

단열 coating층의 접합강도에 미치는 잔류응력의 영향

(Effect of Residual Stress on the Bonding Strength of Thermal Barrier Coatings)

신상범*, 한명섭
현대중공업(주), 산업 기술 연구소

1. 서론

선박의 고속화 및 대형화 추세에 따라 박용 디젤 엔진의 고효율화 및 고성능화는 필수적인 요건으로써 대두되었다. 그러나, 디젤엔진의 핵심 부품인 피스톤, 배기 밸브 그리고, 연료밸브 등이 연소 가스에 의한 유해 원소 및 열 하중 그리고, 폭발압에 의한 기계적 응력등의 복합적인 작용으로 주요 손상부로서 작용하게 되고, 이로 인해 엔진 효율 및 성능 향상의 장애요소로 작용한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 연소 가스에 노출된 부위의 엔진 부품의 열 손실의 차단을 통한 엔진 효율의 향상 및 유해원소에 의한 기계적·물리적 특성 저하를 방지하기 위한 엔진 부품의 단열 coating에 관련된 연구가 활발히 수행되고 있으며, 실 적용사례 또한 보고되고 있다. 그러나, 이러한 단열 coating층의 엔진부품에 적용시 가장 큰 문제로 대두되고 있는 것은 coating 층 및 모재의 열 팽창량의 차에 기인된 열응력에 의해 coating층과 모재 계면간의 박리현상이다.

따라서, 본 연구에서는 피스톤 crown부의 내구성을 향상을 위하여 plasma spray에 의하여 형성된 단열 coating층의 접합강도를 향상시키고자 계면에서 발생하는 잔류응력과 단열층을 구성하는 경사재료 특성간의 상관관계를 규명하고자 하였다. 이를 위하여 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 이용하여 항온시험시 단열 coating층 및 모재에서의 잔류응력 및 이에 따른 접합강도의 거동을 평가하였다.

2. 잔류응력

2.1 해석 모델 및 재료 물성

Fig. 1과 같이 디젤 엔진의 piston crown 재질인 GGG60(DIN spec.) 및 coating층의 두께 및 gradient 층의 유무를 각각 변수로 하여 coating system A, B, C 그리고, D를 해석모델로 선정하였다. 이때, 각 system의 coating층 두께 및 gradient층의 분율은 Table 1과 같다. Gradient층의 적층방식은 적층형태에 따라 linear, convex 그리고, concave type이 있는데, 본 연구에서는 단열효과 측면에서는 다소 뒤지지만 열응력 완화 측면에서 효과적인 concave 형태의 적층방식을 선정하였다.

단열 coating된 GGG 60의 모재를 노에서 800°C까지 항온 상태로 가열한 후 공냉됨으로 본 고의 해석모델은 800°C ~ 20°C의 온도구간에 놓이게 된다. 따라서, 모재 및 단열 coating층의

Table 1. Thermal barrier system compositions

Systems Design.	Thermal barrier layer			
	Composition rate(%)		Thickness(mm)	
	NiCrAlY	8wt%Al ₂ O ₃		
A	100	0	0.18	1.5
	0	100	1.32	
B	100	0	0.15	0.4
	0	100	0.25	
C	100	0	0.18	1.5
	75	25	0.375	
	50	50	0.225	
	25	75	0.075	
	0	100	0.675	
D	100	0	0.20	0.4
	75	25	0.055	
	50	50	0.035	
	25	75	0.010	
	0	100	0.13	

열 전달 및 열 팽창의 차에 기인한 열응력 해석시 모재 및 coating층이 등방성이며, GGG 60의 경우 elasto-plastic strain hardening 거동율, coating층의 경우 재료 특성상 elastic 거동만을 하는 것으로 가정하였으며, 온도에 따른 Coating층의 8wt%Y₂O₃ 및 NiCrAlY 그리고, 모재 GGG60의 열적·기계적 물성치들은 기존의 관련 문헌의 data를 이용하였으나, gradient층의 열적·기계적 물성치들은 외삽 및 분율에 따른 양으로 환산하여 적용하였다. 프와송의 비, ν 는 GGG 60은 0.33, 8wt%Y₂O₃ 및 NiCrAlY는 0.28로 해석 온도 구간에서 일정한 것으로 가정하였다[1~2].

