



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2016년 2월

석사학위논문

위상잠금 적외선 열화상 기술을
이용한 반사판에 따른 비가시 영역의
결함 측정 조건 평가

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

강 성 훈

위상잠금 적외선 열화상 기술을
이용한 반사판에 따른 비가시 영역의
결함 측정 조건 평가

Evaluation of defect measurement in accordance
with reflector for measuring invisible area
using an Lock-in IRT

2016 년 2 월 25 일

조 선 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

강 성 훈

위상잠금 적외선 열화상 기술을
이용한 반사판에 따른 비가시 영역의
결함 측정 조건 평가

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2015년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

강 성 훈

강성훈의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 지 훈 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 경 석 ㉠

위 원 조선대학교 교수 박 설 현 ㉠

2015년 11월

조선대학교 대학원

- 목 차 -

LIST OF TABLE III
LIST OF FIGURE IV
ABSTRACT VI

제 1 장 서 론 1
 제 1 절 연구배경 1
 제 2 절 연구목적 및 내용 3

제 2 장 이론적 배경 4
 제 1 절 적외선의 원리 4
 1. 적외선 4
 2. 적외선 활용 분야 8
 3. 흑체와 방사율 10
 제 2 절 적외선 센서의 원리 및 종류 17
 제 3 절 위상 잠금 기법 20
 제 4 절 열 전달 23
 1. 열전도 23
 2. 열대류 23
 3. 열복사 24

제 3 장 실험장치 및 방법	25
제 1 절 반사판과 시험편	25
1. 반사판 후보군	25
2. 평판 시험편	26
3. 반사판과 고정지그	28
제 2 절 실험장치	30
제 3 절 실험방법	33
제 4 장 실험결과	34
제 1 절 반사판 선정	34
1. 반사판과 열원의 단위시간당 온도변화	34
2. 에너지 변화율	35
제 2 절 결함 검출	37
1. 평판 시험편	37
2. 반사판을 이용한 결함 검출	39
제 5 장 결 론	49
참고문헌	51

- LIST OF TABLE -

Table 2-1 IBC of standard(IEC usage Sect 841)(μm)	7
Table 3-1 Material characteristic	26
Table 3-2 Specification of infrared camera	32
Table 3-3 Specification of Halogen Lamp	32
Table 4-1 Per unit temperature change	34
Table 4-2 Energy variation rate	35

- LIST OF FIGURE -

Fig. 2-1 Spectrum of electronic wave	4
Fig. 2-2 Relation between blackbody and temperature	6
Fig. 2-3 Composite material defect detection cases	9
Fig. 2-4 Electric transformer electric energy infrared system test	10
Fig. 2-5 Piping defect image	10
Fig. 2-6 Separation of emissivity	11
Fig. 2-7 Principle of emissivity of applied object	13
Fig. 2-8 Radiation energy of blackbody	14
Fig. 2-9 Blackbody effect of hole	15
Fig. 2-10 Effect of penetration	16
Fig. 2-11 Wave range of infrared detector to each detector material	18
Fig. 2-12 Signal processing of lock-in infrared thermography	20
Fig. 3-1 Reflector Candidates	25
Fig. 3-2 Flat specimen	27
Fig. 3-3 Reflector	28
Fig. 3-4 Jig	29
Fig. 3-5 Infrared camera	30
Fig. 3-6 Infrared Thermography system(IRT)	31
Fig. 4-1 Result graph	36
Fig. 4-2 Thermal image of Flat specimen	37
Fig. 4-3 Lock-in image of Flat specimen	38
Fig. 4-4 Thermal image of Aluminium reflector	39
Fig. 4-5 Lock-in image of Aluminium reflector	40
Fig. 4-6 Thermal image of Brass reflector	41
Fig. 4-7 Lock-in image of Brass reflector	42
Fig. 4-8 Thermal image of Copper reflector	43
Fig. 4-9 Lock-in image of Copper reflector	44
Fig. 4-10 Thermal image of Carbon Steel reflector	45

Fig. 4-11 Lock-in image of Carbon Steel reflector 46
Fig. 4-12 Thermal image of Pure iron reflector 47
Fig. 4-13 Lock-in image of Pure iron reflector 48

ABSTRACT

Evaluation of defect measurement in accordance with reflector for measuring invisible area using an Lock-in IRT

Kang, SungHoon

Advisor Prof. Kim, KoungSuk Ph.D.

Department of Mechanical System Engineering,

Graduate School of Chosun University

Defect inspection system for industrial applications takes the important portion, and non-contact inspection method has been significantly improved. Infrared thermograph, as one of method for non-contact inspection, can provide relatively precise data and quick inspection time. In addition, temperature distribution and thermal variation can be acquired. Therefore, it is widely applied to detect the defect out of temperature change.

Infrared thermography presents real-time images of temperature variation by detecting radiation energy from object surface. It has been used for thermal characteristic evaluation, thermal imaging on power system, defect inspection for composite material, evaluation for building insulation, medical diagnosis using body temperature, etc.

All objects, which are above absolute temperature, emit IR radiation energy. IR thermography is used to detect and measure thermal energy in IR spectrum from object. These IR energies are originated from vibration and rotation of molecule. As temperature of object is high, more movement is followed, and higher amount of infrared energy is radiated. This energy is detected by infrared thermography camera. IR thermography camera utilizes device to detect IR spectrum from object, and converts the amount of IR to temperature. It can be displayed as IR or thermal image. Therefore, IR thermography can show temperature distribution on the surface of object, and it can give temperature distribution at each point.

This study, it was performed to measure defect according to the measurement limit of

the non-visible areas such as the back surface of the pipe using reflection plate based on Infrared thermography. Reflection plate materials that can be measured non-visible areas are selected. To evaluate the heat absorption, it was analyzed in accordance with the temperature distribution and the rate of change of energy heat source. The temperature of the reflector according to the heat source was measured by attaching a thermocouple on the surface, was measured at the same time as the infrared camera. Heat source is heated to a reflection plate at a distance of 1m using a halogen lamp. By analyzing the slope of the temperature change per unit of the reflector of the absorbed heat energy, it was selected for the reflector plate. . Based on temperature change and energy variances for each reflector, metallic materials, such as pure iron, carbon steel, aluminum, and brass, are considered to be better. Proper material can be selected based on space limitation and thermal characteristics of target material, detection rate of defect can be improved.

For further study, detection of defect in non-accessible area using the candidate materials for reflector will be conducted.

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경

적외선이란 파장이 가시광선보다 길고 전파보다 짧은 전자파이다. 온도를 가지고 있는 모든 물체는 복사에너지를 방출하게 되며, 적외선 열화상 기법(Infrared Thermography: IRT)은 이 방출된 에너지량을 측정하여 검출 에너지량과 온도의 상관관계로부터 물체의 온도영상을 제공한다. 1960년대 초 적외선 열화상 기법이 개발되었고 초기에는 단일 검출소자에 의해 스캐닝 방식으로 온도영상을 구현하였으나, 현재는 어레이(array)방식의 고감도 적외선 검출소자와 화상처리기술의 발전을 배경으로 비파괴 진단에서 평가기술까지 다양한 산업분야에서 활용되고 있다. 일본 비파괴검사협회 규격 (NDIS 3005)에 의하면 적외선 카메라와 적외선 열화상 기술의 구별은 물체로부터 방사되는 적외선 강도분포 영상을 표시하는 것을 적외선 카메라, 이 강도분포를 온도로 환산하여 표시하는 기능이 부과되어 있는 것을 적외선 열화상 기법이라고 정의하고 있다. 적외선 열화상 기법의 성능이 급격히 향상됨과 동시에 고분해능, 고정밀도, 고속 측정이 가능하게 되면서, 과학기술 및 산업분야에서 다양하게 응용되고 있다.

오늘날 현대 산업사회는 다양화되고 첨단화되어짐에 따라, 각종 구조물은 급속히 고속화, 고압화, 대형화되는 추세에 있으므로 그것의 품질과 규모에 큰 변화를 가져오며, 이에 따라 안전에 대한 신뢰성 확보가 중요한 문제로 대두되고 있다.[1] 각종 구조물의 모든 소재나 재료는 완전무결할 수 없기 때문에 그 수명 또한 영구적일 수가 없다. 자체적인 결함이 있을 수 있을 뿐만 아니라 가공 및 사용 중에도 결함이 발생하여 생산됨으로써 재료의 영향을 주어 결국 구조물의 수명 단축으로 이어진다.[2, 3] 그러므로 구조물이나 대상체의 내부 구조에 어느 정도의 결함이 존재하는지, 그리고 그 결함들이 구조물이나 대상체를 사용함에 있어서 얼마나 유해한가를 알아야 한다. 이러한 판단의 근거를 제시하는 것이 비파괴 검사 기술이다. 즉 비파괴 검사로 대상물에 존재하는 유해한 결함의 유무를 확인하고 미리 기록하여 수명을 연장시켜 대형사고 및 파손을 방지하여 각종 구조물의 신뢰성을 높일 수 있다.

비파괴 검사 분야로써 현재 널리 사용되고 있는 기술 중에 적외선을 이용한 열 영상 기술은 갈수록 그 활용 범위가 확대되고 있는 추세이다. 적외선 열화상 기술은 적외선 카메라를 이용하여 비접촉, 비파괴, 원거리 검사 장점으로 물리적 성질과 결함발생 여부를 대상체의 표면으로부터 발산하는 적외선 또는 열을 검출하여 이때 온도변화 또는 온도분포로부터 대상체의 이상 유무를 재료의 파단이나 파괴 없이 실시간으로 영상을 제공하고 평가하여 진단하는 품질검사 및 안전성 평가 기술로써[4] 응력해석, 금속재료 부식결함 검사, 피로한계치 분석, 전력설비 열화진단, 의료진단, 복합재 박리 검사뿐 만 아니라 고도의 신뢰성과 안전성이 요구되는 반도체, 원자력산업, 방위산업, 항공우주 산업 등의 발달과 더불어 그 활용성과 중요성이 증대되어 응용범위가 점차 확대되고 있는 추세이다.

금속결함 검출에 적용되는 경우, 열확산계수가 큰 금속 재료일수록 검출소자의 샘플링 한계로 인하여 결함을 찾는 데 어려움이 있다. 따라서 이러한 문제 해결방안으로 위상 잠금 적외선 열화상 기법(Lock-in Infrared thermography)을 이용하여 열확산계수가 큰 금속의 내부결함을 검출할 수 있다. 이러한 위상 잠금 열화상 기법은 낮은 샘플링에서도 표면의 미세한 변화를 감지할 수 있다.[5] 적외선 열화상 기법은 국외에서는 1960년도부터 상용화가 되어 각 산업분야에서 널리 사용되어 왔으며, 특히 콘크리트 결함 계측, 미국 전력연구센터(EPRI)의 변압기의 전기 누출의 상태 감시분야 등 여러 분야에서 활용되어지고 있다.

제 2 절 연구목표 및 내용

본 연구에서는 최근 비파괴 검사에서 많이 이용되고 있는 육안 검사(VT), 방사선 투과 검사(RT) 그리고 초음파 검사(UT) 등 다양한 비파괴 검사 기법들 중 적외선 열화상 기법(IRT)을 이용하여 배관의 배면부와 같은 비가시 영역 검사의 한계에 따른 결함측정을 위해 진행하였다.

현재 원자력 발전소나 화학공장의 배관 또는 Oil과 Gas 배관에서 발생하는 국부적인 두께 감소(감육, 減肉) 현상은 배관의 건전성을 저하시키는 대표적인 결함으로 알려져 있다. 배관의 두께 감소(감육)을 일으키는 원인으로는 배관의 재질이나 형상, 유동조건 그리고 수질 등에 의하여 침식(erosion), 부식(corrosion) 혹은 유동가속부식(FAC, flow accelerated corrosion) 등이 있으며, 이러한 형태에 의해 배관 내부에서 발생하는 결함은 거의 나타나지 않으며 어느 한계에 다다르면 순함의 경우에는 그 특성상 초기 징후가 간접적으로 파열을 일으키기 때문에 문제가 되고 있다.[6] 배관의 건전성을 진단하기 위한 현재의 비파괴 기법들은 측정 영역 범위가 좁고 검사시간이 오래 걸리며 또한, 배관의 피복을 벗겨 내야 하는 등 측정을 위한 시간과 인력이 많이 드는 문제점을 가지고 있다. 이는 결국 검사 비용의 증가로 이어질 뿐만 아니라 관리영역의 한계로 인하여 안전성 확보가 어려워진다. 따라서 경제적이면서 넓은 검사영역에서 운전 중 감시가 가능한 신 개념의 원거리, 비접촉, 비파괴 측정 검사 기법 도입이 절실하다.[7]

본 논문에서는 적외선 열화상 기법을 바탕으로 결함검사 대상체의 비가시 영역을 반사판(Reflector)을 이용하여 측정하기 위한 실험적 연구를 진행하였다. 이러한 대상체의 비가시 영역에서 대류 또는 복사되어지는 열에너지를 반사판이 흡수할 수 있게 하고 이를 적외선 열화상 카메라로 측정하여 온도분포 및 열적특성의 차이를 분석한다면 결함부를 찾아낼 수 있을 것으로 예측된다. 이를 위해 결함이 가공된 시험편을 제작하여 다양한 조건에서 적외선 열화상 기법 및 위상 잠금 적외선 열화상 기법을 수행하고, 그 결과로부터 결함 검출을 위한 시험조건 결정하며, 분석을 통한 결함을 예측할 수 있도록 한다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 적외선의 원리

1. 적외선(Infrared Radiation)

가. 적외선의 원리

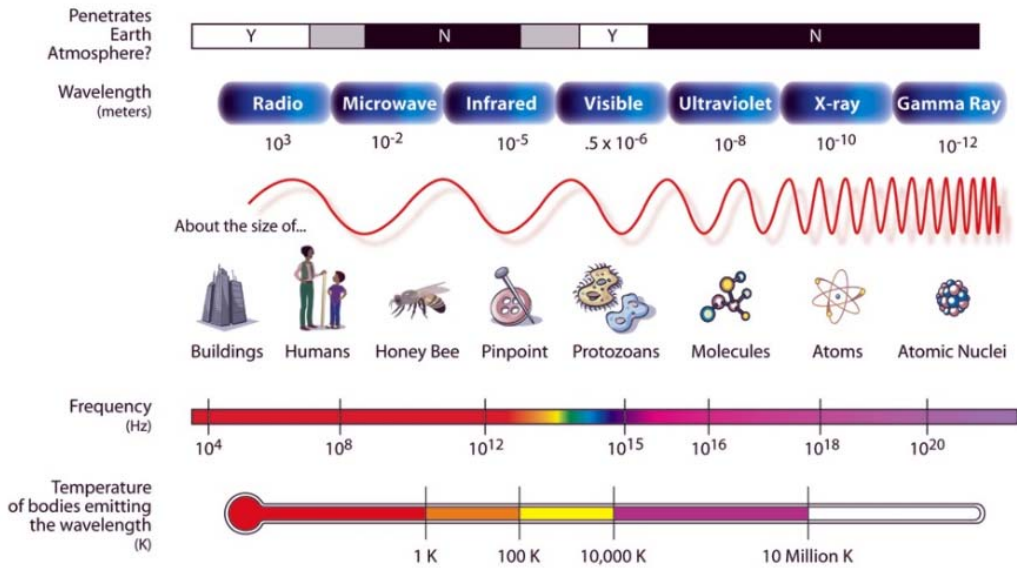


Fig. 2-1 Spectrum of electronic wave

적외선은 우리 눈에는 보이지 않으면서 빨간색 보다 파장이 긴 전자기파 영역으로써 전자기파란 전자파(electron wave)라고도 하며, 주로 파장의 길이가 약 1mm 이상인 전자기파를 전파(라디오파)라고 부른다. Fig. 2-1에 있는 바와 같이 사람들이 들을 수 있는 매우 낮은 주파수의 음파에서부터 시작하여 초음파 영역, 라디오, 텔레비전, 휴대폰, 레이더에서 사용하는 라디오파 영역, 적외선 영역, 가시광선 영역, 자외선 영역, X-선 영역, 그리고 우주선 영역 등의 매우 광범위한 영역을 지칭한다. 사람이 볼 수 있는 전자기파의 영역은 가시광선 영역인데, 이는 전자기파의 영역에서 볼 때 매우 좁은 영역에 불과하다.[8, 9] 이처럼 자연에 존재하는 대부분의 전자기파를 사람은 느낄 수 없는 것이다. 이러한 전자기파를 잘 사용하면 인체에

좋은 것도 있지만 인체에 나쁜 것으로 알려져 있다. 특히 X-선 영역은 사람에게 너무나 위험하기 때문에 조사되는 한계량이 있으며, 이 외에도 자외선을 너무 많이 받으면 피부암의 원인이 될 수 있다. 그리고 휴대폰이나 텔레비전에 나오는 전자기파도 한계량을 초과하게 되면 각종 병의 원인이 될 수 있다. 그러나 적외선은 오히려 인체의 신진 대사에 도움을 주기 때문에 일부러 적외선을 쬐기 위해 많은 노력을 하고 있다.

모든 물체는 온도의 작용으로써 적외선을 방출(복사)한다. 절대영도(섭씨온도(celsius scale)) -273.15°C 이상, 화씨온도(fahrenheit scale) -459.67°F 모든 물체는 물질을 이루고 있는 단위인 원자들이 미소한 진동을 하고 있다. 이러한 원자들의 진동 에너지가 적외선 영역의 에너지와 동일하기 때문에 모든 물체는 적외선이 나오는 것이다. 그리고 온도가 높으면 높을수록 더 많은 양의 적외선이 발산하게 되는데 이러한 이유 때문에 적외선을 열선(熱線)이라고도 부른다. 그러나 이러한 적외선도 너무 높은 온도에서는 인체에 오히려 해가된다.

