



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](#)

2018년 8월

박사학위논문

위상잠금 적외선 열화상 기술을  
이용한 감육 결함의 최적화 측정에  
관한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템미래자동차공학과

김 상 채

위상잠금 적외선 열화상 기술을  
이용한 감육 결함의 최적화 측정에  
관한 연구

A study on the optimal measurement of wall thinning  
defect using lock-in infrared thermography

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

기계시스템미래자동차공학과

김 상 채

위상잠금 적외선 열화상 기술을  
이용한 감육 결함의 최적화 측정에  
관한 연구

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2018년 4월

조선대학교 대학원

기계시스템미래자동차공학과

김 상 채

# 김상채의 박사학위 논문을 인준함

,

위원장	조선대학교	명예교수	양인영	(인)
위원	조선대학교	교수	김경석	(인)
위원	조선대학교	교수	김재열	(인)
위원	조선대학교	교수	정현철	(인)
위원	포항공과대학교	교수	홍정기	(인)

2018년 6월

조선대학교대학원

## 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	vii
Abstract .....	viii
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구목적 .....	3
제 3 절 연구동향 .....	4
1. 증적외선 .....	4
2. 장적외선 .....	13
제 2 장 이론적 배경 .....	14
제 1 절 적외선 .....	14
제 2 절 흑체와 방사율 .....	19
1. 방사율(Blackbody) .....	19
2. 적외선의 흡수율(방사율, Emissivity) .....	21
제 3 절 Planck's Law .....	27
제 4 절 Stefan-Boltzmann's Law .....	28
제 5 절 적외선 열화상 카메라 .....	29
제 6 절 위상잠금 적외선열화상 기술 .....	32
제 7 절 적외선 센서 기술 .....	36
제 8 절 적외선 열화상 측정 기법 .....	40
1. 수동적 열화상 검사 .....	42
2. 능동적 열화상 검사 .....	43

제 3 장 가열 실험장치 설계 및 개발 .....	45
제 1 절 가열장치(할로겐램프) .....	45
1. 기존 상용 할로겐 램프 .....	45
2. 가열장치 개발 .....	46
3. 가열장치 최적 설계 .....	49
제 2 절 적외선 열화상 프로그램 개발 .....	52
제 4 장 감육 결합 측정 실험 방법 .....	62
제 1 절 결합시험편 .....	62
제 2 절 실험장치 .....	67
제 3 절 실험방법 .....	69
제 5 장 감육 결합 측정 실험 결과 및 고찰 .....	71
제 1 절 위상잠금을 이용한 가열 실험 결과 이미지 .....	71
제 2 절 위상잠금을 이용한 가열 실험 프로파일 결과 .....	80
제 6 장 결론 .....	93
참고 문헌 .....	95

## LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Comparison of light intensities for several MW infrared light sources passed through 10um pinholes .....	6
Fig. 1-2 Detectivity of various detectors according to wavelength .....	7
Fig. 1-3 Application of MW infrared spectroscopy according to wavelength .....	8
Fig. 1-4 Classification according to technology and wavelength range of MW infrared light source .....	9
Fig. 1-5 Structure and wavelength variable characteristics of wavelength variable QCL .....	12
Fig. 2-1 Spectrum of electromagnetic waves .....	14
Fig. 2-2 Relationship between black body and temperature .....	16
Fig. 2-3 Emissivity .....	20
Fig. 2-4 The emissivity principle of the object .....	22
Fig. 2-5 Radiation energy of blackbody .....	23
Fig. 2-6 Blackbody effect of hole .....	25
Fig. 2-7 Penetration effect .....	26
Fig. 2-8 Infrared thermography principle .....	29
Fig. 2-9 Calculation principle of phase, amplitude, lock-in infrared thermography image .....	34
Fig. 2-10 IR camera with added scanning element for imaging .....	37
Fig. 2-11 IR inspection technique .....	40
Fig. 2-12 Infrared thermography method .....	41
Fig. 2-13 Passive Infrared thermography method .....	42
Fig. 2-14 Active Infrared thermography method .....	43



Fig. 3-1 Commercial heating device(Philips PAR 64) .....	46
Fig. 3-2 Developed heating device .....	48
Fig. 3-3 Comparison of illuminance and irradiation range of commercial heating device and developed heating device .....	48
Fig. 3-4 Load condition of heat source according to existence of defects .....	50
Fig. 3-5 Heating device with cylindrical lens .....	50
Fig. 3-6 Variation of light distribution by cylindrical lens .....	51
Fig. 3-7 Supplied library .....	52
Fig. 3-8 Developed Nondestructive Inspection Program .....	52
Fig. 3-9 Program Structure .....	53
Fig. 3-10 Pre-Run Setting algorithms and Screen Images .....	54
Fig. 3-11 Menu image of show Configuration .....	55
Fig. 3-12 Menu image of show Tool .....	56
Fig. 3-13 Line profile execution image .....	56
Fig. 3-14 Real-time temperature distribution run image for Rectangle area .....	57
Fig. 3-15 Labview algorithm image(Camera focus control) .....	57
Fig. 3-16 Temperature profile measurement algorithm .....	58
Fig. 3-17 Measurement part program execution image .....	58
Fig. 3-18 Image save, load program Run image .....	58
Fig. 3-19 Labview algorithm image(Save Image) .....	59
Fig. 3-20 Labview algorithm image(Import image) .....	59
Fig. 3-21 Labview algorithm image(2D, 3D screen Display) .....	60
Fig. 3-22 Overall block diagram of the operating program .....	60
Fig. 3-23 Saved strength data as a Data file .....	61
Fig. 4-1 Wall thinning defect specimen(5 mm, 50 %) .....	63
Fig. 4-2 Wall thinning defect specimen(5 mm, 75 %) .....	64

Fig. 4-3 Wall thinning defect specimen(10 mm, 50 %)	65
Fig. 4-4 Wall thinning defect specimen(10 mm, 75 %)	66
Fig. 4-5 Mid wavelength Infrared camera	67
Fig. 4-6 Long wavelength Infrared camera	68
Fig. 4-7 Experimental configuration with a mid wavelength infrared camera	69
Fig. 4-8 Experimental configuration with a long wavelength infrared camera	70
Fig. 5-1 Image results of specimen using mid wavelength infrared camera (5 mm, 50 %)	72
Fig. 5-2 Image results of specimen using mid wavelength infrared camera (5 mm, 75 %)	73
Fig. 5-3 Image results of specimen using mid wavelength infrared camera (10 mm, 50 %)	74
Fig. 5-4 Image results of specimen using mid wavelength infrared camera (10 mm, 75 %)	75
Fig. 5-5 Image results of specimen using long wavelength infrared camera (5 mm, 50 %)	76
Fig. 5-6 Image results of specimen using long wavelength infrared camera (5 mm, 75 %)	77
Fig. 5-7 Image results of specimen using long wavelength infrared camera (10 mm, 50 %)	78
Fig. 5-8 Image results of specimen using long wavelength infrared camera (10 mm, 75 %)	79
Fig. 5-9 Line profile position of wall thinning defect specimen	80
Fig. 5-10 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(AL6061, 10 mm, 50 %)	81

Fig. 5-11 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(AL6061, 10 mm, 75 %) .....	82
Fig. 5-12 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(SM45C, 10 mm, 50 %) .....	83
Fig. 5-13 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(SM45C, 10 mm, 75 %) .....	84
Fig. 5-14 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(STS316L, 10 mm, 50 %) .....	85
Fig. 5-15 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(STS316L, 10 mm, 75 %) .....	86
Fig. 5-16 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(AL6061, 10 mm, 50 %) .....	87
Fig. 5-17 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(AL6061, 5 mm, 75 %) .....	88
Fig. 5-18 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(SM45C, 5 mm, 50 %) .....	89
Fig. 5-19 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(SM45C, 5 mm, 75 %) .....	90
Fig. 5-20 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(STS316L, 5 mm, 50 %) .....	91
Fig. 5-21 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth(STS316L, 5 mm, 75 %) .....	92

## LIST OF TABLES

Table 1-1 Absorption Spectrum Strength of Major Molecules by Wavelength Range at Room Temperature .....	4
Table 2-1 IBC of standard(IEC usage Sect 841)( $\mu\text{m}$ ) .....	17
Table 2-2 Sensor characteristics .....	38
Table 2-3 Types of Infrared Sensors .....	39
Table 3-1 Comparison of heating device illuminance(Distance, 2m) .....	49
Table 4-1 Mid wavelength Infrared camera specifications .....	67
Table 4-2 Long wavelength Infrared camera specifications .....	68

## ABSTRACT

### **A study on the optimal measurement of wall thinning defect using lock-in infrared thermography**

Kim SangChae

Advisor : Prof. Kim Kyeong-Suk, Ph.D.

Dept. of Mechanical System & automotive Engineering,  
Graduate School of Chosun University

Infrared thermography technology has been developing rapidly in industry and science and technology due to the infrared camera, microcomputer technology, infrared sensor, electronic technology and computer technology, which have developed rapidly over the last 20 years. Infrared thermography technology is currently being applied in industry in relation to various fields such as nondestructive testing, condition diagnosis, predictive maintenance, energy saving of process and architecture, and detection of gas components. In addition, cheap cameras due to the competition of camera manufacturers have appeared on the market and infrared thermography technology is being applied to new fields.

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 due to temperature change.

In particular, Infrared thermography using a lock-in technique for inspection is expected to be able to clearly detect the boundaries between non-defective parts and defective parts, which will allow it to be extensively utilized in industrial fields. A lock-in technique detects defects by synchronizing the measurement cycle of the camera with the load cycle of the incident energy source by inputting an external energy source to the object and eliminating the nonuniformity of the

incident thermal energy distribution.

In this study, defects in defect specimens were measured using a medium-infrared and long-infrared camera. A halogen lamp was fabricated and the defect was measured by heating the defect specimen at 0.08 Hz, 0.1 Hz and 0.12 Hz using the fabricated halogen lamp. The results of the mid-infrared camera and the long-infrared camera were compared with each other according to the frequency and material, and optimum conditions were derived

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

적외선은 영어로 Infrared, 한자로 赤外線이라고 한다. Infrared는 ‘빨간색’을 뜻하는 red에 ‘넘어’라는 뜻을 가진 Infra라고 하는 접두어가 합해진 것으로 풀이하면 ‘빨간색 너머’라는 뜻이다. 이러한 영문의 뜻을 그대로 한자로 풀이한 것이 赤外線이다. 빨간색은 사람 눈으로 볼 수 있는 가시광선 중의 하나이다. 가시광선은 무지개색이라고 하는 ‘빨주노초파남보’의 일곱 가지 색이 존재하는 빛의 영역이다. 사람의 눈으로 인식할 수 있는 파장을 기준으로 가시광선 중에서 빨간색 바깥에 있는 빛을 적외선이라 하며, 보라색 바깥에 있는 빛을 적외선이라 한다. 온도를 가지고 있는 모든 물체는 복사에너지를 방출하게 되며, 적외선 열화상 기술은 이 방출된 에너지량을 측정하여 검출 에너지량과 온도의 상관관계로부터 물체의 온도영상을 제공한다. 1960년대 초 적외선 열화상 기술이 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 규격에 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 기술은 지난 20년간 비약적으로 발전한 적외선 감지기, 전자기술, 컴퓨터 기술이 집약된 적외선 카메라 마이크로 시스템 기술 덕택에 산업체와 과학기술계에서 비약적으로 발전하고 있는 분야이다. 열화상 분석은 현재 비파괴검사, 상태진단, 예측정비, 공정과 건축분야의 에너지 절감, 가스 성분의 검출 등 다양한 분야와 관련하여 산업체 및 연구 개발 분야에서 적용되고 있다. 이와 함께 카메라 제조 회사의 경쟁 분위기로 인하여 가격이 수천 달러 또는 수천 유로의 저렴한 카메라들이 시장에 등장하면서 새로운 분야들에 적용이 확대되고 있다.

오늘날 현대 산업사회는 다양화되고 첨단화되어짐에 따라, 각종 구조물은 급속히 고

속화, 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 파괴없이 실시간으로 영상을 제공하고 평가하여 진단하는 품질검사 및 안전성 평가 기술로써[4] 응력해석, 금속재료 부식결함 검사, 피로한계치 분석, 전력설비 열화진단, 의료진단, 복합재 박리 검사뿐만 아니라 고도의 신뢰성과 안전성이 요구되는 반도체, 원자력산업, 방위산업, 항공우주산업 등의 발달과 더불어 그 활용성과 중요성이 증대되어 응용범위가 점차 확대되고 있는 추세이다.

본 논문에서는 최근 비파괴 검사에서 많이 이용되고 있는 육안 검사(VT), 방사선 투과 검사(RT) 그리고 초음파 검사(UT) 등 다양한 비파괴 검사 기법들 중 적외선열화상 검사를 이용하여 가장 효율적으로 결함을 검사하는 것을 목적으로 하였으며, 실험을 통해 최적화된 검사 장비와 실험 방법들을 연구하였다.



## 제 2 절 연구목적

적외선 영역에서의 복사에너지는 대기 중의 가스분자 및 분자덩어리, 비, 눈이나, 연무, 안개, 아지랑이 등 수증기성분에 의해 흡수되거나 산란되어 그 양이 감쇄된다. 그 밖의 흡수분자로는 이산화탄소, 오존등이 존재한다. 이러한 흡수 분자들에 의해 특성 파장에 대해서 대기투과 특성에 영향을 미쳐 2개의 투과 특성이 우수한 영역이 형성된다. 3~5  $\mu\text{m}$  영역과 8~14  $\mu\text{m}$  의 영역의 대기 중의 투과율이 좋은 현상을 볼수 있는 데, 이 이유로 인해 두 영역의 파장 영역을 대기창이라고 한다. 따라서, 열상 장비는 일반적으로 관측대상물의 온도와 두 대기창의 영역을 비교하여 적당한 파장을 선택하여 설계하게 된다.

배관계통에서 감육결함은 유동가속부식이 자주 일어나는 곡관, 연결관 인접부, 밸브 등에서 발생한다. 감육 결함은 사전징후 없이 바로 손상으로 진행, 모재부에서도 흔히 발생, 기존의 가동 중 검사를 통해 발견이 어려움이 있다. 적외선열화상 검사는 비접촉식 검사로서, 안전성이 높고 검사 시간이 빨라 감육결함 검사에 적합할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 적외선열화상 검사를 이용하여 가장 효율적으로 감육결함을 검사하는 것이 목적으로 실험을 통해 최적화된 검사 장비와 실험 방법 연구하였다. 적외선은 범위에 따라 기본적으로 장파장 적외선과 중파장 적외선의 두 가지로 장파장 (LW) 적외선 카메라는 8 ~12  $\mu\text{m}$  에서 작동하며 중파장 (MW) 적외선 카메라는 3~5  $\mu\text{m}$  범위에서 작동 장파장 적외선 카메라는 적외선 빛이 공기나 수증기에 의해 흡수, 산란, 굴절되기 때문에 중파장 적외선 카메라에 비하여 영향을 더 받는다. 중파장 적외선 카메라는 고가의 감지기와 극저온 냉각이 필요하다.

본 논문에서는 장파장과 중파장 적외선 카메라의 상관관계를 실험을 통해 찾아 장파장 적외선 카메라의 측정방법을 보완 및 효율성을 향상시키는 것을 목표로 연구하였다.

## 제 3 절 연구동향

### 1. 중적외선

중적외선 영역은  $2.5\sim 50\mu\text{m}$  대역으로 1,000도 이하 온도에서 복사체의 복사 파장영역에 해당하며, 이는 물리적인 특성이 복사열을 감지하여 열분포 영상을 얻는 열화상 기술에서 중적외선 검출기가 중요한 이유이다. 또한 Table 1-1 에서 보듯이 많은 분자들의 주요 흡수스펙트럼이 이 파장 영역대에 집중해 있기 때문에 흡수스펙트럼 분석을 통한 분자의 성분을 알아내는 데 매우 유용하다고 알려져 있다[5]. 이러한 기술적 이유로 화학 및 생물학적 감지, 환경 및 위험물질 모니터링, 의학, 통신, 천문학, 국방, 보안 등의 수많은 분야에서 주요한 응용처를 가지고 있다.

Table 1-1 Absorption Spectrum Strength of Major Molecules by Wavelength Range at Room Temperature

wavelength	$0.7\sim 2.0\mu\text{m}$	$2.5\sim 5.0\mu\text{m}$	$5.5\sim 12\mu\text{m}$
CO <sub>2</sub>	0.3	3000	0.03
CO	0.02	300	0
CH <sub>4</sub>	1	100	50
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	10	200	100
H <sub>2</sub> O	20	200	200
NH <sub>3</sub>	5	10	200
NO	0.04	0.3	20

중적외선 검출기는 크게 비냉각식과 냉각식으로 구분되는데, 비냉각식은 최근에 FLIR사에서 iPhone 5/5s에 탑재되는 FLIR ONE이라는 모델의 열화상 카메라를 출시하였고, 냉각식은 주로 군수용으로 많이 활용되고 있는 상황이며, 관련 기업들도 큰 market share를 가지고 있다. 그러나, 중적외선 광원은 검출기에 비해 상용화가 많이 진행되지 못하여 상대적으로 빈약한 시장규모를 가지고 있으나, 최근에 중적외선 광원의 기술이 크게 발전됨에 따라 향후 중적외선 기반의 거대한 시장형성이 기대되고 있으며, 시장 예측기관에서도 향후 거대시장을 예측하고 있다. 중적외선 대역의 분광학은 그 자체로 중요성을 가지고 있어, Hg-lamp 또는 thermal emitter를 광원으로 FTIR(Fourier Transform Infrared spectroscopy) 분광방법이 사용되어 왔다. 실제 가스분석기 시장을 보면, 2011년에 이미 NDIR(Non-dispersive Infrared detector) 방식이 전체 가스검출기 시장의 50% 이상을 차지하고 있으며, 지속적인 시장확대가 예상되고 있다. 기존의 NDIR 방식은 근적외선 영역 분광과 중적외선 영역 분광으로 나눌 수 있다. 이 중 근적외선을 사용하는 이유는 고출력 파장 가변 광원의 구현이 힘들기 때문이나, 반면 데이터 분석이 힘들다는 단점 또한 가진다. 중적외선을 사용하는 경우는 thermal emitter를 주로 사용한다. Thermal emitter는 nerst glower, glowbar(globar), incandescent wire source 등이 있고, 가격적으로 저렴하며, 안정적인 연속 광대역광을 제공하는 장점이 있으나, 출력이 낮으며, 광가이딩이 어려운 단점이 있다. Fig. 1-1 은 광원의 형태에 따른 광 세기를 비교한 것으로 globar의 경우 근본적으로 광 세기가 약하며, diffraction limited source가 아니기에 공간적으로 국소영역에 빔을 모으기가 불가능하여, QCL(Quantum Cascade Laser) 및 synchrotron radiation에 비하여 매우 낮은 광량을 보인다. 또한 synchrotron radiation은 diffraction limited source이긴 하나 QCL에 비해 광 세기가 현저하게 낮은 특징이 있다. 중적외선 대역의 큰 응용기술은 열화상 기술과 분자분광 기술이다. 열화상 기술은 Fig. 1-2 에서 보듯이 냉각형에 비해 비냉각형 검출기의 detectivity가 낮아 높은 contrast를 확보하기가 힘들기때문에 중적외선 광원을 조명광으로 활용할 경우 높은 contrast를 확보할 수 있다. 예를 들어 105개의 pixel을 가지는 비냉각형 microbolometer FPA를 이용한 imaging에 적용할 경우 QCL은 103의 SNR(Signal to Noise Ratio)을 확보할 수 있다[6].

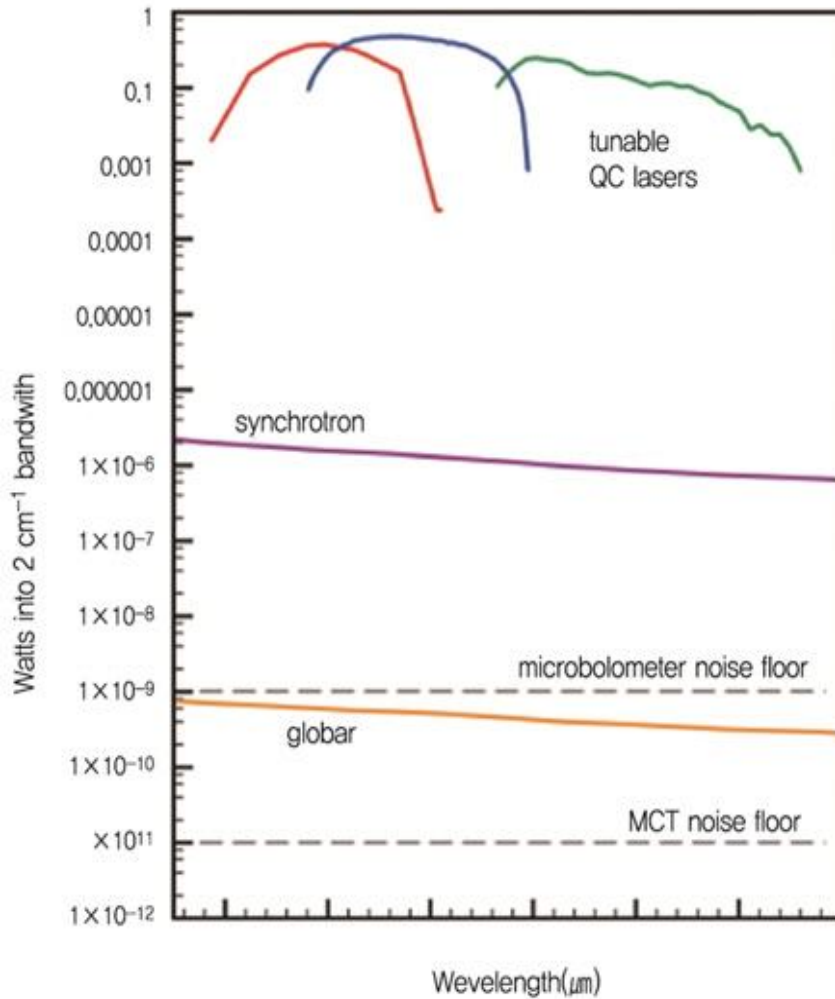


Fig. 1-1 Comparison of light intensities for several MW infrared light sources passed through 10um pinholes

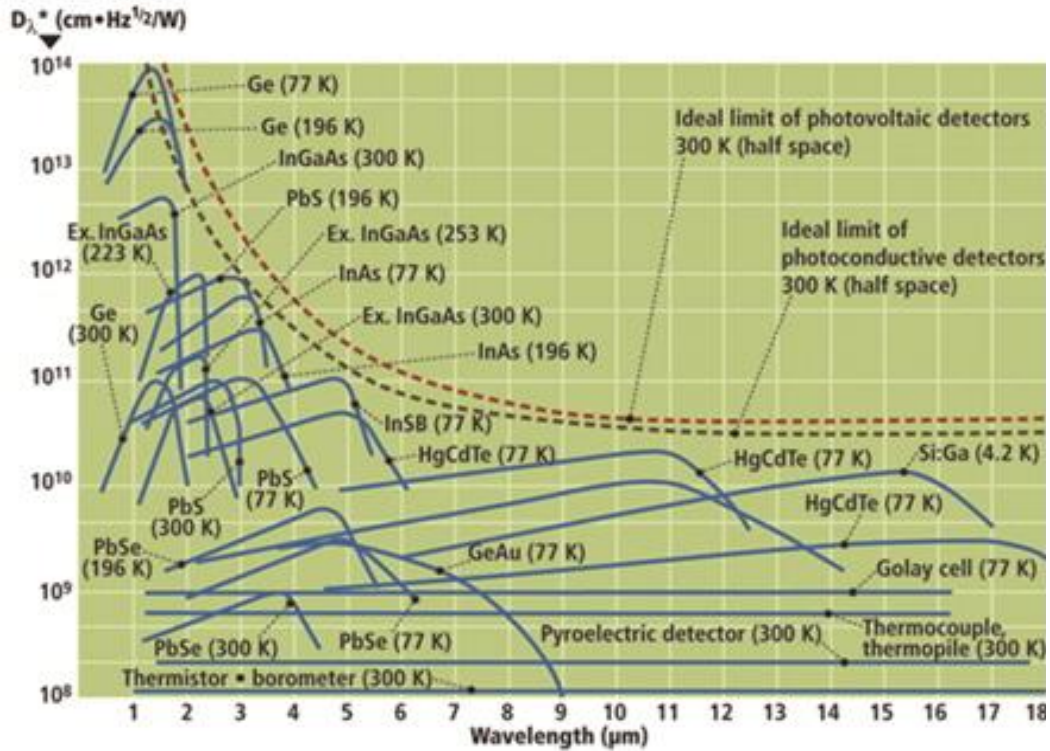


Fig. 1-2 Detectivity of various detectors according to wavelength

현재의 분광기술은 낮은 광원의 세기로 SNR을 향상시키기 위해 Faraday rotation spectroscopy, cavity ring-down spectroscopy, integrated cavity output spectroscopy, advanced quartz-enhanced photo acoustic spectroscopy 등과 같은 다양한 방법으로 높은 감도의 검출단을 구성하기 위한 노력을 경주하고 있다. 이는 시스템 구성의 어려움을 증가시키며, 향후 거대시장을 창출하기 위해 필요한 스마트폰과 같은 소형 consumer device에 적용이 불가능한 한계를 갖는다[7]. Fig. 1-3 은 측정된 분자들의 흡수 스펙트럼을 기반으로 한 중적외선 흡수파장 영역의 여러 다양한 응용분야를 보여 주고 있다. 이외에도 군수분야의 경우 미사일에 3~5 $\mu\text{m}$ (대기투과창) 대역의 중적외선을 쏘아 미사일의 IR 검출기를 마비시키는 IR countermeasure용으로 이용되기도 한다. 의료분야의 경우 물 흡수 파장인 2.94 $\mu\text{m}$ 는 안과 및 치과치료용으로, 그리고 amide-II 공

명파장인  $6.45\mu\text{m}$ 는 laser surgery에 적용되기도 하며, 산업용으로는 플라스틱 또는 폴리머 공정에 사용된다.

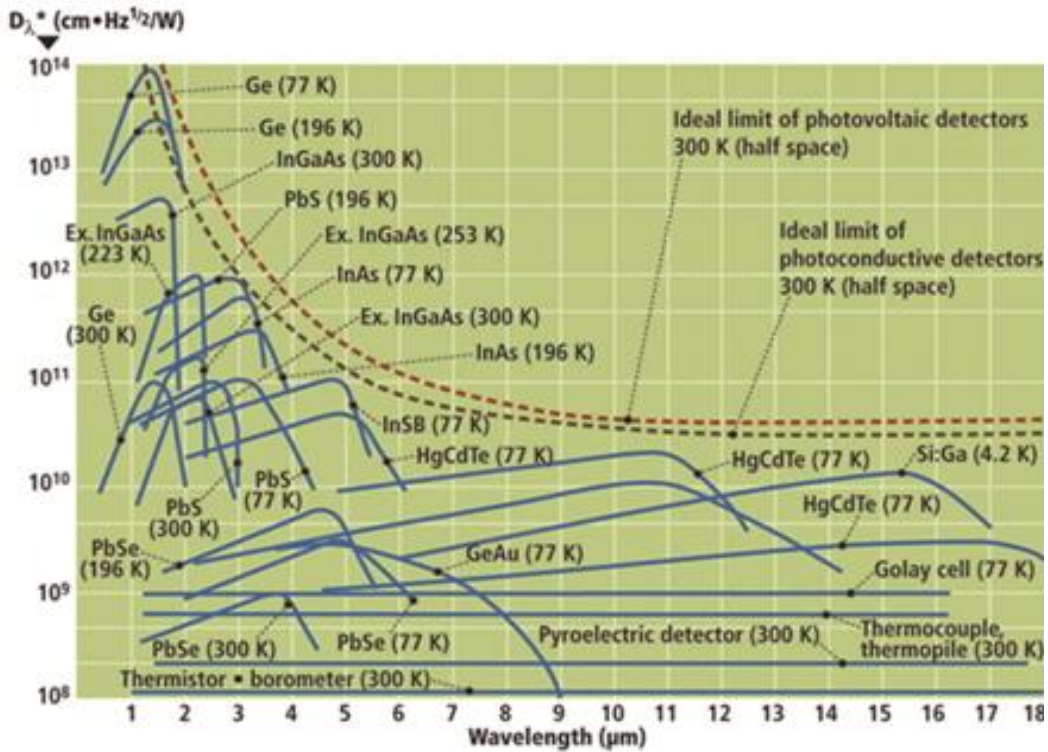


Fig. 1-3 Application of MW infrared spectroscopy according to wavelength

이처럼 중적외선 광원의 응용처는 지속적으로 발굴되고 있으며, 향후 미래를 선도할 핵심 부품으로 자리 잡아가고 있다.

Fig. 1-4 는 기술에 따른 중적외선 광원의 종류와 각 기술별 가능한 파장 영역대를 나타내고 있다. 중적외선 광원은 크게 가스 레이저, 반도체 레이저, 고체 레이저, 비선형성을 이용한 파장변환 기반의 광원, 파이버 레이저로 크게 구분할 수 있다. 가스 레이저인 CO 및 CO<sub>2</sub> 레이저는 주로 cutting, welding, engraving 등과 같은 산업가공용으로 사용되었으나, 고효율 파이버 레이저에 크게 시장을 잠식당함에 따라 최근 들어 오히려 치과, 수술, 피부 클리닉 등의 의료용으로 그 활용성이 증대되고 있다. 광섬유 레이저는 Tm<sup>3+</sup>(2.0, 2.3 $\mu\text{m}$ ), Ho<sup>3+</sup>(2.1, 2.8, 3.0, 3.2, 3.5 $\mu\text{m}$ )과 같은 trivalent rare earth 이온을 doping하여 이득영역을 구성한다. 이 중 Tm-doped 실리카 광섬유를 사용할

경우 2.0 $\mu\text{m}$ 에서 1kW의 출력이 가능함을 보고하고 있다. 하지만 2.7 $\mu\text{m}$  이상에서는 실리콘 광섬유의 손실이 매우 커서 fluorides, tellurites, chalcogenides와 같은 물질을 이용한 중적외선용 광섬유를 사용하고 있다.

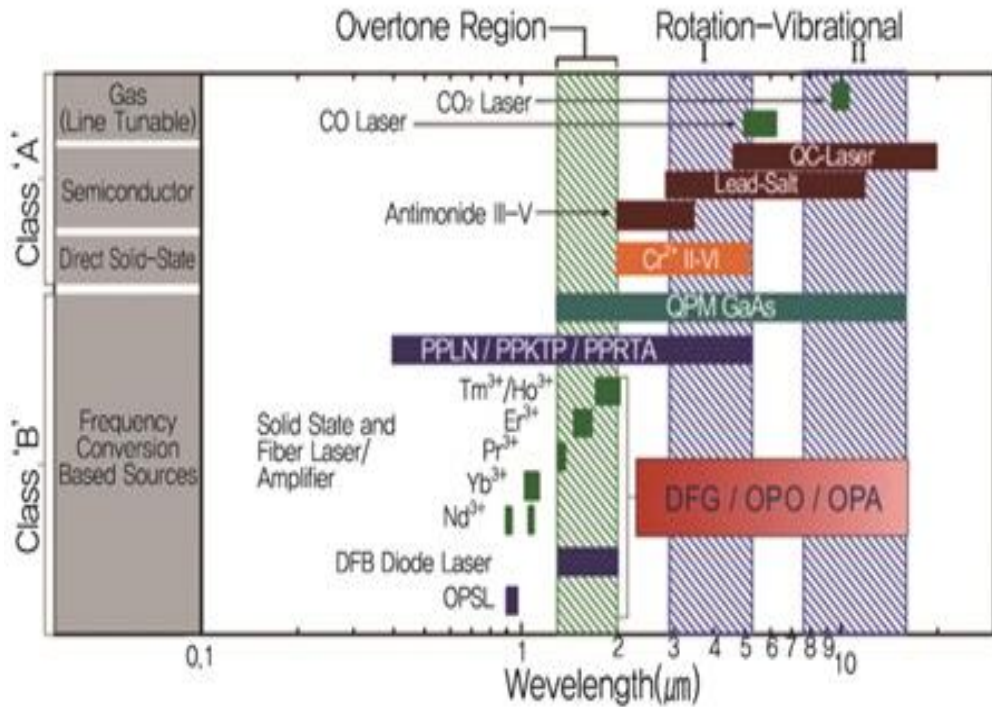


Fig. 1-4 Classification according to technology and wavelength range of MW infrared light source

중적외선 고체 레이저는 1960년대에 이미 개발되었으며, 대부분의 경우 rare-earth 이온의 전자천이나, transition metal에서 vibronic transition을 이용한다. Rare earth 이온은 광섬유 레이저와 마찬가지로  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$  등의 trivalent rare earth 이온이 사용되며, 호스트 물질은 가변성을 가지나 발진 파장은 광섬유 레이저와 비슷하고 큰 변화가 없어, 파장 가변성을 높이기 위해 transition metal을 사용한다. Transition metal을 사용할 경우 호스트물질로는 electron-phonon 상호작용이 강한 II-VI 화합물 반도체가 주로 사용되며, 현재 optical pumping으로 발진시켜 20W 연속(CW: Continuous Wave) 발진과 1,200nm 이상의 파장 가변성이 보고된바 있고, 현재도 고출

력광원을 목적으로 연구개발이 진행 중이다[8]. 비선형성을 이용한 파장 변환방식[9]은 2nd harmonic generation, DFG(Difference Frequency Gene-ration), OPO(Optical Parametric Oscillator) 등과 같이 물질의 고유한 비선형성을 이용하는 방식으로 비선형성의 효율이 낮기 때문에 사용되는 광원들의 출력이 높지만 출력되는 중적외선의 출력이 다른 방식에 비해 낮은 단점이 있다. 하지만, 파장 가변 광원의 구성은 상대적으로 용이하여 분광기용 광원으로 유용한 장점이 있다. 현재 Novawave는 IR 영역의 레이저 다이오드를 사용한 DFG 방식으로 구성된 광대역 광원과 이를 이용한 분광시스템을 생산·판매 중이다. 반도체 레이저는 구성의 난점으로 인한 소형화의 어려움이 단점으로 지적되었으나, Sb-based 레이저 및 QCL 기술의 비약적인 발전으로 소형 레이저 상용제품이 제공되는 상황에 도달하였다. 아직은 가격 측면에서 고가의 가격이 단점으로 작용하고 있으나 향후 시장확대에 따른 지속적인 가격하락이 유도되어 큰 시장을 이룰 것으로 기대되고 있다. 현재 2~3 $\mu\text{m}$  대역은 Sb-based 레이저 다이오드, 4~12 $\mu\text{m}$  대역은 QCL이 사용되고 있으며, 3~4 $\mu\text{m}$  및 12 $\mu\text{m}$  이상의 파장대역에서는 연구개발이 진행 중이다. 그리고 분광학에 응용하기 위해서는 파장 가변성이 필요하기 때문에 QCL을 이용한 파장 가변 레이저가 활발히 연구되고 있다. Bell연구소에서 1994년 극저온에서 QCL 발전이 보고된 이후, 1996년 펄스 상온발전, 2002년 CW 상온발전이 보고되는 등 비약적인 발전이 진행되었으며, 현재는 100mW 이상의 광 세기를 얻고 있고, 효율면에서도 CW 상온발전에서 20%의 WPE(Wall Plug Efficiency)를 얻고 있다.

