

열차폐 코팅의 동은 및 주기 산화 특성 평가에 관한 연구

Characteristic Evaluation of Thermal Barrier Coating with Isothermal and Cyclic Oxidation

*신인환¹, 김대진¹, 구재민¹, 석창성¹, 이택운²

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

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

Key words : Thermal Barrier Coating, TGO, Cyclic Oxidation

1. 서론

가스터빈 고온 부품 중 1단 블레이드의 경우 현재 1,350°C 이상의 고온에서 약 3,600rpm의 고속회전을 하게 됨으로서, 고온 부식 및 산화조건에 노출되고 있다. 열차폐 코팅(thermal barrier coating; TBC)은 가스터빈 고온부품에 직접적인 열전달을 감소시켜주는 기능을 하며, 열차폐 역할을 하는 세라믹계열의 탑코팅(TC)층, TC재질과 모재의 결합력을 유지시켜주는 본드코팅(BC)층으로 이루어져 있다.[1]

가스터빈 복합화력 설비의 경우 가동, 정지가 타 발전 설비에 비해 용이한 장점 때문에 여름철 및 수도권 전력의 첨두부하용으로 주로 사용된다. 이는 긴 시간 동안 운전이 지속되면서 고온부품이 장시간 등온 산화(isothermal oxidation)되는 것과 달리, 시스템의 잦은 기동 및 정지로 인한 반복적인 산화, 즉 주기 산화 환경에 놓이게 됨을 의미한다.

이에 본 연구에서는 첨두부하용 발전설비의 운전방식을 모사한 주기 산화 시험을 통해, 열차폐 코팅의 주기 산화에 따른 박리수명을 평가하고, 박리된 코팅층 미세 조직변화를 관찰하고자 한다. 또한 기저부하용 발전설비의 운전방식을 모사한 등온열화에 따른 박리 수명과 비교하여 열차폐 코팅의 동은 및 주기산화 특성을 평가하고자 한다.

2. 열차폐 코팅 시험편 제작 및 시험장치 구성

열차폐 코팅의 주기산화 특성을 평가하기 위해 코인(coin)형상의 시험편을 이용하였다. 현재 블레이드에 사용되는 GTD-111DS 소재를 시험편의 모재로 정하고, 진공 정밀 주조 후 직경 25.4mm, 두께 3mm로 가공하였다. Table.1에 시험편의 각층의 재질, 파우더 종류 및 코팅 방식을 정리하여 나타내었다.

Fig.1은 주기산화 시험장치의 개략도를 나타낸 것으로서, 튜브형 수직가열로, 가열로 제어기, 시험편 자동 이송장치 및 시험편 홀더로 구성되어 있다. 시험편 자동 이송 장치는 모터, 구동축, 베어링, 타이머, 시험편 지지대, 시험편 홀더로 구성되어 있다.

3. 주기산화시험

시험주기는 1시간으로, 일정온도로 가열되어 있는 퍼니스에 시험편을 투입하여 45분 동안 가열한 후 퍼니스 밖에서 15분 동안 자연냉각 하였다.[2] 가스터빈 입구온도 상승에 따른 열차폐 코팅의 주기산화 박리수명을 평가하기 위해, 시험온도를 열피로 시험에 주로 적용되는 1,100°C 기준으로 1,050°C부터 1,200°C까지 5단계로 변화시켜 온도별 주기산화 시험을 수행하였다. 또한 반복 사이클에 따른 열차폐 코팅층의 TGO 두께 성장을 관찰하기 위해, 시험온도 1,100°C에서 1사이클부터 20사이클까지 5단계로 나누어 반복 사이클별 주기산화 시험을 수행하였다. Table.2에 온도별, 반복 사이클별 주기산화시험 방식을 정리하여 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 주기산화시험을 통한 열차폐 코팅의 박리수명이 감소하는 경향을 나타내었으며, Fig.2에 1,100°C와 1,151°C 주기산화 시험에서 코팅층이 박리된 모습을 나타내었다. Fig.3에 온도별 주기산화시험의 heating 시간만을 고려하여 등온열화를 통한 열차폐 코팅의 박리수명[3]과 비교하였으며, 등온열화에 비해 열차폐 코팅의 박리수명이 감소된 것을 알 수 있었다.

