

◆ 특집 ◆ 최신 정밀 설계재료 기술 III

## 가스터빈의 열차폐용 탑코팅의 내구성 향상 설계기술

### Design Technique for Improving the Durability of Top Coating for Thermal Barrier of Gas Turbine

구재민<sup>1</sup>, 석창성<sup>1,✉</sup>  
Jae-Mean Koo<sup>1</sup> and Chang-Sung Seok<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)  
✉ Corresponding author: seok@skku.edu, Tel: +82-31-290-7446

Manuscript received: 2013.9.9 / Revised: 2013.11.23 / Accepted: 2013.12.2

Thermal barrier coating (TBC) is used to protect the substrate and extend the operating life of the gas turbine for a power plant and an aircraft. The major cause of failure of such a coating is the spallation of coating, and it results from the thermal stress between top coating and bond coating. To improve the durability of TBC system, the dense vertical cracked (DVC) coating method to insert vertical cracks is applied to a gas turbine blade. In this study, a criterion for the design of vertical crack in the DVC coating was presented using the finite element analysis.

Key Words: Thermal Barrier Coating (열차폐코팅), Finite Element Analysis (유한요소해석), Thermal Stress (열응력), Vertical crack (수직균열)

#### 기호설명

$\sigma_{xx}$  = stress parallel to interface (MPa)

#### 1. 서론

가스터빈 블레이드와 같이 고온의 환경에 노출되는 부품들은 고온에 의한 열화에 의하여 수명이 짧다. 따라서 적정 수명을 확보하기 위한 기법들이 개발되어 있는데, 그 중 하나가 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)이다. 이와 같은 열차폐 코팅은 고온과 고압의 화염으로 인한 모재의 온도변화를 억제하는 역할을 하는데, 열차폐코팅은 금속을 사용한 본드 코팅층과 세라믹을 사용한 탑코팅층으로 나뉜다. 열차폐 코팅의 목적인 온도 상승 억제는 대부분 탑코팅에서 이뤄지지만 금속

인 모재와 세라믹인 탑코팅 사이의 열팽창계수의 차이와 접착강도와 같은 문제로 금속재료를 사용한 본드 코팅층을 탑코팅층과 모재의 사이에 둔다.<sup>1</sup> 기존의 연구에 따르면 TBC에서의 본드 코팅이 금속인 모재와 세라믹인 탑코팅간의 열팽창계수의 차이로 야기되는 열응력의 크기를 줄여주는 것은 하지만 세라믹인 탑코팅과 금속인 본드 코팅 사이의 박리 문제는 여전히 남아있다.<sup>2</sup> 뿐만 아니라 1단 가스터빈 블레이드 표면의 온도는 초기의 820°C 정도였으나 현재는 1,370°C까지 증가했으며 군사용 제트엔진(Scencma M88)의 경우는 1,590°C에 이른다. 이런 제반 상황 하에서 기존의 열차폐 코팅으로는 한계가 있기에 내구성이 향상된 코팅이 필요하게 되었다. DVC (Dense Vertically Cracked) 코팅은 열차폐 코팅의 한 방법으로서 세라믹 탑코팅 부 내에 세로방향의 균열을 20~300개/inch의 간격

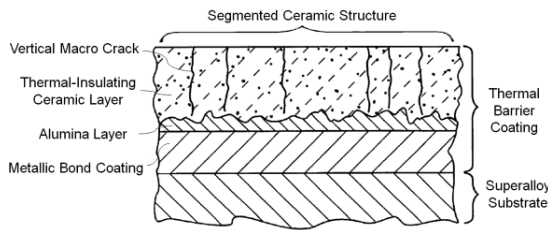


Fig. 1 Cross-sectional view of a gas turbine blade using DVC technique<sup>5</sup>

밀도로<sup>3</sup> 인위적으로 균열을 삽입하는 방법이다. 이 균열은 온도변화에 따른 팽창 및 수축을 완화시켜, 반복되는 열피로 시 팽창 및 수축으로 인해 발생하는 열응력을 감소시킴으로써 코팅의 내구성을 향상시키는 역할을 한다.<sup>4</sup>

DVC 코팅은 Fig. 1과 같이, 금속 재질의 모재와 본드 코팅, 사용 중 열화에 의하여 발생하는 내산화성의  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  형태의 산화물(Thermally Grown Oxide, TGO) 및 세라믹 재질인 안정화 지르코니아(Yttria Stabilized Zirconia, YSZ)의 탑코팅의 4개 층으로 구성되어 있는 TBC 시스템의 세라믹 코팅 층 내에 세로방향의 균열이 삽입된 것이다.

