



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](#)

2009 년 2월
석사학위논문

위상잠금 적외선열화상을 이용한
응력해석에 관한 연구

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김민근

위상잠금 적외선열화상을 이용한
응력해석에 관한 연구

A study on stress analysis by Lock-in infrared
thermography technique

2009년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김민근

위상잠금 적외선열화상을 이용한
응력해석에 관한 연구

지도교수 김 경 석

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2008년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 민 근

金旻根 學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 梁光永 印

委員 朝鮮大學校 教授 金庚錫 印

委員 朝鮮大學校 教授 張完植 印

2008年 11月

朝鮮大學校 大學院

- 목 차 -

LIST OF TABLE	III
LIST OF FIGURE	IV
ABSTRACT	v
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. 적외선현상	5
2. 적외선특징	8
3. 흑체와 방사율	9
제 2 절 적외선영상 시스템의 원리	13
제 3 절 적외선센서의 원리 및 종류	16
제 4 절 열탄성 효과	18
제 5 절 위상잠금 기법	21
제 6 절 데이터 중첩(Data superposition)이론	22

제 7 절 상관함수(Correlation function)	25
제 3 장 피로시험편의 응력해석	26
제 1 절 실험장치	26
제 2 절 실험방법	29
제 4 장 실험결과	32
제 1 절 주파수 변화에 따른 응력해석 실험	32
1. 유한요소해석	32
2. 수치해석	33
3. 응력 측정구간 선정	35
4. 열탄성 응력측정	36
제 2 절 하중 변화에 따른 응력해석 실험	40
제 5 장 결 론	44
참고문헌	46
감사의 글	48

- LIST OF TABLE -

Table 2-1 IBC of standard(IEC usage Sect 841)	7
Table 2-2 Typical values of K_m for some common engineering materials	
20	
Table 3-1 Specification of fatigue testing machine	27
Table 3-2 Specification of infrared thermography system	27
Table 3-3 Material property of SM 45C(AISI 1045)	30
Table 4-1 The plate specimens of thermoelastic stress and temperature evolution	39
Table 4-2 The circle hole specimens of thermoelastic stress and temperature evolution	39
Table 4-3 Verification of thermoelastic stress and temperature evolution to 15 kN loading signal	43
Table 4-4 Verification of thermoelastic stress and temperature evolution to 20 kN loading signal	43

- LIST OF FIGURE -

Fig. 2-1 Spectrum of an electronic wave	4
Fig. 2-2 Relation between Blackbody and temperature	6
Fig. 2-3 Application of the infrared thermography technique	8
Fig. 2-4 Separation of an emissivity	9
Fig. 2-5 Principle of an emissivity of the applied object	10
Fig. 2-6 Radiation energy of the blackbody	12
Fig. 2-7 Blackbody effect of a hole	12
Fig. 2-8 Effect of penetration	13
Fig. 2-9 Detection principle of the IRT	13
Fig. 2-10 Temperature calibration	15
Fig. 2-11 Wave range of infrared detector to each detector material	17
Fig. 2-12 Signal processing of Lock-in infrared thermography	21
Fig. 2-13 Data overlap algorithm	24
Fig. 3-1 Fatigue machine system	26
Fig. 3-2 Infrared thermography system	26
Fig. 3-3 Configuration of Experiment system	28
Fig. 3-4 Experimental setup	29
Fig. 3-5 Performance graph of fatigue testing machine	30
Fig. 4-1 Stress analysis to FEM	31
Fig. 4-2 Stress concentration factor of circle hole plate specimen	34
Fig. 4-3 Establishment of a temperature measurement section	35
Fig. 4-4 Temperature evolution to each frequency	36
Fig. 4-5 Thermoelastic stress values to each frequency	37
Fig. 4-6 Thermoelastic stress values to each frequency (15 kN)	41
Fig. 4-7 Thermoelastic stress values to each frequency (20 kN)	42

ABSTRACT

A study on stress analysis by Lock-in infrared thermography technique

Kim, Minkwen

Advisor Prof. Kim, Koungsuk Ph.D.

Department of Advanced Parts and Materials
Engineering, Graduate School of Chosun University

Fatigue behavior is strongly affected by the environment, material, and loading conditions. The process of fatigue can be categorized into three stages: crack initiation, growth, and final fracture. Non-destruction evaluation (NDE) of fatigue damage is of critical importance for life assessments and structural integrity evaluations. Several NDE methods, including ultrasonics, acoustic emission, and thermography, have been used to monitor fatigue damage. This paper aims to describe thermal stress measurement using Lock-in thermography as a non-destructive testing method with real time and non-contact technology. Due to the first and second principles of thermodynamics, there is a relationship between temperature and mechanical behaviour laws. Lock-in thermography is classically used to measure linear thermo-elastic effect to evaluate stresses in structure under periodic, random or transient loading condition. For this study, the followings are performed to analyse and to locate thermo-mechanical mechanism in fatigue fracture specimen materials and structures.

This paper describes stress analysis of smooth plate and circle hole-notch

plate by lock-in thermography. Temperature change of specimen under cyclic loading is negatively proportional to the sum of principle stress change and surface temperature measured by lock-in thermography is estimated to stress with thermoelastic equation. The infrared thermography test is conducted to measure the stress distribution resulted from the change of loading. The material considered in this paper is the SM 45C(AISI 1045). The fatigue tests are performed at $f_L=40 \sim 80$ Hz with a stress ratio equal to zero. and a maximum stress is 246.91 MPa on a smooth plate and a dynamic stress concentration factor is an 2.5 on a circle hole-notch plate in the theoretical stress value. Since this stress range is smaller than the static yield stress. A black paint layer has been applied to the specimens to obtain an emissivity close to 1. The paint must be uniformly applied. In case of the infinite iteration loading for material, surface temperature is more increase than resolution of infrared system and the thermal conduction can be neglected after about 20000 cycles on that specimens. At this time, stress is measured with thermography system and Temperature fluctuation. The theoretical stress values in the smooth plate specimens were evaluated 246.91 MPa and measured as 231.28 MPa in the Lock-in infrared thermography test. The theoretical stress concentration factor in the circle hole specimens is evaluated as 2.5 and measured as 2.08~2.48 in the Lock-in infrared thermography test. The average of test results is evaluated or measured as 2.26. In the case of the plate specimen, The error between infrared thermography test and FEM is evaluated as 4 %, which has good agreement. In the case of the circle hole specimen, The error between infrared thermography test and FEM is evaluated as 14 %, which has good agreement.

In this paper, we measure the stress distribution of structure designed

under the transient condition using the Lock-in infrared thermography and predict the stress value and the dynamic stress concentration factor based on the stress distribution. In the test, test results shows the change of stress distribution resulted from the frequency change measured. The stress value and the dynamic stress concentration factor resulted from the change of amplitude at frequency of 40~80 Hz are estimated and then the value is compared with results of finite element analysis. The relative measuring error is measured as 4 % because the spatial resolution of detection device is so limited and experimental system does not completely meet the thermal parallel condition of specimen.

The many advantages of infrared thermography such as non contact, whole field, insensitivity of environmental vibration enables its user to measure the stress of small and micro structure, without shape restriction.

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경

파장이 가시광선보다 길고 전파보다 짧은 전자파를 적외선이라 부른다. 온도를 가지고 있는 모든 물체는 그 온도에 대응하는 복사에너지를 방출하게 되며, 적외선 열화상기술(Infrared thermography: IRT)은 이 방출된 에너지량을 측정하여 검출 에너지량과 온도의 상관관계로부터 물체의 온도화상을 제공한다. 1960년 적외선 열화상기술이 개발되었고 초기에는 단일 검출소자에 의해 스캐닝 방식으로 온도영상을 구현하였으나, 현재는 어레이(array)방식의 고감도 적외선 검출소자와 화상처리기술의 발전을 배경으로 비파괴 진단에서 평가기술까지 다양한 산업분야에서 활용되고 있다. 일본 비파괴검사협회 규격 (NDIS 3005)에 의하면 적외선 카메라와 적외선 열화상기술의 구별은 물체로부터 방사되는 적외선 강도분포 영상으로 표시하는 것을 적외선 카메라, 이 강도분포를 온도로 환산하여 표시하는 기능이 부과되어 있는 것을 적외선열화상기술이라고 정의하고 있다. 적외선 열화상기술의 성능이 급격히 향상됨과 동시에 고분해능, 고정밀도, 고속 측정이 가능하게 되면서, 과학기술 및 산업분야에서 다양하게 응용되고 있다. 2008년 3월 미국 올랜도에서 열린 thermosense XXX에서 일본 오사카대학 Sakagami 교수는 열탄성효과를 이용하여 실제 교량구조물에 적용하여 현장적용 가능성을 제시하였으며, 이를 기반으로 기업체와 상용 시스템 개발을 추진하는 것으로 파악되고 있으며, 유럽의 경우 (독일 stuttgart 대학교, 이탈리아 페루지아 대학교) 실험실 단위로 적외선 검출기반의 응력해석 시스템이 개발되어 사업화를 위한 연구가 추진되고 있으며, 현재 자동차 산업에서 빠르게 기술 도입을 추진하여 성공적인 사례가 보고되고 있다. 향후 이러한 성공적 사례를 기반으로 타 산업으로 확대가 급속히 이루어지고 제품 상용화가 가속화 될 것으로 예상되었다. 원자력 산업에서 응용은 압력용기 재질의 피로손상 연구에 가장 활발하게 이용되고 있다. 미국 Tennessee 대학교의 Liaw 교수는 미국과 대만으로부터 연구비를 지원 받아 고온에서 압력용기 시험편 (SA533B112)에 대해 피로한계 예측을 위한 시험연구를 수행하였으며, 인도 Venkatraman 박사는 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 검사기술 또한 국가 연구소와 대학 등에서 현재 연구 중이다.¹

물체 표면 온도 분포 측정에 기초한 비파괴 평가·모니터링 기술은 적외선열화상의 응용이 성공을 얻은 분야 중 하나이다. 적외선열화상에 의한 비파괴 평가 기술은 결함 평가를 위한 비파괴 검사 기술과 적외선 응용 측정 기술로 크게 나뉜다. 전자는 결함의 존재에 기인하는 재료 표면의 온도 변화 영역을 검출·측정함으로써 그 변화의 원인인 결함을 검사하는 열적 비파괴 검사 방법이다. 또한 후자는 재료에 하중이 부과되었을 때의 열탄성 효과에 의한 온도 변동을 적외선열화상에 의해 측정함으로써 재료에 작용되고 있는 응력 분포를 가시화 측정하는 것이다. 최근에는 탄성영역 내에서 응력분포해석 기술을 소성영역으로 확대하면서 피로한계치분석 기술로 확장하고 있다. 본 연구에서는 적외선열화상기술에 의해 반복하중을 받는 평판피로시험편에 대해 응력해석을 수행하고자 한다.

제 2 절 연구목표 및 내용

대부분의 기계 및 구조물은 사용 시 반복하중 상태에 놓이는 경우가 많게 되고 이에 의해 반복응력이 걸리게 된다. 이 때 반복응력이 그 재료의 정적강도(static strength)보다 상당히 작은 값이라도 오랫동안 반복되면 파괴에 이르게 된다. 이러한 현상을 피로파괴(fatigue failure)라고 한다. ASTM에 나타난 피로의 정의는 다음과 같다.

“반복응력이나 반복변형을 받아 구조물의 일부에서 점진적인 영구변형이 생기고 상당한 기간 동안 반복되면 균열이 생기거나 완전파괴에 이를 수 있는 현상”

일반적으로 소재에는 불순물 또는 아주 작은 결함 등이 존재하게 되고 기계 가공 시 생기게 되는 흠이 있게 되는데 이들로부터 피로파괴가 시작되는 것으로 알려져 있다. 특히 금속은 수많은 결정입자가 임의의 방향으로 배열되어 있어 그들 중 어떤 입자들에는 슬립(slip)현상이 쉽게 일어날 수 있는 방향으로 응력이 걸리게 된다. 따라서 반복응력이 작용할 경우 이들 입자들에 슬립현상이 진행되어 피로파괴가 시작되게 된다.

반복하중이 걸리는 예를 살펴보면 철교의 경우 50년 사용기간에 약 200만회의 반복하중이 걸리며 고속회전기계의 경우 수십억회의 반복하중이 사용 수명기간 내에 걸리게 된다. 피스톤형 제트 엔진의 크랭크축에는 200시간의 비행시간 내에 2000만회 반복응력이 걸리게 되고 10년간 계속 사용되는 증기터빈의 축에는 약 160억 회, 블레이드에는 2500억 회의 반복응력이 걸리게 된다. 이렇게 반복응력이 걸리는 모터 축, 볼트, 스프링, 치차, 철로, 터빈부품, 비행기 및 자동차 부품 등을 설계 시에는 피로가 필수적으로 고려되어야 한다.

피로에는 단순히 하중만 반복적으로 작용하는 경우와 사용환경, 즉 부식, 고온, 저온환경 등이 함께 작용한 경우 및 반복적인 마찰(fretting)에 의한 경우도 있게 되어 실제 조건에 따라 시험사항이 고려되어야 한다. 또한 실제 구조물에는 임의 크기의 반복하중이 작용하게 되나 일반적으로 시편 시험에는 일정한 크기의 반복하중으로 대체시키며 자동차 구조시험 등 실물시험에는 실제 임의크기의 반복하중으로 시험을 행한다. 이러한 반복하중의 시험의 경우 대체적으로 스트레인게이지를 부착하여 응력을 측정하는 시스템을 기존에 많이 이용하였다. 스트레인지 기법은 대상체의 중요 위치에 스트레인게이지를 부착하여 점(point)단위의 결과를 측정하고, 측정결과를 보간하여 구조물 전체로 확장하여 예측하곤 하였다. 그러나 이미 발생한 결함에서 응력집중, 용접 접합부와 같은 복잡한 응력분포에서 점 단위의 해석결과를 면(area)단위로 확장하는데 기술적인 한계가 있다. 또한 고온, 고방사선 등의 환경에서 접촉식 검사기법의 기술적 한계가 있기 마련이다. 본 연구에서는 적외선 열화상을 이용한 비파괴적 응력측정 방법을 소개하고자 한다. 하중을 받는 물체는 변형과 함께 일부의 에너지를 적외선(열)에너지로 방사하고, 방사된 적외선은 이에 상응하는 응력으로 환산 가능하다는 이론적인 내용을 토대로 비파괴적으로 응력을 측정하는 기술이다. 이를 열탄성응력이라 한다. 적외선 열화상 기술은 열탄성효과(Thermoelastic effect)로부터 구조물에 발생하는 주응력을 직접 측정 가능하며, 비접촉으로 1 m의 거리에서 1 mm 크기의 스트레인게이지 수만개의 정보를 실시간으로 동시에 제공한다. 이와 같은 열탄성효과(Thermoelastic effect)를 이용한 응력해석은 적외선 열화상 카메라의 개발과 함께 급격히 발전하였으며, 재료의 온도변화를 2차원 열화상으로 표현함으로써 재료의 응력상태를 비접촉, 전면(Full-field) 계측이 가능하게 하였다.

