[UCI]I804:24011-200000234166

2007년2월 석사학위논문

적외선열화상계측기법을 적용한 가스터빈블레이드 건전성평가

최 철 준

2007년 2월
석사학위논문

적외선 열화상 계측기법을 적용한 가스터빈 블레이드 건전성 평가

조선대학교대학원

정 밀 기 계 공 학 과

최 철 준

적외선 열화상 계측기법을 적용한 가스터빈 블레이드 건전성 평가

Integrity Estimation of Gas Turbine Blade Apply Infrared Thermography Technique

2007년 2월 24일

조 선 대 학 교 대 학 원

정 밀 기 계 공 학 과

최 철 준

적외선 열화상 계측기법을 적용한 가스터빈 블레이드 건전성 평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2007년 11월 30일

조 선 대 학 교 대 학 원

정 밀 기 계 공 학 과

최 철 준

최철준의 석사학위 논문을 인준함

위원장　조선대학교 교수　　심재기　인

위원　　조선대학교 교수　　윤성운　인

위원　　조선대학교 교수　　김재열　인

2006년　11월　30일

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

LIST OF FIGURES iii

LIST OF TABLE vi

NOMENCLATURE vii

ABSTRACT viii

제 1 장 서론 1

제 1 절 연구배경 및 국내•외 연구동향 1

1. 연구 배경 1

2. 국내•외 연구 동향 4

제 2 절 연구목적 7

제 2 장 열화상계측 및 분석 9

제 1 절 열화상계측 시스템 9

1. 열 측정 이론 9

2. 적외선 열화상 계측 시스템 구성 16

제 2 절 적외선 열화상 계측 실험 방법 21

1. 가스 터빈 블레이드 시편 실험 22

2. 적외선 열화상 계측 데이터(버킷 실적용) 13

3. 할로겐 램프를 이용한 코팅층 크랙 검출 34

제 3 장 연구 결과 및 고찰 ····· 33

제 1 절 가스터빈 블레이드 시편의 reference data 획득 ····· 33

제 2 절 가스터빈 블레이드 실적용 reference data 획득 ····· 34

제 3 절 가스터빈 블레이드 표면 크랙 검출 ····· 37

제 4 절 코팅층 물성 변화에 관한 연구 ····· 41

제 4 장 결론 ····· 53

REFERENCE ····· 56

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Atmospheric transmission over 1 nautical mile ····· 9
Fig. 2-2 Radiation contributions to the general measurement situation ····· 10
Fig. 2-3 Infrared thermography (Pulse technique) ····· 15
Fig. 2-4 Infrared thermography (Lock-in Technique) ····· 16
Fig. 2-5 Component of thermovision 900 system ····· 17
Fig. 2-6 Schematic diagram of system controller ····· 18
Fig. 2-7 Exploded view of the scanner optical path ····· 19
Fig. 2-8 Schematic diagram of scanner ····· 20
Fig. 2-9 The state of the art of the cooling blade ····· 21
Fig. 2-10 Blade cooling method of open and closed loop ····· 23
Fig. 2-11 The cooling technologies of G.E for first stage bucket ····· 23
Fig. 2-12 FEM analysis by using ANSYS 9.0 ····· 24
Fig. 2-13 Manufactured specimens (NEW, USED 1T, 4T) ····· 29
Fig. 2-14 Component of experiment system ····· 30
Fig. 2-15 Experiment system in dark room ····· 30
Fig. 2-16 FEM analysis condition by using ANSYS program. ····· 31
Fig. 2-17 FEM analysis by using ANSYS program ····· 32
Fig. 2-18 Actuality image of bucket ····· 33
Fig. 2-19 Diagram of heating system using hot air ····· 34
Fig. 2-20 Position of specimens to measure ····· 37
Fig. 2-21 Halogen lamp experiment for crack detection ····· 37
Fig. 3-1 Basic shape of blade ····· 38
Fig. 3-2 General thickness of blade wall ····· 39
Fig. 3-3 IR Image for specimens (before coating) ····· 40

Fig. 3-4 Temp. distribution before coating ····· 40
Fig. 3-5 IR Image for specimens (heating start) ····· 41
Fig. 3-6 IR Image for specimens (after 40minute) ····· 41
Fig. 3-7 Temp. follow in coating thickness(1T) ····· 43
Fig. 3-8 Temp. follow in coating thickness(4T) ····· 43
Fig. 3-9 IR image for specimens(last heating) ····· 45
Fig. 3-9 IR image for specimens(after 20min) ····· 45
Fig. 3-10 Temp. follow in coating thickness(1T) ····· 46
Fig. 3-11 Temp. follow in coating thickness(4T) ····· 47
Fig. 3-12 Experiment IR image of bucket ····· 48
Fig. 3-13 Temp. of spot 1 by burke ····· 49
Fig. 3-14 Temp. of spot 2 by burket ····· 49
Fig. 3-15 Temp. of spot 3 by burkett ····· 50
Fig. 3-16 Temp. of spot 4 by burket ····· 50
Fig. 3-17 Temp. of spot 5 by burkett ····· 51
Fig. 3-18 Temp. of spot 6 by burkett ····· 51
Fig. 3-19 Temp. of spot 7 by burket ····· 52
Fig. 3-20 Temp. of spot 8 by burkett ····· 52
Fig. 3-21 Temp. of spot 9 by burkett ····· 53
Fig. 3-22 Temp. of spot 10 by burket ····· 53
Fig. 3-23 Temp. of spot 11 by burkett ····· 54
Fig. 3-24 Temp. of spot 12 by burkett ····· 54
Fig. 3-25 Temp. of spot 13 by burket ····· 55
Fig. 3-26 Temp. of spot 14 by burket ····· 55
Fig. 3-27 Temp. of spot 15 by burket ····· 56
Fig. 3-28 Crack of IR thermography (Lamp ON) ····· 57

Fig. 3-29 Temp. distribution in change over time (Lamp ON) ····· 58
Fig. 3-30 Crack of IR Thermography (Lamp OFF) ····· 59
Fig. 3-31 Temp. distribution in change over time (Lamp OFF) ····· 59
Fig. 3-32 Image for crack by using camscope ····· 60
Fig. 3-33 Microscope image for new specimens(7PASS, 11PASS) ····· 62
Fig. 3-34 Microscope image for new specimens(13PASS, 16PASS)) ····· 62
Fig. 3-35 Microscope image for used specimens(U4TIN1, U4TOUT1) ····· 62

LIST OF TABLE

Table 1-1 Full equipment cycle of gas turbine main parts ····· 3
Table 2-1 Properties of matter ····· 24

NOMENCLATURE

B	: Spectrum parameter
F	: Model parameter
I_m	: Thermal value of measured whole radiation
$I(T)$	: Thermal Value
R	: Correspondence parameter
T_{amb}	: Ambient air temperature
T_{atm}	: Atmosphere air temperature
T_{obj}	: Temperature of measurement target
W_b	: Exitance of whole radiant energy
α	: Absorptivity
ϵ	: Emissivity
ρ	: Reflectivity
τ	: Transmissivity
σ	: Stefan-Boltzman constant

ABSTRACT

Integrity Estimation of Gas Turbine Blade Apply Infrared Thermography Technique

Choi Choul-Jun
Advisor : Prof. Kim Jae-Yeol Ph. D.
Department of Precision Mechanical Engineering,
Graduate School of Chosun University

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. 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. In this investigation, we evaluated diagnoses of a defect concerning coating of land-base gas turbine using infrared thermography camera. In this camera method has a strong point which is able to save time and costs compared with former method. Because it can be long field acquire temperature distribution by using non-contact method. But it has a week point that method applies thermal load about inspection sample. Presently, Method used widely in detection of crack is ultrasonic inspection. But this method, There is problem in application in place that uneven surface. In order to check cracks on a blade coating of a gas turbine, a part with cracks in a waste blade disposed after having been used in the field was extracted to produce a sample. So we apply the method by a infrared thermography camera to the produced sample, the sample was heated by means of a halogen lamp. In this paper, we want to describe production of land-base turbine sample, a method of applying thermal load at produced sample, infrared thermography camera technique, an analysis technique of thermography, a defect analysis of coating of land-base gas turbine blades.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 국내•외 연구 동향

1. 연구 배경

가스터빈의 주요설비는 고온·고압·고속회전등의 조건과 빈번한 부하변동 및 기동정지로 인하여 각설비의 중요 부품의 손상빈도가 높아 유지보수 비용의 증가는 물론 발전정지로 이어지는 경우가 많다. 이러한 설비의 손상상태를 정밀하고 체계적으로 진단하여 그 정도를 정확하게 판단하고 이를 기초로 각 부위에 대한 건전성을 평가 하여야 한다.

특히 전력산업 구조개편 후 전력설비의 운영이 안정성 보다는 당장의 수익성에 치우쳐 운영되고 있는바, 단기간에는 별문제가 없는 것처럼 보일지 몰라도 중장기적으로 전력설비의 안정성에 매우 심각한 잠재적 위험을 갖고 있어, 설비의 안정적인 운용을 위한 체계적인 설비관리 기준이 마련되어야 하는 시점에 이르렀다고 하겠다.[12]

가스터빈의 경우 기력발전소에 비하여 국외 전력회사에 대한 정보가 거의 없어, 국내 전력사는 제작사의 기준을 참고로 하여 운영하여 왔으나, 제작사가 정확한 자료를 제공하지 않아 체계적이고 일관된 기준이 부족 할 뿐 아니라, 이를 적용함에 있어서도 전력사마다 혹은 같은 전력사라 하더라도 제작사에 따라 상이한 기준을 갖고 있는 실정이다. 따라서 국내전력사의 설비 점검 및 비파괴 진단실적, 제작사의 기준은 물론 국외 전력사가 활용하고 있는 비파괴 기준설정을 위한 프로그램을 기본으로 국내의 설비운용 조건, 고장사례 등을 반영하여 비파괴 진단 기준정립이 이루어 져야한다.

진단기술의 국내자립과 진단결과의 신뢰성 제고를 위해서는 선진국에서 시행하고 있는 기술의 국내개발 및 적용이 필수적이다. 발전설비의 안전성 확보를 위해서 제작 및 건설 중에 관련규격에 따라 철저한 시험•진단을 수행하게 된다. 그러나 이들 장치나 설비는 장기간 가동에 따라 여러 가지 요인으로 손상/경년 열화 됨에 따라 강도의 저하와 함께 안전율도 떨어지게 되므로 지속적인 안정성 보장을 위해서 제작진단과 더불어 가동 전 진단(pre-service inspection) 및 계획예방정비를 실시한다. 계획예방정비 중 비파괴진단에 의한 결함평가는 발전소의 안정성과 직결되는 것으로 발전소의 안정성은 전 수명기간 동안 지속적으로 관리되어야 하며 많은 전문가들이 정보를 공유해야 한다.

GE 7F-Class, MS7001F(PG7191), MS7001FA(PG7221), MS7001FA+(PG7231), MS7001FA+e (PG7241) 가스터빈은 발전용량이 150MW급의 TIT(Turbine Inlet Temperature)가 약 1300℃ 고온에서 운전되고 있으며, 고온에서의 장시간 운전으로 인해 가스터빈의 주요부품인 로터 및 고온부품은 정기점검 및 교체주기를 제작사에서 권고하고 있다. 이는 적정 점검 및 정비주기를 통하여 설비의 신뢰성을 확보하여 효율적인 운영을 위한 것이다.[5]

적외선 검사방법은 기존의 비파괴검사방법으로는 검사하기 어려운 분야인 고온부, 고속회전부, 탐촉자의 접촉을 요할 수 없는 부분의 검사를 대체할 뿐만 아니라 번거로운 검사 방법을 대신한다는 점에서 많은 주목을 받고 있는 기술이며, 특히 열화로 인한 각종 설비의 결함부분을 검출하기 위한 방법으로는 그 유용성이 이미 검증된 부분이다. 또한 비접촉으로 검사가 이루어지기 때문에 설비 운전중 평가가 가능하다는 장점이 있다.

이러한 장점에도 불구하고 결함의 건전성을 판별하기 위해서는 외부 열원 또는 내부열원이 반드시 필요하기 때문에 Active 방법으로서 외부 열원의 공급 문제에 대한 기술적인 해결방법이 이루어질 경우 획기적인 비파괴 평가 방법이 될 수 있다.

Table 1-1 Full equipment cycle of gas turbine main parts

Division	Examination cycle (GE Recommendation)	Driving cycle (Exhaust)	Refreshing/equipment cycle	Use form
1th Bucket	24,000 hour	72,000 hour	16,000 hour	2th refreshing 3th use
1th Nozzle	24,000 hour	72,000 hour	16,000 hour	2th refreshing 3th use
Bolt	When inspect rotor accuracy	When assemble dissolution	Do not reuse	Whole provisions replace at dissolution assembly
Rotor	2,825 times	W510D5 : 30 year	GT11N : 10 year GE : 10~15 year	Reusability after wheel realignment
RBE Rotor	4,762 times			

발전설비의 특성상 일단의 고장정지가 발생하게 되면 예방정비 기간 중 발견된 결함에 대하여 안정성 판단유무에 따라 발전소의 가동률에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 발전소의 경제성을 높이는 것은 물론 안정적인 전기수급이라는 국가적 경쟁력 확보를 위해서도 결함평가는 매우 중요한 문제이다. 또한 발전소의 수명을 결정하거나 발전소 연장운영 여부를 결정하는데 있어 전 운영기간 동안의 안정성평가와 관련된 자료의 확보 및 체계적인 데이터의 관리가 필수적으로 요구된다. 이는 발전설비에 대한 관리체계 미흡으로 인한 설비 고장시 엄청난 사회, 경제적인 비용 초래가능성이 상존하고 그 피해의 전파가능성을 항상 내포하고 있기 때문에 보다 정확한 진단과 손상해석 또는 안정성평가를 위한 여러 가지 시험 및 평가기술의 확보와 관련된 연구와 시험, 진단장치의 개발이 병행되어야 한다.

적외선 검사(Infrared Ray Testing)는 적용기법과 편리성에서 많은 각광을 받고 있는 검사 방법이다. 적외선 검사방법은 물체의 단위 면적•시간당 방출되는 복사에너지 즉, 복사 에미턴스(Radiant emittance)의 차이를 영상화하여 물체의 온도를 측정하는 방법으로 1930년대부터 군사용으로 개발되기 시작하였다. 적외선 열화상

카메라는 산업전반에 걸쳐 대단히 광범위한 응용을 보이고 있으나 적외선 열화상 카메라의 핵심기술부분인 적외선 검출 센서는 선진국에 국한된 군사 기밀 기술로서 거의 모든 제품군이 수출규제 품목에 해당되며, 민수용으로 사용하더라도, 각 end-user의 정확한 사용목적을 기술하고 수출허가를 취득한 후 납품이 될 정도이다. 이런 이유로 적외선 열화상 카메라를 이용한 진단기술은 향후 부가가치 창출의 선행기술이 될 것으로 판단된다.[(13)(14)]

2. 국내·외 연구동향

가스터빈 발전소의 경우 원자력 발전설비에 비하여 온도조건과 기동정지 조건이 더욱 가혹함에도 불구하고, 검사기준과 시스템 관리상태는 최소한의 요건만 요구하고 있는 실정이다. 특히 전력산업 구조 개편 후 발전소의 수익성이 지나치게 강조되어 보수주기 및 비용을 줄이려는 방향으로 발전설비가 운용되고 있어 선진국의 민영화 사례에서 보듯이 멀지 않은 미래에 발전설비의 고장이 급속히 증가하여 전력의 안정적인 공급에 지장을 초래할 가능성이 상존하고 있다.

특히 계획예방정비 기간 중 수행되는 비파괴 진단은 한전기공 가스터빈 정비센터에서 대체로 총괄 운영 되고 있으며, 관련분야 비파괴 검사가 수행되더라도 기술적인 판단과 검사결과의 평가에 대해서는 핵심 부품을 제작사에 의존하고 있는 실정이다. 결국 비파괴 진단평가를 제작사에 의존한 결과, 대부분의 운전 중 발생된 결함에 대하여 과도하게 평가를 실시하여 교체 정비를 권고안으로 제시하고 있으나, 이를 방어할 기술적 배경이 미흡한 상태여서 비파괴검사 결과에 대한 신뢰성을 검증할 수 있는 국내 시스템 확보가 요구된다.

다만 이러한 문제점에 대한 인식은 발전회사와 정비회사에서 인식하고 있는 상태이며 일부 발전회사에서는 가스터빈 비파괴 진단수행 업무에 대한 필요성 검토가 적극 이루어지고 있다.

국내에 존재하는 많은 가스터빈에 대한 비파괴 진단기술은 일부 부품에 대하여 MT, PT 검사를 적용하고 있으며 대부분 제작사에 의존하여 비파괴적 진단을 수행하고 있다. 현재 사용되고 있는 FPI, MT 기술의 현장 적용성 한계점을 인식하여 대체 검사방법으로는 와전류검사(ECT)기술 적용에 필요한 장비도입과 신호해석 기술이 도입단계에 있다.[12]

그 동안 비파괴검사 기술에 대한 연구개발이 원자력이나 스팀터빈에 집중되어 왔으나, 상대적으로 고온의 가혹한 환경에서 운전되고 있는 가스터빈에 대한 연구개발은 미비한 실정이다. 가스터빈 설비에 대한 비파괴 적용기술은 기존 스팀터빈에서 사용하는 방법으로 자성체 로터에 대해서는 MPI를, 비자성체인 7F-Class 터빈 로터의 경우 FPI을 수행하는 정도의 표면 검사만 이루어지고 있는 실정이다.

국내에서는 한전기공 가스터빈 정비센터를 중심으로 해외 공급사인 GE등과 기술협정을 통하여 일부 품목에 대한 비파괴 진단을 수행하고 있으며, 운영설비별 고장 사례에 대한 정보는 정비기술과 함께 부분적으로 유지 관리하고 있으나 독자적인 진단체계구축에는 기술적인 한계를 나타내고 있다.

한국표준과학연구원 및 일부 학교를 중심으로 표면결함 검출을 위한 와전류 센서 제작기술은 일정 수준에 도달해 있으며, 블레이드 코팅층에 대한 열화상결함 평가에 대한 기초 연구는 학교기관에서 일부 수행 중에 있다. 그러나 기술적용 대상 설비에 대한 실용화 연구가 진행되지 못한 상태이며, 일반적인 표면결함 검출 기술 기반은 이 연구과제에 앞서 기초 기술과 필수 최소 장비는 확보되어 있고, 부품별로 실용적인 평가기준과 진단 절차에 대한 시스템적 접근과 조직구축은 미 확보된 상태이다.

비파괴 검사결과로 이루어지는 결함 데이터는 안전진단, 결함평가, 재료 물성에 대한 해석과 동시에 이루어 져야 하지만 각 분야별로 제한적으로 수행되고 있고, 주요 데이터의 통합관리는 이루어지고 있지 않고 있다. 설비의 안전진단은 각 부위별로 최소기술을 적용하여 정기적인 비파괴검사가 수행되고 있으나 검사데이터의

양이 워낙 방대하고 부위별 관리가 어려워 체계적인 저장이나 통계처리가 어려운 실정이다. 특히 결함검출 분야는 평가절차 및 시스템 확보를 위해 많은 시간과 인력이 소요되는 상황이며, 설비의 노후화 진행에 따라 중요성이 증가하고 있는 실정에 비하여 각 발전사 별로 결함검출을 위한 체계적인 시스템을 유지/개발하는 데는 인력과 시간적 소요가 과다하게 투입되어야 하는 문제가 있고, 국내 연구분야에서는 고온부품 소재개발에 치우치고 있어 현 설비의 비파괴 진단기술은 전문인력과 예산의 부족으로 본격적인 시도가 이루어지지 않고 있다.

