

## 플라즈마 용사 열차폐 코팅의 박리수명 평가에 관한 연구

김대진\* · 신인환\* · 구재민\* · 석창성<sup>†</sup> · 김문영\*\*  
(2008년 12월 30일 접수, 2009년 1월 20일 수정, 2009년 1월 23일 심사완료)

### Evaluation on the Delamination Life of Isothermally Aged Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating

Dae-Jin Kim, In-Hwan Shin, Jae-Mean Koo, Chang-Sung Seok and Moon-Young Kim

**Key Words:** Thermal Barrier Coating(열차폐코팅), Thermally Grown Oxide(열 생성산화물), Bond Test(접착강도시험), Delamination Map(박리지도), Delamination Life(박리수명)

#### Abstract

In this study, disk type of thermal barrier coating system for gas turbine blade was isothermally aged in the furnace changing exposure time and temperature. The aging conditions that delamination occurs were determined by the extensive microscopic analyses and bond tests for each aging condition. The delamination map was drawn from the time-temperature matrix form which summarize the delamination conditions. Finally, a method to draw the delamination life diagram of a thermal barrier coating system by using the delamination map was suggested.

#### 1. 서 론

열차폐코팅(TBC; Thermal barrier coating)은 항공기나 가스터빈 엔진 등의 고온 부품에 적용되는 기술로서 부품의 표면온도를 낮추어 엔진의 효율을 높여주는 역할을 한다. 이러한 TBC는 주로 초내열 합금 모재,  $M\text{CrAlY}(M=\text{Ni, Co or both})$  본드코팅, 세라믹(7~8 wt.%  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ ) 탑코팅 및 가스터빈 가동 중 본드코팅의 산화로 인해 본드코팅과 탑코팅 사이에 생성되는 열생성산화물(TGO; Thermally Grown Oxide)<sup>(1)</sup>로 구성되어 있다. TBC의 파손은 주로 TGO 또는 TGO 근처의 세라믹 층이 떨어져 나가는 형태로 발생된다고 알려져 있다.<sup>(2)</sup>

항공기용 가스터빈에 적용되는 열차폐 코팅의 경우 잦은 이착륙에 따른 열피로가 열차폐 코팅의 파손에 지배적인 영향을 미친다.<sup>(3)</sup> 이러한 경우 열차폐 코팅 시스

템의 신뢰성 평가는 대부분 버너리그 시험<sup>(4)</sup>과 같은 열 피로 시험의 형태로 이루어지며, 열차폐 코팅의 수명은 단순히 열차폐 코팅이 떨어져 나가는(spallation) 시점에 해당하는 열피로 주기의 반복 횟수로 평가된다. 그런데, 기저부하용 가스터빈과 같은 경우에는 한 번 가동된 이후에 긴 시간동안 운전되므로 반복적인 열피로에 의한 영향보다는 정상상태에서의 장시간 운전에 따른 코팅의 열화 특성을 평가하는 것이 더욱 중요하다.<sup>(5)</sup> 그 경우에는 버너리그 시험에서와 같은 급작스러운 파손 보다는 열차폐 코팅층 내부에 발생하는 미세적인 박리 현상이 더욱 중요한 문제가 될 수 있다. 지금까지 열차폐 코팅의 열피로(TF; Thermal Fatigue) 및 열기계 피로(TMF; Thermal Mechanical Fatigue)에 관한 연구는 많이 이루어져 왔지만,<sup>(5,6)</sup> 열차폐 코팅의 박리수명 평가에 관한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 열차폐 코팅의 등온산화시험을 통해, 열차폐 코팅의 열화에 따른 미세조직의 변화와 접착강도의 변화를 평가하고, 이러한 결과들을 분석하여 열차폐 코팅의 장시간 사용에 따른 박리수명을 예측하는 방법에 관한 연구를 수행하였다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : seok@skku.edu

