

# 열 및 기계적 반복하중 하의 내열금속 표면 홀 주변 산화막의 변형 및 응력해석<sup>§</sup>

이 봉 훈\* · 강 기 주\*†

\* 전남대학교 기계시스템공학부

## Cracking Near a Hole on a Heat-Resistant Alloy Subjected to Thermo-Mechanical Cycling

Feng-Xun Li\* and Ki-Ju Kang\*†

\* Dept. of Mechanical Systems Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received May 13, 2010 ; Revised June 15, 2010 ; Accepted June 17, 2010)

**Key Words** : Thermally Grown Oxide(산화막), Thermo-Mechanical Fatigue(열-기계피로), Thermal Stress(열 응력)

**초록**: 가스터빈엔진 내의 블레이드에서는 표면에 외부의 찬 공기를 흘려주는 작은 냉각 홀들을 가공하고 열 차단 코팅시스템을 코팅하는 방법으로 기지금속을 고온에서 보호한다. 열 차단 코팅은 열 피로 과정에서 산화막의 성장 및 접합층과 산화막의 열팽창계수의 불일치로 산화막내부에 잔류응력이 발생하며 궁극적으로 코팅층의 분리를 유발한다. 본 연구에서는 내열합금 시편 표면에 작은 홀을 가공하여 여러 가지 고온 유지 조건에서 열 및 기계적 피로 시험을 수행하여 홀 주위의 산화막의 변형을 관찰하였다. 실험결과 기계적 피로가 홀 주위의 산화막의 변형에 중요한 영향을 미치며, 동일한 산화막 두께에서 고온 유지 시간이 짧을수록 변형이 쉽게 발생 하였다. 또한 본 연구에서는 홀 주위 산화막의 응력해석을 위한 이론적인 연구도 시도되었다.

**Abstract**: In the hot section of a gas turbine, the turbine blades were protected from high temperature by providing a thermal barrier coating (TBC) as well as by cooling air flowing through internal passages within the blades. The cooling air then passed through discrete holes on the blade surface, creating a film of cooling air that further protects the surface from the hot mainstream flow. The holes are subjected to stresses resulting from the lateral growth of thermally grown oxide, the thermal expansion misfit between the constituent layers, and the centrifugal force due to high-speed revolution; these stresses often result in cracking. In this study, the deformation and cracks occurring near a hole on a heat-resistant alloy subjected to thermo-mechanical cycling were investigated. The experiment showed that cracks formed around the hole depending on the applied stress level and the number of cycles. These results could be explained by our analytic solution.

### 1. 서 론

항공기 추진용 및 발전용으로 사용되는 가스터빈 엔진의 부품은 고온 노출환경에서 작동되므로 부품들의 내열성은 엔진의 수명에 직접적인 영향을 주게 된다. 따라서 고온에서 가스터빈의 블레

이드를 보호하기 위하여 블레이드에서 냉각공기층을 형성하는 방법과 표면에 열차단코팅층(Thermal Barrier Coating; TBC)을 코팅하는 방법을 사용한다. 냉각 공기는 블레이드 내부의 순환통로를 통하여 내부 냉각을 실현함과 동시에 블레이드 표면에 작은 홀(hole)을 가공하여 내부 순환통로와 이어줌으로써 냉각 공기가 블레이드 표면에서 분사되어 블레이드의 표면을 외부 열로부터 차단한다. 열 차단 코팅 시스템은 금속기지 위의 접합층(Bond Coat; BC)과 열 성장 산화막(Thermal Grown Oxide; TGO), 그리고 그 위의 다공성 지르코니아

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 라테나콘도) 발표논문임.

† Corresponding Author, kjkang@Chonnam.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

단열층인 TBC 로 구성되어 있다.<sup>(1)</sup> 고온에서 생성된 TGO 는 TBC 와 함께 금속기지를 고온부식으로 부터 보호하고 금속부품의 온도를 낮추어주는 반면에 TGO 자체의 불안정성으로 열 차단 코팅시스템의 내구성에 영향을 미치게 된다. TGO 의 불안정성은 BC 와의 열팽창계수의 차이, 반복적인 열 및 기계적 피로하중, 그리고 BC 표면의 기하학적 형상 등에 기인한다.

