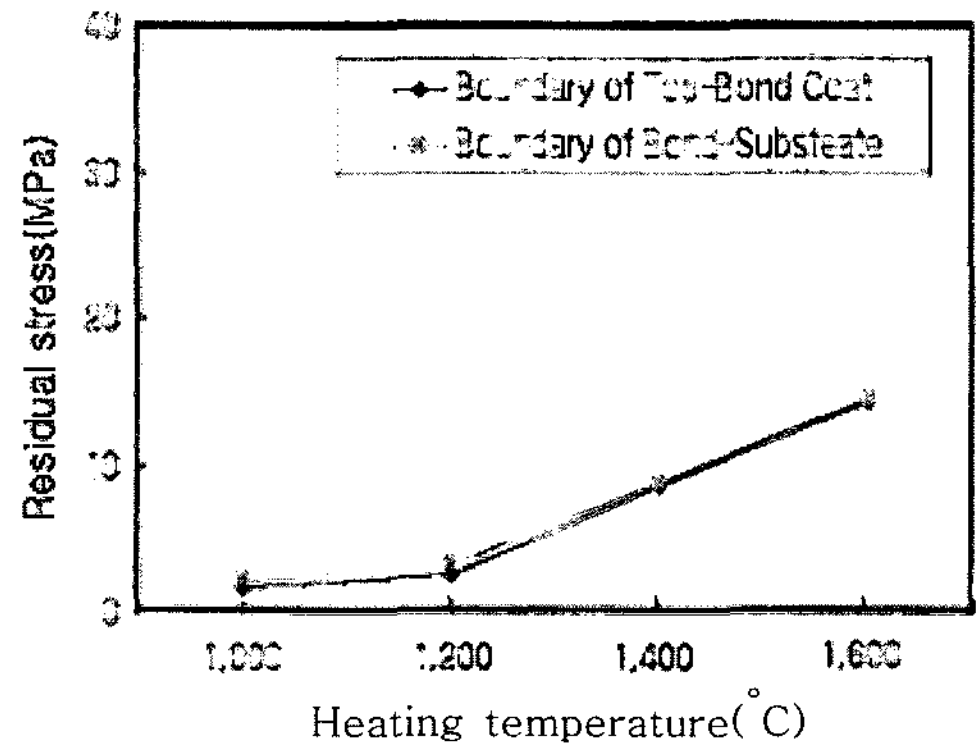


Fig. 6. Effect of heating temperature on residual stresses.