본 연구에서는 반복하중을 받는 평판 피로시험편에 대한 응력을 적외선열화상 기

법을 이용하여 응력을 측정, 그에 대한 데이터를 이론적인 응력값과, 유한요소해석과 비교를 통하여 신뢰성을 검증하고자 하였다.

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.

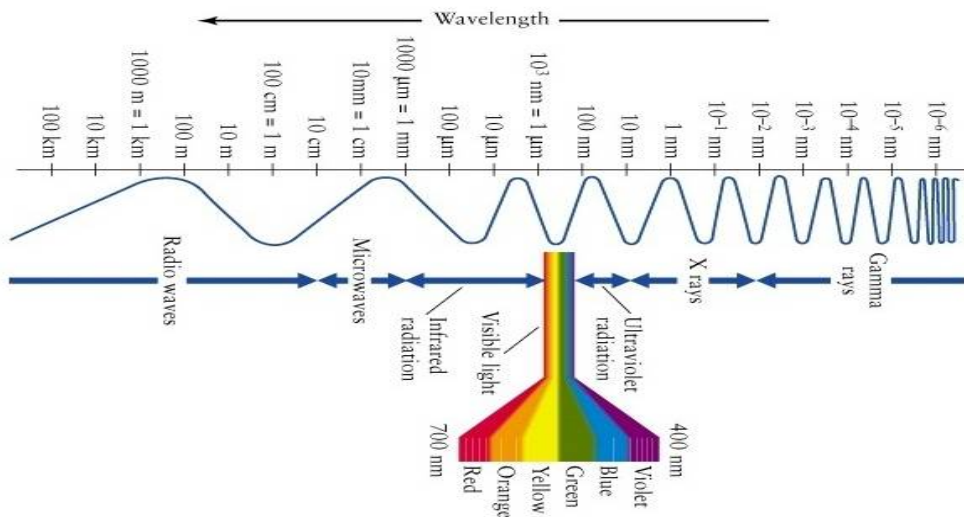


Fig. 2-1 Spectrum of an electronic wave

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 영역

에 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. 영하 273℃ 이상의 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 해가 된다. 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 0.5 이하의 값을 가진다.

적외선과 온도와의 관계를 알려면 흑체의 적외선 방사현상을 이해해야 한다. 적외선 방사는 역사적으로 볼 때 1800년대 초 경 영국의 윌리엄 허셸(William Herschel)경에 의해 태양광의 분광 시험 중 적색 부분보다 파장이 긴 부분이 있으며, 인체에 온열효과를 가져오는 파장을 발견하였다. 이 물리 현상은 1900년대 초 창기에 여러 물리학자들에 의해 연구되었으며, 그 후 적외선 파장 중 온도를 이용하려는 이론은 1890~ 1900년초 플랑크(N. Planck)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.

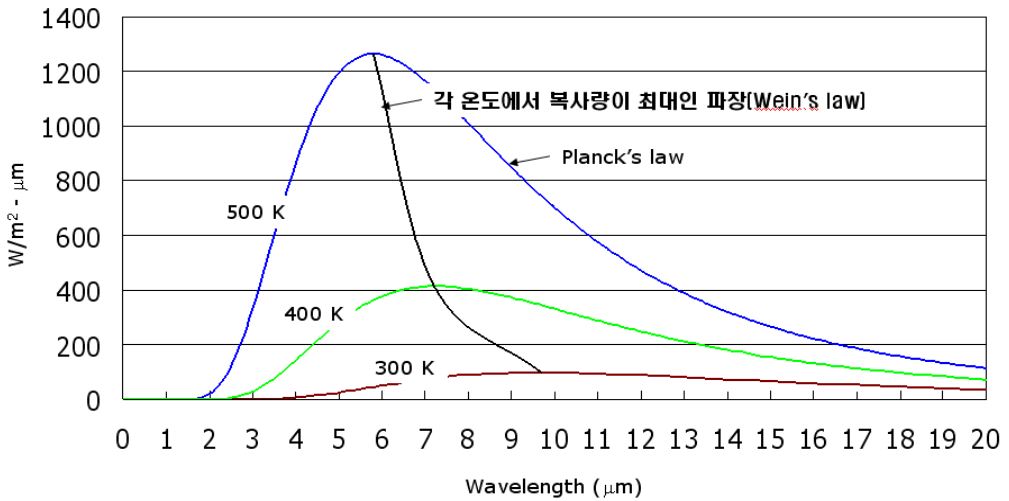


Fig. 2-2 Relation between Blackbody and temperature

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 °C)인 상온에서는 파장의 최대값이 10 μm 근처이며, 500K(223°C)의 온도에서는 5 μm 근처에서 최대값을 가진다.

나. 적외선의 구분

적외선 파장으로 보면 매우 넓은 영역을 차지하기 때문에 몇 개의 영역으로 나누어서 설명하고 있다. 적외선은 가시광선(Visible Wave)보다 파장이 길고 마이크로광선(Micro Wave)보다 짧은 보통 0.8 ~ 1000 μm 파장 대역의 전자파를 말하며, 국제전기표준회(IEC)의 용어집에 의하면 적외선은 다음과 같이 분류 하였다.

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

구분 명 칭 파 장 구 분	파장구분
Short Wave Infrared Radiation(근 적외선)	약 0.8 μm ~ 2 μm
Medium Wave Infrared Radiation(중간 적외선)	약 2 μm ~ 4 μm
Long Wave Infrared Radiation(원 적외선)	약 4 μm ~ 1000 μm

1) Short Wave Infrared radiation(근 적외선)

적외선 중 가시광선에 가장 근접한 파장 범위를 적외선이라 하며 가시 광선에 근접하기 때문에 광전수전기(빛 검출기)로 검지할 수 있는 범위의 적외선 방사를 말한다. 파장 범위는 0.8 μm ~ 2 μm 이며 인체의 피부에 대하여 가장 깊게 투과하기 때문에 인체에 온열 효과를 느끼게 하는 파장 영역이다.

2) Medium Wave Infrared radiation(중간 적외선)

적외선 Wave중 중간 범위의 영역으로 파장 대역은 2 μm ~ 4 μm 의 범위의 영역으로 방사체는 공기 중에서 직접 가열하는 방식의 적외선 방사에너지는 이 파장 대역을 주로 방사하는 것이 많다.

3) Long Wave Infrared radiation(원 적외선)

적외선 파장중 Microwave와 가장 근접한 파장이며 파장 대역은 4 μm ~ 1000 μm 이며 주로 고분자 재료의 가열이나 유기 용체의 건조에 이용되는 파장이다. Long wave 한계에 있는 파장 1000 μm 는 Micro 파의발생 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 500 K에 해당하는 적외선이 최대로 나오는 파장 영역이며, LWIR은 300 K에 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.

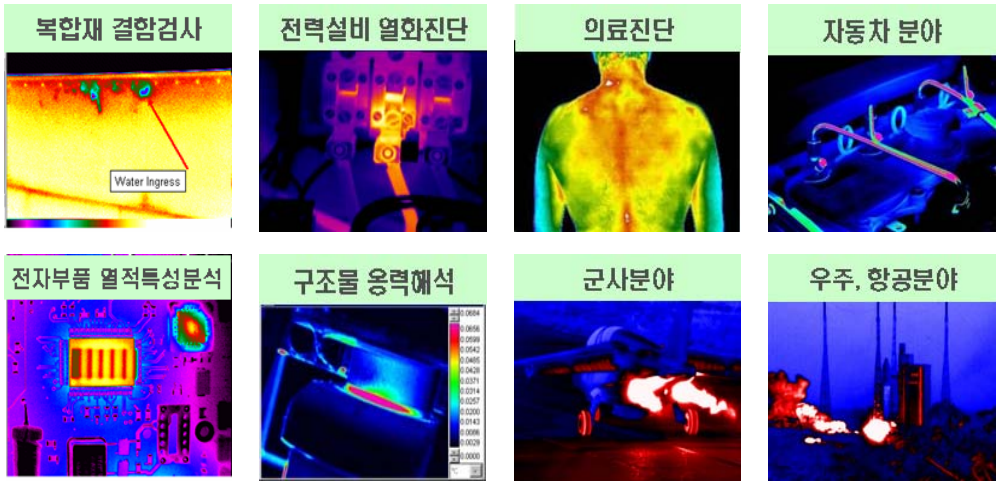


Fig. 2-3 Application of the infrared thermography technique

2. 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.

나. 열방사(Thermal radiation)

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

다. 완전 방사체(Full radiator)

물체에 입사하는 방사의 파장, 입사하는 방향, 편광등에 관계없이 입사된 방사를 전부 흡수하는 물체를 말한다. 또한 어떤 온도의 전파장 영역에 있어서 최대 열방사를 하는 방사체를 흑체(Black Body) 및 플랑크(Planck)방사체라고 한다. 하지

만 현실적으로 완전흑체는 존재하지 않으며 다만 이 상태에 근접하는 방사체를 보통 흑체라 하여 완전 방사체로 규정하고 있다.

3. 흑체와 방사율

가. 방사율

적외선 방사와 온도와의 관계는 플랑크(Planck)법칙에서 정립된 바와 같다. 이 법칙은 흑체방사에서 가능하며, 일반적인 물체들 즉 철, 동, 청동 스텐, 애자등 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 방사율이다. $\epsilon=1$ 인 물체를 흑체(Black Body)라고 하고 $\epsilon(\lambda) = \epsilon$ 의 물체를 회체(Gray body)라하며 $\epsilon(\lambda)$ 가 파장에 따라 상이하게 되는 물체를 선택 방사라 한다. Fig. 2-4는 각각의 특성에서 물체의 방사율을 나타내었다.

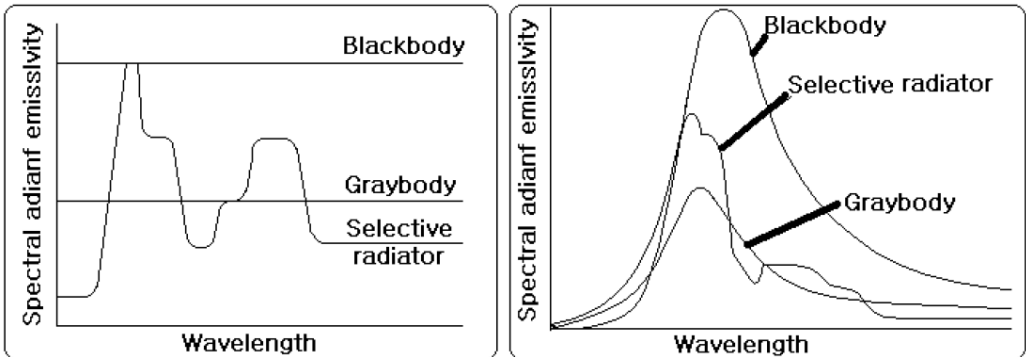
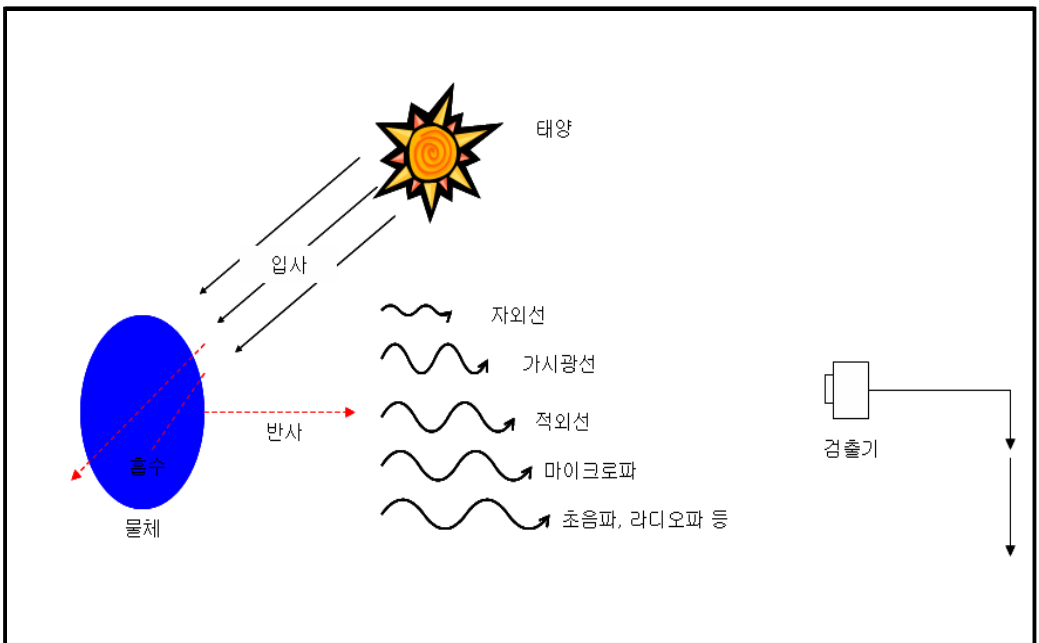


Fig. 2-4 Separation of an emissivity

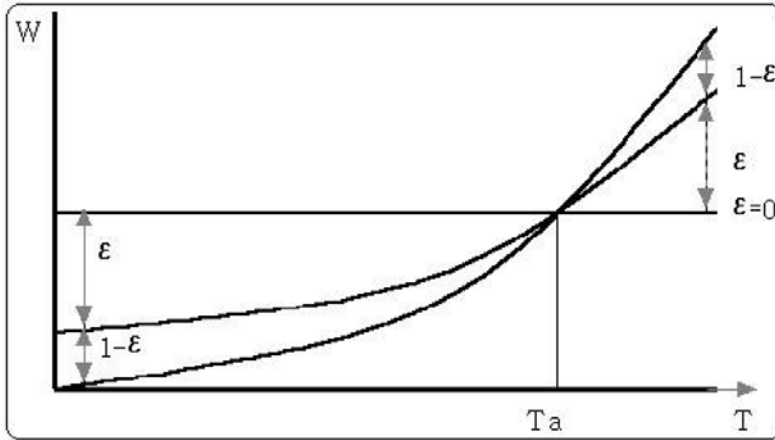
나. 적외선의 흡수율(방사율)

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 $\varepsilon=1-\beta$ 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 $0 \leq$ 방사율(ε) ≤ 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, 검정페인트는 방사율이 높고 온도측정시 정밀하고 알루미늄, 은 등은 방사율이 낮고 온도측정이 어렵다. 이러한 금속물질의 방사율이 낮아 측정이 어려운 물질은 흑체에 가까운 무광택 스프레이($\varepsilon=0.95$) 도포를 통하여 방해요인을 줄일 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 2-5 Principle of an emissivity of the applied object

Fig. 2-5에서처럼 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 ε = 1의 경우는 주위 온도 영향을 거의 받기 때문에 입사에너지가 분산되어 물체의 온도는 주위 온도와 같게 되어 간다.

