

# 접착층의 두께가 용사 열차폐 코팅의 열응력에 미치는 영향

## Effects of the Thickness of Bond Coating on the Thermal Stress of TBC

김형남, 최성남, 장기상

한전 전력연구원, 대전시 유성구 문지동 103-16

**ABSTRACT** Based on the principle of complementary energy an analytical method is developed for determining thermal stress distribution in an thermal barrier coating. This method gives the stress distributions which satisfy the stress-free boundary conditions at the edge. Numerical examples are given in order to verify the method and to investigate the thickness effects of the  $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$  top coat on the integrity of thermal barrier coating consisted of IN738LC substrate and MCrAlY bond coat.

### 1. 서론

하나의 기계 부품에서 필요로 하는 물리적 성질이 한가지 재료로부터 얻을 수 없을 때 모재에 코팅이나 클래딩을 하여 서로 다른 재료의 유리한 성질을 이용하게 된다. 클래딩의 경우 고온, 고압을 이용하여 압접을 하기 때문에 클래딩 재료와 모재 사이의 친화력이 큰 문제가 되지 않으나, 코팅 재료와 모재 사이의 친화력이 떨어지면 코팅층이 모재로부터 쉽게 박리가 된다. 이에 대한 해결 방안으로 코팅층과 모재 사이에 두 재료와 모두 친화력을 가지고 있는 재료를 이용하여 접착층을 형성시킨다. 코팅 재료와 모재의 열팽창계수 차이가 너무 큰 경우에는 기계부품이 온도 변화에 민감하게 되므로 코팅층과 모재 사이에 두 재료의 중간 정도의 열팽창계수를 가진 재료를 이용하여 이 문제를 해결한다. 세라믹 재료를 이용한 일반적인 열차폐 코팅의 경우 열차폐 코팅 재료와 모재 사이의 친화력 문제와 고온, 고압에 의한 모재의 산화 문제를 해결하기 위하여 열차폐 코팅층과 모재 사이에 접착 코팅층을 형성시킨다.

가스터빈 등에 사용되는 열차폐 코팅은 IN738LC 모재에 MCrAlY 접착층 및  $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$  세라믹층으로 이루어진다. MCrAlY 접착층은 IN738LC 모재의 산화를 방지하고  $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$  세라믹 열차폐층이 모재에 잘 붙도록 하는 역할을 하지만 접착층으로 사용되는 MCrAlY의 열팽창계수가 제일 크기 때문에 온도 변화에 따라 부품의 신뢰도에 영향을 미치는 미세 균열이나 박리의 원인이 되는 큰 열응력이 발생할 수 있다. 그러므로 부품의 건전성을 확보하기 위해서 열차폐 코팅의 열응력 해석은 필수적이라 할 수 있다.

접층 구조물에 대한 열응력 문제는 Grimado<sup>(1)</sup> 이후 Electronic Packaging, 표면처리 등 여러 분야에서 널리 연구되어 왔다. Chen et. al<sup>(2)</sup>과 Kuo<sup>(3)</sup>는 접착 코팅층과 같은 중간층의 두께 변화에 따른 열응력을 계산하였으나 Chen의 연구 결과는 접착층의 응력이 두께 방향으로 변화가 없다고 가정하였기 때문에 접착층이 얇은 경우에만 응용이 가능하고 Kuo의 연구 결과는 자유단에서 경계조건을 만족시키지 못했기 때문에 박리가 일어나는 자유단 부분에서의 응력해석에는 적합하지 않다. 접층부의 경계면을 따라 작용하는 열응력을 구하기 위하여 Yin<sup>(4, 5)</sup>은 Stress Function을 이용한 변분법을 이용하였다. 그의 연구는 끝단 효과(End-Effects)에 중점을 두어 접층부의 자유단에서 경계조건을 만족하는 응력을 구하는데 중점을 두었다. Yin의 연구는 온도가 일정하게 상승 또는 강하하는 경우를 취급하였기 때문에 플라즈마 용사법이나 납땀(Soldering)에서와 같이 서로 다른 온도의 물체가 만나서 결국 같은 온도가 되는 경우에는 적용이 불가능하다.

