

고온환경하에서의 열차폐 코팅의 정적강도평가

Static Strength Evaluation of Thermal Barrier Coating(TBC) at High Temperature

*송현우¹, #석창성¹, 구재민¹, 김용석¹

*H. W. Song¹, #C. S. Seok(seok@skku.edu)¹, J.M.Koo¹, Y.S.Kim¹

¹성균관대학교 기계공학과

Key words : Thermal barrier coating, Bond strength, Thermal Stress

1. 서론

가스터빈을 고온 환경으로부터 보호하기 위하여 사용되는 열차폐 코팅은 가스터빈 가동 중 반복적인 열피로에 의해 파손된다. 열차폐 코팅의 파손은 탑코팅 부분에서 발생하는데, 이러한 탑코팅의 파손은 전체 열차폐 코팅 시스템의 파괴로 이어지게 된다. 따라서 열차폐 코팅의 강도평가는 열차폐 코팅 시스템의 파손을 방지하기 위하여 반드시 선행되어야 하는 연구이다.

이러한 코팅의 강도평가를 위하여 접착강도시험을 수행하고 있는데, 이는 계면의 강도나 코팅 자체의 강도를 평가하는 인장시험법[1]이다.

일반적으로 탑코팅 박리의 주요 원인은 온도변화에 따른 코팅계면에서의 열팽창계수 불일치에 의한 계면에 평행인 방향의 수직응력인 것으로 알려져 있다. 따라서 열차폐 코팅 시스템의 열화에 의한 접착강도저하를 측정하기 위해서는 코팅계면에 평행인 방향으로 측정하는 것이 합리적이나 이를 측정하기 어렵다.

본 연구에서는 계면에서의 열팽창계수 불일치 응력과 계면에 평행인 방향의 접착강도대신에 가스터빈 1단 블레이드에 적용되는 열차폐 코팅의 열화에 따른 계면의 수직인 방향의 접착강도 시험결과와 계면에 수직인 방향의 열응력을 비교하여 열차폐 코팅의 강도를 간접적으로 평가함으로써 열차폐 코팅의 사용 중 내구성을 평가하고자 하였다.

2. 접착강도시험

김대진 등[2]은 가스터빈 1단 블레이드 소재인 GTD-111DS를 사용하여 직경 25mm의 원기둥 형태의 코팅 시험편을 Table 1과 같이 제작하였다.

Table 1 Composite of TBC system[3]

	Material	Coating Type	Thickness
Substrate	GTD111DS	-	3 mm
Bond Coat	MCrAlY	LVPS	248 μm
Top Coat	7~8% Y ₂ O ₃ -ZrO ₂	APS	472 μm

Table 2 Results of bond tests[2]

Temp(°C)	Time(h)	Bond Strength(MPa)
1100	0	60
	10	50
	50	38
	100	37
	200	30
	400	22

김대진 등[2]은 1100°C에서 열화를 0, 10, 50, 100, 200, 400시간 동안 열화를 시킨 후, 25ton 용량의 전기모터식 만능시험기를 사용하여 접착강도 시험을 수행하였다. ASTM C633-79에 따라 변위계를 이용하여 1mm/min의 속도로 시험을 수행하여 하중-변위 선도를 구한 후, 파단 하중을 단면적으로 나누어 접착강도를 구하였으며, 그 결과는 다음 Table 2와 같다. 이 결과로부터 열화시간이 증가함에 따라 접착강도가 감소되고 있음을 알 수 있다.

3. 해석 모델 및 조건

열차폐 코팅의 열응력해석을 수행하기 위하여 Fig. 1과 같이 직경이 25mm인 코인형 시험편을 모델링을 하였다. 시험편의 축대칭을 고려하여 1/2 만 모델링한 후 y축에 대한 축대칭 조건을 주었다.

김대진 등[2]의 연구와 동일하게 탑코팅과 본드 코팅, 모재의 두께는 0.472mm, 0.248mm, 3mm로

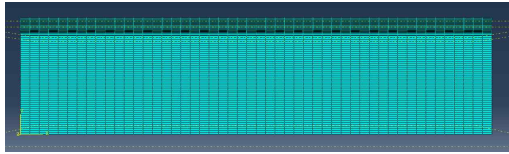


Fig. 1 Analysis Model

고정하고 초기온도는 25°C, 최고온도는 1100°C에 도달하도록 열전달해석을 수행하였다.

