



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

2013년 2월

석사학위논문

적외선 열화상 기법을 이용한
감육 결함 배관의 결함 검출
최적 계측 조건 평가

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

윤 경 원

적외선 열화상 기법을 이용한
감육 결함 배관의 결함 검출
최적 계측 조건 평가

**Evaluation of Optimal Measuring Condition
in the Flaw detection of Wall-Thinning Defect pipe
by Infrared Thermography**

2013년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

윤 경 원

적외선 열화상 기법을 이용한
감육 결함 배관의 결함 검출
최적 계측 조건 평가

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2012년 11월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

윤 경 원

윤경원의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교 수 김 재 열



위 원 조선대학교 교 수 장 완 식



위 원 조선대학교 교 수 김 경 석



2012년 11월 26일

조선대학교 대학원

- 목 차 -

LIST OF TABLE	III
LIST OF FIGURE	IV
ABSTRACT	VII
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적 및 내용	2
제 2 장 이론적 배경	4
제 1 절 적외선의 원리	4
1. 적외선 현상	4
2. 적외선 활용 분야	9
3. 적외선의 특징	11
제 2 절 적외선 영상 시스템의 원리	18
제 3 절 적외선 센서의 원리 및 종류	21
제 4 절 위상 잠금 기법	24
제 5 절 렌즈설계	27
제 3 장 원전 배관	31

제 1 절 실험장치	31
제 2 절 실험방법	32
제 3 절 배관(4 inch, 소구경 2.5 inch)	34
제 4 장 실험결과	47
제 1 절 유한요소해석	47
1. 배관모델링	48
2. 유한요소해석 모델링	50
3. 유한요소해석 시뮬레이션 결과	50
제 2 절 결함 검출	53
1. 4 inch 배관	53
2. 소구경 2.5 inch 배관	59
제 3 절 각도의 의한 결함 검출	63
제 4 절 배관의 결함 검출을 통한 결함 길이 예측	68
제 5 절 광학 설계를 통한 Halogen Lamp 설계	73
제 5 장 결론	77
참고문헌	79

- LIST OF TABLE -

Table 2-1 IBC of standard(IEC usage Sect 841)(μm)	7
Table 2-2 Typical transmissive IR window material	30
Table 3-1 Specification of infrared camera	32
Table 3-2 Specification of Halogen Lamp	32
Table 3-3 Material property of ASTM A106 Gr.B	36
Table 3-4 Geometry of 4 inch pipe (500mm)	37
Table 3-5 Geometry of 4 inch pipe (1200mm)	37
Table 3-6 Geometry of 2.5-inch specimen (700mm)	45
Table 4-1 Thermal Properties of ASTM A106 Gr.B	48
Table 4-2 Simulation conditions of FEM	51
Table 4-3 defects(ℓ/D) defect l =ength(mm)	72
Table 4-4 defects(ℓ/D) defect length(%)	72
Table 4-5 defects(d/t) wall-thinning depth(mm)	73
Table 4-6 defects(d/t) wall-thinning depth(%)	73

- 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	11
Fig. 2-6 Separation of emissivity	13
Fig. 2-7 Principle of emissivity of applied object	14
Fig. 2-8 Radiation energy of blackbody	16
Fig. 2-9 Blackbody effect of hole	17
Fig. 2-10 Effect of penetration	17
Fig. 2-11 Detection principle of IRT	18
Fig. 2-12 Temperature calibration	20
Fig. 2-13 Wave range of infrared detector to each detector material	22
Fig. 2-14 Signal processing of lock-in infrared thermography	24
Fig. 2-15 multiple internal reflection of optical energy flow calculated	29
Fig. 3-1 Infrared camera	31
Fig. 3-2 Infrared Thermography system(IRT)	31
Fig. 3-3 Infrared Thermography System	33
Fig. 3-4 Pipe of damage example	34
Fig. 3-5 Comparison of planar defect and wall thinning effect in pipe	35
Fig. 3-6 SP1-1 pipe defect floor plan	38
Fig. 3-7 SP2-1 pipe defect floor plan	39
Fig. 3-8 SP2-5 pipe defect floor plan (A Section)	40

Fig. 3-9 SP2-6 pipe defect floor plan (A Section)	41
Fig. 3-10 4 inch pipe of ASTM A106 Gr.B material (500mm)	42
Fig. 3-11 2.5 inch pipe of ASTM A106 Gr.B material (700mm)	43
Fig. 3-12 SP3-1 Pipe defect floor plan	44
Fig. 3-13 2.5 inch complex pipe of ASTM A106 Gr.B material	46
Fig. 3-14 2.5 inch elbow pipe of ASTM A106 Gr.B material	46
Fig. 4-1 Basic mechanism of thermal characteristics	48
Fig. 4-2 4 inch Pipe with artificial defects	49
Fig. 4-3 Configuration of the modeling 4 inch Pipe and Halogen Lamp	51
Fig. 4-4 Surface temperature of 4 inch pipe on 70% of Halogen Lamp output	52
Fig. 4-5 Measurement results of Infrared Thermography image SP1-1	54
Fig. 4-6 4 inch pipe(SP1-1) Temperature graph	55
Fig. 4-7 Measurement results of Lock-in SP1-1	55
Fig. 4-8 4 inch pipe(SP2-5) Infrared Thermography image	57
Fig. 4-9 4 inch pipe(SP2-5) Lock-in image	57
Fig. 4-10 4 inch pipe(SP2-6) Infrared Thermography image	58
Fig. 4-11 4 inch pipe(SP2-6) Lock-in image	58
Fig. 4-12 2.5 inch pipe(SP3-1) Infrared Thermography image	60
Fig. 4-13 2.5 inch pipe(SP3-1) Lock-in image	60
Fig. 4-14 2.5 inch pipe(SP3-4) Infrared Thermography image	61
Fig. 4-15 2.5 inch pipe(SP3-4) Lock-in image	61
Fig. 4-16 2.5 inch complex pipe	62
Fig. 4-17 2.5 inch elbow pipe	62
Fig. 4-18 SP1-1 pipe angle of defect(Infrared Thermography)	64
Fig. 4-19 SP1-1 pipe angle of defect(Lock-in)	65
Fig. 4-20 SP2-1 pipe angle of defect(Infrared Thermography)	66

Fig. 4-21 SP2-1 pipe angle of defect(Lock-in) 67

Fig. 4-22 Dimensions of defects in small-bore pipe 68

Fig. 4-23 Infrared Thermography Image (1.5m) 69

Fig. 4-24 1.5m Temperature at defects(ℓ/D) 70

Fig. 4-25 1m Temperature at defects(θ/π) 70

Fig. 4-26 1.5m Temperature at defects(d/t) 71

Fig. 4-27 New Halogen Lamp image 74

Fig. 4-28 Focal length according to surface receiver illuminance distribution ... 74

Fig. 4-29 BK-7 glass of Infrared transmissivity 75

Fig. 4-30 measure (a) against (b) of defect image 76

ABSTRACT

Evaluation of Optimal Measuring Condition in the Flaw detection of Wall-Thinning Defect pipe by Infrared Thermography

Yun, kyungwon

Advisor Prof. Kim, Koungsuk Ph.D.

Department of Advanced Parts and Materials

Engineering, Graduate School of Chosun University

Non-destruction evaluation(NDE) method with the merits of rapid response, economic efficiency, and manifold applications has been an important role in industries from the safety diagnosis of large infra structure to the reliability evaluation of small products. There are many efficient Non-destruction evaluation(NDE) methods such as Visual Testing(VT), Radio-graphic Testing(RT), Ultrasonic Testing(UT), Magnetic testing(MT), Liquid penetrant Testing(LT), Eddy current Testing(ET), Acoustic Emission(AE), Thermography. Generally, VT, PT, MT, and ET are applied for the detection of surface defects and UT and RT are done for internal defect. have been used to monitor fatigue damage. This paper aims to describe thermal stress measurement using Lock-in Infrared Thermography as a non-destructive testing method with real time and non-contact technology.

NDE methods based on optical metrology such as Thermography, Holography, Electronic Speckle Pattern Interferometry, Shearography etc can provide solution to the problems of previous methods. Infrared Thermography(IRT), application techniques is a two-dimensional non-contact Non-destruction evaluation(NDE) that can detect internal

defects from the thermal distribution by the inspection of Infrared light from the object surface.

Infrared Thermography thermal imaging of bulk is different from that of a Wall-Thinning defect, In a heated metal with an internal defect, and then location and size of a Wall-Thinning defect can be measured by the analysis of thermal imaging pattern.

This study conducted Pulsed Infrared Thermography (IRT) and Lock-in Infrared Thermography (Lock-in IRT) test for 4 inch and small-bore 2.5 inch piping of two types of artificial Wall-Thinning defects to find optimal conditions for Infrared Thermography (IRT) for Wall-Thinning defect piping components. Pulsed Infrared Thermography thermal imaging is a method to inspect a Wall-Thinning defect by indirect heating treatment, and Lock-in Infrared Thermography thermal imaging is a method to detect a defect by direct heating treatment, respectively.

The first experiment used two Halogen Lamps, whose full power capacity are 1 kW, were used to heat pipes, and the exposure distance between pipe and Halogen Lamp and the Halogen Lamp power were considered as experimental parameters. When the exposure distance is 4 inch 1m, 2m, 3m, small-bore 2.5 inch 1m, 1.5m, 2m and the exposure rate is higher than 70% of full power.

In the case of 4 inch, IRT and Lock-in IRT thermal images of Wall-Thinning defects were clearer under the conditions of higher exposure rate and exposure distance of 2m than under the conditions of lower exposure rate and exposure distance of 1m and 3m. But the image of small-bore 2.5 inch pipe Wall-Thinning defect was clearer under the conditions of higher exposure rate and exposure distance of 1.5m than under the conditions of lower exposure rate and exposure distance of 1m and 2m. Also, it was recognized that the detectability of Wall-Thinning defects is similar for both Pulsed Infrared Thermography and Lock-in Infrared Thermography.

The second, Infrared Thermography (IRT) test using 4 inch pipe with artificial

Wall-Thinning defect to measure on the Wall-Thinned nuclear pipe components. This study conducted for defect detection condition of nuclear small-bore pipe research using deducted condition in the advanced research. Defect process is processed by change for defect length, circumferential direction angle, wall-thinning depth. In the used equipment IR camera and two Halogen Lamps, whose full power capacity is 1 kW, halogen lamps and Target pipe experiment performed to the distance of the changed 1m, 1.5m, 2m. To analysis of the experimental results ensure for the temperature distribution data, by this data measure for defect length. artificial defect of 4 inch pipe is high reliability in the 2m, but small-bore pipe is in the 1.5m from the defect clearly was detected.

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경

과장이 가시광선보다 길고 전파보다 짧은 전자파를 적외선이라 부른다. 온도를 가지고 있는 모든 물체는 그 온도에 대응하는 복사에너지를 방출하게 되며, 적외선 열화상 기법(Infrared Thermography: IRT)은 이 방출된 에너지량을 측정하여 검출 에너지량과 온도의 상관관계로부터 물체의 온도화상을 제공한다. 1960년대 초 적외선 열화상 기법이 개발되었고 초기에는 단일 검출소자에 의해 스캐닝 방식으로 온도 영상을 구현하였으나, 현재는 어레이(array)방식의 고감도 적외선 검출소자와 화상 처리기술의 발전을 배경으로 비파괴 진단에서 평가기술까지 다양한 산업분야에서 활용되고 있다. 일본 비파괴검사협회 규격 (NDIS 3005)에 의하면 적외선 카메라와 적외선 열화상기술의 구별은 물체로부터 방사되는 적외선 강도분포 영상으로 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. 최근 원자력 시설물 내부 결함 진단을 위한 기초연구를 수행하고 있다. 비파괴 검사기술 분야의 표준화는 ISO/TC 135에서 주관하고 있으며, 적외선 열화상 비파괴 검사기술은 ISO/TC 135/SC 8에서 주관하여 표준화 관련 업무를 진행하고 있다. 현재까지 적외선 열화상 관련 용어정의 등의 표준화 작업이 진행되고 있으나, 일본 비파괴학회(JSNDI)가 주관이 되어 열탄성 관련 분야 표준화를 준비하는 것으로 포착되었다. 국내에서도 적외선 열화상을 이용한 검사기법 한 국가 연구소와 대학 등에서 현재 연구 중이다. 하지만 미국, 일본, 프랑스 등 여러 선진국에서 하나의 전문 분야로써 인정받고 있는 비파괴 검사기법으로 국내의 경우에는 약 20년 전부터 선진 외국으로부터 상용화장비 및 기법을 받아들였다. 또한, 비파괴 검사 시험의 도입 기간이 짧았을 뿐만 아니라 일부 산업분야를 제외한 원자력 산업분야 및 일반 산업분야에서 비파괴 시험에 대한 요구가 많지 않아 비중 있게 다루어 지지 않았다. 하지만 2011년 3월 11일 후쿠시마 원전 사고에 의하여 방사능 누출로 원자력 발전소의 직원 약 3040명의 사상자

가 발생하게 되었다. 그로인해 원전의 안전의식이 국가의 안전으로 자리매김하였다.

이로써 검사결과와 신속성, 경제성, 검사대상의 다양성 등의 장점으로 일반 대형 구조물의 안전진단에서부터 원자력 발전소의 구조물에 신뢰성 평가 분야까지 산업 전반에서 중요한 역할을 담당하고 있으며, 그 중요성은 안전진단을 통한 후쿠시마 원전 사고와 같은 대형사고의 예방에서부터 제품의 신뢰성평가를 통한 기업경쟁력 강화까지 이르고 있다. 적외선 열화상 기법은 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 추세다. 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. 적외선 열화상 기법은 국외에서는 1960년도부터 상용화가 되어 각 산업분야에서 널리 사용되어 왔으며, 특히 콘크리트 결함 계측, 미국 전력연구센터(EPRI)의 변압기의 전기 누출의 상태감시분야 등 여러 분야에서 활용되어지고 있다.

제 2 절 연구목표 및 내용

본 연구에서는 원자력 관련 배관의 결함 검출에 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 배관에 존재하는 결함검출에 관한 것이다. 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 유동가속부

식(FAC, flow accelerated corrosion) 등이 있으며, 이러한 형태에 의해 배관 내부에서 발생하는 결함의 경우에는 그 특성상 초기 징후가 거의 나타나지 않으며 어느 한계에 다다르면 순간적으로 파열을 일으키기 때문에 문제가 되고 있다. 배관의 건전성을 진단하기 위한 현재의 비파괴 기법들은 측정 영역 범위가 좁고 검사시간이 오래 걸리며 또한, 배관의 피복을 벗겨 내야 하는 등 측정을 위한 시판과 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.

원자력 발전소(이하 원전)의 경우, 2차측 배관에는 부식에 취약한 탄소강이 사용되고 있으며, 유동가속부식에 의한 감육 결함의 발생가능성이 높다. 실제 감육 결함은 원전 2차측 배관의 건전성을 위협하는 주요 손상 메커니즘으로 알려져 있다. 감육 결함은 누설과 같은 사전 징후가 없이 바로 손상으로 진행되며, 용접부가 아닌 모재부에서도 흔히 발생되기 때문에 기존의 가동 중 검사를 통해 발견하기 어려운 특징이 있다. 따라서, 원전에서는 배관의 감육 결함 관리를 위한 별도의 프로그램을 운영하고 있으며, 이에 따른 감육 결함의 발생 가능성이 높은 부위를 선정하여 두께 검사를 시행하고 있다. 하지만, 이들 배관의 곡관부는 탐촉자의 접촉이 어려워 신뢰성이 떨어지고, 소구경 배관의 경우에는 방사선 투과 검사를 적용하고 있지만 이 또한, 검사 시 작업자 피폭 등의 문제로 현장 적용에 한계가 있다. 따라서, 원전 배관의 결함 검출에 적합한 검사 방법의 개발이 요구되고 있다. 이와 관련하여 국내외적으로 배관 감육 결함 검사에 적외선 열화상 기법(IRT)을 적용하기 위한 시도들이 진행되고 있다. 그러나 아직까지 적외선 열화상 기법을 실제 원전 배관의 감육 결함 검사에 적용하여 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 여러 가지 체계적인 검토와 평가가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 능동형 검사방법(active technique) 중 하나인 위상 잠금 적외선 열화상 기법(Lock-in infrared thermography)을 적용하였다. 위상 잠금 적외선 열화상 기법은 배관에 약 50 mHz 대역의 광원을 표면에 가하여 그 흡수된 열원에 가하여 분포되는 촬영 영상을 측

정 및 분석함으로써 결함을 검출하는 것이다.

본 논문에서는 이들 연구의 일부로 4 inch 배관, 소구경 2.5 inch 배관의 결함 검출에 적합한 가열 조건 및 촬영 조건 또한, 길이 예측 조건을 파악하고자 한다. 이를 위해 결함이 가공된 배관을 제작하여 다양한 조건에서 적외선 열화상 기법 및 위상 잠금 적외선 열화상 기법을 수행하고, 그 결과로부터 배관 결함 검출을 위한 시험조건 결정하며, 분석을 통한 결함길이를 예측할 수 있도록 한다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 적외선의 원리

1. 적외선(Infrared Radiation) 현상

가. 적외선(적외방사)

적외선이란 우리 눈에는 보이지 않으면서 빨간색 보다 파장이 긴 전자파 영역이다.

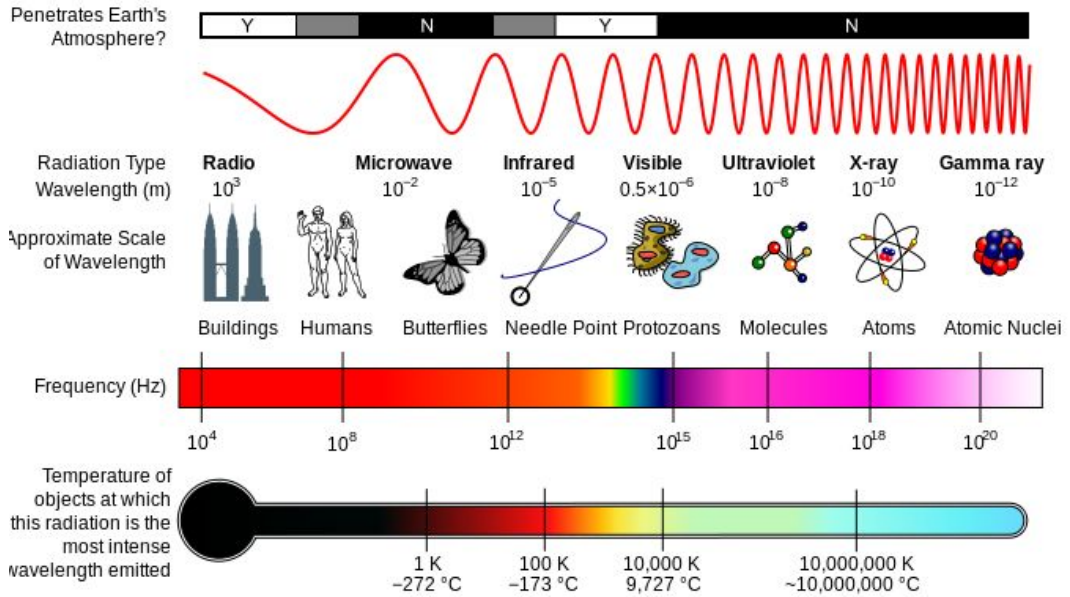


Fig. 2-1 Spectrum of electronic wave

전자기파란 Fig. 2-1에 있는 바와 같이 사람이 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. 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.

이러한 적외선은 과연 무엇인가? 사실 모든 물체는 적외선을 방출한다. 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.

그러면 모든 물체에서 동일한 적외선이 나오는가? 물론 아니다. 적외선 보다 잘 내놓는 물질이 있는가 하면 그렇지 못한 물질도 있다. 일반적으로 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 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. 흑체와 온도의 관계는 Fig. 2-2와 같다.

가로축은 파장(Wavelength)을 나타내며, 세로축은 적외선 복사량을 나타낸다. 즉, 온도가 올라가면 적외선이 나오는 파장의 최대 값은 가시광 쪽으로 이동하고 보다 많은 양의 적외선이 나오며, 온도가 낮을수록 파장의 최대 값은 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 최대 값을 가진다.

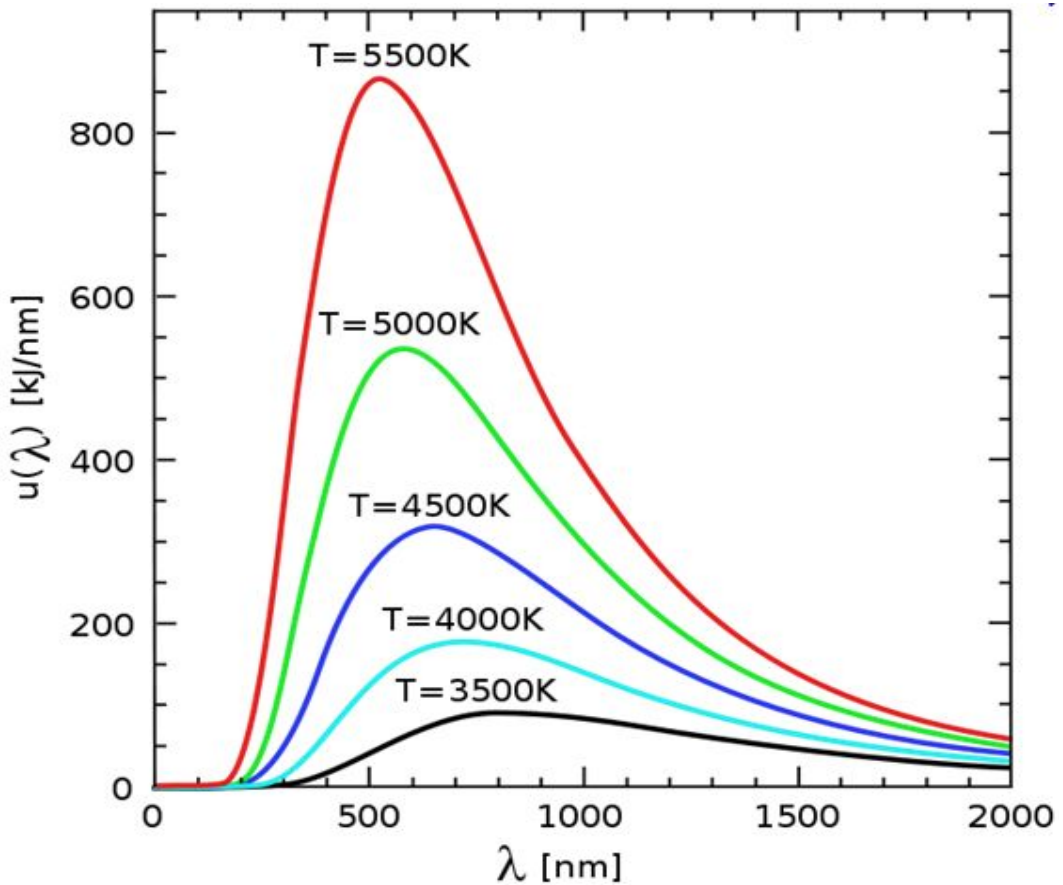


Fig. 2-2 Relation between Blackbody and temperature

나. 적외선의 구분

모든 물체는 온도의 작용으로써 적외선을 복사(방사)한다. 적외선 열화상 측정 기법은 대상체에서 방출되는 적외선 열에너지를 “검출”하고 “측정”하기 위해 사용된다. 열, 혹은 적외선 에너지는 파장이 너무 길어 육안으로 탐지할 수 없으므로 비가시광선이며 가시광선과 달리, 적외선 환경에서는 절대영도(섭씨온도(celsius scale)) -273.15°C 이상, 화씨온도(fahrenheit scale) -459.67°F 를 초과한 온도의 모든 사물이 열을 방출한다. 다시 말해, 모든 물체가 적외선을 복사한다는 의미이다. 이러한 적외선 에너지는 원자와 분자의 진동과 회전으로 발생한다. 물체의 온도가 높을수록 더 많은 움직임이 발생하고 결국 더 많은 적외선 에너지를 복사한다. 이 에너지가 적외선 열화상 카메라에 감지되는 것이다. 적외선 열화상 카메라는 온도를 보는 것이 아니라 열의 복사, 즉 열에너지를 감지하는 것이다. 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(VisibleWave)보다 파장이 길고 마이크로 광선(MicroWave)보다 짧은 보통 $0.8 \sim 1000\mu\text{m}$ 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 말한

다. 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 Wave중 중간 범위의 영역으로 파장 대역은 $2 \mu\text{m} \sim 6 \mu\text{m}$ 의 전자기와 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 Microwave와 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 Microwave의 발생 장치나 Microwave 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. 적외선이 응용되고 있는 분야를 Fig. 2-3에 나타내었다.

2. 적외선(Infrared Radiation) 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

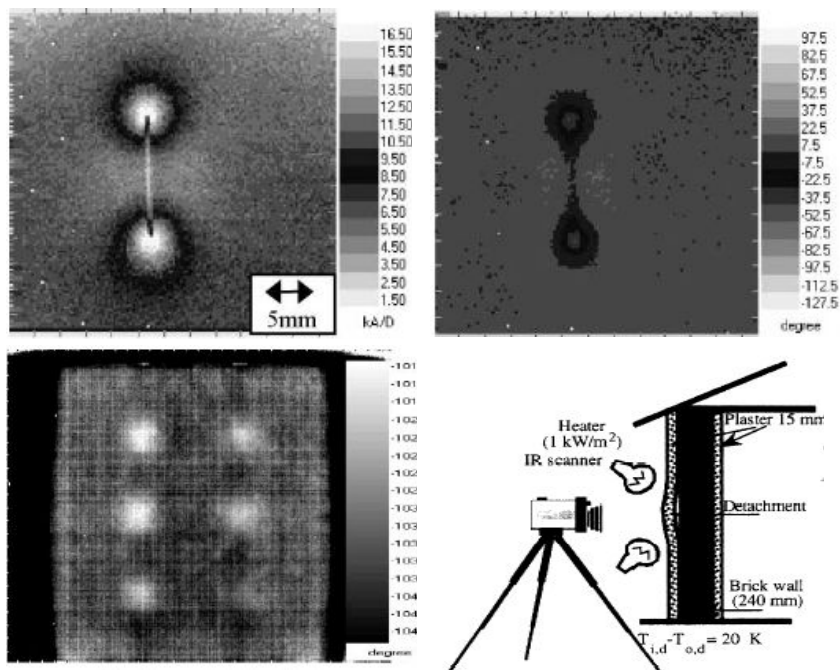


Fig. 2-3 Composite material defect detection cases

결함을 검출하기 위한 수단으로 적외선 열화상 기법이 적용되고 있다. 또한, 적외선 열화상 기법의 시스템을 송배전 기설에 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.