Fig. 1-5 는 기술별/년도별 파장 가변 QCL 결과를 소개하고 있다. Fig. 1-5 에서 보는 바와 같이 다양한 방식의 파장 가변 레이저에 대한 연구가 진행되고 있으며 현재 중심 파장 기준으로 39%의 파장 가변성을 갖는 파장 가변 QCL이 보고된바 있다[10]. QCL은 제작/설계 기술뿐 아니라, QCL을 이용한 분광기법 및 응용성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. 높은 SNR을 바탕으로 사람의 날숨 정밀분석을 통한 건강검진 모니터링 기능이 가능하며, 2014년에는 인체의 피부에서 산란된 신호분석을 통해 혈당측정의 가능성이 보고되는 등 의료분야를 포함한 많은 분야에서 주목을 받고 있다. 그러나, 가격이 FP QCL이 4,300불, 파장 가변 QCL이 2~3만불에 달하는 문제로 현재까지는 특수분야에만 적용되고 있는 실정이다. 대량주문을 통한 가격하락이 가능할 것이나 아직 대형시장에 진입할 수 있을 정도의 적절한 가격 제공이 쉽지가 않다. 하지만, 향후 지속적인 기술개발을 통해 이러한 가격적인 문제를 해결한다면, QCL이



갖는 고유한 쓰임과 다양한 응용성에 맞게 거대시장이 유도될 수 있을 것으로 예측하고 있다.

현재까지 다양한 형태의 중적외선 광원이 개발되어 왔고, 각 광원마다 장점을 가지는 특유의 응용처가 존재하고 있으며, 시장진입을 위해서는 소비자가 원하는 기능적인 면 이외에도 가격적인 부분에 대한 해결책을 제시할 수 있어야 한다. 그러므로 가격을 낮출 수 있는 중적외선 광원의 요소기술 개발 및 소재의 개발이 중적외선 파장대역을 실생활에서 현실화시킬 수 있는 관건이라 할 수 있다.

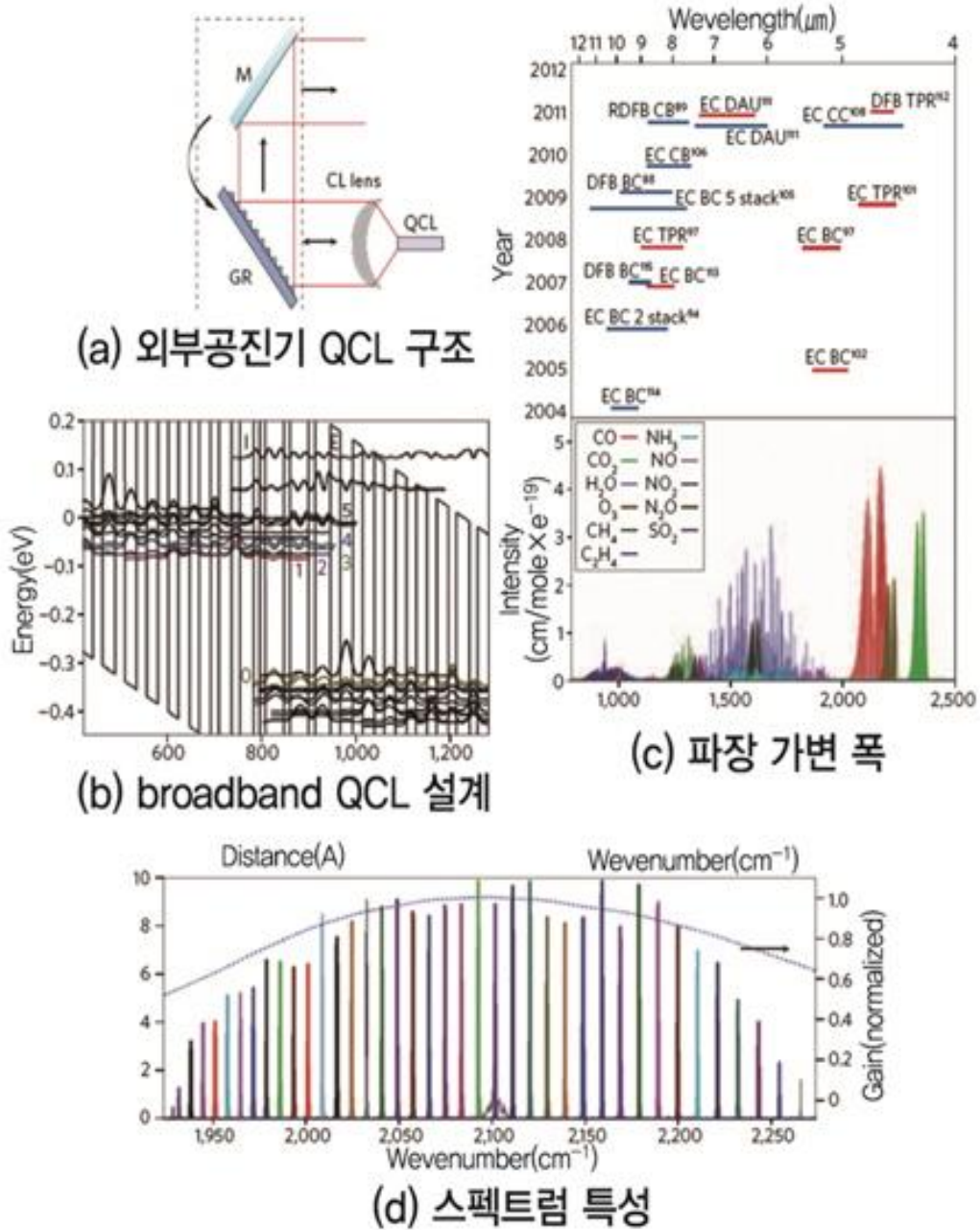


Fig. 1-5 Structure and wavelength variable characteristics of wavelength variable QCL

## 2. 장적외선

흑체 복사가 상온에서 최대값을 갖는 8~12  $\mu\text{m}$  의 장파장 적외선 영역에서 작동하는 소자는 대기중 통신, 의료 진단 및 치료, 미사일 유도 및 제어, 조기경보, 인공위성에서의 지구관측, 야간 물체 식별 등의 분야에 걸쳐 중요하게 이용될 수 있다는 측면에서 많이 연구되고 있다.[11-15] 그러나 장파장 적외선의 광자 에너지는 보통의 반도체의 띠간격(band gap)인 수 eV에 비해 매우 작기 때문에 이 파장 영역의 빛을 검출하는 소자를 제작하는 것은 그다지 용이하지 못하다. 1950년대 말 띠 간격을 조절할 수 있는 물질로서 영국의 Lawson이 소개한 II-IV족 화합물 MCT는 장파장 적외선 검출기의 재료로써 Hg, Cd, Te의 합금이다.[16,17]

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 적외선

#### 1. 적외선

가. 적외선의 원리

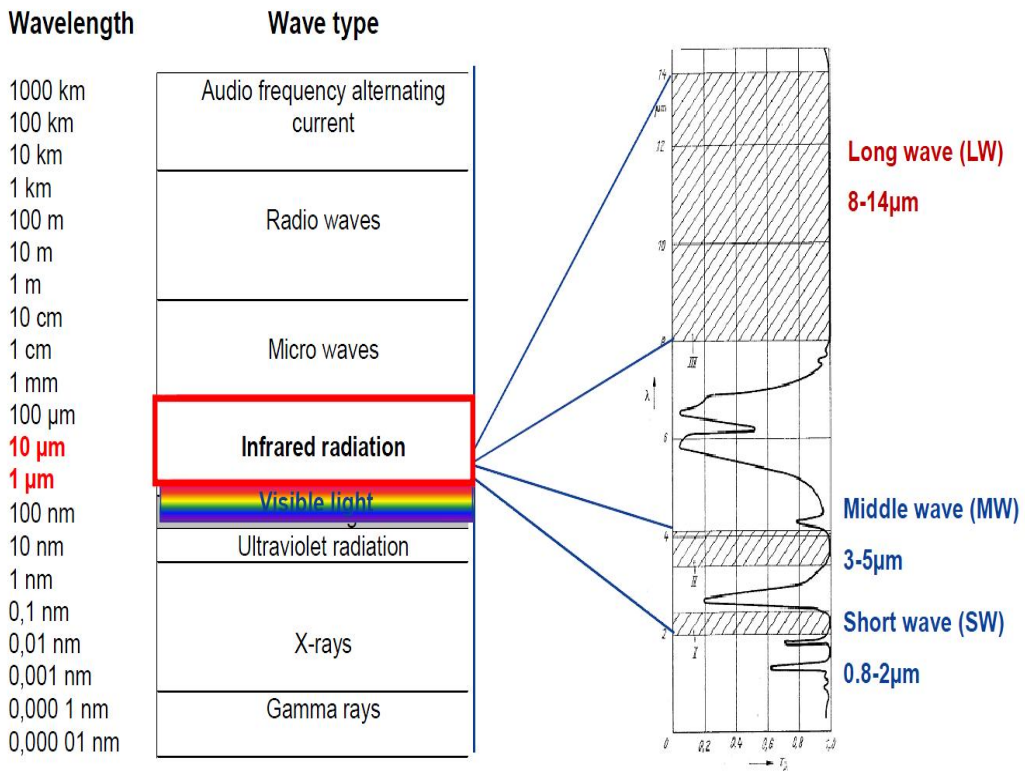


Fig. 2-1 Spectrum of electromagnetic waves

빛은 질량이 없는 파장의 형태로 존재하는 에너지 덩어리이다. 자연계에 존재하는 파

장은 빛과 같이 높은 에너지를 가진 파장 영역이 있는가 하면, 이보다 훨씬 낮은 에너지를 가진 소리와 같은 파장 영역도 있다. 파장과 에너지는 서로 반비례 관계에 있는데, 소리와 같이 낮은 에너지를 가진 파장은 매우 길고, X선과 같은 높은 에너지를 가진 파장은 매우 짧다. 이처럼 자연계에 존재하는 전자기파 스펙트럼의 파장들은 영역마다 고유한 물리적 특성이 있기 때문에 각 영역을 Fig. 2-1 과 같이 스펙트럼을 분류하고 있다. 가시광선은 스펙트럼 전체에서 보면 매우 좁은 대역에 해당하며, 자연에는 사람 눈이 인식하지 못하는 대역이 훨씬 넓다. 지구상에 존재하는 대부분의 물체들은 적은 에너지를 갖고 있어 적외선 범위를 넘지 못하는 복사선을 방사함으로 적외선을 검출하는 소자를 사용하면 광범위하게 응용이 가능하다.

모든 물체는 온도의 작용으로써 적외선을 방출(복사)한다. 절대영도(섭씨온도(celsius scale))  $-273.15^{\circ}\text{C}$  이상, 화씨온도(fahrenheit scale)  $-459.67^{\circ}\text{F}$  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 허셸(Wililam Herschel)경에 의해 태양광의 분광 시험 중 적색 부분보다 파장이 긴 부분이 있으며, 인체에 온열 효과를 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 열

을 가하면 이 열은 모두 흑체에 흡수되어 흡수된 열은 적외선이라는 형태로 손실 없이 나온다는 것을 뜻한다.[18] 흑체와 온도의 관계는 Fig. 2-2 와 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  $\mu\text{m}$  근처이며, 500K(223℃)의 온도에서는 5 $\mu\text{m}$  근처에서 최대값을 가진다.

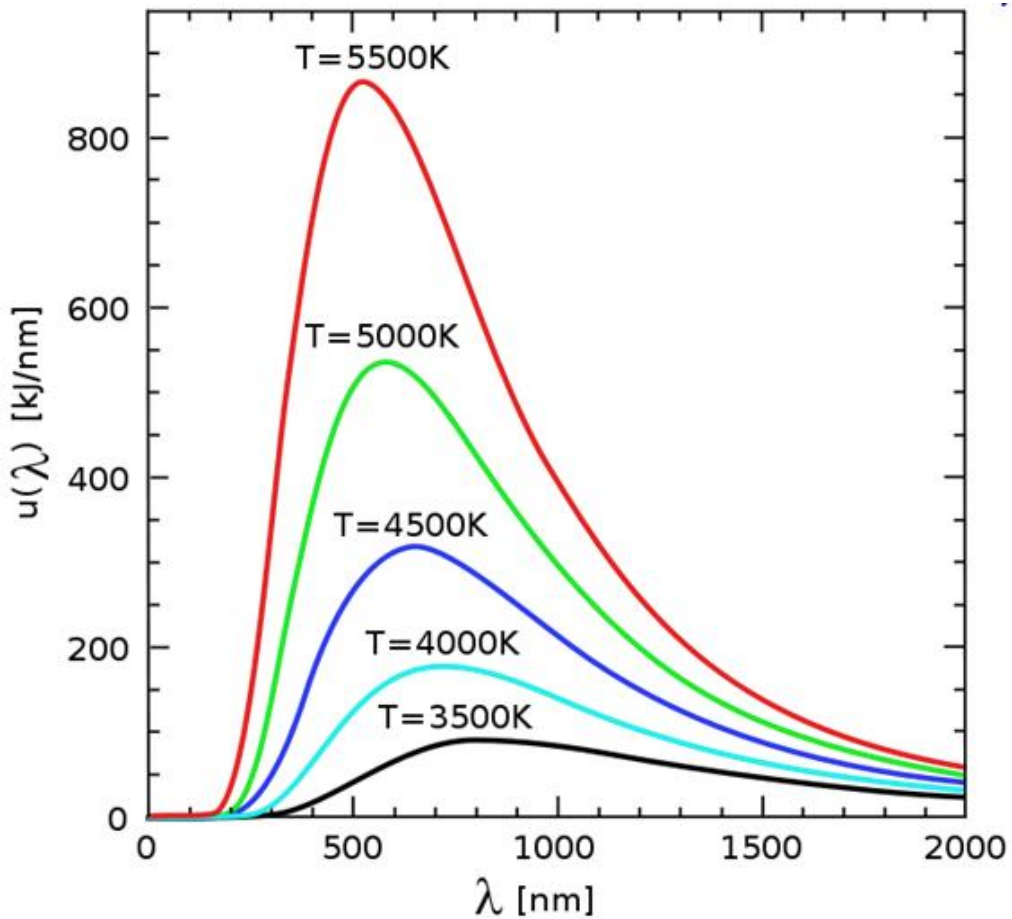


Fig. 2-2 Relationship between black body and temperature

전자기파 스펙트럼에서 적외선이란 파장이 가시광선보다 길고 마이크로파보다 짧은  $0.75\mu\text{m}$ ,  $1000\mu\text{m}$  파장 영역에 해당하며, 가시광에 비하면 매우 넓은 영역대로 Electromagnetic wave(전자기파)로서 1800년경 William Herchel경에 의해 발견되었으며 국제 전기표준회(IEC)의 용어집에 의한 적외선은 Table 2-1 과 같이 분류 하였다.

Table 2-1 IBC of standard(IEC usage Sect 841)( $\mu\text{m}$ )

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 $\mu\text{m}$	1.1~2.5 $\mu\text{m}$	2.5~7.0 $\mu\text{m}$	7.0~15.0 $\mu\text{m}$	15.0~1,000 $\mu\text{m}$

(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  $0.8\mu\text{m}$  ~  $2\mu\text{m}$ 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  $2\mu\text{m}$  ~  $6\mu\text{m}$ 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 적외선은 공기 중의 입자와 충돌하거나 흡수된다. MWIR은 온도가 500K에 해당하는 적외선이 최대로 나오는 파장 영역이며, LWIR은 300K에 해당하는 적외선이 최대로 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.



## 제 2 절 흑체와 방사율

### 1. 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 발생시키는 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  $\epsilon$ 은 식 (2.1)으로 나타난다.[19]

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

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. 그림 Fig. 2-3 은 각각의 특성에서 물체의 방사율을 나타내었다.

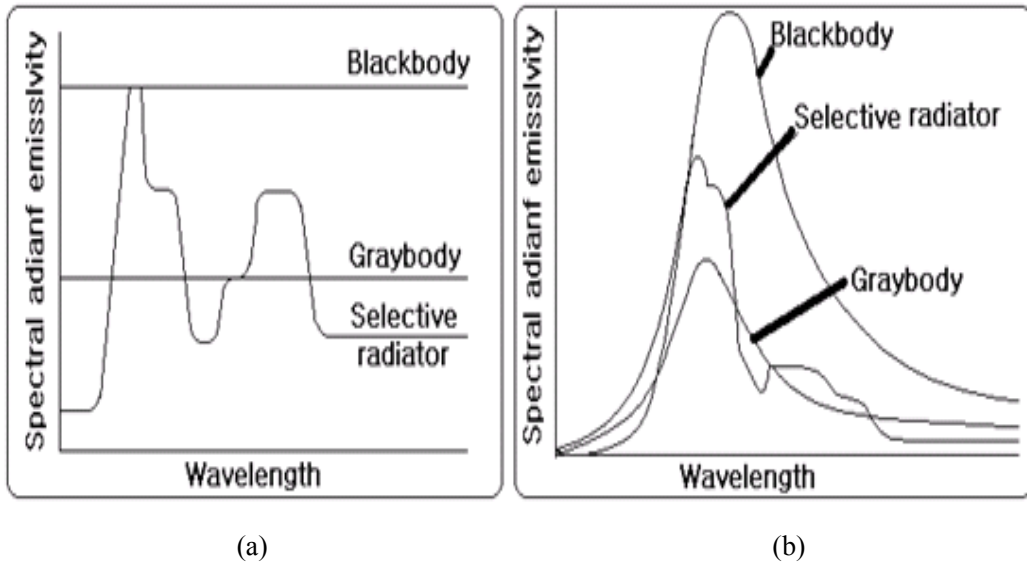


Fig. 2-3 Emissivity

## 2. 적외선의 흡수율(방사율, Emissivity)

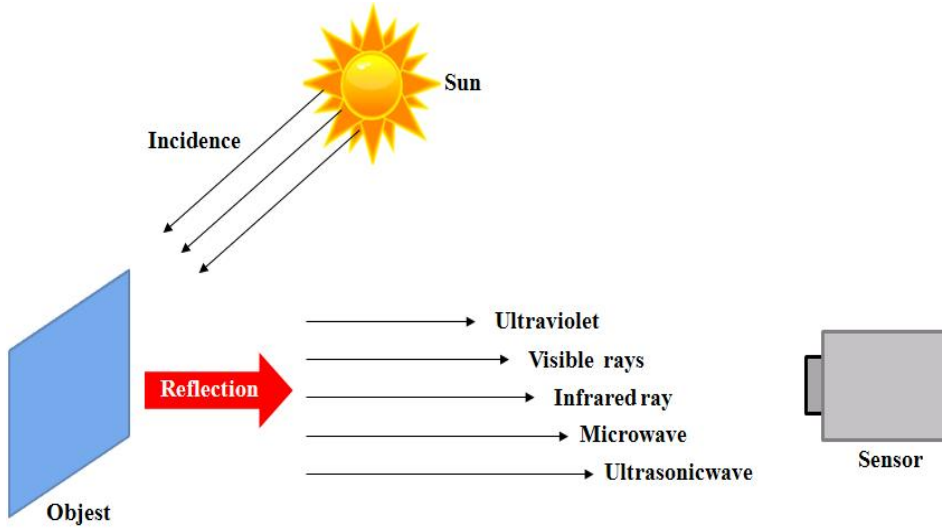
어떤 물체에 적외선이 입사하게 되면 물체의 종류, 표면 상태에 따라 반사, 흡수, 투과되는 성분이 서로 상이한 경우가 있다. 여기서 흡수되는 적외선을  $\epsilon$ (흡수율, 방사율) 투과하는 적외선  $\tau$ (투과율). 반사되는 적외선을  $\beta$ (반사율)라고 하면 물체에 입사되는 적외선 성분은  $1 = \epsilon + \tau + \beta$  ( $\epsilon \leq 1$ )로 나타낼 수 있다. 물체가 적외선을 투과하지 않을 때는  $\tau=0$ 이 되고  $\epsilon=1-\beta$ 에서 반사율( $\beta$ )을 알면 흡수율  $\epsilon$ 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. 2-4 에서처럼 100℃의 물체를 적외선 카메라를 통해서 볼 때 100℃로 나타나지 않은 것은 물체의 방사율( $\epsilon$ )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.

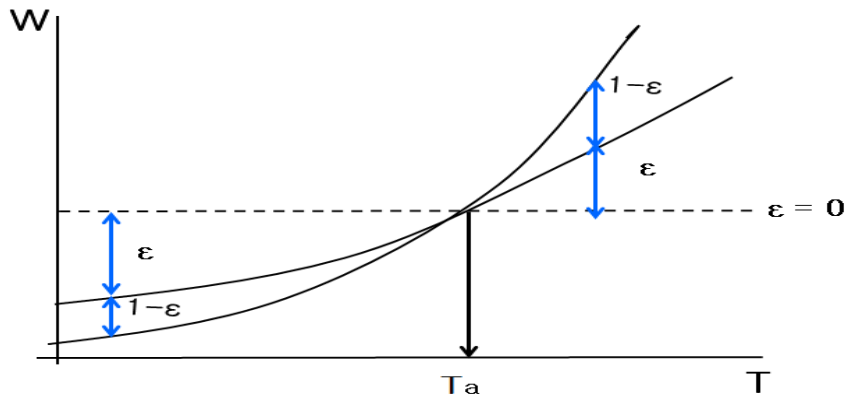
$$e(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)_{source}}{M(\lambda, T)_{Blackbody}} \quad (2.2)$$

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 낮아지는 경향이 있다.



(a)



(b)

Fig. 2-4 The emissivity principle of the object

### 다. 주변 온도와 물체의 표면 온도와의 관계

표면온도가  $T_a(^{\circ}\text{C})$ 인 어떤 물체가 방사하는 에너지를 주위 온도( $T_a$ )의 보정이 없는 적외선 열화상 카메라로 촬영을 하였을 경우, 측정된 방사에너지는 물체 표면온도( $T_s$ )이 방사하는 실제 에너지와 차이를 보이게 된다. 이는 그 물체의 방사율( $\epsilon$ )에 따라 주위 온도의 영향을 받기 때문이다. 방사율( $\epsilon$ )이 0에 가까워질수록 주위 온도( $T_a$ )에 근접하게 되고, 방사율( $\epsilon$ )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 방사에너지는 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.

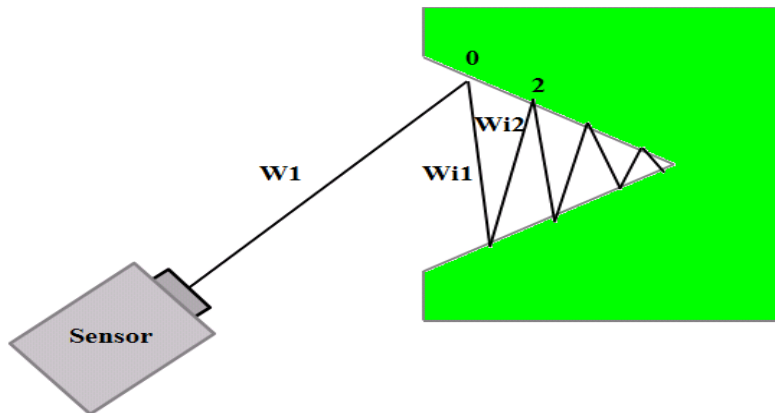


Fig. 2-5 Radiation energy of blackbody

### 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.

$$W_i = \epsilon W(T) - (1 - \epsilon)W_i$$

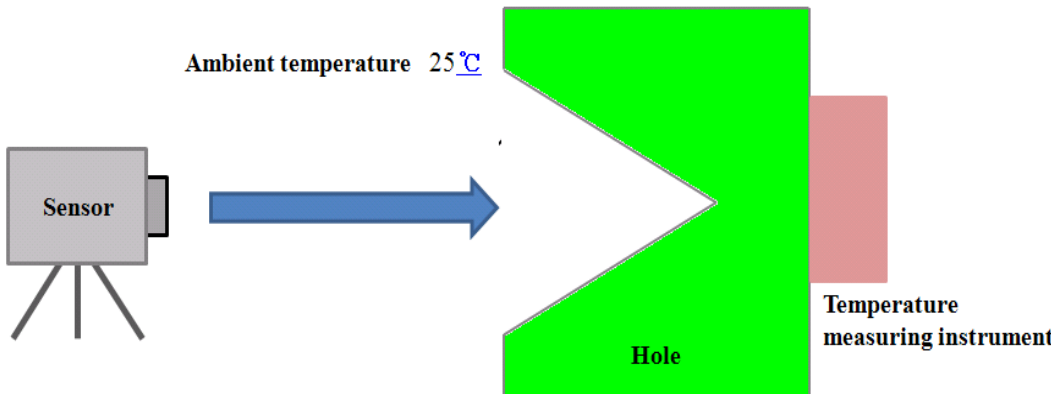
$$W_i = \epsilon W(T) - (1 - \epsilon)W_i \quad (2.3)$$

$$\therefore W_i = WT$$

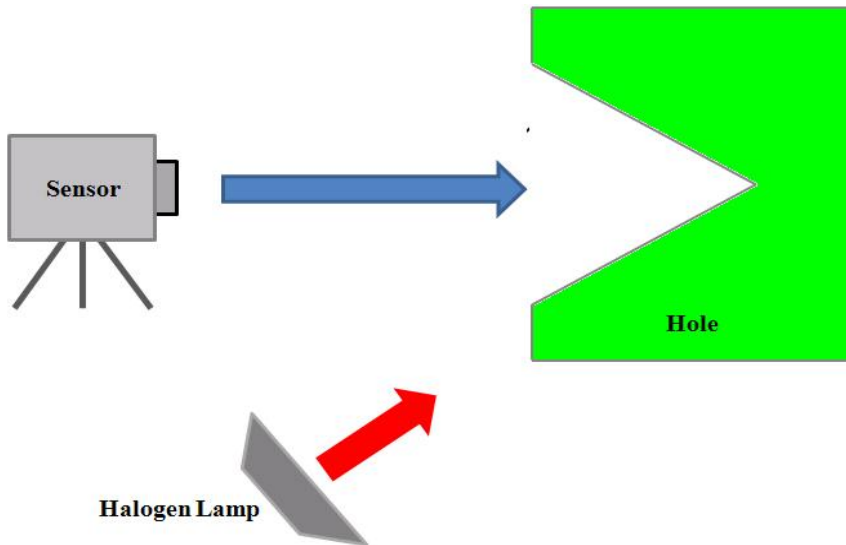
입사된 빛이 나간 방향이 없는 형태(원주, 구)등에 있어서 입구 부분에서 방사율이 1인 흑체가 있다. 따라서 흑체는 적외선 카메라에서 온도를 검출하는 표준이 된다.

### 마. 구멍의 흑체 효과

Fig. 2-6 (a) 와 같이 주위온도 25℃ 상태에서 구멍이 폐인 흑체에 자체 가열을 사용하여 40 ℃로 가열하고 전원을 제거하면 구멍 부분의 온도는 다른 부분보다 높아진다. 이는 구멍부분의 방사율이 다른 부분보다 높기 때문에 방사에너지가 크다. Fig. 2-6 (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.



(a)



(b)

Fig. 2-6 Blackbody effect of hole

### 바. 투과율의 영향

카메라에 입사된 에너지  $W_i$ 는  $W_i = W_r(T_O) + (1-r)W(T_a)$  이상에 의해 적외선 카메라에 입사된 에너지  $W_i$ 는 다음에 의해 계산되어지며 Fig. 2-7 은 방사율과 투과율과의 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.

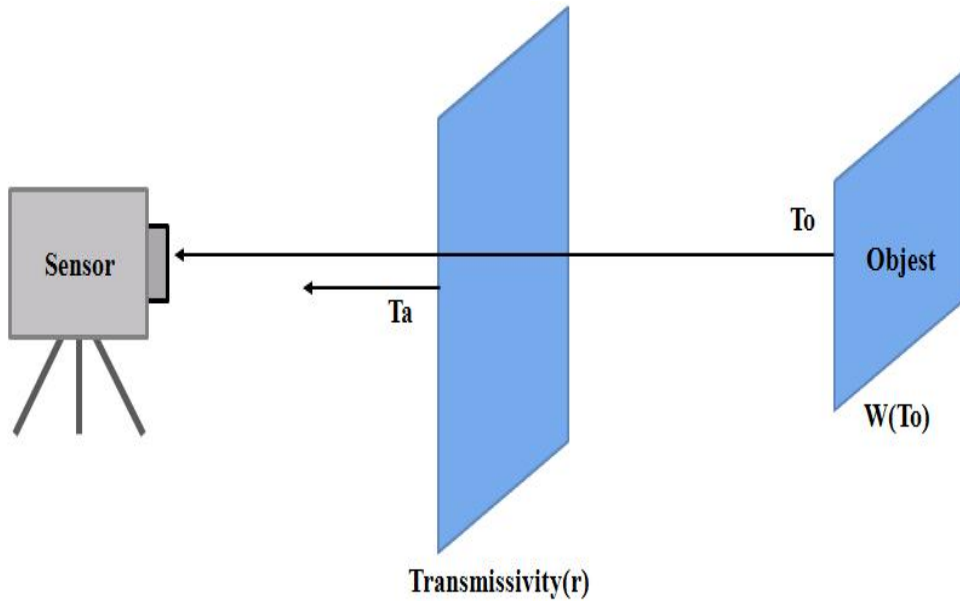


Fig. 2-7 Penetration effect

즉, 방사율 ( $\epsilon$ )과 투과율( $\tau$ )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( $\epsilon$ )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 3 절 Planck's Law

적외선과 온도와의 관계를 알려면 흑체의 적외선 방사현상을 이해해야 한다. 적외선 파장 중 온도를 이용하려는 이론은 1890~ 1900년 초 플랑크(N.Plank)에 의해 흑체이론이 완성되어 적외선을 이용한 온도 측정이 가능하게 되었으며 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 모든 물체는 절대적인 온도를 가지고 있고, 흡수한 에너지와 방출한 에너지가 열적 평형을 이루어 일정한 온도를 유지한다. 적외선열화상 기술은 물체가 열적 평형을 이루기 위해 방출하는 에너지를 측정하여 에너지양과 온도의 상관관계를 이용한다. 플랑크의 흑체복사이론은 플랑크상수와 볼츠만상수, 빛의 속도를 계산하여 파장과 온도의 관계를 나타내는 법칙이며, 식 (2.5)는 플랑크의 흑체복사이론이다.

$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [e^{hc/\lambda kT} - 1]}$$

$$\text{플랑크상수 } h = 6.626 \times 10^{-23} J \cdot s \quad (2.5)$$

$$\text{볼츠만상수 } k = 1.380658 \times 10^{-23} JK^{-1}$$

$$\text{광속 } c = 2.998 \times 10^8 ms^{-1}$$

위의 식 (2.5)에서  $M_{\lambda}$  (in units of  $Wm^{-1}\mu m^{-1}$ )는 물체에 조사된 에너지양을 나타낸다.

## 제 4 절 Stefan-Boltzmann's Law

스테판 볼츠만 법칙은 플랑크 법칙을 통해 물체에서 흡수된 파장과 에너지의 관계를 구할 수 있다 ( $0 \leq \lambda \leq \infty$ )[20].

$$R = \sigma T^4 \tag{2.6}$$

스테판 볼츠만 상수  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^2)$

식 (2.6)은 플랑크의 흑체 복사이론과 관계가 있다. 스테판 볼츠만 법칙은 흑체의 단위표면적으로부터 단위시간에 방사되는 방사에너지는 절대온도 T의 4승에 비례한다는 이론이다. 적외선열화상 카메라는 플랑크의 법칙과 스테판 볼츠만의 법칙을 통하여 물체의 온도를 측정한다[21].

