

박리면적을 이용한 열차폐 코팅의 파손 수명 평가

Spallation Life Estimation of Thermal Barrier Coatings by Delaminated Area

*신인환¹, 김대진¹, 구재민¹, #석창성¹, 이택운²

*I.H.Shin¹, D.J.Kim¹, J.M.Koo¹, #C.S.Seok(seok@skku.edu)¹, T.W.Lee²

¹ 성균관대학교 기계공학과, ²한전 KPS(주) G/T정비기술센터 기술팀

Key words : Thermal Barrier Coating, Spallation Life, Bond Test; Thermal Fatigue

1. 서론

열차폐 코팅(TBC; thermal barrier coating)은 가스터빈 고온부품에 직접적인 열전달을 감소시켜주는 기능을 하며, 열차폐 역할을 하는 탑코팅(Top Coat)층, 세라믹 재질과 초내열합금 블레이드 모재의 결합력을 증가시키는 역할을 하는 본드코팅(Bond Coat)층 및 고온 산화로 인해 생성되는 열생성산화물(TGO; Thermally Grown Oxide) 층으로 이루어져 있다[1].

열차폐 코팅이 파손될 경우, 코팅 파손 부분의 블레이드 금속 모재의 표면온도는 900℃ 이상 증가하게 되어 급속 산화 및 부식이 진행된다. 따라서 열차폐 코팅의 파손 수명은 블레이드의 수명과 직결되며 이에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 열피로 시험을 통해, 열차폐 코팅의 온도별 파손 수명을 평가하고, 특정사이클까지 열피로를 가한 코팅 시험편에 대한 접착강도 시험을 통해, 코팅의 파손 수명을 간접적으로 평가하고자 한다.

2. 열차폐 코팅 시험편 제작 및 시험장치 구성

열피로에 따른 열차폐 코팅의 파손 수명을 평가하기 위해 코인(coin)형상의 시험편을 제작하였다. 시험편 재질은 상용 블레이드의 재질인 GTD-111DS 소재로 정하였으며, 직경 25.4mm, 두께 3mm로 가공하였다. 제작된 금속 시험편에 MCrAlY계열의 본드코팅을 LVPS(Low Vacuum Plasma Spray)방식으로 적용하였고, 7~8% Y₂O₃-ZrO₂의 탑코팅을 DVC(Dense Vertical Cracked)방식으로 적용하였다. Table.1에 시험편의 각층의 재질, 코팅 적용 방식 및 각층의 두께를 정리하여 나타내었다.

Fig.1은 주기산화 시험장치의 개략도를 나타낸 것으로, 수직 퍼니스 및 시험편 자동 이송장치로 구성되어있다.

3. 열피로 시험

열피로 시험의 1사이클 동안 시험편은 퍼니스내에서 45분 동안 가열되며, 퍼니스 밖에서 15분 동안 자연 냉각된다[2]. 열피로에 따른 열차폐 코팅의 파손 수명을 평가하기 위해, Table 2에 나타낸 것과 같이, 1,100℃와 1,151℃에서 각각 4개씩 코팅층이 완전 파손 될 때까지 시험하였다. 각 사이클마다, 시험편이 냉각되는 단계에서 열차폐 코팅의 파손 유무를 육안으로 관찰하였으며, 시험편에서 코팅층이 완전히 떨어진 사이클을 파손 수명으로 정하였다. 열피로 시험을 통해 평가된 코팅시험편의 파손 수명을 Table 3에 정리하여 나타내었다. 또한 코팅층 파손 원인이 되는 균열은 코팅부 가장자리부터 발생되어 시험편 중앙으로 진전되는 것으로 관찰되었다.

4. 접착강도 시험

열피로로 인해 코팅 가장자리에서 발생한 균열과 코팅의 파손 수명의 연관성을 확인하기 위해 접착강도시험을 이용하여 일정 사이클동안 열피로를 받은 시험편의 코팅층과 모재를 강제로 떨어뜨려 파면을 평가하였다. 접착강도시험 전에 미리 Table 2에 나타낸 것과 같이 1,151℃ 및 1,100℃에서 각각 1, 2, 5, 10 사이클까지만 열피로를 가하여 시험편을 제작하였으며, 25ton 유압식 만능시험기를 이용하여 시험속도 1mm/min으로 시험하였다[3].