엔진 내의 부품은 작동 및 정지과정에서 고온과 상온을 주기적으로 반복하게 된다. 이것은 블레이드 내의 열차단시스템에 열 피로와 기계적 피로를 동시에 유발한다. 즉 열-기계적 피로(thermo-mechanical cycling)하중의 작용하에 TGO 에 응력이 반복적으로 작용한다. 이러한 응력은 TGO 의 분리(separation), 좌굴(buckling), 균열(cracking) 등을 발생시키며 궁극적으로 TBC 의 파손을 초래한다. 따라서 반복적인 열 피로환경에서 TGO 의 내구성 평가에 관한 연구는 많이 발표되었으나<sup>(2-5)</sup> 표면 홀 주위에 산화막의 내구성 평가에 관한 연구는 거의 발표되지 않았다. 하지만 작동과정에서 홀 주위에 응력 집중이 발생할 수 있으므로 홀 주위 TGO 의 내구성에 관한 연구를 진행할 필요가 있다.

Kang 등<sup>(6-8)</sup>은 고온 TGO 의 기계적 물성 측정을 위하여 박막 시험편용 고온 크릴 시험기를 연구 제작하였으며 TGO 의 인장 및 크릴특성 측정에 성공하였다. 본 시험기는 수 내지 수십 N 수준의 피로하중과 1300°C 까지 열 하중을 각각 독립적으로 가할 수 있어 열-기계적 피로에 대한 흠의 변형측정에 유용한 수단이다. 본 시험기를 이용하여 측정된 내열금속(Fecralloy) 및 그 표면에 생성된 TGO 의 고온인장 특성은 본 연구의 이론해석에 사용되었다.

Karlsson 등<sup>(9,10)</sup>은 열 피로과정에서 TGO 의 성장 및 열 팽창계수의 차이로 발생하는 응력을 이론적으로 해석하였다. 하지만 Karlsson 등의 해석에서 이용된 여러 가지 재료물성들은 기존문헌에 기초하여 가정되었으며 실제 TGO 거동을 예측하기에 일정한 한계가 있었다.

본 연구에서는 블레이드 표면 홀의 고온 작동과정에서의 내구성을 평가하기 위하여 Fecralloy 시험편 표면에 작은 홀을 가공하여 열 및 기계적 피로 환경에서 홀 주위 TGO 의 변형을 관찰하였다. 실험에서 발견된 균열현상을 이해하기 위해서 이론모델을 세우고 이에 의한 예측결과를 실험결과와 비교하였다.

## 2. 시편제작 및 실험조건

### 2.1 시편제작

실험 시편은 내열성 발열체 소재이면서 가스터빈엔진의 열차단막(TBC)의 BC 상부에 생성하는 것과 유사한 알루미늄 TGO 을 생성하는 Fecralloy (Fe72.8/Cr22/Al5/Y0.02/Zr0.09)를 사용하였다. 두께가 0.5 mm의 Fecralloy 박판을 와이어 커팅을 이용하여 길이, L=50 mm, 폭, W=5 mm인 직사각형 쿠폰(Coupon)형태로 제작하였다. 시편 표면은 다이아몬드 콤파운드(Diamond compound 3 μm)로 연마하였으며 미니 드릴로 시편 센터부분에 직경이 1 mm인 홀을 가공하였다. 가공 후 홀 내부 표면을 매끄럽게 하기 위하여 다이아몬드 콤파운드(1 μm)를 이용하여 홀 내부 표면을 연마(Polishing) 하였다. Fig. 1 은 홀이 가공된 시편 형상이다. 홀의 변형을 관찰하기 위하여 FE-SEM 을 이용하였다.

### 2.2 실험 장치

시험기는 자체 개발한 미소 재료시험기를 사용하였다. Fig. 2 는 시험기의 개략도를 나타내고 있다. 시편에 전기를 가하여 발생하는 저항열(Joule Heat)을 사용하여 시편을 가열하였다. 시험기 전방에 시편의 온도와 시편 표면에 형성되는 TGO 의 두께를 실시간으로 측정하기 위한 파장이 다른 2 개의 적외선온도계(OMEGA 사 OS554-v1-6, Chino 사 IR-FA1NN)가 설치되었다. 시험기의 상부에는 시편에 하중을 가할 수 있는 천칭형식의 저울이 설치되었다. 이 저울은 지렛대 위에 설치된 이동 추와 고정 추를 사용하여 원하는 크기의 하중을 시간에 따라 조절할 수 있는 기능이 있다. Fig. 3 은 실험결과로서 시간에 따른 하중과 온도 변화를 보여준다. 실험 장치에 관한 자세한 설명은 참고문헌<sup>(6,7)</sup>에 기술되어 있다.