## 제 5 절 적외선 열화상 카메라

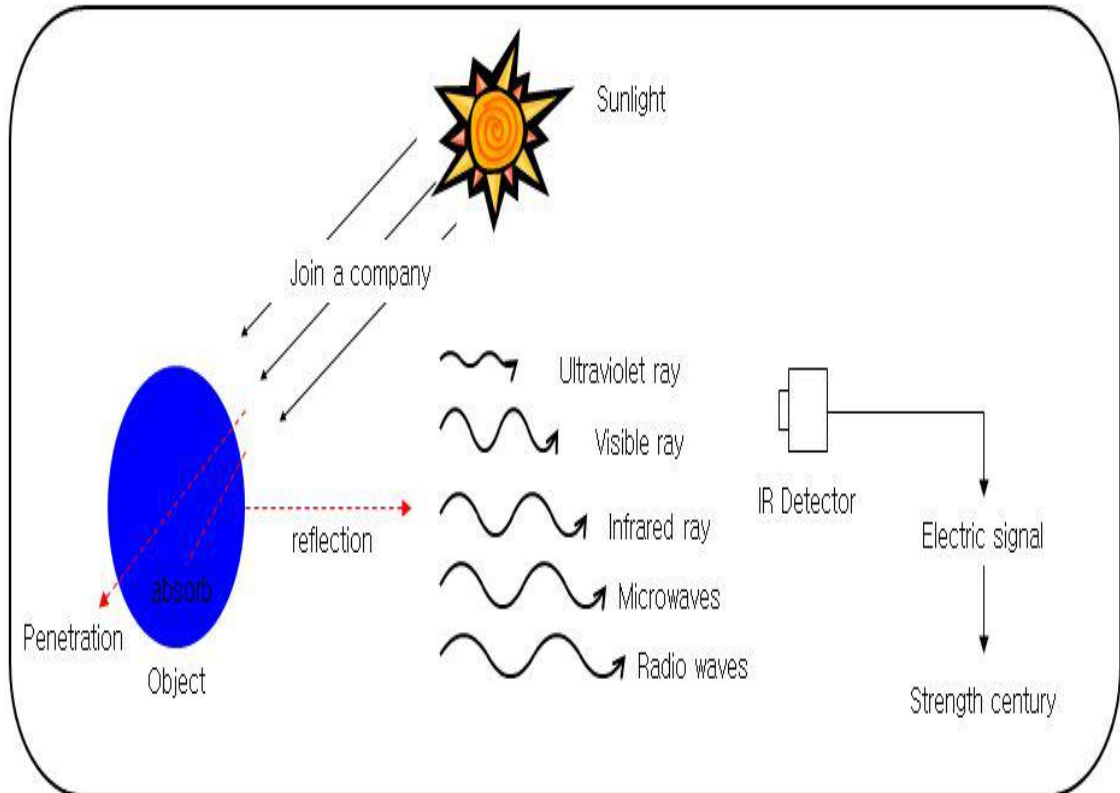


Fig. 2-8 Infrared thermography principle

적외선은 사람의 눈에는 보이지 않지만 적외선 카메라를 사용하면 눈으로 볼 수 있는 보통의 실화상으로 변환할 수 있으므로 대상 물체 또는 임의의 범위에 존재하는 열의 차이(온도)를 조사할 수 있다. 전자기파의 스펙트럼에서 적외선이 차지하는 영역은 대략 900~14,000 나노미터(0.9 - 14  $\mu\text{m}$ ) 부분이며 온도가 절대 온도 이상인 모든 물체는 적외선을 방사하며 그 방사하는 양은 온도에 따라서 증가한다. 여기서 방사된 적외선에너지는 적외선 감지센서를 이용하여 화상으로 만드는 기술로 복사에너지의 파장대역에 따라 서로 다른 검출센서가 사용되며, Frame rate 및 고해상도 구현이 핵심 기

술이며 Fig. 2-8 과 같다. 90년대 위상 잠금 기술의 개발로 응력해석, 결합정량 해석이 가능해졌으며 의료분야와 전력 시설물 진단에 많은 활용이 되고 있으나, 최근 비파괴 검사 및 응력해석분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 적외선열화상 검사 기술은 움직이는 물체를 비접촉으로 실시간 넓은 영역의 온도정보를 제공하며 어두운 공간에서도 측정이 가능하다. 또한 온도차 분석을 통한 예방정비 기술로 활용하여 개선 전후 효과를 보다 좀 더 쉽게 확인 할 수 있지만 장비가 고가이며 대상체의 방사율과 표면 반사가 있을 경우 그 반사로인해 정확한 온도 측정은 어려울 때가 있으며 표면온도만을 측정하는 단점이 있다. 열화상은 대상 물체나 장면 내에 있는 온도값의 차이를 보여주는 적외선 카메라를 사용하여 이미지로 작성하는 방법이라 할 수 있다. 그러므로 열화상은 대상 물체의 온도를 비접촉 방식으로 측정할 수 있는 것이다. 적외선 카메라의 기계적인 구조는 디지털 비디오 카메라와 비슷하다. 주요 구성부분은 입사되는 적외선이 디텍터 즉, 센서 위에 초점이 맺히도록 하는 렌즈 및 신호와 이미지를 처리하고 디스플레이 해주는 전자장치와 소프트웨어 등이다. 일반 비디오 및 디지털 스틸 카메라에서 사용되고 있는 CCD(charge coupled device) 디텍터와 달리 적외선 카메라의 디텍터는 적외선 파장대에 민감한 다양한 물질로 만들어 지는 마이크로미터 크기의 픽셀로 구성되는 초점면 배열(focal plane array; FPA)이다. FPA의 분해능은 대략  $160 \times 120$  픽셀부터  $1024 \times 1024$  픽셀까지의 범위이다. 카메라 기종에 따라서 FPA상의 원하는 부분에 초점을 두고 그 부분을 집중적으로 온도를 계산할 수 있도록 해주는 소프트웨어를 내장하고 있는 모델도 있다. 또한 온도 분석을 지원하는 특수한 소프트웨어가 설치된 컴퓨터나 다른 데이터 시스템을 사용하기도 한다. 이런 방법들은 모두  $\pm 1^\circ\text{C}$  이내의 정밀도로 온도를 분석할 수 있다. FPA 디텍터 기술은 열 디텍터(thermal detector)와 광자 디텍터(quantum detector)의 두 종류로 분류할 수 있다. 대표적인 열 디텍터로는 금속 또는 반도체를 소재로 제조되는 비냉각식 마이크로볼로미터(uncooled microbolometer)가 있다. 이 방식의 디텍터는 대개 광자 디텍터에 비해 가격이 저렴하며 더 넓은 범위의 적외선 스펙트럼을 검출할 수 있다. 마이크로볼로미터는 입사되는 적외선에 반응하며 광자 디텍터에 비해 그 반응속도와 민감도가 훨씬 더 낮습니다. 광자 디텍터는 InSb, InGaAs, PtSi, HgCdTe(MCT) 등의 재료로 제조되며, GaAs/AlGaAs 층을 형성하여 QWIP(Quantum Well Infrared Photon) 디텍터가 만들어진다. 광자 디텍터의 동작 원리는 결정 내에 있는 전자의 상태가 입사 광자에 의하여

달라지는 현상에 기반을 두고 있다. 광자 디텍터는 일반적으로 열 디텍터에 비해 속도와 민감도가 더 우수하다. 그러나 액화질소 또는 소형의 스텔링 사이클 냉각 장치를 사용하여 극저온까지 냉각시켜 주어야 하는 단점이 있다.

## 제 6 절 위상잠금 적외선열화상 기술

위상잠금을 이용한 적외선열화상 검사는 대상체 표면의 국부적인 온도변화를 검출할 수 있는 방법이다. 가열 장치 및 냉각장치 등을 이용하여 조화함수 형태로 대상체에 온도 변화를 주고 이때 발생하는 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 위상잠금 적외선열화상 기법을 이용하면, 시간에 따른 주파수 변조를 통해 정상운전중인 원전 배관의 감육결함을 검사할 수 있다. 계획 예방정비기간 혹은 정상운전 중 원전 배관의 감육결함을 검사할 때, 주기적으로 배관에 열을 가하거나 냉각하면 결함부분이 국부적으로 온도가 변하게 된다. 특정 주파수 대역에서 주기적으로 발생하는 온도변화를 평균화하면 정확한 온도변화를 알 수 있다[22].

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

위의 식 (2.7)에서  $\rho$ 는 밀도,  $c_p$ 는 비열,  $k$ 는 열전도 계수이다.  $T$ 는 온도에 따른 결과이며,  $z$ 는 열 유동 방향으로의 거리, 시간은  $t$ 이다. 열적 자극으로 인한 온도변화는 식 (2.8) 과 같이 표현할 수 있다.

$$T(z, t) = T_0 e^{-z/\mu} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \quad (2.8)$$

여기서 광원의 침투깊이는  $\mu$ 이고, 식 (2.9)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega \rho c_p}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (2.9)$$

열확산 길이는 열파동의 감쇄율을 결정한다. 배관에 열확산계수  $\alpha$ 는 재료의 특성에 따라 다르며, 열파장  $\lambda$ 는 식 (2.10) 과 같이 광원의 침투깊이를 이용하여 표현할 수 있다.

$$\lambda = 2\pi\mu \quad (2.10)$$

식 (2.11) 에서 위상  $\phi$ 는 결함깊이  $z$ 와 관계가 있으며, 결함의 깊이가 선형적이라는 것을 보여준다.

$$\phi(z) = \frac{2\pi z}{\lambda} = \frac{z}{\mu} \quad (2.11)$$

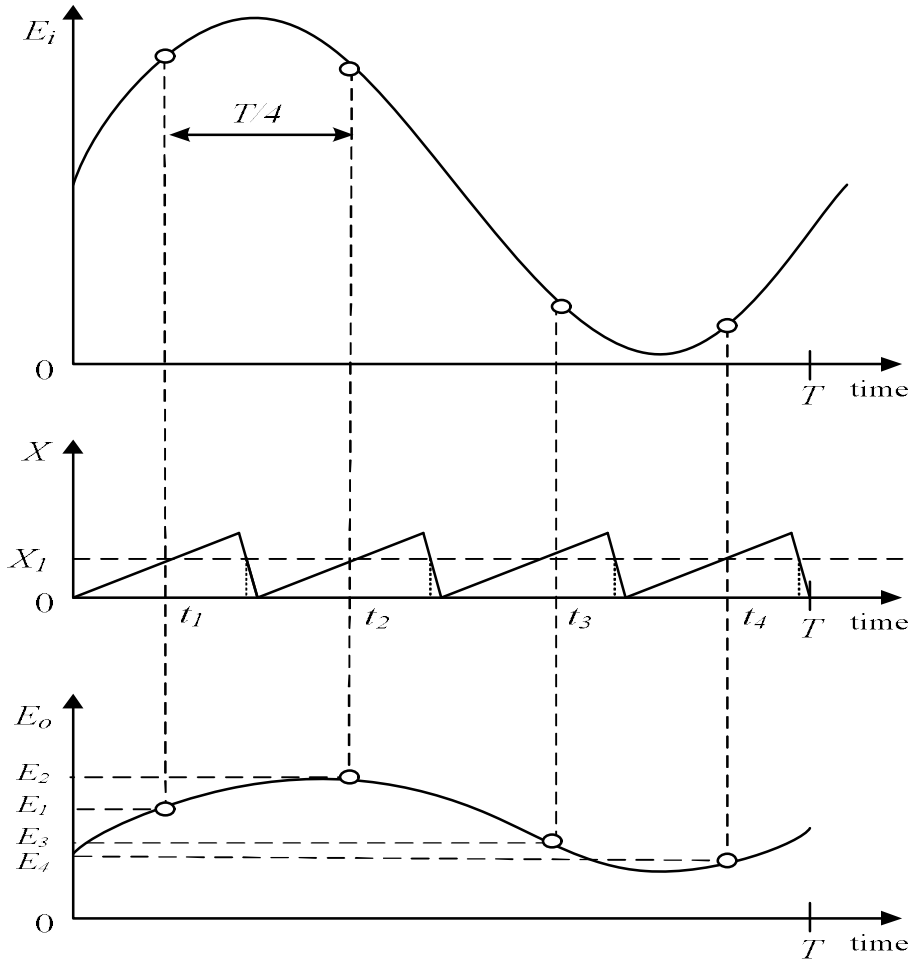


Fig. 2-9 Calculation principle of phase, amplitude, lock-in infrared thermography image

위상잠금 적외선열화상 기법은 주파수 응답특성을 통해 설명할 수 있다. 정상상태에서 정현파 입력 주파수는  $\omega$ 이고 진폭은  $E_i$ 이다. 선형시스템에서는 입력에 따라 출력이 변하고, 출력의 진폭이  $E_o$ 일 때 위상  $\phi$ 을 갖는다. 조화함수 형태의 입력신호  $E_i$ 는 Fig. 2-9의 상단에 보여주고 있다. 조화함수 형태의 입력 주파수와 출력 주파수는 위상 변화와 진폭 변화를 이용하여 계산할 수 있다.



$$\phi = \text{atan} \frac{E_1 - E_3}{E_2 - E_4} \quad (2.12)$$

$$E_i = \sqrt{(E_1 - E_3)^2 + (E_2 - E_4)^2} \quad (2.13)$$

식 (2.12) 과 식 (2.13) 에서  $E_1, E_2, E_3, E_4$  는 한 주기 동안 배관 표면의 한 픽셀에서 기록된 온도데이터들이다[23].

## 제 7 절 적외선 센서 기술

적외선 열화상은 물체의 표면에서 방출되는 적외선을 이용해 온도로 나타내어 물체의 표면온도 분포를 카메라 영상으로 나타내는 것이다. 비파괴 시험의 한 분야로서 눈에 보이지 않는 적외선 방사 에너지를 비접촉식으로 결함과 모재 부를 온도 색상분포로 구분하여 검사 할 수 있는 기술이다. 열화상 카메라는 일반 비디오카메라의 작동 원리와 유사하다. 하지만 영상이 빛(Light)이 아닌 열적외선(Infrared energy)를 검출하는 것에서 차이가 있다. 또 일반 오디오에서 사용되고 있는 CCD (Charge Coupled Device) 디텍터와 달리 적외선 카메라 디텍터는 적외선 파장대에 민감한 다양한 물질로 만들어지며 마이크로미터 크기의 픽셀로 구성되는 초점면 배열(Focal Plane Array: FPA)이다.  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  이내의 정밀도로 온도를 분석하기 위해 카메라 기종에 따라 FPA 상의 원하는 부분에 초점을 두고 그 부분의 온도를 집중적으로 계산할 수 있도록 프로그램 되어있는 소프트웨어와 온도 분석을 지원하는 특수한 소프트웨어가 설치된 컴퓨터나 다른 데이터 시스템을 사용하기도 한다. FPA 디텍터 기술은 열디텍터 (Thermal detector)와 양자 디텍터(Quantum detector)의 두 종류로 분류한다. 적외선 카메라의 주 구성품은 입사되는 적외선이 디텍터 즉, 센서 위에 초점이 맺히도록 하는 렌즈 및 신호와 이미지를 처리하고 디스플레이 해주는 전자장치와 소프트웨어 등이다. 검출 원리는 Fig. 2-10 에 나타낸 것과 같이 열적외선 에너지가 적외선 카메라의 검지부(Detector)의 광학렌즈를 통과하면 검지부의 센서(Sensor)에 모아진다. 센서에 감지된 열적외선 에너지는 전기신호로 변환되어 제어부로 보내진다. 제어부에서 감지된 전기신호를 열화상정보로 바꾸며 물체의 표면온도는 수천 개의 점으로 표현된다. 이 시각화된 이미지는 예를 들어 저온일수록 단파장의 청색, 고온일수록 장파장의 적색에 가까깝게 표시되어 그 변화로 인해 물체 온도 특성을 알 수 있다.

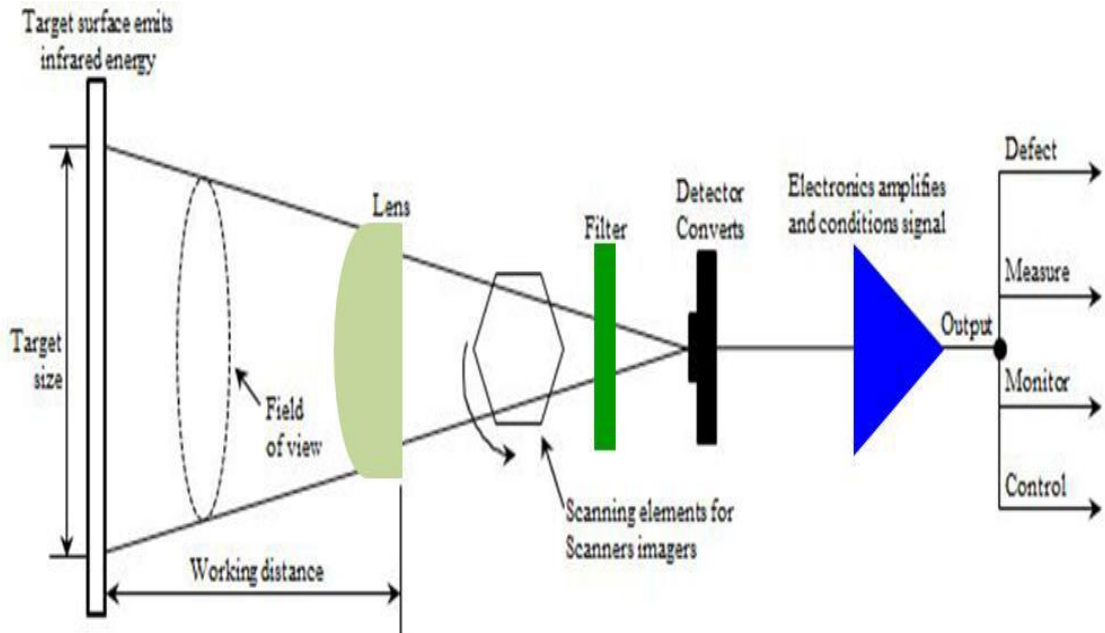


Fig. 2-10 IR camera with added scanning element for imaging

다음은 각 측정 장치의 부위 별 기능을 설명하였다,

1) 검출부

- 대상물로부터 방사되는 적외선은 대기를 통과하여 광학계에 의해 집광되어 검출기에 의해 전기신호로 변환하여 증폭기에 의해 증폭된다.

2) 제어부

- 검출부에서 전기신호로 변환된 적외선은 파장에너지와 온도의 비례관계에 의해 표시부에서 온도로 변환된다.

- 광학계에 주사경을 부가시킨 경우에는 브라운관 등을 통해 온도분포를 모니터에 영상처리 하여 표시한다.

3) 분석부

- 온도분포를 색상 구분하여 열화상으로 나타낸다.

- 온도분포를 Graph화하며 임의 부분의 등온분포 최저, 최고온도, 평균온도, 부위 별 온도 차 등을 나타낸다.

적외선 센서는 크게 열형 센서와 광자형 센서로 구분할 수 있다. 적외선은 온열효과를 가져오기 때문에 열선이라고도 명명되어지고 있다. 열형 센서에는 목표물에서 입사되는 적외선에 의해 물질의 온도가 상승함으로써 유발되는 물성의 변화를 감지하는 볼로미터, 온도변화에 따른 전기적 특성의 변화를 감지하는 초전형 검출기 및 물질 양단의 온도차에 의해 발생하는 기전력을 감지하는 열전 검출기 등이 있다. 열형 센서는 넓은 파장 대역에 걸쳐 균일한 감지능을 가지며, 냉각을 필요치 않다는 장점이 있으나, 물질의 온도가 상승하거나 냉각하는데 걸리는 시간으로 인해 응답속도가 느리고, 감지능이 다소 낮다는 단점이 있다.

광자형 센서는 반도체 물질로 제조되며 적외선이 입사되었을 때 반도체 물질 내의 전자 - 정공의 여기로 유발되는 전류, 전압의 변화를 감지한다. 따라서 광 검출기는 반도체 물질의 에너지 밴드 갭에 해당하는 특정 파장대역에서 감지능이 최대가 되는 파장 선택성을 갖는다. 광자형 센서는 응답속도가 매우 빠르고 감지도 또한 우수하나 근적외선 파장 이외의 장파장 적외선을 감지하고자 할 때는 주변 온도에 의해 야기되는 전자, 정공 쌍의 형성을 억제하는 냉각장치를 필요로 한다. 원거리 관측에 필요한 첨단 군사장비, 미세한 온도 변화를 감지하는 의료장비 등에서는 광 검출기가 주로 사용되고 있다. 따라서 아래 Table 2-2 와 Table 2-3 에서는 적외선 센서를 열형과 광자형 센서로 구분하여 센서의 종류를 분류하였다.

Table 2-2 Sensor characteristics

구분	장점	단점
열형	상온에서 동작이 가능하다. 파장 의존성(파장에 따른 감도변화)이 없다.	감도가 낮다. 응답이 느리다.
광자형	감도가 높다. 응답이 빠르다.	냉각 장치가 필요하다. 파장 의존선이 있다.

Table 2-3 Types of Infrared Sensors

센서의 종류		동작모드	응답 파장	재료	동작 온도 (K)	용도
열형	Thermopile	Thermoelectric		Bi, Sb, InSb, Te	300	방사온도계, 분광 광도계
	Bolometer	저항 변화		백금, Ge	300	형태감지, 자동차 안전
	Pneumatic Cell	Gas Expansion		불화성 Gas	300	물체 유무, 위치, 형태 감지
	Pyroelectric Sensor	Pyroelectric - effect		<i>PZT, TGS, PVDF, LiTaO<sub>3</sub></i>	300	방범 장치, 방사 온도계
광자형	Intrinsic Type	Photo-Conductive	1~3	PbS	300	분광기, 화염방지
			1~4.5	PbSe	300	화재검출기, Gas 분석기
			2~12	HgCdTe	77	적외촬영장치, 불꽃조절
		Photo-Voltatic	0.6~1.9	Ge	300	광통신, Laser Monitor
			1~3	InAs	77	분광기, Laser 검출기
			2~5.5	InSb	77	적외선 현미경
	Extrinsic Type	Photo-Conductive	1~10	Ge : Au	4.2	CO <sub>2</sub> Laser Sensor
			2~14	Ge : Hg		
			2~30	Ge : Cu		
			2~40	Ge : Zn		
1~17			Si : Ga			
1~23			Si : As			

## 제 8 절 적외선 열화상 측정 기법

적외선 열화상 비파괴검사는 크게 수동적 방법(passive method)과 능동적 방법(active method) 2가지로 구분된다[24].

수동적 방법은 Fig. 2-11(a) 와 같이 단지 측정 대상으로부터 자연스럽게 방사되고 있는 적외선 에너지를 검출하는 방법으로 가장 일반적인 방법이다[5]. 수동적 방법과 달리 능동적 방법은 Fig. 2-11(b) 와 같이 측정 대상체 고유의 적외선량에 의존하는 방법이 아닌 외부에서 제어 가능한 에너지를 가진하여 그에 따른 반응으로 대상체가 표면으로부터 방사하는 적외선 에너지를 측정하는 기법이다. 이러한 능동적 방법은 물체표면 주변온도, 방사율, 거리, 형상, 측정각도, 풍속에 따른 영향을 제어할 수 있으며, 검사자가 얻고자 하는 결과를 좀 더 정밀하게 얻을 수 있다. 능동적 검사기법은 대표적으로 Fig. 2-12 에서 보이는 것과 같이 외부에너지(광적외선, 진동, 마이크로웨이브, 초음파, 와전류 등)따른 분류와 제어 방법에 따른 분류로 나뉜다. 다시 말해 능동적 방법은 일반적으로 측정 대상물에 전혀 열적인 영향이 없어 온도 변화가 없는 경우 또는 온도 변화가 매우 미세한 경우에 외부에서 열 에너지를 가해줌으로서 측정 대상체의 내부 결함이나 표면의 미세 결함에 대하여 온도 분포를 발생시켜 검출하는 기술이다 [25].

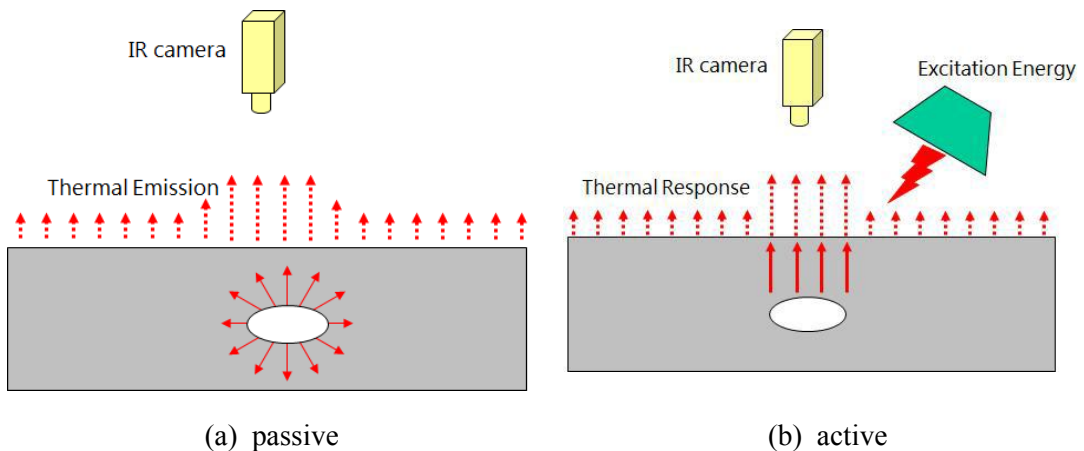


Fig. 2-11 IR inspection technique

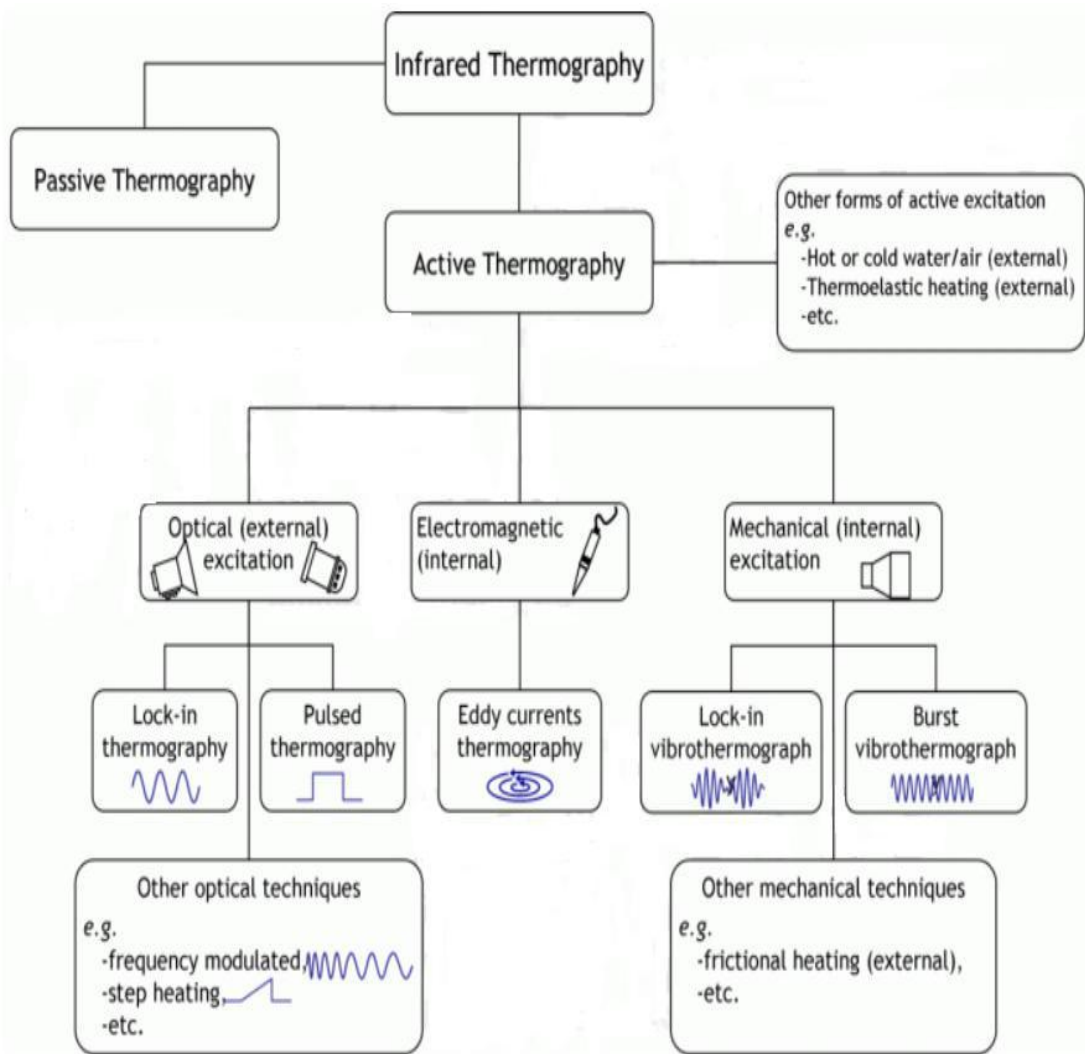


Fig. 2-12 Infrared thermography method

## 1. 수동적 열화상 검사 (Passive thermography)

수동적 열화상 검사는 Fig. 2-13 과 같이 검사 대상 물체로부터 방사되는 적외선을 검출하는 방법이다. 적외선을 방출하는 모든 물체에 해당하는 것으로 검사되는 물체의 고유 적외선 양을 측정한다. 주로 전력열화, 전자부품 등 동작 상태에서 측정하는데 사용된다. 능동적인 검사에 비해 간단하지만 물체 표면의 방사율, 주변온도, 풍속, 거리, 형상등 여러 인자들을 고려해야 한다[26].

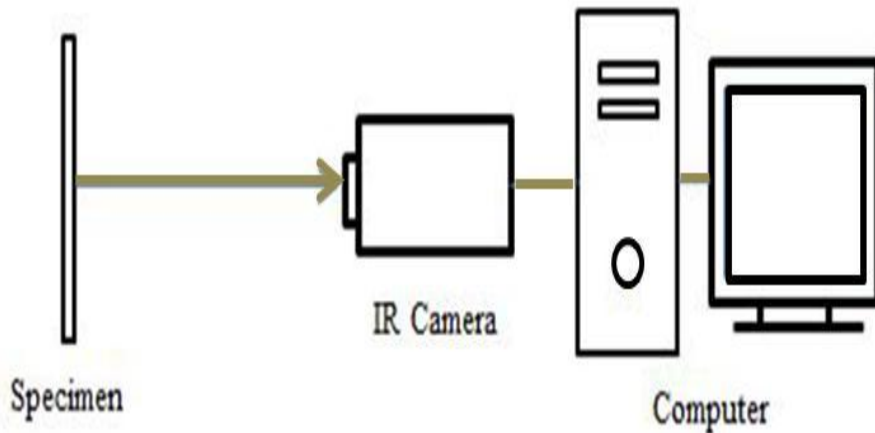


Fig. 2-13 Passive Infrared thermography method



## 2. 능동적 열화상 검사 (Active thermography)

능동적 열화상 검사는 Fig. 2-14 와 같이 검사 대상 물체에 제어 가능한 에너지 열원을 입사하여 검사체와의 반응으로 나타나는 적외선을 측정하는 방법이다. 주로 측정 대상물에 열이 가해지지 않아 온도 분포가 없거나 그 차이가 미소한 경우 외부에서 열을 가함으로써 대상물의 내부결함, 또는 표면결함 분포를 나타 낼 수 있다[27]. 외부 열원으로 보통 펄스가 많이 사용 되는데 대표적으로 제논램프와 할로겐램프가 있다. 이는 물체의 열전도율에 따라 방사되는 복사 에너지를 온도로 기록하는 방법이다[28]. 짧은 시간 열 자극을 주어 신속한 결함 검출과 재료의 손상을 방지하는 장점을 갖고 있지만 반면에 감도가 다소 떨어질 수 있다.

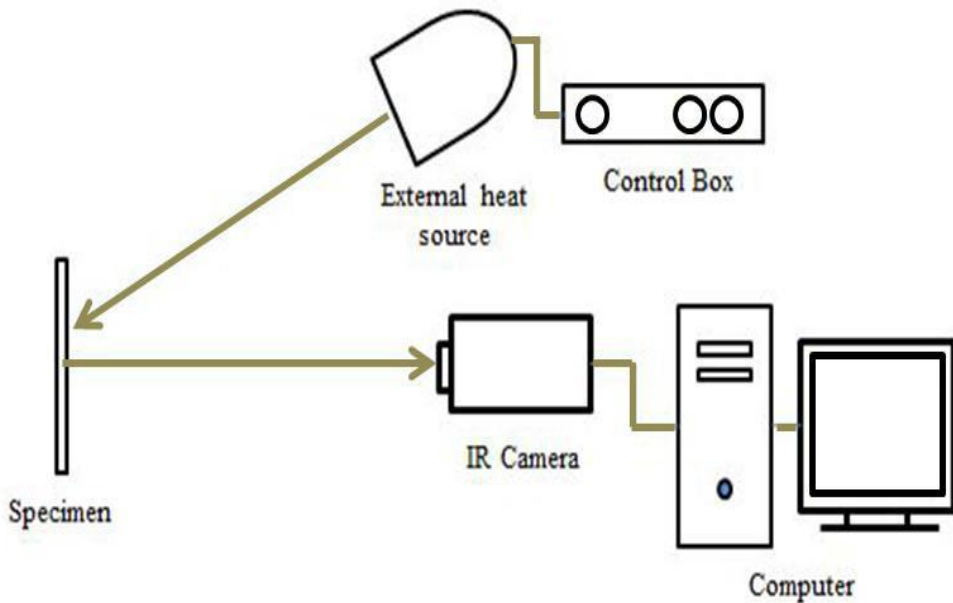


Fig. 2-14 Active Infrared thermography method

능동적인 열화상 분석은 비정상상태(non-steady-stats), 비평형상태(nonequilibrium) 또는 동적 열화상 분석(dynamic thermography)으로 간주할 수 있다. 표면의 표면온도

는 시간의 함수로서 모니터되고 표본의 하부표면을 통해 생성된 일시적인 열 흐름은 표면온도 분포에서 과도적 이상현상(transient anomaly)의 원인이 될 것이다. 표본을 복사에너지 흡수를 통해 가열하거나 전기 가열, 와전류 또는 초음파를 통해 가열한다. 표본으로의 에너지 전달은 연속적이거나 조절된 연속형태로 또는 펄스를 통해 할 수 있다. 표본 내에서-내부 결합/구조에 의해 영향을 받는-열전달의 검출은 시간의 함수로서 반사 중 또는 투과 중 표면온도의 측정을 통해 한다. 연속적인 가열 또는 단계적 가열의 사소한 경우를 무시하고 능동적 열화상촬영의 가장 중요한 방법들은 펄스 열화상 분석과 위상잠금 열화상 분석이다. 그것들은 항공기 검사, 태양광 패널, 탄소 또는 유리섬유 구조와 함께 복합재로 만든 물체, 기타 등 많은 다양한 분야에 광범위하게 적용된다. 과도온도 작용을 이용한 비파괴검사의 개념은 오랜 역사를 지니고 있으며 최초의 열영상 장치보다 먼저 개발 되었다. 1960년대에는 물체의 과도적 표면온도를 검출하기 위한 실험적 연구가 많이 있었다. 온도 민감한 색, 점 측정 센서 그리고 기타 계기들이 사용되었다. 그러나, 이 모든 방법들은 온도의 민감성과 느린 응답시간에 의해 심히 제한을 받았다. 1970년대 말은 위상잠금 열화상 분석 방법과 펄스 열화상 분석 방법의 성공적인 개발이 시작되는 시기였다[29,30]. 지난 수십년 동안 전자 및 컴퓨터 기술은 물론 열화상 시스템과 새로운 가열 방법의 사용이 증가하면서 이 두 방법들은 비파괴검사의 전체 분야에서 확고한 자리를 잡았다[31~34].