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

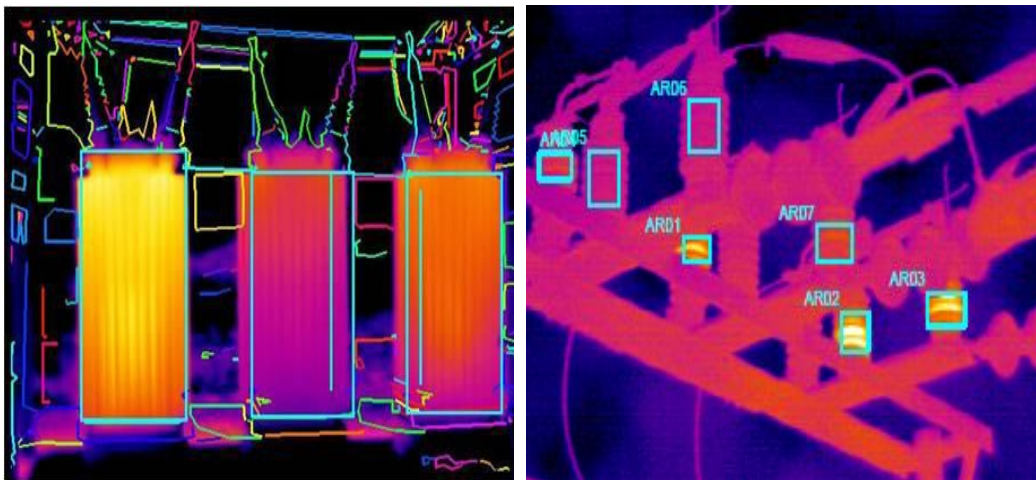


Fig. 2-4 electric transformer electric energy infrared system test

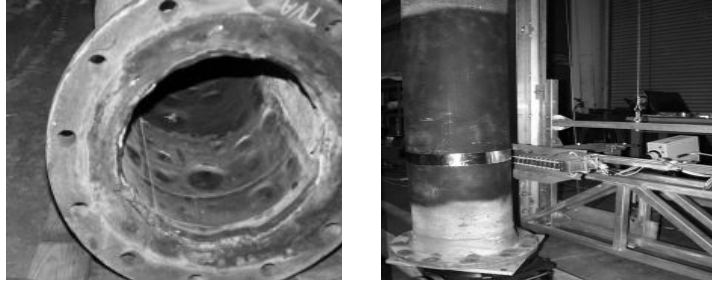


Fig. 2-5 Piping defect image

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. 적외선의 특징

가. 적외선 가열(Infrared Heating)

적외선은 전자파의 형태로 에너지를 전달시킬 때 중간에 전달을 위한 물체를 필요로 하지 않기 때문에 에너지를 전달하는 과정에서는 열 손실이 없다. 이와 같이 열의 이동이 직접적이고 손실이 없기 때문에 피사체를 가열시키는데 여러 가지 이점이 있으며 적외선으로 통상 물체의 가열은 그 물체의 표면에만 적용하는 난점이 있다. 즉 적외선 가열은 넓은 표면적의 얇은 물체를 가열하는 것이 적당하다. 여기서는 원전이 정기 점검을 위해 정지되어 있는 상태를 가정하여, 상온 상태의 배관을 외부에서 열적으로 자극하여 검사하는 경우를 고려하였다.

나. 열 방사(Thermal radiation)

물질을 구성하는 입자(원자, 분자, 이온)의 집단이 열에 의해 가열할 때 그 결과 전파를 방출하는 현상이다. 이 현상은 고온일수록 현저하며 상온 및 저온에서도 물체가 절대온도($^{\circ}\text{K}$)이상의 온도에서는 반드시 일어나며, 또한 태양 등 천체로부터

방사는 대부분이 열방사이다.

다. 완전 방사체(Full radiator)

물체에 입사하는 방사의 파장, 입사하는 방향, 편광 등에 관계없이 입사된 방사를 전부 흡수하는 물체를 말한다. 또한 어떤 온도의 전과장 영역에 있어서 최대 열방사를 하는 방사체를 흑체(Blackbody) 및 플랑크(Plank)방사체라고 한다. 하지만 현실적으로 완전흑체는 존재하지 않으며 다만 이 상태에 근접하는 방사체를 보통 흑체라 하여 완전 방사체로 규정하고 있다.

4. 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 대항하고 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 ϵ 은 식 (2.1)으로 나타난다.

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

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 상

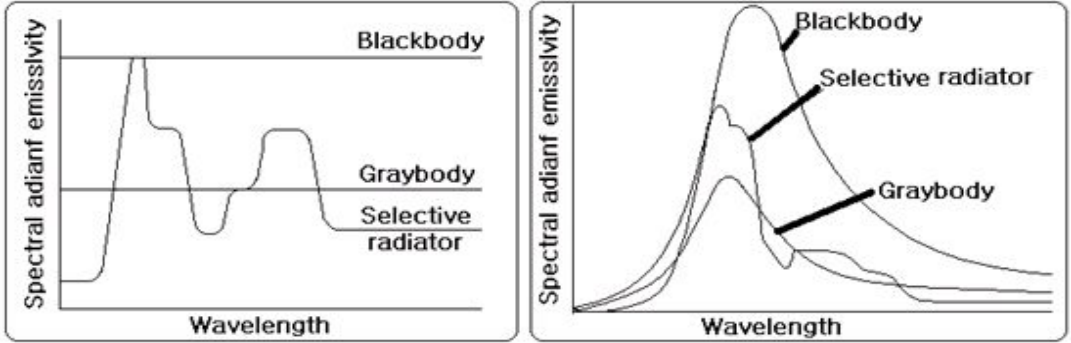
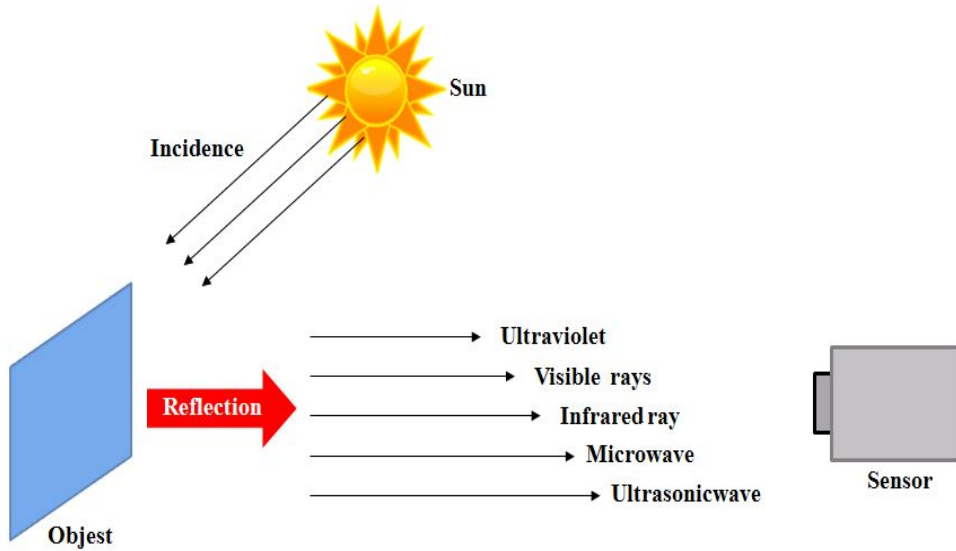


Fig. 2-6 Separation of emissivity

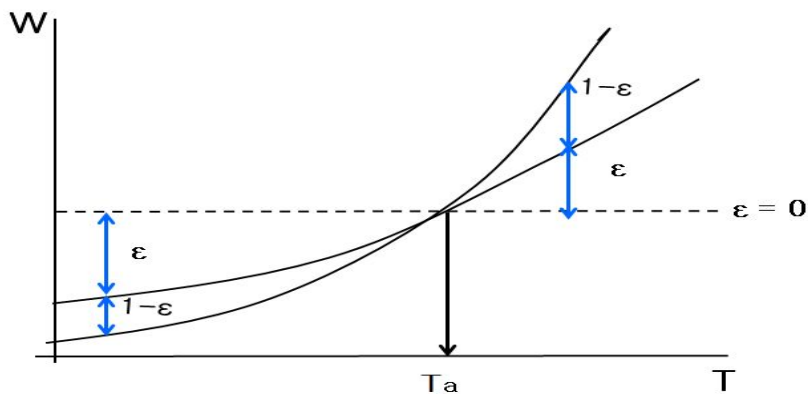
태에 따라 다르며 또한 파장과 온도에도 다르다. 이와 같이 서로 다른 방사량을 구분하는 것이 방사율(Emissivity)이다. $\epsilon=1$ 인 물체를 흑체(Blackbody)라고 하고 $\epsilon(\lambda)=\epsilon$ 의 물체를 회체(Graybody)라하며 $\epsilon(\lambda)$ 가 파장에 따라 상이하게 되는 물체를 선택 방사라 한다. Fig. 2-6은 각각의 특성에서 물체의 방사율을 나타내었다.

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 방사체라할 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 원리임. (즉,전도도가 낮은 물질/표면이 거친 물질에서 유리) 탄소, 고무, 검정 방사 페인트는 방사율이 높고 온도측정시 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.



(a)



(b)

Fig. 2-7 Principle of emissivity of applied object

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 않

고, 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.

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 표면 온도(T_s)이 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 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.

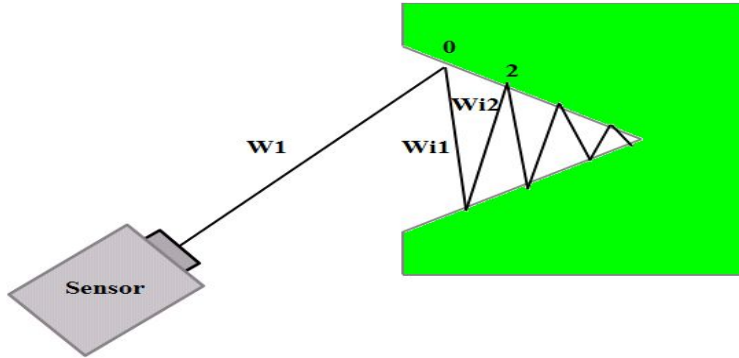


Fig. 2-8 Radiation energy of blackbody

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.

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

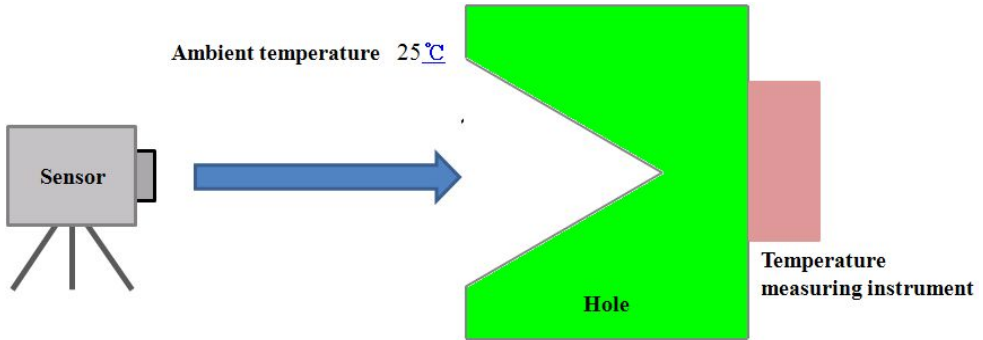
$$W_i = \epsilon W(T) (1 - \epsilon) \% \epsilon W(T) = (1 - \epsilon) W_i \quad (2.3)$$

$$\therefore W_i = W T$$

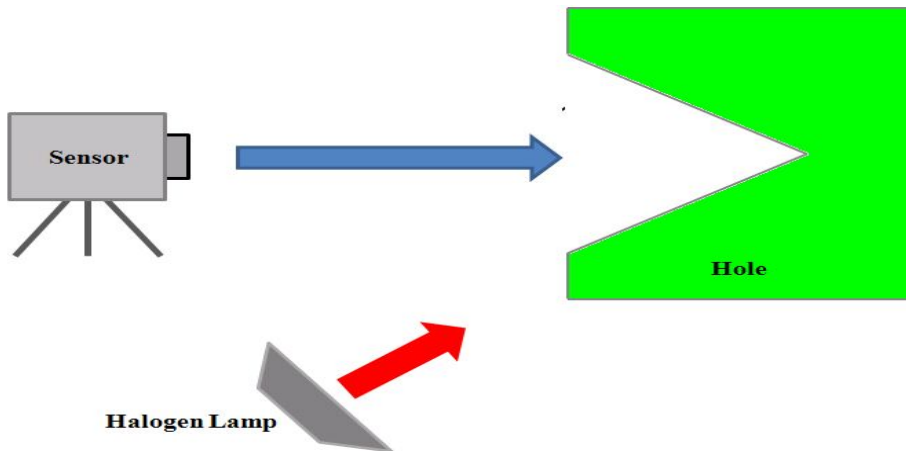
입사된 빛이 나간 방향이 없는 형태(원주, 구)등에 있어서 입구 부분에서 방사율이 1인 흑체가 있다. 따라서 흑체는 적외선 카메라에서 온도를 검출하는 표준이 된다.

마. 구멍의 흑체 효과

주위 온도 25℃ 상태에서 구멍이 폐인 흑체에 자체 가열을 사용하여 40℃로 가열하고 전원을 제거하면 구멍 부분의 온도는 다른 부분보다 높아진다. 이는 구멍 부분의 방사율이 다른 부분보다 높기 때문에 방사 에너지가 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 방사 에너지가 적다.



(a)



(b)

Fig. 2-9 Blackbody effect of hole

바. 투과율의 영향

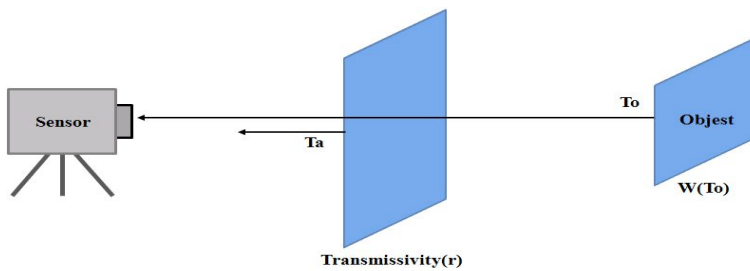


Fig. 2-10 Effect of penetration

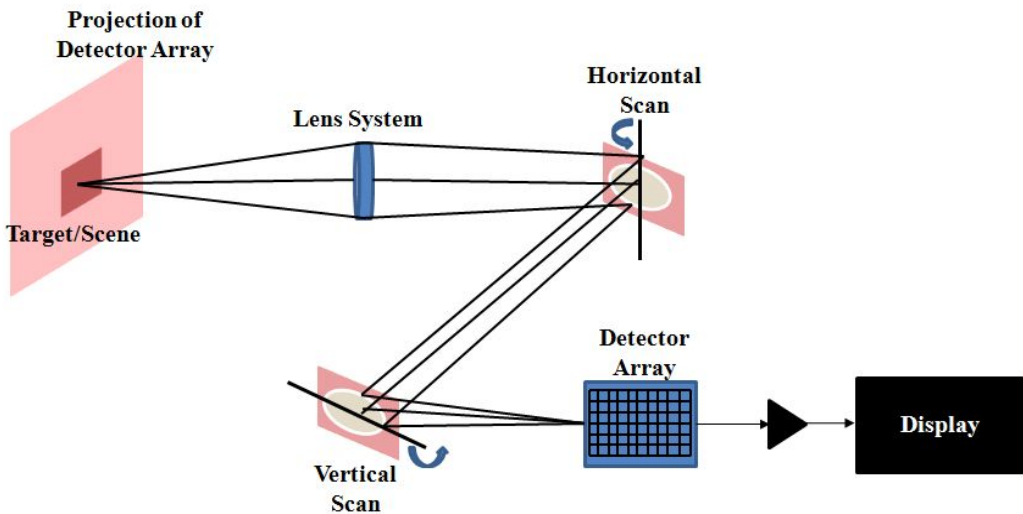
카메라에 입사된 에너지 W_i 는 $W_i = W_r(TO) + (1-r)W(Ta)$ 이상에 의해 적외선 카메라에 입사된 에너지 W_i 는 다음에 의해 계산되어지며 Fig 2-10은 방사율과 투과율과의 관계를 나타낸 것이다.

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

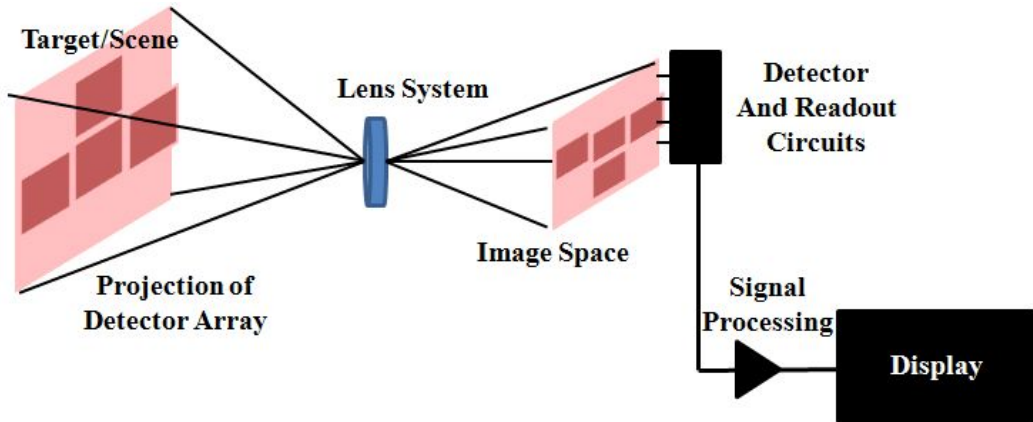
$Ta = Ta_1 = Ta_2$ 의 경우, $W_i = r\varepsilon W(TO) + (1-r\varepsilon)W(Ta)$ 이 된다.

즉, 방사율 (ε)과 투과율(τ)을 같이 보정하여 온도측정이 가능하다. 흑체는 완전한 흡수체로 $\varepsilon = 1$ 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 영상 시스템의 원리



(a) scanning type-Serial scanning



(b) Staring type

Fig. 2-11 Detection principle of IRT

어떤 물체의 형태를 인식하고자 하려면 사람의 눈을 생각하면 쉽게 이해가 된다. 눈으로 넓은 영역을 보려면 얼굴을 돌리거나 눈알을 굴리면서 전체를 인식한다. 여기에서 눈은 적외선 센서에 해당하며, 눈알을 굴리는 것은 적외선 광학계에 해당한다. 그리고 얼굴은 적외선 영상 시스템 전체를 의미한다. 이와 같은 원리를 응용하여 두 가지 방법의 광학계를 이용하여 영상을 획득한다. 먼저 Fig. 2-11(a)과 같은 수평, 수직 거울을 돌리면서 전체를 인식하는 주사 방법(scanning type-Serial scanning)과 Fig. 2-11(b)과 같이 수평, 수직 거울 없이 인식하는 주시 방법(staring type)이 있다. 주사 방법(scanning type-Serial scanning)은 모니터에 나오는 물체를 실시간으로 보고자 하면 수평, 수직 거울을 고속으로 움직이도록 해야 한다. 왜냐하면 모니터의 주사선을 250선으로 보고, 영상을 무리 없이 보고자 하면 초당 24 frame은 되어야 하므로, 기본적으로 세로축으로는 24×250 에 의해 초당 6000번을 움직여야 한다. 그리고 가로축도 같은 비율로 움직여야 하므로 세로축은 6000×250 에 의해 약 1 MHz 이상의 주기로 움직여야 한다는 결론에 도달한다. 거울이 이렇게 빨리 움직이려면 구동 부분이 특수 설계로 이루어져야 한다. 보통의 평면거울로는 이 속도를 도저히 낼 수 없기 때문에 8각형 또는 그 이상의 각을 이룬 거울을 사용한다. 이 방법의 장점은 주사하면서 신호를 증폭하여 신호 대 잡음비를 높일

수 있는 것과 센서의 소자 개수가 작아도 된다는 것이다. 그러나 광학계의 복잡성 때문에 시스템 자체의 크기와 무게 때문에 이 방법보다는 주시 방법으로 기술이 옮겨가고 있다.

주시(staring)방법은 주사 방법과는 달리 거울이 없는 대신에 센서의 소자 하나하나가 모니터의 한 Pixel에 해당하도록 설계되어 있다. 그러므로 센서의 소자 개수가 많으면 많을수록 화면에 나타나는 화질은 그만큼 향상되며, 복잡한 광학계가 없기 때문에 크기 및 무게에서 많은 이점을 갖고 있다. 주시 방법에 사용되는 적외선 센서는 256×256 이상의 이차원 배열을 갖는 소자가 필요하며, 현재 센서의 재료에 따라 다르지만, PtSi를 사용한 경우 1024×1024 배열을 갖는 센서가 개발되어 실용화되었으며, 가장 성능이 우수한 HgCdTe 반도체형 센서인 경우 512×512 배열까지 개발되어 있다. 주사 및 주시 방법으로 광학계에서 센서에 적외선을 집속시켜 주면 센서는 적외선과 반응하여 전압 또는 전류를 발생시킨다. 그런데 센서의 소자 개수가 많아지게 되면 소자 각각의 특성들이 일정하지 않기 때문에 신호처리에

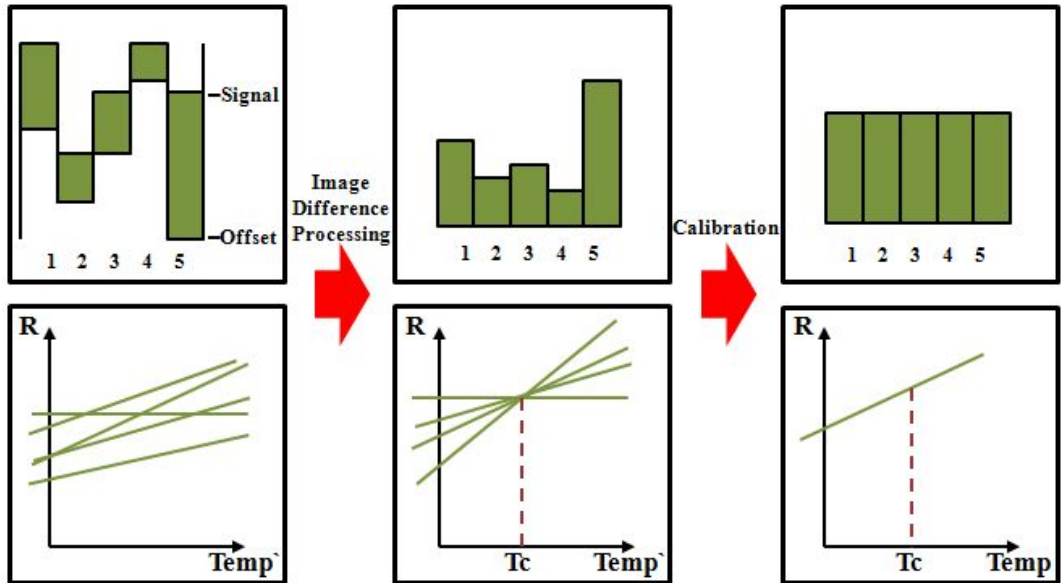


Fig. 2-12 Temperature calibration

서는 각 소자의 신호 크기를 보상해 주거나 반응을 하지 않는 소자의 신호도 보상해 주어 모니터에 깨끗한 영상이 구현되도록 해야 한다. 이러한 역할의 내용을 Fig. 2-12에 나타내었다. 첫 번째 그림은 각 소자의 특성들이 서로 다른 특성을 갖고 있음을 나타내고 있다, 주위 온도에 변화에 대해 반응하는 정도와 기준점인 offset이 모두 다르다. 이것을 두 번째 그림에서 기준점인 offset을 모두 맞추고, 세 번째 그림에서처럼 소자의 특성을 모두 균일하게 맞추어 주면, 온도변화에 대한 반응 정도가 모두 동일하게 나타나게 되어 깨끗한 상을 얻을 수 있는 것이다. 적외선 열화상 기법에서의 결함은 적외선 이미지에서 결함이 차지하고 있는 화소수(Pixel)로 크기를 대략적으로 추정할 수 있다. 일반적으로 결함의 크기측정을 위해서는 먼저 지시자를 이용하여 적외선 열화상 카메라의 화각에 따라 단위 화소에 대응하는 실제 길이를 산정하는 방법을 사용한다. 즉, 결함의 크기(mm) D는 식 (2.5)과 같이 표현된다.

$$D = M \times \left(\frac{L}{P}\right) \quad (2.5)$$

여기에서, L은 지시자(Calibrator)의 길이(mm), P는 지시자의 길이에 대응하는 화소수(Pixel), M은 결함이 차지하는 화소수(Pixel)이다.

제 3 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 냉

각형과 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 2-13에 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 2-13에 있는 두 개의 점선은 이론적으로 접근이 가능한 가장 높은 탐지도를 나타낸다. 그러나 Fig 2-13에 있는 탐지도는 단일소자에 대한 값이므로 일차원 또는 이차원 배열의 센서인 경우는 각 소자에서 나오는 신호들을 적분해서 신호처리를 하기 때문에 이론적인 값보다 높게 나온다.