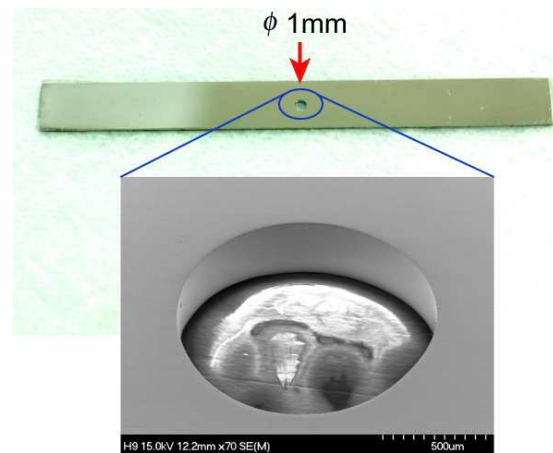


Fig. 1 Specimen and surface profile of the hole.

Table 1 Experimental condition

Loading type	Maximum temperature	Applied mechanical stress	Number of cycles		
			1 (static)	20	200
Thermal cycling	1200°C	0MPa	●	●	●
Thermo-mechanical cycling		0.5MPa	●	●	-

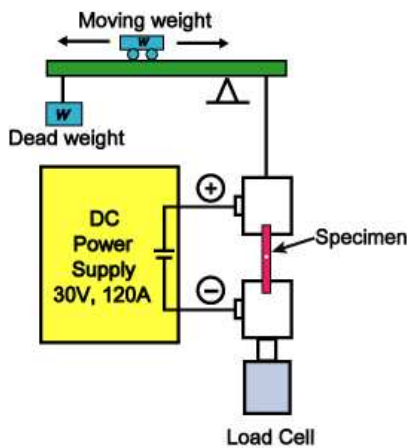


Fig. 2 Block diagram of the micro-creep tester

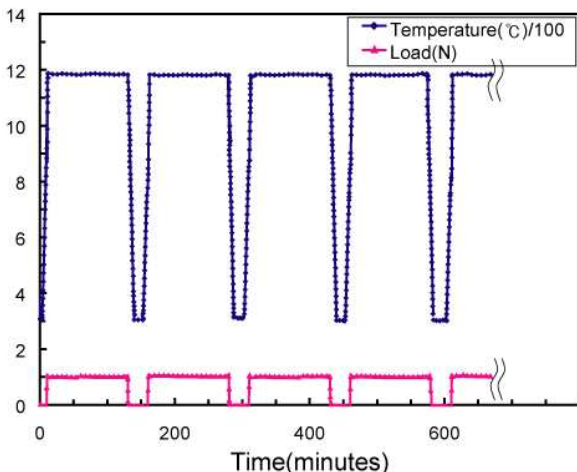


Fig. 3 Example of data measured during a thermo-mechanical cyclic test

### 2.3 실험조건

실험 조건은 열 피로 실험 및 열-기계적 피로 실험에 따라 그리고 사이클 수에 따라 6 가지로

분류하였다. 피로실험은 각각 1, 20 및 200 사이클로 하였으며 매 사이클은 가열과정(heating), 고온 유지과정(hold at high temperature), 냉각과정(cooling) 및 상온유지과정(hold at room temperature)을 경과하였다. 냉각, 가열 및 상온 유지과정은 각각 5분, 5분, 2분으로 하였다. 고온 유지과정에서 사이클 수에 무관하게 일정한 두께의 TGO 형성하기 위하여 최고온도에서 유지시간을 다르게 하였다. 즉 등온유지 정적 실험(1 사이클)에서 고온유지시간을 10시간, 20 사이클과 200 사이클인 경우 각각 30분과 3분으로 하였다.<sup>(11)</sup> 열-기계적 피로실험에서는 열 사이클과 동시에 고온 유지구간에서 시편에 응력  $\sigma_{max}=0.5MPa$  의 기계적 피로 하중을 가하였다. 냉각과정이 시작됨에 따라 외부하중은 제거되었다. Table 1 은 이상의 여러 가지 시험조건을 유형을 보여주고 있다. 1200°C 에서 200 사이클 0.5MPa 실험에서는 시편에 전반적인 고온 크리핑장 현상이 발생하였기에 결과분석에서 제외하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 사이클 증가에 따른 TGO 변형