능동적 열화상 분석 기법은 고체내 과도 열전달에 기초하고 있다. 모든 방법들의 목표는 고체 안에 감추어진 물질 불연속부를 검출, 발견 및 특성화하는 것이다[35~39]. 이러한 시스템에서 3차원 과도 열전달을 정확히 정량적으로 설명하는 것은 매우 복잡한 문제이다. 능동적 열화상 분석에서 과도 열전달을 시뮬레이션하려면, 물질의 이방성 열작용에 대한 3D 열전도 미분방정식을 이용하여 3D 온도 분포도를 예측해야 한다. 1D 모델 또는 2D 모델을 사용하여 열전달을 단순화하면 온도 분포도에 대한 어림추정치나 정성적 정보만 나올 것이며 측정결과에 대한 해석이 어려울 것이다. 오늘날에는 실험조건을 정확히 고려하는 경우[40], 유한요소법이 3D 열전달 모델링에 가장 유망한 도구이다.

## 제 3 장 실험장치 설계 및 개발

적외선열화상 카메라를 이용하여 감육결함을 검사할 때, 시험편을 가열하거나 냉각하는 장비는 매우 중요하다. 적외선열화상 기술은 온도분포를 열화상이미지로 가시화하여 결함의 유무, 형상, 위치를 측정하는 기술이다. 감육결함이 발생한 경우, 외부로부터 가열하거나 냉각하면 내부 결함의 유무에 따라 열확산이 방해받게 되어, 많은 온도차를 발생시킨다. 냉각장치와 가열장치의 성능은 적외선열화상 검사 시 결함을 판단하는데 많은 영향을 미친다. 본 연구에서는 감육결함 검출을 위해 온도 변화를 발생하게 하는 가열장치를 개발하였다.

### 제 1 절 가열장치(할로겐램프)

적외선열화상 카메라를 이용하여 감육결함을 검사하기 위해서는 검사에 가장 적절한 파장대역의 램프를 사용하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 적외선열화상 검사 시 1000W 할로겐램프의 파장대역이 가장 적절하다고 판단하여, 가열장치로 할로겐램프를 사용하였다. 가열장치의 성능을 실험하기 위해 상용제품인 필립스 PAR 64 1000W 할로겐램프와 개발한 할로겐램프로 실험하였다.

본 절에서는 상용제품인 필립스 PAR 64 가열장치와 개발한 가열장치의 성능을 비교하였다. 감육결함검사에 적합한 가열장치를 개발하는 것을 목표로 하여 연구를 수행하였으며, 적외선열화상 카메라를 이용하여 감육결함 검사 시 최적의 장비와 검사방법을 개발하는 것을 목표로 하였다.

#### 1. 기존 상용 할로겐 램프

기존 상용 할로겐 램프는 필립스 PAR 64로 무게가 2.5 kg으로 가볍고, 내구성이 높은 장점을 가지고 있다. 1000 W의 출력을 가지고 있으며, 램프와 반사판 그리고 렌즈까지 모두 일체형으로 구성되어 있다. 크기는 가로 250 mm/ 세로 300 mm/ 폭 400

mm이다. 적외선열화상 카메라를 이용하여 대상체의 결함유무를 판별할 때, 가장 많이 사용되는 제품이다. Fig. 3-1 은 상용 할로겐 램프를 보여 주고 있다.

상용 할로겐 램프는 빛이 조사되는 중앙을 중심으로 조도가 높았으며, 주변으로 갈수록 조도가 감소되는 경향을 보인다. 빛의 조사범위를 조절하기 위해서 램프를 직접 이동하여야 하기 때문에 좁은 공간에서 큰 대상체를 검사하기 어려우며, 작은 대상체를 조사 시에 빛을 집중적으로 조사하기 어렵다. 따라서 감육결함을 검사에 적합한 램프는 빛이 골고루 조사되고, 대상체 형태에 따라 빛의 조사각도를 조절할 수 있어야 하며 빛이 대상체 균일하게 조사되어야 한다.



Fig. 3-1 Commercial heating device(Philips PAR 64)

## 2. 가열장치 개발

본 연구에서 배관결함검사에 최적화된 가열장치를 개발하기 위하여 1000W의 할로겐 램프를 사용하였으며, 반사판의 반사율을 높이기 위하여 석영재질의 반사판을 사용하

였다. 빛의 집중도를 높이기 위해 Cylindrical 렌즈를 사용하여 검사하고자 하는 대상체에 빛을 집중적으로 조사할 수 있도록 하였다. 감육결함 검사 시 휴대성을 높이기 위해 작은 가로 300 mm, 세로 150 mm, 폭 150 mm로 소형화하고, 무게를 경량화 하였다. Fig. 3-2 는 개발한 가열장치를 보여주고 있다.

가열장치의 성능을 측정하기 위해 조도측정기를 이용하여 기존 상용 할로겐램프와 개발한 가열장치의 조도를 비교 하였다. 조도 측정결과, 개발한 가열장치가 3850 LUX 정도 밝은 것을 알 수 있다. Table 3-1 은 거리 2m에서 기존 상용 할로겐램프 와 개발한 가열장치의 조도를 비교한 것을 보여주고 있다. 또한 Fig. 3-3 은 기존 상용 할로겐램프와 개발한 가열장치의 조도 및 조사범위를 비교한 것을 보여준다. 빛의 조사범위 비교결과, 개발한 가열장치는 빛의 조사각도를 조절하여 집중적으로 조사할 수 있다. 개발한 가열장치는 조사되는 빛의 중앙 부분과 외곽 부분의 조도가 균일하여 대상체에 빛과 열을 고르게 조사할 수 있어 대상체의 감육결함 검사에 적합할 것으로 판단된다. Fig. 3-3 을 통해 개발한 가열장치가 기존의 상용장비보다 조도가 높고, 빛이 배관에 고르게 분포된다는 것을 알 수 있다. 개발한 가열장치는 램프와 반사판을 이동할 수 있도록 하여 빛의 조사범위를 조절할 수 있도록 하였다. 조사범위는 4~64도까지 조절할 수 있으며, 빛의 유효 조사 거리는 2-10m로 조사범위가 넓다. 개발한 가열장치는 빛의 조도뿐만 아니라, 대상체의 길이와 두께에 맞추어 빛의 조사 범위를 조절할 수 있어 여러 대상체의 감육결함 검사 시 매우 적합할 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 3-2 Developed heating device

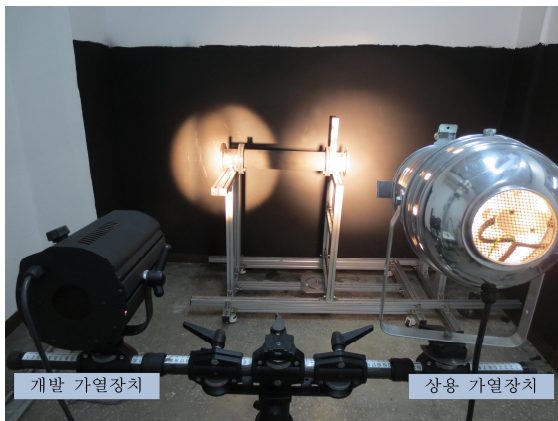


Fig. 3-3 Comparison of illuminance and irradiation range of commercial heating device and developed heating device

Table 3-1 Comparison of heating device illuminance(Distance, 2m)

PAR 64(1000 W)	개발가열장치(1000 W)
19872 Lux	23730 Lux

### 3. 가열장치 최적 설계

#### 1) 최적 디자인을 도출하기 위한 광학 설계

본 논문에서는 배관에 균일하게 광을 조사하여 배관 전체에서 균일한 온도 분포를 갖도록 함으로 결합의 위치 및 크기를 정확히 파악하고자 한다. 이를 위하여 광선의 복잡한 경로를 몬테카를로 시뮬레이션에 근거한 광선 추적 방법으로 분석하였다. 분석에는 3차원 광학 디자인 툴인 LightTools을 활용하였다. 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 광선추적기법은 광자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화시켜 공간 내에서 광자의 운동 경로를 수학적으로 예측 가능하게 해준다. 또한 교차한 면에서 빛의 반사 특성, 투과 특성 등과 같은 벡터의 방향이나 크기에 변화를 줄 수 있는 요인 등을 고려하여 벡터의 새로운 방향과 크기를 결정할 수 있는 기법으로 구성되어 있다. 가열장치에서 빛을 조사하는 배관의 거리 및 면적을 고려하여 평면 형태의 Surface receiver를 설정할 수 있어 배관에 조사되는 광의 세기를 정확하게 분석 할 수 있으며, 조도, 광도, 배광곡선, CIE 색좌표, 색온도 (CCT) 의 다양한 결과를 얻을 수 있다.

#### 2) 평행광을 얻기 위한 반사체 디자인

Fig. 3-4 는 반사체를 디자인하기 위해 디자인한 개략도를 보여준다. 우선 휴대성을 높이기 위해 반사체의 지름을 125mm로 설정하였다. 이것은 상용램프 204mm에 비해 크기가 1/2 로 줄어든 것이다. 조도의 측정을 위해서는 1m 거리에 surface receiver를 140mm×250mm의 크기로 설정하였다. 빛의 진행 방향을 평행광으로 설정하기 위해서 반사체의 초점거리를 15.8mm에서 19.2mm까지 변화시켰다. 그림 2.3.18에서 보는 것처럼 초점거리가 15.8mm에서 17.5mm로 증가하면 빛이 원형 모양으로 집중되는 것을 확인하였다. 빛의 세기는 외각의 갈색에서 중앙의 분홍색으로 갈수록 커진다. 초점거리가 다시 늘어나게 되면 빛의 모양이 다시 타원형으로 찌그러지는 것을 확인하였다. 따라

서 17.5mm로 반사체를 제작하였을 때 빛이 가장 평행광에 가깝게 진행함을 보여준다.

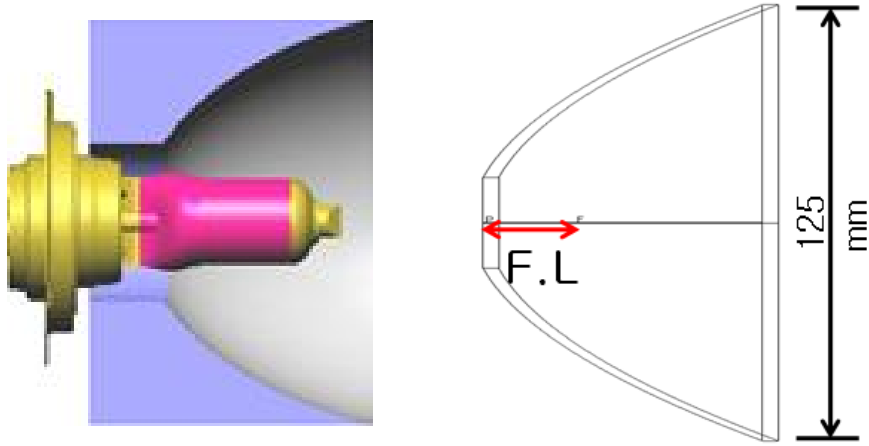


Fig. 3-4 Load condition of heat source according to existence of defects

3) 배관 모양에 맞는 균일한 배광을 얻기 위한 광학 설계

배관 모양에 맞는 균일한 배광을 얻기 위해 본 과제에서는 실린더형 렌즈를 반사판 앞에 설치하였다. Fig. 3-5 는 설계된 가열장치의 설계 도면을 보여준다. 실린더형 렌즈는 130mm×130mm의 크기를 갖는다. 조도 측정을 위해서 1m 거리에 surface receiver를 140mm×250 mm의 크기로 설정하였다.

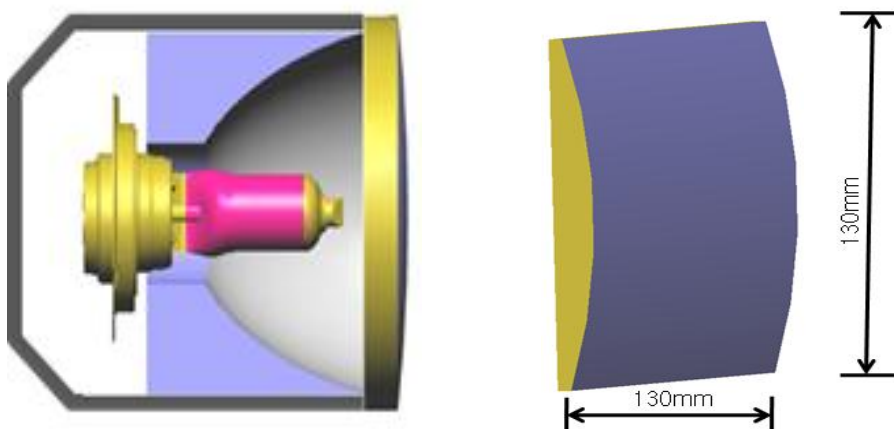


Fig. 3-5 Heating device with cylindrical lens



실린더형 렌즈를 사용하면 초점거리 17.5mm의 반사체에 의해 설계된 평행광이 실린더형 렌즈에 의해 굴절되어 궁극적으로 Fig. 3-6 과 같은 배광 분포를 갖는다. 직사각형 모양의 가로축으로 균일한 세기의 빛이 생성되고 이는 배관의 단면이 직사각형 모양이기 때문에 가로축으로 일정한 두께까지 결함을 정확하게 분석하는데 크게 도움이 될 것으로 예상된다. 또한 균일한 세기의 빛이 가로 축으로 전달됨으로 결함이 있는 부분과 없는 부분의 온도차를 분석하는데 상당히 유리할 것으로 판단된다.

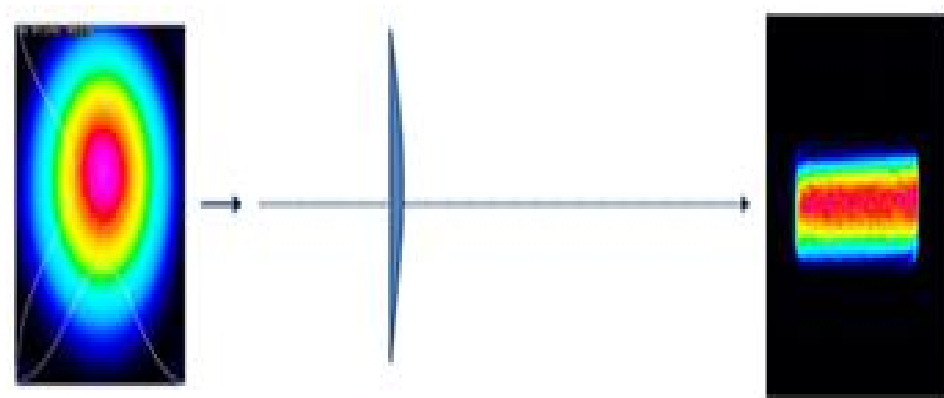


Fig. 3-6 Variation of light distribution by cylindrical lens

최적의 배광 분포를 얻기 위하여 실린더형 렌즈의 초점 거리를 771mm에서 385mm까지 변화시켰다. 앞서 초점거리가 17.5mm인 반사체를 이용하여 설계한 평행광의 중앙이 약간 둥근 점시 모양으로 변화함을 볼 수 있다. 초점거리가 작아질수록 가로축으로 좀 더 균일한 빛의 세기를 가짐을 확인 할 수 있다. 초점거리가 428mm인 실린더형 렌즈를 이용했을 때 약 80mm의 지름을 갖는 배관에서 균일한 가로 배광을 얻을 수 있었다.

## 제 2 절 적외선 열화상 프로그램 개발

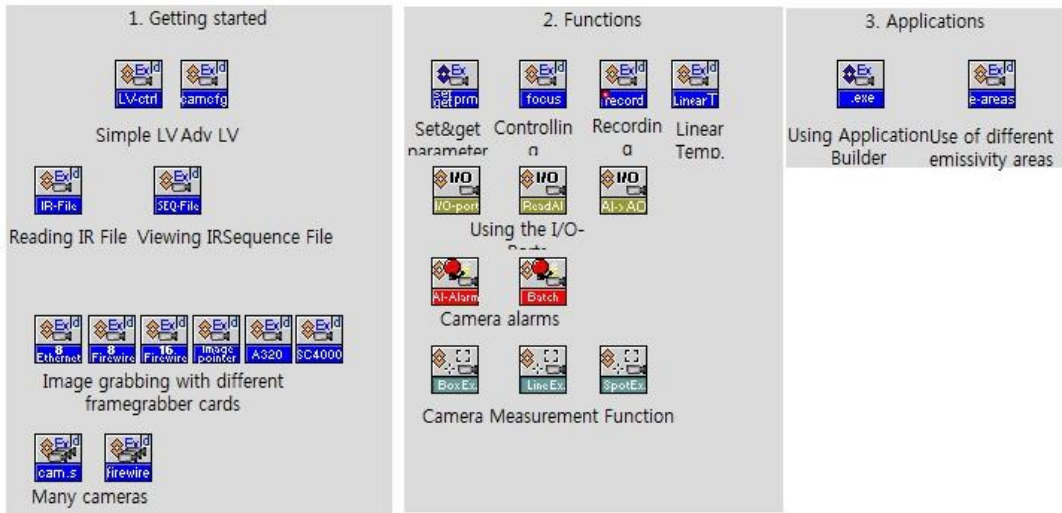


Fig. 3-7 Supplied library

본 연구에서는 중적외선, 장적외선 적외선열화상 카메라를 이용하여 시험편의 결함을 검사하기 위해서 Fig. 3-7 에서 보인 제공 라이브러리와 Labview의 Vision 기능들을 활용하여 Fig. 3-8과 같은 위상잡음을 이용한 비파괴 검사 전용 프로그램을 개발하였다.

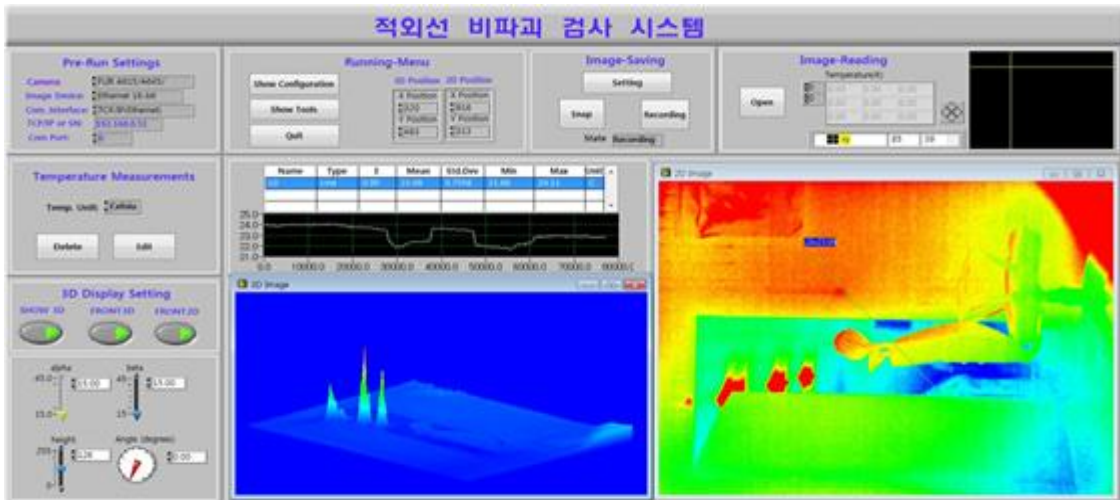


Fig. 3-8 Developed Nondestructive Inspection Program

Fig. 3-9 와 같이 개발된 UI(User Interface)는 편리하고 직관적인 구조로 개발하였고, 각 기능별 구별을 명확히 하여 편리한 사용자 환경을 갖도록 개발하였다. 프로그램 실행전 세팅부, 실행시 메뉴, 이미지 저장, 이미지 불러오기, 온도 히스토그램 분석, 2D 이미지, 3D 이미지 분석부 등으로 구성되어 있다.

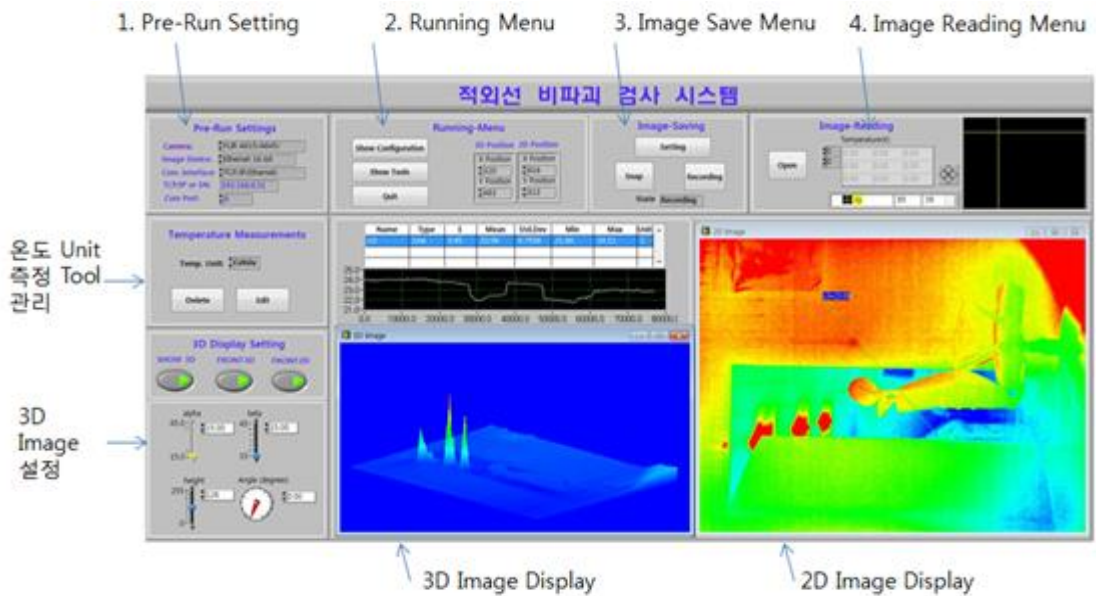
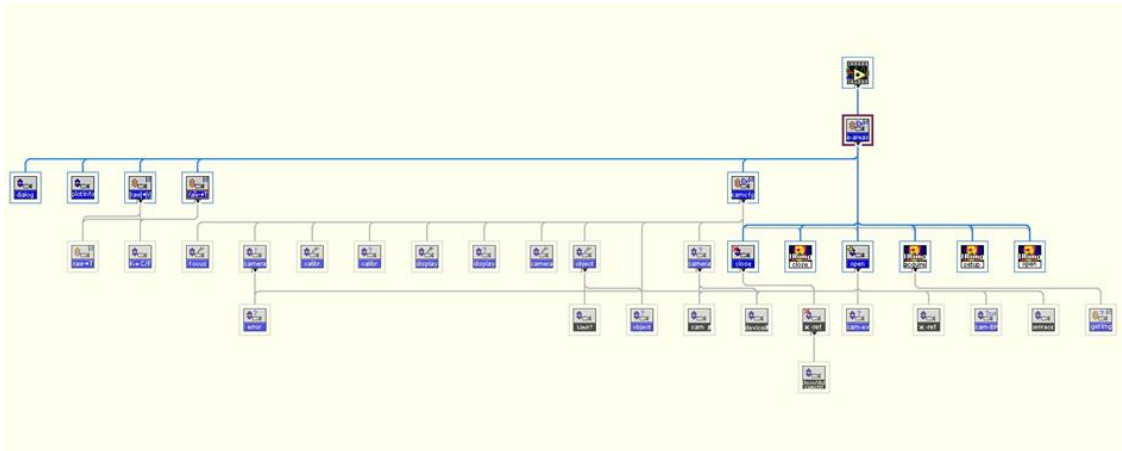


Fig. 3-9 Program Structure

상단의 전체 화면 Fig. 3-9 와 같이 1~4 번의 프로그램 작동을 위한 Menu를 구성하였고, 중간의 온도 Unit 측정 Tool 및 히스토그램 관리는 실시간으로 나타내었다. 히스토그램 관리창은 라인 profile 과 같은 명령을 수행 시 해당 라인의 온도분포가 실시간으로 Display 되도록 하였다. 프로그램 구동 후 메인창이 열린 상태에서 Pre-run setting 이 필요하다. 카메라의 모델명을 Data Board에서 인식하고 통신속도 IP 등을 정확하게 인식하지 않으면 작동이 되지 않기 때문이다. 이를 위한 실행 전 세팅부를 LabView 프로그램을 통하여 프로그램 하였고 결과를 나타내었다. 2D와 3D는 모두 실시간으로 Display 되면 3D는 열화상을 3차원 영상으로 재구성함으로써 사실감을 높이기 위하여 개발되었다. 향후 형상측정에도 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

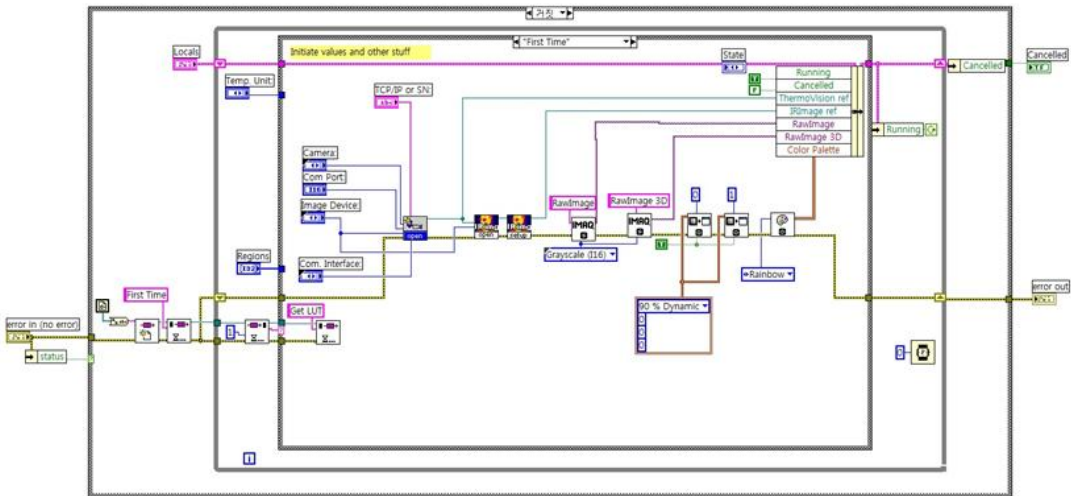


Fig. 3-10 Pre-Run Setting algorithms and Screen Images

Running Menu는 Show Configuration 과 Show tools, Quit 3가지의 서브 메뉴를 포함하고 있으며 구성은 Fig. 3-10, Fig. 3-11 과 같다.

- Running Menu - Show Configuration - Camera : 카메라 세팅 등
- Settings : 주변환경 등 설정
  - Picture : 초점 조정과 자동초점, 2D 화면선택
  - Show Tool - 점, 라인, 사각형 선택 기능, 화면확대, 화면이동
  - Quit - 검사 중지.

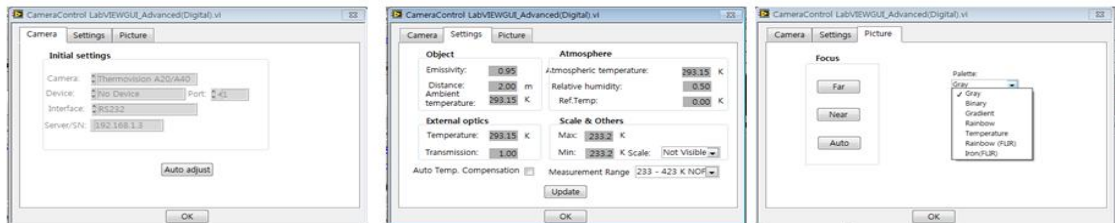
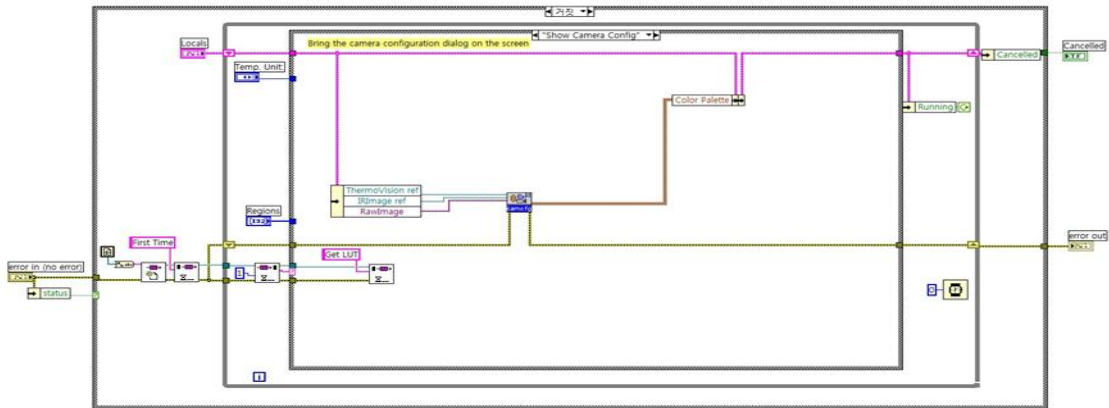


Fig. 3-11 Menu image of show Configuration

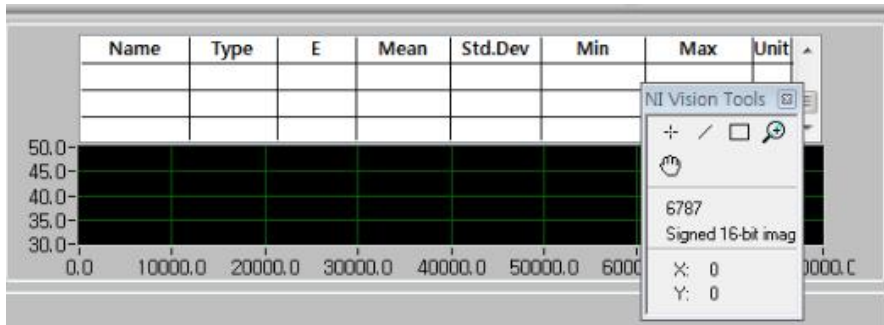


Fig. 3-12 Menu image of show Tool

Fig. 3-12 는 Line Profile 메뉴를 나타내고 있으며 Fig. 3-13은 Show Tool 기능 중 한가지인 Line Profile을 실행하였을 시 이미지를 나타내었다. 설정은 섭씨(℃)로 설정하였고, (Unit 에 ℃ 표시) 라인의 온도를 실시간으로 나타내고 있다.

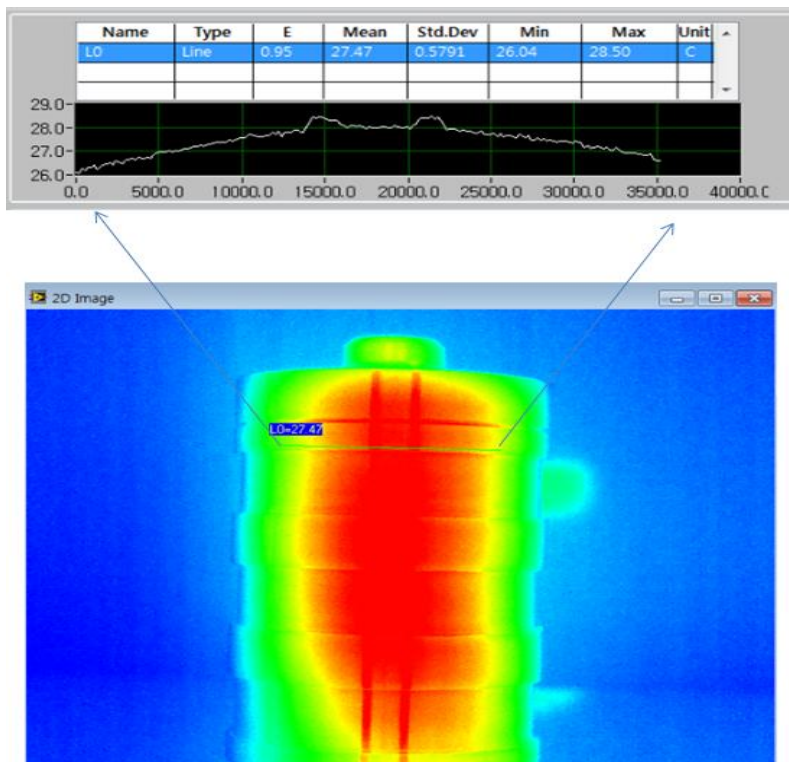


Fig. 3-13 Line profile execution image

Fig. 3-14 는 Show Tools 중에서 Rectangle 기능을 실행한 이미지 이다. 선택한 영역의 Min, Max 온도와 평균값을 실시간으로 나타내고 있다. 여기서는 절대온도 (K)로 설정하여 실행 하였다.