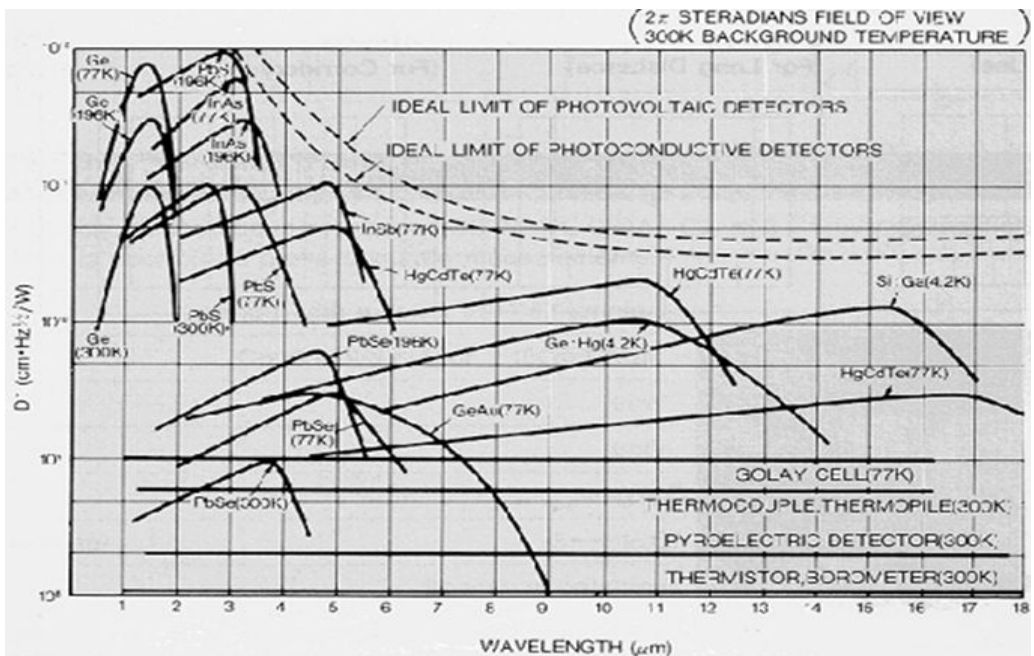


Fig. 2-13 Wave range of infrared detector to each detector material

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 기여하는 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.

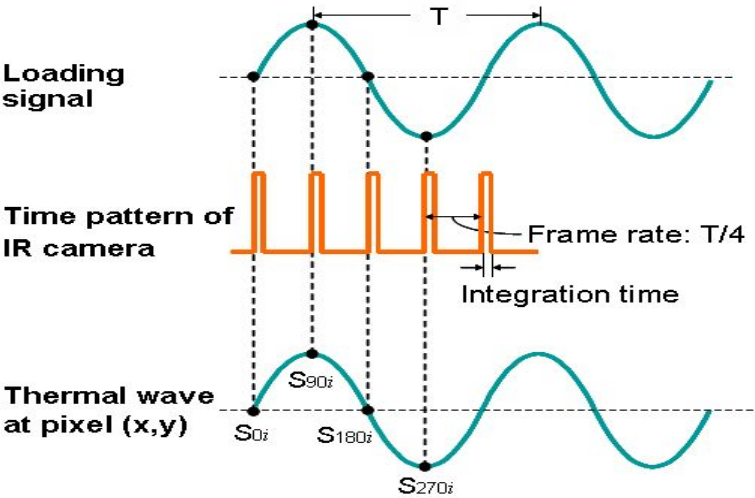
양자형과 열형은 각각의 장점이 있기 때문에 응용 분야에 따라서 사용하는 재료가

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 열화상 센서를 채택할 수 있을 것이다.

제 4 절 위상 잠금 기법(Lock-in IRT)

위상 잠금 적외선 열화상 기법(Lock-in IRT)은 기계구조물에 있어서 열에 대한 변화로 인한 온도변화가 미세하여 미세한 온도변화를 측정하기 위한 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. 2-14와 같다.



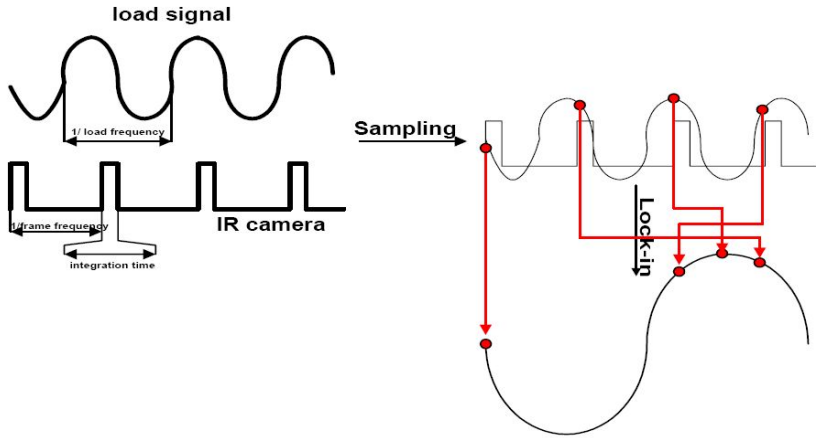


Fig. 2-14 Signal processing of lock-in infrared thermography

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 (2.6)와 같은 고체 내의 1차원 열전도 방정식에서 자극원을 Halogen Lamp로 대상체에 조화함수($T = T_0 \cos \omega t$)로 가진 및 가열을 하고 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함 검출을 하게 된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa_m}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} \quad (2.6)$$

여기에서 T 는 온도, t 는 시간, κ_m 는 열전도 계수, ρ 는 밀도, c_p 는 비열이다. 조화함수는 가열된 식 (2.8)의 해는 식 (2.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
T(x,t) &= T_0 e^{-x/\mu} e^{i(\omega t - x/\mu)} \\
&= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) + i \sin(\omega t - x/\mu)
\end{aligned} \tag{2.7}$$

여기에서 침투깊이 $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$, 열확산계수 $\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p}$ 이다. 식 (2.7)의 실수부만을 고려하면 식 (2.8)과 같이 쓸 수 있다.

$$T(x,t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \tag{2.8}$$

식 (2.8)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 (2.9)에서는 검사 결과로서 위상을 추출함으로서 결합 검출능을 향상시킬 수 있다. 시간평균으로 구성된 열적 분해능을 개선하고 Least mean square 방법과 단일 조건 푸리에 급수와 유사한 방법으로 Load frequency와 동기화가 되어지지 않게 Frame rate를 선택하여 신호 대 잡음비를 개선한다.

$$signals(x,y) = c \sum_{i=0}^N F_i \cdot T(x,y) \tag{2.9}$$

식 (2.10)에서 $C =$ 계수, $F_i =$ 가중치(위상, 진폭, RMS 값, Peak to Peak 값)을 나타낸다. 이 기법은 Fig. 2-11 과 같다[23].

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

$$S_4 = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2) \quad (2.10)$$

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

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

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)과 식 (2.12)을 사용하여 특정화소(x, y)에서 온도변조에 대한 위상(ϕ)과 진폭(A)을 구할 수 있게 된다.

제 5 절 렌즈설계

1. Halogen Lamp Lens 설계

공기 중에서 Lens의 초점거리는 Lens의 굴절률, Lens의 굴절률과 밀접한 관계가 있으며 이를 이용하여 Lens를 설계 및 제작할 수 있다. Halogen Lamp Lens 설계의 식 (2.13)은 다음과 같다.

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.13)$$

f = 초점거리
 n = 굴절률
 R_1, R_2 = Lens의 곡률

2. Spot size

육안으로 명확히 구분할 수 있는 Spot size의 크기는 일반적으로 Airy Circle로 정의한다. F는 초점거리, λ 는 빛의 파장, D는 Lens의 직경을 의미한다. 식 (2.14)은 다음과 같이 이루어진다.

$$d = (2.44F\lambda/D)$$

$$\begin{aligned}
 F &= \text{초점거리} \\
 \lambda &= \text{빛의 파장} \\
 D &= \text{Lens의 직경}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

3. 적외선 투과창(IR Window) 재료

비접촉식 포토다이오드, LED, 열화상 카메라 등에 적외선이 입사하는 부분에 내부 전기회로 보호 및 적외선을 잘 투과시켜주기 위해 적외선 투과창(IR Window)을 장착해서 사용한다. 적외선 센서들이 좋은 특성을 내기 위해서는 측정 대상물로부터 방사하는 적외선을 최대한 많이 투과시킬 수 있어야 한다. 군수용으로 열화상 카메라를 사용할 경우, 수분이나 모래에 의한 부식이 강해야 하며, 열적 충격에도 강인해야 한다. 또한, 전자기파를 어느 정도 차폐해야 하는 다기능을 가져야 한다. 군수용이 아닌 일반 상업용으로 사용하는 경우에도 어느 정도 기계적인 강도를 유지해야 하며, 습기 등에 의해 시간에 따라 적외선 투과 특성이 변하지 않도록 적외선 투과창 표면의 관리를 잘해야 한다.

광학적으로 광의 반사 및 투과에 대한 물리적인 개념은 Fig. 2-15와 같다. 두께가 d , 굴절률이 n 인 투과창 표면으로 I_0 광의 세기로 수직 입사하고, 표면에서의 반사를 R , 투과창 내부에서의 흡수계수를 α , 투과창 내부에서 빛의 간섭현상을 무시한다면, Fig. 2-15에서 투과창을 투과하여 나온 광을 모두 합하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 I &= (1-R)^2 I_0 e^{(-\alpha d)} + R^2 (1-R)^2 I_0 e^{(-3\alpha d)} + R^4 (1-R)^2 I_0 e^{(-5\alpha d)} + \dots \\
 &= I_0 \frac{(1-R)^2 e^{(-\alpha d)}}{1-R^2 e^{(-2\alpha d)}}
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

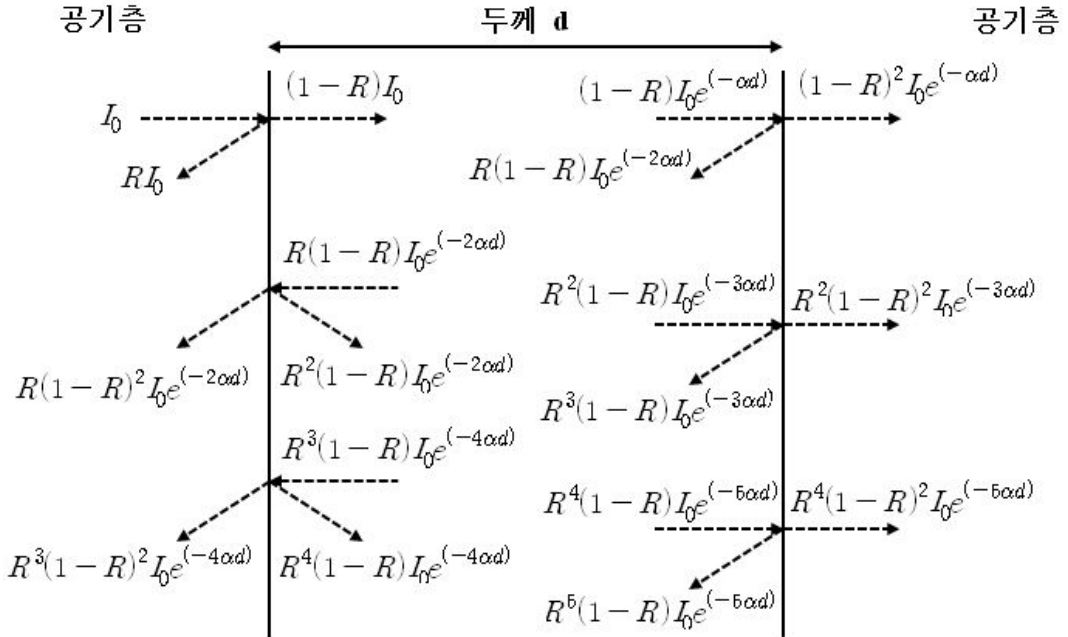


Fig. 2-15 multiple internal reflection of optical energy flow calculated

따라서 투과도 T는 식 (2.16)과 같다.

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}}, R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (2.16)$$

위 식에서 투과도 T를 높게 하려면 반사율 R이 작거나, 흡수계수 α 와 투과창의 두께 d 가 작아야 한다. 반사율을 작게 하려면 굴절률 n 이 공기의 굴절률인 1에 근접한 재료를 선택하는 것이 좋으며, 일반적으로 흡수계수 및 굴절률은 자광의 함수로 주어진다. 굴절률이 큰 재료인 경우는 반사방지(Anti Reflection, AR)코팅을 하여 반사율을 작게 해야한다. 파장에 따른 대표적인 적외선 투과창 재료의 특성은 Table 2-2와 같다.

Table 2-2 Typical transmissive IR window material

재료명	화학 기호	파장대역(μm)	굴절률	
			$\lambda = 4\mu m$	$\lambda = 10\mu m$
Calcium Fluoride	CaF_2	0.13 ~ 12	1.4096	1.3002
Sapphire	Al_2O_3	0.15 ~ 5.5	1.6752	-
Silicon	Si	1.2 ~ 9.0	3.429	-
Germanium	Ge	2.0 ~ 17.0	4.0242	4.0003
Gallium Arsenide	$GaAs$	0.9 ~ 16.0	3.3246	3.2952
Thallium Bromiodide	$KRS 5$	0.6 ~ 40.0	2.3834	2.3720
Zinc Sulfide	ZnS	0.37 ~ 14.0	2.2518	2.2001
Fused Silica	SiO_2	0.17 ~ 3.3	1.3888	-
Zinc Selenide	$ZnSe$	0.5 ~ 22.0	2.4331	2.4065
Barium Fluoride	BaF_2	0.15 ~ 12.5	1.4558	1.4014
IR Polymer	-	0.15 ~ 22.0	1.4 ~ 1.6	

제 3 장 원전 배관

제 1 절 실험장치

적외선 열화상 시스템은 열화상 이미지를 측정 및 수집하는 적외선 열화상 카메라 센서는 Fig. 3-1과 같으며, Cedip사와 FLIR사와 인수 합병된 상용화제품인 Silver 480M 모델을 실험에 사용하였으며, 배관 표면에 광원을 주는 Halogen Lamp, Halogen Lamp를 열을 조절할 수 있는 전원제어장치(Power Supply), Halogen Lamp와 적외선 열화상 카메라 센서를 동기화할 수 있는 함수발생기(Function generator) 및 적외선 열화상 카메라 센서를 제어하는 컴퓨터(Control PC)로 Fig. 3-2와 같이 구성하였다.



Fig. 3-1 Infrared camera

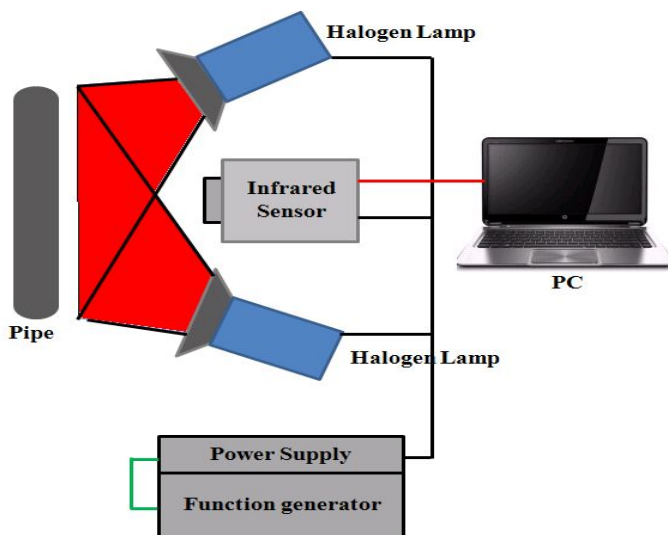


Fig. 3-2 Infrared Thermography system(IRT)

또한, 이와 같은 장치 구성이 적외선 열화상 기법 및 위상 잠금 기법을 적용하기 위한 장치 구성이다. Table 3-1은 적외선 열화상 카메라 센서, Table 3-2는 Halogen Lamp에 대한 재원으로 나타내었다.

Table 3-1 Specification of infrared camera

Infrared camera(FLIR., Sliver 480M)	
Detector Materials	InSb(안티몬화 인듐)
Cooling method	내장 스테링 쿨러(Stirling)
Spectral Response	3.7~5.0um
Number of Pixels	320*256
Pitch	30um*30um
NETD	25mK@25℃ (20mK typical)
Temperature measure range	-15~2000℃
Frame rate	5Hz~380(400)Hz
Frame rate resolution	1Hz Step
Integration time	10 μs to 5000 μs programmable, 1 μs step

Table 3-2 Specification of Halogen Lamp

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

제 2 절 실험방법

일반적으로는 적외선 열화상 기법 및 위상 잠금 적외선 열화상 기법을 적용한 결함 검출에는 2가지 방법을 고려하여 볼 수 있다. 첫 번째는 결함을 포함한 대상체가 자체 발열하는 경우이며, 결함부에서 온도 차이에 의한 복사에너지 차이를 직

접 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. 하지만 여기서는 원자력 발전소와 같은 환경에서 실험을 할 수 없는 상황이므로 상온 상태의 배관을 외부에서 열적으로 자극하여 검사하는 경우를 고려하였다. 따라서, 본 실험에서는 Halogen Lamp를 이용하여 배관 외부에서 가열하는 방법을 적용하였다. 본 실험에서 이용되는 모든 배관은 자체 발열하지 않은 대상으로 외부에서 Halogen Lamp의 열적 자극을 가하는 방법인 적외선 열화상 기법 및 위상 잠금 기법을 적용하였으며, 최대 용량이 1 kW인 Halogen Lamp 2개를 이용하여 배관을 가열하였다. 또한, 결함 검출에 Lock-in Infrared Thermography(위상 잠금 적외선 열화상 기법)을 적용할 경우 결함에 의한 단일온도장을 검출할 수 있도록 Halogen Lamp 가열의 점멸(움직임) 등으로 피 측정물에서 면외방향의 변동하는 열류를 형성시킨다. 결함 가공면에서 Halogen Lamp의 깜빡임에 의한 주기변동 온도장을 Lock-in으로 계측하였다. 실험을 하기 위해서는 적외선 열화상 카메라 센서는 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 4290 Ultra Flat Black)를 도포하여 대상체의 방사율을 0.97로 유지시켰다.



Fig. 3-3 Infrared Thermography System

제 3 절 배관(4 inch, 소구경 2.5 inch)

1. 배관의 감육 결함 특징 및 배관 재료 선정

가. 특징의 필요성

최근 장기 가동된 노후화된 원전의 수가 증가됨에 따라 원전 2차 계통 설비의 문제로 인한 발전정지 사례가 증가하여 주요설비의 건전성 여부 확인을 위한 비파괴검사에 대한 관심이 고조되고 있으며, 현재 원전 2차 계통 설비의 비파괴검사에는 감육 배관의 두께 측정을 위한 초음파검사, 복수기 튜브 검사를 위한 와전류검사, 터빈 설비의 검사를 위한 초음파검사와 자기탐상검사, 침투탐상검사 등이 활용되고 있다. 하지만, 배관 감육 결함은 주로 유체의 유동에 의한 부식의 가속화 (Flow Accelerated Corrosion, FAC)로 인해 발생되며 Cr 함량이 낮은 탄소강 배관에서 발생됨. 따라서, 탄소강 배관 감육 결함의 체계적인 관리를 위해서는 주기적인 검사가 필요하며, 특히 원전의 가동을 멈추지 않은 상태에서도 정밀 검사가 된다. 현재 배관 두께 측정에는 초음파 시험이 가장 보편적으로 적용되고 있으나, 초음파 두께 측정은 검사 부위에 격자를 그리고 모든 격자점에서 두께를 측정하기 때문에 검사에 많은 시간이 소요된다. 소구경 배관의 경우에는 결함 검사인 방사선 투과 검사를 사용하고 있으나 결함에 대한 정량성이 떨어지며 검사 시 결함 검사자와 피폭 등의 문제로 인하여 현장에서 적용할 수 있는 한계가 있다.



Fig. 3-4 Pipe of damage example

나. 배관

감육 결함은 국부적으로 기기의 벽 두께가 기준치 이하로 얇아져 있는 것으로 Fig. 3-5에 나타낸 것과 같이 균열성 면상 결함과 달리 길이, 깊이, 그리고 폭을 갖는 3차원 형상의 결함이다. 감육 결함은 배관을 포함한 다양한 유체 기기들에서 발견되고 있으며, 운전 환경에 따라 결함의 발생 원인이 다양하다. 이들 원인 중 배관에서 발생하는 감육 결함은 대부분 유동가속부식 (FAC, flow accelerated corrosion)에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 즉, 유체유동에 의해 국부적으로 부식이 촉진되어 배관의 두께가 얇아지는 것이다. 따라서, 배관 감육 결함은 부식에 취약한 탄소강 배관에서 주로 발생된다. 크게 4 inch, 소구경 2.5 inch 로 구분하여 선정하였다.

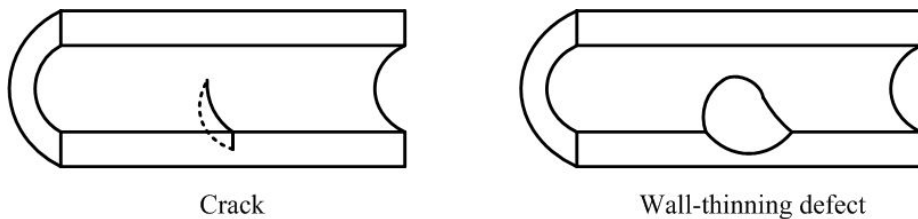


Fig. 3-5 Comparison of planar defect and wall thinning effect in pipe

배관 계통에서 감육 결함의 발생 위치는 일반적으로 곡관, 연결관 인접부, 오리피스나 밸브 후단 등 난류유동이 심한 부위에서 발생하는 것으로 알려져 있으나, 동일한 형태의 배관에서도 구체적인 결함 위치는 배관 내부의 유동 특성에 따라 다른 것으로 알려져 있다. 배관에서 감육 결함의 형상은 설계코드에서 요구하는 배관의 최소 설계요구두께 이하인 영역의 길이, 폭, 깊이로 정의되는데, 감육 결함의 형상 역시 배관 내부의 유동 특성에 따라 매우 다양한 양상을 보인다. 결함의 길이와 폭이 배관 직경의 수배에 이르는 경우도 있고, 노치와 같이 매우 짧고 좁은 형상을 갖기도 한다. 따라서, 특정한 형상으로는 배관에서 발생하는 감육 결함의 형상을

대표할 수 없으며, 배관 결함을 제작할 때 다양한 형상을 고려하여야 할 것이다. 배관 계통에 많이 적용되는 재질은 탄소강 계열이며, 본 논문에서는 ASTM A106 Gr.B를 선정하여 배관으로 제작하였다. Table 3-3은 ASTM A106 Gr.B 탄소강에 대한 재료 사양을 정리한 것이다.