일반적으로 적외선은 세라믹 계열인 벽돌, 진흙, 도자기, 황토 등에서는 많이 나오며, 금속물질인 금, 은, 구리, 철 등에서는 별로 나오지 않는다. 이것을 방사율(emissivity)이라 한다. 뒤에서 자세히 설명하겠지만 방사율은 0에서 1까지의 값을 가지며, 금속 계통은 0.2 ~ 0.5 이하의 값을 가진다.

적외선과 온도와의 관계를 알려면 흑체의 적외선 방사현상을 이해해야 한다. 적외선 방사는 역사적으로 볼 때 1800년대 초 경 영국의 윌리엄 허셜(Wililam Herschel) 경에 의해 태양광의 분광 시험 중 적색 부분보다 파장이 긴 부분이 있으며, 인체에 온열효과를 가져오는 파장을 발견하였다. 이 물리 현상은 1900년대 초창기에 여러 물리학자들에 의해 연구되었으며, 그 후 적외선 파장 중 온도를 이용하려는 이론은 1890 ~ 1900년 초 플랑크(N.Plank)에 의해 흑체이론이 완성되어 적외선을 이용한 온도 측정이 가능하게 되었으며 Planck라는 과학자에 의해 체계적으로 정립이 되었다. 흑체란 색깔이 검다는 것이 아니라 빛이 흑체 내부로 유입되면 다시는 밖으로 나오지 않아 결국에 흑체 내부에서 완전히 흡수됨을 뜻하는 것이다. 이것을 다른 말로 풀이하면 흑체에 열을 가하면 이 열은 모두 흑체에 흡수되어 흡수된 열은 적외선이라는 형태로 손실 없이 나온다는 것을 뜻한다.[10] 흑체와 온도의 관계는 Fig. 2-2와 같다. 가로축은 파장(Wavelength)을 나타내며, 세로축은 적외선 복사량을 나타낸다. 즉, 온도가 올라가면 적외선이 나오는 파장의 최대값은 가시광 쪽으로 이동하고 보다 많은 양의 적외선이 나오며, 온도가 낮을수록 파장의 최대값은 긴

파장 쪽으로 이동하며 나오는 적외선의 양도 작아지는 것을 의미한다. 그리고 300K(27℃)인 상온에서는 파장의 최대 값이 10 μm 근처이며, 500K(223℃)의 온도에서는 5 μm 근처에서 최대값을 가진다.

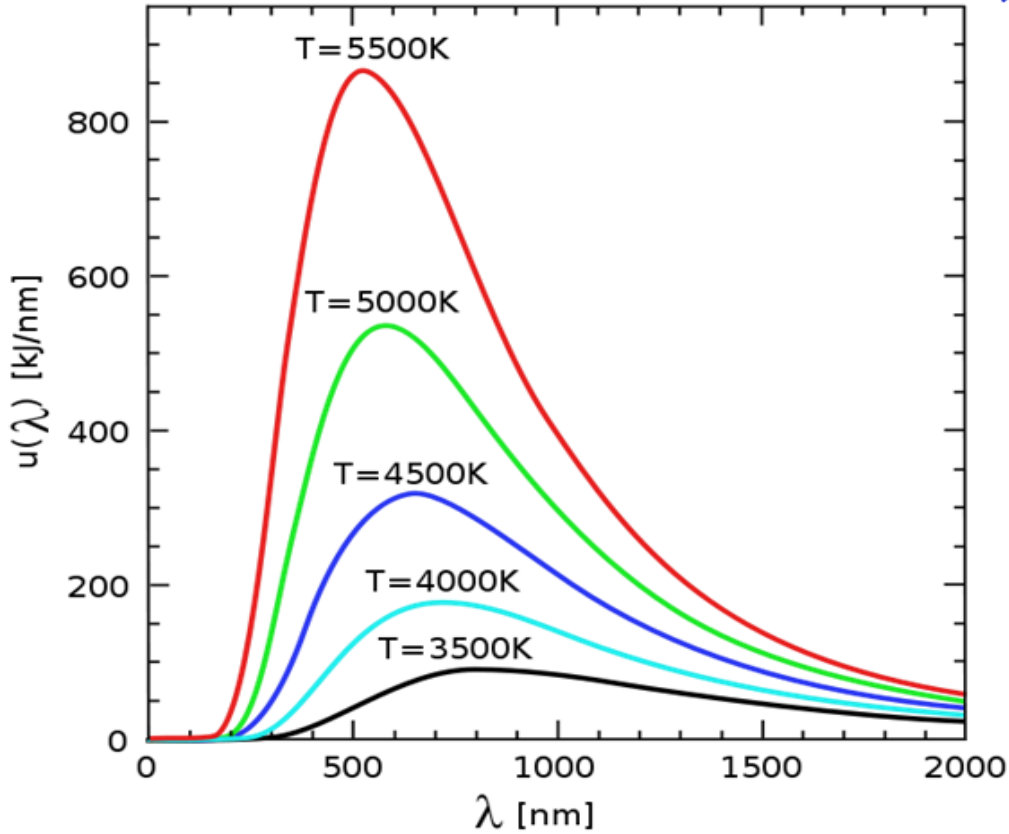


Fig. 2-2 Relation between blackbody and temperature

나. 적외선의 구분

절대 영도에서 모든 물체는 최저의 에너지 상태를 나타내며, 따라서 적외선 복사도 최소 수준으로 유지된다. 적외선 파장으로 보면 매우 넓은 영역을 차지하기 때문에 몇 개의 영역으로 나누어서 설명하고 있다. 적외선은 가시광선(Visible Wave)보다 파장이 길고 마이크로 광선(Micro Wave)보다 짧은 보통 0.8 ~ 1000 μm 파장 대역의 전자파를 말하며, 국제전기표준회(IEC)의 용어집에 의하면 적외선은 다음과 같이 분류 하였다.

Table 2-1 IBC of standard(IEC usage Sect 841)(μm)

Infrared Ray	NIR (Near Infrared Ray)	SWIR (Short Wavelength Infrared Ray)	MWIR (Mid Wavelength Infrared Ray)	LWIR (Long Wavelength Infrared Ray)	FIR (Far Infrared Ray)
Wavelength	0.7~1.1 μm	1.1~2.5 μm	2.5~7.0 μm	7.0~15.0 μm	15.0~1,000 μm

(1) Near Infrared Ray, Short Wavelength Infrared Ray(근 적외선)

적외선 중 가시광선에 가장 근접한 파장 범위를 적외선이라 하며 가시광선에 근접하기 때문에 광전수전기(빛 검출기)로 검지할 수 있는 범위의 적외선 방사를 말한다. 파장 범위는 $0.8\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 이며 인체의 피부에 대하여 가장 깊게 투과하기 때문에 인체에 온열 효과를 느끼게 하는 파장 영역이다. 또한, 검출기에는 사진건판, 광전지, 광전관, 열전대, 인광체 등에 쓰인다. 사진건판과 광전관은 $1.2\mu\text{m}$ 의 파장만이 검출 가능하다.

(2) Mid Wavelength Infrared Ray(중 적외선)

적외선 Wave 중 중간 범위의 영역으로 파장 대역은 $2\mu\text{m} \sim 6\mu\text{m}$ 의 전자기파 범위의 영역으로 방사체는 공기 중에서 직접 가열하는 방식의 적외선 방사에너지는 이 파장 대역을 주로 방사하는 것이 많다. 또한, MIR 에너지는 코팅된 금속이나 비금속 계열의 제품 건조에 가장 적합한 파장 대역을 가지고 있으며 특히 수성, 유성도료 고분자수지(플라스틱), 유리 등의 건조에 있어 탁월한 고효율 특성을 가지고 있다.

(3) Long Wavelength Infrared Ray, Far Infrared Ray(원 적외선)

적외선 파장 중 Micro wave와 가장 근접한 파장이며 파장 대역은 $4\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ 이며 주로 고분자 재료의 가열이나 유기 용체의 건조에 이용되는 파장이다. Long wave 한계에 있는 파장 $1000\mu\text{m}$ 는 Micro wave의 발생 장치나 Micro wave 검출장치의 단파장 한계가 대부분 비슷하다.

적외선을 여러 가지 영역으로 나누는 이유가 있다. 적외선 전자(electron)와 같이 파동이면서 입자인 성격을 가지고 있기 때문에, 물체에서 나온 어떤 영역의 적외선

은 공기 중의 입자와 충돌하거나 흡수된다. MWIR은 온도가 500K에 해당하는 적외선이 최대 나오는 파장 영역이며, LWIR은 300K에 해당하는 적외선이 최대 나오는 영역이다. 우리 생활과 밀접히 관련된 파장 영역은 바로 LWIR이며 민수용으로 많이 응용되고 있으며, MWIR은 비행기나 미사일의 연기에서 나오는 온도와 일치하기 때문에 군수용으로 사용되고 있다. SWIR 영역은 광통신에 응용되고 있다.

2. 적외선 활용 분야

가. 일반 산업분야

일반 산업분야에서 적외선 열화상 기법은 다양한 분야에서 적용되고 있으며, 특히 건축물 누수검사, 복합재료 내부 결함 검사, 자동차 크랙 검사, 반도체 열적특성 분석 등에 활용되고 있으며, 러시아의 Ioffe Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences에서 복합재료 및 일반 강에 대하여 연구를 많이 하고 있으며, 내부의 존재하는 결함이나 박리현상이 발생하는 부위의 검출 연구를 수행 중이다. 특히 최근에는 항공기 등에 복합 재료들이 많이 사용되면서 적외선 열화상을 이용한 초고속 카메라를 개발하여 항공기 이륙 및 착륙 시의 영상을 촬영하여 복합재료의 비파괴 결함 검사에도 적외선 열화상 기법을 적용하고 있다.

또한, 콘크리트 구조물 내의 결함 검출 및 안전성 평가에 활용되고 있으며, 적외선 열화상 기법 및 열적 가열을 이용하여 공업 및 산업단지 건축물의 결함 검출에 활용하고 있다. 화력 발전소나 공업 단지 굴뚝의 온도 범위를 측정함으로써 굴뚝의 결함을 검출하기 위한 수단으로 적외선 열화상 기법이 적용되고 있다. 또한, 적외선 열화상 기법의 시스템을 송배전 시설에 적용한 바가 있으며, 군사용 감시 카메라 및 야시경의 개발과 원전 터빈의 진공상태의 이상 유무를 검사하기 위해 적외선 열화상 기법을 활용한 바 있다. 다양한 비파괴검사를 자체적으로 적외선 열화상 기법 시스템을 구축하여 연구를 수행하였다.

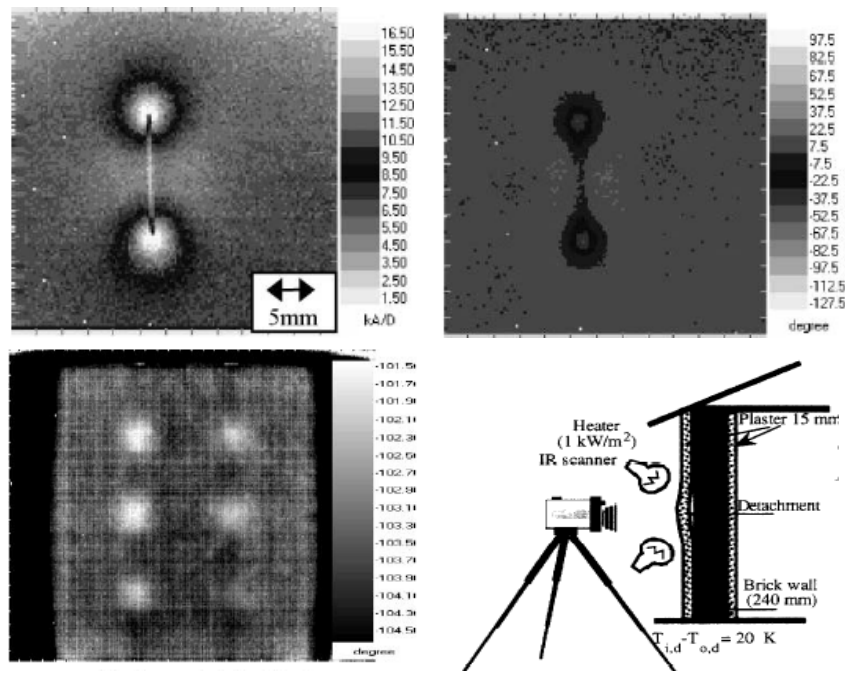


Fig. 2-3 Composite material defect detection cases

나. 원자력 산업분야

미국 전력연구소(EPRI)는 1999년부터 적외선 열화상 기법을 이용한 원자력발전소 설비의 비파괴검사에 관심을 갖고 다양한 연구를 수행하였다. Vermont Yankee 원자력발전소에서의 적외선 열화상 장비를 이용한 실험 결과를 바탕으로 Thermal Wave Imaging사와 함께 적외선 열 분사 기법의 최적화 연구를 수행하는 한편, TR-107142 'Infrared Thermography Field Application Guide'를 작성하여 적외선 열화상 장비의 현장 활용에 대한 가이드를 제시하고 있다. 적외선 열화상에 대한 이론적인 연구를 비롯하여 송배전선 및 변전소에 대한 적외선 열화상 기법의 활용 및 능동형 적외선 열화상 기법을 이용한 비파괴검사에 대해 연구하고 있다. 또한, 자체적으로 적외선 열화상 기법을 개발하여 센서를 통하여 자동화를 확립하여 누수

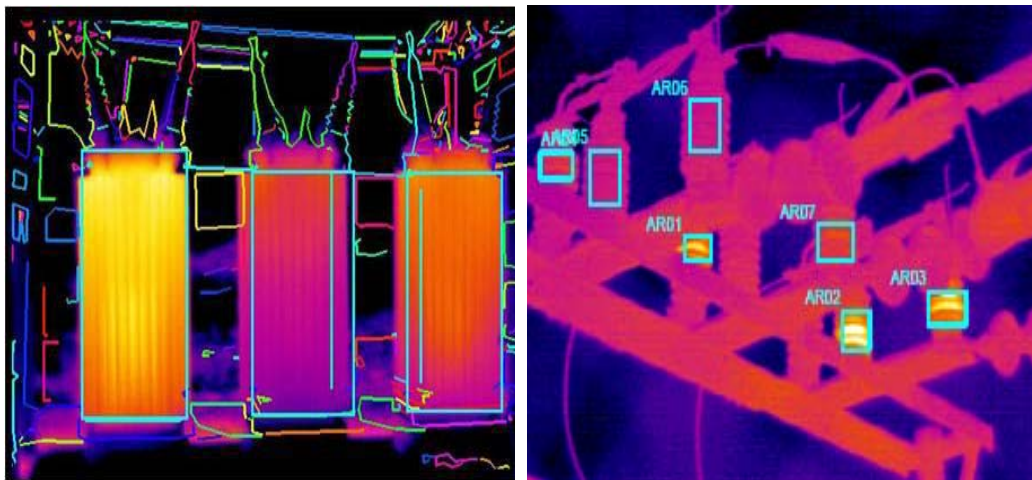


Fig. 2-4 Electric transformer electric energy infrared system test

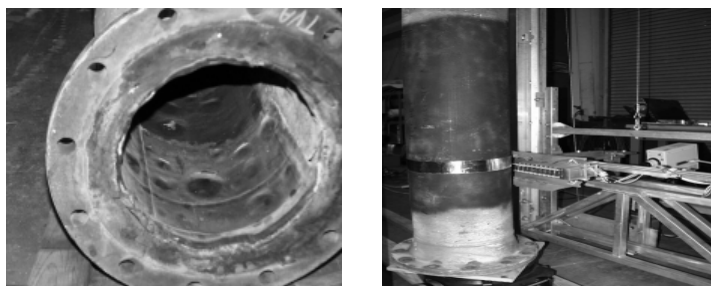


Fig. 2-5 Piping defect image

및 결함 검출을 실시간 촬영을 할 수 있도록 자동화 시스템을 구축하였다. 미국 전력연구소(EPRI)는 배관이나 열교환기 튜브에서 부식이나 침식으로 인한 결함을 검사하기 위한 수단으로 적외선 열화상 기법을 적용하기 위한 시도들이 최근에 있었으며, Subtraction 기능을 적용하여 실시간 데이터 분석 및 오차를 최소화하기 위한 연구가 진행되고 있다.

3. 흑체와 방사율(Blackbody and Emissivity)

가. 방사율(Blackbody)

물질을 구성하는 모든 입자는 절대온도(273K) 이상에서 복사에너지를 방출하게 되며 이 현상은 고온일수록 커지게 된다. 또한 공간을 가지고 서로 대향하고 물체 간에는 각 물체에서 발생시키는 복사에너지를 주고받게 되는데 상대 물체가 발생

시키는 복사에너지를 얼마만큼 흡수할 수 있는가를 나타내는 지표가 방사율($\epsilon = \text{emissivity}$)이다. 한 물체가 외부 광 에너지를 흡수한 후의 방사율은 표면으로부터 방출된 복사에너지의 효율을 측정하는 것이다. 물체의 복사적 성질들은 완전 방사체인 흑체에 대해 상대적으로 기술할 수 있다. 흑체로부터 방사된 에너지는 R_{bb} 이고 이상적인 흑체 방사체는 실제 존재하지 않으며 실제 물체가 방사하는 에너지는 R_{obj} 이면, 같은 온도의 물체와 흑체면과의 방사도의 비율 ϵ 은 식 (2.1)으로 나타난다.[11]

$$\epsilon = \frac{R_{obj}}{R_{bb}} \quad (2.1)$$

적외선 방사와 온도와의 관계는 플랑크(Plank)법칙에서 정립된 바와 같다. 이 법칙은 흑체방사에서 가능하며, 일반적인 물체들 즉 철, 동, 청동 스텐, 애자 등 전기기기를 구성하고 있는 주요 물체들에 대한 적외선 방사는 그 물체의 종류와 표면 상태에 따라 다르며 또한 파장과 온도에도 다르다. 이와 같이 서로 다른 방사량을 구분하는 것이 방사율(Emissivity)이다. $\epsilon=1$ 인 물체를 흑체(Blackbody)라고 하고 $\epsilon(\lambda)=\epsilon$ 의 물체를 회체(Graybody)라하며 $\epsilon(\lambda)$ 가 파장에 따라 상이하게 되는 물체를 선택 방사라 한다. Fig. 2-6은 각각의 특성에서 물체의 방사율을 나타내었다.