Fig. 4 는 1200°C 에서 열 피로 실험에서 홀 주위 TGO 의 변형 형상이다. 그림에서 세 시편들의 최종 TGO 두께는 동일함에도 불구하고 사이클 수가 증가함에 따라 변형이 증가하였다. 또한 20 사이클에서 홀 주위 TGO 의 크랙이 발생하였으며 200 사이클에서는 매우 선명한 크랙들이 나타났다. 이러한 현상은 냉각과정에서 기지금속(substrate)과 TGO 에서 압축응력이 증가함에 따라 기지금속에서 보다 쉽게 소형변형이 발생하고, 다음 사이클 가열과정에서 TGO 에 인장응력이 유발된 것으로 추정된다.

Fig. 5 는 1200°C 에서 열-기계적 피로 실험에서 홀 주위 산화막의 변형 형상이다. 그림에서와 같이 열-기계적 피로 실험에서도 사이클 수가 증가함에 따라 TGO 의 변형이 더욱 선명하게 나타났다.

### 3.2 기계적 하중의 영향

Fig. 4(a)와 Fig. 5(a)의 1 사이클 정적(static)실험에서는 기계적 하중이 홀 주위 산화막 변형에 대한 영향은 관찰되지 않았다. 하지만 Fig. 6 에서 20 사이클 실험에서 기계적 하중을 가함에 따라 응력 집중 효과로 인하여 홀 주위 TGO 의 크랙이 선명하게 나타났다.

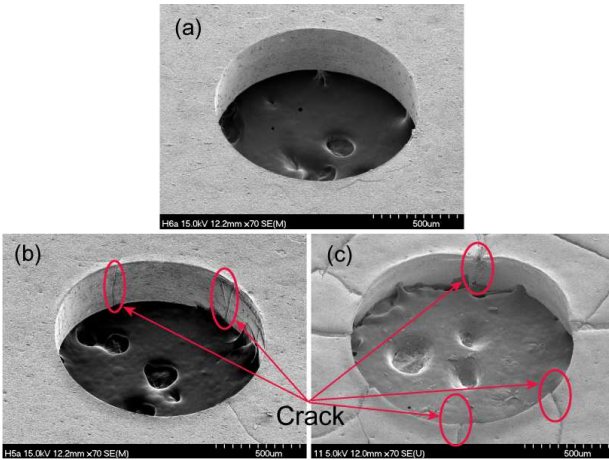


Fig. 4 Hole profiles after (a) 1cycles (b) 20cycle (c) 200cycles thermal cycle at 1200°C

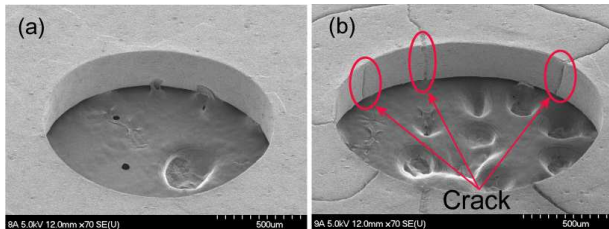


Fig. 5 Hole profiles after (a) 1cycles (b) 20cycle thermo-mechanical cycle at 1200°C with 0.5MPa

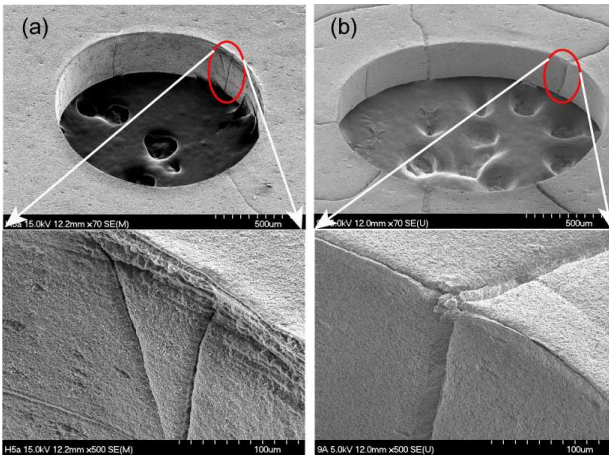


Fig. 6 Hole profile after 20cycle (a) thermal cycling (b) thermo-mechanical cycling at 1200°C