Table 3-3 Material property of ASTM A106 Gr.B

화학 조성	C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Mo	Ni	V
합량(%)	0.30	0.29	0.035	0.035	0.10	0.40	0.40	0.15	0.40	0.08
	이하	~1.06	이하	이하	이하	이하	이하	이하	이하	이하
Tensile strength (MPa)		415 이상								
Yield strength (MPa)		240 이상								

가. 4 inch 배관

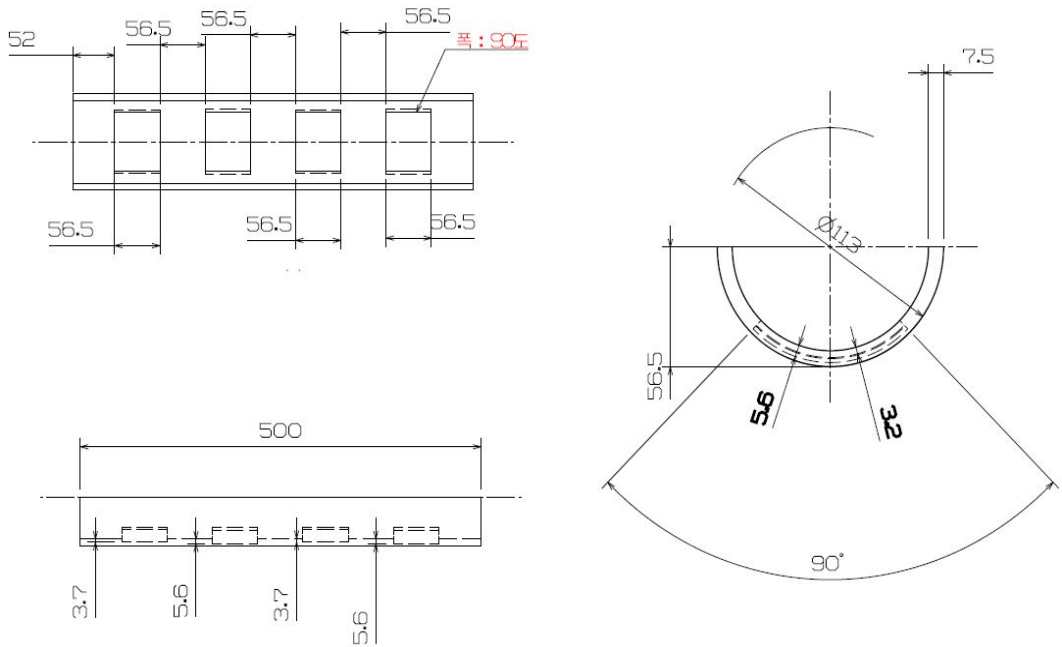
4 inch 배관은 ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관으로 설계 및 제작되었다. 일반적으로 상용화 배관은 공칭 직경과 두께가 일정할지라도 실제 직경과 두께는 일정하지 않고 위치에 따라 약간씩 차이를 보인다. 또한, 배관의 형상과 결함의 형상을 정확하게 가공하기 위해서 4 inch 배관의 내부 및 외부를 먼저 기계 가공하여 일정한 두께와 직경을 확보한 후 내면에 결함을 가공하였다. 내부 및 외부 가공이 완료된 후 배관의 외경(D_o)과 두께(t)는 각각 113.0mm와 7.5mm이고 길이는 500mm, 1200mm가 되었다. 직관 내면에 결함을 가공하기 위해서 직관을 길이 방향으로 절단한 후 배관의 양쪽 내면에 결함을 가공하고 다시 축 방향으로 용접하여 배관 내부에 다양한 결함을 가공한 총 4개의 4 inch 배관을 제작하였다. 또한, 배관의 양쪽 끝단에 플랜지를 연결하여 실험 시 배관의 거치가 용이하도록 제작하였다. Table 3-4, Table 3-5는 각각의 배관에 포함된 결함의 형상을 정리한 것이다. Fig. 3-6 ~ Fig. 3-9는 각 배관의 상세 도면을 나타낸 것으로 직관 내면에 양쪽으로 결함이 배열되어 있으며, 결함의 형상은 결함 길이(L)와 감육 깊이(d), 그리고 원주방향변화(2θ)이 일정한

Table 3-4 Geometry of 4 inch pipe (500mm)

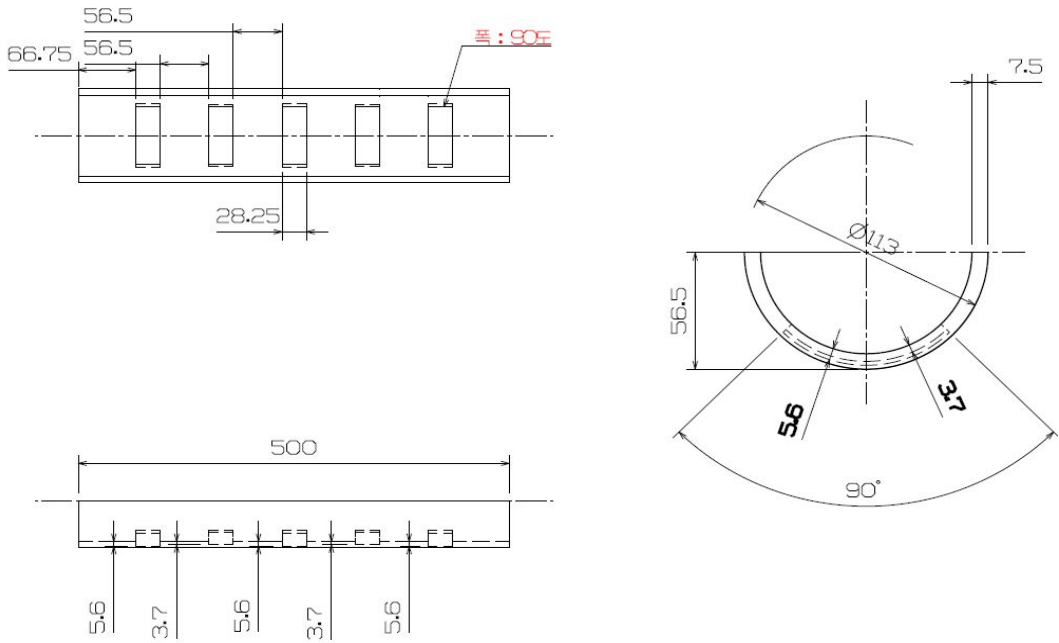
Pipe. ID	결합 길이, L/D_o	감육 깊이, d/t	원주 방향 크기, θ/π	비 고
SP1-1	0.25	0.5, 0.75	0.25	측정 범위 결합 검출 능력 (각도)
	0.5	0.5, 0.75	0.25	
SP2-1	0.5	0.5	0.0625, 0.125, 0.25	결합 검출 능력 (각도)
	0.5	0.75	0.0625, 0.125, 0.25	

Table 3-5 Geometry of 4 inch pipe (1200mm)

Pipe. ID	결합 길이, L/D_o	감육 깊이, d/t	원주 방향 크기, θ/π	비 고
SP2-5	0.5	0.5, 0.75	0.25	경사 결합
	0.25	0.5, 0.75	0.25	
SP2-6	0.5	0.5	0.0625, 0.125, 0.25	결합 검출 능력
	0.5	0.75	0.0625, 0.125, 0.25	

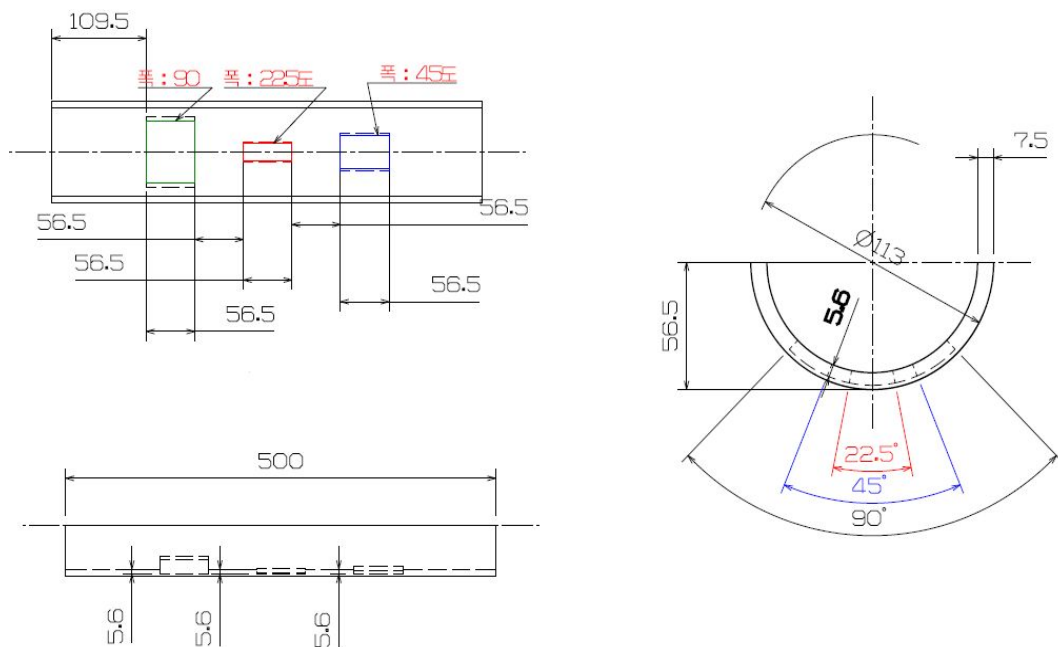


(a) Up

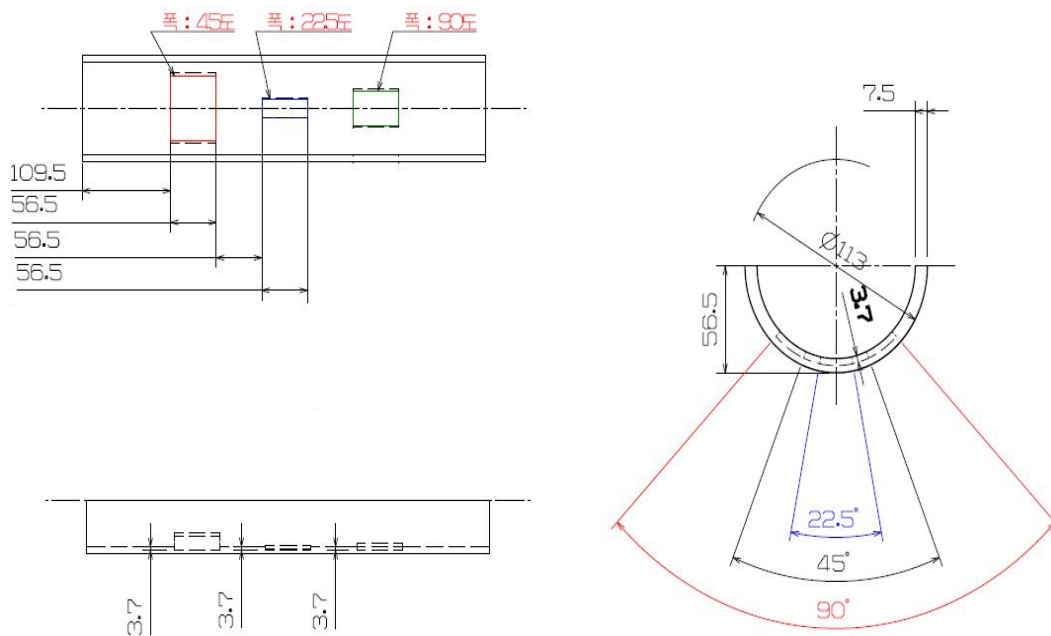


(b) Down

Fig. 3-6 SP1-1 pipe defect floor plan

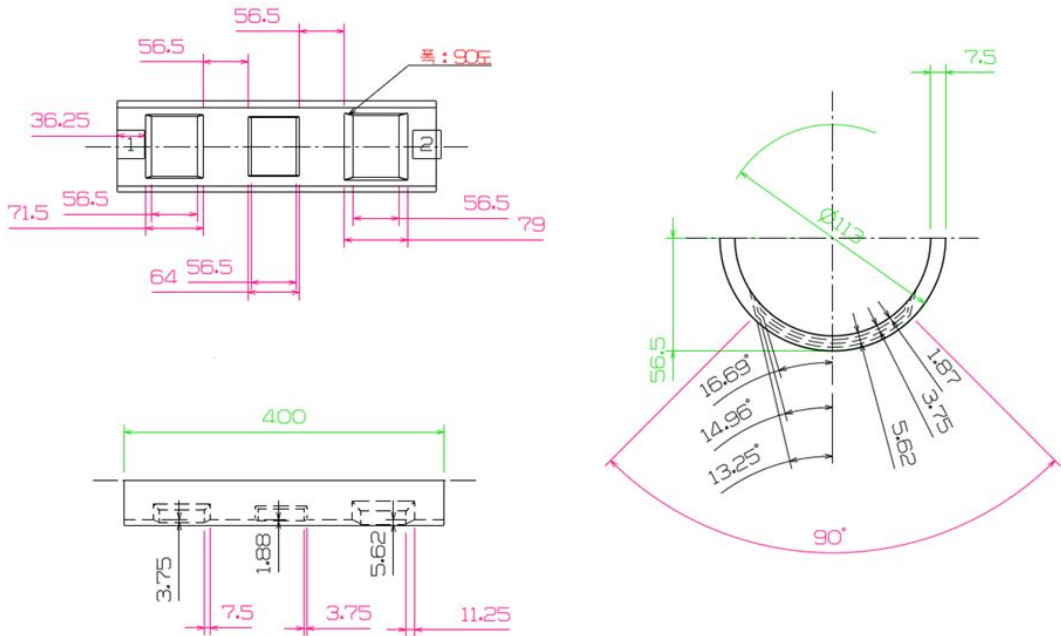


(a)

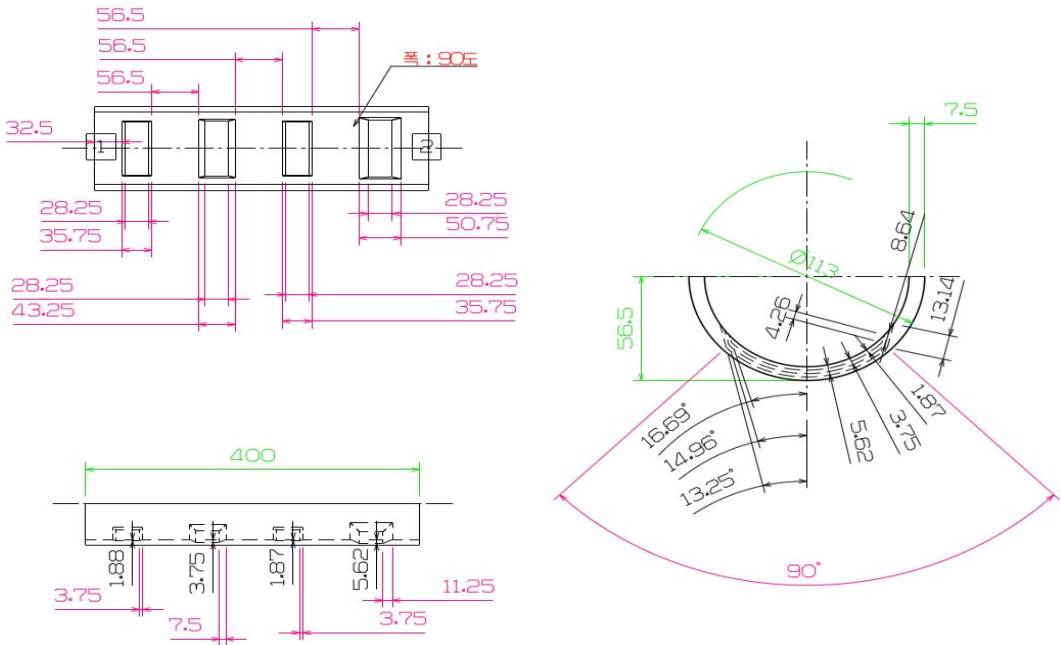


(b)

Fig. 3-7 SP2-1 pipe defect floor plan

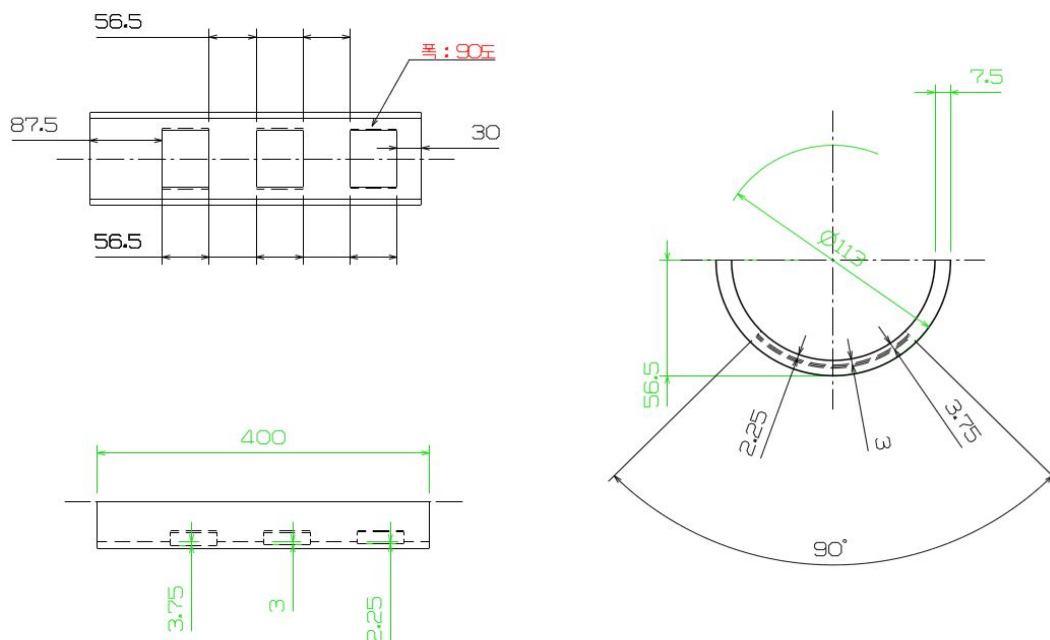


(a)

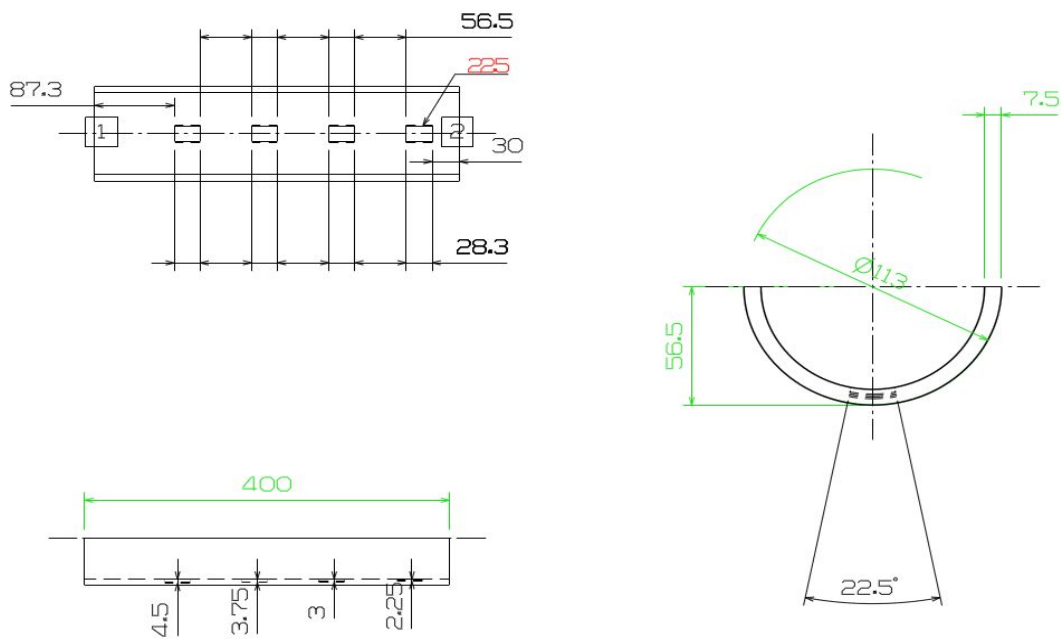


(b)

Fig. 3-8 SP2-5 pipe defect floor plan (A Section)



(a)



(b)

Fig. 3-9 SP2-6 pipe defect floor plan (A Section)

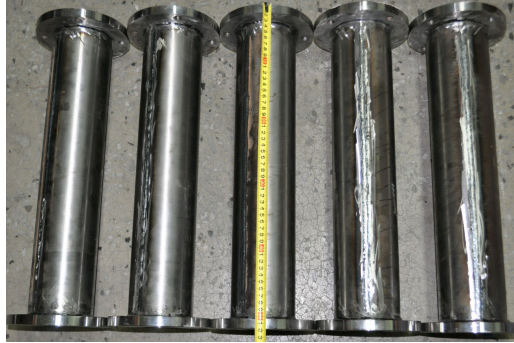


Fig. 3-10 4 inch pipe of ASTM A106 Gr.B material (500mm)

사각 형태이다. 실제 배관에서 발견되는 감육 결함은 결함부에서 두께 변화가 불규칙하고 부드럽게 변화하는 형상적 특징을 보이지만, 여기서는 이들 결함을 이상화한 사각 형태의 결함을 고려하였다. Fig. 3-6에 나타나 있는 것과 같이 SP1-1 배관의 양쪽 면에는 감육 깊이가 각각 50%와 75%인 결함이 교차로 4개와 5개씩 배열되도록 설계되었으며, 이것은 적외선 열화상 기법을 적용하여 배관 결함을 검출할 때 1회 측정으로 결함을 검출할 수 있는 영역을 확인하기 위한 것이다. 한편, Fig. 3-7 ~ Fig. 3-9에서 알 수 있는 것과 같이 배관 SP2-1, SP2-5, SP2-6에는 다양한 결함 길이, 깊이, 그리고 원주방향변화를 갖는 결함들이 배열되어 있으며, 이들 배관은 배관에서 적외선 열화상 검사 방법의 결함 검출 능력을 확인하기 위한 목적으로 설계 및 제작된 것이다. 또한, SP2-5 배관의 경우는 실제 원전 배관에서 일어나는 감육 결함을 바탕으로 제작하였으며 결함의 모양이 경사가 있도록 하여 실제 현장에서 사용유무를 확인하기 위하여 설계 및 가공하였다.

나. 소구경 2.5 inch 배관

소구경 2.5 inch 배관은 적외선 열화상 기법을 적용하여 배관의 결함을 검사할 때 결함 검출에 미치는 배관의 크기 영향(곡률, 결함크기 등)을 파악하기 위해 설계 및 제작되었다. 2.5 inch 배관 역시 ASTM A106 Gr.B 탄소강으로 제작되었으며, 배관의 내부 및 외부로 먼저 가공하여 일정한 두께와 직경을 확보한 후 내부에 결

함을 가공하였다. 내부 및 외부가 가공된 후 배관의 외경과 두께는 각각 $D_o = 72.5\text{mm}$ 와 $t = 6.5\text{mm}$ 이고, 길이는 350mm가 되었다. Fig. 3-11과 같이 내면에 결함을 가공하기 위해서 내부 및 외부가 가공된 직관을 길이 방향으로 절단하여 배관의 내면에 결함을 가공한 후 다시 축 방향으로 용접하였으며, 배관의 양쪽 끝단에 플랜지를 용접하여 실험 시 배관의 거치를 용이하도록 하였다. 하지만 소구경의 경우 350mm의 길이 때문에 2개의 배관을 용접하여 거치대의 용이하게 제작하였다. 그로인해 용접부위가 적외선 열화상 기법을 적용한 결함 검출에 미치는 배관 길이의 영향을 살펴보기 위한 것이다. 4 inch 배관과 같이 2.5 inch 배관에서도 다양한 형상의 결함들을 고려하여 제작하였다.

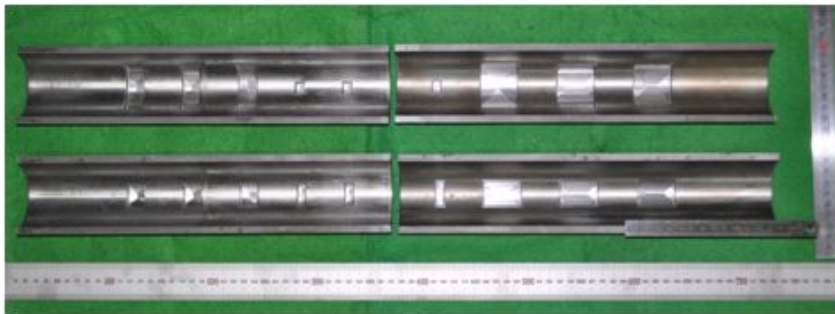
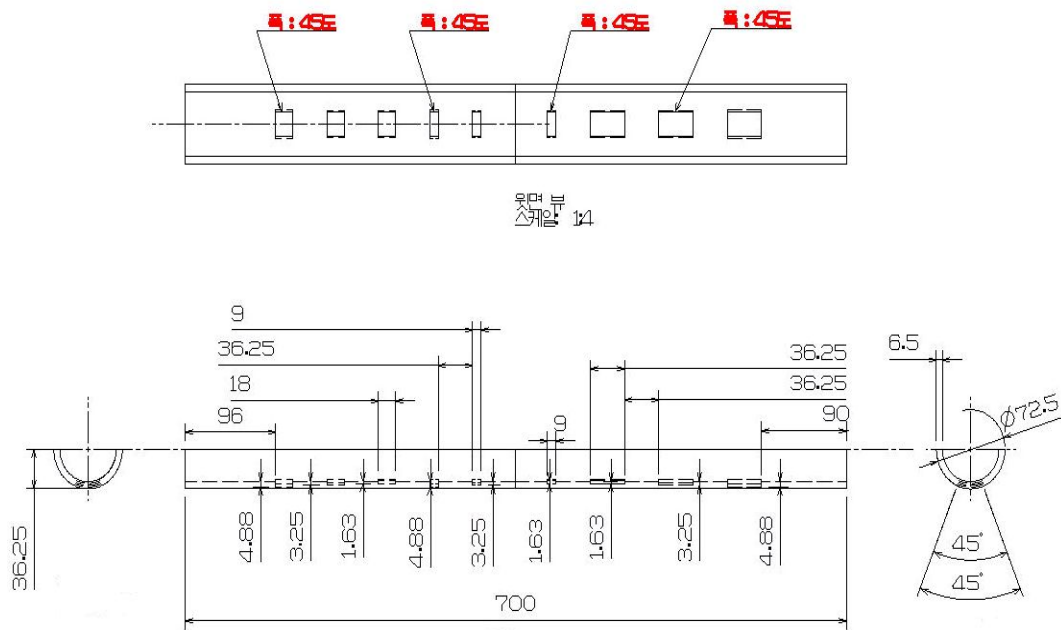
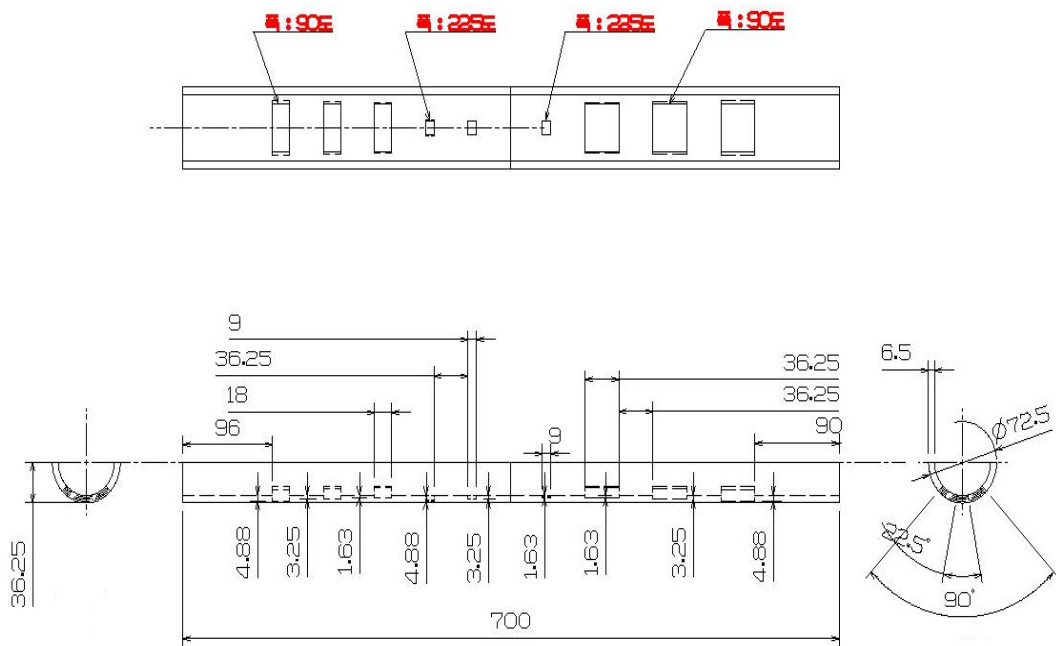


Fig. 3-11 2.5 inch pipe of ASTM A106 Gr.B material (700mm)



(a)



(b)

Fig. 3-12 SP3-1 Pipe defect floor plan

Table 3-6 Geometry of 2.5-inch specimen (700mm)

Pipe. ID	결합 길이, L/D_o	감육 깊이, d/t	원주 방향 크기, θ/π	비 고
SP3-1	0.5	0.5, 0.75	0.25	결합 검출 능력
	0.78	0.5, 0.75	0.25	
	0.25	0.5, 0.75	0.25	
	0.39	0.5, 0.75	0.25	
	0.125	0.25, 0.5, 0.75	0.0625	
	0.25	0.25, 0.5, 0.75	0.25	
	0.5	0.25, 0.5, 0.75	0.25	
	0.125	0.25, 0.5, 0.75	0.125	
	0.25	0.25, 0.5, 0.75	0.125	
	0.5	0.25, 0.5, 0.75	0.125	
SP3-4	0.5, 0.25, 0.75	0.5	0.25	경사 결합
	0.75, 0.75, 0.75, 0.75	0.5	0.25	
	0.25, 0.5, 0.25, 0.75	0.5	0.25	
	0.25, 0.5, 0.25, 0.75	0.5	0.25	

Fig. 3-12는 소구경 배관(SP3-1)의 도면을 나타낸 것이다. 결합은 배관의 양쪽 내면에 가공되었으며, 결합의 형상은 4 inch 배관과 같이 결합 길이, 감육 깊이, 그리고 원주방향변화 폭이 일정한 크기를 갖는 사각, 경사 형태로 설계 및 제작되었다. Fig. 3-12에서 알 수 있는 것과 같이 소구경 배관 SP3-1의 양쪽 내면에는 길이와 폭이 일정한 조건에서 깊이가 $d/t=0.5$ 와 0.75 인 결합이 교차하도록 배열되었으며, SP3-1 배관은 $L/D_o=0.125\sim 0.5$, $d/t=0.25\sim 0.75$, $\theta/\pi=0.0625\sim 0.25$, SP3-5는 경사결합으로 범위의 다양한 결합을 갖도록 설계 및 제작되었다. Table 3-4는 각 배관에서 결합의 형상을 정리한 것이다. 4 inch와 마찬가지로 SP3-1은 실험조건을 결정하기 위해서 실험을 수행하였으며, SP3-5는 실험조건을 통하여 실험을 수행하였다.

