



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



**저작자표시.** 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2008년 8월  
석사학위논문

# 적외선 열화상 진단기술을 적용한 가스터빈 1단 버킷의 건전성 평가

조선대학교대학원

정밀기계공학과

최 승 현



# 적외선 열화상 진단기술을 적용한 가스터빈 1단 버킷의 건전성 평가

Integrity Evaluation of Gas Turbine 1st Stage Bucket Apply  
Infrared Thermography Diagnostic Technology

2008년 8월 25일

조선대학교대학원  
정밀기계공학과  
최승현

# 적외선 열화상 진단기술을 적용한 가스터빈 1단 버킷의 건전성 평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2008년 4월

조선대학교대학원

정밀기계공학과

최 승 현

# 최승현의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교 교수                    심재기    인

위원        조선대학교 교수                    윤성운    인

위원        조선대학교 교수                    김재열    인

2008년    5월

조선대학교 대학원

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLE .....	vii
NOMENCLATURE .....	viii
ABSTRACT .....	ix
제 1 장 서론 .....	1
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구목적 .....	3
제 2 장 가스터빈 1단 버킷 .....	5
제 1 절 GE 7F-Class 가스터빈 1단 버킷 .....	5
제 3 장 열화상계측 및 분석 .....	D
제 1 절 열화상계측 시스템 .....	D
1. 열 측정 이론 .....	0
2. 적외선 열화상 계측 시스템 구성 .....	8
제 2 절 적외선 열화상 계측 실험 방법 .....	22
1. Hot Air를 이용한 적외선 열화상 계측 .....	2
2. Halogen lamp를 이용한 적외선 열화상 계측 .....	2
제 4 장 연구 결과 및 고찰 .....	38

제 1 절 Hot Air를 이용한 적외선 열화상 계측 분석 .....	3
제 2 절 Halogen lamp를 이용한 적외선 열화상 계측 분석 3	
1. 버킷 표면 미세 크랙 검출 .....	8
2. 버킷 코팅면 접착 상태 분석 .....	9
3. Halogen Lamp를 이용한 버킷 크랙 검출 .....	4
4. 재생 주기에 대한 고찰 .....	4
제 5 장 결론 .....	5
REFERENCE .....	5

## LIST OF FIGURES

Fig. 1-1	Blade material trend used by GE .....	4
Fig. 1-2	Bucket alloys – LCF life .....	6
Fig. 1-3	Failure mode of bucket on gas turbine .....	6
Fig. 1-4	Failure case of 7FA 1st stage bucket on gas turbine .....	7
Fig. 2-1	The electromagnetic spectrum .....	10
Fig. 2-2	Atmospheric transmission in different wavelength bands .....	10
Fig. 2-3	Incident radiation .....	11
Fig. 2-4	Exitant radiation .....	11
Fig. 2-5	Radiation contributions to the general measurement situation ..	12
Fig. 2-6	Infrared thermography (Pulse technique) .....	17
Fig. 2-7	Infrared thermography (Lock-in Technique) .....	17
Fig. 2-8	Component of thermovision 900 system .....	18
Fig. 2-9	Schematic diagram of system controller .....	19
Fig. 2-10	Exploded view of the scanner optical path .....	20
Fig. 2-11	Schematic diagram of scanner .....	21
Fig. 2-12	FEM analysis condition by using ANSYS program .....	22
Fig. 2-13	FEM analysis by using ANSYS program. ....	23
Fig. 2-14	Actuality image of bucket. ....	24
Fig. 2-15	Diagram of Heating System using Hot Air .....	24
Fig. 2-16	Actual experiment equipment set .....	25
Fig. 2-17	Actual image of bucket crack .....	26
Fig. 2-18	Defect sample(material + bond masking) .....	26
Fig. 2-19	Defect sample(bond + top masking) .....	27
Fig. 2-20	Position of specimens to measure .....	28

Fig. 2-21 Examination equipment composition .....	28
Fig. 2-22 Actuality image of bucket .....	29
Fig. 2-23 Experiment equipment using halogen Lamp .....	30
Fig. 2-24 Experiment equipment using halogen Lamp .....	31
Fig. 2-25 Bucket before cutting .....	32
Fig. 2-26 Bucket as water jet cutting .....	32
Fig. 2-27 Wire cutting point .....	33
Fig. 2-28 Specimens .....	33
Fig. 3-1 Experiment IR image of bucket(after heating 60 min) .....	34
Fig. 3-2 Experiment IR image of bucket(after cooling 60 min) .....	35
Fig. 3-3 Temp. of spot 1 by bucket .....	35
Fig. 3-4 Temp. of spot 2 by bucket .....	35
Fig. 3-5 Temp. of spot 3 by bucket .....	35
Fig. 3-6 Temp. of spot 4 by bucket .....	35
Fig. 3-7 Temp. of spot 5 by bucket .....	36
Fig. 3-8 Temp. of spot 6 by bucket .....	36
Fig. 3-9 Temp. of spot 7 by bucket .....	36
Fig. 3-10 Temp. of spot 8 by bucket .....	36
Fig. 3-11 Temp. of spot 9 by bucket .....	36
Fig. 3-12 Temp. of spot 10 by bucket .....	36
Fig. 3-13 Temp. of spot 11 by bucket .....	37
Fig. 3-14 Temp. of spot 12 by bucket .....	37
Fig. 3-15 Temp. of spot 13 by bucket .....	37
Fig. 3-16 Temp. of spot 14 by bucket .....	37
Fig. 3-17 Temp. of spot 15 by bucket .....	37
Fig. 3-18 IR image of bucket crack(heating system) .....	38
Fig. 3-19 IR image of bucket crack(halogen lamp) .....	39

Fig. 3-20	Temp. of bucket crack .....	39
Fig. 3-21	IR iamge of Heating system method .....	40
Fig. 3-22	IR iamge of Halogen lamp method .....	40
Fig. 3-23	Temp. of spot 1 by bucket .....	41
Fig. 3-24	Temp. of spot 2 by bucket .....	41
Fig. 3-25	Temp. of spot 2 by bucket .....	41
Fig. 3-26	Crack of IR Thermography (Lamp ON) .....	42
Fig. 3-27	Temp. Distribution in change over time (Lamp ON) .....	42
Fig. 3-28	Crack of IR Thermography (Lamp OFF) .....	43
Fig. 3-29	Temp. Distribution in change over time (Lamp OFF) .....	43
Fig. 3-30	Image for crack by using camscope .....	44
Fig. 3-31	IR image of bucket (concave) .....	45
Fig. 3-32	IR image of bucket (convex) .....	45
Fig. 3-33	Temp. of spot 4 by bucket(concave) .....	46
Fig. 3-34	Temp. of spot 9 by bucket(concave) .....	46
Fig. 3-35	Temp. of spot 14 by bucket(concave) .....	47
Fig. 3-36	Temp. of spot 2 by bucket(convex) .....	47
Fig. 3-37	Temp. of spot 7 by bucket(convex) .....	48
Fig. 3-38	Temp. of spot 12 by bucket(convex) .....	48
Fig. 3-39	IR image of bucket (concave) .....	49
Fig. 3-40	IR image of bucket (convex) .....	49
Fig. 3-41	Temp. of spot 2 by bucket(concave) .....	50
Fig. 3-42	Temp. of spot 7 by bucket(concave) .....	50
Fig. 3-43	Temp. of spot 12 by bucket(concave) .....	51
Fig. 3-44	Temp. of spot 4 by bucket(convex) .....	51
Fig. 3-45	Temp. of spot 9 by bucket(convex) .....	52
Fig. 3-46	Temp. of spot 14 by bucket(convex) .....	52



Fig. 3-47 SEM-EDX Analysis ..... 56

## LIST OF TABLE

Table 1-1 Full equipment cycle of gas turbine main parts .....	5
Table 2-1 Properties of matter .....	24
Table 3-1 Average temperature change rate .....	53
Table 3-2 EDX result showing the compositions .....	56

# 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
$\alpha$	: Absorptivity
$\epsilon$	: Emissivity
$\rho$	: Reflectivity
$\tau$	: Transmissivity
$\sigma$	: Stefan-Boltzman constant

# ABSTRACT

## Integrity Evaluation of Gas Turbine 1st Stage Bucket Apply Infrared Thermography Diagnostic Technology

Choi Seung-Hyun

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 weak 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

### 1. 연구 배경

기력 설비의 경우, 설비의 건전성을 진단하기 위한 다양한 신기술이 개발되고 설비별 진단방법 및 진단주기가 확립되어 계획예방 정비기간(Overhaul period)은 물론 설비고장이 발생할 시 적절한 비파괴 진단 방법을 통해 설비를 진단하고 재사용, 교체여부 등을 결정하여 안전성을 확보하고 있다. 그러나 가스터빈의 경우 고온, 고압 그리고 고속회전의 악조건에서 운영되고 빈번한 부하변동 및 기동정지로 인하여 각설비의 중요 부품의 손상빈도가 높아 유지보수 비용의 증가는 물론 발전정지로 이어지는 경우가 많지만, 비파괴 진단기술의 국내 개발이 전무한 상태이고, 대부분의 설비진단을 제작사에 의존하고 있어 진단비용은 물론 제작사의 보수적인 진단으로 인한 막대한 부품교체비용이 소요되고 있는 실정이다.<sup>(12)</sup>

국내 현황은 가스터빈 설비에 대한 비파괴 진단기준 체계가 미흡한 실정이다. 특히 계획예방정비 기간 중 수행되는 비파괴 진단은 한전기공 가스터빈 정비센터에서 총괄하여 수행하고 있으며, 관련분야 비파괴 검사가 일부 수행되더라도 핵심 부품에 대한 기술적인 판단과 검사결과에 평가에 대해서는 제작사에 의존하고 있으며, 비파괴 진단평가를 제작사에 의존한 결과, 대부분의 운전 중 발생된 결함에 대하여 과도하게 평가를 실시하여 교체 정비를 권고안으로 제시하고 있으나 이를 방어할 기술적 배경이 미흡한 상태이다. 그리고, 비파괴 진단 및 평가 시스템이 확보되지 않고 있다. 국내 발전설비 중 가스터빈을 운영하는 복합설비는 용량대비 25% 정도를 점유하고 있으며 비파괴 진단기술 개발에 적용될 7FA급 가스터빈은 전체 발전회사에서 보유하고 있는 가스터빈 81대중 24대로서 약 30%정도의 점유율을 보이고 있다. 그러나 비파괴 진단방법을 적극적으로 도입하여 체계적인 진단 프로그램을 운영하여 설비의 건전성을 확인하고 있지 못하며, 일반적인 FPI, MI 검사방법을 적용하고 있다. 국내에 존재하는 많은 가스터빈에 대한 비파괴 진단기술은 일부 부품에 대하여 MT, PT 검사를 적용하고 있으며 대부분 제작사에 의존하여 비

파괴적 진단을 수행하고 있다. 그리고 사용되고 있는 FPI, MT 기술의 현장 적용성에 대한 한계점을 인식하여 대체 검사 방법으로 와전류검사(ECT)기술 적용에 필요한 장비도입과 신호해석 기술이 도입단계에 있다.<sup>(12)</sup>

그 동안 비파괴 검사 기술에 대한 연구개발이 원자력이나 스팀터빈에 집중되어 왔으나, 상대적으로 고온의 가혹한 환경에서 운전되고 있는 가스터빈에 대한 연구개발은 미흡한 실정이다. 가스터빈 설비에 대한 비파괴 적용기술은 기존 스팀터빈에서 사용하는 방법으로 자성체 로터에 대해 MPI를 비자성체인 7F-Class 터빈로터의 경우 FPI를 수행하는 정도의 표면 검사만 이루어지고 있는 실정이다.

국내의 적외선 열화상 카메라의 활용 면에서 보면 의료 분야에서는 인체의 체온을 측정하여 질병의 유무를 판단하고 있으며, 산업현장의 경우 단순히 열화상 촬영에 국한되어 있으나, 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. 가스터빈 Bucket 코팅은 모재를 고온으로부터 보호하기 위하여 모재위에 2중으로 코팅되어 있으며, 대략 200 ~ 300 $\mu$ m 두께를 갖고 있다. 가스터빈 운용 중에 이러한 코팅층에 약간의 손상이 발생하여도 모재에 심각한 손상을 초래하고 이는 곧바로 터빈의 진동, 효율 저하는 물론 터빈 설비의 심각한 손상을 가져올 수 있어 코팅층에 대한 주기적인 진단 및 건전성 평가는 매우 중요하다. 그러나, 지금까지의 코팅층에 대한 건전성 평가는 거의 이루어지지 못하고 있어 가스터빈 정비 시 모든 버킷을 분해하여 코팅층을 제거하고 재 코팅을 수행함으로써 보수비용 증대는 물론 보수기간이 늘어남으로써 효율적인 설비의 운용에 많은 어려움이 있었다.

최근에 외국에서는 적외선 검사방법(IR)을 이용하여 코팅층의 두께 및 재질변화를 감지하고 이를 근거로 코팅층의 건전성을 평가하는 방법이 점차 확산되고 있고 국내 전력사에서도 코팅층 건전성 진단방법 개발에 관심을 갖고 있는바, 가스터빈 코팅층의 건전성 진단기술을 개발하고 이를 적용하는 것은 매우 시의적절 하다고 하겠다.



## 제 2 절 연구목적

전력산업의 구조개편 후 전력설비의 운영이 안정성 보다는 당장의 수익성에 치우쳐 운영되고 있는바, 단기적으로는 별문제가 없는 것처럼 보일지 몰라도, 중장기적으로는 전력설비의 안정성에 매우 심각한 문제를 야기할 가능성이 많아 설비의 안정적인 운용을 위한 설비관리 기준이 마련되어야 하는 시점에 와 있다. 특히, 가스터빈의 경우 기력발전소에 비해 비파괴 진단기준 및 방법이 확립되어 있지 못하여 제작사의 권고에 따라 설비운영, 진단, 부품교체 등을 수행하여 왔으나, 제작사가 이에 대한 근거를 제공하지 않고 있어 지나치게 보수적인 기준을 적용해 오고 있으며, 같은 전력사라 하더라도 제작사마다 적용기준이 상이하여 체계적이고 합리적인 기준을 마련하지 못하고 있다. 기본적으로 국내 가스터빈 부품에 대한 비파괴 진단기술은 제작사에 의존하고 있고, 일부업체에서 MT, PT에 한정하여 적용하고 있어 선진국이 개발하여 적용하고 있는 ECT, DRT, IR 및 Phased Array 기술등의 신기술과는 너무나 거리가 먼 실정이다. 따라서, 국내 전력설비의 운용현황, 비파괴 진단실적, 제작사의 권고기준은 물론 국외 전력사의 적용현황등을 반영하여 비파괴 진단방법을 개발하고 기준을 설정하는 것이 필수적이다.

산업·경제적인 측면에서 보면 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 완화함으로써 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 안정성평가와 관련된 자료의 확보 및 체계적인 데이터의 관리가 필수적으로 요구된다. 따라서, 이러한 체계적인 설비관리 및 안정성 평가를 위해서는 정확한 진단과 평가를 위한 여러 가지 시험, 평가기술 확보가 필요하다. 비파괴분야 신기술의 하나인 열적외선 기술(IR)은 온도차를 이용하여 설비의 건전성 여부를 객관적이고 정량적으로 진단하는 기술로 발전하고 있다.

특히, 적외선 검사(Infrared Ray Testing)는 적용기법과 편리성면에서 많은 각광을 받고 있는 검사 방법이다. 적외선 검사 방법은 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 결합부분을 검출하기 위한 방법으로는 그 유용성이 이미 검증된 부분이다. 또한 비접촉으로 검사가 이루어지기 때문에 설비 운전 중 평가가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 결합의 건정성을 판별하기 위해서는 외부 열원 또는 내부 열원이 반드시 필요하기 때문에 Active 방법으로서 외부 열원의 공급 문제에 대한 기술적인 해결방법이 이루어질 경우 획기적인 비파괴 평가 방법이 될 수 있다.

본 연구에서는 적외선 열화상 기법을 이용하여 7FA 1단 버킷을 대상으로 시험편을 제작하여 기초 실험 및 reference data를 확보하기 위해 모재의 열원 온도 설정을 위한 모재와 코팅층간의 열전달 해석을 수행하여 시험편을 바탕으로 하는 Heating System 즉, Hot air를 이용한 Heating System과 Halogen lamp 를 이용한 Heating System의 현장 적용성 및 타당성 검증에 있다. 또한, 사용품, 재생품, 폐품의 7FA 1단 버킷을 대상으로 halogen lamp를 열원으로 사용하여 Thermography data의 비교 분석을 수행하였다. 열원의 공급 방법으로는 IR장비와 동일한 위치에 열원을 공급하는 Reflection method 와 열원을 IR장비의 반대 위치에 열원을 공급하는 Transmission method 을 사용하여 온도 데이터를 습득한 후 시험편을 cutting 하여 물성분석을 통해 사용부품에 대한 재사용 가능여부의 판정기준을 제시할 수 있다.

## 제 2 장 가스터빈 1단 버킷

### 제 1 절 GE 7F-Class 가스터빈 1단 버킷<sup>(29)</sup>

국내발전설비 규모의 약 27%를 차지하고 있는 가스 터빈발전은 더 높은 효율과 환경 친화성, 그리고 전력의 부하조절용으로 1990년대 이후 꾸준한 증가 추세에 있다. 특히 국내 가스터빈설비에서 150MW 이상의 대용량 설비의 증가가 두드러지고 있는데 그 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 것이 GE 의 7F-Class 가스터빈발전소이다. 7F-Class의 국내 도입은 1992년 11월 7F 8기가 서인천 복합화력에 완공된 이래 신인천 복합에 8기, 부산 복합 8기 등 한전발전자회사에 24기와 광양 POSCO 에 2기, 광양 K-Power에 2기 등 민자발전회사에 4기 등 총 28기가 상업 운전되고 있다. 7F-Class 은 7F→7FA→7FA+→7FA+e 로 모델의 변천을 가져왔으며, 이것은 가스터빈의 효율 증가를 위해TIT(Turbine Inlet Temperature) 온도가 7F가 1,260℃에서7FA+e 는 1,327℃로 상승을 가져왔다. 이러한 온도 상승은 부품 손상변화와 이를 개선하기 위한 터빈 모델 개선을 가져왔다.

