<Original Paper>
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 36, No. 5: 353-362, 2016
ISSN 1225-7842 / eISSN 2287-402X http://dx.doi.org/10.7779/JKSNT.2016.36.5.353

초음파 C-scan을 이용한 터빈 블레이드 열차폐코팅의 등온열화에 의한 박리 평가 기법

Delamination Evaluation of Thermal Barrier Coating on Turbine Blade owing to Isothermal Degradation Using Ultrasonic C-scan Image

이호걸*, 김학준*, 송성진*†, 석창성*

Ho-Girl Lee*, Hak-Joon Kim*, Sung-Jin Song*† and Chang-Sung Seok*

초 록 가스터빈 블레이드는 고온 고압의 환경 아래 장시간 가동하기 위하여 초합금 모재에 세라믹 코팅으로 이루어진 열차폐코팅(thermal barrier coating, TBC)은 필수요소이다. 하지만 TBC 또한 가스터빈 가동 중 일정 열화온도 및 가동시간에서 top coat의 박리현상이 일어난다. TBC의 박리는 블레이드의 손상과 직결되므로 가스터빈의 안정적인 가동을 위해서 TBC의 박리 평가가 선행되어야 한다. 기존 비파괴평가 기법 연구는 산화알루미늄층(thermally grown oxide, TGO)의 생성 유무 또는 완전 박리의 정성적 평가가 이루어져 왔다. 본 연구에서는 TBC 박리를 정량적으로 평가하기 위해 초음파검사의 C-scan기법을 이용한 TBC의 부분박리손상 map을 구현하였다. 시편들은 1,100°C로 등온열화하여 각각 열화시간을 변화시킨 시편들을 사용하였다. 단일 탐촉자를 이용한 펄스-에코법으로 C-scan을 수행하였고 TBC 내 부분박리를 검출하기 위해 초음파를 수침법으로 시편에 수직 탐상하였다. 그리고 Rogers-Van Buren과 Kim의 이론 반사식을 이용하여 부분박리영역 지름이 1 mm부터 6 mm까지 부분박리지수를 도출했다. 이를 적용하여 각 부분박리지수에 따른 부분박리 손상 map을 영상화하였다. TBC는 열화시간이 증가할수록 부분박리지수에 관계없이 부분박리영역이 모두 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 단일 시편 내에서 부분박리지수가 증가할수록 부분박리영역이 감소하는 것을 확인하였다. 부분박리손상 map의 부분박리영역에 따른 분포를 이용하여 TBC의 완전박리 기준과 잔여 수명을 또한 도출할 수 있었다.

주요용어: 열차폐코팅, 등온열화, 부분박리, 초음파, C-scan, 비파괴평가

Abstract Thermal barrier coating (TBC) is an essential element consisting of a super-alloy base and ceramic coating designed to achieve long operational time under a high temperature and pressure environment. However, the top coat of TBC can be delaminated at certain temperatures with long operation time. As the delamination of TBC is directly related to the blade damage, the coupling status of the TBC should be assured for reliable operation. Conventional studies of nondestructive evaluation have been made for detecting generation of thermally grown oxide (TGO) or qualitatively evaluating delamination in TBC. In this study, the ultrasonic C-scan method was developed to obtain the damage map inside TBC by estimating the delamination in a quantitative way. All specimens were isothermally degraded at 1,100°C with different time, having different partial delamination area. To detect partial delamination in TBC, the C-scan was performed by a single transducer using pulse-echo method with normal incidence. Partial delamination coefficients of 1 mm to 6 mm were derived by the proportion of the surface reflection signal and flaw signal which were theoretical signals using Rogers-Van Buren and Kim's equations. Using the partial delamination coefficients, the partial delamination maps were obtained. Regardless of the partial delamination coefficient, partial delamination area was increased when degradation time was increased in TBC. In addition, a decrease in partial delamination area in each TBC specimen was observed when the partial delamination coefficient was increased. From the portion of the partial delamination maps, the criterion for delamination was derived.

Keywords: Thermal Barrier Coating (TBC), Isothermal Degradation, Partial Delamination, Ultrasonic, C-scan, Non-Destructive Evaluation

[Received: June 16, 2016, Revised: July 11, 2016, August 23, 2016, September 13, 2016, Accepted: September 20, 2016] *성균관대학교 기계공학과, †Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Republic of Korea (E-mail: sjsong@skku.edu)
ⓒ 2016, Korean Society for Nondestructive Testing