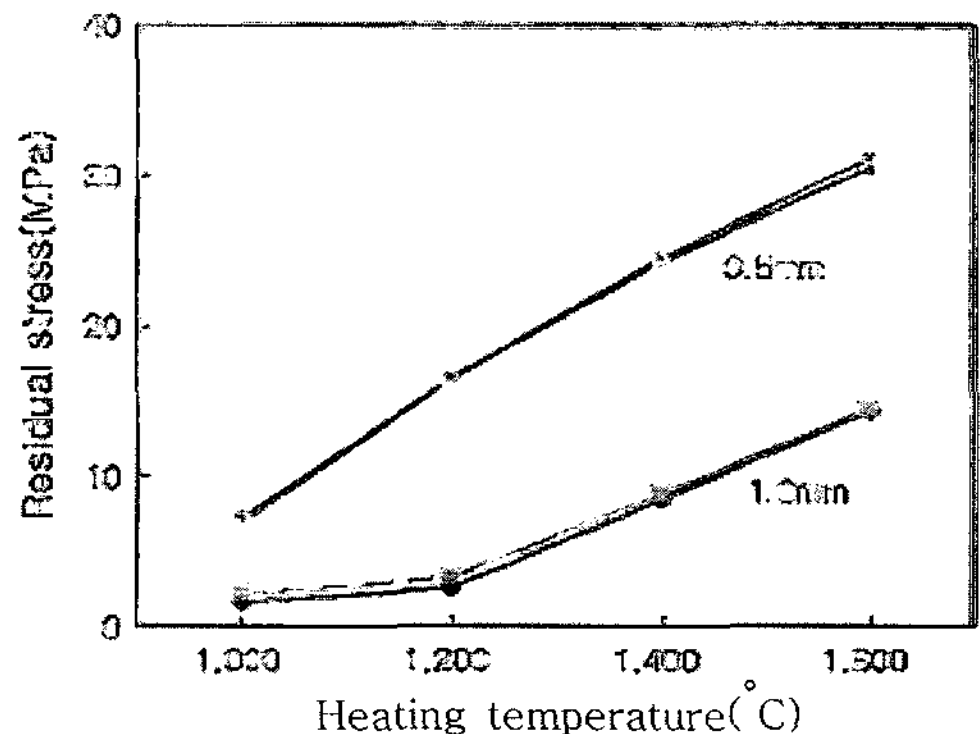


Fig. 7. Effect of coating thickness on residual stresses.

경우가 1.0mm코팅두께의 경우 보다 높은 잔류응력을 나타내며, 온도가 높아질수록 잔류응력의 차이도 더 커짐을 보이고 있다. 이는 세라믹코팅두께가 두꺼워질수록 깊이방향으로의 온도 전달이 어려워지기 때문에 경계부에서의 열팽창이 작게 일어나 잔류응력의 생성도 작게 일어나는 것으로 사료된다. 세라믹코팅 두께가 두꺼우면 열차폐 효과가 크고 재료의 내구성이 좋아지나 플라즈마 용사 작업에 따른 경제적 비용이 크게 증가하기 때문에 적절한 코팅두께의 설계가 중요하다.

### 3. 결론

플라즈마 용사 세라믹 코팅재에 열충격을 가한 후 재료내에 발생하는 잔류응력에 대한 컴퓨터 해석 결과를 요약한다면 다음과 같다.

- 1) 잔류응력의 크기는 표면온도가 1200°C 이상에서 급격하게 선형적으로 증가함을 보였다.
- 2) 접착부의 잔류응력은 코팅두께가 얇을수록 높게 발생하며, 두 코팅두께의 경우 표면온도가 증가할수록, 잔류응력의 차가 크게 나타남을 보였다.

**감사의 글 :** 이 논문은 2006년도 호서대학교 학문연구조성비에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- 1) P. K. Wright, A. G. Evans, "Mechanics Governing The Performance of Thermal Barrier Coatings", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 4, pp. 255 ~265, 1999.
- 2) K. kokini, B. D. Choules, T. A. Taylor, "Thermal Fracture of Thermal Barrier Coatings in a High Heat Flux Environment", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 106, pp. 23 ~29, 1998.
- 3) H.W.Na, Z.Gan, "Finite Element Analysis Technique or Predicting as Sprayed Residual Stresses Generated by The Plasma Spay Coating Process", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 41, pp. 1235 ~1254, 2005.
- 4) A. Kucuk, C. C. Berndt, "Influence of Plasma Sprayed Parameter on Mechanical Properties of Yttia Stabilized Zirconia Coatings", *Material Science and Engineering*, Vol. A2, pp. 29 ~40, 2000.
- 5) F. A. Kandil, J. D. Lord, A. T. Fry, P. V. Granti, "A Review of Residual Stress Measurement Methods-a Guide to Technique Selection", *NPL Materials Centre*, NPL Report MATC(A)04, 2001.
- 6) M. F. J. Koolloos, J. M. Houben, "Behavior of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings During Thermal Cycling and The Effect of a Preoxidized NiCrAlY Bond Coat", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 9, pp. 48 ~58, 2000.
- 7) "Standard Test Method for Determinig Residual Stresses by The Hole-Drilling Strain-Gage Method", *ASTM E837-01*, pp. 681 ~690, 2001.