

열차폐 코팅층의 고온 열충격 시험후 ECT를 이용한 결함 평가

Evaluation of Defects of Thermal Barrier Coatings by Thermal Shock Test Using Eddy Current Testing

허태훈*, 조윤호**†, 이준현**, 오정석***, 이구현****

Tae Hoon Heo*, Younho Cho**†, Joon Hyun Lee**, Jeong Seok Oh*** and Koo Hyun Lee****

초 록 열차폐 코팅 시편에 대하여 열충격을 주기적으로 가한 후 발생하는 결함을 관찰하였다. 실험에 사용된 열차폐 코팅 시편은 인코넬-738로 제작된 모재 위에 CoNiCrAlY 본드 코팅층과 ZrO₂-8wt%Y₂O₃ 세라믹 탑 코팅층이 플라즈마 용사 방법으로 올려진 형태로 되어있다. 열충격 시험은 1000℃의 고온으로 가열했다가 상온으로 급격하게 냉각시키는 가혹한 조건으로 실행되었고, 사이클 수가 증가함에 따라 열충격의 피로도 또한 증가하였다. 시험후 시편 내부의 미세 조직 변화와 결함을 전자현미경으로 관찰하고, 시편의 기계적인 특성을 측정하여 그 변화 양상을 살펴보았다. 열충격 주기실험후 본드 코팅층과 세라믹 탑 코팅층 사이에 발생하는 TGO 산화물층에 대한 변화 양상과 이에 대한 와전류 신호를 측정하여 TGO층 성장 거동의 비파괴적인 평가를 위한 실험을 진행하였다. 본 연구를 통하여 마이크로 단위의 TGO층에 대한 와전류검사의 적용 가능성을 확인하고 열차폐 코팅의 수명을 예측할 수 있는 가능성을 제시하였다.

주요어: 열차폐 코팅, 열충격, 플라즈마 용사, TGO, 와전류

Abstract Periodical thermal shock can introduce defects in thermal barrier coating made by layers of CoNiCrAlY bond coating(BC) and ZrO₂-8wt%Y₂O₃ ceramic top coating(TC) on Inconel-738 substrate using plasma spraying. Thermal shock test is performed by severe condition that is to heat until 1000℃ and cool until 20℃. As the number of cycle is increased, the fatigue by thermal shock is also increased. After test, the micro-structures and mechanical characteristics of thermal barrier coating were investigated by SEM, XRD. The TGO layer of Al₂O₃ is formed between BC and TC by periodical thermal shock test, and its change in thickness is inspected by eddy current test(ECT). By ECT test, it is shown that TGO and micro-crack can be detected and it is possible to predict the life of thermal barrier coating.

Keywords: Thermal Barrier Coating(TBC), Thermal Shock, Plasma Spray, Thermally Grown Oxide(TGO), Eddy Current Testing(ECT)

1. 서 론

열차폐 코팅(thermal barrier coating, TBC)은 화력발전소, 항공기의 터빈 날개나 가스터빈 내부의 고온부 부품 등 높은 열응력과 온도 조건에서 최근

사용되고 있다. 이 열차폐 코팅은 내열합금 부품들의 한계 작동 온도를 보완하기 위해 개발된 것으로 높은 내열성을 지내고 있다. 열차폐 코팅의 종류에 따라 한계 작동 온도를 최대 170℃ 가량 높일 수 있다[1]. 이런 열차폐 코팅에 의한 단열 작용으로

[접수일: 2009. 9. 21, 수정일: 2009. 10. 13, 게재확정일: 2009. 10. 15] *부산대학교 기계공학부 대학원, **부산대학교 기계공학부, ***한국기계연구원, ****한국기계연구원 부설 재료연구소, †Corresponding author: Wave and Structural Health Monitoring Lab., School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea, (E-mail: mechcyh@pusan.ac.kr)

각종 부품의 열화를 막아 수명을 늘릴 수 있고, 작동 온도의 상승으로 더 높은 열효율을 가질 수 있어 이산화탄소 배출의 감소에 크게 기여할 수 있다.

열차폐 코팅은 본드 코팅(bond coating, BC)층과 탑 코팅(top coating, TC)층으로 이루어져 있다. 탑 코팅층은 주로 세라믹으로서 모재의 산화나 고온 부식 등을 방지한다. 그리고 본드 코팅층은 탑 코팅층과 모재 사이에 위치하여 금속 소재의 모재와 세라믹 소재의 탑 코팅층의 특성 차이를 완화시켜 결속력을 유지하게 하는 역할을 한다[2].

