

가스터빈의 코팅층 건정성 평가를 위한 적외선 열화상 카메라 기법 활용

김재열*(조선대학교 기전공학과), 양동조(조선대학교 대학원 정밀기계공학과),
최철준(조선대학교 대학원 정밀기계공학과), 박상기(한국전력연구원),
안연식(한국전력연구원), 정계조(한국전력연구원)

IR Camera Technique Application for Evaluation of Gas Turbine Blades
Covering Integrity.

J. Y. Kim(Mech. Eng. Dept., CSU), D. J. Yang(Mech. Eng. Dept., CSU),
C. J. Choi(Mech. Eng. Dept., CSU), S. G. Park(KEPRI), Y. S. Ahn(KEPRI), G. J. Jeong(KEPRI)

ABSTRACT

Key part of main equipment in a gas turbine may be likely to be damaged due to operation under high temperature, high pressure, high-speed rotation, etc. Accordingly, the cost for maintenance increases and the damaged parts may cause generation to stop. The number of parts for maintenance also increases, but diagnostics technology for the maintenance actually does not catch up with the demand. Blades are made of precipitation hardening Ni superalloy IN738 and the like for keeping hot strength. The surface of a blade is thermal-sprayed, using powder with main compositions such as Ni, Cr, Al, etc. in order to inhibit hot oxidation. Conventional regular maintenance of the coating layer of a blade is made by FPI (Fluorescent Penetrant Inspection) and MTP (Magnetic Particle Testing). Such methods, however, are complicated and take long time and also require much cost. In this study, defect diagnostics were tested for the coating layer of an industrial gas turbine blade, using an infrared thermography camera. Since the infrared thermography method can check a temperature distribution on a wide range of area by means of non-contact, it can advantageously save expenses and time as compared to conventional test methods. For the infrared thermography method, however, thermo-load must be applied onto a tested specimen and it is difficult to quantify the measured data. To solve the problems, this essay includes description about producing a specimen of a gas turbine blade (bucket), applying thermo-load onto the produced specimen, photographing thermography images by an infrared thermography camera, analyzing the thermography images, and pre-testing for analyzing defects on the coating layer of the gas turbine blade.

Key Words : Gas turbines; Covering; Infrared thermography camera(IR camera)

1. 서론

현대사회는 산업이 고도로 성장함에 따라 전력 수요가 급증하고 있는 실정이다. 이러한 수요전력의 원활한 공급과 심각한 환경오염을 최소화하는 발전설비는 건설공기가 짧고 청정연료를 사용하는

가스터빈 설비가 최적이라 할 수 있다. 그러나 이런 발전용 가스 터빈은 장시간 고온, 고압 및 부식 환경에서 운전됨에 따라 산화 손상이 심각한 문제로 대두되고 있다. 특히 터빈 블레이드의 손상은 불시정지를 야기 시킬 수 있어서 사고예방 차원에서 관심이 집중되고 있다. 그러므로 가스터빈 고온

부품의 가동 중 건전성 확보를 위해서 주기적인 진단, 검사 및 정비 또는 교체가 필요하며 이를 위하여 정비 및 교체주기를 예측하기 위한 수명평가 기법이 요구되고 있다. 가스터빈(GE 7FA) 블레이드는 약 24,000시간의 정비주기(HGPI : Hot Gas path inspection)를 가지고 있으며 3HGPI의 교체주기를 가지고 있다. 이런 정기적인 정비시간에 사용되는 기존의 검사 방법은 많은 비용과 시간이 소요되고 신뢰성 있는 검사가 이루어지지 않고 있는 문제점이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 새로운 검사방법이 제시되어 왔다. 그 중 하나의 방법이 바로 적외선 열화상 카메라를 활용하는 방법이다. 이 기법은 빠른 진단시간과, 비용절감의 장점을 가지고 있는 반면 평가 결과의 정량적인 분석이 어렵고 검사 대상체의 가열 문제 등으로 인하여 가스터빈 블레이드의 코팅층 건전성 평가에 적용하지 못했다. 따라서 본 연구에서는 Thermography 기법을 가스터빈 블레이드 코팅층의 건전성 평가 방법으로 적용하기 위한 reference data의 구축에 관해 기술하고자 한다.