적외선 열화상 카메라의 활용 면에서 보면 의료 분야에서는 인체의 체온을 측정하여 질병의 유무를 판단하고 있으며, 산업현장의 경우 단순히 열화상 촬영에 국한되어 있으며 이 역시 측정자의 주관적인 판단에 따라서 평가가 이루어지고 있는 실정이다. 이렇게 적외선 열화상 카메라를 이용하여 촬영한 열화상의 분석을 보다 객관적인 판단 근거를 위한 기준 개발이 필요한 상태이다.

세계 각국의 전문 정비회사는 기술이전이나 기술개발을 통하여 기술자립을 수행하고 있으며, 신 모델에 적용하는 이 분야의 기술은 미진한 상태로서 거의 제작사에 의존하여 수행하는 상태이다. 또한 제작사의 원천기술 습득에 많은 문제가 있어 신 모델 적용 기술개발에 커다란 어려움을 지니고 있다. 따라서 대부분의 선진 전문정비회사도 기반 기술습득을 위하여 자체 개발과제를 추진 중이거나 추진 하고자하는 상태이다.

유럽(ABB ALSTOM, SIMENSE 등)에서는 미국 전력사에 대한 인수 합병 전략 등을 바탕으로 국내 가스터빈 시장을 공략하고 있으며, 비파괴 검사장치의 소형화/자동화 기술을 개발하고 있다. 적외선 검사 분야는 가스터빈 블레이드 버킷 코팅층 건전성 평가를 위해 halogen lamp를 사용하여 적외선 열화상을 측정하는 방법이 소개되고 있지만 단순히 열화상 측정에만 머물고 있으며, Westing House사에서는 블레이드에 가진을 부여하고 진동에 의한 결함 경계에서 마찰이 발생하는 현상을 열화상 카메라로 검출하는 기술이 개발되고 있다.[12]

제 2 절 연구목적

현재 가스터빈을 이용한 복합발전은 국내 총 발전량의 27% 정도에 이르고 있으며, 복합발전은 타 발전방법에 비해 건설기간이 짧고, 환경에 무해하고, 건설부지가 비교적 좁아서 부하변동에 대처할 수 있기에 그 비중이 점차 증대되고 있다. 복합발전용 가스터빈 엔진의 터빈부는 1,000℃이상의 고온 환경에서 작동하기 때문에 부품의 열화에 의한 경년(aging) 효율 저하 폭이 타 발전 수단에 비해 크고 국내 전력 여건상 잦은 기동 및 정지로 인하여, 고온 부품의 수명이 3~4년 정도로 매우 짧고 고장이 빈번한 실정이다. 이에 따라 터빈 고온 부품의 보수 정비의 수요가 점차 증가하고 있다.

특히 가스터빈의 경우 검사나 진단 기술이 제작사의 기준을 참고로 하여 운영하고 있으나, 제작사가 정확한 자료를 제공하지 않는 실정이며, 이에 따라 체계적이고 일관된 기준이 부족할 뿐 아니라, 이를 적용함에 있어서도 제작사의 주관된 기준과 정비 업체의 상이한 기준으로 정비 기술면에서 크게 뒤떨어지는 실정이다.

또한 가스터빈 각 부품에 대한 비파괴 진단기술은 제작사에 의존하고 있으며, 일부 국내업체가 시행하는 기술도 MT, PT등에 한정하고 있어 선진국의 ECT, 배열형 소자를 이용한 진단결과의 2차원 영상화, 자동 검사 장치에 의한 진단, 디지털 RT, 적외선 열화상 검사 등의 신기술과 거리가 멀다 하겠다.

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 정비 주기(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 검사 방법이 제시되고 있는 방법이 바로 적외선 열화상

카메라를 적용한 방법이다. 이 기법은 빠른 진단 시간과, 비용절감의 장점을 가지고 있는 반면 평가 결과의 정량적인 분석이 어렵고 검사 대상체의 가열 문제등으로 인하여 가스터빈 블레이드의 코팅층 건전성 평가에 적용하지 못했다. 따라서 본 열화상(Thermography)기법을 가스터빈 블레이드 코팅층의 건전성 평가 방법으로 적용하기 위하여 기초실험 및 Heating System에 현장 적용 타당성에 중점을 두어 연구를 추진하였다.

제 2 장 열화상계측 및 분석

제 1 절 열화상 계측 시스템

1. 열측정 이론

전자기 스펙트럼은 대역(band)이라고 부르는 많은 파장의 영역으로 나눌 수 있다. 여기에는 전자기 스펙트럼의 다른 대역간의 기본적인 차이점은 없고 모두가 동일 법칙에 의한 지배를 받고 있으며 유일한 차이점은 단지 파장의 차이 뿐이라는 사실이다. 적외선 열화상 카메라는 Fig. 2-1에 나타낸 바와 같이 2㎛~13㎛ 대역을 사용한다. 여기서 SW(Shortwave) 영역은 2㎛~5㎛의 대역을 사용하고 LW(Longwave) 영역은 8㎛~12㎛의 대역을 사용한다. 중간에 5㎛~8㎛의 대역에서는 공기 중 수증기에서의 전달률이 0%를 나타내고 있으므로 적외선 검출이 불가능하기 때문이다. 또한 SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다.

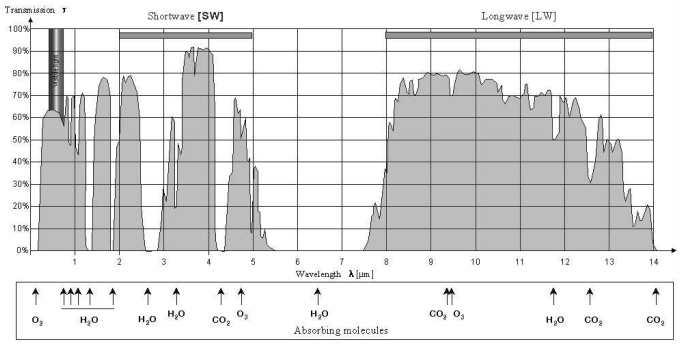


Fig. 2-1 Atmospheric transmission over 1 nautical mile

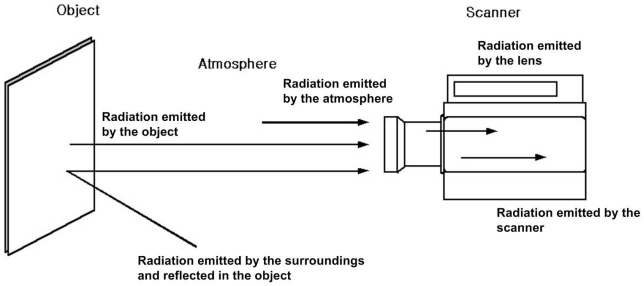


Fig. 2-2 Radiation contributions to the general measurement situation

대기와 물체 방사율에 영향을 미치는 보정은 열상에 존재하는 부수적인 방사에너지와 대기에 의해 감쇄된 피사체의 방사에너지뿐만 아니라 주위로부터의 방사에너지, 즉 대기 자체에서 방사된 방사에너지와 대기에 의한 감쇄와 물체에서 반사되어진 방사에너지로 존재한다. 피사체 방사에너지 강도는 존재하지 않는 완전한 흑체 방사율의 함수와 같다. 이에 상응하는 측정공식은 시스템 컨트롤러에 포함된 ERIKA 소프트웨어 안에 주어진다. 열 측정 공식은 식 2-1에서와 같이 표현된다. 여기에서 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.

$$I_m = I(T_{obj}) \times \tau \times \epsilon + \tau(1-\epsilon) \times I(T_{amb}) + (1-\tau) \times I(T_{atm}) \qquad (2\text{-}1)$$

이 측정 공식은 Thermovision 900에 의해 자동적으로 계산되며 오퍼레이터가 피사체에 대해 입력해야하는 매개변수는 대상체의 방사율, 피사체거리, 상대 습도, 대기 온도, 반사된 주위 온도 등이다.

식 2-1에서 $I(T)$는 온도 T일 때 흑체로부터 방사량에 비례하는 신호 값으로서 물체, 대기, 주변에 관한 함수이다. 식 2-1은 불투명 물체, Lambertian 표면, 일정 분광 방사율(grey body)이라는 가정을 갖는다.

스캐너로부터 반사된 방사에너지의 교정, 다시 말해 스캐너와 그 고유 광학계로부터 반사되어진 스캐너 온도에 의한 방사에너지 교정은 Thermovision 900에서 자동적으로 실행된다. 이것은 두 흑체 온도를 기준으로 4개의 온도센서 스캐너를 사용하는 마이크로프로세서로 컨트롤된 시스템에 의해 실행된다. 이러한 교정기능은 흑체온도와 스캐너의 신호 출력간의 비선형 관계를 표현해 주는 것이며 각 렌즈와 각 필터, 영역 조합은 그 자신이 교정 기능을 가지고 있다. 이 기능에 대한 상수는 스캐너에 저장되어 있고 시스템은 자동으로 사용된 조합에 대하여 적당한 상수를 선택한다. 또한 플랭크 법칙과 스캐너 및 필터의 분광 응답을 이용하여 계산하지만 더 많은 정확한 결과는 측정에 의해서 얻을 수 있다. 이는 많은 흑체 소스가 스캐너로 측정되었을 때 측정 중에 이루어 질 수 있는 것이다. Thermovision 900에 사용되어진 교정기능은 일부 플랭크 법칙과 일부 경험적인 것에 의존한다.

$$I = \frac{R}{\exp(\frac{B}{T}) - F} \tag{2-2}$$

식 2-2에서 I는 온도 값이고 R은 대응인자, B는 분광인자, F는 모형인자며, T는 물체의 온도이며 스캐너의 출력 신호는 입사된 방사에너지와 비례한다는 가정을 갖는다.

검출기의 응답은 비선형이기 때문에 네 번째 측정 상승의 보정 기능이 Thermovision 900에 덧붙어 작은 비선형 에러를 보정하여 준다.

$$I_s = \frac{U}{1-(U \times L)} \tag{2-3}$$

식 2-3에서 U는 스캐너 안에 A/D 변환기로부터의 비디오 신호이며 L은 비선형

상수, I_s는 Object signal이다. 또한 Object signal은 측정 표시 단위이고 이 신호는 비선형적인 교정을 거친 후 표시된다. 이 신호는 광 방사에너지와 비례한다.

피사체 매개변수들의 선정은 특정한 측정 상황을 설명한다. 그리고 대상물 온도에서 방사에너지 값의 전환에 앞서 피사체의 교정을 위해 요구한 매개변수들 즉 방사율과 대기에 의한 영향을 소프트에서 포함하고 있다. 피사체 매개변수들은 방사 계수, 대기온도, 주위 온도, 피사체거리, 상대 습도, 반사된 주위 온도 영향을 포함하고 있다.

방사율의 경우 실제 피사체는 거의 "블랙"이 아니기 때문에 방사요인은 측정 식으로 나타난 적외선 온도 측정으로 고려하여야 한다. 피사체 방사는 측정 될 수도 있고 표에서 찾을 수 있다. 보통 피사체 재질과 표면은 약 0.1~0.95 범위에서 방사율을 갖는다. 광택이 많이 나는(거울) 표면은 0.1이하로 떨어지고 산화 혹은 페인트 표면은 방사가 아주 크게 증가한다. 사람 피부 방사율은 0.98에 가깝게 표시된다. 반사된 주위온도에서 불투명한 피사체의 반사요인은 $\rho = 1 - \epsilon$로서 얻을 수 있다. 따라서 낮은 방사 요인은 피사체로부터의 방사율이 같은 온도의 흑체의 그 것보다 낮을 뿐만 아니라, 주위로부터 바람직하지 않은 복사가 피사체에서 반사되어 스캐너로 들어오게 됨을 의미한다. 측정 식은 이 복사를 보정하며, 이 보정은 반사된 주위온도(피사체 주위 온도의 평균 값)에 근거한 것이다. 대부분 대기온도, 반사 주위 온도 값은 같은 것이라 생각한다. 대기온도는 피사체와 스캐너 사이의 대기의 온도를 말한다. 그 경로의 온도가 과도하게 변화한 경우, 그 때의 평균값이 사용된다.

계산된 투과율은 스펙트럼 대역에서 대기흡수 적외선 복사의 구성을 사용하고 있다. 가장 중요한 가스들은 물(기체)과 이산화탄소이다. 이 흡수는 피사체에서 측정은 적외선 복사를 엷게 할 것이다. 이 대기 희박 효과는 측정 공식에 의해 보상된다. 측정 공식은 피사체와 스펙트럼 안의 복사에 의한 앞 렌즈사이의 대기 투과율을 의미하는 상수 τ를 사용한다. 이 τ는 피사체 거리, 대기 온도, 상대습도의 기

능으로써 τ가 계산된 소프트웨어로 계산 할 수 있고, τ값이 측정에 의해 또는 Lowtran과 같은 고기능 대기용 모델로부터 알려 질 수 있다면 직접 입력에 의해 계산될 수도 있다. 만약 오퍼레이터가 τ값을 입력한다면 추정된 τ는 소프트웨어에 의해 계산된 값을 무시 할 것이다. 공식은 효과적인 대기 투과율을 계산하기 위해서 소프트웨어가 사용한 식은 2-4와 같이 경험적이다.

$$\tau = X \times \exp(-\sqrt{d}(\alpha_1 + \beta_1\sqrt{W})) + (1-X) \times \exp(-\sqrt{d}(\alpha_2 + \beta_2\sqrt{W})) \qquad (2\text{-}4)$$

식 2-4에서 τ는 효과적인 대기 투과율이고, X는 무게 요인, α_1와 α_2는 감쇠 계수, β_1과 β_2는 수증기과 관련된 감쇠 계수, d는 물체와 스캐너 렌즈 앞쪽 사이의 거리, W는 equivalent water content(소프트웨어로부터 계산된 상대습도와 대기온도의 함수)이다. 대기 상수 $X, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$는 수증기 함수와 피사체 거리 사이에 계산된 것으로 알고리즘에 알맞게 계산되며 Lowtran 대기 모델에서 모든 스펙트럼은 Thermovision 900 스캐너와 전형적인 대기 안에 표준 필터에 의해 값은 이끌어내 사용된다. 이 모든 대기 상수는 새 필터를 선택했을 때 자동적으로 적재된 것과 스캐너 안에 포함된다.

추정 투과율에서 가끔 측정 조건은 트릭이 있을 수 있고, 대기를 통한 전송 계산에 있어서 정상적인 연산 방식이 적용되지 않을 수 있다. 그와 같은 경우 그것은 종렬 추종 투과율로 값을 세팅하므로 자동적으로 계산된 대기 전송을 무시 할 수가 있다. 즉 이는 측정통로에서 사파이어 윈도우가 있을 경우인 것이다. 이러한 윈도우는 0.87의 투과율을 갖고 있고, 이는 계산된 투과율을 곱해야 한다. 추정 투과율 값은 보통 전혀 값을 갖지 않으나 0은 사용되지 않는다.

상대습도는 피사체와 스캐너 사이의 대기의 상대 습도이다. 이 매개변수는 유효대기 투과율의 계산에 사용된다.

$$I_o' = \epsilon_o \tau_o I_o + \tau_o (1-\epsilon_o) I_\alpha + (1-\tau_o) I_{atm} \tag{2-5}$$

$$I_o = \frac{R}{e^{b/T_o - F}} \tag{2-6}$$

식 2-5에서 I_o는 물체 방사를 위한 디지털 값이고, I_o'는 스캐너로부터 받아들인 총 방사량(디지털 값에서), R, B, F는 보정 매개변수, T_o는 물체의 온도,ϵ_o는 물체의 방사율, τ_o는 물체의 투과율, I_α은 주변의 온도, I_{atm}은 식 2-6에 의하여 변환된 대기의 온도이며, 투과율 τ는 계산된 투과율 공식 의해 계산된다. 공식에서 W 인자는 다음 식에 의해 계산된다.

$$W = \text{RelHum} \times \text{precipitable water content} \tag{2-7}$$

Water content는 다음 식에서 표현할 수 있다.

$$\text{PrecWater} = \exp(k1 + k2 \times T + k3 \times T^2 + k4 \times T^3) \tag{2-8}$$

$$W = \text{RelHum} \times \exp(k1 + k2 \times T + k3 \times T^2 + k4 \times T^3) \tag{2-9}$$

식 2-8과 식 2-9에서 $k1$= 1.5587, $k2$= 6.939E-2, $k3$= -2.7816E-4, $k4$= 6.8455E-7의 값을 갖는다.[1]

적외선 열화상 테크닉은 기본적인 Pulse 적외선 열화상테크닉과 Lock-in 적외선 열화상 테크닉, Pulse-phase 적외선 열화상 테크닉이 있다.

Pulse 적외선 열화상 테크닉은 적외선 열화상 테크닉에 있어서 가장 보편적인

열자극 방법 중 하나로 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문이며 짧은 순간의 열 자극은 사용이 편리한 heating sources를 이용하여 평판에 직접 주사하는 방법을 취한다. 더욱이 신속한 열 자극은 재료의 손상을 방지한다.

기본적으로 Pulse 테크닉은 시편에 순간의 열 자극을 주고, 이때의 온도 변화를 기록하는 것이다. 이러한 현상의 금속에서의 온도 변화는 금속의 내부로 전파의 산란으로 인하여 매우 빨리 변화한다. 이에 시편의 결함 검출에 있어서 깊이에 따라 표면 온도를 관찰하였을 때 주위의 온도가 달리 나올 것이다. 깊은 결함일수록 명암의 대비가 확실하여 검출하기 편리하다.