4. 이론해석

4.1 이론 모델

본 연구에서는 열 피로 과정에서 홀 주위 산화막에서 발생하는 응력을 해석하기 위하여 이론적인 분석을 수행하였다. Karlsson 등<sup>(9)</sup>의 구형기공 표면의 TGO 변형 모델을 참고하여 실린더형 홀

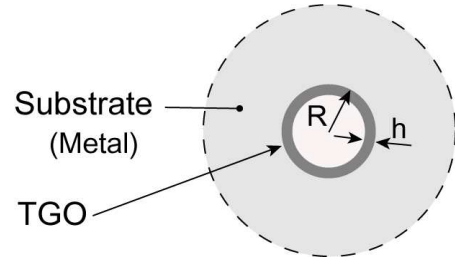


Fig. 7 Schematic of cylinder model

주위 산화막의 변형을 해석하였다.

이론해석을 위하여 홀 주위의 형상을 두 개의 실린더를 합성하는 방법을 사용하였다. 즉 내부 실린더는 TGO 이고 외부 실린더는 기지금속이다. 합성하기 전 내부 실린더의 외경은 TGO 의 열 성장(lateral growth)으로 외부 실린더의 내경보다  $u$ 만큼 더 크다. 조립된 후 두 실린더에 똑같이 작용하는 접촉응력은 외부 실린더의 내경 증가와 내부 실린더의 외경 감소의 합이  $u$ 가 되도록 한다.

기지금속이 탄성일 때 TGO 와 기지금속의 경계면의 압축응력이 증가함에 따라 TGO 응력은 다음 식 (1), (2)로 유도되었다.<sup>(12)</sup>

$$\Delta P = \Delta \epsilon_T \left( \frac{3}{2E_{sub}} + \frac{R}{E_{tgo}h} \right)^{-1} \tag{1}$$

$$\Delta \sigma_{tgo} = -\Delta P \frac{R}{h} \tag{2}$$

여기서  $\Delta P$  는 TGO 와 기지금속 사이에 발생하는 압축응력;  $E_{sub}$ ,  $E_{tgo}$  는 각각 기지금속과 TGO 의 영 계수;  $R$  은 TGO 의 외경;  $h$  는 TGO 의 두께이다.  $\Delta \epsilon_T$  는 TGO 와 기지금속의 열팽창계수의 차이로 발생한  $-\Delta \alpha \Delta T$  혹은 TGO 의 표면방향 성장으로 발생한 변형을  $\Delta \epsilon_g$  이다. 즉  $\Delta \epsilon_T$  는 열 피로가 진행됨에 따라 냉각 및 가열과정에서는  $-\Delta \alpha \Delta T$ 로 나타나고 고온유지과정에서  $\Delta \epsilon_g$ 로 표현된다.  $\Delta \alpha$  는 TGO 와 기지금속의 열팽창계수의 차이이다.

고온에서 TGO 는 표면 방향( $\epsilon_g$ )으로 성장할 뿐만 아니라 두께 방향으로도 성장한다. 따라서 TGO 의 두께  $h$ 도 증가하게 된다. TGO 두께 증가는 과거 본 연구팀에서 측정한 데이터<sup>(13)</sup>를 사용하였다(Fig. 8). 또한 이론해석에서는 냉각 및 가열과정에서 발생하는 TGO 성장은 무시하였다. 고온유지과정에서 TGO 에서의 항복이 일어나면 압축응력은 더 이상 증가하지 않으며  $\Delta \epsilon_g = 0$ 이 된다.