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

\* 성균관대학교 기계공학부

\*\* 한전 KPS(주) G/T 정비기술센터 기술팀

## 2. 코팅 시험편 제작 및 열화

가스터빈 1단 블레이드 소재인 GTD-111DS를 사용하여 직경 25mm의 원기둥 형태의 코팅시험편을 Table 1과 같이 제작하였다.<sup>(7)</sup> 제작된 열차폐 코팅 시험편을 1100°C로 유지된 전기로에 투입한 후 800 시간까지 유지시간을 변화시키며 열화 시험편을 제작하였다. 또한 온도가 코팅 열화에 미치는 영향을 분석하기 위해 50 시간의 고정된 유지시간에 대하여, 퍼니스의 온도를 950°C에서 1350°C까지 변화시켜가며 시험편을 열화하였다. 그 밖에 950°C, 1050°C 및 1121°C 조건에 대해서는 200 시간까지 유지시간을 변화시키며 열화 시험편을 제작하였다. Table 2에 열화조건을 ● 기호로 표기하여 정리하였다.

## 3. 미세조직 분석을 통한 박리 조건 도출

Figs. 1~5에 열화조건에 따른 코팅층 단면의 미세조직 변화를 나타내었다. Fig. 6은 TGO의 두께와 열화시간과의 관계를 온도변화에 따라 나타낸 것이다. TGO의 두께는 시험 중앙부의 단면 미세조직 사진과 이미지 분석 프로그램을 이용하여 측정된 20 지점의 평균 두께이다. 열화온도가 증가할수록 TGO 두께의 증가율도 커짐을 알 수 있다. 열화시간이 길어짐에 따라 TGO 두께의 증가율은 점점 감소하고 있다.

**Table 1** Compositions of thermal barrier coating system

	Material	Coating Type	Thickness
Substrate	GTD111DS	-	3 mm
Bond Coat	MCrAlY	LVPS	248 $\mu\text{m}$
Top Coat	7~8% $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$	APS	472 $\mu\text{m}$

LVPS : Low Vacuum Plasma Spray

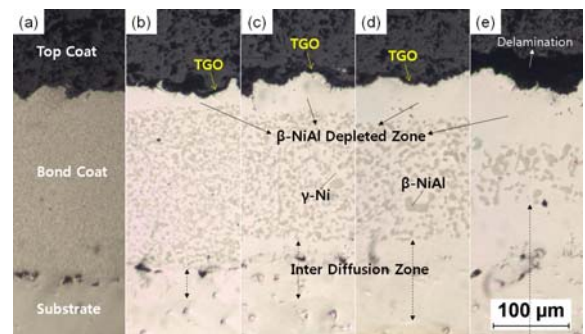
APS : Air Plasma Spray

**Table 2** Conditions for isothermal aging

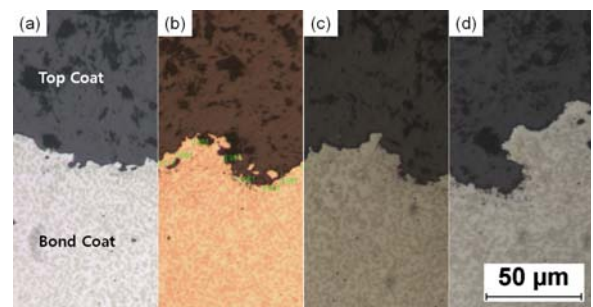
Temp. (°C)	Exposure Time (hr)					
	10	50	100	200	400	800
950	●	●	●	●		
1050	●	●	●	●		
1100	●	●	●	●	●	●
1121	●	●	●	●		
1151		●				
1200		●				
1350		●				

Fig. 7은 열화시간이 50 시간일 때 TGO 두께와 열화온도와의 관계를 나타낸 것이다. 950°C 일 때 TGO의 두께는 약 1  $\mu\text{m}$  이며 열화온도가 1000°C 이상이 되면 온도 증가에 따른 두께의 증가율이 급격히 증가함을 알 수 있다.