본 연구에서는 인위적으로 삽입한 수직방향의 균열이 TBC시스템에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수직방향의 균열의 길이와 간격이 열응력에 미치는 영향을 평가함으로써 열차폐용 코팅의 내구성향상을 위한 설계기준을 제시하고자 하였다.

## 2. 유한요소 해석모델 및 조건

본 연구에서는 상용화된 유한요소 프로그램인 ABAQUS 10.1을 사용하였으며, 열전달 해석에는 DC2D4 type, 열응력 해석에는 CPS4R type의 요소를 사용하였다.

열차폐 코팅에서 탑코팅 내부에 삽입된 수직균열의 길이와 균열간의 간격이 코팅 내부에 발생하는 열응력에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 모델링하였다. 모재와 본드 코팅, 탑코팅을 각각 Inconel 738, NiCrAlly, 8% YSZ로 하였으며 모재의 두께는 3mm, 탑코팅의 두께는 0.5mm, 본드 코팅의 두께는 0.25mm로 설정했다. 그리고 반복조건을 주기 위하여 주기적으로 배열되는 단위 셀 조건을 적용하여<sup>6</sup> 열응력이 발생한 뒤에도 좌측 모서리가 직선상태를 유지하도록 하였으며, 우측은 균열비( $=a/t$ ), 즉, 탑코팅층에 삽입된 균열의

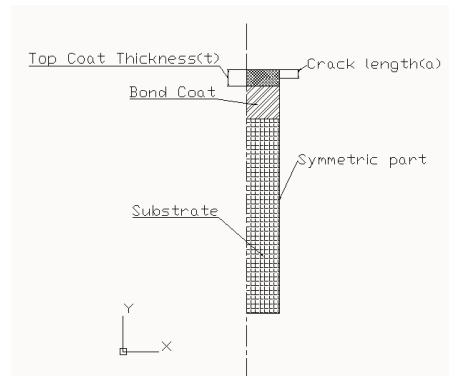


Fig. 2 Model for DVC coating analysis

Table 1 Material Properties of TBC System

|  | Top Coating (8 wt% YSZ) | Bond Coating (Nicaly) | Substrate (IN738) |
|--|-------------------------|-----------------------|-------------------|
| Young's Modulus (GPa)                                | 53                      | 156                   | 225               |
| Poisson's Ratio                                      | 0.25                    | 0.27                  | 0.27              |
| Density (kg/m <sup>3</sup> )                         | 6037                    | 7711                  | 7890              |
| Specific Heat (J/kg °C)                              | 500                     | 628                   | 456               |
| Thermal Expansion Coefficient (10 <sup>-6</sup> /°C) | 7.6~12.7                | 12~19.3               | 11.6~15.9         |
| Thermal Conductivity (W/mK)                          | 1~2.3                   | 11.6~25               | 11.8~25.4         |

길이(a)와 탑코팅두께(t)의 비가10~90%가 되도록 균열을 삽입한 후 균열 외의 부분은 대칭조건을 주었다.

또한 DVC 코팅은 약 0.1~1.3mm 당 한 개의 균열이 존재한다고 알려져 있기 때문에(균열밀도 20~200개/inch)<sup>7</sup> 1/2모델의 폭을 0.1mm~0.8mm 로 변화시키면서 균열간격이 0.2mm~1.6mm되게 모델을 구성하여 열전달해석을 수행한 후 열응력해석을 수행하였다. 온도조건<sup>8</sup>은 탑코팅 표면은 1100°C, 모재의 하단은 110°C로 부여하였으며, 재질의 물성치는 Table 1과 같이<sup>9-11</sup> 부여하였다.

