

## ◆ 특집 ◆ 가스터빈 블레이드 설계 기술 I

# 가스터빈 블레이드 열차폐 코팅의 열피로 시험방식

## Thermal Fatigue Test Methods for Thermal Barrier Coatings of Gas Turbine Blade

김대진<sup>1</sup>, 구재민<sup>1</sup>, ✉석창성<sup>1</sup>, 원종일<sup>2</sup>, 박상열<sup>3</sup>, 김문영<sup>3</sup>, 이성호<sup>4</sup>  
Dae Jin Kim<sup>1</sup>, Jae Mean Koo<sup>1</sup>, ✉Chang Sung Seok<sup>1</sup>, Jong Il Won<sup>2</sup>, Sang Yeol Park<sup>3</sup>, Mun Young Kim<sup>3</sup>  
and Sung Ho Lee<sup>4</sup>

1 성균관대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

2 한국화학연구원 (Korea Research Institute of Chemical Technology)

3 한전 KPS(주) G/T 정비기술센터 기술팀 (Technology Team, KPS Gas Turbine Technology Service Center)

4 한전 전력연구원 (Korea Electric Power Research Institute)

✉ Corresponding author: seok@skku.edu, Tel: 031-290-7446

Key Words: Thermal Barrier Coating (열차폐 코팅), Thermal Fatigue (열피로), Thermal Gradient Fatigue (열구배피로), Thermal Mechanical Fatigue (열기계피로), Thermal Gradient Mechanical Fatigue (열구배기계피로), Burner Rig Test (버너리그시험)

### 1. 서론

열차폐 코팅(TBC: Thermal Barrier Coating)이 적용되고 있는 가스터빈의 고온 핵심 부품 중 1 단 블레이드의 경우 현재 1,350°C 이상의 고온에서 작동되므로 극심한 부식과 산화를 겪게 된다. 또한, 3,600 rpm 으로 고속회전 하므로 원심력도 받는다. 따라서 가스터빈이 기동과 정지를 반복하게 되면, 1 단 블레이드는 원심력에 의한 기계적 피로 뿐 아니라 반복적인 열적 피로를 받게 된다. 그리고 이때 블레이드의 표면에 적용된 열차폐 코팅 역시 블레이드와 같은 열적-기계적 피로를 받는다.

열차폐 코팅층은 블레이드보다 먼저 산화되거나 부식되고, 반복적인 피로하중으로 인해 사용 중 파괴될 수 있으며, 열차폐 코팅층의 파괴는 그 부분으로 산화 및 부식을 집중시켜 모재의 파괴로 이어진다. 즉, 가스터빈 1 단 블레이드의 신뢰성을 평가하기 위해서는 초내열합금만의 신뢰성이 아닌 열차폐 코팅까지 포함한 열차폐 코팅 시스템의 신뢰성을 고려해야 한다. 열차폐 코팅 시스템의 신뢰성을 평가하고자 할 때, 실제 코팅이 적용된 블

레이드를 대상으로 한 실험 및 해석을 수행하는 것은 고가의 재료 비용, 블레이드의 복잡한 형상 등으로 인해 매우 어렵다. 따라서 대부분의 경우, 블레이드로부터 직접 모재를 채취하거나 초내열합금 잉곳을 주조한다. 그리고 이들을 적절한 형상으로 가공하고, 그 표면에 열차폐 코팅을 적용한 시험편을 대상으로 열차폐 코팅 시스템의 신뢰성을 평가한다. 열차폐 코팅 시스템의 신뢰성 평가는 대부분 열피로 시험의 형태로 이루어지는데, 본 연구에서는 이러한 열피로 시험방식을 조사 및 분류하였고 각각에 대한 개요 및 사례들을 제시하였다.

### 2. 레인보우테스트(Rainbow Test)<sup>1</sup>

레인보우테스트는 실제 운전조건하에서 새로운 소재 및 코팅층의 특성을 평가하는 일종의 현장시험(field tests)으로, 다양한 합금 소재 및 코팅층을 실제 가스터빈에서 동시에 시험하는 것을 가리킨다. 무지개(rainbow)란 용어는 소재 및 코팅층에 따라 외관이 잠재적으로 다르게 나타날 가능성에서

유래되었다.

대표적인 가스터빈 제작사인 GEPC(General Electric Power Generation)에서는 실제로 가스터빈에서 고온 가스가 지나가는 모든 부품들에 적용되는 재료들에 대하여, 제품이 생산되기 이전에 레인보우테스트를 통해서 그 적용성을 검증하고 있으며 레인보우테스트는 일반적으로 10,000 시간에서 24,000 시간 동안 실시된다.

레인보우테스트를 실시하는 주된 목적은 실제 운전 조건하에서 신소재의 성능(capabilities)을 평가하고, 신소재의 적용에 따른 위험부담을 가스터빈 기종(fleet) 전체가 아닌 몇 개의 선정된 가스터빈으로 제한하기 위함이며, 신기술이 현장 조건에서 검증되었음을 고객들에게 증명하는데 있다. 이러한 레인보우테스트는 실험실 수준에서 이루어지고 있는 시험과 제품 사이의 간극을 메워주는 가교 역할을 수행한다.

GEPC 는 1950 년대 중반부터 다양한 합금 및 코팅층에 대해 레인보우테스트를 수행해 왔으며, 열차폐 코팅이 적용된 부품에 대한 레인보우테스트는 1987 년 이후부터 실시되고 있다.