1. 서 론

가스터빈의 블레이드는 고온 고압의 환경에 노출이 되어 있어 고온에 의해 이루어지는 열화로 블레이드의 수명이 짧아진다. 그러므로 블레이드의 열화를 막기 위한 많은 기법들이 있는데 그중 최근에 널리 쓰이는 방법이 열차폐코팅(thermal barrier coating, TBC)이다. 열차폐코팅은 모재의 고온, 고압 화염에 의한 급격한 온도 상승을 방지하여 수명을 늘려주는 역할과 내열성을 지니므로 터빈의 작동 온도를 상승시켜 운전 효율을 높일 수 있다[1]. 열차폐코팅의 구조는 모재위에 금속 성분(MCrAlY) bond coat과 세라믹 성분(yttria stabilized zirconia, YSZ) top coat, 두 개의 층으로 이루어져있다. 온도 상승 억제는 대부분 top coat에서 이뤄지고 금속인 모재와 세라믹인 top coat 사이의 열팽창계수 차이와 접착강도 문제 해결을 위해 금속재료인 bond coat를 먼저 모재에 코팅한 후 그 위 top coat을 코팅한다[2]. 하지만 열차폐코팅 또한 고온환경에서 가스터빈의 장기간 가동 및 정지로 인해 열차폐코팅의 파손이 발생한다[3]. 이와 같이 열차폐코팅의 주요 파손 원인은 코팅 박리이다. 박리는 가동시간 증가에 의해 top coat, bond coat 사이에 확산 현상으로 산화알루미늄층이 생성되고 성장하면서 발생한다. 이에 각 층간의 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 열응력이 주요 박리의 원인이다[4]. 이때 발생한 산화알루미늄층을 thermally grown oxide(TGO)라고 한다. 박리의 생성은 첨두부하용 발전 터빈의 경우 반복적인 열피로에 의한 코팅 파손이 주요 원인이지만 원자력발전소에서 주로 사용되는 기저부하용 발전 터빈의 경우 한 번 가동된 후 장시간 정지하지 않고 운전하므로 등온열화에 의한 파손으로 문제가 대두되고 있다[5]. 그러므로 정상상태의 장시간 운전에 수반되는 등온열화로 인한 코팅 변화의 특성 평가가 더욱 중요하다. 특히 기저부하용 발전 터빈의 경우 급작스러운 파손보다는 TBC의 내부에 발생하는 부분적 박리 현상이 더욱 중요한 문제가 될 수 있다[6]. 또한 가스터빈 부품은 매우 고가이며 재생정비에도 많은 비용이 소요되기 때문에 부분 손상만으로도 정비 비용이 막대해진다. 또한 압축기 블레이드 손상시 부분박리가 코팅에 미치는 영향을 정확히 이해하지 못할 경우 정확한 정비가 이루어지지 않으므로 또 다른 파급 손상을 일으킨다[7]. 그러므로 기저부하용 터빈블레이드 열차폐코팅의 부분박리로 인하여 가스터빈 블레이드의 파손이 일어날 수 있기 때문에 TGO층의 파괴정도를 예측하고 이를 보수하기 위해선 열차폐코팅의 박리정도에 대한 비파괴적인 평가가 이루어져야 한다.

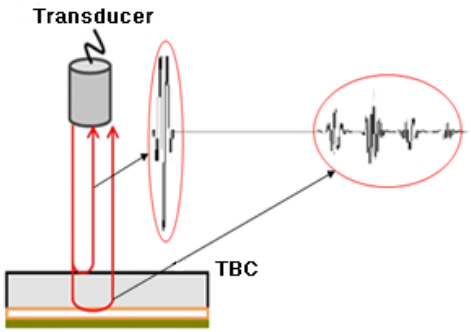
TBC를 비파괴평가 기법으로 연구한 사례로는 허태훈 등이 TGO층에 대한 와전류검사법의 적용가능성을 제시하였고[8] 강토 등은 임피던스 스펙트로스코피를 이용하여 TGO층의 생성을 탐상하였다[9]. 해외의 경우 Yang Zhao 등이 레이저를 이용하여 TBC의 산화시간에 따른 변화를 측정하였다[10]. 그렇지만 다수의 연구에도 불구하고 TGO 층의 유무 또는 TBC의 완전박리 판단 정도만 가능할 뿐 TBC의 수명과 직접적으로 연관이 있는 박리현상에 대한 정량적인 비파괴평가 연구결과는 현재 미비한 실정이다. 그렇기에 본 연구를 통해 TGO 성장에 따른 TBC의 부분박리 현상을 초음파검사의 C-scan 기법을 이용하여 부분박리손상 map을 구현하였다. 또한 이를 통해 TBC 시편의 완전 박리의 기준점을 제시하였다.

2. 실 험

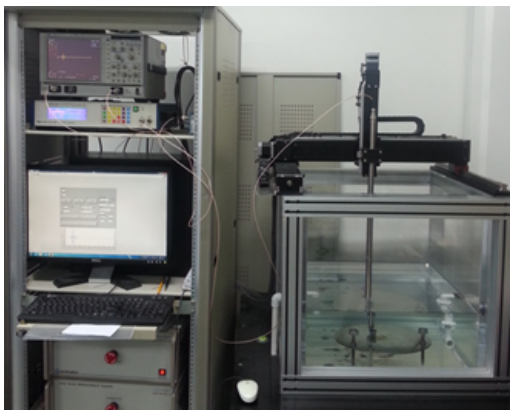
2.1. 시험편 및 초음파검사의 C-scan 기법 장치

본 실험에 사용된 TBC 시편은 인위적인 균열을 삽입하여 온도 변화에 따른 팽창 및 수축을 완화시켜 코팅 내구성을 향상시킨 코팅법을 사용하였다.[11] 시편은 지름 25 mm 코인 형태이고 모재의 두께는 3 mm이었다. 시편의 열화온도는 실제 터빈 가동 조건인 1100°C로[12] 등온열화했고 열화시간은 25, 50, 100, 150으로 각기 달리하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 시편이고 좌측부터 열화시간은 각각 25, 50, 100, 150시간 그리고 150시간일 때 완전 파괴된 시편을 포함해 총 5개의 시편을 사용했다. 시험편 내부로 입사된 초음파는 각 코팅의 경계면에서 음향임피던스의 차이로 투과와 반사가 일어난다. 이때 반사된 초음파는 오실로스코프 상에 나타나고 탐상 범위 내의 A-scan 신호들을 수집하여 이차원적 이미지인 C-scan을 작성할 수 있다. 신호 수집 영역은 30 mm × 30 mm이고 신호 수집 간격은 0.5 mm 이었다.