## 3. 수직균열길이의 영향

Fig. 3은 균열사이의 간격이 1mm인 경우로서 균열이 없는 경우와 50%의 균열비를 갖는 경우에 계면에 평행인 방향(x방향)의 응력( $\sigma_{xx}$ )에 대한 해석결과를 나타낸 것이다. 균열이 없는 경우는 왼쪽에 무한반복조건을 주기 위하여 좌측 모서리의

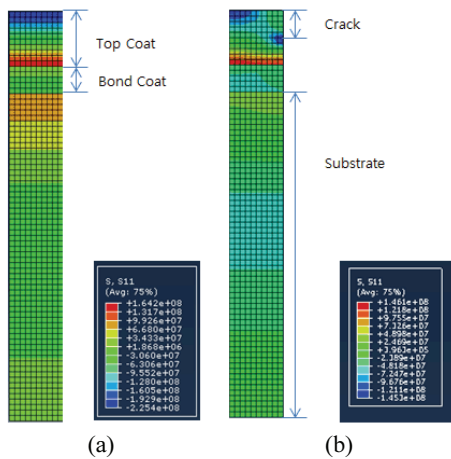


Fig. 3 Stress distribution ( $\sigma_{xx}$ ) of the direction parallel to the interface in the case of (a) no crack and (b) crack length ratio of 50%

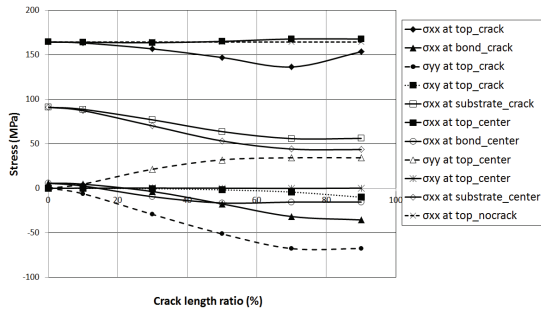


Fig. 4 Stress changes due to changes of crack length ratio (crack span=1mm)

직선성을 유지시켰으며, 오른쪽은 대칭조건을 주었다. 또한, 50%의 균열비의 경우에는 균열을 제외한 부분에 대칭조건을 부여하였다. 균열이 없는 경우는 계면에 따라서 일정한 응력이 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 50%의 균열비의 경우에는 균열끝에 압축응력이 발생하고 있으며, 전해석모델에서 균열이 없는 좌측 모서리, 즉, 반복되는 균열의 사이의 중심부의 탑코팅쪽 계면(top\_center)에서 큰 응력이 발생한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 균열사이의 간격이 1mm이고, 균열길이가 10%, 30%, 50%, 70%, 90%인 경우에 응력을 비교한 그림이다. 우측 모서리(즉, 균열아래)를 따라 탑코팅 계면에서 각 방향의 응력 (top\_crack), 본드코팅 층에서 탑코팅과 만나는 계면의 응력 (bond\_crack), 본드코팅과 기저가 만나는 계면에서

기저의 응력(substrate\_crack)과 비교하였다. 또한, 좌측 모서리(즉, 균열 사이의 중심부)를 따라 탑코팅층의 계면에서의 각 방향의 응력(top\_center), 본드코팅 층에서 탑코팅과 만나는 계면에서의 응력 (bond\_center), 본드코팅과 기저가 만나는 계면에서 기저의 응력 (substrate\_center)를 비교한 것이다.

전체적인 응력의 크기를 비교할 때, 탑코팅의 계면에서 x방향 응력( $\sigma_{xx}$ )의 크기가 다른 응력에 비하여 큰 것을 알 수 있는데, 특히 균열아래의 x방향 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_crack)보다는 균열로부터 가장 먼 위치인 중심부에서의 x방향 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_center)이 보다 큰 것을 알 수 있다. 일반적으로 TBC 시스템에서 박리의 주요원인중의 하나는 탑코팅계면에서 x방향의 열팽창계수불일치 응력이라고 알려져 있다.<sup>12</sup> 따라서 박리는 균열사이 중심부의 탑코팅계면(top\_center)에서 발생할 가능성이 높다.

