

# 가스터빈 블레이드 열차폐 코팅의 접착강도 평가

김대진\*·이동훈\*·김형익\*·김문영\*\*·양성호\*\*·박상열\*\*·구재민\*·석창성†

## Evaluation of a Bond Strength of Thermal Barrier Coating for Gas Turbine Blade

Dae-Jin Kim, Dong-Hoon Lee, Hyung-Ick Kim, Mun-Young Kim, Sung-Ho Yang, Sang-Yoel Park, Jae-Mean Koo, Chang-Sung Seok

**Key Words:** Thermal Barrier Coating(열차폐 코팅), Air Plasma Spray(대기중 플라즈마용사), High Velocity Oxy-Fuel(고속화염용사법), Low Vacuum Plasma Spray(진공 플라즈마용사), Bond Test(접착강도테스트)

### Abstract

In this study, bond strength tests were performed for the thermal barrier coating applied to the 1st stage turbine blade. After the tests, the specimens were cut and the locations of failure were observed by using optical microscope. The influence of heat treatment on bond strength of a bond coating and the difference among the three types of bond coatings are treated.

### 1. 서 론

가스터빈 블레이드를 고온화염으로부터 보호하고 부품의 표면온도를 낮추기 위해 모재 표면에 열차폐 코팅(TBC; Thermal Barrier Coating)을 적용하고 있다. 열차폐 코팅은 MCrAlY 재료를 이용한 금속의 접합코팅(본드코팅)과 YSZ(7~8% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>)재료를 이용한 최종코팅(탑코팅)으로 구성되며<sup>(1)</sup>, 본드 코팅은 고온에서 내산화성 및 부식성을 향상시키고, 탑 코팅의 접착력을 높여 주며 모재와 세라믹 탑 코팅 재료와의 열팽창계수 차이에 따른 열응력을 완화시켜주는 역할을 한다<sup>(2)</sup>. 접착강도 테스트는 용착금속과 모재 또는 용착금속간의 접착강도 특성을 평가하기 위해 수

행되는 일종의 인장시험으로서 접착강도는 코팅의 질을 판정하는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 현재 널리 적용되고 있는 APS(Air Plasma Spraying), HVOF(High Velocity Oxy-Fuel) 및 LVPS(Low Vacuum Plasma Spray)의 세 가지 본드 코팅 방식과 DVC(Dense Vertically Cracked)방식의 탑코팅 방식을 이용하여 코팅시험편을 제작하였고 접착강도 특성을 평가하였다.

### 2. 코팅 시험편 제작

#### 2.1 본드코팅

가스터빈 1단 블레이드 소재인 GTD-111DS 재질로 정밀 주조한 환봉형태의 모재를 직경 25.4mm, 두께 3mm의 코인(Coin)형태로 가공하였다. Table 1은 GTD-111DS의 화학적 성분<sup>(3)</sup>을 나타낸 것이다. 가공된 모재에 대하여 MCrAlY 분말을 사용하여 APS, HVOF 및 LVPS방식으로 본드 코팅을 실시하였다. 코팅 두께는 150~250 $\mu$ m이다. 표면 거칠기를 조성하여 본드코팅과 모재와의 기계적 결합력을 증가시키고자 모재 표면에 #24 메쉬(Mesh) 크기의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입

† 성균관대 기계공학부

E-mail : seok@skku.edu

TEL : 031)290-7446 FAX : 031)290-7482

\* 성균관대 기계공학부

\*\* 한진 KPS(주) GT 정비기술센터

자를 60psi의 압력으로 분사하여 그릿브라스팅(Grit Blasting) 처리하였다.

본드코팅의 접착강도에 미치는 열처리의 영향을 평가하기 위하여 HVOF와 LVPS에 대해서 본드코팅 후 열처리를 실시하였다. 1000°C 이상의 온도에서 2시간을 유지하였고 모재 및 본드코팅 층의 산화를 최소화하기 위해 진공분위기하에서 열처리를 실시하였다.

## 2.2 DVC 탑코팅

실제 가스터빈 블레이드와 같이 LVPS로 본드코팅한 후 DVC 탑코팅을 적용하였고, 탑코팅 하기 전에 열처리를 실시하였다. DVC 코팅용 분말은 7~8%  $Y_2O_3-ZrO_2$ 를 사용하였고 Sulzer Metco의 9M 로봇을 이용하여 코팅을 실시하였다.

