

TGO 성장이 열피로 수명에 미치는 영향 평가

Evaluation of Effect on Thermal Fatigue Life Considering TGO Growth

송현우¹, 이정민¹, 김용석¹, 오창서¹, 한규철¹, 이영제², 구재민², 석창성²✉
Hyunwoo Song¹, Jeong-Min Lee¹, Yongseok Kim¹, Chang-Seo Oh¹, Kyu Chul Han¹,
Young-Ze Lee², Jae-Mean Koo², and Chang-Sung Seok²✉

¹ 성균관대학교 기계공학과 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

² 성균관대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

✉ Corresponding author: seok@skku.edu, Tel: +82-31-290-7446

Manuscript received: 2014.5.19 / Revised: 2014.9.3 / Accepted: 2014.10.27

Thermal barrier coating (TBC) which is used to protect the substrate of gas turbine is exposed to high temperature environment. Because of high temperature environment, thermally grown oxide (TGO) is grown at the interface of thermal barrier coating in operation of gas turbine. The growth of TGO critically affects to durability of TBC, so the evaluation about durability of TBC with TGOs of various thickness is needed. In this research, TGO was inserted by aging of TBC specimen to evaluate the effect of the TGO growth. Then thickness of TGO was defined by microstructure analysis, and thermal fatigue test was performed with these aging specimens. Finally, the relation between thermal fatigue life and the TGO growth according to aging time was obtained.

Key Words: Thermal Barrier Coating (열차폐코팅), Thermal Fatigue (열피로), Degradation(열화), Thermally Grown Oxide (열생성산화물), Micro-Structure Analysis (미세조직분석)

기호설명

h = TGO thickness

t = Aging time

N = Thermal fatigue life

1. 서론

열차폐코팅은 탑코팅과 본드코팅으로 구성되어 있으며,¹ 외부의 온도를 약 150°C 감소시켜 모체를 보호한다.² 하지만 열차폐코팅은 가스터빈의 잦은 가동 및 정지로 인하여 반복적인 열피로를 받게 되

며, 이로 인하여 열차폐코팅의 파손이 발생한다.^{3,4} 이러한 열차폐코팅의 파손은 가스터빈 블레이드의 파손으로 이어지기 때문에, 열차폐코팅의 열피로 수명에 대한 연구가 반드시 선행되어야 한다.

또한 고온 환경에서는 열차폐코팅의 계면에서 열생성산화물(TGO)이 성장된다. 이러한 TGO의 성장은 코팅 박리 수명에 미치는 영향이 크기 때문에,^{5,6} 이를 고려하여 열차폐코팅의 박리 수명을 평가해야 한다. 열차폐코팅에 대한 열피로 시험의 경우 실제 가스터빈 온도를 고려하여 1000°C-1150°C 범위의 다양한 온도 조건에서 수행되고 있다.^{3,7,8}

이와 같은 TGO의 성장거동은 일반적으로 등은

열화 시험에 의하여 평가되고 있으며, 열화 시간에 대하여 맥함수형태로 TGO 성장곡선을 나타내고 있다.⁹

본 연구에서는 열차폐코팅 시험편을 열화하여 TGO를 삽입하고, 미세조직 분석을 통하여 열차폐코팅의 TGO 성장곡선을 도출하였다. 도출된 TGO 성장 곡선을 토대로 특정 두께의 TGO를 삽입하였으며, 이에 대한 열피로 시험을 수행하여 열피로 수명을 도출하였다. 열피로 시험 결과로부터 열화 시간에 따른 TGO의 성장이 열피로 수명에 미치는 영향을 평가하였으며, TGO 두께와 열피로 수명 사이의 관계를 수식적으로 제시하였다.