가스터빈 블레이드 재질은 주로 많이 사용되고 있는 Ni계 초합금인 IN738로서 1970년초 산업용 가스터빈 블레이드에 처음으로 소개되어졌으며, 크리프 파괴강도와 부식저항의 개선으로 현재까지 산업용 가스터빈 재질로서 폭 넓게 사용되어지고 있다. 그리고 최근에 많이 사용되어지고 있는 또 다른 Ni계 초합금인 GTD-111 재질은 1970년대에 설계되었으며, 1980년대에 가스터빈 1단 블레이드에 최초로 적용되어 사용되었다. 얼마 후 고온에서 크리프 강도가 훨씬 더 좋은 GTD-111DS (Directionally Solidification) 재질이 1984년과 1990년대에 소개되어 블레이드에 적용되었다. 미국의 가스터빈 제조사인 GE는 2000년부터 신규 가스터빈 블레이드 재질로서 1970년 초에 개발하여 사용된 IN738 재질을 점차적으로 GTD-111DS 재질로 교체 제작하여 사용하기 시작하였다. GTD-111DS 재질의 블레이드는 equiaxed GTD-111보다 10배가 넘는 열피로 또는 변형 조절능력을 가지고 있으며, 충격강도가 33% 이상 향상되었다. Equiaxed GTD-111은 IN738LC 보다 크리프 성질이 35°F(20℃) 개선되었으며, 저주기 피로강도 (L.C.F) 또한 훨씬 우수하다. IN738LC 역시 고온 부식저항 및 내구성을 증가시키기 위하여 우수한 결합체를 지닌 초합금

중의 하나이다. 다음 Fig. 1-1은 GE사에서 사용한 가스터빈 블레이드 재질의 변천을 보여주고 있다.<sup>(27)</sup>

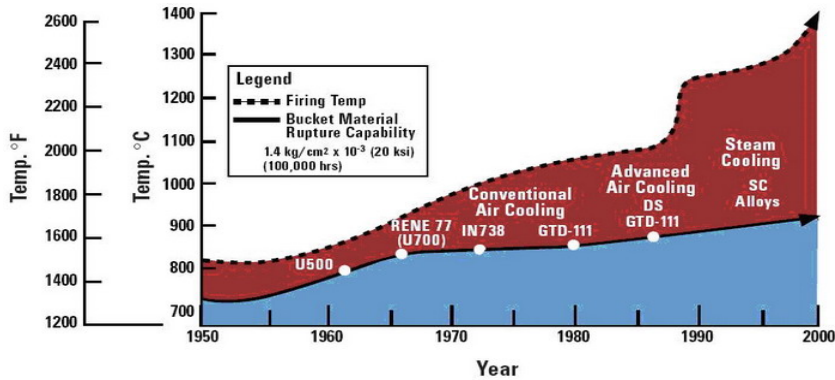


Fig. 1-1 Blade material trend used by GE

그리고 1단 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% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>)재료를 이용한 최종코팅(탑코팅)등 2개층 이상으로 구성되어 있으며 이러한 TBC System의 내구성은 모재, 본드코팅 및 탑코팅 3개층 간의 결합과 상호작용에 의존하게 된다.

### 가. 버킷의 운전주기

버킷은 약 1 주기운전 조건인 24,000시간 후 정기검사를 수행하게 되어있는데 정비 시 정비절차에 따라 입고검사, 스트리핑(Stripping) 및 비파괴 검사 등과 같은 순으로 정비하게 된다. 이와 같은 1 주기는 제작사 관련문서(GER-3620K)에서 권고하는 정비주기(HGPI : Hot Gas Pass Inspection Interval)를 말하는 것으로 일반적으로 등가운전시간(EOH : Equivalent Operation Hour)을 말하고 있다. 다음 Table 1-1은 제작사에서 권고하는 가스터빈주요부품의 정비 및 교체시기를 나타내고 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			

## 나. 고장사례

### (1) 가스터빈 주요부품 손상유형

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. 손상유형(Failure Mode)은 다음 Fig. 1-2와 같다. 처음의 5가지 유형은 터빈의 운전조건과 관계있으며 버킷의 재료 특성에 영향을 미친다. 보통 각 세트로부터 1개씩의 버킷을 뽑아 파괴시험을 수행하기도 하는데 이 결과를 근거로 버킷의 계속 사용 여부를 판단할 수 있다. 또한 버킷의 재생 가능성 및 용접성과 정비방법 그리고 운전에 대한 권고사항도 역시 결정할 수 있다.<sup>(28)</sup>

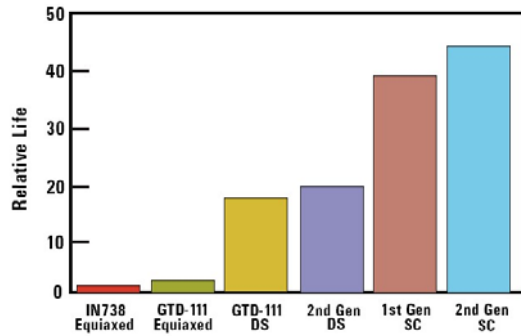


Fig. 1-2 Bucket alloys - LCF life

(2) 버킷의 손상유형

GE 7FA형 가스터빈 버킷에 발생하는 일반적인 bucket 손상유형을 정리하면 Fig. 1-3 과 같다. 고온, 고압의 연소가스에 직접적으로 노출되어 있는 Airfoil 및 Platform 에 손상이 집중적으로 발생하는 것을 볼 수가 있다. Vane에 형성된 crack 손상이 가지고 있는 잠재적인 설비에 대한 위험도는 비교적 높지 않지만, Bucket에 발생 된 crack은 설비에 대한 위험도가 상당히 높으므로 버킷의 손상을 비파괴 검사를 이용해 철저히 진단 및 평가하는 것은 중요하다.<sup>(30)</sup>

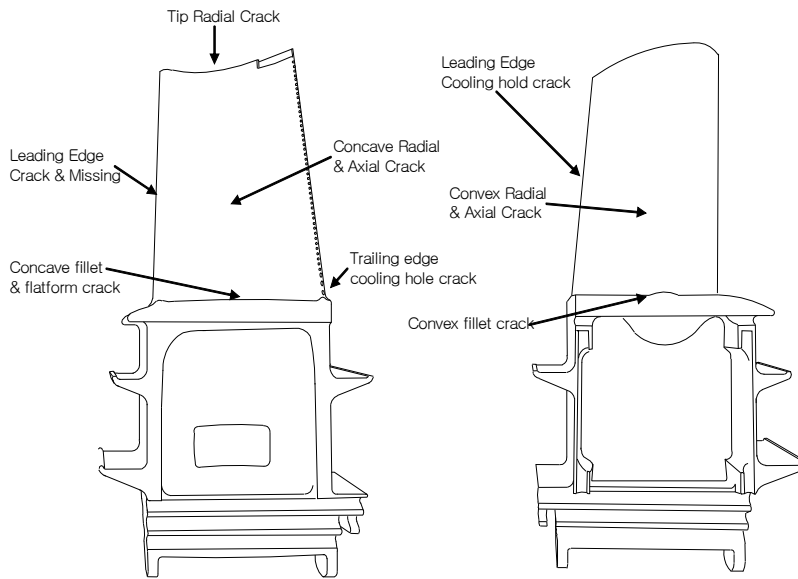
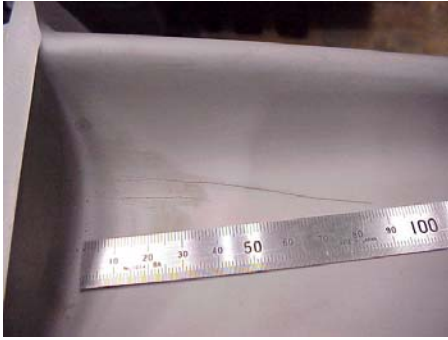
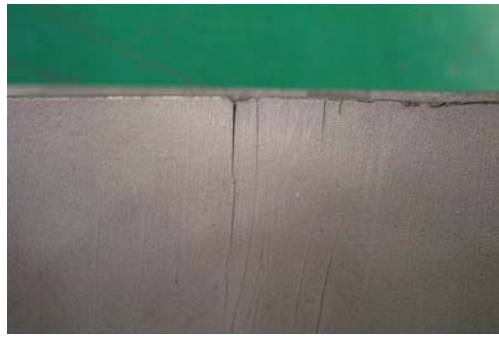


Fig. 1-3 Failure mode of bucket on gas turbine



(a) Concave crack  
(MS7001FA 1st stage bucket)



(b) tip radial crack  
(MS7001FA 1st stage bucket)



(c) Convex crack  
(MS7001FA +e 1st stage bucket)



(d) Concave flatform crack  
(MS7001FA+e 1st stage bucket)



(e) Leading edge cooling hole crack  
(MS7001FA+e 1st stage bucket)



(f) Trailing edge cooling hold crack  
(MS7001FA 1st stage bucket)

Fig. 1-4 Failure case of 7FA 1st stage bucket on gas turbine

# 제 3 장 열화상계측 및 분석

## 제 1 절 열화상 계측 시스템

### 1. 열측정 이론

적외선 열화상(Infrared Thermography)은 열복사로 피사체에서 방사되는 적외선 영역을 열화상 카메라를 통하여 가시적인 화상을 만들어 주는 기술이다. 적외선은 가시광선보다 파장이 긴 전자기적 복사의 한 형태이며, 기타 전자기적 복사 파로는 X-레이, 자외선, 라디오파 등이 있다. 전자기적 복사는 주파수 혹은 파장에 의해 범위가 정해진다. 전자기 스펙트럼은 대역(band)이라고 부르는 많은 파장의 영역으로 나눌 수 있다. 적외선 열화상 카메라는 Fig. 2-1, Fig. 2-2에 나타낸 바와 같이  $2\mu\text{m}\sim 13\mu\text{m}$  대역을 사용한다. 여기서 단파(SW:Short wave) 영역은  $2\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 의 대역에서 복사가 검출될 수 있는 범위를 말하며, 장파(LW:Long wave) 영역은  $8\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}$ 의 대역의 복사가 검출될 수 있다. 그리고 중간에  $5\mu\text{m}\sim 8\mu\text{m}$ 의 대역에서는 대기에서의 낮은 투과율에 의해 전달률이 0%를 나타내고 있으므로 적외선 검출이 불가능하다. 또한 SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다.<sup>(25)</sup>

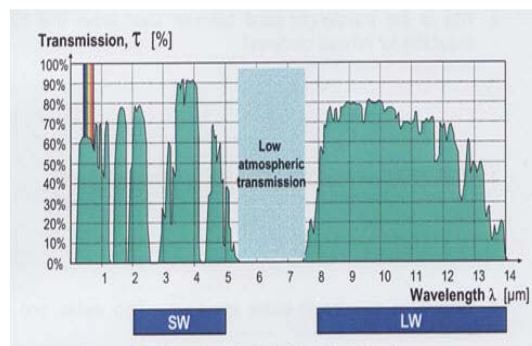
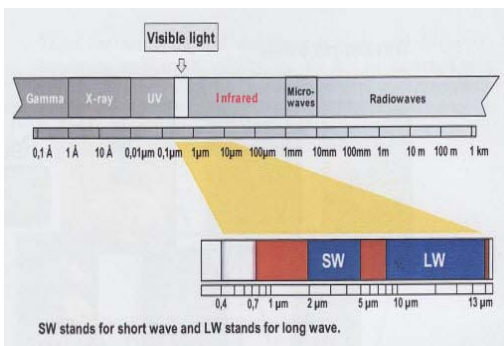
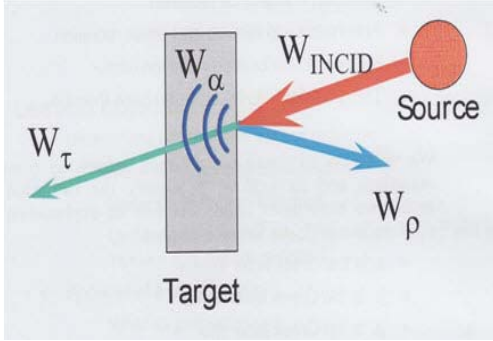


Fig. 2-1 The electromagnetic spectrum Fig. 2-2 Atmospheric transmission in different wavelength bands



### 가. 적외선 열화상 측정 원리

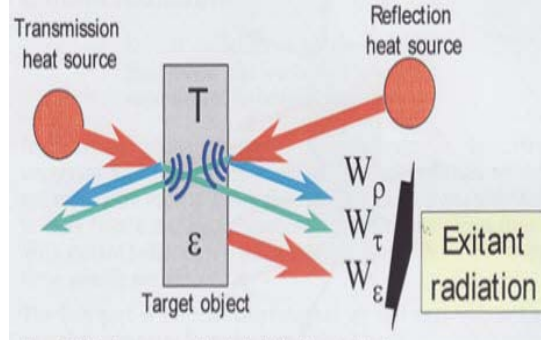
본 과제에 사용된 적외선 카메라는 AGEMA사에서 제작한 Thermovision 900 SE/TE 기종이며 빛이 물체에 방사되어 나오는 각종 파장 중에서 적외선 부분만을 검출해 내어 온도분포를 측정한다. 복사 에너지는 Fig. 2-3, Fig. 2-4에서 나타난 것과 같이 Incident 복사와 Exitan 복사로 세분화 할 수 있다.



$$W_{\alpha} + W_{\rho} + W_{\tau} = W_{\text{INCID}} = 100\%$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Fig. 2-3 Incident radiation



$$W_{\epsilon} + W_{\rho} + W_{\tau} = W_{\text{EXIT}} = 100\%$$

$$\epsilon + \rho + \tau = 1$$

Fig. 2-4 Exitan radiation

Incident 복사란 물체의 주위 사물로부터 물체에 부딪히는 모든 복사에너지를 말하는 것으로 흡수율( $\alpha$ ) + 반사율( $\rho$ ) + 투과율( $\tau$ ) = 1로 나타낼 수 있으며 Exitan 복사는 원래의 열원에 상관없이 물체의 표면을 떠나는 모든 복사 에너지를 말하며 방출률( $\epsilon$ ) + 반사율( $\rho$ ) + 투과율( $\tau$ ) = 1로 나타낼 수 있다. 즉,  $\alpha = \epsilon$  이므로 물체가 Incident 복사에너지를 흡수하는 용량 또는 능력은 그 물체 자신이 복사에너지를 방출하는 용량과 언제나 같음을 알 수 있다.<sup>(26)</sup>

그리고 어떤 파장이라도 그것에 부딪히는 모든 복사선을 흡수하는 물체를 흑체라고 정의하는데, 이는 모든 빛을 똑같이 방출시킬 수 있다는 것이며 이 온도 검출은 흑체(Blackbody)에 가까운 대상체를 제작하여 이 시편을 기준으로 하여 보정된 값으로 나타낸다. 여기서 중요하게 작용하는 요인은 각각의 물체와 온도, 거리에 따라 달라지는 방사율인데 이 방사율값의 차이에 따라서 온도를 측정하는 것이다.

흑체에 대해,

$$W = \sigma T^4 \text{ W/m}^2 \tag{2-1}$$

식 (2-1)에서,  $\sigma$ 는 스테판 볼츠만(stephan-Boltzmann)상수 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^2$ )이

다.

방사율(Emissivity)이란 복사열이 완전히 흡수되는 흑체의 복사강도를 기술한 플랑크(Planck)법칙에 의해 물체로부터 방출되는 전체 에너지는 스테판 볼츠만 법칙으로 다음과 같다.

$$\text{Stephan - Boltzmann Law} : E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2-2)$$

같은 온도 같은 파장에서 Black body에 의해 방출되는 복사에너지에 대한 Real body에 의해 방출되는 복사에너지의 비율로서 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{W_{RB}}{W_{BB}} \quad , \quad W_{BB} = \frac{W_{RB}}{\epsilon} = T \quad (2-3)$$

또한 적외선 열화상 카메라는 외부의 광원에서부터 대상 물체에 반사되어진 적외선 파장을 검출하여 Stefan-Boltzmann Law에 의한 온도와 파장의 관계식을 이용하여 적외선 detector로부터 검출된 적외선 파장을 온도의 함수로 나타내어 온도의 고저를 화상으로 보여주는 것이다.

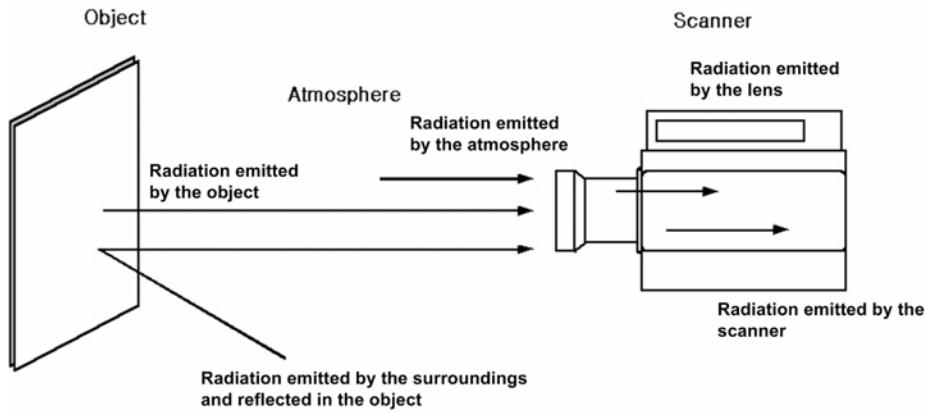


Fig. 2-5 Radiation contributions to the general measurement situation

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 3-1에서와 같이 표현된다.