### 3. 버너리그테스트(Burner Rig Test)<sup>2,4</sup>

열차폐 코팅의 우수성은 코팅층이 얼마나 오랜 시간 동안 떨어져나가지 않고(spallation) 그 형태를 온전하게 유지하고 있는나에 달려있다고 할 수 있다. 열차폐 코팅의 우수성을 평가하는 최선의 방법은 레인보우테스트라고 불리는 엔진 시험을 통해 내구성을 평가하는 것이다. 하지만 레인보우테스트에는 막대한 비용이 들고 또한 시험 시간이 매우 많이 소요되므로, 엔진 제작사 들은 지금까지 엔진 시험을 실시하기 이전 단계에 여러 후보 코팅 재료에 대한 성능을 비교하고 이를 통해 최적의 사양을 나타내는 열차폐 코팅을 선발(screening)하기 위해 버너리그시험을 실시하고 있다.<sup>2</sup>

Figure 1 은 NASA 의 버너리그 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 버너리그시험은 실제 엔진의 가동 조건을 매우 가깝게 모사할 수 있는 시험방법으로서, 버너리그 시험의 온도 범위는 현재 최대 1,650℃ 까지 가능하며 화염의 속도는 마하 0.8 까지 가능한 것으로 알려져 있다.<sup>3</sup> 하지만, 엔진 제작자와 사용자는 그들의 목적에 부합하는 조건으로 시험하므로, 버너리그를 이용한 열피로 시험

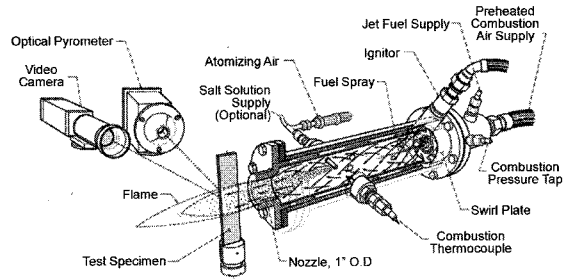


Fig. 1 NASA GRC mach 0.3 burner rig<sup>4</sup>

의 기준은 아직 정립되어있지 않다.<sup>2</sup>

버너리그의 작동온도는 대개 1,000℃에서 1,500℃ 사이이며 열피로 주기의 가열시간은 짧게는 수분에서 길게는 한 시간에 이르기까지 다양하다.<sup>2</sup> 냉각 과정에 소요되는 시간 역시 최대 15 분 이내에서 다양한 조건으로 실험되고 있다.

레인보우테스트에서는 부식 및 산화물질의 종류 및 조성의 임의 조절 불가능하다는 단점이 있지만, 버너리그 시험에서는 연료에 오염물질을 첨가함으로써 열간부식(hot corrosion) 특성을 평가할 수 있으며, 연료에 고체 입자를 섞어서 분사함으로써 열차폐 코팅의 침식(erosion)에 대한 저항성을 평가할 수 있다.<sup>3</sup> 또한 시험편(coupon) 또는 부품(component)에 적용된 열차폐 코팅의 내구성에 미치는 주기산화(cyclic oxidation), 열간 부식(hot corrosion) 및 침식(erosion)의 영향을 동시에 평가할 수 있다는 장점이 있다.<sup>4</sup>

### 4. 소형 시험편을 이용한 열피로 시험방식

열피로 시험 방식은 시험편 두께 방향의 온도 구배 및 축방향 하중의 유무에 따라 TF(Thermal Fatigue), TGF(Thermal Gradient Fatigue) 및 TGMF(Thermal Gradient Mechanical Fatigue) 방식으로 분류될 수 있다.<sup>5</sup>

#### 4.1 TF(Thermal Fatigue) 방식

TF 방식의 시험에서는 주로 전기로(furnace) 내부에 시험편을 위치시켜 간접적으로 가열하는 방식이 사용되는데, 전기로를 이용한 TF 시험의 경우 Fig. 2 와 같은 수평형 방식 또는 Fig. 3 과 같은 수직형 방식이 존재한다. TF 시험에서는 시험편 두께에 걸쳐 온도 구배가 거의 없고 1 주기에 소요되는 시간은 대개 1 시간 정도이다.

김의현<sup>8</sup>은 GTD-111 을 모재로 하는 열차폐 코

팅 시험편(MCrAlY/7YSZ)에 대해 Fig. 2 에 나타난 방식과 동일한 방식으로 TF 시험을 수행하였다. 1,100℃에서 45 분 동안 가열하고 공기 중에서 15 분 동안 냉각하는 과정을 반복한 결과, 475 회 반복 후 Fig. 4 와 같이 세라믹 코팅층 전체가 박리되는 양상으로 파손되었고, 박리된 세라믹 코팅층의 아랫면과 MCrAlY 윗면에 대한 X-선 회절 분석을 통해, 박리된 위치가 세라믹 층과 MCrAlY 계면이었다고 보고하였다.

Table 1 은 DVC-TBC 방식으로 제작된 코팅 시험편의 재료 및 성분을 나타낸 것이다. Fig. 5 는 Table 1 의 코팅 시험편을 이용하여 1,100℃, 1,121℃ 및 1,151℃의 온도 조건에서 TF 시험을 수행한 결과로서, 설정온도까지 10 분간 빠르게 가열하고 40 분간 유지한 후 10 분간 상온으로 냉각하는 과정을 1 주기로 하였을 때의 코팅 수명을 나타내고 있다. 1,100℃ 조건의 경우 500 회 이상, 1,151℃의 경우도 100 회 이상의 수명을 가짐을 알 수 있다.

