

# 세라믹코팅재의 잔류응력에 대한 연구

한 지 원

호서대학교 공과대학 기계공학과  
(2006. 11. 27. 접수 / 2007. 1. 18. 채택)

## A Study on the Residual Stresses of Ceramic Coating

Ji-Won Han

Department of Mechanical Engineering, Hoseo University  
(Received November 27, 2006 / Accepted January 18, 2007)

**Abstract :** The aim of this study was to determine residual stresses in thermal barrier coatings(TBCs) by isothermal heating. Specimens were heated at the range of 1000~1600°C. A finite element method was used to determine the residual stresses. Finite element coupled heat transfer and elastic-plastic thermal stress analysis using a general purpose commercial FEM software ABAQUS. I obtained the stresses were not affected below the temperature of 1400°C but affected over that of temperature.

**Key Words :** thermal barrier coatings, isothermal heating, residual stresses, hole-drilling strain-gage method

### 1. 서 론

가스터빈이나 디젤엔진에 사용되는 플라즈마 용사 열차폐코팅(Thermal barrier coatings)은 금속모재(Substrate)위에 산화막생성과 열팽창계수의 차이로 인한 열응력을 감소시키기 위한 NiCoCrAlY인 접착부(Bond coat)와 부분안정화 지르코니아(PSZ ZrO<sub>2</sub>)인 세라믹층(Top coat)으로 구성되어 있다<sup>1)</sup>.

고온에서 코팅재를 사용하면 접착부의 경계층 부근에서 생기는 균열로 인하여 세라믹 코팅이 파괴되거나 분리되는 현상이 나타난다. 이 같은 파괴 메커니즘은 아직 정확하게 규명되지는 않았지만, 두 접착재의 열팽창계수 차이에 의한 잔류응력이 주원인인 것으로 지적되고 있다<sup>2)</sup>.

열차폐코팅재에서의 잔류응력은 용사과정중에 생기는 경우와 등온열처리나 열피로 후에 생기는 경우가 있다.

Montay 등<sup>3)</sup>은 열차폐코팅의 플라즈마 용사과정 중 용사온도, 금속모재의 종류에 따른 고온의 분말 입자(Splats)와 입자가 고착화(Solidification)되면서 생기는 잔류응력에 대해 구멍뚫기법을 이용하여 평가

하였으며, Na 등<sup>4)</sup>은 구멍뚫기법을 유한요소법에 의한 평가방법으로 연구하여, 용사중의 높은 잔류응력이 세라믹 표면에 심각한 균열을 발생하게 한다고 하였다. Turquier 등<sup>5)</sup>은 열 피로 사용 중에 생기는 잔류응력에 대해 중성자회절 법을 이용하여 평가하였으나, 열 피로나 등은 열처리에 대한 잔류응력에 대한 연구는 극히 미미한 상태이다.

잔류응력의 측정 방법은 크게 파괴적인 방법, 비파괴적인 방법 그리고 준비파괴적인 방법의 3가지로 나눌 수 있다<sup>6)</sup>.

절단법(Sectioning method)으로 대표되는 파괴적인 방법은 측정대상을 완전히 파괴시켜서 측정하기 때문에 효율적이지 못하며, 경우에 따라서는 측정이 불가능할 때도 있다.

비파괴적인 방법에는 X-선회절법, 중성자회절법, 초음파법등이 있는데 비파괴적으로 측정할 수 있다는 장점이 있는 반면, 정확한 측정이 어려우며, 측정장비가 고가라는 단점이 있다.

이들 방법에 비하여 준비파괴적인 방법인 구멍뚫기법(Hole-drilling strain-gage method)은 측정대상에 최소의 손상을 일으키는 것만으로 측정이 가능하며, 측정품의 크기나 기하학적 형상에 거의 제한을 받지 않는다, 또 측정원리나 과정이 비교적 간

단하면서도 정확하게 측정할 수 있다. 그러나 이 방법도 스트레인게이지 부착의 한계로 인하여 재료 내에 존재하는 잔류응력을 측정하는 것은 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 열차폐코팅재에 등온열부하에 대하여 온도 변화에 따른 접착부의 근방에서 발생하는 잔류응력을 컴퓨터 해석을 통해 평가하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 Inconel 601인 모체에 접착부를 0.2mm 두께의 NiCoCrAlY로, 그 위에 부분안정화 지르코니아인 세라믹을 1.0mm로 코팅한 열차폐코팅재에서 CNC에 부착된 워터젯으로 40mm × 50mm의 크기로 잘라 준비하였다. 자른 면은 자를 때 생길 수 있는 미세균열을 제거하기 위해서 사포지(Emery Paper)로 각 면을 약 0.1mm 정도 연마 하였다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다.