여기에서 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.

$$I_m = I(T_{obj}) \times \tau \times \epsilon + \tau(1 - \epsilon) \times I(T_{amb}) + (1 - \tau) \times I(T_{atm}) \quad (2-4)$$

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

식 2-4에서  $I(T)$ 는 온도 T일 때 흑체로부터 방사량에 비례하는 신호 값으로서 물체, 대기, 주변에 관한 함수이다. 식 2-4은 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 블랙바디온도와 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 플랑크법칙과 스캐너 및 필터의 분광 응답을 이용하여 계산하지만 더 많은 정확한 결과는 측정에 의해서 얻을 수 있다. 이는 많은 블랙바디 소스가 스캐너로 측정되었을 때 측정 중에 이루어 질 수 있는 것이다.

Thermovision 900에 사용되어진 교정기능은 일부 플랑크법칙과 일부 경험적인 것에 의존한다.

$$I = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T}\right) - F} \quad (2-5)$$

식 2-5에서  $I$ 는 온도 값이고  $R$ 은 대응인자,  $B$ 는 분광인자,  $F$ 는 모형인자며,  $T$ 는 물체의 온도이며 스캐너의 출력 신호는 입사된 방사에너지와 비례한다는 가정을 갖는다.

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

$$I_s = \frac{U}{1 - (U \times L)} \quad (2-6)$$

식 2-6에서  $U$ 는 스캐너 안에 A/D 변환기로부터의 비디오 신호이며  $L$ 은 비선형 상수,  $I_s$ 는 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 소프트웨어에서 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 1에 가깝게 표시된다. 반사된 주위온도에서 불투명한 피사체의 방사요인은  $\rho = 1 - \epsilon$ 로서 얻을 수 있다. 따라서 낮은 방사 요인은 피사체로부터의 방사율이 같은 온도의 흑체의 그것보다 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 피사체에서의 측정은 적외선 복사를 잃게 할 것이다. 이 대기 희박 효과는 측정 공식에 의해 보상된다. 측정 공식은 피사체와 스펙트럼 안의 복사에 의한 앞 렌즈사이의 대기 투과율을 의미하는 상수  $\tau$ 를 사용한다. 이  $\tau$ 는 피사체 거리, 대기 온도, 상대습도의 기능으로써  $\tau$ 가 계산된 소프트웨어로 계산 할 수 있고,  $\tau$ 값이 측정에 의해 또는

Lowtran과 같은 고기능 대기용 모델로부터 알려 질 수 있다면 직접 입력에 의해 계산될 수도 있다. 만약 오퍼레이터가  $\tau$ 값을 입력한다면 추정된  $\tau$ 는 소프트웨어에 의해 계산된 값을 무시 할 것이다. 효과적인 대기 투과율을 계산하기 위해서 소프트웨어가 사용한 식은 2-7과 같이 경험적이다.

$$\tau = X \times \exp(-\sqrt{d}(\alpha_1 + \beta_1 \sqrt{W})) + (1 - X) \times \exp(-\sqrt{d}(\alpha_2 + \beta_2 \sqrt{W})) \quad (2-7)$$

식 2-7에서  $\tau$ 는 효과적인 대기 투과율이고,  $X$ 는 무게 요인,  $\alpha_1$ 와  $\alpha_2$ 는 감쇠 계수,  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 는 수증기와 관련된 감쇠 계수,  $d$ 는 물체와 스캐너 렌즈 앞쪽 사이의 거리,  $W$ 는 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 값을 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 유효 대기 투과율의 계산에 사용된다.

$$I'_o = \epsilon_o \tau_o I_o + \tau_o (1 - \epsilon_o) I_\alpha + (1 - \tau_o) I_{atm} \quad (2-8)$$

$$I_o = \frac{R}{e^{b/T_o - F}} \quad (2-9)$$

식 2-8에서  $I_o$ 는 물체 방사를 위한 디지털 값이고,  $I'_o$ 는 스캐너로부터 받아들인

총 방사량(디지털 값에서),  $R, B, F$ 는 보정 매개변수,  $T_o$ 는 물체의 온도,  $\epsilon_o$ 는 물체의 방사율,  $\tau_o$ 는 물체의 투과율,  $I_a$ 은 (a)에 의하여 변환된 주변의 온도,  $I_{atm}$ 은 식 2-9에 의하여 변환된 대기의 온도이며, 투과율  $\tau$ 는 계산된 투과율 공식에 의해 계산된다. 공식에서  $W$  인자는 다음 식에 의해 계산된다.

$$W = \text{RelHum} \times \text{precipitable water content} \quad (2-10)$$

Water content는 다음 식에서 표현할 수 있다.

$$\text{PrecWater} = \exp(k1 + k2 \times T + k3 \times T^2 + k4 \times T^3) \quad (2-11)$$

$$W = \text{RelHum} \times \exp(k1 + k2 \times T + k3 \times T^2 + k4 \times T^3) \quad (2-12)$$

식 2-11과 식 2-12에서  $k1 = 1.5587$ ,  $k2 = 6.939E-2$ ,  $k3 = -2.7816E-4$ ,  $k4 = 6.8455E-7$ 의 값을 갖는다.<sup>(1)</sup>

적외선 열화상 테크닉은 기본적인 Pulse 적외선 열화상 테크닉과 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 금속 내부에서 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.

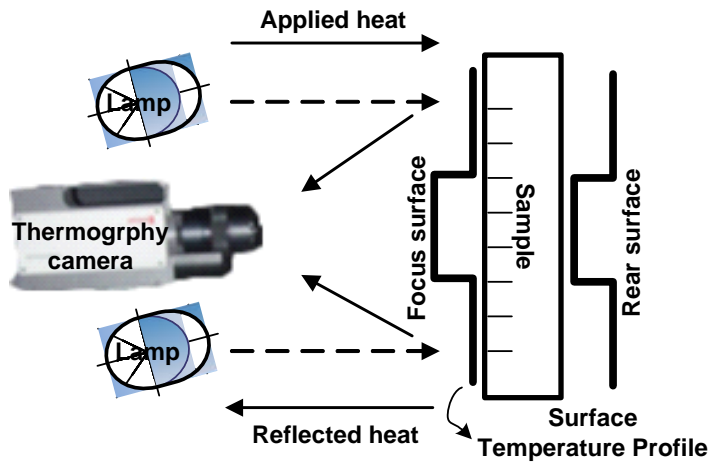


Fig. 2-6 Infrared thermography (Pulse technique)

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 점 중에서 단지 1개의 점에 대해서만 모니터링이 가능하다.<sup>(13)(14)</sup>

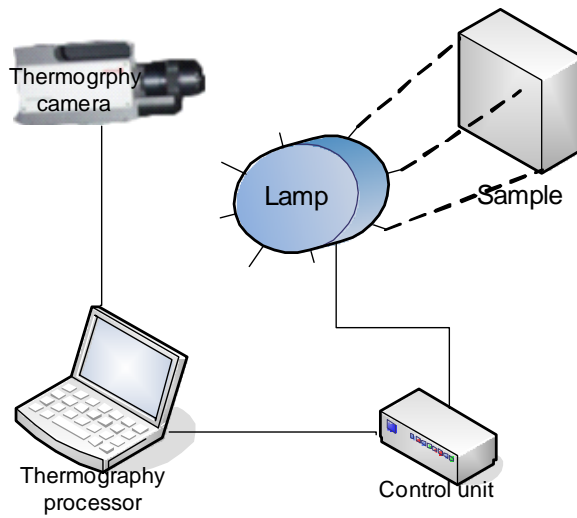


Fig. 2-7 Infrared thermography (Lock-in Technique)

## 2. 적외선 열화상 계측 시스템 구성

본 연구에 사용한 적외선 열화상 카메라 Thermovision 900 system은 AGEMA 적외선 SYSTEM AB에서 생산한 적외선 SCANNING SYSTEM을 사용하였다. 이중 채널 마이크로프로세서를 기초로 하는 제어기 부분에서는 2개의 68020 프로세서가 사용되고 32비트 VME버스, 2개의 16비트 IR버스가 사용된다. 스캐너의 냉각방식은 열 전 기적이며 검출형태는 2개의 스프리트, 직렬 스캐닝, 2~5.4 마이크로 스펙트럼 응답을 보이며 온도 범위는  $-10^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$  (고온 필터 사용 시  $2,000^{\circ}\text{C}$ 까지 검출 가능), 민감도는  $30^{\circ}\text{C}$ 에서  $0.1^{\circ}\text{C}$ , 공간 해상도는 140원소/Line(50%변조), IR라인 주파수 3.5kHz, 심플/라인 204를 갖추고 있다. Fig. 2-8은 적외선 열화상 카메라 Thermovision 900 system의 전체적인 모습과 이동성을 위해 노트북컴퓨터와 연결할 수 있는 Research package 900의 구성도를 나타낸다.<sup>(1)</sup>



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

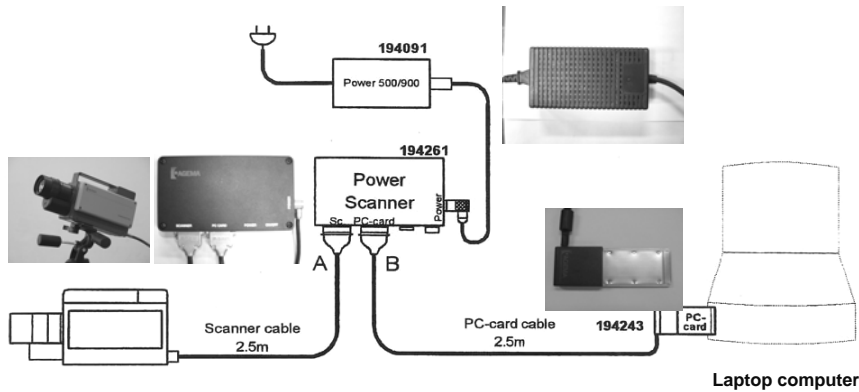


Fig. 2-8 Component of thermovision 900 system



## 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. 2-9는 시스템 제어기의 신호 처리 방식과 제어 이동 경로를 나타내었다.

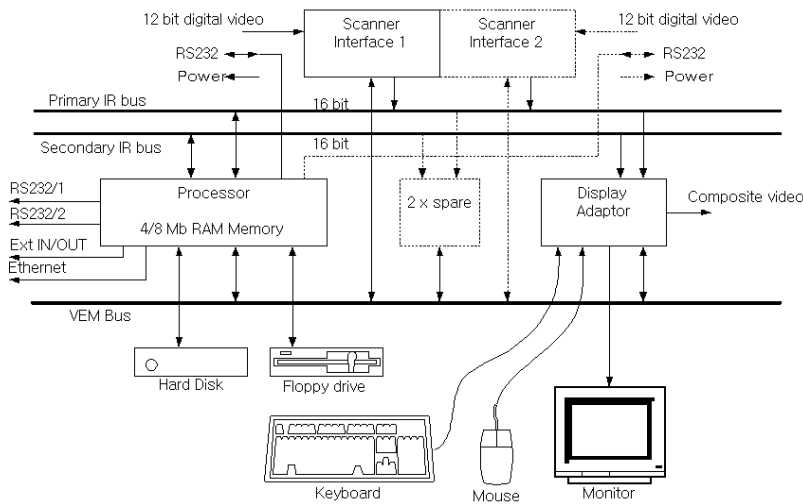


Fig. 2-9 Schematic diagram of system controller

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.<sup>(1)</sup>

## 나. 스캐너

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

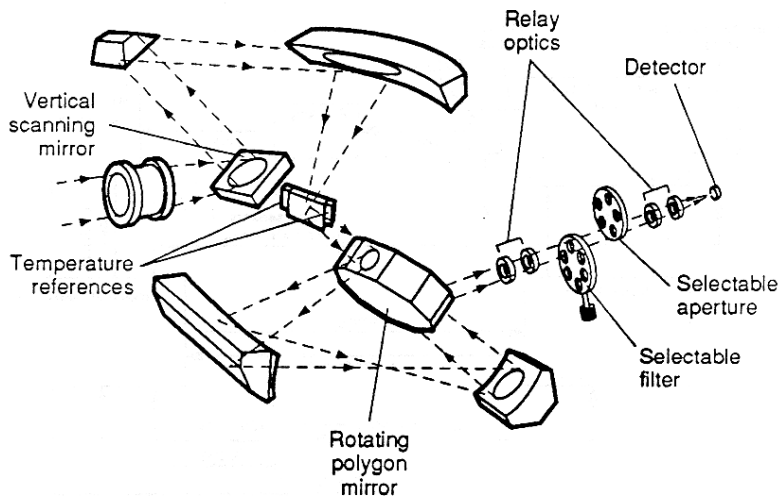


Fig. 2-10 Exploded view of the scanner optical path

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 설치 함으로 통과한다. 검출기 출력은 전치중폭기를 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. 2-11에서는 스캐너의 신호 처리와 제어 경로를 나타내었다.<sup>(1)</sup>

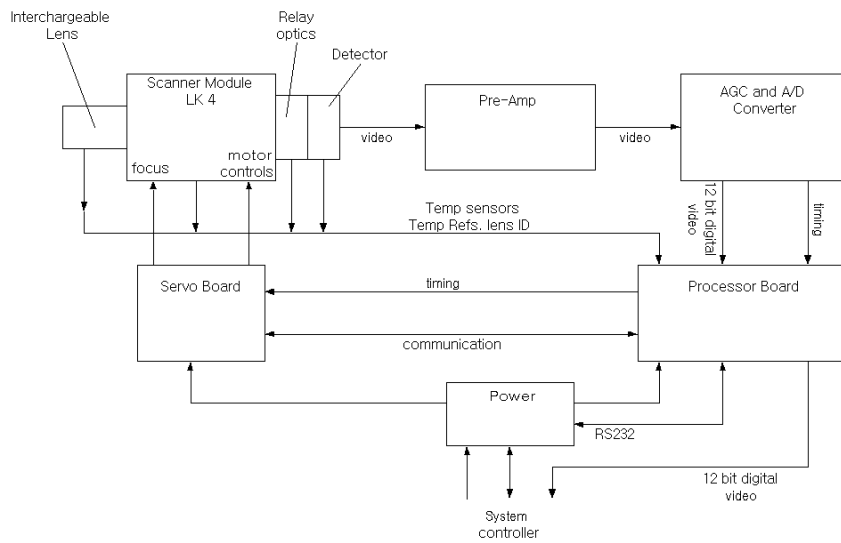


Fig. 2-11 Schematic diagram of scanner

## 제 2 절 적외선 열화상 계측 실험 방법

### 1. Hot air를 이용한 적외선 열화상 계측

#### 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 구성하였다. 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. Fgi. 2-12과 Fgi. 2-13은 FEM 해석 조건 및 결과이다.

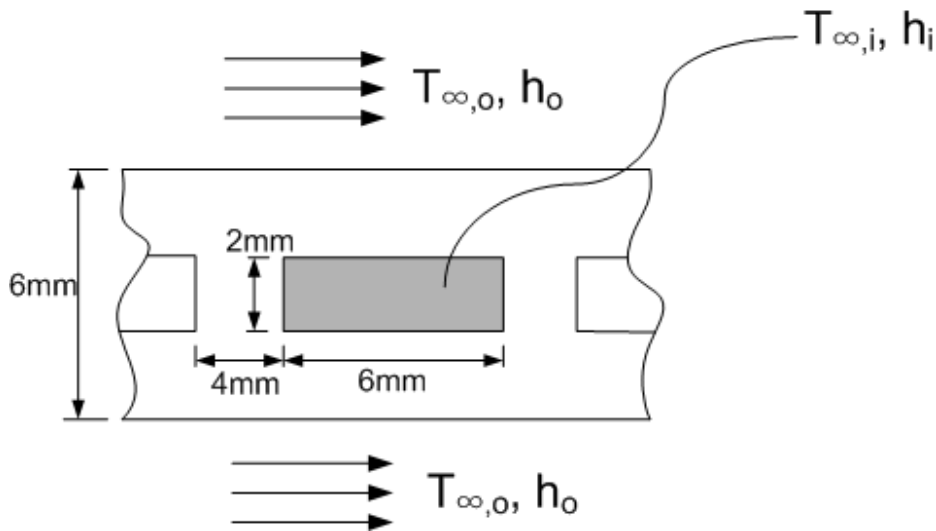


Fig. 2-12 FEM analysis condition by using ANSYS program.

단 여기서, Thermal conductivity of the blade,  $K_{XX}=25W/(m-k)$

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

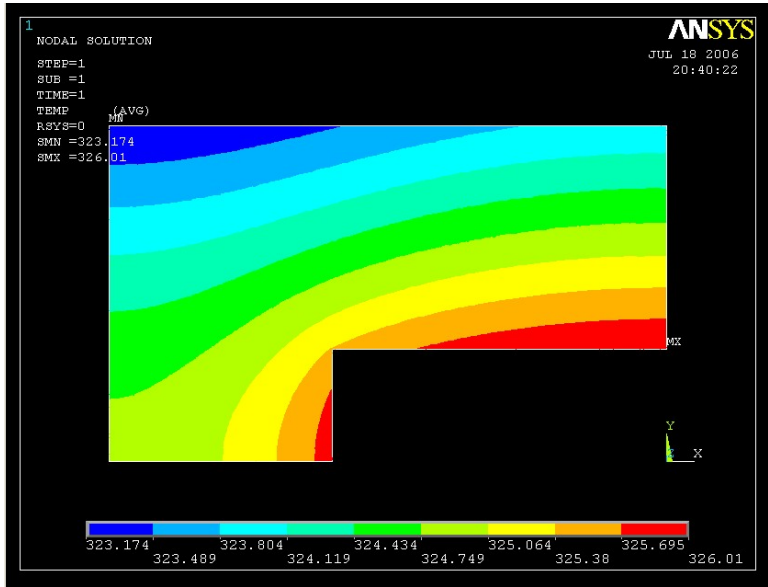


Fig. 2-13 FEM analysis by using ANSYS program.