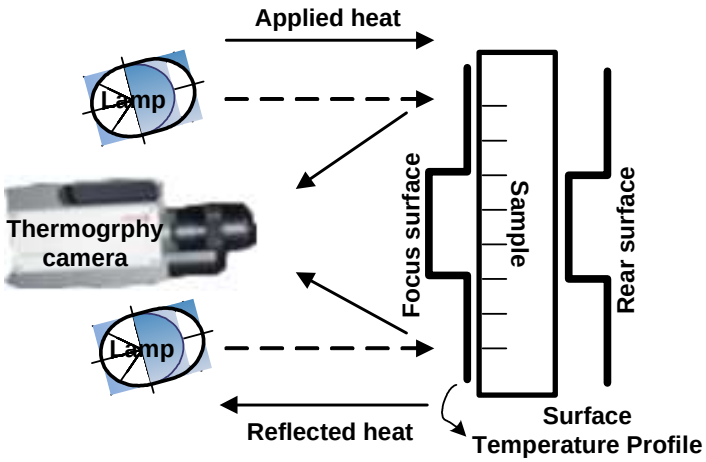


Fig. 2-3 Infrared thermography (Pulse technique)

Lockin 적외선 테크닉은 모듈레이터 램프의 레이저 공학에서 기초되었다. 측정 대상체에 저주파의 thermal wave를 동시에 주사하여 IR 장비로 측정을 하는 원리이다. 또한 IR 장비 검출기로 주사된 물체에 대해서 수많은 점중에서 단지 1개의 점에 대해서만 모니터링이 가능하다는 점이다.[(13)(14)]

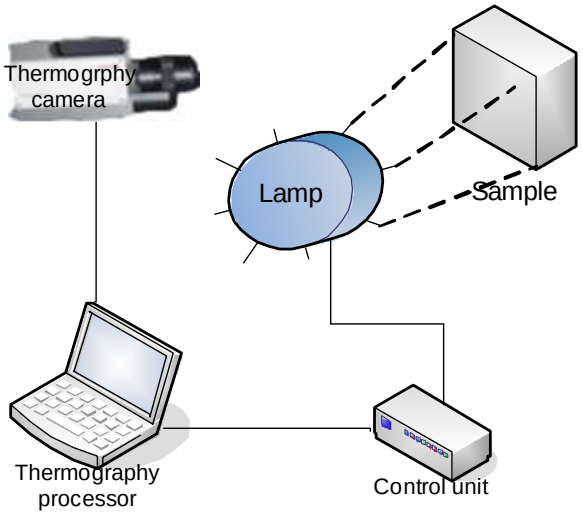


Fig. 2-4 Infrared thermography (Lock-in Technique)

2. 적외선 열화상 계측 시스템 구성

본 연구에 사용한 적외선열화상카메라 Thermovision 900 system은 AGEMA 적외선 SYSTEM AB에서 생산한 적외선 SCANING SYSTEM을 사용하였다. 이중 채널 마이크로프로세서를 기초로 하는 제어기 부분에서는 2개의 68020 프로세서가 사용되고 32비트 VME버스, 2개의 16비트 IR버스가 사용된다. 스캐너의 냉각방식은 열 전기적이며 검출형태는 2개의 스프리트, 직렬 스캐닝, 2~5.4 마이크론 스펙트럼 응답을 보이며 온도 범위는 -10℃~500℃(고온 필터 사용 시 2,000℃까지 검출 가능), 민감도는 30℃에서 0.1℃, 공간 해상도는 140원소/Line(50%변조), IR라인 주파수 3.5kHz, 심플/라인 204를 갖추고 있다. Fig. 2-5은 적외선 열화상 카메라 Thermovision 900 system의 전체적인 모습과 이동성을 위해 노트북컴퓨터와 연결할 수 있는 Research package 900의 구성도를 나타낸다.[1]

No.	Description
1	SW/TE Scanner
2	25°Lens
3	Focus control motor
4	Monitor
5	Keyboard
6	Computer

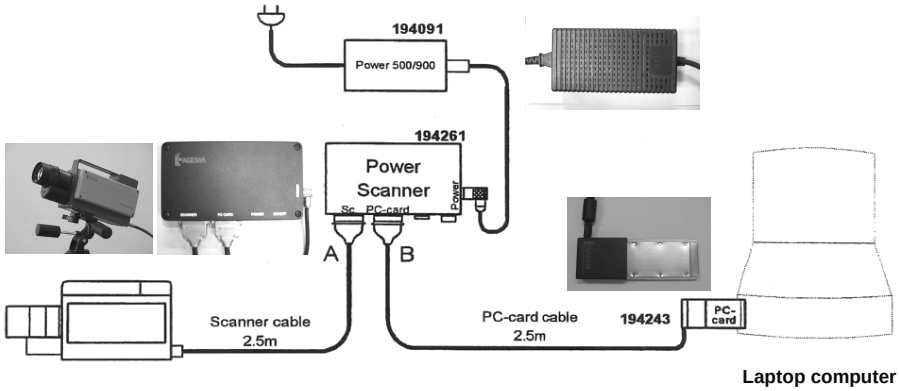


Fig. 2-5 Component of thermovision 900 system

가. 시스템 제어기

시스템 제어기는 산업표준 VME bus를 기초해서 만들어진 마이크로컴퓨터이며 OS9 운영시스템 아래 X윈도우 시스템을 사용하고 2개의 68020 프로세서를 사용하며 화상조절을 위해 특별히 내장된 조절 장치와 Enhanced 키보드를 사용하고 4+8Mb DRAM를 포함하고 있다. 또한 두 개의 스캐너 신호를 동시에 전송 할 수 있는 시스템을 가지고 있다. Fig. 2-6는 시스템 제어기의 신호 처리 방식과 제어 이동 경로를 나타내었다.

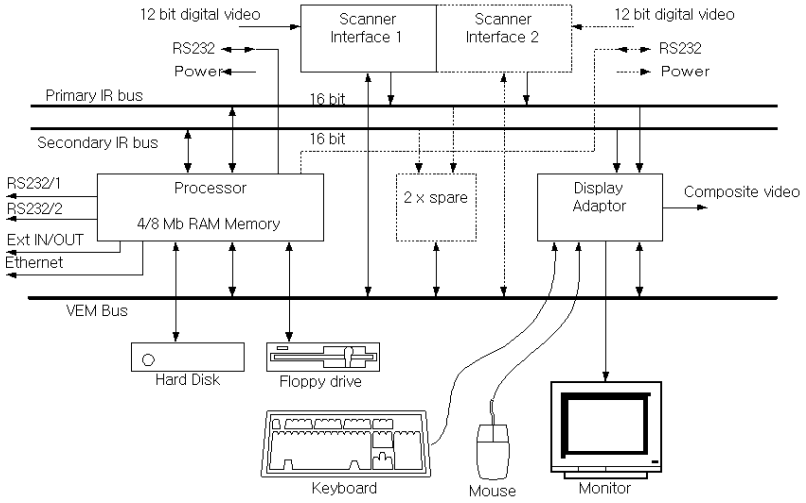


Fig. 2-6 Schematic diagram of system controller

3개의 메인 버스는 산업표준 VME 32비트 시스템버스, 스캐너 인터페이스를 위한 2개의 IR버스로 프로세서 장치에서 사용한다. 프로세서 장치는 기본적인 싱글 혹은 듀얼 스캐너 시스템을 위해 사용 할 수 있는 5개의 보드 슬롯 중 프로세서를 위한 것 1개, 스캐너 인터페이스와 디스플레이 인터페이스 보드 등 3개를 사용한다. 스캐너로부터 데이터입력은 완전한 온도범위에서 고 해상도를 주는 12비트 디지털 형태이다. 화상데이터는 12비트 형태로 저장됨으로써 차후 분석은 리얼 분석과 같은 정확도로 수행 될 수 있다. 시스템 Ethernet interface 혹은 2개의 RS232-C 커넥터 중 하나를 경유해서 멀리 호스트 컴퓨터에 연결되어 제어 될 수 있고 데이터를 교환 할 수 있다.[1]

나. 스캐너

스캐너 기기는 적외선을 디지털신호로 전환 할 수 있고 이는 시스템 컨트롤러로써 해석 할 수 있다. 또한 칼라 혹은 그래이스케일로 물체의 상을 보여주는데 사용

되고 있다. 스캐너에서 적외선 복사는 12비트 디지털신호로 변환된다. 이는 중간 케이블 또는 광섬유 접속 부위를 지나 Process unit로 들어간다. 스캐너는 광 스캐닝 모듈 LK4, 검색 모듈 합병 신호 변조기, 신호-수치 변환기, 마이크로프로세서 보드 및 서보 모터 제어 보드로 구성된다. 주사는 부교착이고 2개의 다른 프레임 레이트에서 발생된다.

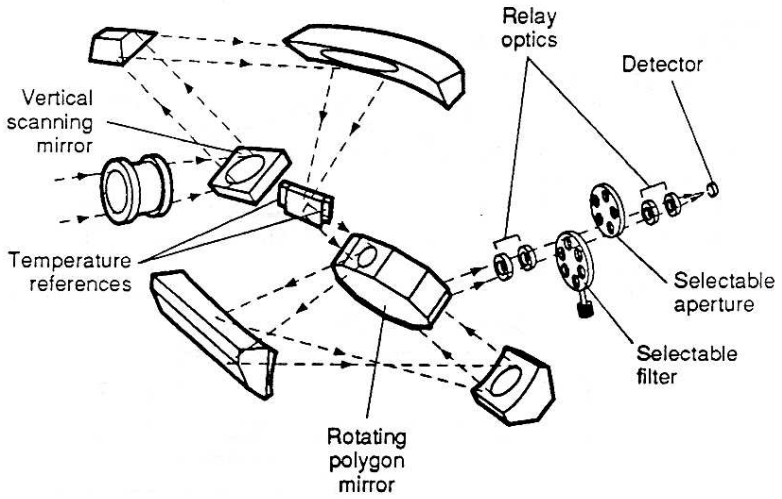


Fig. 2-7 Exploded view of the scanner optical path

스캐너는 복사선을 광학 스캐닝 모듈에 있는 첫 번째 스캐닝밀러에 초점을 맞추고 이 거울은 DC모터토크에 의해 수평면으로 진동한다. 진동밀러의 빔은 3개의 고정 밀러에 의해 회전다각형밀러의 꼭짓점으로 도달한다. 진동밀러와 회전다각형밀러는 서보 모터 제어 보드로부터 제어된다. 회전다각형밀러로부터 관련된 빔은 다각형의 반대 면에 2개의 멀리 고정된 밀러에 의해 초점이 맞추어져 있다. 필터, 휠, 최종으로 검출기의 초점이 맞추어지고 선택할 수 있는 구경을 포함하여 교체 시각을 설치함으로 통과한다. 검출기 출력은 전치증폭기를 통하여 통과되고 아날로그에서 디지털 컨버터로 제어 회로를 얻을 수 있다. 12비트 신호 통과로부터 프로세서

보드까지 시스템 제어기에 전송을 위한 병렬에서 직렬형태로 바뀐다. 2개의 온도를 보상하기 위해 스캐너는 3개의 분리된 온도센서와 스캐너에 의해 복사 방출을 보상하기 위한 2개의 기준이 있다.

Fig. 2-8에서는 스캐너의 신호 처리와 제어 경로를 나타내었다.[1]

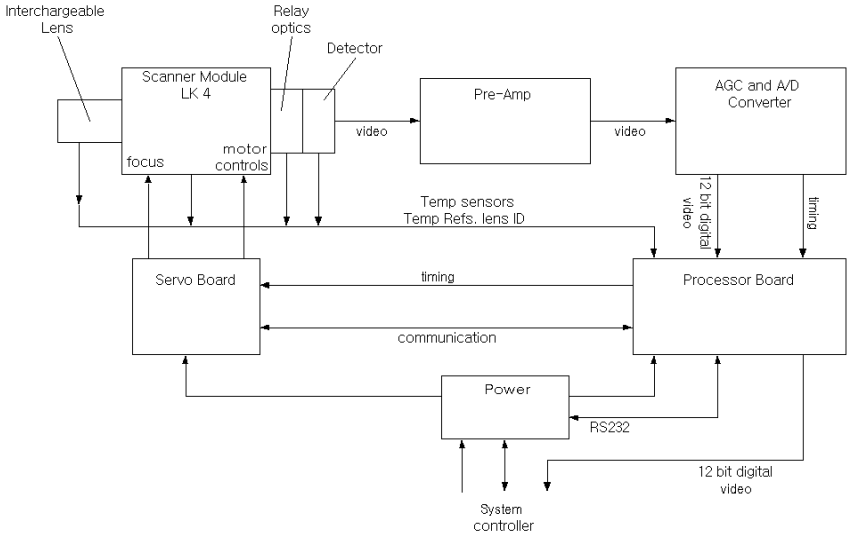


Fig. 2-8 Schematic diagram of scanner

제 2 절 적외선 열화상 계측 실험 방법

1. 가스 터빈 블레이드 시편 실험

가. 시편용 *Heating System* 제작을 위한 선행 *FEM* 해석

가스터빈 1단 버킷의 Heating 입구온도(TIT, Turbine Inlet Temperature)의 상승은 가스터빈의 고효율화 및 비출력의 증대를 위하여 불가피하나, 가스터빈의 소재로써 내열재료를 사용하더라도 재질의 허용 온도의 상승에는 한계가 있으며, 연소기 라이너(linear), 터빈 블레이드 등의 가스터빈 고온부품의 수명 및 신뢰성을 보장하기 위해, 온도를 가능한 낮고 균일하게 유지하기 위한 냉각의 필요성이 제기된다. 한편 고온부품의 냉각을 위해서는 압축기로부터 추출된 고압의 냉각공기가 주로 사용되어진다. Fig. 2-9는 블레이드의 냉각 방식에 대한 설명이다.[16]

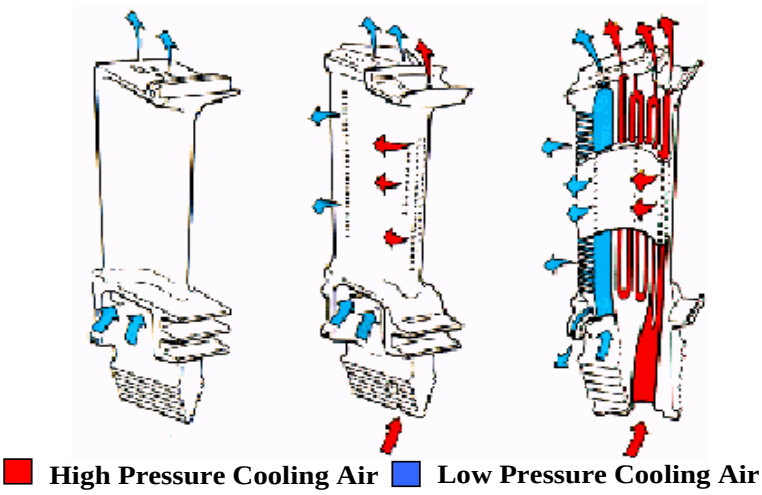


Fig. 2-9 The state of the art of the cooling blade

가스 터빈의 주요 핵심 고온부품인 터빈 블레이드의 냉각방식으로는 연소가스의 온도가 1,300 ~ 1,600℃ 정도일 때 사용되는 내부냉각 (대류냉각(convective cooling), 충돌냉각(impingement cooling)과 연소가스의 온도가 1,600℃ 이상의 경우 사용되어지는 외부 냉각(막냉각(film cooling), 투과냉각(transpiration cooling), 열차폐 코팅(Thermal Barrier Coating)으로 분류할 수 있다.

대류 냉각(convection cooling)은 압축기로부터 추출된 냉각공기를 요철(rib), 못형휜(pin-fin) 배열 등이 부착된 굴곡이 있는 내부 냉각유로로 통과시킨 후 후연부(leading edge)로 배출시켜 국부적으로 발생하는 고온부를 냉각시키는 방법이다. 막냉각(film cooling)은 냉각구멍을 통해 정해진 표면 사이에 얇은 막을 형성함으로써 연소가스가 블레이드 표면과 직접 접촉하는 것을 방지하는 냉각방법이다. Fig. 2-9은 냉각방식의 예를 보여주고 있다. 최근에는 다공성 재질의 블레이드를 사용하여 블레이드 표면에 냉각공기 막을 형성시키는 투과냉각(transpiration)이 연구되어지고 있으나, 복잡한 구조와 제작상의 어려움으로 인하여 아직 연구단계에 머물고 있고 상용 가스터빈에서는 아직 채택되지는 못하고 있는 실정이다.

가스터빈의 1단 동익은 고온의 작동환경 뿐만 아니라 회전으로 인해 높은 열응력 및 원심응력 상태에서 운전된다. 1,300℃급 가스터빈의 1단 동익은 고압단의 압축기에서 추출한 냉각공기를 가스터빈 내부 또는 외부의 유로를 통해 동익으로 공급하여, 대류냉각 및 막냉각 방법에 의해 냉각이 수행된다. 1,300℃급 가스터빈의 1단 동익의 경우, 동익 내부에 냉각을 위한 굴곡유로(serpentine passage)가 설치되어, 압축기로부터 추출되어 블레이드로 공급되는 냉각공기의 유량을 제어하며, 유로의 압력면과 흡입면에는 열전달 증가를 목적으로하는 요철이 설치되어 있으며 블레이드의 상부(tip)와 후연에 냉각공기의 배출을 위한 유로(냉각구멍)가 설치되어 있다. Fig. 2-10은 유로가 설치된 블레이드와 설치가 안된 블레이드 사이의 냉각방식에 대하여 비교한 그림이다.

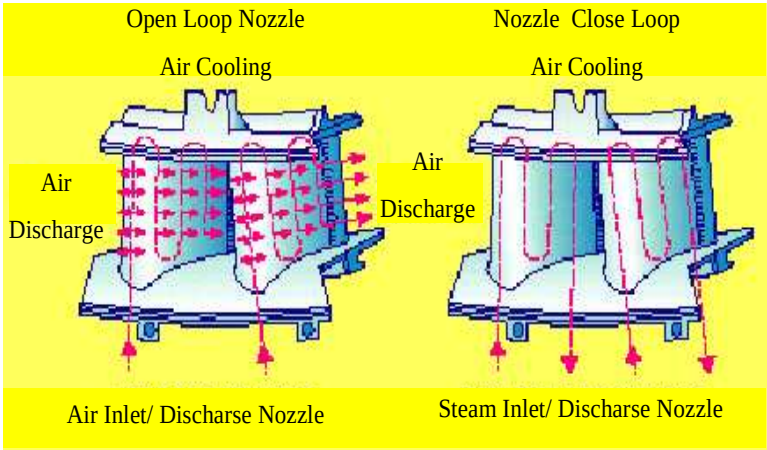


Fig. 2-10 Blade cooling method of open and closed loop

한편 1,300℃급 1단 동익에서도 General Electric Company의 7FA+, Westinghouse의 W501F 모델 가스터빈의 경우 전연부 막냉각(showerhead film cooling)을 사용하고 있다. Fig. 2-11에 보이고 있는 General Electric Company 7FB 모델의 터빈에서는 효율적인 냉각을 위해 기존의 모델에서보다 더 많은 막냉각 기술을 적용할 뿐만 아니라 개선된 열차폐코팅 기술을 활용하고 있다.[16]

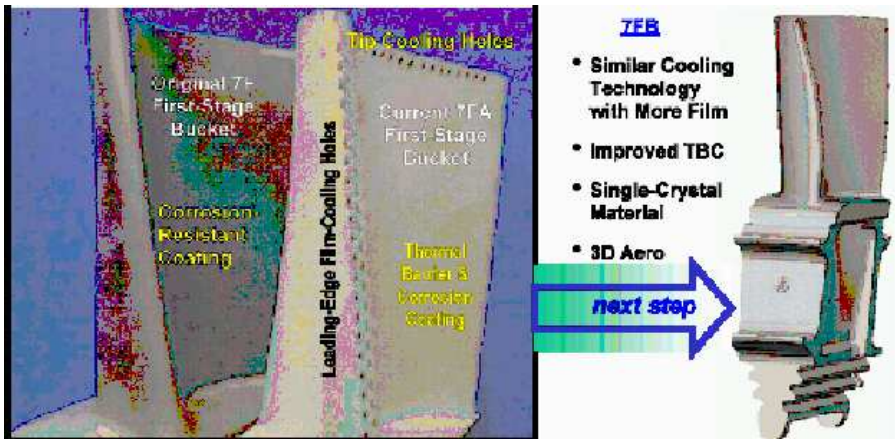


Fig. 2-11 The cooling technologies of G.E for first stage bucket

이 선행 FEM 해석에서는 heating part의 열원 온도와 시편의 예상 가열 온도, 각 층의 heat flux를 예상 결정하는데 쓰였다. Fig. 2-12는 상용 FEM 해석 소프트웨인 ANSYS 9.0을 이용한 결과값이다. FEM 해석의 기본은 시편에 중점을 두어 실행하였으며, 모델링의 크기는 0.3×0.134×0.1이며, 맨 밑의 0.3×0.02×0.1의 크기의 철판에서 열을 발생시켜, 0.3×0.11×0.1의 크기만큼의 공기층에 의하여, 0.3×0.04×0.1의 최종 시편이 가열되는 형상으로 구성하였다. Table. 1는 열전달 해석에 사용되었던 물성치들이다.