## 3. 접착강도 테스트

### 3.1 시험편 제작

시험편은 세 가지 형태로 제작되었다. 접착제(Adhesive) 자체의 접착강도를 평가하기 위한 시험편을 Fig. 1(a)와 같이 제작하였다. 본드 코팅 및 탑 코팅된 코인시험편의 접착강도를 평가하기 위한 시험편을 각각 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)와 같이 제작하였다. 접착제를 바르기 전에 Fig. 1(d)에 나타난 지점에 대해서 브라스팅 처리하였다. 사용된 접착제는 3M사의 2214 Epoxy이며, 접착제를 바른 시험편을 가열로에 넣어 170°C에서 약 2시간 동안 유지시켜 접착제를 경화시켰다. Table 2 에 본드코팅 후 열처리 유무에 따른 시험편의 종류와 수량을 정리하여 나타내었다.

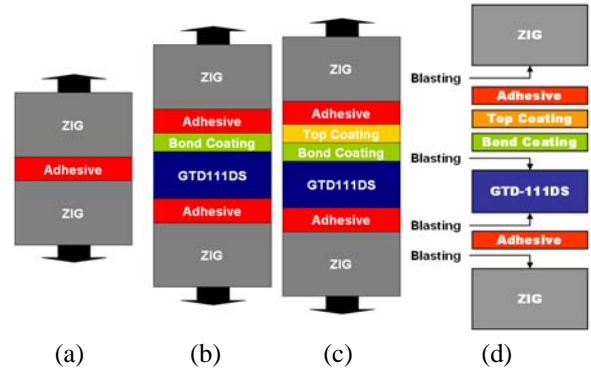
### 3.2 시험 장치 및 방법

**Table 1** Chemical composition of GTD-111DS (wt.%)

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Al
0.11	0.02	0.001	Bal.	14.26	1.36	4.77	2.33
Co	W	Ta	Zr	P	S	B	-
9.92	3.07	2.37	0.001	0.027	0.007	0.005	-

**Table 2** Test specimen preparation

Type in Fig. 1	Coating	H/T	EA
(a)	-	-	3
(b)	APS	N	3
	HVOF	N	3
	HVOF	Y	3
	LVPS	N	3
	LVPS	Y	3
(c)	LVPS/DVC	Y	3



**Fig. 1** Schematic illustrations of specimens for evaluating the bond strength and the locations where grit blasting is applied

Fig. 2에 시험장치(SHIMADZU AG-25TG) 및 지그에 시험편이 장착된 모습을 나타내었다. ASTM C633에 따라 변위제어를 이용하여 0.8mm/min의 속도로 시험하였다. 각각의 시험편 종류에 대해서 3회씩 실험하여 파단 하중 데이터를 획득하였다. 파단된 시험편을 Fig. 3에 나타난 것과 같이 절단하고 파면간 거리를 1mm 이내로 둔 채로 마운팅하였고, 전자현미경을 이용하여 파단위치를 확인하였다.

## 4. 시험 결과

### 4.1 접착제의 강도

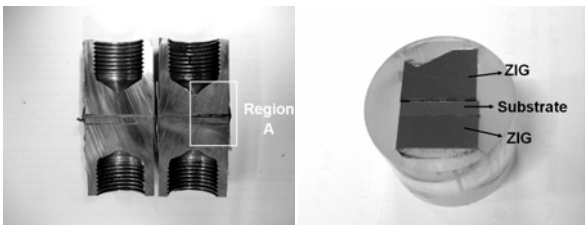
Fig. 4는 접착강도 테스트 결과 얻어진 접착제 자체의 하중-수명 선도를 나타낸 것이다. 하중-수명 선도에서의 최대하중을 시험편의 단면적으로 나누어 접착강도를 구하였으며, 접착제 자체의 3회 평균 접착강도는 9718psi로 얻어졌다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 전체 시험결과와 파단면의 모습을 나타낸 것이다. Table 3은 전체 시험편에 대한 강도 및 파단위치 결과를 종합하여 정리한 것이며, Fig. 7은 일부 시험편의 파단위치를 전자현미경으로 분석한 모습을 나타낸 것이다.