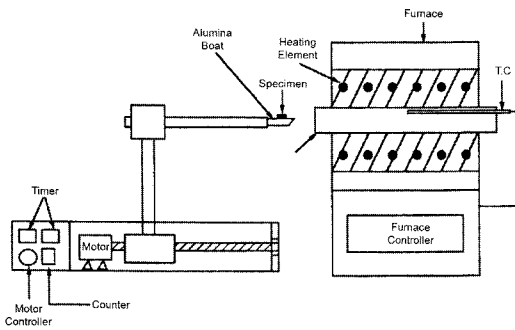


Fig. 2 Schematic diagram of cyclic oxidation apparatus<sup>6</sup>

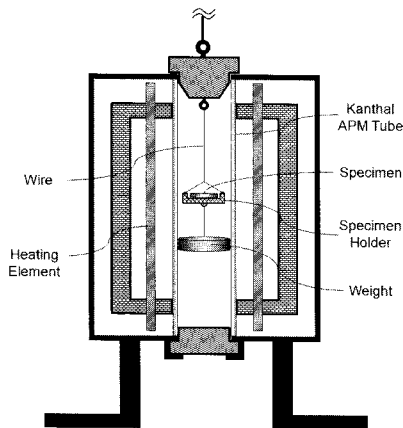


Fig. 3 Schematic illustration of thermal fatigue tester with vertical furnace<sup>7</sup>

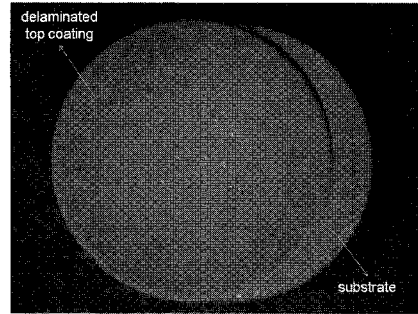


Fig. 4 TBC failure after 475 times of thermal cycles<sup>8</sup>

Table 1 Typical composition of the different layers in the DVC-TBC system<sup>9</sup>

Layer	Material	Composition (wt%)
Substrate	GTD-111	13.5 Cr, 9.5 Co, 4.75 Ti, 3.8 W, 3.3 Al, 2.7 Ta, 1.53 Mo, 0.23 Fe, 0.09 C, 0.01 B, Bal. Ni
Bond Coat	APS NiCrAlY	Ni22Cr10Al1Y
Ceramic Top Coat	APS YSZ	8 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> in ZrO <sub>2</sub>

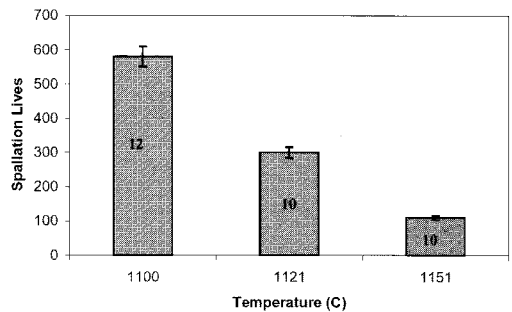


Fig. 5 Total cycles to failure for 1,100℃, 1,121℃ and 1,151℃ for DVC-TBC system. The number on the bar is number of samples tested<sup>9</sup>

Table 2 TF test conditions<sup>10</sup>

Specimen	- SPPS TBC & APS TBC(250 μm) on the bond-coated superalloy
Furnace	- CM <sup>TM</sup> rapid temperature furnace
Thermal Cycle	- 10 min heat-up from RT to 1,121℃ - 40 min hold at 1,121℃ - 10 min forced air quench
Failure Criteria	- When the TBC failure area reached 50% of the total area

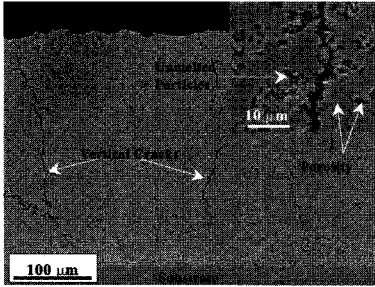


Fig. 6 SEM micrograph of a polished cross-section view of a SPPS TBC showing vertical cracks<sup>10</sup>