다. 흑체의 경우(ε=1)

ε=1인 물체는 원칙적으로 존재하지 않지만 이에 근접하는 것이 흑체다. 흑체에서 방사시킨 적외선 에너지를 계산한 식을 아래와 같이 나타내었다.

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

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

$$\therefore W_i = W(T)$$

입사된 빛이 나간 방향이 없는 형태(원주, 구)등에 있어서 입구 부분에서 방사율이 1인 흑체가 있다. 따라서 흑체는 적외선 카메라에서 온도를 검출하는 표준이 된다.²

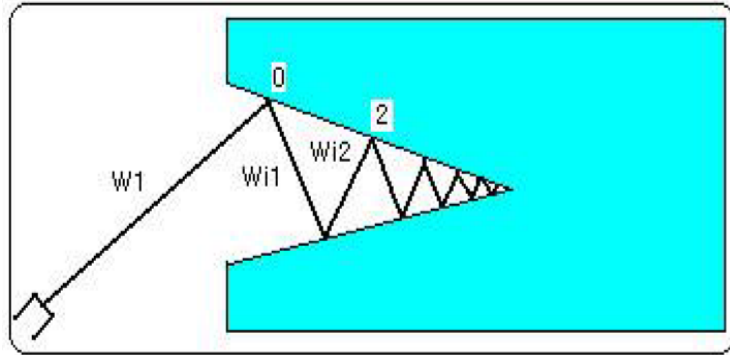
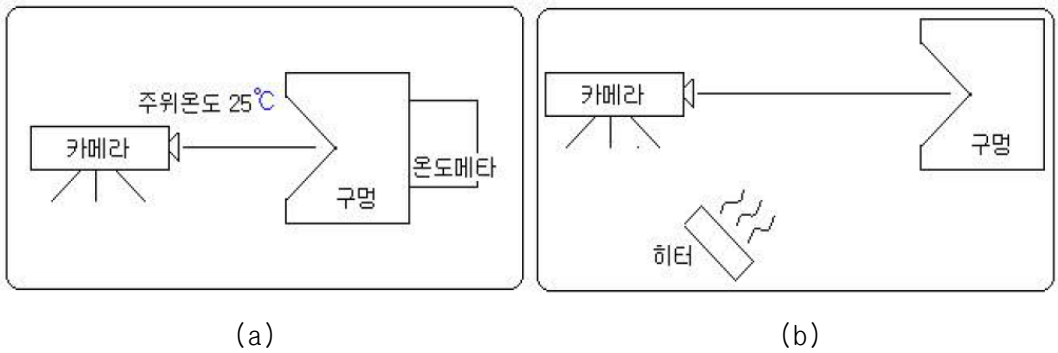


Fig. 2-6 Radiation energy of the blackbody

라. 구멍의 흑체 효과

주위 온도 25°C 상태에서 구멍이 폐인 흑체에 자체 가열을 사용하여 40°C로 가열하고 전원을 제거하면 구멍 부분의 온도는 다른 부분보다 높아진다. 이는 구멍부분의 방사율이 다른 부분보다 높기 때문에 방사에너지가 크다.

Fig. 2-7(b)와 같은 물체에 외부에서 히터를 이용하여 100°C까지 가열시키면 구멍 부분의 온도는 다른 부분보다 낮다. 이는 구멍 부분의 흡수율이 낮기 때문이며 즉 방사에너지가 적다.



(a)

(b)

Fig. 2-7 Blackbody effect of a hole

마. 투과의 영향

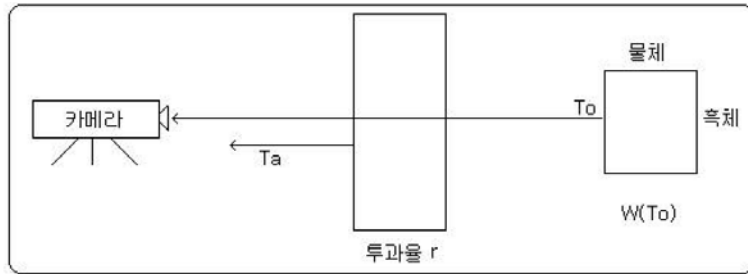


Fig. 2-8 Effect of penetration

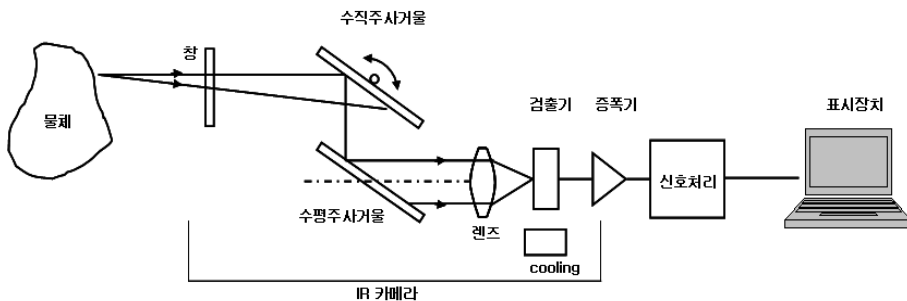
카메라에 입사된 에너지 W_i 는 $W_i = rW(T_0) + (1-r)W(T_a)$ 이상에 의해 적외선 카메라에 입사된 에너지 W_i 는 다음에 의해 계산되어지며 Fig 2-8은 방사율과 투과율과의 관계를 나타낸 것이다.

$$W_i = r[\epsilon W(T_0) + (1-\epsilon)W(T_a)]$$

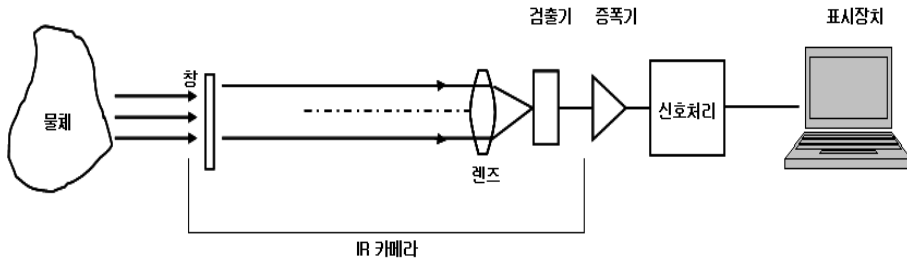
$T_a = T_{a1} = T_{a2}$ 의 경우, $W_i = r\epsilon W(T_0) + (1-\epsilon)rW(T_a)$ 이 된다.

즉, 방사율 (ϵ)과 투과율 (τ)을 같이 보정하여 온도측정이 가능하다. 흑체는 완전한 흡수체로 $\epsilon = 1$ 이 됨을 이미 설명한바와 같으며 전기설비를 구성하고 있는 물질은 여러 가지로 구성되어 있으므로 그 물질에 따라서 방사율 ϵ 을 조절하여야 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



(b) staring type

Fig. 2-9 Detection principle of the 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. 2-9(a)와 같은 수평, 수직 거울을 돌리면서 전체를 인식하는 주사 방법(scanning type)과 Fig. 2-9(b)와 같이 수평, 수직 거울 없이 인식하는 주시 방법(staring type)이 있다.

주사(Scanning)방법은 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 결론이 나온다. 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 픽셀에 해당하도록 설계되어 있다. 그러므로 센서의 소자 개수

가 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.

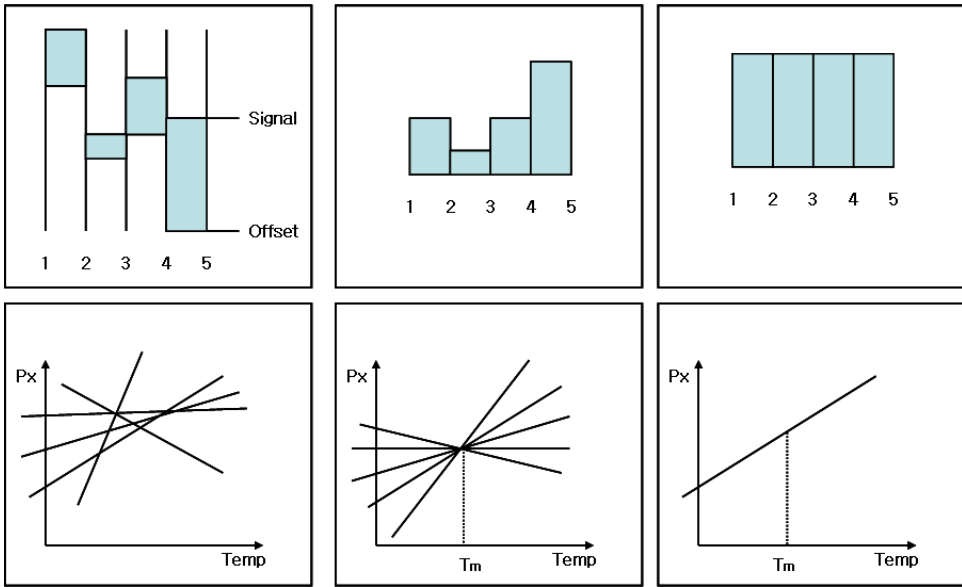


Fig. 2-10 Temperature calibration

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 신호처리기에서는 각 소자의 신호 크기를 보상해 주거나 반응을 하지 않는 소자의 신호도 보상해 주어 모니터에 깨끗한 영상이 구현되도록 해야 한다. 이러한 역할의 내용을 Fig. 2-10에 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 모

두 동일하게 나타나게 되어 깨끗한 상을 얻을 수 있는 것이다.

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°C)에서 작동한다는 단점이 있는 반면에, 열형재료들은 성능은 반도체에 비해 다소 떨어지지만 대부분 상온에서 동작한다는 장점이 있다. 그리고 반도체 재료들은 대부분 낮은 온도에서 작동하고 열형 재료들은 상온에서 동작하기 때문에, 작동 온도에 따라 냉각형과 비 냉각형으로 구분하기도 한다. 이러한 이유로 냉각이 필요한 양자형 재료들은 주로 군수용의 목적으로 연구되고 있으며, 비 냉각형인 열형 재료들은 민수용으로 개발 중에 있다.

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

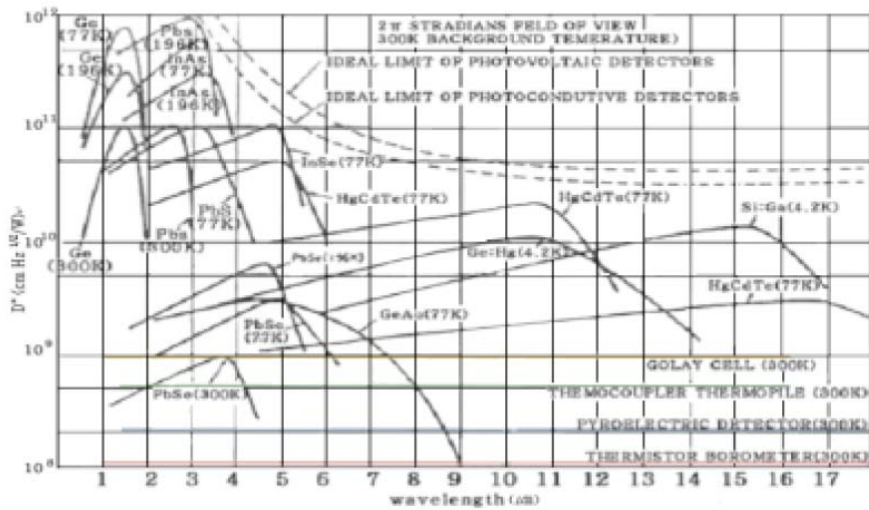


Fig. 2-11 Wave range of infrared detector to each detector material

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.^{3,4}

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

제 4 절 열탄성 효과

탄성 고체의 변형력 분포가 그 온도 상태에 따라 좌우되는 일을 말하며 탄성체 렌즈 안에 인장력과 압축응력을 받았을 때 그 물질의 가역의 전환의 기계와 열에너지 사이의 물질의 전환을 알게 된다. 단열곡선의 조건으로 유지시키고 그 첫 번째 응력 불변의 변화와 관계되어진 온도변화를 유지시키고 그 둘 사이에서 하중도수의 독립과 선형이다. 이것은 일반적인 기계에너지를 뒤집을 수 있는 위치이다. 이 응력 분석 기술로 알려진 SPATE(Stress Pattern Analysis by Thermal Emission)는 주기적인 하중아래의 물체 쿨링과 thermoelastic 열을 측정하는 것이다.

