

# 열 cycle하의 단열 coating층 열 응력

(Thermal Stress at a thermal barrier coatings under a given thermal cycle)

신상범, 한명섭, 김대영  
현대 중공업(주), 산업기술연구소

## 1. 서론

최근 선박의 대형화 및 고속화에 대한 요구가 끊임없이 제기됨에 따라 박용 엔진의 대용량 및 고효율이 필요하게 되었다. 이를 위하여 1970년대 중반이후 기존의 엔진 연소실 부품에 열전도도가 금속재료보다 훨씬 낮은 ceramic을 플라즈마 용사로 단열 coating함으로써, 열 손실의 감소를 통한 열 효율의 증대 및 엔진 냉각설비의 축소 그리고, 금속 모재의 사용온도의 저하에 따른 수명 향상을 꾀하고자 하는 노력이 꾸준히 진행되어 왔다. 한편, ceramic의 경우 부식 산화 마모에 대한 저항성이 높고, 고온에서도 낮은 열 전도도와 화학적·열적으로 높은 안전성을 가지고 있는 반면에 이 재료가 가지는 현저한 취성으로 인한 내구성의 저하가 실용상의 장애요인이 되어 왔다. 또한 기존의 연구결과들에 의하면 coating층의 두께가 증가함에 따라 금속으로의 열 전달이 감소하여 열 효율은 높일 수 있으나, coating층의 두께 증가할수록 높은 잔류응력이 형성되기 때문에 적용 두께는 제한되어 있다. 따라서, coating층을 실 엔진 부품에 적용하기 위해서는 단열 coating층의 제조시 즉 플라즈마 용사과정중 형성되는 coating층의 잔류응력에 대한 평가뿐만 아니라 사용조건 하에서 모재 및 단열 coating층에 작용하는 열 응력에 대한 평가도 내구성 및 내열 특성이라는 측면에서 선행되어야만 한다. 즉, 최적의 단열 coating층의 적용을 위해서는 각 계면에서 발생하는 잔류응력(residual stress) 및 실 사용 조건하에서 단열 coating층의 열 응력 거동에 관한 평가가 필수적인 사항이다.

따라서, 본 연구에서는 열 cycle하에 단열 coating층 및 모재(GGG60) 그리고, 각 계면에서 열 응력 특성을 유한 요소 해석(Finite Element Analysis, FEA)을 이용하여 평가함으로써 coating층에 대한 적정 설계 기준을 모색하고자 한다.

## 2. 해석 모델 및 방법

열 cycle에 의한 coating층 및 모재의 온도분포를 해석하는 문제는 시간에 의존하는 비정상과도(unsteady transient problem) 문제이며, coating 층 및 모재의 온도 분포를 결정하는 열 전달 지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{--- (1)}$$

where, T: Temperature,  $\rho$ : Density [kg/mm<sup>3</sup>], C: Specific heat[J/kg°C]

k : Thermal conductivity coeff. along X, Y and Z direction[W/mm°C]

열 cycle하의 coating층 및 모재는 팽창 및 수축에 의한 변형을 수반함으로써, 열 전달 및 열 응력의 연성된 해석이 요구되나 본 고에서는 열 cycle에 기인한 변형이 열 전달 기구에 미치는 영향이 매우 미세하므로 이를 각각 비 연성된 것으로 가정하고 해석을 수행하였다. 열 전달 및 열 응력의 해석모델은 Fig. 1과 같이 3차원의 구조 형상을 가지고 있으나, Z축방향과 대칭면에서 열 유동이 없는 것으로 가정함으로써, Fig. 1의 은선화된 영역에서의 2차원 해석으로 축소하고 본 해석을 수행하였다. 해석시 Table 1과 같이 coating층의 형상 즉 gradient 층의 유무 및 coating층의 두께를 각각 해석 변수로 선정하였다. 열 전달 해석시 1200°C의 화염 분위기 하에서 4분 가열 및 1분 강제 공냉되는 열 cycle 시험과 동일한 열하중 조건을 적용하였으며, 이때, 각 절점에서의 온도분포를 이용한 열 응력 해석시 모재의 항복 조건은 Von-Mises, plastic flow는 Prandtl - Reuss's law에 따른 소성거동을 하는 것으로 가정하였다.

