

용사 열차폐 코팅층의 두께가 열응력에 미치는 영향

A Study on the Effects of the Thickness of Top Coat on the Thermal Stresses of a Sprayed Thermal Barrier Coating

김형남*, 양승한*

* 한국전력공사 전력연구원

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

가스터빈의 열효율을 높이기 위하여 터빈 입구 온도를 높여야 한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 열효율을 높이기 위하여 수반되는 고온의 가혹한 운전 조건은 초내열합금의 개발, 냉각 방법의 향상 등으로 극복해 왔으며 최근에는 세라믹 재질을 이용한 열차폐 코팅(TBC, Thermal Barrier Coating)이 각광을 받고 있다.

열차폐를 위한 코팅은 일반적으로 모재, 접착층(Bond Coat), 열차폐층(Top Coat 혹은 TBC) 등 3개의 층으로 구성되어 있다. 접착층은 모재의 산화를 방지하고 열차폐층이 모재에 잘 부착되도록 하는 역할을 한다. 열차폐 코팅은 고온의 기체로부터 모재를 보호하는 역할을 하므로 열차폐층의 두께가 두꺼울수록 그 효과는 크다고 할 수 있다. 그러나 각 층의 열팽창계수 및 탄성계수가 다르기 때문에 온도 변화에 따라 부품의 신뢰도에 영향을 미치는 미세 균열이나 박리의 원인이 되는 열응력을 발생시킨다.

접층 구조물에 대한 열응력 문제는 Grimado⁽¹⁾ 이후 Electronic Packaging, 표면처리 등 여러 분야에서 널리 연구되고 있으나 자유단에서의 응력 조건을 만족시키는 연구 결과를 찾기는 매우 어렵다. Suhir^(2, 3)는 Timoshenko⁽⁴⁾의 바이메탈 이론을 발전시켜 유한 길이의 바이메탈을 두 개의 독립된 보로 취급하여 경계에서 응력과 변위를 일치시키는 방법으로 경계면에서의 응력을 구하였다. Razaqpur⁽⁵⁾와 Suhir⁽⁶⁾ 자신에 의해 지적된 것처럼 그의 첫 번째 연구는 자유단에서의 응력 조건을 만족시키지 못했지만 두 번째 연구에서는 이를 보완한 연구 결과를 내놓았다.

접층보의 경계면을 따라 작용하는 열응력을 구하기 위하여 Yin^(7, 8)은 Stress Function을 이용한 변분법을 이용하였다. 그의 연구는 끝단 효과(End-Effects)에 중점을 두어 접층보의 자

유단에서 경계조건을 만족하는 응력을 구하는데 중점을 두었다.

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 있는 방법을 제시하고 IN738LC 모재에 MCrAlY 접착층 및 $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$ 세라믹층을 코팅시킨 전형적인 열차폐 코팅에 대하여 열차폐층의 두께에 따른 열응력을 검토하였다.

2. 지배방정식

Figure 1은 양쪽 끝이 자유단인 전형적인 열차폐 코팅의 기하학적 크기 및 물리적 성질을 보여 준다. 편의를 위하여 다음과 같은 관계식을 도입 하자.

$$\sigma_x^k = \hat{\sigma}_x^k - \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1 - \nu_k} \quad (1)$$

$$\sigma_y^k = \hat{\sigma}_y^k - \frac{\alpha_k E_k \Delta T_k}{1 - \nu_k} \quad (2)$$

$$\tau_{xy}^k = \hat{\tau}_{xy}^k \quad (3)$$

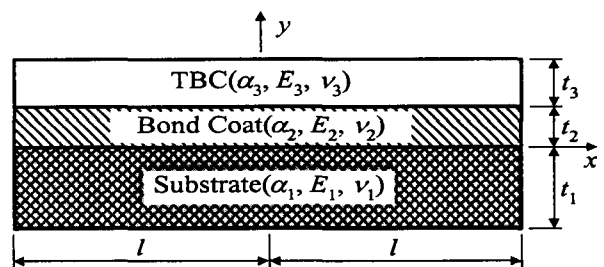


Fig. 1. 열차폐 코팅의 구조

각 층의 기계적 성질이 일정하다고 가정하면 다음과 같은 평형 방정식을 얻는다.