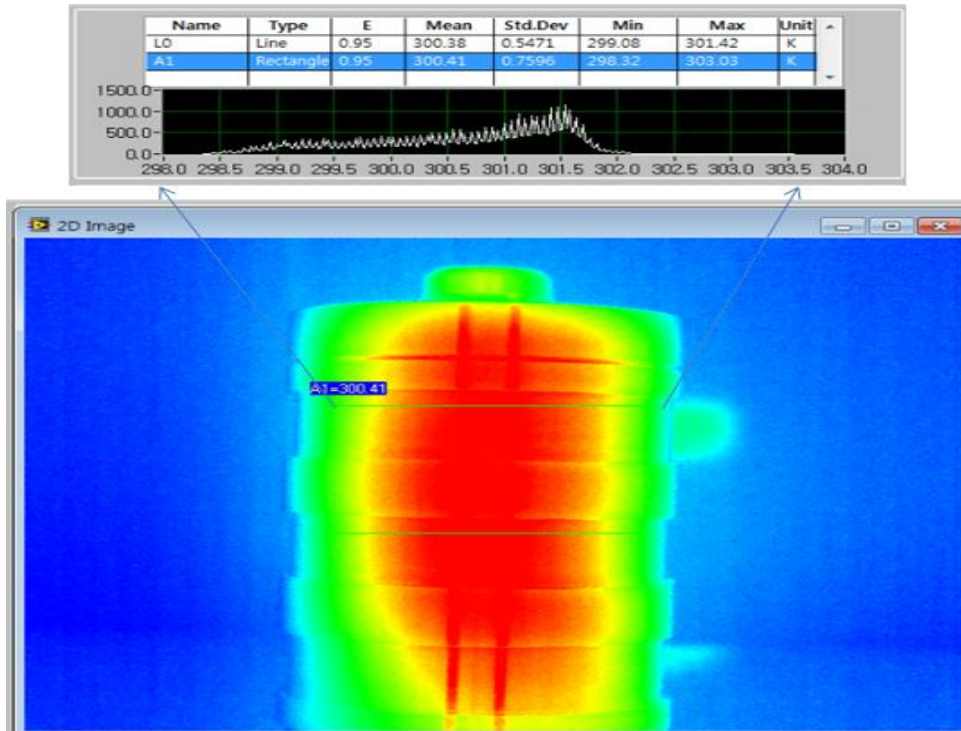


Fig. 3-14 Real-time temperature distribution run image for Rectangle area

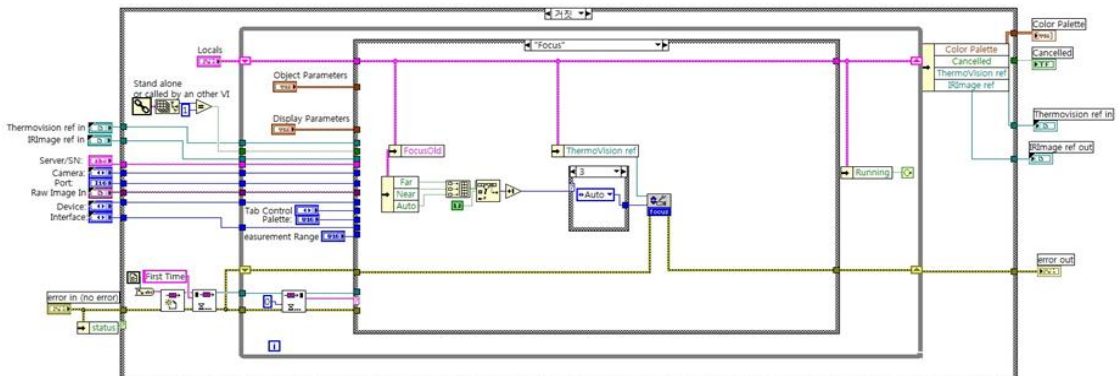


Fig. 3-15 Labview algorithm image(Camera focus control)

라인 프로파일 기능은 아래 그림과 같이 측정 대상물의 온도분포를 히스토그램으로 나타내는 기능이다. 측정부의 Labview 알고리즘과 측정부 이미지는 Fig. 3-14부터 Fig. 3-22 와 같다.

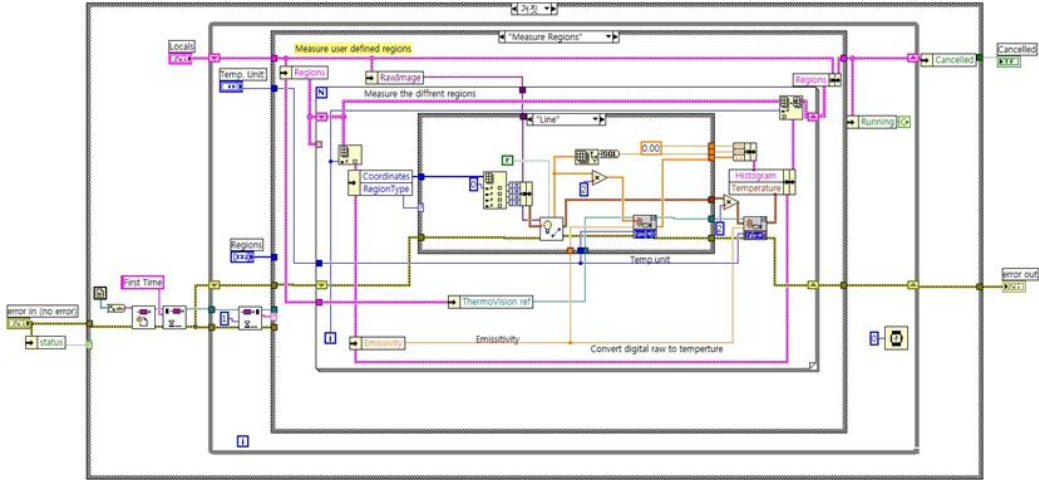


Fig. 3-16 Temperature profile measurement algorithm



Fig. 3-17 Measurement part program execution image

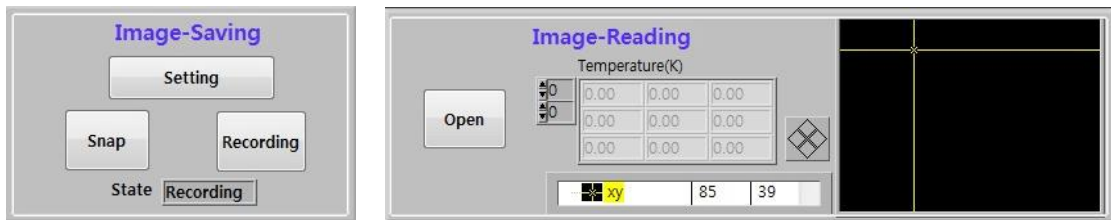


Fig. 3-18 Image save, load program Run image



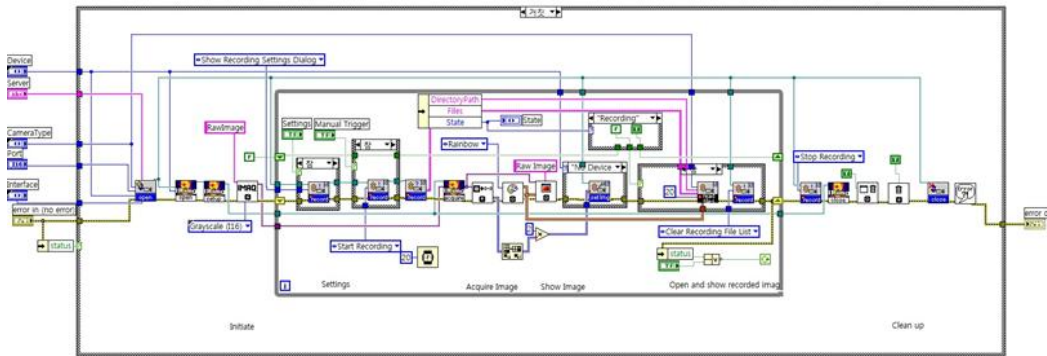


Fig. 3-19 Labview algorithm image(Save Image)

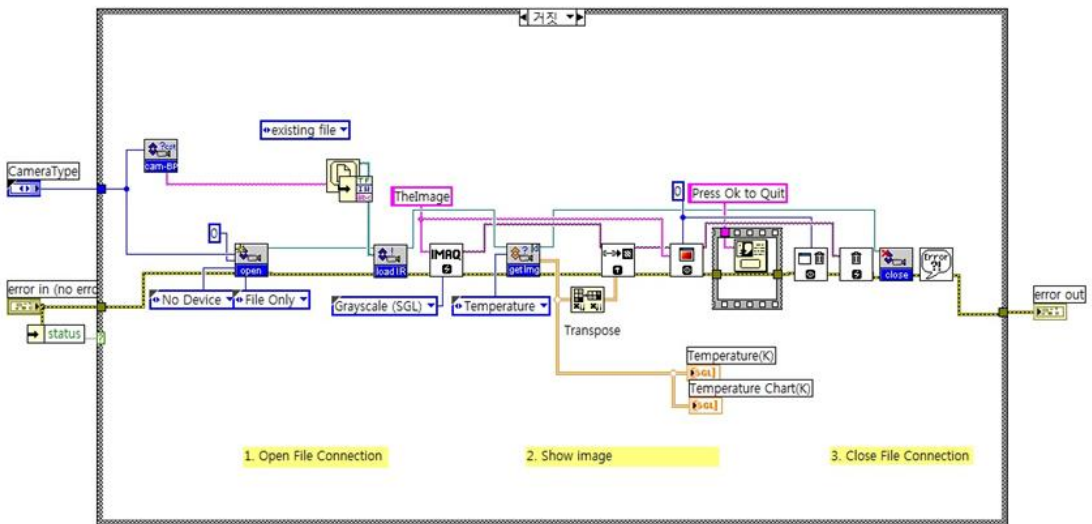


Fig. 3-20 Labview algorithm image(Import image)

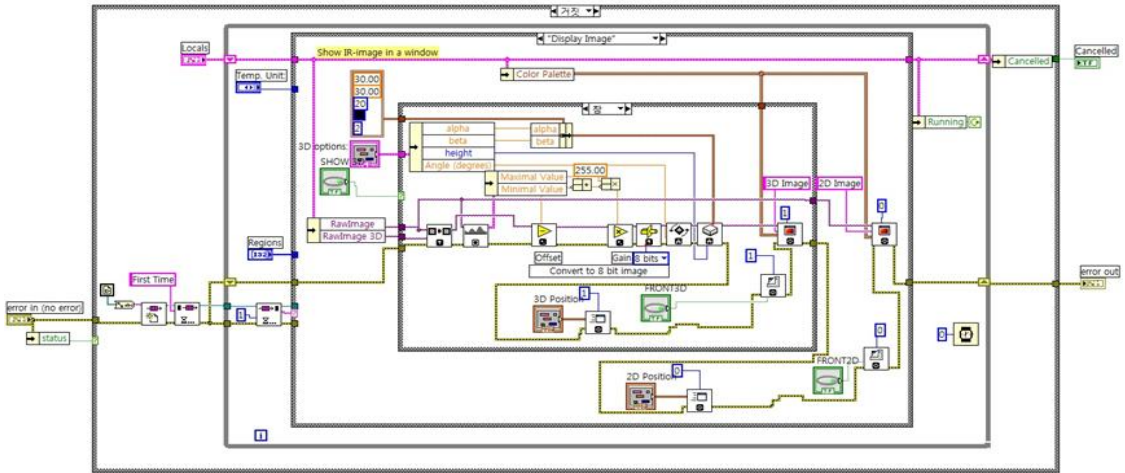


Fig. 3-21 Labview algorithm image(2D, 3D screen Display)

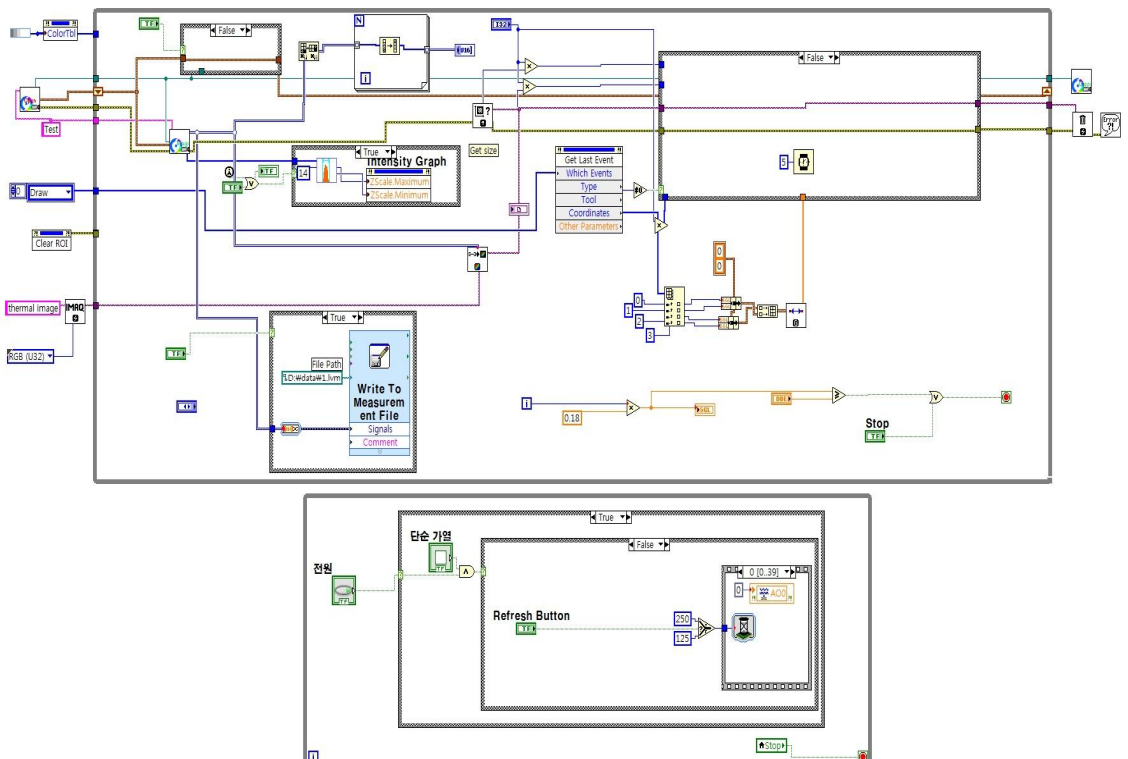


Fig. 3-22 Overall block diagram of the operating program

프로그램에는 강도 데이터를 수치화하여 Excel로 저장할 수 있는 기능을 추가하였다. 강도 데이터 파일은 프로그램에서 Lock-in mode 기법을 이용하여 처리된다. Lock-in mode 기법을 이용하면 영상처리를 통해 결함을 선명하게 검출할 수 있다. Fig. 3-23은 Data로 저장된 수치 데이터의 예를 보여주고 있다.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Time*	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3	Untitled 4	Untitled 5	Untitled 6	Untitled 7	Untitled 8	Untitled 9	Untitled 10	Untitled 11	Untitled 12	Untitled 13	Untitled 14	Untitled 15	Untitled 16	Untitled 17	Untitled 18
2	0	9168	9167	9178	9168	9185	9162	9167	9158	9159	9165	9165	9114	9087	9072	9110	9100	9114	909
3	1	9153	9178	9150	9165	9159	9163	9160	9165	9139	9164	9146	9130	9079	9105	9073	9109	9101	914
4	2	9148	9135	9149	9140	9149	9159	9150	9151	9163	9143	9160	9129	9094	9071	9092	9085	9116	908
5	3	9132	9155	9138	9140	9132	9150	9143	9152	9146	9147	9130	9162	9091	9081	9081	9100	9094	907
6	4	9167	9163	9163	9158	9153	9128	9151	9144	9146	9163	9175	9147	9126	9080	9112	9090	9126	911
7	5	9179	9193	9179	9194	9170	9191	9167	9178	9154	9170	9155	9145	9105	9112	9093	9113	9100	91
8	6	9172	9162	9185	9164	9183	9166	9191	9167	9174	9152	9175	9137	9135	9098	9120	9102	9117	907
9	7	9158	9149	9137	9165	9152	9169	9162	9184	9169	9174	9162	9155	9139	9116	9108	9119	9108	91
10	8	9156	9139	9143	9142	9150	9150	9162	9161	9180	9172	9178	9155	9153	9120	9143	9142	9151	91
11	9	9165	9168	9172	9159	9161	9173	9151	9188	9186	9185	9166	9172	9139	9134	9135	9170	9143	91
12	10	9148	9150	9154	9148	9163	9150	9179	9174	9190	9171	9172	9179	9130	9126	9147	9149	9150	91
13	11	9133	9161	9150	9169	9161	9171	9170	9187	9186	9177	9179	9167	9140	9127	9137	9153	9147	91
14	12	9166	9162	9163	9152	9163	9169	9171	9182	9185	9176	9159	9152	9128	9130	9143	9150	9144	91
15	13	9173	9162	9177	9169	9186	9182	9173	9172	9180	9168	9148	9144	9143	9129	9133	9152	9140	91
16	14	9178	9172	9179	9170	9180	9195	9184	9175	9185	9165	9161	9144	9127	9105	9131	9143	9149	91
17	15	9188	9192	9212	9184	9196	9188	9201	9198	9192	9169	9154	9138	9132	9120	9130	9147	9156	91
18	16	9194	9178	9172	9188	9187	9192	9186	9192	9188	9156	9144	9117	9097	9107	9136	9137	9138	91
19	17	9202	9195	9192	9190	9212	9199	9211	9185	9195	9149	9138	9136	9123	9094	9140	9163	9157	91
20	18	9200	9203	9172	9202	9216	9204	9191	9190	9183	9151	9126	9130	9106	9093	9131	9157	9150	91
21	19	9197	9183	9175	9192	9214	9200	9192	9188	9184	9145	9131	9120	9118	9097	9133	9148	9159	91
22	20	9171	9193	9182	9191	9173	9191	9177	9187	9179	9157	9106	9100	9105	9100	9123	9152	9158	91
23	21	9202	9190	9189	9181	9181	9187	9181	9188	9199	9167	9123	9102	9105	9102	9132	9153	9157	91
24	22	9185	9181	9188	9193	9190	9186	9174	9199	9189	9174	9117	9090	9092	9082	9110	9141	9129	91
25	23	9170	9184	9174	9170	9180	9169	9182	9179	9189	9159	9108	9095	9082	9074	9108	9127	9120	907
26	24	9144	9146	9152	9142	9149	9147	9157	9155	9141	9146	9093	9077	9079	9055	9085	9085	9071	908
27	25	9118	9117	9108	9084	9100	9109	9093	9103	9102	9089	9071	9070	9042	9048	9056	9048	9043	907
28	26	9071	9046	9052	9063	9058	9043	9044	9053	9039	9038	9022	9038	9041	9024	9010	9008	8997	907
29	27	9035	9023	9027	9021	9033	9020	9015	9001	9009	8995	9001	8979	8941	8983	8974	8976	8963	899
30	28	8974	8959	8955	8947	8939	8946	8929	8945	8914	8909	8905	8890	8896	8885	8869	8880	8873	888
31	29	8836	8820	8797	8787	8791	8778	8769	8747	8747	8737	8716	8722	8711	8703	8696	8676	8659	866
32	30	8629	8626	8610	8613	8598	8609	8591	8598	8589	8573	8576	8589	8569	8576	8557	8564	8558	855
33	31	8611	8594	8613	8591	8596	8611	8590	8613	8587	8593	8594	8594	8579	8584	8567	8568	855	855

Fig. 3-23 Saved strength data as a Data file

## 제 4 장 감육 결합 측정 실험 방법

적외선열화상 기술을 이용하여 배관의 건전성을 평가하는 방법은 수동적 검사기법과 능동적 검사기법이 있다. 수동적인 검사기법은 대상체가 자체적으로 복사에너지를 방출하는 경우 사용할 수 있으며, 능동적인 검사기법은 대상체를 냉각, 가열 등의 에너지를 대상체에 가하여 그 응답특성을 평가하는 방법이다.

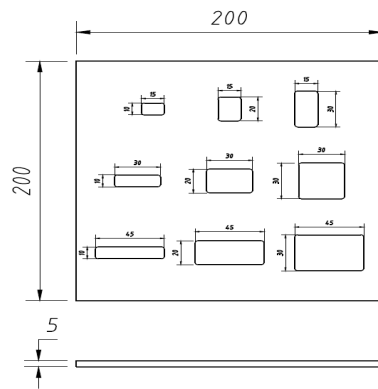
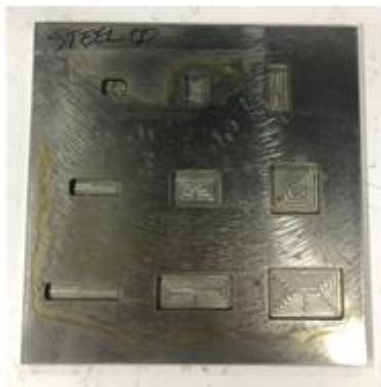
본 연구에서는 능동적인 검사기법을 사용하여 감육결합을 검출하기 위해 가열장치를 사용하였다. 시험편을 가열시키기 위해서 가열장치는 최대용량이 1000 W인 할로겐램프 2개를 사용하였다.

실험방법은 할로겐 램프를 이용한 가열 위상잠금을 이용한 가열방법을 사용하였다. 시험에 앞서 시험편의 표면은 방사페인트를 도포하여 시험편에서 표면 방사율이 0.95가 되도록 하여, 배관시험편에서 빛의 반사율을 최소화하였다.

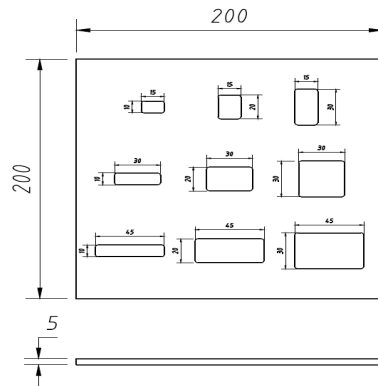
위상잠금 적외선열화상기술은 온도변화가 작은 대상체에 사용되며, 검사시간이 빠르고 검사에 신뢰성이 높아 많은 분야에서 사용되고 있다. 본 연구에서는 위상잠금 기법을 사용하여 시험편의 감육결합 검사에 최적화된 검사 방법을 개발하는 것을 목표로 하여 연구를 수행하였다.

### 제 1 절 결합시험편

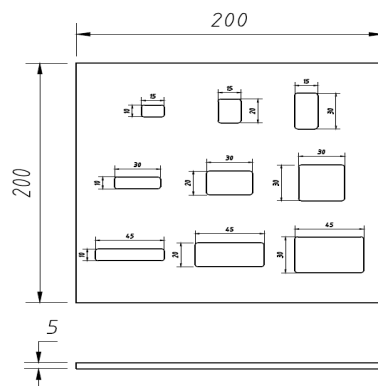
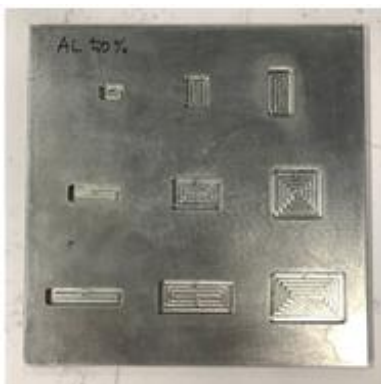
본 논문에서는 적외선 열화상 기법을 적용하여 결합 검출 실험을 하기 위해 사용될 결합 시험편을 제작하였다. Fig. 4-1, Fig. 4-2, Fig. 4-3, Fig. 4-4 와 같이 평판 시험편 뒤에 크기가 다른 9가지의 결합을 가공하였으며 시험편의 재질은 철, 스테인레스, 알루미늄 3종류로 제작 하였다. 시험편의 두께를 5 mm, 10 mm 두종류로, 결합 깊이는 50 %, 75 % 두종류로 제작하였으며, 결합의 크기와 깊이를 각각 다르게 하여 재질에 따른 결합을 검출할 수 있는지 확인하였다.



(a) STEEL

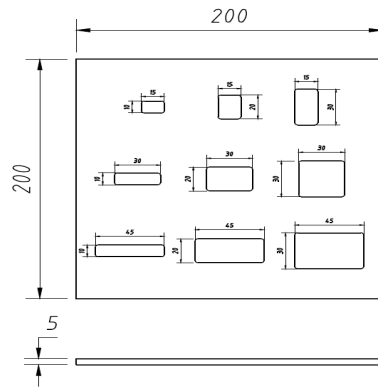
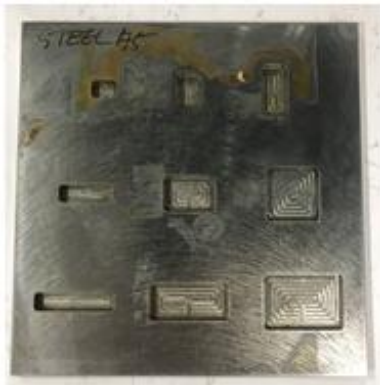


(b) STS

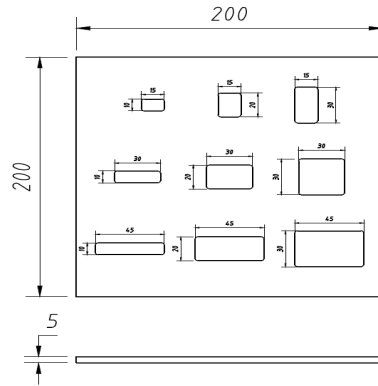
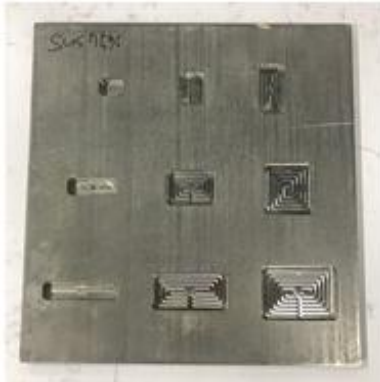


(c) ALUMINIUM

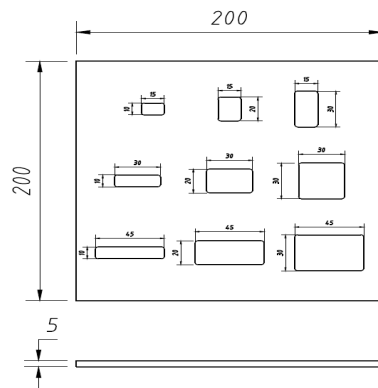
Fig. 4-1 Wall thinning defect specimen(5 mm, 50 %)



(a) STEEL

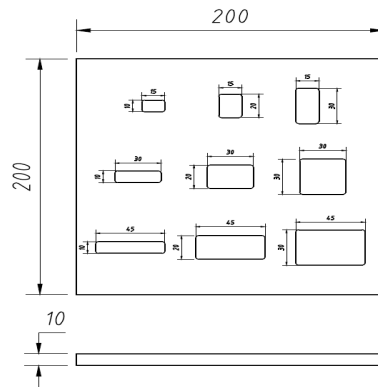
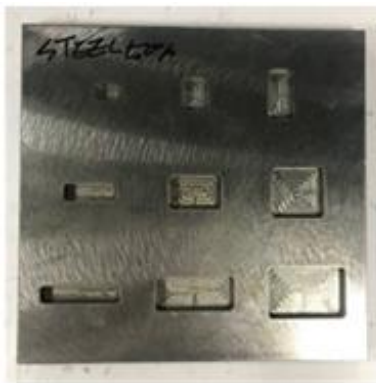


(b) STS

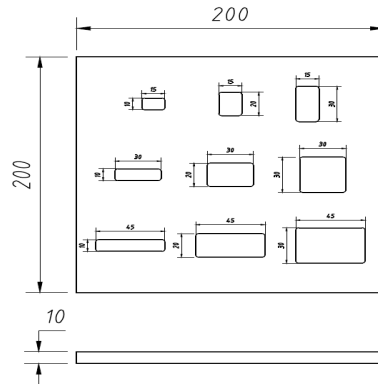
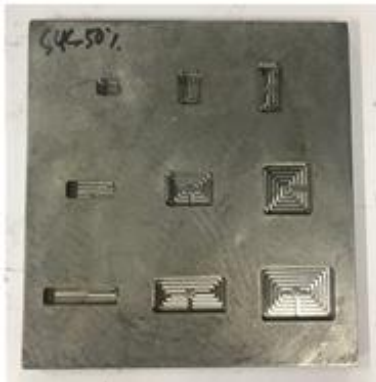


(c) ALUMINIUM

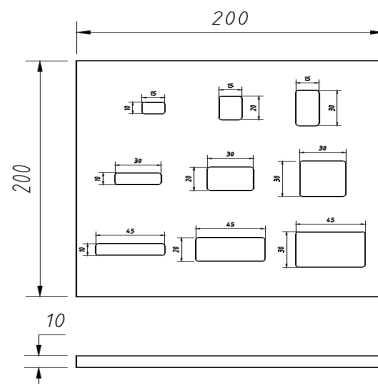
Fig. 4-2 Wall thinning defect specimen(5 mm, 75 %)



(a) STEEL

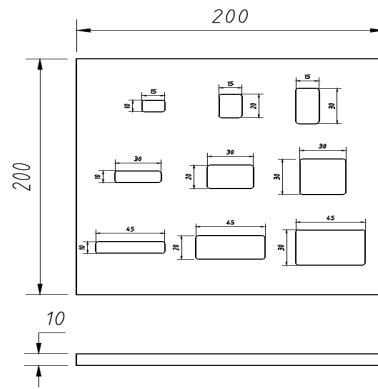


(b) STS

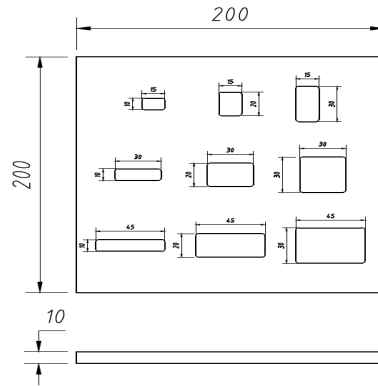


(c) ALUMINIUM

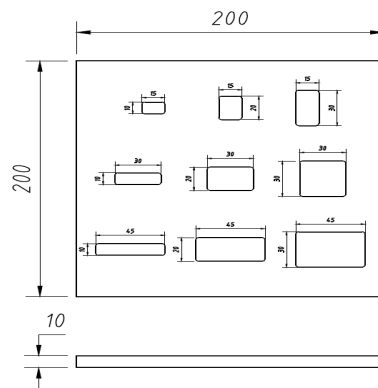
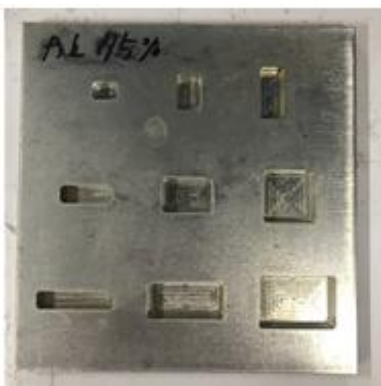
Fig. 4-3 Wall thinning defect specimen(10 mm, 50 %)



(a) STEEL



(b) STS



(c) ALUMINIUM

Fig. 4-4 Wall thinning defect specimen(10 mm, 75 %)



## 제 2 절 실험장치

적외선 열화상 시스템은 열화상 이미지를 측정 및 수집하는 적외선 열화상 카메라의 이미지는 Fig. 4-5 와 Fig. 4-6 과 같으며, 스펙은 Table 4-1과 Table 4-2와 같다. 중적외선 카메라는 FLIR사의 SC5500 모델과 장적외선 카메라는 FLIR사의 A655SC 모델을 실험에 사용하였으며 시험편 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 구성하였다.



Fig. 4-5 Mid wavelength Infrared camera

Table 4-1 Mid wavelength Infrared camera specifications

Infrared camera(FLIR. SC5500)	
Detector Materials	InSb(안티몬화 인듐)
Cooling method	내장 스티링 쿨러(Stirling)
Spectral Response	3.7~5.0 $\mu\text{m}$
Number of Pixels	320*256
Pixel Pitch	30 $\mu\text{m}$
NETD	25mK@25 $^{\circ}\text{C}$ (20 mK typical)
Temperature measure range	-15~2000 $^{\circ}\text{C}$
Digital Full Frame rate	383 Hz
Frame rate resolution	1Hz Step
waveband	2.5~5.1 $\mu\text{m}$



Fig. 4-6 Long wavelength Infrared camera

Table 4-2 Long wavelength Infrared camera specifications

Infrared camera(FLIR. A655SC)	
Detector Type	Uncooled Microbolometer
Spectral Range	7.5~14.0 $\mu\text{m}$
FOV(Field of View)	25°x18.8°
Close focus Limit	0.4 m
Spatial resolution	0.69 mrad
Thermal sensitivity	<0.03 °C @30°C /50 mK
Resolution	640x480 pixels
Detector pitch	17 $\mu\text{m}$

### 제 3 절 실험방법

위상잠금을 이용하여 배관 내부의 감육결함을 검출하기 위해서는 함수발생기와 전원 공급기가 필요하다. 위상잠금 기법은 함수발생기를 통해 출력주파수를 발생시키고, 카메라와 가열장치 및 냉각장치를 동기화하는 방법이다. 위상잠금을 이용하여 시험편의 감육결함을 검출하기 위해서는 적절한 거리와 주파수를 사용해야 한다. 본 연구에서 주파수는 시험편의 크기와 두께와 재질을 고려하여 0.08, 0.1, 0.12 Hz의 주파수와 2번의 주기를 사용하였으며, 시험편과 가열장치의 거리는 1.5 m에서 측정하였다.