열차폐 코팅은 고온상태에서 오랜 시간동안 작동하게 된다. 이 과정에서 열차폐 코팅층인 MCrAlY (M=Co, Ni, CoNi) 본드 코팅층과 지르코늄 계열의 세라믹 탑 코팅층 사이의 확산 현상에 의해 본드 코팅이 산화되어 Al₂O₃로 구성된 산화층이 형성되는데, 이 산화층을 TGO(thermally grown oxide)층이라고 한다[3]. 이 TGO층의 성장으로 인하여 코팅층간 잔류응력이 점점 변화하게 되고, 이 잔류응력의 변화로 인하여 심하게는 열차폐 코팅의 박리가 일어나는 등 수명이 단축되는 문제점이 있다. 그러므로 TGO층의 거동을 예측하고 미리 보수할 필요가 있다[4].

이전의 연구에서 TGO층의 성장 거동 및 특성에 대하여 많은 연구가 이루어졌다[5-8]. 그러나 이 TGO층을 비파괴적으로 평가한 논문은 미흡한 실정이다[9]. 그렇기 때문에 앞으로 많은 연구가 필요한 분야로 판단된다. 본 논문에서는 이 TGO층을 비파괴적인 방법중 와전류검사 방법을 선택하여 그 신호를 측정하고 경향을 고찰하였다. 기존의 비파괴 검사 방법중 많이 이용되는 초음 검사법은 마이크로 단위의 결함을 찾기 위하여 매우 고가의 고주파 센서를 사용해야 하지만, 와전류검사법은 저가의 센서로도 시편의 전자기적인 값을 측정하여 아주 미세한 변화도 정량적인 값으로 표현이 가능하기 때문에 마이크로 단위의 결함을 찾는 데에 매우 효율적인 방법이라고 할 수 있다. 이와 같이 비파괴적인 방법중 매우 효율적인 와전류검사법을 통하여 열차폐 코팅의 수명을 예측할 수 있는 가능성을 발견하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시편 제작

시편은 모재(인코넬 738) 위에 열차폐 코팅이 용

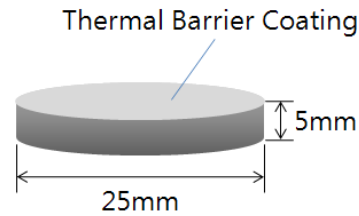


Fig. 1 The shape and dimension of specimen

Table 1 Conditions of plasma spraying process

Parameters	Bond coating	Top coating
Plasma spray process	VPS	APS
Working Pressure [mbar]	200	1013
Plasma Arc current [A]	800	600
Primary Gas [SLPM]	55	45
Secondary Gas [SLPM]	6	11
Stand-off distance [mm]	300	65
Powder feeding rate [g/min]	48	45
Carrier Gas [SLPM]	3	6

Table 2 Composition of powder material

Material	Composition [wt.(%)]						
	Co	Ni	Cr	Al	Y	ZrO ₂	Y ₂ O ₃
Bond coating	Bal.	32	21	8	0.5	-	-
Top coating	-	-	-	-	-	Bal.	8

사된 형태로 되어 있다. 열충격시험에 용이하도록 제작된 시편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다.

제작 과정은 먼저 전처리과정으로서 표면 블라스팅(blasting)을 한 다음에 초음파세척기로 약 15분 동안 세척한 후 열차폐 코팅을 용사하였다. 본드 코팅은 진공 플라즈마 용사(vacuum plasma spraying, VPS)를 이용하였고, 탑 코팅은 대기 플라즈마 용사(atmosphere plasma spraying, APS)를 이용하였다. 열차폐 코팅의 조건은 Table 1와 같다. 열차폐 코팅의 재료로서 본드 코팅에는 CoNiCrAlY 금속 합금 분말이 사용되었고, 탑 코팅에는 ZrO₂-8wt%Y₂O₃ 세라믹 계열의 분말이 사용되었다. 코팅 분말은 Table 2와 같이 구성되어 있다.

Fig. 2에서와 같이 코팅층의 두께는 약 400 μm로서 본드 코팅층의 두께가 약 150 μm, 탑 코팅층의 두께가 약 250 μm이다. 제작할 때마다 약 30 μm의

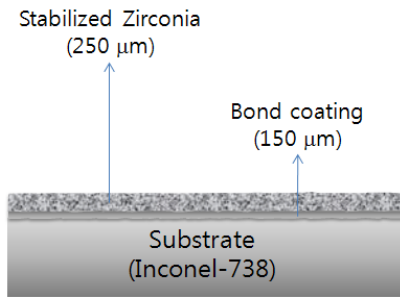


Fig. 2 The cross section of specimen

편차가 발생하므로 실제 본드 코팅층의 두께는 약 150~180 μm, 탑 코팅층의 두께는 약 250~280 μm 정도로 형성된다. 그러나 동시에 제작된 시편들은 모두 같은 두께의 코팅층을 가진다.

2.2. 열충격 시험

열차폐 코팅 시편의 열충격 시험을 위해 Fig. 3 과 같은 실험 장치를 사용하였다.