평균강도가 접착제의 평균강도 보다 높게 나타난 APS와 LVPS(H/T)의 경우 모두 접착제에서 파손이 발생하였다. 접착강도가 접착제의 평균강도 보다 낮은 경우 대부분 접착제에서 파손되었으나, HVOF①②③과 LVPS③의 경우 다른 부분에서 파손되었다. HVOF의 경우 접착제 강도에 비하여 강도가 가장 낮았고 ①②③ 모두 Fig. 7(e)에서와 같이 모재와 본드코팅 사이의 계면에서 파손되었다. LVPS③의 경우 Fig. 6과 Fig. 7(c)에



Fig. 2 Experimental setup for evaluating bond strength(SHIMADZU AG-25TG)



(a) Specimen cut (b) Mounted region A  
Fig. 3 Fracture Surface after bond test

서와 같이 접착제, 접착제와 본드코팅 계면, 본드코팅과 모재의 계면에서의 파괴가 복합적으로 나타났고, 대부분의 파단면은 모재와 본드코팅의 계면에서 발생하였다. APS와 DVC의 결과로부터 접착강도가 접착제의 강도 범위의 위·아래로 어느 정도 벗어나는 경우에도 접착제에서 파손이 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 산포의 원인으로는 접착제를 바르는 과정에서 시험편의 상부와 하부가 약간 기울어진 채로 시험되었을 가능성 및 접착제 내부의 기공 등을 유추해볼 수 있다.

#### 4.2 본드코팅 후 열처리의 영향

APS 방식은 실제 현장에서 적용 시 본드코팅 후 열처리를 실시하지 않으므로 HVOF와 LVPS 방식에 대해서만 열처리의 영향을 비교하였다. HVOF와 LVPS 두 경우 모두 열처리 후에 접착강도가 증가하였으며 특히 HVOF의 경우 열처리 전 모두 모재와 본드코팅과의 계면에서 파괴되었으나 열처리 한 후에는 접착제에서 파손됨으로써 강도가 큰 폭으로 향상되었다. 이것은 열처리 후 모재와 본드코팅의 계면에서 발생한 성분원소의 확산을 통해 계면에서의 결합력이 증가함에 따른 것으로 판단되며<sup>(4)</sup>이러한 원인에 대해서는 향후 성분분석에 의한 추가적 검증이 요구된다.