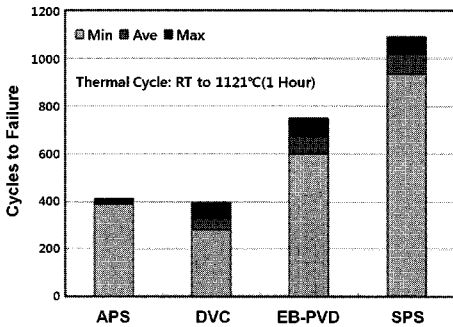


Fig. 7 Thermal cyclic life of SPPS TBCs and conventional TBCs<sup>10</sup>

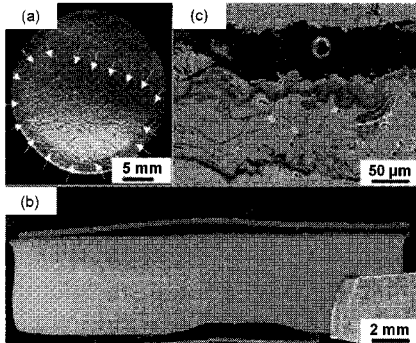


Fig. 8 Micrographs of the failed SPPS TBCs<sup>10</sup>

Table 2 는 또 다른 TF 시험의 예로서, Fig. 6 에 나타낸 것과 같은 SPPS(Solution Precursor Plasma Spraying) 코팅층에 대한 시험 방식을 나타낸 것이다. Fig. 7 은 1,121°C 조건에서 1 시간을 1 주기로 하였을 때의 시험결과를 보여주고 있다. 수명이 가장 짧은 APS(Air Plasma Spraying)와 DVC(Dense Vertically Cracked) 방식의 경우도 최소 200 회 이상의 수명을 가짐을 알 수 있으며, 이로서 TF 방식의 시험에는 많은 시간이 소요됨을 확인할 수 있다. 실제 블레이드의 경우 내부에 냉각 채널이

존재하여 외부 코팅층과 내부 모재와의 온도차가 존재하고 있지만, 전기로를 이용한 TF 방식으로는 그러한 온도구배 환경을 모사하기 어렵다.

#### 4.2 TGF(Thermal Gradient Fatigue) 방식

TGF 방식은 TF 방식에 온도 구배 조건이 부가된 것이다. 즉, 시편의 한쪽 면을 가열함과 동시에 반대쪽 면은 냉각함으로써 시편 두께에 걸쳐 온도구배를 일으키는 방식이다. TGF 시험에는 주로 Fig. 9 와 같은 버너리그(burner rig)가 사용된다. Fig. 9 에서 시험편은 버너에 의해 직접 가열되며 이때 시편의 뒷면은 노즐을 통해 분사되는 압축공기로 인해 냉각된다.

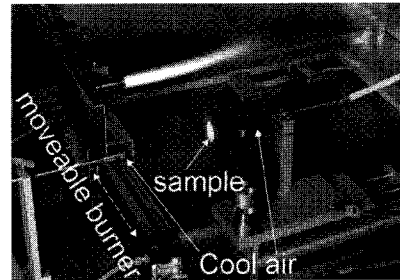


Fig. 9 Thermal cycling test facility with natural gas burner and hot TBC sample<sup>11</sup>

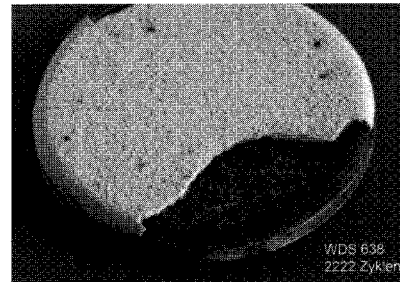


Fig. 10 Failed specimen after thermal cycling on a burner rig<sup>12</sup>

Fig. 10 은 버너리그 TGF 시험에 사용된 시험편으로, 가장자리에서 발생하는 응력의 영향을 최소화하기 위해 시험편의 테두리가 가공되어 있다.

Table 3 은 버너리그를 이용한 TGF 시험 조건의 구체적인 예를 나타낸 것이다. 일반적으로 시험편의 표면온도는 파이로미터(pyrometer)에 의해, 모재의 온도는 모재 두께의 중간 위치에 삽입된 열전대를 이용하여 측정된다. Table 3 의 파괴 기준은 세라믹 탑코팅의 5%가 떨어져나갔을 때이지만, 정해

진 기준은 없다. Fig. 11 은 Table 3 의 조건에 따른 TGF 시험 중 탑코팅 표면 및 모재의 온도 변화를 보여주는 것으로서, 코팅 표면과 모재와의 온도 차이가 존재함을 알 수 있다. Fig. 11 에서 열피로 시험의 1 주기는 약 5 분으로 TF 시험에 비해 시험 주기가 매우 짧은 것을 알 수 있다. TGF 방식은 실제 블레이드의 조건과 보다 유사하다는 장점이 있지만, 가스 유량 제어 및 온도의 측정이 어려운 단점이 있다.

Table 3 TGF test conditions<sup>13</sup>

Specimen	- Disk shaped Ni-base superalloy (Φ 30, t = 3 mm) - 120 μm NiCoCrAlY bond coat
A Gas Burner	- Coal gas and oxygen
Temperature	- $T_{\text{surface}} = 1,250 \pm 30^\circ\text{C}$ - $T_{\text{substrate}} = 965 \pm 15^\circ\text{C}$
Failure Criteria	- When 5 % area of the ceramic coating was lost, the cycling was manually stopped

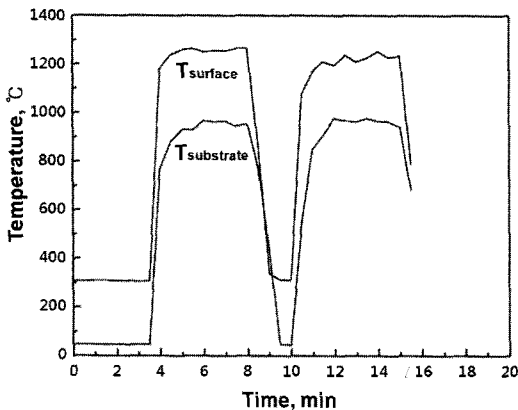


Fig. 11 Thermal cycling procedure<sup>13</sup>

### 4.3 TGMF(Thermal Gradient Mechanical Fatigue) 방식

1 단 블레이드는 1,300°C 이상의 고온 환경에서 가스터빈이 기동과 정지를 반복함에 따라 열피로를 받으며, 3,600 rpm 정도로 고속 회전함에 따른 원심력도 받게 된다. 또한 열차폐 코팅의 열차단 효과(ΔT drop) 및 냉각채널을 통한 블레이드 내부 냉각(internal cooling)으로 인해 블레이드 두께에 걸쳐 온도구배가 발생된다. TGMF 방식은 이러한 열적 피로, 시편 두께에 걸친 온도구배 뿐 아니라