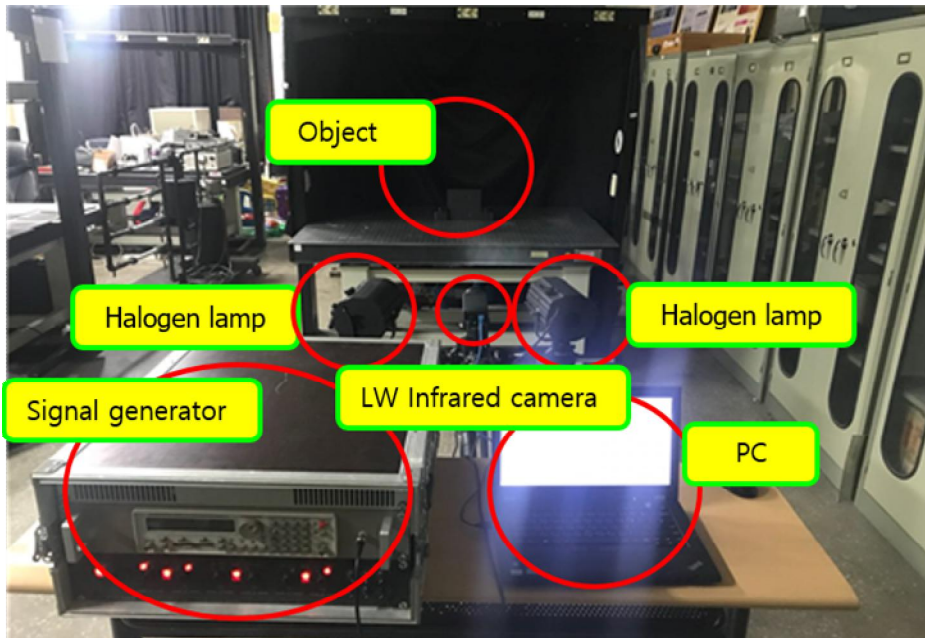


Fig. 4-7 Experimental configuration with a mid wavelength infrared camera

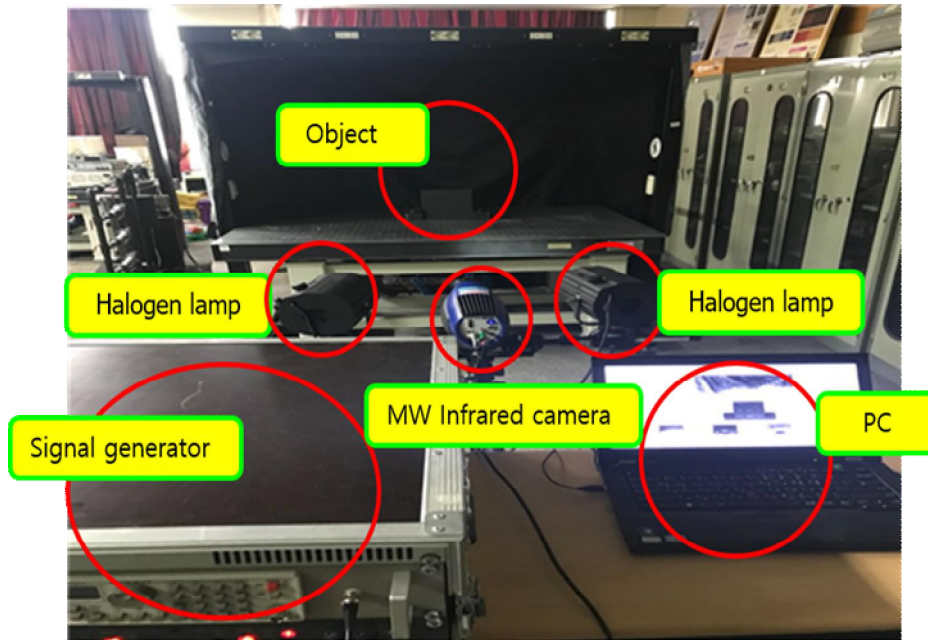


Fig. 4-8 Experimental configuration with a long wavelength infrared camera

## 제 5 장 감육 결함 측정 실험 결과 및 고찰

### 제 1 절 위상잠금을 이용한 가열 실험 결과 이미지

가열장치에 위상잠금 기법을 이용하여 시험편 결함을 모두 검출할 수 있다. 시험편의 결함 위치뿐만 아니라, 크기도 정확하게 검출할 수 있다. 위상잠금을 이용한 가열방법은 연속적인 가열방법보다 검사시간이 빠르고, 시험편의 정상부와 결함부의 경계를 뚜렷하게 구분할 수 있다. Fig. 5-1 에서 Fig. 5-8 은 결함시험편을 위상잠금 기법을 이용하여 얻은 적외선열화상 이미지이다.

위상잠금을 이용한 실험에서 사용되는 주파수는 대상체의 재질에 따라 조정이 되어야 한다. 본 연구 이전 실험을 통해서 0.1 Hz에서 최적의 조건을 구할수 있었으며 따라서 0.1 Hz와 주변의 주파수 0.08 Hz, 0.12 Hz로 설정하여 실험을 진행하였다.

실험 결과를 통하여 증적외선 카메라를 이용한 이미지와 장적외선을 사용한 이용한 이미지의 결과는 비슷하였다. 그리고 위상 잠금 주파수는 0.1 Hz에서 뚜렷한 결함을 확인 할 수 있었다. 시험편의 두께는 얇을수록 결함이 뚜렷하였으며 이는 시험편 두께 5 mm의 결함두께 75 %(3.75 mm)인 결함과 시험편두께 10 mm의 결함두께 75 %(7.5 mm)인 결함을 통해 확인할 수 있었다. 같은 조건에서 결함은 STS316L, SM45C, AL6061순으로 선명한 결함이 검출 되었다.

Fig. 5-1 은 중적외선 카메라를 사용하여 평판 결함 시험편의 결함을 측정된 결과, 주파수는 0.1 Hz로 측정시 시험편 재질은 STEEL과 STS에서 결함을 뚜렷하게 확인할 수 있었다.

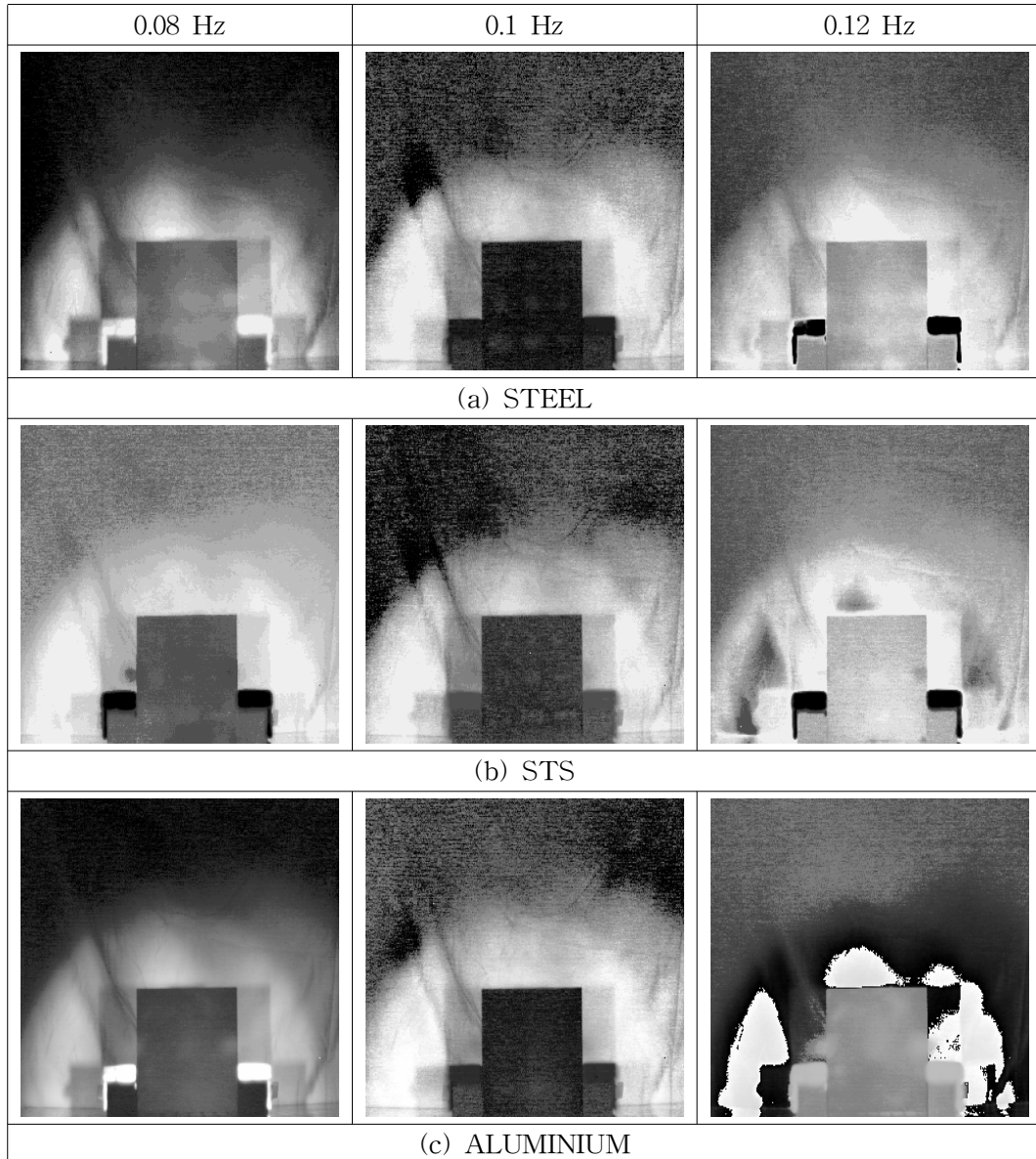


Fig. 5-1 Image results of specimen using mid wavelength infrared camera  
 (5 mm, 50 %)

Fig. 5-2 는 중적외선 카메라를 사용하여 평판 결함 시험편의 결함을 측정 한 결과, 주파수와 재질에 관련없이 결함을 확인할 수 있었으며 0.1H에서 가장 뚜렷하였다.

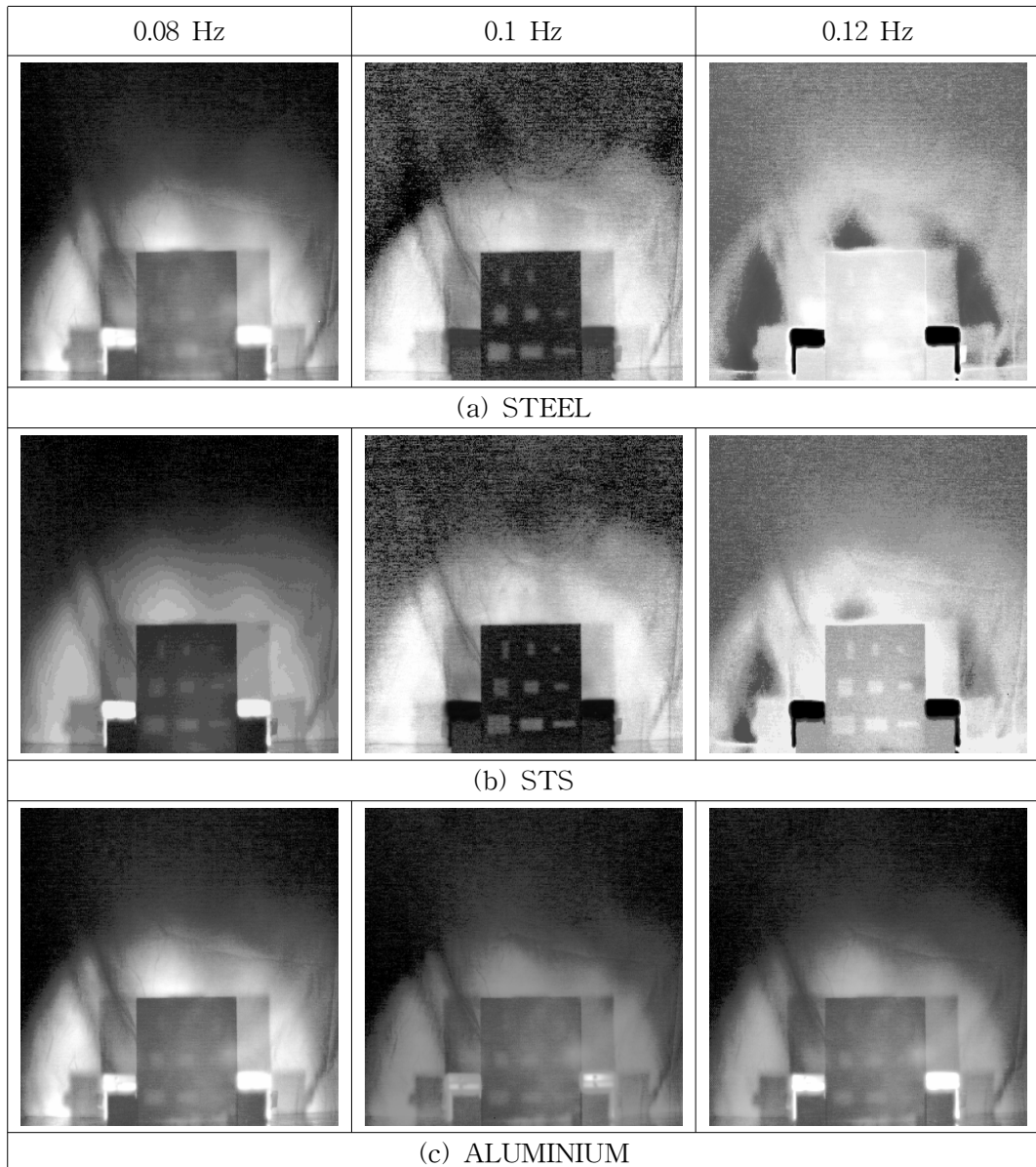


Fig. 5-2 Image results of specimen using mid wavelength infrared camera  
 (5 mm, 75 %)

Fig. 5-3 은 중적외선 카메라를 사용하여 평판 결함 시험편의 결함을 측정된 결과, 주파수와 시험편 재질에 관련없이 결함을 확인하기 어려웠다.

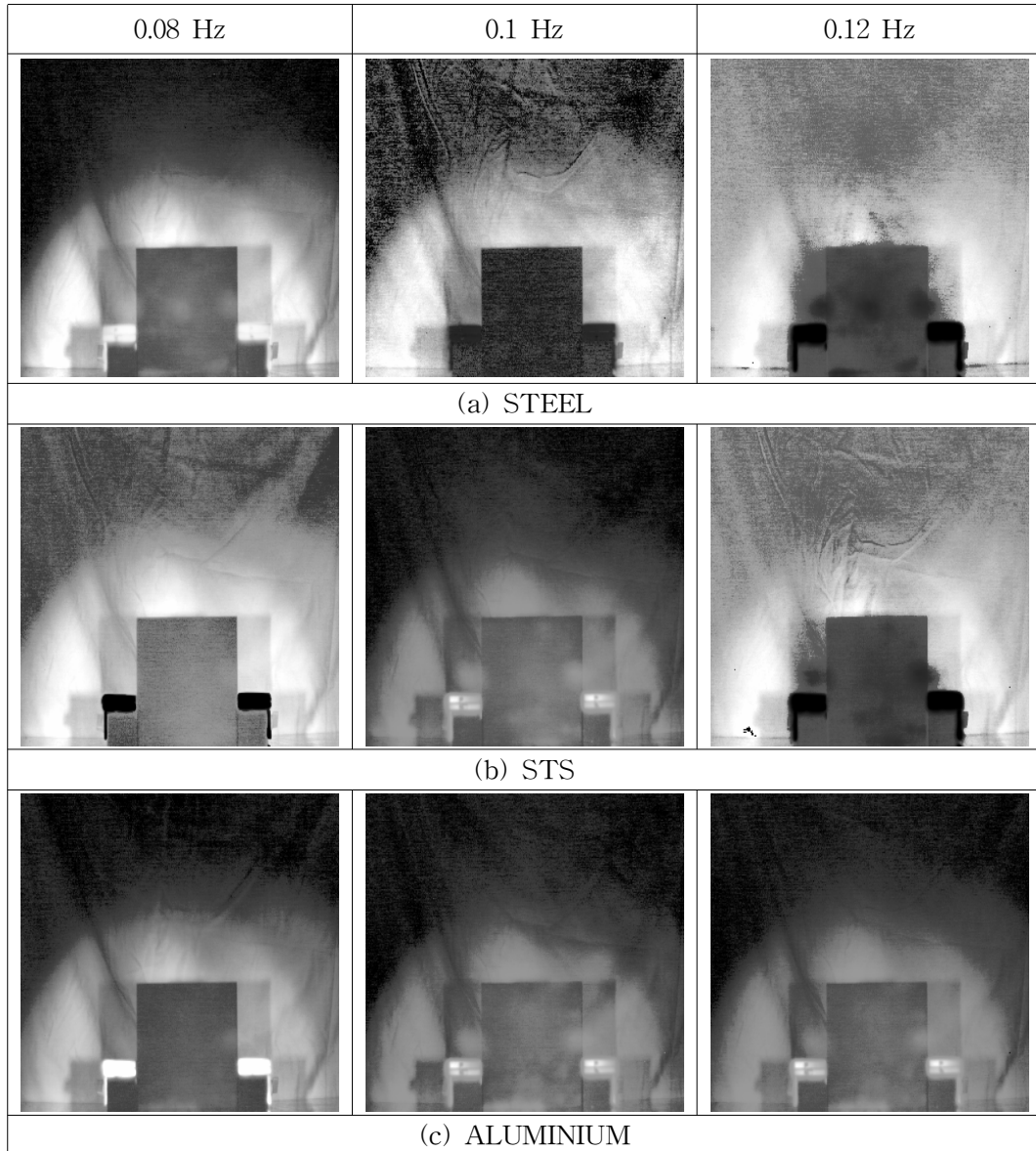


Fig. 5-3 Image results of specimen using mid wavelength infrared camera  
 (10 mm, 50 %)



Fig. 5-4 는 중적외선 카메라를 사용하여 평판 결함 시험편의 결함을 측정된 결과, 주파수는 0.1 Hz로 측정시 시험편 재질은 STEEL과 STS에서 결함을 뚜렷하게 확인할 수 있었다.

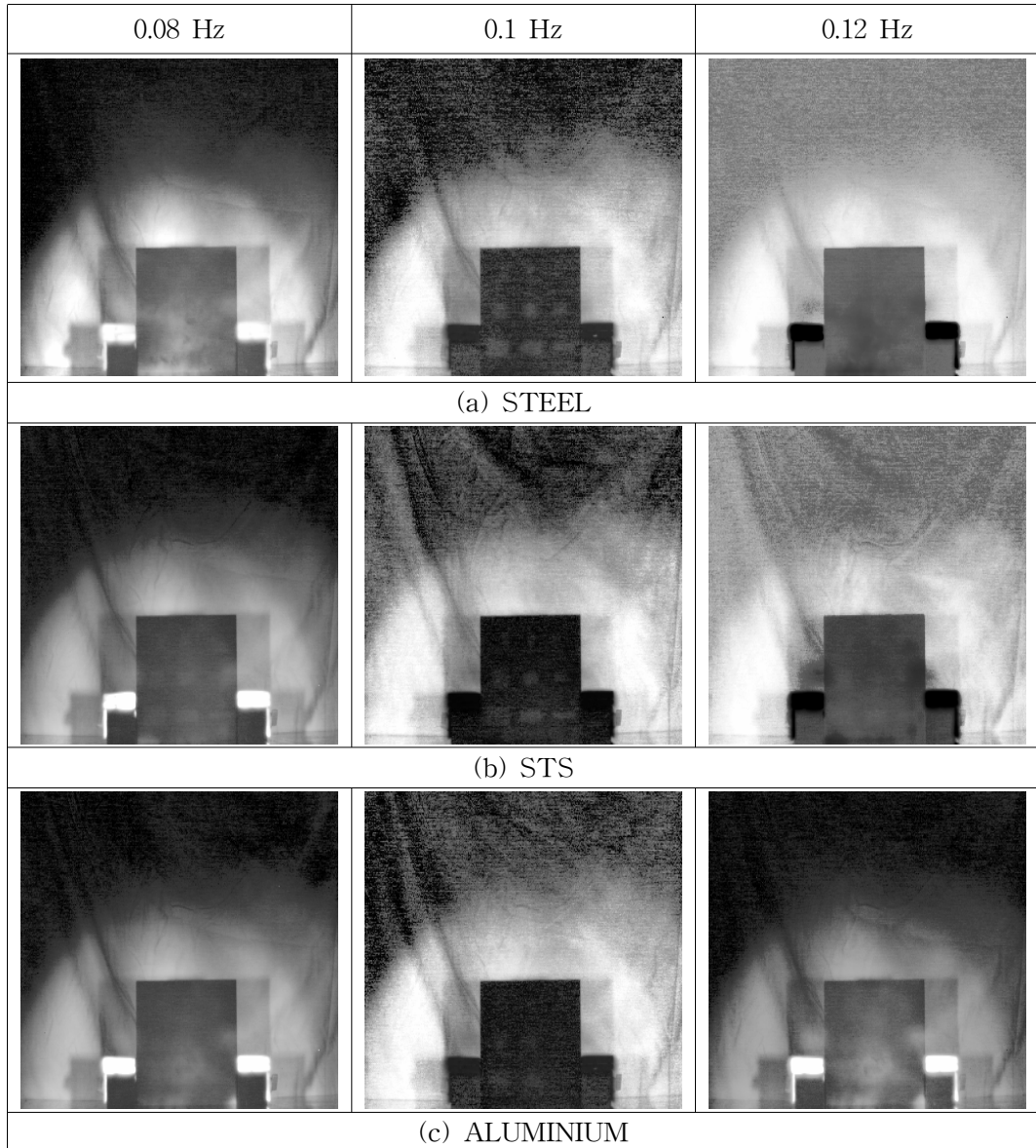


Fig. 5-4 Image results of specimen using mid wavelength infrared camera  
 (10 mm, 75 %)

Fig. 5-5 는 장적외선 카메라를 사용하여 평판 결함 시험편의 결함을 측정된 결과, 주파수와 시험편 재질에 관련없이 결함을 확인하기 어려웠다.

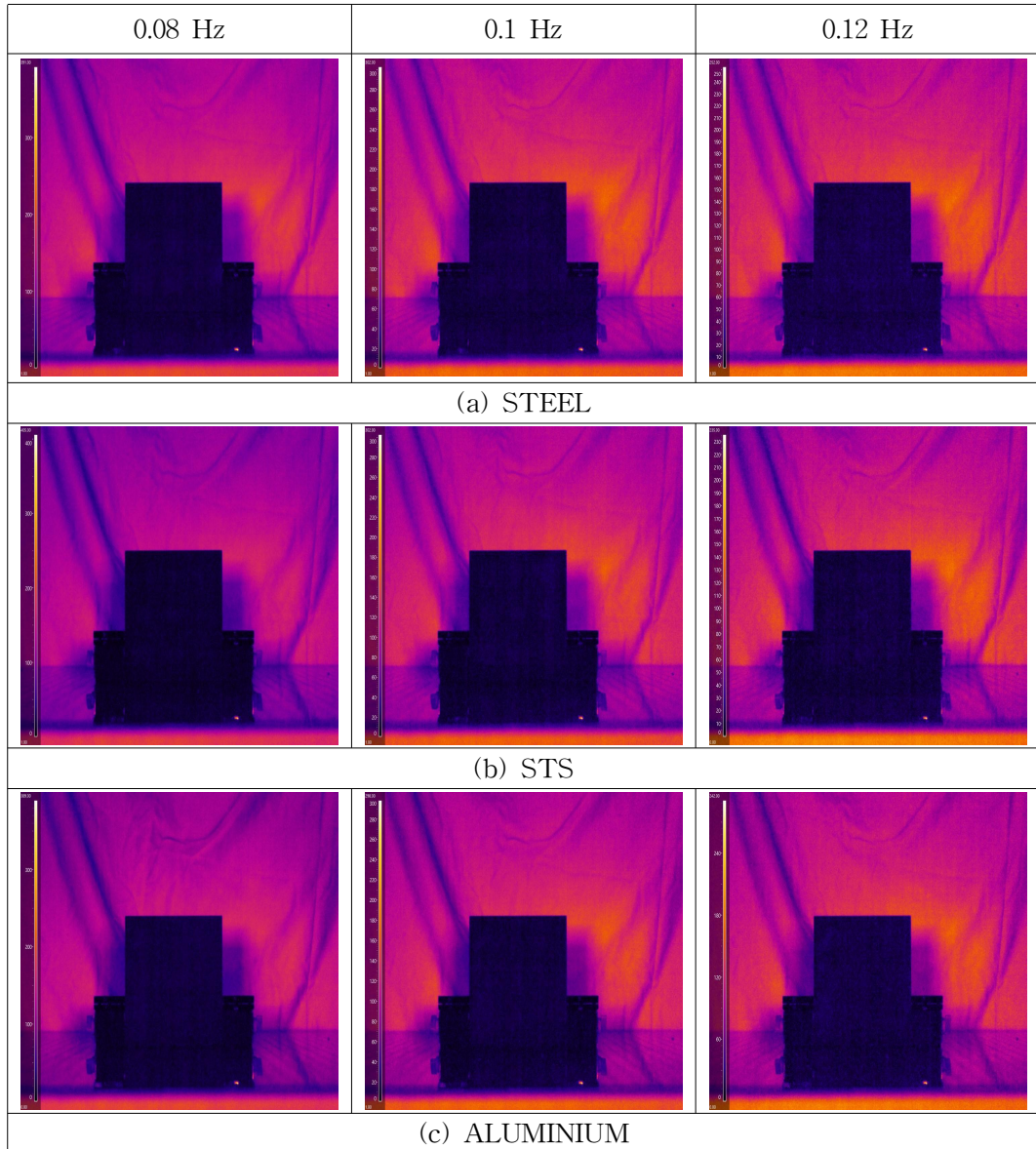


Fig. 5-5 Image results of specimen using long wavelength infrared camera  
 (5 mm, 50 %)

Fig. 5-6 은 장적외선 카메라를 사용하여 평판 결함 시험편의 결함을 측정된 결과, 주파수와 재질에 관련없이 결함을 확인할 수 있었으며 0.1H에서 가장 뚜렷하였다.

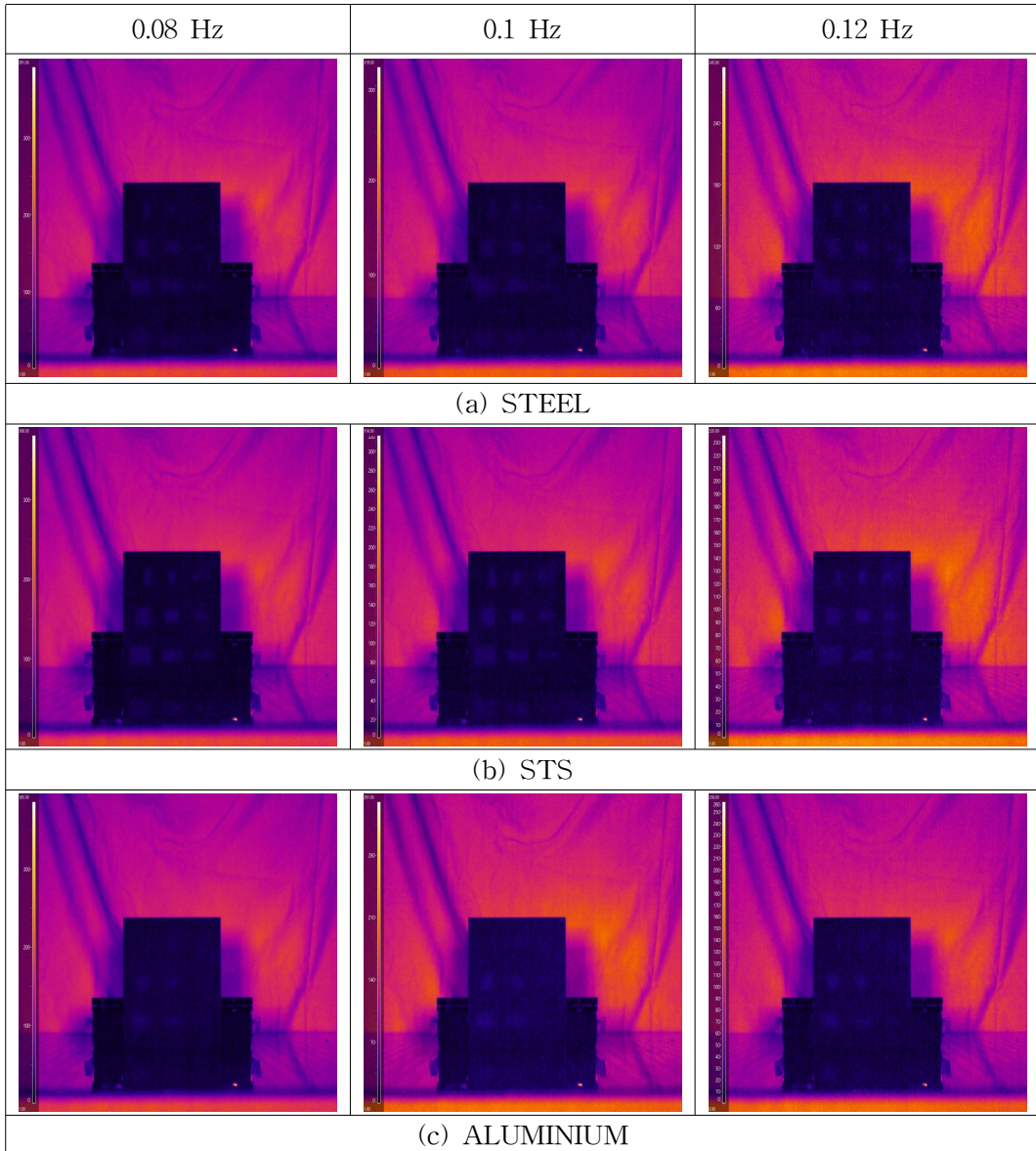


Fig. 5-6 Image results of specimen using long wavelength infrared camera  
 (5 mm, 75 %)

Fig. 5-7 은 장적외선 카메라를 사용하여 평판 결함 시험편의 결함을 측정된 결과, 주파수와 시험편 재질에 관련없이 결함을 확인하기 어려웠다.

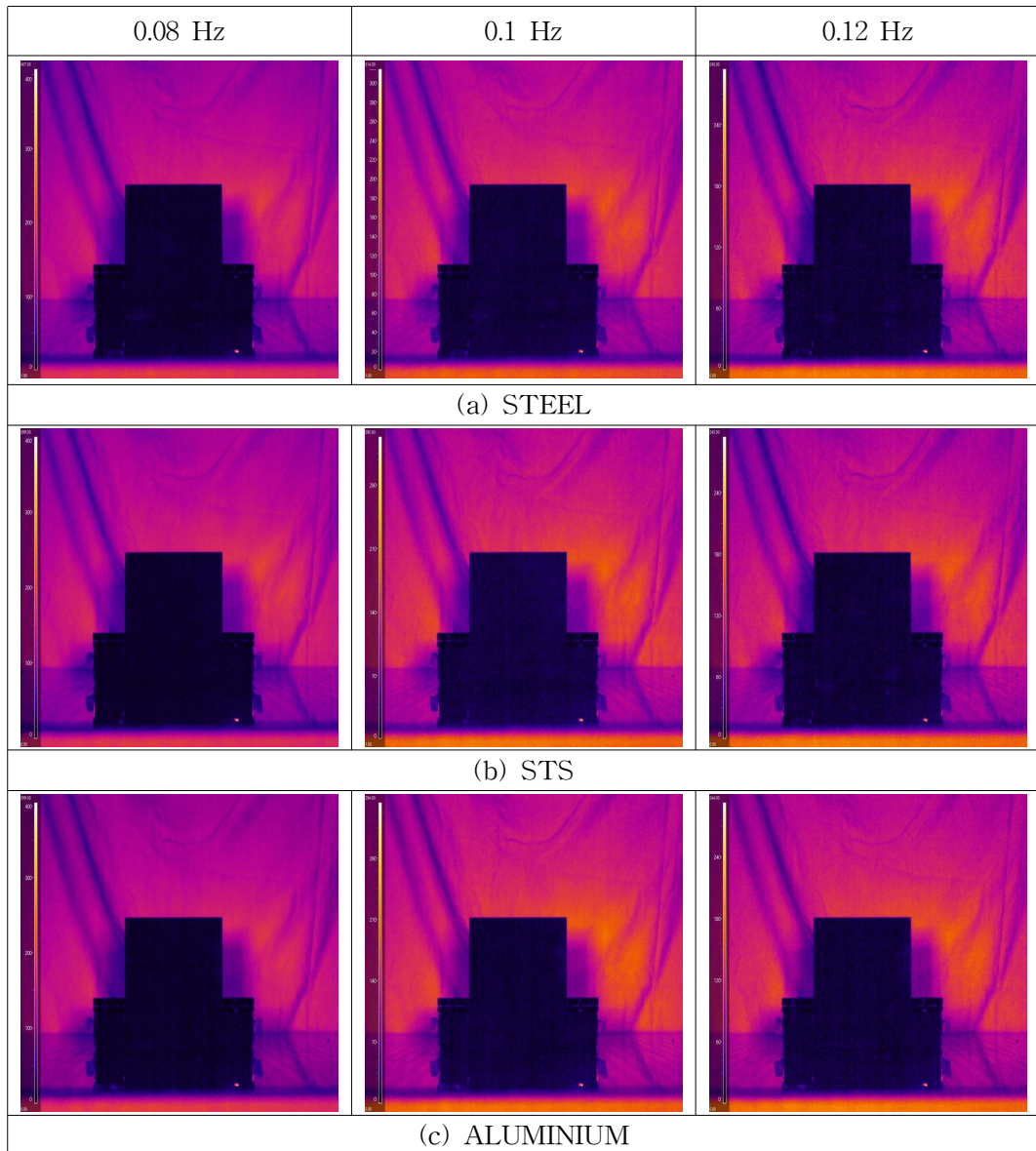


Fig. 5-7 Image results of specimen using long wavelength infrared camera  
(10 mm, 50 %)

Fig. 5-8 은 중적외선 카메라를 사용하여 평판 결함 시험편의 결함을 측정된 결과, 주파수는 0.1 Hz로 측정시 결함을 확인할 수 있었다.