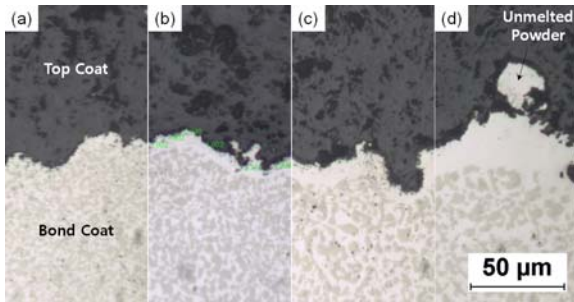
한편, Fig. 1에서 열화온도가 1100°C 일 때 열화시간이 800 시간인 경우 탑코팅과 본드코팅 사이에서 코팅층이 박리되어 있음을 알 수 있다. 열화온도가 1121°C 일 때는 Fig. 4로부터 열화시간이 200 시간일 때 코팅층이 박리된 것을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 5에서 열화온도가 1151°C와 1200°C 일 때는 50 시간 열화 된 경우에도 박리현상이 나타났다. 열화온도가 1100°C 보다 낮은 경우에는 Figs. 2~3에서와 같이, 열화시간이 200 시간이 될 때까지 박리현상이 관찰되지 않았다. Table 3은 광학현미경을 이용한 코팅 단면 분석을 통해 관찰된 박리 조건을 정리한 것으로, 각각의 열화조건에서 박리의 발생 여부를 보여준다. Table 3으로부터 열화온도가 1100°C일 때 800 시간 만에 박리되었고 열화온도가 증가됨에 따라 박리가 발생하는 시점이 빨라지고 있음을 알 수 있다.



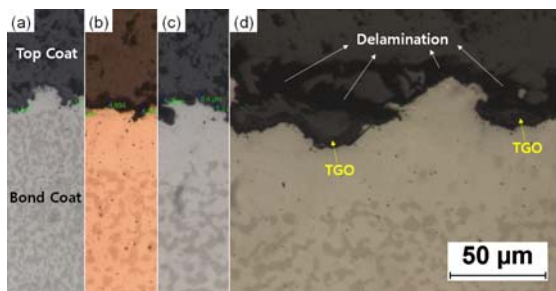
**Fig. 1** Microstructural evolutions of thermal barrier coating isothermally aged at 1100°C for (a) 0 h (b) 100 h (c) 200 h (d) 400 h (e) 800 h ( $\times 50$ )



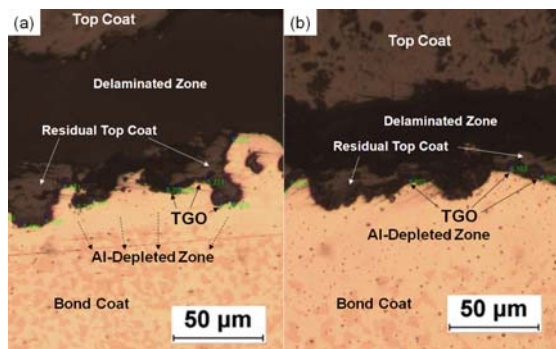
**Fig. 2** Microstructural evolutions of thermal barrier coating isothermally aged at 950°C for (a) 10 h (b) 50 h (c) 100 h (d) 200 h ( $\times 200$ )



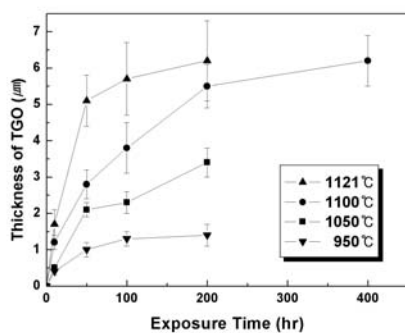
**Fig. 3** Microstructural evolutions of thermal barrier coating thermally aged at 1050°C for (a) 10 h (b) 50 h (c) 100 h (d) 200 h ( $\times 200$ )



**Fig. 4** Micrographs showing the microstructural evolutions of thermal barrier coating thermally aged at 1121°C for (a) 10h (b) 50h (c) 100h (d) 200 ( $\times 200$ )



