

# 가스터빈 블레이드에 적용되는 DVC-TBC에 대한 균열 영향 평가

## Estimation of the effect of Crack on DVC-TBC applied Gas Turbine Blade

\*이동근<sup>1</sup>, 신인환<sup>1</sup>, 석창성<sup>2</sup>, 구재민<sup>2</sup>, 이택운<sup>3</sup>, 김범수<sup>4</sup>

\*D. K. Lee<sup>1</sup>, I. H. Shin<sup>1</sup>, #C. S. Seok(Seok@skku.edu)<sup>2</sup>, J.M.Koo<sup>2</sup>, T. W. Lee<sup>3</sup>, B. S. Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup>성균관대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>성균관대학교 기계공학부, <sup>3</sup>한전 KPS, <sup>4</sup> 전력연구원 발전 연구소

Key words : Turbine, Thermal, Coating, Crack, DVC, TBC, Stress

### 1. 서론

가스터빈 열차폐 코팅은 가스터빈 핵심 부품을 고온 화염으로부터 보호하고 부품의 표면온도를 낮추기 위해 적용되는데, MCrAlY 재료를 이용한 금속의 접합코팅(본드코팅)과 세라믹 재료를 이용한 최종코팅(탑코팅)으로 구성된다. 블레이드의 온도 감소는 세라믹 탑코팅 층에서 크게 발생하지만, 모재 위에 세라믹 코팅을 바로 적용하게 되면 접착강도가 낮아서 쉽게 떨어질 수 있으므로 본드코팅을 적용하게 된다. 열차폐 코팅에 적용되는 탑코팅 방식 중 하나인 Dense Vertically Cracked 코팅의 경우 인위적으로 코팅층 내부에 수직방향 균열을 삽입하여 열팽창 및 수축에 대한 저항을 감소시켜 코팅의 수명을 증가시키게 된다. [1]본 연구에서는 가스터빈 1단 블레이드에 적용되는 DVC 방식의 탑코팅에 삽입된 균열의 밀도에 따른 코팅층의 응력 분포를 살펴보고, 코팅 박리에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 계면에 대한 수직방향 응력 요소[1,2]에 대하여 균열 밀도별 최대응력 크기를 획득하였다. 이를 이용하여 균열에 따른 계면 수직 방향 응력 변화를 분석하고, 최적의 균열 밀도를 도출하였다. 또한, DVC-TBC에 삽입된 균열의 밀도별 열피로 시험 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다.

### 2. 해석모델 및 경계조건

해석 모델은 블레이드 일부를 모사한 석창성 등에 의하여 기 수행된 모델을 이용하였다.[1] DVC 코팅의 경우 약 0.1~1.3mm 당 한 개의 균열(균열밀도 20~200개/in)이 존재하게 되며,[1,3] 따라서 본 연구에서는 0.1~1mm 사이의 균열간격 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.8, 0.9, 1 mm 총 10case

에 대하여 열전달 및 열응력 해석을 수행하였다. Fig. 1 은 해석에 사용된 모델 및 경계조건을 나타낸다. 탑코팅 상단과 하단의 온도는 EPRI의 자료를 참고하여 각 1260°C, 285°C를 적용하였으며, 대류 열전달 계수(h)는 석창성 등에 의하여 기 수행된 해석조건과 달리 실험을 통해 구한 값인 1450W/m<sup>2</sup>°C, 2000W/m<sup>2</sup>°C 를 적용하였다. 또한, 양단 구속 조건을 x축 방향으로 무한반복 되도록 주기적으로 배열되는 단위셀 조건[5]을 적용하였다.

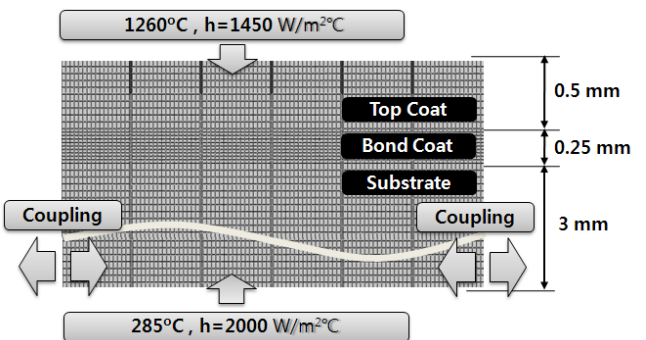


Fig. 1 2D modeling of blade applied DVC coating

해석에는 상용화된 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 열전달 해석에는 DC2D4 type, 열응력 해석에는 CPS4R type 의 요소를 사용하였다. Table. 1 [1]은 해석에 적용된 물성값으로서 탑코팅, 본드코팅, 모재에 따라 각각 다른 물성값을 적용하였다.