고체에 응력이 급격하게 작용하여 변형이 단열적으로 수행되는 경우, 온도 변화는 고체에도 동일하게 나타난다. 고체에 인장응력을 작용시키면 응력변동(Mechanical energy)에 비례한 온도 강하가, 반대로 압축 응력을 작용시키면 응력 변동에 비례한 온도 상승이 일반적으로 발생하는 현상을 열탄성효과(thermo-elastic effect)라

하며, Weber(1830년)의 강선을 이용한 실험 후, Kelvin(1853년)의 가역적 열탄성 효과의 이론이 정식화되어, 열탄성 효과에 따른 응력 측정기술의 기초가 되었다. 등방성, 탄성 요소에서 열응력과 변형과의 관계는 식(1)과 같다.

$$\Delta \varepsilon = \frac{(1-2\nu) \cdot \Delta \sigma}{E} + 3\alpha \Delta T \quad (1)$$

$\Delta \varepsilon$ = 주스트레인 합 변화

$\Delta \sigma$ = 주응력 합의 변화(Pa)

E = Young's modulus (Pa)

ν = Poisson's ratio

α = 선팽창계수 (1/K)

ΔT = 온도변화(K)

힘이 인가되고 탄성인 요소의 가역적, 단열적 행동의 열역학적 분석은 식(2)를 유도한다.

$$\Delta T = -\frac{3 \cdot T \alpha K \Delta \varepsilon}{\rho C_v} \quad (2)$$

T = 절대온도 (K)

K = 용적률 (Bulk modulus) (Pa)

α = 밀도 (Kg/m³)

C_v = 일정한 부피에서의 열용량(J·kg/K)

식(2)의 $\Delta \varepsilon$ 는 부피팽창으로, 구성요소에 부피 변화가 없다면, 탄성조건하에서 온도변화는 없을 것이다. C_v 와 정압 하에서의 열용량, C_p 사이의 관계를 사용하여, 기본공식 식(1)과 (2)로부터 열탄성 효과 식(3)을 유도한다.

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho C_p} \cdot T \cdot \Delta \sigma \quad (3)$$

식(3)은 Lock-in 열화상법의 단열조건이라는 가정 하에 가능하다. 열탄성응력 분

석에서 단열조건은 응력구조물의 주기적 로딩(>3Hz)에 의해 얻어진다. 이 경우 동적 평형상태(가역상태)는 에너지의 기계적 및 열적 형태 사이에서 유지된다. 식(3)은 부하된 하중의 변화에 의해 생성된 온도변화를 정량화 것으로, 음의 기호는 응력변동에 비례한 인장(tension)으로 온도의 감소를, 양은 압축(compression)으로 온도의 상승을 생성한다는 것을 나타낸다. 만약 단열조건이라면, 온도변화는 주응력 합의 변화에 비례하고, 열탄성 계수, K_m 는 식(4)와 같으며, Table 2-2 에 일반적인 기계구조물의 열탄성계수(K_m)의 값을 나타내었다.

$$K_m \equiv \frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} \quad (4)$$

Table 2-2 Typical values of K_m for some common engineering materials

Material	α (K^{-1})	ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	C_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	K_m (MPa^{-1})
Steel	1.20E-05	7800	490	3.14E-06
Cast Iron	1.00E-05	7800	500	2.56E-06
Titanium	8.55E-06	4428	545	3.54E-06
Inox	1.20E-05	7800	500	3.08E-06
Alu 42100	6.70E-05	2735	918	2.67E-05
Iron	1.21E-05	7870	441	3.49E-06
Epoxy	3.50E-05	1170	1040	2.88E-05
Polyester	8.00E-05	1140	1700	4.13E-05
Alumina	7.70E-06	3900	990	1.99E-06

결과적으로 탄성영역에서 내부응력변화에 따른 온도변화는 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$T = -K_m \cdot T \cdot \Delta\sigma \quad (5)$$

식(5)에서 온도변화를 적외선 열화상 기술을 이용하여 계측함으로써 물체의 응력변화를 예측하게 된다. 그러나 실제 기계구조물에 있어서 응력변화로 인한 온도변화는 미세하며, 그 온도변화를 측정하기 위해서 Lock-in IRT가 이용된다.

제 5 절 위상잠금 기법(Lock-in IRT)

위상잠금(Lock-in) 기법은 기계구조물에 있어서 응력변화로 인한 온도변화가 미세하여 미세한 온도변화를 측정하기 위한 분해능을 높이기 위한 방법이다.⁵⁻²⁰

위상잠금 적외선 열화상 기법은 만능재료시험기(MTS Co.)통해 조화함수형태로 대상을 가진하고, 대상체에 입사한 적외선 에너지를 동기화된 검출소자를 통해 받아들여 신호처리를 통하여 획득하고자 하는 위상, 진폭을 구하는 방법이다. 이 기법은 Fig. 2-12과 같다.

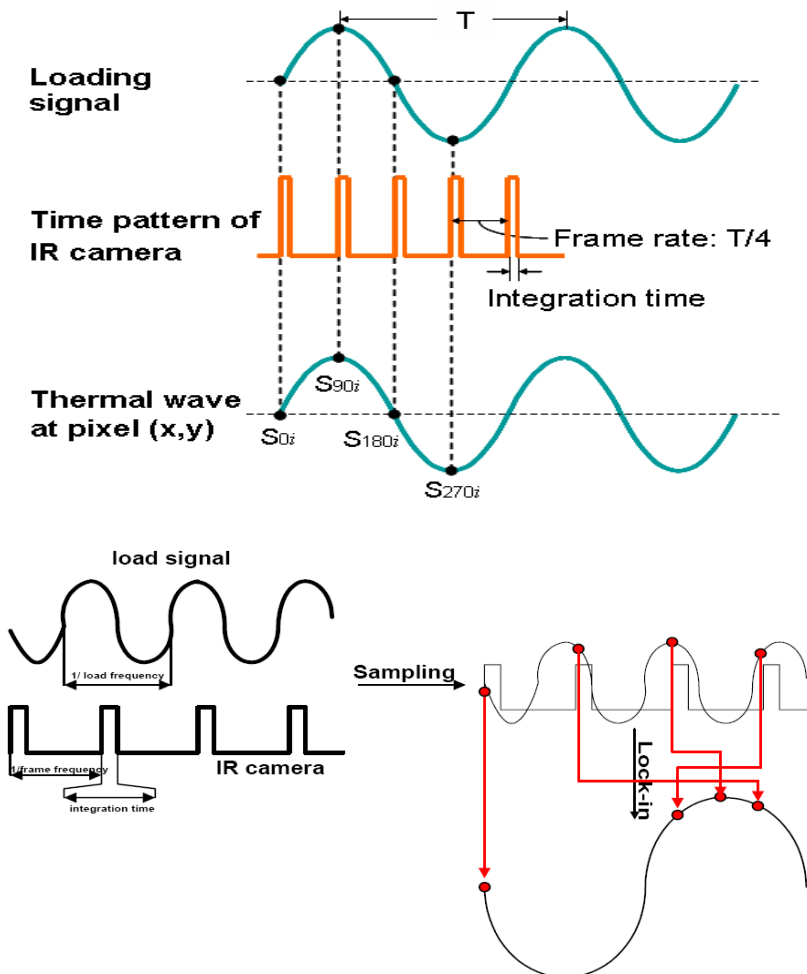


Fig. 2-12 Signal processing of Lock-in infrared thermography

제 6 절 데이터 중첩(Data superposition)이론

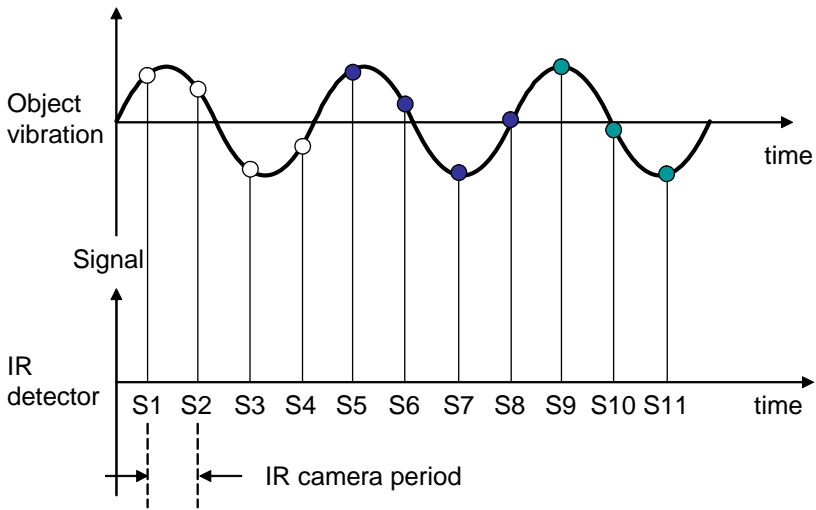
Nyquist Theory이란 디지털화된 신호로부터 원래의 아날로그 신호를 완전히 구연하기 위해서는 아날로그 신호를 샘플링 할 때 그 신호가 가지고 있는 최대 주파수보다 최소 2 배 이상으로 샘플링 하여야 한다. 즉 얻고자 하는 주파수 값이 10 Hz 이면 20 Hz로 샘플링을 해야 한다.

어떤 소리를 샘플링할 때에 소리가 왜곡되지 않으려면 그 음이 가진 가장 높은 frequency의 2 배 이상의 rates로 샘플링 해야 한다는 것이다. 그렇게 하지 못했을 경우에는 Aliasing이란 오류가 발생한다. 어떤 소리의 최고 frequency가 20 kHz일 경우 40 kHz 이상의 레이트가 필요하고, 이를 30 kHz로 샘플링 했을 경우엔 20 khz에서 나와 정상인 소리가 40-30=10 kHz만큼 원래의 20 kHz에서 더 내려간 곳에 엉뚱한 소리가 나온다는 것이다. 인간의 가청주파수가 20~22 kHz란 점을 상기할 때, CD의 샘플링 레이트가 44,100 Hz란 점도 이와 관련이 있다.

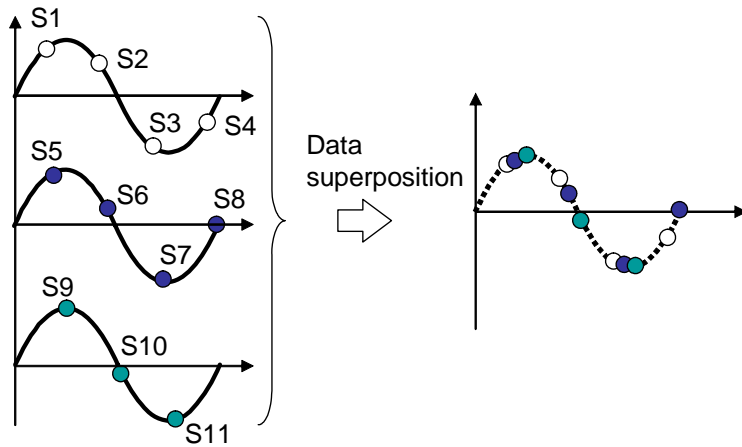
이러한 내용은 위상잠금 기법에 적용되어 질 수 있다. 즉, 만능재료시험기(MTS Co.)통해 조화함수형태로 대상체를 가진하고, 대상체에 동기화된 검출소자를 통해 받아들여 신호처리를 통하여 획득하고자 하는 위상, 진폭을 구하는 경우, 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해 만능 재료 시험기의 가진 주파수의 2 배 이상의 샘플링으로 검출소자를 통해 데이터를 획득해야 더욱 더 정확한 결과를 얻을 수 있다는 것이다. 예를 들어 만능 재료시험기의 가진 주파수가 30 Hz라면 적외선 열화상 카메라의 검출소자의 샘플링 값은 이론적으로 60 Hz이상이어야 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있다는 것이다.

아날로그 신호들은 신호의 파형의 특징으로 만들어진 주파수 성분을 포함한다. 만약, 너무 낮은 신호율로 샘플링 되어진다면 확실한 신호를 놓칠 수 있다. 그것을 디지털 Equivalent로 바꾸어져야한다. 느린 샘플링은 낮은 주파수 성분의 신호를 측정하거나 부주의하게 존재하지 않는 신호(노이즈)를 측정할 때 높은 주파수의 성분을 놓치는 경향이 있다. 이것을 Aliasing Error라 한다. Nyquist 이론은 Aliasing Error를 최소화하기 위한 필요로 하는 Sampling rates를 이해하는데 도움이 된다. IR 검출소자 보다 높은 일정 주파수로 조화 운동을 하는 물체에 대해 낮은 주파수를 갖는 IR 검출소자가 IR 신호를 검출할 때, Nyquist 주파수 이론에 의해 Fig. 2-13(b)와 같이 정확한 신호를 측정할 수 없게 된다. 실제 적용 조건에

서는 검출소자의 주파수는 물체 주파수의 10배 내외를 요구하고 있으므로 제한된 Frame rates(Sampling rates)으로 측정이 불가능 하다. 즉, 30 Hz로 조화 진동하는 물체의 신호를 정확히 측정하기 위해서 IR 검출소자는 300 Hz의 Frame rates를 요구하게 되는데 이는 낮은 frame rates의 검출소자로 측정할 경우 aliasing 또는 시간평균 효과 등으로 정확히 온도를 측정하지 못하게 된다. 이를 위하여 조화운동을 하는 물체로 가정하여 Fig. 2-13(b)와 같이 각 파장내의 측정신호를 중첩함으로써 높은 sampling rates를 갖는 신호를 형성하게 된다. 30 Hz로 운동하는 물체의 열적 거동을 해석하기 위해 64 Hz(FFT의 효율성을 위해 2n을 사용)로 구동하는 중적외선 시스템에 대해 이 알고리즘을 적용하면 30 Hz의 한 주기에 대해 IR 검출소자는 2.1개의 신호를 획득하게 되고 4.7초 동안 물체를 측정하여 약 143개의 주기를 중첩함으로써 300 개의 sample를 갖는 한 개의 주기를 형성할 수 있다. 이 알고리즘은 물체가 조화진동을 하는 조건에서 적용이 가능한 제한요소가 있으나, 주파수 분해능 개선 효과는 매우 우수하다 할 수 있다.