시편에 작용하는 축방향 하중까지 고려할 수 있는 시험 방식이다. TGMF 방식은 TGF 에 비해 블레이드의 경계조건을 보다 사실적으로 모사할 수 있는 시험방식이지만 시험장치의 구성 및 변형을 제어 통한 축방향 하중의 제어가 매우 어려워 많은 시간과 비용이 소요되는 시험방식이다.

Figure 12 는 J. Shi, et. al<sup>5</sup> 의 연구 중에서 중공 환봉 시험편을 이용한 TGMF 시험 방식을 나타낸 것이다. Table 4 는 TGMF 시험 조건을 정리한 것이다. Fig. 13 은 한번 운전(one flight) 동안 실제 터빈 블레이드의 저주기 피로 하중(low cycle fatigue load)

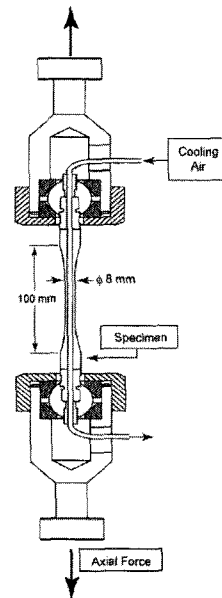


Fig. 12 Schematic drawing of experimental setup in the TGMF test<sup>5</sup>

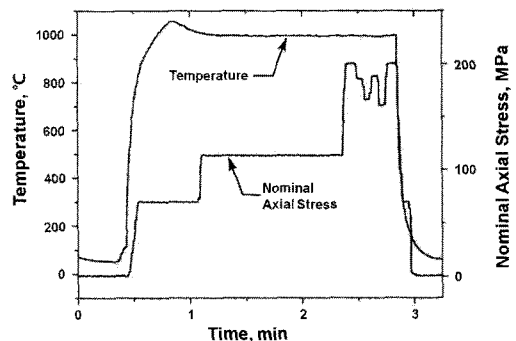


Fig. 13 Estimated temperature at the outer wall and axial tensile force as a function of time for one typical load<sup>5</sup>

을 모사하기 위한 실험조건으로서, 1 주기인 약 3 분 동안의 시험편의 표면온도 및 축방향 응력의 변화를 보여주고 있다.

Table 4 TGMF test conditions<sup>5</sup>

Substrate	- Nickel-based superalloy, IN 100 DS - A hollow circular cylinder (ID: 4 mm, OD: 8 mm)
Bond Coat	- NiCoCrAlY(110 μm) (in wt%: 20Co, 21Cr, 12Al, 0.15Y +Ni) - Coating method: EB-PVD
Top Coat	- 7-8 YSZ(220 μm) - Coating method: EB-PVD
Thermal Load	-Radiation furnace with 4 cylindrical quartz lamps - The maximum temp. : 1,000 °C - The minimum temp. : 100 °C
Internal Cooling	- By a constant air flow - The inlet temperature of the internal cooling air: about 270 °C

축방향 응력은 유압식 만능시험기를 이용한 하중 제어를 통해 모사되었다. 정상상태 일 때, 내부 냉각에 따른 시험편 내외부의 온도 차이는 170 °C 로 나타났다. Fig. 13 과 같은 열적/기계적 피로를 가하기 전, 로크웰 압입자로 시험편의 표면을 압입하여 탑코팅이 국부적으로 박리되도록 하였는데, 이것은 인위적으로 설정한 코팅층의 초기결함이 반복적인 열구배 피로를 받게 되면 어떻게 변화되는가를 관찰하기 위함이다. Fig. 14 는 TF, TGF 및 TGMF 조건에 대한 실험결과로서, 500 사이클 후의 본드코팅 표면의 모습을 보여주고 있다. 열구배가 없을 때는(TF) 본드코팅의 표면이 평평하게 유지되고 있으나, 열구배를 적용하였을 때는(TGF)

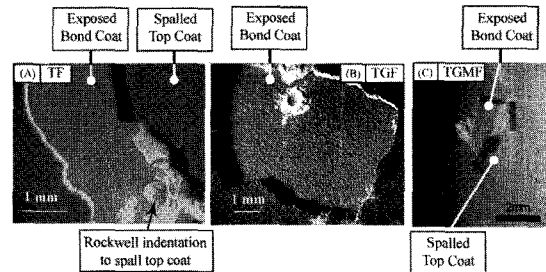


Fig. 14 Surfaces of the bond coat after 500 thermal cycles: (A) TF; (B) TGF; (C) TGMF<sup>5</sup>

표면에 굴곡이 발생하였다. 또한 열구배와 축방향 하중을 동시에 작용하였을 때는(TGMF) 발생한 굴곡이 하중이 작용하는 축방향으로 정렬되어 나타남을 알 수 있다.