2. 등은 열화 시험

2.1 시험편 형상

본 연구에서는 신인환, 김대진 등의 열차폐코팅 시험편과 동일한 형상을 적용하여, Fig. 1과 같은 두께 3mm, 직경 25mm의 코인형 시험편을 제작하였다.^{8,10} 열차폐코팅 시험편은 탑코팅, 본드코팅 및 모재로 구성되었으며, 각 층의 재질을 Table 1에 나타내었다. 또한 Fig. 2와 같이 단면 분석을 수행하여 탑코팅과 본드코팅 층의 두께를 각각 30회 측정하였으며, 이를 통해 각 층의 평균 두께를 도출하였다. 단면 분석을 통하여 측정된 각 층의 평균 두께를 Table 2에 나타내었다.

2.2 시험 조건

가동환경하에서의 TGO 성장은 열차폐코팅의 주요 파손 원인 중 하나로 알려져 있으며, TGO가 형성되는 탑코팅-본드코팅 계면의 온도는 약 900℃이다.¹¹ 따라서 본 연구에서는 코팅 계면에서 열화 시간에 따른 TGO 성장 곡선을 획득하기 위하여 등은 열화시험을 900℃의 온도에서 수행하였으며, 코팅이 박리되지 않는 범위인 0, 25, 50, 100, 200, 500, 1000 시간 동안 열화를 수행하였다.

2.3 시험 결과

등을 열화 시험을 완료한 열차폐코팅 시험편에 대하여 Fig. 3과 같이 SEM 분석을 수행하였으며, 이를 통해 코팅 계면에 생성된 TGO의 두께를 측정하였다. TGO의 두께는 KanScope 3.5 프로그램을 이용하여 도출한 정량적 TGO 면적으로부터 도출하였으며, TGO 두께를 10회 측정 후 평균 두께를 도출하여 Table 3에 나타내었다. 열화를 수행하지

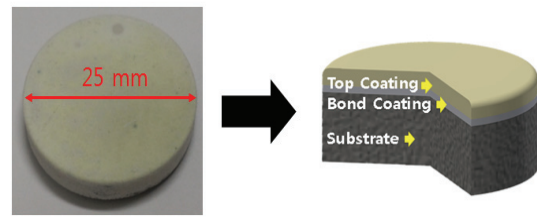


Fig. 1 Coin-type APS TBC specimen

Table 1 Materials of TBC specimen

	Materials
Top coat	7-8% Y ₂ O ₃ -ZrO ₂
Bond coat	NiCrAlY
Substrate	IN738LC

Table 2 Average thickness of top coat and bond coat

	Average thickness (μm)
Top coat	513
Bond coat	162

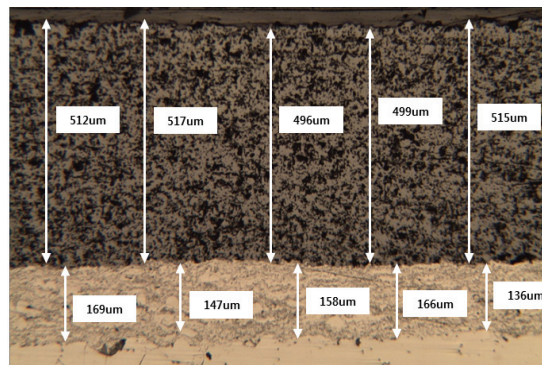


Fig. 2 Measurement of top coat and bond coat thickness

Table 3 TGO thickness according to aging time

Aging time (h)	TGO thickness (μm)
0	0.10
25	1.62
50	1.72
100	2.39
200	2.4
500	4.25
1000	4.41

않은 0시간 열화 시험편의 경우에도 0.1μm의 TGO가 측정되었는데, 이는 고온의 코팅 용사과정에서 생성된 Al 산화층으로 판단된다.