FIg. 1 Delaminate TBC specimen at 1,100˚C



(a)



(b)

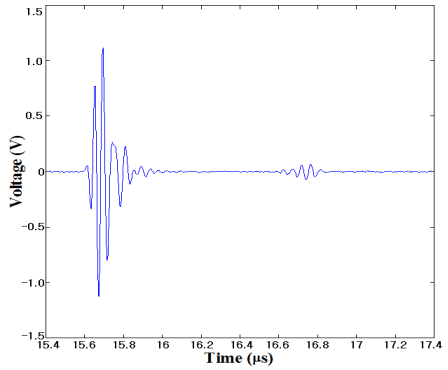
Fig. 2 Schematic diagram of (a) TBC reflection signal measurement (b) ultrasonic C-scan system

초음파를 이용한 C-scan의 반사신호 측정 모식도는 Fig. 2(a)과 같고 (b)는 초음파검사의 C-scan 기법을 이용할 수 있는 측정 시스템이다. 해당 시스템 구성으로 펄서-리시버 5900PR을 이용하여 20 MHz의 수침 탐촉자로 초음파를 가진하였다. 2차원 스캐닝을 수행하기 위해 초음파 탐촉자의 움직임은 자동 시스템으로 제어하였다. 수신 신호는 500 MHz의 샘플링 주파수로 디지털 오실로스코프에 기록하였다. 본 연구에서 사용된 전체 시스템은 LabVIEW 프로그램에 의해 제어하였다. 초음파 탐촉자는 중심주파수가 20 MHz이고 지름이 0.5 인치인 수침용 탐촉자를 사용하였다.

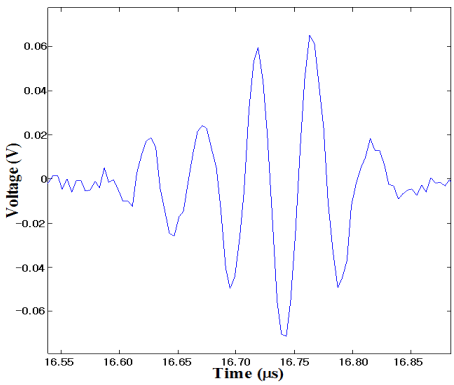
2.2. TBC 신호 측정 및 처리

TBC에서 반사된 A-scan 신호는 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)은 열화가 되지 않은 시편의 A-scan이고 두 개의 신호가 존재하는데 첫 번째 신호는 모재-물 경계에서 반사신호이고 두 번째 신호는 모재-bond coat, bond coat-top coat 두 경계면에서 발생된 두 신호들이 중첩된 반사신호이다.

두 번째 신호는 Fig. 3(b)와 같이 A-scan에서 두 번째 신호를 확대하여 확인해 보면 시편 내 세 경계면에서 반사하여 발생된 중첩 펄스임을



(a)



(b)

Fig. 3 A-scan signal of non-degradation specimen (a) reflection A-scan signal of TBC, (b) reflected multi signal from substrate-bond coat and bond coat-top coat Interface

Table 1 Specification and material property of TBC specimen

	top coat	TGO	bond coat	Substrate
Material	YSZ	–	MCrAlY	IN738LC
Thickness (μm)	400	–	150	3000
C_L (m/s)	3245	11193	5027	5929
Δt (μs)	0.25	–	0.06	1.01
Impedance (ρC_L)	1.96	4.46	3.88	4.68

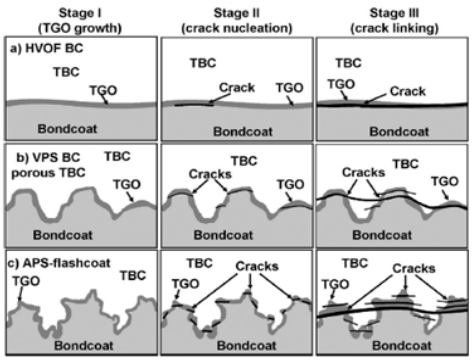


Fig. 4 Schematic showing proposed failure mechanisms for TBC systems with the studied bond coats. Stage I: TGO growth, Stage II: crack nucleation and growth, Stage III: crack linking and macroscopic failure[15]

알 수 있고 해당신호는 Table 1의 물성들이 초음파 신호에 반영된 결과이다.

등온열화 시 TBC 내부 계면중 어떤 계면이 중첩반사신호의 변화를 급격하게 만드는 주요인자인지 살펴보고자 기존의 선행연구를 통해 알아보았다. W. Nowak[13]의 TBC 박리모델인 Fig. 4와 같이 bond coat과 top coat 사이에 TGO층과 부분박리영역이 형성되지만 열화가 되지 않은 시편과 마찬가지로 Fig. 5(a)와 같이 첫 번째 표면신호와 두 번째 중첩신호가 발생한다. 등온열화 시편의 두 번째 중첩신호는 TGO가 생성되면서 모재-bond coat, bond coat-TGO, TGO-top coat, 세 신호의 중첩신호가 발생한다. 또는 부분박리가 일어난 경우 모재-bond coat, bond coat-공기 두 개의 신호로 이루어진 중첩신호가 발생한다. TBC 시편의 top coat과 bond coat의 두께가 너무 얇아 초음파의 신호가 중첩되므로 각 경계면의 반사된 신호를 정확히 분별하는 것은 매우 어렵지만 중

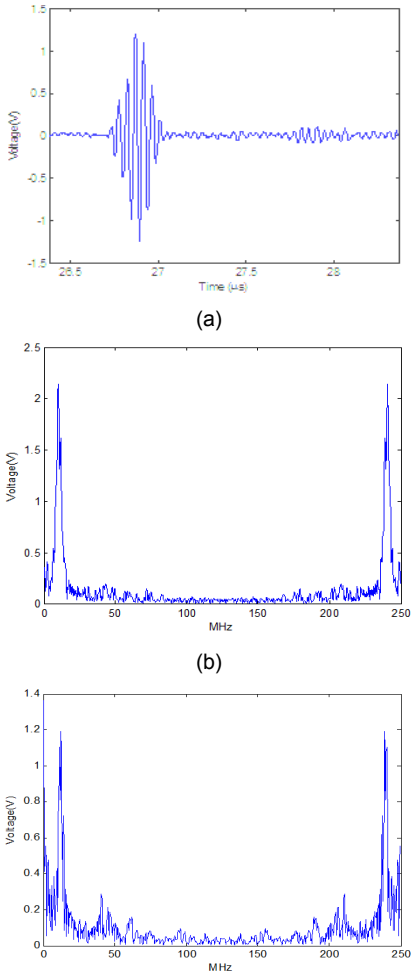


Fig. 5 Reflection signal of degradation TBC specimen (a) A-scan, (b) FFT of surface-substrate signal, (c) FFT of the multiple signal inside TBC

첩신호를 통해 상부 및 결합 코팅 사이의 변화를 알 수 있다. 이는 시편이 등온열화가 일어나게 되면 TGO가 bond coat와 top coat 사이에 생성되고 등온열화 후, top coat와 TGO의 경계면이 점점 약해지므로 시편에서 반사되는 두 번째 신호의 급격한 변화가 생기기 때문이다. 부분박리의 경우 bond coat과 TGO 층 사이에 공기층이 형성되므로 코팅의 결합이 초음파 반사신호로 확연히 드러나게 된다.