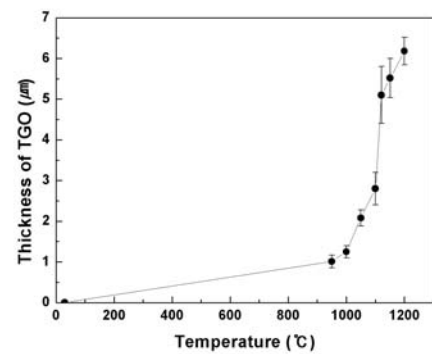
**Fig. 5** Micrographs showing the delaminations in the coating (a) 1151°C, 50 h (b) 1200°C, 50 h<sup>(8)</sup>



**Fig. 6** The relation between the thickness of TGO and the exposure time

**Table 3** Result of microscopic analysis for delamination in the coating (○; Delamination)

Temp.(°C)	Exposure Time (hr)					
	10	50	100	200	400	800
950	×	×	×	×		
1050	×	×	×	×		
1100	×	×	×	×	×	○
1121	×	×	×	○		
1151		○				
1200		○				



**Fig. 7** The relation between the thickness of TGO and temperature when the exposure time is 50 h<sup>(7)</sup>



**Fig. 8** Experimental setup for bond test

#### 4. 접착강도 시험을 통한 박리조건 도출

Fig. 8은 접착강도시험 방식을 보여주고 있다. 구체적인 시험편 제작 요령 및 시험 방식은 이전의 연구<sup>(7,8)</sup>에 자세히 설명되어 있다.

Fig. 9는 일정온도 조건에 대한 접착강도 시험결과를 보여주는 것으로서, 열화시간이 200 시간 이상이 되면 열차폐 코팅의 파손 모드가 탑코팅 파단에서 탑코팅과 TGO 계면 파단으로 전환되는 경향이 나타남을 알 수 있다. 탑코팅과 TGO 계면에서 파손이 발생한 것은, 강제로 파단시키기 이전에 이미 그부분이 박리되어 있었기 때문이다.<sup>(7)</sup>

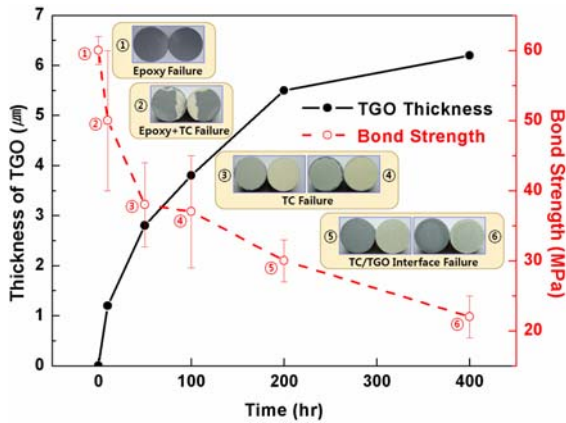


Fig. 9 Results of bond tests<sup>(7)</sup>

50 시간의 일정시간 열화 조건에서는 열화온도가 1151°C 이상이 되면 열차폐 코팅의 파손 형태가 탑코팅 파단에서 탑코팅과 TGO 계면 파단으로 전환되는 경향이 나타났다. 따라서 접착강도 시험을 통해 110°C 조건에서는 200시간 이후로, 그리고 50 시간의 일정시간 조건에서는 1151°C 이상에서 코팅층이 박리됨을 알 수 있었다. 1100°C에서 200 시간 및 400 시간 동안 열화된 경우, 광학현미경 분석을 통해서 박리가 되지 않은 것으로 관찰되었지만, 접착강도시험을 통해 강제적으로 파단시켰을 때의 파손 위치가 탑코팅과 TGO의 계면이었으므로 박리되는 조건에 포함시켜야 한다.

한편, Figs. 6~7에서 박리 조건에 해당하는 1100°C-200h 와 1151°C-50h 조건의 TGO 두께는 모두 5.5 μm 인 것으로 나타났다. 따라서 박리를 일으키는 TGO의 임계 두께가 5.5 μm 이며 TGO 두께가 그 이상이 되면 박리가 발생한다고 볼 수 있다.