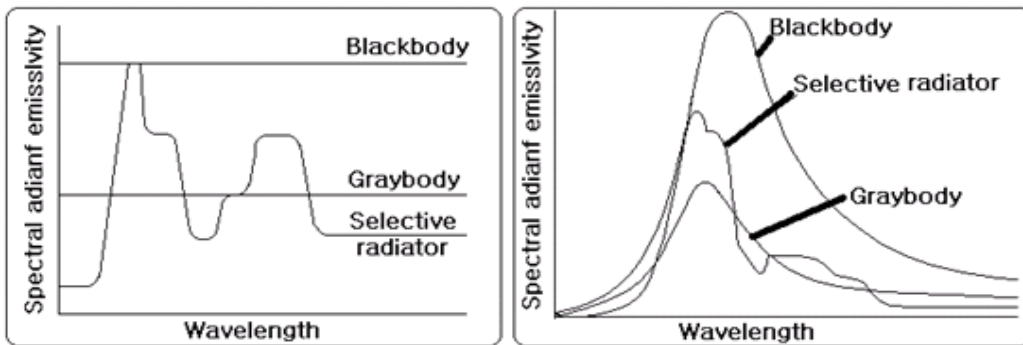


Fig. 2-6 Separation of emissivity

나. 적외선의 흡수율(방사율, Emissivity)

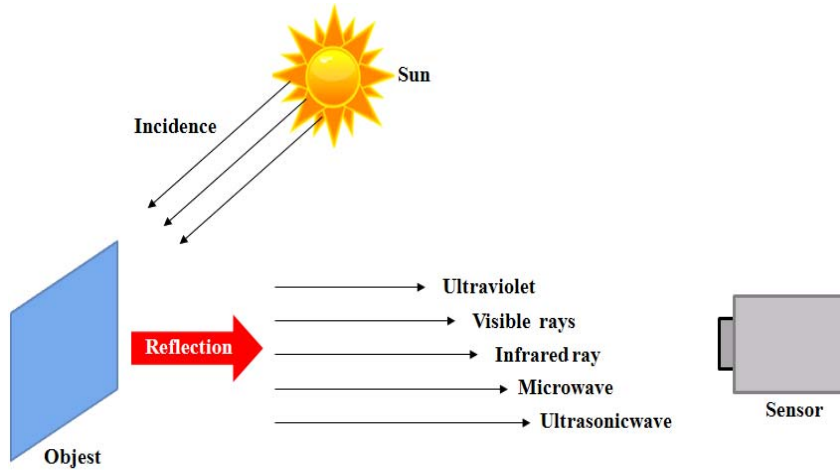
어떤 물체에 적외선이 입사하게 되면 물체의 종류, 표면 상태에 따라 반사, 흡수, 투과되는 성분이 서로 상이한 경우가 있다. 여기서 흡수되는 적외선을 ϵ (흡수율, 방사율) 투과하는 적외선 τ (투과율). 반사되는 적외선을 β (반사율)라고 하면 물체에 입사되는 적외선 성분은 $1 = \epsilon + \tau + \beta$ ($\epsilon \leq 1$)로 나타낼 수 있다. 물체가 적외선을 투과하지 않을 때는 $\tau=0$ 이 되고 $\epsilon=1-\beta$ 에서 반사율(β)을 알면 흡수율 ϵ 을 알 수 있다. 즉 방사율이 높을수록 반사율은 적게 된다. 또한 흡수율이 좋은 것은 방사체라 할 수 있다. 입사에너지=반사에너지+흡수에너지+투과에너지 로 나타낼 수 있으며 실제 물체의 경우 $0 \leq \text{방사율}(\epsilon) \leq 1$ 의 범위의 방사율을 가진다. 방사율이 높고, 투과율 및 반사율이 낮아야 적외선 온도계의 측정값이 정확하다. 즉, 방사율이 높으면 방열량이 높고 방해요인이 낮아지는 원리이다. (즉, 전도도가 낮은 물질/표면이 거친 물질에서 유리 탄소, 고무, 검정 방사 페인트는 방사율이 높고 온도측정 시 정밀하고 알루미늄, 은 등은 방사율이 낮고 온도측정이 어렵다. 이러한 금속물질의 방사율이 낮아 측정이 어려운 물질은 흑체에 가까운 무광택 스프레이($\epsilon=0.97$) 도포를 통하여 방해요인을 줄일 수 있다.

Fig. 2-7에서처럼 100℃의 물체를 적외선 카메라를 통해서 볼 때 100℃로 나타나지 않은 것은 물체의 방사율(ϵ)이 있기 때문이다. 방사율이 적게 되면 주위의 온도에 근접하게 되고 $\epsilon = 1$ 의 경우는 주위 온도 영향을 거의 받기 때문에 입사에너지가 분산되어 물체의 온도는 주위 온도와 같게 되어 간다. 또한, 일반적인 물체는 적외선을 방사하지만 Planck 복사법칙을 따르지 않고, 방사율에 의해 결정된다. 방사율은 아래 수식과 같이 흑체 복사량에 비해 얼마만큼의 복사량을 내놓는가 하는 정도이다. 즉, 방사율은 주어진 온도에서 흑체에서 나오는 방사와 물체에서 나오는 방사의 비율로 정의된다.

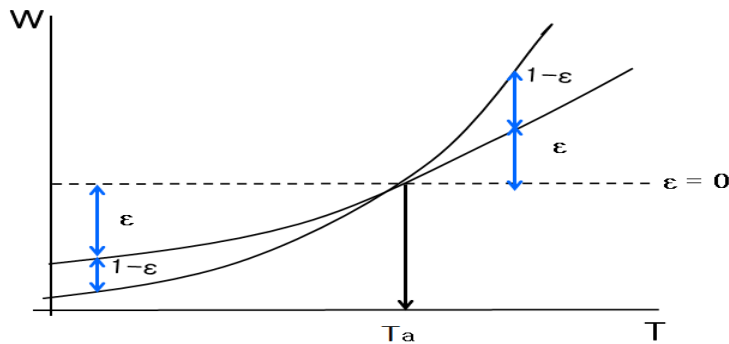
$$e(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)_{source}}{M(\lambda, T)_{Blackbody}} \quad (2.2)$$

일반적으로 방사율은 금속 물질인 경우 대부분 0.5 이하이며, 비금속 물질은 0.5 이상의 값을 가진다. 또한, 금속 물질은 온도가 올라가면 표면에 산화막이 생기기 때문에 방사율이 올라가고, 반면 비금속 물질은 온도가 올라가면 방사율이 낮아지

는 경향이 있다.



(a)



(b)

Fig. 2-7 Principle of emissivity of applied object

다. 주변 온도와 물체의 표면 온도와의 관계

표면온도가 T_s ($^{\circ}\text{C}$)인 어떤 물체가 방사하는 에너지를 주위 온도(T_a)의 보정이 없는 적외선 열화상 카메라로 촬영을 하였을 경우, 측정된 방사에너지는 물체 표면온도(T_s)가 방사하는 실제 에너지와 차이를 보이게 된다. 이는 그 물체의 방사율(ϵ)에 따라 주위 온도의 영향을 받기 때문이다. 방사율(ϵ)이 0에 가까워질수록 주위 온도(T_a)에 근접하게 되고, 방사율(ϵ)이 1에 가까워질수록 주위 온도의 영향을 작게 받아 물체 고유의 표면온도(T_s)가 방사하는 에너지를 나타내게 된다. 즉, 표면온도가 주변온도 보다 높은 경우의 적외선 열화상 카메라에 감지되는 방사에너지

는 실제 물체 표면의 방사에너지 보다 낮게 측정되며 표면온도가 주변온도 보다 낮은 경우의 적외선 열화상 카메라에 감지되는 방사에너지는 실제 물체표면의 방사에너지보다 높은 값을 보이게 된다. 따라서 상용화된 대부분의 적외선 열화상 카메라는 주위 온도의 영향을 입력된 방사율에 의하여 보정하는 방법으로 측정 대상 물체 표면의 방사에너지를 구하는 방법을 취하고 있다.

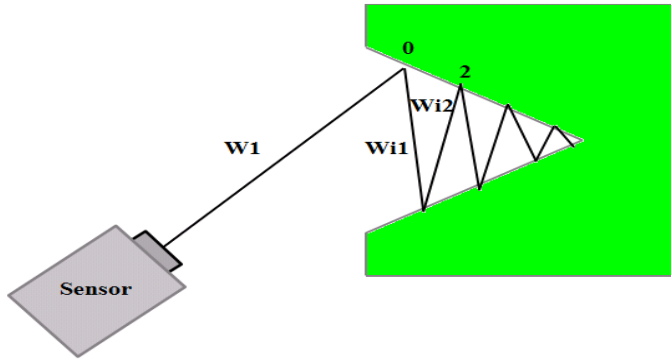


Fig. 2-8 Radiation energy of blackbody

라. 흑체의 경우($\epsilon = 1$)

$\epsilon=1$ 인 물체는 원칙적으로 존재하지 않지만 이에 근접하는 것이 흑체다. 흑체에서 방사시킨 적외선 에너지를 계산한 식(2.3)을 아래와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 W_i &= \epsilon W(T) (1 - \epsilon) W_i \\
 W_i &= \epsilon W(T) (1 - \epsilon) + \epsilon W(T) = (1 - \epsilon) W_i + \epsilon W(T) \quad (2.3) \\
 \therefore W_i &= W(T)
 \end{aligned}$$

입사된 빛이 나간 방향이 없는 형태(원주, 구)등에 있어서 입구 부분에서 방사율이 1인 흑체가 있다. 따라서 흑체는 적외선 카메라에서 온도를 검출하는 표준이 된다.

마. 구멍의 흑체 효과

주위온도 25℃ 상태에서 구멍이 폐인 흑체에 자체 가열을 사용하여 40℃로 가열하

고 전원을 제거하면 구멍 부분의 온도는 다른 부분보다 높아진다. 이는 구멍부분의 방사율이 다른 부분보다 높기 때문에 방사에너지가 크다. Fig. 2-9 (b)와 같은 물체에 외부에서 Halogen Lamp를 이용하여 100℃ 까지 가열시키면 구멍 부분의 온도는 다른 부분보다 낮다. 이는 구멍 부분의 흡수율이 낮기 때문이며 즉 방사에너지가 적다.

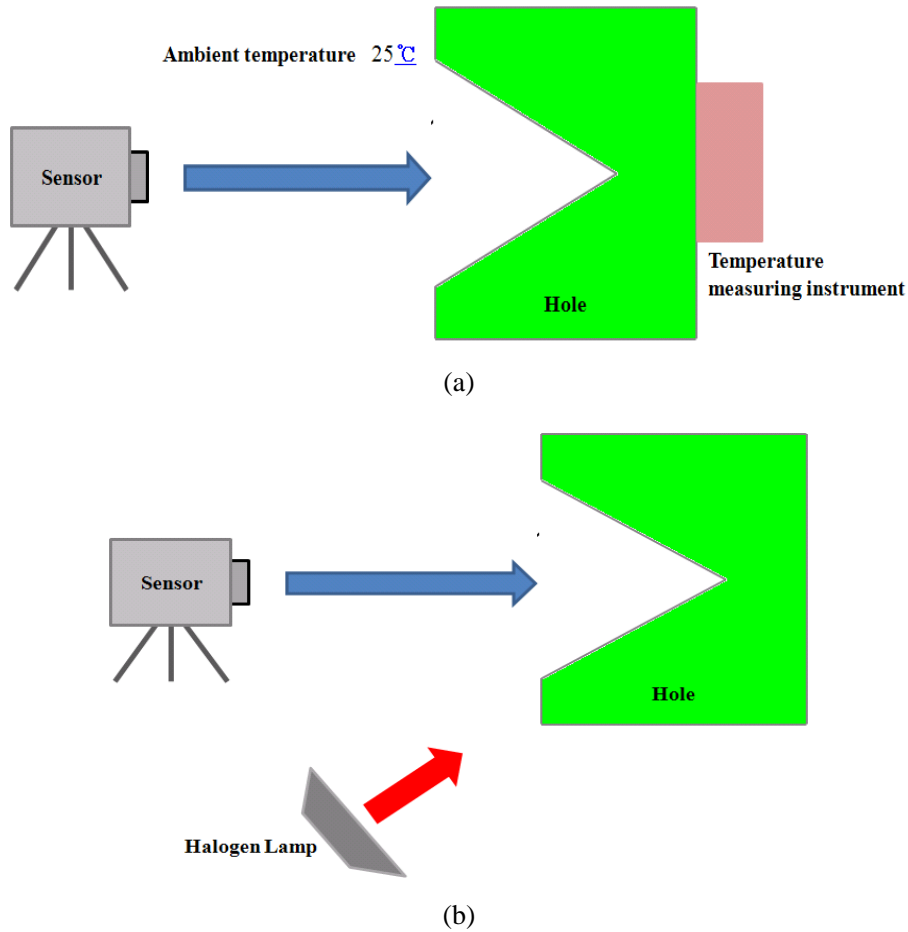


Fig. 2-9 Blackbody effect of hole

바. 투과의 영향

카메라에 입사된 에너지 W_i 는 $W_i = W_r(TO) + (1-r)W(Ta)$ 이상에 의해 적외선 카메라에 입사된 에너지 W_i 는 다음에 의해 계산되어지며 Fig 2-10은 방사율과 투과율과

의 관계를 나타낸 것이다.

$$W_i = r[\epsilon W(TO) + (1-r)W(Ta_2)] \quad (2.4)$$

$Ta = Ta_1 = Ta_2$ 의 경우, $W_i = r\epsilon W(TO) + (1-r)W(Ta)$ 이 된다.

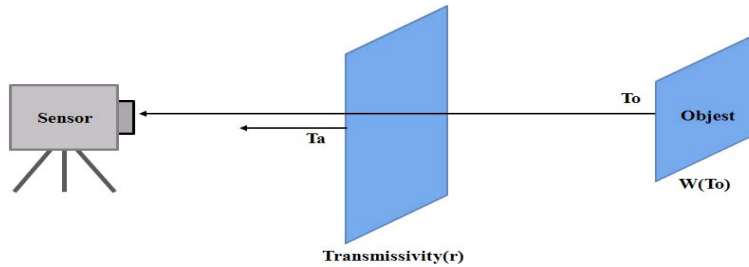


Fig. 2-10 Effect of penetration

즉, 방사율 (ϵ)과 투과율(τ)을 같이 보정하여 온도측정이 가능하다. 흑체는 완전한 흡수체로 $\epsilon = 1$ 이 됨을 이미 설명한바와 같으며 전기설비를 구성하고 있는 물질은 여러 가지로 구성되어 있으므로 그 물질에 따라서 방사율(ϵ)을 조절 하여야 한다. 하지만 적외선 열화상 장비는 현재까지 자동으로 방사율을 조절하는 장비가 아직 개발되어 있지 않아 피사체에 따라서 방사율(흡수율)을 조정하여야 한다.

제 2 절 적외선 센서의 원리 및 종류

적외선 영상 시스템에서 가장 핵심이 되는 기술을 사람 눈에 해당되는 적외선 센서의 개발이다. 적외선 센서의 재료에는 작동 원리에 따라 크게 양자형(photon)과 열형(thermal)으로 나눌 수 있다. 양자형은 주로 반도체 재료이며, 열형은 반도체 이외의 재료들이다. 반도체 재료들은 특성은 좋으나 액체 질소 온도(-193℃)에서 작동한다는 단점이 있는 반면에, 열형재료들은 성능은 반도체에 비해 다소 떨어지지만 대부분 상온에서 동작한다는 장점이 있다. 그리고 반도체 재료들은 대부분 낮은 온도에서 작동하고 열형 재료들은 상온에서 동작하기 때문에, 작동 온도에 따라 냉각형과 비 냉각형으로 구분하기도 한다. 이러한 이유로 냉각이 필요한 양자형 재료들은 주로 군수용의 목적으로 연구되고 있으며, 비 냉각형인 열형 재료들은 민수용으로 개발 중에 있다.

이러한 적외선 센서 재료들의 작동 온도 및 반응하는 적외선 파장 영역을 Fig 2-11에 요약하였다. 이 그림에서 가로축은 적외선 파장을 나타내며, 세로축은 센서의 성능을 나타내는 값으로 탐지도(detectivity ; D)라고 정의된 값이다. 이 값의 의미는 센서의 입사한 적외선을 전기적 신호로 얼마나 잘 변환시켜 주는가 하는 것과 미세한 온도 차이를 얼마나 잘 구분하는가를 표시해 주는 값이다. 그러므로 이 값이 클수록 성능이 우수한 적외선 센서이다. 그리고 Fig 2-11에 있는 두 개의 점선은 이론적으로 접근이 가능한 가장 높은 탐지도를 나타낸다. 그러나 Fig 2-11에 있는 탐지도는 단일소자에 대한 값이므로 일차원 또는 이차원 배열의 센서인 경우는 각 소자에서 나오는 신호들을 적분해서 신호처리를 하기 때문에 이론적인 값보다 높게 나온다.