Table 2-1 Properties of matter

	Density(Kg/m^3)	Specific Heat ($J/Kg/C$)	Thermal cond ($W/m/C$)
STEEL (heating part)	7850	45	530
AIR (Convection Part)	1.204	0.24	1
SPECIMENS (GTD-111DS)	8160	22.3	450

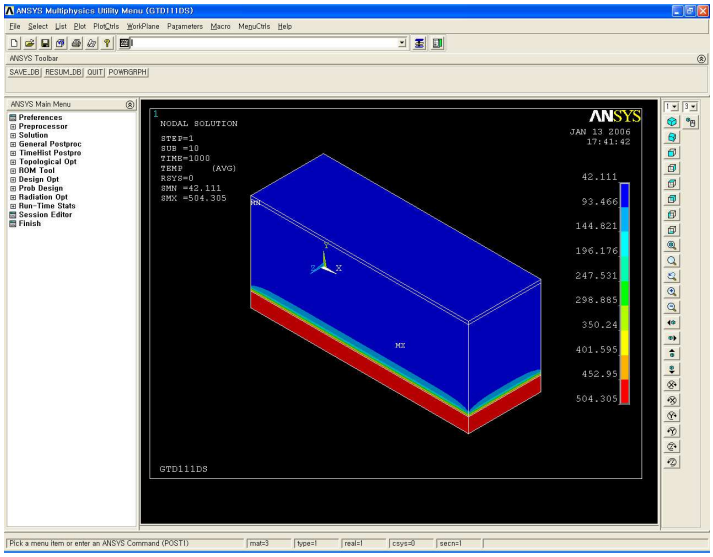


Fig. 2-12 FEM analysis by using ANSYS 9.0

Fig. 2-12에서 나온 결과값을 분석해보면, heating part에서 열을 발생시켜 공기층의 대류 열전도를 거쳐서 1000초 이후의 시편의 결과를 도출하였다. 1000초 이후의 온도는 heating part부의 온도는 약 500℃였으며, 발생된 열에 의해서 시편이 가열된 후의 온도는 약 42℃였다. 이를 바탕으로 heating system의 최적설계 유도하였으며, 이 heating system의 알맞은 시편의 크기를 결정 하였다.

아래는 FEM 해석에서의 기준 조건이다.

단, 1. 부품들 사이의 접촉부의 접촉 저항은 무시한다.

2. 하중, 경계조건의 대칭적인 적용으로 모델링은 전체의 1/2만을 하였다. (열전달 해석에서 경계-하중 조건이 부각되지 않으면 열전달이 없는 것으로 간주된다. 그러므로 대칭면은 아무런 경계, 하중조건의 적용되지 않는다)

나. 가스터빈 버킷 시험편 제작

GE사는 1960년대 중반부터 로스트왁스(Lost Wax) 기술을 사용하여 인베스트먼트 주조(Investment Cast) 방법으로 제작된 노즐과 버킷을 사용해 오고 있다. 이러한 주조 방법은 성형이나 가공이 어려운 합금의 사용을 가능케 하였으며 내부 냉각기구의 설계에도 큰 융통성을 부여하였다. 예를 들어 세라믹 코어는 내부 냉각통로를 확보하고 무게를 줄이기 위해 널리 사용되고 있다. GE사에 의해 사용되는 대부분의 노즐과 버켓 주조품은 전통적인 Equiaxed Investment Casting 방식으로 만들어지고 있다. 이 제조공정 중 용탕(MoltenMetal)은 10-2torr/10-2mmHg 이하의 압력에서 세라믹 주형으로 주입된다. 일부 코발트 합금을 제외하고는 대부분의 경우, 초합금 중의 반응성이 강한 원소가공기 중의 산소나 질소등과 반응하는 것을 방지하기 위해 진공분위기에서 주조된다.[(18)(19)]

주입재료와 주형(Mold)의 온도조건을 적절히 제어하면 용탕은 표면으로부터 주

형의 중심부를 향해 응고되면서 Equiaxed Structure를 생성시킨다. 수축시 형성되는 수축공(Shrinkage Porosity)을 방지하기 위해 응고 동안 용탕을 추가로 공급하는 것이 필요하다. 지난 30년간 다양한 형태의 인베스트먼트 주조 버켓 및 노즐이 생산되었다.

방향성 응고(D S , Directional Solidification) 제조공정이 보다 더 진보된 형태의 버킷 생산에 적용되고 있다. 이 공정은 25년 전에 최초로 항공기엔진에 사용되었으며 GEPG에서는 보다 큰 에어 포일(Large Airfoil)을 만들기 위해 이 방법을 적용하고 있다. 온도조건을 주의 깊게 제어하면 버킷에서 평평한 응고표면(Planar Solidification Front)이 형성되는 데 부품의 전 길이에 걸쳐 세로방향으로 이동되면서 응고됨에 따라 버킷은 가로방향의 입계(GrainBoundry)가 없이 버킷의 길이방향에 평행으로 응고된 입자구조를 가지게 된다. 이렇게 가로방향의 입계를 없앰으로써 합금의 크립(Creep) 및 파단강도(Rupture Strength)를 높일 수 있으며 방향성의 입자구조는 피로수명(Fatigue Strength)을 증가시킬 수 있는 세로방향의 탄성률(Modulus of Elasticity)에 보다 유리한 조건을 제공하고 있다.

최근에 GEPG에서는 아예 입계를 제거하므로 써 크립 및 피로강도를 더 크게 증가시킬 수 있는 대형 단결정 주조품(Large Single-crystal Castings)을 개발하고 있다. MS5002C DS버킷은 최초로 상업적으로 생산된 산업용 가스터빈 버킷으로서 1989년부터 사용되고 있으며 그림3은 DS 타입의 1단 버킷인 MS9001FA, MS7001FA, MS6001FA의3가지 최초 모델을 보여주고 있다. 이들은 모두 방향성 입자구조를 보여주기 위해 에칭 처리된 것이다.

2차 공정으로는 전해가공과 방전가공, 하드코팅을 실시하며 그라인딩 작업이 수행된다. 이러한 제조공정과 이어지는 코팅공정은 부식 및 산화를 방지하기 위해 금속적인품질(Metallurgical Quality)이 유지되도록 모두 자격부여 되며 또한 이 과정중에 잔류응력이 남거나 전체적인 성질이 열화 되지 않아야 한다. 추가로 도브테일부의 피로강도를 향상시키기 위해 쇼트피닝을 수행, 표면에 압축 잔류응력을 형성

시킨다.

가스터빈의 효율과 성능은 작동 사이클의 온도와 직접 관련되는데 효율을 향상시키기 위해서는 가능한 한 높은 온도에서 작동시켜야 한다. 이것은 핵심부품이 고온, 고산화성 분위기에서 얼마나 잘 견딜 수 있는가 하는 능력에 따라 결정된다. 따라서 가스터빈의 효율을 높이기 위해서는 터빈입구 온도(TIT)를 가능한 한 높여야 하며 이를 위해 고온에서 보다 높은 강도와 사용수명을 갖는 재료개발과 함께 그 부품의 검사 방법도 각각의 소재에 적합한 방법으로 개발•발전되어야 한다.

현재 1,300℃급 가스 터빈은 1990년대 초반 개발되어, 전 세계적으로 많은 발전소에 설치 운전되고 있으며, 제작사에서는 기설치 운용되고 있는 가스터빈의 냉각성능을 개선하기 위해 보다 광범위하고 적극적인 막 냉각 기술을 사용한 개량형 냉각 블레이드를 출시하고 있는 상황이다. 또한 GE, 웨스팅하우스, 등의 선진제작사에서는 터빈 효율 향상을 위해 1,500℃ 이상 급의 가스터빈 개발 및 상용화를 위한 연구에 노력을 경주하고 있다.

1단 버킷은 가스터빈 부품 중에서 가장 극심한 온도, 응력, 환경에 노출되는 부품이다. 1950년대 이래 지금까지 버킷 재료 개발을 통해 버킷이 견디는 내열성능(20Ksi 응력에서 100,000시간 파단수명을 주는 온도)은 850°F(472℃), 즉 연간 약 20°F(10℃/y)씩 향상되어 왔다. 연소온도가 100°F(56℃) 증가하면 출력은 약 8~3% 향상되며 단순 사이클의 효율은 2~%정도 개선된다. 따라서 합금 및 제조방법의 개선은 시간과 비용이 많이 들기는 하지만 출력밀도(Power Density)의 증가와 효율 개선의 측면에서 큰 동기를 제공한다고 볼 수 있다.

1970년대까지 연소온도의 증가는 버킷재료의 내열성능 향상에 주로 기인하나, 에어 냉각기술이 도입되면서 둘 사이의 상관관계는 보다 약화되었다. 또한 금속의 온도가 1600°F(870℃)에 도달되면서 코팅기술이 도입될 때 까지 강도보다는 버킷의 고온부식이 수명에 더 큰 영향을 주었다.[(18)(19)]

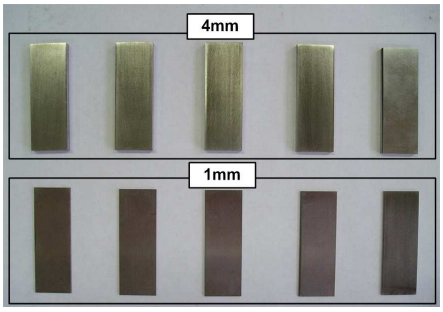
1980년대의 개발 방향은 다음과 같은 두 가지에 초점이 맞추어 졌다. 첫째는 내

식성의 저하 없이 합금의 제조방법을 개선하는 것이고 , 둘째는 차세대 F형 가스터빈의 연소온도를 향상시키기 위해 정교한 냉각기술을 개발하는 것이다. 복합 사이클의 효율을 향상시키기 위한 스팀 냉각기술의 사용은 1990년대에 이르러 실용화되었다. 모든 GE 가스터빈 버킷재료는 진공 주조된 니켈기지 초합금으로 고용 및 석출경화 열처리를 통해 강화시킨다.

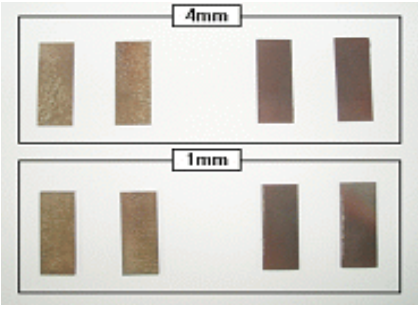
현재 생산되고 있는 1단 버킷 재료로 GTD-111 Equiaxed 와 유사하나 합금성분을 좀 더 엄격하게 조절한 것이다. 이 재료는 현재 6FA, 7FA, 9FA에 사용되고 있으며 6B, 9EC, 7EA, 5/2C & D, 3/2J의 Uprate에 적용되고 있다. DS GTD-111은 또한 7FA와 9FA의 2,3단 버킷에도 적용된다. 앞서 언급했지만 방향성 응고재료인 GTD-111의 사용은 크리프 수명의 증가 또는 응력한도를 높이는 데 기여한다. 이는 버킷으로 부터 미세구조상 약한 연결부인 가로방향의 입계를 제거한 데 따른 것이다. 크리프 수명의 개선에 추가해서 DS GTD-111은 Equiaxed GTD-111에 비해 10배 이상의 피로강도 및 변형 제어능력을 갖고 있다. DS GTD-111의 충격강도 또한 Equiaxed 에 비해 33% 이상 뛰어남을 알 수 있다.[(18)(19)]

시편은 GE에서 생산된 7FA형 가스터빈의 1단 버킷에 사용되는 GTD-111 DS를 이용하여 1단 블레이드가 터빈 동체에 결합되는 결합부에서 와이어 컷팅을 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 코팅 층의 두께를 변화시켜 코팅을 하여 준비하였다. 여기에서 코팅 층의 두께는 가스터빈 블레이드의 코팅부에서 쓰는 PASS의 개념을 사용하였다. (pass의 값이 클수록 코팅 층의 두께는 증가함, 적정 pass의 값은 8 ~ 16pass) 여기서 모재의 두께를 변화 시킨 것은 가스터빈 블레이드의 wall두께가 다양하여 그 각각의 wall두께에 해당하는 reference data를 획득하기 위함이다. 또한 코팅 층의 두께를 변화시킨 것은 가스 터빈 기동 후에 블레이드의 코팅 층이 손상되면서 두께가 변하여 모재에 손상을 줄 것이라는 가정 하에 이 실험을 진행하였다.

따라서 시편 제작도 이와 같이 실제 정비 상황을 유사하게 재현하기 위해 시편의 종류를 다양하게 제작하게 되었다. 또한 실제 가스터빈에서 기 사용된 블레이드는 크랙이 심하게 발생하는 안쪽과 심각한 산화 손상을 입는 바깥쪽에서 발생하는 것을 볼 수 있기에 여기서 추출한 시편을 새로이 제작된 시편과 비교 대상으로 삼았다.



(a) New specimens(4T, 1T)



(b) Used specimens(4T, 1T)

Fig. 2-13 Manufactured specimens

다. *Heating system* 제작

제작된 시험편의 적외선 열화상 카메라 촬영을 위해서는 일정한 온도로 가열하는 장치가 필요하다. 모든 사물은 적외선을 방출을 한다. 그러나 이러한 적외선은 대상 사물의 온도가 높을수록 더 많은 양의 적외선이 방출이 된다. 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. 제작할 heating system은 전기적 저항을 이용하여 금속 부를 가열시키고 금속으로부터 110mm높이에 시편을 위치시켜 공기층

에 의해 간접적으로 시편을 가열하도록 설계하였다. 이는 현 가스 터빈의 상황을 고려했을 때 가열된 금속부에 의해서 터빈 블레이드가 가열 되는게 아니라, 터빈내로 유입되는 고온의 공기에 의해서 가열이 되고 있는 실정이다. 이에 우리는 일단 공기층에 의한 간접 가열 방식을 택한 것이다.[3]

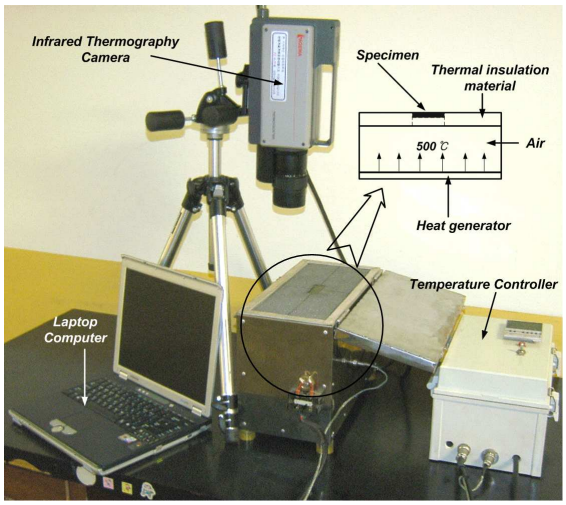


Fig. 2-14 Component of experiment system

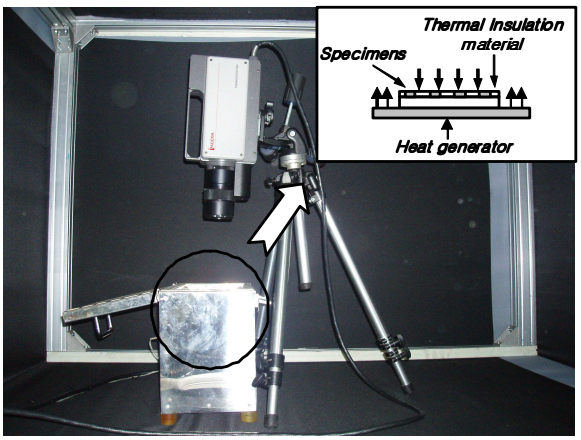


Fig. 2-15 Experiment system in dark room

또한 실험의 정확성을 높이기 위해서는 외부요인을 되도록 배제하도록 하였다. 이에 가열공기가 시편 측정 옆면으로 유입되는 것을 차단하기 위하여 시편 주위를 단열재를 사용하여 차단하였으며, 외부의 열원을 차단하여, 최적의 실험 상태를 유지하기 위해서 암실을 제작하여 그 안에서 실험을 시행하였다.

2. 적외선 열화상 계측 데이터*(*버킷 실적용*)*

가. 버킷 전체 *Heating System* 제작을 위한 *FEM* 해석 수행

가스 터빈의 버킷의 전체적인 실험을 위하여 루트부 후면부의 Air foil부의 냉각홀을 이용한 Hot air 주입방식의 Heating system를 구상하였다. 이에 시스템 제작에 앞서 에어 히터의 사양과 용량, 콤프레샤의 스펙을 결정하기 위한 선행 FEM 해석을 수행하였다. 열전달 해석은 상용 프로그램인 ANSYS 9.0를 사용하였으며, 버킷의 일부분만을 해석에 적용하였다. Fig. 2-28은 FEM 해석 조건 및 결과이다.

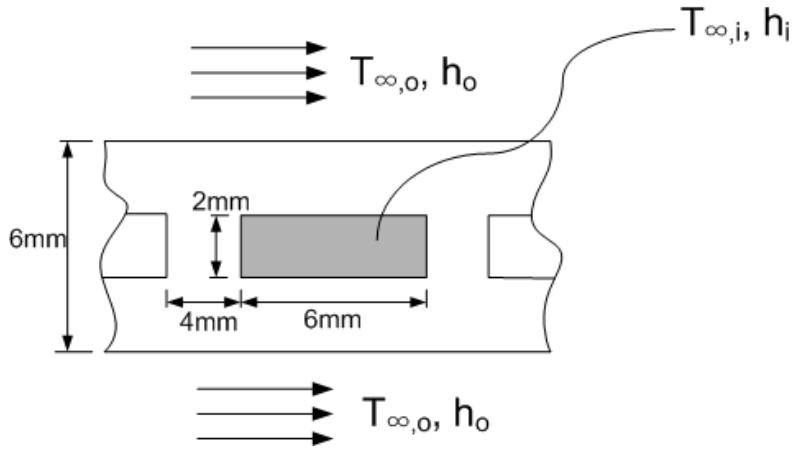


Fig. 2-16 FEM analysis condition by using ANSYS program.

단 여기서, Thermal conductivity of the blade, KXX=25W/(m-k)

Operating condition : $T_{4,o}$ = 293K, H_o = 1000W/(m^2-K),

$T_{4,i}$ = 500K , H_i = 200W/(m^2-K) 이다.

T : Temperature, H : Film coefficient

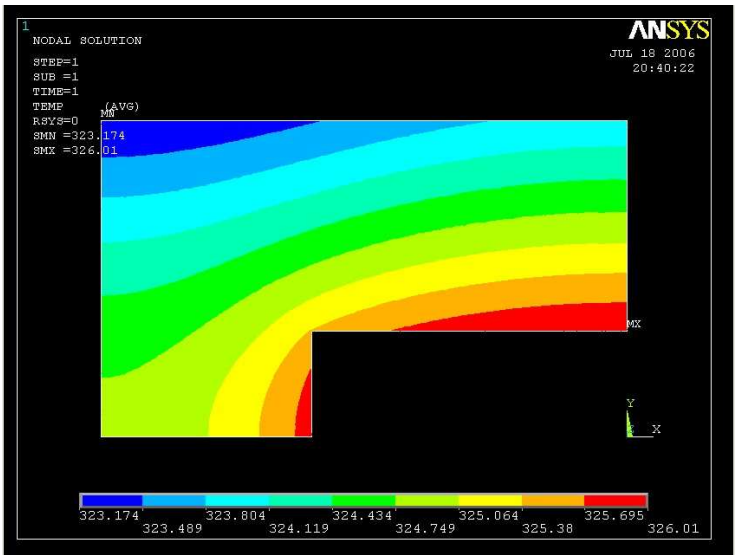
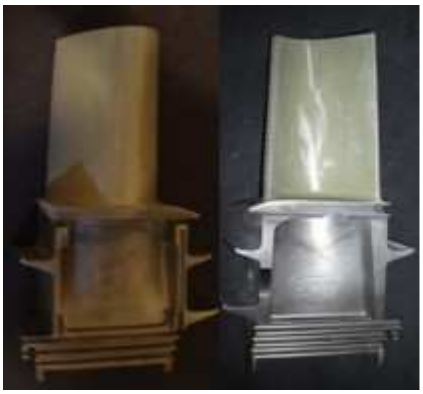


Fig. 2-17 FEM analysis by using ANSYS program.

Fig. 2-29의 열전도해석 결과에서 알 수 있듯이 약 200℃의 Hot air로 약 10분정도 가열하였을 때 버킷의 표면부 온도가 40℃이상이 되어 IR장비로 촬영하는데 문제가 없었다.