고온 열피로 시험기는 자체적으로 제작한 것으로, 1400℃까지 온도를 올릴 수 있고 원하는 온도로 설정하여 실험할 수 있다. 또한 원하는 시간만큼 고온로 내에서 시편을 가열할 수 있으며, 원하는 시간만큼 시편에 열충격을 가할 수 있다.

본 시험에서는 Fig. 4의 조건으로 1 사이클을 구성하였다. 시편은 가열로 내에서 1000℃의 온도로 58분간 가열되며 2분 동안 상온의 물속에서 급랭된다. 총 6개의 시편으로 각각 0, 20, 30, 40, 60, 70사이클의 시험을 진행하였다.

3. 실험 결과

시편에 열충격을 가한 후 다음과 같은 시편 분석 과정을 거쳐 실험데이터를 수집하였다. 먼저 열충격 시편에 대하여 와전류 신호를 측정 한 후에 XRD(X-Ray diffractometer)를 이용하여 코팅층의 상분석을 실시하고 잔류응력을 측정하였다. 측정 완료 후 전자현미경으로 표면을 촬영한 다음에 절단하여 단면을 촬영하였다. 실험 결과는 측정 순서와는 반대인 표면형상(surface morphology)과 절단면의 미세구조 분석 결과, XRD 상분석 및 잔류응력 측정 결과, 그리고 와전류 신호 측정 실험 결과 순으로 제시하였다.

3.1. 미세구조 분석

열차폐 코팅 시편의 표면형상과 절단면의 미세구조를 분석하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 사용하였다. 그리고 본드 코팅층과 세라믹 탑 코팅층 사이의 계면에서 생성되는 생성물을 파악하기 위해 EDS(energy dispersive spectroscopy)를 분석하였다. 또한 세라믹 탑 코팅층의 상분석을 위해 XRD(X-Ray diffractometer)를 이용하였다.

Fig. 5는 세라믹 탑 코팅층의 표면에 대한 XRD 상분석 결과이다. 열충격 시험의 여부나 사이클 수

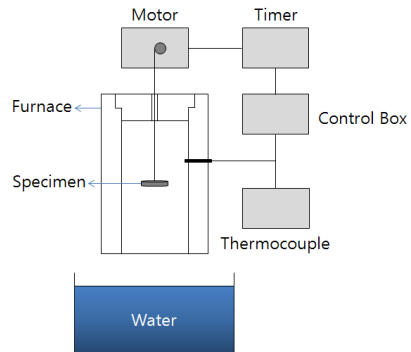


Fig. 3 A schematic of cyclic thermal fatigue test

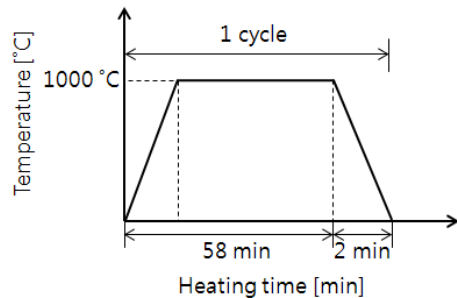


Fig. 4 A condition of cyclic thermal fatigue test

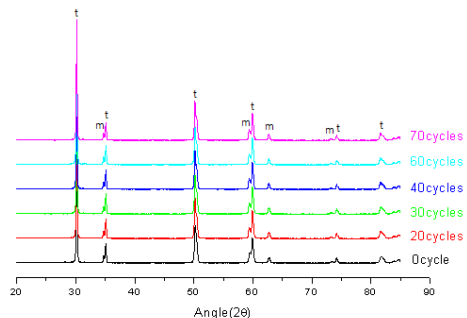


Fig. 5 XRD analysis of top coating layer (t : ZrO₂(tetragonal), m : ZrO₂(monoclinic))

에 관계없이 모두 같은 형태의 그래프를 보여주었다. 탑 코팅층은 상온에서 산화지르코늄(ZrO_2)이 주재료이기 때문에 고온 열충격 시험 후에도 변화 없이 동일한 상을 나타내었다. 그래프에서 2 θ 값에 따른 정방정계(tetragonal)와 단사정계(monoclinic) ZrO_2 의 상을 확인할 수 있다.