$$\frac{\partial \hat{\sigma}_x^k}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\tau}_{xy}^k}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \hat{\tau}_{xy}^k}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\sigma}_y^k}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

3. 지배방정식의 변환

각층에 생기는 x -축 방향의 응력을 다음과 같이 가정하자.

$$\hat{\sigma}_x^k(x, y) = \sum_{i=1}^{n_k+1} \sigma_{(i-1)}^k(x) \left(\frac{y}{t_k}\right)^{i-1} \quad (6)$$

여기서, $n_k (k=1, 2, 3)$ 는 임의로 선택된 다항식의 최대 차수이고 $\sigma_{(i-1)}^k(x)$ 는 (n_k+1) 개의 미지 함수이다. 경계조건은 다음과 같다.

$$\left. \frac{d\sigma_m^k}{dx} \right|_{x=\pm l} = 0 \quad (m=1, 2, 3, \dots, n_k) \quad (7)$$

4. 에너지법

기하학적 적합조건은 실제 상태의 응력을 구하기 위한 필요조건이며 Complementary 에너지법에 근거한 변분법에 의해서 우회적으로 만족시킬 수 있다. Principle of Complementary Energy는 다음과 같이 설명이 된다. 물체의 내부와 힘이 작용하는 일부 표면에서 평형 조건을 만족하는 모든 응력 중에서 기하학적 적합조건을 만족하는 응력은 Complementary 에너지 변분을 0으로 만든다.

2차원 응력 문제에서 Complementary Energy는 다음과 같다.

$$V^* = \int_{-l}^l \int_{-t}^t \sum_{k=1}^3 \frac{1}{2E_k} \{ (\hat{\sigma}_x^k)^2 + (\hat{\sigma}_y^k)^2 - 2\nu_k \hat{\sigma}_x^k \hat{\sigma}_y^k + 2(1+\nu_k)(\hat{\tau}_{xy}^k)^2 \} dy dx \quad (8)$$

탄성계수와 Poisson비를 안다면 y 에 대한 적분을 할 수 있으며, 여기에 대한 변분을 취하여 이를 "0"으로 놓으면(Principle of Stationary Complementary Energy) 다음과 같은 연립 상미분 방정식이 얻어진다. 즉,

$$\delta V^* = 0, \quad (9)$$

$$[L]\{\sigma\} = \{a\}. \quad (10)$$

이 된다. $[L]$ 은 Square Symmetric 행렬로 이의 성분 $L_{rs} (r, s=1, 2, 3, \dots, (n_1+n_2+n_3+1))$ 는 다음의 형태를 취하는 Linear Operator이다.

$$L_{rs} = A_{rs} \frac{d^4}{dx^4} + B_{rs} \frac{d^2}{dx^2} + C_{rs} \quad (11)$$

여기서, 상수 A_{rs}, B_{rs}, C_{rs} 는 식 (8)을 y -좌표에 대하여 적분을 하고 변분을 취하는 과정에서 결정되는 상수이다(Column Matrix $\{a\}$ 의 성분도 이 과정에서 결정됨).

5. 수치예

본 논문에서 소개된 방법으로 구해진 응력분포는 각 층에서 평형방정식과 모든 경계에서 "Traction-Free" 조건, 각 층간 경계면에서 수직 및 전단 응력의 연속 조건, 변형율에 대한 기하학적 적합 조건 및 층간 경계면에서의 변위의 연속성을 만족하고 있다.

열차폐층의 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 코팅에 대한 열응력을 검토하였다. 여기에서 사용된 각 층의 두께 및 기계적 성질은 Table 1과 같다. 길이 $2l$ 은 25.4 mm 이고 온도 변화 ΔT_k 는 모든 층에 대하여 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 주었다.