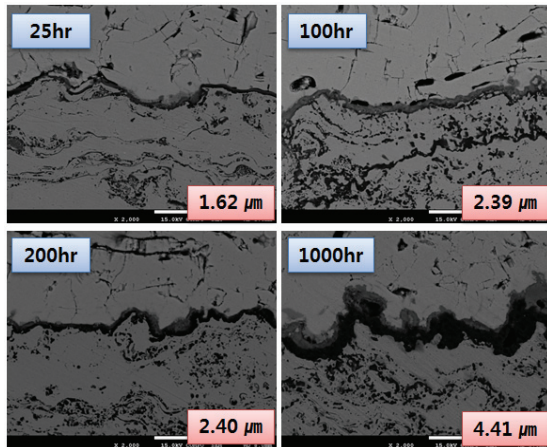


Fig. 3 Measurement of TGO thickness

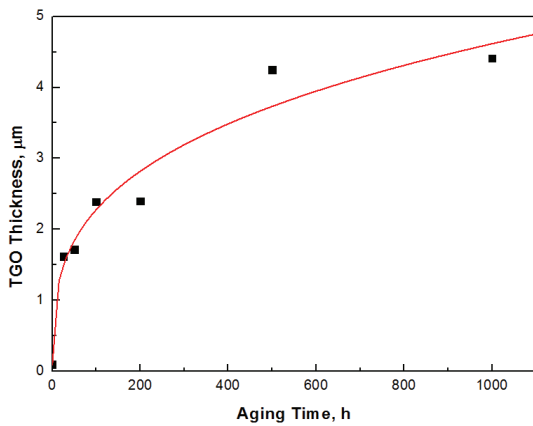


Fig. 4 TGO growth curve

$$h = 0.56 * (t + 0.0036)^{0.31} \quad (1)$$

열화 시간에 따른 TGO 두께 측정 결과로부터 900℃에서의 APS 코팅의 TGO 성장 곡선을 도출하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다. 또한 열화 시간에 따른 TGO 성장 식을 식(1)에 나타내었다. 식(1)에서 h는 TGO 두께이고 t는 열화 시간을 나타낸다.

3. 열피로 시험

3.1 열피로 시험편

본 연구에서는 TGO가 열피로 수명에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 열피로 시험을 수행하기 전에 900℃의 온도에서 등온 열화 수행하여 코팅

Table 4 TGO thickness of thermal fatigue specimen

Aging time, h	TGO thickness (μm)
0	0.10
50	1.85
200	2.82
800	4.31

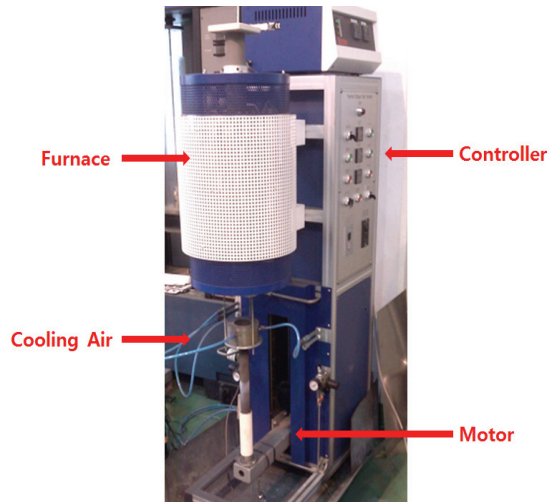


Fig. 5 Experimental equipment for thermal fatigue test

계면에 TGO를 삽입하였다. 열피로 시험편 내부에 삽입된 TGO 두께는 식(1)의 TGO 성장 식에 따라 증가한다고 가정하였으며, TGO 성장곡선으로부터 TGO 두께가 크게 변하는 지점으로 판단되는 0, 50, 200, 800 시간 동안 열화를 수행하였다. 각각의 열화 시간에 대한 삽입된 TGO 두께를 Table 4에 나타내었다.