(a) Signal acquisition by infrared detector



(b) Full period formation by data overlap

Fig. 2-13 Data overlap algorithm

하중변화에 따른 물체 온도변화는 매우 작은 값으로 나타나게 되며, 이 온도변화는 IR 검출소자의 측정분해능에 비해 매우 작은 값이 된다. 이를 위해 온도변화가 단위 주기 당 온도 변화(K/cycle)라고 하면, IR 검출소자의 측정분해능 이상이 되도록 충분한 주기 동안 온도변화를 누적 측정하여 평균을 구함으로써 온도변화에 따른 열탄성응력을 측정할 수 있을 것이다. 즉 식(6)과 같이 처리함으로써 변형에너지 변화에 따른 평균온도변화(평균 응력변화)를 측정할 수 있을 것이다. 물체가 30 Hz의 진동주파수와 50 MPa의 응력변화를 갖는 경우 600 초 동안의 누적처리함으로써 0.223 K의 온도변화가 나타나게 되며, 이는 IR 검출소자에 의해 측정 가능한 온도변화가 된다.

$$\Delta T_{avg.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (6)$$

제 7 절 상관함수(Correlation function)

디지털 통신시스템은 수신기에서 신호를 검출하기 위해서 상관기(Correlator)를 사용한다. 수신기의 정합필터(Matched Filter)를 이용해서 신호의 한 주기(T)에서 최대 출력 신호를 얻게 된다. 이 정합필터가 표본을 추출하는 주기(T)에서의 출력

과 상관기에서 출력은 같다. 그래서 실제로 정합필터를 실현한 것이 바로 상관기이다. 상관 말 그대로 서로 관련이 있는 신호를 찾아내는 것이다. 이러한 신호를 찾아내는 것은 상관함수(Correlation function)를 이용해서 찾을 수 있다. 상관함수는 자기 자신의 지연된 신호와 자기 자신과의 상관을 찾는 자기 상관함수가 있고, 자기 자신과 다른 신호와의 상관을 찾는 상호상관함수가 있다. 일반적인 자기 상관함수 $R(\tau) = \int x(t+\tau)x(t)dt$, 시간지연 τ 가 검색변수가 되어서 τ 값에 따라서 상관값 $R(\tau)$ 값이 출력되며, 그림으로 그리면, τ 값이 수평축 $R(\tau)$ 값이 수직축에 그리게 된다. 적분기호의 범위는 $-\infty \sim \infty$ 이다. 상호상관함수는 $R(\tau) = \int y(t+\tau)x(t)dt$, x 와 다른 y 라는 신호와의 관계를 알아보는 것이다. 앞서 언급했듯이 이런 상관함수는 디지털 통신시스템에서 송신측에서 보낸 신호가 무엇인지를 수신측에서 추출할 때 쓸 수 있다. 즉 여러 개의 대상 신호들 중에서 자기 자신의 지연된 버전(송신신호)과 수신기 측에서 발생시킨 복제신호(reference 신호라고 하며, 기준 신호라고 함)를 τ 라는 매개변수를 수평축에서 좌우로 변경해가면서 이동시키고 이렇게 출력된 신호를 주기(T, 표본추출시간 또는 신호지속시간)에서의 신호 출력값을 추출한다. 이렇게 추출된 신호는 주기 T에서 최대값이 나오고, 자기 자신과 다른 복제신호에서는 더 적은 출력이 나온다. 따라서 수신기는 가장 큰 출력이 발생하는 쪽의 신호를 송신신호로 판단하는 것이다. 위상잠금기법(Lock-in method)에서 구조물표면에서 발생한 적외선 방사를 측정하는 검출소자는 반복하중 하에서 추출한 복제신호를 Lock-in module을 통하여 수신신호를 받아들여 검출소자에 의한 열적 분해능에 따라 구체화된 노이즈(Noise)와 미세한 온도변화를 측정하는 원리이다.

제 3 장 피로시험편의 응력해석

제 1 절 실험장치

실험장치는 반복하중을 인가하기 위한 피로시험기(MTS Co.)와 응력을 측정하기 위한 적외선열화상 장비(FLIR Co.)를 사용하였다. Fig. 3-1과 같이 피로시험기는 미국 MTS 사의 상용제품(Model : 793.01)을 사용하였으며, H/W controller, S/W controller, PC, servovalve controller로 이루어져 있다.



Fig. 3-1 Fatigue machine system

Fig. 3-2과 같이 적외선 열화상 장비는 프랑스 Cedip 사의 상용제품 Silver 480M 모델을 사용하였다.



Fig 3-2 Infrared thermography system

이 둘 장비의 동기화를 위하여 피로시험기의 출력신호(fullscale ± 10 V)를 얻어 적외선 열화상 장비와 동기화를 시켰다. 적외선 열화상 장비의 입력신호가 ± 5 V~ ± 10 V의 입력 신호를 받는다. 고로 본 실험에서 사용하는 피로시험기의 가진 주파수는 시험편의 항복강도 이내의 하중으로만 작동하므로 피로시험기의 출력신호가 ± 5 V미만에서 작동하므로 출력신호를 증폭시킬 필요가 있으므로 증폭기를 사용하여 출력신호를 ± 5 V~ ± 10 V가 발생하도록 신호를 증폭시켜 동기화된 적외선 열화상 장비에서 신호를 획득할 수 있게 하였으면 이러한 출력신호 값을 확인하기 위하여 오실로스코프(Lecroy Co.)를 사용하여 증폭된 신호를 확인하였다. 또한

이와 같은 장치 구성이 위상잠금 기법(Lock-in method)을 적용하기 위한 장치 구성이다. 정확한 열탄성 응력해석을 위해서 시험편은 전도 및 대류에 의한 열손실이 없어야 하며, 시험 중에는 주위와 열교환이 없도록 열적 평형상태가 유지되어야 한다. 본 연구에서는 시험편의 단열조건을 만족시키기 위해 일정한 주파수와 하중으로 반복적으로 가진함으로써 시험편에서 열적 평형상태에 도달할 수 있도록 하였으며, 외부와의 열교환을 일정하게 하기 위해 내부온도 및 대류, 방사율을 일정하게 유지할 수 있게 밀폐된 공간에서 시험하였다. Table 3-1, 3-2은 피로시험기와 적외선열화상 장비에 대한 제원을 나타내었다.

Table 3-1 Specification of fatigue testing machine

Force capacity	100 kN(Monotonic: 120 kN)
Available actuator ratings	25 kN
Dynamic stroke	100 mm
Output voltage	± 10 V(full scale)
Excitation frequency	10 kHz(± 100 mm)
Data sampling rate	122.88 kHz

Table 3-2 Specification of infrared thermography system

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

제 2 절 실험방법

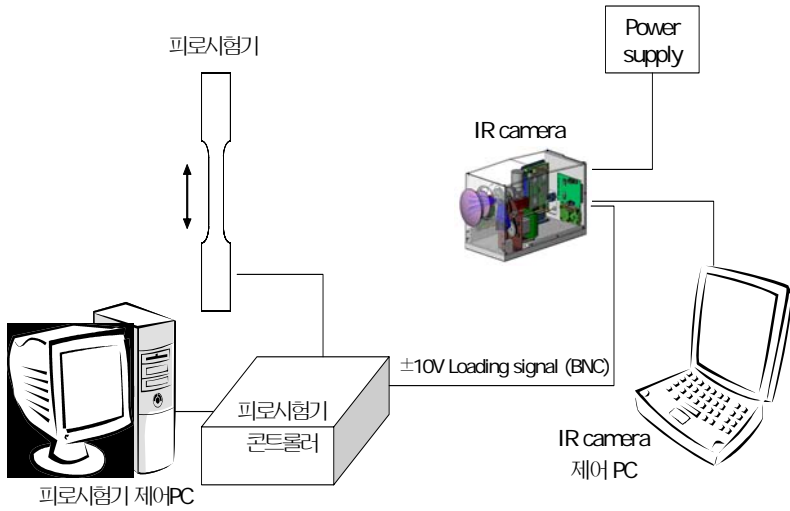
본 논문에서 제시한 적외선 열화상을 이용한 응력해석을 수행하기 위한 실험적 검증은 위하여 피로시험편을 반복하중을 인가하고 그 때의 응력 분포를 수치해석을 통한 이론적인 응력 값, 유한요소 해석과 위상잠금 적외선열화상기법을 이용한 실험적인 기법과 일치하는지를 검증하였다. 실험 장치구성을 Fig. 3-3에 나타내었다.



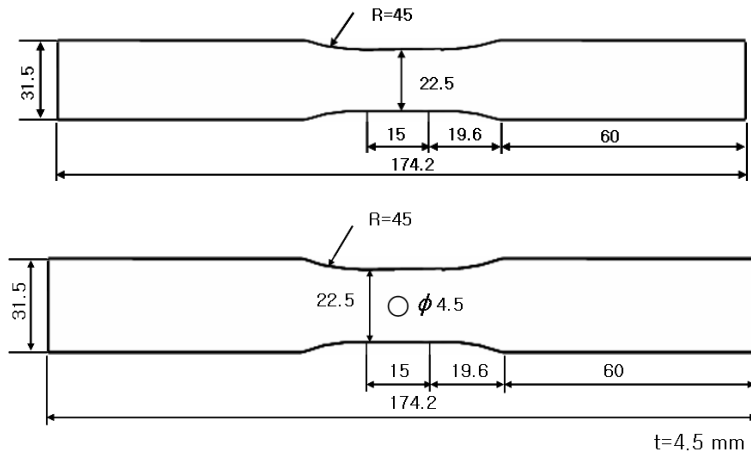
Fig. 3-3 Configuration of Experiment system

반복하중을 인가한 열탄성 응력분포를 해석시험을 통하여 각각 평판, 원공 피로시험편 응력을 구하고 이론적인 수치해석 값과 유한요소해석을 통하여 응력값을 비교하였다. 정확한 열탄성 응력해석을 위해서는 시험편은 전도 및 대류에 의한 열손실이 없어야 하며, 시험 중에는 주위와 열교환이 없도록 열적 평형상태가 유지되어야 한다. 본 연구에서는 시험편의 단열조건을 만족시키기 위해 일정한 주파수와 하중으로 반복적으로 가진함으로써 시험편에서 열적 평형상태에 도달할 수 있도록 하였으며, 외부와의 열교환을 일정하게 하기 위해 밀폐된 공간에서 시험하였다. 시험편은 KS B 5537 "피로시험기", KS B 1099 "축하중 피로시험" 규격에 따라 시험편을 제작하여 y방향으로 1축 하중만을 받을 수 있도록 하였다. 시험편의 재

질은 SM 45C(AISI 1045)로서 열탄성계수는 $3.01 \times 10 \text{ MPa}^{-1}$ 이다. 시험편의 형상과 시험장치 개략도를 Fig. 3-4과 같이 나타내었다.



(a) Thermoelastic stress analysis system



(b) specimen

Fig. 3-4 Experimental setup

적외선 검출장치는 Cedip Infrared System사의 Sliver 480M을 사용하였으며, 온도 측정분해능(NEDT)은 $0.02 \text{ } ^\circ\text{C}$ 이다. 온도측정은 적외선 검출장치와 만능재료시험기

를 동기화시키는 위상잠금(lock-in)방법으로 측정하였다. Table 3-3는 실험에 사용된 시험편의 물성을 나타내었다.

Table 3-3 Material property of SM 45C(AISI 1045)

재료	열팽창계수	밀도	비열	열탄성계수
SM 45C	11.5 K ⁻¹	7850 kg/m ³	486 J/kg-K	3.01 MPa ⁻¹

측정시험편은 피로시험기로 응력비(R=0)를 0 으로 일정 반복하중(25 kN)으로 진동하게 되며, 주파수는 보유 장비의 성능곡선(performance graph)을 토대로 40 Hz~80 Hz 까지 10 Hz씩 증가시키며 가진 할 수 있는 최대 주파수까지 주파수영향에 따른 응력해석 값을 측정하였다.

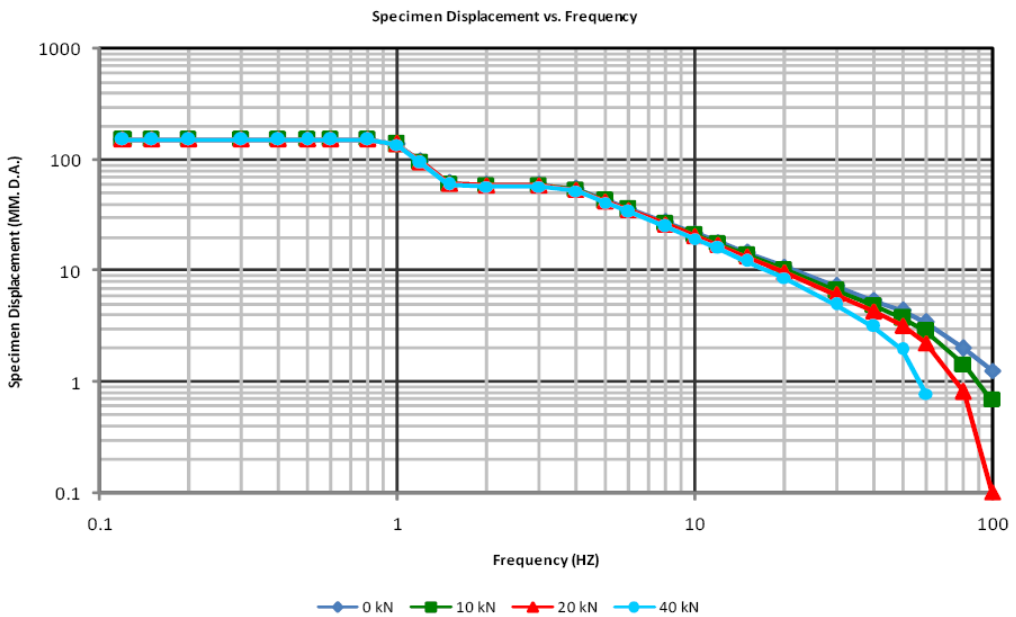


Fig. 3-5 Performance graph of fatigue testing machine

보유 장비의 성능곡선을 Fig. 3-5에 나타내었다. Fig. 3-5에 보는 바와 같이 하중 25 kN의 작동범위에서 80 Hz까지의 하중속도로 제어할 수 있다. 이는 항복강도

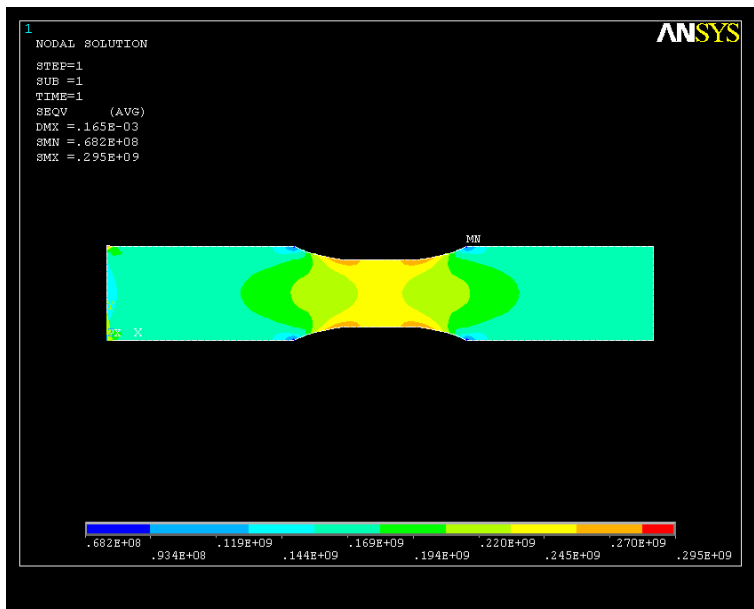
이하의 하중으로 가진할 수 있는 최대하중에서 작동하는 최대작동주파수를 찾아 그 때의 주파수별 응력 분포를 찾고자 함이다. 이를 통해 실험적으로 최적 주파수 (속도가 빠를수록 좋다고 함)를 결정하고, 실험적으로 측정된 응력값은 이론적인 수치해석 값과 유한요소해석의 Static analysis 결과와 비교하였다. 원공 시험편의 경우, 유한요소해석에 의한 응력집중계수(Stress Concentration Factor)와 적외선 열화상기술에 의해 측정된 응력집중계수를 비교하였다.