이것으로 반사된 초음파 신호의 급격한 변화를 예상할 수 있고 박리로 인한 bond coat-공기, 공기-TGO 사이의 경계면이 변화로 음향 임피던스의 차이가 발생한다.

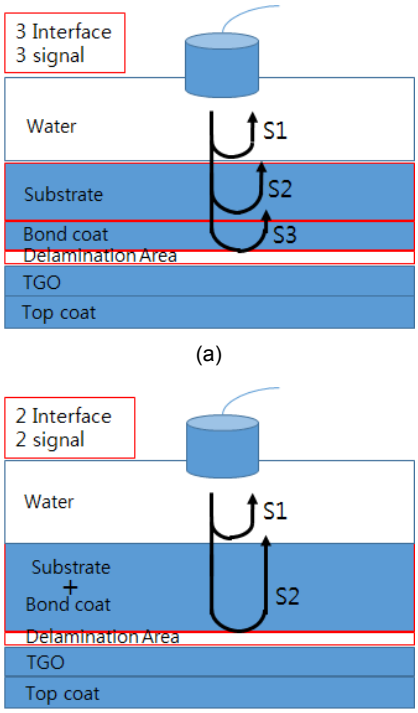


Fig. 6 Schematic of ultrasonic reflection model in TBC (a) actual model (b) calculated model

음향임피던스를 이용하여 모재-bond coat의 반사율을 Roger-Van buren 반사계수식[14]을 표현하면 다음과 같다.

$$E_r = E_i R = E_i\left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \quad (1)$$

수식(1)에서 E_r은 초음파 반사파의 에너지이고 E_i는 초음파 입사파의 에너지, R은 반사계수, Z_1, Z_2는 매질1, 2의 음향임피던스이다. 해당 수식을 이용하여 반사계수를 계산하면 0.009로 이는 반사파의 크기가 매우 작아 모재에서 bond coat에 입사된 파에 미약한 영향을 미친다. 그러므로 Fig. 6의 모식도와 같이 3개의 계면에서 3개의 반사신호가 발생하는 TBC의 초음파 모델을 2개의 계면을 갖고 2개의 반사신호가 발생하는 모델로 단순화할 수 있다. 2개의 계면으로 단순화된 모델을 이용하여 물-모재 간의 반사신호와 시편 내 중첩반사신호에 대해 각각 fast Fourier transform(FFT)를 수행하였고 이는 Fig. 5(b), (c)와 같다. 해당 FFT 값 중 탐촉자의 중심주파수에 해당하는 20 MHz의 신호값을 표면신호와 TBC 내부신호에서 각각 추출하여 TBC 내부신호의 FFT 값을 표면신호의 FFT 값으로 나눠 신호의 크기를 노멀라이징 해주었다. 해당 노멀라이징 수치를 실험값으로 하여 C-scan 데이터를 저장하였다.

FFT를 한 반사신호를 C-scan 기법에 적용한 이유는 TBC 시편 내 반사신호중 중심주파수를 이용하여 C-scan을 구현하면 결함 경계가 명확히 드러나는 현상을 이용하였다. 또한 노멀라이징은 반사계수 차이에 의해 항상 표면신호가 내부 신호보다 크므로 내부신호인 두 번째 FFT신호를 첫 번째 FFT신호로 나눠주는 신호처리를 하게 되면 모든 데이터는 1보다 작은 수치를 갖게 된다. 해당 수치는 초음파탐상 시스템 모델, 탐촉자 모델, 음장 모델, 산란음장 모델, 산란파 수신 모델이 변하여도 해당 기법을 사용하면 각 시스템 인자를 고려하지 않아도 C-scan의 일정한 결과를 도출할 수 있기에 해당 기법을 도입하였다.

다음으로 부분박리지수를 설정하기 위해 Rogers-Van Buren의 표면반사식[14]과 Kim의 내부결함 반사식[15]을 이용하여 이론값을 구하였다. 두 식 모두 Gaussian beam model을 이용한 반사식이므로 표면반사 신호와 내부반사 신호의 시스템 효율인자가 동일하다. Rogers-Van Buren의 표면반사식은 다음과 같다.

$$P_r = \rho v_0 c e^{ikz}\left\{1 - e^{-ika^2/z}\left[J_0\left(\frac{ka^2}{z}\right) - iJ_1\left(\frac{ka^2}{z}\right)\right]\right\} \quad (2)$$

$$V_0(\omega) = \beta(\omega)[\langle v_z \rangle / v_0] \quad (3)$$

$$V_0(\omega) = \beta(\omega) e^{2ik_1 z_1} e^{2ik_2 z_2}\left[T_{12}^{P:P} c(\omega)\right]^2 \times 4(w)\left(\frac{2}{-ik_2^p a^2} \cdot \frac{\rho_2 c_c^p}{\rho_1 c_1}\right) \quad (4)$$

