

# 가스터빈 엔진 적용을 위한 이중 본드층 구조를 갖는 열차폐 코팅층의 두께에 따른 열적 안정성 평가

이승수, 박형주  
국방기술품질원 항공센터  
e-mail:ceramist@dtqa.re.kr

## Thermal Stability Evaluation for the Coating Thickness of Thermal Barrier Coatings with Double Layer Bond Coat Structure for Gas Turbine Engine

Seoung Soo Lee, Hyung Ju Park  
Aviation System Center, Defense Agency for Technology and Quality

### 요약

이중 본드층 구조를 갖는 열차폐 코팅에 대해 코팅층 두께가 열적 안정성에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 이중 구조를 갖는 본드층은 동일 조성의 Ni-Cr계 상용 MCrAlY 분말을 스테인리스 내열합금 모재 (SUS 304)에 고속화염용사법과 대기플라즈마용사법으로 형성하였으며, 탑층은 상용 이트리아 안정화 지르코니아 (YSZ) 분말을 사용하여 대기 플라즈마 용사법 (APS)으로 코팅층을 형성하였다. 열차폐 코팅 평가를 위해 1100°C에서 40분간 유지한 후 20분 냉각하는 것을 1 cycle로 하여 1143회 동안 반복 열피로 시험을 수행한 결과, 탑층의 두께가 얇고 본드층의 두께가 두꺼울수록 산화층은 두껍게 형성되었으나, 탑층 두께가 증가할수록 본드층 두께 영향은 감소하였다.

### 1. 서론

열차폐 코팅(Thermal Barrier Coatings, TBCs)은 낮은 열전도성 물질인 세라믹 top 코팅층과 intermetallic bond 층으로 고온의 열원으로부터 모재를 보호하는 역할을 한다. 하지만 이러한 코팅층의 경우 조성과 열적 노출에 의해 bond coat와 top coat 계면에서 산화에 의한 TGO 층이 생성되며, 반복적으로 열에 노출될 경우 코팅층 박리의 원인이 되기도 한다.

본 연구에서는 반복 열피로 시험을 통해, 항공용 엔진, 발전용 가스터빈 및 함정, 유도 무기용 고온 부품에 적용되는 열차폐 코팅층의 두께에 따른 TGO층의 생성 거동 및 미세구조 분석결과를 바탕으로 열적 안정성에 대해 평가하고자 하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 시편제조

본 연구에서는, 스테인리스강인 SUS 304를 모재로 사용하였으며, bond 층은 2중층으로 형성하였다. 1차 bond 층은 고속화염용사(HVOF) 코팅 시스템 장비를 이용하였으며, 2차 bond 층과 top 층 모두 대기 용사

코팅 시스템 장비를 이용하였다. Bond 층 형성은 MCrAlY 상용 분말을 사용하였으며, top 층은 상용 YSZ 분말을 사용하여 코팅층을 형성하였다.

#### 2.2 열피로시험

열차폐 코팅층의 열적 내구성 평가를 위해 열차폐 코팅층의 표면을 1100 °C 온도에 노출하고 모재 하단에 냉각 공기를 통해 냉각하는 형태의 반복 열피로 시험 장치를 이용하였다. 사용된 열피로 시험 장치는 실제 가스터빈 고온 부품의 내부 냉각 유로를 통해 냉각되는 구동환경과 유사한 조건을 모사하여 40분간 가열하고, 상온에서 20분간 냉각하는 것을 1 cycle로 하여 1143회까지 테스트를 수행하였다.

#### 2.3 특성평가

열피로 시험 전/후 시험편 단면 미세구조 관찰하기 위해 절단된 시편을 epoxy resin으로 마운팅하여 diamond paste로 1 μm까지 연마하였으며, 시험편의 단면 미세구조는 주사전자현미경으로 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

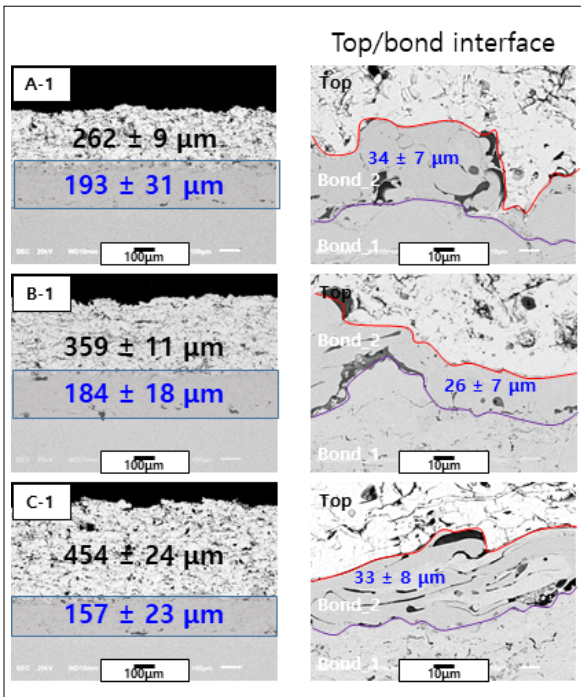
코팅층 두께에 따른 열차폐 코팅의 열적 안정성을 확

인하기 위해 top 층과 bond 층 두께를 설정하였으며, 표 1에 나타내었다.

