한국기계가공학회지, 제13권, 제6호, pp.1~7(2014.12) ISSN1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.13 No.6, pp.1~7(2014.12) ISSN2288-0771(online)

http://dx/doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.6.001

◆특집◆ 정밀계측제어

열 거동 영향에 따른 코팅층 검사 시스템

윤성운*, 김재열#, 최승현**, 김항우***
(* 조선대학교 기계공학과, #,** 조선대학교 기계시스템공학과, *** 송원대학교 기계자동차공학과)

Inspection System of Coating Layers by Thermal Behavior Effect

Sung-Un Yun*, Jae-Yeol Kim#, Seung-Hyun Choi**, Hang-Woo Kim***
(Received 15 December 2014; received in revised form 18 December 2014; accepted 26 December 2014)

ABSTRACT

Gas turbines for generation are operated under high temperatures, high pressures and in corrosive environments for long periods of time. This environment causes serious damage to these parts. Therefore, the material, coating, and cooling technology used with a gas turbine are important factors with regard to turbine blade development. One method that can be used to protect a product from harsh conditions is the coating technology. A turbine blade undergoes very aggressive thermal stress and experiences high-temperature fatigue. In order to reduce the surface temperature of the components and protect the blade from high-temperature flames, a thermal barrier coating (TBC) is applied to its substrate.

This study confirms the applicability of an inspection system for the turbine blade coating layer using an artificial heat source.

Key Words : Infrared Thermography(적외선열화상), Gas Turbine(가스터빈), Coating Layer(코팅층), Inspection System(검사 시스템)

1. 서 론

국가 산업발전에 필수적인 전력설비에 대한 체계적이고 통일된 진단기준 및 체계 구축은 고온·고압, 빈번한 기동정지등으로 설비의 안정성 및 신뢰성이 크게 위협받고 있는 가스터빈 설비에 반드시 필요한 일이며, 제작사에 의해 수행되는 진단비용 및 제작사가 권고하는 보수적인 교체기준을 완화함으로서 많은 비용절감효과를 가져올 수 있다. 또한, 발전설비의 예방정비 기간 중 발견된 결함에 대하여 안정성 판단유무에 따라 발전소의 가동률에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 발전소의 경제성을 높이는 것은 물론 안정적인 전력공급을 통한 국가적 경쟁력 확보를 위해서도 결함평가는 매우 중요한 문제이다. 또한 발전소의 수명을 결정하거나 발전소 연장운영 여부를 결정하는데 있어 전 운영기간 동안의 안정성 평가와 관련된 자료의 확보 및 체계적인 데이터의 관

* Dept. of Mechanical Engineering, Chosun UNIV.
# Corresponding Author :
Dept. of Mechanical System Engineering, Chosun UNIV.
E-mail : jykim@chosun.ac.kr
** Dept. of Mechanical System Engineering, Chosun UNIV.
*** Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Songwon UNIV.

리가 필수적으로 요구된다. 따라서 이러한 체계적인 설비관리 및 안정성 평가를 위해서는 정확한 진단과 평가를 위한 여러 가지 시험, 평가기술 확보가 필요하다[1,2]. 비파괴분야 신기술의 하나인 적외선 열화상 기술(IRT)은 온도차를 이용하여 설비의 건전성 여부를 객관적이고 정량적으로 진단하는 기술로 발전하고 있다. 국내 가스터빈 설비에서 대용량 설비의 증가가 두드러지고 있으며, 그 중 많은 비중을 차지하고 있는 것이 7F-Class 가스 터빈 발전소 이다. 7F-Class 가스 터빈 블레이드는 가스터빈 부품 중에서 가장 극심한 열응력과 고온피로를 받는 부품으로서 블레이드를 고온화염으로부터 보호하고 부품의 표면온도를 낮추기 위해 모재 표면에 열차폐 코팅(TBC : Thermal Barrier Coating)을 적용하고 있다. 열차폐 코팅은 MCrAlY 재료를 이용한 금속의 접합코팅(본드코팅)과 세라믹(7~8% Y2O3-ZrO2)재료을 이용한 최종코팅(탑코팅)등 2개층 이상으로 구성되어 있으며 이러한 TBC System의 내구성은 모재, 본드코팅 및 탑코팅 3개층 간의 결합과 상호작용에 의존하게 된다. 가스터빈 버킷은 회전기기에 요구되는 구조적인 건전성을 유지하면서 극심한 환경 조건하에서 운전되어야 한다. 이들 버킷에 대한 모든 종류의 손상 유형을 정하고 필요한 정비기술 및 정비공정 개발은 매우 중요하다[3,4]. 본 논문에서는 검사 시스템의 열원으로는 halogen lamp, hot air, ultrasonic excitation를 사용하였으며, 버킷의 손상 유형에 따른 인공 열원을 적용한 가스 터빈 블레이드 코팅층의 검사 시스템 적용 가능성에 대해 확인하였다.