제 4 장 실험결과

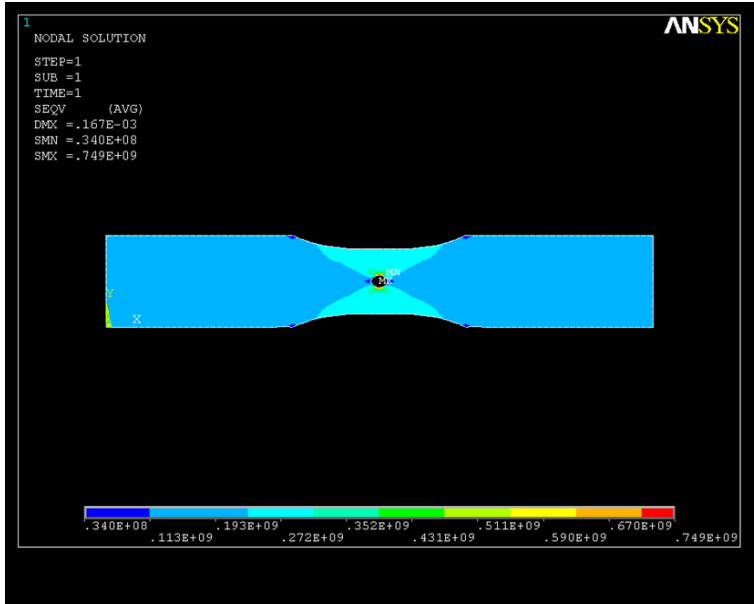
제 1 절 주파수변화에 따른 응력해석 실험

1. 유한요소해석

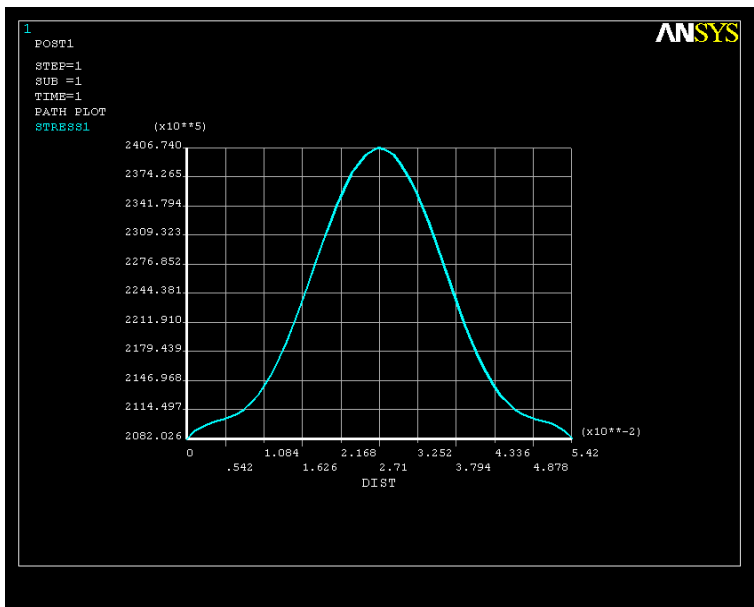
유한요소해석은 상용프로그램(ANSYS, element Plane 82)을 사용하여 정적(Static) 해석을 수행하였다. Fig. 4-1은 유한요소해석을 이용하여 시험편에 등분포 하중을 받게 하중을 주었으며 그 때의 응력을 구한 값을 나타내었다. 이는 하중값을 25 kN으로 놓고 3축방향의 응력 값을 해석한 결과이다.



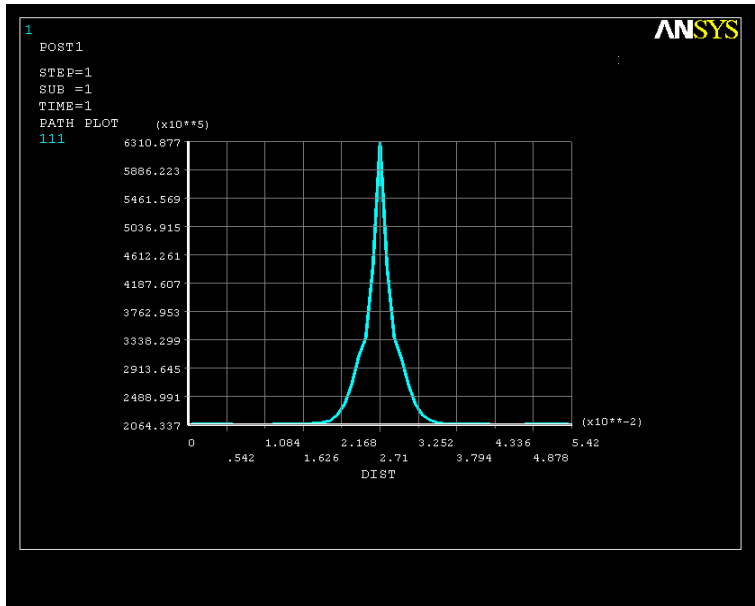
(a) Stress distribution of the plate specimen



(b) Stress distribution of the circle hole specimen



(c) Stress values of the plate specimen to each point



(d) Stress values of the plate specimen to each point

Fig. 4-1 Stress analysis to FEM

Fig. 4-1(c),(d)는 실제 해석하고자 하는 영역만의 응력해석을 수행하였다. 유한 요소해석을 수행한 결과 응력값은 평판시험편 중심면에서 응력의 최대값이 나타났으며 그 값은 240.59 MPa로 나타났으며, 원공 시험편의 경우 응력집중 계수 (Stress Concentration Factor: K) 의 값은 K=2.62 로 나타났다.

2. 수치해석

이론적으로 1 축 방향으로 하중이 전달된다고 가정 하에 이론적인 응력 값을 계산은 식(7)과 같다.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (7)$$

여기서 σ 는 하중에 따른 응력값을 나타내고 P 는 하중값을 나타내며, A 는 단면적을 나타낸다. 하중값은 25 kN이고 단면적은 0.0225×0.0045 이다. 수치 해석적으로 계산한 값은 246.91 MPa이다. 원공시험편의 경우 응력집중계수를 구하기 위

한식은 식(8)과 같다.

$$K = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ave}}} \quad (8)$$

여기서 응력집중계수 (K)는 최대응력과 공칭응력의 비를 나타내며, 시험편의 응력 집중 계수를 구하는 식은 Fig. 4-2와 같다.

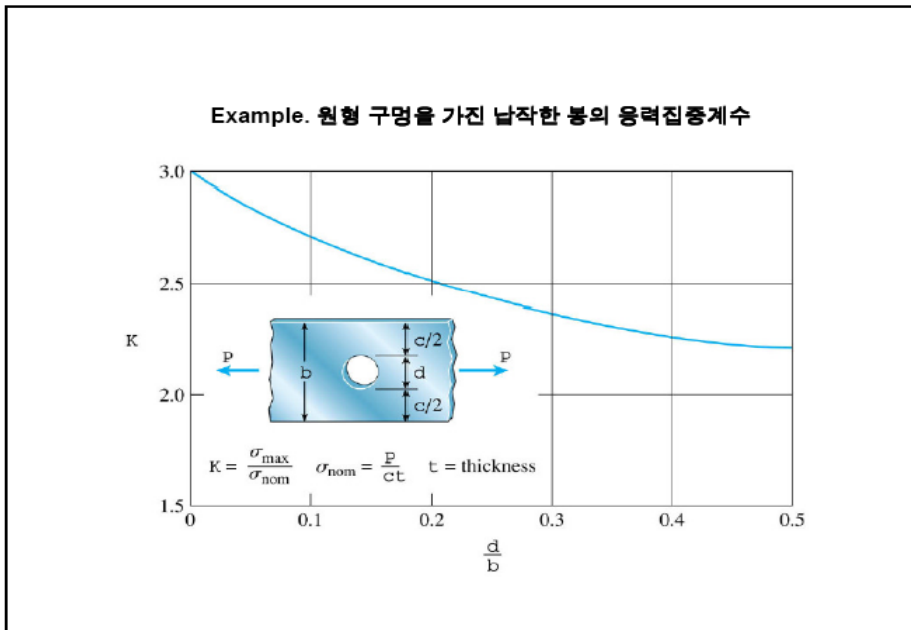


Fig. 4-2 Stress concentration factor of circle hole plate specimen

응력집중계수의 값은 단면 폭과 원공의 직경의 비로 구할 수 있다. 즉 응력집중계수 (K)값은 2.5가 된다.

이와 같은 결과를 토대로 실험적인 값과 비교를 하였다.

3. 응력 측정구간 선정

열탄성응력 측정에 있어서 온도평균 측정구간을 선정해야 한다. 이는 열전도 등 손실에 의해 열 평행조건에 이르러 응력변화가 온도변화에 국한되어 나타나는 지점에서 응력을 측정해야 한다. Fig. 4-3는 응력을 측정하기 위한 온도평균 측정구

간을 나타내었다.

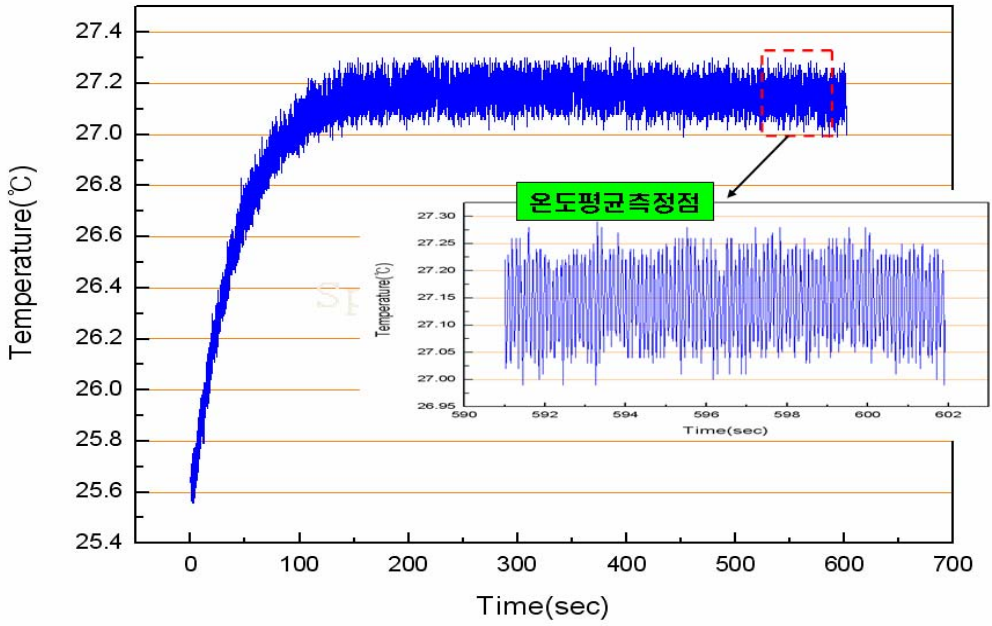


Fig. 4-3 Establishment of a temperature measurement section

반복하중을 인가한 후 시험편의 온도상승이 발생하는데 열전도 등의 열손실이 발생한 후 온도가 평행해지는 구간이 온도 평균측정점이 된다. 각 주파수 별로 온도 상승구배가 다르므로 각 주파수에 따른 온도 평균 측정구간을 찾는 것이 중요하다. 만약 온도가 평행구간에 도달하지 않은 상태에서 응력을 측정할 경우 수행한 실험값을 정확하게 측정하기 어렵다.

Fig. 4-4 해당 시험편(SM 45C)의 시험 주파수(50 Hz~80 Hz)별 시험 중 전체 온도 변화 곡선을 나타내었다. 이는 해당 시험편의 주파수에 따른 온도 평균 측정점을 찾기 위함이다. 온도평행 구간을 찾음으로써 실험 시 측정을 위한 적정구간을 선정하여 정확한 응력측정을 수행할 수 있으며 실험시간을 단축할 수 있다는 장점이 있다.