식(2)를 이용하여 표면반사 신호의 크기를 구해보면 0.206935이다. 해당 수식에 필요한 수치로 ρ는 물의 밀도인 1 g/cm^3, v_0는 탐촉자에서의 음속 5800 m/s, c는 매질인 물의 음속 1480 m/s, k는 파수 21226 rad/m, z는 물거리 22 mm, a는 탐촉자의 반지름 3.175 mm와 같다. Kim의 내부결함 반사모델[2]은 Fig. 7과 같고 이를 수식으로 정의한 것이 식(3), (4)이다. 식(3)에서 $v_0(\omega)$ 주파수에 따른 전압, $\beta(\omega)$는 시스템 효율인자, v_z는 탐촉자에 수신된 초음파의 평균음속, v_0는 탐촉

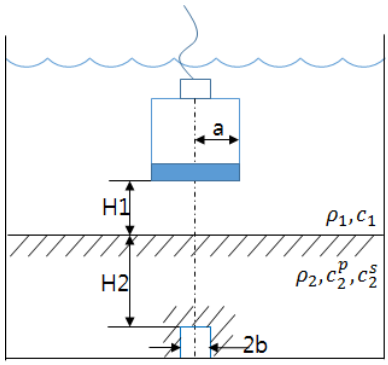


Fig. 7 Pulse-echo immersion testing geometry for a flat-bottom hole in a solid specimen[2]

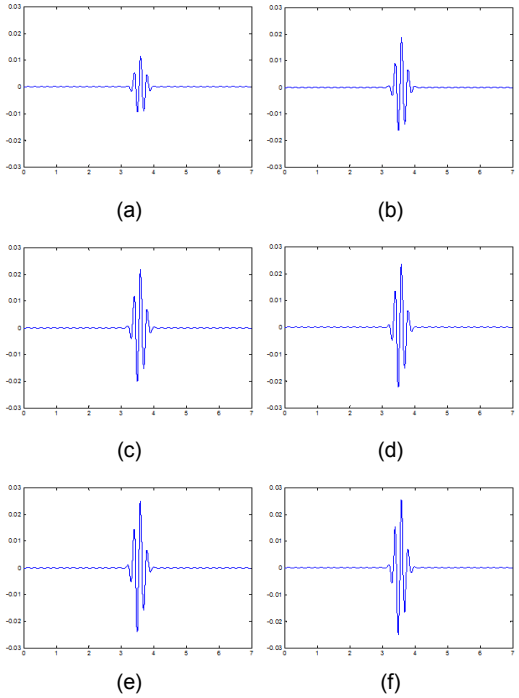


Fig. 8 Reflection A-scan signal from FBH by Kim[15]'s reflection model, (a) 1 mm, (b) 2 mm, (c) 3 mm, (d) 4 mm, (e) 5 mm, (f) 6 mm

Table 2 Amplitude of reflection signal amplitude and normalized amplitude by surface signal using theoretical equation

	1 mm	2 mm	3 mm
v_{defect} / $v_{surface}$	0.10021	0.16652	0.19976
	4 mm	5 mm	6 mm
v_{defect} / $v_{surface}$	0.21896	0.23301	0.241629

자에서 발생한 초음파의 초기 음속이다. 식(4)에서 H_1, H_2는 수직거리, $T_{12}^{p:p}$는 매질1, 2에 대한 종파의 투과계수, C(ω)는 회절보정계수, a는 탐촉자 반지름, ρ_1과 ρ_2는 매질1, 2의 밀도, c_1과 c_1^p는 매질1, 2의 종파 속도, k_1과 k_2^p는 매질1, 2에서의 파수이다. 식(3), (4)를 바탕으로 Matlab을 이용하여 1, 2, 3, 4, 5, 6 mm의 FBH결함을 가진 결함 반사 신호를 Fig. 8과 같이 도출하였다. FBH은 부분박리영역과 동일하다고 고려하고 탐촉자 지름보다 작은 6 mm까지 부분박리영역을 고려하였다. 결함반사 신호의 크기와 결함반사 신호값을 표면 반사 신호값으로 나눈 수치는 Table 2와 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

1100˚C 에서 등온열화된 TBC 시험편의 초음파 반사 신호의 실험값을 이용하여 C-scan 이미지를 Fig. 9와 같이 얻을 수 있다. 부분박리 면적은

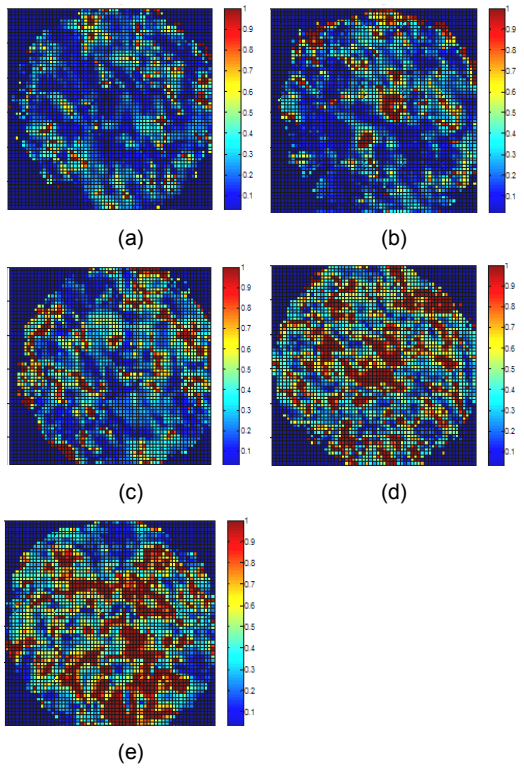


Fig. 9 Ultrasonic C-scan image of degradation TBC at 1,100˚C using v_{defect} value (a) 25 hours (b) 50 hours (c) 100 hours (d) 150 hours (e) 150 hours-spallation

TGO 두께에 따라 증가하므로 등온열화시간과 함께 TGO의 두께가 증가하기 때문에 큰 진폭을 가진 초음파의 반사가 많이 일어나는 영역의 면적이 증가함을 결과로부터 알 수 있다.