현재의 균열간격이 1mm인 경우, 탑코팅 계면 중심부의 x방향 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_center)이 균열비가 증가함에 따라 계속 증가할 뿐 만 아니라, 균열비가 60%이상의 경우에는 균열이 없는 경우( $\sigma_{xx}$  at top\_nocrack)에 비하여 응력값이 크게 나타나고 있는데 비하여, 균열아래 탑코팅 계면의 x방향 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_crack)이 균열 길이가 70%일 때까지는 균열길이의 증가에 따라 계속 감소하다가 다시 증가하는데, 전체적으로 균열이 없는 경우( $\sigma_{xx}$  at top\_nocrack)에 비하여 작음을 알 수 있다.

따라서 균열간격이 1mm인 경우, 탑코팅계면에서 X방향응력이 다른 응력에 비하여 클 뿐만 아니라 삽입된 수직 균열의 길이가 변화함에 따라 응력이 변화하기 때문에 균열간격을 변화시키면서 탑코팅계면에서의 x방향의 응력의 변화를 검토할 필요가 있다.

#### 4. 균열간격의 영향

Figs. 5와 6은 균열길이가 70%인 경우인데, Fig. 5에서 균열이 없는 경우 모델의 폭의 변화에 관계없이 탑코팅 계면의 x방향 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_nocrack)이 일정함을 알 수 있다. 또한 균열의 존재여부와 균열간격의 변화에 관계없이 탑코팅 계면의 x방향 응력이 다른 응력에 비하여 큼을 알 수 있다. 또한 균열간격이 0.4mm까지는 균열아래 탑코팅 계면에서 x 방향 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_crack)이 증가하였다가 감소하고 있다. 또한 이 구간에서 중심부의 x방향 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_center)이 감소하였다

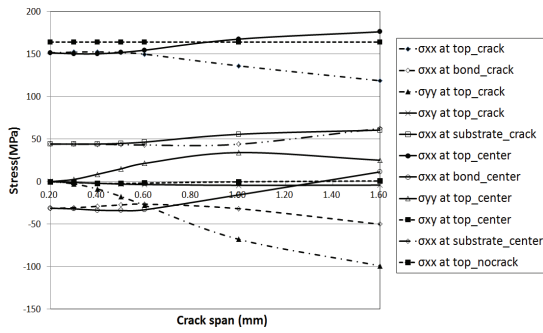


Fig. 5 Stress changes due to changes of crack span (crack length ratio=70%)

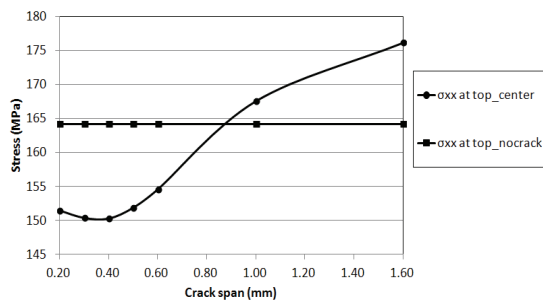


Fig. 6 Stress changes due to changes of crack span in the center of top (crack length ratio=70%)

가 증가하는데, 균열 간격이 약 0.9mm 이상에서는 균열이 없는 경우보다 오히려 크게 나타나고 있다.

Fig. 6은 탑코팅계면에서 균열이 없는 경우( $\sigma_{xx}$  at top\_nocrack)와 중심부의 x방향 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_center)을 확대하여 비교한 것으로 균열 간격이 약 0.9mm 이하의 경우 균열이 없는 경우에 비하여 응력이 감소하기 때문에 탑코팅 두께에 대하여 70%의 균열을 삽입하는 경우 TBC 시스템의 내구성 이 향상될 것으로 예측된다.

Fig. 6에서 특히 균열간격이 0.2mm~0.5mm인 경우에 응력이 최소값을 갖는 것을 알 수 있는데, 이는 U.S. Patent, US 5073433<sup>7</sup>에서 최적의 균열밀도로 제시한 75~100개/inch와 일치하는 결과이다.