2. 측정 이론

적외선열화상 비파괴검사 기술은 대상품을 파괴하지 않고 물리적 성질과 결함발생 여부를 대상체로부터 방사되는 적외선 검출을 통해 진단하는 품질검사 및 안정성 평가기술로써, 고도의 신뢰성과 안정성이 요구되는 반도체, 원자력산업, 방위산업, 항공우주산업, 자동차 산업 등의 발달과 더불어 그 활용성과 중요성이 증대되고 있다. 적외선 열화상 기법은 외부의 광원에서부터 대상 물체에 반사 되어진 적외선 파장을 검출하여 Stefan-Boltzmann Law에 의한 온도와 파장의 관계식을 이용하여 적외선 detector로부터 검출된 적외선 파장을 온도의 함수로 나타내어 온도의 고저를 화상으로 보여준다[5]. 초음파 적외선 열화상은 진동이 20kHz로 일어나게 되면 가청 주파수를 넘어서게 되고 이를 우리는 초음파라 하며 이때 발생되는 에너지원을 이용하는 검사기법이다. 실제 초음파 영역은 20kHz이상을 통칭 사용하고 있으나 열화상 검사 시에는 15~40kHz 대역의 가청이 일부 가능한 영역부터 초음파 탐상 비파괴 검사기법에 비하여 낮은 주파수의 초음파가 적용된다. 이러한 초음파를 발생시키는 장치는 대부분 초음파 혼을 통하여 발생되게 되는데 높은 주파수 영역으로 인해 진동 적외선 방법에 비하여 많은 진동을 발생시키게 되어 상대적으로 다른 검사 기법에 비하여 작은 μm 크기의 결함을 빠르게 검출할 수 있는 장점이 있다. 이때 발생하는 초음파는 횡파, 종파가 혼합되어 발생하는 혼합파 형태로 발생되어 매질을 타고 진행하게 된다. 초음파 발생기를 통하여 매질의 음향 인피던스에 따라 달리 전파되는 초음파는 결함에 다다르게 되면 탄성파와 마찰, 슬라이스 등을 일으키는 검사체의 물리적 현상에 의하여 발열이 발생하게 되고 이를 열화상 카메라를 통하여 검출하여 결함 여부를 진단 할 수 있는 기술이다[6].

3. 실험 장치 구성

3.1 Hot air를 적용한 검사 시스템

가스터빈 버킷 내부의 전체적인 열 공급을 위하여 루트부 후면의 air foil부의 냉각홀에 hot air를 주입하는 방식의 히팅 시스템을 설계 제작하였다. 시스템 히터의 사양과 용량, compressor의 최적 선정을 위해 FEM 해석을 수행하였다. Fig. 1은 열전도 해석 결과를 나타내고 있는 것으로 200℃의 Hot air로 약 10분 정도 가열하였을 때 버킷의 표면부 온도가 40℃이상이 되어 IR장비로 촬영하는데 문제가 없었다. 현 IR 장비는 30℃에서 0.1℃까지의 분해능을 가지고 있다. 이에 30℃보다 10℃ 추가로 가열하여 보다 나은 영상을 얻는데 주력하였다. Fig. 2는 hot air를 버킷의 냉각 홀에 주입하는 방식의 계략도를 나타내고 있다[7].