Table 1 Composition of thermal barrier coating system

	Material	Coating Type	Thickness
Substrate	GTD-111DS	-	3 mm
Bond Coat	MCrAlY	LVPS	240 μm
Top Coat	7~8%Y ₂ O ₃ -ZrO ₂	DVC	598 μm

Table 2 Test conditions for thermal fatigue

Test	Exposure Time		Temperature (°C)	Cycle (N)
	heating	cooling		
1	45min	15min	1,151°C, 1,100°C	until spallation
2				1, 2, 5, 10, 20

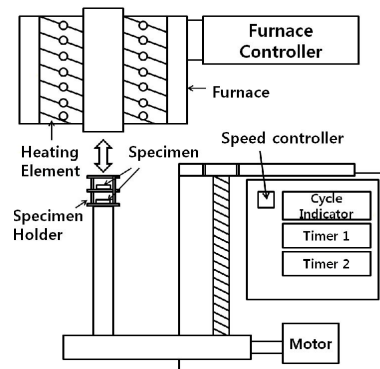


Fig.1 Schematic illustration of apparatus for thermal fatigue test

Table 3 Spalled Cycles of TBCs with thermal fatigue

Temperature (°C)	Spalled Cycles of TBCs (N)				
	No.1	No.2	No.3	No.4	Avg.
1,151	14	14	10	19	14
1,100	40	52	42	37	43

5. SEM-EDX 분석

1,151℃ 및 1,100℃에서 일정 사이클동안 열피로를 가한 코팅시험편의 접착강도시험 후 파단면을 관찰한 결과, 파단면내에 탑코팅 색과 유사한 색을 띤 A면과 완전 박리된 코팅면과 유사한 색을 띤 B면이 존재함을 확인할 수 있었다. 따라서 A, B면에 대한 성분 분석을 SEM-EDS를 이용하여 실시하였다. 우선 열화되지 않은 코팅면과 완전 박리된 코팅면을 SEM-EDS를 통해 성분 분석하였으며, 이 결과와 A, B면의 성분 분석결과를 비교하였다. Fig.2에 열화되지 않은 시험편과 완전박리된 시험편의 단면 및 성분을 나타내었으며, Fig.3에 A, B면에 대한 단면 및 성분을 나타내었다. EDX분석 결과, 열피로로 인해 박리된 면에서 검출된 Al 성분이 B면에서도 동일하게 검출되었다. 이 결과를 통해, B면의 경우, 접착강도 시험 전에 이미 열피로를 통한 박리가 시험편 바깥쪽에서 발생되어 시험편 중앙으로 진전된 것으로 판단된다.

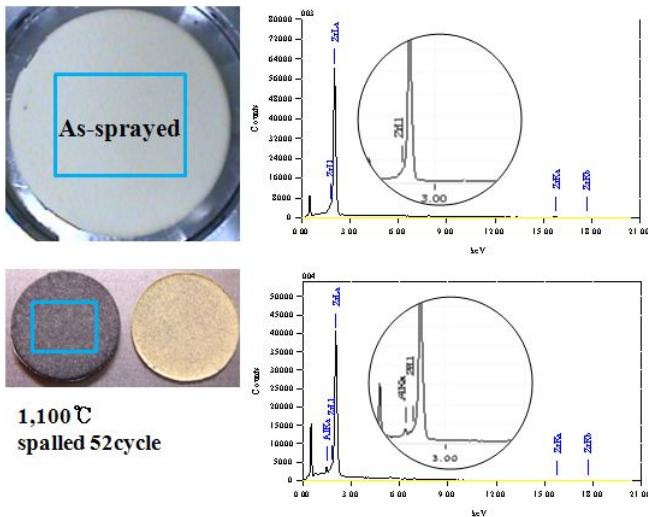


Fig.2 SEM image and composition of TBC (a)as sprayed and (b)spalled with thermal fatigue at 1,100°C

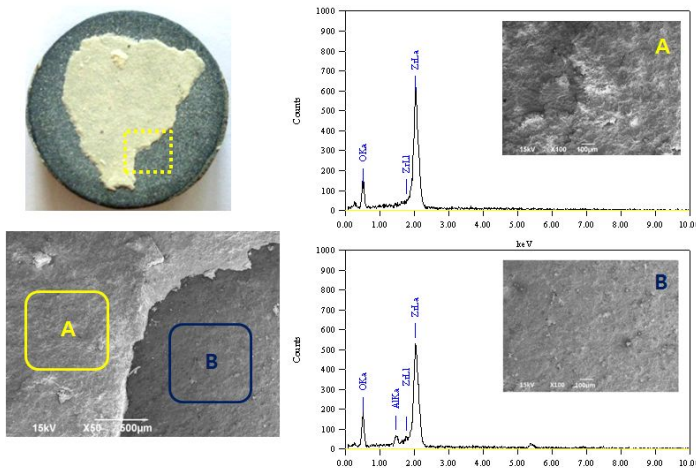


Fig.3 SEM image and composition between A and B zone of fractured surface by bond test

6. 코팅 파단면에 대한 이미지 분석

접착강도시험 후 파단면에서 관찰된 B면이 완전 박리가 진행되는 중간단계 면이라고 가정할 경우, 사이클에 대한 B면의 면적 증가는 곧 완전 박리라고 가정할 수 있다. 따라서 가동온도별, 사이클 증가에 따른 B면의 면적 증가를 열피로 시험을 통한 코팅의 완전 박리 수명을 비교하기 위해 Fig.4에 나타낸 것과 같이 이미지 분석 기법을 이용하여 평가하였다. 이미지 분석을 통해 구한 B면적 비율과 주기산화 사이클의 관계를 통해 B면적이 100%가 되는 시점을 식(1)을 이용하여 구해 보았으며 이를 Fig.5에 나타내었다. 또한 면적 분석을 이용하여 계산된 코팅 파손 수명과 실제 열피로 시험을 통한 파손 수명을 비교하여 Fig.6에 나타내었다.