2.2 해석 방법

열전달 해석시 초기에 단일 coating층 및 GGG 60의 전 해석 영역에서 800°C의 항온 상태로 가정하고 해석을 수행하였다. 그리고, 냉각중 coating층 및 모재는 수축에 의한 변형을 수반하게 되므로 열전달 및 열응력의 연성된 해석이 요구되나 전체의 변형량이 해석 모델에 비해 매우 작을 뿐아니라 변형에 의한 열전달 기구의 변화가 매우 미비하므로 이를 비연성 된것으로 간주하고 해석을 수행하였다.

열전달 및 열응력 해석시 구성된 요소망은 해석 모델이 Fig. 1과 같이 축대칭 형상이므로 축대칭 경계조건 및 z방향으로의 열 유동 및 변위가 고정된 즉, 3차원 해석 모델을 2차원으로 가정하고 요소망을 구성하였다. 요소망 구성시 4절점 등매개 요소(4-nodes isoparametric element)를 사용하였다. 열전달 및 열응력 해석시 재료물성의 온도에 의존하는 비선형 과도문제는 Newton-Raphson method를 이용하여 해석을 수행하였다

2.3 해석 결과

Fig. 2는 냉각 시간에 따라 계면 및 coating층에서 반경 방향으로 작용하는 최대 인장

및 압축 잔류응력 수준을 냉각시간에 따라 나타내고 있다. σ_r 은 시간이 경과함에 따라 열 팽창에 기인하여 응력수준이 점점 증가하여 상온에서 최대치를 나타내고 있다. Coating층의 두께 및 gradient층의 유무에 따른 응력수준은 냉각시간에 걸쳐서 거의 일정한 양상으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 계면에서 인장 잔류응력, coating층에서는 압축 잔류응력이 작용하고 있다. 이는 기존의 연구결과와 일치하고 있다[3]. 계면에서 작용하는 인장 잔류 응력은 Coating층의 두께가 얇을 경우($t=0.4\text{mm}$) 즉, system A 및 D에서는 gradient층의 유무에 따른 큰 차이를 보여주고 있지 않으나, coating층의 두께가 큰 경우($t=1.5\text{mm}$) 즉, system C 및 D에서 gradient층이 존재하는 경우 잔류응력이 크게 감소하고 있다.

3. 잔류응력 및 접합강도

단열 coating층의 적정 형상을 얻기 위해 단열 Coating된 시험편의 항온 시험후 접합강도 평가를 수행하였다. 접합강도 평가는 단열 coating된 시험편을 STYCAST 2850-FT epoxy를 이용하여 adapter를 접합시키고, ASTM C633-79 spec.에 준하여 시험을 실시하였다.

접합강도 시험결과 파단은 최대 인장 잔류응력이 존재하는 계면에서 발생하였으며, Table 2와 같이 단열 Coating층의 접합강도는 system D > B > C > A순으로 증가한다. 이 결과는 Fig. 2에서와 같이 단열 coating층의 접합강도는 잔류응력이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 따라서, 항온 test에 의한 최적의 단열 coating층은 0.4mm 두께를 가진 gradient 단열 coating층이다.

Table 2 Adhesive strengths, σ_{adv} at each thermal barrier coating layers

		System A	System B	System C	System D
σ_{adv} (kg/mm^2)	1hr	1.35	4.59	2.16	4.92
	10hr	1.98	3.41	3.21	4.23

4. 결 론

1. 단열 coating층에 작용하는 최대 인장 잔류응력은 coating층 및 모재의 계면에서 작용하고, 최대 압축 잔류응력은 coating층에 작용한다.
2. 단열 coating층의 접합강도는 잔류응력이 증가함에 따라 감소한다.
3. 단열 coating층 및 모재에 작용하는 잔류응력 및 접합강도는 coating층이 두께가 얇고, 경사층일수록 우수하다.

