

가스터빈 1단 블레이드의 코팅층 특성평가

김대진¹, 장중철², 이성호², 원종범², 김문영³, *석창성⁴

¹성균관대 기계공학부 대학원, ²한전 전력연구원, ³한전기공 G/T 정비기술센터, ⁴성균관대 기계공학부

Characteristics Evaluation of Coatings on the 1st Bucket for Gas Turbine

D. J. Kim¹, J. C. Jang², S. H. Lee², J. B. Won², M. Y. Kim³, *C. S. Seok⁴,

¹Dept. of Mech. Eng., Graduate School, Sungkyunkwan Univ., ²KEPRI, ³KPS, ⁴Dept. of Mech. Eng., Sungkyunkwan Univ.

Key words : MCrAlY, TBC(Thermal Barrier Coating), HVOF(High Velocity Oxy-Fuel), DVC(Dense Vetically Cracked)

1. 서론

1단 블레이드는 가스터빈 부품 중에서 가장 극심한 열응력과 고온피로를 받는 부품으로서^[1] 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 세라믹(7~8% Y₂O₃-ZrO₂) 재료를 이용한 최종코팅(탑코팅)등 2개 층 이상으로 구성되어 있으며^[2] 이러한 TBC System의 내구성은 모재, 본드코팅 및 탑코팅 3개 층 간의 결합과 상호작용에 의존하게 된다.^[3] 본 연구에서는 본드 및 탑 코팅층 자체에 대한 기본적인 특성을 평가하기 위하여, 신재 및 E.O.H=6175Hrs의 사용이력을 갖는 사용재 블레이드의 코팅층에 대하여 마이크로 비커스 경도 시험, SEM-EDX 분석 및 나노 압입 시험을 수행하였고, 블레이드의 사용재와 신재의 특성을 서로 비교함으로써 사용이력에 따른 특성변화를 관찰하고자 하였다.

2. 재료 및 시험편

대상 블레이드는 GE사의 1350℃급 MS7001FA+e 모델로서, GTD-111DS를 모재로 하며 본드코팅은 HVOF(High Velocity Oxy-Fuel)방식으로, 세라믹 탑코팅은 DVC(Dense Vetically Cracked) 방식으로 이루어져 있다. 사용재의 경우 블레이드 팁으로부터 약 20mm 떨어진 지점(약 20% Span)의 단면에 대하여 SEM-EDX 분석이 용이하도록 3조각으로 절단하였고, 신재의 경우 Trailing Edge 부분 중 일부를 절단하여 Fig. 1과 같이 시험편을 준비하였다.

3. 마이크로 비커스 경도시험

3.1 시험장치 및 방법

경도시험에 사용된 마이크로 비커스 시험기는 Akashi사의 MVK-H2 시험기이며, 사용재와 신재 블레이드의 본드 및 탑코팅 층에 대하여 250 μm 간격으로 10회씩 압입하였다. 각각의 경우에 대하여 시험하중은 500gf를 적용하였다.

3.2 시험결과

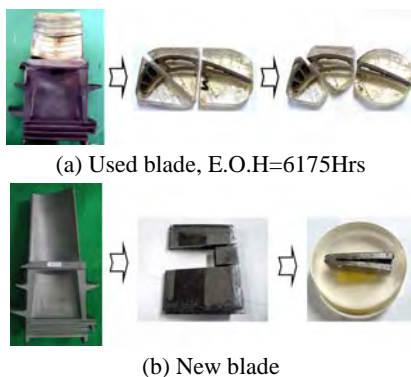


Fig. 1 Specimen making process

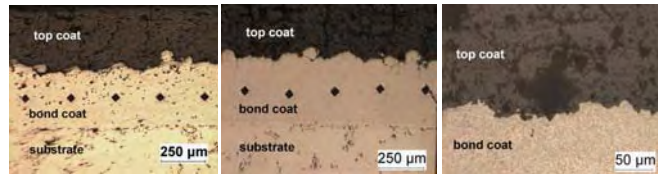


Fig. 2 Micrographs showing the impressions on the coatings

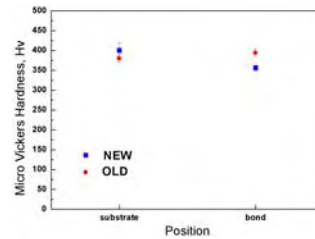


Fig. 3 Micro vickers hardness test results

Fig. 2의 (a)와 (b)에 본드 코팅 층에 나타난 연속적인 압흔의 모습을 나타내었다. 탑 코팅은 Fig. 2의 (c)에서 보는 바와 같이 압흔 형상이 뚜렷하지 못하여 경도를 산출할 수 없었다. Fig. 3은 압입시험 결과를 나타낸 것이다. 경도의 평균치는 모재의 경우 신재가 400HV로 사용재의 380HV보다 높고, 본드 코팅의 경우 사용재가 394HV로 신재의 357HV보다 상대적으로 높게 나타났다.