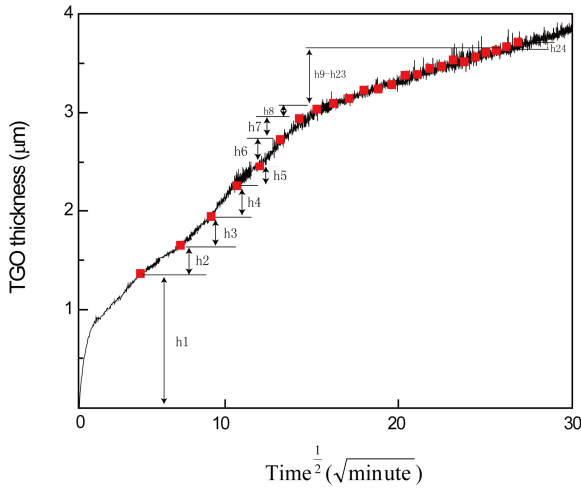


Fig. 8 The variation of TGO thickness with the square root of the elapsed oxidation time<sup>(13)</sup>

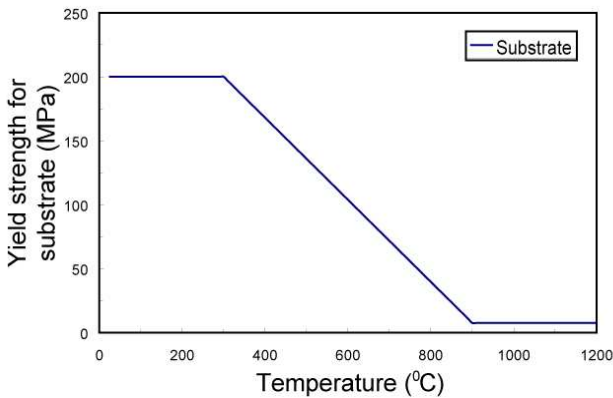


Fig. 9 The yield strength for Fecralloy substrate<sup>(8,15,16)</sup> (tensile)

경계면에서의 압축응력은 Mises 항복조건에 따라 식 (3)을 만족하면 기지금속의 항복이 일어난다. 항복 후 누적된  $\epsilon_T$ 와 소성영역 반경  $R_p$ 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\sqrt{3}\Delta P = \Delta\sigma_Y^{sub} \quad (3)$$

$$\frac{\epsilon_T}{\epsilon_Y^{sub}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{R_p}{R} \right)^2 + \frac{E_{sub} R}{E_{igo} h} \frac{2\sqrt{3}}{3} \left( \frac{1}{2} + \ln \left( \frac{R_p}{R} \right) \right) \quad (4)$$

여기에서  $\sigma_Y^{sub}$ 와  $\sigma_Y^{igo}$ 는 각각 기지금속과 TGO의 항복응력이다.

기지금속의 항복과정에서  $\sigma_{igo}$ 와  $P$ 는 아래 식 (5), (6)과 같다.

$$\frac{\sigma_{igo}}{\sigma_Y^{sub}} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{R}{h} \left( \frac{1}{2} + \ln \left( \frac{R_p}{R} \right) \right) \quad (5)$$

$$P = -\sigma_{igo} \frac{h}{R} \quad (6)$$

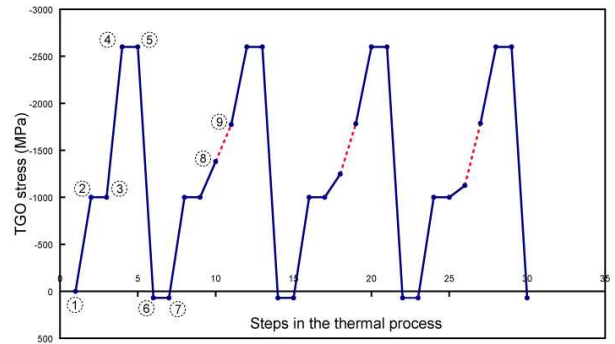


Fig. 10 Changes in the tangential stress in the TGO for four cycles. The red lines demark the stages wherein the substrate is at yield

$$\sigma_Y^{igo} = \sigma_{igo} \quad (7)$$

해석에 사용된 상수들은 아래와 같다.

$$R = 0.5mm; h_{initial} = 1\mu m;$$

$$E_{sub} = 140GPa; E_{igo} = 390GPa;$$

$$\Delta\alpha = 6 \times 10^{-6} / ^\circ C; \Delta T = 1200^\circ C - 25^\circ C$$

온도에 따라 TGO 및 기지금속의 강도는 변화<sup>(9)</sup>하므로 사이클 구간에 따라 항복강도를 각각 다르게 하였다. 즉 TGO의 항복응력은 고온유지과정에서 압축강도는 1000MPa로 가정하였고 고온유지과정을 제외한 나머지 구간들에서 압축강도는 2600MPa<sup>(14)</sup>로 하였다. 가열, 냉각 및 상온 인장 시 TGO의 인장강도는 본 연구실에서 측정한 TGO의 인장강도 70MPa<sup>(13)</sup>을 사용하였다. 기지금속의 항복응력은 Fig. 9에서와 같이 온도에 따라 변화하도록 하였다.