2. 실험장치 구성

2.1 Infrared thermography camera

적외선 열화상 카메라는 외부의 광원에서부터 측정하고자 하는 물체에 반사되어진 적외선 파장을 검출하는 측정기이다. Stefan-Boltzmann Law에 의한 온도와 파장의 관계식을 이용하여 적외선 detector로부터 검출된 적외선 파장을 온도의 함수로 나타내어 온도의 고저를 화상으로 보여주는 것이다.

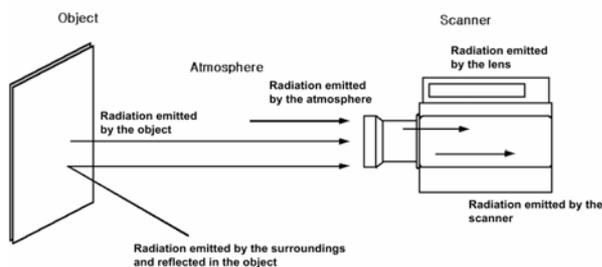


Fig 1: Measurement situation of thermograph

$$I_m = I(T_{obj}) \cdot \tau \cdot \varepsilon + \tau(1 - \varepsilon) \cdot I(T_{amb}) + (1 - \tau) \cdot I(T_{atm})$$

Fig 1: 에서와 같이 총 표준 복사에너지는 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다. 첫 번째 항은

Radiation emitted by the surroundings and reflected in the object, 두 번째 항은 Radiation emitted by the object, 세 번째 항은 radiation emitted by the atmosphere. 실험에 사용된 적외선 열화상 카메라는 AGEMA사에서 제작한 Thermovision 900 SW/TE이다. 적외선 열화상 카메라 스캐너의 냉각방식은 TE(Thermal Electric)이며 검출형태는 2개의 스프리트, 직렬 scanning, 2 ~ 5.4 마이크로론 스펙트럼 응답을 보이며 온도범위는 -10℃ ~ 500℃(고온 필터 사용 시 2000℃까지 검출), 민감도는 30℃에서 0.1℃, 공간 해상도는 104원소/Line(50%변조), IR line frequency는 3.5Khz이다. Fig. 2에서는 X-Windows OS(operation system)에서 운영되는 Thermovision 900 system을 microsoft windows OS 기반 laptop computer에 연결할 수 있게 해주는 Research Package900을 나타내고 있다.

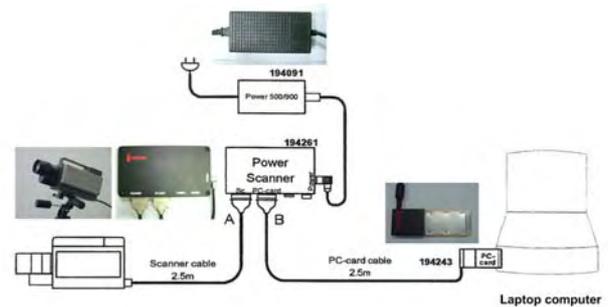


Fig 2: Infrared thermography camera

2.2 시편 제작

모든 가스터빈 부품 중에서 1단 버킷은 가장 가혹한 환경하에서 운전된다. 1950년대 이래 터빈 블레이드 재료의 사용 온도는 대략 연간 10℃ 정도 상승되면서 최고 사용온도(30ksi 응력에서 1000,000시간 파단수명을 주는 온도)가 470℃까지 증가되었다. 1970년 이후 공기 냉각 방식이 도입되면서 연소 온도는 더욱 상승되었고 금속온도가 870℃까지 높아지면서 블레이드의 고온 부식이 재료 고온 강도보다 부품 수명에 더 많은 영향을 주는 요인으로 등장하였다. 따라서 합금재료의 개발이 고온 부식 저항성과 장수명 내식 코팅 기술개발 방향으로 이동하였다. 본 연구의 대상인 GE 7FA 가스터빈의 1단 블레이드 재료는 DS GTD-111(GE 특허품)이다. 과거에 주로 사용되던 IN-738에 비하여 온도 능력이 20℃ 향상된 Equiaxed GTD-111 보다 10배 이상으로 이상 변형에 대한 저항력과 열피