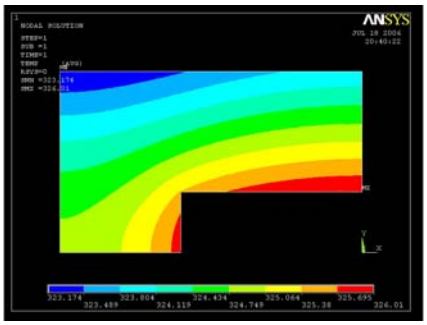

Fig. 1 FEM analysis by using ANSY program

Fig. 2 Diagram of Heating System using Hot Air

Fig. 3 Actual experiment equip ment set

3.2 Halogen lamp를 적용한 검사 시스템

본 연구에서 사용된 할로겐램프는 최대 용량이 1kW 할로겐램프를 2개 사용하여 시편을 가열하였다.

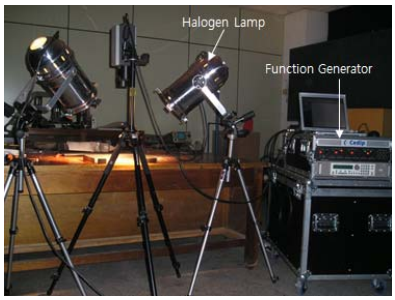

Fig. 4 Heating system using halogen lamp

Table 1 Specifications of halogen lamp

Model	aluPAR 64aluPAR 64
Nominal wattage	1000 W
Nominal voltage	230 V
Nominal luminous flux	297000 lm
Luminous intensity	297000 cd
Color temperature	3200 K
Beam angle	14/10°
Lifespan	300 h
Base(standard designation)	GX16d

또한 할로겐램프를 함수 발생기로 시험편을 자극하는 열원을 제어하면서 시편에 입사 시키도록 하였다. 다음 Fig. 4는 할로겐램프와 함수 발생기를 나타내고 있으며, Table. 1은 할로겐램프의 사항을 나타내고 있다[8].

3.3 Ultrasonic Excitation을 적용한 검사 시스템

본 연구에 사용한 초음파 가진기는 부스터 일체형 가진기이다. 사양은 입력전원 AC180~245V, 초음파 가진 시간 0.1~5sec 연속발진이 가능하며, 주파수조정범위는 30kHz이며, 출력은 400W이다. 실험은 60초 동안 5초 간격으로 초음파 펄스를 인가하여 1초당 1프레임으로 적외선 열화상 카메라로 계측하였다. 혼 형상은 대상체에 최적의 초음파 펄스를 입사하기 위하여 관련 논문 및 자료를 참고하여 원뿔형의 혼을 설계하고 두랄루민 재질로 제작하였다.

Fig. 5 Heating system using ultrasound excitation

4. 실험 방법

가스터빈 버킷은 회전기기에 요구되는 구조적인 건전성을 유지하면서 극심한 환경 조건하에서 운전되어야 한다. 제작사는 이들 버킷에 대한 모든 종류의 손상 유형을 정하고 필요한 정비기술 및 정비공정을 개발해 왔다. 손상유형에 따라 버킷을 뽑아 파괴시험을 수행하기도 하는데 이 결과를 근거로 버킷의 계속 사용 여부를 판단할 수 있다. 또한 버킷의 재생가능성 및 용접성과 정비방법 그리고 운전에 대한 권고사항도 역시 결정할 수 있다.

4.1 모재와 코팅층의 접착 상태 분석

가스터빈 버킷의 사용 주기에 따른 코팅층의 열적 부하 변동에 관한 연구를 위해 코팅면과 모재와의 접착 상태에 관해 Hot air를 적용한 검사 시스템을 사용하여 실험을 진행하였다. 가스터빈 버킷에 인공적으로 코팅면을 박리하여 비교 샘플을 제작하였다. 아래의 Fig. 6는 비교 샘플의 인공 박리 위치와 크기를 나타내고 있다. Hot air의 온도는 200℃로 선정하였으며, 3기압의 압력으로 주입하였다. 1시간동안 히터와 compressor를 작동하여 공기를 주입하였으며, 가열된 버킷의 냉각시의 특징을 살펴보기 위하여 히터만 작동을 멈추고 compressor를 이용하여 버킷을 1시간동안 냉각을 시켰다.