### 5. 열차폐 코팅의 박리수명 평가

#### 5.1 박리지도 (Delamination Map)

Table 4는 박리지도의 작성방법을 설명하기 위해 본 연구에서의 모든 열화조건 및 그에 따른 박리여부를 종합적으로 정리하여 매트릭스 형태로 나타낸 것이다. 매트릭스는 두 단계의 음영으로 구분되어 있다. 광학현미경을 이용하여 코팅 단면을 관찰하였을 때 박리 현상이 관찰되지 않은 경우가 옅은 음영이며, 반대의 경우는 짙은 음영으로 지정하여 나타내었다. 셀 내부에 화살표가 기입된 부분은 실험하지 않고서도 박리 여부를 예측이 가능한 부분임을 의미한다. 음영이 지정되지 않은 부분은 실험을 수행하지 않

Table 4 Matrix for dividing the various aging conditions into the safe, delamination and spallation zone

	1200°C 50h○	→	→	→	→
	1151°C 50h●	→	→	→	→
	1121°C 10h	1121°C 50h■	1121°C 100h	1121°C 200h	→
	1100°C 10h□	1100°C 50h□	1100°C 100h■	1100°C 200h●	1100°C 400h○
	1050°C 10h	1050°C 50h□	1050°C 100h	1050°C 200h	
Temp	950°C 10h	950°C 50h□	950°C 100h	950°C 200h	

↑ Time

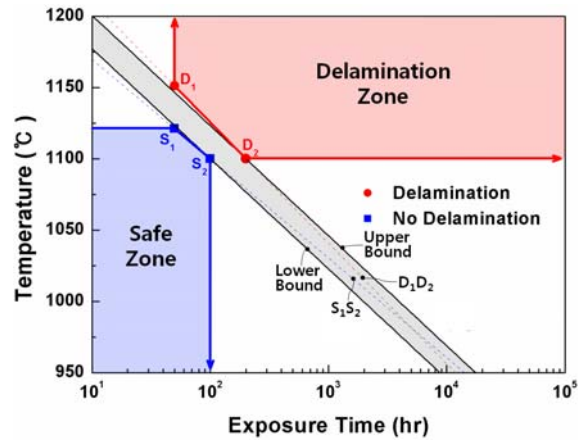


Fig. 10 Delamination map and the lower and upper bound of delamination life

았고 예측을 통해서도 박리여부를 판단할 수 없는 미지의 영역에 해당한다. 셀의 내부에 기호가 표시되어 있는 것은 접착강도 시험 조건에 해당한다. 이 중 접착강도 시험을 통해 박리 조건으로 확인 된 것은 ○ 기호로, 그렇지 않은 경우를 □ 기호로 표기하였다.

박리가 일어난 조건 중에서, 일정온도 조건에서 가장 빨리 박리가 일어난 1100°C-200h 와 일정시간 조건에서 가장 낮은 온도에서 박리가 된 1151°C-50h 의 경우 ● 기호로 표시하였다. 반대로, 박리가 일어나지 않은 조건 중에서 일정온도 조건에서 가장 시간이 긴 1100°C-100h 와 일정시간 조건에서 가장 온도가 높은 1121°C-50h 의 경우 ■ 기호로 표시하였다. 박리가 된 조건 및 박리가 되지 않은 조건에 대하여 각각 속이 채워진 도형을 이어 그래프 형태로 표현하면 Fig. 10과 같은 박리지도를 도출할 수 있다.