반도체 재료들은 적외선에 반응하여 전기적 신호로 기여하는 전자가 내인성(intrinsic), 외인성(extrinsic), 그리고 자유전자형(free electron)인가에 따라 분류가 되며, 열형 재료들은 작동 원리에 따라 열전효과(thermoelectric), 볼로미터(bolometer), 그리고 초전효과(pyroelectric)를 이용한 재료들로 분류된다. 내인성 반도체 재료에는 PbS, PbSe, InSb, HgCdTe 등이 있으며, 외인성 반도체 재료에는 Si:In, Si:Ga, Ge:Hg 등이 있으며, 자유전자 반도체 재료에는 PtSi, Pt, Si 등이 있다. 이들의 작동 온도는 대부분 저온에서 작동하는 냉각형 재료들이다. 이러한 반도체 재료의 작동 원리는 입사한 적외선의 에너지를 흡수하여 여기된 전자(excited electron)가 신호로 기

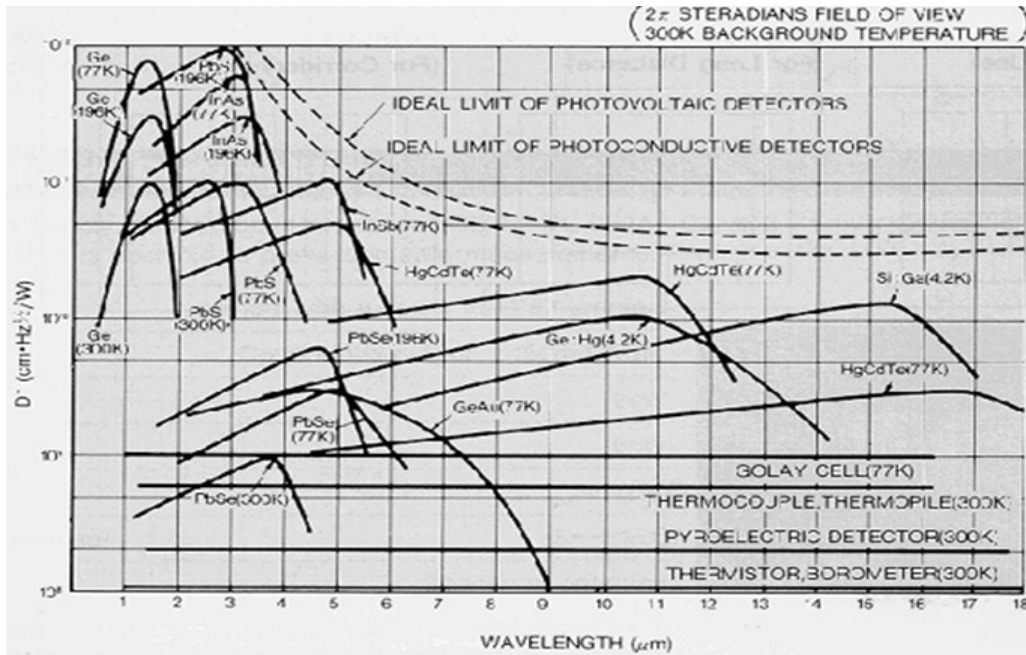


Fig. 2-11 Wave range of infrared detector to each detector material

여하는 광전도(photoconductive) 현상이다. 여기된 전자가 가전도대(valence band)에 있는 전자가 전도대(conduction band)로 천이(transition)한 경우를 내인성 반도체라 부르며, 여기된 전자가 불순물 준위(impurity level)에서 온 경우를 외인성 반도체라 한다. 그리고 가전도대 내에서 여기되거나 Schottky 장벽 효과를 이용한 경우를 자유전자형 반도체로 분류한다. 또한 소자 형태에 따라 단순한 저항 형태로 된 경우를 광전도형(photoconductive, PC) 소자라 하며, 다이오드 형태를 이룬 경우를 광기전력형(photovoltaic, PV) 소자라 부른다. 이외에도 양자 우물(quantum well) 구조를 가진 GaAs/GaAlAs 반도체는 상온에서 동작하며, 양자우물 내에 존재하는 준위들의 에너지 차이가 입사하는 적외선 에너지와 비슷하게 하여 신호를 생성하게 하는 반도체 재료이다.

열전효과는 두 종류의 금속을 접촉해 놓고, 접촉점에 열을 가하면 열에 의해 기전력의 차이가 발생하는 현상을 이용한 것으로 열전대(thermo-couple)와 이러한 열전대를 직렬로 모아 놓은 열전기터미(thermopile)가 있다. 볼로미터 효과는 입사한 적외선에 의해 재료의 온도가 상승하여 저항이 급격히 변하는 효과를 이용한 것으로 Si, Ge, V2O5, 초전도체(Superconductor) 등이 있다. 그리고 초전효과는 유전체

(dielectrics)의 양면에 금속판을 만든 후 적외선을 입사하면 내부 분극이 바뀌어 금속판의 전하량이 바뀌는 현상으로 BaSrTiO₃, PZT 등의 초전체(pyroelectrics) 등이 있다.

양자형과 열형은 각각의 장점이 있기 때문에 응용 분야에 따라서 사용하는 재료가 달라진다. 군수용처럼 가격보다는 성능 위주로 적외선을 감지하고자 하면 반드시 양자형의 재료를 사용해야 한다. 그러나 민수용은 성능보다는 가격도 고려되어야 하므로 열형 재료를 많이 사용하고 있다. 이러한 적외선 센서들은 가격 면에서 보면 수 만원에서부터 수 천만원까지 다양한 층을 이루고 있다. 그러므로 적용하고자 하는 목적을 명확하게 해야만 가격 대 성능이 우수한 적외선 센서를 채택할 수 있을 것이다.

제 3 절 위상 잠금 기법(Lock-in IRT)

위상 잠금 기법(Lock-in IRT)은 기계구조물에 있어서 열에 대한 변화로 인한 온도 변화가 미세하여 미세한 온도변화를 측정하기 위해 분해능을 높이기 위한 방법이다. 위상 잠금 적외선 열화상 기법은 Halogen Lamp, 초음파 가진기 등을 통하여 조사하여 대상체에 입사한 적외선 에너지를 동기화된 검출소자를 통해 받아들여 신호처리를 통하여 획득하고자 하는 위상, 진폭을 구하는 방법이다. 이 기법은 Fig. 2-12와 같다.

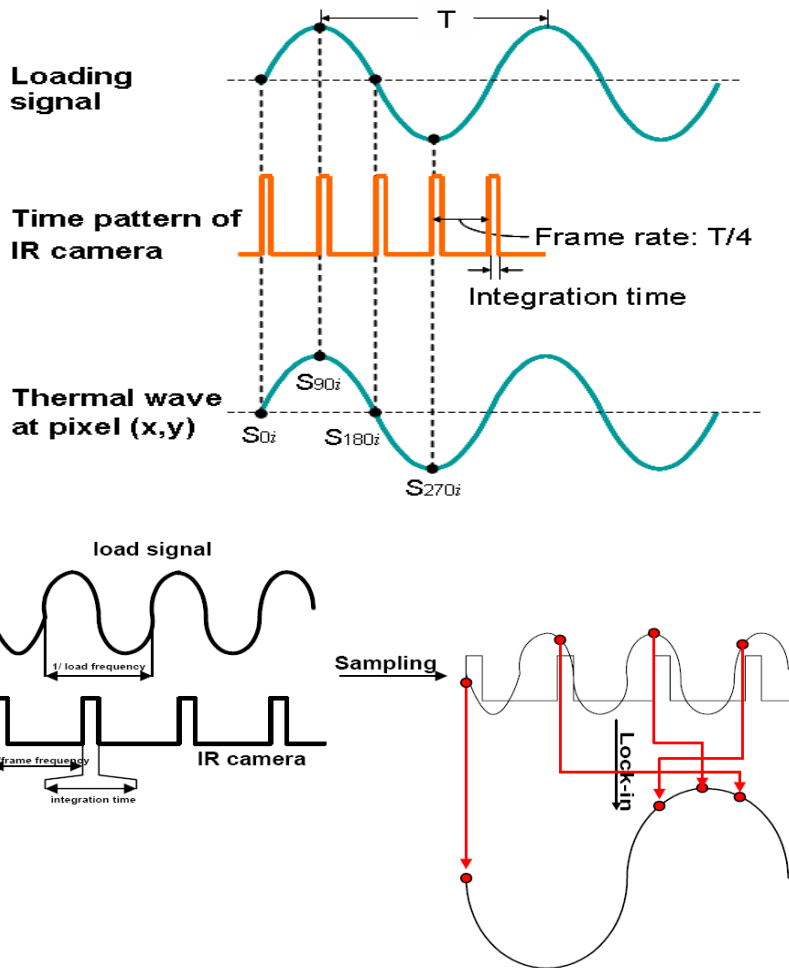


Fig. 2-12 Signal processing of lock-in infrared thermography

적외선 열영상에 있어서 가장 보편적인 열자극 방법 중 하나로 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문이며 신속한 열자극은 재료의 손상을 방지한다. 또한, 안정된 상태의 에너지를 입사할 때 각각의 프레임을 추적시켜 S/N 비가 향상되는 방법으로 하나의 주파수 신호에 에너지가 집중되며, 실시간으로 적외선 영상 측정이 가능하다. 균일한 가열과 온도로부터 독립된 상태로 위상 측정이 가능하며 초음파, 마이크로웨이브, 광학적 가열에 모두 사용할 수 있는 기술로 증폭을 통하여 깊이 침투깊이를 얻을 수 있어 모든 검사에 사용가능한 제어기법이다.

이 기술들은 식 (2.5)와 같은 고체 내의 1차원 열전도 방정식에서 자극원을 Halogen Lamp로 대상체에 조화함수($T = T_0 \cos wt$)로 가진 및 가열을 하고 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함 검출을 하게 된다.[12]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa_m}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.5)$$

여기에서 T 는 온도, t 는 시간, κ_m 는 열전도 계수, ρ 는 밀도, c_p 는 비열이다. 조화함수는 가열된 식 (2.5)의 해는 식 (2.6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T(x,t) &= T_0 e^{-x/\mu} e^{i(\omega t - x/\mu)} \\ &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) + i \sin(\omega t - x/\mu) \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기에서 침투깊이 $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$, 열확산계수 $\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p}$ 이다. 식 (2.6)의 실수부만을 고려하면 식 (2.7)과 같이 쓸 수 있다.

$$T(x,t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (2.7)$$

식 (2.7)은 $T_0 \cos \omega t$ 로 고체를 가열할 때, 깊이 x 에 따라 위상지연이 x/μ 로 일어난다는 것을 알 수 있다. 입사되는 자극원의 주파수가 증가함에 따라 침투깊이가 작아지며, 표면에서 근접한 정보만을 얻게 된다. 또한 낮은 주파수에서는 침투깊이가 증가하여 깊은 곳의 정보를 검출할 수 있게 된다.

위상 잠금 기법에서는 식 (2.7)에서는 검사 결과로서 위상을 추출함으로써 결합 검출능을 향상 시킬 수 있다. 시간평균으로 구성된 열적 분해능을 개선하고 Least mean square 방법과 단일 조건 푸리에 급수와 유사한 방법으로 Load frequency와 동기화 되어지지 않게 Frame rate를 선택하여 신호 대 잡음비를 개선한다.

$$signals(x,y) = c \sum_{i=0}^N F_i \cdot T(x,y) \quad (2.8)$$

식 (2.8)에서 C = 계수, F_i = 가중치(위상, 진폭, RMS 값, Peak to Peak 값)을 나타낸다. 이 기법은 Fig. 2-12와 같다[13].

$$\begin{aligned}
 S_1 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \\
 S_2 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi/2) \\
 S_3 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi) \\
 S_4 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2)
 \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\phi = x/\mu = \tan^{-1} \left(\frac{S_4 - S_2}{S_1 - S_3} \right) \quad (2.11)$$

$$A(x,y) = T_0 e^{-x/\mu} = \sqrt{(S_4 - S_2)^2} + \sqrt{(S_1 - S_3)^2} \quad (2.12)$$

Fig. 2-12에서 위상을 추출하기 위해 자극원과 적외선 검출소자를 동기화 하여 제어함으로서 자극원의 $\lambda/4$ 주기 간격으로 연속하는 적외선 검출신호 S_1, S_2, S_3, S_4 를 측정할 수 있다. 연속하는 신호 S_1, S_2, S_3, S_4 는 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있으며, 4개의 방정식으로부터 식 (2.11)와 식 (2.12)를 사용하여 특정화소(x,y)에서 온도변조에 대한 위상(ϕ)과 진폭(A)을 구할 수 있게 된다.

제 4 절 열 전달

1. 열전도(Heat conduction)

열전도란 열에너지가 물질의 이동을 수반하지 않고 고온부에서 저온부로 연속적으로 전달되는 현상을 말한다. 열전도는 물질의 종류에 따라 전도되는 속도가 크게 다르다. 예를 들면 구리·철과 같은 도체인 경우에는 열이 매우 빠르게 전달되지만, 황·플라스틱과 같은 절연체인 물질의 경우에는 느리게 전달된다. 또 액체·기체는 고체에 비해 열전도가 매우 느리고 그 일부에 가해진 열을 전체에 확산시키기 어렵다. 집의 창문을 보면 보통 2중창으로 되어 있는데 이는 창문과 창문 사이에 공기라는 열 절연체를 사용하기 위한 것이다. 뜨거운 냄비를 들어 올릴 때 오븐용 장갑을 사용하는 것도 오븐용 장갑이 좋은 열 절연체이기 때문이다.

이렇게 물질마다 열을 전달하는 정도가 다른 것은 각각 물질에 따라 열전도의 작용원리가 다르기 때문이다. 이것을 수치로 나타내는 것을 그 물질의 열전도도라고 하며, 두께 1cm의 물질층 양면에 1℃의 온도 차를 두었을 때, 그 층의 1cm²의 넓이를 1초 사이에 통과하는 열량을 사용한다. 일반적으로 열전도도는 온도에 따라 다소 달라지는데, 물질 종류에 따라 거의 정해진 값을 가지는 물질상수로 보아도 좋다.

금속의 열전도도와 전기전도도 사이에는 비례관계가 있으며, 1853년 G.H.비데만과 R.프란츠는 동일 온도일 때 금속의 열전도도와 전기전도도의 비는 금속 종류에 관계없이 일정한 값을 가진다는 사실을 발견하였다. 이것을 비데만-프란츠의 법칙이라고 한다.

2. 열대류(Heat convection)

대류는 유체가 부력에 의한 상하운동으로 열을 전달하는 것으로 아랫부분이 가열되면 대류에 의해 유체 전체가 골루 가열되는 것을 말한다. 열대류는 열전도가 어려운 유체의 전열 시에만 일어나는 현상이며, 자연대류와 인공적인 강제 대류로 나누어진다. 자연대류는 바다에서 수증기가 하늘로 올라가 구름이 되는 것이나 저기압에서 공기가 위로 올라가고 고기압에서는 공기가 아래로 흐르는 것을 말한다. 인공적인 대류는 그릇에 물을 넣고 끓이면 골고루 뜨거워지는 것이나 방안에 난방을 하면 그 위의 공기도 따뜻해지는 것들이 있다.

3. 열복사(Heat radiation)

열복사는 온도복사 또는 열방사라고도 하며 열복사의 세기는 물체의 종류와 온도에 따라서 결정되는데, 온도가 높을수록 커진다. 그러므로 고온인 물체 부근에 저온인 물체가 있으면 저온 물체가 복사선의 일부를 흡수하여 열로 변한다. 이 열을 복사열 또는 방사열이라 한다. 난로 등의 발열체에 손을 가까이 대면 주위 공기가 따뜻하지 않아도 손이 더워지는 것은 이 때문이다. 복사에 의한 열의 전달방식은 대류나 열전도와 달라서, 주위에 열을 중개하는 물질 없이도 빛과 동일한 속도로 순간적으로 고온체로부터 저온체로 열이 전달된다. 또 빛과 마찬가지로 반사판으로 열의 방향을 바꿀 수 있는 특성이 있다.

태양과 지구 사이의 공간이 거의 진공상태인데도 대량의 태양열이 지상에 도달하는 것은 열이 복사선의 형태로 운반되기 때문이며, 밤이 되면 물체가 점점 차가워지는 이유도 태양으로부터의 열복사 대신 지상으로부터 하늘을 향해 열이 복사되기 때문이다. 물체가 복사선을 방출하고 흡수하는 정도는 물체 온도 외에 그 표면 상태에 크게 영향을 받는다. 예를 들면, 거울과 같이 매끄러운 물체에서는 복사선 대부분이 반사되지만, 물체 표면에 검댕을 칠하면 흡수율이 95%나 되므로 복사선에 의해 열을 받기 쉽다. 또 복사선을 잘 흡수하는 물체일수록 그 자체의 복사선을 내는 작용도 강하다.