[표 1] Top 과 bond 층의 설정 두께

No.	Top 층 두께 (μm)	Bond 층 두께 (μm)
A-1	200 - 300	100 - 200
A-2		200 - 300
A-3		300 - 400
B-1	300 - 400	100 - 200
B-2		200 - 300
B-3		300 - 400
C-1	400 - 500	100 - 200
C-2		200 - 300
C-3		300 - 400

그림 1은 100 ~ 200 μm의 두께로 bond coat를 설정하여 형성한 후 top coat의 두께를 달리하여 형성한 열차폐 코팅의 미세구조를 나타내었다. 그림 1에서 알 수 있듯이, 표 1에서 설정한 코팅층 두께 조건에 맞게, 실제 코팅층 두께가 형성된 것을 확인할 수 있다. 또한, 각각 층간의 계면에서 박리현상이나, 균열이 없는 양호한 미세구조를 보이고 있다.

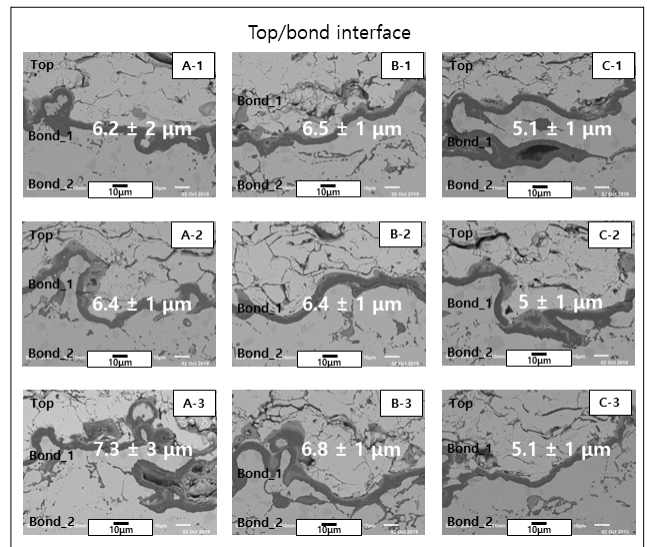


[그림 1] 열차폐 코팅층 두께에 따른 코팅 후 미세구조

발전용 가스터빈 고온부품의 일반적인 수명에 따라 [1], 1100℃에서 1143 회 전기 열피로 시험을 수행한 후 코팅층 분석 결과를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 확인할 수 있듯이, 전기 열피로 시험 후 top 층과 bond 층 계면에서 균열이나 코팅층의 박리현상이 없는 양호한 상태를 나타내었으며, 모든 시편에서 유사하게 bond 층의 산화, top 층의 치밀화 현상이 관찰되었다. 또한, 전기 열피로 시험 후 4 ~ 10 μm 두

께의 TGO 층이 생성되었으며, 형성된 bond coat의 두께가 두꺼울수록, TGO 층의 생성에 영향을 주는 원소의 양이 증가하여 TGO 층을 두껍게 형성하였고, top coat의 두께가 얇을수록 상대적으로 열차폐 효과가 감소하여 TGO 층의 두께는 두껍게 형성되었다. 하지만, top coat의 두께가 증가함에 따라 bond coat 두께 증가에 따른 TGO층 생성 효과는 감소하였다. A-3 시편에서 부분적으로 코팅층 박리에 영향을 주는 임계 두께인 10 μm 까지 성장하였으나, TGO 층 부위에서 균열은 관찰되지 않았다.



[그림 2] 열차폐 코팅층 두께에 따른 열피로 시험 후 미세구조

#### 4. 결론

본 연구에서는 고온에서 사용되는 가스터빈 부품을 보호하기 위한 열차폐 코팅층 두께를 달리하여 제조된 열차폐 코팅 시험편에 대해 열적 안전성과 손상 거동에 대한 코팅층 두께의 영향을 고찰하였다.

전기 열피로 시험 결과, 코팅층 두께와 관계없이 bond coat의 산화 및 top coat의 치밀화 현상이 관찰되었으나, 코팅층 두께에 따라 4 ~ 10 μm의 TGO 층이 관찰되었다. Top 층의 치밀화로 인한 균열의 성장이나, TGO로 인한 박리 영향은 관찰되지 않는 양호한 상태로 유지되었다. Bond coat의 두께가 두꺼울수록 top coat의 두께가 얇을수록 TGO층은 두껍게 형성되었으며, TGO층의 생성 거동은 top coat의 두께가 두꺼워짐에 따라 bond coat의 두께 영향은 감소하였다.

#### 참고문헌

- [1] 이승수, “경사화 두께를 갖는 열차폐 코팅의 열적 내구성 평가”, 산학기술학회논문지, 제 21권 8호, pp. 248-55, 8월, 2020년.