#### 5.2 박리지도를 이용한 박리수명 선도 도출

열화 온도와 열차폐 코팅 수명의 관계가 금속재료



의 S-N 선도와 같이 선형-대수 좌표계에서 서로 선형적인 관계라고 가정할 경우 안전 지역과 박리 지역의 경계는  $D_1$ 과  $S_1$  사이의 임의의 점과  $S_2$ 와  $D_2$  사이의 임의의 점을 지나는 직선이 된다. 본 연구에서는 안전영역의 두 점을 연결하는 직선  $S_1S_2$ 와 박리영역의 두 점을 연결하는 직선  $D_1D_2$ 의 기울기의 평균을 취하여 안전영역과 박리영역의 경계를 구분 짓는 선도의 기울기로 결정하였다. 그 경우  $S_2$ 를 지나는 직선과  $D_2$ 를 지나는 직선 사이의 공간이 바로 안전영역과 박리영역의 경계가 위치할 수 있는 곳에 해당하며 Fig. 10에 그러한 영역을 도시하였다.

5.3 박리수명 선도 도출 방법의 검증

Fig. 6의 TGO 두께 측정 결과를 이용하여 열화온도가 950°C, 1050°C 및 1121°C 일 때, TGO의 두께가 박리를 일으키는 임계 두께에 해당하는 5.5 μm 가 되는 시점을 곡선 접합을 통해 예측하였다. Fig. 11에 곡선 접합 결과와 곡선식 및 예측된 박리수명을 나타냈다. 모든 곡선은 지수함수이며 동일한 지수를 사용하며 계수만 달리함으로써 온도 변화에 따른 세 개의 서로 다른 접합곡선을 찾을 수 있었다. 접착강도 시험을 수행하지 않아 예측할 수 없었던 950°C, 1050°C 및 1121°C 조건에 대한 박리수명은 각각 7641 시간, 781 시간 및 120 시간으로 얻어졌다.

Fig. 12는 Fig. 10에서 도출한 박리수명 선도의 하한계 및 상한계와 TGO의 두께 측정 결과로부터 구해진 박리수명 데이터를 함께 도시한 것이다. TGO 두께 측정 결과 자체에는 어느 정도 오차가 포함되어 있고, 950°C의 경우 단수명 영역의 매우 적은수의 데이터만으로 장시간 수명을 예측한 것임에도 불구하고, 예측된 박리수명 데이터들은, 열화온도와 수명의 선형-대수 좌표계에서 거의 선형적인 관계를 나타내고 있으며 박리선도와도 거의 일치하는 경향을 보이고 있다. 따라서 열화온도와 수명이 선형적인 관계라고 가정하여 박리시도로부터 박리수명 선도를 도출했던 방식은 타당하다고 판단된다.

5.4 열차폐 코팅의 박리 수명 평가

Fig. 13은 본 연구를 통해 도출된 열차폐 코팅의 박리수명 선도와 문헌에 제시된 완전 파손 기준 코팅 수명 선도<sup>(9)</sup>를 함께 나타낸 것이다. 완전 파손이란 탑 코팅층의 Spallation이 발생한 경우에 해당하는데, 박리수명 선도와 완전 파손 기준 코팅 수명 선도의 기울기는 거의 같은 것으로 나타났다. Fig. 13에서 열화온도가 1100°C인 경우 완전 파손 시점은 1000 시간이며

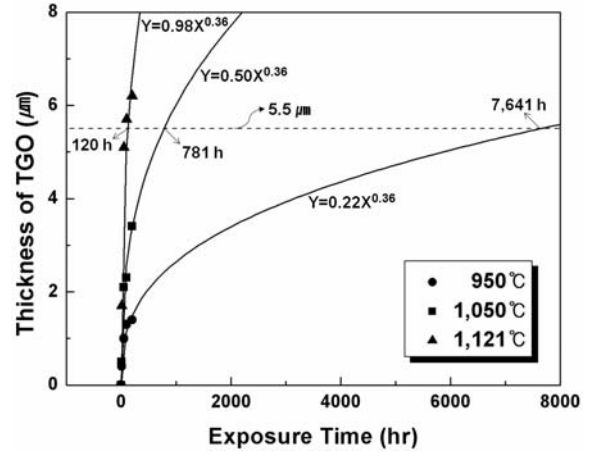


Fig. 11 Estimation of delamination life from curve fitting using the measured thickness of TGO