나. 실험 대상 버킷 및 실험 장치 구성

Fig. 2-30은 버킷의 시험편으로 7FA^{+e}형 타입의 신품과 1회 사용품, 1차 재생정비품, 1회 사용 후 스크립트된 제품, 그리고 폐기품을 대상으로 실험을 진행하였다.



(a) NEW burket

(b) 1th refreshing equipment bucket

(c) 1th times used bucket

(d) Script done bucket

Fig. 2-18 Actuality image of bucket

Fig. 2-31 버킷 루트부의 냉각홀을 이용한 Hot air 주입 방식의 계략도이다. Hot air의 온도는 200℃로 선정하였으며, 3기압의 압력으로 주입하였다. 1시간동안 히터와 콤프레샤를 작동하여 공기를 주입하였으며, 가열된 버킷의 냉각시의 특징을 살펴보기 위하여 히터만 작동을 멈추고 콤프레샤를 이용하여 버킷을 1시간동안 냉각을 시켰다.

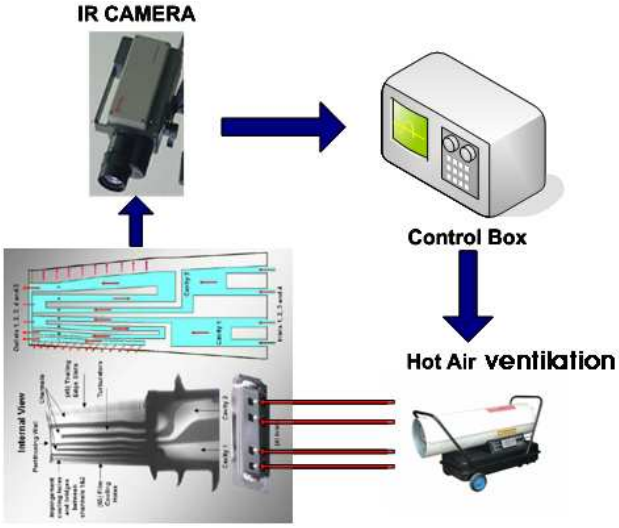


Fig. 2-19 Diagram of Heating System using Hot Air

3. 할로겐 램프를 이용한 코팅층 크랙 검출

가스터빈 버킷은 회전기기에 요구되는 구조적인 건전성을 유지하면서 극심한 환경 조건하에서 운전되어야 한다. GE사는 이들 버킷에 대한 모든 종류의 손상 유형을 정하고 필요한 정비기술 및 정비공정을 개발해 왔다. 보통 각 세트로부터 1개씩의 버킷을 뽑아 파괴시험을 수행하기도 하는데 이 결과를 근거로 버킷의 계속 사용 여부를 판단할 수 있다. 또한 버킷의 재생 가능성 및(또는) 용접성과 정비방법 그리고 운전에 대한 권고사항도 역시 결정할 수 있다. 이러한 버킷의 일반적인 정비공정은 블렌딩, 용접, 가공(Re-machining), 정밀 그라인딩, 코팅 등으로 이루어진다. 특수한 용접방법의 하나인 WRAP(Weld Repair Advanced Process)은 GE 특허인 GTD-111 버킷을 수리하기 위하여 개발된 방법으로 용접 전에 모재 전 부위에 균일하게 열을 가할 수 있도록 제작된 특수장비를 이용하며, 냉각속도를 늦출 수 있기 때문에 응고시의 수축변형을 줄일 수 있다. WRAP 방법은 탈락된 팁 부위의

재생 및 Angel Wing의 씰 면 그리고 Shroud 부위의 재생 및 Uprate작업에도 이용되고 있다.

실제로 검사 후 수리 및 교체 여부는 제조회사의 지침, 운전시간 및 운전경험, 그 동안의 정비경험 등을 참고로 하여 결정해야 한다. 정비주기에 영향을 끼치는 요소로는 보통 다음과 같은 것들이 있다.[12]

1. Fuel
2. Load Setting
3. Steam/Water Injection
4. Peak Load TF Operation
5. Trips from Load
6. Start Cycle
7. Hot Gas Path Hardware Design
8. Cyclic Effects

현재 7FA G/T 블레이드의 코팅층 크랙 검출 방법은 육안 검사와 형광 물질 침투 탐상에 의한 방법에 의존하고 있다. 그러나 이마저도 단순 육안 전수 검사에 대부분 의존하는 실정이다. 이러한 전수 검사는 터빈 전체를 사람의 육안으로 검사해야 하기 때문에 여기에 소요되는 시간과 인력의 낭비가 심각한 실정이다. 육안으로 검출되지는 않으나 크랙 발생이 예상되는 부분과 크랙 발생 빈도가 많는 부분에 한정되어서만 침투탐상검사가 이루어지고 있다. 이 방법 또한 검사에 소요되는 시간의 낭비가 심각한 실정이다.

사실 기계 부품의 크랙 검출에 있어서는 초음파 장비가 많이 사용되기는 하나, 초음파 방법은 검출하고자 하는 부위가 매끄럽지 못하면 장비에 적용하여 크랙을 검출 하는데 한계에 접하게 된다. 이에 적외선 열화상 카메라를 사용한 새로운 방법으로 접근해서 크랙을 검출하고자 한다.

새로운 방법을 간략히 설명하면, 블레이드 표면에 할로겐램프로 가열하여 방사되어 나오는 열에너지를 적외선 카메라로 촬영하는 것이다. 이를 기본 베이스로 하여 실험을 진행하고자 한다. 이를 위해서는 대용량의 할로겐램프와 적외선 카메라와 외부 열원의 방해가 없는 암실이 필요하겠다. Fig. 2-48은 촬영하고자 하는 시편의 위치이다. 7FA G/T 1단 블레이드는 안쪽 중간 지점에서 주로 크랙이 발생하는 상황이다. 발생되는 크랙을 관찰하면, 크랙의 크기에 따라서는 최대 0.05mm ~ 0.1mm 정도의 크기로 발생하는 것을 볼 수 있다. 크랙의 발생 원인은 고온의 공기층에 의한 구성 입자의 성장에 따라 구성 입자가 긴밀히 조성하지 못하여 크랙이 발생되는 것으로 유추할 수 있다. 이 크랙이 처음 발생한 후 차츰 성장해 가는 방향을 보면 블레이드의 회전 방향으로 크랙이 진전되는 것을 볼 수 있다. 이는 고속 회전에 따른 블레이드 진동으로 크랙이 진전되는 것으로 보인다.

여기서 가장 중요한 문제는 과연 이 크랙이 진전이 회전축에 따른 코팅층에서만 진전되는 것이 아니라 모재의 방향으로 진전되는 크랙이 있다는 것이다. 7FA G/T 블레이드의 코팅층은 고온•고압의 증기로부터 모재를 보호하는 것이다. 이러한 코팅층는 2회의 재생 정비를 거치면서 재코팅을 하고 있다. 하지만 모재에 발생하는 크랙에 있어서는 정비가 불가능함으로 발생되기 이전에 찾아 그 부위에 코팅을 다시 함으로써 모재로까지의 진전되는 것을 예방할 수 있다. 현재 1차 실험에 사용된 블레이드는 2회 재생에 걸쳐 사용된 후 폐기 상태인 블레이드를 이용하여 실험을 하였다. 이 시편에서 발생된 크랙을 잘 분석함으로써 향후에 발생될 크랙을 미리 예측하고 과연 어떤 상태의 크랙이 모재까지 진전하였는가를 찾아냄으로써 블레이드의 파손에 따른 가스 터빈 전체의 사고 예방을 할 수 있다.

Fig. 2-49은 할로겐램프를 이용한 실험을 하기 위한 실험 장비이다. 저용량의 할로겐램프를 사용하여 버킷 표면의 크랙을 검출하는 다양한 방법을 모색하였다.[3]

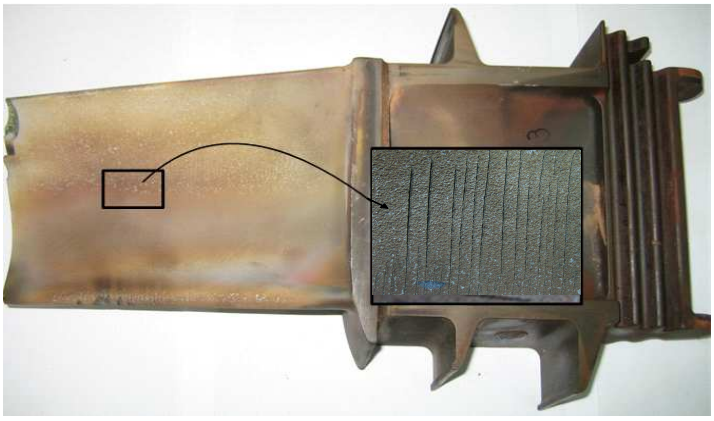


Fig. 2-20 Position of specimens to measure

Fig. 2-21 Halogen lamp experiment for crack detection

현재 재생 주기가 끝난 7FA G/T 블레이드를 분석해 보면 외부는 산화에 의한 손상이 발생한 반면에 내부 쪽은 크랙이 발생하는 것을 볼 수 있다. 적외선 열화상 카메라로 측정한 열 분포 그래프와 크랙 부분을 와이어 컷팅한 부분을 서로 비교하여 크랙의 모재 침투 진전 사항을 체크하는 것이다.

제 3 장 연구 결과 및 고찰

제 1 절 가스터빈 블레이드 시편의 *reference data* 획득

7FA 가스터빈의 1단 블레이드는 Fig. 2-16과 2-17에서 보듯이 그 형상이 매우 복잡하다. 각각의 부위별 모재의 두께가 달라 그 부위별 열전도가 차이가 나는 관계로 외부에서 블레이드 전체를 촬영하였을 때 나오는 온도 분포 데이터와 모재의 두께와 코팅층의 두께에 따라 표면온도가 다르게 나올 거라는 예상하에 실험하여 확보한 두께별 온도 reference data를 이용하여 블레이드 전체에 가열하여 촬영된 이미지와 비교하여 부위별 코팅층 건전성을 평가하는데 그 의의가 있겠다. 코팅층 건정성 평가를 위한 reference data 구축 실험 방법은 코팅층의 두께와 모재(subatrate)의 두께를 달리하는 시편을 제작하고 heating system으로 시편을 가열하는 방법과 heating system 안에서 가열된 시편을 외부에서 냉각하는 방식으로 실험을 전개하였다.

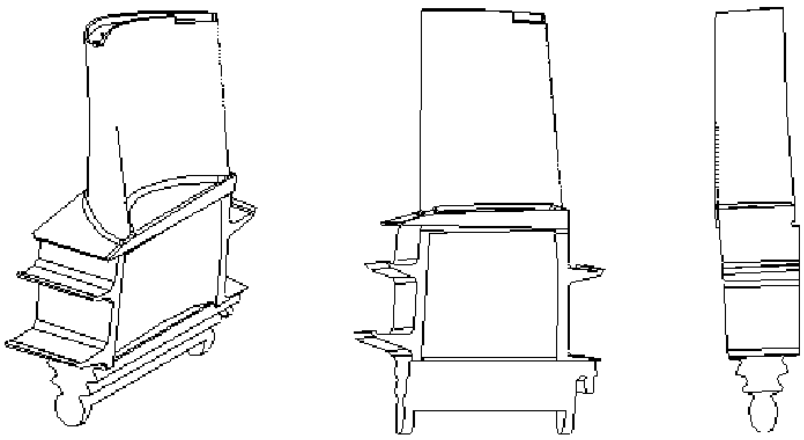


Fig. 3-1 Basic shape of blade

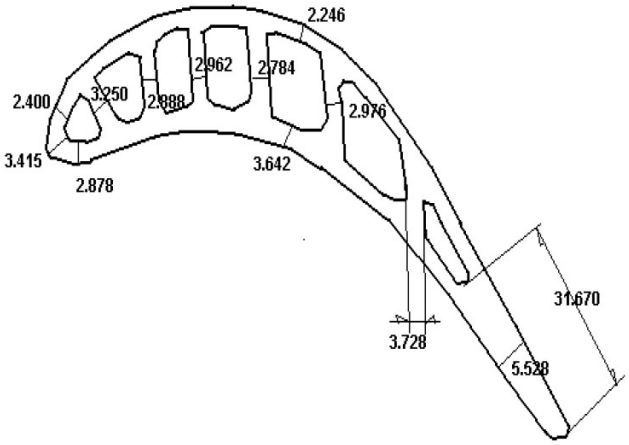


Fig. 3-2 General thickness of blade wall

Fig. 2-17은 블레이드 루트부의 단면도 이다. 단면도에서 보면 각각의 두께가 서로 달라 매우 복잡한 형상을 나타내는 것을 볼 수 있다.

(1) 코팅층 data 구축실험 (Heating Method)

Heating system의 heat generation부 온도는 약 500℃이며 heat generation부와 시편과의 사이를 110mm로 하여 공기층에 의한 간접적인 가열 방법을 택하였다. 또한 외부로부터 오는 외부 열원을 차단하기 위해서 시편의 옆면은 단열재를 사용하여 차단하였다. 아래 Fig. 2-18에서는 코팅 전 모재만의 열전달 성질을 파악하기 위한 기초 실험 IR 영상이다. Fig 2-18의 IR영상은 다소 불안정해 보이나 시편 자체가 펄리싱(Polishing) 작업처리가 되어 있어서 외부 열원의 반사에 의한 오차 값이 발생하였다. 실험 시편의 확보 부족으로 인하여 더 이상의 시편의 가공이 어려운 실정이었음으로 표면의 흑체 페인트를 사용하여 반사를 막을 수 있는 방법을 사용하지 못하였다.

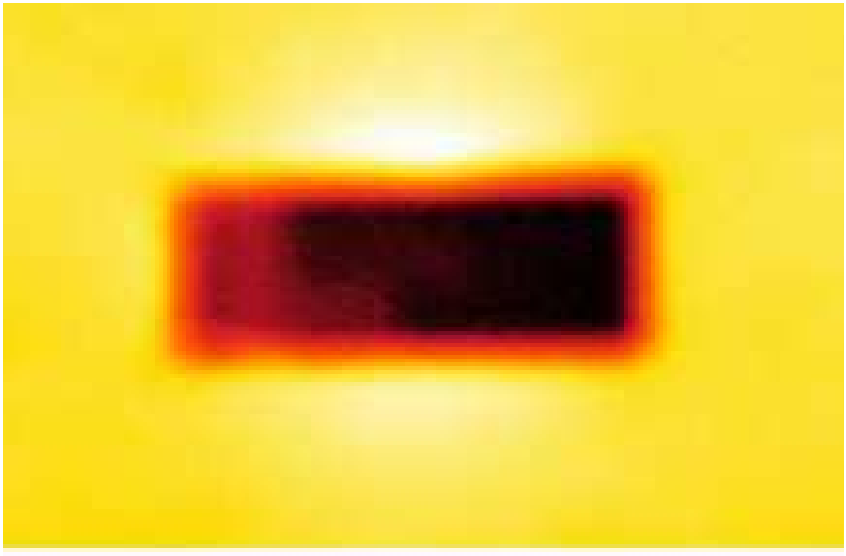


Fig. 3-3 IR Image for specimens (before coating)

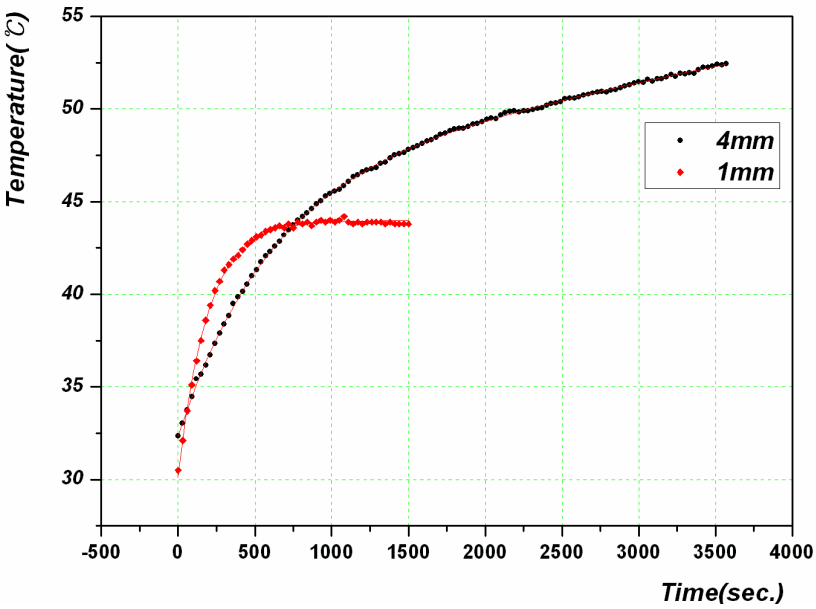


Fig. 3-4 Temp. distribution before coating

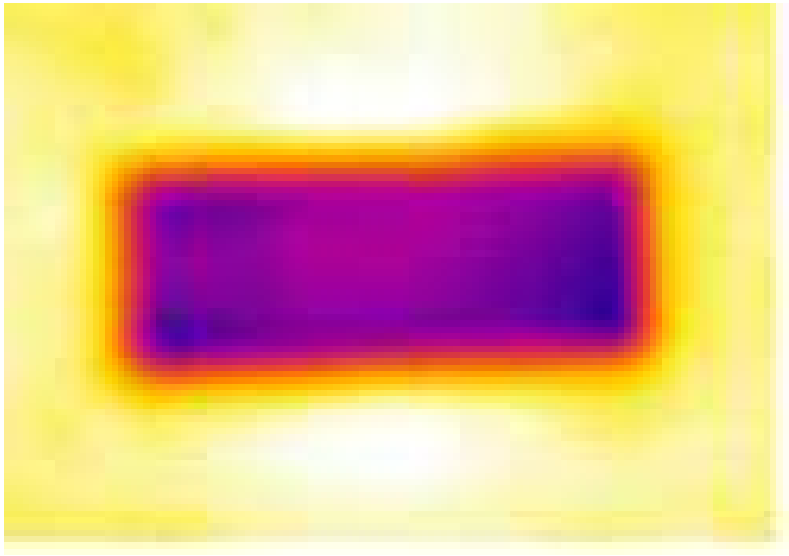


Fig. 3-5 IR Image for specimens (heating start)

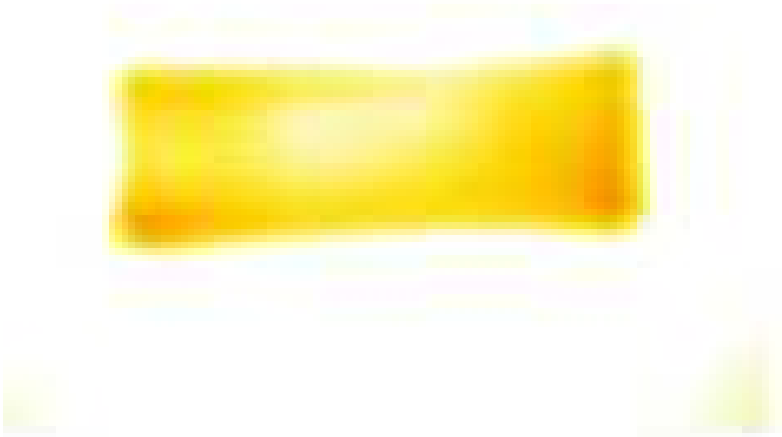


Fig. 3-6 IR Image for specimens (after 40minute)

Fig. 2-19는 가열 시간 변화에 따른 실험 시편 표면 평균온도를 그래프로 나타내었다. Fig. 2-19에서와 같이 시편에서의 가열 온도가 안정화되기 시작한 시간이 약 11분정도이고, 이때의 시편 온도는 약 42℃임을 알 수 있다.

Fig. 2-20은 실험 시작단계의 IR 이미지이다. heating을 시작하는 단계임으로 시편의 온도가 낮게 나타나고 있으며 다음의 Fig. 2-21는 약 40분정도 heating 후의 영상을 나타내고 있다.