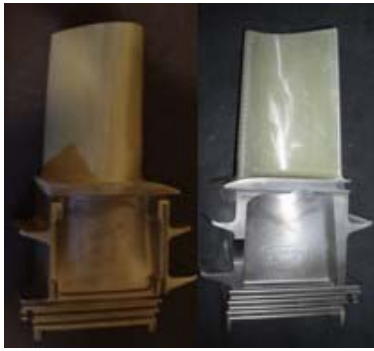
열전도해석 결과 Fig. 2-13에서 보면 알 수 있듯이 약 200℃의 Hot air로 약 10분정도 가열하였을 때 버킷의 표면부 온도가 40℃이상이 되어 IR장비로 촬영하는데 문제가 없었다. 현 IR 장비는 30℃에서 0.1℃까지의 분해능을 가지고 있다. 이에 30℃보다 10℃ 추가로 가열하여 보다 나은 영상을 얻는데 주력하였다.

#### 나. 실험 대상 버킷 및 실험 장치 구성

현재는 7FA에서 7FA+e형으로 변화됨에 따라 실험 시편의 대상을 현재 우리나라 발전기에 주로 사용되고 있으며, 앞으로 변화될 버킷인 7FA+e형 타입으로 선정하여 실험을 하였다.

Fig. 2-14는 버킷의 시험편으로 7FA+e형 타입의 신품과 1회 사용품, 1차 재생정비품, 1회 사용 후 스크립트된 제품, 그리고 폐기품을 대상으로 실험을 진행하였다.

Fig. 2-15은 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.



(a) NEW bucket



(b) 1th refreshing equipment bucket



(c) 1th times used bucket



(d) Script done bucket

Fig. 2-14 Actuality image of bucket

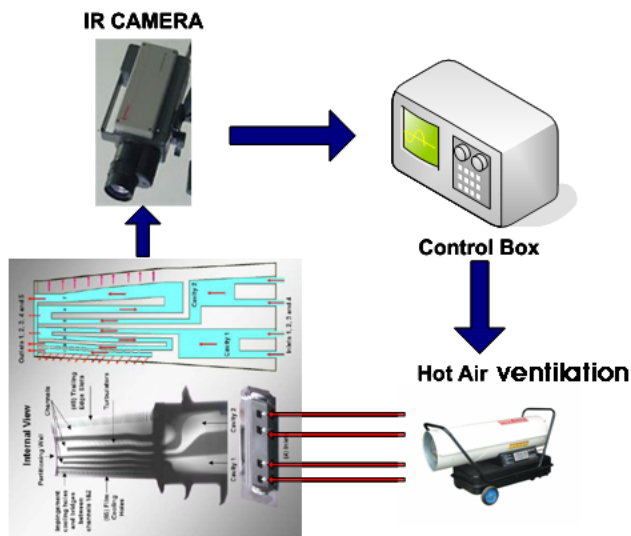


Fig. 2-15 Diagram of Heating System using Hot Air



Fig. 2-16 Actual experiment equipment set

## 2. Halogen lamp를 이용한 적외선 열화상 계측

### 가. 버킷 표면 미세 크랙 검출

버킷의 사용품은 2회의 재생 과정을 거친다. 이러한 도중 이전 단계의 코팅을 전부 제거하는 스트립트 과정을 거치면, GTD-111DS의 모재만의 상태를 분석할 수 있다. 실험 대상 시편은 재생 정비 중에 크랙이 발생되어 폐기 처분된 버킷을 실험대상으로 하였다. 아래의 그림에서 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.

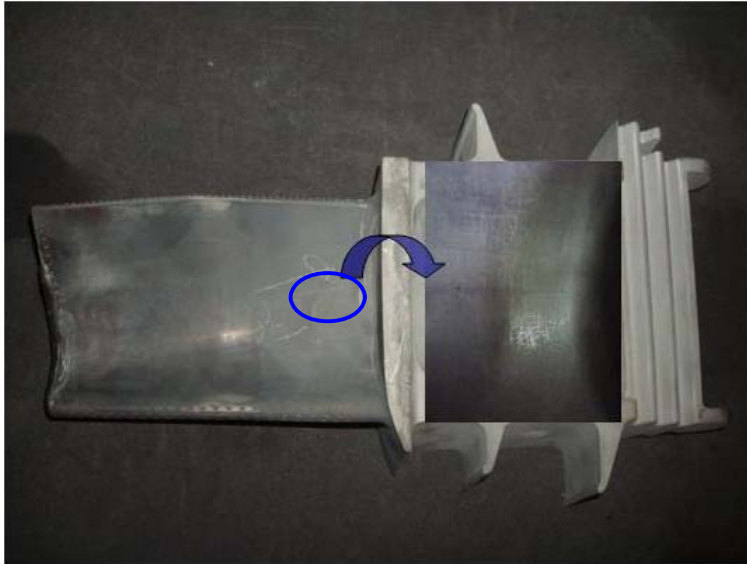


Fig. 2-17 Actual image of bucket crack

### 나. 버킷 코팅면 접착 상태 분석실험

코팅층의 사용 주기에 따른 코팅층의 열적 부하 변동에 대하여 연구를 진행하였다. 즉, 실험을 진행한 부분은 코팅면과 모재와의 접착 상태에 관한 연구이다. 본 연구를 위하여, 폐기 버킷에 인공적으로 코팅면을 박리하여 비교 샘플을 제작하였다. 아래의 Fig. 2-18,19는 비교샘플의 인공 박리 위치와 크기이다.

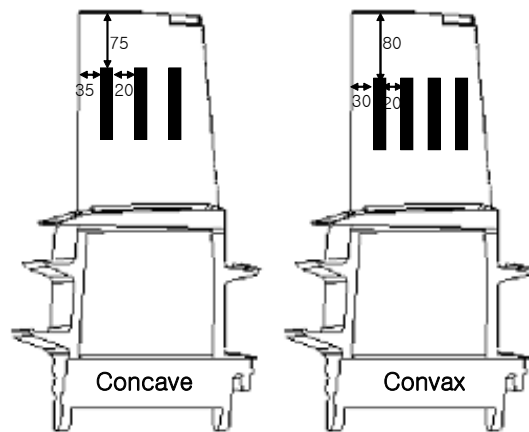


Fig. 2-18 Defect sample(material + bond masking)



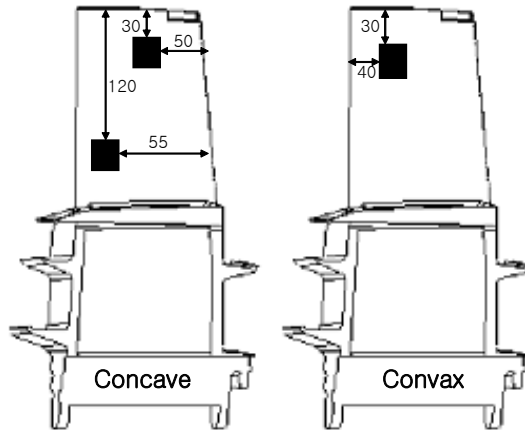


Fig. 2-19 Defect sample(bond + top masking)

#### 다. Halogen lamp를 이용한 버킷 크랙 검출 실험

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 많은 부분에 한정되어서만 침투탐상검사가 이루어지고 있다. 이 방법 또한 검사에 소요되는 시간의 낭비가 심각한 실정이다.

Fig. 2-20는 촬영하고자 하는 시편의 위치이다. 7FA G/T 1단 블레이드는 안쪽 중간 지점에서 주로 크랙이 발생하는 상황이다. 발생하는 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 발생하는 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 코팅층

는 2회의 재생 정비를 거치면서 재코팅을 하고 있다. 하지만 모재에 발생하는 크랙에 있어서는 정비가 불가능 함으로 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.

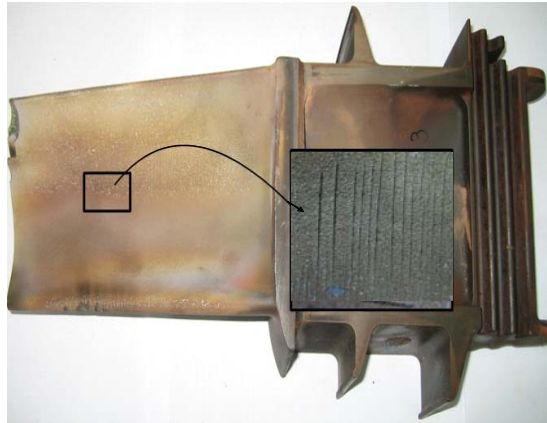


Fig. 2-20 Position of specimens to measure

Fig. 2-21은 할로젠 램프를 이용한 실험을 하기 위한 실험 장비이다. 크랙 검출의 타당성을 검토하기 위한 기초 실험인 관계로 저용량의 할로젠 램프를 사용하였다.



Fig. 2-21 Examination equipment composition

현재 재생 주기가 끝난 7FA G/T 블레이드를 분석해 보면 외부는 산화에 의한 손상이 발생한 반면에 내부 쪽은 크랙이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 크랙이 진전 사항이 어디 까지 인지가 이번 실험의 중요한 목표이다.

이에 크랙 부분을 표면에서부터 가열하여 열의 진행 사항을 보는 것이 관건이다. 적외선 열화상 카메라로 측정한 열 분포 그래프와 크랙 부분을 와이어 컷팅한 부분을 서로 비교하여 크랙의 모재 침투 진전 사항을 체크하는 것이다.

### 라. 재생주기에 대한 고찰

Hot air Heating System 을 열원으로 사용하여 사용주기에 따른 코팅층 열적 부하 변동 data를 습득하였고 halogen lamp를 사용하여 크랙 검출의 타당성을 알아보았다. 다음으로 수행한 실험은 사용품, 재생품, 폐품을 대상으로 halogen lamp를 이용하여 사용품에 대한 재사용가능 여부의 판정기준을 제시하고, 현재 24,000시간 후 재생주기에 대한 대안을 제시하고자 한다.

다음 Fig. 2-22은 실험에 사용한 시편으로 사용품, 재생품, 폐품을 나타내고 있다.



(a) Used bucket

(b) Useless bucket



(c) Refreshing equipment bucket

Fig. 2-22 Actuality image of bucket

(1) Reflection method(반사법)

고출력의 할로젠램프를 열원으로 사용한 실험 모습을 Fig. 2-23 에 나타내었다. 실험 Heating System 장비 구성으로 1Kw할로젠램프 2개를 사용하였고, 램프의 출력을 조절 할 수 있는 컨트롤 박스로 구성되어있으며, 시편과 램프와의 거리에 변화를 주어 실험을 수행하였다. 300mm, 600mm, 900mm로 세 번의 실험을 한 결과 온도 데이터 값은 거의 비슷한 경향을 나타내었다.

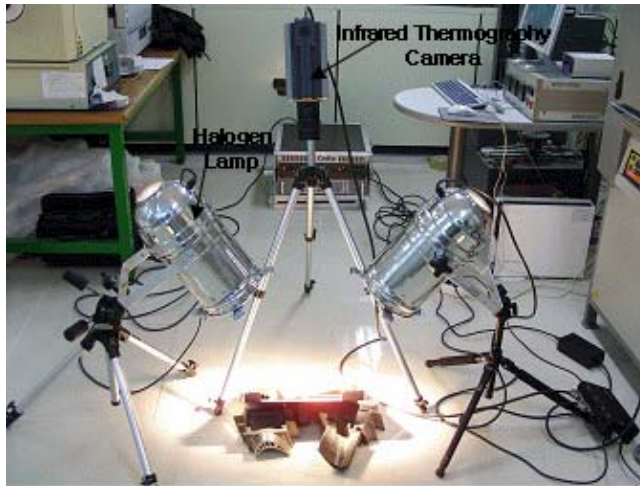


Fig. 2-23 Experiment equipment using halogen Lamp

1Kw 할로젠램프를 사용하여 IR카메라와 열원의 방향이 같은 Reflection method 으로 3분간 광원 및 열원을 공급하고 3분간 할로젠램프를 off 시킨 상태에서 자연냉각시켰으며, 버킷의 concave면과, convex면에서 각각 블레이드 끝단에서 길이방향으로 10%, 60%, 90% 부분 15개의 spot을 대상으로 시험편 종류에 따른 시간별 온도 데이터를 취득 하였다.

(2) Transmission method(투과법)

시편 표면의 상태에 따른 각기 다른 방사율 값을 설정해주지 못하는 문제점을 해결하기 위해 시편 뒤에서 열원을 주어 시편을 가열하는 적외선 열화상 기법 중에 하나인 Transmission method 을 사용하여 실험을 수행하였다. 실험의 구성도는 다음 Fig. 2-24 에 나타난 것과 같다.



Fig. 2-24 Experiment equipment using halogen Lamp

위에서 수해한 시편과 동일한 시편(사용품, 재생품, 폐품)으로 할로젠 램프를 10분간 가열하고 5분간 자연 냉각시키면서 촬영하였으며, 버킷의 concave면과, convex면에서 각각 블레이드 끝단에서 길이방향으로 10%, 60%, 90% 부분 15개의 spot을 대상으로 시험편 종류에 따른 시간별 온도 데이터를 취득 하였다. Transmission method 을 사용할 때에의 방사율 결정은 자연상태의 시험편의 방사율값으로 설정해주었다.

### (3) 시편 제작

할로젠램프를 열원으로 사용하여 적외선 열화상 카메라로 측정한 각 spot의 온도데이터와 실제 시편의 각 spot에서의 상태를 비교하기 위하여 시편을 Cutting을 하여 시편을 제작하였다. 커팅하기 전의 시편 모습을 Fig. 2-25에 나타내었다. 시편 제작은 사용품, 재생품, 폐품에 대하여 버킷의 concave면과 convex면에서 각각 블레이드 끝단에서 길이방향으로 10%, 60%, 90% 부분 30개 spot 중 촬영한 열화상 이미지에서 온도 데이터 습득이 가장 용이한 부분의 spot 지점을 선정하여 Water Jet Cutting을 하였다. Fig. 2-26에 Water jet Cutting을 한 시편을 나타내었다.

블레이드 끝단에서 길이방향으로 10%, 60%, 90% 지점의 spot 중 버킷의 edge 양쪽에서 10%, 60%, 90%지점에서 각각 4개씩 와이어 커팅을 하여 시편을 확보하였다. 그 사진을 Fig. 2-27에 나타내었다.



(a) concave



(b) convex

Fig. 2-25 Bucket before cutting



Fig. 2-26 Bucket as water jet cutting

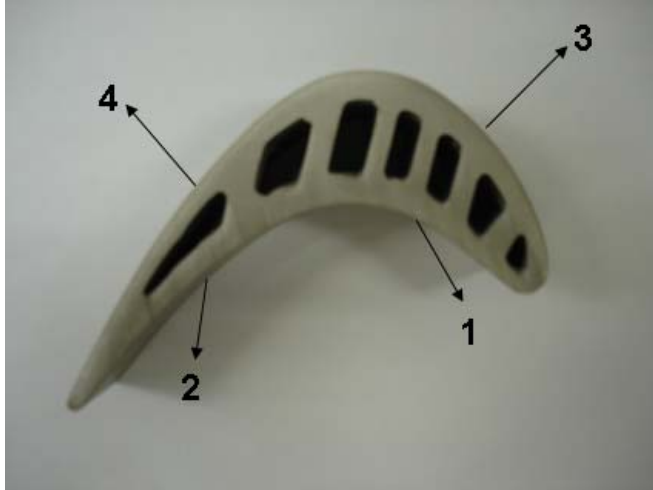


Fig. 2-27 Wire cutting point

시편은 사용품, 재생품, 폐품에서 각각 12개씩 총 36개를 준비하였으며, Sic 연마제로 #2000까지 습식연마를 하였고, 1.0 $\mu$ 까지 알루미나분말수용액( $Al_2O_3$ )을 사용하여 폴리싱 포로 정연마한 후 초음파 세척을 하여 금속현미경으로 분석을 행하였다. 다음 Fig. 2-28 는 총 36개의 시편을 나타내고 있다.



Fig. 2-28 Specimens

## 제 4 장 연구 결과 및 고찰

### 제1절 Hot air를 이용한 적외선 열화상 계측 분석

Hot Air주입을 이용한 열적외선 계측 열화상 이미지를 Fig. 3-1과 Fig. 3-2에 나타내었다. 루트부를 통한 Hot air 주입으로 가열된 버킷의 concave면과 convex면에서 각각 10%, 60%, 90% 부분 15개의 spot를 대상으로 시험편 종류에 따른 시간별 온도 분포를 구하여 Fig. 3-3 ~ Fig. 3-17에 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 경우에는 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 24,000시간 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.