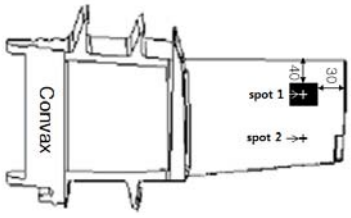

Fig. 6 Defect sample

4.2 박리 코팅층 결함 분석

터빈 블레이드 가동 중 코팅층의 박리 현상은 자주 일어난다. 이러한 진단 방법은 육안으로 수행되었으나 결함을 찾는 방법을 고안하기 위해 실험을 진행하였다. 외부에서 열적 자극을 가하는 방법인 광 적외선 열화상 기술은 직접 시편에 광원을 입사하는 방식인 reflection method와 시편 뒤에서 열원을 주어 시편을 가열하는 transmission method기법이 있다. 본 실험에서는 정확한 방사율 값을 지정할 필요는 없어 적외선 열화상 카메라와 광원의 방향이 같은 reflection method를 적용하였으며 halogen lamp로 진행되는 실험은 주변의 온도와 습도가 일정한 값을 유지하도록 하였다. 박리 시험편은 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7 Actuality image of defect

4.3 Halogen lamp와 hot air 검사 시스템

추가적인 실험으로 재생 정비 중에 코팅층에 크랙이 발생한 버킷을 대상으로 실험을 진행하였다. 아래의

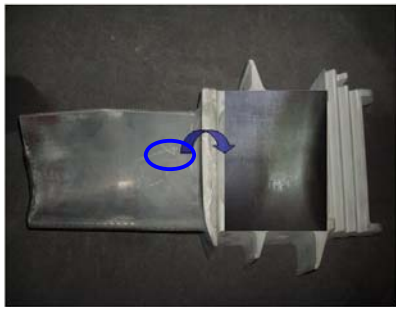

Fig. 8 Actual image of bucket crack

Fig. 8에서 보듯이 리드 테일부에 미세한 크랙이 발생되어 있는 것을 볼 수가 있다. 실험 진행은 Hot air 주입을 통한 가열 방식과, 할로겐램프를 이용하여 가열하는 2가지 방법으로 실험을 수행하여 비교 분석 하였다.

4.4 가스터빈 블레이드 크랙 검출

7FA G/T의 버킷 사용품을 대상으로 실험을 진행하였다. 7FA G/T 버킷의 사용품을 분석해 보면 convex쪽은 산화에 의한 손상이 빈번한 반면, Concave쪽은 크랙이 발생되는 것으로 볼 수 있다. Fig. 9는 7FA 가스터빈의 버킷에서의 실제 측정 위치를 나타내고 있다. 실험은 열원을 할로겐램프와 초음파 가진기 두 가지 방식을 사용하여 진행하였다. 초음파 가진기를 적용한 실험은 시편은 지그로 움직이지 않게 고정하였으며, 시편 옆면에 초음파 가진기 혼을 일정 접촉력으로 힘을 가하고 5초 간격으로 초음파 펄스를 인가하여 1초당 1프레임으로 적외선 열화상 카메라로 계측하였다.

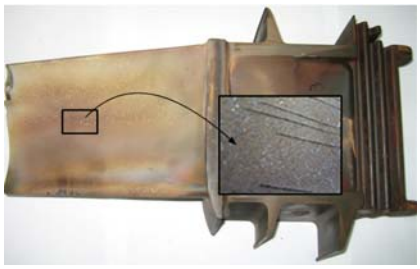

Fig. 9 Photographing position to detect crack

5. 실험 결과

버킷에 발상된 크랙은 설비에 대한 위험도가 상당히 높으므로 버킷의 손상을 비파괴 검사를 통해 철저히 진단 및 평가하는 것은 중요하다. 버킷 코팅층에 발생한 박리 및 크랙 손상에 대해 각기 다른 열원을 적용하여 비파괴 검사를 수행한 결과 다음과 같은 실험 결과를 얻을 수 있었다.