3.2 열피로 시험 장치 및 시험 조건

본 연구에서는 시험편을 퍼니스 내부와 외부로 자동으로 이송시키는 Fig. 5와 같은 시험 장치를 사용하여 열피로 시험을 수행하였다. 열피로 시험을 수행하기에 앞서 1150℃의 퍼니스에서 15분 가열 후, 5분 동안 퍼니스 외부에서 상온의 공기를 분사하여 냉각하는 과정동안 열차폐코팅 계면에서의 온도를 측정하였으며, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 이 때 시험편 계면의 온도가 목표온도인 1150℃ 및 25℃ 조건에 충분히 도달하였기 때문에 15분 가열 5분 냉각의 과정을 반복하도록 구성하여 열피로 시험을 수행하였으며, 이는 김용석 등의 열피로 시험 조건과 일치한다.¹²

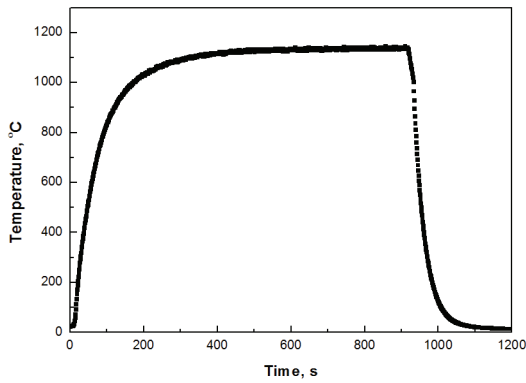


Fig. 6 Temperature measurement at coating interface

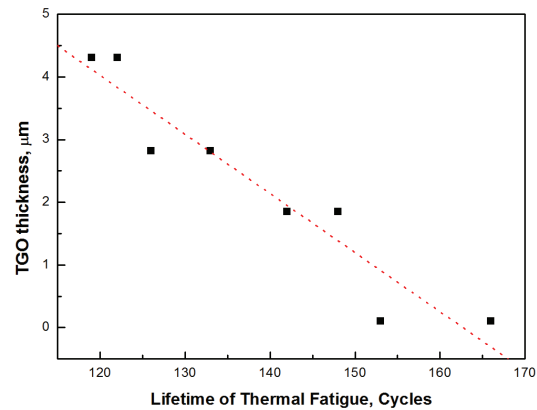


Fig. 7 Thermal fatigue life according to TGO thickness

Table 5 Results of thermal fatigue test

Aging time, h	Thermal fatigue life, Cycle
0	166
	153
50	148
	142
200	133
	126
800	122
	119

3.3 열피로 시험 결과

본 연구에서는 열피로 시험편 내부에 TGO를 삽입한 뒤 열피로 시험을 수행하였으며, 코팅이 완전히 박리되는 시점을 기준으로 열피로 수명을 측정하였다. Table 5는 열피로 시험편의 초기 열화 시간과 열피로 시험을 통하여 도출된 열피로 수명을 나타낸 것이다. 열피로 시험 결과로부터 초기 열화 시간이 증가함에 따라서 열피로 수명이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 열피로 수명의 감소는 열화 시간에 대하여 선형적인 관계를 나타내지 않고, 초기 열화 시간이 증가함에 따라서 점차 완만한 수명 감소 경향을 나타내었다. 이는 열화 시간에 따른 코팅 내부의 손상보다는 TGO 두께가 증가함에 따라 발생하는 내부 응력의 크기가 더 큰 영향을 주기 때문이라고 판단된다. 이와 같은 시험 결과는 열화 시간이 증가함에 따라 접착강도가 감소하는 김대진 등¹⁰의 연구 결과와 일치한다.

3.4 TGO-열피로 수명 관계 도출

본 연구에서는 TGO가 열피로 수명에 미치는

영향을 평가하기 위하여 삽입된 TGO 두께에 따른 열피로 수명 선도를 도출하였으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다. 또한 열피로 수명 선도로부터 TGO 두께와 열피로 수명 사이의 관계를 수식적으로 도출하였으며, 이를 식(2)에 나타내었다. 식(2)에서 h는 TGO 두께를, N은 열피로 사이클 수를 나타낸다. 도출된 수식은 TGO 두께 측정을 통하여 열피로 수명 예측에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