**5. 수직 균열삽입에 의한 내구성 향상설계 기준**

Figs. 7과 8은 TBC 시스템에서 발생하는 응력 중 계면의 박리에 큰 영향을 미치는 중심부의 탑코팅계면에서 x 방향의 응력 ( $\sigma_{xx}$  at top\_center)을 나타낸 그림이다.

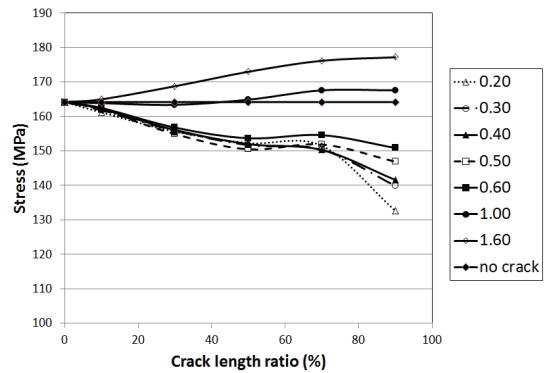


Fig. 7 Stress vs. crack length ratio due to changes of crack span

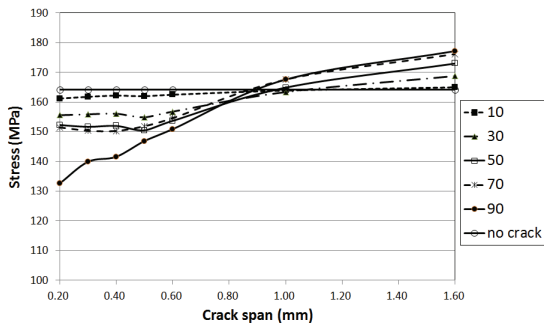


Fig. 8 Stress vs. crack span due to changes of crack length ratio

Fig. 7은 균열 길이비의 변화에 따른 응력의 변화를 균열 간격의 변화에 대해서 나타낸 결과이다. 이 결과로부터 균열 간격이 1.6mm인 경우에는 균열이 없는 경우( $\sigma_{xx}$  at top\_nocrack)보다 응력이 크게 나타남을 알 수 있는데, 이 경우에는 삽입된 균열 길이에 관계없이 오히려 균열을 삽입하는 것에 의하여 내구성이 저하된 것을 알 수 있다. 그러나 0.2mm~0.6mm인 경우에는 삽입된 균열길이가 증가함에 따라 응력이 감소할 뿐 만 아니라 균열이 없는 경우보다도 응력이 작기 때문에 균열을 삽입하는 것에 의하여 내구성이 향상된 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 균열 간격의 변화에 따른 응력의 변화를 균열길이비에 따라서 나타낸 그림이다. 균열 간격이 0.2mm인 경우에는 삽입된 균열길이비에 관계없이 균열이 없는 경우보다 응력이 작다가 균열길이비에 따라 균열간격이 0.8mm~1.0mm 인 범위에서 균열이 없는 경우( $\sigma_{xx}$  at top\_nocrack)와 응력이 같아지며, 보다 큰 균열 간격에서는 균열이 없

는 경우보다 오히려 응력이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서, 균열 간격이 0.8mm 이하인 경우에는 균열길이에 관계없이 수직균열을 삽입함으로써 열차페코팅의 내구성을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 인위적으로 삽입한 수직방향의 균열이 TBC시스템에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수직방향의 균열의 길이와 간격이 열응력에 미치는 영향을 유한요소해석에 의해 평가함으로써 열차페용 코팅의 내구성향상을 위한 설계기준을 제시하고자 하였다.

