[UCI]I804:24011-200000256882

2012년2월

석사학위논문

적외선 열화상 기술을 적용한 풍력발전기 친환경 부품소재의 비파괴 신뢰성평가

김 성 현

2012년 2월

석사학위논문

적외선 열화상 기술을 적용한 풍력발전기 친환경 부품소재의 비파괴 신뢰성평가

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 성 현

적외선 열화상 기술을 적용한 풍력발전기 친환경 부품소재의 비파괴 신뢰성평가

Evaluation of Non-Destructive Reliability using Infrared-Thermography Technology for Eco-Friendly Part and Materials in Aero-Generator

2012년 2월 24일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 성 현

적외선 열화상 기술을 적용한 풍력발전기 친환경 부품소재의 비파괴 신뢰성평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

김 성 현

김성현의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 심 재 기 (인)

위 원 조선대학교 교수 황 석 승 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 재 열 (인)

2011년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF FIGURES ····· iii
LIST OF TABLES ····· v
NOMENCLATURE ····· vi
ABSTRACT ····· vii

제 1 장 서 론 ····· 1
제 1 절 연구배경 ····· 1
제 2 절 연구목적 ····· 3

제 2 장 풍력발전기 부품소재 및 열화상 시스템 ····· 5
제 1 절 풍력발전용 부품소재 ····· 5
1. 풍력발전용 베어링 ····· 5
2. 풍력발전용 베어링의 손상유형 ····· 8
3. 풍력발전기의 보강용 플랜지 ····· 10
제 2 절 적외선 열화상 측정이론 ····· 11
1. 열 측정 이론 ····· 11
2. 초음파 서모그래피 ····· 19
제 3 절 열화상 시스템 구성 및 초음파 가진기 구성 원리 ····· 21
1. 적외선 열화상 시스템 ····· 21
2. 초음파 가진기 원리 및 구성 ····· 25

제 3 장 시험장치 구성 및 시험편 제작 ····· 27
제 1 절 시험장치 구성 및 시험편 제작 ····· 27
1. 시험 장치 구성 ····· 27

2. 초음파 혼 ····· 28
3. 시험편 제작 ····· 29

제 4 장 연구 결과 및 분석 ····· 30
제 1 절 베어링 시험편에 대한 열전달 해석 ····· 30
1. 초음파 서모그래피의 열전달 해석 ····· 30
2. Halogen lamp 열원 적용 해석 ····· 33
제 2 절 초음파 서모그래피 및 할로겐 램프 열원 적용 ····· 37
1. SUJ2(베어링) 재질의 감육결함 분석 ····· 37
2. SM45C(플랜지) 재질의 열패턴 분석 및 미세크랙 검출 ····· 41
3. 플랜지 시험편의 Lock-in을 적용한 노이즈 제거 ····· 45

제 5 장 결론 ····· 47

Reference ····· 48

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Bearing damage image ····· 9
Fig. 2-2 Tower flange for wind power generation ····· 10
Fig. 2-3 The electromagnetic spectrum ····· 11
Fig. 2-4 Atmospheric transmission in different wavelength bands ····· 11
Fig. 2-5 Incident radiation ····· 12
Fig. 2-6 Exitan radiation ····· 12
Fig. 2-7 Radiation contributions to the general measurement situation ····· 13
Fig. 2-8 Infrared thermography (Pulse technique) ····· 18
Fig. 2-9 Infrared thermography (Lock-in Technique) ····· 18
Fig. 2-10 Diagram of Heating System using Ultrasonic Excitation ····· 20
Fig. 2-11 Component of thermovision 900 system ····· 21
Fig. 2-12 Schematic diagram of system controller ····· 22
Fig. 2-13 Exploded view of the scanner optical path ····· 23
Fig. 2-14 Schematic diagram of scanner ····· 24
Fig. 2-15 The composition of ultrasonic exciter ····· 25
Fig. 2-16 Converter of the theoretical concepts ····· 26
Fig. 3-1 DYW-430H Spec ····· 27
Fig. 3-2 DYW-430H ····· 27
Fig. 3-3 The composition of experiment equipment ····· 28
Fig. 3-4 2D design drawings and images of the produced horns ····· 28
Fig. 3-5 Manufactured specimen ····· 29
Fig. 4-1 Pre-process for Thermal Transfer Analysis ····· 30
Fig. 4-2 Pre-process for Boundary Condition ····· 31
Fig. 4-3 Result of Thermal Transfer Analysis (Temperature Distribution) ····· 32
Fig. 4-4 Result of Thermal Transfer Analysis (Temperature Distribution_Surface Clipping) ····· 32
Fig. 4-5 Pre-process for Thermal Transfer Analysis ····· 33
Fig. 4-6 Pre-process for Boundary Condition ····· 34
Fig. 4-7 Result of Thermal Transfer Analysis (Temperature Distribution_Wall Thinning 30%) ····· 35
Fig. 4-8 Result of Thermal Transfer Analysis