Table 1 properties of coating materials [1]

	Substrate	Bond Coat	Top Coat
Elastic Modulus[GPa]	225	225	53
Poisson's Ratio	0.27	0.27	0.25
Density[kg/m <sup>3</sup> ]	7,860	7,700	6,037
Specific Heat[J/kg °C]	456	501	500

### 3. 해석 결과 및 고찰

구축된 모델을 이용하여 균열 간격별 10case에 대한 2차원 열전달 해석 및 열응력 해석을 수행하였으며, 각 case에서 직접적으로 박리가 진행되는 탑코팅-본드코팅 계면에서의 수직방향 최대 응력 변화를 살펴보았다. Fig. 2는 계면에서의 수직 방향 최대 인장 및 압축응력을 나타낸 것이다. x축은 균열과 균열 사이의 간격을 나타내며, y축은 최대 응력을 나타낸다.

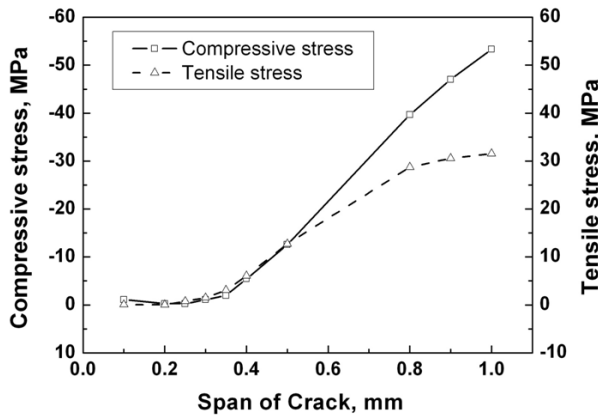


Fig. 2 Max stress of interface of top-bond coat

Fig. 2와 같이 탑코팅-본드코팅 계면에서의 수직 방향 최대응력은 균열 간격이 좁아질수록 감소하며 균열 간격 0.2~0.3mm 사이에서 수렴하는 것을 알 수 있다. 이를 균열 밀도로 환산하면 50~75개/in가 된다. 이 해석결과로부터 박리에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 계면에서의 수직방향 응력이 감소함으로써 파손 수명의 증가를 가져올 것이라 예측 할 수 있다.

Tomas A. Taylor 등은 다양한 조건에 따른 DVC 코팅 특성을 평가하기 위하여 코인 시편을 이용하여 열피로 시험을 수행하였다.[3] Table. 2는 실험 결과중 하나를 보여준다..

Table 2 Thermal fatigue test result [3]

Vertical cracks per inch	0	77.6	86.4
Test result (Edge cracks after 2000 cycles)	100*	32	0

\*Failed early, after 900 cycles

이것은 열피로 시험을 2000cycle 진행한 후 시편에 Edge crack이 발생하는 정도를 분석한 결과인데, 시편에 Edge crack이 많이 발생할수록 파손이 빠르게 일어난다고 알려져 있다.[3] 그들의 연구에 따르면 균열 밀도가 커질수록 시편의 열피로 수명이

증가하고 있다. 즉 균열과 균열 사이의 간격이 좁아질수록 시편의 열피로수명이 증가하는데, 이는 유한요소 해석에서 도출된 결론과 유사한 결과이다.

따라서 DVC코팅에 균열을 삽입하는 것은 열팽창 및 수축시 코팅층에 발생하는 응력을 완화시켜 코팅 수명을 증대시키는 효과가 있으며, 균열 밀도가 높은 시편일수록 열피로 수명이 길어지고 있으나, 균열 간격의 감소에 따라 최대수직응력이 수렴하고 있기 때문에 수직균열의 간격을 0.2~0.3mm 사이로 하는 것이 타당하다.

### 4. 결론

- 1) 해석 결과와 같이 DVC코팅에 삽입된 수직 균열의 밀도가 커질수록 계면에 작용하는 수직방향의 최대응력이 감소하는 것을 알 수 있다.
- 2) 균열 간격 0.2~0.3mm 사이에서는 응력 감소가 거의 없이 수렴하는 것을 알 수 있다.
- 3) 균열 밀도가 높은 시편일수록 열피로 수명이 길어지고 있으나, 균열 간격의 감소에 따라 최대 수직응력이 수렴하고 있기 때문에 수직균열의 간격을 0.2~0.3mm 사이로 하는 것이 타당하다.

### 후기

본 연구는 2단계 두뇌한국 BK21사업과 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제임.(2008T100100272)

### 참고문헌

1. 이동근, 신인환, 김일환, 석창성, 구재민, "유한요소 해석을 이용한 가스터빈 블레이드용 DVC-Type 열차폐 코팅 균열 영향 평가"
2. A.M. Freborg, B.L. Ferguson, W.J. Brindley, G.J. Petrus, "Modeling oxidation induced stresses in thermal barrier coatings", *Materials Science and Engineering*, **A245**, 182-190, 1998.
3. U.S. Patent, US 5073433, "Thermal Barrier Coating For Substrates and Process for Producing It", 1991.
4. 김대진, 2009, "가스터빈 블레이드용 플라즈마용사 열차폐 코팅의 박리수명 평가에 관한 연구", 성균관대학교 박사학위 논문.
5. A. A. Spector, M. Ameen, and A. S. Popel, "Simulation of Moter-Driven Cochlear Outer Hair Cell Electromotility," *Biophysical Journal*, **Vol. 81**, 11-24, 2001.