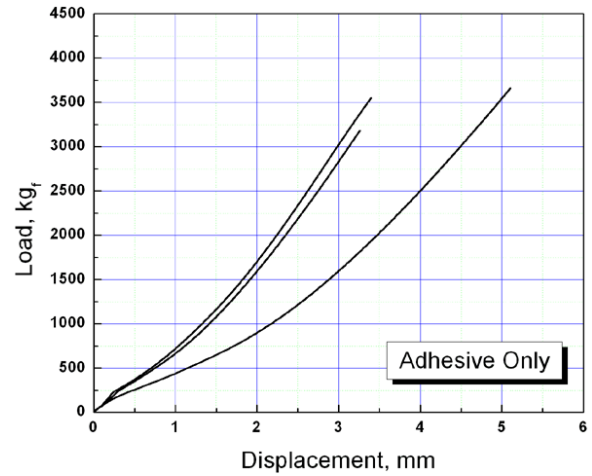


Fig. 4 Load displacement curves from bond test

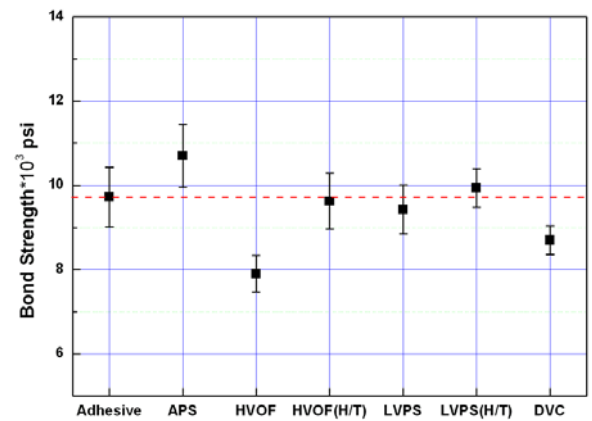


Fig. 5 Bond strength test results

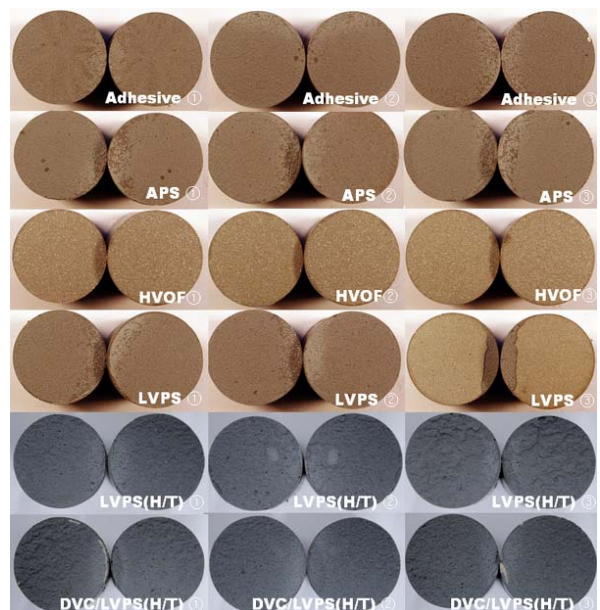


Fig. 6 Fracture Surface after bond test

**Table 3** Bond test results

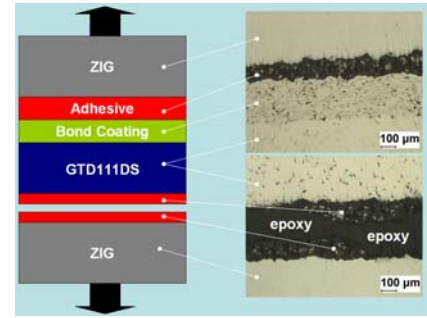
		Load (kgf)	Bond Strength (psi)	Location of Failure
Adhesive Only	1	3,659	10,271	A
	2	3,180	8,926	A
	3	3,550	9,965	A
	Avg.	3,462	9,718	
APS (No H/T)	1	4,114	11,548	A
	2	3,710	10,414	A
	3	3,612	10,139	A
	Avg.	3,812	10,700	
HVOF (No H/T)	1	2,985	8,379	B
	2	2,773	7,784	B
	3	2,685	7,537	B
	Avg.	2,814	7,899	
HVOF (H/T)	1	3379	9,485	A
	2	3224	9,050	A
	3	3379	10,347	A
	Avg.	3327	9,627	
LVPS (No H/T)	1	3,550	9,965	A
	2	3,385	9,502	A
	3	3,139	8,811	A+B+C
	Avg.	3,358	9,426	
LVPS (H/T)	1	3,593	10,084	A
	2	3,671	10,305	A
	3	3,358	9,424	A
	Avg.	3,540	9,938	
LVPS(Bond)/DVC(Top)	1	3,040	8,533	A
	2	3,237	9,088	A
	4	3,019	8,474	A
	Avg.	3,099	8,698	

※ Location of Failure

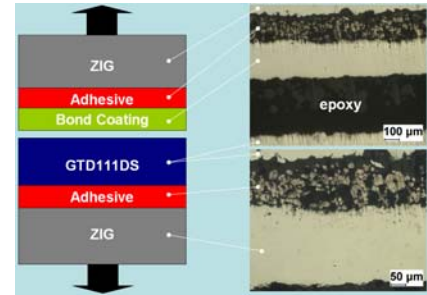
A : In the middle of adhesive

B : Interface between substrate and bond coat

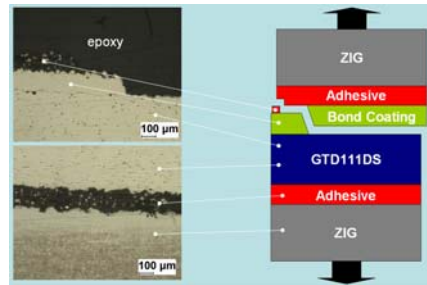
C : Interface between bond coat and adhesive