Fig. 6는 시편의 절단면을 주사전자현미경을 사용하여 1000배 배율로 확대하여 촬영한 사진으로서 실험 전후의 세라믹 탑 코팅층과 본드 코팅층의 일부를 관찰할 수 있다. 세라믹 탑 코팅층과 본드 코팅층 사이의 계면에 층이 형성된 것을 볼 수 있는데, EDS 분석 결과 Al과 O로 구성된 산화물 층으로 판명되었다. 이는 고온 확산에 의해 침투된 O_2 가 본드 코팅층 내 Al과 반응하여 Al_2O_3 로 형성된 것이다. 주로 Al_2O_3 가 형성되는 이유는 Al이 산소 친화력이 높고, 본드 코팅층 내의 다른 금속 원소보다 확산계수가 높기 때문이다. 온도가 높아질수록 확산계수의 차이가 더 심해지기 때문에 Al_2O_3 산화층이 더 잘 생성된다. 이 산화물층은 열에 의해 성장한 층으로 TGO(thermally grown oxide)층이라고 부른다.

Fig. 7은 TGO층의 두께변화경향으로, TGO층의 두께를 사이클별로 여러번 측정하여 최대값과 최소값의 평균값으로 나타내었다.

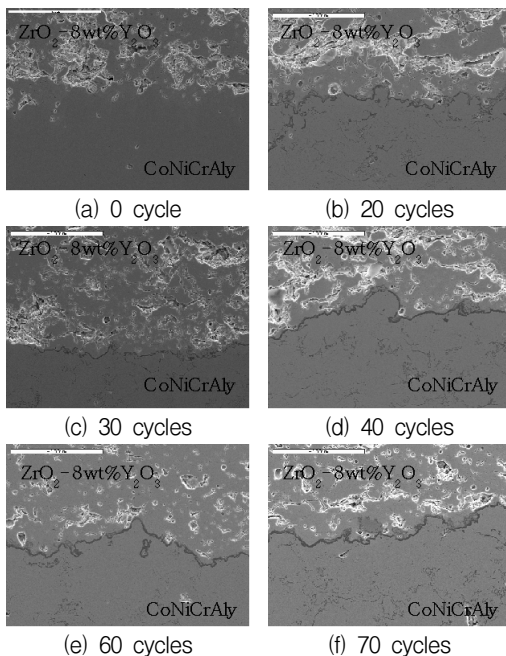


Fig. 6 SEM images of cross section morphology in top coating layer($\times 1000$)

TGO층의 두께는 열충격 시험 전에는 $0 \mu m$, 20사이클에서 $0.97 \pm 0.31 \mu m$, 30사이클에서 $1.09 \pm 0.33 \mu m$, 40사이클에서 $1.52 \pm 0.48 \mu m$, 60사이클에서 $1.89 \pm 0.69 \mu m$, 70사이클에서 $3.07 \pm 1.01 \mu m$ 로 두께가 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 열충격 시험의 사이클 수가 증가함에 따라 TGO층의 두께 또한 증가함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 표면 관찰을 위한 전자현미경 촬영 사진이다. 육안으로는 시편의 표면에서 어떠한 크랙도 발견할 수 없었으나 전자현미경으로는 40, 60, 70 사이클 시편에 대해서 표면크랙이 부분적으로 생성 및 성장하였음을 관찰할 수 있었다.

추가실험으로 80사이클을 진행하였다. Fig. 9와 같이 세라믹 탑 코팅층에 부분적으로 박리가 일어난 것을 확인할 수 있었다. 이는 표면크랙 및 TGO층의 성장과 잔류응력에 의한 층간 계면의 크랙으로 인하여 발생한 것으로 사료된다.

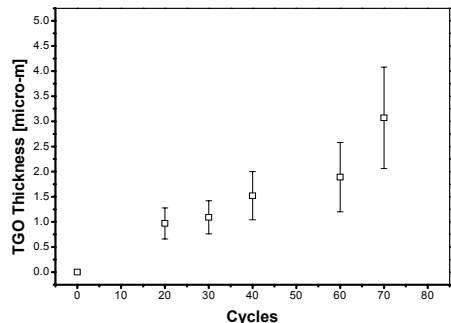


Fig. 7 Changes of TGO(Al_2O_3) thickness by cyclic thermal shock fatigue test

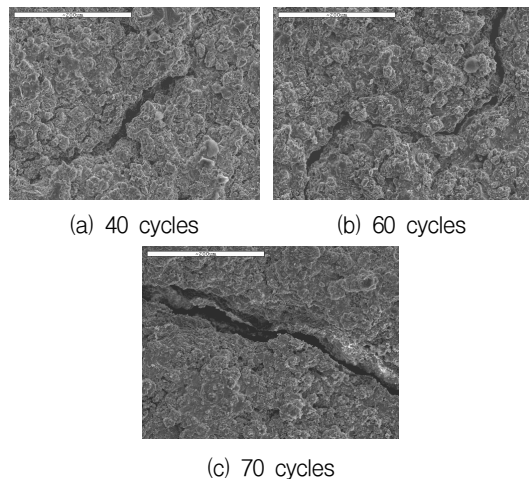


Fig. 8 SEM images of surface crack morphology



Fig. 9 Partial separation of coating layer from substrate (80 cycles)