### 2.2. 잔류응력 측정실험

열차폐코팅재가 열 부하 후에 재료 내에 존재하는 잔류응력을 측정하기 위해서 우선 시험편은 전기로에서 1000℃로 1시간 유지한 후 노에서 상온까지 냉각시켰다.

잔류응력 측정은 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>.

스트레인게이지는 Kyowa사의 KFG-3-120-D28-11(D=11mm, Do=4mm)모델인 로제트 스트레인게이지(Rosette strain gauge)를 사용하였으며, 구멍의 직경은 일반적으로 1-2mm이나, 본 실험의 경우 세라

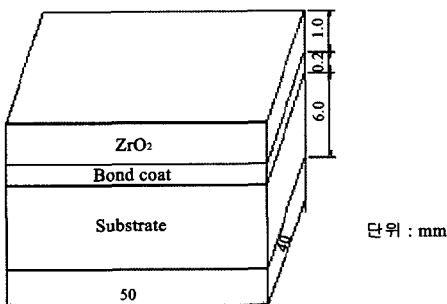


Fig. 1. Specimen geometry.

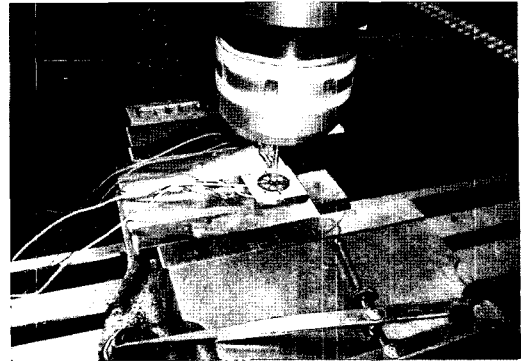


Fig. 2. Residual stresses measurement system.

믹 부분의 구멍 가공에는 다이아몬드 분말이 부착된 드릴을 사용해야 하는데 직경이 작다보니 다이아몬드분말이 쉽게 떨어져서 드릴로서의 기능을 발휘하지 못하였다. 그래서 다이아몬드분말이 부착된 직경 4mm 드릴을 0.1mm까지 미세조정이 가능한 밀링머신에 장착하여 구멍가공 하였다(Fig. 2).

잔류응력은 3개의 스트레인게이지에서 측정된 스트레인을 이용하여 다음 식으로 계산하였다.

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

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

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

$\nu$ : 포와손비, E: 탄성계수

## 3. 요한요소법

### 3.1. 해석모델

해석모델은 구멍뚫기법에 따라 3차원 전체 모델로 구성하였으며, 총 3개의 층으로 나누어서 깊이 방향으로 구멍요소를 제거해 갈 수 있도록 하였다. 모델링은 MSC/patran 프로그램을, 해석은 Abaqus 6.4를 이용하였으며, 이때 사용한 요소는 8절점 솔리드 요소(Solid element)를 23,200개, 절점 수는 25,772개이다.

Fig. 3은 본 해석에 사용된 유한요소망을 나타낸 것이며, Fig. 4는 구멍부분을 일부 제거한 유한요소망을 나타낸 것이다.

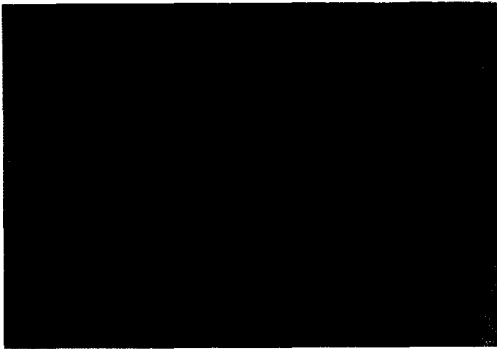


Fig. 3. Finite element model for hole-drilling strain-gage method.