로 강도 등이 향상되었고 33% 향상된 충격강도를 보이고 있다. 시편은 GE에서 생산한 7FA형 가스터빈의 1단 버킷에 사용되는 DS GTD-111 을 이용하여 54mm(L) × 19mm (W) × 4mm(T)의 크기와 54mm(L) × 19mm(W) × 1mm(T)의 크기를 각각 4개씩 총 8개를 제작하였다. 이와 같이 두 가지 부류로 나누어진 시편에 코팅층의 두께를 Fig. 3와 같이 변화시켜 코팅을 하였다. 여기에서 코팅층의 두께는 가스터빈 블레이드의 코팅부에서 쓰는 pass의 개념을 사용하였다.(pass의 값이 클수록 코팅층의 두께는 증가함, 적정 pass의 값은 8~16pass). 모재의 두께를 변화시킨 것은 가스터빈 블레이드의 wall 두께가 다양하고, 코팅층의 두께를 변화시킨 것은 가스 터빈 기동 후에 블레이드의 코팅층이 손상되면서 두께가 변하여 모재에 손상을 주기 때문이다. 따라서 시편 제작도 이와 같이 실제 정비 상황을 유사하게 재현하기 위해 시편의 종류를 다양하게 제작하게 되었다.

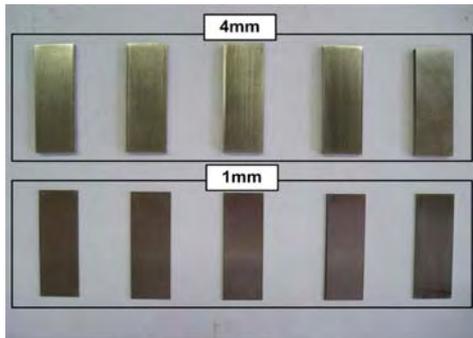


Fig3: Produced Specimens(4mm, 1mm)

2.3 heating system 제작

제작된 시험편의 적외선 열화상 카메라 촬영을 위해서는 일정한 온도로 가열하는 장치가 필요하다. Fig. 4에 시험편을 가열하기 위한 heating system의 구성을 나타내었다. 전기적 저항을 이용하여 금속 부를 가열시키고 금속부로부터 110mm 높이에 시험편을 위치시켜 공기층에 의해 간접적으로 시험편을 가열하도록 설계하였다. 또한 가열 공기가 시험편 측면으로 유입되는 것을 차단하기 위하여 시험편 주위를 Fig. 4와 같이 차단하였다.

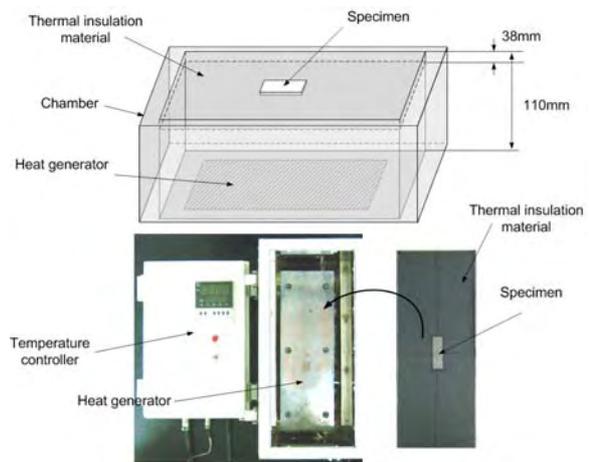


Fig 4: Schematic diagram of heating system

3. 실험 방법 및 결과

실험 방법은 코팅층의 두께와 모재(substrate)의 두께를 달리하는 시편을 제작하고 heating system으로 시편을 가열하는 방법으로 실험을 진행하였다.