또한 모재의 두께 변화에 대해 코팅의 두께를 달리하여 적외선 열화상 카메라로 촬영하여 얻어진 데이터 값을 코팅 층의 변화와 모재의 두께 변화에 따른 온도-시간 그래프를 각각 나타내었다. Fig. 2-22(1mm) ~ 2-23(4mm)에서 보듯이 모재의 두께가 작을수록 측정 온도는 증가하고, 코팅 층의 두께가 클수록 측정 온도는 감소함을 알 수 있다.

7FA 가스터빈 블레이드의 신품은 코팅 두께는 약 150 ~ 300㎛이다. 그러한 재생 정비를 거치면서 정확한 두께 측정이 어려운 관계와, 작업자의 수작업으로 인한 정확한 두께의 코팅이 어려운 실정이어서 재생 정비를 시행하고 있는 현장에서는 PASS라는 단위로 대신하여 코팅을 하고 있은 실정이다. 이 PASS란 단위는 현장에서 코팅이 한번 살포되어 지나가는 단위이다. 현재 8 ~ 16PASS가 재생 정비가 끝난 블레이드의 코팅층 두께이다. 코팅층 두께의 변화 요인이 여기서 작용하였으며, 적정 코팅 수준에 못 미치는 시편과 적정 코팅 수준을 과도하게 넘은 시편을 추가로 제작하여, 적정 코팅층과의 비교 대상으로 삼았다. 이에 적정 코팅수준에 든 시편들은 온도-시간 그래프에서 다소 집중현상이 발생하였으나, 적정 코팅 수준에 못 들었던 시편은 나머지 시편들과의 텀이 발생하는 현상이 발생하였다.

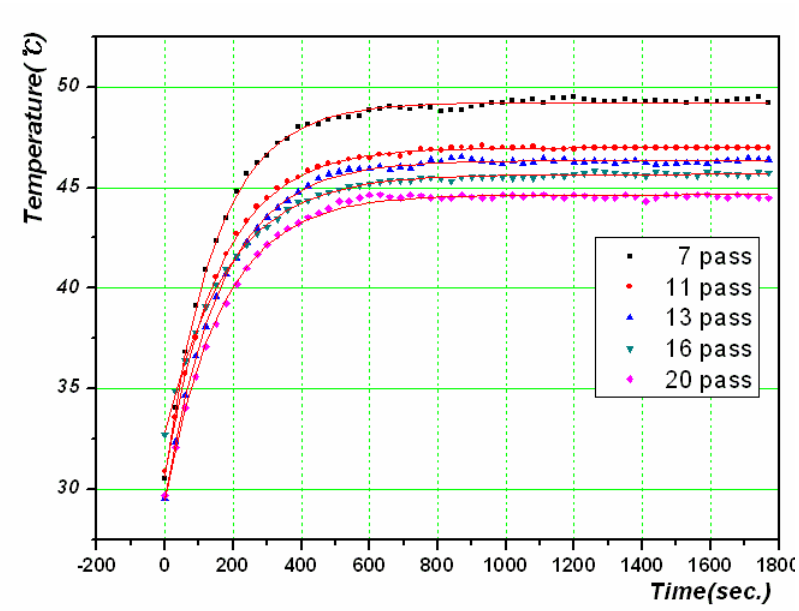


Fig. 3-7 Temp. follow in coating thickness(1T)

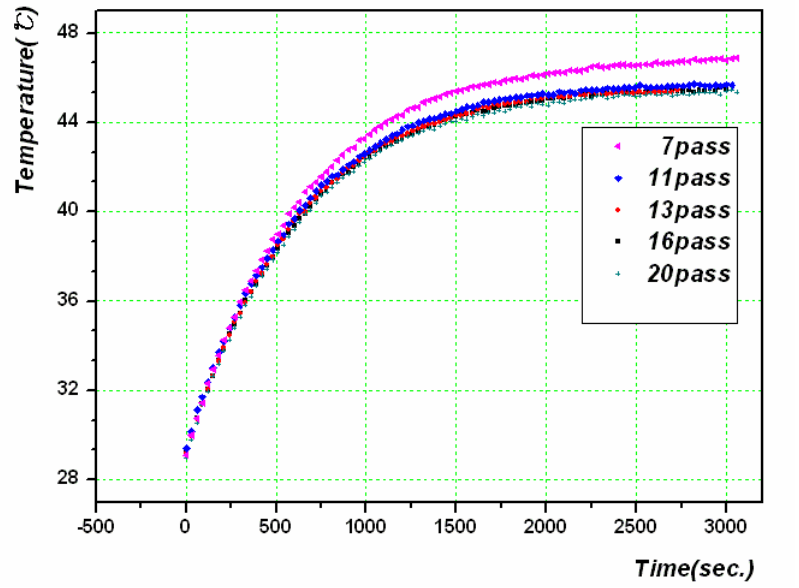


Fig. 3-8 Temp. follow in coating thickness(4T)

(2) 코팅층 data 구축실험 (Cooling Method)

가스터빈 블레이드 코팅층의 주된 목적은 가혹한 환경속에서 작용하는 가스터빈 블레이드의 내열성을 향상시켜 고온•고압의 공기로부터 모재를 보호하는데 있다. 이에 우리는 터빈의 실제 운전 상황과 유사하게 실험 환경을 조성하고자 이러한 방안을 구상하였다. 여러 방안들이 구상단계에서 대두 되었으나 여러 시편의 동일한 환경에서의 실험을 위하여 최종 확정된 실험 방법은 고온•고압의 공기를 코팅층에 직접 가하여 가열시간에 따라 블레이드 두께변화와 코팅층 두께변화의 thermography 데이터를 비교 분석하는 것이다.

동일한 환경에서의 실험을 위하여 같은 두께의 시편을 모두 열전도율이 적은 나무판에 모재면을 잘 부착하고, 코팅면이 아닌 다른면(옆면)에서의 열흡수 현상을 방지하기 위해서 실링(shilling)처리 한 후 가열 공기층(100±1℃) 안에서 10분간 노출하여 코팅층으로 직접 열이 흡수되는 방식을 택하였다. 그 다음 이 가열된 시편이 상온과 일치 할 때까지 외부 열원이 없는 곳에서 냉각시키는 것을 적외선 열화상 카메라로 촬영하여 thermography 데이터를 분석하였다.

Fig. 2-24는 약 30분간 가열된 후 열을 차단하기 전에 시편을 촬영한 영상이며, 열이 가해지면서 시편 자체가 가지고 있는 방사열이 증가함에 따라 시편에서 나오는 적외선도 증가하여 적외선 열화상 카메라로 촬영했을 때 보다 깨끗한 영상을 얻을 수 있었다. 하지만 Fig. 2-25에서는 외부 열원을 차단한 후 주위 온도와 일정하게 될 때까지 약 20분을 외부에 노출한 후 촬영한 영상이다. 이 영상에서 보면 시편 보다 낮은 외부에서 냉각시킴으로 외부의 온도와 일치 되면서 방사되는 적외선도 주변 환경과 동일하게 되어 시편과 주변을 구별하기 힘들다.

이와 같이 적외선 열화상 카메라로 촬영한 영상들을 보면, 열을 가한 후에 촬영한 영상과 열을 가하지 않은 상태에서 촬영한 영상에 뚜렷한 차이를 볼 수 있다. 이에 위 실험에서 시편에 열을 가한 ACTIVE방법을 권고 한다.

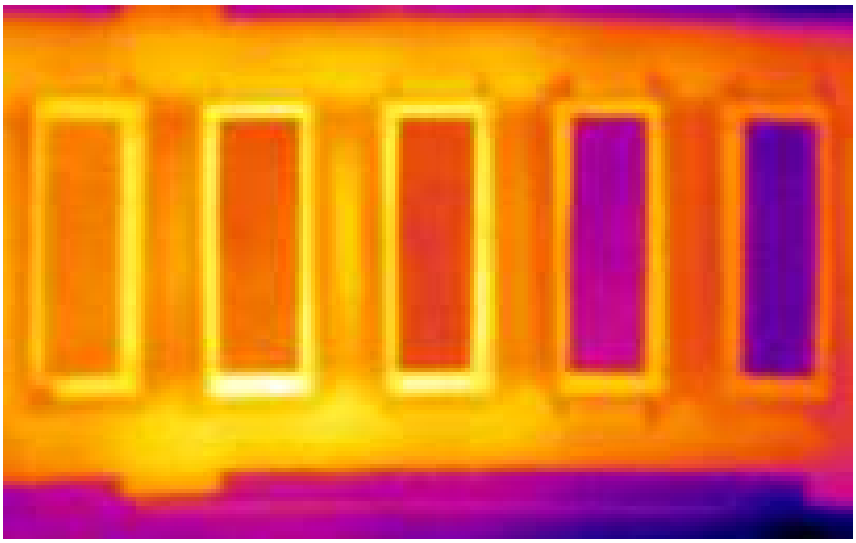


Fig. 3-9 IR image for specimens(last heating)

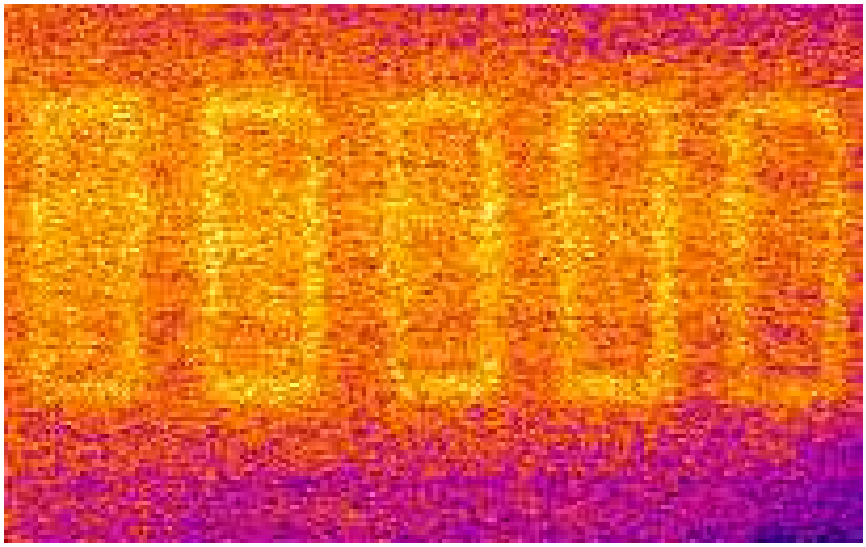


Fig. 3-9 IR image for specimens(after 20min)

다음은 각각 시편 냉각에 따른 온도-시간 그래프이다. 그래프에서 보듯이 같은 환경에서 동일한 열량을 가했을 때 시편이 포함한 열량은 폐기품의 환경을 적용한 시편이 가장 많았으며, 이는 폐기품의 코팅층이 제 기능을 발휘를 못하는 것으로 판단된다. 폐기품 시편 중에서도 블레이드의 외부에서 추출한 시편이 더 열악한 환경에서 운전되어 코팅층에 보다 많은 악영향을 주었다. 새로이 제작된 시편에서는 코팅층의 두께가 증가될수록 주위 환경에서 흡수되는 열이 가장 적었으며, 이는 코팅층 두께에 따라 모재로 전달되는 열을 차단했다는 증거이다. 이에 우리는 여기서 코팅층의 두께가 두꺼울수록 모재로의 열을 많이 차단한다는 결론을 내릴 수 있다.

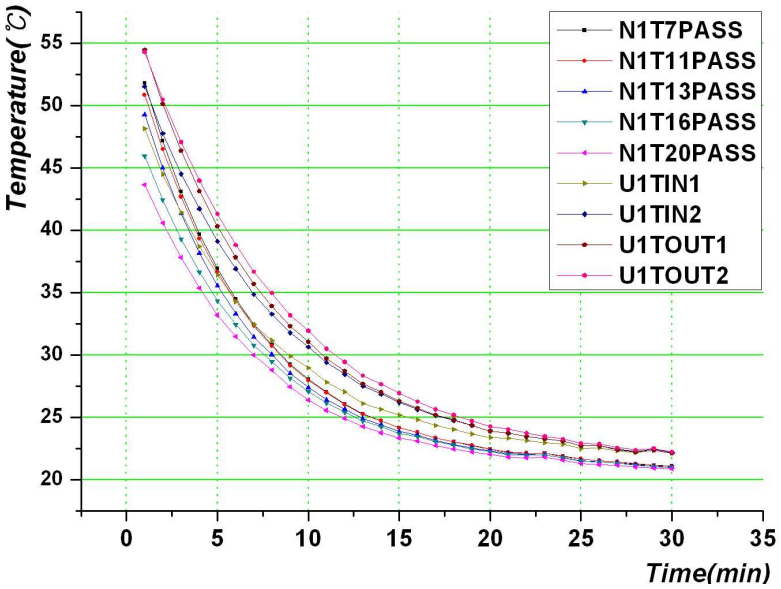


Fig. 3-10 Temp. follow in coating thickness(1T)

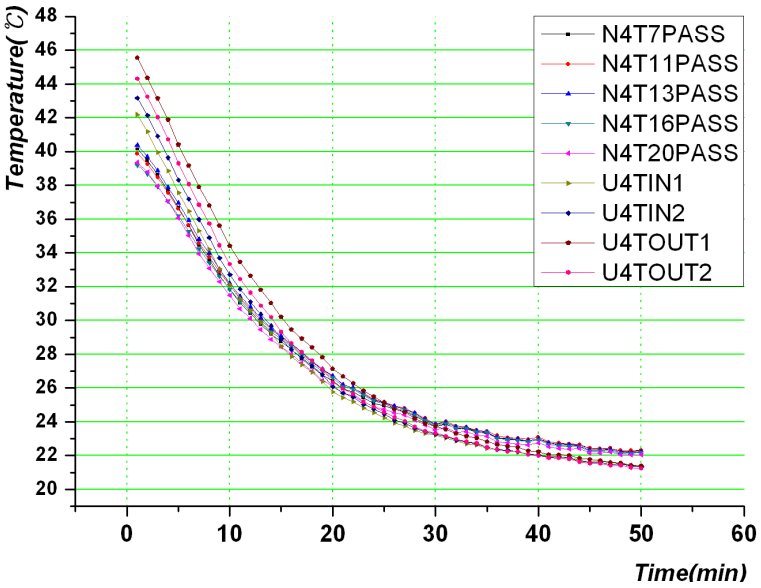


Fig. 3-11 Temp. follow in coating thickness(4T)

제 2 절 가스터빈 블레이드 실적용 *reference data* 획득

Fig. 2-32은 루트부를 통한 Hot air 주입으로 가열된 버킷의 concave면과 convax면에서 각각 10%, 60%, 90% 부분 15개의 spot를 대상으로 시험편 종류에 따른 시간별 온도 분포를 구하여 Fig. 2-33 ~ 2-47로 나타내었다.

각 spot에서의 온도 구배선을 분석해 보면 대체로 신품의 버킷의 열전도율이 가장 적었으며, 1회 사용품과 재생품은 비슷한 구배를 보였다. 다만 재생 정비를 하기 전에 코팅층을 스크립트한 버킷의 경우에서는 다른 시편보다 온도 증가와 감소가 뚜렷한 비교를 보였다. 이와 같은 온도 구배 데이터는 사용품의 코팅층 수명을 예측할 수 있었다. 재생품과의 차이를 살펴보면 사용품의 코팅층은 상당히 양호한 면을 볼 수가 있다. 이는 현재 12,000시간 버킷 전부에 대한 재생 정비를 실시하고 있으나, 재생품과 사용품의 코팅층 성능에 대해서는 그리 차이를 보이지 못하고 있는 실정이라 하겠다. 다만 스크립트된 버킷에서 보면 코팅층이 있는 것과 없는 것은 많은 차이를 보였다.