다. 소구경 2.5 inch 복합 배관

소구경 2.5 inch 직관 배관과 곡관 배관을 결합하여 용접 가공하였으며, 결합의 종류는 감육 깊이 50%와 75%인 결합이 교차하도록 배열되었다. 형상은 다음 Fig. 3-13과 같이 설계 및 가공하였다.

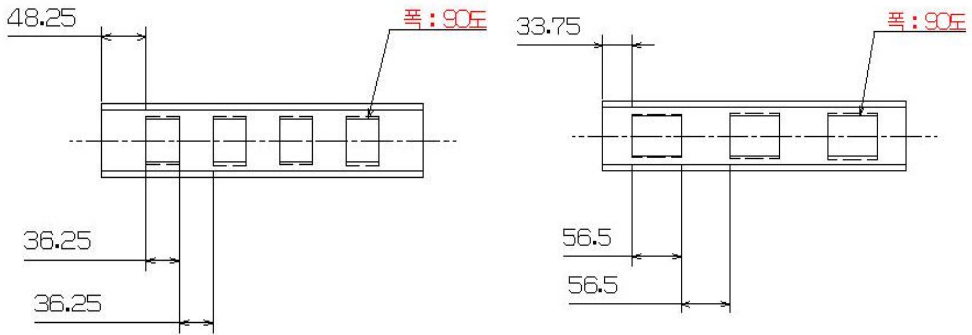


Fig. 3-13 2.5 inch complex pipe of ASTM A106 Gr.B material

라. 소구경 2.5 inch 엘보우(elbow) 배관

소구경 2.5 inch 직관 배관이 아닌 감육 결합이 가장 심하게 일어나는 2.5 inch 엘보우(elbow) 배관도 Fig. 3-14와 같이 가공하여 실험을 수행하였다.



Fig. 3-14 2.5 inch elbow pipe of ASTM A106 Gr.B material

제 4 장 측정결과

제 1 절 유한요소해석

적외선 열화상 기법과 수치적 기법을 이용한 유한요소해석을 통해 열적 알고리즘을 파악하고자 한다. 본 논문에서는 적외선 열화상 기법을 이용한 원전 배관 결함 검출에 필요한 원전 배관에 대한 3D화 모델링과 결함에 대한 모델링을 구축하고 열 해석 시뮬레이션 결과 분석을 통해 배관에서의 열 분포의 문제점을 미리 예측하고, 실제 환경에 적용 가능한 실험장치 구성을 위한 데이터를 확보하고자 한다. 적외선 열화상 기법은 기본적으로 가열조건을 기반으로 결함부와 비결함부의 열적 특성 차이에 의해 결함이 검출된다. 이에 대한 수치적인 기본 물리적 메카니즘은 Fig. 4-1과 같으며 수치해석을 위한 고전적인 모델링을 보여 주고 있다. 또한, 대상체의 전면과 후면에서 불일정한 가열을 가정하고 있다. 열전도의 측면에서 물리적 메카니즘의 2차원 지배방정식은 다음 식 (4.1)으로 표현할 수 있다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (4.1)$$

Fig. 4-1에서 A-B표면(후면) 전체에 균일한 열 유속이 가해지도록 동일 조건으로 가열하면, 대상체의 열전도에 의해 전달된 열에너지는 대류열전달과 복사열전달의 조합으로 C-D 표면에서 방사된다. 이 과정의 열 평행 방정식은 다음 식 (4.2)으로 표현된다. 여기서, σ 는 스테판볼츠만 상수($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)이다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial x_i} \Big|_{i=1,2,3} = h(T_s - T_a) + \epsilon \sigma [(T_s)^4 - (T_a)^4] \quad (4.2)$$

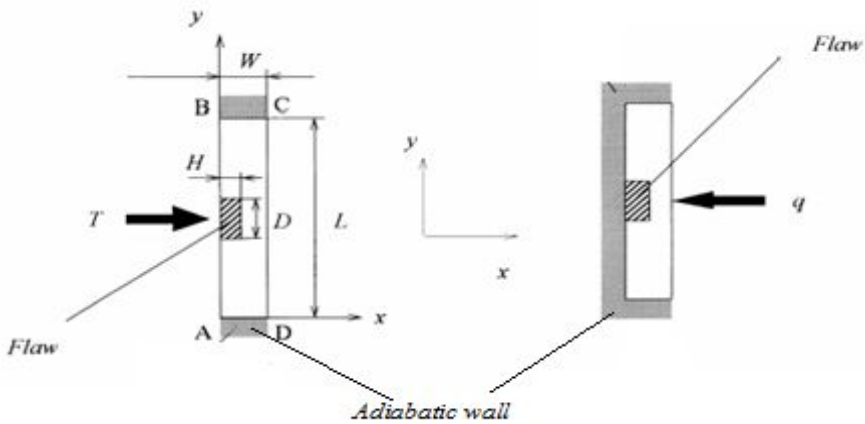


Fig. 4-1 Basic mechanism of thermal characteristics

1. 배관모델링

유한요소해석을 위한 배관 모델링은 본 논문에서의 동일한 조건으로 CATIA를 통하여 모델링하였으며, 배관의 감육 결함을 형성하기 위해 배관의 상층부에 길이가 각각 $L/D=0.25$ 와 0.5 이고 길이가 배관 두께의 감육 깊이 75%와 50%의 두 가지 형태의 인공 결함으로 설계 및 가공하였다. 또한, 전체 길이가 500mm, 두께가 7.5mm, 외경이 113mm인 4 inch 배관이다. 이와 동일한 배관을 모델링한 배관 설계도면 및 ANSYS Work-Bench를 통한 모델링의 전체형상을 Fig. 4-2에 나타내었다. 유한요소해석 시뮬레이션을 수행하기 위해 열적상태량은 Table 4-1과 같이 정의하였다.

Table 4-1 Thermal Properties of ASTM A106 Gr.B

Physical properties	quantity of state(Thermal)
Density(ρ)	7722.72 kg/m ³
Thermal conductivity(k)	60.73 W/m ^{°C}
Thermal diffusion(α)	0.06457 m ² /hr
Coefficient of thermal expansion(β)	7.02×10^{-6}

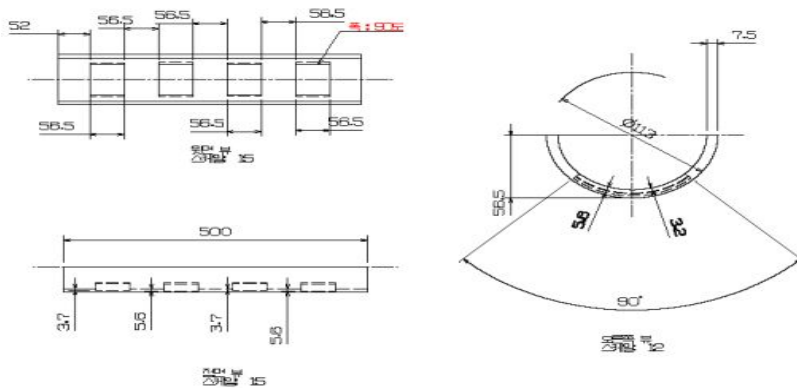
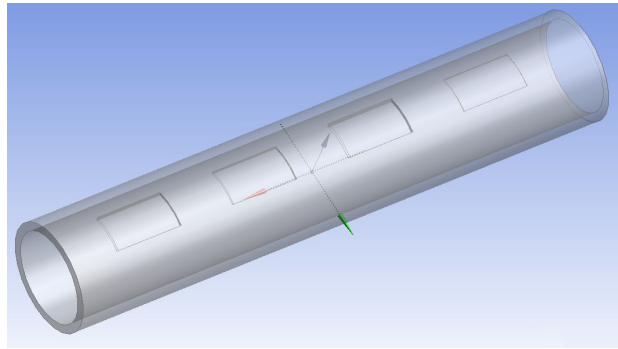


Fig. 4-2 4 inch Pipe with artificial defects

실험에서 배관은 실제 원전 2차 계통 배관에 흔히 사용되는 ASTM A106 Gr.B 탄소강으로 제작된 배관이며 표면에 방사페인트(KRYLON 4290 Ultra Flat Black)를 도포하여 배관에서 표면 방사율이 0.97이 되도록 빛의 반사를 최소화하였다. 유한요소 해석에서도 회체조건을 고려하여 방사율의 영향을 일정한 값으로 하여 빛의 조사에 대한 반사를 최소화하였다.

유한요소해석 시뮬레이션을 수행하기 위해 경계조건을 다음과 같이 설정하였다. 해석을 단순화하기 위해 배관의 반을 고려하는 대칭조건으로 설정하였고 각각의 고체 및 공기를 열 유동 매질로 한 유체에 대하여 열적상태량 및 유동조건을 입력하였다. 또한, 배관 내부의 유동 조건이나 온도는 자유경계조건으로 설정하였고,

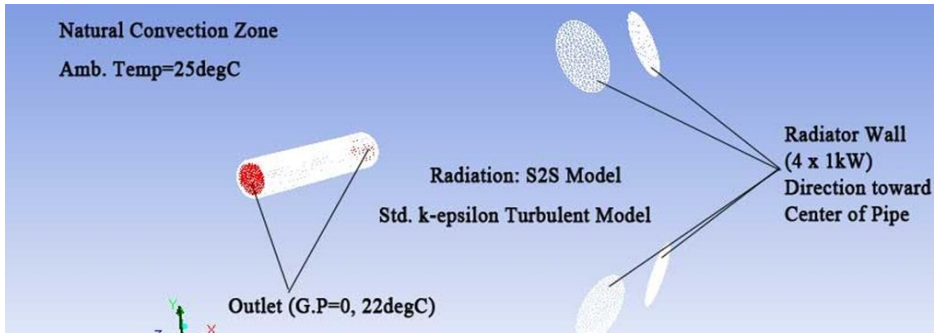
Halogen Lamp로부터 배관에 조사되는 경로에 대해서는 주변의 온도(23℃)와 습도를 에어컨을 통하여 일정하게 유지하였다.

2. 유한요소해석 모델링

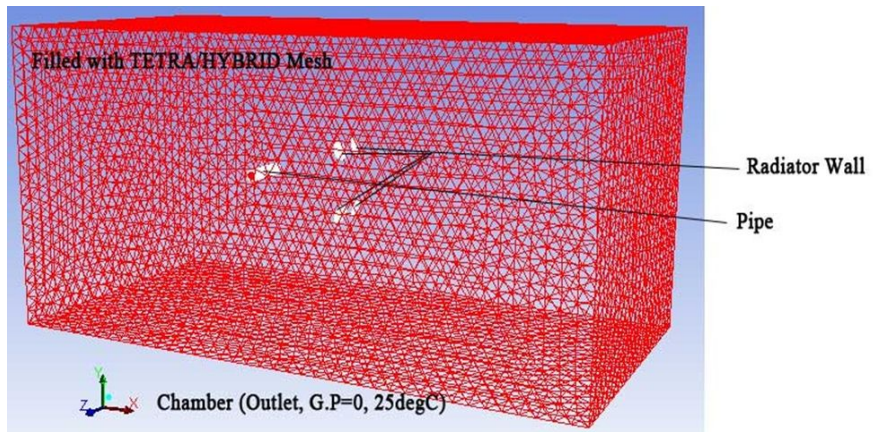
유한요소해석은 Halogen Lamp의 성질을 이용하여 1 kW Halogen Lamp를 의 거리와 Halogen Lamp의 조사율을 70%로 결정하여 ANSYS 플루언트를 사용하여 실행하였다. 시뮬레이션 조건은 배관과 Halogen Lamp의 거리를 2m으로 결정하고 이에 따른 Halogen Lamp의 조사율은 70%로 설정하였다. 또한, 배관의 실제온도, 실내온도, Halogen Lamp의 표면온도와 표면 방사율, 형상, 표면면적 등을 고려하였다. Fig. 4-3(a)는 배관과 Halogen Lamp의 구성도이며, Fig. 4-3(b)는 해석의 정밀도를 향상시키기 위한 메쉬를 생성한 모습이다.

3. 유한요소해석 시뮬레이션 결과

유한요소해석 시뮬레이션은 최고 조사율 1 kW의 Halogen Lamp 2개 사용하여 수행하였다. 시뮬레이션을 수행한 내용은 Table 4-2와 같다. Fig. 4-4(a)는 Halogen Lamp 조사율을 70%로 유지하고 배관과 Halogen Lamp의 거리는 2m로 60초 동안 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 배관과 Halogen Lamp의 거리에 관계없이 모든 시험 조건에서 결함부에서 온도 차이가 육안으로 관찰되었다. 다만 결함 깊이가 배관 두께의 75%에 비해 50%에서는 결함부 온도 편차의 선명도가 낮았다. Fig. 4-4(b)는 Halogen Lamp 조사율을 70%로 유지하고 배관과 Halogen Lamp의 거리는 2m로 조절하면서 각각 60초 동안 유한요소해석 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 배관과 Halogen Lamp의 시험 조건에서 결함부의 온도 편차가 뚜렷이 관찰되었고, 육안으로 확인할 수 있었다. 결함 깊이가 배관 두께의 75%에 비해 50%에서는 결함의 선명도가 낮았다. 배관 표면에서 온도분포를 그림으로 나타내었다. 결과에 따라 배관에 전달된 온도가 높을수록 결함이 선명하고 결함의 형상이 실제 형상과 유사하다고 판단된다.



(a) Configuration of 4 inch Pipe and Halogen Lamp

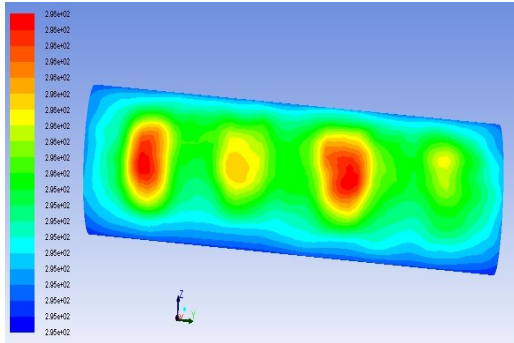


(b) Mesh Creation

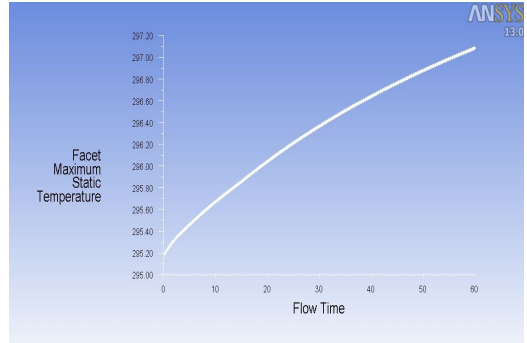
Fig. 4-3 Configuration of the modeling 4 inch Pipe and Halogen Lamp

Table 4-2 Simulation conditions of FEM

Halogen Lamp	Lamp의 조사율	가열 시간	배관과 Lamp의 거리
1 kW의 Lamp 2개	70%	60초	2m



(a) 70% of Lamp output (2m)



(b) Distance of 2m

Fig. 4-4 Surface temperature of 4 inch pipe on 70% of Halogen Lamp output

유한요소해석 시뮬레이션은 2개의 1 kW의 Halogen Lamp를 이용하여 광원에 따른 배관 표면의 온도 변화를 측정하고 온도 변화에 따른 결함부의 열적 특성 차이를 이용하여 배관의 결함을 검출하기 위해 수행하였다. 시뮬레이션 수행 방법은 Halogen Lamp의 조사율을 70%로 설정하고 배관과 Halogen Lamp의 거리를 2m로 고정하여 배관 표면의 온도를 측정하여 결함을 검출하였다. 유한요소해석 결과 결함이 선명하고 결함의 형상이 실제 형상과 유사하였다. 하지만 결함의 깊이에 따라 결함의 선명도 차이가 발생하였다. 따라서 유한요소해석 시뮬레이션 결과를 통해 Halogen Lamp를 이용한 배관 결함 검출을 위한 실험조건을 예측할 수 있다.

제 2 절 결함 검출

1. 4 inch 배관

가. 배관 SP1-1 측정 결과

4 inch 배관 SP1-1은 본 논문에서의 실험조건을 찾기 위한 실험으로 Fig. 4-5는 4 inch 배관 SP1-1의 앞면, 뒷면에서 측정된 적외선 열화상 측정결과를 배관과 IR Camera 및 Halogen Lamp의 거리와 Halogen Lamp의 조사율에 따라 나타낸 것이다. Halogen Lamp의 조사율에 모든 조건에서 결함이 육안으로 관찰되었다. 전체적으로 감육 깊이가 50%에 비해 75%인 결함에서 선명도가 높게 나타났으며, 조사율이 60% 이상이고 배관과 Halogen Lamp 및 IR Camera의 거리가 1m인 경우에는 깊이가 $d/t=0.5$ 인 결함도 뚜렷하게 구분되었다. Halogen Lamp의 조사율과 배관, IR Camera 및 Halogen Lamp의 거리에 따라 적외선 열화상 기법의 결과가 다소 차이를 보였다. 배관과 IR Camera 및 Halogen Lamp의 거리가 1m인 경우에는 Halogen Lamp의 조사율에 관계없이 배관의 중심에 있는 결함은 명확히 검출되는 반면 배관의 양쪽 끝에 있는 결함은 상이 명확하지 않았다. 이는 바깥쪽 결함은 공기의 영향을 많이 받는 동시에 Halogen Lamp의 열이 고루 전달되지 않기 때문이다. 또한, 동일한 크기의 결함일지라도 이미지상의 검출된 결함의 크기가 상이하게 나타나는 것을 알 수 있다. 배관과 IR Camera 및 Halogen Lamp의 거리가 2m인 경우에는 Halogen Lamp의 조사율에 관계없이 4개의 결함이 모두 검출되었으며, 동일한 형상의 결함이 거의 유사한 크기로 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 Halogen Lamp의 조사율이 70%일 때 결함이 명확히 구분되었다. 거리가 3m인 경우에도 4개의 결함이 모두 검출되었으나, 감육 깊이가 50%인 결함에서는 상의 선명도가 크게 떨어졌으며 결함의 길이와 폭이 실제 결함 형상에 비해 작게 나타났다.

한편, 결함의 길이가 $L/Do=0.25$ 인 뒷면에서 적외선 열화상 측정결과를 살펴보면, 결함의 길이가 짧음에도 불구하고 Halogen Lamp의 조사율이 60% 이상에서는 배관과 Halogen Lamp 및 IR Camera의 거리에 관계없이 5개의 결함이 모두 육안으로 관찰되었다. $L/Do=0.25$ 인 경우에도 감육 깊이가 75%인 결함에 비해 50%인 결함에서는 결함부의 선명도가 낮았으나 배관에 존재하는 모든 결함이 육안으로 뚜렷하

게 구분되었다. 배관의 중심에 위치한 결함과 측면에 위치한 결함 사이에 결함의 선명도와 형상이 큰 차이를 보였다. 이 역시 앞면과 동일한 증상이다. 배관이 2m 거리에서는 조사율이 70%와 80% 조건에서는 5개의 결함이 명확하게 구분되고 동일한 형상의 결함은 거의 유사한 상을 보였다. 배관과 IR Camera 및 Halogen Lamp의 거리가 3m인 조건에서는 조사율이 80%일 때 결함이 일부 검출되었으나, 전체적으로 결함이 명확히 관찰되지 않았으며 결함 간의 구분이 선명하지 않았다.

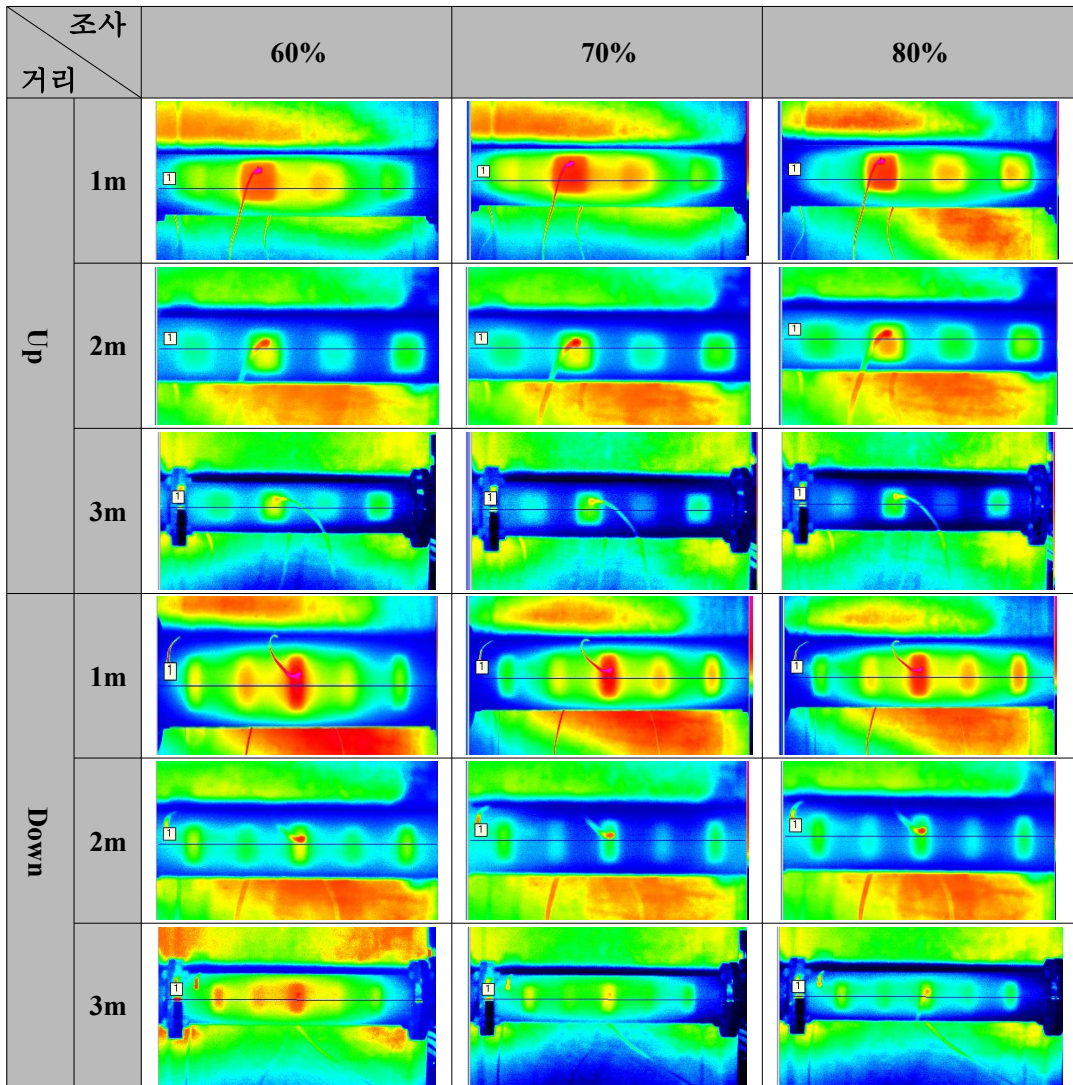
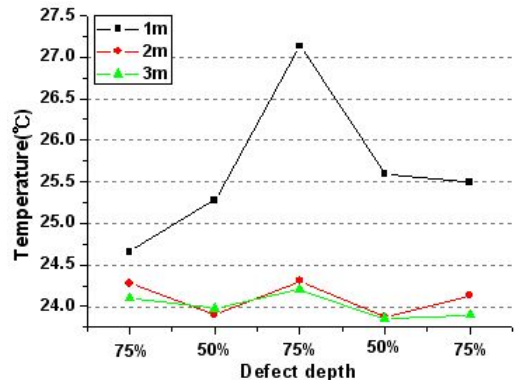
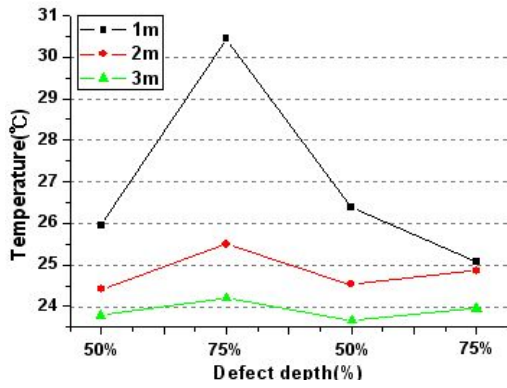


