

# 실조건 온도구배를 적용한 열차폐 코팅의 열피로 시험

## (Thermal Fatigue Test of Thermal Barrier Coating by Real Temperature Gradient)

\*김일환<sup>1</sup>, 신인환<sup>1</sup>, 이종근<sup>1</sup>, 구재민<sup>1</sup>, 이택운<sup>2</sup>, 석창성<sup>1</sup>

\*I.H.Kim<sup>1</sup>, I.H.Shin<sup>1</sup>, D.G.Lee<sup>1</sup>, J.M.Koo<sup>1</sup>, T.W.Lee<sup>2</sup>, C.S.Seok(seok@skku.edu)<sup>1</sup>

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

Key words : Thermal Barrier Coating, Thermal Gradient, Internal Cooling, Thermal Fatigue, Spallation Life

### 1. 서론

열차폐 코팅은 고온 화염의 열이 블레이드에 직접 전달되는 것을 막는 역할을 하며, 이로 인해 블레이드 표면의 온도가 화염온도에 비해 약 100~170℃ 정도 낮아지게 된다. 실제 열차폐 역할을 하는 세라믹계열의 탑코팅층과 모재의 결합을 유지하면서 모재와 세라믹재료의 열팽창계수차이를 완화시켜 발생하는 열응력을 감소시켜주는 역할을 하는 MCrAlY 재질의 본드 코팅층으로 이루어져 있다.

열차폐 코팅은 고온환경에서 장시간 운전 시 본드코팅과 탑코팅 계면에 알루미늄 산화물(TGO)층이 생성된다. TGO층은 모재의 산화를 막는 역할을 하지만 반복 열피로를 받는 경우에는 코팅층의 박리가 진행되어 파손에 도달하게 된다.

열차폐 코팅이 파손될 경우, 코팅 파손 지점의 블레이드 모재 부분에 급속한 산화 및 부식이 진행된다. 따라서 열차폐 코팅의 수명 평가는 매우 중요하다.

이에 본 연구에서는 기존 열피로 시험 방식에 따른 코팅 가열 후 급속 냉각에 따른 열충격으로 발생한 코팅 박리가 아닌 실제 블레이드 온도구배가 가스터빈 블레이드의 열차폐 코팅 수명에 미치는 영향을 평가하였다.

### 2. 실제 블레이드 온도 구배를 적용한 열 피로 시험

#### 2.1 시험재료 및 시험편

상용 가스터빈 1단 블레이드에 사용되는 급속 모재인 GTD-111DS(DS; Directional Solidification)와 동일한 재료로 열차폐 코팅 시험편을 제작하였으며, Table 1에 GTD111DS의 일반적인 화학 조성을 나타내었다. 시험편의 형상을 직경 25mm, 두께 3mm의 동진 모양으로 가공하였으며, 모재와 본드코팅의 결합력 향상을 위해 #24 mesh의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자를 모재 표면에 분사하여 표면 거칠기를 주어 가공하였다. 모재 윗면에 MCrAlY [M=Ni or Co] 분말을 사용하여 LVPS 방식으로 두께 약 240 μm로 본드코팅을 적용하였으며, 본드코팅을 적용한 후 산화를 방지하기 위해 진공에서 1000℃의 온도로 2시간 유지하여 열처리 하였다.

본드코팅을 적용한 시험편에 7~8% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> 성분의 분말을 Sulzer Metco사의 8MB Robot으로 분사하여 DVC(Dense Vertically Cracked) 코팅을 적용하였다. Table 2에 시험편의 각 코팅층 재료, 파우더 종류 및 적용 방식을 정리하여 나타내었다. Fig. 1에 본드코팅과 탑코팅이 적용된 시험편 단면을 나타내었으며, 시험편 탑코팅 두께는 약 598 μm, 본드코팅 두께는 약 239 μm로 측정되었다.