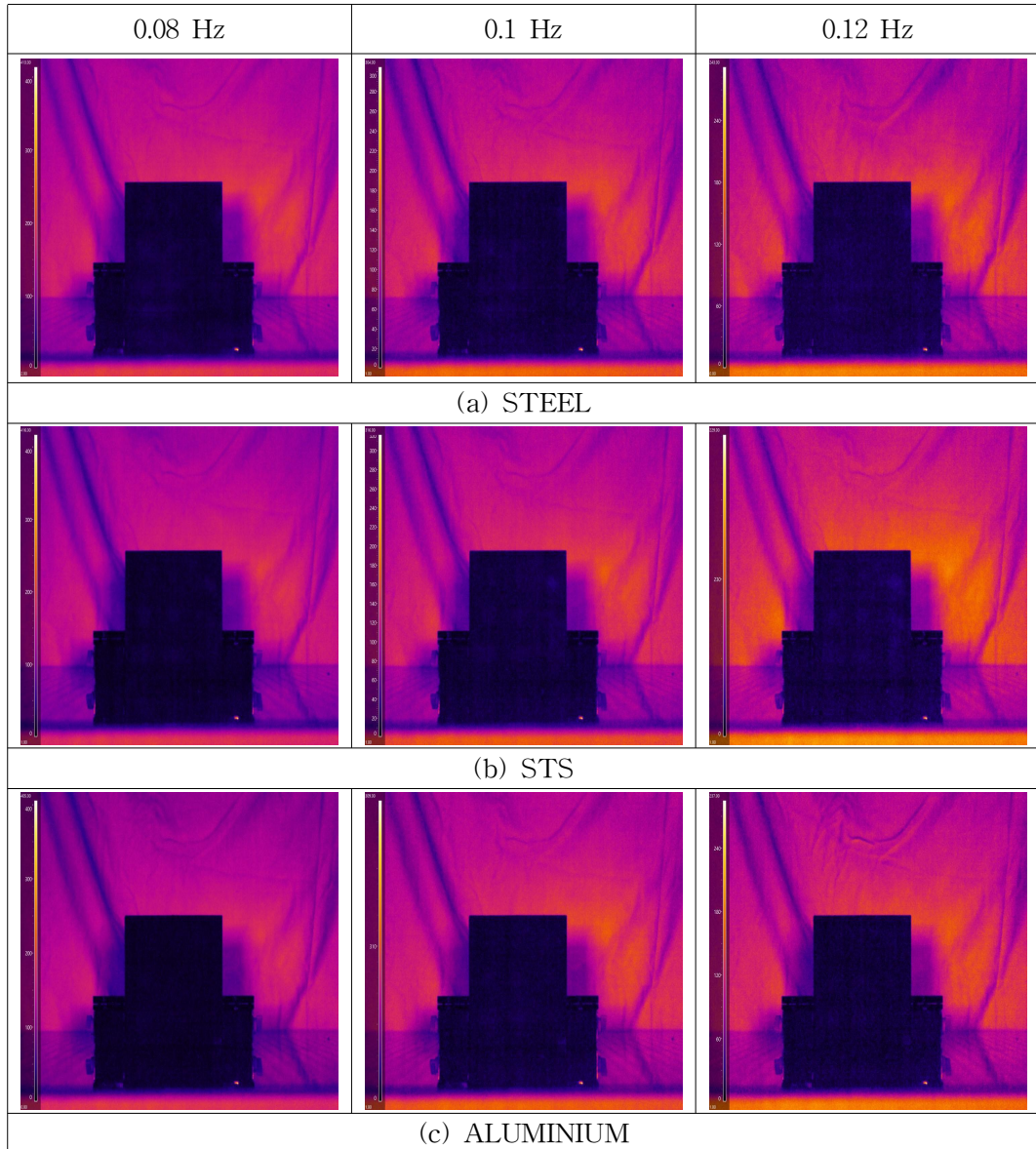


Fig. 5-8 Image results of specimen using long wavelength infrared camera  
(10 mm, 75 %)

## 제 2 절 위상잠금을 이용한 가열 실험 프로파일 결과

위상잠금 기법을 이용한 평판 결함시험편의 결함 검출을 하기 위해 측정된 Fig. 5-1 부터 Fig. 5-8 에 라인프로파일을 그렸으며 이미지의 프로파일의 위치는 Fig. 5-9 에 나타내었다. 라인 프로파일을 사용하여 얻은 데이터를 통하여 그린 그래프를 통해서 본 결과 중적외선 카메라를 이용하여 측정한 결과에서는 결함을 확연히 식별할 수 있었으며 장적외선 카메라로 측정한 결과에서는 노이즈가 심하며 러프한 결과를 확인할 수 있었다.

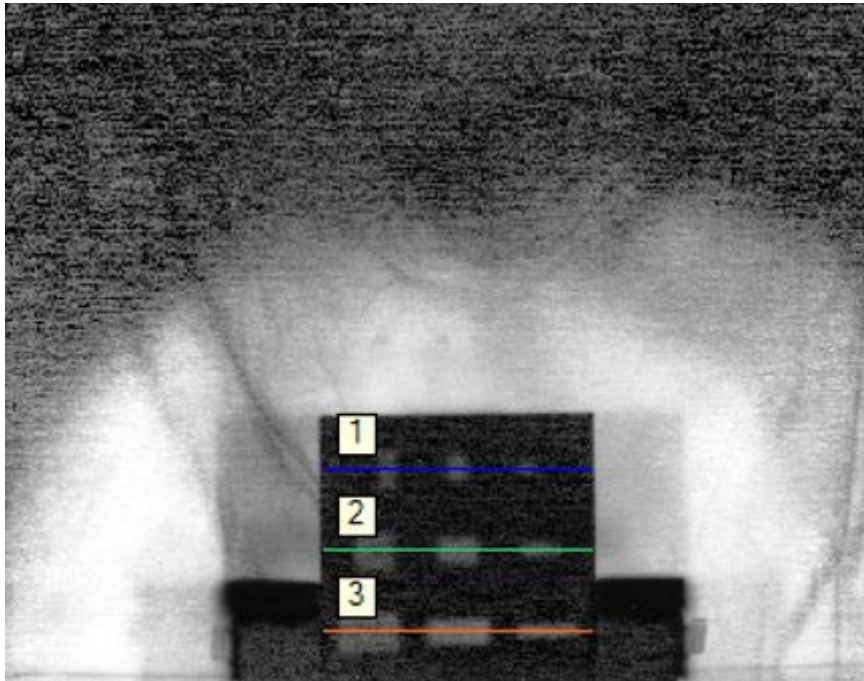


Fig. 5-9 Line profile position of wall thinning defect specimen

Fig. 5-10 은 재질 AL6061, 시험편 두께 10 mm, 결함 두께 50 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해 3개의 주파수에서 3번 결함을 확인할 수 있었지만 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일에서는 확인할 수 없었다.

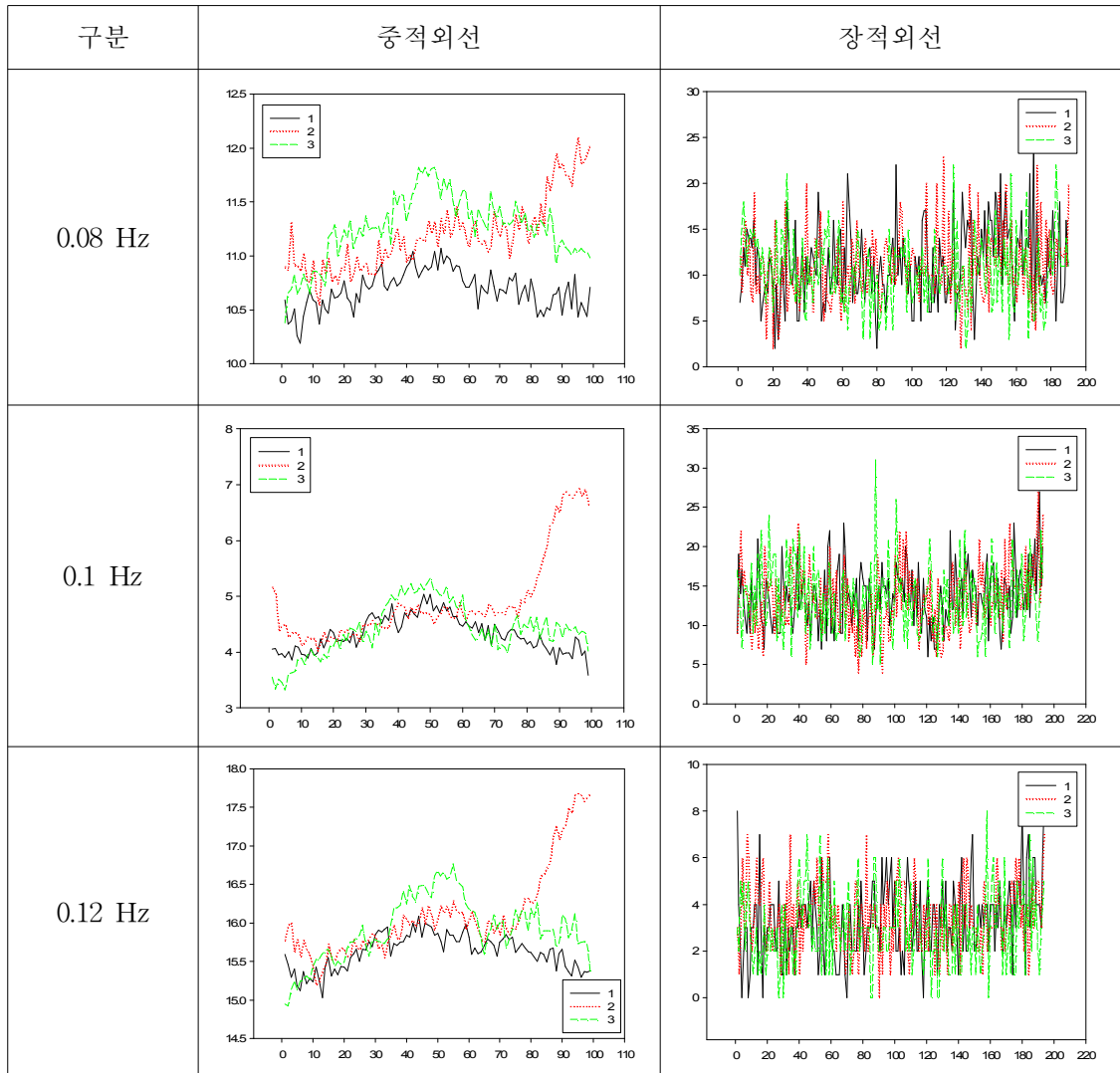


Fig. 5-10 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (AL6061, 10 mm, 50 %)

Fig. 5-11 은 재질 AL6061, 시험편 두께 10 mm, 결함 두께 75 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해 3개의 주파수에서 2, 3번 결함을 확인할 수 있었지만 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일에서는 확인할 수 없었다.

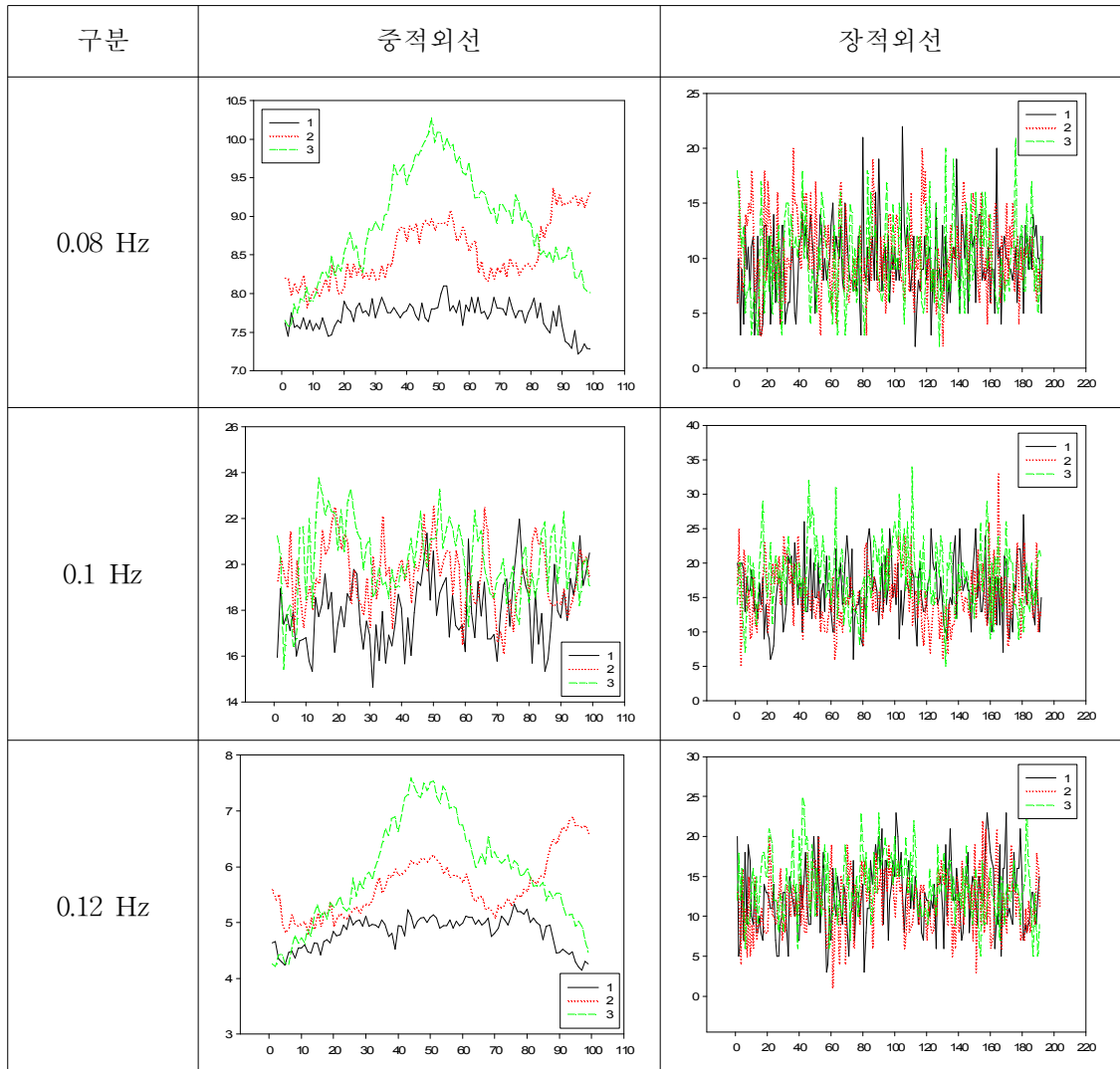


Fig. 5-11 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (AL6061, 10 mm, 75 %)



Fig. 5-12 는 재질 SM45C, 시험편 두께 10 mm, 결함 두께 50 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정 한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선, 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해서 는 결함을 확인할 수 없었다.

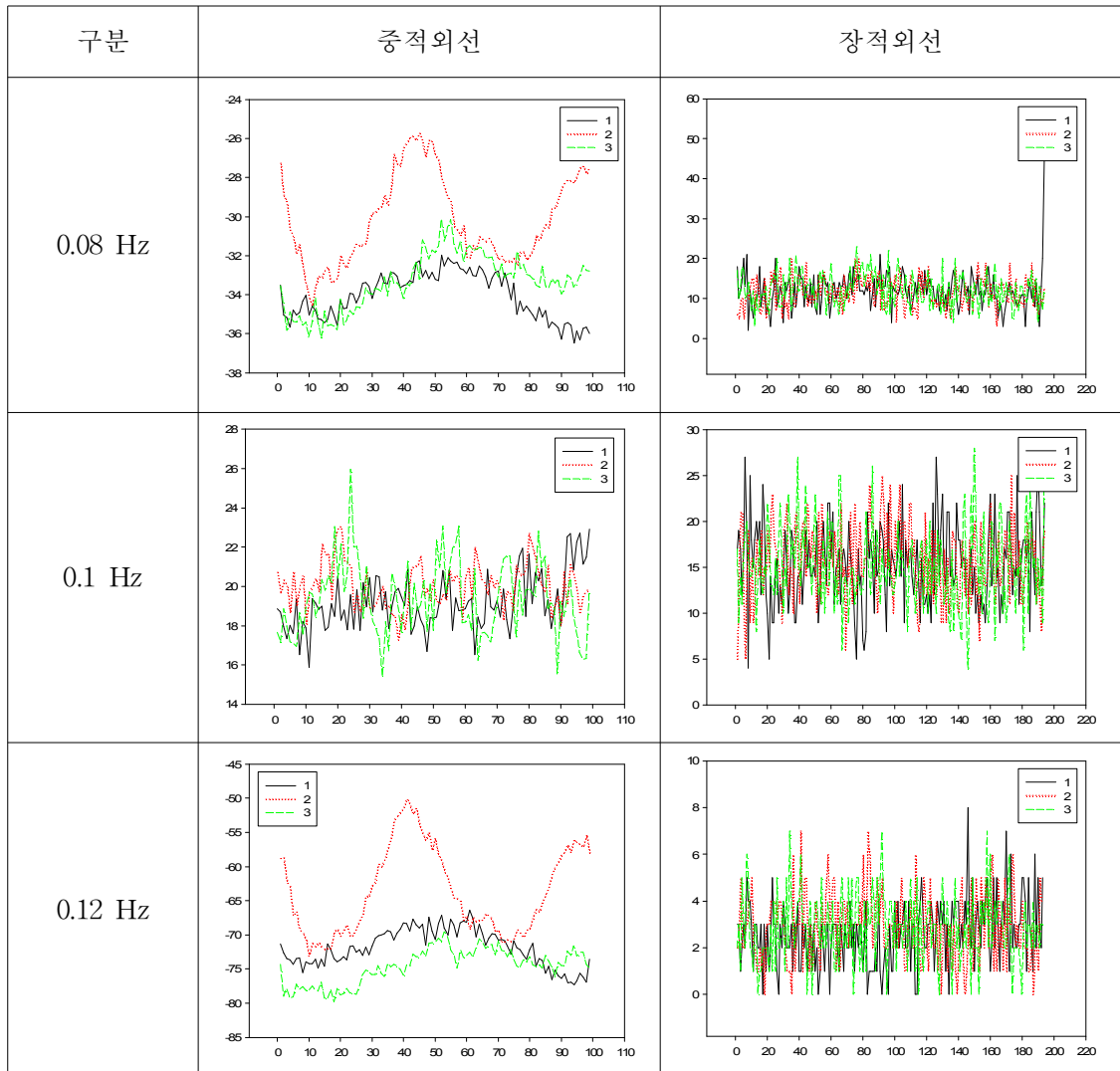


Fig. 5-12 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (SM45C, 10 mm, 50 %)

Fig. 5-13 은 재질 SM45C, 시험편 두께 10 mm, 결함 두께 75 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정된 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선, 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해서 는 결함을 확인할 수 없었다.

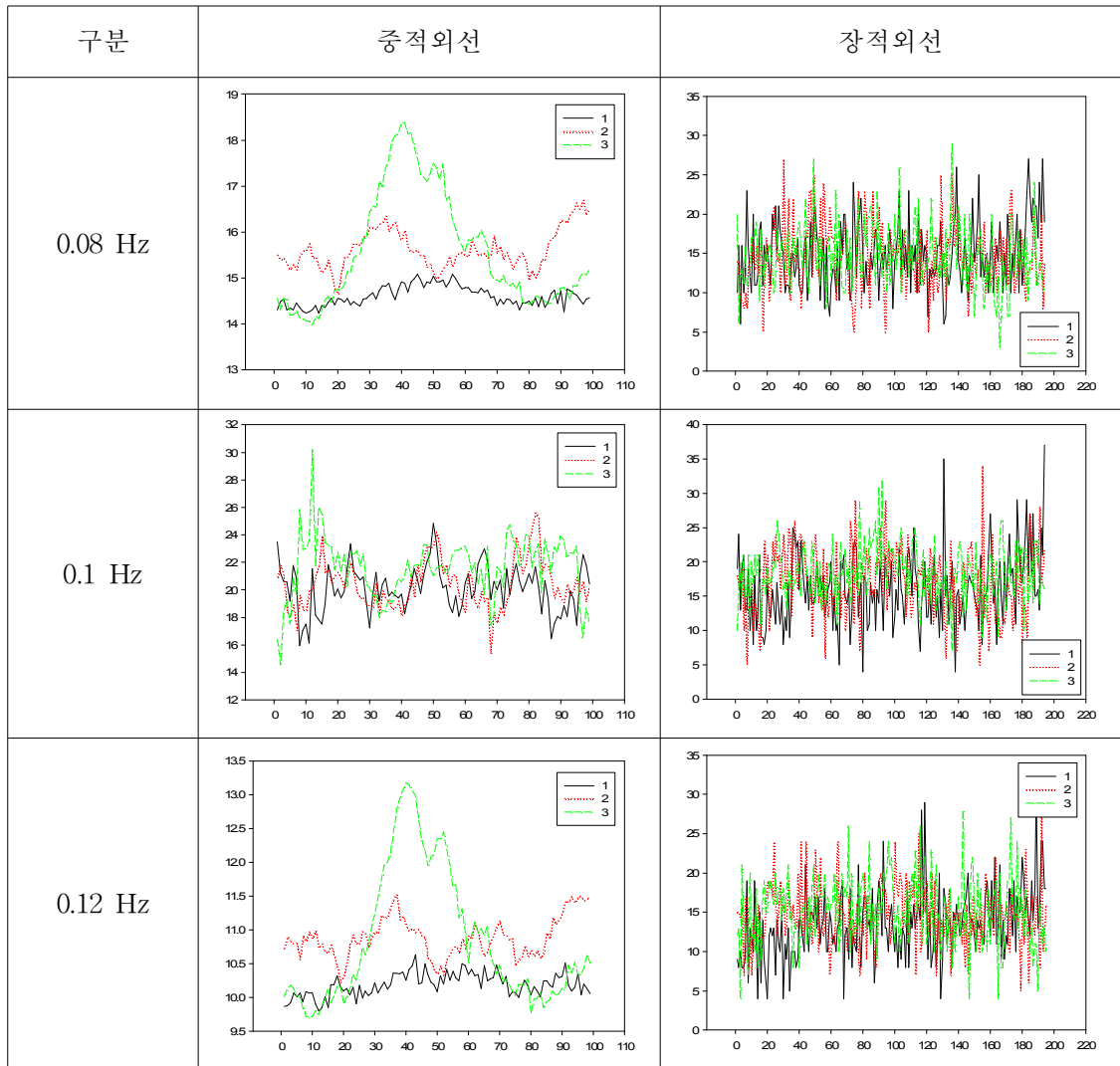


Fig. 5-13 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (SM45C, 10 mm, 75 %)

Fig. 5-14 는 재질 STS316L, 시험편 두께 10 mm, 결함 두께 50 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정 한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선, 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해서 는 결함을 확인할 수 없었다.

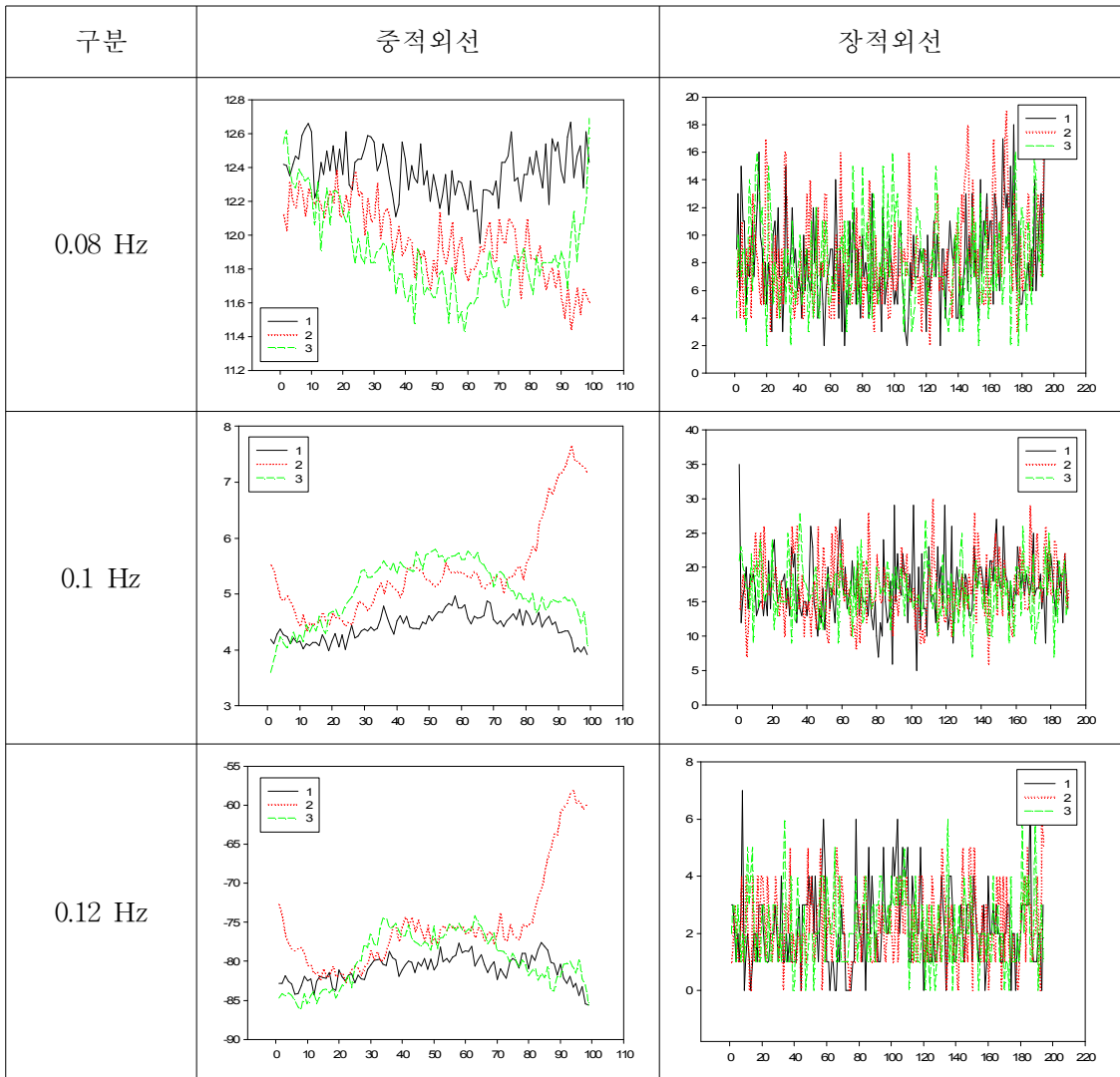


Fig. 5-14 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (STS316L, 10 mm, 50 %)

Fig. 5-15 는 재질 STS316L, 시험편 두께 10 mm, 결함 두께 75 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정 한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해 3개의 주파수에서 2, 3번 결함을 확인할 수 있었지만 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일에서는 확인할 수 없었다.

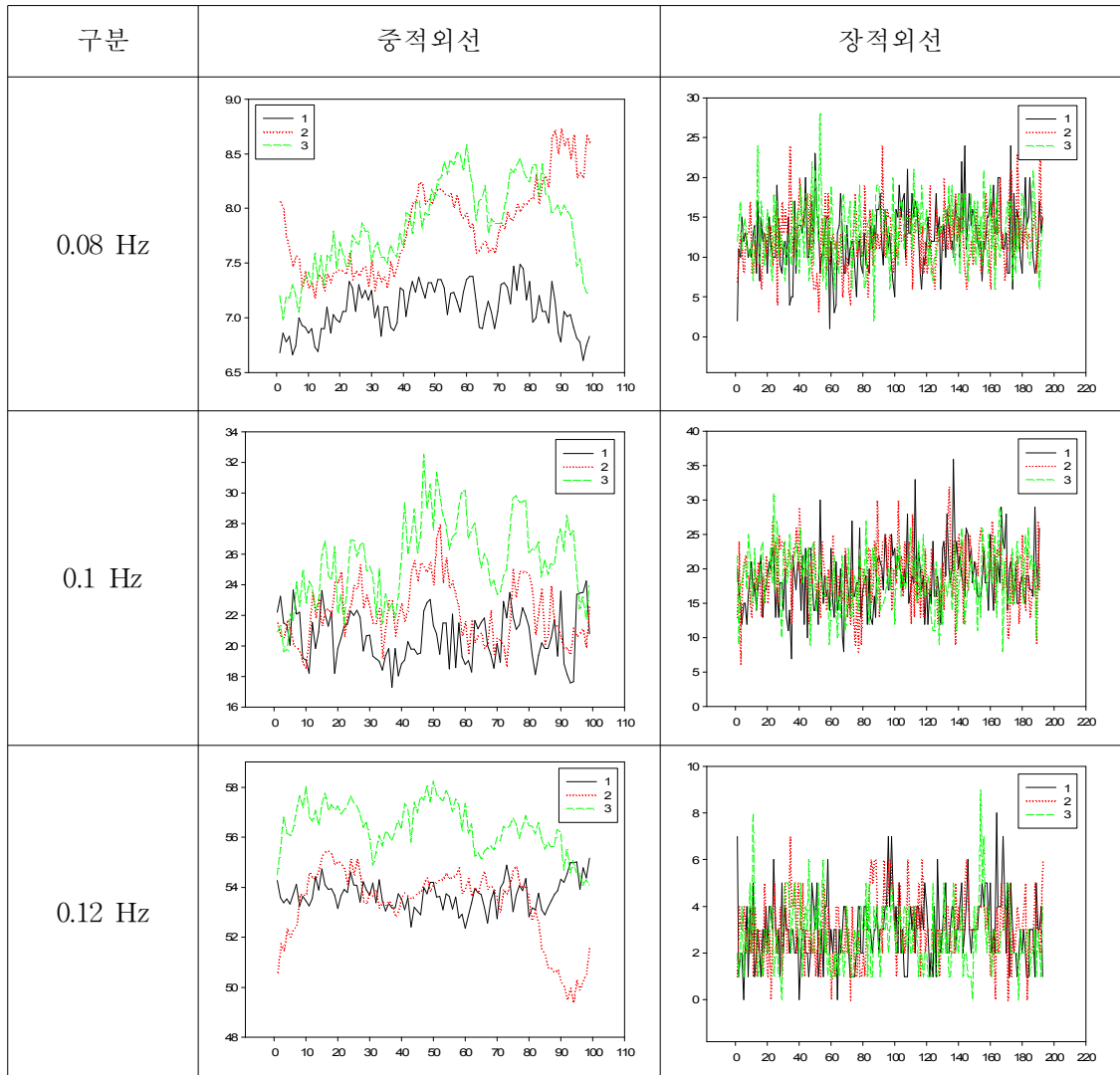


Fig. 5-15 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (STS316L, 10 mm, 75 %)

Fig. 5-16 은 재질 AL6061, 시험편 두께 5 mm, 결함 두께 50 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정 한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선, 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해서 는 결함을 확인 할 수 없었다.