Reference>

1. Ingared Kverens. "Coating of Diesel Engine Components", Conf. Coating for High Temperature Applications Petten, Netherlands, pp. 361~394, 1983
2. Hersley R. L. "Diesel engine R&D review and analysis", Final Report, Science Management Co., 1981
3. Yoshiyasu Itoh et al. "Residual stress Characteristics of Gradation Coating Components", J. Soc. Mat. Sci. Japan, Vol. 41, No. 469, pp.1575~1580. Oct., 1992

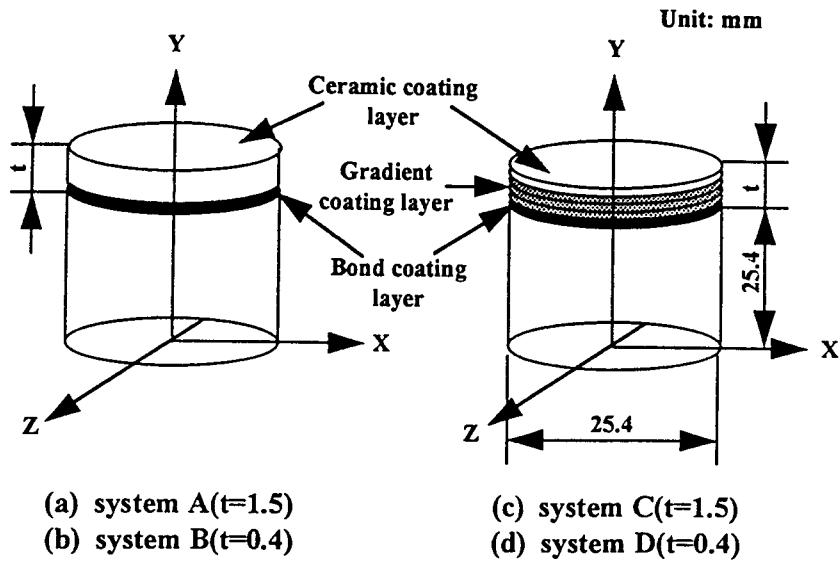


Fig. 1 Schematic diagram of analysis model for FEA

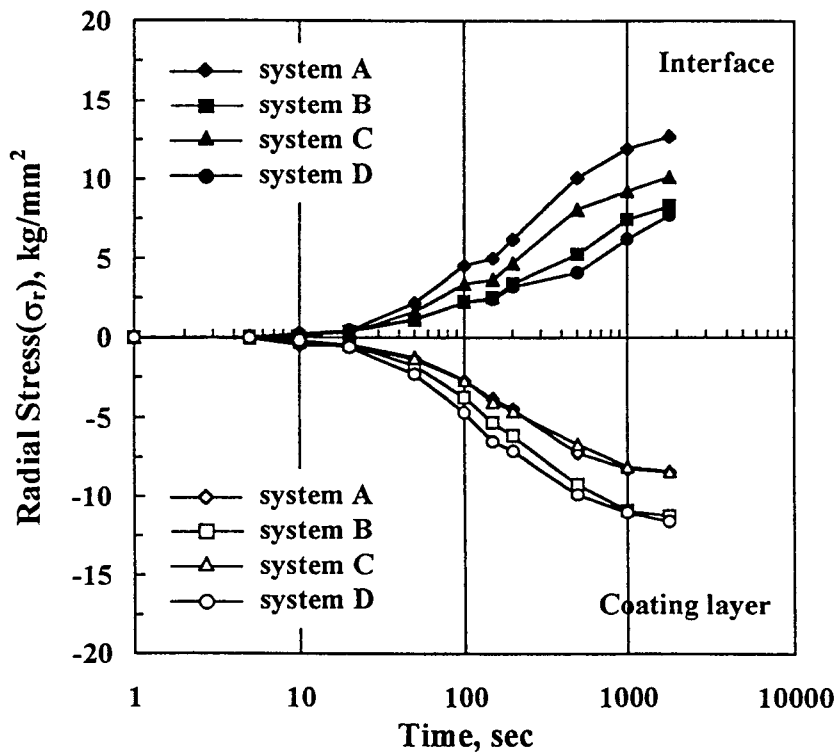


Fig. 2 Radial residual stress with cooling time