Fig. 2는 열차폐층의 두께에 따른 접착층에서 x -축 방향의 평균 응력 분포도(σ_x^2)이다. 열차폐층의 두께 t_3 가 두꺼울수록 접착층에 큰 압축 응력이 발생함을 알 수 있다. 열차폐층의 두께에 따른 열차폐층에서 x -축 방향의 평균 응력 분포(σ_x^3)가 Fig. 3에 주어져 있다. 열차폐층의 두께가 두꺼울수록 열차폐층에 작용하는 축방향 응력이 작기 때문에 열차폐층에 크랙과 같은 결함이 생길 가능성이 낮아짐을 알 수 있다. 그러나 모재로부터 접착층을 박리 시키려고 하는 접합면을 따라 작용하는 자유단 부분의 응력은 열차폐층의 두께가 두꺼워짐에 따라 커지게 되며(Fig. 4), 접착층으로부터 열차폐층을 박리 시키려고 하는 접합면을 따라 작용하는 자유단 부분의 응력 $\sigma_y^2(\pm l, t_2)$ 또한 열차폐층의 두께가 두꺼워짐에 따라 커지게 된다. 즉, 모재의 내열 효과를 향상시키기 위하여 열차폐층의 두께를 증가시키면 열차폐층에 대한 열차폐층 자체의 건전성은 향상되나 자유단에서의 수직응력에 의한 접착층 혹은 열차폐층의 박리 가능성은 커지게 된다.

Table 1과 같은 열차폐 코팅의 조성에서는 접착층의 수직방향(y -방향) 응력은 같은 높이(y -좌표)에 대하여 Fig. 4와 같이 자유단 부분에서 최대가 된다. 접착층 자유단의 y -축 방향 수직 응력($\sigma_y^2(\pm l, y)$)은 $y = 0.6 t_2$ 정도에서 최대, 층간 경계면에서 최소가 된다. 일반적으로 제작할 때 생기는 잔류응력을 무시하는 경우, 재질 자체의 인장강도보다 이중 재질에 대한 접착강도가 작기 때문에 열차폐층의 두께가 증가하면 열차폐 코팅의 박리가 일어날 가능성이 커진다. Figure 5는 열차폐층 두께 변화에 따른 접착층에서 수직방향 최대응력을 보여준다. 열차폐층의 두께가 증가할수록 최대 수직응력은 작아지나 박리가 일어날 가능성이 큰 경계면에서의 최대 수직응력이 커짐을 알 수 있다.

Table 1. Mechanical properties of layers

	두께 t (mm)	탄성계수 E (GPa)	Poisson비 ν	열팽창계수 α ($^{\circ}C$)
모재	2000	200	0.3	16×10^{-6}
접합층	127	160	0.3	17×10^{-6}
코팅층	*	150	0.3	11×10^{-6}

* 열차폐 코팅층의 두께는 127~381 μm 로 접합층의 1~3배임

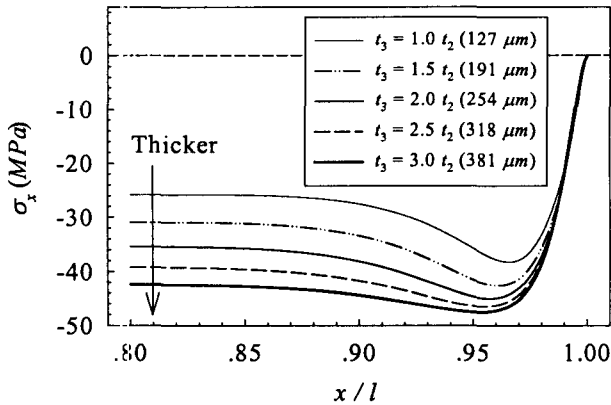


Fig. 2. Average axial stress distributions in bond coat

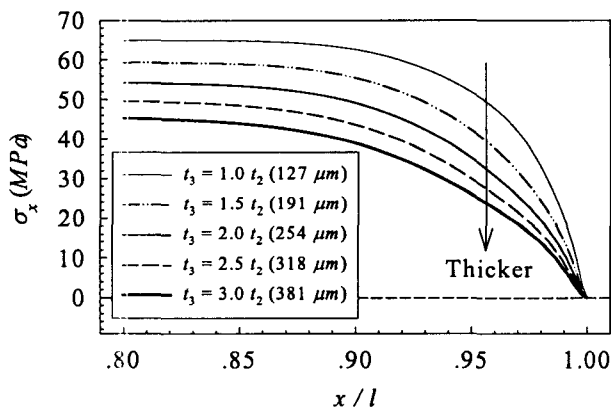


Fig. 3. Average axial stress distributions in the top coat(TBC)