(Temperature Distribution_Surface Clipping_Wall Thinning 30%) ·····35
Fig. 4-9 Result of Thermal Transfer Analysis
(Temperature Distribution_Wall Thinning 50%) ·····36
Fig. 4-10 Result of Thermal Transfer Analysis
(Temperature Distribution_Surface Clipping_Wall Thinning 50%) ·····36
Fig. 4-11 Image of the ultrasonic thermography test for bearing ·····37
Fig. 4-12 Temperature result graph of the ultrasonic thermography test for bearing ·····38
Fig. 4-13 Bearing test image with the halogen lamp ·····39
Fig. 4-14 Bearing temperature result graph with the halogen lamp
(Wall thinning defect: 30%) ·····40
Fig. 4-15 Bearing temperature result graph with the halogen lamp
(Wall thinning defect: 50%) ·····40
Fig. 4-16 2D design of Experiment specimens ·····42
Fig. 4-17 Ultrasound diffusion paths ·····42
Fig. 4-18 Heat a defective part ·····42
Fig. 4-19 Carbon steel(SM45C) ·····42
Fig. 4-20 IR test image for the flange: 5mm surface defect ·····43
Fig. 4-21 Temperature graph for the flange: 5mm surface defect ·····44
Fig. 4-22 Lock-in program source screen (LabView version) ·····45
Fig. 4-23 Lock-in program image-processing image (LabView version) ·····46

LIST OF TABLE

Table 2-1 Bearing damage shape ····· 9

NOMENCLATURE

B : Spectrum parameter

C : Speed of Sound in a Material of Horn

E : Modules of Elasricaty

F : Model parameter

F : Frequency

I_m : Thermal value of measured whole radiation

$I(T)$: Thermal Value

P : Density

R : Correspondence parameter

T_{amb} : Ambient air temperature

T_{atm} : Atmosphere air temperature

T_{obj} : Temperature of measurement target

W_b : Exitance of whole radiant energy

α : Absorptivity

ϵ : Emissivity

ρ : Reflectivity

τ : Transmissivity

σ : Stefan-Boltzman constant

λ : Wavelength

ABSTRACT

Evaluation of Non-Destructive Reliability using Infrared-Thermography Technology for Eco-Friendly Part and Materials in Aero-Generator

Kim Sung-Hyun
Advisor : Prof. Kim jae-yeol, Ph.D.
Dept. of Advanced parts and materials engineering,
Graduate School of Chosun University

Unlike the generation methods based on the fossil fuel or uranium, the wind power generation is an unlimited pollution-free generation method that uses the wind as a clean power source without the air pollution or radiation exposure. Accordingly, the wind power generation is recognized as a prospective alternative-energy source. In South Korea, the interest of the wind power generation is increasing in the global climate change, the rapid increase in oil prices, and the energy problem due to the strong dependence on the imported energy (approx. 96%).

The ultrasound thermography detects defects by applying 20-30kHz ultrasound waves to a specimen and sensor for the heat generated from the defective part using an infrared thermographic camera. This technique draws the attention as a next-generation nondestructive inspection technique in the

new and renewable energy, car, and aerospace industries, because it can simultaneously inspect large areas and detect defects such as cracks and delaminations in real time. Although the heating mechanism due to the ultrasound excitation has not been precisely identified, it is presumed that the thermomechanical coupling effect and surface, or internal friction are the main causes. Observing this measured heat using an infrared thermographic camera allows the detection of defects in or on the objects to be quickly detected.

In this study, the ultrasound thermography is used to manufacture the specimens of the wind power generator bearing and wind power generator supplement flange, and the optimally designed ultrasound horn and ultrasound excitation system are employed to detect the damage on part materials of the wind power generation. In addition, the thermal flow analysis and imaging ultrasonic thermography detection method are comparatively analyzed to improve the detection reliability for the surface and internal defects of part materials of the wind power generation, and to verify the field applicability and reliability.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

현재 지구 온난화 현상으로 각국에서는 기상이변 및 자연재해가 빈번하게 일어나고 있다. 인명손실, 재산피해, 산업기반손실 등 막대한 경제적 손실을 주고 있는 상황에 있다. 따라서 국내외 각국은 신재생에너지 기술과 녹색성장기술에 대한 융복합 에너지 개발기술에 주력하고 있다. 또한 지구 온난화 현상으로 대두되는 환경 문제와 자원의 구갈 우려, 고유가 시대에 대한 대책으로 세계 각국은 여건에 맞는 지원육성프로그램을 수립하여 풍력발전산업의 발전을 주도하기 위한 투자를 강화하고 있다. 최근 풍력발전이 화석연료에 대한 대체에너지로 부각되며, 고성장세 지속, 2005년 이후 신규 발전용량은 연평균 36%의 고성장하고 있으며, 2004년 0.9%성장 이후 2005년 41%, 2006년 32% 성장, 1995~2004년의 연평균 성장률 23%보다 1.6배 증가하고 있다. 지난 2년간의 발전능력 확대에 힘입어 총 발전량은 2006년 72.2GW로 증가 전체 발전용량 36%가 지난 2년간 설치 풍력발전 능력은 지속적으로 늘어 2010년 150GW로 증가할 전망이며, 2010년 설치된 발전용량은 21GW로 연평균 8.4% 성장(2006~10년)이 전망되고 있다.[6]