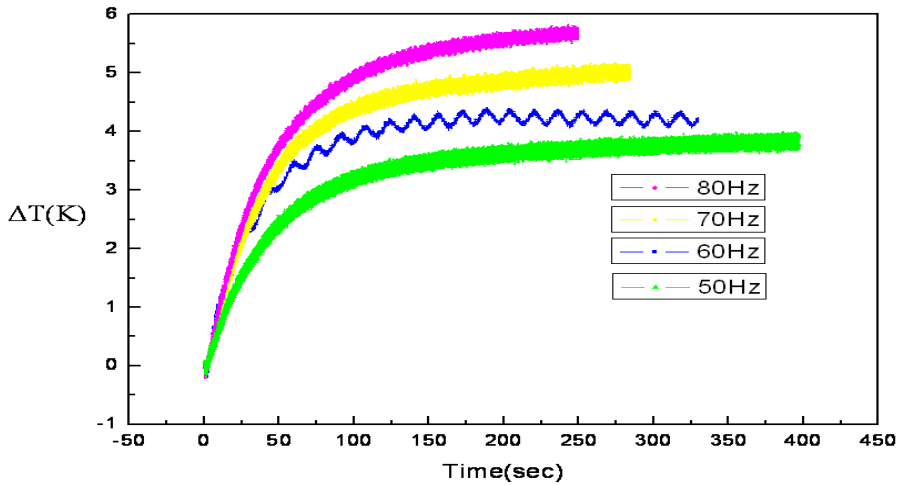


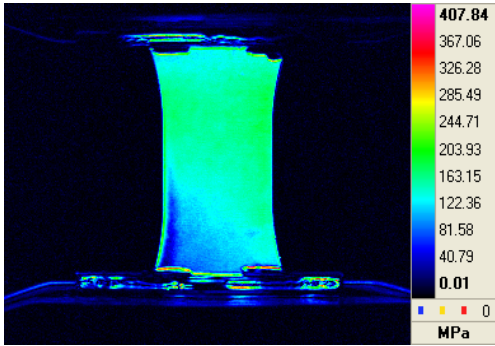
Fig. 4-4 Temperature evolution to each frequency

Fig. 4-4는 각 주파수별 20000 cycle까지를 측정한 결과이며 50 Hz에서 20000 cycle에서 온도가 평행한 구간이 나타나므로 고주파수영역으로 갈수록 온도상승 구배가 커질 것이므로 20000 cycle이상에서 50 Hz이상의 고하중속도로 측정한다면 온도평행 상태에 도달하게 된다. 물론 이보다 낮은 주파수, 하중조건이면 온도평행조건에 도달하기 위한 주기(cycles)는 20000 cycle 이상이 될 것이다. 또한 항복강도 이하의 응력조건에서 무한한 반복을 가하면 피로한계응력에 도달하여 시험편에 균열성장이 나타나게 된다. 따라서 피로한계 주기보다 작은 구간(구조용 강 의 경우: $10^6 \sim 10^7$ cycles 미만)에서 측정하는 것이 바람직하다. 이는 시험편의 형상, 시험환경에 따라 온도평균 측정구간이 달라질 수 있으므로 위상잠금 적외선 열화상을 이용한 응력을 측정하기 전에 온도평균 측정구간을 실험을 통해서 찾는 것이 중요하다. 실제 온도평균 측정구간을 잘못설정하면 그 때의 응력값 또한 달라질 수 있다.

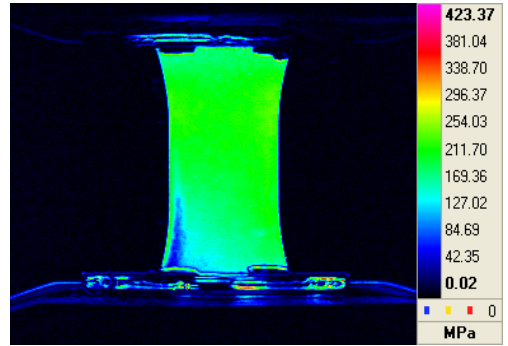
4. 열탄성 응력측정

온도평균 측정구간을 선정하면 위상잠금 기법을 이용하여 응력을 측정하게 된다. 응력 측정은 온도평균 측정구간을 피로시험기와 동기화된 신호를 10 초 동안 측정

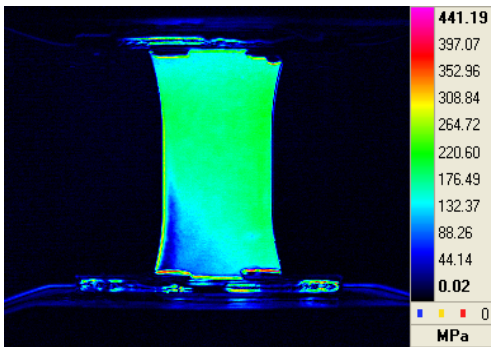
하여 processing을 통해 응력으로 환산되어 지며, 이 응력 값은 peak to peak 점에 대한 평균을 취한 값이다. Fig. 4-5에 일정 반복하중(25 kN)에서 주파수 변화별 응력을 측정된 값을 나타내었다.



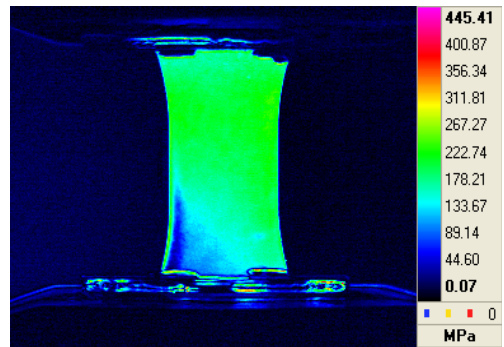
40 Hz



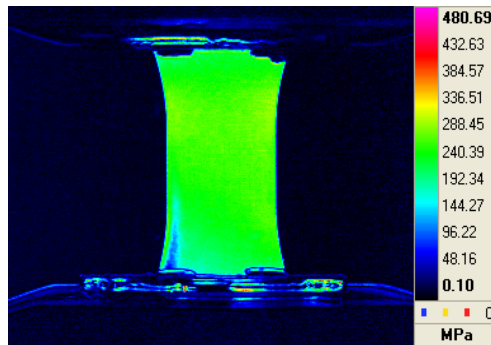
50 Hz



60 Hz

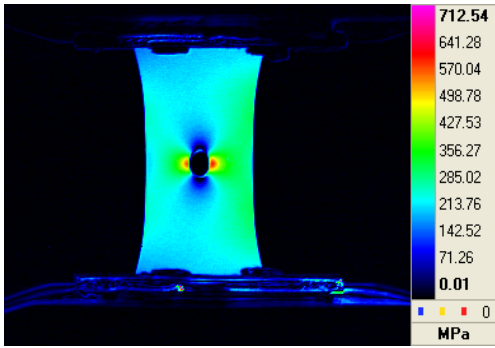


70 Hz

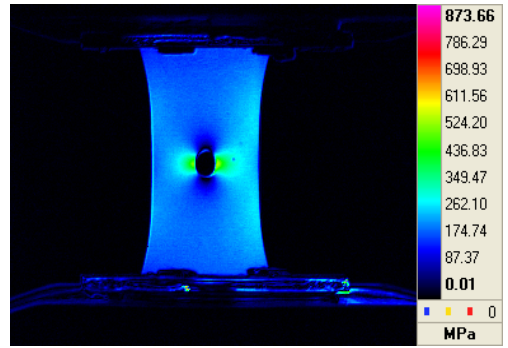


80 Hz

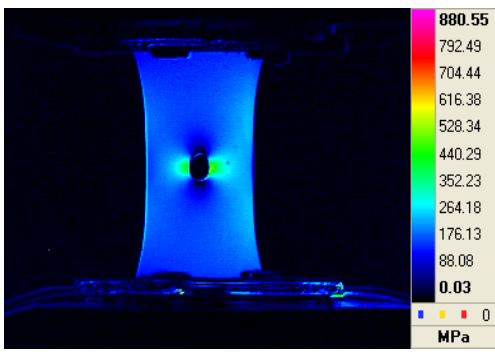
(a) Plate specimens



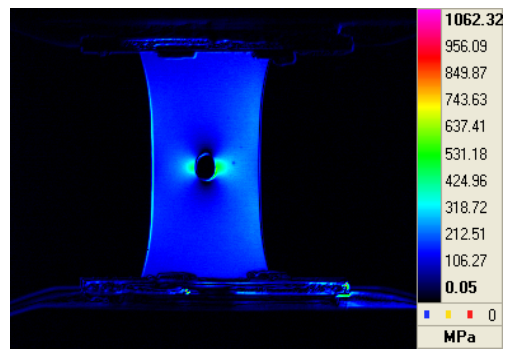
40 Hz



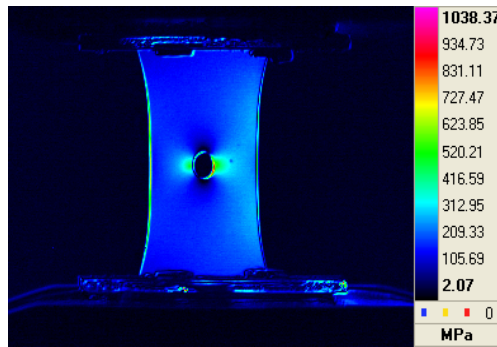
50 Hz



60 Hz



70 Hz



80 Hz

(b) Circle hole specimens

Fig. 4-5 Thermoelastic stress values to each frequency

주파수 변화에 따른 온도평행 상태에서 온도변화(ΔT) 및 응력값을 Table 4-1, 4-2에 나타내었다. Table 4-1은 평판 시험편에 대한 결과값이며 Table 4-2는 원공 시험편에 대한 응력 집중계수 값을 나타낸 것이다.

Table 4-1 The plate specimens of thermoelastic stress and temperature evolution

주파수(Hz)	응력(Mpa)	온도변화(ΔT)
40	206.29	0.18
50	212.995	0.19
60	225.955	0.20
70	232.675	0.21
80	253.505	0.23

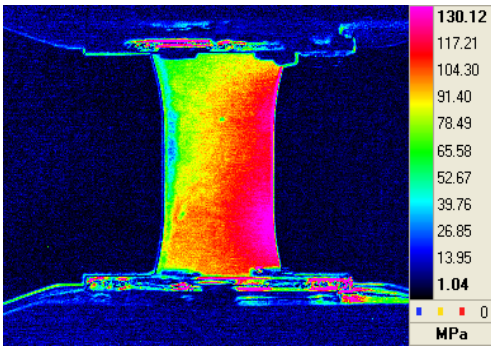
Table 4-2 The circle hole specimens of thermoelastic stress and temperature evolution

주파수(Hz)	응력집중계수(K)
40	2.08
50	2.11
60	2.21
70	2.42
80	2.48

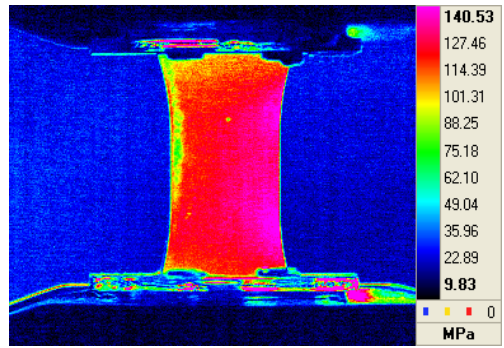
일정 반복하중에 조건에서 응력측정은 주파수가 높을수록(40 Hz 이상) 보다 정확한 결과를 얻을 것이다. 이는 외부로의 전도와 대류의 영향을 최소화 할 수 있다고 사료되며 또한 응력측정구간 설정(50 Hz 25 kN에서 20000 cycles이상)에 있어서 주파수에 따라 적절한 측정점을 설정하는 것도 결과에 영향을 미침을 보였다. 그에 따른 열탄성 응력측정 실험결과에 있어서 측정값은 평균 231.28 Mpa로 이론적인 응력값 246.91 Mpa과 7 % 내로 일치함을 보였으며 유한요소해석 결과 240.59 Mpa와 4 % 내로 일치함을 보였다. 또한 원공 시험편에 대한 응력집중계수의 값(K)은 평균 2.26으로 이론적인 응력집중계수의 값 2.5와 9.6 %로 일치함을 보였으며 유한요소해석 결과 2.62과 14 % 내로 일치 하였다. 이는 측정 주파수 영역의 값을 평균한 값으로 측정한 결과이며 주파수(하중속도)가 높으면 높을수록 더욱 정확한 결과를 도출할 수 있다.

제 2 절 하중변화에 따른 응력해석 실험

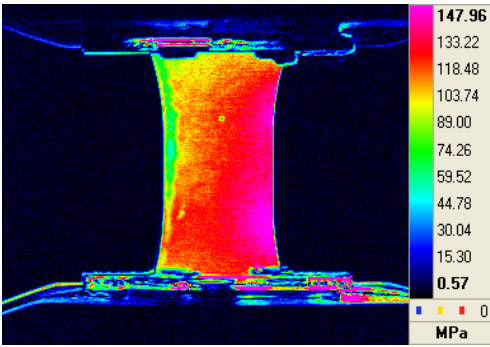
1절에서 수행한 실험결과에 타당성을 검사하기 위하여 각 주파수 영역에서 하중값을 변화시켜 실험결과에 대한 신뢰성을 검증하고자 한다. 하중값은 항복강도 이하의 영역에서 15 kN과 20 kN의 일정 하중값을 증가 시켜가며 측정하였다. 이때의 이론적인 응력 값은 15 kN에서 148.15 MPa이며, 20 kN에서 197.53 MPa로 나타났다. 실험을 수행하기 전 제 1절에서 수행한 바와 마찬가지로 열전도 등 손실에 의해 열 평행조건에 이르러 응력변화가 온도변화에 국한되어 나타나는 지점을 찾아 그 때의 응력을 측정 하였다. Fig. 4-6와 Fig. 4-7는 15 kN과 20 kN의 일정 하중값에서 주파수 변화별 응력을 측정한 값을 나타내었다. Table 4-3, 4-4는 측정결과에 대한 결과값을 나타내었다.