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	APS	598 μm

Table.2 Test conditions for cyclic oxidation

Test	Exposure Time		Temperature (°C)	Cycle (N)
	heating	cooling		
1	45min	15min	1050, 1100, 1121, 1151, 1200	until spallation
2			1100	1, 2, 5, 10, 20

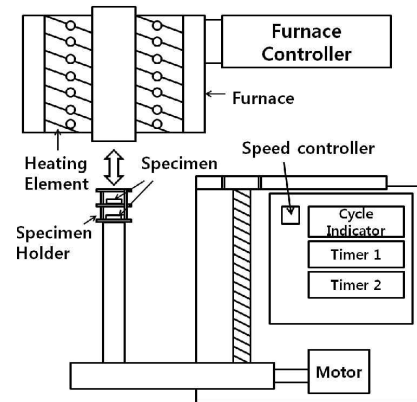
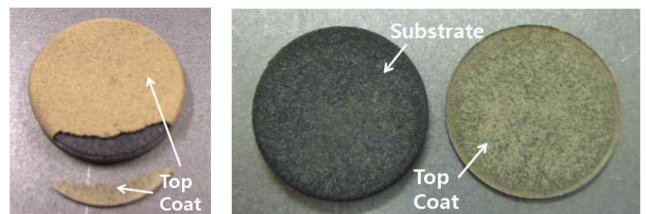


Fig.1 Schematic illustration of apparatus for cyclic oxidation test



(a) edge chipping of TBC at 1,151°C

(b) spallation of TBC at 1,100°C

Fig.2 Spalling of specimens after cyclic oxidation at different temperature conditions.

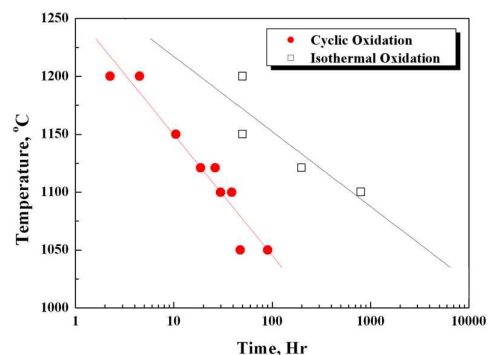


Fig.3 The relationship between temperature and spallation life of TBC with cyclic oxidation.

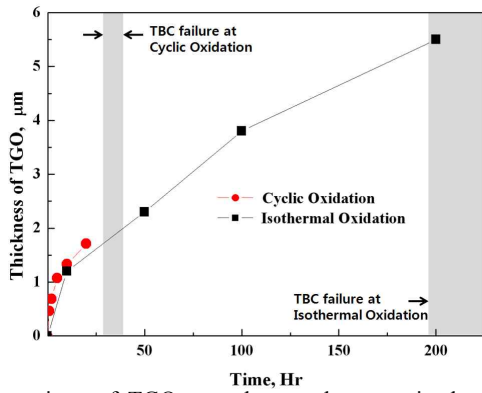


Fig.4 Comparison of TGO growth rates between isothermal and cyclic oxidation test at 1,100°C.

4. 미세조직을 통한 주기산화 특성평가

1,100°C에서 반복사이클별 주기산화시험을 종료한 시험편의 절단면을 관찰하여 TGO층 두께를 측정 한 후, Fig.4에 등온열화와 비교하여 나타내었다. TGO의 두께가 약 5.5μm일 때 코팅층이 박리된다고 알려진 등온산화[3]에 비해, 주기산화의 경우 약 40~52 사이클(30~40 hr)에서 박리되었으며, 이 때 TGO 두께는 약 2.5μm이다. 주기산화와 등온열화의 TGO의 두께 성장률은 Fig.4에 나타난 것과 같이 비슷하기 때문에 주기산화에서 박리수명이 감소되는 주요 원인은 TGO의 성장률 차이보다, 주기적인 온도변화와 코팅층 열팽창계수 차이로 발생하는 열응력인 것으로 판단된다.

5. 열응력 해석 및 박리선도 도출

주기산화에서 열차폐 코팅층의 열응력 차이를 관찰하기 위해, 유한요소법을 이용한 해석을 수행하였다. Fig.5에 나타난 모델의 형상은 2차원 Beam으로서, 시험에 사용된 시험편의 치수를 적용하였다. 또한 미세조직 관찰을 통해 측정된 코팅층의 두께를 적용하였고, 모델의 양 끝은 자유단을 주었다. 유한요소 mesh는 7449개의 node와 2400개의 element로 구성되었으며, 해석에 사용된 각 층의 기계적 성질은 Table.3과 같다.