글로벌 금융위기 이전에 신재생에너지에 대한 요구는 급격한 유가상승으로 지속적으로 발생하고 있으며, 특히 온실가스 의무감축과 관련되어 활발한 움직임을 보이고 있다. 글로벌 금융위기로 유가가 급락하고 낮은 수준에서 머물고 있지만, 오히려 글로벌 금융위기 이후 전 세계 주요 국가들은 경제 활성화 대책으로 신재생에너지에 대한 투자를 늘리려고 하고 있다. 대부분의 산업이 정체되거나 마이너스 성장을 하는데 반하여 신재생에너지 산업은 더욱 확대될 가능성이 높아, 지속적으로 관심을 잦고 경쟁력을 잦추어 나가야 하는 부분이 되고 있다. 우리나라의 녹색성장 주요 정책을 살펴보면 녹색 신성장동력 17개에 신재생에너지가 포함되어 있다. 이러한 녹색성장 추진 방향은 국가에너지기본계획에 포함되어 신재생에너지 비중을 현재 2.6%에서 2030년까지 11%로 높이는 것을 목표로 하고 있다. 특히 우리나라는 1차 에너지 구조의 석유의존도가 44.6%이며, 전력생산에서도 62%에 달하는 화석연료의 의존도를 낮출 필요가 있을 것으로 보인다. 비록 최근 화석연료의 가격이 하락하였지만 금융의기와 경기침체에 따른 수요 감소에 의한 원인이 크므

로, 경제 활성화 대책에 따른 풍부한 유동성이 경기회복과 연계된다면 화석연료의 가격이 급등할 수 있는 상황도 발생할 수 있기 때문이다. 이러한 측면에서 본다면 신재생에너지 확보는 지속적, 집중적으로 조명을 받을 수밖에 없다.

풍력발전은 유럽 선진국의 주요 업체들이 시장을 주도하고 있으며, 국내 업체들의 경쟁력은 아직 약한 것으로 알려져 있지만 유니슨과 같이 국내 풍력발전을 주도하고 있는 기업과 현대중공업, 삼성중공업, 등 대형 조선사들이 사업다각화 측면에서 진출하고 있어 향후 국제경쟁력 확보가 기대된다. 또한 플랜지, 샤프트, 베어링, 타워 등 주요 부품의 경쟁력은 상단항 수준에 있어서 풍력발전이 국내 주요 산업이 될 수 있을 것으로 보인다. 특히 대형 조선사들의 경우 풍력발전이 주문생산방식, 생산에 걸리는 시간이 길다는 점, 해양풍력발전 단지조성과 같은 부분은 해양플랜트와 큰 차이가 없고, 주요 부품 중 하나인 Blade는 선박에서 사용하는 프로펠러와 유사한 역학적 특징을 갖기 때문에 풍력발전에 적극적으로 진입할 것으로 보인다. 최근 삼성중공업은 풍력발전 설비공장도 갖추지 못한 상태에서 미국 에너지기업 Cielo와 2.5MW급 풍력발전기 3기를 오는 2011년까지 텍사스주에 설치하는 내용의 투자의향서를 체결한 것으로 알려져 더욱 기대가 높아지고 있다. 금융위기와 경기 침체로 조선산업이 장기간 위축될 것으로 전망되는 가운데 새로운 신성장 동력으로 신재생에너지 특히 풍력발전에 기대감이 높아 국내 대형 조선사들이 진입은 매우 긍정적으로 볼 수 있다.(7)

전기 전자분야는 실시간 IR현미경이 집적회로의 기능서과 수명검사에 이용되고 있으며, 제조업분야는 비 접촉 적외선 온도측정 장비들이 제조업에서 이용되고 있다. 제조공정에서 제품 품질향상과 공정의 효율화와 관련하여 온도를 모니터링 하고 제어하는데 적외선카메라가 이용된다. 알루미늄 누출공장, 열연공장, 제강공장 의고로, 연속주조, 열처리로 등에서 품질균일화를 위한 온도제어와 관련하여 열화상시스템이 도입되고 있다.

초음파 적외선 영상(Ultrasonic Infrared Imaging : UII) 분야는 물체 속에 결함을 검출하는데 초음파 에너지와 적외선 영상을 함께 응용하는 합성기술이다. 균열 박리 등이 초음파에너지를 받으면 열이 발생하게 되는데 이것들의 위치와 방향을 적외선 영상이 찾아내 해석하게 된다.

제 2 절 연구목적 및 방법

풍력발전은 청정에너지인 바람이 동력원이므로 화석연료나 우라늄 등을 이용한 발전방식에 비해 대기오염이나. 방사능 누출 등과 같은 문제가 없는 무한정의 무공해 발전방식이다. 이러한 장점으로 풍력발전은 가장 유력한 대체 에너지원으로 인정받고 있다. 지구 환경 변화에 대한 국제적 관심과 최근의 급속한 유가 상승, 사용 에너지의 약96%를 수입에 의존하고 있는 우리나라의 에너지 문제로 인해, 최근 들어 국내에서 풍력발전에 대한 관심이 높아지고 있다.[8]

베어링이란 회전하고 있는 기계의 축을 일정한 위치에 고정시켜고 축의 자중과 축에 걸리는 하중을 지지하면서 축의 회전을 보호하는 역할을 하는 기계요소로서 일명 축받이라고도 한다. 이때 베어링과 접촉하고 있는 일정한 폭의 축 부분을 저널(journal)이라고 하며, 그 접촉상태에 따라 크게 미끄럼 베어링(sliding bearing)과 구름 베어링(rolling bearing)의 두 종류로 분류한다.