인공박리 결함이 있는 부분에서의 온도는 건전부보다 약 1℃ ~ 2℃ 낮게 나타났다. 이는 모재면에서 열전달이 코팅면으로 전달되는 과정에서 접착력이

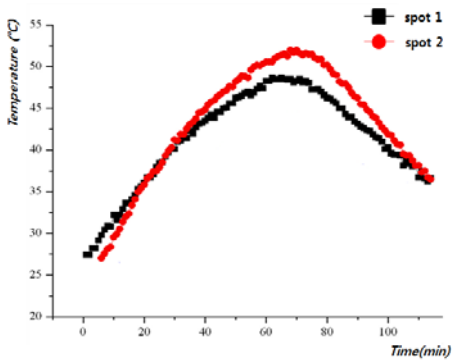

Fig. 10 Temperature distribution of spot 1 and spot 2

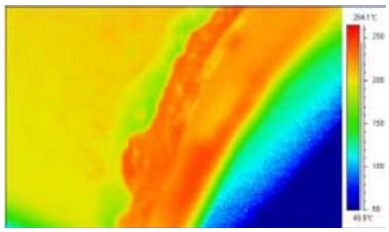

Fig. 11 IR image of delamination

다른 시편보다 약하여, 열전도가 원활히 이루어 지지 않아 온도가 타 시편보다 낮게 나타난 것으로 보인다. 시간에 따른 온도 분포 데이터를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 11에서 나타난 것과 같이 박리 된 버킷 끝부분에서 건전부 코팅층에 비해 높은 온도분포를 갖으며, 4~5℃의 온도 차이를 나타내고 있다.

아래의 Fig. 12 영상은 루트부의 hot air 주입을 통한 가열 방식의 열 영상이다. Fig. 13는 할로겐램프를 이용하여 1분간 주사하여 얻어진 열 영상이다. 아래의 그림에서 온도 데이터만을 그래프로 나타낸 것이 Fig. 14이다. Fig. 14에서 보듯이 크랙의 위치에서 온도가 약 1℃이상 증가되는 것을 볼 수 있었다.

열화상에서 나타나듯이 크랙 부분에 와서는 온도가 내려가는 것으로 볼 수 있다. 이는 halogen lamp의 빛이 크랙 사이의 비탈진 공간에서 서로 상쇄되어 없어지는 것으로 판단된다. 또한, 초음파 가진기를 열원으로 적용하였을 경우 카메라의 성능을 고려하여 뚜렷한 결함형태를 알아볼 수는 없었지만

halogen lamp를 적용했을 때 보다 짧은 시간에 결함 유무를 판단 할 수 있었다.

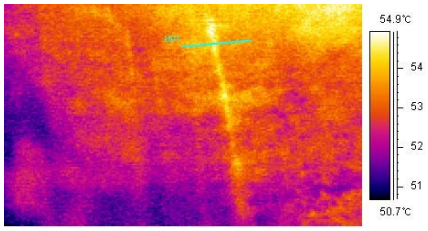

Fig. 12 IR image of bucket crack(hot air)

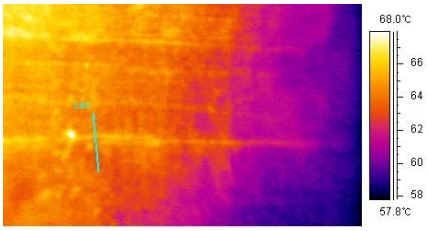

Fig. 13 IR image of bucket crack(halogen lamp)