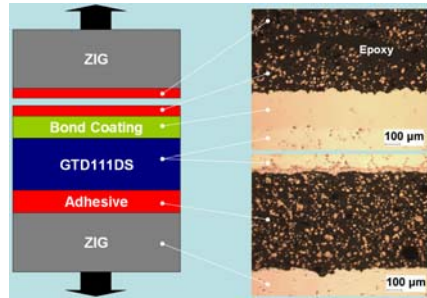
(a) APS③



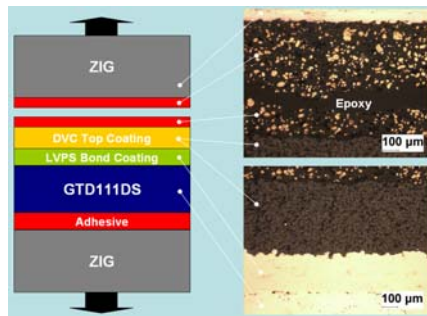
(b) HVOF③



(c) LVPS③



(d) LVPS(H/T)③



(e) LVPS(H/T)/DVC③

**Fig. 7** Schematic illustrates and micrographs showing the location of fracture

한편, APS 코팅방식은 코팅 분말 각각의 입자들이 적층으로 쌓여서 코팅 층을 이루고 있는 구조이므로 입자와 입자사이에 큰 기공이 형성되며<sup>(4)</sup> HVOF와 LVPS에 비해 코팅층 조직이 치밀하지 못하다. 그러나, APS 본드코팅의 경우 열처리를 하지 않았음에도 HVOF와 일부 LVPS가 모재와 본드코팅에서의 파손이 발생한 것과 달리, 모두 접착제 내부에서 파단 되었다.

이는 APS 코팅의 경우 플라즈마의 온도가 최대 14000K정도로<sup>(5)</sup> 매우 높은 온도에서 용사가 이루어짐에 따라, 열처리모재와 본드코팅의 계면에서 성분 확산이 발생함에 따른 것으로 짐작되어지며, 이에 대해서는 향후 열처리 전후에 대하여 모재와 본드코팅의 계면에서의 성분분석을 통한 체계적인 검증이 요구된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 본드코팅 및 탑코팅에 대한 접착강도 테스트를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. HVOF 본드코팅의 경우, 열처리를 하지 않았을 때는 모두 모재와 본드코팅 사이에서 파단되었으나, 열처리를 실시한 후에는 모두 접착제에서 파손되었다.

2. LVPS 본드코팅의 경우, 열처리를 하지 않았을 때는 모재와 본드코팅 사이의 계면에서 떨어질 수 있는 위험을 가지고 있었으나, 열처리를 실시한 후에는 모두 접착제에서 파손되었다.

3. APS 본드코팅의 경우 열처리를 하지 않았음에도 모재와 본드코팅 사이의 계면에서의 파괴는 발생하지 않았고, 모두 접착제 내부에서 파단 되었다. 가장 고온의 조건에서 용사됨으로 인해 열처리를 모재와 본드코팅의 계면에서 성분 확산이 발생함에 따른 것으로 판단되며 이에 대해서는 체계적인 분석이 요구된다.

4. LVPS 본드코팅 후 열처리를 실시한 후 DVC 방식으로 탑코팅한 경우, 접착제에서 파손이 발생할 때까지 모재와 본드코팅 및 본드코팅과 탑코팅 사이의 계면은 건전하였다. 향후 동일

한 경우에 대하여 1000℃ 이상의 고온조건에서 일정시간 열화 시킨 시험편에 대해서도 접착강도 테스트를 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 논문은 BK21 사업과 산업자원부의 전력산업연구개발사업의 지원을 받아 이루어 졌습니다.

#### 참고문헌

- (1) U.H.Kim, J.S.Jung, W.S.Sik, 1997, "The effects of NiCoCrAlY bond coating methods on high temperature properties of thermal barrier coatings ", *Journal of KWS*, Vol. 2, pp. 125-127.
- (2) H.K.Lee, D.H.Kim, S.H.Hwang, K.N.Chun, D.S. Suhr, 1989, "Plasma Spray Coating of Zirconia Ceramic", *Journal of KWS*, Vol. 7, No. 2, pp. 25-34.
- (3) H.S.Park, H.I.Km, Y.M.Lee, C.S.Seok, M.Y.Kim, 2005, "Evaluation of High Temperature Tensile Properties in GTD-111DS", *Proceedings of Korean Society of Precision Engineering*, p. 195.
- (4) Eui-Gil Lee, Han-Sam Kim and Christopher C. Berndt, 2000, "A Study on the Bond Strength of Plasma Sprayed WC-12% Co Coating", *Journal of KWS*, Vol. 18, No. 5, pp. 112-116.
- (5) Lech Pawlowski, 1995, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, p. 33.