제 3 장 실험장치 및 방법

제 1 절 반사판과 시험편

1. 반사판 후보군

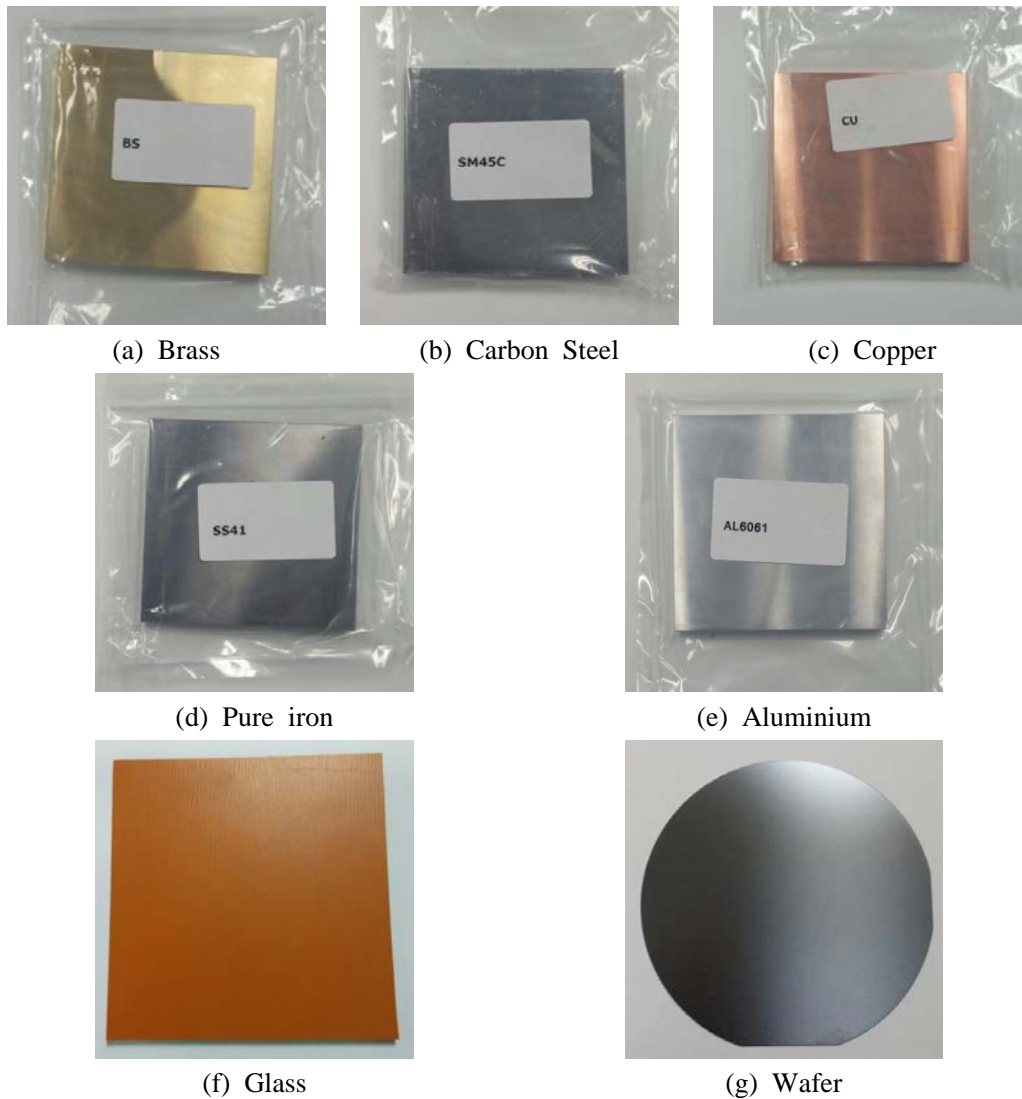


Fig. 3-1 Reflector Candidates

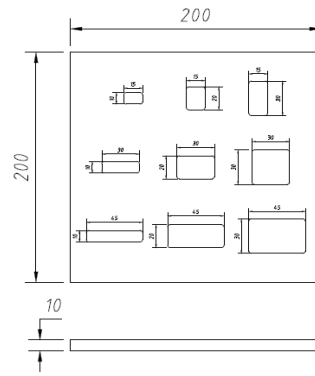
반사판의 후보군으로 현재 연구가 진행 중인 Fig. 3-1의 7가지 종류를 선정하였다. 각 반사판 후보군의 크기는 가로와 세로는 100mm이고, 두께는 10T로 제작하였고 이 후보군들의 열적 특성을 평가하여 본 연구에 사용될 적절한 반사판을 선정하였다. 각 후보군의 열전도율(k), 비열(C_p), 밀도(ρ), 체적(V) 등 물질 특성을 Table 3-1에 나타내었다.

Table 3-1 Material characteristic

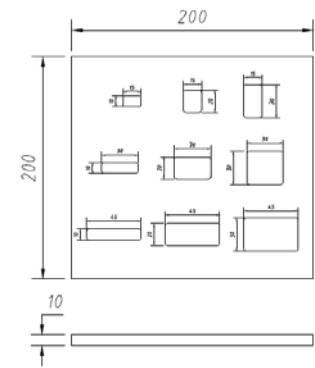
Material	Thermal conductivity (k, Kw/(m·K))	Specific heat (C_p , J/(kg·K))	Density (ρ , kg/m ³)	Volume (V, m ³)
Aluminium	0.237	898.8	2700	0.0001
Brass	0.1	382.2	8500	0.0001
Glass	0.00057	630	2500	0.00002
Copper	0.4	390.6	8900	0.0001
Carbon Steel	0.043	462	7900	0.0001
Pure iron	0.045	449.4	7800	0.0001
Wafer	0.149	705.6	2300	0.0000039

2. 평판 시험편

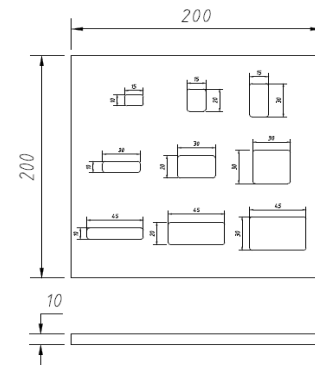
본 논문에서는 적외선 열화상 기법을 적용하여 반사판을 이용한 비가시 영역의 결함 검출 실험을 하기 위해 사용될 평판 시험편을 제작하였다. Fig. 3-2와 같이 평판 시험편 뒤에 크기가 다른 9가지 결함을 철, 스테인레스, 알루미늄 3종류로 제작하였다. 결함 깊이는 시험편 두께의 50%로 같으며, 결함 길이와 높이가 각각 다르게 하여 재질에 따른 결함을 검출할 수 있는지 확인하였다.



(a) Steel



(a) Sus

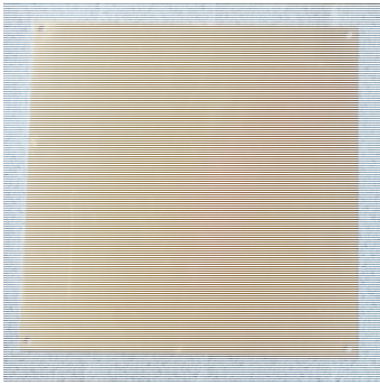


(c) Aluminium

Fig. 3-2 Flat specimen

3. 반사판과 고정지그

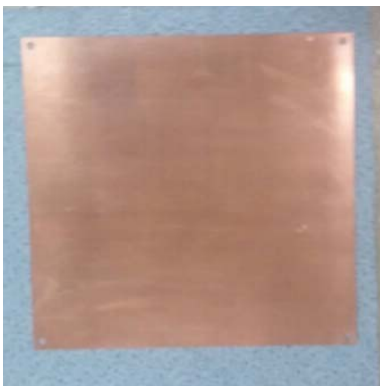
가. 반사판



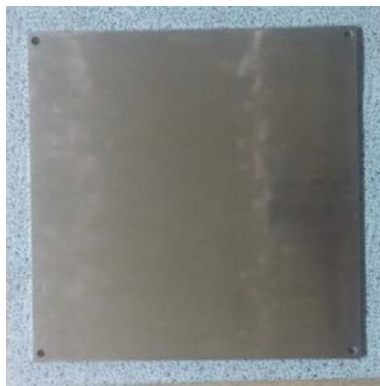
(a) Brass



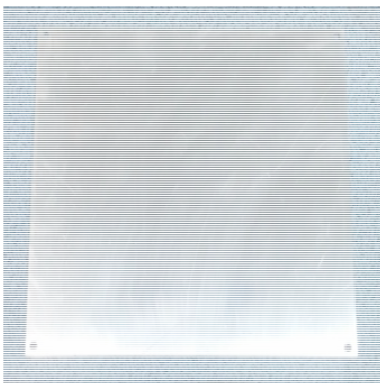
(b) Carbon Steel



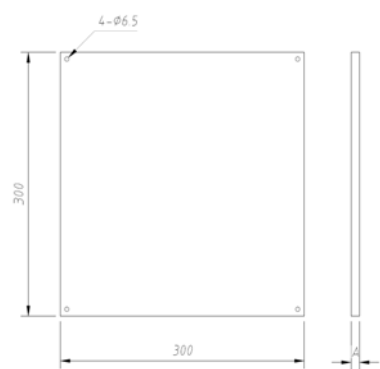
(c) Copper



(d) Pure iron



(e) Aluminium



(f) Reflector drawings

Fig. 3-3 Reflector

반사판 후보군의 측정된 온도 데이터와 열에너지를 흡수하여 단위시간당 온도변화에 대한 기울기를 분석하여 적절한 반사판을 선정하였다. 선정된 반사판은 Fig. 3-3과 같이 황동, 탄소강, 구리, 순철, 알루미늄 등 철금속류로 에너지 변화율이 높을수록 결함계측 대상체로부터 대류 또는 복사되어지는 열에너지 흡수량이 높고, 시험편의 결함을 발견 할 확률이 높을 것으로 판단되어 선정하였다.

나. 고정 지그

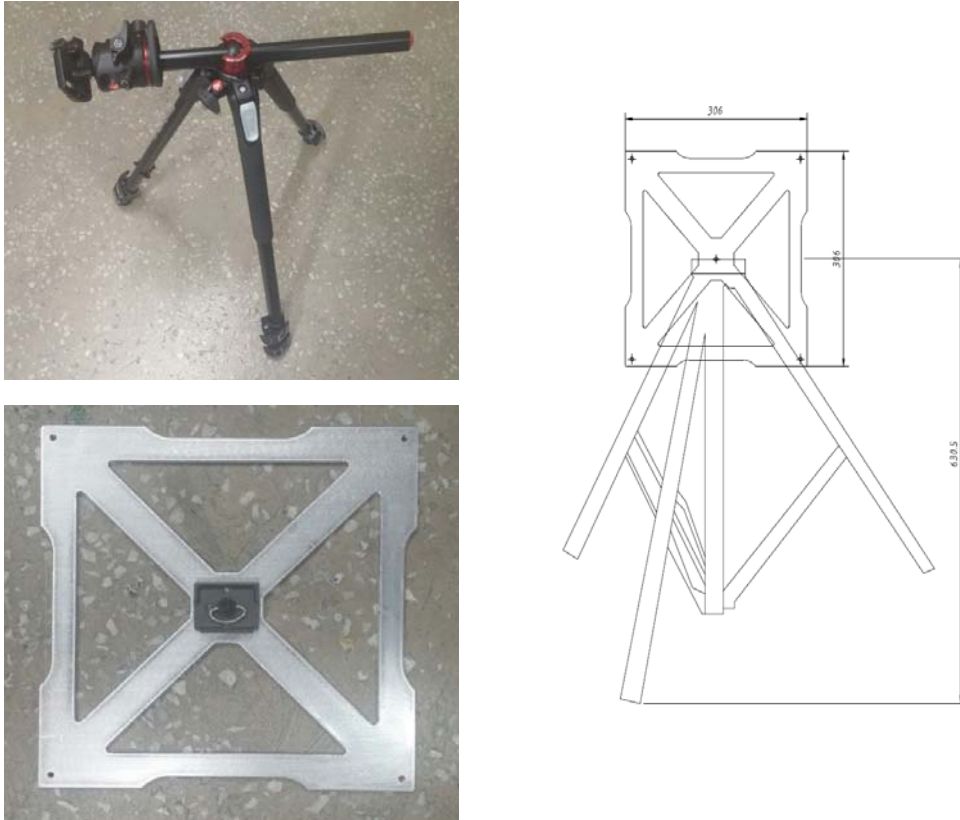


Fig. 3-4 Jig

앞서 제작된 반사판을 고정하고 세울 수 있는 고정 지그를 Fig. 3-4와 같이 제작하였다. 삼각대는 최대 높이가 1.7m까지 늘릴 수 있으며, 헤드 부분은 반사판을 4개의 모서리에서 볼트로 고정할 수 있도록 제작하였다.

제 2 절 실험장치

적외선 열화상 시스템은 열화상 이미지를 측정 및 수집하는 적외선 열화상 카메라는 Fig. 3-5와 같으며, FLIR 사의 SC5500 모델을 실험에 사용하였으며 배관 표면에 광원을 주는 Halogen Lamp와 이 Halogen Lamp의 열을 조절할 수 있는 전원제어장치(Power Supply), Halogen Lamp와 적외선 열화상 카메라를 동기화할 수 있는 함수발생기(Function generator) 및 적외선 열화상 카메라를 제어하는 컴퓨터(Control PC)로 Fig. 3-6와 같이 구성하였다.



Fig. 3-5 Infrared camera



Fig. 3-6 Infrared Thermography system(IRT)

또한, 이와 같은 장치 구성이 적외선 열화상 기법 및 위상 잠금 기법을 적용하기 위한 장치 구성이다. Table 3-2은 적외선 열화상 카메라, Table 3-3는 Halogen Lamp 에 대한 재원으로 나타내었다.

Table 3-2 Specification of infrared camera

Infrared camera(FLIR. SC5500)	
Detector Materials	InSb(안티몬화 인듐)
Cooling method	내장 스테링 쿨러(Stirling)
Spectral Response	3.7~5.0um
Number of Pixels	320*256
Pixel Pitch	30um
NETD	25mK@25℃ (20mK typical)
Temperature measure range	-15~2000℃
Digital Full Frame rate	383Hz
Frame rate resolution	1Hz Step
Integration time	10 μs to 5000 μs programmable, 1 μs step

Table 3-3 Specification of Halogen Lamp

Halogen Lamp	
Lamp	230V, Max 1kW
Max room temp.	25℃
Outside surface temp.	310℃

제 3 절 실험방법

반사판으로 사용될 후보를 선정하기 위해 후보군에 열전대(Thermocouple)를 부착하여 열적 특성을 파악한다. 각 후보군의 열전도율(k), 비열(C_p), 밀도(ρ), 체적(V)을 이용하여 단위시간당 에너지 변화율을 구한 다음 반사판 후보를 선정한다.

선정된 반사판을 이용하여 제작한 시험편의 결함을 검출한다. 일반적으로는 적외선 열화상 기법 및 위상 잠금 기법을 적용한 결함 검출에는 2가지 방법을 고려하여 볼 수 있다. 첫 번째는 결함을 포함한 대상체가 자체 발열하는 경우이며, 결함부에서 온도 차이에 의한 복사에너지 차이를 직접 측정하거나 대상체를 강제로 냉각하여 결함부와 건전부의 온도 차이를 유도하여 복사에너지 차이를 측정하여 결함을 검출하는 방법이 있다. 두 번째는 결함을 포함한 대상체가 자체 발열이 되지 않는 경우에는 외부에서 Halogen Lamp와 같은 열적으로 조사를 통하여 자극을 줌으로써 대상체가 가열되는 동안 결함부와 건전부에서 온도 편차를 유도하고, 이에 따른 복사에너지 차이를 측정하는 방법으로 나눌 수 있다. 본 실험에서 이용되는 모든 시험편은 자체 발열하지 않으므로 외부에서 최대용량이 1kW 인 Halogen Lamp 2개를 이용하여 적외선 열화상 기법 및 위상 잠금 기법을 적용하였다. 또한, 결함 검출에 위상 잠금 기법을 적용할 경우 결함에 의한 단열온도장을 검출할 수 있도록 Halogen Lamp 가열의 점멸(움직임) 등으로 피 측정물에서 면외방향의 변동하는 열류를 형성시킨다. 실험을 하기 위해서는 적외선 열화상 카메라는 온도가 평균적으로 유지가 되어야 하므로 ($23 \pm 0.5^\circ\text{C}$)와 습도가 일정한 값을 유지할 수 있도록 에어컨을 이용하여 유지하였으며, 이 때 빛의 반사를 막기 위해 방사페인트(KRYLON Ultra Flat Black)를 도포하여 시험편의 방사율을 0.97로 유지시켰다.

제 4 장 실험결과

제 1 절 반사판 선정

1. 반사판과 열원의 단위시간당 온도변화

Table 4-1에서 열원과 반사판의 단위시간당 온도변화 측정 결과에서 알 수 있듯이 열원의 단위시간당 온도변화와 가장 비슷한 결과를 나타낸 반사판은 유리로 측정되었다. 또한, 가장 큰 차이를 나타낸 반사판은 구리로 측정되었다. 이 결과로 반사판의 열전도율이 낮을수록 열원의 단위시간당 온도변화와 비슷하게 측정되는 것을 알 수 있다.

Table 4-2는 열원으로부터 조사된 열에너지를 흡수한 반사판의 단위시간당 에너지 변화율을 분석한 것이다. 단위시간당 에너지 변화율은 다음 식으로 정의하였다.

$$\dot{q} = \rho c_p \frac{dT}{dt} V \quad (4.1)$$

Table 4-1 Per unit temperature change

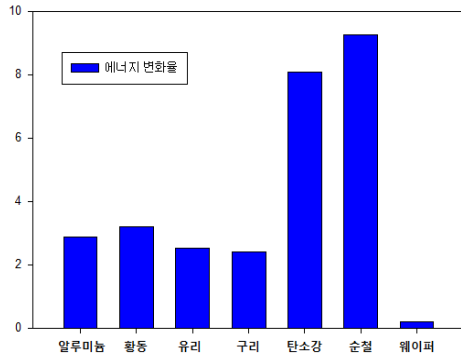
	1 Time		2 Time		3 Time	
	Halogen lamp	Reflector	Halogen lamp	Reflector	Halogen lamp	Reflector
Aluminium	0.059135	0.013462	0.054359	0.011795	0.041232	0.010427
Brass	0.073737	0.010101	0.05731	0.010526	0.043017	0.008939
Glass	0.083721	0.085465	0.074869	0.081675	0.062621	0.074757
Copper	0.065865	0.008173	0.057767	0.006796	0.046635	0.005769
Carbon Steel	0.050739	0.023645	0.052055	0.024658	0.044091	0.018182
Pure iron	0.044041	0.035751	0.041509	0.023585	0.038647	0.019807
Wafer	0.078947	0.027632	0.060366	0.035366	0.049405	0.040476

2. 에너지 변화율

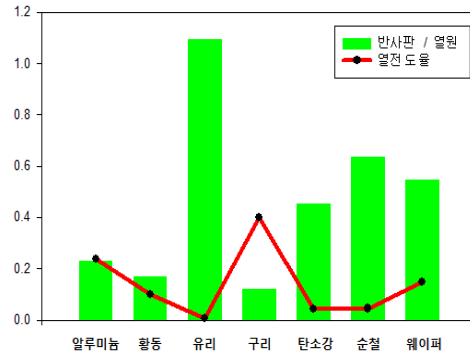
Table 4-2와 Fig. 4-1에서 보이는 바와 같이 단위시간당 에너지 변화율은 순철의 경우가 가장 높게 측정되었으며, 웨이퍼가 가장 낮게 나타났다. 철의 함량이 높은 반사판일수록 에너지 변화율이 높게 측정되었고 열원의 단위시간당 온도변화와 비슷한 경향을 나타낸 유리는 구리 다음으로 낮은 결과를 나타내었다. 또한, 단위시간당 온도변화는 열전도율이 낮은 반사판일수록 열원의 온도변화에 가까운 경향을 나타내었고, 반사판의 단위시간당 온도변화는 열원의 변화에 가까울수록 결합계측 대상체에 의한 온도 응답률도 높은 것으로 나타났다. 그리고 에너지 변화율이 높을수록 결합계측 대상체로부터 발산되어지는 에너지 흡수량이 높고 단위시간당 온도변화와 에너지 변화율에 따라 계측 대상체로부터 온도 및 열에너지 차이에 의한 결함을 발견할 확률이 높을 것으로 나타났다.