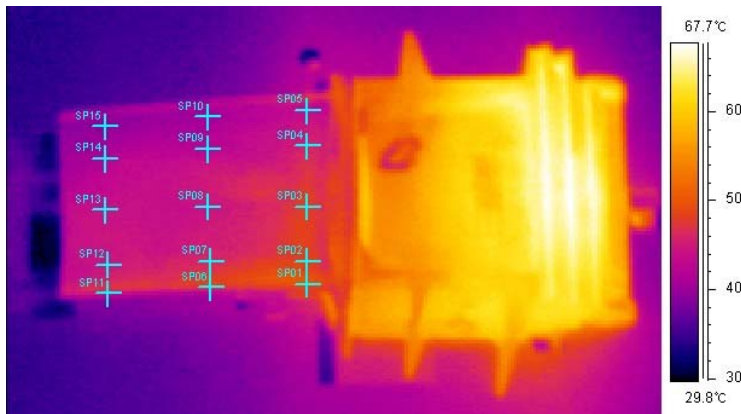


Fig. 3-1 Experiment IR image of bucket(after heating 60 min)



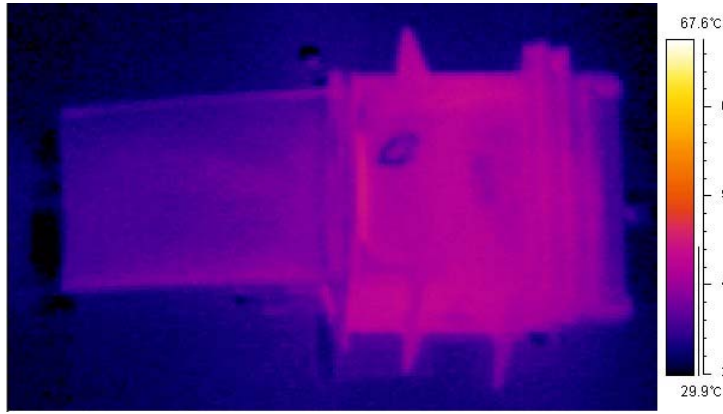


Fig. 3-2 Experiment IR image of bucket(after cooling 60 min)

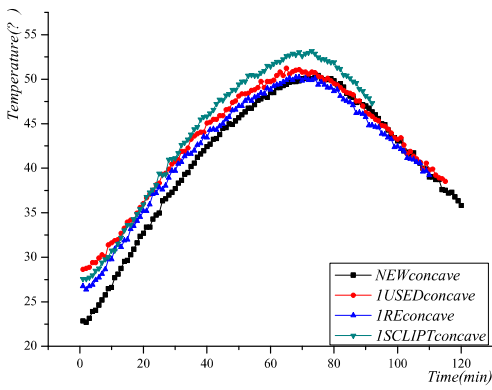


Fig. 3-3 Temp. of spot 1 by bucket

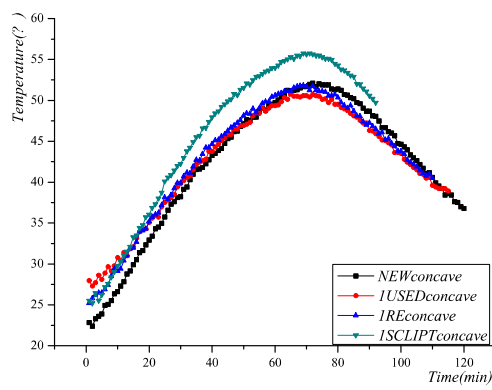


Fig. 3-4 Temp. of spot 2 by bucket

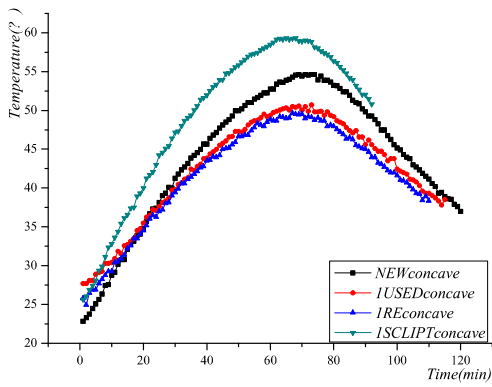


Fig. 3-5 Temp. of spot 3 by bucket

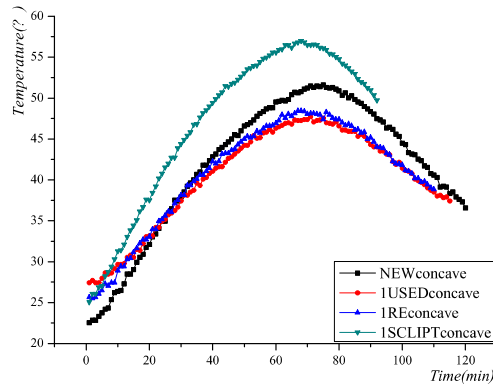


Fig. 3-6 Temp. of spot 4 by bucket

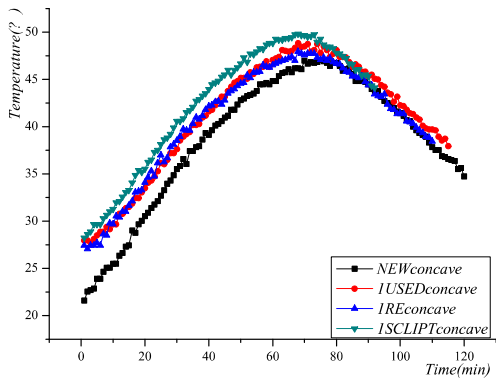


Fig. 3-7 Temp. of spot 5 by bucket

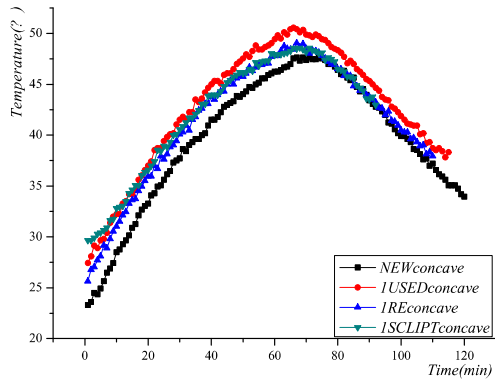


Fig. 3-8 Temp. of spot 6 by bucket

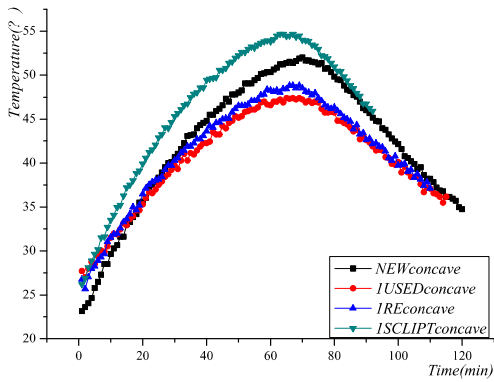


Fig. 3-9 Temp. of spot 7 by bucket

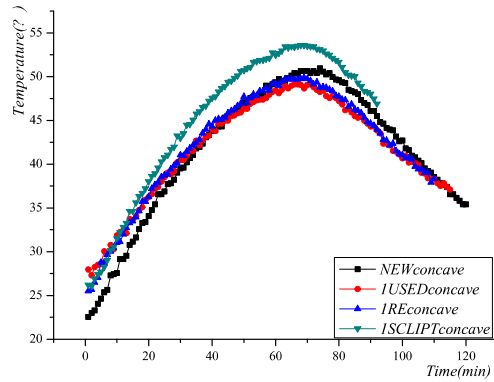


Fig. 3-10 Temp. of spot 8 by bucket

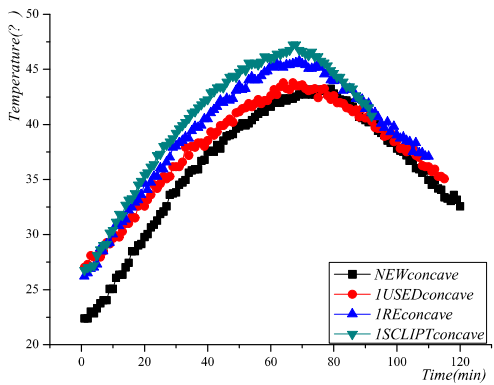


Fig. 3-11 Temp. of spot 9 by bucket

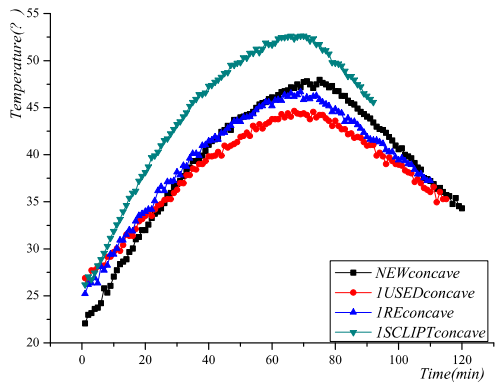


Fig. 3-12 Temp. of spot 10 by bucket

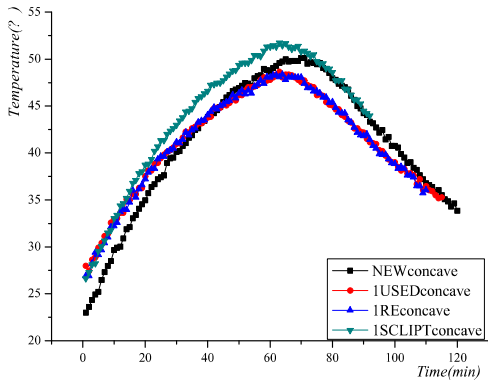


Fig. 3-13 Temp. of spot 11 by bucket

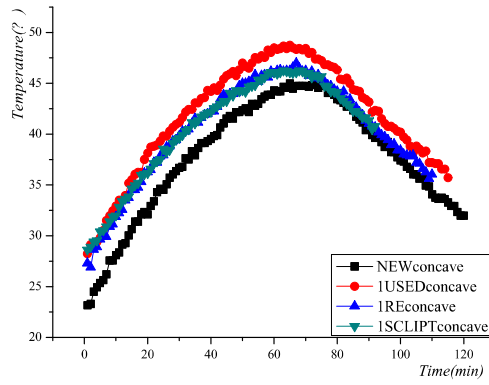


Fig. 3-14 Temp. of spot 12 by bucket

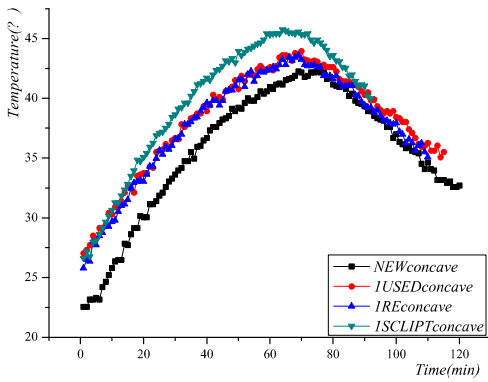


Fig. 3-15 Temp. of spot 13 by bucket

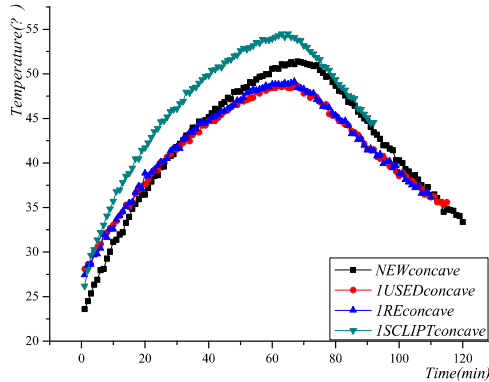


Fig. 3-16 Temp. of spot 14 by bucket

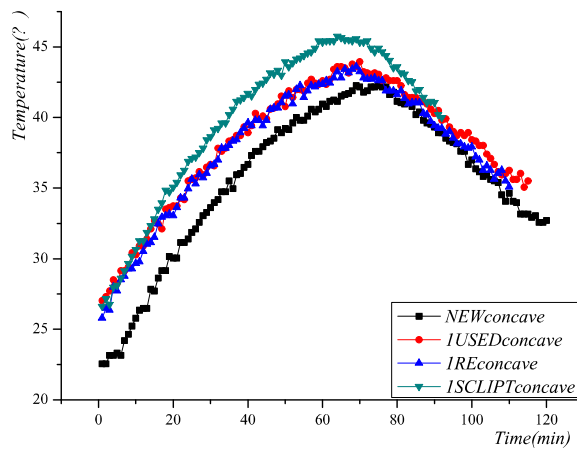


Fig. 3-17 Temp. of spot 15 by bucket

설계 제작된 hot air 주입형 heating system를 이용하여, 버킷 전수 검사를 실행하였으며, 사용 주기에 따른 코팅층 열적 부하 변동 data를 습득하였다.

연구수행결과 습득된 data에 따르면, 코팅층의 물성변화가 없는 신품의 표면 온도가 가장 낮았으며, 1차 사용품과 재생품과의 열적 부하는 거의 차이가 없었다. 단 스크립트된 시편에서의 경우에서 보면 미약하게나 코팅층이 남아있는 시편이 모재의 열적 부하 영향이 적게 나타났다.

1차 사용품의 data 중에 유심히 보아야 할 점은 사용품의 열적 부하 변동과 재생품과의 부하 변동에서의 차이가 거의 없다는 것이다. 이에 사용품의 1차 재생 정비를 생략하거나, 코팅층의 예측 수명 평가를 선정하여 사용주기를 늘릴 수 있다고 판단된다.

## 제2절 Halogen lamp를 이용한 적외선 열화상 계측 분석

### 1. 버킷 표면 미세 크랙 검출

아래의 Fig. 3-18의 영상은 루트부의 hot air 주입을 통한 가열 방식의 열 영상이다. Fig. 3-19는 할로젠 램프를 이용하여 1분간 주사하여 얻어진 열 영상이다. 아래의 그림에서 온도 데이터만을 그래프로 나타낸 것이 Fig. 3-20이다. Fig. 3-20에서 보듯이 크랙의 위치에서 온도가 약 1℃이상 증가되는 것을 볼 수 있었다.

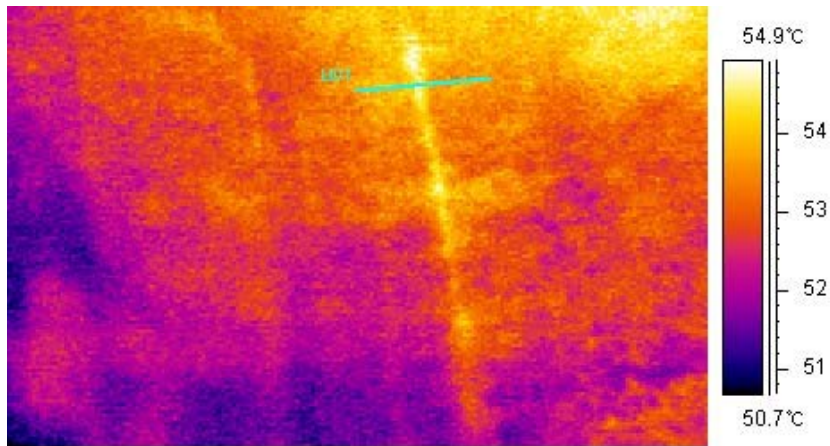


Fig. 3-18 IR image of bucket crack(heating system)

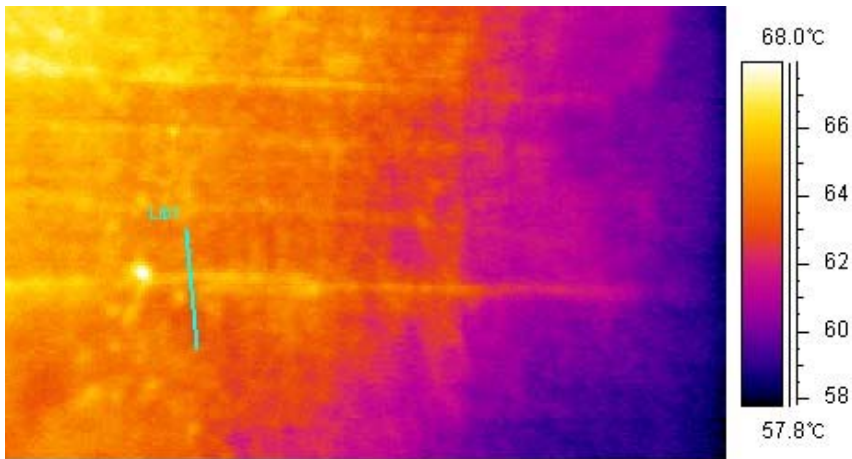


Fig. 3-19 IR image of bucket crack(halogen lamp)

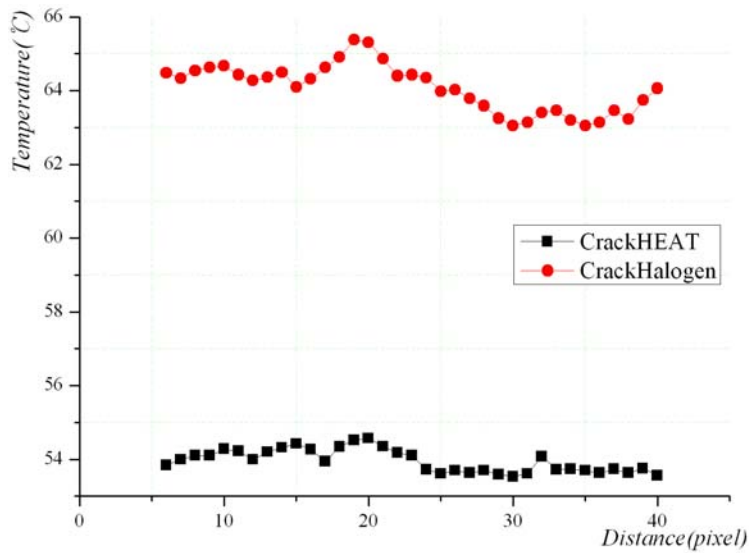


Fig. 3-20 Temp. of bucket crack

## 2. 버킷 코팅면 접착 상태 분석

본 실험에서의 비교 대상은 신품과 1차사용품, 박리시편을 비교 대상으로 하였다.

IR 이미지 상으론 박리된 부분을 확인하는데 다소 어려움이 있어서 온도 data를 뽑아서 확인하는 방향으로 하였다. 온도 그래프에서 신품과 1차 사용품과의 온도 변화는 앞선 실험에서 이미 입증된바 있다. 인공결합의 시편에서의 온도는 이보다 약 1℃ ~ 2℃ 낮게 나타났다. 이는 모재면에서 열전달이 코팅면으로 전달되는 과정에서 접착력이 다른 시편보다 약하여, 열전도가 원활히 이루어 지지 않아 온도가 타 시편보다 낮게 나타난 것으로 보인다.

실험은 기존의 실험과 동일한 heating system과 halogen lamp를 이용하여 진행하였으며, 각각의 영상에서 spot1 ~spot3의 온도 data를 뽑아 그래프로 나타내었다.