본 논문에서는 열하중을 받는 서로 다른 물질로 이루어진 3층 보의 평형 방정식과 자유단에서의 응력조건을 포함한 모든 경계조건을 만족하고 Complementary Energy 법을 통하여 간접적으로 Compatibility Equation을 만족하는 응력분포를 구할 수 있도록 Kim et. al<sup>(6)</sup>의 방법을 일반화하였다. Glaser<sup>(7)</sup>의 유한요소법에 의한 수치해 및 Yin<sup>(4, 5)</sup>의 응력함수를 이용한 해와 본 논문에서 소개된 해석적 방법에 의한 결과를 서로 비교, 검증하였다. 또한 IN738LC 모재에 MCrAlY 접착층 및  $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$  세라믹층을 코팅시킨 전형적인 열차폐 코팅에 대하여 접착 코팅층의 두께에 따른 열응력을 검토하였다.

## 2. 지배방정식

Figure 1은 양쪽 끝이 자유단이고 폭이 1(unit)인 3층으로 이루어진 전형적인 열차폐코팅의 기하학적 크기 및 물리적 성질을 보여준다.

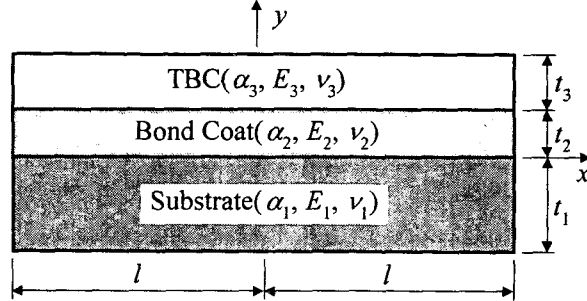


Fig. 1 Structure of typical TBC

편의를 위하여 온도 변화가  $\Delta T_k$  ( $k$ 는  $k$ -번째 ( $k = 1, 2, 3$ ) 층을 의미)인 경우 2-차원 등방성 탄성체에 대하여 다음과 같은 관계식을 도입하자.

$$\sigma_x^k = \hat{\sigma}_x^k - \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1 - \nu_k}, \quad \sigma_y^k = \hat{\sigma}_y^k - \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1 - \nu_k}, \quad \tau_{xy}^k = \hat{\tau}_{xy}^k \quad (1)$$

각 층의 물리적 성질이 일정하다고 가정 하면 새로운 응력 성분에 대한 평형 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \hat{\sigma}_x^k}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\tau}_{xy}^k}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \hat{\tau}_{xy}^k}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\sigma}_y^k}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

## 3. 지배방정식의 변환

각 층에 생기는  $x$ -축 방향의 응력을 다음과 같이 가정하자.

$$\hat{\sigma}_x^k(x, y) = \sum_{i=1}^{n_k+1} \sigma_{(i-1)}^k(x) \left(\frac{y}{t_k}\right)^{i-1} \quad (3)$$

여기서,  $n_k$  ( $k=1, 2, 3$ )는 임의로 선택된 다항식의 최대 차수이고  $\sigma_{(i-1)}^k(x)$ 는  $(n_k+1)$ 개의 결정해야 되는 함수이다. 각 층의 자유단 ( $x = \pm l$ )에서의 경계조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_o^k = \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1 - \nu_k}, \quad \sigma_m^k = 0 \quad (m = 1, 2, 3, \dots, n_k) \quad (4)$$

식 (2)에 의해서 각 층에서 미지의 함수  $\sigma_{(i-1)}^k(x)$ 와  $\hat{\tau}_{xy}^k(x, y)$  및  $\hat{\sigma}_y^k(x, y)$ 의 관계가 구해지며 식 (3)에 의해서 부가적인 경계조건이 다음과 같이 얻어진다.

$$\left. \frac{d\sigma_m^k}{dx} \right|_{x=\pm l} = 0 \quad (m=1, 2, 3, \dots, n_k) \quad (5)$$

경계면에서 첫 번째 층과 두 번째 층의 수직응력 ( $\sigma_y$ ), 전단응력 ( $\tau_{xy}$ )이 같다는 조건을 이용하면 중간 층에서의 미지함수 ( $\sigma_o^2, \sigma_1^2, \dots, \sigma_{n_2}^2$ ) 중 2개가 결정되어 전체 응력분포를 알기 위해서 구해야 하는

미지함수의 수는  $(n_1 + n_2 + n_3 + 1)$ 개 이다.