영역의 변화정도는 100시간 미만 열화시편들이 상대적으로 150시간 열화시편보다 작고 150시간일 때 반사영역은 급격히 넓어짐을 보여준다. 150시간에서의 급격한 변화는 탑 코팅재의 박리가 보수적으로 보았을 때 150시간부터 시작된다는 사실[16]에서 인과관계가 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 초음파신호에 대해 FFT를 수행하여 두 번째 신호를 첫 번째 신호로 나눠주는 신호처리를 하게 되면 모든 데이터는 1보다 작은 수치를 갖게 된다. 해당 데이터들의 값을 모두 legend가 0~1 사이의 값에 해당하는 RGB color를 이용하여 C-scan을 구현하였다. 하지만 Fig. 9는 박리손상지수를 이용하지 않은 단순한 C-scan map이므로 부분박리에 대한 정의를 내릴 수 없다. 그러므로 앞서 Table 2에서 구한 이론값을 이용하여 C-scan map을 영상화하였을 때 박리의 정량적평가가 가능하다.

등온열화된 TBC 시험편의 초음파 반사 신호를 노멀라이징한 Table 2의 $v_{defect}/v_{surface}$ 부분박리지수를 이용하여 부분박리 손상 map을 그리는 과정은 Fig. 10과 같다. 1~6 mm의 부분박리손상지수를 한 시편 내에 동시에 적용하여 반사신호의 크기가 각각의 부분박리손상지수보다 크거나 작음을 판별한다. 1 mm부터 6 mm까지의 선은 앞서 정의한 부분박리손상지수의 크기를 나타낸다. 예를 들어 실험의 반사 신호가 4 mm 부분박리손상지수보다 크고 5 mm 부분박리손상지수보다 작으면 4 mm 크기의 부분박리영역이라고 평가하는 것이다. 해당영역의 부분박리영역에 대한 크기를 색상을 달리하여 부분박리손상 map에 표현하였다. 부분박리영역은 1 mm 영역은 짙푸른색, 2 mm는 하늘색, 3 mm는 연두색, 5 mm는 주황색, 6 mm는 붉은색으로 표현하여 가장 넓은 범위인 1 mm부터 가장 좁은 범위를 갖는 6 mm를 적층식으로 표현하였다. 이를 바탕으로 부분박리와 완전박리의 연관성을 보고자 하였다. 그리고 각 시편의 부분박리 손상 map을 Fig. 11과 같이 도출하였다. 상대적으로 적은 시간에서 등온열화된 TBC에서 미약한 손상 영역을 관찰할

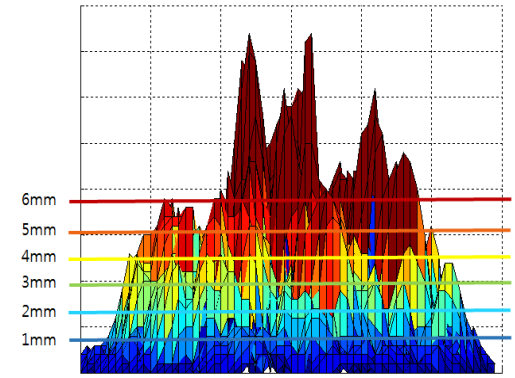


Fig. 10 Schematic of the drawing manner for the delamination map of degradation TBC at 1,100˚C using $v_{defect}/v_{surface}$ values

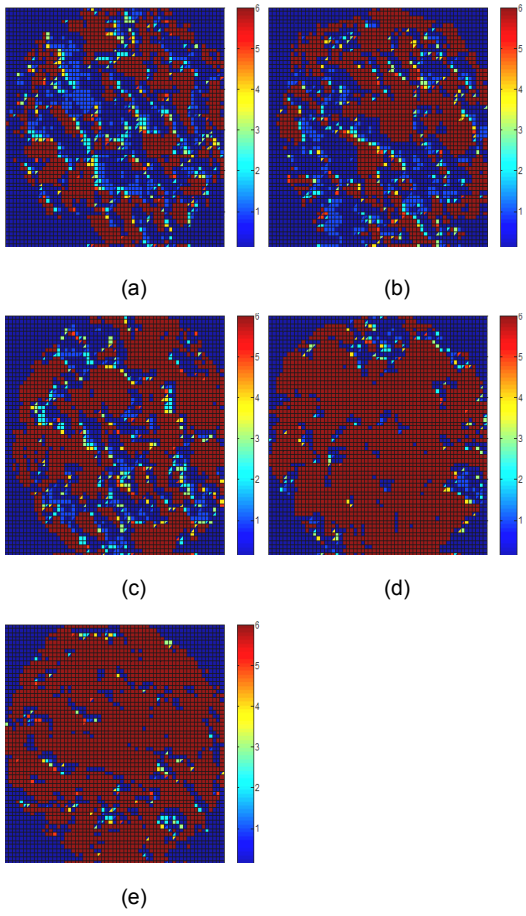


Fig. 11 Delamination map of degradation TBC at 1,100˚C using $v_{defect}/v_{surface}$ value (a) 25 hours (b) 50 hours (c) 100 hours (d) 150 hours (e) 150 hours-spallation

Table 3 The number of the partial delamination pixel categorized by the partial delamination coefficient

	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm
25hr	2194	1594	1309	1183	1083	1025
50hr	2224	1687	1454	1338	1260	1204
100hr	2511	2087	1860	1710	1612	1557
150hr	2769	2572	2452	2385	2323	2291
150hr Spallation	2762	2605	2469	2388	2330	2293

Table 4 Percentage of the partial delamination pixel categorized by the partial delamination coefficient

	25 hr	50 hr	100 hr	150 hr	150 hr spallation
1 mm	60.9	61.8	69.8	76.9	76.7
2 mm	44.3	46.9	58.0	71.4	72.4
3 mm	36.4	40.4	51.7	68.1	68.6
4 mm	32.9	37.2	47.5	66.3	66.3
5 mm	30.1	35.0	44.8	64.5	64.7
6 mm	28.5	33.4	43.3	63.6	63.7
1 mm - 6 mm	32.4	28.4	26.5	13.3	13

수 있다. Fig. 9에서 나타난 현상과 마찬가지로 부분박리 손상 영역은 등온열화시간과 비례함을 확인할 수 있었다. 이는 Table 3의 픽셀 수치를 통해서 정량적으로 부분박리 손상 영역의 증가를 확인할 수 있다. 또한 부분박리영역의 픽셀 수를 시편의 전체 픽셀 수를 기준으로 백분율을 Table 4와 같이 구할 수 있다.