3.2. 잔류응력 측정 및 결과

잔류응력은 고분해능 X-선 회절분석기(high resolution X-ray diffractometer)인 Philips사의 X'pert PRO MRD 장비를 사용하여 $\sin^2\psi$ 법으로 측정되었다. X-선은 CuK α 를 방사(radiation)하여 측정하였다. 측정에 사용된 결정면은 ZYO(101)이고, 사용된 2Theta값은 XRD 상분석 그래프에서 가장 피크값이 높았던 30.127°이다. 참고문헌에 따라 영계수는 50GPa를 사용했고, 프아송비는 0.25를 사용하였다. ZrO₂-8wt%Y₂O₃ 세라믹 탑 코팅층에 대하여 측정된 잔류응력은 Fig. 10과 같다.

실험전 세라믹 탑 코팅층은 19.5±1.8 MPa의 인장응력을 받고 있었다. 실험후 20 사이클과 30 사이클 시편의 세라믹 탑 코팅층 역시 각각 7.3±1.8 MPa과 6.3±2.0 MPa로 인장응력을 받고 있었지만 그 값이 점점 줄어들고 있었다. 40 사이클 시편은 잔류응력이 -4.9±1.4 MPa로 인장응력에서 압축응력으로 변화하였고, 60 사이클 시편은 압축응력이 -15.9± 0.4 MPa로 더 증가하였다. 70 사이클 시편은 -1.5± 0.2 MPa로 응력값이 급감하였다.

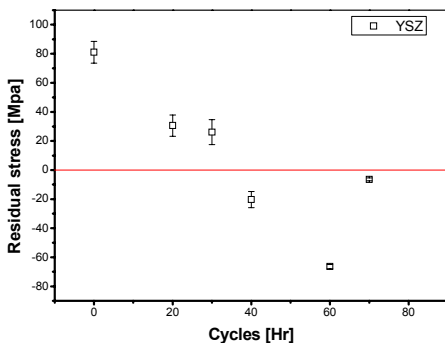


Fig. 10 Changes of residual stress by cyclic thermal shock fatigue test

열충격 실험에 의해 시편의 온도가 상승한 후 다시 급랭하면서 세라믹 탑 코팅층, 본드 코팅층, 그리고 모재가 서로 열팽창계수의 차이로 인하여 인장과 압축을 받게 되는데, 시편의 온도가 많이 상승할수록 큰 압축응력이 작용한다. 그리고 압축 잔류응력의 성질을 가진 Al₂O₃의 TGO층이 성장하면서 압축응력이 더 증가하게 된다. 정리해보면, 세라믹 탑 코팅층이 열충격 실험 전에는 인장응력을 받다가 실험후 열충격 사이클이 증가함에 따라 열팽창계수의 차이와 TGO층의 성장으로 점점 압축응력을 받는다. 그러다가 어느 시점에서 크랙들로 인하여 압축응력이 풀리면서 다시 인장으로 돌아서서 잔류응력이 0에 가까워진다. 그리고 80사이클 시편과 같이 박리가 일어나게 된다.

3.3. 와전류신호 분석

와전류를 측정하기 전에 신호가 시편에 얼마나 침투할 것인지를 알기위해 표준 침투깊이(standard depth of penetration)를 고려해야한다. 표준 침투깊이 공식은 다음과 같다.

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f\mu_r}} \quad (1)$$

δ : 표준 침투깊이(mm)
 ρ : 전기 저항($\mu\Omega$ -cm)
 f : 측정 주파수(Hz)
 μ_r : 자기 투자율

위 식에서 측정 주파수의 변화에 따른 표준 침투깊이를 구하기 위해서는 시편의 전기 저항과 자기 투자율(magnetic permeability)을 알아야한다. 먼저 시편의 전기저항값을 구하기 위해 전기전도도(electrical conductivity)값을 측정하였다. 전기전도도를 구하는 공식은 다음과 같다.

$$\%IACS = \frac{172.41}{\rho} \quad (2)$$

전기전도도의 단위는 %IACS가 사용된다. IACS(International Annealed Copper Standard)는 단면적과 길이가 각각 1mm², 1m인 가열 및 냉각 처리된(annealed) 순수 동(pure copper)에 대하여 상온(20°C)에서 그 비저항값을 측정하여 기준으로 삼은 것이다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 비저항과 전기전도도는 서로 반비례 관계에 있다. 즉, 시편의 비저항값이 클수록 전기전도도는 감소하게 된다.

측정된 전기전도도는 세라믹 코팅층이 0, 본드 코팅층이 1.30 IACS, 모재가 1.29 IACS로, 비저항값은 각각 132.62 $\mu\Omega\text{-cm}$, 133.65 $\mu\Omega\text{-cm}$ 이다. 열차폐 코팅 시편은 상자성체로 자기투자율이 1에 가깝다.