- 1) 탑코팅의 계면에서 계면에 평행인 x방향의 응력( $\sigma_{xx}$ )의 크기가 다른 응력에 비하여 큰 것을 알 수 있으며, 특히 균열아래 계면보다는 균열로부터 가장 먼 위치인 중심부의 x방향인 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_center)이 보다 큰 것을 알 수 있었다. 따라서 박리는 균열사이의 중심부의 탑코팅계면(top\_center)에서 발생할 가능성이 높다.
- 2) 균열간격이 1mm인 경우, 중심부의 계면에 평행인 x방향의 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_center)이 균열비가 증가함에 따라 계속 증가할 뿐 만 아니라, 균열이 없는 경우( $\sigma_{xx}$  at top\_nocrack)에 비하여 응력값이 크게 나타나고 있는데 비하여, 균열아래 계면에서는 균열 길이비가 70%일 때까지는 균열길이비의 증가에 따라 x 방향의 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_crack)이 계속 감소하다가 다시 증가하는데, 전체적으로 균열이 없는 경우( $\sigma_{xx}$  at top\_nocrack)에 비하여 작음을 알 수 있었다.
- 3) 균열길이비가 70%인 경우, 균열간격이 0.2mm~0.5mm인 경우에 중심부의 계면에 평행인 응력( $\sigma_{xx}$  at top\_center)이 최소값을 갖는 것을 알 수 있었다.
- 4) 균열 간격이 1.6mm인 경우에는 균열이 없는 경우( $\sigma_{xx}$  at top\_nocrack)보다 응력이 크게 나타남을 알 수 있는데, 이 경우에는 삽입된 균열 길이에 관계없이 오히려 균열을 삽입하는 것에 의하여 내구성이 저하된 것을 알 수 있다.
- 5) 균열 간격이 0.8mm 이하인 경우에는 균열길이에 관계없이 수직균열을 삽입함으로써 열차페코팅의 내구성을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

## 후 기

본 논문은 정부의 재원(교육과학기술부)으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0020024 and 2012R1A1A 2043624).

## 참고문헌

1. Brindley, W. J. and Miller, R. A., "Thermal Barrier Coating Evaluation Needs," NASA Technical Memorandum 103708, 1990.
2. Madhwal, M., Jordan, E. H., and Gell, M., "Failure Mechanisms of Dense Vertically-Cracked Thermal Barrier Coatings," Materials Science and Engineering: A, Vol. 384, No. 1-2, pp. 151-161, 2004.
3. Gilbert F., "Method of Protecting Gas Turbine Combustor Components Against Water Erosion and Hot Corrosion," US Patent, No. 6047593 A, 2000.
4. Freborg, A. M., Ferguson, B. L., Brindley, W. J., and Petrus, G. J., "Modeling Oxidation Induced Stresses in Thermal Barrier Coatings," Materials Science and Engineering: A, Vol. 245, No. 2, pp. 182-190, 1998.
5. Schaeffer J. C. and Bruce, R. W., "Thermal Barrier Coating," US Patent, No. 6730413 B2, 2004.
6. Spector, A. A., Ameen, M., and Popel, A. S., "Simulation of Motor-Driven Cochlear Outer Hair Cell Electromotility," Biophys J., Vol. 81, No. 1, pp. 11-24, 2001.
7. Taylor, T. A., "Thermal Barrier Coating For Substrates and Process for Producing It," US Patent, No. 5073433 A, 1991.
8. Kim, D. J., "(The) Estimation of Delamination Life of the Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coating for Gas Turbine Blade," Ph.D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ. 2009.
9. Almeida, D. S., Silva, C. R. M., Nono, M. C. A., and Cairo, C. A. A., "Thermal Conductivity Investigation of Zirconia Co-Doped with Ytria and Niobia EB-PVD Tbc's," Materials Science and Engineering: A, Vol. 443, No. 1-2, pp. 60-65, 2007.
10. Arnold, S. M., Pindera, M. J., and Aboudi, J., "Analysis of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings with Homogeneous and Heterogeneous Bond Coats under Spatially Uniform Cyclic Thermal Loading," NASA/TM, Paper No. 2003-210803, 2003.

11. Ferguson, B. L., Petrus, G. J., and Krauss, T. M.,  
“Modeling of Thermal Barrier Coatings,” NASA  
Contractor Report, Paper No. NAS3-26664, 1992.
12. Koo, J. M., Lee, S. Y., and Seok, C. S., “Top Coating  
Design Technique for Thermal Barrier of Gas  
Turbine,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 8,  
pp. 802-808, 2013.