주목할 점은 등온열화시간이 증가한 시편일수록 1 mm와 6 mm의 부분박리영역의 백분율 차가 적게 나는 것을 확인할 수 있다. 특히 완전박리가 일어나는 시점인 150시간[16]의 1 mm와 6 mm의 백분율 차가 가장 작았고 150시간 파손 시편과 비교하였을 때 백분율의 차이가 거의 없음을 알 수 있었다. 이는 완전박리가 일어나게 되면 적은 등온열화 시간에서 1 mm 부분박리영역보다 상대적으로 작은 면적을 차지하고 있었던 6 mm의 부분박리영역이 열화시간이 증가하면서 TGO 성장에 따라 부분박리영역의 크기가 커져 최종적으로 완전박리가 일어나는 시점에선 6 mm 부분박리영역이 대다수 면적을 차지함을 알 수 있다.

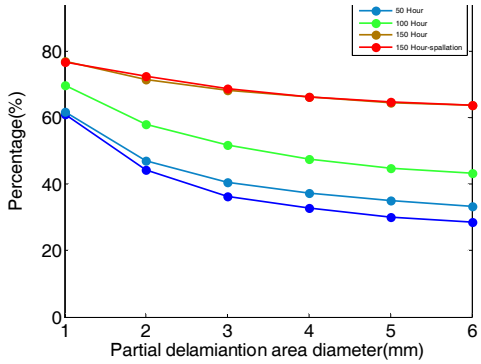


Fig. 12 Percentage of delamination area for TBC specimen at 1,100°C

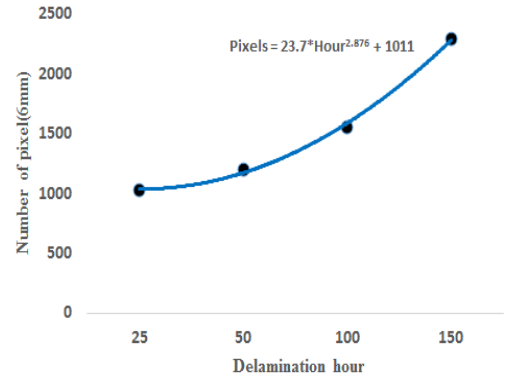
Table 5 Weighted averages of TBC specimens using partial delamination pixels.

	25 hrs	50 hrs	100 hrs	150 hrs	150 hrs spallation
1 mm	600	537	424	424	157
2 mm	285	233	227	227	136
3 mm	126	116	180	180	81
4 mm	100	78	98	98	58
5 mm	58	56	55	55	63
6 mm	1025	1204	1557	1557	2293
Weighted average	399.4	436.5	544.1	704.4	713.2

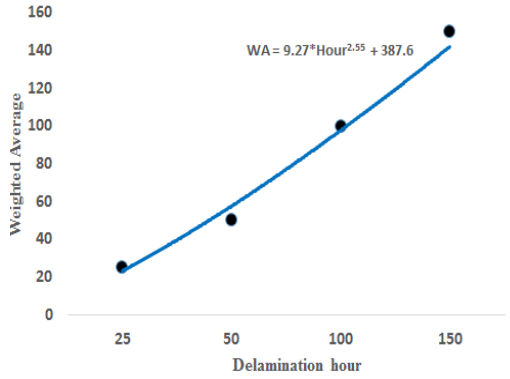
각 부분박리영역의 픽셀수를 이용하여 가중평균을 통해 완전박리 기준을 정립해보았다. 부분박리영역의 지름이 클수록 TBC 시편의 박리에 지대한 영향을 미치는 것을 Fig. 12에서 보였으므로 가중평균을 이용하여 완전박리 기준을 정하였다. 각 부분박리영역 지름에 따른 픽셀수는 중복수를 포함하고 있으므로 해당 픽셀수만 고려하여 Table 5와 같이 작성하였다. 완전박리 기준을 정립하기 위한 가중평균식은 식(5)와 같다.

$$WA = \frac{\Sigma w \cdot e}{\Sigma w} \tag{5}$$

WA는 가중평균이고 w는 가중치 즉 부분박리영역 지름 그리고 e는 부분박리영역 지름의 픽셀수이다. 식(5)를 이용하여 가중평균을 도출했을 때 150시간이 완전박리가 일어나는 시점이므로 150시간에서의 가중평균인 704.4와 100시간인 544.1이 완전박리를 결정하는 기준으로 정할 수 있다. 시편의 표본이 각각 100시간과 150시간이고 열화시간이 불연속적이므로 이를 고려하면 완



(a)



(b)

Fig. 13 Equations of (a) delamination hour-pixels of 6 mm (b) delamination hour-weighted average

전박리는 100시간과 150시간 사이에 일어나는 현상으로 추측할 수 있다.

이를 토대로 150시간에서 부분박리영역 지름을 6 mm으로 계산하면 픽셀수는 2465개이고 100시간에서는 1904개이다. 그러므로 부분박리에 큰 영향을 미치는 6 mm 지름 부분박리영역으로 완전박리 기준을 픽셀수로 정한다면 1904개와 2465개 사이에 완전박리가 일어남을 알 수 있다.