#### 4.2 이론해석 결과

이론 해석결과의 설명의 편리를 위하여 Fig. 10에서와 같이 4 사이클만 표현하였다. 그림에서 ①-③는 고온유지구간, ③-⑤는 냉각구간, ⑤-⑦는 가열구간이다.

Fig. 10의 첫 번째 사이클에서 TGO가 성장함에 따라 계면의 압축응력은 증가하고 ②에서 TGO의 항복이 일어난다. 그리고 나머지 고온유지구간(②-③)에서 TGO의 응력은 변하지 않는다. 냉각과정에서 TGO의 항복응력은 고온에서 보다 높으므로 다시 탄성거동을 한다. 하지만 냉각이 진행됨에 따라 압축응력은 증가하여 ④에서 TGO의 항복을 다시 유발하게 된다. ⑤에서 가열과정이 시작됨에 따라 계면의 압축응력은 완화되고 TGO의 압축응력도 감소한다(⑤-⑥). 압축응력은 감소하다가 ⑥에서 TGO의 항복응력(70MPa)을

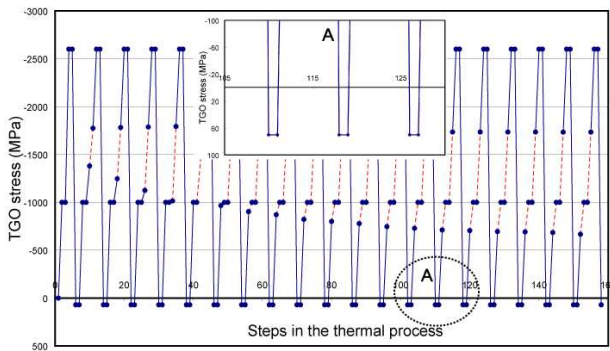


Fig. 11 Changes in the tangential stress in the TGO for 20cycle

초과하게 된다. TGO 는 나머지 가열과정(⑥-⑦)에서 항복을 유지하게 된다. 첫 번째 사이클에서의 응력 및 변형은 그 다음 사이클로 누적된다.

누적된 변형을 및 응력은 두 번째 사이클의 냉각과정에서 기지금속의 항복을 유발한다. Fig. 10에서 ⑧-⑨구간의 점선은 기지금속이 항복되었을 때 TGO 의 응력 변화이다. Fig. 11 은 20 사이클 동안 TGO 의 응력 변화이다. 그림에서 사이클이 진행됨에 따라 기지금속의 항복구간은 증가하게 된다. TGO 의 변형은 주로 기지금속의 소성변형을 유발한다. 따라서 기지금속의 항복구간이 증가함에 따라 TGO 의 변형은 증가하게 되며 최종적으로 Fig. 4(b)에서와 같은 크랙이 발생하게 된다.

Ding 등<sup>(15,16)</sup>은 열 피로 과정에서 표면에 존재하는 반원형 홈에서의 변형을 유한요소법으로 해석한 바 있다. 비록 해석 대상은 다소 차이가 있으나 해석에 사용된 재료의 물성과 열 피로 사이클이 같으므로 이론 해석결과와 서로 비교할 수 있다. 유한요소 해석 결과에 의하면 냉각과정에서 약 -2700MPa 의 압축응력이 발생하며 가열과정에서 약 100MPa 의 인장응력이 발생하였다. 본 논문의 Fig. 10 에서도 냉각과 가열과정에서 각각 -2600MPa, 70MPa 의 응력이 발생하였다.

## 5. 결 론

내열합금 시편을 이용하여 고온에서 사이클 회수를 변화시키면서 열 피로 및 열-기계적 피로 실험을 수행하였다. 사이클이 진행됨에 따라 홀 주위 TGO 의 변형을 관찰하였으며 이론적으로 TGO 의 응력변화를 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 홀 주위 TGO 의 변형은 사이클 수가 증가함에 따라 증가하며 가열과정에서 TGO 의 선명한 크랙이 발생한다.