#### 4. 에너지법

평형 방정식과 경계조건을 이용하여 구한 응력장(Auxiliary Stress Field)이 유일해가 되기 위해서는 다음과 같은 기하학적 적합조건에 관한 식을 만족해야 한다. 기하학적 적합조건은 실제 상태의 응력을 구하기 위한 필요 조건이며 Complementary 에너지법에 근거한 변분법에 의해서 우회적으로 만족시킬 수 있다. 에너지법(Principle of Stationary Complementary Energy)을 적용하면 다음과 같은 연립 상미분 방정식이 얻어진다.

$$\left[ A \frac{d^4}{dx^4} + B \frac{d^2}{dx^2} + C \right] [\sigma_0^1, \sigma_1^1, \dots, \sigma_0^2, \sigma_1^2, \dots, \sigma_{n_3-1}^3, \sigma_{n_3}^3]^T = \{a\} \quad (6)$$

여기서, 상수  $A, B, C$ 는 변분을 취하는 과정에서 결정되는 상수이다(Column Matrix  $\{a\}$ 의 성분도 이 과정에서 결정됨). 경계조건과 함께 식 (6)에 의해 주어진 지배방정식을 풀고 이를 식 (1)에 대입 하므로써 실제의 응력분포가 구해진다.

#### 5. 수치예

지면 관계상 본 논문에서는 소개하지 않았으나 앞 절에서 개발된 방법으로 구한 응력분포는 다른 연구자들의 연구결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 절에서는 접착층의 두께가 온도 변화에 의한 열차폐 코팅의 건전성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 IN738LC 모재에 MCrAlY 접착층 및  $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$  세라믹층을 코팅시킨 전형적인 열차폐 코팅 (Table 1 참조)에 대한 열응력을 검토하였다. 여기에서 사용된 각 층의 두께 및 기계적 성질은 Table 2와 같다. 길이  $2l$ 은  $25.4 \text{ mm}$  이고 온도 변화  $\Delta T_k$ 는 모든 층에 대하여  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 주었다. 열차폐층의 두께는  $254 \text{ }\mu\text{m}$ 이고 접착층의 두께는 열차폐층의 0.1~1.0배로 변화를 주었다.

Table 1. Mechanical properties of plasma sprayed TBC

	탄성계수 $E \text{ (GPa)}$	Poisson비 $\nu$	열팽창계수 $\alpha \text{ (}/^\circ\text{C)}$
모재	200	0.3	$16 \times 10^{-6}$
접착층	160	0.3	$17 \times 10^{-6}$
코팅층	150	0.3	$11 \times 10^{-6}$

Fig. 2는 경계면에서  $y$ -축을 따라 발생하는  $x$ -축방향 응력의 불연속을 보여준다. 접착층의 두께가 두꺼울수록 접착층 자체의  $x$ -축방향 응력은 작아지나 열차폐층에 발생하는 응력이 커짐을 알 수 있다. 접착층에 발생하는 평균  $x$ -축방향 응력분포가 Fig. 3에 주어져 있다. 열차폐 층의 박리와 직접 관련이 있는  $y$ -축방향 응력 분포가 Fig. 4에 주어져 있다. 일반적인 접착층의 열응력분포에서 볼 수 있는 것처럼 자유단 근처에서 매우 변화가 많음을 알 수 있다. Fig. 5는 자유단에서의  $y$ -축방향 응력 분포도이다. 일반적으로 접착층 재료 자체의 강도가 다른 재료에 부착되는 강도보다 크다는 것을 감안하면 접착층 두께가 얇을수록 접착층 보다는 경계면에서 박리가 일어나기 쉽고, 접착층 두께가 두꺼울수록 경계면 보다는 접착층이 깨져 박리가 일어나기 쉽다는 것을 알 수 있다.

#### 6. 결론

경계조건을 완전히 만족하는 응력분포를 구하는 방법을 제시하였다. 접착층 두께가 얇을수록 경계면에서 박리가 일어나고, 접착층 두께가 두꺼울수록 접착층에서 박리가 일어난다.