가스터빈 블레이드의 wall 두께는 Fig. 5와 같이 매우 다양하다. 이런 다양한 두께 때문에 냉각홀을 통해 블레이드를 가열하여 열전달 되는 열량 차이로 코팅층의 건전성을 판별하기 위해서는 블레이드 두께에 따른 reference data가 필요하다.

3.1 코팅층 reference data 구축

가스터빈 블레이드의 wall 두께는 Fig. 5와 같이 매우 다양하다. 이런 다양한 두께 때문에 냉각홀을 통해 블레이드를 가열하여 열전달 되는 열량 차이로 코팅층의 건전성을 판별하기 위해서는 블레이드 두께에 따른 reference data가 필요하다. 따라서 본 실험에서는 블레이드 두께와 코팅층 두께의 변화에 따른 thermography 데이터를 분석하였다.

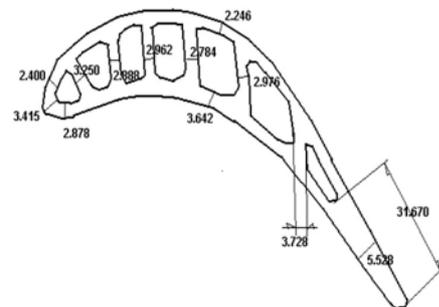


Fig 5: General thickness of blade wall

시편 가열 방법은 Fig. 6에 나타내었다. heating system의 heat generation부 온도는 약 500℃이며 heat generation부와 시편과의 사이를 110mm로 하여 공기층에 의한 간접적인 가열 방법을 택하였다.

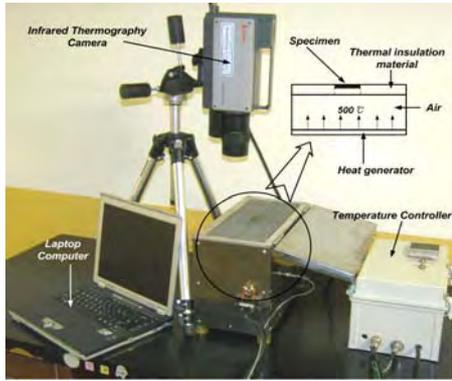


Fig 6: Component of experiment system

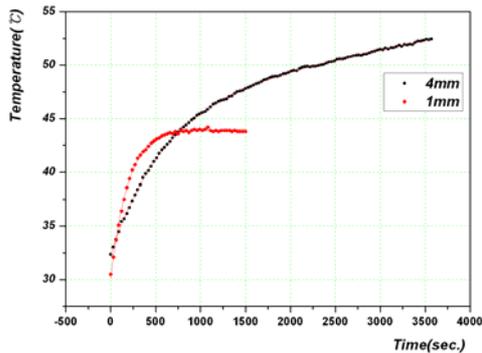


Fig 7: Temp. distribution before coating

그리고 Fig. 7은 가열 시간 변화에 따른 시편 표면 평균 온도를 그래프로 나타내었다. Fig. 7에서와 같이 적절한 시편의 가열 시간은 11분, 시편 온도는 42℃임을 알 수 있다.

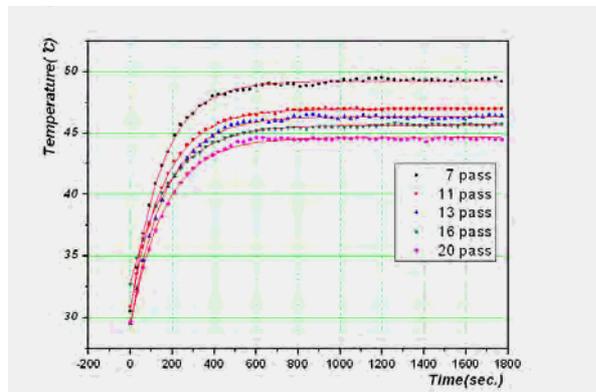


Fig 8: Temp. follow incoating thickness(1mm)