구름 베어링은 축과 베어링의 볼 또는 롤러가 접촉하며 축이 회전하면 볼 또는 롤러도 같이 회전하기 때문에 일반적으로 마찰저항이 작고 정확한 움직임이 보장되므로 주로 공작기계류에 쓰인다.

한편, 회전하는 기계 축에는 하중이 축과 수직으로 걸린느 경우와 축 방향으로 걸리는 경우가 있으며, 베어링은 이와 같은 하중에 견디면서 회전운동을 확실히 보장해야 된다. 베어링은 이와 같은 하중방향에 따라 그 구조가 많이 달라지는데, 축과 수직으로 하중이 걸리는 경우에 사용하는 것을 레이디얼(radial) 베어링이라 하고, 축 방향으로 하중이 작용하는 경루에 쓰는 것을 드러스트(thrust) 베어링이라 한다. 이에 따라, 볼베어링의 경우에 레이디얼 볼베어링과 드러스트 볼베어링 등이 있으며, 또 가늘고 긴 침상의 롤러를 사용하는 니들베어링이 있다. 구름 베어링을 사용하게 된 것으로 대량 생산과 사용시의 교환성이라는 점에서 유리하나, 하중 조건이 변하면 수명이 짧아질 수 있다. 미끄럼 베어링은 축이 회전할 때의 마찰열을 방지하기 위해 적절한 윤활이 필요하며, 사용 중 마모로 인해 구멍이 커지므로 가락지와 같은 부시(bush) 메탈을 저널과 접촉하는 구멍부에 끼워 넣는 것이 일반적이다. 드러스트 베어링의 경우는 축의 선단에 걸리는 하중을 베어링의 밑면이 지지하게 되며, 경우에 따라서는 그 면의 발열을 적게 하기 위하여 선단을 약간 가늘게 한 피벗(pivot) 베어링이나 큰 드러스트 하중에 견디기 위하여 축의

일단 몇 개의 칼라(collar)를 붙여 칼라의 옆면이 힘을 지지하게 한 것도 있다. 이상과 같이 베어링의 종류를 간단하고 크게 나누었으나 실제로는 여러 가지 특징에 따라 더 많은 종류로 세분할 수 있다.[18]

초음파 서모그래피 (ultrasound thermography) 기술은 시편에 20~30 kHz 대역의 초음파를 입사하면 결함부에서 발열이 되고, 그 열원을 적외선 열화상 카메라로 측정함으로써 결함을 검출하는 기술이다. 이 기술은 넓은 면적을 동시에 검사 할 수 있고, 크랙 또는 박리와 같은 결함을 실시간으로 검출 할 수 있어 신재생에너지 산업, 자동차 산업, 우주항공 산업에서 차세대 비파괴 검사기술로 주목 받고 있다. 초음파 가진에 의한 발열 메커니즘은 정확히 규명되지 않았으나, 열-기계 연성효과(thermo-mechanical coupling effect)와 결함 계면사이의 마찰효과(surface friction or internal friction)가 주요한 원인인 것으로 추정되고 있다. 이러한 열을 적외선 열화상 카메라로 측정하면 물체 내 또는 표면에 존재하는 결함을 신속하게 검출할 수 있다. 그러나 이 기술은 비교적 간단하게 시험장치를 구성하여 빠른 시간 내에 결함을 검출 할 수 있으나, 아직까지는 검출능과 관련된 인자들의 신뢰성 있는 데이터는 없다. 20kHz 대역 주파수의 초음파는 수십㎝의 파장 성분을 갖는다. 또한 파장 길이보다 훨씬 먼 거리를 진행할 경우에도 초음파는 충분한 진폭 에너지를 가지면서 전파된다. 재료에 손실이 없을 경우 초음파는 감쇠 없이 수파장 이상의 거리를 전파할 수 있다. 일반적으로 고체에서 음파의 속도는 수 ㎞/s 이다. 초음파 여기 펄스가 인가되는 순간에 1㎡ 이내의 크기를 갖는 구조물의 전 검사 영역을 음장(Sound Field)이 완전히 투과한다. 수 kHz 대의 영상 획득시간을 갖는 초고속 적외선 열화상 카메라를 이용할 경우 수십㎲ 이내에 결함을 검출할 수 있다. 따라서 결함부위에서의 발열을 효과적으로 여기하기 위해 가청 주파수의 경계에 위치하는 15kHz~40kHz 대역의 여기 주파수를 사용하며 일반적으로 20kHz 대역이 널리 사용된다.[12~17]

본 논문에서는 이러한 초음파 서모그래피 기법을 이용하여 풍력발전기용 베어링과 풍력발전기 보강용 플랜지을 대상으로 시험편을 제작하고 최적 설계된 초음파 혼과 초음파 가진 시스템을 이용하여 풍력발전용 부품소재의 손상여부를 검출하고자 한다. 또한, 풍력발전용 부품소재의 표면결함 및 내부결함의 판별정도의 신뢰성 향상을 위한 검출 이미지의 열 흐름 분석과 화상처리 초음파 서모그래피 검출기법을 비교 분석하여 현장 적용성 및 신뢰성을 검증하고자 한다.