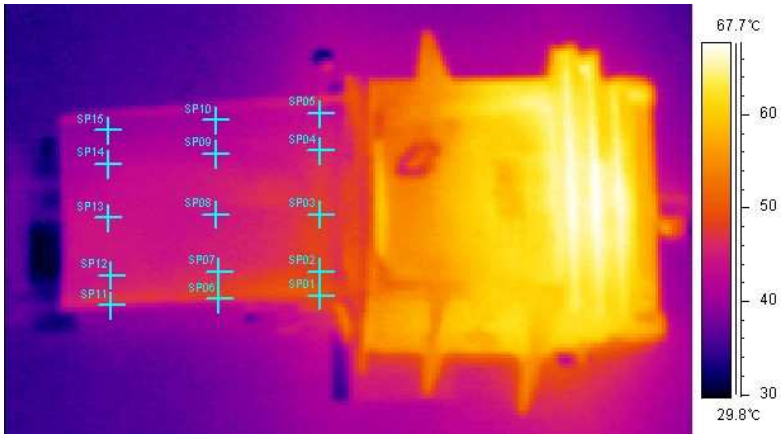


Fig. 3-12 Experiment IR image of bucket

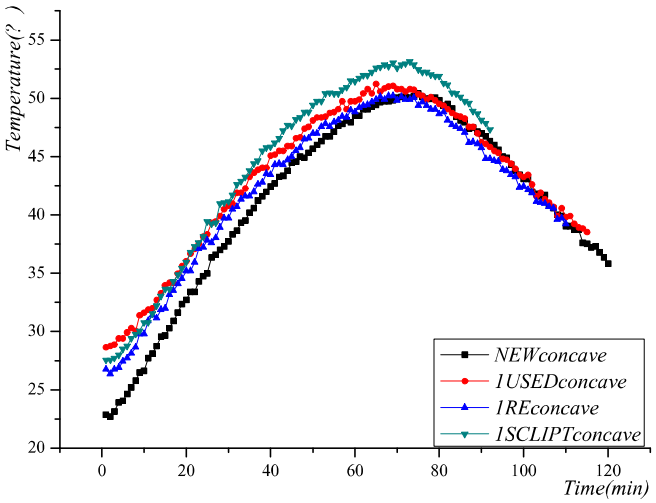


Fig. 3-13 Temp. of spot 1 by burket

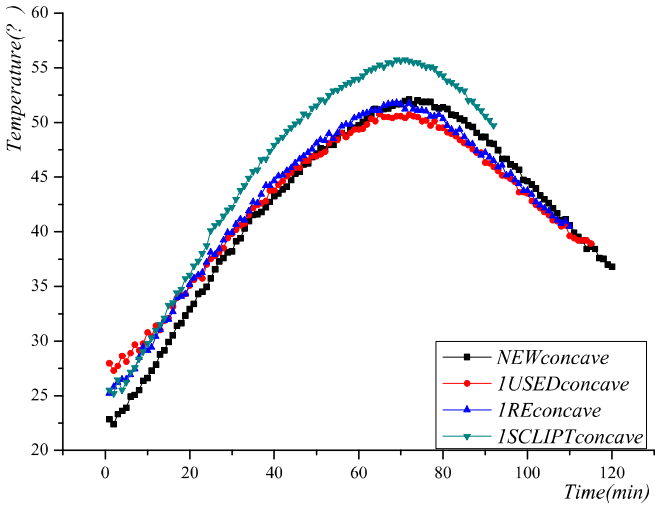


Fig. 3-14 Temp. of spot 2 by burket

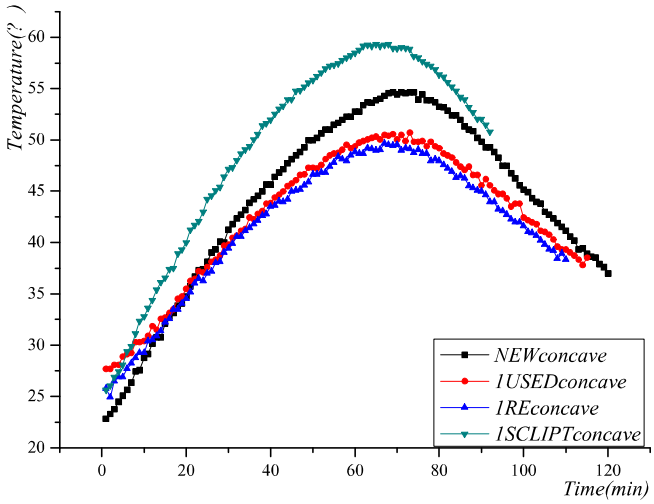


Fig. 3-15 Temp. of spot 3 by burket

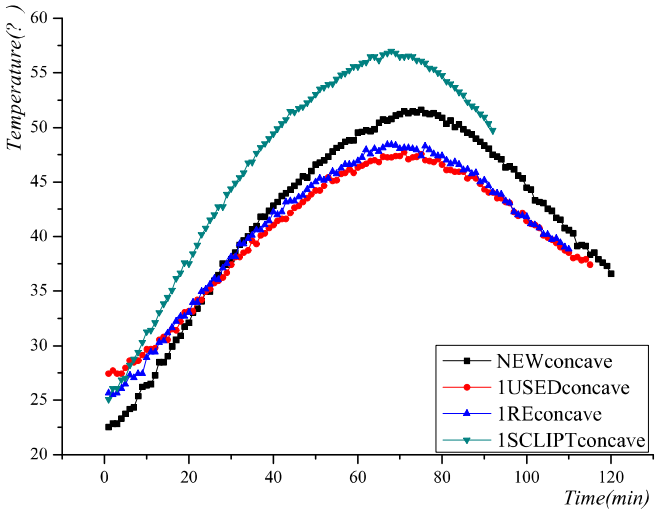


Fig. 3-16 Temp. of spot 4 by burket

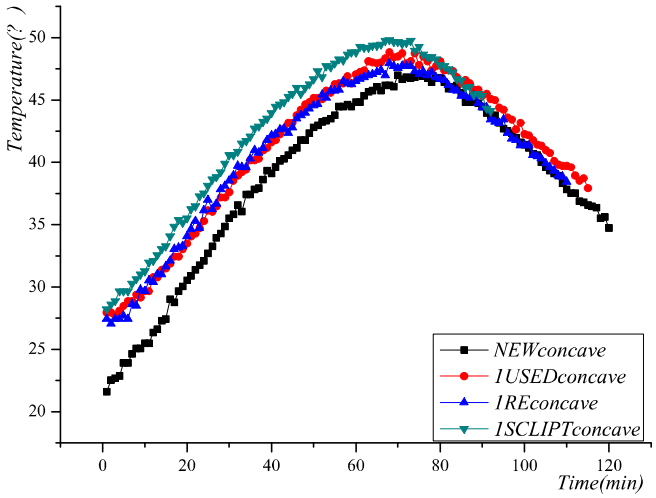


Fig. 3-17 Temp. of spot 5 by burket

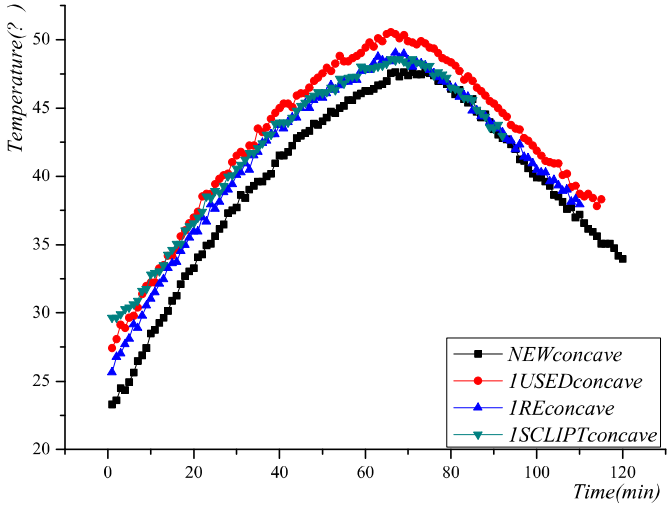


Fig. 3-18 Temp. of spot 6 by burket

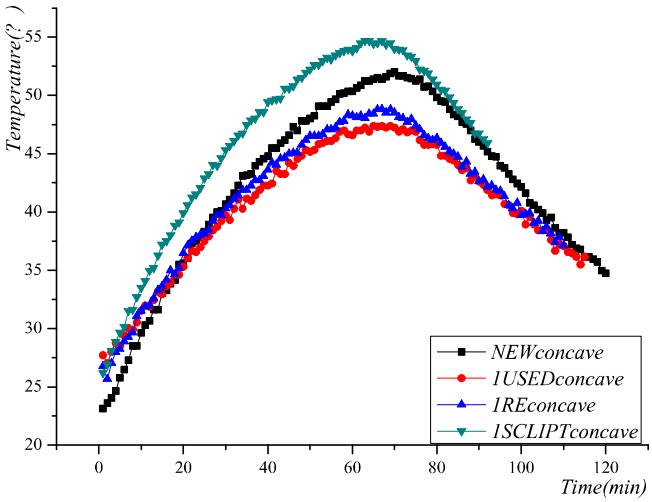


Fig. 3-19 Temp. of spot 7 by burket

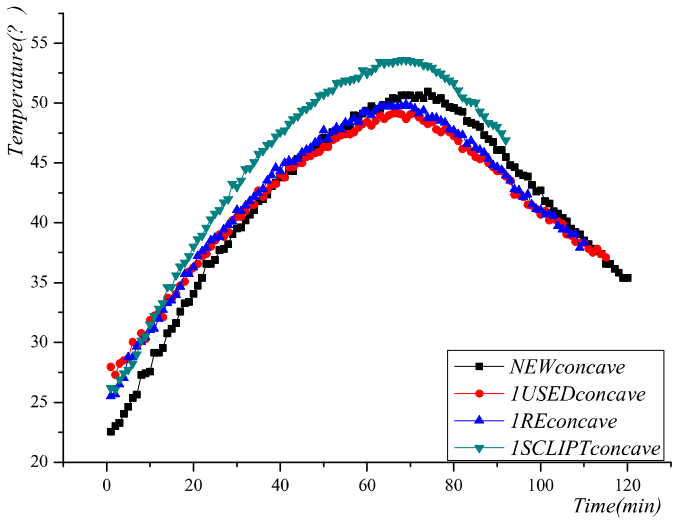


Fig. 3-20 Temp. of spot 8 by burket

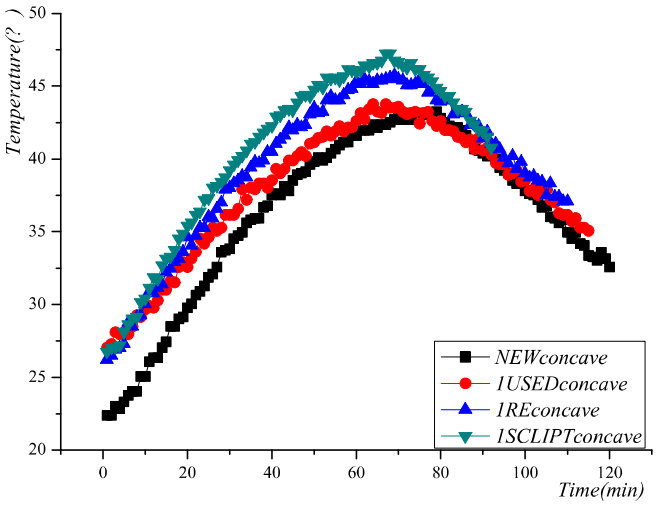


Fig. 3-21 Temp. of spot 9 by burket

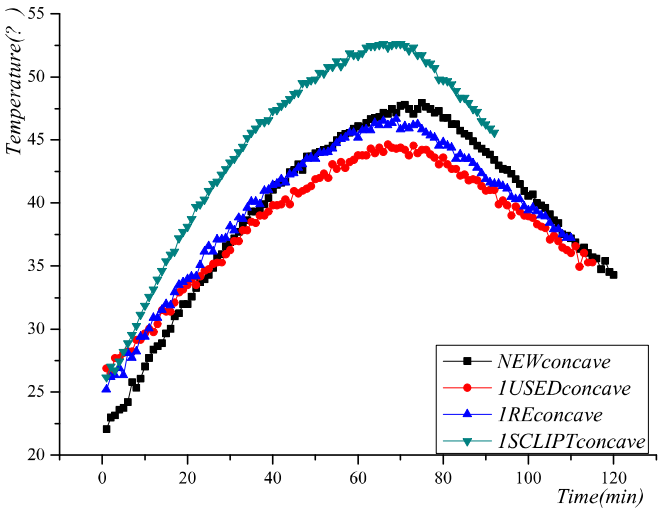


Fig. 3-22 Temp. of spot 10 by burket

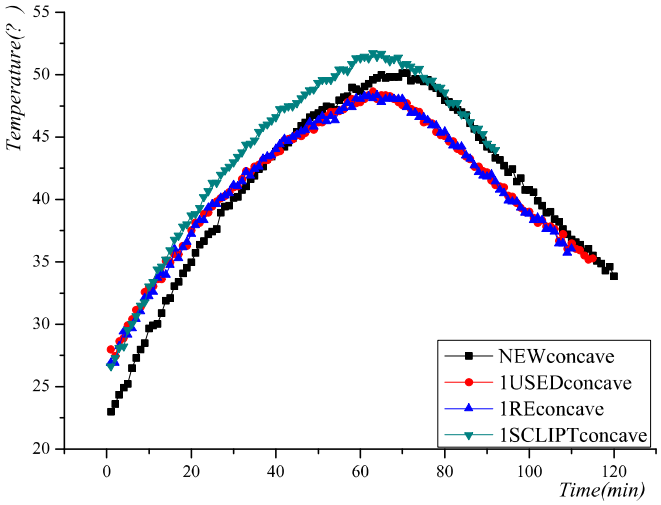


Fig. 3-23 Temp. of spot 11 by burket

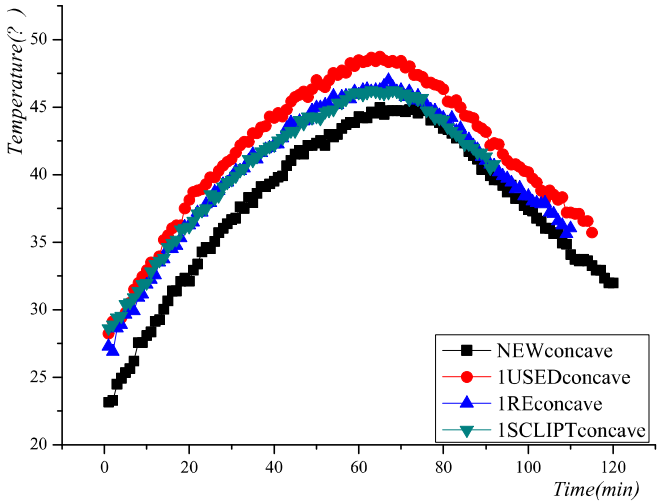


Fig. 3-24 Temp. of spot 12 by burket

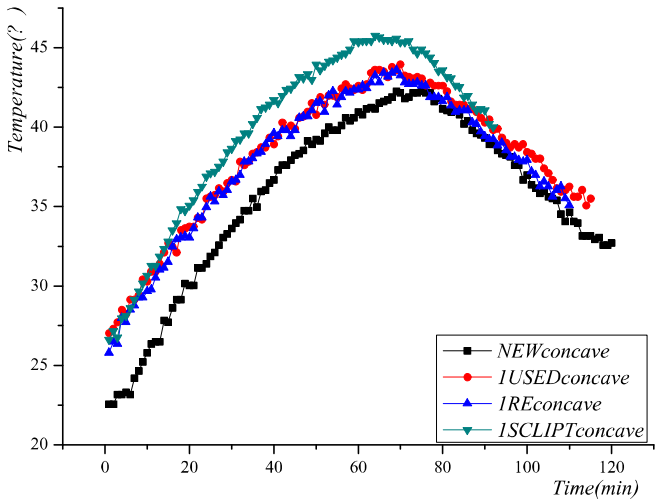


Fig. 3-25 Temp. of spot 13 by burket

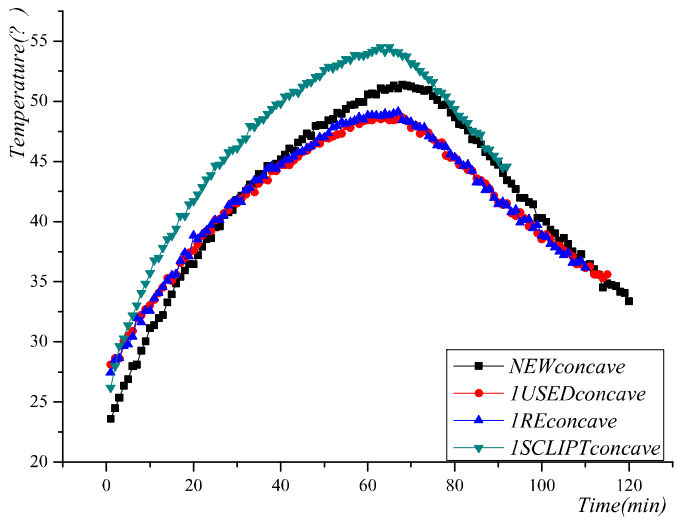


Fig. 3-26 Temp. of spot 14 by burket

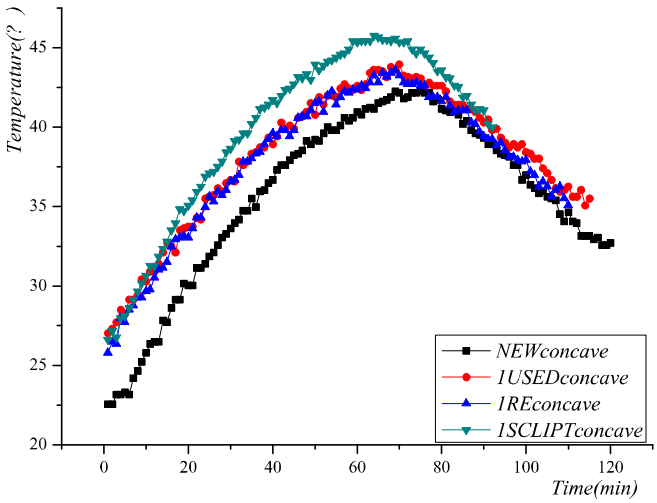


Fig. 3-27 Temp. of spot 15 by burket

제 3 절 가스터빈 블레이드 표면 크랙 검출

Fig. 2-50은 할로겐램프 ON 방법으로 램프을 계속 켠 상태에서 가열하면서 실험을 진행하였다. 램프가 ON 상태임으로 카메라 주변에 램프라는 외부 열원이 있어서 실험하는데 조금의 고려 대상이었다. 허나 이러한 실험도 램프 OFF 상태의 실험과의 비교 대상으로 삼기 위하여 실험을 진행하였다. Fig. 2-51은 LINE1에 대한 크랙 A, B, C의 온도-시간 그래프이다.

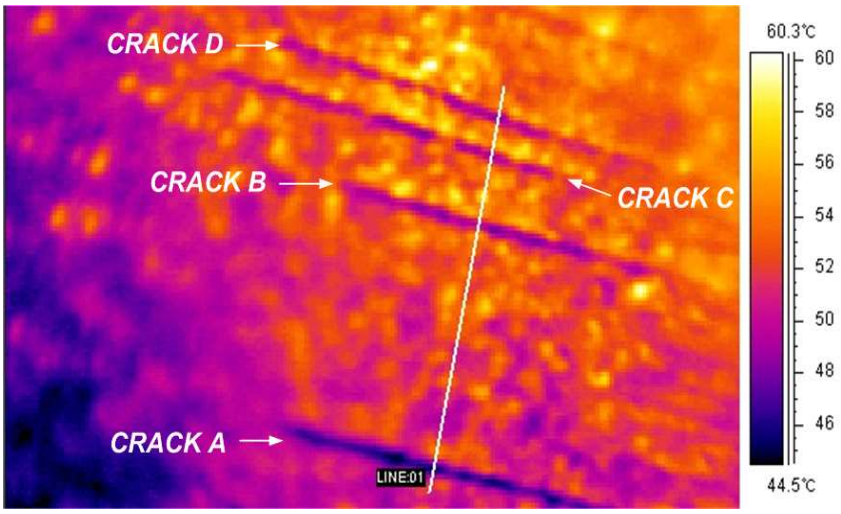


Fig. 3-28 Crack of IR thermography (Lamp ON)

Fig. 2-50의 적외선 열화상 이미지를 보면 크랙 부분에 있어서 경사진 면안으로 들어갈수록 빛이 상쇄됨으로, Fig. 2-51에 온도 분석 그래프를 보면 크랙 부분에서 온도가 다른 표면에 비교해서 내려가는 것을 볼 수 있다. 이 또한 적외선 카메라 측정에서는 크랙 검출에 있어서는 어느 정도는 크랙의 모재 진전에 따른 검출 방법이 가능하다고 판단된다.

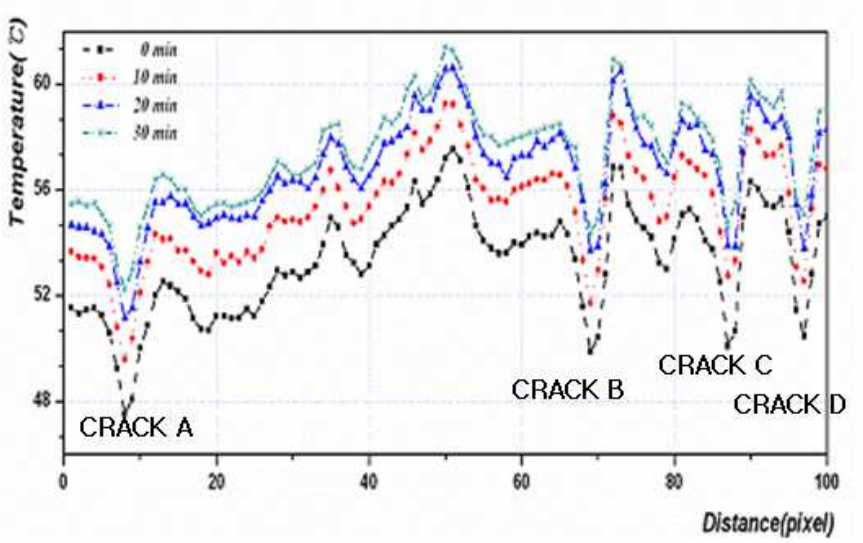


Fig. 3-29 Temp. distribution in change over time (Lamp ON)

두 번째 실험은 Lamp OFF에서 상태에서 실험을 진행하는 것이다. Lamp OFF 방법은 램프로 계속되는 가열이 불가능함으로 일정 시간 가열하여(위 실험에서는 30분 가열했음) 램프를 제거한 상태에서 촬영한 영상이다. 램프 같은 열원을 제거하였음으로 지속적인 촬영이 어려운 상태이며, 일정시간이 지나면 주위 온도에 따라 표면의 냉각으로 인하여 크랙의 검출 영상이 매우 불안정 하게 나타난다. Fig. 2-52는 30분간 가열 한 후 촬영한 IR 이미지에서 보듯이 Lamp ON에서와는 반대로 이 방법에서는 크랙부분의 열 증가 현상이 다른 부위 보다 뚜렷한 것을 볼 수 있을 것이다. 이는 처음에 가정 했듯이 코팅층이 모재로 침투되는 열원을 차단하여 부식이나 산화를 보호해 주는 것을 의미한다. 열원이 직접 모재에 침투함으로 주변보다 1 ~ 3℃ 정도 온도가 높게 나타났다. 이러한 온도 차이를 구분하여 보면 1℃ 이상 온도 차이가 나는 크랙들을 조합해서 보면 이들 크랙은 모재에 진전이 된 크랙들이다. 온도 변동이 1℃이하인 크랙들도 약 50%이상 모재로 진전되고 있는 실정이다.