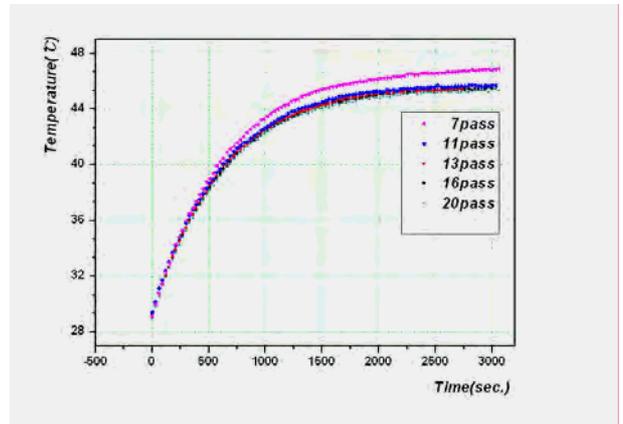


Fig 9: Temp. follow in coating thickness(4mm)

또한 모재의 두께 변화에 대해 코팅의 두께를 달리 하여 적외선 열화상 카메라로 촬영하여 얻어진 데이터 값을 코팅층의 변화와 모재의 두께 변화에 따른 온도-시간 그래프를 각각 나타내고 있다. Fig. 8(1mm)과 Fig. 9(4mm)에서 보듯이 모재의 두께가 작을수록 측정 온도는 증가하고, 코팅층의 두께가 클수록 측정 온도는 감소함을 알 수 있다.

4. 결론

적외선 열화상 카메라를 이용하여 가스터빈(GE 7FA)의 1단 버킷에 대한 코팅층 건전성 평가를 위한 reference data의 구축에 대한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

1. 시편의 두께와 코팅층의 두께를 다양하게 변화시켜 적외선 열 영상에 대한 데이터를 정량화시켰다.
2. 정량화된 적외선 열 영상을 통해 블레이드 wall 두께에 따른 코팅층의 건전성 평가를 위한 reference data를 확보하였다.
3. 모재의 두께 변화와 코팅층의 두께 변화에 따른 열 영상의 데이터를 정량화하여 reference data를 확보하였다.
4. 향후 연구 계획 : 본 연구에서 확보한 가스터빈 블레이드의 적외선 열 영상 reference data를 이용하여 가스 터빈 블레이드 코팅층의 건전성 유무를 판별할 수 있는 방법 및 system을 구축할 것이다. 또한 system의 신뢰성을 향상시키기 위해 지속적이며 다양한 적외선 열 영상의 정량화 작업을 수행할 계획이다.

후기

본 연구는 2005년도 산업자원부 전력연구개발사업과 지역혁신 인력양성 사업의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 노승훈, 가스터빈기술, 1996
- [2] Rovert Madding, Gary orlove, Inframation 2004 Proceeding (Las vegas, NV) Vol 5, 2004
- [3] Dong-Jo Yang, Chang-Heon Kim, Jae-Yeol Kim, "Evaluation of Defects in the Boned Area of Shoes by Using Infrared Thermal Vision Camera", MODERN PHYSICS, 제 17권, 제8&9호, pp.1947-1952, 2003
- [4] 김재열, 윤성운, 유 신, 마상동, 양동조,송경석, "Thermo-Analysis of Machining Center Main-Axis Thermo-Displacement for Infrared Rays Thermo-Image Camera", 한국공작기계학회 춘계 학술대회, pp. 125 ~ 130. 2001,
- [5] Dong-Jo Yang, Jae-Yeol Kim, Young-Tae Yoo, Kyoung-Bo Ro, and Jae-Ho Han, "Estimation of laser welding behaviors of SM45C steel by plume monitoring", Key Engineering Materials 제274호, 제 276권, pp. 463 ~ 468. 2004