제 2 장 풍력발전기 부품소재 및 열화상 시스템

제 1 절 풍력발전용 부품소재

풍력발전기는 타워, 로터 블레이드, 기어박스 그 외에 전력변환기, 변압기, 발전기, 메인 프레임, 피치시스템, 메인 샤프트, 로터 허브, 너셀 하우징, 브레이크 시스템, 요 시스템, 로터베어링, 스크류, 케이블로 구성되어 있다.

1. 풍력발전용 베어링

가. 베어링의 사용부위

1~2MW 풍차 나셀부에는 회전주축, 기아박스, 발전기, 요 기어박스, 그 외에 요 선회시트, 날개(blade) 피치선회시트, 유압펌프 등 많은 부위에 베어링이 사용되고 있다.

나. 베어링의사용조건

(1) 회전 주축용 베어링은 날개와 회전체를 지지하여 회전토크를 기어박스에 전달한다. 항상 변화하는 바람에 의해서 주축용 베어링에 작용하는 하중과 회전속도는 크게 변화한다.

(2) 컷인 이하의 풍속에는, 회전체 주축은 아이들링(idling) 상태에서 저속, 가벼운 하중에서의운전이 되지만, 컷인 이상의 발전상태 에서는 정격 회전수에 상승하고, 하중도 평균적인 값이 된다. 더더욱, 돌풍이 불 때에는 큰 하중이 날개, 회전체를 흔들어서 주축용 베어링에 부하를 가중시킨다. 이와 같은 하중과 회전수의 변동은 주축용 베어링과 같은 모양의 기어박스용 베어링에도 부하를 가중시킨다.

(3) 풍력 발전용 베어링은, 가벼운 하중부터 돌풍이 불 때의 무거운 하중까지 광범위한 하중대역에서 운전시킨다. 또, 하중의 변동을 끊임없이 받으면서 시동, 가속, 감속, 정지를 불규칙적으로 반복하기 때문에 베어링의 사용부위별로 최소하중, 등가하중, 최대하중의 각 조건에 관해서 베어링의 기술검토가 필요하다.

다. 궤도륜 및 전동체의 재료

궤도륜 및 전동체에는 일반적으로 고탄소 크롬 베어링강이 사용되고 있으며, 대부분의 베어링에는 SUJ2가 사용되고, 대형베어링에는 SUJ3가 사용된다. SUJ2의 화학구분은 모든 외국에서 베어링용 재료로서 규격화되어 있는강을 사용하고 있다. 내충격성을 더욱더 필요로 하는 경우에는 베어링재료로서 크롬강, 크롬몰리브덴강, 니켈크롬몰리브덴강 등을 사용하여 침탄 열처리에 의해 표면에서 적당한 깊이까지 경화시킨다. 적절한 경화깊이와 치밀한조직, 적정한 표면경도 및 심부경도를 가진 침탄베어링을 이용한 베어링보다 뛰어난 내충격성을 갖고 있다.[25]

라. 피치베어링

피치베어링은 블레이드와 로터를 연결하고 지지하는 역할을 한다.
바람의 세기에 따라 날개의 경사각 조절로 출력을 능동적으로 제어하며 변화하는 풍력에 대응하여 최적의 출력을 나타내야 하기 때문에 정밀 성형 공정 및 가공 기술이 필수적으로 요구 된다.

마. 요 베어링

요 베어링은 수평축 풍력 발전기의 요 시스템 중 중요한 요소 중 한가지이다.
요 시스템은 로터 축을 항상 바람이 불어오는 방향으로 일치 하도록 제어하는 방향 제어 시스템이다. 여기서 요 베어링은 고정된 타워와 회전하는 니셀을 연결하고 지지하는 기어타입의 핵심부품으로 조직의 균일성 및 오차설계 등 제품의 요구특성이 까다로우며 기어 가공기술은 물론 고주파 열처리등에 의한 표면 강화기술을 요구 하고 있다.

바. 회전체 주축용 베어링

(1) 최대하중에 있어서의 축 박스의 강도 확인과 등가하중에 있어서의 축 박스의 변위를 고려한 베어링 수명의 검토를 이행, 군살이 없는 얇고 축 박스설계와 실용상 충분히 계산수명을 만족하는 추축용 베어링을 선택한다.
(2) 베어링 타입으로는, 자동조정 롤러 베어링(Self-aligning roller bearings), 원통 롤러 베어링이 주로 쓰이며 그 중 미스 얼라인먼트에 유리한 자동조정 롤러

베어링이 많이 이용되고 있다. NTN 자동 조정 롤러 베어링은 최소 하중으로부터 최대 하중까지 넓은 하중조건에 있어서, 롤러가 가운데로 안내받고 있기 때문에 비틀림이 적고, 토크가 안정된 발열이 적은설계를 실현 하고 있다.