## 5. TMF(Thermal Mechanical Fatigue) 방식

### 5.1 블레이드의 변형-온도 이력<sup>13</sup>

Figure 15 는 정상 운전 및 정지 조건(normal startup and shutdown cycle) 하에서의 가스터빈 연소 온도(firing temperature)의 변화를 보여주고 있다. Fig. 15 에 나타난 일련의 과정을 거치면서 블레이드의 온도 또한 변화한다. 이때 Fig. 16 과 같이 연소 온도의 빠른 변화에 대하여 블레이드 또는 노즐의 최외곽부의 재료는 내부의 재료에 비해 보다 빠르게 반응한다. 이러한 반응 속도의 차이는 블레이드의 두께 방향에 걸쳐 온도 구배를 형성하고 그로 인한 발생응력은, 사이클이 반복되면서 블레이드에 균열을 발생시킬 수 있다.

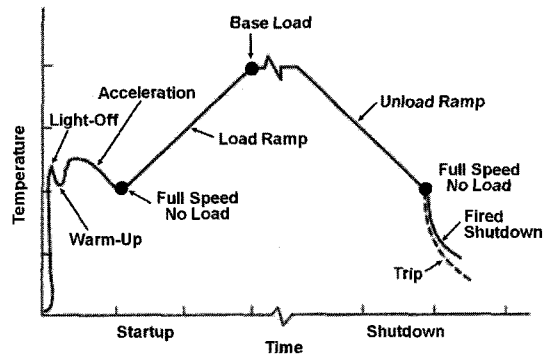


Fig. 15 Turbine start/stop cycle-firing temperature changes<sup>14</sup>

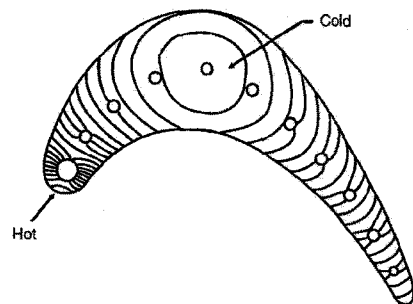


Fig. 16 First stage blade transient temperature distribution<sup>14</sup>

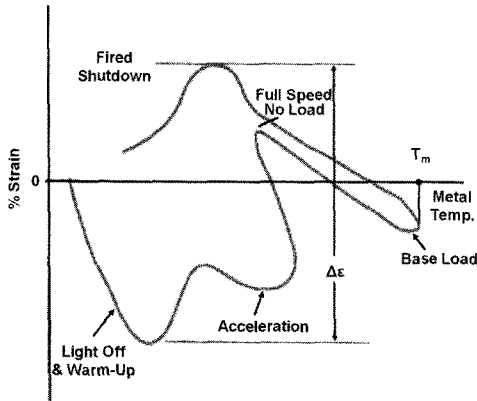


Fig. 17 Bucket low cycle fatigue<sup>14</sup>

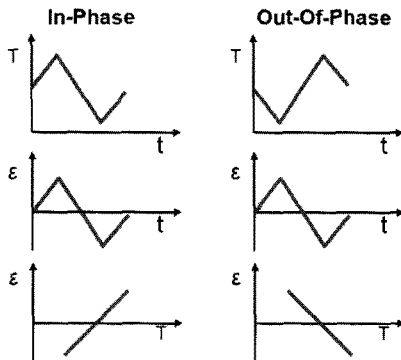


Fig. 18 TFM cycles<sup>15</sup>

Figure 17 은 GE 사의 MS7001EA 가스터빈의 1 단 블레이드에 대한 정상 가동 및 정지 조건에서의 온도와 변형율의 변화를 나타낸 것이다. 점화 과정(light-off)과 가속 과정(acceleration) 동안 리딩 에지(leading edge) 부위에는 일시적인 압축응력이 발생하는데, 이것은 리딩에지 부위가 두꺼운 다른 부위에 비해 보다 빨리 가열 됨에 따라 열팽창이 오히려 억제되기 때문이다.

최대 부하 조건(full load condition)에서는 블레이드가 최고 온도에 도달한 상태로 온도구배는 정상상태를 유지하게 되는데, 이때는 일정한 압축응력이 발생하고 있는 상태가 된다. 이러한 응력 상태는 가스터빈 기동이 정지(shutdown)되면 역전된다. 즉, 리딩에지부가 다른 두꺼운 부위에 비해 좀 더 빨리 냉각됨에 따라 냉각 수축이 제한되고 그에 따라 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 온도와 변형율의 관계는 블레이드 냉각홀 주변에서는 반대가 된다. 따라서 블레이드에는 위치에 따라

동상(in-phase)과 역상(out-of-phase)이라는 두 가지 상황이 존재하게 된다. 동상이란 가열시 인장응력 상태가 되고 냉각시 압축응력 상태가 되는 것이며 블레이드 외곽 부분에서 나타나는 현상이다. 역상이란 가열시 압축응력 상태가 되고 냉각시 인장응력 상태가 되는 것이며 블레이드의 안쪽 냉각홀 주변에서 나타나는 이력이라 할 수 있다. Fig. 18 은 TFM 의 동상과 역상 조건을 개념적으로 나타내 주고 있다.