Table 4-2 Energy variation rate

Material	Thermal conductivity (k, Kw/(m·K))	Specific heat (CP, J/(kg·K))	Density (ρ, kg/m ³)	Volume (V, m ³)	Energy variation rate (\dot{q} , J/s)
Aluminium	0.237	898.8	2700	0.0001	2.886465
Brass	0.1	382.2	8500	0.0001	3.201688
Glass	0.00057	630	2500	0.00002	2.539927
Copper	0.4	390.6	8900	0.0001	2.403127
Carbon Steel	0.043	462	7900	0.0001	8.088525
Pure iron	0.045	449.4	7800	0.0001	9.247381
Wafer	0.149	705.6	2300	0.0000039	0.218303



(a) Energy variation rate



(b) Thermal conductivity and Graph

Fig. 4-1 Result graph

제 2 절 결함 검출

1. 평판 시험편

적외선 열화상 기법을 이용한 평판 시험편 결함 검출은 본 논문에서 반사판을 사용하기 전에 Reference를 하기 위한 실험으로 Fig. 4-2는 Thermal mode로 측정하여 나타낸 이미지와 Line profile graph이다. 적외선 열화상 카메라와 평판 시험편의 거리는 1m로 측정하였다. 열화상 이미지는 전체적으로 명확히 관찰되지 않았지만,

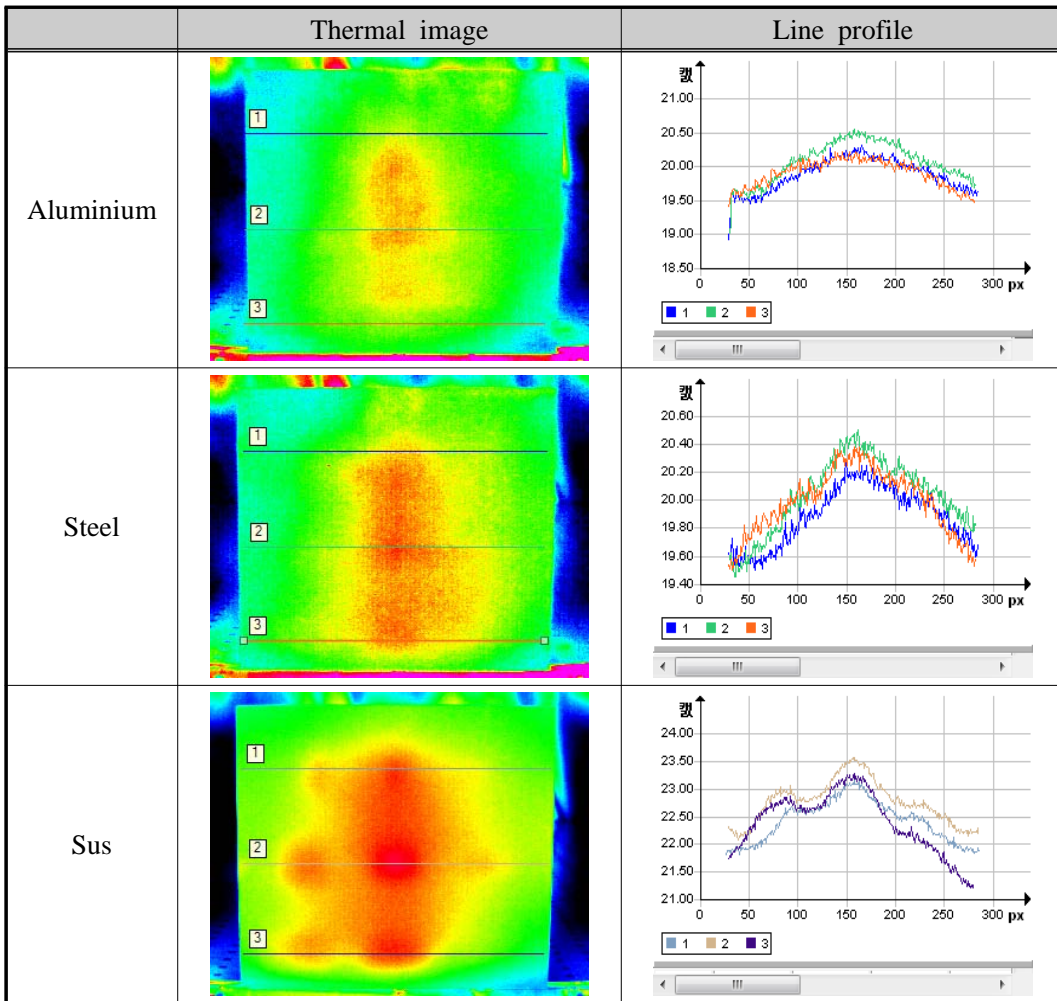


Fig. 4-2 Thermal image of Flat specimen

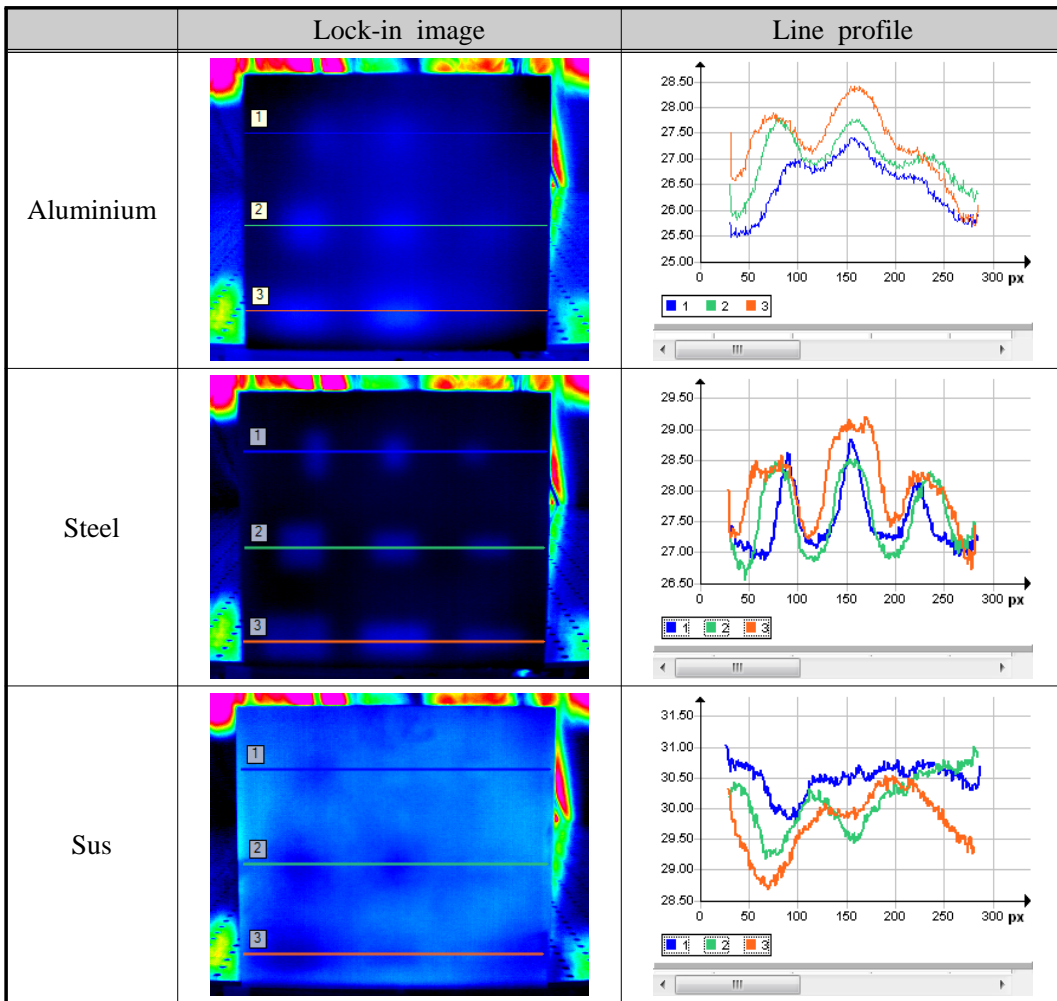


Fig. 4-3 Lock-in image of Flat specimen

스테인리스(Sus)의 결함이 흐릿하게 확인되었다. Line profile graph도 스테인리스가 결함 있는 곳에서 온도 변화가 일어나는 것을 확인 할 수 있었다.

또한, 열에 대한 변화로 인한 미세한 온도변화를 측정하기 위해 분해능을 높이기 위한 위상 잠금 기법을 사용하였을 때는 알루미늄(Aluminium), 철(Steel), 스테인레스(Sus) 중에서 철의 위상 잠금 결함 이미지가 확인되었고, 철의 결함부에서 온도 변화가 확실하게 나타나는 것이 확인되었다.

2. 반사판을 이용한 결함 검출

가. 알루미늄 반사판

Fig. 4-4에서 알루미늄 재질의 반사판을 사용하여 평판 시험편의 결함을 측정하는 결과, 열화상 이미지는 모두 뚜렷하게 나오지 않았으며, Line profile graph의 온도 변화도 결함을 검출하지 못함을 알 수 있었다.

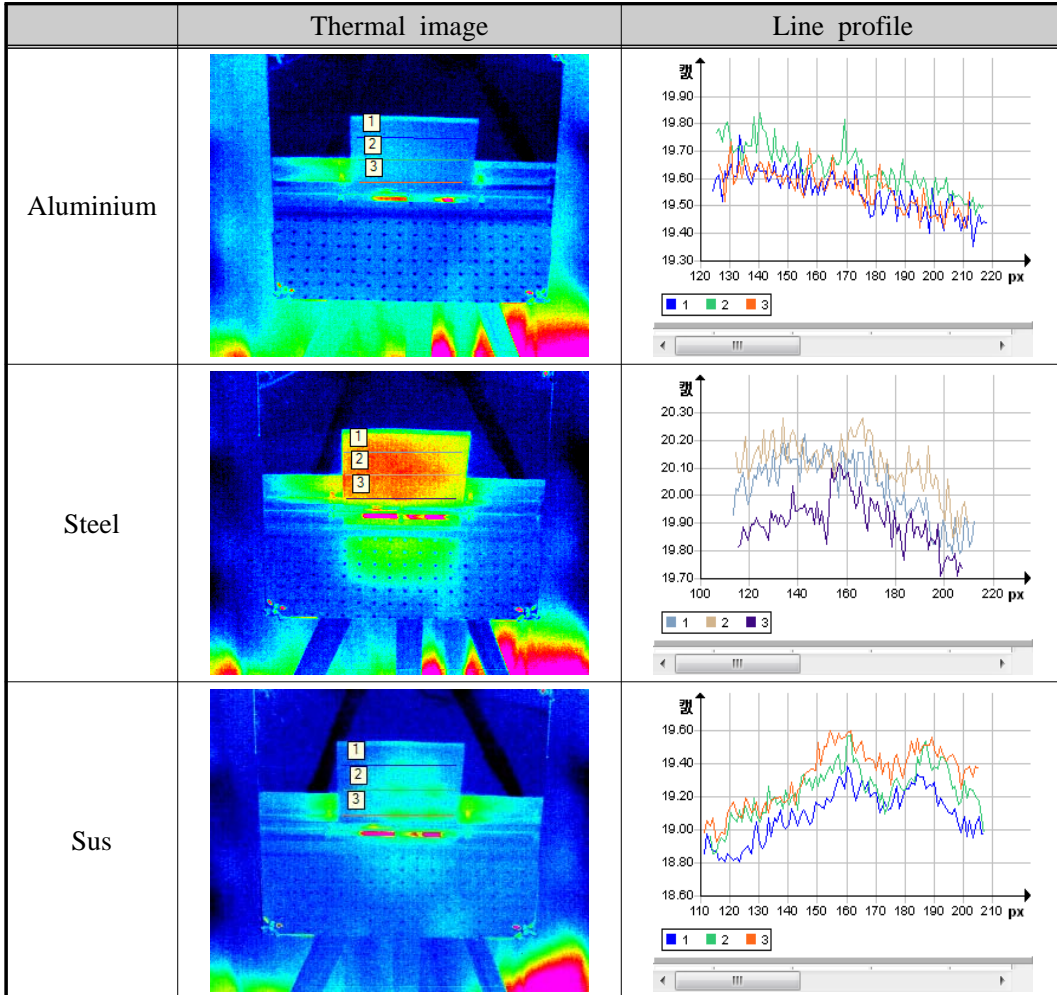


Fig. 4-4 Thermal image of Aluminium reflector

Fig. 4-5에서 알루미늄 반사판을 이용한 위상 잠금 기법 측정 결과, 위상 잠금 이미지는 철과 스테인레스에서 뚜렷하게 확인되었고, Line profile graph에서 온도변화도 철과 스테인레스에서 결함을 검출할 수 있었다.

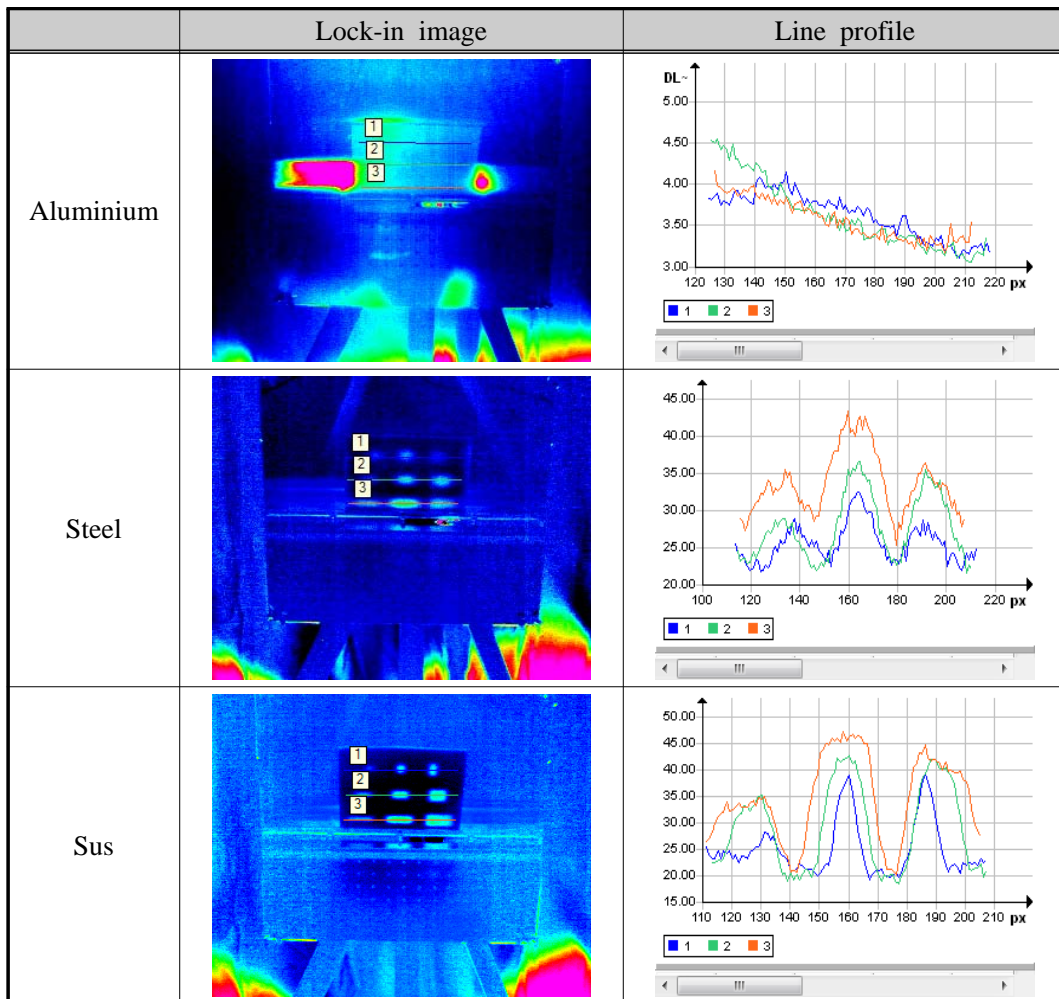


Fig. 4-5 Lock-in image of Aluminium reflector

나. 황동 반사판

Fig. 4-6에서 황동 반사판을 사용하여 평판 시험편의 결함을 측정하는 결과, 열화상 이미지의 알루미늄은 결함을 확인하지 못하였으며 철과 스테인레스에서 확인되었다. Line profile graph의 온도변화는 스테인레스에서 몇 개의 결함을 확인 할 수 있었다.