표준 침투깊이 공식을 이용하여 50 kHz의 측정 주파수를 선택하였을 때의 침투깊이를 계산해보니 2.58 mm이었다. 센서와 측정 시편 간 거리(lift-off)가 2 mm이므로 이를 제외한 침투깊이는 0.58 mm로 580 μm 이다. 60 kHz를 선택했을 때 표준 침투깊이는 2.35 mm로 센서와 측정 시편 간 거리를 뺀 값은 0.35 mm 즉, 350 μm 이다. 열차폐 코팅층의 총 두께는 400~460 μm 으로, 60 kHz 이상의 주파수를 사용할 경우 침투깊이가 코팅층을 모두 커버하지 못하므로 50 kHz 이하로 측정주파수를 선정하였다. 표준 침투깊이가 시편의 두께를 넘지 않는 범위 내에서 와전류 신호를 측정하기 위해 10~50 kHz의 측정주파수를 선택하여 실험하였다. 인덕턴스와 저항의 측정 결과는 Fig. 11~12와 같다. 각 주파수별 그래프의 경향은 거의 비슷한 형태로, 인덕턴스

는 증가하고 저항은 감소하는 경향을 보였다.

저항과 인덕턴스 측정 시 공기 중에서의 값이 환경이나 장비의 오차에 의해 조금씩 달라질 수 있으므로 이를 보정하기 위해 임피던스 공식을 초기값을 고려하여 변환하였다.

$$Z = \sqrt{\left(\frac{R-R_0}{\omega L_0}\right)^2 + \left(\frac{\omega L}{\omega L_0}\right)^2} \quad (3)$$

- Z : 임피던스(Ω)
- R : 저항(Ω)
- L : 인덕턴스(H(Herry))
- ωL : 리액턴스(Ω)

마찬가지로 위상각(phase angle)을 구하기 위한 공식도 초기값을 고려한 식으로 변환하였다.

$$\tan\phi = \frac{\frac{\omega L}{\omega L_0}}{\frac{R-R_0}{\omega L_0}} \quad (4)$$

식 (3)을 이용하여 주파수별 열충격 시편들의 정규화(normalized)된 임피던스값을 구한 후 이를 그래프로 나타내면 Fig. 13과 같다. 초기값이 보정된 임피던스 그래프는 인덕턴스 그래프와 거의 흡사한 형태로 나타났다. 사이클 수가 증가할수록 코일의 임피던스 또한 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 14는 임피던스값의 변화와 TGO층의 평균 두께 변화를 비교한 그래프로, 두 그래프의 경향이 거의 비슷한 것을 볼 수 있다. 70사이클에서 임피던스값의 변화폭이 TGO층 두께의 변화폭보다 약간 더 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 TGO층의 급격한 성장으로 인하여 TGO층의 일부에 박리(delamination)가 발생하여 생긴 현상으로 파악된다.

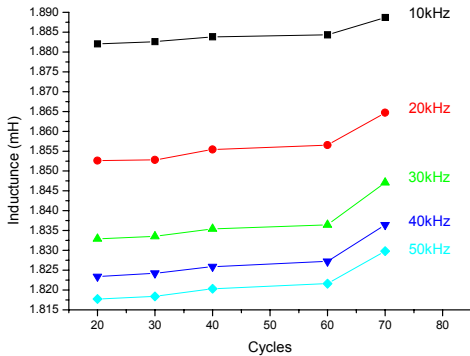


Fig. 11 The variation of inductance by cyclic thermal shock fatigue test (10~50kHz)

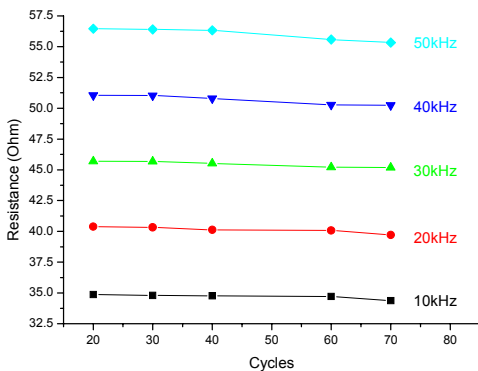


Fig. 12 The variation of resistance by cyclic thermal shock fatigue test (10~50kHz)