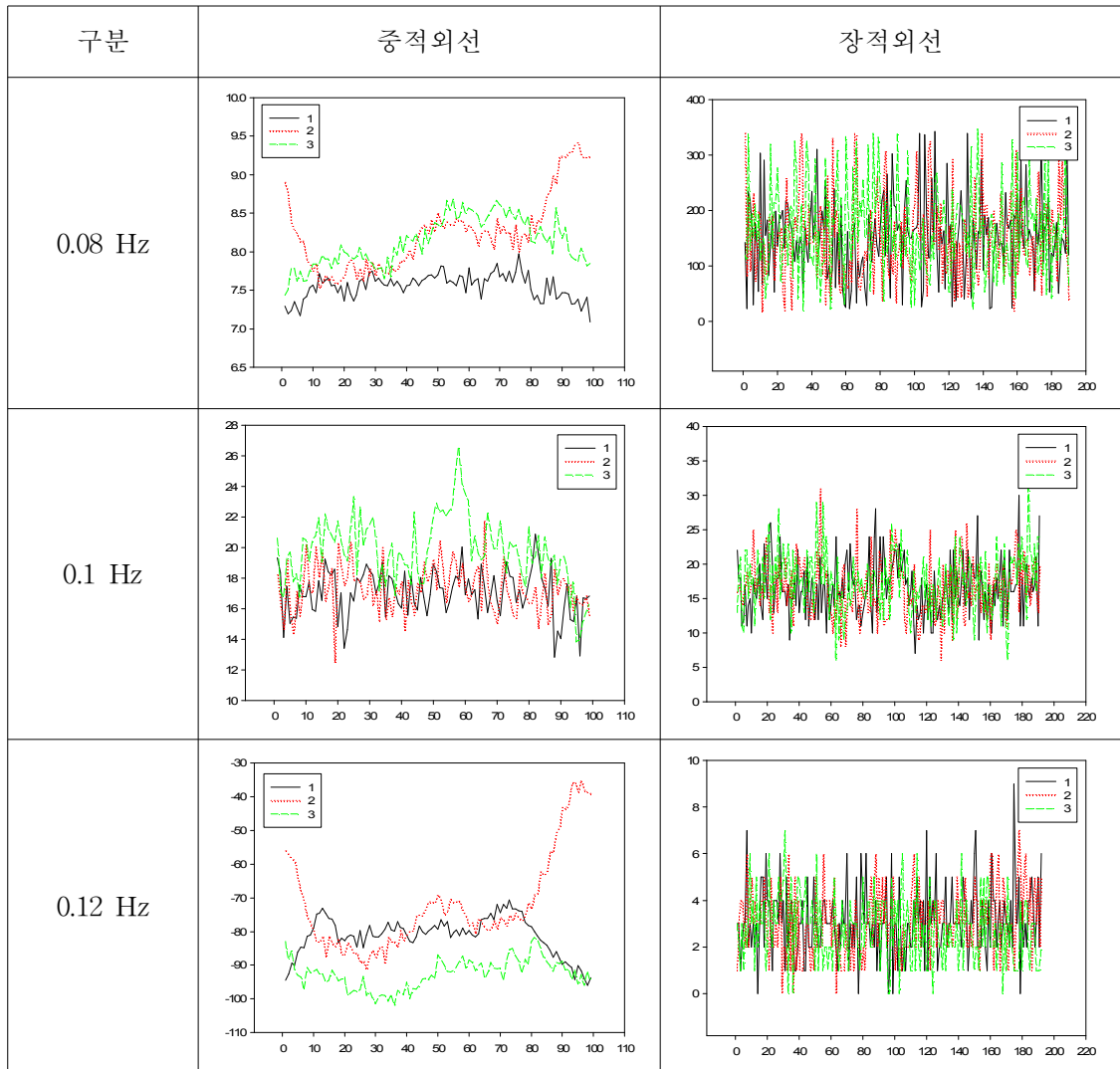


Fig. 5-16 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (AL6061, 10 mm, 50 %)

Fig. 5-17 은 재질 AL6061, 시험편 두께 5 mm, 결함 두께 75 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정 한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해 3개의 주파수에서 2, 3번 결함을 확인할 수 있었지만 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일에서는 확인할 수 없었다.

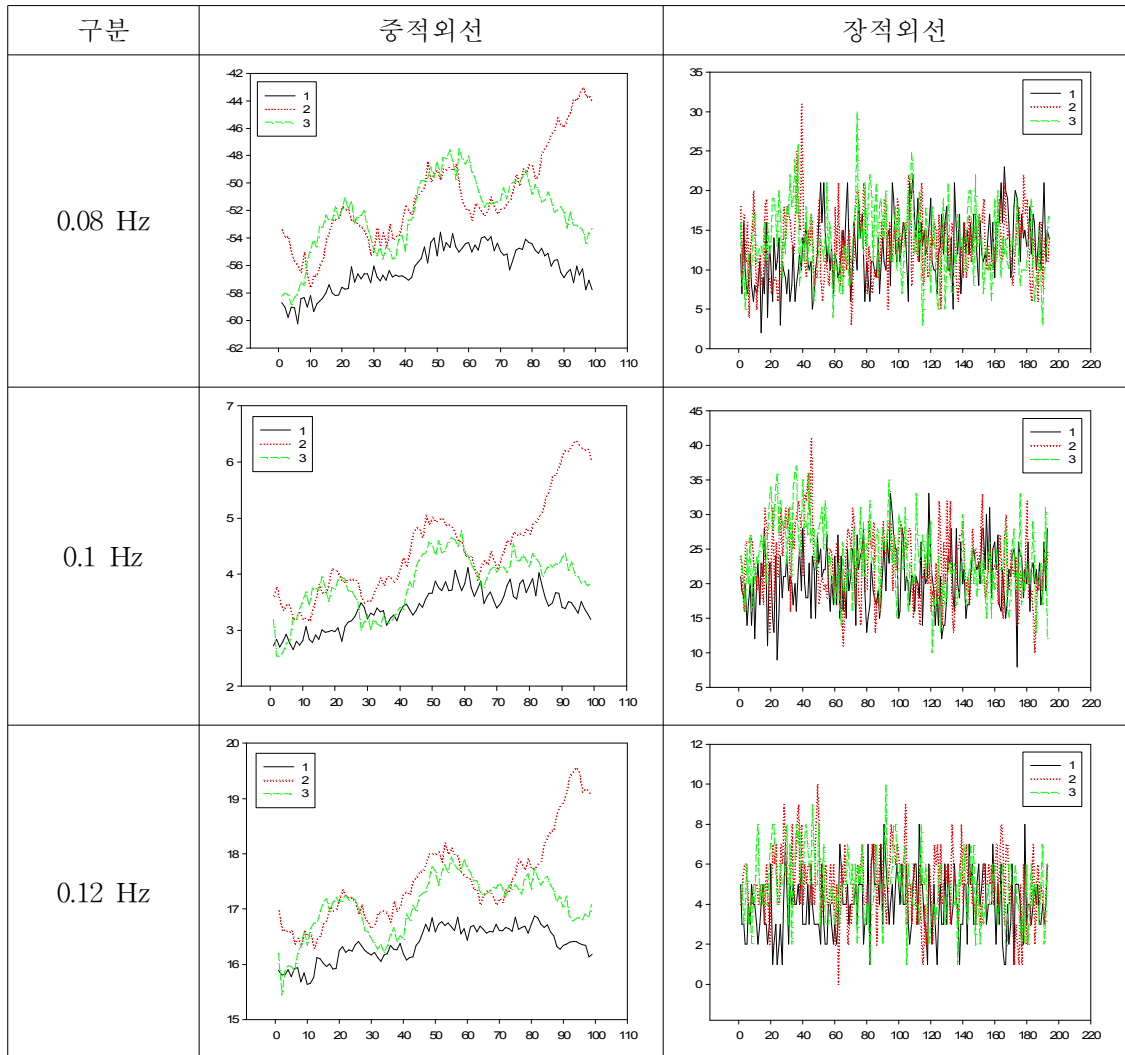


Fig. 5-17 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (AL6061, 5 mm, 75 %)

Fig. 5-18 은 재질 SM45C, 시험편 두께 5 mm, 결함 두께 50 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선, 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해서 는 결함을 확인 할 수 없었다.

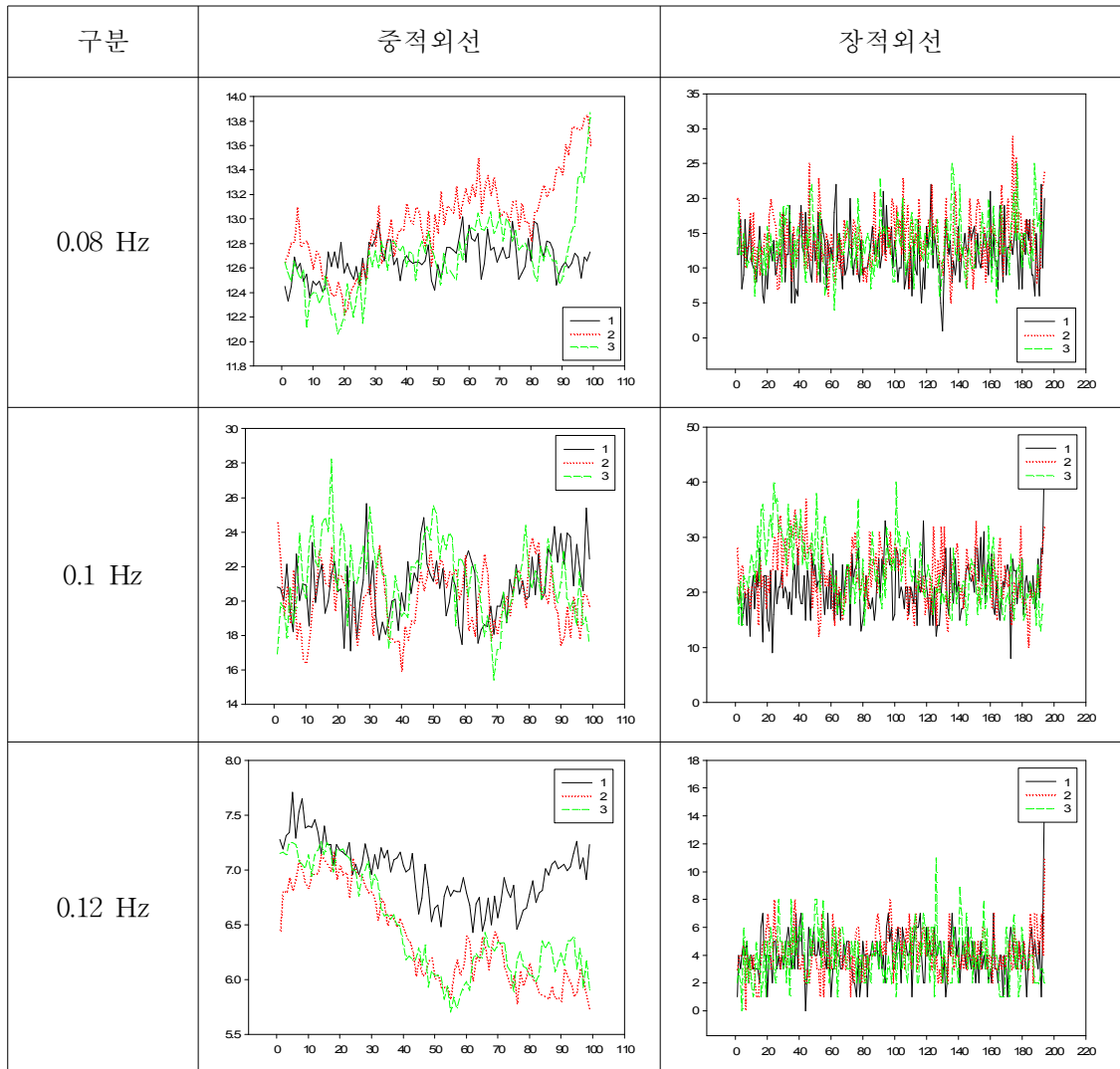


Fig. 5-18 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (SM45C, 5 mm, 50 %)

Fig. 5-19 는 재질 SM45C, 시험편 두께 5 mm, 결함 두께 75 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정 한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선 카메라를 이용한 라인프로파일 그래프에서는 결함을 확인 할 수 있었다.

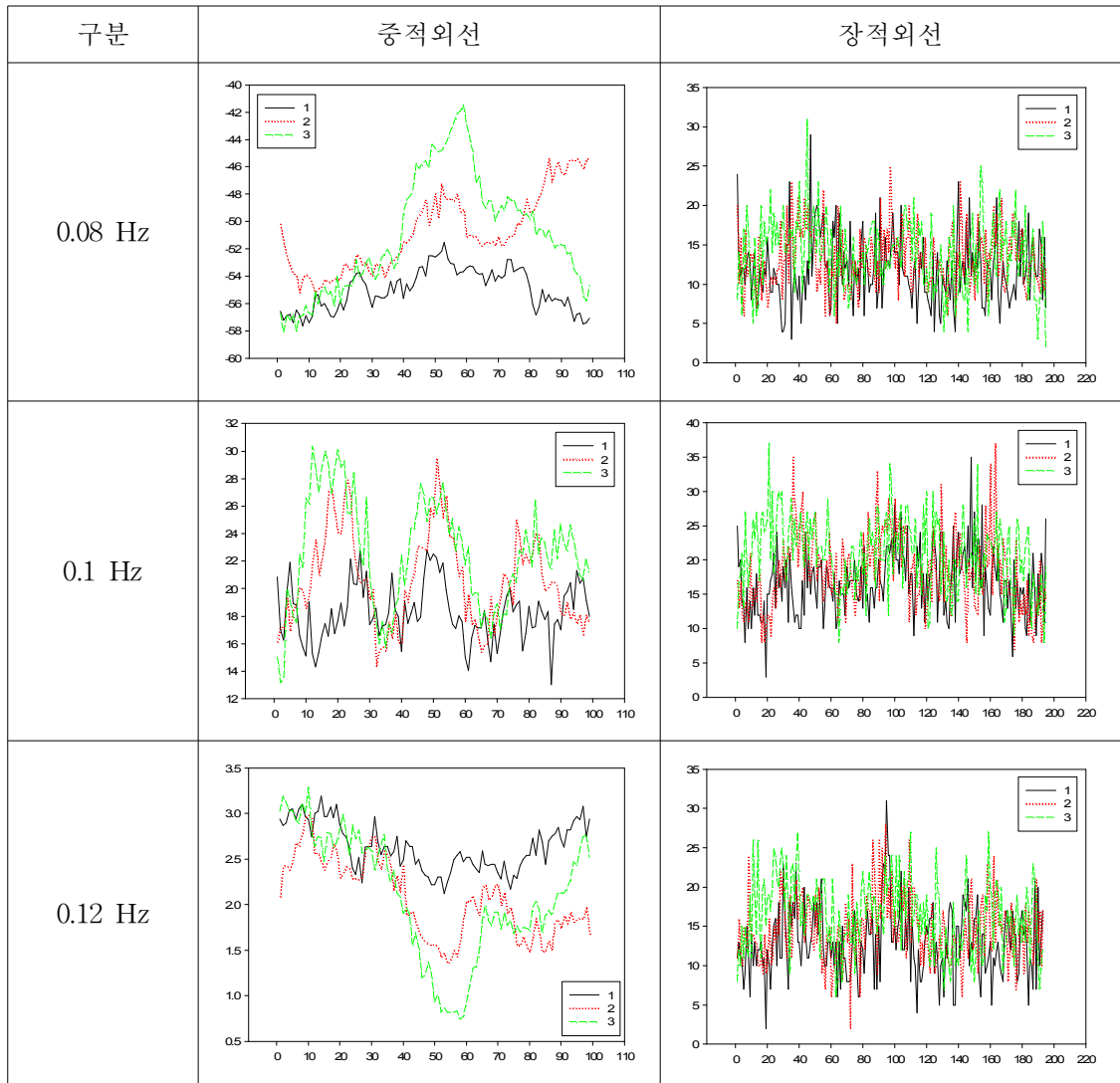


Fig. 5-19 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (SM45C, 5 mm, 75 %)



Fig. 5-20 은 재질 STS316L, 시험편 두께 5 mm, 결함 두께 50 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정 한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선, 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해서 는 결함을 확인 할 수 없었다.

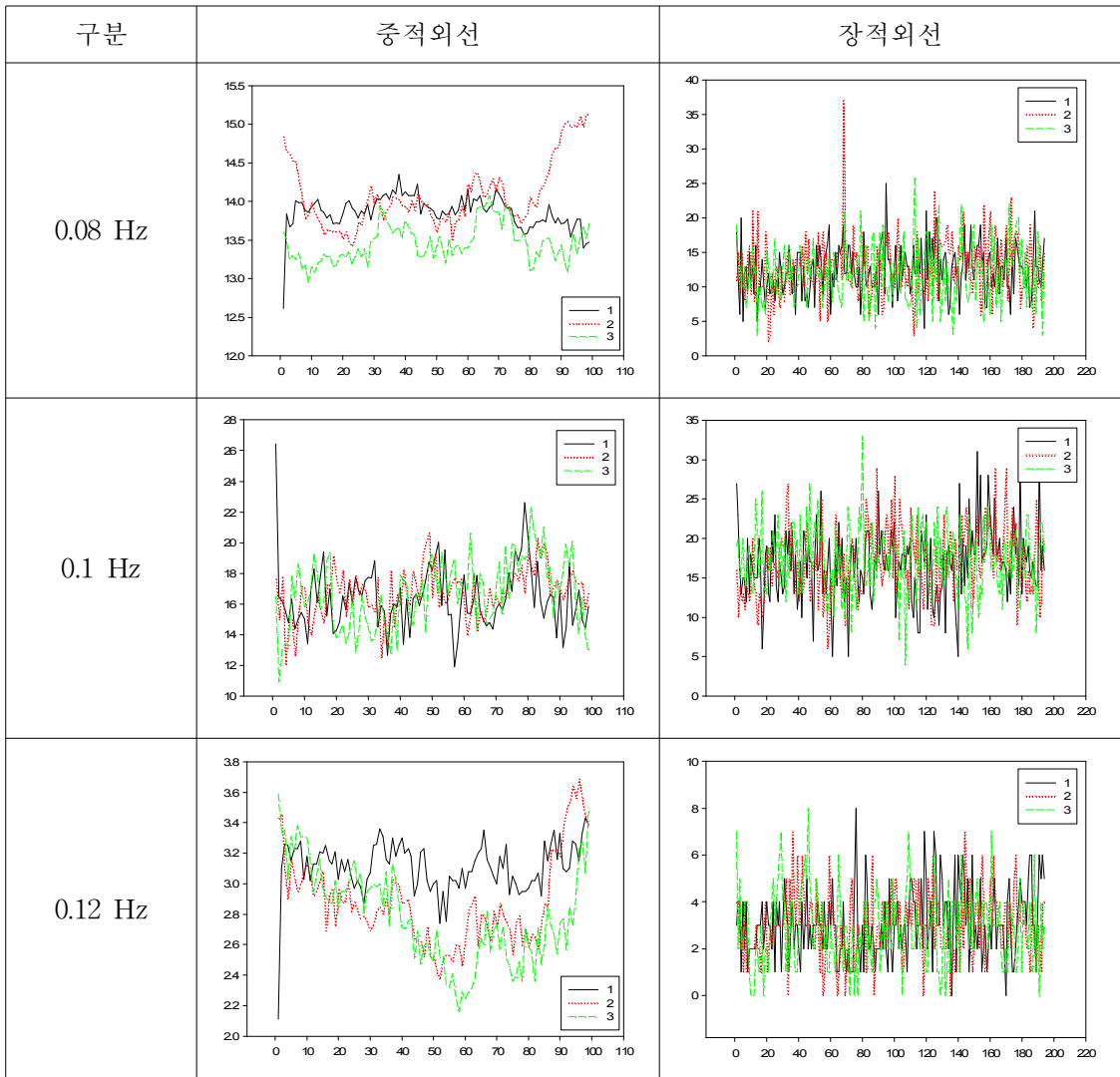


Fig. 5-20 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (STS316L, 5 mm, 50 %)

Fig. 5-21 은 재질 STS316L, 시험편 두께 5 mm, 결함 두께 75 %의 평판 결함시험편을 중적외선, 장적외선카메라를 이용하여 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz의 주파수로 측정 한 이미지에 라인프로파일을 그린 후 그 결과를 그래프로 나타내었다. 중적외선카메라를 이용한 라인프로파일의 그래프를 통해 3개의 주파수 모두 결함을 확인할 수 있었지만 장적외선 카메라를 이용한 라인프로파일에서는 확인할 수 없었다.

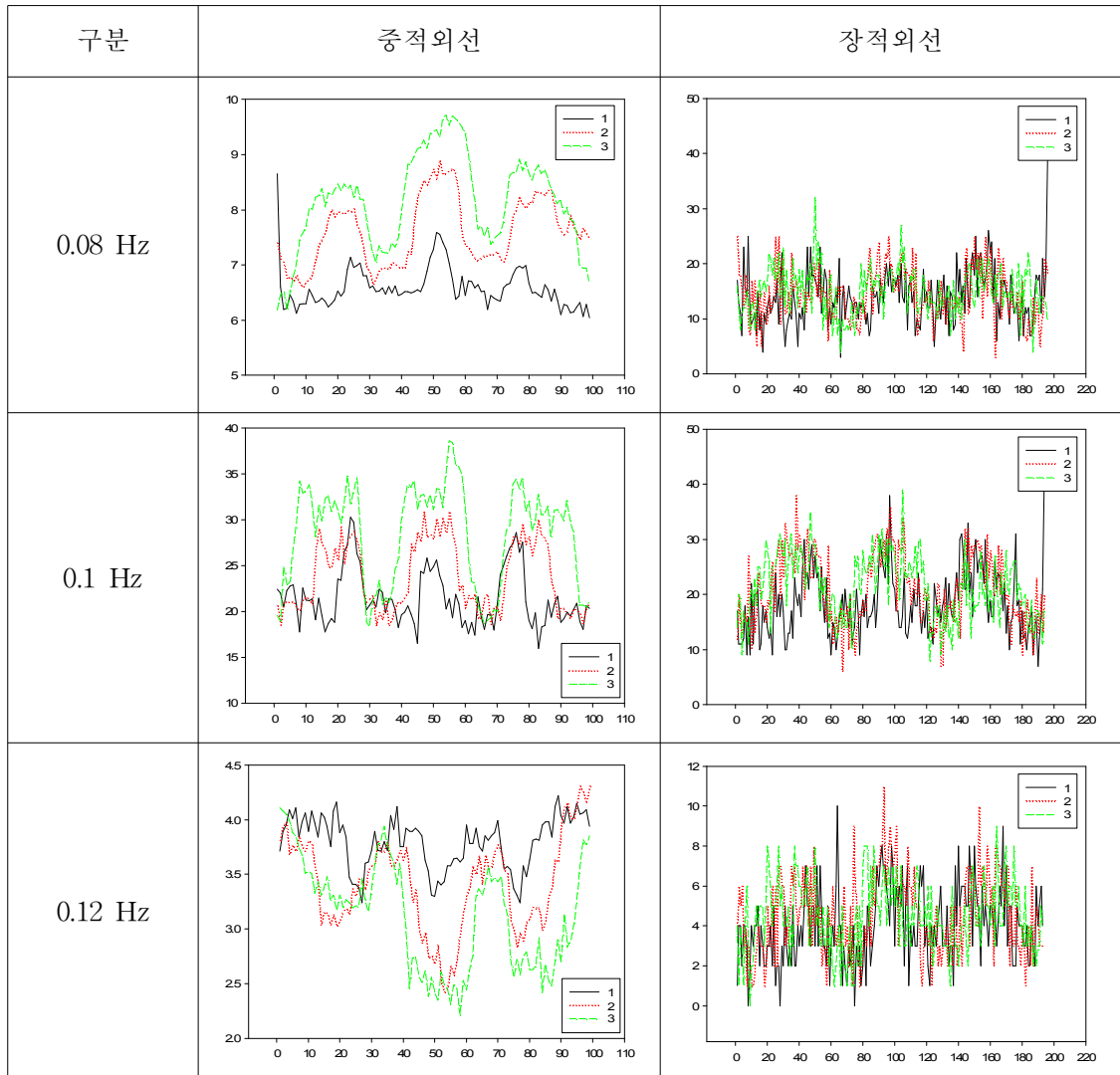


Fig. 5-21 Line profile results according to material, specimen thickness, defect depth (STS316L, 5 mm, 75 %)

## 제 6 장 결 론

본 연구에서는 첨단 비파괴 검사 분야로써 현재 널리 사용되고 있는 기술 중에 Lock-in 적외선 열화상 기법을 이용하여 재질에 따른 결함 평판 시험편의 결함을 검출하기 위한 최적의 조건을 위한 실험을 수행하였다. 이에 따른 다양한 재질, 시험편 두께, 결함크기 및 깊이를 갖는 평판 시험편을 제작하였다. 적합하다고 판단한 주파수 0.08 Hz, 0.1 Hz, 0.12 Hz와 제작한 할로겐 램프를 사용하여 중적외선 카메라와 장적외선 카메라로 결함을 측정하였다. 실험 및 데이터 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이 논문 연구 전의 데이터를 통하여 최적의 적외선 열화상 시험 조건은 시험편과 IR카메라 및 할로겐 램프의 거리는 1.5 m이고 1 kW 할로겐 램프 2개를 사용 할 때 인 것으로 판단되어 실험을 진행하였으며 전체적으로 중적외선 카메라와 장적외선 카메라를 이용한 실험 모두 평판 결함 시험편의 재질, 시험편 두께, 결함 크기 및 깊이를 고려한 측정을 통해서 적합한 주파수는 0.1 Hz이었다.

(2) 시험편의 두께는 얇을수록 결함의 깊이는 클수록 결함이 뚜렷하게 검출되었다. 제작한 할로겐 램프를 사용하여 빛을 집중적으로 조사하였음에도 불구하고 시험편 두께 5T의 결함두께 75 % (3.75 mm)인 결함이 시험편두께 10T의 결함두께 75 % (7.5 mm)보다 결함이 뚜렷하였다. 따라서 이를 개선하기 위해서는 결함 검출에 적합한 새로운 형태의 가열 방법을 개발하여 시험편에 순간 더 많은 열을 전달하게 된다면 두꺼운 시험편의 얇은 결함도 측정이 가능할 것으로 사료된다.

(3) 중적외선 카메라를 이용한 결함 검출과 장적외선 카메라의 결함 검출 이미지는 비슷하였으나 라인프로파일을 통한 결과는 중적외선 카메라를 통한 데이터로만 확인할 수 있었다. LabVIEW를 이용하여 개발한 장적외선 카메라의 lock-in 프로그램의 라인프로파일에 데이터 보정이 가능한 프로그램을 추가하여 데이터를 보정을 통한 결함 검출을 이용하면 장적외선 카메라를 이용한 결함 검출 라인프로파일을 이용하여 정량적

인 결함검출을 할 수 있을것으로 사료된다.

본 연구를 진행하며 재질에 따른 위상잠금 적외선 열화상기법의 결함 진단 적용 가능성을 확인 하였으며, 이를 통하여 향후 배관 및 여러분야의 결함 측정에 도움이 될 것으로 전망된다.

## References

- [1] M. Frank, R. Hans, and S. Helmut, “Experience with Piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspects,” Nucl. Eng. Des., vol. 207, pp. 307-316 (2001).
- [2] P. K. Rastogi and D. Invalid, Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection. Elsevier Science, 2000.
- [3] C. J. Hellier, Handbook of Nondestructive Evaluation. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [4] K. H. Yoo, J. H. Kim, M. G. Na, J. W. Kim, H. C. Jung, and K. S. Kim, “Utilization of Lamp Lock-in for Wall-Thinned Defects Detection Using IR Thermography,” Proc. of KNS Spring Mtg, Geangju, Korea, May, 30-31, 2013.
- [5] the-infrared-choice, <http://www.vision-systems.com>
- [6] M.J. Weida and B. Yee, “Quantum cascade laser-based replacement for FTIR microscopy,” Proc. SPIE, vol. 7902, 2011.
- [7] the-infrared-choice, <http://www.vision-systems.com>
- [8] S.B. Mirov et al., “Progress in mid-IR Cr<sup>2+</sup> and Fe<sup>2+</sup> doped II-VI materials and lasers,” Optical Mater. Exp., vol. 1, 2011, pp. 898-910.
- [9] V. Petrov, “Parametric down-conversion devices: The coverage of the mid-infrared spectral range by solid-state laser sources,” Optical Mater., vol. 34, no. 3, 2012, pp. 536-554.

- [10] Y. Yao, A.J. Hoffman, and C.F. Gmachl, "Mid-infrared quantum cascade laser," *Nature Photon.*, vol. 6, 2012, pp. 432-439.
- [11] T.L.Lin, J.S.Park, T.George, E.W.Jones, R.W.Fathauer, and J.maserjian, *Appl. Phys. Lett.*, 62, 3318 (1993)
- [12] K.W.Goossen, J.E.Cunningham, M.B.Santos, and W.Y.Jan, *Appl. Phys. Lett.*, 62, 3229 (1993)
- [13] K.L.Wang and R.P.G. Karunasiri, *J.Vac.Sci.TechnoL*, B11, 1159 (1993)
- [14] B.F.Levine, *J. Appl. Phys.*" 74 (1993)
- [15] S.D.Gunapala, K.M.S.V.Bandara, B.F.Levine, G.Sarusi, D.L.Sivco, and A.Y.Cho, *Appl. Phys. Lett.*" 64, 2288 (1994)
- [16] Owen.K.Wu, *Compound Semiconductor*, p.26.(1996)
- [17] R.A.Ballingal, I.D.Blenkimsop, I.Baker, and J. Par sons, *SPIE*, 685, 115 (1986)
- [18] W. Bich, "Newton's laws, Plank's principle, and metrology in chemistry," *Accreditation and Quality Assurance*, Vol. 11, No. 12, pp.638-639, 1993.
- [19] 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.

- [20] O. Breitenstein, W. Warta, and M. Langenkamp, Lock-In Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials. pp. 7-26, 2nd Ed., New York: Springer, 2010.
- [21] X. P. V. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. pp. 21-30, New York: John Willy & Sons, 2001.
- [22] K. S. Kim, H. S. Chang, D. P. Hong, C. J. Park, S. W. Na, K. S. Kim, and H. C. Jung, "Defect Detection of the Wall Thinning Pipe of the Nuclear Power Plant Using Infrared Thermography," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, vol. 30, pp. 85-90 (2010).
- [23] Maldague. X., "Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography", London: Springer-Verlag, 1993.
- [24] Wontae Kim, ISO 10878: 2013(E), Non-destructive testing - Infrared thermography - Vocabulary, 2013.
- [25] Maldague, Xavier PV. "Introduction to NDT by active infrared thermography." Materials Evaluation 60.9 (2002): 1060-1073.
- [26] 최만용, 김원태. (2012) " 적외선열화상검사," 노드미디어.
- [27] Choi. Man Yong, Kim. Won Tae. (2012) "Infrared thermography testing"Node Media.
- [28] X. Maldague. (2001)"Infrared thermal testing"ASNT, NDT Handbook, Vol. 3, 3rd.

- [29] Milne, J.M. and Reynolds, W.N. (1985) The Non-destructive evaluation of composites and other materials by thermal pulse. Proceedings of SPIE, vol. 520, p. 119.
- [30] Kuo, P.K., Ahmed, T., Huijia, J., and Thomas, R.L. (1988) Phase-Locked image acquisition in thermography. Proceedings of SPIE, vol. 1004, pp. 41-45.
- [31] Moore, P.O. (ed.) (2001) Nondestructive Testing Handbook, 3rd edn, American Society for Nondestructive Testing, Columbus.
- [32] Breitenstein, O. and Langenkamp, M. (2003) Lock-in Thermography, Springer-Vedag, Berlin and Heidelberg.
- [33] Malclague, X.P.V. (2001) Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing, JohnWiley & Sons, Inc.
- [34] www.ndt.net (2010).
- [35] Wu, D., Salerno, A., Schonbach, B., Hallin, H. and Busse, G. (1997) Phase sensitive modulation thermography and its application for NDE. Proceedings of SPIE, vol. 3056, pp. 176-183.
- [36] Sagakami, T. and Kubo, S. (2002) Application of pulse heating thermography and Lock-In thermography to quantitative non-destructive evaluations. Infrared Phys. Technol, 43, 211-218.
- [37] Grinzato, E., Bison, P.G., Marinetti, S., and Vavilov, V. (2007) Hidden corrosion detection in thick metallic components by transient IR thermography. Infrared Phys. Technol, 49, 234-238.



[38] Maldague, X., Benitez, H.D., Ibarra Castenado, C., Benada, A., Laiza, H., and Caicedo, E. (2008) Definition of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography. *Infrared Phys. Technol.*, 51, 160-167.

[39] Genest, M. and Fahr, A. (2009) Pulsed thermography for nondestructive evaluation (NDE) of aerospace materials. *Inframation 2009, Proceedings*, vol. 10, pp. 59-65.

[40] Tarin, M. (2009) Solar panel inspection using Lock-in-Thermography. *Inframation 2009, Proceedings* vol. 10, pp. 225-237.

[41] Weiser, M., Arndt, R., Rollig, M., and Erdmann, B. (2008) Development and test of numerical model for pulse thermography in civil engineering. *ZIB-Report 08-45*, Konrad-Zuse Zentaim fli r Informationstechnik, Berlin, December 2008.

[42] 김주형, 강부병. (2014) “적외선 열화상 분석기술” 홍릉과학출판사.

[43] 조선대학교, “적외선 열화상 기술을 이용한 원전 배관 결함 검사기술 개발”, 원전기술혁신사업 연구보고서, 2013

[44] 전북대학교, “적외선 열화상기법 적용 압력용기의 냉각온도변화를 통한 결함검출 장치개발”, 중소기업융복합기술개발사업 연구보고서, 2015

[45] 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석, “위상잠금 광-적외선 열화상을 이용한 내부결함의 위치 및 크기 평가,” *비파괴검사학회지*, Vol .27, No. 4, pp. 321-327, 2007.

[46] X. P. V. Maldague, Rastogi P.K., Inaudi D, editors, “Trends in optical nondestructive testing and inspection,” Elsevier Science, Switzerland, pp. 591-633, 2000.

[47] 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.

[48] 전북대학교, “비접촉 레이저 응용 검사기술을 이용한 원자력기기의 신뢰성 향상 기술 개발”, 원자력연구개발 사업 연구 보고서, 2008.

<b>저작물 이용 허락서</b>					
학 과	기계시스템 미래자동차공학과	학 번	20147207	과 정	박사
성 명	한글: 김 상 채    한문: 金 相 彩    영문: Kim, Sang-Chae				
주 소	광주광역시 남구 봉선1로 47번길 1				
연락처	E-mail : bluerune@chosun.ac.kr				
논문제목	한글: 위상잡음 적외선 열화상 기술을 이용한 감육 결함의 최적화 측정에 관한 연구 영문: A study on the optimal measurement of wall thinning defect using lock-in infrared thermography				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다            음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함</li> <li>2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.</li> <li>3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.</li> <li>4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.</li> <li>5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.</li> <li>6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음</li> <li>7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.</li> </ol> <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(○)    반대( )</p> <p style="text-align: center;">2018 년    7    월    10    일</p> <p style="text-align: center;">저작자:    김 상 채    (서명 또는 인)</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;"><b>조선대학교 총장 귀하</b></p>					