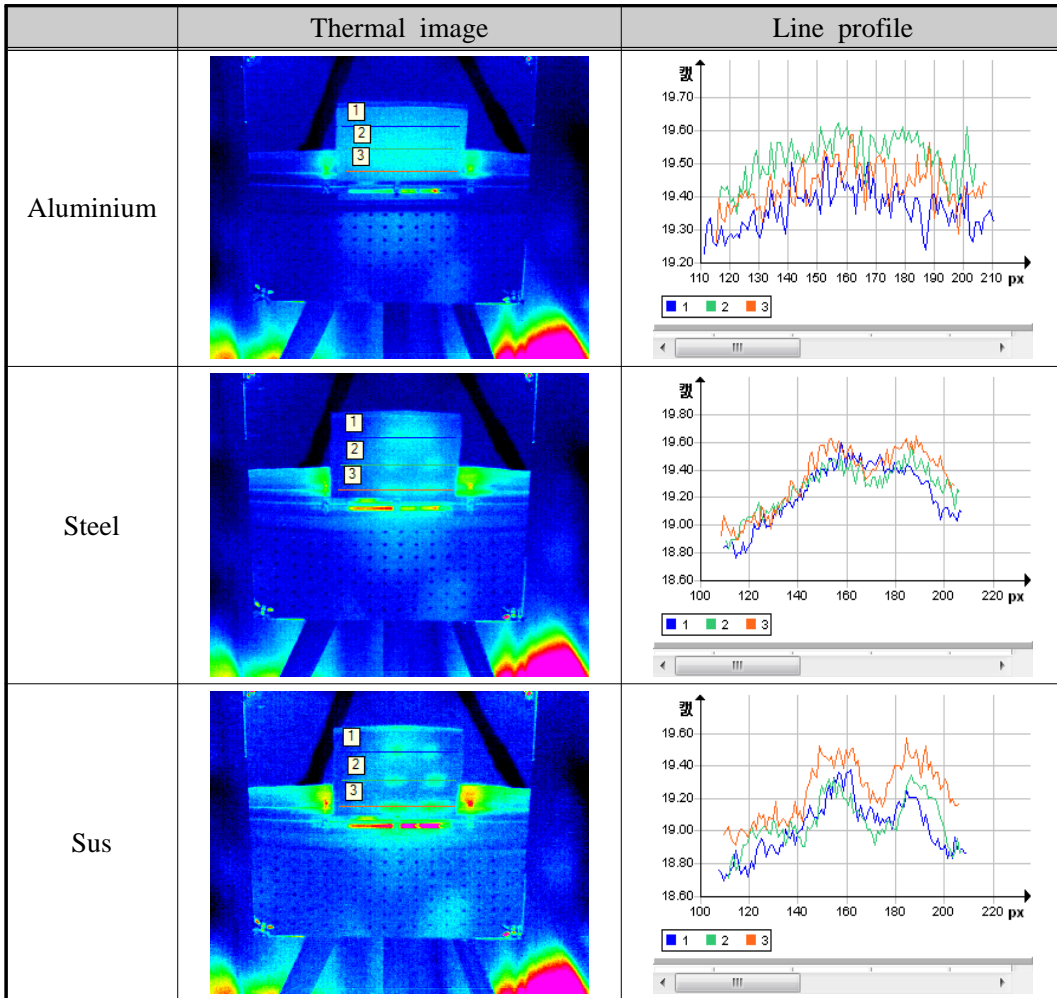


Fig. 4-6 Thermal image of Brass reflector

Fig. 4-7에서 황동 반사판을 이용한 위상 잠금 기법 측정 결과, 위상 잠금 이미지는 철과 스테인레스에서 뚜렷하게 확인되었고, Line profile graph에서 온도변화도 철과 스테인레스에서 결함을 검출할 수 있었다.

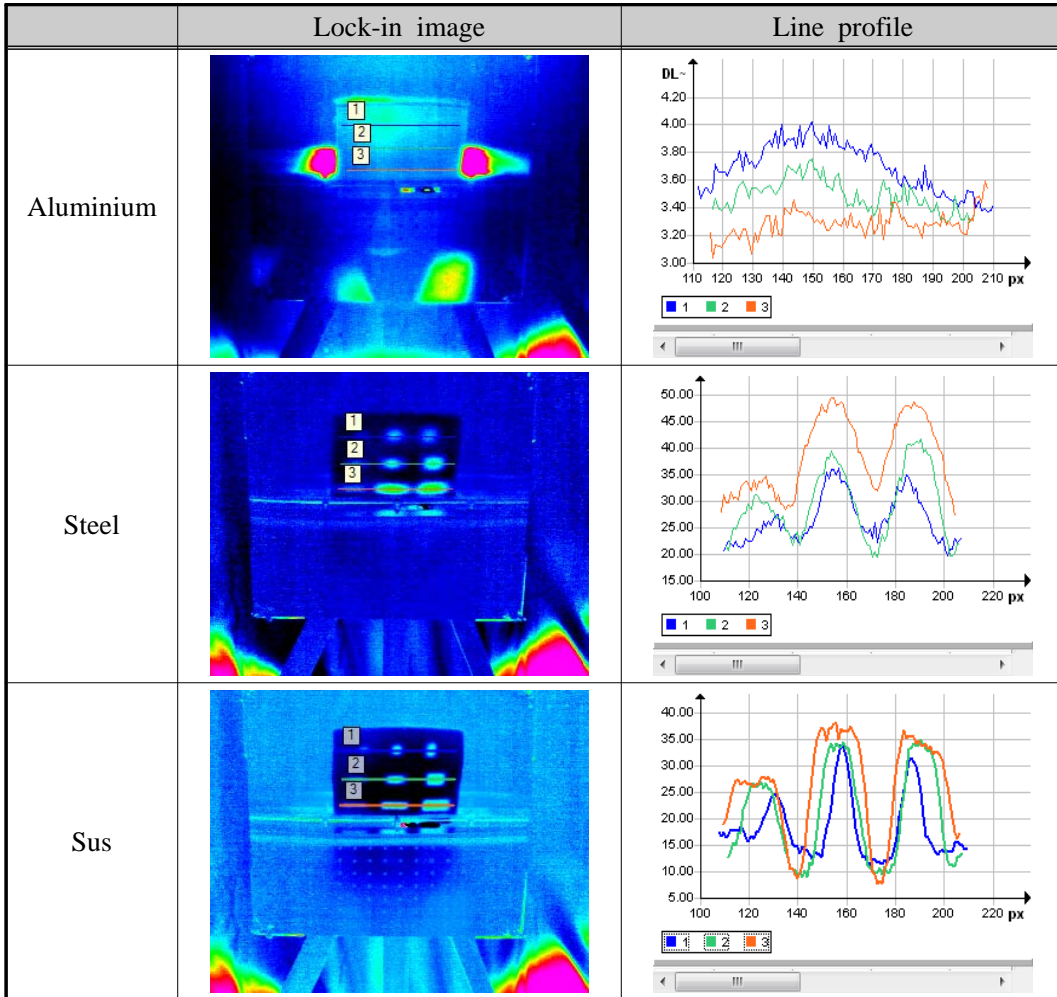


Fig. 4-7 Lock-in image of Brass reflector

다. 구리 반사판

Fig. 4-8에서 구리 반사판을 사용하여 평판 시험편의 결함을 측정 한 결과, 열화상 이미지는 모든 평판 시험편에서 결함을 확인하지 못하였다. Line profile graph의 온도변화도 결함을 확인 할 수 없었다.

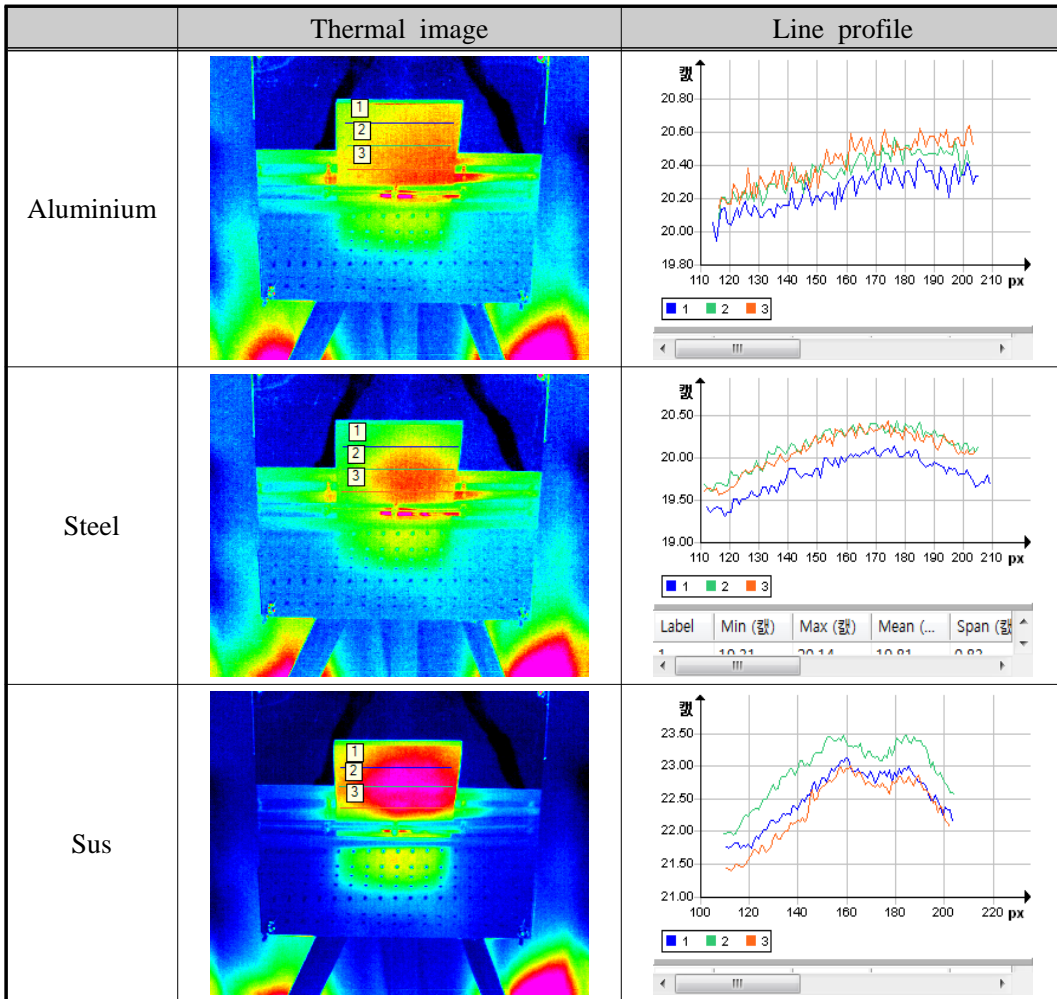


Fig. 4-8 Thermal image of Copper reflector

Fig. 4-9에서 구리 반사판을 이용한 위상 잠금 기법 측정 결과, 위상 잠금 이미지는 철은 몇 개의 결함이 흐릿하게 확인되었고 스테인레스에서는 뚜렷하게 확인되었다. Line profile graph에서 온도변화는 철과 스테인레스에서 결함을 확인 할 수 있었다.

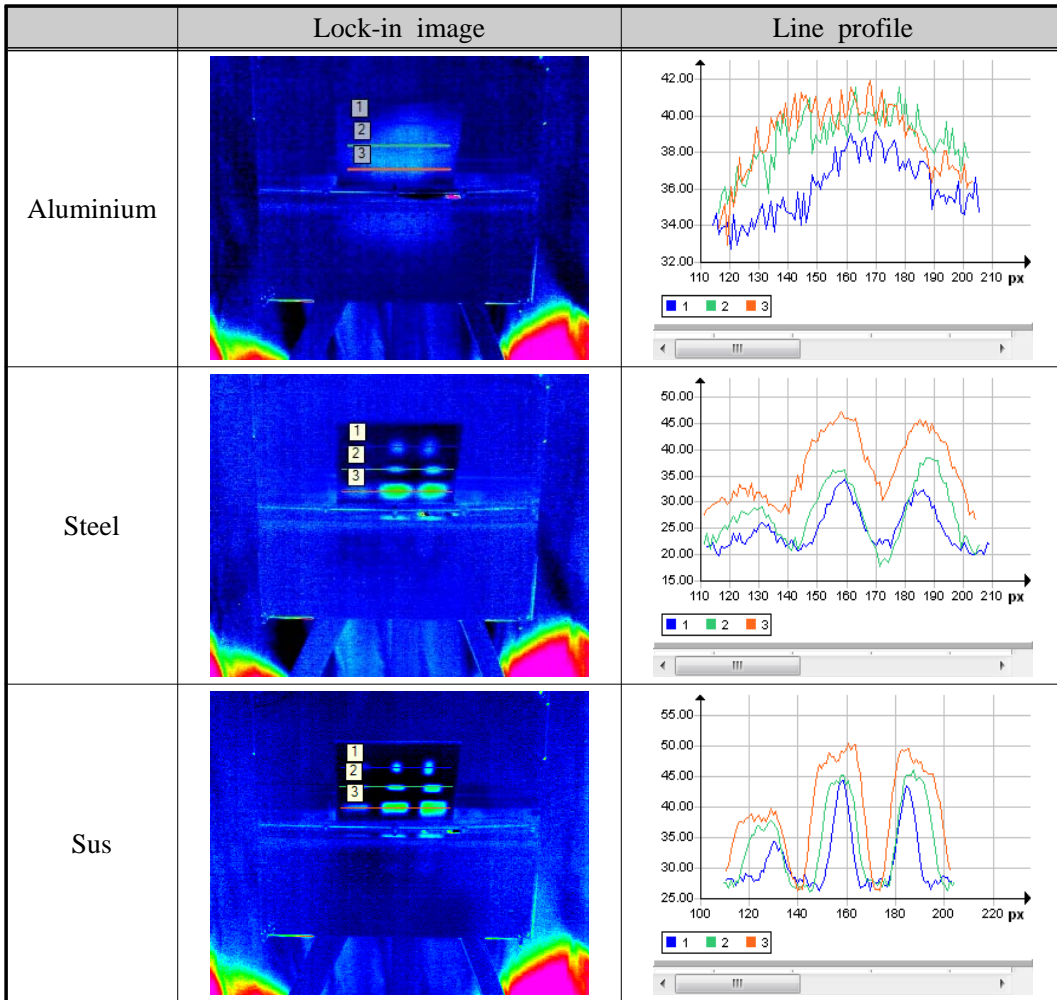


Fig. 4-9 Lock-in image of Copper reflector

라. 탄소강 반사판

Fig. 4-10에서 탄소강 반사판을 사용하여 평판 시험편의 결함을 측정된 결과, 열화상 이미지는 알루미늄과 철에서 결함을 확인하지 못하였고, 스테인레스에서 흐릿하게 확인하였다. Line profile graph의 온도변화도 스테인레스에서만 결함을 확인할 수 있었다.

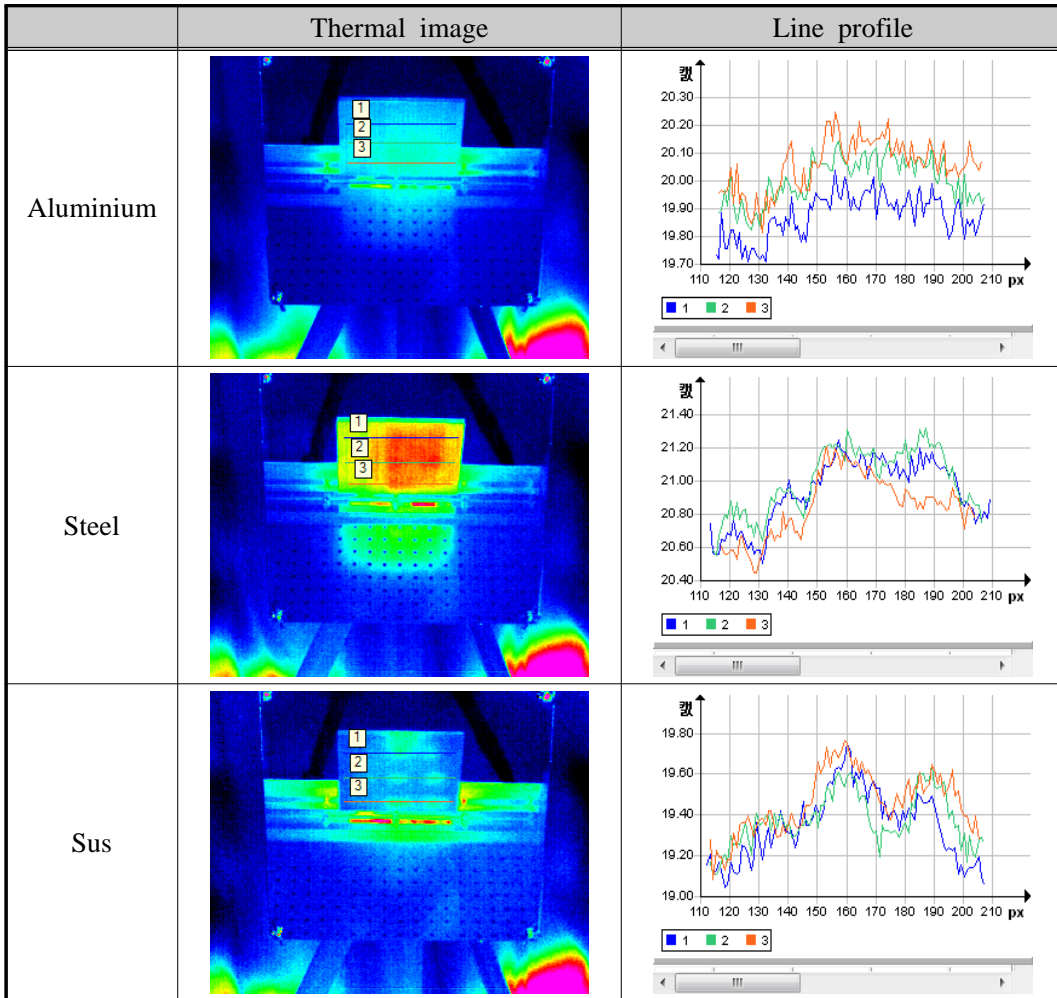


Fig. 4-10 Thermal image of Carbon Steel reflector

Fig. 4-11에서 탄소강 반사판을 이용한 위상 잠금 기법 측정 결과, 위상 잠금 이미지는 철과 스테인레스에서 결함이 확인되었고, Line profile graph에서 온도변화도 철과 스테인레스에서 결함을 확인할 수 있었다.