Fig. 4-5 Measurement results of Infrared Thermography image SP1-1



(a) Up defect

(b) Down defect

Fig. 4-6 4 inch pipe(SP1-1) Temperature graph

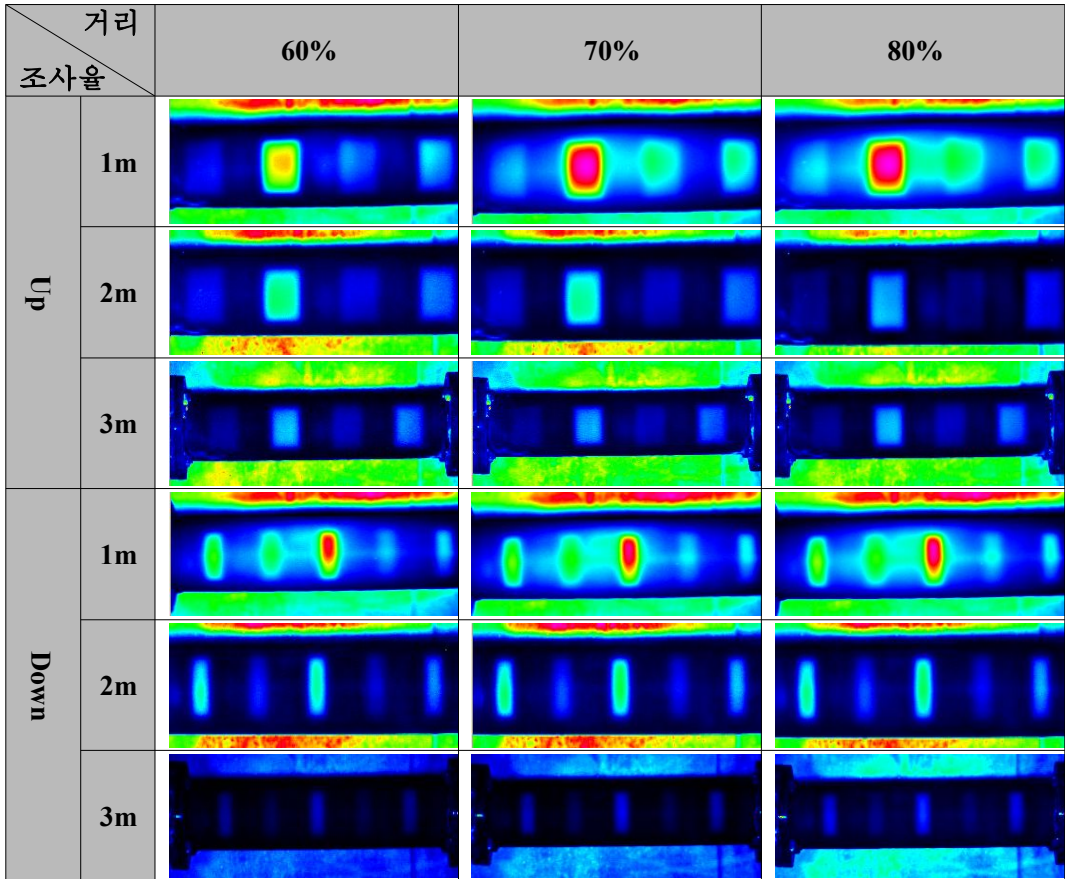


Fig. 4-7 Measurement results of Lock-in SP1-1

다음 Fig. 4-6은 배관 SP1-1에 대한 열화상 데이터를 통한 그래프(1m ~ 3m 70%)를 나타낸 것이다. 또한, 기계구조물에 있어서 열에 대한 변화로 인한 온도변화가 미세하여 미세한 온도변화를 측정하기 위한 분해능을 높이기 위한 방법으로 위상 잠금 적외선 열화상 기법을 이용하여 차이점을 알아보았다. Fig. 4-7의 결과를 도출하였다. 적외선 열화상 측정 결과에 비해 실제 결함과 유사한 크기와 형상을 보이며, 결함에 대한 이미지상의 선명도가 뚜렷하게 검출되었다. Lock-in에 의한 측정결과에서도 마찬가지로 동일한 크기의 결함임에도 불구하고 배관의 중심에 위치한 결함과 측면에 위치한 결함 사이에 결함의 선명도와 형상이 큰 차이를 보였다. 이는 일반적인 Halogen Lamp를 이용하여 배관을 가열하는 경우에 배관의 전체 길이가 균일하게 가열되지 못하기 때문으로 판단된다. 또한, Halogen Lamp 및 IR Camera의 거리가 멀수록 뚜렷하게 결함을 검출되었으며 결함간의 구분도 분명함을 알 수 있다. 이 역시 2m 거리와 70%의 조사율에서의 측정결과 값이 가장 좋았다.

나. 배관 SP2-5 측정 결과

경사 결함 배관 SP2-5는 S1-1에서의 실험조건을 찾아서 적용 실험으로 Fig. 4-8은 SP1-1의 앞면, 뒷면에서 측정된 적외선 열화상 측정 데이터 및 그래프를 통하여 적용하였다. 실험시스템은 동일하게 진행되었으며, 거리 2m, 조사율 70%를 유지한 상태에서 실험하였다. 그 측정 데이터는 다음 Fig. 4-7과 같다. 4 inch 배관 SP2-5의 경우는 다른 배관과 다르게 사각 결함이 아닌 경사 결함으로 이루어져 있으며, 실제 감육에서 일어나는 현상과 비슷하게 되어 있다. 전체적으로 모든 적외선 열화상 기법을 이용하여 실험한 결과 결함의 크기를 육안으로 확인할 수 있었다. 하지만, 감육 깊이가 25%이하인 경우의 결함 검출을 할 수 없었다. SP2-5 배관의 경우에도 Lock-in 기법을 이용하여 촬영한 결과 적외선 열화상 기법으로 촬영한 데이터를 비교해 봤을 때 감육 깊이가 25%인 결함을 찾을 수 있었다. 이는 미세한 열 분포에도 민감하여 찾을 수 있는 것으로 사료된다. 또한, 경사, 사각 결함 구분 없이 결함 검출을 도출할 수 있었다.

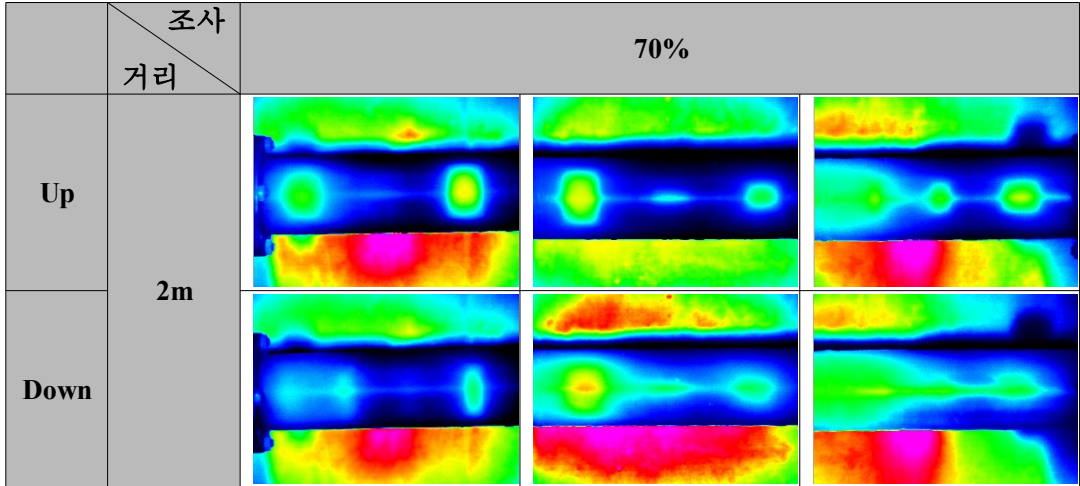


Fig. 4-8 4 inch pipe(SP2-5) Infrared Thermography image

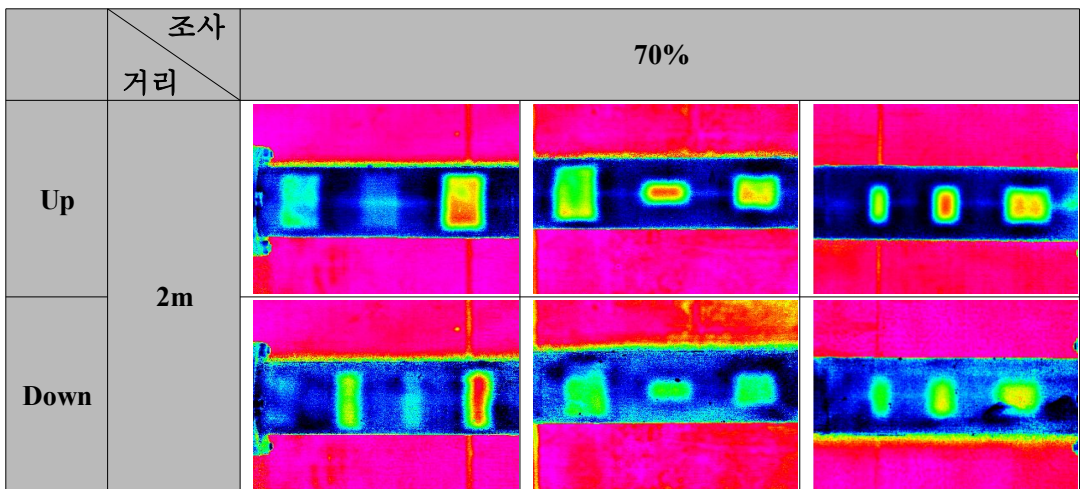


Fig. 4-9 4 inch pipe(SP2-5) Lock-in image

다. 배관 SP2-6 측정 결과

사각 결함 배관 SP2-6은 S1-1에서의 실험조건을 적용하였다. 그 측정 데이터는 다음 Fig. 4-10과 같다. 4 inch 배관 SP2-5의 경우는 다른 배관과 다르게 사각 결함이 아닌 경사 결함으로 이루어져 있으며, 전체적으로 결함 깊이는 10% ~ 60% 사이로 주었으며, 결함 길이는 $L/Do=0.25 \sim L/Do=0.0625$ 까지 가공하였다. Fig. 4-10보면 결함의

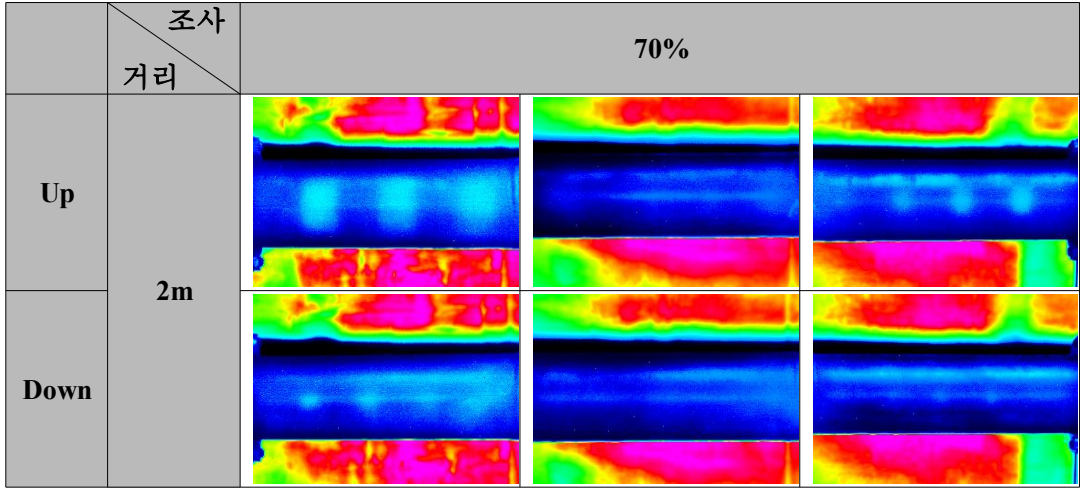


Fig. 4-10 4 inch pipe(SP2-6) Infrared Thermography image

상관없이 감육 깊이가 30%이상의 결함에서는 적외선 열화상 이미지로 확인할 수 있었다. 감육 깊이가 20%이하인 경우에는 결함 길이가 $L/D_o=0.25$ 이라도 검출을 할 수 없었다. 차이점을 찾기 위해 Lock-in 기법을 이용한 촬영한 결과 Fig. 4-11과 같으며, Lock-in 기법 역시 30%이상의 결함은 찾을 수 있는 반면 20%이하의 결함은 찾을 수 없었다.

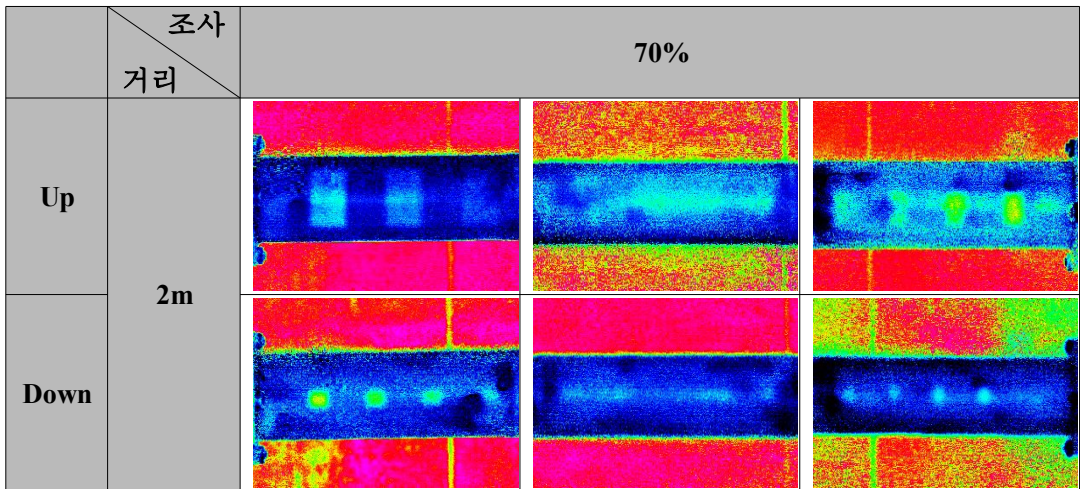


Fig. 4-11 4 inch pipe(SP2-6) Lock-in image

2. 소구경 2.5 inch 배관

가. 배관 SP3-1 측정 결과

소구경 2.5 inch 배관에서 측정된 적외선 열화상 영상을 소구경 배관과 Halogen Lamp 및 IR Camera의 거리와 Halogen Lamp의 조사율에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 소구경 배관과 Halogen Lamp 및 IR Camera의 거리, 그리고 Halogen Lamp의 조사율에 실험조건에서 결함이 육안으로 관찰되었다. 하지만 감육 깊이가 12.5%는 폭과 길이에 상관없이 결함을 검출하지 못하였다. 또한, Halogen Lamp의 조사율이 높으면 높을수록 적외선 열화상에서 결함이 보다 선명하였다. 하지만 앞서 실험한 4 inch 배관의 실험조건이라고 정하였던 거리가 2m이며 Halogen Lamp의 조사율이 70%이상일 경우 가장 선명하게 나왔던 결과 값과는 달리 소구경 2.5 inch 배관 같은 경우 직경이 적어 열이 고루 전달되지 않으며 열이 전달되는 경우 4 inch 배관보다 많은 열이 집중적으로 전달되는 현상으로 인하여 실험에 큰 영향을 끼쳤다. 또한, 1m, 2m인 경우보다 1.5m의 거리에서의 결과가 더 선명하게 검출됨을 실험을 통하여 알 수 있었다. 이러한 결과를 종합하면 폭과 길이에 상관없이 12.5%의 결함 깊이를 제외하고는 결함을 육안으로 확인할 수 있었다. 또한, 실험조건을 적용한 결과 4 inch 배관의 조건인 2m거리와 70%조사율의 조건이 아닌 소구경 2.5 inch 배관은 1.5m거리와 70% 조사율일 경우 보다 선명한 데이터를 얻을 수 있었다. 또한, Lock-in 기법에서의 결함 검출 조건에서도 1.5m의 거리에서 조사하였을 시 정확한 데이터를 획득할 수 있었다. 다음 Fig. 4-12는 적외선 열화상 이미지이며, Fig. 4-13는 위상 잠금 적외선 열화상 이미지를 도출하였다.

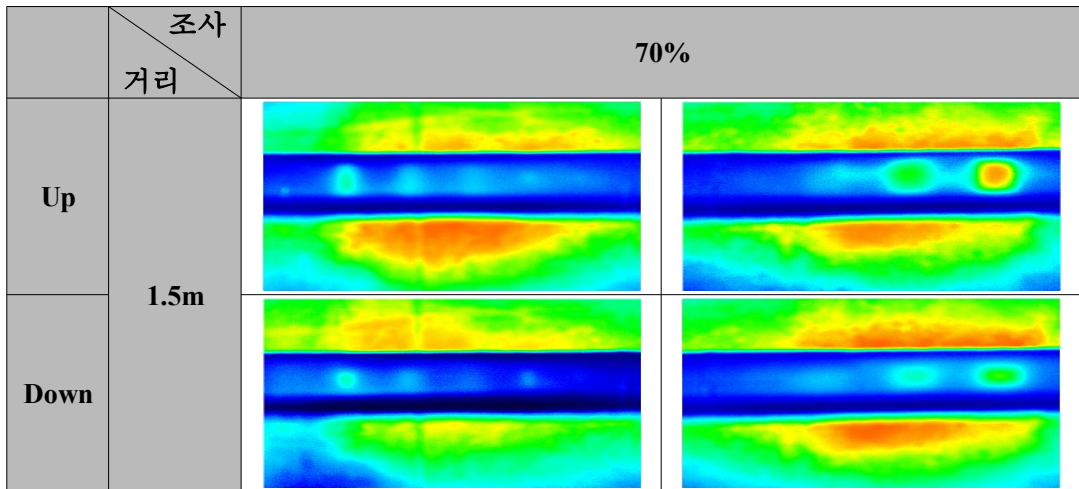


Fig. 4-12 2.5 inch pipe(SP3-1) Infrared Thermography image

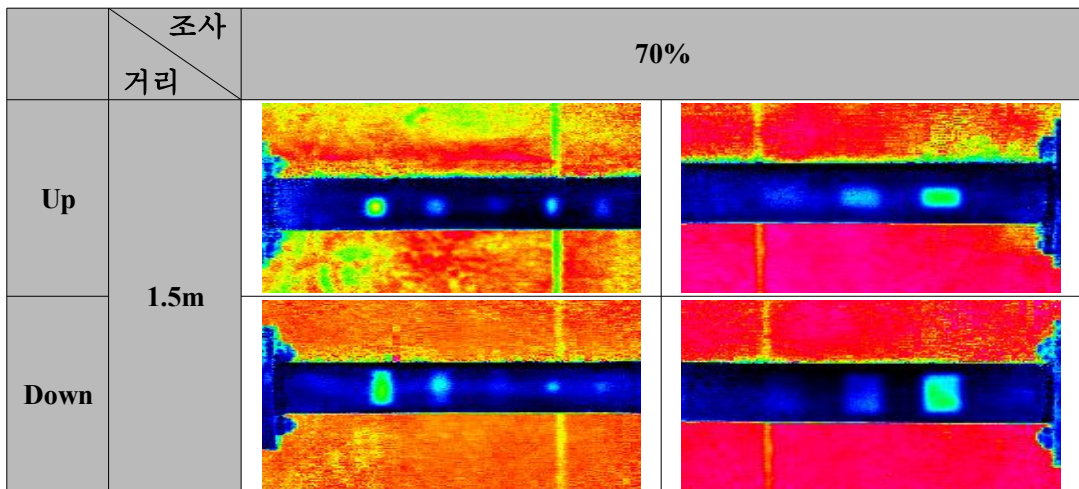


Fig. 4-13 2.5 inch pipe(SP3-1) Lock-in image

나. 배관 SP3-4 측정 결과

적외선 열화상 기법의 실험 결과에 의하면, SP3-4 배관에서도 감육 깊이가 25% 이상인 결함은 모두 검출되었고 결함이 육안으로 뚜렷하게 구분되었다. Lock-in 기법의 경우에는 SP3-4 모든 결함이 육안으로 확인되었다.

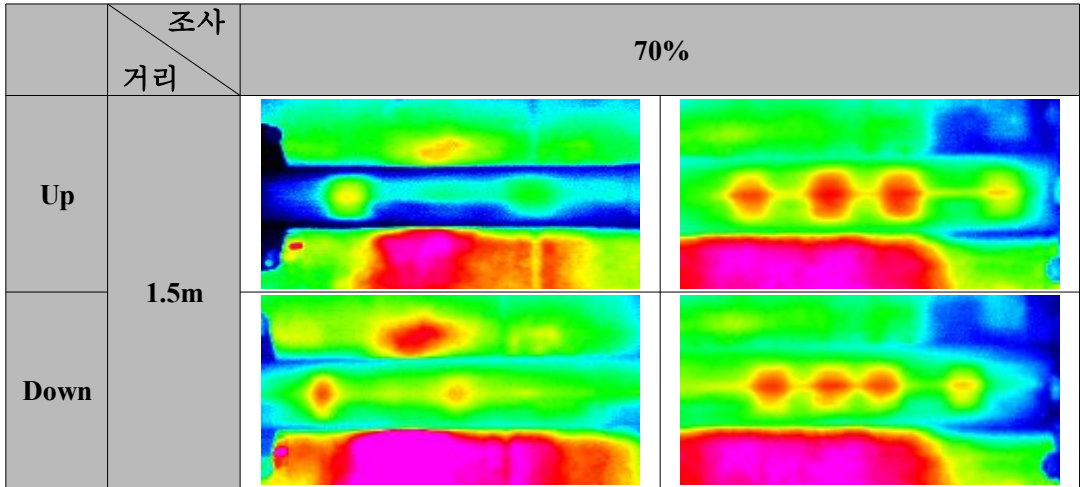


Fig. 4-14 2.5 inch pipe(SP3-4) Infrared Thermography image

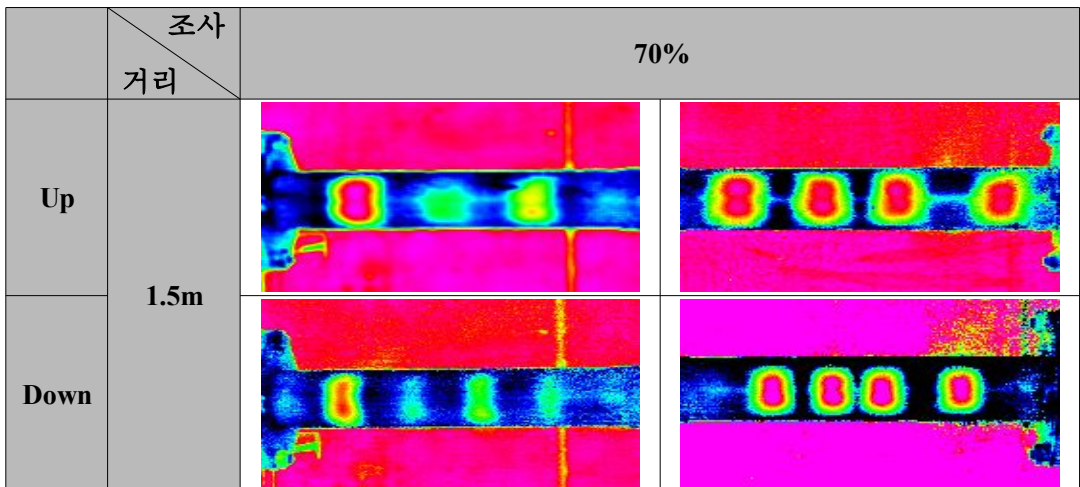
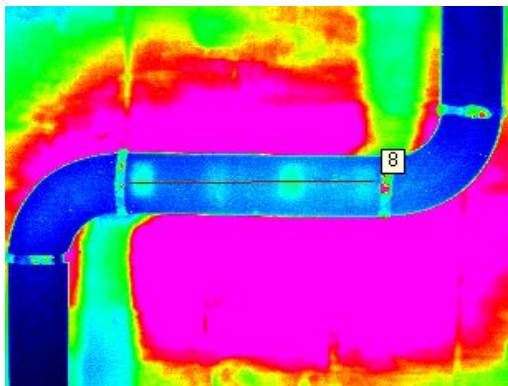


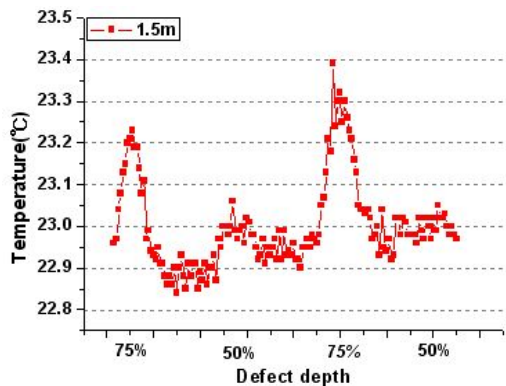
Fig. 4-15 2.5 inch pipe(SP3-4) Lock-in image

다. 소구경 2.5 inch 복합 배관

감육 깊이는 50% 75%로 이루어져있으며, 배관과 배관을 용접을 통하여 가공하였으므로 알루미늄 호일을 통하여 각각의 경계선을 표시하여 온도에 따른 결함을 확인하였다. 결과는 Fig. 4-16과 같다. 위의 모든 실험과 동일하게 감육 깊이가 50% 이상의 경우에는 결함을 육안으로 확인할 수 있을 뿐만 아니라 그래프로도 확인할 수 있었다.