4. EDX 분석

4.1 성분 분석 위치

Fig. 4는 사용재 및 신재 블레이드 단면에 대한 성분분석 위치를 보여주고 있다. 사용재의 경우 리딩에지 부분과, concave 및 convex 면에서 각각 9 지점씩 총 19 지점에 대하여 본드코팅, 탑코팅 및 TGO의 성분을 SEM-EDX 장비(SEM:HITACHI S-2460N, EDX:FISONS SIGMA MS2)를 이용하여 분석하였다.

4.2 분석 결과

Fig. 5의 (a)와 (b)는 각각 본드코팅과 탑코팅의 위치에 따른 성분분석 결과로서, 사용재에서 위치에 따른 본드 코팅과 탑 코팅층의 성분 함량의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 6은 신재의 concave와 convex의 각각 한 지점에 대해서 성분 분석한 결과를 사용재 19지점의 전체 평균값과 비교한 것인데, 그래프로부터 사용재와 신재의 성분차이가 거의 없음을 알 수 있다.

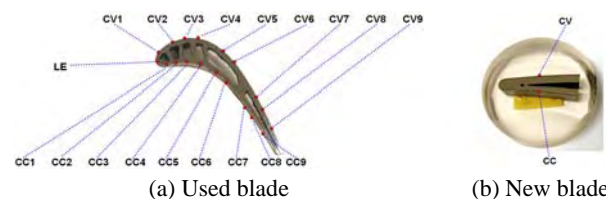
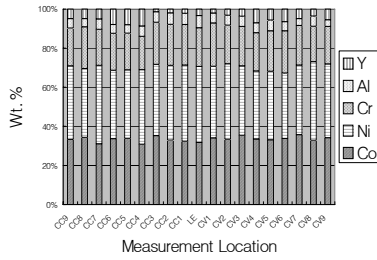
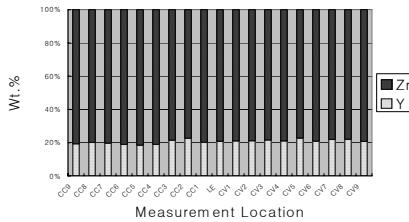


Fig. 4 EDX analysis locations on the cross section of a blade

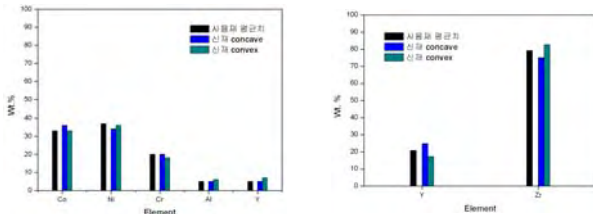


(a) Bond



(b) Top

Fig. 5 EDX results showing the compositions of coatings, used blade



(a) Bond

(b) Top

Fig. 6 Comparison of the compositions of coatings

5. 나노압입시험

5.1 시험 방법

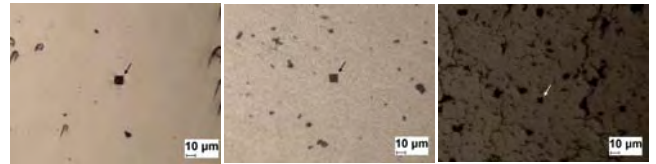
사용된 시험편은 Fig. 1에 나타난 것과 동일하며 압입자는 B1749 vickers tip을 사용하였고, 변위제어를 이용하여 2000nm까지 압입하였다. 한 지점에 대한 탄성계수 및 경도값은 주변의 9지점에 대한 결과의 평균을 취하여 구하였고 약 100µm 정도의 압입간격을 두고 연속적으로 압입하였다.