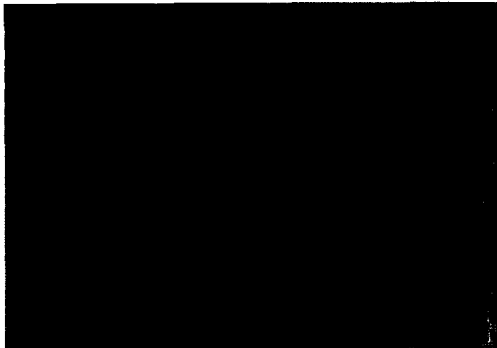


Fig. 4. Finite element model after drilling.

Table 1은 FEM해석을 위한 재료의 물성치를 나타낸 것이다<sup>8,9)</sup>.

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

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

### 3.2. 해석결과 및 검토

#### 3.2.1. 해석모델 검증

FEM해석을 위해 구성한 요한요소망의 타당성을 우선 검증하기 위해서 실험에 의해 얻은 잔류응력측정값과 컴퓨터 해석 값을 비교하였다.

그림에서 열처리온도는 1000℃인 경우에 대해 구멍뚫기법에 의해 얻은 세라믹 표면에서의 잔류응력

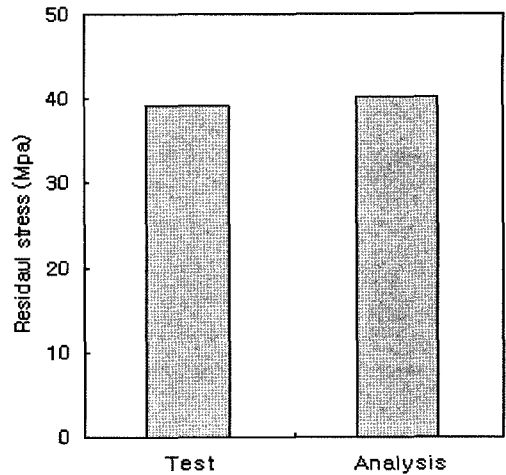


Fig. 5. Comparison of residual stress for Test and Analysis.

은 38.3MPa이며, FEM해석에 의한 잔류응력 값은 40.2MPa이다. 두 값에는 다소 오차가 있으나, 실험상의 오차를 고려한다면 FEM해석으로 잔류응력의 해석이 가능함을 알 수 있다. 따라서 재료내부에 존재하는 잔류응력도 쉽게 평가할 수 있음을 보였다.

#### 3.2.2. 재료 깊이 방향으로의 잔류응력 크기

Fig. 6은 열처리온도가 1200℃인 경우, 세라믹 표면에서 재료 깊이 방향으로 존재하는 잔류응력을 나타낸 것이다.

세라믹 표면에서 잔류응력은 41.4MPa를 나타내며, 깊이 방향으로 선형적인 감소를 보이고 있다.

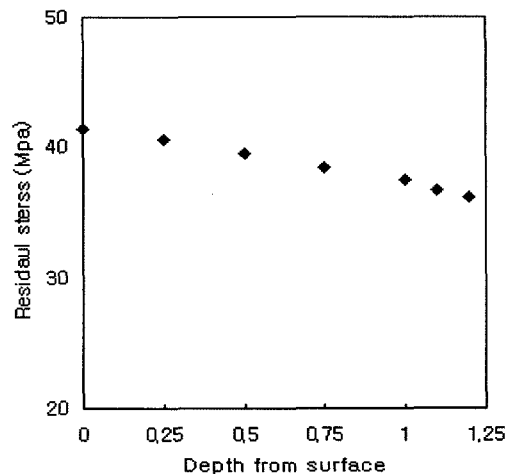


Fig. 6. Residual stress is given as distance from coating surface.