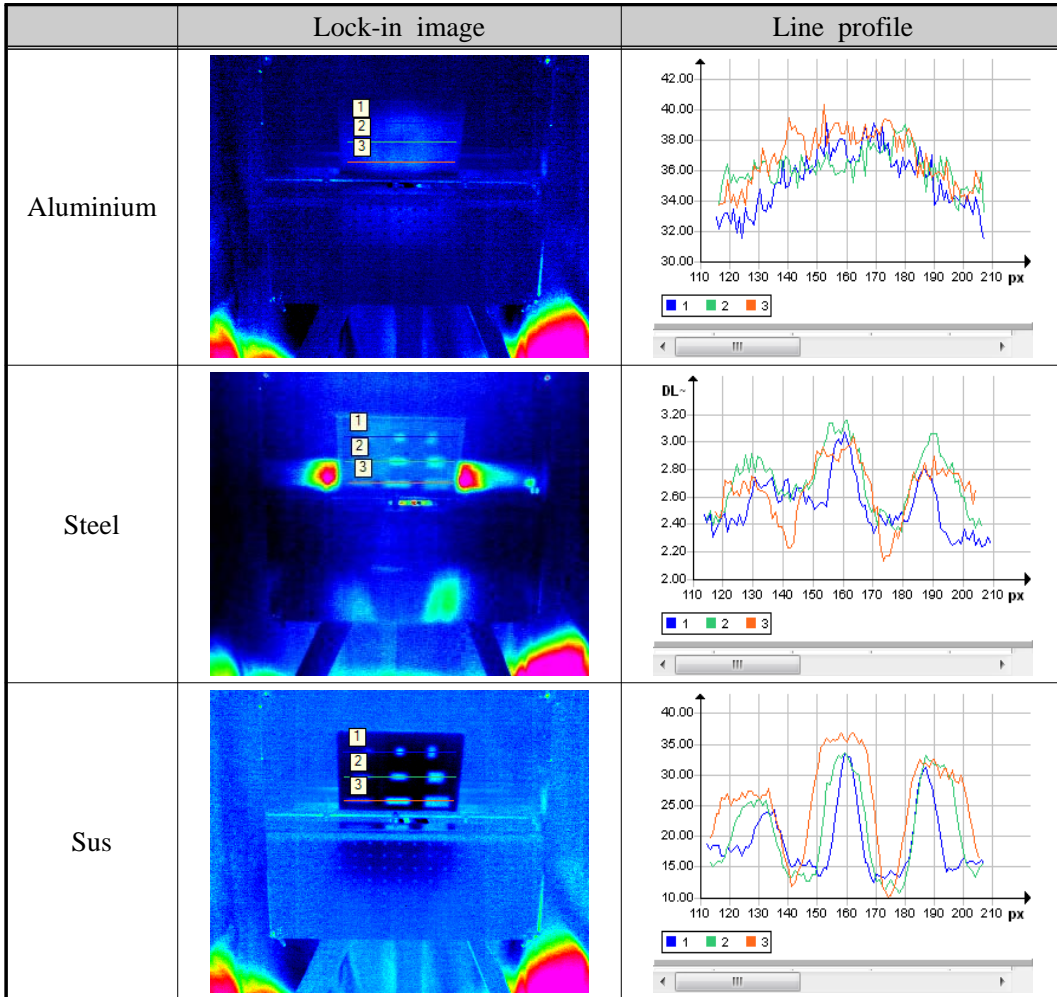


Fig. 4-11 Lock-in image of Carbon Steel reflector

마. 순철 반사판

Fig. 4-12에서 순철 반사판을 사용하여 평판 시험편의 결함을 측정하는 결과, 열화상 이미지는 모든 시험편에서 결함을 확인하지 못하였다. Line profile graph의 온도변화도 모든 시험편에서 결함을 확인 할 수 없었다.

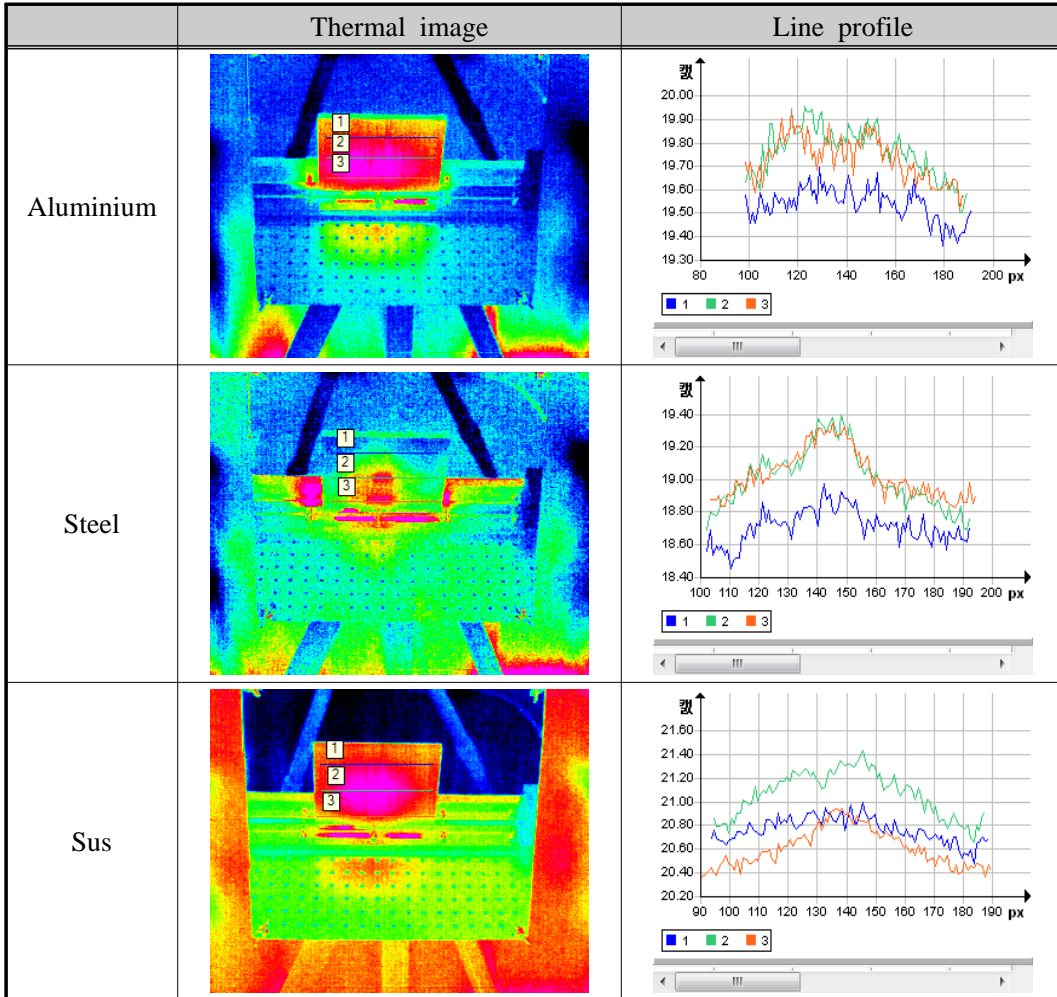


Fig. 4-12 Thermal image of Pure iron reflector

Fig. 4-13에서 순철 반사판을 이용한 위상 잠금 기법 측정 결과, 위상 잠금 이미지는 철과 스테인레스에서 몇 개의 결함이 뚜렷하게 확인되었고, Line profile graph에서 온도변화도 철과 스테인레스에서 결함을 확인할 수 있었다.

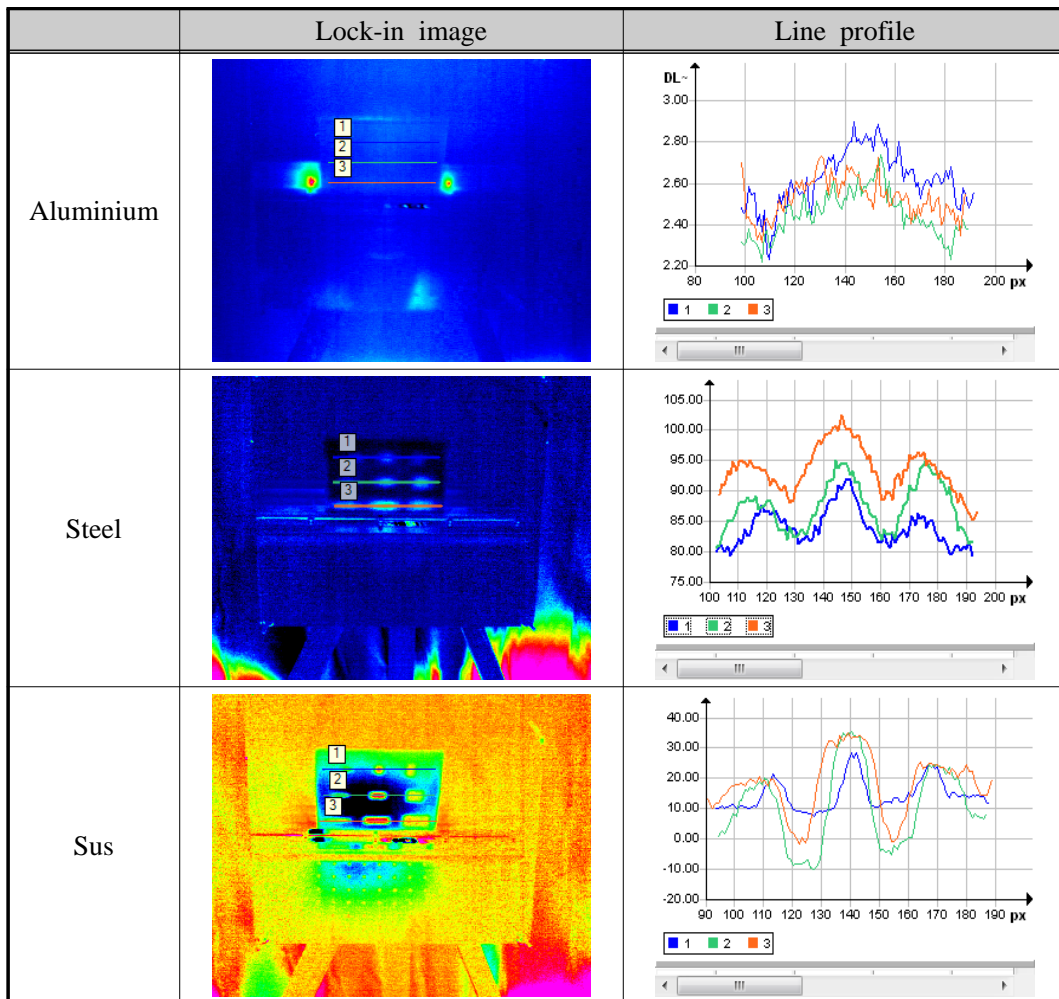


Fig. 4-13 Lock-in image of Pure iron reflector

제 5 장 결 론

본 논문에서는 첨단 비파괴 검사 분야로써 현재 널리 사용되고 있는 기술 중에 적외선 열화상 기법과 미세한 온도변화를 측정할 수 있는 위상 잠금 적외선 열화상 기법을 적용하여 비가시 영역의 결함을 검출하기 위한 조건을 파악하기 위해 평판 시험편에 다양한 결함을 제작하여 결함을 측정하였다. 실험 및 데이터 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 반사판의 에너지 변화율 분석을 통해 우리는 열원으로부터 온도 응답률이 높지만 결함계측 대상으로부터 에너지 흡수율이 낮기 때문에 반사판으로는 적합하지 않다. 또한, 열원에 의한 반사판 가열 실험으로부터 온도변화와 에너지 변화에 대하여 순철, 알루미늄, 황동, 탄소강 등 금속재질이 반사판으로서 활용도가 높을 것으로 판단된다.

(2) 평판 시험편의 결함 깊이가 모두 같을 지라도 중앙 부분이 뚜렷이 높은 온도를 보였다. 이러한 온도 차이는 Halogen Lamp를 이용하여 시험편을 가열하는 경우에 전체적으로 균일하게 가열되지 못하기 때문으로 시험편의 표면에서 온도 불균일성이 심화되는 것으로 판단된다. 따라서 이를 개선하기 위해서는 평판 시험편의 결함 검출에 적합한 새로운 형태의 가열 방법 개발 및 온도 보정 알고리즘이 필요하다는 것을 확인 할 수 있다.

(3) 알루미늄 평판 시험편의 경우에 반사판의 재질에 관계없이 적외선 열화상 기법과 위상 잠금 열화상 기법 모두 결함을 검출하지 못하였다. 철 재질의 평판 시험편의 경우에는 적외선 열화상 기법으로 뚜렷하게 결함을 확인하지는 못하였으나, 위상 잠금 기법으로는 결함을 모두 확인하였다. 스테인레스 평판 시험편의 경우에도 적외선 열화상 기법으로 뚜렷하게 결함을 확인하지는 못하였으나, 위상 잠금 기법으로는 결함을 모두 확인하였다.

(4) 반사판을 이용하여 위상 잠금 기법을 이용한 실험결과, 적외선 열화상 기법과 확인한 차이의 결과로 결함이 검출되었다. 위상 잠금 기법이 적외선 열화상 측정결

과보다 결함의 상에 대한 선명도가 높아 일부 결함들은 실제 결함과 유사하고 명확한 형태와 크기를 보였으며 그 외 결함들도 더 선명하며 또렷하게 검출되었다. 이렇듯 대상체의 온도 변화만을 관찰하고 그것을 후처리하는 방법이 갖고 있는 한계를 극복하기 위한 방법으로 Lock-in 기법을 활용한 방법을 사용하게 되면 좀 더 정밀한 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Maldague. X., "Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography", London: Springer-Verlag, 1993.
- [2] Hung, Y.Y.. "Speckle-shearing interferometric technique: A full-fields strain gauge," Applied Optics Vol. 14, pp. 618-622, 1975.
- [3] Hung, Y.Y.. "Digital shearography versus TV-holography non-destructive valuation," J Opt Lasers Eng, 1997.
- [4] A. Vageswar, K. Balasubramanian, C.V. Krishnamurthy, T. Jayakumar, B. Raj, "Periscope infrared thermography for local wall thinning in tubes," NDT&E International, Vol.42, pp.275-282, 2009.
- [5] K. J. Lee, H. S. Jang, H. C. Jung and K. S. Kim, "Quantitative out-of-plane deformation measurement of pressure vessel with the defect using shearography," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 10, pp. 36-42, 2006.
- [6] 김경석, 장호섭, 홍동표, 박찬주, 나성원, 김경수, 정현철, "적외선 열화상을 이용한 원자력발전소 감육 배관의 결함 검출," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 30, No. 2, pp. 85-90, 2010.
- [7] G. Shen and T. Li, "Infrared thermography for high-temperature pressure pipe," Insight, Vol.49, pp.151-153, 2007.
- [8] X. P. V. Maldague, "Infrared methodology and technology", Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1994.
- [9] 전북대학교, "비접촉 레이저 응용 검사기술을 이용한 원자력기기의 신뢰성 향상 기술 개발", 원자력연구개발 사업 연구 보고서, 2008.
- [10] W. Bich, "Newton's laws, Plank's principle, and metrology in chemistry," Accreditation and Quality Assurance, Vol. 11, No. 12, pp.638-639, 1993.
- [11] V. P. Vavilov, X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., "Infrared and thermal testing: heat transfer," Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed), pp. 54-86, 2001.
- [12] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," Journal of Applied Physics, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965, 1992.

- [13] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gin. Therm.*, Vol. 37, pp.693-703, 1998.
- [14] 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석, "위상잠금 광-적외선 열화상을 이용한 내부결함의 위치 및 크기 평가," *비파괴검사학회지*, Vol.27, No. 4, pp. 321-327, 2007.
- [15] X. P. V. Maldague, Rastogi P.K., Inaudi D, editors, "Trends in optical nondestructive testing and inspection," Elsevier Science, Switzerland, pp. 591-633, 2000.
- [16] 박은수, 박익근, 송성진, "비파괴평가 공학", 학연사, pp. 7-10, 2001.
- [17] 심찬구, "비파괴검사·시험의 기술진흥을 위한 제언," *한국비파괴검사협회 춘계학술대회 논문집*, pp.3-13, 2001.
- [18] 이해동, "적외선 열화상 카메라를 이용한 열 측정 이론," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, vol. 17, No. 3, pp. 31-34, 2007
- [19] P. O. Moore., "Nondestructive Testing Handbook," *Infrared and Thermal Testing*, ASNT, Vol. 3, 3rd ed., pp. 223-246, 2001.
- [20] T. Inagaki, T. Ishii and, T. Iwamoto, "On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography," *Nondestructive Testing and E International*, Vol. 32, No. 5, pp. 247-257, 1999.
- [21] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gin. Therm.*, Vol. 37, pp.693-703, 1998.
- [22] G. Busse, X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., "Infrared and thermal testing: technique of infrared thermography", *Nondestructive Testing Handbook Series III(3rd Ed ASNT*, Columbus, USA, pp.318-328, 2001.
- [23] 박희상, 최만용, 박정학, 김원태, 최원중, "적외선 열화상 기술을 이용한 복합재료의 결함 검출 정량화 연구", *비파괴검사학회지*, Vol. 31, No. 2, pp.150-156, 2011.

저작물 이용 허락서

학 과	기계시스템공학	학 번	20147100	과 정	석사
성 명	한글: 강 성 훈 한문: 姜 成 訓 영문: Kang, Sung Hoon				
주 소	광주광역시 광산구 소촌동 모아드림아파트 2차 201동 606호				
연락처	E-MAIL : afterdodo@naver.com H.P : 010-5193-4147				
논문제목	한글 : 위상잠금 적외선 열화상 기술을 이용한 반사판에 따른 비가시 영역의 결함 측정 조건 평가 영문 : Evaluation of defect measurement in accordance with reflector for measuring invisible area using an Lock-in IRT				

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 의사표시가 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()

2015 년 11 월 30 일

저작자: 강 성 훈 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하