가중평균과 6 mm 부분박리 픽셀수를 고려하여 TBC 완전박리 평가가 가능하고 이를 바탕으로 잔여수명을 예측할 수 있는 관계식을 도출할 수 있다. 6 mm 픽셀수를 이용하여 도출한 시간-픽셀수와 관계식과 가중평균을 이용하여 도출한 시간-가중평균식은 각각 $Pixels=23.7*Hour^{2.876}+1011$, $WA=9.27*Hour^{2.55}+387.6$으로 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음파 수직탐상법을 이용한 C-scan 영상으로 등온열화된 TBC의 손상 map을 작성할 수 있었다. 수직탐상법으로 얻은 초음파 반사신호 중 TBC의 표면반산신호와 TBC 내부반사신호의 FFT를 통한 중심주파수 값의 비를 이용하여 데이터 처리하였다. 다음으로 Rogers-Van Buren과 Kim의 반사신호식을 통해 얻은 이론값을 이용하여 부분박리손상지수를 정의하여 각 시편의 영역별 박리영역의 크기에 따른 손상 map을 작성하였다. 등온열화 처리 TBC시험편의 실험결과, 초음파검사의 C-scan 기법을 이용한 박리손상 map을 통해 1100°C 등온열화 시 열화시간이 증가할수록 TBC 시편에서 손상 영역이 증가했다. 또한 열화시간이 증가하면서 TGO 성장에 따라 6 mm의 부분박리영역이 차지하는 비율이 증가하여 최종적으로 완전박리가 일어나는 시점인 150시간에서는 6 mm 부분박리영역이 대다수 면적을 차지하였다.

본 연구를 통해 부분박리에 주된 영향을 받는 기저부하용 터빈의 블레이드의 TBC 시스템의 건전성을 평가하여 블레이드의 손상 및 TBC 코팅의 유지보수에 기준으로 쓰일 수 있는 정성적인 평가기준을 제시하였다.

향후 연구 목표로는 초음파검사의 C-scan 기법을 이용한 부분박리 손상 map 구축에서 실제 박리손상영역과 오차를 줄일 수 있는 적합한 신호처리 기법에 관한 연구가 필요하다. 또한 현재까지 실험을 진행해왔던 탐촉자와 다른 주파수영역대의 탐촉자를 이용하여 top coat과 TGO의 경계면의 반사신호를 정확하고 측정하여 정밀하게 TBC의 박리 손상을 살펴보아야 한다. 나아가 다양한 등온열화온도와 시간 조건을 달리한 시편을 통하여 박리손상의 기준값을 검증한다면 TBC의 비파괴적인 평가를 통해 박리영역과 터빈 블레이드의 정비 기준 정립이 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구실지원사업(BRL) 지원으로 수행되었습니다 (No. 2011-0020024).

References

[1] J. M. Koo and C. S. Seok, "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)

[2] W. J. Brindley and R. A. Miller, "Thermal Barrier Coating Evaluation Needs," NASA Technical Memorandum 103708 (1990)

[3] W. J. Quadakkers, V. Shemet, D. Sebold, R. Anton, E. Wessel and L. Singheiser, "Oxidation characteristics of a platinized MCrAlY bond coat for TBC systems during cyclic oxidation at 1000℃," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 199, No. 1, pp. 77-82 (2005)

[4] Pindera, M. J. Aboudi, J. and Arnold, S. M, "The Effect of Interface Roughness and Oxide Film Thickness on the Inelastic Response of Thermal Barrier Coatings to Thermal Cycling," NASA/TM, Document ID: 2003-210803 (1999)

[5] M. Eskner, "Mechanical Behavior of Gas Turbine Coatings," Doctoral Thesis (2004)

[6] D. J. Kim, I. H. Shin, J. M. Koo, C. S. Seok and M. Y. Kim, "Evaluation on the delamination life of isothermally aged plasma sprayed thermal barrier coating," *Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 33, No.2, pp. 162-168 (2009)

[7] M. S. Kang, W. N. Yun and K. Y. Kim, “Effects of the damaged axial-flow compressor blade on the gas turbine components," *Jounal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 53-58 (2007)

[8] T. H. Heo, Y. Cho, J. H. Lee, J. S. Oh and K. H. Lee, "Evaluation of defects of thermal barrier coatings by thermal shock test using eddy current testing," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 5, pp. 450-457 (2009)

[9] T. Kang, J. Zhang, M. Yuan, S.-J. Song, H.-J. Kim, Y. Kim and C. S. Seok, "Influence of compressive stress in TGO layer on impedance spectroscopy from TBC coatings," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 33, No. 1, pp. 46-53 (2013)

[10] Y. Zhao, J. W Chen, Z. Z. Zhang and Y. N. Zhu, "Nondestructive evaluation of residual stress and TGO by using laser ultrasonic method," *2015 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA)*, Jinan, CHINA (2015)

[11] I. H. Shin, J. M. Koo, C. S. Seok, S. H. Yang, T. W. Lee and B. S. Kim, "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)

[12] D. J. Kim, I. H. Shin, J. M. Koo, C. S. Seok and T. W. Lee, "Failure mechanisms of coin−type plasma-sprayed thermal barrier coatings with thermal fatigue," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, No. 1, pp. S451-S458 (2010)

[13] W. Nowak, D. Naumenko, G. Mor, F. Mor, D. E. Macka, R. Vassena, L. Singheiser and W. J. Quadakkers, "Effect of processing parameters on MCrAlY bondcoat roughness and lifetime of APS − TBC systems," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 260, pp. 82-89 (2014)

[14] P. H. Rogers and A. L. Van Buren, "New approach to a constant beamwidth transducer", *J. Acoust. Soc. Am*. Vol. 64(1), pp. 38-43 (1978)

[15] H. J. Kim, S. J. Song and L. W. Schmerr Jr., "Modeling ultrasonic pulse-echo signals from a flat-bottom hole in immersion testing using a multi-gaussian beam," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 23, No. 1, pp 11-19 (2004)

[16] Y. Kim, "Performance evaluation of plasma-sprayed thermal barrier coatings," a thesis for a doctorate, pp. 37-53 (2016)