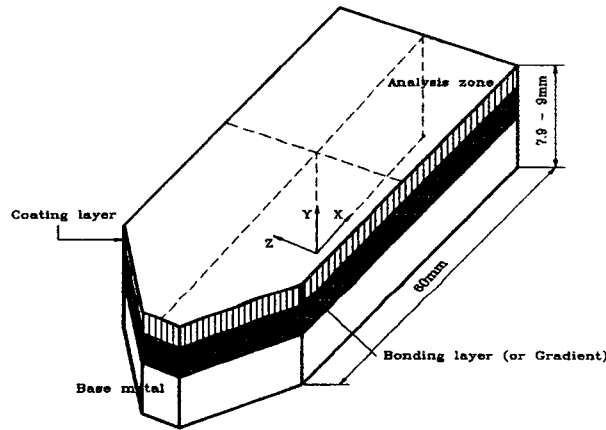


Fig. 1 Schematic diagrams of analysis model for FEA

Table 1. Configuration of thermal barrier coating system studied.

System	Coating Powder composition	Total thickness, mm
T <sub>1.5</sub>	NiCrAlY bond coat	1.5
	8wt%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> ceramic coat	
T <sub>0.4</sub>	NiCrAlY bond coat	0.4
	8wt%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> ceramic coat	
G <sub>1.5</sub>	NiCrAlY bond coat	1.5
	75 bond + 25 ceramic	
	50 bond + 50 ceramic	
	25 bond + 75 ceramic	
	8wt%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> ceramic coat	
G <sub>0.4</sub>	NiCrAlY bond coat	0.4
	75 bond + 25 ceramic	
	50 bond + 50 ceramic	
	25 bond + 75 ceramic	
	8wt%Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub> ceramic coat	

### 3. 해석 결과

Coating층의 debonding은 열 cycle하에 coating층에 작용하는 압축응력이 각 층의 임계 좌굴 강도를 초과하는 경우 발생한다. 따라서, 본 고에서는 열 cycle 시험에 따른 coating층의 debonding 양상을 이해하기 위해 각 열 cycle하에서 최대 압축응력을 평가하고 이를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 coating층 및 각 계면에 작용하는 최대 압축응력은 기계적 물성이 ceramic층이나 gradient층에 비해 상대적으로 우수한 bonding층에서 발생하며, coating층의 두께가 증가함에 따라 그리고, gradient층이 있는 경우 최대 압축응력은 증가한다. 이때, 압축응력의 분포 및 양상은 coating층의 두께 및 gradient층의 유무에 따라 다소 차이를 보이는데, ceramic층과 bonding층만으로 이루어진 two layer 적층구조에서는 bonding/ceramic층의 계면에 작용하는 압축응력이 gradient층이 존재하는 적층구조의 gradient/ceramic층의 계면에 비해 높다.

열 cycle하의 coating층에서 debonding의 발생은 각 적층의 가장 취약한 bonding/ceramic층(two layer)의 계면이나, gradient/ceramic층(gradient layer)의 계면에서 발생한다. 따라서, 열응력 해석 결과로부터 two layer 적층구조의 파손 가능성이 gradient층을 가진 적층 구조의 파손 가능성에 비해 상대적으로 높음을 알 수 있으며, 이는 열 응력 측면에서 coating층의 내구성이 ceramic층의 두께가 감소할수록 그리고, gradient층이 존재하는 경우 증가함을 의미한다.

### 4. 결론

1. Coating층에 작용하는 최대 압축응력은 coating층의 두께가 증가함에 따라 증가하고 two-layer 적층구조에서 ceramic층과의 계면에서 압축응력은 증가한다.
2. 열응력 측면에서 coating층의 적정 설계를 위해서는 coating층의 두께는 최소화하고, coating층의 ceramic층과 bonding층의 사이에 gradient층을 형성시키는 것이 바람직하다.

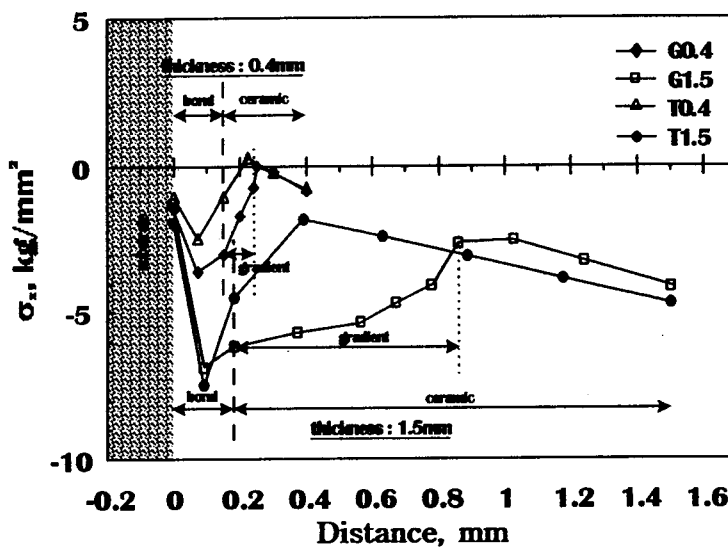


Fig. 2 The distribution of  $\sigma_x$  at the coating layer (time=720sec)