(3) 주축은, 날개 진동과 기어박스 진동에 의한 프레팅 부식(Fretting corrosion)이 발생하는위험이 있기 때문에, 베어링 빈틈과의 맞춤 정상화와 동시에 그리스(greease) 선택도 중요하다. 베어링과 축 박스를 주축 유닛으로 정상화를 꾀하면서, 신뢰성의 향상을 도모하는 것이 필요하다.

사. 기어박스 용유성 베어링

(1) 기어박스는 입력축, 유성, 저속축, 중간축, 고속축으로 구성되어있다.
그 안의 유성 톱니기구는, 복잡해서 가장 많은 베어링의 과제이다.

(2) 유성톱니는 자동조정 롤러베어링, 풀 타입(pull type) 롤러 베어링 으로 구성되어있다.

(3) 유성 베어링의 탄성변형과 미스 얼라인먼트를 고려한 검토가 필요하다. 해석 모델로는 베어링의 전동체 하중을 부하하고, 링 기어 측과선 기어 측 각각의 기어 물림점을 전방향 으로 구속해서 변형을 고려한 베어링 수명 계산을 행한다.

(4) 변형해석의 결과로부터 궤도 바퀴의 탄성변형을 고려한 베어링 수명은, 탄성변형을 고려하지 않은 경우에 비해 수명비가 약60%로 감소하고, 베어링의 외측 열이 내측 열에 비해 하중 대 부하비율이 높은 결과로 나타났다.

(5) 유성기어는 톱니바퀴와 베어링 외바퀴의 탄성변형의 영향, 캐리어의 비틀림 등에 의한 유성 베어링의 미스얼라인먼트의 영향, 드라이 스타트(윤활유부족)의 영향 등이 문제로 꼽을 수 있다.

아. 발전기용 절연베어링

(1) 베어링 내부의 전류통과에 의한 스파이크 현상(전식)의 방지가 베어링의 신뢰성 향상에 불가결한 것이다.

(2) 절연저항치가 100㏁ 이상에서, 절연파괴전압2㎸ 이상의 절연성능을 가지고 있고, 풍력용 발전기의 절연 요구치를 만족하고 있다.

2. 풍력발전용 베어링의 손상유형

베어링에서 발생하는 문제의 해결 방법과 베어링 손상 형태(Mode)를 진단하는 방법은 베어링의 주된 손상 형태인 마멸(Abrasion), 부식(Corrosion), 전식(Electrical Pitting), 피로(Fatigue), 과열(Overheating), 마찰(Wiping)등 여섯 가지에 대해 자세하게 다루었으며, 각각의 손상 양상 및 그 발생 과정(Mechanism)에 대해 설명하였다. 또한 각 손상 형태에 따른 베어링의 육안 점검에 대해 설명하고 가능한 손상 원인에 대해서도 검토하였다. 베어링 표면에서 발생한 손상형태에 대해서 설명하고 손상 형태를 확인하는 실례를 들어, 근본 원인과 그에 대한 정비 방안을 제시하였고, 윤활 계통의 문제는 베어링 손상의 주된 원인이기 때문에, 윤활유의 상태를 감시하는 효과적인 방법들에 대해서도 설명하였다. 터빈 발전기의 베어링 손상은 발전기를 운전하지 못하게 하는 주된 원인이 되며, 베어링 계통뿐만 아니라 Rotor, Stator, 관련 설비들의 심각한 손상을 일으킬 수도 있다. 터빈 발전기의 베어링 손상이외에도 펌프, Fan, 보조 가스터빈, 모터 등과 같은 그 밖의 다른 회전 기기의 베어링 손상도 또한 발전소의 운전정지를 초래할 수 있다.

Breakdown과 같은 중대한 상황이 발생되면, 베어링 손상의 원인 규명과 효과적인 정비 방법이 아주 중요하게 된다. 전기 설비 산업에 종사하는 베어링 사용자, 원제작자, 판매자들은 각각의 손상 형태를 잠재적 원인 및 근본 원인에 연관시켜, Thrust 및 저널 베어링의 다양한 손상 양상들을 진단해왔으며, 정비 조치 및 베어링의 재생을 위한 지침을 개발해 왔다. Fig. 2-1, Table 2-1은 발전소 회전설비에 사용되는 유막 베어링에서 발생 가능한 16가지의 분류로 나누고 있다.