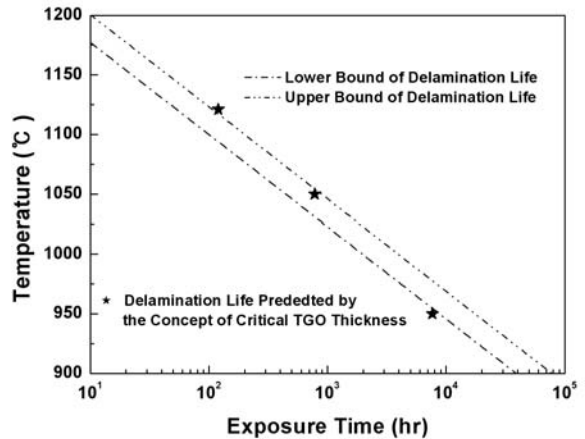


Fig. 12 Varification of the method for drawing delamination life diagram

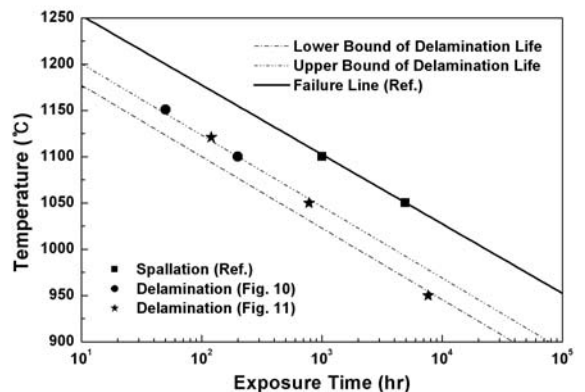


Fig. 13 The proportion of crack initiation life to total failure life

본 연구 결과로부터의 박리 시점은 200 시간이다. 따라서 1100°C에서 열차폐 코팅의 박리 시점은 전체 수명의 20% 정도 되는 시점임을 알 수 있다.

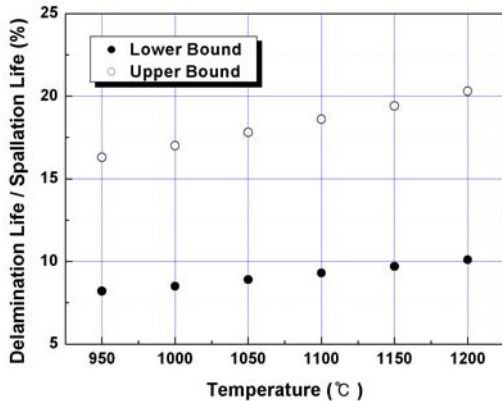


Fig. 14 Relation between the proportion of crack initiation life to the total failure life and temperature of thermal exposure

Fig. 14는 다양한 열화온도에 대하여 전체 수명에서 박리수명이 차지하는 비율을 계산하여 그 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 온도가 증가할수록 박리수명이 전체 수명에서 차지하는 비율이 증가하고 있지만 950°C에서 1200°C까지 온도가 변화하는 동안 그 차이는 5% 미만이며 전 온도 범위에 대하여 상한계 기준일 때의 박리수명은 전체 수명의 25% 미만이라고 볼 수 있다. 이것은 본 연구의 대상인 상용화된 열차폐 코팅의 경우 박리가 발생하더라도 완전 파손에 이르기까지는 전체 수명의 75% 이상에 해당하는 안전의 여유가 존재함을 의미하는 것이다.

열차폐 코팅은 가스터빈 블레이드의 최외곽에 적용되며, 1주기 운전된 후에는 스트리핑(Stripping)이라는 과정을 거쳐 제거되고, 다시 2주기 운전을 시작하기 전에 새롭게 코팅하게 되는 소모품 개념으로 사용되고 있다. 보통 1주기는 등가운전시간(EOH: Equivalent Operating Hours)으로 약 24000 시간으로 알려져 있다.<sup>(10)</sup> 이러한 재생·정비 주기는 블레이드 제작사에서 규정하고 있으며, 열차폐 코팅의 수명은 1주기에 해당하는 시간 동안 안전하다는 보장이 마련되어야 한다. 따라서 본 연구에서 도출된 박리수명 선도를 이용하면 새롭게 개발된 코팅에 대한 안전여유도를 판단할 수 있을 것이다.