### 5.2 열차폐 코팅의 TFM 시험 방식<sup>16,17</sup>

TFM 시험 방식은 가스터빈 블레이드의 복잡한 하중 상황을 모사하기 적절한 방식이지만 열차폐 코팅이 적용된 시험편에 대한 TFM 시험에는 몇 가지 어려움이 따른다. 낮은 열전도도의 탑코팅 가열이 쉽지 않다는 점과 실제 사용조건에 해당하는 온도 조건을 모사하기 위해서는 약 1,000℃ 까지의 빠른 가열 및 냉각이 요구되므로 강력한 가열 및 냉각 장치가 필요하다는 점이다. 이러한 매우 까다로운 시험 조건으로 인하여 열차폐 코팅이 적용된 시험편에 대한 TFM 시험은 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.<sup>16</sup>

TFM 시험의 가열방식에는 전기저항에 의한 가열(resistance heating), 램프 전기로(ramp furnace)를 이용한 가열 및 유도가열 방식(induction heating)이 사용되며 일반적으로 유도가열 방식이 가장 많이 사용되고 있다. 그런데, 열차폐 코팅이 적용된 시험편에 대한 TFM 시험에서 전기저항에 의한 가열 방식을 이용하는 경우 가열 및 냉각 속도가 너무 느리고, 램프 전기로를 이용하는 경우 가열 속도는 빠르지만 요구되는 빠른 가열 및 냉각 사이클로 인해 가혹한 조건에서 램프가 운전됨에 따라 시험편의 수명보다 램프의 수명이 더욱 짧은 문제가 발생할 수 있다. 또한 유도가열 방식을 사용할 경우 전자기속(electromagnetic flux)이 모재에만 작용하고 세라믹 재질의 탑코팅에는 작용하지 않음에 따라, 탑코팅은 모재로부터의 전도(conduction)를 통해서 가열된다. 이 경우 탑코팅 온도가 모재의 온도보다 낮아지게 되어 실제조건과는 반대의 상황이 되는 문제점이 생긴다.

B. Baufeld, et. al.<sup>16</sup> 은 이러한 문제를 해결하기 위해 간접 유도가열 방식(indirect induction heating)을 이용하여 열차폐 코팅이 적용된 시험편에 대한 TFM 시험을 성공적으로 수행하였다. 이 방식은 Fig. 19 에 나타낸 것과 같이 시험편과 유도가열 코일

사이에 원통형 중간막(susceptor)을 설치하는 방식으로, susceptor 가 유도가열에 의해 1 차로 가열되고 시편은 susceptor로부터의 복사(heat radiation)를 통해 가열되는 방식이다.

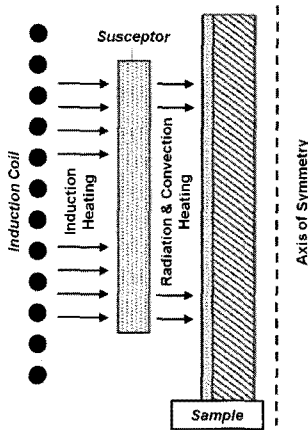


Fig. 19 Schematic drawing of the heating set-up, where the sample is heated indirectly by the induction coil via the susceptor<sup>16</sup>

Fig. 20 은 susceptor 를 적용한 경우와 그렇지 않은 경우 950℃에서 온도를 유지할 때의 탑코팅의 온도를 측정 한 결과이다. Susceptor 를 사용할 경우에는 탑코팅의 온도가 모재의 온도에 비해 120℃ 정도 더 높지만, 그렇지 않은 경우에는 탑코팅의 온도가 100℃ 정도 더 낮다는 것을 보여주고 있다. Baufeld, et. al.<sup>16</sup> 은 또한 코일의 직경을 변화시킴으로써 원하는 온도 구배를 얻을 수 있다고 보고하였다.

열차폐 코팅이 적용된 시험편에 대하여 TMF 시험을 수행한 또다른 방식으로는 4.3 절의 Fig. 14 에 나타난 방식이다. 이 방식은 Fig. 21 과 같이 4 개의 석영램프(quartz lamp)와 각각의 램프를 감싸고 있는 타원형의 거울(elliptical mirrors)을 이용한 방식으로서, 거울의 초점이 시편에 맞춰져 있어서 램프가 가열되면 그 복사열이 시편에 집중되도록 설계된 시험장치를 이용하고 있다. 이때 온도 구배는 중공형 시험편의 내부를 통과하는 냉각 공기의 온도와 유량을 조절함으로써 조절하는 방식이다. 두 개의 슬라이더(slides)에는 36 개의 통기구멍(vents)이 뚫려 있으며 냉각과정에서 슬라이드가 닫혔을 때 매우 빠른 시편의 냉각이 가능해진다. 또한 석영램프는 냉각과정 동안에도 작동을 멈추

지 않고 계속 켜져있는 상태이므로 슬라이더를 다시 열었을 때 시편의 온도를 매우 빠르게 상승시킬 수 있다.