Table 1 Chemical composition of the GTD-111DS (wt. %)[11]

Chemical Composition, (wt.%)								
Element	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Al
wt. %	0.11	0.02	0.001	Bal.	14.26	1.36	4.77	2.33
Element	Co	W	Ta	Zr	P	S	B	-
wt. %	9.92	3.07	2.37	0.001	0.027	0.007	0.005	-

Table 2 Material and Method of each layer of coating specimen

	Material	Powder	Method
Top Coat	YSZ (7~8% ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	SPM 2000-1	APS (Air Plasma Spray)
Bond Coat	MCrAlY (Co <sub>32</sub> Ni <sub>21</sub> Cr <sub>8</sub> Al <sub>0.5</sub> Y)	SM 4198	LVPS (Low Vacuum Plasma Spray)
Substrate	GTD-111DS	-	Directional Solidification Casting

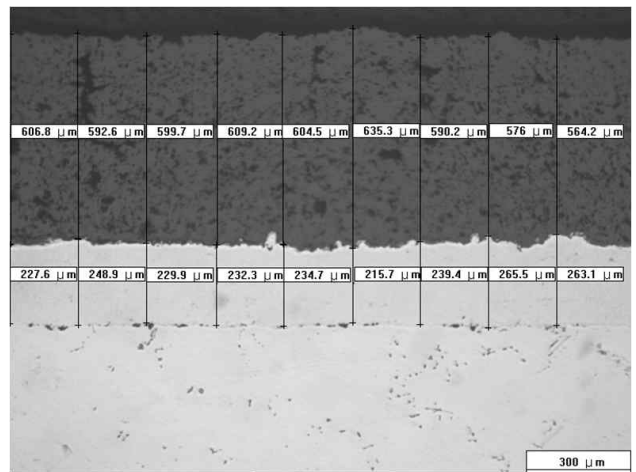


Fig. 1 Cross-sectional view of a as-sprayed coating specimen

#### 2.2 시험장치

내부냉각을 고려한 열피로 시험장치는 튜브형 수직 가열로, 가열로 제어기, 시험편 자동 이송장치, 냉각 공기 입력관, 압축공기분사장치 및 시험편 홀더로 구성되어 있고, Fig. 1에 나타내었다. 또한 시험편내의 온도구배를 구현하기 위해 압축 공기분사장치를 이용하여 공기유량을 조절하고 냉각 공기 입력관을 통하여 시험편 하부에 냉각공기를 분사시켰다.



Fig. 2 Thermal fatigue test facility

#### 2.3 열전달 해석을 통한 시험편 온도구배 조건 도출

열차폐 코팅의 일반적인 온도분포에서 1260℃의 연소가스 온도는 탑코팅 표면에서 995℃이며 탑코팅을 거치게 되면 790℃까지 떨어진다. 내부 냉각이 이루어지는 모재쪽 온도는 585℃이며 냉각공기의 온도는 285℃이다. Fig. 3은 열전달 해석에 사용된 모델의 개략도와 유한요소망을 나타냈다.

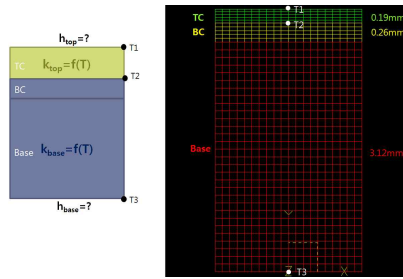


Fig. 3 The finite element model for heat transfer analysis

열전달계수를 변화시켜 가며 얻은 T1~T3 온도를 구하였고, 탑코팅 쪽의 열전달계수가 4520 W/m°C 이고 모재쪽의 열전달계수가 4000 W/m°C 일 때 목표하는 온도분포가 나타남을 알 수 있었다. Fig. 4은 열전달 해석 결과를 나타낸 것으로서, 기존 코팅의 경우 실제 가스터빈 블레이드의 조건을 모사하는 열피로 시험시 탑코팅과 모재의 온도를 각각 1060°C와 589°C로 맞추어야 함을 의미한다. 이와 같이 열전달 해석을 통해 Fig. 5와 같이 코팅에 대한 실조건 열피로 시험조건을 도출하였다.