열전달해석을 수행하여 온도 분포를 획득한 후, 해석된 온도분포를 적용하여 열응력해석을 수행함으로써 최종적으로 열응력분포를 획득하였다. 상용화된 유한요소 프로그램인 ABAQUS 6.10을 사용하여 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과

접착강도시험은 계면에 수직인 방향으로 인장하중을 주기 때문에, 해석에 의한 계면에 수직인 y방향응력(S22)을 Table 4에 나타내었다.

Table 4로부터 중심부에서 계면에 수직인 y방향응력은 0이나, 모서리부의 본드코팅과 기저계면에서 상대적으로 큰 인장응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 모서리부의 본드코팅과 기저계면에서 파괴가 시작될 것으로 예측되며, 이는 김대진 등[2]의 연구결과와 일치한다.

Fig. 2은 김대진 등[2]의 접착강도 시험결과와 본 연구에서 획득한 본드코팅과 기저계면에서의 계면에 수직인 방향의 응력을 비교한 결과이다.

Table 4 Result of analysis

Stress (MPa)	Center				Edge			
	Top-Bond	Bond-Top	Bond-Basis	Basis	Top-Bond	Bond-Top	Bond-Basis	Basis
S22	0	0	0	0	1.81	2.05	3.04	3.02

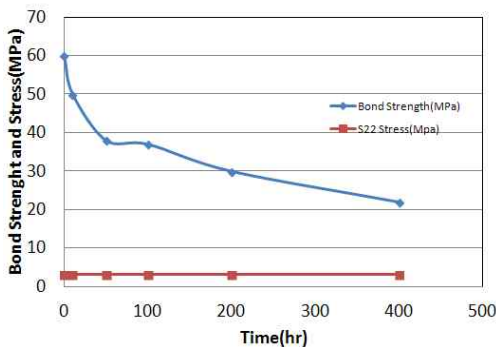


Fig. 2 Result of thermal stress analysis

계면에 수직인 방향의 응력이 1100°C에서 400시간 열화된 뒤의 접착강도보다 훨씬 낮기 때문에 열차폐 코팅의 내구성이 있음을 알 수 있다. 그러나 이 결과는 열피로와 열화에 의한 TGO의 성장이 무시된 결과이기 때문에, 이를 고려한 정적 접착강도측면에서의 내구성 평가가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 고온환경하에서의 열차폐 코팅의 정적강도를 간접적으로 평가하기 위하여 계면에 수직인 방향의 강도를 측정하는 접착강도시험결과와 계면에 수직인 방향의 응력을 비교하였다.

본 연구의 해석 결과로부터 모서리부의 본드코팅과 기저계면에서 파괴가 시작될 것으로 예측되며, 이는 본드코팅과 기저계면에서 파괴가 발생한 김대진 등의 연구결과와 일치한다.

김대진 등의 접착강도 시험결과와 본 연구에서 획득한 본드코팅과 기저계면에서의 계면에 수직인 방향의 응력을 비교한 결과, 1100°C에서 400시간 열화된 뒤의 접착강도보다 응력이 훨씬 낮음을 알 수 있었다. 이로부터 열차폐 코팅의 내구성을 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

그러나, 이 결과는 열피로와 열화에 의한 TGO의 성장이 무시된 결과이기 때문에, 이를 고려한 정적 접착강도측면에서의 내구성 평가가 필요하다.

후기

본 논문은 정부의 재원(교육과학기술부)으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0020024 and 2012R1A1A2043624).

참고문헌

1. ASTM C633-79, "Standard Test Method for Adhesive or Cohesive Strength of Flame Sprayed Coatings", ASTM, 1980
2. 김대진, 이동훈, 구재민, 송성진, 석창성, 김문영, "플라즈마 용사 열차폐 코팅의 열화에 따른 접착강도 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제 32권 제7호, 569~575, 2008
3. Kim, D.J., Seok, C.S., Lee, D.H., Koo, J.M., Kim, M.Y., Yang S.H. and Park, S.Y., 2007, "Evaluation of a Degradation of Thermal Barrier Coating for Gas Turbine Blade," Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting, pp. 99~104.