## 6. 결 론

(1) 시간별, 온도별 접착강도 시험을 통해 구해진 박리 조건을 시간과 온도의 매트릭스 형태로 정리한 후 이를 그래프로 표현하여 박리지도를 도출하였다

며, 박리지도를 이용하여 열차폐 코팅의 박리수명 선도를 도출하는 방법을 제시하였다.

(2) 박리수명 선도를 이용하여 예측한 박리수명과 문헌에 제시된 열차폐 코팅의 파손수명을 비교한 결과 열차폐 코팅이 박리 되는 시점은 완전 파손 수명의 약 25% 이내임을 알 수 있었다.

(3) 열차폐 코팅에 대한 일정온도 조건 및 일정 시간 조건의 등온산화시험을 수행하고, 각 시험편에 대한 접착강도 시험을 통해 단순히 파손 위치를 확인 하는 것으로도 열차폐 코팅의 박리 수명을 예측할 수 있음을 알 수 있었으며 박리 수명 선도를 활용하는 경우 블레이드의 보다 안전한 설계가 가능할 것이다.

## 후 기

본 논문은 BK21 사업과 산업자원부의 전력산업연구개발사업의 지원을 받아 이루어 졌습니다.

## 참고문헌

- (1) Martena, M., Botto, D., Fino, P., Sabbadini, S., Gola, M. M. and Badini, C., 2006, "Modelling of TBC system failure: Stress Distribution as a Function of TGO Thickness and Thermal Expansion Mismatch," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, No. 3, pp. 409~426.
- (2) Gell, M., Jordan, E., Vaidyanathan, K., McCarron, K., Barber, B., Sohn, Y. H. and Tolpygo, V. K., 1999, "Bond Strength, Bond Stress and Spallation Mechanisms of Thermal Barrier Coatings," *Surface & Coatings Technology*, Vols. 120~121, pp. 53~60.
- (3) Mats Eskner, Mechanical Behavior of Gas Turbine Coatings, Doctoral Thesis, 2004.
- (4) Stöver, D., Pracht, G., Lehmann, H., Dietrich, M., Döring J. -E. and Vaßen, R., 2004, "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.
- (5) Sohn, Y. H., Kim, J. H., Jordan, E. H., Gell, M.,

- 2001, "Thermal Cycling of EB-PVD/MCrAlY Thermal Barrier Coatings: 1. Microstructural Development and Spallation Mechanisms," *Surface and Coatings Technology*, Vols. 146~147, pp. 70~78.
- (6) Baufeld, B., Tzimas, E., Mullejans, H., Peteves, S., Bressers, J. and Stamm, W., 2001, "Thermal-Mechanical Fatigue of MAR-M 509 with a Thermal Barrier Coating," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 315, pp. 231~239.
- (7) Kim, D. J., Lee, D. H., Koo, J. M., Song, S. J., Seok, C. S. and Kim, M.Y., 2008, "Evaluation of Bond Strength of Isothermally Aged Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating," *Transactions of the KSME A*, Vol. 32, No. 7, pp. 569~575.
- (8) Kim, D. J., Seok, C. S., Lee, D. H., Koo, J. M., Kim, M. Y., Yang, S. H. and Park, S. Y., 2007, "Evaluation of a Degradation of Thermal Barrier Coating for Gas Turbine Blade," *Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting*, pp. 99~104.
- (9) Echsler, H., Renusch, D. and Schutze, M., 2000, "Bond Coat Oxidation and Its Significance for Life Expectancy of Thermal Barrier Coating Systems," *Materials Science and Technology*, Vol. 20, pp. 307~318.
- (10) Kim, M. Y., Park, S. Y. and Yang, S. H., 2006, "Properties Variation According to Heat Treatment for Gas Turbine Blade(Bucket) Material Of GTD-111DS," *Transactions of the KSME A*, Vol. 30, No. 3, pp. 349~355.