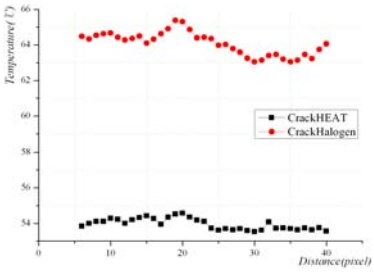

Fig. 14 Temp. of bucket crack

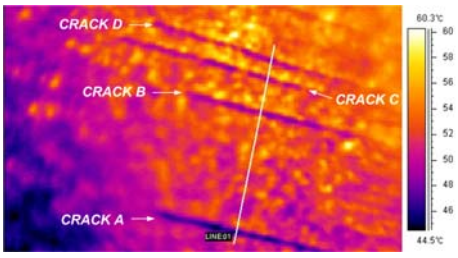

Fig. 15 IR image for detect crack(halogen lamp)

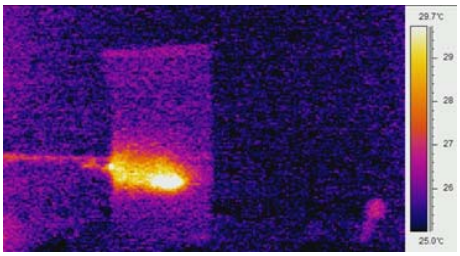

Fig. 16 IR image for detect crack (ultrasound excitation)

실제 crack B의 단면을 잘라서 VIDEO MICRO SYSTEM을 이용하여 전용 소프트 툴에에서 크랙의 크기와 모재로 진전된 크랙의 길이를 측정한 결과 크랙의 크기는 0.05mm이고, 코팅층을 제외한 모재에서의 크랙 길이는 약 0.3mm 정도로 나타났다.

6. 결 론

7FA 가스터빈 1단 버킷의 코팅층 건전성 평가를 위하여 적외선 열화상 계측 시스템의 적용 가능성을 검토하였다. 버킷 코팅층의 크랙 및 박리 시편의 열화상 진단을 수행하였으며, 진단을 효율적으로 진행하기 위한 히팅 시스템을 설계 제작하였다. Hot air 및 halogen lamp를 열원으로 적용하여 버킷의 크랙 및 박리 결함 검출이 가능함을 알 수 있었으며, 특히 halogen lamp를 적용한 크랙 판별 유무에서는 크랙의 온도가 주변의 온도보다 1℃ ~ 3℃정도 차이가 났으며, 이 중 1℃이상 온도 차이가 나는 크랙은 이미 모재로의 진전이 된 상태임을 알 수 있었다. 특히, 초음파 적외선 열화상 기법을 적용한 검사 시스템에서는 결함 검출 시간이 단축됨을 확인 할 수 있었다.

후 기

“이 논문은 2014년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음..”

REFERENCES

(1) Park. S. Y., Yang. S. H., Kim. M. Y., Choi. H. S., Ko. W. and Chae. N. H., "Analysis of Damage Trend according to Shape Modification of the 1st Stage Bucket of GE 7F-Class Gas Turbine", Proceeding of the KSPE Autumn Conference, pp. 631-632, 2006.

(2) Viswanatan. R., "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM International, 1989.

(3) Kim. U. H., Jung. J. S. and Park. W. S., "The effects of NiCoCrAlY bond coating methods on high temperature properties of thermal barrier coatings", Journal of KWS, Vol. 2, pp. 125-127, 1997.

(4) Hoeft. R., Janawitz. J. and Keck. R., "Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations", GE Power Systems, GER- 3620J, http://accttech.com/LibFiles/ger3620j. pdf

(5) Xavier P. V. Maldague., "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing", A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION., pp. 355-358, 2001.

(6) Favro. L. D., Thomas. R. L., Han. X., Ouyang. Z., Newaz. G. and Gentile. D., "Sonic infrared imaging of fatigue cracks", Int. J of Fatigue, 2001, 23,471−476

(7) Choi. C. J., Choi. S. H. and Kim. J. Y., "Study for Blade Ceramic Coating Delamination Detection for Gas Turbine", Modern Physics B., Vol. 22, pp. 5699-5704, 2008.

(8) Cha. Y. H., Kim. J. Y., Choi. S. H., Kim. S. H., Kwak. N. S. and Park. S. K., "Integrity Evaluation of Coatings For Refreshing Cycles Extension of the 1st Stage Bucket on Gas Turbine", Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 13, No. 9, pp. 1555-1561, 2012.