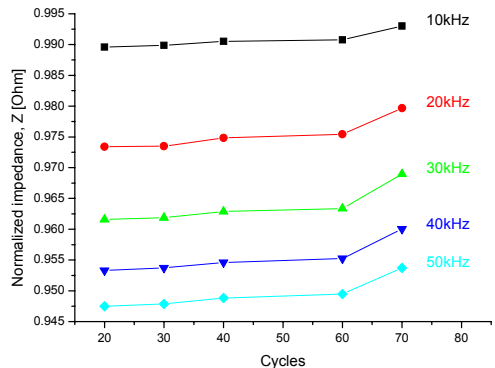
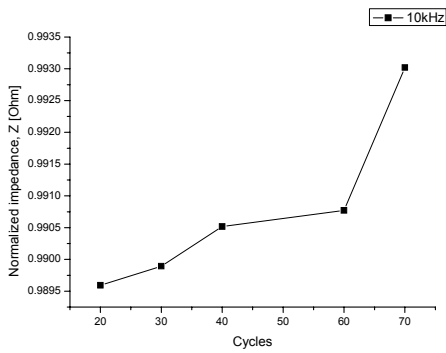
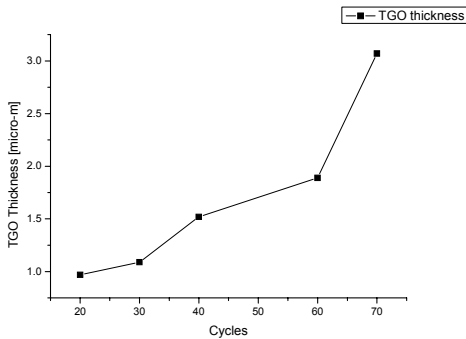


Fig. 13 The variation of normalized impedance by cyclic thermal shock fatigue test (10~50kHz)



(a) variation of normalized impedance (10 kHz)



(b) average value of TGO thickness

Fig. 14 Comparison between value of impedance and average TGO layer thickness

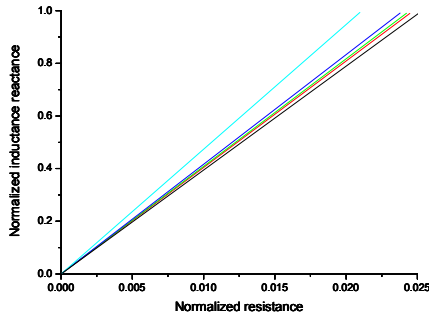


Fig. 15 The variation of phase angle by cyclic thermal shock fatigue test (10 kHz)

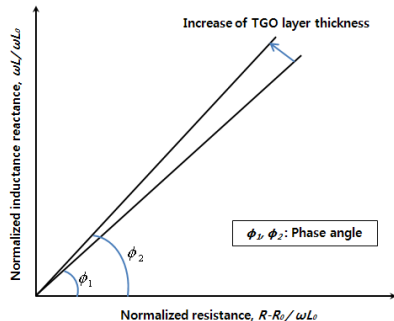


Fig. 16 The variation of phase angle due to the change of TGO layer thickness

Fig. 15는 식 (4)를 이용하여 정규화된 위상각을 그래프로 나타낸 것으로, 사이클 수가 증가할수록 위상각 또한 증가하면서 기울기가 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 사이클 수의 증가에 따른 위상각의 증가는 열차폐 코팅층 내부의 TGO층의 두께가 증가함에 따라 발생하는 것으로 사료된다. Fig. 16에서는 TGO층의 두께변화에 따른 위상각의 변화에 대하여 그래프로 설명하였다.

4. 결론

본 연구에서는 인코넬 738 모재 위에 진공 플라즈마 용사법을 이용하여 CoNiCrAlY 본드 코팅층을 올린 후, 그 위에 대기 플라즈마 용사법을 이용하여 $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$ 세라믹 탑 코팅층을 올린 열차폐 코팅 시편에 대한 고온 열피로 가속(열충격) 실험을 진행하였다. 열충격 실험후 열차폐 코팅 시편의 미세구조 변화와 기계적 특성을 파악하였고, 열차폐 코팅 시편의 고온 열피로 손상진단 기법으로 와전류 신호 분석법의 적용성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열차폐 코팅 시편의 고온 열충격 시험을 수행한 결과, 세라믹 탑 코팅층과 본드 코팅층 사이의 계면에서 Al_2O_3 산화물층인 TGO층을 확인할 수 있었다. 사이클수가 증가함에 따라 TGO층의 두께 또한 증가하는 것을 실험적으로 확인하였다.
- 2) 40사이클의 고온 열충격 시험 이후 세라믹 탑 코팅층의 표면부에서 표면크랙이 발생하였다. 80사이클에서는 표면크랙과 TGO층의 성장 및 잔류응력에 의한 층간 계면의 박리(delamination)로 인하여 세라믹 탑 코팅층이 부분적으로 파손되었다.
- 3) 잔류응력 측정 결과, 실험전 열차폐 코팅 시편의 세라믹 탑 코팅층에는 인장응력이 존재하고 있었다. 그러나 고온 열충격 시험 이후 사이클 수가 증가함에 따라 압축응력이 발생하였고, 70 사이클에서는 다시 인장응력으로 돌아서면서 잔류응력의 크기가 0에 가까워졌다. 80사이클에서 부분 박리가 일어난 것으로 보아 이는 완전 박리 이전의 상태로 판단된다.
- 4) 와전류신호 분석 결과, 사이클 수가 증가함에 따라 TGO층이 성장하면서 인덕턴스와 저항의 변화가 생기는 것을 알 수 있었다. 이들 값으로 구한 사이클별 코일 임피던스의 변화 경향은