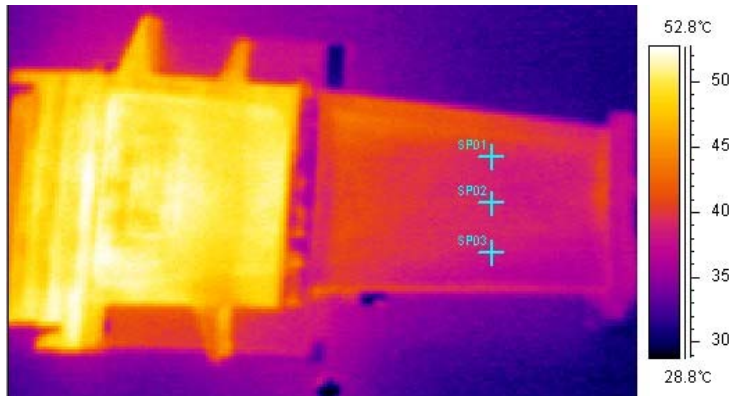


Fig. 3-21 IR iamge of Heating system method

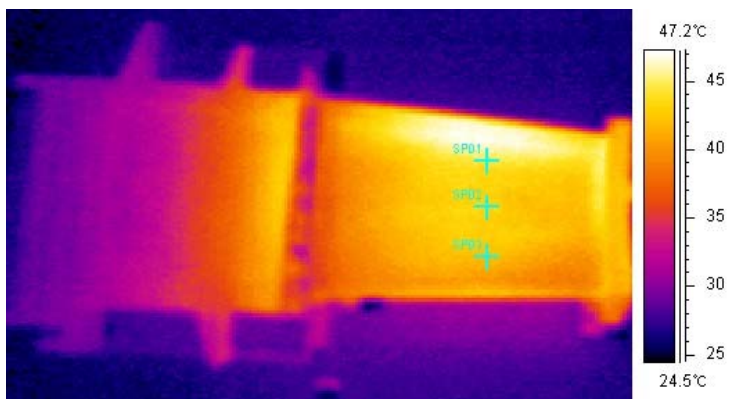


Fig. 3-22 IR iamge of Halogen lamp method

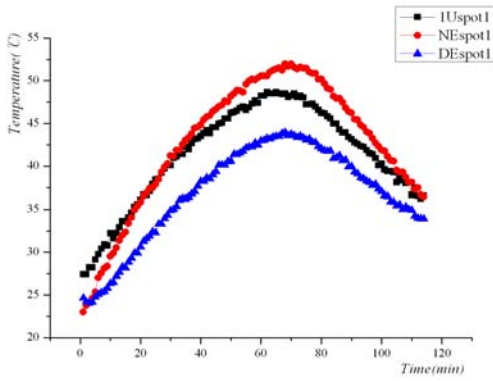


Fig. 3-23 Temp. of spot 1 by bucket

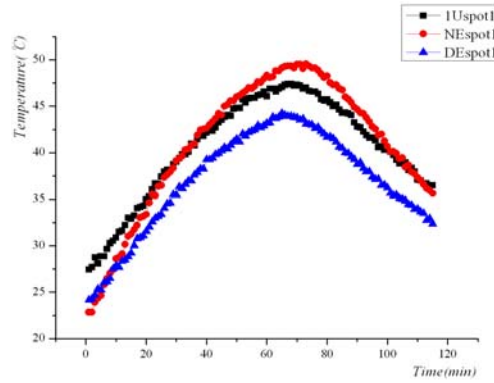


Fig. 3-24 Temp. of spot 2 by bucket

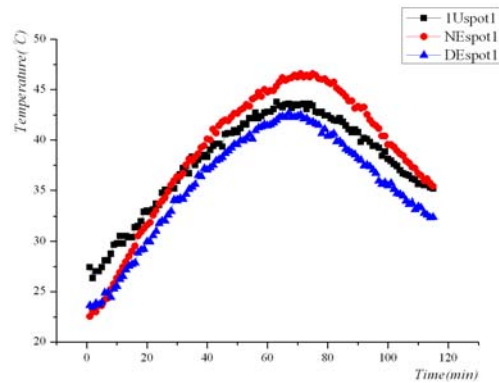


Fig. 3-25 Temp. of spot 2 by bucket

### 3. Halogen lamp 를 이용한 버킷 크랙 검출

Fig. 3-26은 할로젠 램프 ON 방법으로 램프를 계속 켜 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. 3-27은 LINE1에 대한 크랙 A,B,C의 온도-시간 그래프이다. 그래프에서 보듯이 크랙 부분에 와서는 온도가 더 내려가는 것을 볼 수 있을 것이다. 이는 할로젠 램프의 빛이 크랙 사이의 비탈진 공간에서 서로 상쇄 되어 없는 지는 것으로 추정된다.

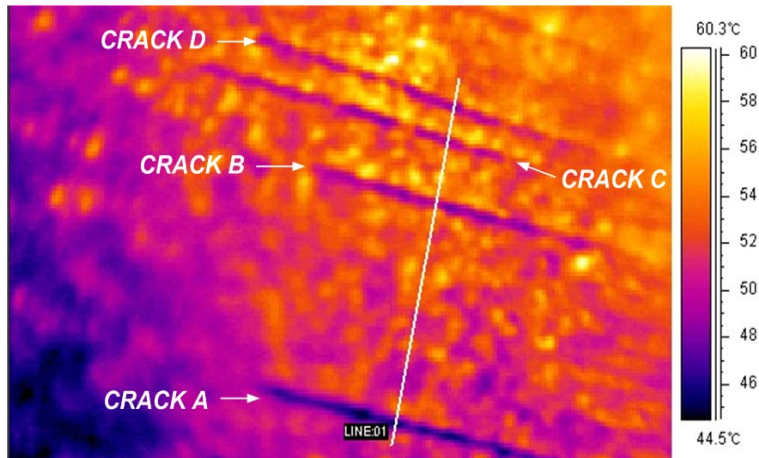


Fig. 3-26 Crack of IR Thermography (Lamp ON)

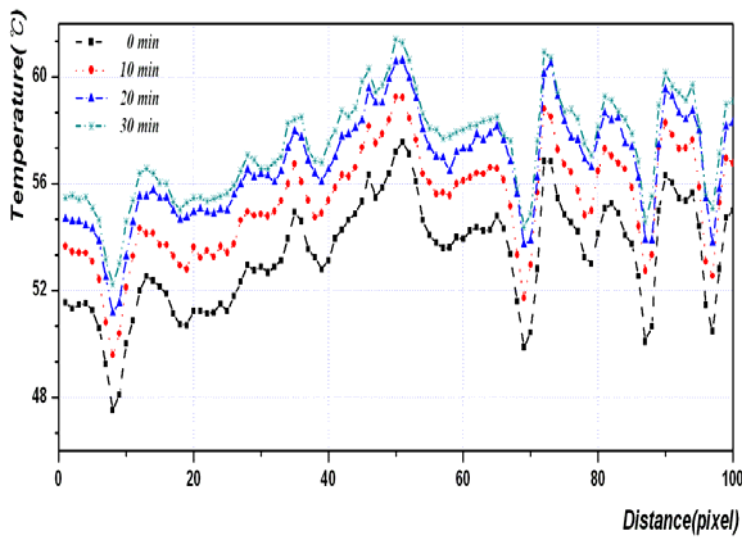


Fig. 3-27 Temp. Distribution in change over time (Lamp ON)

위에 적외선 열화상 이미지를 보면 알 수 있듯이 크랙 부분에 있어서 안으로 들어갈수록 빛이 상쇄됨으로 이에 따른 온도 분석 그래프를 보면 알 수 있듯이 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.

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 제거하였으므로 지속적인 촬영이 어려운 상태이며, 일정시간이 지나면 주위 온도에 따라 표면의 냉각으로 인하여 크랙의 검출 영상이 매우 불안정 하게 나타난다. Fig. 3-28 은 30분 간 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.

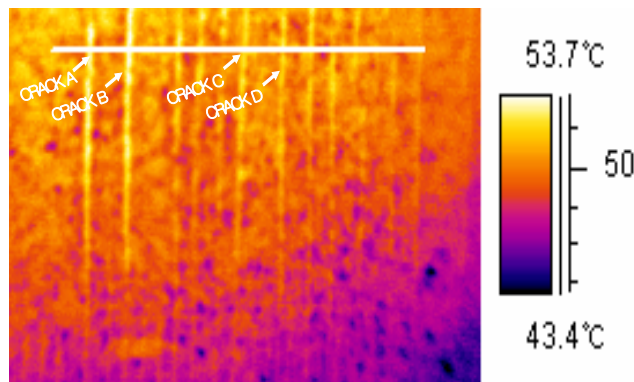


Fig. 3-28 Crack of IR Thermography (Lamp OFF)

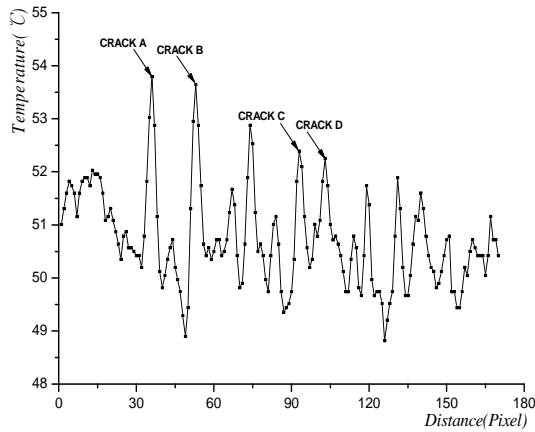


Fig. 3-29 Temp. Distribution in change over time (Lamp OFF)

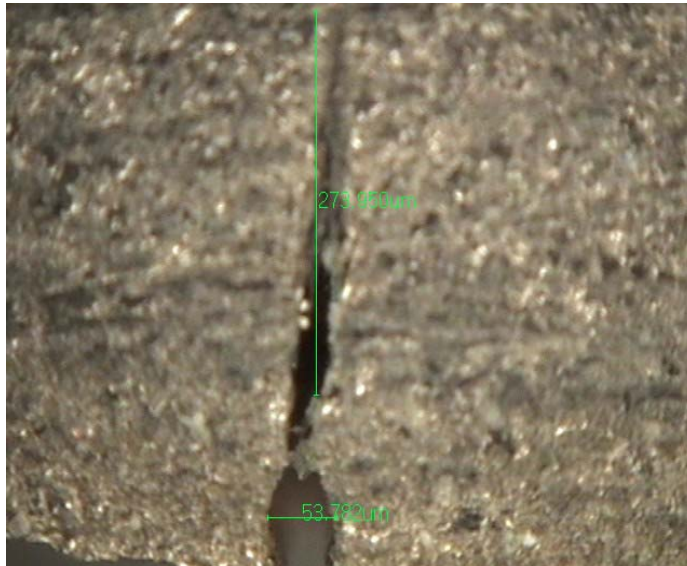


Fig. 3-30 Image for crack by using camscope

Fig. 3-30 은 실제 크랙이 모재까지 진전된 영상을 VIDEO MICRO SYSTEM을 이용하여 300배 촬영한 영상이다. 크랙의 크기와 모재로 진전된 크랙의 길이는 전용 소프트웨어에서 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. 모재로의 크랙 진전을 막을 수 있는 방법과 함께 모재로의 침투되기 전까지의 크랙을 찾아내는게 중요한 목표가 될 것이다.

#### 4. 재생 주기에 대한 고찰

##### 가. Reflection method (반사법)

각 시편에 적외선 열화상 카메라와 같은 방향으로 열원을 줌으로써 방사율(emissivity)값을 시험편 표면에 열원을 3초간 노출시켰을 때의 시편의 온도와 자연 상태에서의 시편의 온도와 보상하여 각각의 시편에 각기 다르게 설정해주었다. 온도 데이터를 Fig. 3-33 ~ Fig. 3-38에 그래프로 나타내었다. 각 spot 에서의 온도 구배선의 분석결과 사용품, 재생품, 폐품에서의 온도 평균상승률이 다르게 나타남을 알 수

있었다. 이와 같은 온도 구배 데이터에서 나타난 것과 같이 사용품과 재생품의 온도 상승률은 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. 사용품과 재생품에서 온도 차이가 나는 이유는 광원을 시편에 직접적으로 가해 줌으로써 시편의 표면 상태에 따라 한 시편에서도 각기 다른 반사율 값을 설정해 줄 수 없으므로 각 sopt 이 각기 다른 온도로 나타났으며, 대안으로 시편에 검은색 무광 페인트를 도포하여 실험을 수행하면 가능하나, 차 후 각 시편을 커팅하여 물성변화를 보기위해서 페인트 도포는 하지 않았다. 그리고 열원을 가해주는 초기 온도값이 다르게 나타나는 이유로는 각 시편에 반복적인 열원을 가해준다 보니 할로젠 램프이 사용 중 잔류 열원이 남아있어 초기 값이 차이가 났다.

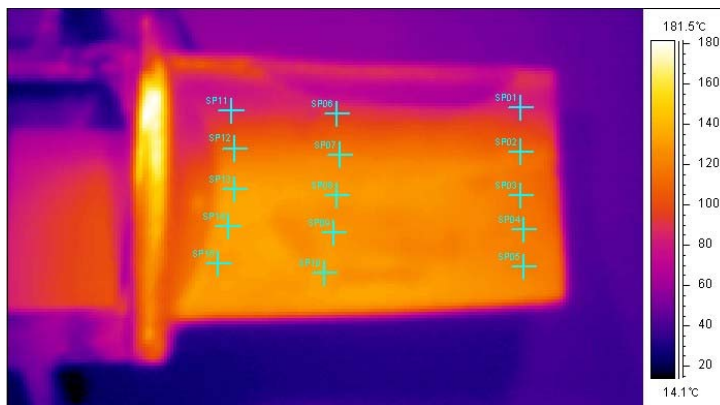


Fig. 3-31 IR image of bucket (concave)

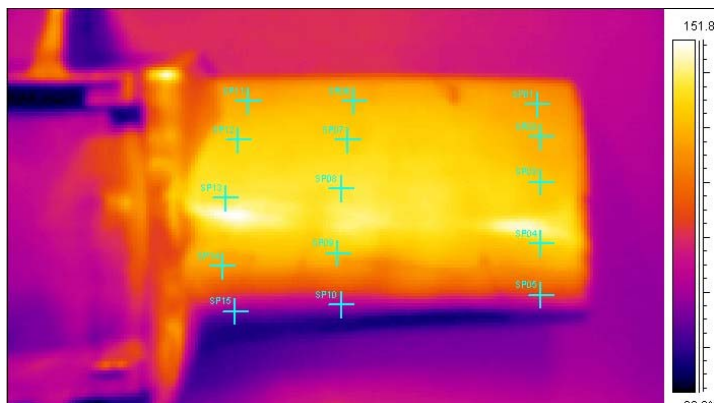


Fig. 3-32 IR image of bucket (convex)

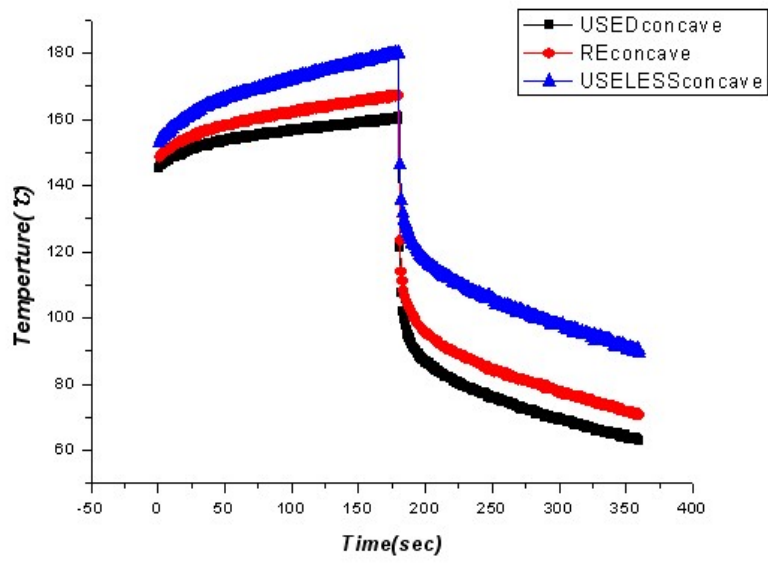


Fig. 3-33 Temp. of spot 4 by bucket (concave)

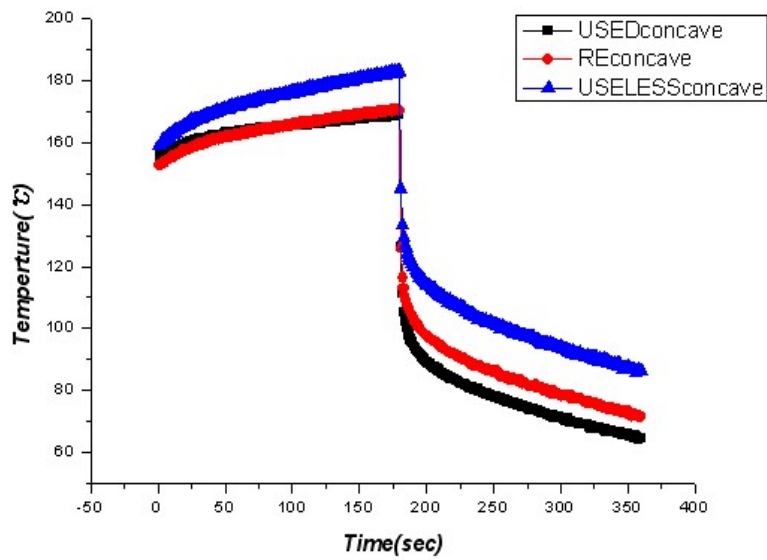


Fig. 3-34 Temp. of spot 9 by bucket (concave)