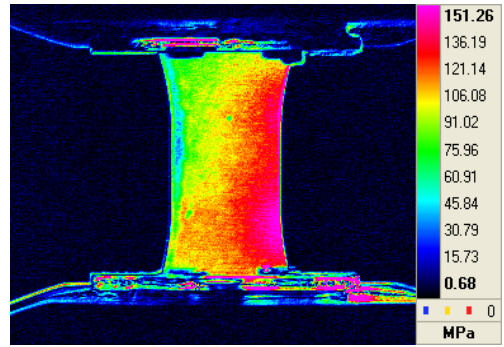
40 Hz



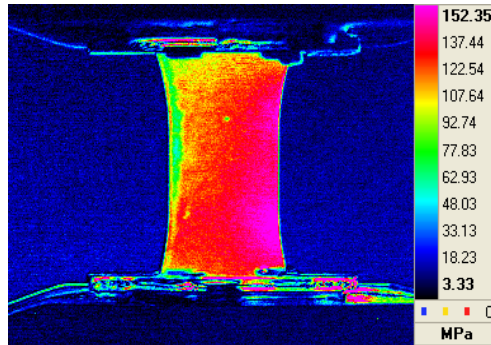
50 Hz



60 Hz

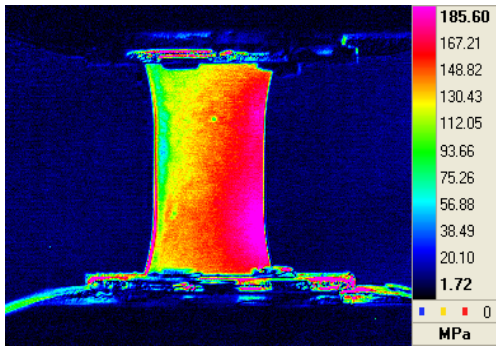


70 Hz

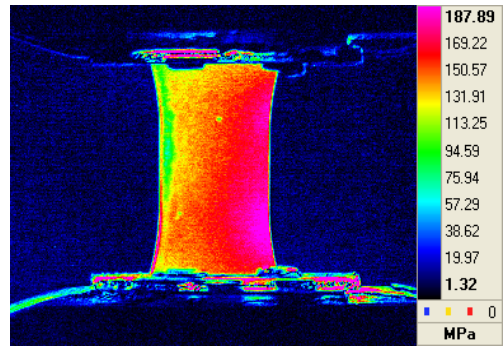


80 Hz

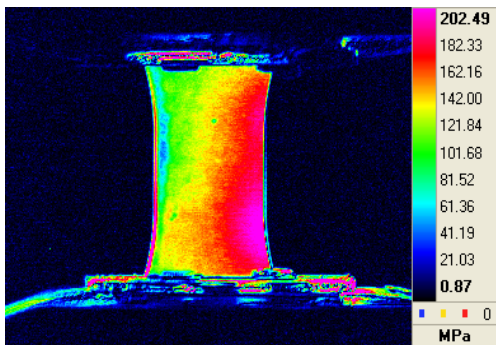
Fig. 4-6 Thermoelastic stress values to each frequency (15 kN)



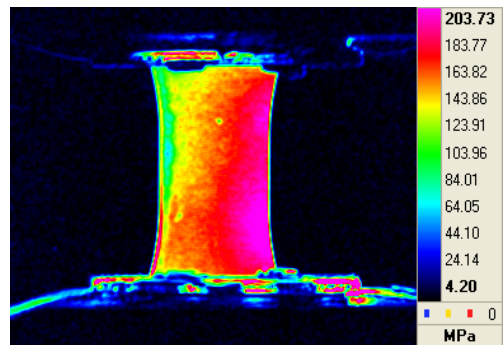
40 Hz



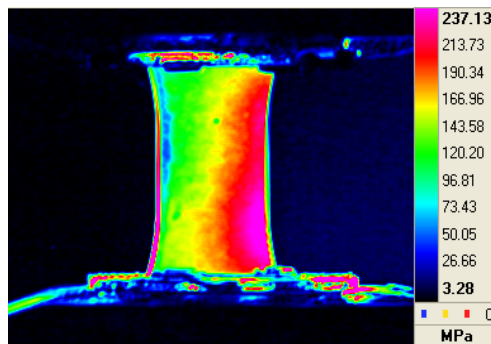
50 Hz



60 Hz



70 Hz



80 Hz

Fig. 4-7 Thermoelastic stress values to each frequency (20 kN)

Table 4-3 Verification of thermoelastic stress and temperature evolution to 15 kN loading signal

주파수(Hz)	응력(Mpa)	온도변화(ΔT)
40	130.12	0.12
50	140.53	0.13
60	147.96	0.13
70	151.26	0.14
80	152.35	0.14

Table 4-4 Verification of thermoelastic stress and temperature evolution to 20 kN loading signal

주파수(Hz)	응력(Mpa)	온도변화(ΔT)
40	185.60	0.17
50	187.89	0.17
60	202.49	0.18
70	203.73	0.18
80	237.13	0.21

Table 4-3, 4-4에서 보는 바와 같이 열탄성 응력측정 실험결과에 있어서 각각의 하중변화(15, 20 kN)에서 측정평균값은 144.44 Mpa로 이론적인 응력값 148.15 Mpa과 3 % 내로 일치함을 보였으며 에 따른 열탄성 응력측정 실험결과에 있어서 측정평균값은 203.37 Mpa로 이론적인 응력값 197.53 Mpa과 3 % 내로 일치함을 보였다. 이는 측정평균 값으로 각각의 주파수에 따른 응력값을 개별적으로 비교하면 오차는 다소 증가하나 오차범위는 크지 않다. 또한 주파수가 높아지면(70 Hz 이상) 이론적인 값보다 더욱 큰 응력 값이 얻어지는데 이는 시험편에 반복하중을 인가하는 피로시험기의 Grip부분에서의 발열이 주파수가 높아질수록 시험편으로 열전도를 발생시켜 측정대상 즉 시험편의 추가적인 온도상승을 수반하는 것으로 사료된다.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 미세한 온도변화를 측정할 수 있는 적외선열화상카메라와 위상잠금 열화상기법을 열탄성원리에 적용시켜 시험에서 응력변동(Mechanical energy)에 비례한 온도변화를 모니터링 함으로써 시험의 응력을 적외선열화상으로 예측하는 것이다. 이는 위상잠금 적외선열화상기법을 통한 시험편의 응력해석은 적외선열화상 카메라의 온도분해능이 향상됨으로써 가능하게 되었다. 반복하중을 인가하는 동안에 응력변화와 온도변화와의 관계는 외부 열원이 없고 재료가 탄성한도 내의 거동을 한다면 열탄성효과와 열전도 등의 효과에 영향을 받게 된다. 이 중 열탄성 효과는 반복하중을 인가하는 동안 시험편의 온도변화에 주요한 영향을 미친다. 이는 이론적인 식의 값에 온도변화만의 함수로써 응력값을 환산할 수 있다. 본 논문에서는 1차원에 해당하는 수치해석결과를 토대로 시험편에서의 온도변화를 나타내었다. 이러한 모델은 2차원, 3차원의 수치해석과의 비교로 확장되어질 수 있으며, 이러한 수치해석 결과를 토대로 보다 정확한 결과를 도출할 수 있으리라 기대된다. 이러한 적외선열화상기법은 시험편을 파괴하지 않고 비접촉으로 단시간에 응력을 측정할 수 있으며 수치해석을 통한 계산법이 아닌 실시간으로 해당 시험편의 응력 분포를 점(point)단위의 응력분포가 아닌 면(surface)단위의 응력분포를 보여줌으로써 스트레인게이지 수 만개의 데이터를 한꺼번에 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 실제 구조물이나 재료의 손상부위나 취약부위를 알아낼 수 있어 사고를 미연에 방지할 수 있다. 이는 광탄성(Photo-elastic)이나 ESPI(Electronic

speckle pattern interferometry)방법에 비해 우수하다.

산업체에서 요구되는 시간 단축과 경비절감 차원에서 이 측정방법과 피로시험을 병행함으로써 실제로 파괴에 이르는 시험편 등의 수량과 시간을 절감할 수 있어 피로시험을 크게 완화시킬 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

1. S.K. Min, M.J. Choi and S.H. Jang, A Study on Stress and Vibration Evaluations and Application of Piping System in Petrochemical Plant, J. of The Korean Society of Machine Tool Engineers, 11 (2002) 110~116.
2. G. Gaussorgurs, "Infrared thermography," translated by Chomet, S., Champman & Hall, London, (1994)
3. W. Thomson, (Lord Kelvin), "On the dynamic theory of heat," Trans. Soc. Edinburgh, Vol. 20, pp. 261-283, (1853)
4. B.J. Rauch and R.E. Rowlands, Thermoelastic stress analysis in Handbook on experimental mechanics ed by A.S. Kobayashi, SEM (1993).
5. Pierre Bremond and Pierre Potet, Cedip Infrared System : Application of Lock-in thermography to the measurement of stress and to the determination of damage in material and structures., QIRT conferences 2000
6. P. Bremond and P. Potet, Lock-In Thermography: A tool to analyse and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures, Thermosense XXII, (2001) 4360-4376.
7. Wu, D., Busse, G., "Lock-in thermography for evaluation of materials", Rev. Gen. Therm., Vol. 37, 693-703, 1998
8. 김원태, 강기수, 최만용, 박정학, 허용학, "Lock-in Thermography를 이용한 노치시험편의 응력해석 및 피로한계치 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 26, No. 5, pp. 315-320, 2006.
9. Minh Phong Luong, "Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique" , Mechanics of Materials, 28, 155-163, 1998.
10. M.H. Belgen, "Structural stress measurement with a infrared radiometer," ISA Trans., Vol. 6, pp. 49-53, (1967)
11. B. Yang, P.K. Liaw, M. Morrison, C.T. Liu, R.A. Buchanan, and J.Y. Huang, "Temperature evolution during fatigue damage." Intermetallics, Vol. 13, pp. 419-428, (2005)
12. Boyd, S.W., Dulieu-Barton, J.M., Rumsey, L., "Stress analysis of finger joints in pultruded GRP materials", International Journal of Adhesion and

Adhesives, 26(7), 498–510, 2006.

13. J.Y. Huang, C.Y. Chen, K.F. Chien, R.C. Kuo, L. Jiang, B. Yang, et al., High-cycle fatigue behavior of SA533-B1 steels, American Society for Testing and Materials (ASTM), 31st National Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics, Cleveland, Ohio, 21--24 June, 1999 (submitted for publication).

14. D.T. Lohr, N.F. Enke, B.I. Sandor, 'Analysis of fatigue damage evolution by differential infrared thermography', Dynamic failure, Proceedings of the 1987 SEM Fall Conference, 25--27 October, 1987, Savannah, Georgia, pp. 169--174.

15. Panteliou, S.D., Dimarogonas, A.D., "Thermodynamic damping in porous materials with ellipsoidal cavities", J. of Sound and Vibration, 201(5), 555–565.

16. (社)日本非破壊検査學會, “赤外線サーモグラフィによる 設備診断・非破壊評価ハンドブック,” 廣濟堂, 大阪, (2004)

17. M.P. Luong, “Infrared thermographic scanning of fatigue in metals,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 158, pp. 363–376, (1995)

18. R. Peyroux, A. Chrysochoos, C. Licht, and M. Löbel, “Thermomechanical couplings and pseudoelasticity of shape memory alloys,” International Journal of Engineering Science, Vol. 36, Issue 4, pp. 489–509, (1998)

19. T Boulanger, A. Chrysochoos, C. Mabru, and A. Galtier, "Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steel, "International Journal of Fatigue 26, pp. 221–229, 2004

20. X.P.V. Maldague, “Trends in optical nondestructive testing and inspection,” Rastogi P.K., Inaudi D, editors, Elsevier Science, Switzerland, (2000)

감사의 글

대학원에 입학하여 2년이라는 시간이 벌써 지나버렸습니다. 입학한 것이 엇그제 같은데 벌써 몇 달 후면 졸업을 앞두고 있습니다. 어떻게 보면 짧은 시간이었지만 배운 것도 많고 인생에 있어서 제 자신을 돌아볼 수 시간이었으며 저를 한 단계 진일보 하게 된 계기가 아니었나 싶습니다. 2년이라는 대학원 생활동안 쌓은 지식과 배움을 통해 논문을 쓸 수 있게 도와주신 분께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 대학원생활 2년 동안 연구에 전념할 수 있게 아낌없는 지원을 해 주신 김경석 교수님께 감사드립니다. 또한 부족한 저에게 항상 꼼꼼하게 가르쳐 주신 정현철 박사님께 감사드립니다. 후배들의 발전을 위하여 쓴소리도 마다하지 않고 가르침을 주신 장호섭 박사님께도 감사드립니다. 그리고 실험실 생활동안 저와 가장 많은 시간을 보낸 동기들, 항상 내 옆자리에서 내가 힘든 일에 부딪혔을 때 자기 일처럼 도와준 수옥이형, 대학교 생활 때부터 같이 지내온, 입은 거칠지만 마음씨는 착하고 힘든 일 함께 하면 항상 내편이 현민이, 위트있고 명석하여 연구하는 것에 있어서 배울 점이 많은 종현이 고맙다는 말 전합니다. 내가 부탁하면 끝까지 들어주고 같이 고민해주는 대학원 후배지만 대학동기인 성원이, 선배들에게 깎듯하고 심성이 착하며 자기 할 일을 알아서 찾아서 하는 동수에게 고맙단 말을 전합니다. 적외선열화상에 대한 분야를 접하게 해주신 최만용 박사님께 감사드리며, 또한 이 논문을 쓸 수 있게 적외선 열화상에 관한 연구에 전적으로 도와주신 강기수 박사님께 감사의 말씀전합니다.

제가 공부할 수 있게 지원을 아끼시지 않으면 항상 저희 앞날을 위해 걱정을 해주셨고 격려해주시고 묵묵히 지켜봐주신 부모님이 있었기에 제가 이 자리에 있을 수 있었습니다. 그리고 항상 나에게 진심어린 걱정과 기도를 해준 우리형에게도 고맙다는 말을 전합니다.

그리고 내 인생에 있어서 진심어린 고민과 충고를 아끼지 않은 친구들에게 고맙다는 말 전합니다. 마지막으로 대학시절부터 내 옆에서 항상 지켜주고 힘이 되어준 나의 반려자 미란이에게 고맙다는 말 전합니다.

이 모든 분들이 있었기에 지금의 제가 있었던거 같습니다. 이런 감사의 뜻을 헛되이 쓰지 않고 앞으로 나아가는데 필요한 존재가 될 수 있도록 항상 노력하는 사람이 되겠습니다.

저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재 공학과	학 번	20077262	과 정	석사
성 명	한글: 김 민 근 한문: 金 旻 根 영문: Kim, Minkwen				
주 소	광주시 남구 진월동 한신아파트 103동 1204호				
연락처	E-MAIL: nonous@naver.com H.P: 010-3066-5628				
논문제목	한글: 위상장금 적외선열화상을 이용한 응력해석에 관한 연구 영문: A study on Stress Analysis by Lock-in infrared thermography technique				

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

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 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(○) 반대()

2009 년 2 월

저작자: 김 민 근 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하