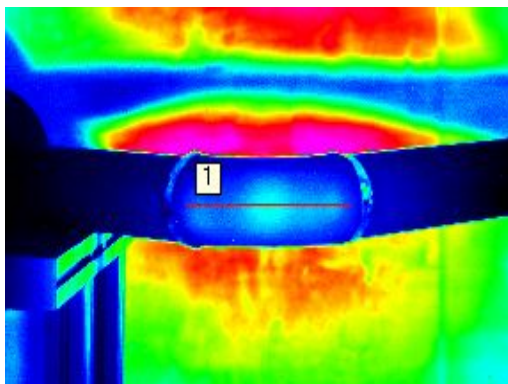


(a) Defect image

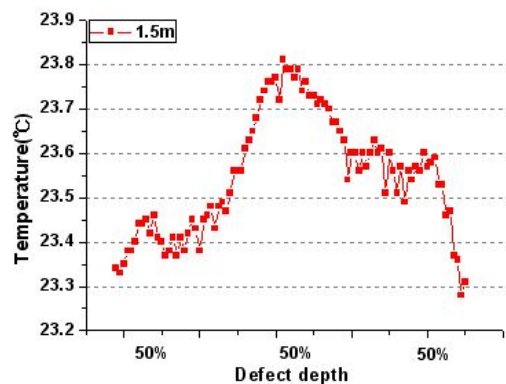


(b) Defect profile graph

Fig. 4-16 2.5 inch complex pipe



(a) Defect image



(b) Defect profile graph

Fig. 4-17 2.5 inch elbow pipe

라. 소구경 2.5 inch 엘보우(elbow) 배관

소구경 엘보우 배관 같은 경우 50%이상의 결함만 존재하며, 실험 결과는 Fig. 4-17과 같으며, 엘보우 배관은 50% 이상의 감육 깊이를 확인할 수 있었지만 정확한 길이가 확인되지는 않았다. 그 이유로는 곡률의 따른 열 영향이 달라 중앙부에만 집중적으로 열을 받아 선명한 데이터는 획득할 수 없었다. 이를 보완하기 위해서는 열이 고루 전달될 수 있는 가열장치를 개발해야 할 것으로 사료된다. 또한, 가열장치를 이용하지 않고 온도 보정을 할 수 있는 알고리즘을 통해서도 가능할 것으로 보인다.

제 3 절 각도의 의한 결함 검출

원전 배관의 같은 경우 일직선으로 결함이 생기는 것이 아닌 예측할 수 없는 곳에서 결함이 발생한다. 따라서 현장에 적용할 수 있도록 각도를 돌려 결함 검출의 각도의 영향을 알아보았다.

가. SP1-1, SP2-1의 대한 각도별 결함 검출

4 inch 배관인 SP1-1에 각도를 15° 씩 돌려서 적외선 열화상 기법과 위상 잠금 적외선 열화상 기법을 이용하여 최대 결함 검출 능력을 평가하였다. 실험조건은 SP1-1에서의 실험조건을 적용하여 2m거리에서의 70%조사율을 적용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과는 다음 Fig. 4-18, Fig. 4-19와 같다. 4 inch 배관인 SP2-1에도 각도를 15° 씩 돌려서 적외선 열화상 기법과 위상 잠금 적외선 열화상 기법을 이용하여 SP1-1과 비교하였다. Fig. 4-18, Fig. 4-19와 같으며, 그 결과 각도를 돌렸을 경우 SP1-1은 원주방향변화가 모든 결함의 경우가 90° 라서 모든 결함의 경우는 60° 까지의 결함은 명확하게 구분할 수 있었으며, SP2-1의 경우에는 모든 결함의 크기가 다르며 최대 45° 까지의 결함을 찾을 수 있었다. 이러한 실험 결과를 토대로 현장에서의 적용은 가능할 것으로 보이며 최대 45° 는 찾을 수 있을 것으로 사료된다.

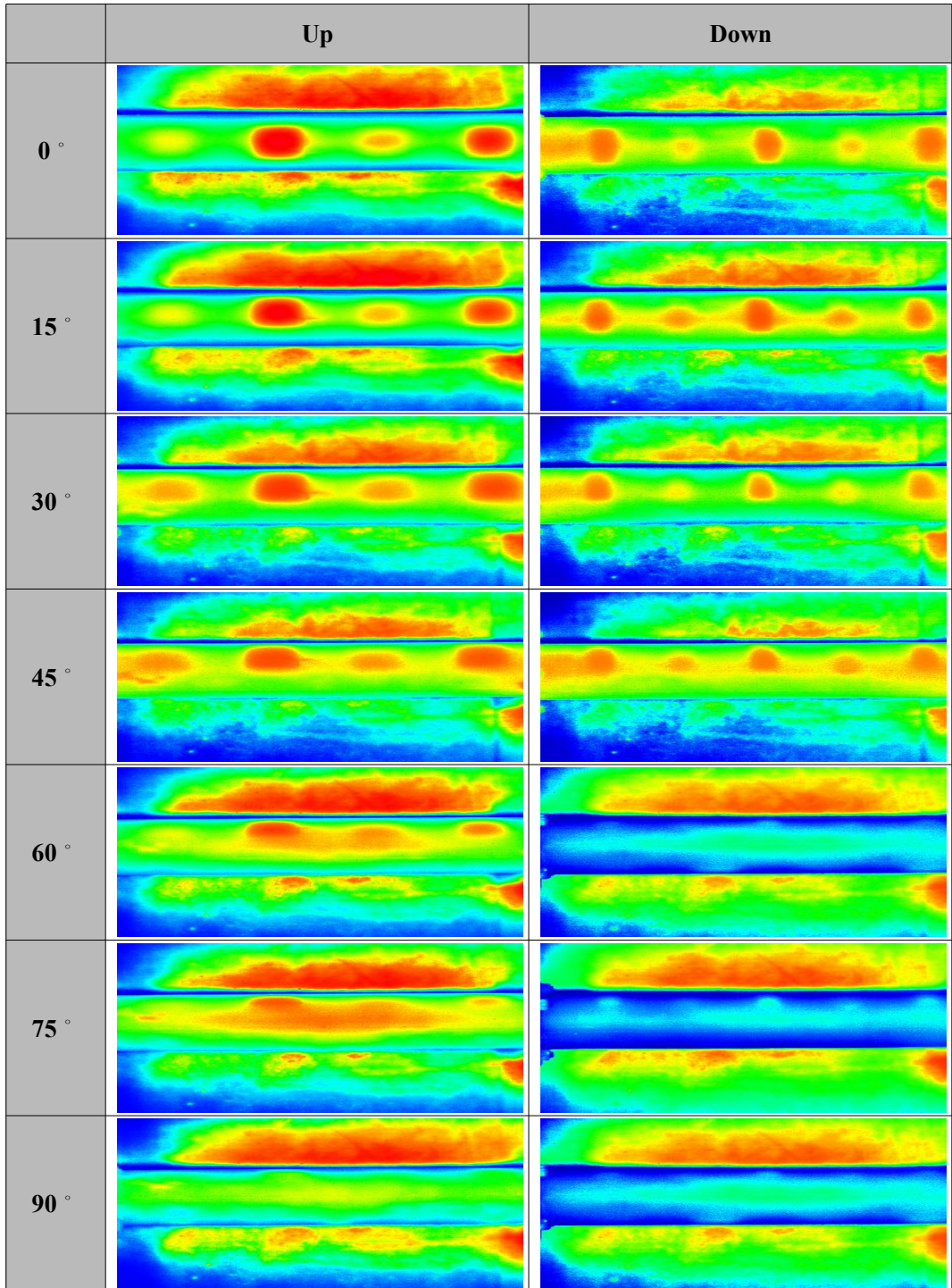


Fig. 4-18 SP1-1 pipe angle of defect(Infrared Thermography)

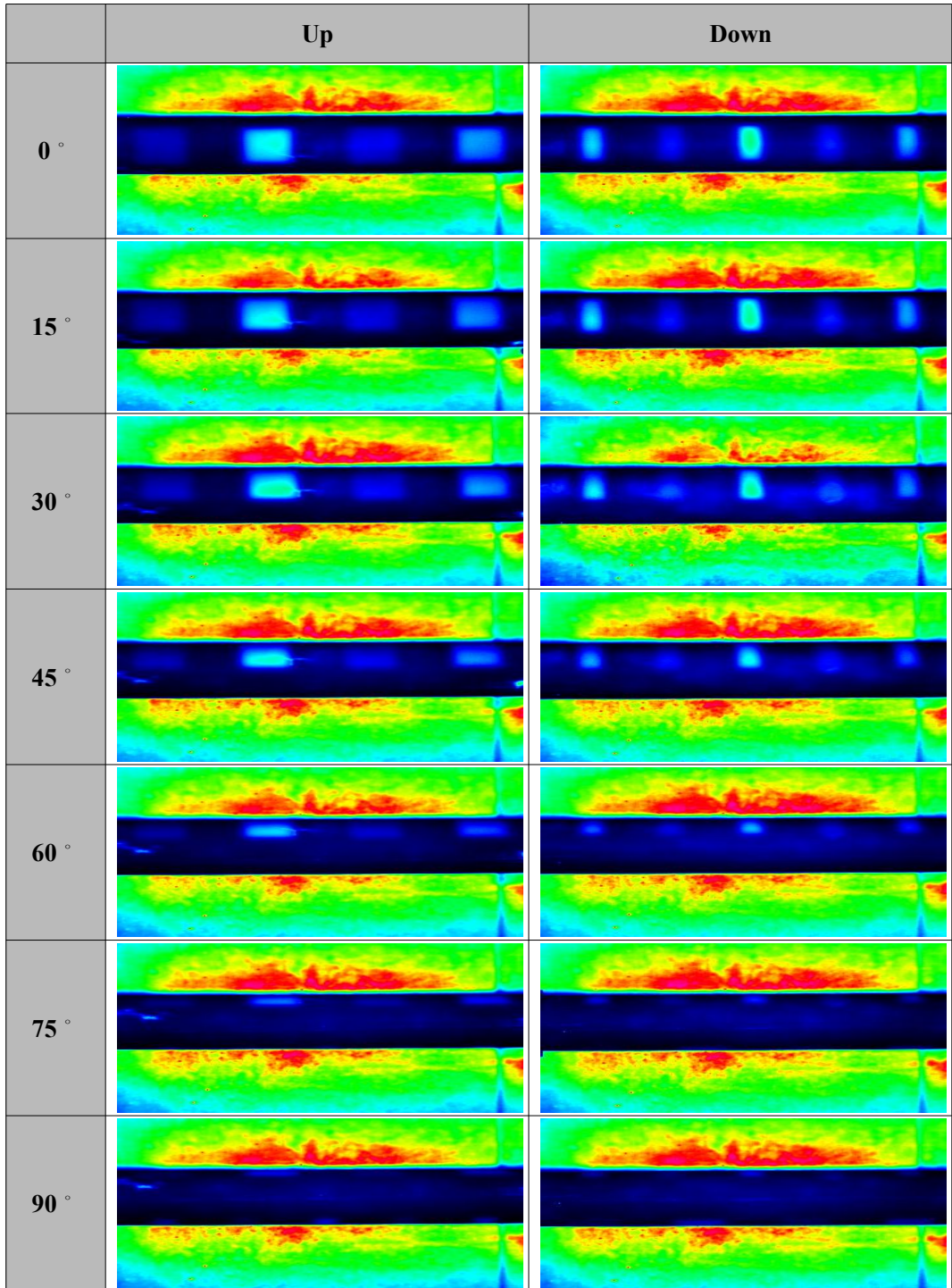


Fig. 4-19 SP1-1 pipe angle of defect(Lock-in)

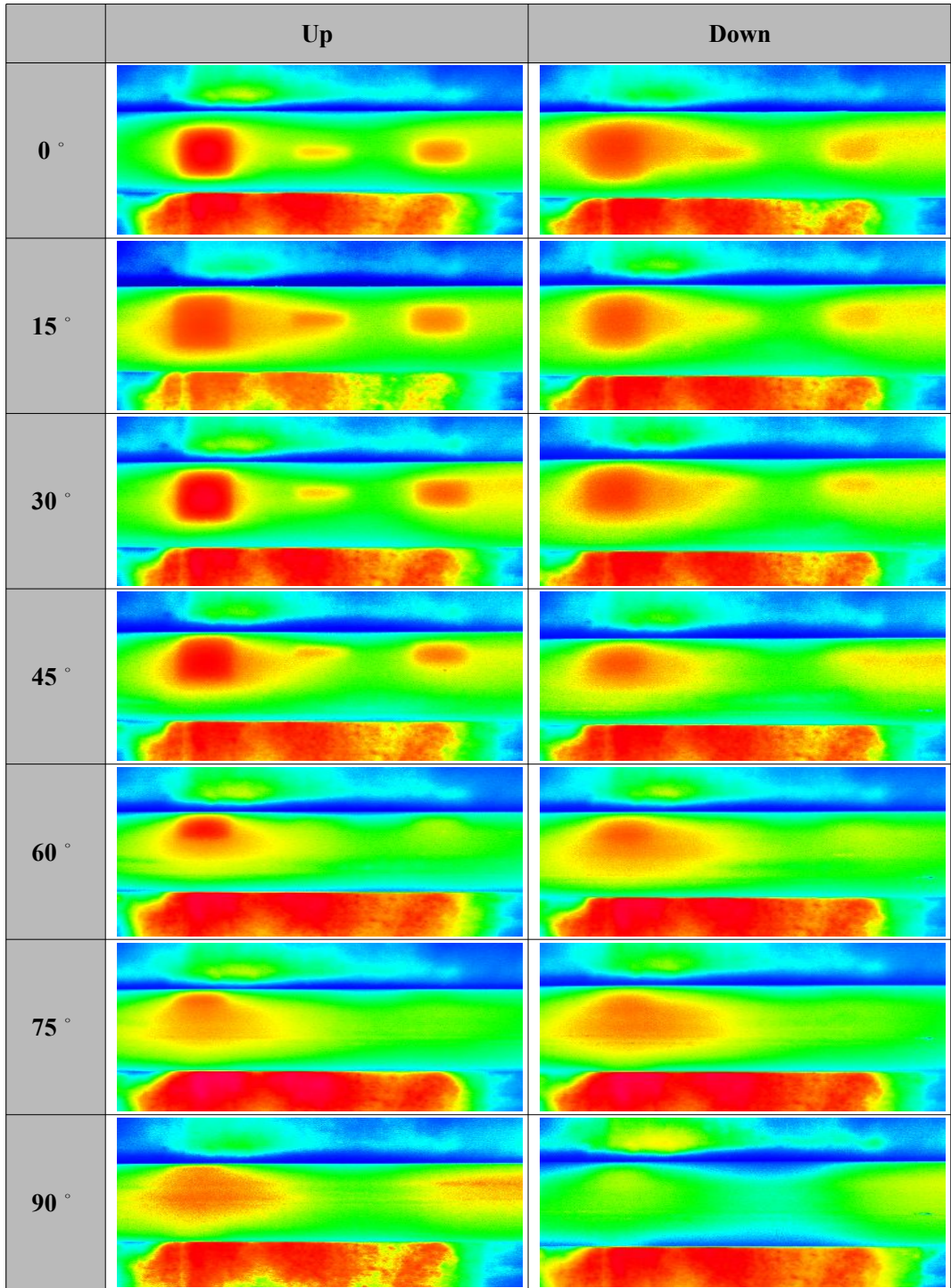


Fig. 4-20 SP2-1 pipe angle of defect(Infrared Thermography)

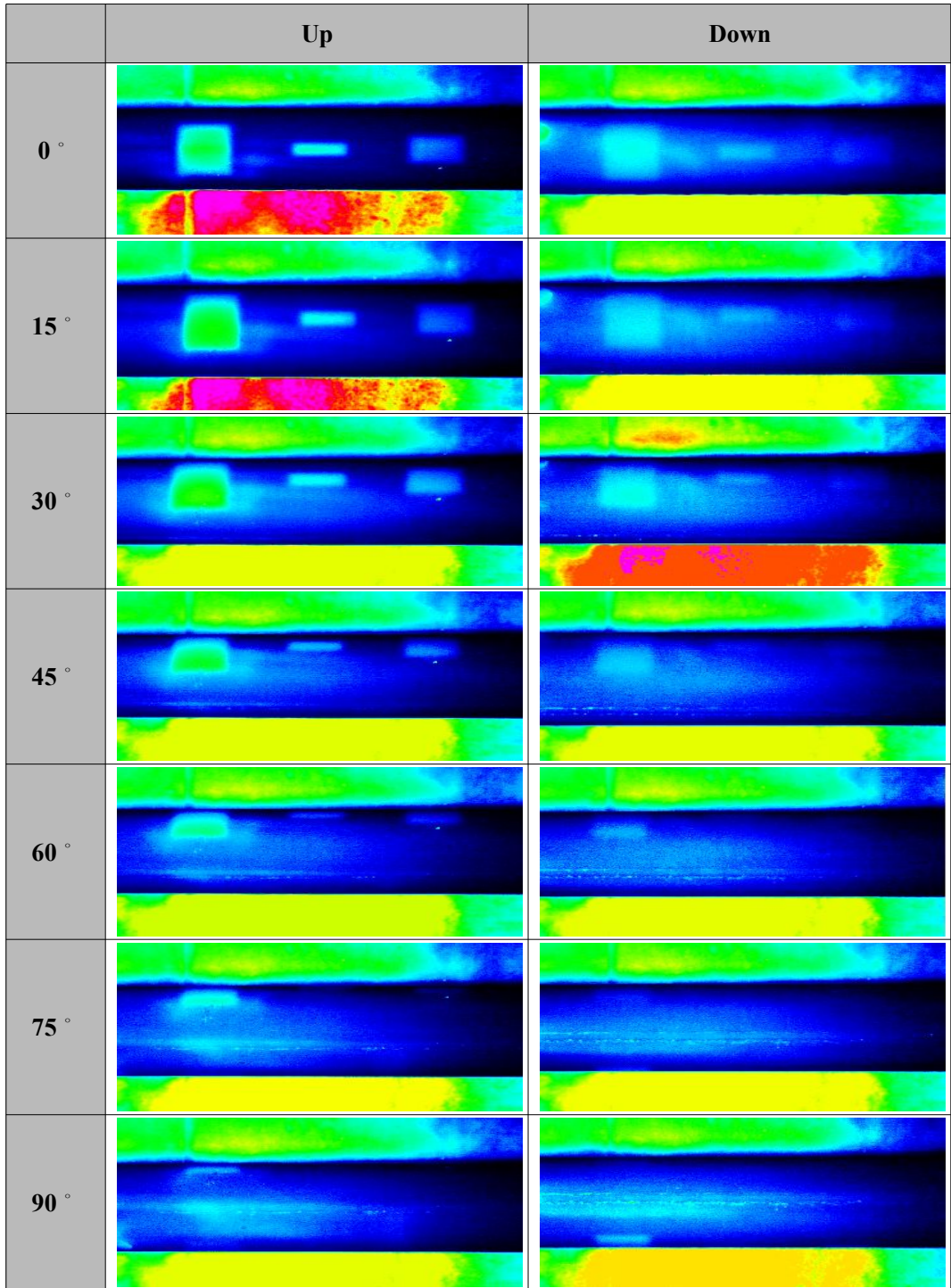
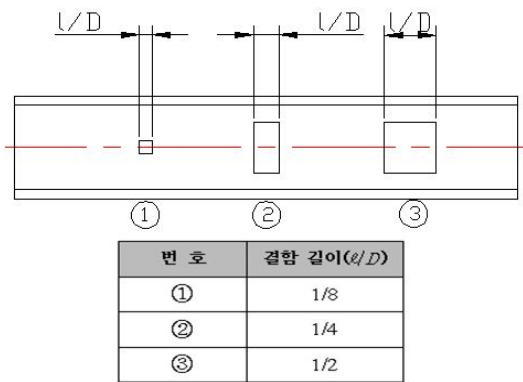


Fig. 4-21 SP2-1 pipe angle of defect(Lock-in)

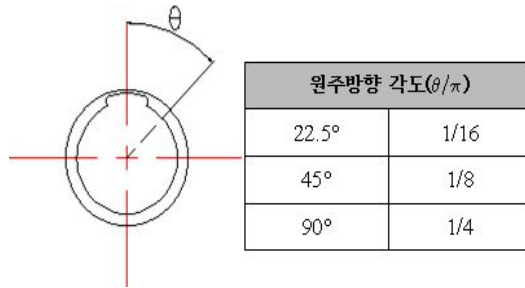
제 4 절 배관의 결함 검출을 통한 결함 길이 예측

소구경 배관은 두께(t) 6.5mm, 전체길이(L)는 700mm로 외경(Do)이 72.5mm이며, Fig.2와 같이 결함의 길이를 배관 직경의 1/8, 1/4, 1/2로 변화시켰다. 또한 원주방향으로 결함의 각도를 변화시켰으며, 여러 가지 변수에 따른 실험 조건은 Fig. 4-22와 같다. 결함의 깊이를 배관 두께 대비 일정하게 변화시켰다. 실험 방법은 위의 소구경 배관의 실험과 동일하게 1m, 1.5m, 2m로 실험조건을 다른 방법으로 찾기 위하여 이미지를 통하여 미분하여 결함 길이를 예측하였다. 그로인해 여러 가지 변수에 따른 실험조건에서 결함이 이미지로 관찰되었으며, 그 결과는 Fig. 4-23과 같다. 하지만 결함 깊이가 25%(D/4)인 깊이는 결함 길이변화와 결함의 원주방향 각도변화와 무관하게 결함이 측정되지 않았다. 각각의 결함 조건에 따른 온도 이미지 프로파일을 이용하여 Fig. 4-24(a)와 같은 온도 분포를 획득하였다. 온도 분포에 대한 미분을 수행하여 Fig. 4-24(b)와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 때 미분한 데이터의 변곡점 사이의 거리를 결함의 길이로 가정하였다.

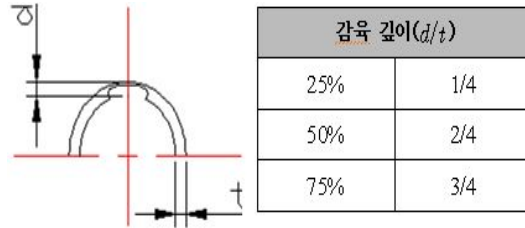
Fig. 4-24는 결함 길이변화에 대한 온도분포 측정 결과이며, Fig. 4-25는 원주방향 각도변화, Fig. 4-26은 감육 깊이변화에 대한 결과이다. 이들 데이터는 거리 1.5m에서 측정 결과이고, 원주방향 각도변화에 대한 데이터는 1m에서 측정한 결과이다.



(a) pipe according to defect length

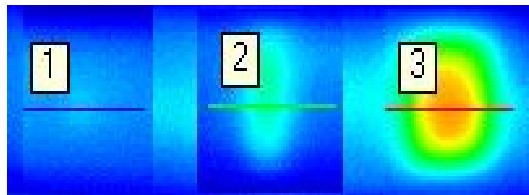


(b) pipe according to circumferential direction

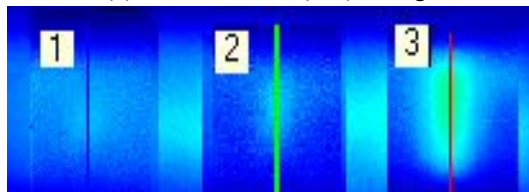


(c) pipe according to wall-thinning depth

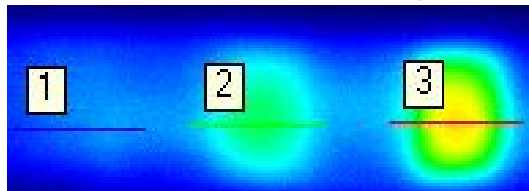
Fig. 4-22 Dimensions of defects in small-bore pipe



(a) 1.5m defects(ℓ/D) Image

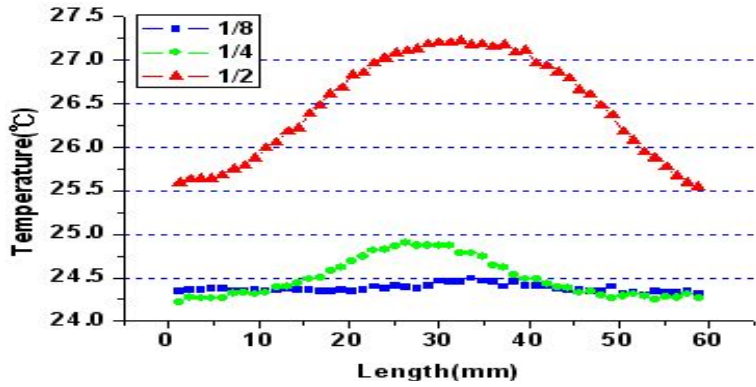


(b) 1.5m defects(θ/π) Image

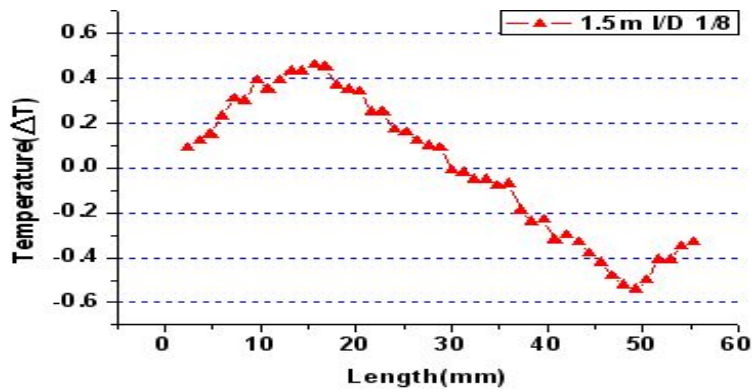


(c) 1.5m defects(d/t) Image

Fig. 4-23 Infrared Thermography Image (1.5m)

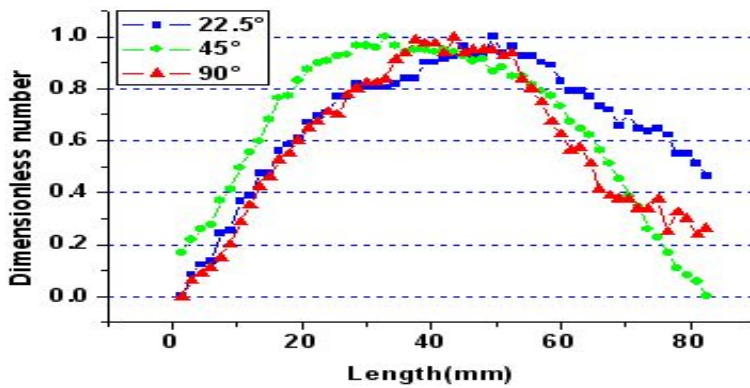


(a) defects(l/D) graph(°C)

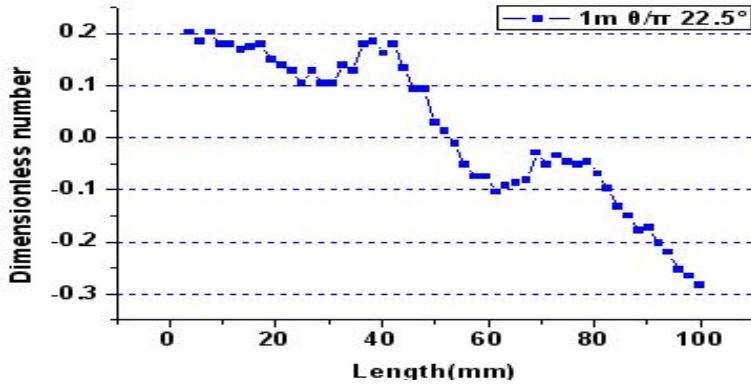


(b) defects(l/D) defect length graph(mm)

Fig. 4-24 1.5m Temperature at defects(l/D)

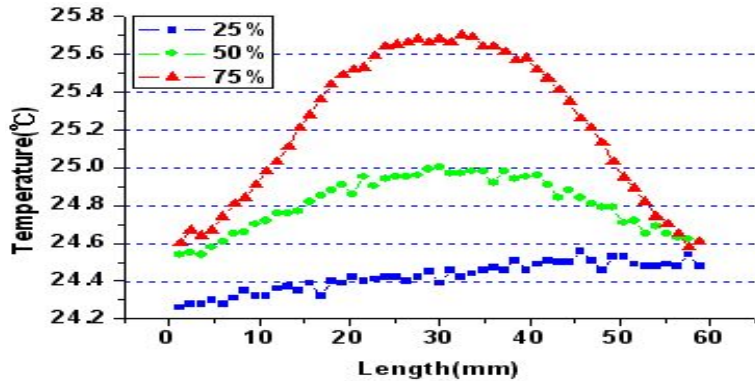


(a) defects(θ/π) graph(°C)

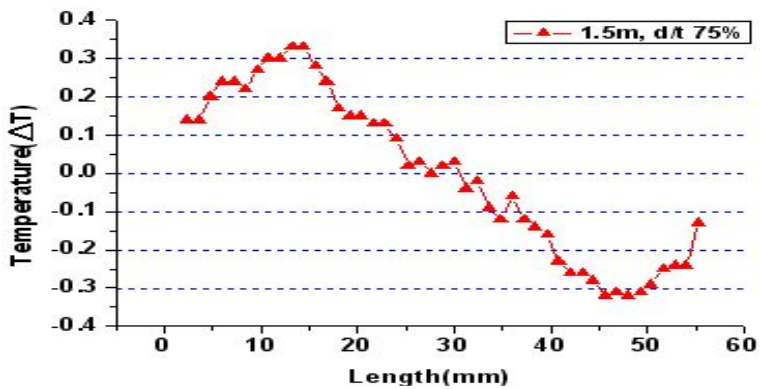


(b) defects(θ/π) circumferential direction graph(mm)

Fig. 4-25 1m Temperature at defects(θ/π)



(a) defects(d/t) graph(°C)



(b) defects(d/t) wall-thinning depth(mm)

Fig. 4-26 1.5m Temperature at defects(d/t)

Table 4-3은 결함 길이 변화에 대한 측정거리별 결함 측정 결과이고, Table 4-4는 측정 결과의 정확도이다. Table 4-5와 Table 4-6은 감육 깊이에 대한 측정 결과이다.