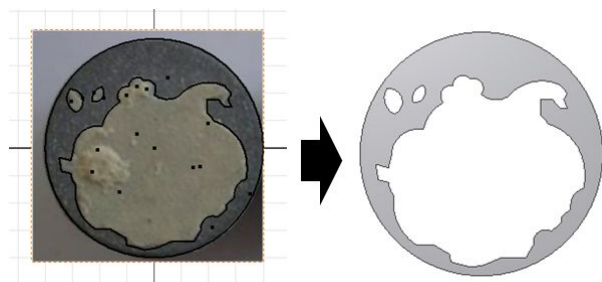


Fig.4 The Method of image analysis for measuring the delaminated area of TBCs

$$Spallation\ life = \frac{(Operating\ Temp. - 960)}{8.3} \times (Area\ of\ B)^{0.5} \quad (1)$$

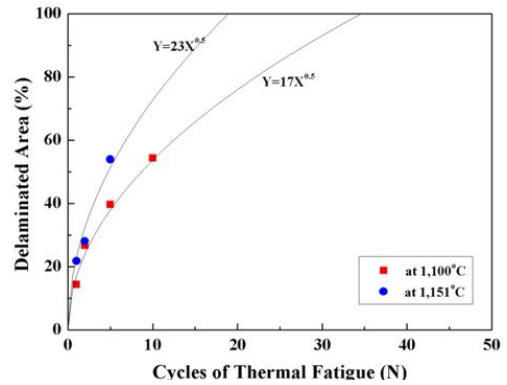


Fig.5 The result of the delaminated area measured by image analysis

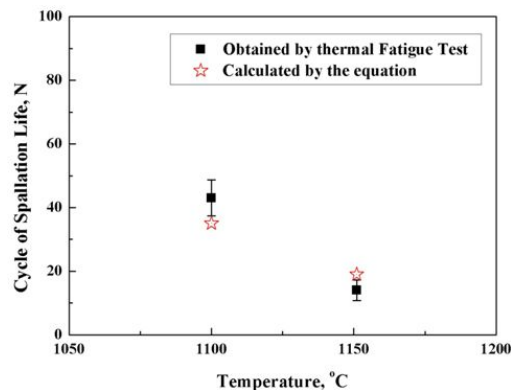


Fig.6 Comparison between the result of calculated spallation life of TBCs using the equation and the results by thermal fatigue tests at each temperature

7. 결론

1. 1,151°C 및 1,100°C 두가지 온도조건에서 열차폐 코팅에 대한 열피로 시험을 하여 코팅의 파손 수명을 평가하였으며, 코팅층 파손 원인이 되는 균열은 코팅부 가장자리부터 발생되어 시험편 중앙으로 진전되는 것으로 관찰되었다.
2. 접착강도시험 후, 노출된 코팅 파단면 중에서, 열피로로 인해 완전 박리된 면과 성분이 유사한 B면적을 계산함으로써, B면적이 100%가 되는 시점을 코팅의 완전 박리 시점으로 예측할 수 있음을 확인하였다.
3. 접착강도시험 후, 파단면의 이미지분석을 통한 열차폐 코팅의 간접 수명 평가 방법은, 열피로 시험 사이클이 긴 낮은 온도 영역에서 간접적인 열차폐 코팅의 완전 박리수명을 예측하는데 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 논문은 2단계 두뇌한국 사업(BK21)과 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-0055842).

참고문헌

1. A.G.Evans, D.R.Mumm, M.Watanabe, A.Karlsson, J.A. Pfaendner, "The influence of test method on failure mechanisms and durability of a thermal barrier system", June, 2002
2. E.Schumann, C.Sarioglu, J.R.Blachere, F.S.Pettit, G.H.Meier, "High-temperature stress measurements during the oxidation of NiAl," Oxidation of Metals, Vol. 53, pp.259-272, 2000.
3. D. J. Kim, S. K. Cho, J. H. Choi, J. M. Koo, C. S. Seok and M. Y. Kim, Evaluation of the degradation of plasma sprayed thermal barrier coatings using nano-indentation, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol.9, 2009.