TGO층이 생성되는 경향과 거의 일치함을 확인하였다. 또한 TGO층의 두께가 증가할수록 위상각이 증가하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 교육과학기술부 원자력연구개발사업 및 한국과학재단의 지원을 받아 수행되었으며(No. R01-2007-000-20417-0), 이에 감사드립니다. 또한 연구에 많은 도움을 주신 한국기계연구원 오정석 박사님과 부산대학교 박진효 박사님께도 감사드립니다.

참고문헌

- [1] P. W. Schilke, Advanced Gas Turbine Materials and Coatings, GER-3569 (2004)
- [2] G. C. Chang and R. A. Miller, "Behavior of thermal barrier coatings for advanced gas turbine blades," Surface and Coating Technology, Vol. 30, pp. 13-28 (1987)
- [3] W. J. Brindley and R. A. Miller, "Thermal barrier coating life and isothermal oxidation of low-pressure plasma-sprayed bond coat alloys," Surface and Coating Technology, Vol. 43, pp. 446-457 (1990)
- [4] R. A. Miller and C. E. Lowell, "Failure mechanisms of thermal barrier coatings exposed to elevated temperatures," Thin Solid Films, Vol. 95, pp. 265-273 (1981)
- [5] A. Bennett, "Properties of thermal barrier coatings," Material Science and Technology, Vol. 2, pp. 257-261 (1986)
- [6] T. Tomimatsu, S. Zhu and Y. Kagawa, "Effect of thermal exposure on stress distribution in TGO layer of EB-PVD TBC," Acta Materialia, Vol. 51, pp. 2397-2405 (2003)
- [7] 정우석, 김길무, "NiCoCrAlY Bond Coat를 사용한 Thermal Barrier Coating의 고온 안정성에 미치는 Pt의 영향", 대한금속·재료학회지, Vol. 44, No. 12, pp. 806-815 (2006)
- [8] 이한상, 김의현, 이정혁, "대기플라즈마 용사법으로 제조된 열차폐코팅의 열피로특성 평가", 대한금속·재료학회지, Vol. 46, No. 6, pp. 363-369 (2008)
- [9] J. H. Park, J. S. Kim and K. H. Lee, "Acoustic emission characteristics for diagnosis of TBC damaged by high-temperature thermal fatigue," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 537-541 (2007)
- [10] 이준현, 이진경, 조운호, "세라믹의 열충격 손상거동 및 초음파 Lamb파를 이용한 비파괴적 손상평가", 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제12호, pp. 2278-2285 (1998)
- [11] V. Teixeira, M. Andritschky, W. Fischer, H. P. Buchkremer and D. Stover, "Effects of deposition temperature and thermal cycling on residual stress state in zirconia-based thermal barrier coatings," Surface and Coatings Technology, Vol. 120-121, pp. 103-111 (1999)
- [12] 장중철, 최성철, "Thermally Grown Oxide의 고온 크리프에 따른 열차폐 코팅의 잔류응력 분포에 관한 유한요소해석", 한국세라믹학회지, Vol. 43, No. 8, pp. 479-485 (2006)
- [13] 이길승, 김태욱, 김화영, 안중환, "와전류 센서를 이용한 금속 모재 선별에 관한 연구", 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, pp. 1788-1792 (2005)
- [14] 정태인, 장기욱, 박대영, "와전류(渦電流) 표준침투(標準浸透) 깊이 표피효과(表皮效果)와 결함신호(缺陷信號) 위상각(位相角)의 관계해석(關係解析)", 비파괴검사학회지, Vol. 4, No. 2, pp. 7-14 (1985)
- [15] 황춘욱, 조희동, 박영민, 김순철, 이성식, "열교환기 세관의 확관부 Mock-Up 시편에 대한 와전류 신호 분석", 한국비파괴검사학회 추계학술발표회 논문집, pp. 293-298 (2001)
- [16] 정현규, 이운상, 정용무, 허형, 심철무, 양동주, "지르코늄 이중관의 Gap 측정을 위한 원거리장 와전류 기술", 한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, pp. 134-138 (2002)
- [17] 박병철, 안연식, 정계조, 박상기, 조용상, 김두송, "가스터빈 동익의 와전류검사", 한국비파괴검사학회 제7차 극동지역비파괴검사학술대회 및 춘계학술대회, pp. 291-296 (2006)