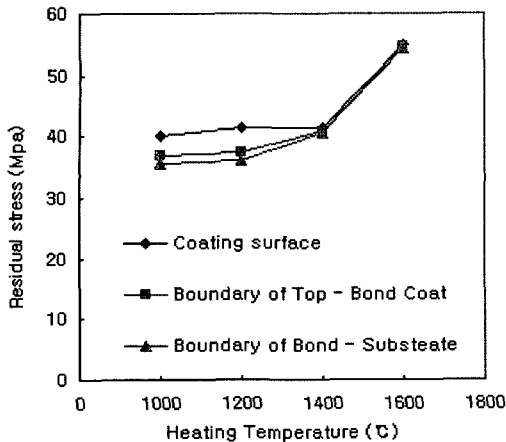


Fig. 7. Residual stress vs Heating temperature.

세라믹-접착부의 경계에서는 37.5MPa를, 접착부-금속모재의 경계에서는 36.1MPa를 나타냈다. 세라믹 표면에서 발생하는 높은 잔류응력은 미세한 표면균열을 만들며, 이 균열은 재료의 탄성변형을 적게 하여 높은 열 충격에 강한 저항을 가지게 해 준다. 그러나 계속적으로 열 부하를 받는 사용 환경에서는 표면 균열이 진전되면서 세라믹-접착부에 존재하고 있는 잔류응력과 함께 세라믹 층의 분리, 이탈 현상이 나타나 세라믹코팅재는 수명을 다하게 된다<sup>10)</sup>.

### 3.3.3. 가열 온도의 영향

Fig. 7은 전기로에서 가열한 시편의 온도변화에 따른 세라믹표면, 세라믹과 접착부의 경계, 접착부와 금속재의 경계부에 존재하는 잔류응력을 나타낸 것이다.

그림에서 1400°C까지는 잔류응력의 크기가 유사하게 발생하고 있으나 1400°C이상에서는 잔류응력의 크기가 크게 증가함을 보이고 있다. 1000°C와 1200°C에서는 세라믹 표면과 세라믹과 접착부 경계의 잔류응력이 3-4MPa 차이를 보이고 있으나 1400°C 이상에서는 각 위치별 잔류응력의 차이가 미미하게 나타났다.

## 4. 결론

플라즈마 용사 세라믹 코팅재에 등은 열처리 후 재료 내에 발생하는 잔류응력에 대한 컴퓨터 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 구멍뚫기법에 의한 잔류응력 평가를 유효요소

법으로 수행할 수 있음을 보였다.

- 2) 1400°C 이하에서는 잔류응력이 유사한 값을 가지나 그 온도 이상에서는 급격하게 증가하여 큰 값을 보였다.

- 3) 1400°C 미만에서는 세라믹 표면과 경계부의 잔류응력 차이를 보이고 있으나, 1400°C 이상에서는 거의 차이를 나타내지 않는다.

감사의 글 : 이 논문은 2003년도 호서대학교 학술연구조성비에 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) A. Kucuk, C. C. Bermdt, "Influence of plasma sprayed parameter on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings", *Material Science and Engineering, A 2&4*, p. 29~40, 2000.
- 3) G. Montay, A. Cherouat, J. Lu, N. Baradel, L. Bianchi, "Development of the high-precision incremental-step hole-drilling method for the study of residual stress in multi-layer material: influence of temperature and substrate on ZrO-YO 8wt.% coatings", *Surface and coatings technology*, Vol. 155, pp. 152~160, 2002.
- 4) H. W. Ng, Z. Gan, "A finite element analysis technique for predicting as-sprayed residual stresses generated by the plasma spray coating process", *Finite elements in Analysis and Design*, Vol. 41, pp. 1235~1254, 2005.
- 5) F. Turquier, M. Ceretti, P. Hairy, A. Lodini, "Residual stress measurements in a tool steel coated with plasma-sprayed zirconia and submitted to thermal fatigue in liquid aluminium", *PhysicaB*, Vol. 276~278, pp. 872~873, 2000.
- 6) 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.
- 7) "Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method", *ASTM E837-01*, pp. 681~690, 2001.

- 8) 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.
- 9) D. Munz, T. Fett, "Ceramics", springer, 1998.
- 10) Klod 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.