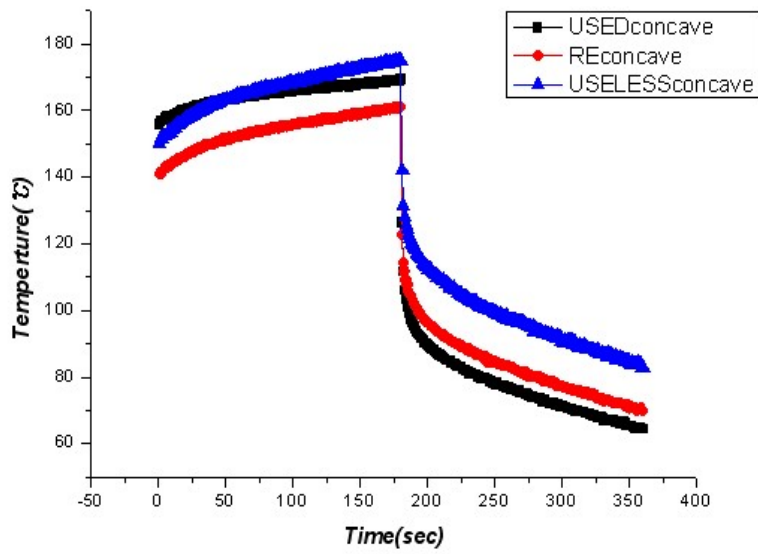


Fig. 3-35 Temp. of spot 14 by bucket(concave)

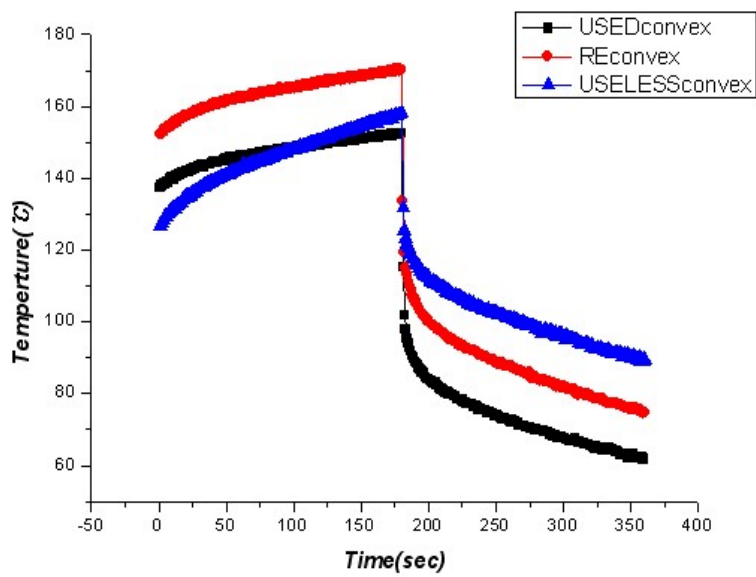


Fig. 3-36 Temp. of spot 2 by bucket(convex)

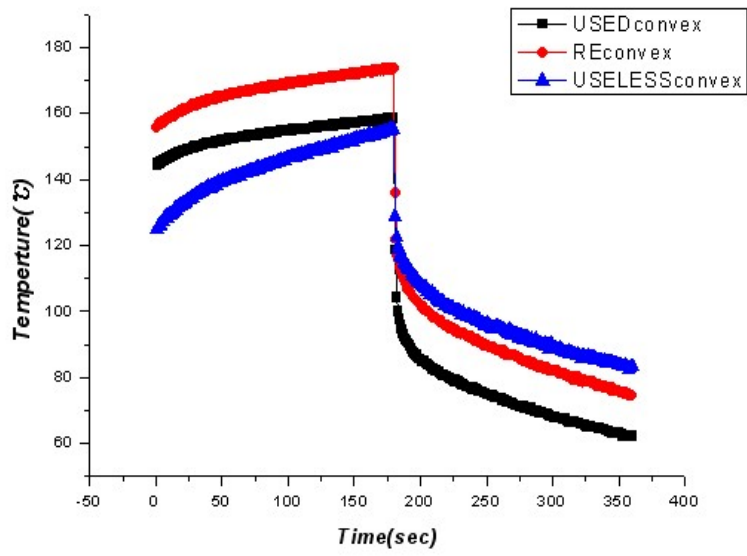


Fig. 3-37 Temp. of spot 7 by bucket(convex)

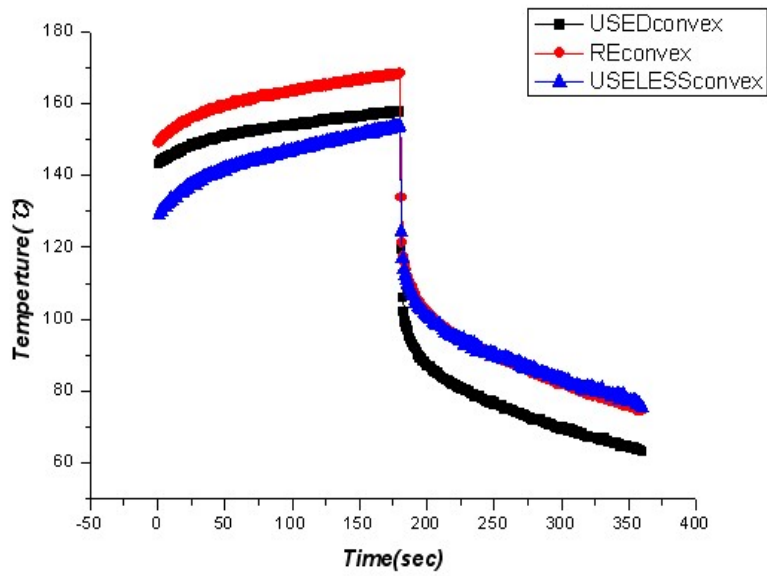


Fig. 3-38 Temp. of spot 12 by bucket(convex)

### 나. Transmission method (투과법)

시편 표면의 상태에 따른 각기 다른 방사율 값을 설정해주지 못하는 문제점을 해결하기 위해 시편 뒤에서 열원을 주어 시편을 가열하는 적외선 열화상 기법 중에 하나인 Transmission method 을 사용하여 실험을 수행하여 분석한 온도 데이터를 Fig. 3-41 ~ Fig. 3-46에 그래프로 나타내었다. 데이터 분석결과 사용품, 재생품, 폐품에서의 평균온도 상승에 차이가 있었으며, 사용품과 재생품과의 온도상승률의 차이는 크게 나타나지 않았다. Hot air를 열원으로 사용하였던 실험결과와 할로젠 램프를 사용한 실험결과가 유사함을 알 수 있었다.

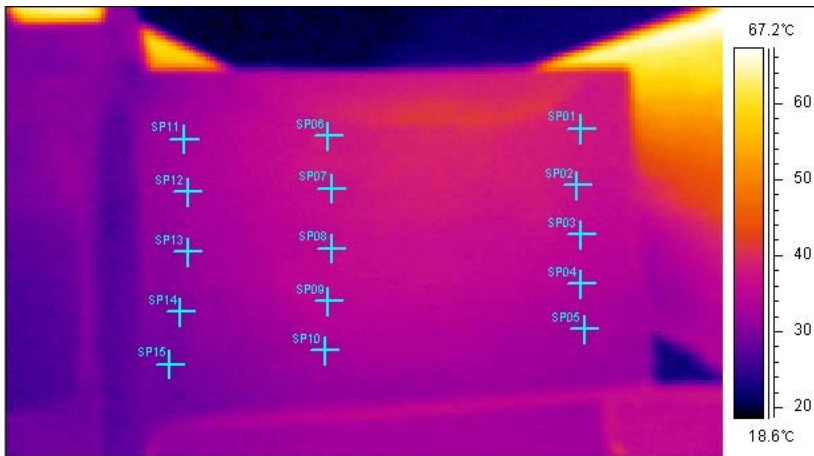


Fig. 3-39 IR image of bucket (concave)

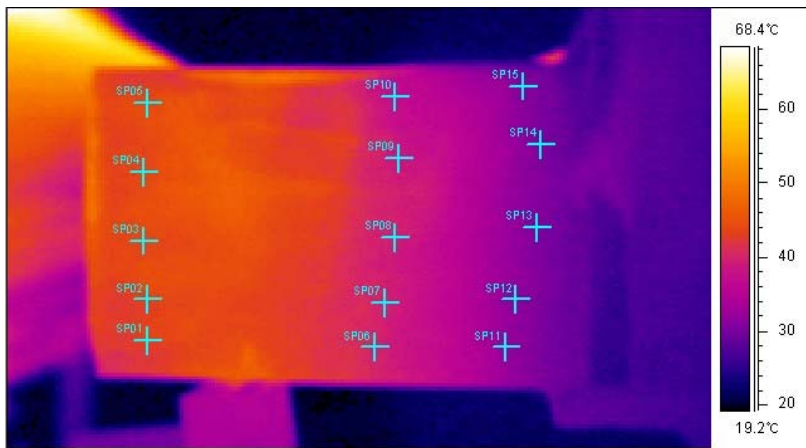


Fig. 3-40 IR image of bucket (convex)

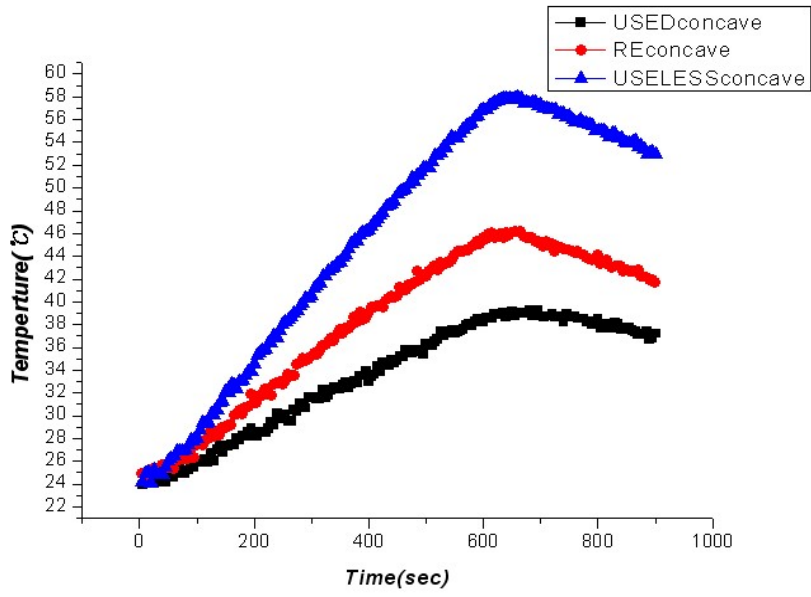


Fig. 3-41 Temp. of spot 2 by bucket (concave)

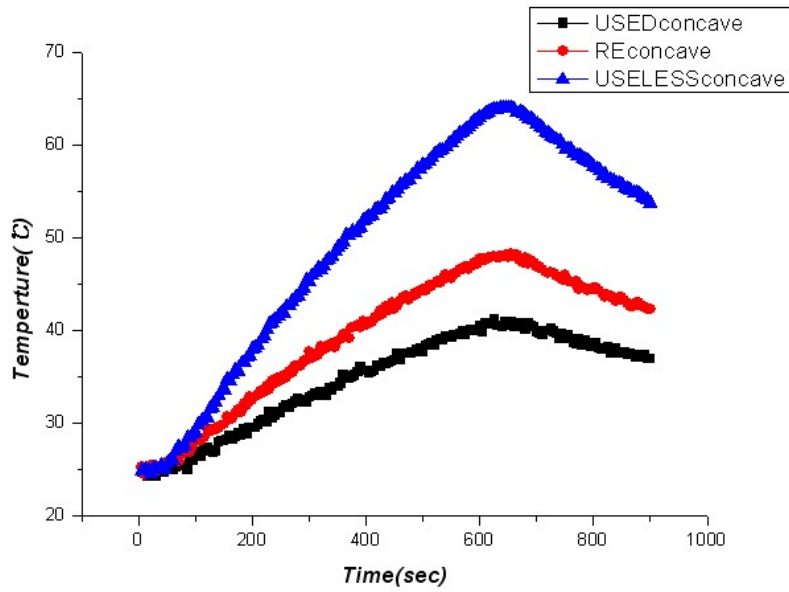


Fig. 3-42 Temp. of spot 7 by bucket (concave)



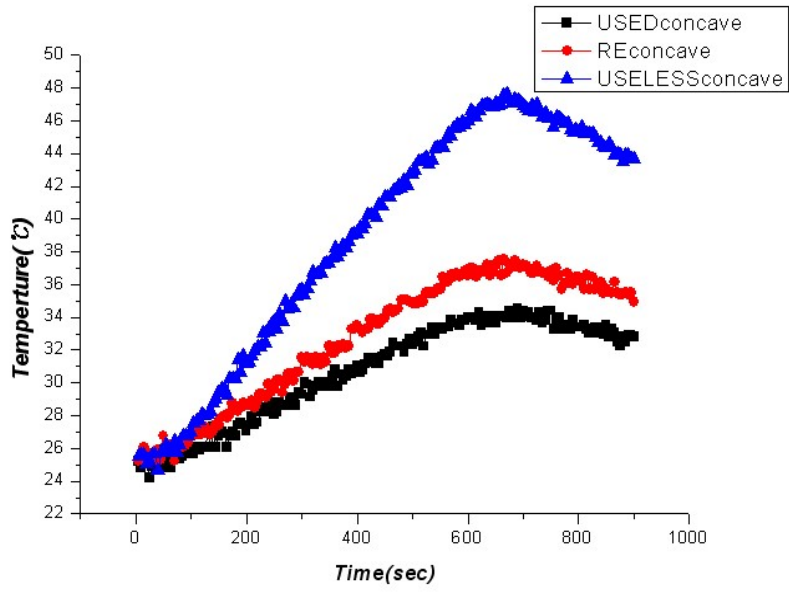


Fig. 3-43 Temp. of spot 12 by bucket(concave)

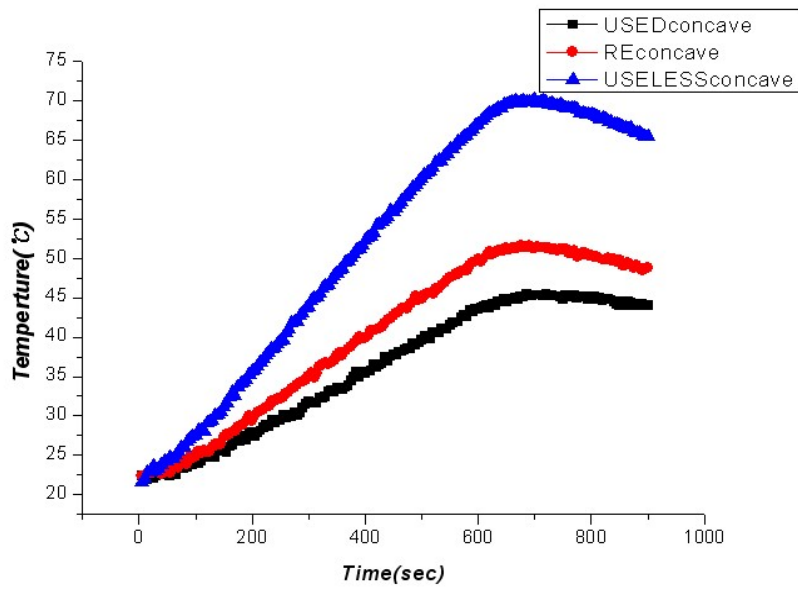


Fig. 3-44 Temp. of spot 4 by bucket(convex)

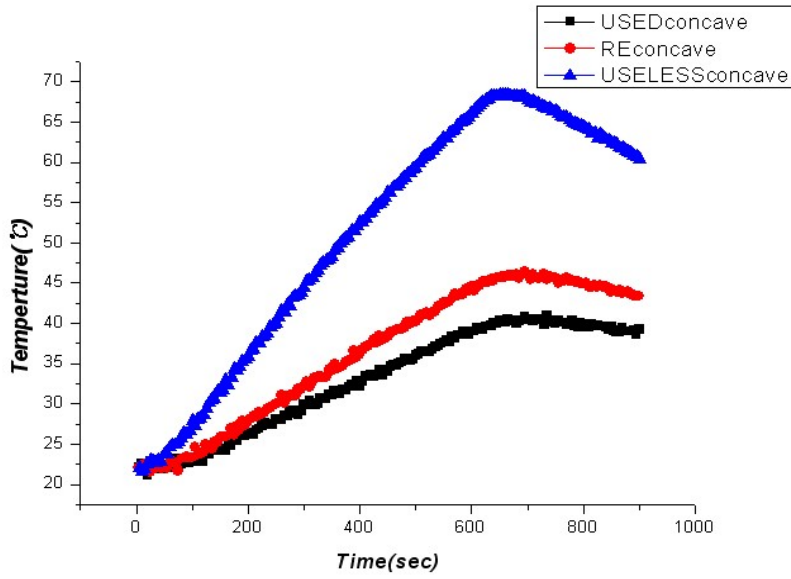


Fig. 3-45 Temp. of spot 9 by bucket(convex)

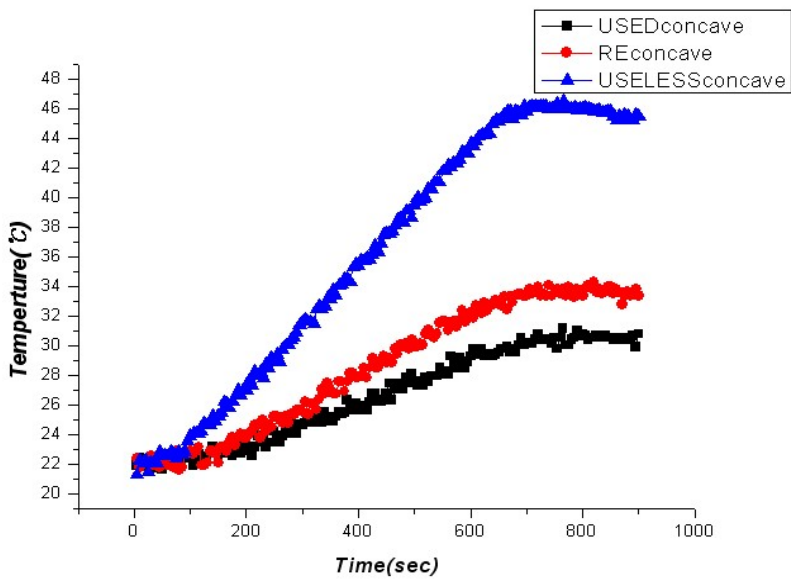


Fig. 3-46 Temp. of spot 14 by bucket(convex)

**다. 평균 온도 변화율**

할로겐램프를 열원으로 사용하여 사용품, 재생품, 폐품을 대상으로 적외선열화상측정 결과를 평균온도변화율에 따라 Table 3-1에 나타내었다. 평균 온도 변화율을 구해본 결과 사용품과 재생품에서는 큰 차이가 나지 않았으며, 폐품의 경우 상승률이 크게 나타남을 알 수 있었다.