Fig. 2-1 Bearing damage image

Table 2-1 Bearing damage shape

손상 형태	손상형태의 다른 명칭
마멸, 마손, 침식(Abrasion)	홈(Gouging), 긁힘(Scoring, Scratching)
접착부 박리(Bond Failure)	파열(Spalling)
공동 침식(Cavitation Erosion)	공동(Cavitation)
부식(Corrosion)	화학적 파괴(Chemical Attack)
전식(Electrical Pitting)	Frosting
침식(Erosion)	Worm Tracks
피로(Fatigue)	
기계적 부식(Fretting)	Fretting Corrosion
고 크롬 성분에 의한 손상 (High Chromium Damage)	Wire-wool, Black Scab
비균질성(Non-homogeneity)	기포(Blistering), 부풀음(Porosity)
과열(Overheating)	얼룩, 반점(Mottling), 이상성(Anisotropy), 톱니모양(Ratcheting), 가열(Sweating)
용착, 눌러붙음(Seizure)	
구조손상(Structural Damage)	
표면마모(Surface Wear)	검은 산화물(Black Scale)
주석산화 손상(Tin Oxide Damage)	마멸(Wear)
마찰, 벗겨짐(Wiping)	문지름(Smearing), Polishing

3. 풍력발전기의 보강용 플랜지

관 지름이 큰관, 내부의 압력이 높은관, 또는 자주 떼어낼 필요가 있는 관에는 관이음을 사용하지만, 이 관이음의 접속부분을 플랜지라 하며, 원주위에 체결용의 볼트 구멍이 설치 되어있다. 플랜지는 주철, 주강, 단강, 강판, 청동, 황동 등으로 제작하고, 관에 부착하는 부착식과 관 부위가 일체로 만드는 일체식 등이 있다. 부착식은 플랜지를 비틀어 박거나, 리벳, 전압, 용접 또는 유합 등의 방법으로 관에 부착한다. 원기둥 위에 부착된 날밑 모양으로 튀어나온 자루를 말하며, 축이음이나 관이음의 플랜지와 같이 부품의 접속에 사용되는 것, 보강플랜지와 같이 부품의 강도를 증가시키기 위해 사용되는 것 등이 있다. 원통 혹은 원기둥 모양의 부품을 다른 부품에 부착하는 경우, 복수의 나사구멍을 낸 플랜지가 흔히 쓰인다. 특히 배관에 사용되는 플랜지 계수(이음부품)는 KS 에 상세하게 규격화되었다.

타워 플랜지는 타워의 연결에 필요한 구성품 으로 6~7개의 플랜지가 한 세트를 이룬다. 타워 플랜지의 제조방식은 크게 용접과 링 압연으로 나눌 수 있다. 타워 플랜지는 저합금강이 주로 사용되며 소재특성으로 용접성이 좋고 일반 강에 비해 강도 및 충격치가 우수하며 알루미늄 첨가를 통해 조직 미세화를 얻어낸 강종이어야 한다.[26]

Fig. 2-2 Tower flange for wind power generation

제 2 절 적외선 열화상 측정이론

1. 열측정 이론

적외선 열화상(Infrared Thermography)은 열복사로 피사체에서 방사되는 적외선 영역을 열화상 카메라를 통하여 가시적인 화상을 만들어 주는 기술이다. 적외선은 가시광선보다 파장이 긴 전자기적 복사의 한 형태이며, 기타 전자기적 복사 파로는 X-레이, 자외선, 라디오파 등이 있다. 전자기적 복사는 주파수 혹은 파장에 의해 범위가 정해진다. 전자기 스펙트럼은 대역(band)이라고 부르는 많은 파장의 영역으로 나눌 수 있다. 적외선 열화상 카메라는 Fig. 2-3 ,Fig. 2-4에 나타낸 바와 같이 2㎛~13㎛ 대역을 사용한다. 여기서 단파(SW:Short wave) 영역은 2㎛~5㎛의 대역에서 복사가 검출될 수 있는 범위를 말하며, 장파(LW:Long wave) 영역은 8㎛~12㎛의 대역의 복사가 검출될 수 있다. 그리고 중간에 5㎛~8㎛의 대역에서는 대기에서의 낮은 투과율에 의해 전달률이 0%를 나타내고 있으므로 적외선 검출이 불가능하다. 또한 SW 영역에서는 고온의 적외선 검출이 용이하고 LW 영역에서는 저온의 적외선 검출이 용이하다.[22]