Fig.6에 코팅층의 주요 박리원인[4]인 top/bond coat 계면의 수직방향(y-방향) 응력분포를 온도별로 정리하여 나타내었다. 온도가 증가할수록 박리가 일어날 가능성이 큰 경계면에서의 최대 수직응력이 증가함을 알 수 있었다. 해석결과를 통해 열차폐 코팅의 온도변화에 따른 Δσ_y를 구하였으며, Fig.7에 주기산화시험의 박리사이클을 이용하여 열응력에 따른 박리선도(S-N)를 나타내었다. 또한 S-N선도를 이용하여 주기산화에 따른 열차폐 코팅의 박리수명식(1)을 도출하였다.

$$\Delta\sigma_y = 127 - 10.65 \times \log_{10} N \quad (1)$$

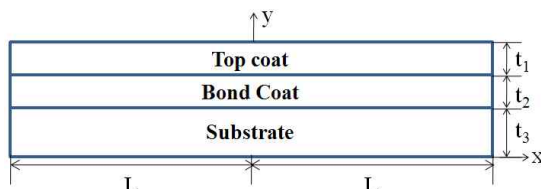


Fig.5 Geometry of the TBC system model.

Table.3 Mechanical properties of TBC system[5]

	Young's Modulus, E(GPa)	Poisson ratio, ν	CTE, α(1/°C)
Substrate	184	0.3	16*10 ⁻⁶
Bond Coat	120	0.33	17.6*10 ⁻⁶
Top Coat	26	0.12	12.2*10 ⁻⁶

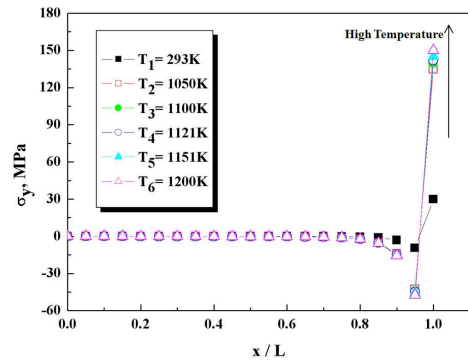


Fig.6 Normal stress distribution at top/bond coat interface.

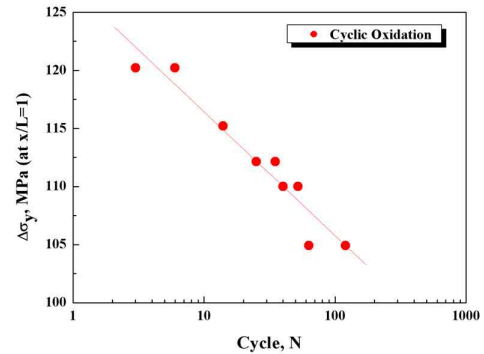


Fig.7 The relationship between Δσ_y(at x/L=1) and cycle of TBC with cyclic oxidation

6. 결론

첨두부하 발전방식과 기저부하용 발전방식에 따른 열차폐 코팅의 등온 및 주기산화 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도별 주기산화와 등온열화 박리수명선도를 비교함으로써, 열차폐 코팅의 박리수명의 차이를 확인할 수 있었다.
2. 등온 및 주기산화에 따른 TGO두께 성장률은 비슷하였다. 따라서 TGO 두께 성장률 차이보다, 주기적인 온도변화와 코팅층 열팽창계수 차이로 발생하는 열응력에 의해 주기산화에서 박리수명이 감소되는 것으로 판단된다.
3. 온도별 열응력 해석을 통해 코팅층의 주요 박리 원인인 top/bond coat 계면의 Δσ_y를 구하였으며, 해석결과와 주기산화 박리 사이클을 이용하여 열응력에 따른 열차폐 코팅의 박리수명식을 도출하였다.

후기

본 연구는 2단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업과 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행되었음 (No. 2007-0055842)

참고문헌

1. 김문영, 박상열, 양성호, 최희숙, 고원, 송국현, “모델 변전에 따른 가스터빈 1단 버켓의 손상경향 분석,” 대한기계학회논문집 A권, 제31권, 제6호, pp. 718-724, 2007.
2. A.G.Evans, D.R.Mumm, M.Watanabe, A.Karlsson, J.A. Pfaendtner, "The influence of test method on failure mechanisms and durability of a thermal barrier system", June, 2002
3. 김대진, 이동훈, 구재민, 송성진, 석창성, 김문영, “플라즈마 용사 열차폐 코팅의 열화에 따른 접착강도 평가,” 대한기계학회논문집 A권, 제32권, 제7호, pp. 569-575, 2008.
4. 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.
5. Rosler J, Baker M, Aufzug K, "A parametric study of the stress state of thermal barrier coatings," Part I; creep relaxation, Acta Mater, 2004;52:4809