5.2 시험 결과

Figs. 7의 (a), (b), (c)는 순서대로 모재, 본드코팅, 탑코팅의 압흔을 보여주고 있다. 모재와 본드코팅의 압흔 크기에 비해 탑코팅의 압흔 크기가 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 마이크로 비커스 경도시험에서는 탑코팅의 압흔 형태가 불명확하여 탑코팅의 경도를 구할 수 없었지만, 나노압입시험을 통해서도 압흔 크기가 상대적으로 매우 작았다. Fig. 8은 압입시험을 통해 얻어진 압입하중 선도를 나타낸 것이다. 사용재와 신재 모두 모재와 본드코팅의 압입 곡선이 서로 유사하였고, 또한 모재와 본드코팅 각각에 대한 9개의 시험 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 탑코팅은 이에 반해 9개 압입곡선의 산포가 매우 크고 2000nm까지 압입하는데 요구되는 하중의 크기가 모재와 본드코팅에 비해 매우 큰 것으로 나타났다. Table 1은 나노 압입 시험 결과로서 코팅 층 각 부위의 탄성계수 및 경도값에 대한 평균값 및 표준편차를 나타낸 것이며, Fig. 9는 Table 1의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 산포를 고려하면 모재, 본드코팅 및 탑코팅의 탄성계수와 경도에 있어서 사용재와 신재의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이로써 6175시간의 사용이력을 갖는 블레이드에 대하여 코팅층의 경도 및 탄성계수는 블레이드의 열화와 관계가 없음을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 신재 및 6175시간 사용재 블레이드 코팅층에

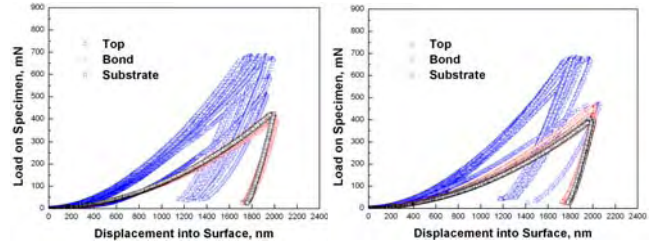


(a) Substrate

(b) Bond

(c) Top

Fig. 7 A Micrograph showing the impression on the new blade



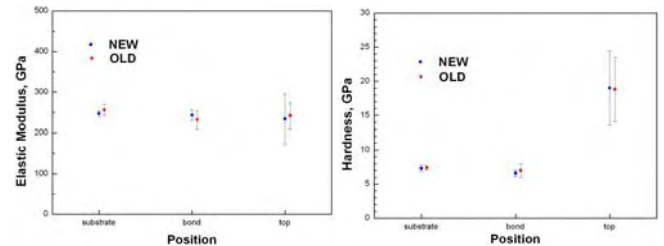
(a) New blade

(b) Old blade

Fig. 8 Load-depth curves from nano indentation tests

Table 1 Results from nano indentation tests

		Elastic Modulus (GPa)		Hardness (GPa)	
		Mean	Std. Dev.	Mean	Std. Dev.
Substrate	NEW	247	7	7.3	0.5
	OLD	256	13	7.4	0.3
Bond	NEW	243	13	6.6	0.5
	OLD	232	23	7.0	1.0
Top	NEW	234	62	19.0	5.4
	OLD	242	32	18.8	4.7



(a) Elastic Modulus

(b) Hardness

Fig. 9 Comparisons between elastic modulus and hardness

대한 성분분석 및 물성평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 신재와 사용재의 코팅층 성분분석 결과, 열화에 따른 성분의 뚜렷한 변화는 나타나지 않았다.
2. DVC-TBC 탑코팅의 경우 기공이 심하여 마이크로 압입시험으로 경도를 평가하기 어렵다.
3. 나노압입시험 결과, 사용재와 신재의 경도 및 탄성계수가 거의 유사함을 확인하였다.

후기

본 논문은 BK21 사업과 산업자원의 전력산업연구개발사업의 지원을 받아 이루어 졌습니다.

참고문헌

1. 강신호, 정길진, 김대은, "7FA/FA+급 1단 버켓 위한 신성비기법 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 2205-2210, 2003.
2. 김의현, 정진성, 박원식, "열차폐 코팅특성에 대한 NiCoCrAlY 접합코팅방법의 영향", 대한용접학회 특별강연 및 학술대회 발표 개요집, 2, 125-127, 1997.
3. Manish Madhwal, Eric H.Jordan, Maurice Gell, "Failure mechanisms of dense vertically-cracked thermal barrier coatings", Materials Science & Engineering A, 384, 151-161, 2004.