Table 3-1 Average temperature change rate

Reflection Method						
Spot	Heating			Colling		
	USEDconcave	REconcave	USELESS concave	USEDconcave	REconcave	USELESS concave
SP01	0.0829	0.1038	0.1796	-0.1676	-0.1795	-0.1267
SP02	0.0966	0.1202	0.1655	-0.2117	-0.2436	-0.1934
SP03	0.0804	0.1106	0.1601	-0.2087	-0.2262	-0.2154
SP04	0.0872	0.1042	0.1522	-0.2073	-0.2128	-0.2233
SP05	0.0814	0.1091	0.1569	-0.2037	-0.2141	-0.2050
SP06	0.0767	0.0998	0.1455	-0.1691	-0.1648	-0.1384
SP07	0.0779	0.0953	0.1301	-0.2040	-0.2059	-0.1927
SP08	0.0740	0.1053	0.1331	-0.2218	-0.2319	-0.2365
SP09	0.0798	0.0993	0.1333	-0.2168	-0.2194	-0.2311
SP10	0.0726	0.1081	0.1439	-0.2114	-0.2153	-0.2188
SP11	0.0746	0.1034	0.1490	-0.1502	-0.1523	-0.1299
SP12	0.0794	0.1100	0.1261	-0.1904	-0.1930	-0.1813
SP13	0.0762	0.1204	0.1452	-0.2227	-0.2275	-0.2540
SP14	0.0764	0.1119	0.1401	-0.2202	-0.2208	-0.2452
SP15	0.0728	0.1101	0.1376	-0.2173	-0.2272	-0.2369
평균	<b>0.0793</b>	<b>0.1074</b>	<b>0.1465</b>	<b>-0.2015</b>	<b>-0.2090</b>	<b>-0.2019</b>

(a) Average temperature change rate of concave

<b>Reflection Method</b>						
<b>Spot</b>	<b>Heating</b>			<b>Colling</b>		
	<b>USEDconvex</b>	<b>REconvex</b>	<b>USELESS convex</b>	<b>USEDconvex</b>	<b>REconvex</b>	<b>USELESS convex</b>
SP01	0.0913	0.1125	0.1764	-0.1901	-0.2122	-0.1817
SP02	0.0837	0.1037	0.1765	-0.1917	-0.2215	-0.1858
SP03	0.0843	0.1018	0.1988	-0.1971	-0.2291	-0.2175
SP04	0.0773	0.1003	0.1727	-0.1897	-0.2348	-0.2285
SP05	0.0662	0.0827	0.1823	-0.0979	-0.1589	-0.0917
SP06	0.0867	0.1055	0.1737	-0.1955	-0.2188	-0.1555
SP07	0.0789	0.1036	0.1693	-0.2038	-0.2332	-0.2017
SP08	0.0771	0.0952	0.1452	-0.2074	-0.2311	-0.2155
SP09	0.0688	0.0868	0.1179	-0.1742	-0.2093	-0.1682
SP10	0.0600	0.0765	0.1207	-0.0567	-0.1027	-0.0485
SP11	0.0878	0.1135	0.1563	-0.1908	-0.2194	-0.1807
SP12	0.0823	0.1093	0.1401	-0.2044	-0.2348	-0.2079
SP13	0.0840	0.1085	0.1468	-0.2114	-0.2360	-0.2195
SP14	0.0680	0.0855	0.1096	-0.1517	-0.1806	-0.1081
SP15	0.0581	0.0736	0.1256	-0.0415	-0.0806	-0.0236
평균	<b>0.0770</b>	<b>0.0973</b>	<b>0.1541</b>	<b>-0.1669</b>	<b>-0.2002</b>	<b>-0.1623</b>

(b) Average temperature change rate of convex

<b>Transmission Method</b>						
<b>Spot</b>	<b>Heating</b>			<b>Colling</b>		
	<b>USEDconcave</b>	<b>REconcave</b>	<b>USELESS concave</b>	<b>USEDconcave</b>	<b>REconcave</b>	<b>USELESS concave</b>
SP01	0.117492	0.168775	0.251008	-0.65047	-0.76257	-0.91267
SP02	0.122725	0.171442	0.272275	-0.64383	-0.75837	-0.94787
SP03	0.105617	0.156317	0.234483	-0.60962	-0.72085	-0.86488
SP04	0.084142	0.130142	0.188175	-0.5716	-0.65867	-0.77227
SP05	0.068358	0.099483	0.163675	-0.54493	-0.60962	-0.72822
SP06	0.122775	0.157483	0.258258	-0.65377	-0.74705	-0.92717
SP07	0.12725	0.1875	0.319625	-0.66515	-0.79527	-0.05473
SP08	0.121058	0.177175	0.323083	-0.6405	-0.76257	-1.05193
SP09	0.095142	0.124008	0.245692	-0.5936	-0.65867	-0.90927
SP10	0.070075	0.10525	0.201258	-0.54102	-0.61137	-0.80583
SP11	0.064042	0.077258	0.136725	-0.55073	-0.57717	-0.68893
SP12	0.072858	0.098167	0.175683	-0.56598	-0.6166	-0.77638
SP13	0.070075	0.096042	0.17475	-0.54102	-0.5954	-0.76257
SP14	0.048808	0.05605	0.129233	-0.49848	-0.52517	-0.67635
SP15	0.035825	0.0415	0.098383	-0.47497	-0.49848	-0.60253
평균	<b>0.0884</b>	<b>0.1231</b>	<b>0.2115</b>	<b>-0.5830</b>	<b>-0.6599</b>	<b>-0.7654</b>

(c) Average temperature change rate of concave

Transmission Method						
Spot	Heating			Colling		
	USEDconvex	REconvex	USELESS convex	USEDconvex	REconvex	USELESS convex
SP01	0.201917	0.26525	0.337175	-0.80715	-0.94357	-1.07767
SP02	0.193308	0.26285	0.359492	-0.77502	-0.92162	-1.11985
SP03	0.173417	0.237483	0.366583	-0.74275	-0.87088	-1.12157
SP04	0.177567	0.226708	0.382475	-0.72822	-0.8265	-1.12497
SP05	0.194742	0.217033	0.378533	-0.76257	-0.80715	-1.12497
SP06	0.192858	0.245008	0.427542	-0.79393	-0.91267	-1.28247
SP07	0.142633	0.208975	0.403717	-0.73115	-0.81882	-0.1831
SP08	0.139992	0.189733	0.385183	-0.66838	-0.76535	-1.14335
SP09	0.141283	0.183808	0.370375	-0.65047	-0.73552	-1.10865
SP10	0.14765	0.261275	0.3919	-0.66838	-0.76257	-1.1517
SP11	0.0986	0.113192	0.215983	-0.60785	-0.65377	-0.83283
SP12	0.075475	0.098598	0.178583	-0.54687	-0.5954	-0.75555
SP13	0.060008	0.071642	0.1666	-0.48792	-0.52917	-0.70887
SP14	0.06555	0.079033	0.185292	-0.49638	-0.53115	-0.72528
SP15	0.07575	0.092725	0.215658	-0.52717	-0.55073	-0.7966
평균	0.1387	0.1836	0.3177	-0.6663	-0.7483	-0.9505

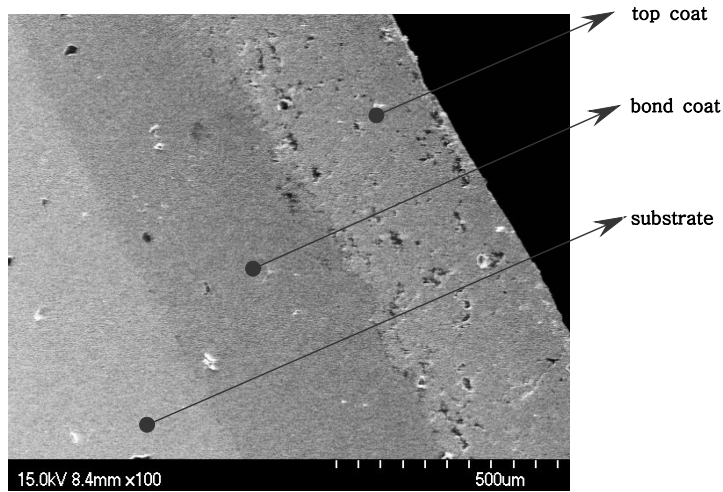
(d) Average temperature change rate of convex

#### 라. SEM촬영 및 EDX분석

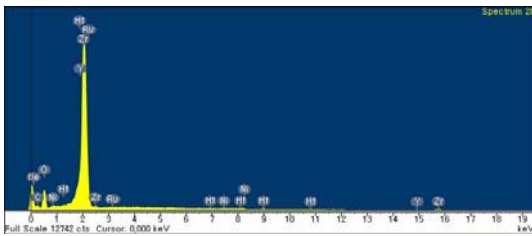
사용품, 재생품, 폐품을 대상으로 각각 12개씩 총 36개의 시편을 탐코팅, 본드코팅, 모재 각 부분의 조성을 비교분석 하였다. Fig. 3-47은 전자현미경 촬영 이미지와 EDX분석결과를 나타내었다. Table 3-2는 EDX 결과를 사용품, 재생품, 폐품별로 분석한 결과이다.

신품과 사용품간의 SEM-EDX 성분분석결과 탐코팅, 본드코팅의 성분함량의 변화는 크지 않다.<sup>(24)</sup>

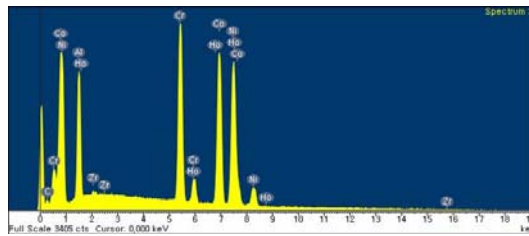
본 연구에서 사용품과 재생품간의 SEM-EDX 성분분석결과도 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.



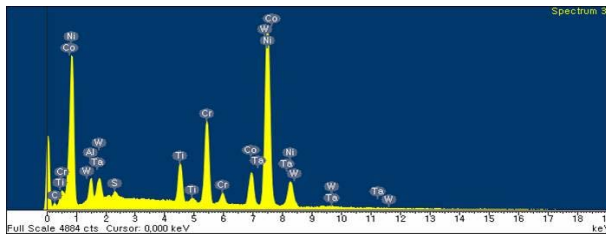
(a) Scanning Electron Microscope image



(b) top coat



(c) bond coat



(d) substrate

Fig. 3-47 SEM-EDX Analysis

Table 3-2 EDX result showing the compositions

Element	Atomic (%)								
	USED bucket			RE bucket			USELESS bucket		
	top coat	bond coat	sub strate	top coat	bond coat	sub strate	top coat	bond coat	sub strate
C	35.47	10.40	16.50	46.04	17.73	24.10	15.89	12.28	19.27
Al	0.18	18.21	4.42		15.38	3.40		21.38	4.59
O	46.24			38.52			60.86		
Cr	0.24	17.62	13.03	0.12	15.73	11.41		15.15	13.06
Ni	0.73	28.52	48.43	0.36	25.42	43.17		25.97	46.26
Zr	16.69	0.45	0.83	13.90	0.06	0.91	21.44		0.45
Si		0.40	2.76		0.46	4.03		0.46	2.54
Mg	0.40			0.19					
Er	0.04								
Cu				0.15			0.20		
Y				0.74			1.35		
Ho					0.53			0.47	
Hf							0.26		
S			0.69			0.65			0.80
Ti			4.07			4.72			4.06
Co		24.40	7.83		24.81	6.72		24.30	7.65
Sr			1.16			0.89			0.86
W			0.28						0.46

## 제 5 장 결 론

7FA 가스터빈 1단버킷의 코팅층 건전성 평가를 위하여 적외선 열화상 계측 시스템의 적용성을 검토하였다. 버킷 코팅층의 크랙 및 박리시편의 열화상 진단을 수행하였으며, 진단을 효율적으로 하기 위한 Heating System을 설계 제작 하였고, 신품, 1차 사용품, 1차 재생품, 스크립된 1차 사용품, 폐품을 대상으로 Hot air를 열원으로 채택한 방법과 Halogen Lamp를 열원으로 채택한 방법을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 내릴수 있었다.

1. 할로젠램프를 열원으로 사용하여 버킷의 크랙 및 박리의 결함검출이 가능함을 알 수 있었다. 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.
2. 적외선 열화상 카메라를 이용하여 코팅층 건전성 평가 시 열원으로 Hot air를 이용한 방법과 Halogen lamp를 이용한 방법 모두 사용품과 재생품간의 온도차는 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다.
3. 사용품, 재생품, 폐품을 대상으로 탑코팅과 본드코팅, 모재부분의 EDX분석결과 본드코팅과 모재부분은 대상시편 모두 크게 변화가 없었으며, 탑 코팅부분에서 산화현상이 사용품, 폐품 순으로 증가됐고, 재생품과 사용품과의 차이는 거의 없는 것을 알 수 있었다.
4. 신품과 사용품간의 SEM-EDX 성분분석결과 탑코팅, 본드코팅의 성분함량의 변화는 크지 않고, 또한 사용품 과 재생품간의 SEM-EDX 성분분석결과도 본 연구에서 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 그러므로 사용품에 대해 재생과정을 거치지 않고 주기를 연장시키는 게 가능할 것으로 사료된다.



## 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 welding journal research supplement , 348-s, 1999, pp. 59~67
12. KEPCO , "GAS TURBINE TECHNOLOGY", 1999.
13. Robert Madding, Gray orlove, "INFRAMATION 2004", Vol. 5, 2004.
14. Robert 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°C", 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.
24. D J Kim, J C Jang, S H Lee, J B Won, M Y Kim, C S Seok, "Characteristics Evaluation of Coatings on the 1st Bucket for Gas Turbine " 한국정밀공학회 추계학술대회, pp.627-628,2006
25. "Level I Course Manual" Infrared Training Central, 2006, Chapter 6
26. "Level I Course Manual" Infrared Training Central, 2006, Chapter 7
27. "Advanced Gas Turbine Materials and Coatings" GE Energy, pp. 4
28. "Advanced Gas Turbine Materials and Coatings" GE Energy, pp. 7
29. "<http://kps.kps.co.kr>", GE 7F/FA 1단 버킷 재료
30. " NDT Technology Development of Main Components in 7FA Type Gas Turbine" (최종보고서), 2008

## 감사의 글

해불양수(海不讓水)라는 말이 있듯이 바다는 강물을 버리지 않습니다. 물은 깨끗한 물이라고 해서 환영하고 더러운 물이라고 해서 물리치지 않습니다. 물은 그 어떤 환경을 구분하지 않고 자기에게 오는 모든 물은 다 받아들입니다. 2년이라는 시간동안 실험실 생활을 하면서 논문이 나오기까지 많은 격려와 질타를 아끼지 않으시며 저를 이끌어주신 김재열 지도교수님, 김영석 교수님, 심재기 교수님, 오울권 교수님, 이동기 교수님 그리고 유영태 교수님은 저에게 바다와 같은 분이셨습니다. 논문 심사과정에서 세심한 지도와 조언을 아끼지 않으신 윤성운 교수님께 깊은 감사를 드리며, 백수북면(白首北面)의 자세로 여러 교수님들의 가르침을 받고 절차탁마(切磋琢磨)의 자세로 끊임없이 정열적으로 학업에 정진해 제 인생의 목표에 도달하는 길이 은혜에 보답하는 길 같습니다.

입학 때부터 논문완료까지 학문적 도움을 주신 송경석 교수님, 대학원 생활을 일깨워주신 김진우 교수님께 감사를 드리며, 김창현 선배님, 양동조 선배님, 김우전 선배님, 최철준 선배님에게도 감사를 드립니다.

같이 입학하여 어려운 일, 즐거운 일 모두 같이 겪은 동기 명석이 형, 후배 호희 형 그리고 진호에게도 고맙단 말을 전합니다.

마지막으로 묵묵히 뒤에서 마음의 얼을 주신 어머니와 빛을 주신 아버지, 그리고 하나밖에 없는 누나에게도 늘 감사하고 사랑한다는 말을 전합니다.

저를 아는 모든 분들께 가시밭 길 위에 제 씨앗을 뿌려주시고, 모진 시련 속에 나를 꽃피게 하심에 다시 한 번 감사드립니다.

2008년 6월 최승현

## 저작물 이용 허락서

학 과	정밀기계공학과	학 번	20067526	과 정	석사
성 명	한글 : 최승현      한문 : 崔承鉉      영문 : Seung-Hyun, Choi				
주 소	광주광역시 동구 학동 평화맨션 3동 407호				
연락처	E-MAIL : <a href="mailto:csyddubi@hanmail.net">csyddubi@hanmail.net</a>				
논문 제목	적외선 열화상 진단기술을 적용한 가스터빈 1단 버킷의 건전성 평가  Integrity Evaluation of Gas Turbine 1st Stage Bucket Apply Infrared Thermography Diagnostic Technology				

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(    )

2008년 8월

저작자 : 최 승 현 (서명 또는 인)

**조선대학교 총장 귀하**