제시한 몇몇 사례와 같이 국외의 경우 열차폐 코팅이 적용된 시험편에 대한 TMF 시험이 이루어지고 있으나, 아직까지 국내에서는 이 부분의 연구가 매우 취약한 상황이다

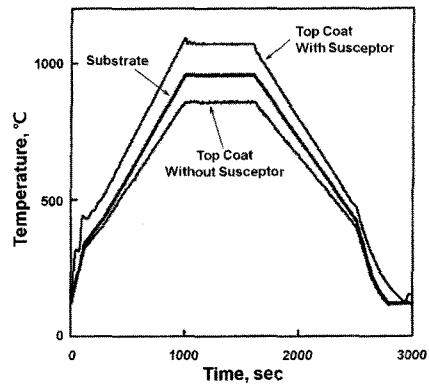


Fig. 20 Comparison of the substrate temperature during a temperature cycle with the temperature at the topcoat surface, applying induction heating with and without susceptor<sup>16</sup>

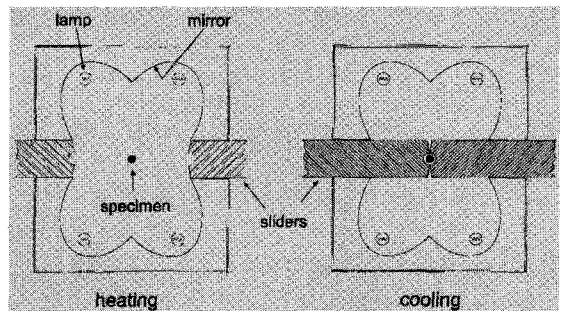


Fig. 21 Radiation heating system and sliders with integrated air-cooling facility to simulate thermoshock conditions<sup>16</sup>

## 6. 결론

본 논문에서는 가스터빈 블레이드 열차폐 코팅의 신뢰성 평가에 활용되고 있는 다양한 열피로 시험방식을 분류하고 그에 대한 사례를 제시하였다. 국내에서는 아직까지 실증시험을 수행할 만한 기술력이 부족하며 버너리그 운용 기술 또한 부족하다. 열차폐 코팅이 적용된 시험편을 대상으로



한 TMF 시험 방식 및 코팅 시험편 두께 방향으로 온도 구배를 조사할 수 있는 시험 방식에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

## 후 기

본 논문은 BK21 사업과 산업자원부의 전력산업 연구개발사업의 지원을 받아 이루어 졌습니다.

## 참고문헌

- Nelson, W. A. and Orenstein, R. M., "TBC Experience in Land-Based Gas Turbines," *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 176-180, 1997.
- Immarigeon, J-P., Parameswaran, V. R., Chow, D. and Morphy, D. D., "Evaluation of thermal barrier coatings from burner rig tests," AGARD SMP Meeting, pp. 15.1-15.10, 1997.
- National Research Council Canada, [http://iar-ira.nrc-cnrc.gc.ca/smpl/smpl\\_1h\\_e.html](http://iar-ira.nrc-cnrc.gc.ca/smpl/smpl_1h_e.html)
- NASA, [http://www.grc.nasa.gov/WWW/EDB/Facilities/mach\\_03\\_burner\\_facility.htm](http://www.grc.nasa.gov/WWW/EDB/Facilities/mach_03_burner_facility.htm)
- Shi, J., Karlsson, A. M., Baufeld, B. and Bartsch, M., "Evolution of surface morphology of thermo-mechanically cycled NiCoCrAlY bond coats," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 434, No. 1-2, pp. 39-52, 2006.
- Baek, J. H., "The Effects of Yttrium Addition on the Oxidation Behavior of W-Mo-40wt.%Cr Alloys," *Detp. Of Metall. Eng., Major in Metall. Eng., Master's Thesis, Sungkyunkwan University.*
- Seok, C. S., Kim, D. J., Kim, H. I., Park, H. S., Kim, M. Y. and Park, S. Y., "Thermal cyclic test facility," Korea Patent, No. 10-0851325-0000, 2008.
- Kim, U. H. and Yoo, K. B., "Thermal cyclic characteristics of TBC/CoNiCrAlY thermal barrier coatings," *Proceedings of The Korean Welding and Joining Society*, pp. 45-47, 2006.
- Madhwal, M., "Failure mechanism of dense vertically-cracked thermal barrier coatings," *Material Science and Engineering A*, Vol. 384, No. 1-2, pp. 151-161, 2004.
- Gell, M., Xie, L., Ma, X., Jordan, E. H. and Padture, N. P., "Highly durable thermal barrier coatings made by the solution precursor plasma spray process," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 177-178, pp. 97-102, 2004.
- Stöver, D., Pracht, G., Lehmann, H., Dietrich, M., Döring, J-E. and Vaßen, R., "New Material Concepts for the Next Generation of Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings," *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 13, No. 1, pp. 76-83, 2004.
- Mack, D. E., Gross, S. -M., Vaßen, R. and Stöver, D., "Metal-glass based composites for application in TBC-systems," *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 652-656, 2006.
- Dai, H., Zhonga, X., Li, J., Zhang, Y., Menga, J. and Caoa, X., "Thermal stability of double-ceramic-layer thermal barrier coatings with various coating thickness," *Materials Science & Engineering A*, Vol. 433, No. 1-2, pp. 1-7, 2006.
- Hoefl, R., Janawitz, J. and Keck, R., "Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations," General Electric Energy Service, GER-3620J, pp. 11-12, 1993.
- Fleury, E., Ha, J. S., Hyun, J. S., Jang, S. W. and Jung, H., "Thermo-Mechanical Fatigue of the Nickel Base Superalloy IN738LC for Gas Turbine Blades," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 1, No. 1, pp. 188-193, 2000.
- Baufeld, B., Tzimas, E., Mullejans, H., Peteves, S., Bressers, J. and Stamm, W., "Thermal-mechanical fatigue of MAR-M 509 with a thermal barrier coating," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 315, No. 1, pp. 231-239, 2001.
- Bartsch, M., Marci, G., Mull, K. and Sick, C., "Fatigue Testing of Ceramic Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine Blades," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 1, Issue 2, pp. 127-129, 1999.