(2) 1 사이클 실험에서 기계적 하중이 홀 주위의 변형에 대한 영향은 관찰되지 않았다. 하지만 사이클 수가 증가할수록 기계적 하중의 영향이 뚜렷이 나타났으며 이러한 현상은 홀 주위 응력 집중 효과로 기인한다.

(3) 이론적으로 사이클에 따른 TGO 응력을 해석함으로써 가열과정에서 TGO 에 크랙이 발생하는 현상은 해석되었다. 즉 Fig. 10 의 가열과정에서 TGO 에 인장응력이 발생하고 항복에까지 이르게 한다. TGO 는 인장에 취약하므로 가열과정에서 쉽게 크랙이 발생하게 된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 원자력기초공동연구소(BEAR)사업의 지원에 의해 수행되었습니다(2009-0078720). 이에 관계자 분들께 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

- (1) Evans, A. G., He, M. Y. and Hutchinson, J. W., 2001, "Mechanics-Based Scaling Laws for the Durability of Thermal Barrier Coatings," *Prog. Mat. Sci.*, Vol. 46, pp. 249~271.
- (2) Tolpygo, V. K. and Clarke, D. R., 1999, "Tensile Cracking During Thermal Cycling of Alumina Films Formed by High-Temperature Oxidation," *Acta Mater*, Vol. 47, No. 13, pp. 3589~3605.
- (3) Tolpygo, V. K. and Clarke, D. R., 1999, "Alumina Scale Failure Resulting from Stress Relaxation" *Surface and Coatings Technology*, Vol. 120~121, pp. 1~7.
- (4) Tolpygo, V. K. and Clarke, D. R., 1998, "Wrinkling  $\alpha$ -Alumina Films Grown by Thermal Oxidation-I. Quantitative Studies on Single Crystals of Fe-Cr-Al Alloy," *Acta Mater*, Vol. 46, No. 14, pp. 5153~5166.
- (5) Tolpygo, V. K. and Clarke, D. R., 1998, "Wrinkling  $\alpha$ -Alumina Films Grown by Thermal Oxidation-II. Oxide Separation and Failure," *Acta Mater*, Vol. 46, No. 14, pp. 5167~5177.
- (6) Lee, S. S., Sun, S. K. and Kang, K. J., 2005, "In-Situ Measurement of the Thickness of Aluminum Oxide Scales at High Temperature," *Oxidation of Metals*, Vol.63, No. 1/2, pp. 73~85.
- (7) Ko, G. D., Lee, S. S. and Kang, K. J., 2007, "Design and Manufacture of Creep Tester of Thin Film

- Form Specimen at High Temperature" *Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. A-31, pp. 253~259
- (8) Ko, G. D., Sun, S. K. and Kang, K. J., 2007, "Creep & Tensile Properties of Thermally Grown Alumina Films," *Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. A-31, pp. 665~670.
- (9) Karlsson, A. M., Hutchinson, J. W., Evans, A. G., 2002 "A fundamental model of cyclic instabilities in thermal barrier systems," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 50, pp. 1565-1589.
- (10) Karlsson, A. M., Hutchinson, J. W., Evans, A. G., 2003, "The Displacement of the Thermally upon Temperature Cycling," *Materials Science and Engineering*, Vol. A351, pp. 244~257.
- (11) Sun, S. K., 2005, "On the Behavior of Thermally Grown Oxide Created upon a Heat-Resistant Metal," Ph. D. thesis, Chonnam National University.
- (12) Saada, A. S., 1974, "Elasticity Theory and Applications," *Pergamon Press Inc*, pp. 323~329
- (13) Ko, G. D., 2007, "Thermally Grown Oxides formed on Superalloy surfaces and their Mechanical Properties at High Temperature," Master Thesis. 2007, Chonnam National University.
- (14) [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- (15) Ding, Jun., Li, F. X., Kang, K. J., 2009, "Effects of Material Creep on Displacement Instability in Surface Groove under Thermo-Mechanical Cycling," *Surface & coatings technology*, Vol. 204, pp. 157~164.
- (16) Ding, Jun., Li, F. X., Kang, K. J., 2009, "Numerical Simulation for TGO Crack Propagation near a surface groove in an Alumina Forming Alloy upon Thermo-Mechanical loading Cycles," *Spring conference of KSME*, Vol. 4, pp. 339 ~ 344.