이 결과에서 보면 결함 길이 변화에 대한 측정 결과가 비교적 다른 결과에 비해 정확하며, 정확도는 약 84.07%로 측정되었다. 감육 깊이에 대한 측정 결과는 약 78.62%로 결함 길이변화에 대한 측정 결과보다는 다소 낮게 측정되었다.

원주방향 각도변화에 따른 결함의 길이는 Fig. 4-25(b)의 경우를 제외하고는 변곡점을 얻을 수 없었다. Fig. 4-23의 온도 이미지를 관찰한 결과도 온도분포 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 소구경 2.5 inch 배관이 4 inch 배관보다 상대적으로 직경이 작아서 배관의 중심부에 열이 집중되므로 원주방향 각도변화에 따른 결함 길이는 측정하는데 어려움이 있었다. 이러한 결과를 종합하면 결함 길이변화와 감육 깊이변화에 대한 측정 결과는 감육 깊이 25%(D/4)의 경우를 제외하고는 결함을 육안으로 확인할 수 있었다. 또한, 4 inch 배관에 대한 실험 결과와는 다르게 거리 1.5m에서 보다 선명한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 방법으로 결함 길이의 예측을 모든 배관에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 4-3 defects(ℓ/D) defect length(mm)

ℓ/D	1m	1.5m	2m
1/8 (9mm)	7	8	8
1/4 (18mm)	16	15	12
1/2 (36.25mm)	26	29	24

Table 4-4 defects(ℓ/D) defect length(%)

ℓ/D	1m	1.5m	2m
1/8 (9mm)	77.78	88.89	88.89
1/4 (18mm)	88.89	83.33	66.67
1/2 (36.25mm)	71.72	80.00	66.21
Average(%)	79.46	84.07	73.92

Table 4-5 defects(d/t) wall-thinning depth(mm)

d/t	1m	1.5m	2m
25% (36.25mm)	×	×	×
50% (36.25mm)	25	28	23
75% (36.25mm)	27	29	24

Table 4-6 defects(d/t) wall-thinning depth(%)

d/t	1m	1.5m	2m
25% (36.25mm)	×	×	×
50% (36.25mm)	68.97	77.24	63.45
75% (36.25mm)	74.48	80.00	66.21
Average(%)	71.72	78.62	64.83

제 5 절 광학 설계를 통한 Halogen Lamp 설계

가. 디자인을 도출하기 위한 광학 설계

본 논문에서는 배관에 균일하게 빛을 조사하여 배관 전체에서 균일한 온도 분포를 갖도록 함으로 결함의 위치 및 크기를 정확히 파악하고자 한다. 이를 위하여 광선의 복잡한 경로를 몬테카를로 시뮬레이션에 근거한 광선 추적 방법으로 분석하였다. 분석에는 3차원 광학 디자인 툴인 LigthTools을 활용하였다. 시뮬레이션을 통하여 공간 내에서 광자의 운동 경로를 수학적으로 확인, 예측하였으며 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 구성하였다. Halogen Lamp에서 빛을 조사하는 배관의 거리 및 면적을 고려하여 평면 형태의 Surface receiver를 설정할 수 있어 배관에 조사되는 빛의 세기를 정확하게 분석할 수 있으며, 조도, 광도, 배광곡선, CIE 색좌표, 색온도(CCT)의 다양한 결과를 얻을 수 있다.

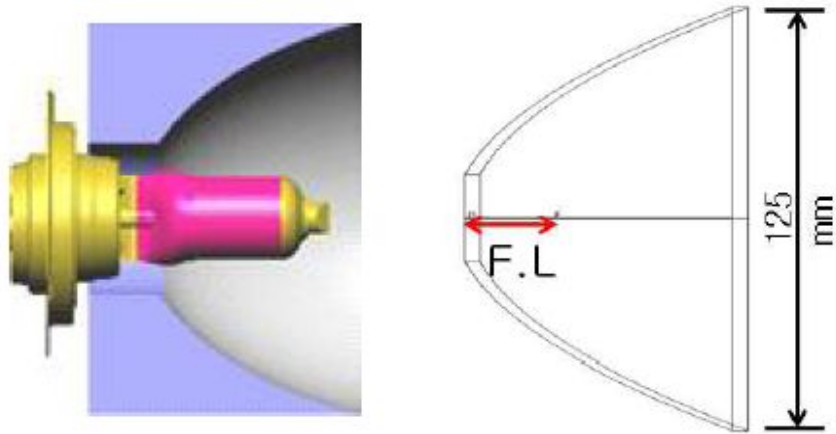


Fig. 4-27 New Halogen Lamp image

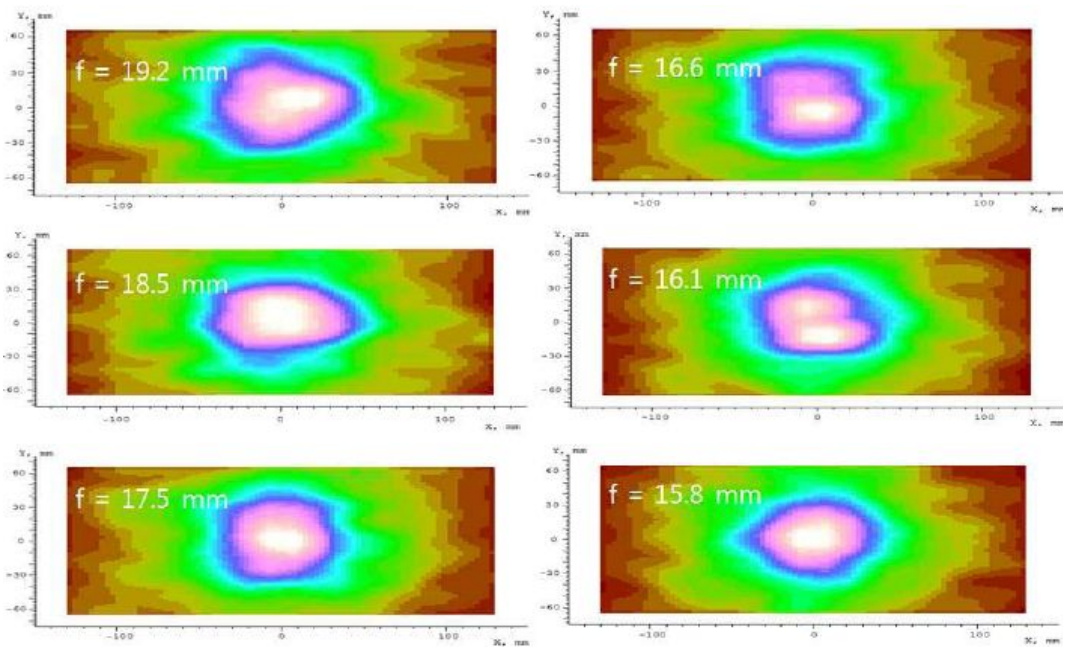


Fig. 4-28 Focal length according to surface receiver illuminance distribution

나. 평행광을 얻기 위한 반사체 디자인

Fig. 4-27은 반사체를 디자인하기 위해 설계한 개략도를 보여준다. 우선 휴대성을 높이기 위해 반사체의 지름을 125mm로 설정하였다. 이것은 기존의 Halogen Lamp

의 204mm에 비해 크기가 1/2로 줄어들었으며, 조도의 측정을 위해서는 2m 거리에 Surface receiver를 140mm × 250mm의 크기로 설정하였다. 빛의 진행 방향을 평행광으로 설정하기 위해 반사체의 초점거리를 15.8mm에서 19.2mm까지 변화시켰으며, 초점거리가 증가할수록 빛이 원형 모양으로 집중되는 것을 Fig. 4-28로 확인할 수 있다.

다. 렌즈 설계를 통한 결함 검출

Cylindrical 렌즈를 제작하기에 앞서 렌즈 앞의 유리의 적외선 파장대를 확인한 결과 2.5um 이상의 근적외선 부분에서 높은 방사율을 보여준다. 따라서 렌즈의 설계 및 제작에서 2.5um 이상의 근적외선을 차단할 수 있는 렌즈 재질로 선택하여 가공하였다. 그림 Fig. 4-29에서 보는 것처럼 BK-7 재질의 경우 2.5um 이상의 근적외선 빛을 상당 부분 차단하는 것으로 확인하였다.

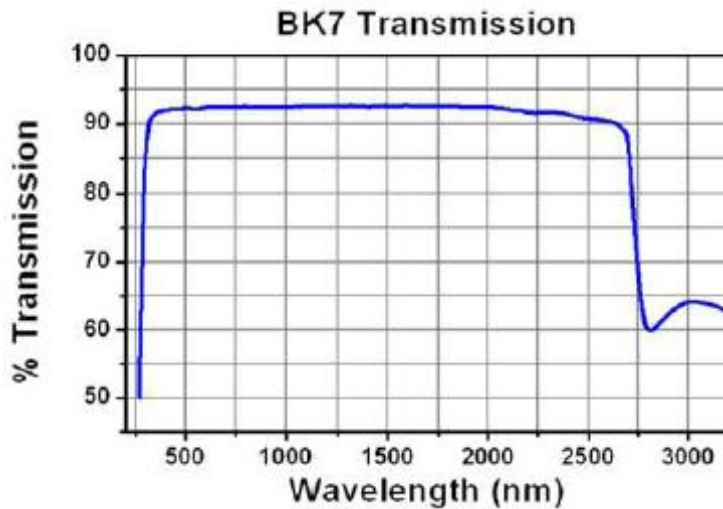
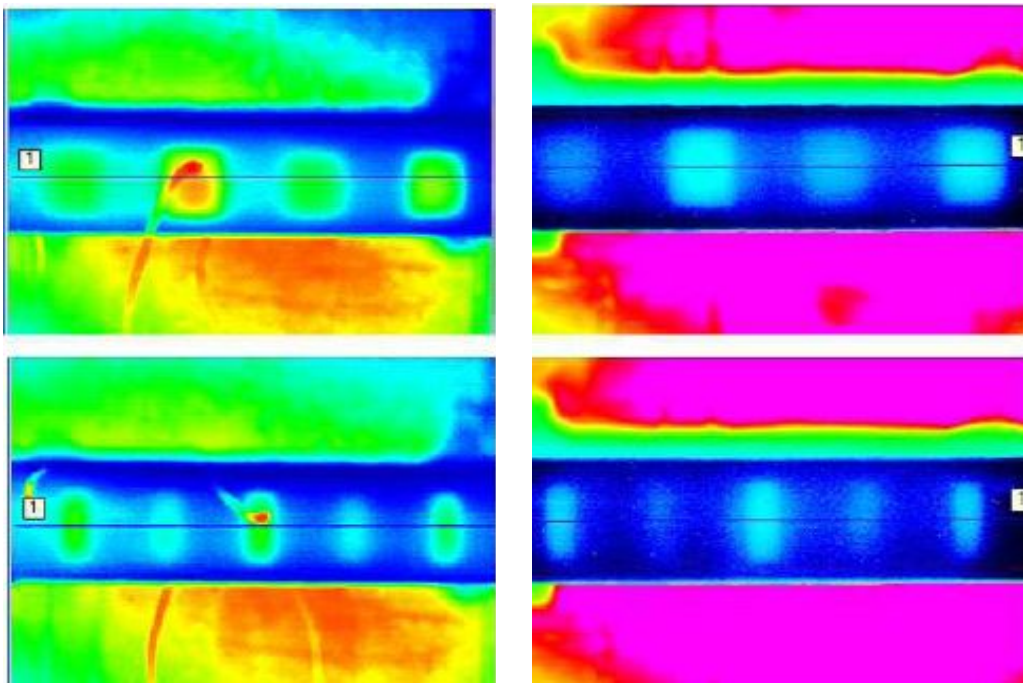


Fig. 4-29 BK-7 glass of Infrared transmissivity

따라서 Cylindrical 렌즈를 제작하기 위해 BK-7 재질의 특성을 갖는 유리를 사용하여 렌즈를 개발하였다. 개발을 한 렌즈를 통하여 실험조건을 결정하는 SP1-1 배관을 통하여 결함 검출 실험을 수행하였다. 결과는 다음 Fig. 4-30과 같다.

제작된 Halogen Lamp를 이용하여 결함 깊이가 배관두께의 50%, 75%로 배치되어 있는 적외선 열화상 이미지를 보면 모든 결함에 대하여 정확하게 측정되는 것을 확인할 수 있다 이것은 개발된 Halogen Lamp가 4 inch 배관의 결함을 측정하는데 매우 적합함을 보여준다. 그림을 보시다시피 기존 Halogen Lamp는 열이 고르게 가지 않고 중심부에만 열이 치우쳐 가운데의 결함만 더 뚜렷하게 보이는 반면 제작 및 설계를 통하여 만든 Halogen Lamp는 열이 고르게 전달되어 깔끔한 이미지를 볼 수 있었다. 이것은 Cylindrical 렌즈에 의하여 가로 방향 및 세로축 방향으로 열이 균일하게 가해지기 때문으로 판단된다.



(a) Halogen Lamp

(b) New Halogen Lamp

Fig. 4-30 measure (a) against (b) of defect image

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 4 inch, 소구경 2.5 inch 배관의 감육 결함을 검출하기 실험조건을 파악하기 위해 4 inch, 소구경 2.5 inch 배관 에 다양한 결함을 제작하여 결함을 측정하였고 결함 길이를 예측하였다. 실험 및 데이터 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전체적으로 4 inch 배관에서의 적외선 열화상 기법의 실험조건은 배관과 IR Camera 및 Halogen Lamp의 거리가 2m이고 1 kW Halogen Lamp 2개의 조사율을 70%로 유지할 때 인 것으로 확인되었다.

(2) 소구경 2.5 inch 배관의 경우에 조사율이 70%이며, 배관과 IR Camera 및 Halogen Lamp의 4 inch 배관의 실험조건을 적용한 결과 1m, 2m인 경우보다 1.5m의 경우가 명확히 결함 검출이 되었으며, 위상 잠금 적외선 열화상 기법의 경우에도 1.5m일 때 명확하게 검출되었다.

(3) 또한, 결함의 깊이가 두께의 25%이하인 경우에는 적외선 열화상 측정에서 결함이 검출하지 못하였으며, 위상 잠금 적외선 열화상 기법을 적용할 시 25%이하의 결함도 검출할 수 있었다.

(4) 결함 깊이가 같을지라도 4 inch, 소구경 2.5 inch 배관의 중앙 부분이 중앙부가 뚜렷이 높은 온도를 보였다. 이러한 온도 차이는 Halogen Lamp를 이용하여 4 inch, 소구경 2.5 inch 배관을 가열하는 경우에 배관의 전체적으로 균일하게 가열되지 못하기 때문으로 4 inch, 소구경 2.5 inch 배관의 표면에서 온도 불균일성이 심화되는 것으로 판단된다. 따라서, 이를 개선하기 위해서는 배관 결함 검출에 적합한 새로운 형태의 가열 방법 개발 및 온도 보정 알고리즘이 필요하다는 것을 확인하였다.

(5) 위상 잠금 기법을 이용한 실험결과, 적외선 열화상 기법과 유사한 결과로 결함이 검출되었으나 적외선 열화상 측정결과보다 결함의 상에 대한 선명도가 높아 일부 결함들은 실제 결함과 유사하고 명확한 형태와 크기를 보였으며 그 외의 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.

(6) 소구경 2.5 inch 배관의 결함 깊이 예측으로 결함 길이변화에 대한 측정 결과 거리 1.5m에서 약 84.07%의 정확도로 다른 거리에서의 측정 결과보다 정확하였다. 첫 번째, 감육 깊이변화에 대한 측정 결과 정확도도 거리 1.5m에서 가장 높게 측정되었으며, 약 78.62%로 측정되었다. 두 번째, 결함 깊이가 25%(D/4)인 경우는 본 실험 조건에서는 결함을 측정할 수 없었다. 세 번째, 원주방향 각도변화의 경우는 온도 이미지에서는 결함을 확인할 수 있었지만, 정량화는 할 수 없었다. 이는 추후 적외선 열화상 기법 및 위상 잠금 적외선 열화상 기법을 이용하여 얻은 데이터를 바탕으로 결함 깊이 예측에 관한 정량성 평가를 할 수 있을 것으로 사료된다.

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 evaluation," J Opt Lasers Eng, 1997.
- [4] Ettemeyer, A.. "Technical engineering note laser shearography for inspection of pipe lines". J. Nucl. Eng. Design, Vol. 40, pp. 160-237, 1996.
- [5] edited Ratogi, P.K. and Inaudi, D.. "Trends in Optical Non-destructive Testing and Inspection", London: Elsevier, 2000.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] G. Shen and T. Li, "Infrared thermography for high-temperature pressure pipe," Insight, Vol.49, pp.151-153, 2007.
- [10] 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석, "위상잠금 광-적외선 열화상을 이용한 내부결함의 위치 및 크기 평가," 비파괴검사학회지, Vol.27, No. 4, pp. 321-327, 2007.
- [11] X. P. V. Maldague, Rastogi P.K., Inaudi D, editors, "Trends in optical nondestructive testing and inspection," Elsevier Science, Switzerland, pp. 591-633, 2000.
- [12] 박은수, 박익근, 송성진, "비파괴평가 공학", 학연사, pp. 7-10, 2001.
- [13] 심찬구, "비파괴검사·시험의 기술진흥을 위한 제언," 한국비파괴검사협회

- 춘계학술대회 논문집, pp.3-13, 2001.
- [14] 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
- [15] P. O. Moore., “Nondestructive Testing Handbook,” Infrared and Thermal Testing, ASTM, Vol. 3, 3rd ed., pp. 223-246, 2001.
- [16] X. P. V. Maldague., “Infrared methodology and technology”, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1994.
- [17] 전북대학교, “비접촉 레이저 응용 검사기술을 이용한 원자력기기의 신뢰성 향상 기술 개발”, 원자력연구개발 사업 연구 보고서, 2008.
- [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] 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.
- [20] 김정국, “적외선 열화상 기술을 이용한 철도차량 대차 건전성 평가,” Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 31, No. 2, 2011.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] D. Wu and G. Busse, “Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials,” Rev. Gin. Therm., Vol. 37, pp.693-703, 1998.
- [24] 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.
- [25] 박희상, 최만용, 박정학, 김원태, 최원중, “ 적외선 열화상 기술을 이용한 복합재료의 결함 검출 정량화 연구,” 비파괴검사학회지, Vol. 31, No. 2, pp.150-156, 2011.
- [26] 김진원, 윤경원, 정현철, 김경석, “ 원전 배관 감육 결함 검사를 위한 IR

열화상시험 조건 결정,” 비파괴검사학회지, Vol. 32, No. 1, pp.12-19, 2012

- [27] 윤경원, 김동률, 홍동표, 정현철, 김경석, “ 적외선 열화상 카메라를 이용한
원전 소구경 감육 배관의 결함 검출,” 비파괴검사학회지, Vol. 33, No. 1, 2013
- [28] 최만용, 김원태, “ 적외선열화상검사,” 노드미디어, 2012
- [29] 정용택, “ 적외선센서의 원리와 응용,” 인포더북스, 2012
- [30] 정용택, “ 물리보안용 센서의 원리와 응용,” 인포더북스, 2012
- [31] 홍경희, “ 기하광학,” 두양사, 2012

감사의 글

대학원에 입학한 이후 벌써 2년이라는 시간이 지났습니다. 조선이공대학, 조선대학교로의 편입, 이렇게 4년이라는 학업을 마치고 2년이라는 대학원에 취업의 늪에서 잠깐이나마 쉬려고 했던 저의 모습이 참 안타까웠습니다. 하지만, 저를 이렇게 까지 인도해 주셨던 김경석 교수님께 감사드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 졸업 논문을 심사하여 주신 김재열 교수님, 장완식 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

우리 4명의 동기들과 2년 동안의 바빴던 여건에서도 꼼꼼히 도와주시고 챙겨주신 정현철 박사님, 이론과 응용 새로운 것을 창조하시고 일일이 화를 내가며 가르침을 주신 장호섭 박사님, 대학원에 들어와서 많은 도움과 요령을 알려주신 김우진 선생님께 감사한 말씀을 전해드립니다. 모두들 건강하시고 앞날의 좋은 일들만 가득하시고 건강하시길 기원합니다.

공부도 못하고 눈치도 없었던 대학원에 들어와 힘들고 지칠 때마다 가족같이 동고동락했던 실험실원들에게 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 쓸 때 없이 고집부리고 동생들 사주기 아까워하는 만형 용찬이형, 만형은 아니지만 실험실에서 제일 바빴던 찬식이형, 고집은 있지만 최선을 다하고 비밀이 많았던 동율이형, 이들 모두가 있어서 저의 대학원 생활이 재밌고 힘들어도 생활할 수 있는 활력소가 되었던 것 같습니다. 언제나 좋은 일들만 가득하고 사회생활에서의 잡초처럼 끈기가 있는 사람이 되었으면 좋겠습니다.

대학원 생활의 절반을 마무리하고 절반을 시작하는 유흥계의 찬근이형, 매일매일 건성건성 하지만 앞으로 창창한 친구 상우 앞으로도 남은 대학원 생활 마무리 잘하시고 좋은 일들만 있기를 기원합니다. 아참 풋내기 경욱이도 힘내라.

마지막으로, 우리 가족인 할머니, 아버지, 상원이, 보라, 그리고 새로운 가족이 된 이빠, 특히 세심하게 일일이 챙겨주신 아버지에게 제대로 된 효도 한번 해주지 못해서 죄송합니다. 앞으로 대학원이라는 준사회를 발판삼아 한결 더 무거운 마음가짐과 잡초 같은 끈기를 가지고 이 세상을 살아가겠습니다. 이빠가 우리 집에 들어서 아버지의 버팀목이자 웃음을 줄 수 있어서 애완견이지만 가족이라고 생각합니다. 고맙고 앞으로도 우리 집의 재간둥이가 되었으면 좋겠다. 그 존재만으로도 존경스러운 가족과 실험실의 모든 사람들에게 깊은 고마움을 전하며 이 논문을 바칩니다.

저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재 공학과	학 번	20117114	과 정	석사
성 명	한글: 윤 경 원 한문: 尹 敬 遠 영문: Yun, Kyung Won				
주 소	광주광역시 남구 월산4동 982-28번지				
연락처	E-MAIL: ksk1149@naver.com H.P: 010-3709-3137				
논문제목	한글: 적외선 열화상 기법을 이용한 감육 결함 배관의 결함 검출 최적측정 조건 평가 영문: Evaluation of Optimal Measuring Condition in the Flaw detection of Wall-Thinning Defect pipe by Infrared Thermography				

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()

2012 년 11 월 30 일

저작자: 윤 경 원 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하