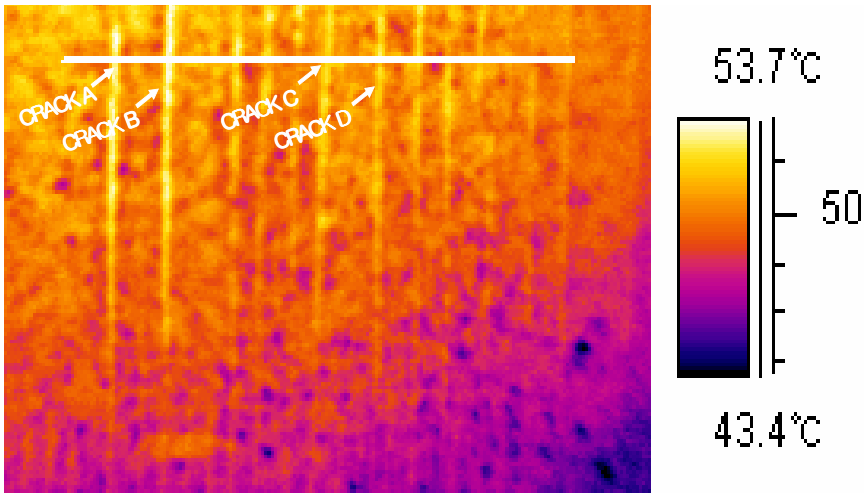


Fig. 3-30 Crack of IR thermography (Lamp OFF)

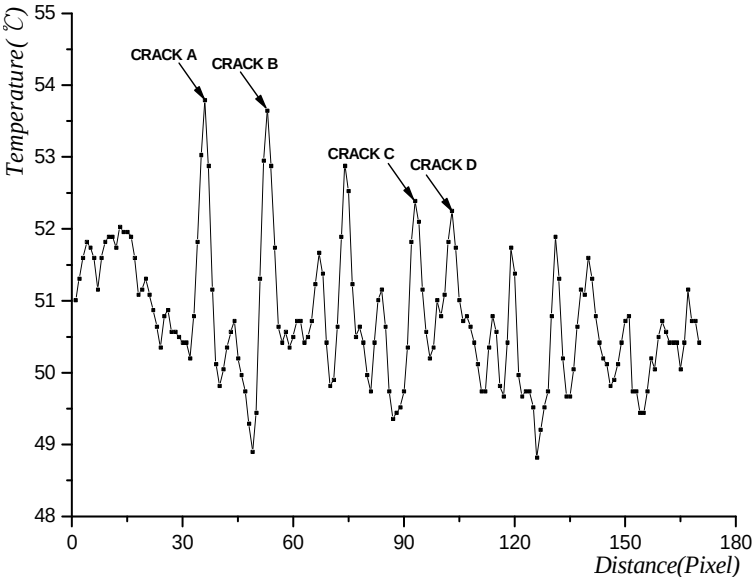


Fig. 3-31 Temp. distribution in change over time (Lamp OFF)

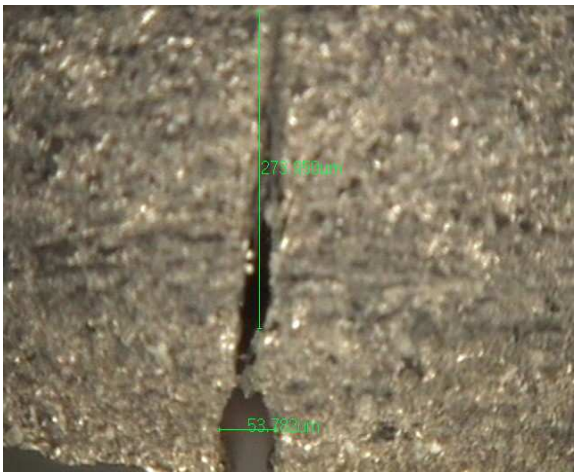


Fig. 3-32 Image for crack by using camscope

Fig. 2-54는 실제 Fig. 2-52의 CRACK B의 단면을 잘라서 VIDEO MICRO SYSTEM을 이용하여 300배 촬영한 영상이다. 크랙의 크기와 모재로 진전된 크랙의 길이는 전용 소프트 툴에서 작업하였으며, 이들 크랙의 발생 크기는 0.05mm이고, 코팅층을 제외한 모재에서의 크랙 길이는 약 0.3mm 정도로 나타났다.

이렇게 크랙이 발생된 상황에서도 계속된 운전에 따라 크랙의 크기는 점점 더 모재로 진전되는 것으로 나타났다.

제 4 절 코팅층 물성 변화에 관한 연구

발전 현장에서 사용되고 폐기된 블레이드의 미세조직을 살펴보면, 장시간 고온에서 사용함에 따라 조직내부의 석출상은 표준 조직에 비해 10배 이상 성장하였으며, 사용 시간이 증가함에 따라 이 석출상이 더욱 성장하였음을 알 수 있다. 동일한 블레이드에서도 중간 부위가 가장 크게 성장하였으며 석출상의 형상이 사각형에서 구형으로, 구형에서 점점 길쭉한 형상으로 바뀌었다. 이와 같은 현상은 GTD-111 DS의 재료의 경우 석출상과 기지조직과의 계면 에너지는 낮고 정합변형 에너지는 매우 커서 열처리 직후에는 석출상이 사각형을 유지하다가 고온에서 장시간 노출되면 근 변형에너지가 구동력이 되어 석출상의 변형을 촉진시키기 때문으로 생각된다. 운전 중인 블레이드 표면온도 분포는 길이 방향에서 30~80% 부위가 가장 높으며, 회전하는 원심력에 의한 외부 응력은 Root부에 가까울수록 크게 작용한다는 것은 이미 보고 된 바 있다. 이는 금속현미경으로 촬영한 아래의 영상에서의 석출상 변화 경향과 일치한다. 따라서 블레이드에서 온도와 응력으로 인한 가장 취약한 부위는 중간부위라는 사실을 알 수 있다.

미세조직 관찰에 사용된 블레이드에서 부위별로 채취한 시험편의 경도를 측정하면 장시간 사용한 시편에서의 경도값이 낮았으며, 동일 블레이드 내에서도 길이 방향으로 중간 부위의 경도값이 가장 낮게 나타났다. 석출경화형 초합금의 강화상의 성장은 기계적 특성을 크게 저하시키며, 장시간 사용시 열화가 가장 심한 부위는 블레이드의 중간부위라는 사실을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 블레이드 수명평가 및 교체기준 마련에 중요한 의미를 갖는다. DS GTD111 가스터빈의 경도 시험 결과도 장시간 고온에서 사용한 블레이드가 인장강도 값이 낮게 나타났으며, 이는 표준강도 1034MPa에 비해 약 40% 이상 상온강도가 낮은 값이다. 이는 석출상의 거동에 따른 결과로 판단된다.

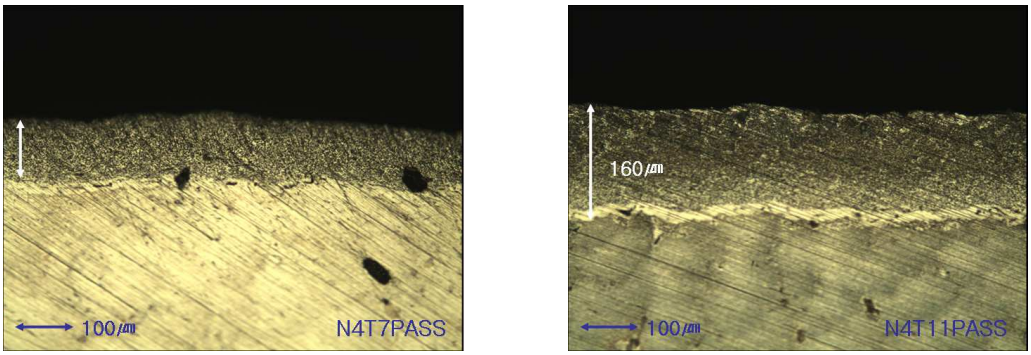


Fig. 3-33 Microscope image for new specimens(7PASS, 11PASS)

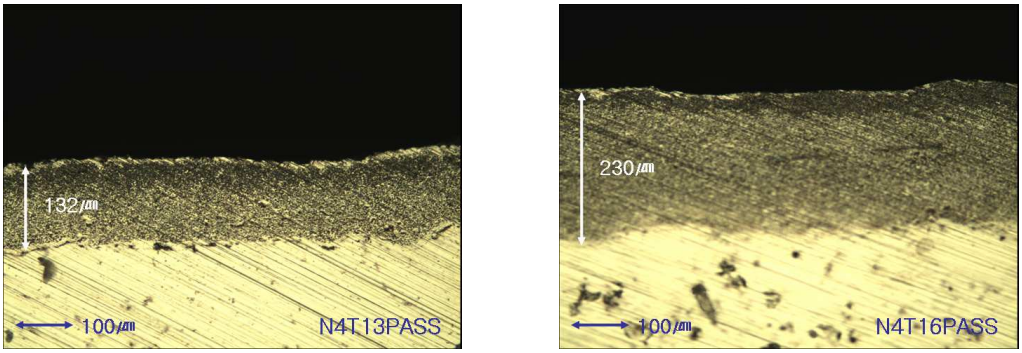


Fig. 3-34 Microscope image for new specimens(13PASS, 16PASS)

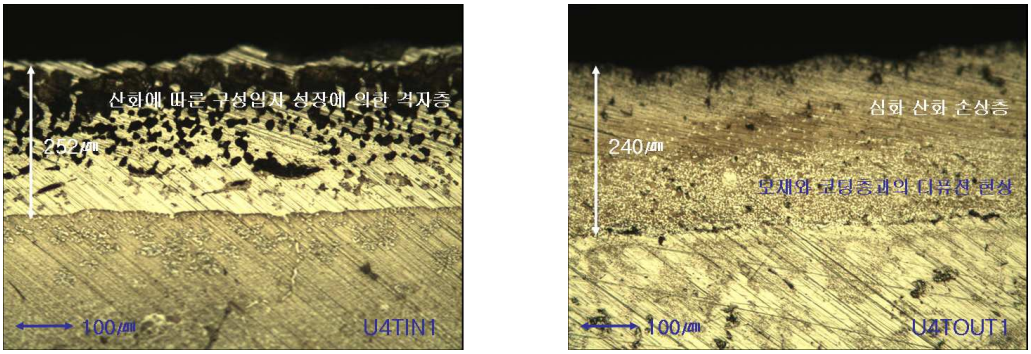


Fig. 3-35 Microscope image for used specimens(U4TIN1, U4TOUT1)

제 4 장 결 론

7FA 가스터빈 1단 버킷의 코팅층 건전성 평가를 위하여 적외선 열화상 장비의 적용성을 검토하였다. 각각 부분의 두께 차이별 열전도 현상의 차이를 보상하기 위하여 두께별로 시편을 제작하여 기초 Reference Data 확보를 하였으며, 버킷 전체에 열원을 고루 주사하여 신품, 1차 재생품, 1차 사용품, 스크립트된 1차 사용품, 그리고 폐품을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 내릴수 있었다.

1. 모재의 열원 온도 설정을 위한 선행 FEM 해석은 상용 해석 프로그램인 ANSYS 9.0이용하여 열전달 해석을 수행하였으며, 이를 통한 시편 실험용 Heating System 최적 설계를 하였다. FEM 해석 결과는 시편의 측정 가능한 온도는 약 42℃정도 였으며, 측정 시간은 가열 후 15min후가 적절하였다.

2. 연구에 사용된 시편은 54mm×19mm로 제작하였으며 이를 바탕으로 하는 Heating System은 최종 연구에 사용될 Heating System의 기본 모델이 되었다.

3. 적외선 열화상 계측을 하기 위한 버킷 전체의 고루 열원을 주기 위한 Hot air 주입형 Heating system를 제작을 위하여 선행 FEM 해석을 수행하였으며, FEM 해석 결과 200℃의 Hot air를 10분이상 주입하였을 때 버킷의 표면이 40℃이상이 되어 적외선 열화상 계측이 가능하였다.

4. 신품, 1차 재생품, 1차 사용품, 스크립트된 1차 사용품의 적외선 열화상 계측 데이터를 비교 분석해 본 결과 신품의 코팅층 성능이 가장 우수하였으며, 1차 재생품과 1차 사용품과는 별반 차이가 없었다. 다만 스크립트된 버킷은 코팅층에

서 다른 시편과 달리 온도 구배가 심하게 나타났다. 또한 재생품의 코팅층 성능은 신품에는 못 미치는 것으로 판별되었다.

5. Halogen Lamp를 사용하여 블레이드 코팅층의 크랙 판별 유무에서는 크랙의 온도가 주변의 온도 보다 1℃ ~ 3℃정도 차이가 났으면, 이중 1℃이상 온도 차이가 나는 크랙은 이미 모재로의 진전이 된 상태임을 알 수 있었다.

REFERENCE

1. "Level I Course Manual" Infrared Training Central, 1998, pp. 12～56
2. Blackman, "A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape", 1987, pp. 19～20
3. D. Y. Yang, C. H. Kim and J. Y. Kim, "Evaluation of defects in the bonded area of shoes by using infrared thermal vision camera", International journal of modern physics B, Vol. 17 No. 8&9, 2003, pp. 1947～1952
4. J. Y. Kim, D. J. Yang, Y. T. Yoo et al., "UT system composition and welding flow classification for SWP stability estimation", Key engineering materials, Vol. 261-263, 2004, pp. 1385～1390
5. D. J. Yang, J. Y. Kim, et al., "A study on the infrared thermography camera application for the evaluation of 7FA gas turbine blade coating integrity", Key engineering materials, Vol. 261-263, 2004, pp. 1683～1688
6. J. Y. Kim, D. J. Yang, Y. T. Yoo et al., "Estimation of laser behaviors of SM45C steel by plume monitoring", Key engineering materials, Vol. 274-276, 2004, pp. 463～468
7. J. Y. Kim, D. Y. Yang, "Heat Analysis of Welding-bead using Infrared Thermography Camera", Journal of the korean society of machine tool engineers, Vol.10, No.3, 2001, pp. 38～44
8. Jae-Yeol Kim, Sung-Un Yoon, Noh-Bin Yim, Sin Yu, Sang-Dong Ma, Dong-Jo Yang and In-Suk Song, "Thermo-Analysis of Machining Center Main-Axis Thermo-Displacement for Infrared Rays Thermo-Image Camera", Proceedings of the KSMTE spring conference, pp. 125～130.

9. "ASNT Programs and Paper Summaries", American Society for Nondestructive Testing, 1989
10. J. Y. Kim, D. Y. Yang, C. H. Kim, "Evaluation of defects in the bonded area of shoes using infrared thermal vision camera", International journal of control automation and system, Vol. 1, No. 4, 2003, pp. 511～514
11. J. XIE, A.KAR, "Laser welding of Thin sheet steel with surface oxidation", The weldicng journal research supplement , 348-s, 1999, pp. 59～67
12. KEPCO , "GAS TURBINE TECHOLOGY", 1999.
13. Rovert Madding, Gray orlove, "INFRAMATION 2004", Vol. 5, 2004.
14. Rovert Madding, Gray orlove, "INFRAMATION 2005", Vol. 6, 2005.
15. Ali. M. S, Song. S, & Xiao. p, "Degradation of thermal barrier coatings due to thermal cycling up to 1150℃", J. Mater. Sci., Vol. 37, 2003, pp. 2097 ~ 2102.
16. Ambrico. J. M, Begley. M, & Jordan, E. H. 2001. "Stress and shape evolution in oxide films on elastic-plastic substrates due to thermal cycling and film growth". Acta Mater., vol. 49, pp. 1577 ~ 1588.
17. Balint, D. S. & Hutchinson, J. W. 2003. "Undulation instability of a compressed elastic film on a nonlinear creeping substrate". Acta Mater., vol. 51, pp. 3965 ~ 3983.
18. Bartlett, A. H. & Maschio, R. D. 1995. "Failure mechanisms of a zirconia-8% yttria thermal barrier coatings". J. Am. Ceram. Soc., vol. 78, pp. 1018 ~ 1024.
19. Bartsch, M., Baufeld, B., & Fuller, E. R. J. 2003. "Elucidating thermo-mechanical spallation of thermal barrier coating-systems using controlled indentation flaws". Ceram. Eng. Sci. Proc. to be published.

20. Bartsch, M., Marci, G., Mull, K., & Sick, C. 2001. Damage evolution in EB-PVD thermal barrier coatings for turbine blades in aircraft engines under close to reality testing conditions. Int. J. Mat. Prod. Technol., vol. 16, pp. 248 ~ 257.
21. Baufeld, B. & Barstch, M. "Effects of controlled thermal gradients in thermal mechanical fatigue". In Portella, P. D., Sehitoglu, H., & Hatanaka, K., ed., Fifth International Conference on Low Cycle Fatigue, Berlin, Germany. Federation of European Materials Societies, Sept 2003. to be published.
22. Baufeld, B., Tzimas, E., Mullejans, H., Peteves, S., Bressers, J., & Stamm, W. 2001. "Thermal-mechanical fatigue of MAR-m 509 with a thermal barrier coating". Mat. Sci. Engng., A315, pp. 231 ~ 239.
23. Bose, S. & Demasi-Marcin, J. 1997. "Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at pratt and whitney". J. Therm. Spray Technol., vol. 6, pp. 99 ~ 103.

감사의 글

부족함이 많은 석사학위 논문을 마감하면서 감사의 마음을 이 글로 대신합니다.

여러 해 동안 많은 도움을 주시고 연구자의 자세를 가르쳐 주신 김재열 지도교수님께 진심으로 감사를 드리며, 논문을 검토하는 과정에서 조언과 격려를 아끼지 않으신 심재기 교수님, 윤성운 교수님께 고마움을 금할 길이 없습니다. 학위 과정 동안 많은 지도와 가르침을 주신 김영석 교수님, 오율권 교수님, 이동기 교수님, 유영태 교수님께도 감사드립니다.

또한 전력산업 연구개발사업 참여을 통해 학문적 도움을 주신 한전전력연구원 관계자님들과 본 논문의 실험을 위해 많은 시간을 할애해 주신 한전기공 G/T 정비센터 관계자 여러분께도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

제 인생 가치관 성립에 있어서 많은 부분에 영향을 주신 양동조 박사님에게도 깊은 감사를 드리며 입학시절부터 부대끼며 같이 생활한 김창현 박사님, 곽이구 박사님, 송경석 박사님, 김우진 석사님, 그리고 부족한 선배 밑에서 많이 고생한 곽남수, 최승현, 고명석 후배님에게도 고맙다는 말을 드립니다.

저의 오늘이 있기까지 못난 자식을 끝없는 사랑으로 보살펴주신 부모님, 항상 제 맘에 커다랗게 자리하고 계신 할머님, 그리고 저희 가족에게 늘 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 마지막으로 오랜 기간 제 옆에 항상 똑같은 마음으로 절 바라보며 서 있는 제 여자 친구 이진희에게도 감사하다는 말과 함께 사랑한다는 말을 전합니다.

저를 아는 모든 분들께 이 감사의 글을 올립니다.

2006년 11월 30일 나노계측메카트로닉스실험실에서 최철준 (올림)

저작물 이용 허락서

학 과	정밀기계공학과	학 번	20057135	과 정	석사
성 명	한글 : 최철준 한문 : 崔哲俊 영문 : Choul-Jun, Choi				
주 소	전남 장흥군 안양면 수문리 35번지				
연락처	E-MAIL : pola98@paran.com				
논문 제목	적외선 열화상 계측기법을 활용한 가스터빈 블레이드 건전성 평가 Integrity Estimation of Gas Turbine Blade by Using Infrared Thermography Technique				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의( ) 조건부 동의(✓) 반대( )

2005년 11월 30일

저작자 : 최 철 준 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하