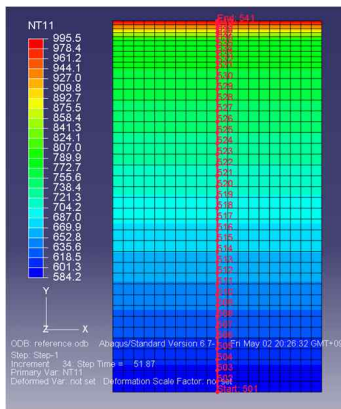


Fig. 4 The result of heat transfer analysis at the steady-state using by FEM

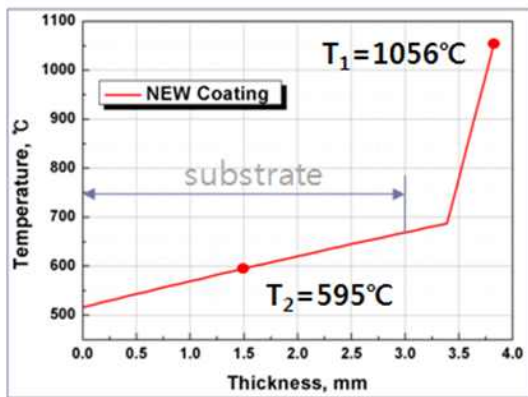


Fig. 5 The result of heat transfer analysis in coat using by FEM

2.4 시험 방법

열전달 해석을 통하여 도출한 시험편 온도구배 조건을 적용하여 시험을 수행하였다. 시험중 탑코팅과 모재에서의 온도는 Fig. 6과 같이 측정되었다. 시험편의 온도구배 조건을 적용하기 위하여 냉각유량은 60L/min, 퍼니스의 온도는 1200°C 적용하여 시험을 수행하였다.

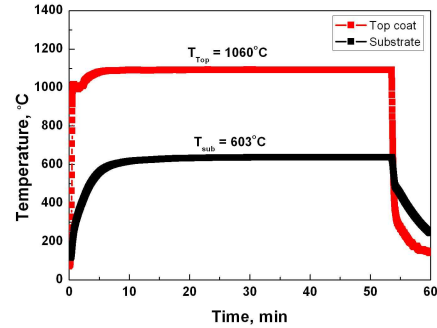


Fig. 6 The result of heat in top coat and substrate

2.4 시험 결과

실제 블레이드 온도구배를 적용한 열피로 시험을 수행한 결과, 기존의 열피로 시험시 급속 냉각으로 인한 열충격 파손 요인을 제거함으로써, 시험편의 파손 수명이 약 40cycle로 파손 평가되었던 열피로 시험결과에 비해 약 900cycle의 파손 수명을 나타내었다. 내부냉각을 고려한 열피로시험에 따른 코팅 파손 수명이 미국GE사에서 열차폐 코팅의 운전 수명을 평가하기 위한 등가운전계산식을 이용하여 환산한 결과 19,000시간으로 평가되었으며, 이는 코팅 운전 1주기 수명으로 알려진 24,000시간에 가깝게 평가된 것을 알 수 있었다.

3. 결론

실제 블레이드 온도구배를 적용한 열피로 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열전달 해석을 통해 실제 블레이드 외부 경계 조건을 구하였으며, 이를 시험편에 적용하여 실제 블레이드 온도구배를 구현하였다.
2. 내부냉각을 고려한 열피로 시험을 수행하여 기존 열피로 시험 통한 코팅 파손 수명이 파손 평가 됨을 알 수 있었으며, 실제 환경을 모사한 코팅 파손 수명을 평가 할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 3단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업과 2007년도 정부 (과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10049-0).

참고문헌

1. 김대진, 이동훈, 구재민, 송성진, 석창성, 김문영, “플라즈마 용사 열차폐 코팅의 열화에 따른 접착강도 평가,” 대한기계학회논문집 A권, 제32권, 제7호, pp. 569-575, 2008.
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
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