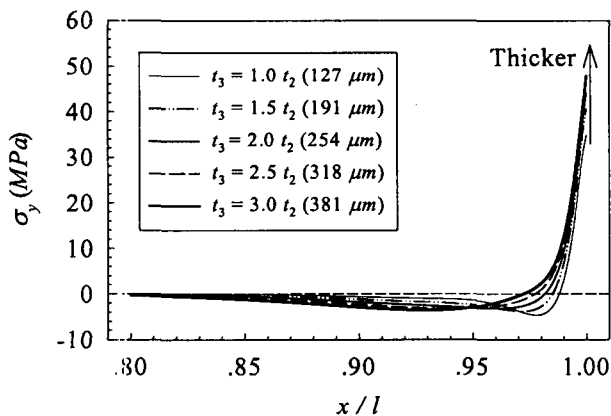


Fig. 4. Normal stress distributions along the interface 1(peeling stress)

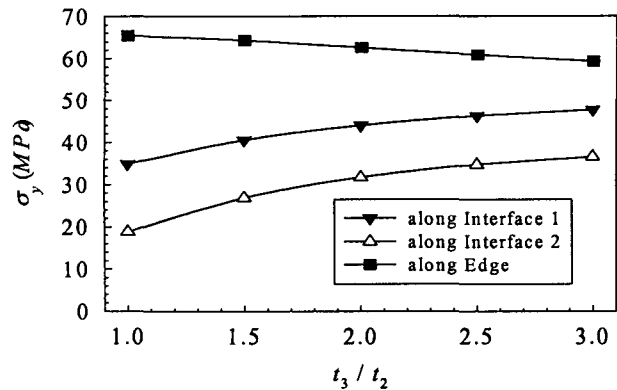


Fig. 5. Maximum normal stresses in the bond coat

6. 결론

모재, 접합층, 열차폐층을 가진 전형적인 열차폐 코팅에 대하여 평형방정식과 경계조건을 만족하고 기하학적 적합 조건은 Complementary 에너지법에 근거하여 우회적으로 만족하는 열응력 분포를 계산할 수 있는 방법을 소개하고 내열합금인 IN738LC 모재에 MCrAlY 접착층 및 ZrO₂-8wt%Y₂O₃ 열차폐층을 가진 전형적인 열차폐 코팅에 대하여 온도가 상승할 경우 열차폐층의 두께에 따른 열응력을 검토하였다. 열차폐 코팅을 제작할 때 생기는 잔류응력을 무시하면 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 열차폐층의 두께가 증가할수록

1. 접착층에 큰 압축응력이 발생한다.
2. 열차폐층 자체에는 작은 인장응력이 작용한다.
3. 박리 가능성이 커진다.

참고문헌

1. P. B. Grimado : Interlaminar Thermoelastic Stresses in Layered Beams, Journal of Thermal Stresses, Vol. 1 (1978), 75-86
2. E. Suhir : Stresses in Bi-Metal Thermostats, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 53 (1986), 657-660
3. E. Suhir : Interfacial Stresses in Bimetal Thermostats, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 56 (1989), 595-600
4. S. P. Timoshenko : Analysis of Bi-Metal Thermostats, Journal of the Optical Society of America, Vol. 11 (1925), 233-255.
5. A. G. Razaqpur : Discussion on Stresses in Bi-Metal Thermostats, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 54 (1987), 479
6. E. Suhir : Discussion on Stresses in Bi-Metal Thermostats, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol. 54 (1987), 479
7. W.-L. Yin : Thermal Stresses and Free-Edge Effects in Laminated Beams: A Variational Approach Using Stress Functions, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 113 (1991), 68-75
8. W.-L., Yin : Refined Variational Solutions of the Interfacial Thermal Stresses in a Laminated Beam, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 114 (1992), 193-198