$$h = 0.94 * N + 15.34 \tag{2}$$

4. 결론

본 연구에서는 등온 열화를 통하여 열피로 시험편 내부에 TGO를 삽입한 뒤 열피로 시험을 수행하였다. 열피로 시험 결과로부터 TGO 두께에 따른 열피로 수명 선도를 도출하였으며, 이를 통해 삽입된 TGO 두께가 증가함에 따라서 열피로 수명이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 TGO 두께가 증가함에 따라서 내부에 더 큰 응력이 발생하기 때문이라고 판단된다. 따라서 LVPS(Low Vacuum Plasma Spray)와 같이 코팅 제작 시 계면에서 발생하는 Al 산화층을 최소화하는 용사 기법을 적용함으로써, 열차폐코팅의 열피로 수명을 향상을 기대할 수 있다. 또한 열피로 수명 선도로부터 TGO 두께와 열피로 수명 사이의 관계를 수식적으로 도출하였으며, 도출된 수식은 TGO 두께에 따른 열피로 수명 예측에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이는 동일한 형상을 갖는 열차폐 코팅에 한하여 제한적으로 적용이 가능하기 때문에, 응력을 통한 열피로 수명예측을 위하여 TGO

두께와 응력의 관계에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 한다.

후 기

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (no. 2011-0020024과 2012M2A8A1029423).

REFERENCES

1. Moon, Y. K., Sang, Y. P., Sung, H. Y., Hee, S. C., Won, K., and Kuk, H. S., "Analysis of Damage Trend for Gas Turbine 1st Bucket Related to the Change of Models," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 6, pp. 718-724, 2007.
2. 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, pp. 39-52, 2006.
3. Quadackers, W. J., Shemet, V., Sebold, D., Anton, R., Wessel, E., and Singheiser, L., "Oxidation Characteristics of a Platinized MCrAlY Bond Coat for TBC Systems during Cyclic Oxidation at 1000 °C," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 199, No. 1, pp. 77-82, 2005.
4. Koo, J. M. and Seok, C. S. "Design Technique for Improving the Durability of Top Coating for Thermal Barrier of Gas Turbine," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 1, pp. 15-20, 2014.
5. Tomimatsu, T., Zhu, S., and Kagawa, Y., "Effect of Thermal Exposure on Stress Distribution in TGO Layer of EB-PVD TBC," *Acta Materialia*, Vol. 51, No. 8, pp. 2397-2405, 2003.
6. Evans, A. G., He, M. Y., and Hutchinson, J. W., "Mechanics-Based Scaling Laws for the Durability of Thermal Barrier Coatings," *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 3-4, pp. 249-271, 2001.
7. Swadźba, R., Wiedermann, J., Hetmańczyk, M., Swadźba, L., Mendala, B., et al., "Microstructure Degradation of EB-PVD TBCs on Pd-Pt Modified Aluminide Coatings under Cyclic Oxidation," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 237, No. 16-22, pp. 16-22, 2013.
8. Shin, I. H., Koo, J. M., Seok, C. S., Yang, S. H., Lee, T. W., and Kim, B. S., "Estimation of Spallation Life of Thermal Barrier Coating of Gas Turbine Blade by Thermal Fatigue Test," *Surface and Coating Technology*, Vol. 205, pp. 157-160, 2010.
9. Poza, P., Gómez-García, J., and Múnez, C. J., "TEM Analysis of the Microstructure of Thermal Barrier Coatings after Isothermal Oxidation," *Acta Materialia*, Vol. 60, No. 20, pp. 7197-7206, 2012.
10. Kim, D. J., Lee, D. H., Koo, J. M., Song, S. J., Seok, C. S., and Kim, M. Y., "Evaluation of Bond Strength of Isothermally Aged Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 7, pp. 569-575, 2008.
11. Moridi, A., Azadi, M., and Farrahi, G. H., "Thermo-Mechanical Stress Analysis of Thermal Barrier Coating System considering Thickness and Roughness Effects," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 243, pp. 91-99, 2014.
12. Kim, Y. S., Lee, D. K., Lee, J. M., Song, H. W., Kim, S. H., et al., "A Study on Thermal Fatigue Life Variation according to Thermal Exposure Time," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 598, pp. 276-280, 2014.