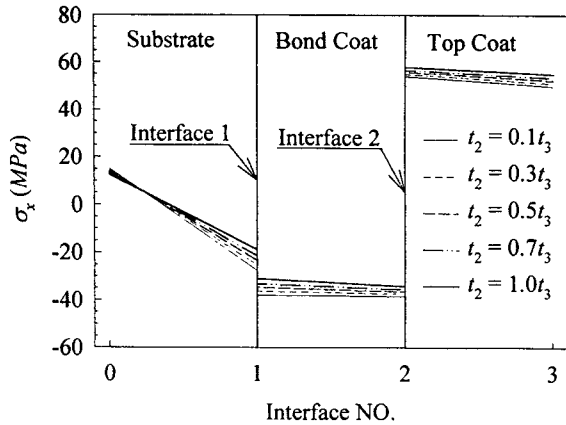


Fig. 2 Axial stress discontinuity along the y-axis

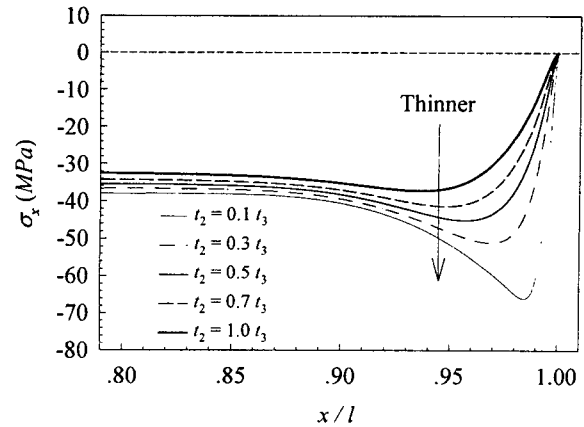


Fig. 3 Average axial stress distributions in the bond coat

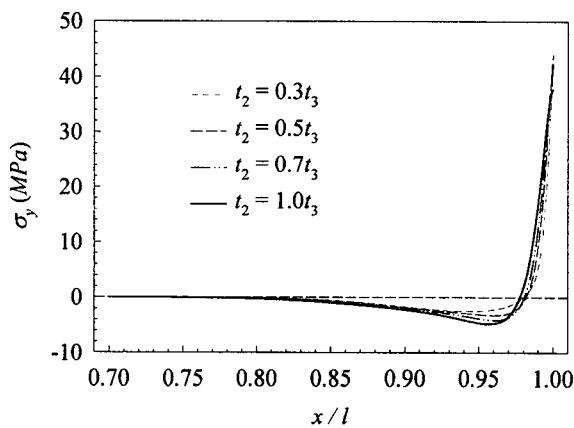


Fig. 4 Average normal stress distributions in the bond coat

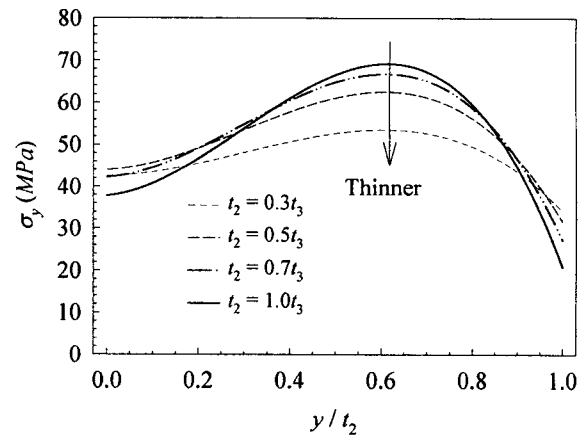


Fig. 5 Normal stress distributions along the edge in the bond coat

## 7. 참고문헌

1. Grimado, P. B.: "Interlaminar Thermoelastic Stresses in Layered Beams", Journal of Thermal Stresses, Vol. 1, 1974, pp. 75~86.
2. Chen, D., Cheng, S. and Gerhardt, T. D., 1982, "Thermal Stresses in Laminated Beams", Journal of Thermal Stresses, Vol. 5, 1982, pp. 67~84.
3. Kuo, A.-Y., "Effects of Thickness on Thermal Stresses in a Thin Solder or Adhesive Layer", ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 114, 1992, pp. 199~202.
4. Yin, W.-L.: "Thermal Stresses and Free-Edge Effects in Laminated Beams: A Variational Approach Using Stress Functions", ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 113, 1991, pp. 68~75.
5. Yin, W.-L.: "Refined Variational Solutions of the Interfacial Thermal Stresses in a Laminated Beam", ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 114, 1992, pp. 193~198
6. H. N. Kim, S. N. Choi and K. S. Jang, "Thermal Stresses near the Edge in a Clad", Journal of the Korean Welding Society, Vol. 18, 2000, pp. 104~109
7. Glaser, J. C., 1989, "Thermal Stresses in Compliantly-Jointed Materials", ASME Winter Annual Meeting, Paper No. 89-WA/EEP-14, Dec. 1989, 7 pages.