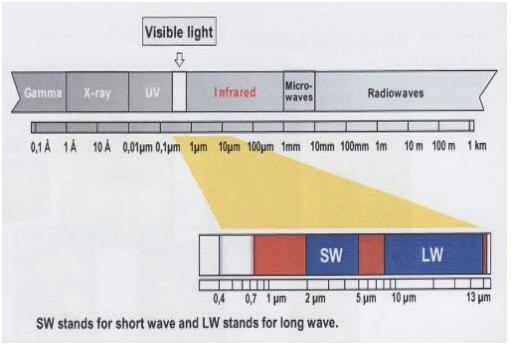


Fig. 2-3 The electromagnetic spectrum

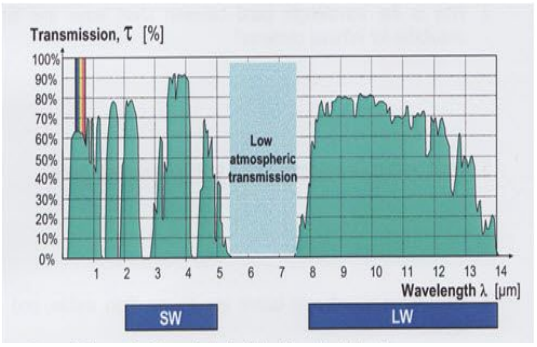
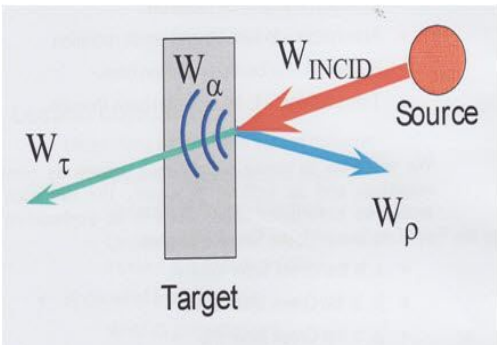


Fig. 2-4 Atmospheric transmission in different wavelength bands

가. 적외선 열화상 측정 원리

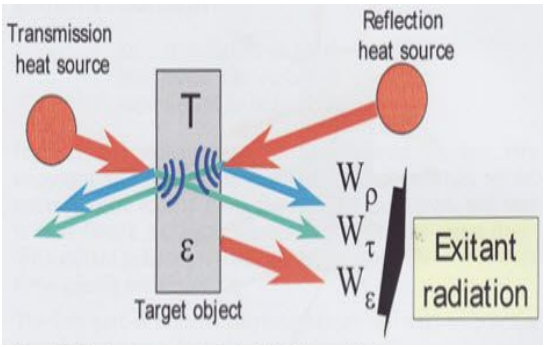
본 논문에 사용된 적외선 카메라는 AGEMA사에서 제작한 Thermovision 900 SE/TE 기종이며 빛이 물체에 방사되어 나오는 각종 파장 중에서 적외선 부분만을 검출해 내어 온도분포를 측정한다. 복사 에너지는 Fig. 2-5, Fig. 2-6에서 나타난 것과 같이 Incident 복사와 Exitan 복사로 세분화 할 수 있다.



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

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

Fig. 2-5 Incident radiation



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

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Fig. 2-6 Exitan radiation

Incident 복사란 물체의 주위 사물로부터 물체에 부딪히는 모든 복사에너지를 말하는 것으로 흡수율(α) + 반사율(ρ) + 투과율(τ) = 1로 나타낼 수 있으며 Exitan 복사는 원래의 열원에 상관없이 물체의 표면을 떠나는 모든 복사 에너지를 말하며 방출률(ε) + 반사율(ρ) + 투과율(τ) = 1로 나타낼 수 있다. 즉, $\alpha = \varepsilon$ 이므로 물체가 Incident 복사에너지를 흡수하는 용량 또는 능력은 그 물체 자신이 복사에너지를 방출하는 용량과 언제나 같음을 알 수 있다.[23]

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

흑체에 대해,

$$W = \sigma T4 \ W/m2 \qquad (2\text{-}1)$$

식 (2-1)에서, σ는 스테판 볼츠만(stephan-Boltzmann)상수 (5.67X10-8W/m2K2)이다.

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

$$\text{Stephan - Boltzmann Law : } E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T4 \qquad (2\text{-}2)$$

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

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

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

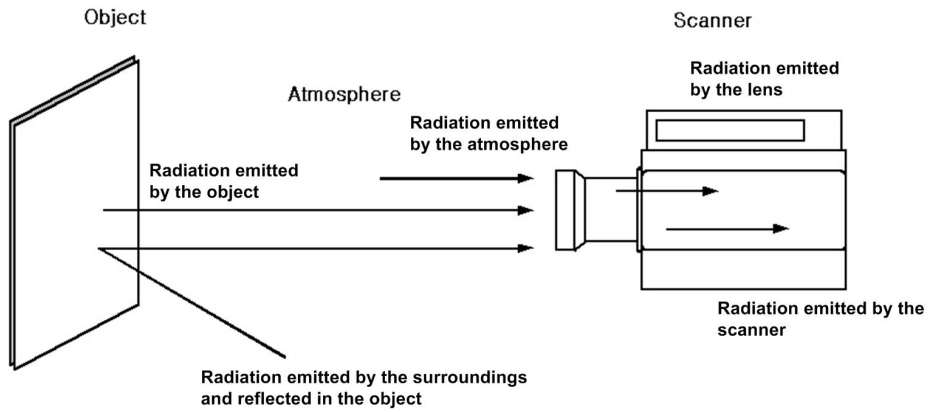


Fig. 2-7 Radiation contributions to the general measurement situation

대기와 물체 방사율에 영향을 미치는 보정은 열상에 존재하는 부수적인 방사에너지와 대기에 의해 감쇄된 피사체의 방사에너지뿐만 아니라 주위로부터의 방사에너지, 즉 대기 자체에서 방사된 방사에너지와 대기에 의한 감쇄와 물체에서 반사되어진 방사에너지로 존재한다. 피사체 방사에너지 강도는 존재하지 않는 완전한 흑체 방사율의 함수와 같다. 이에 상응하는 측정공식은 시스템 컨트롤러에 포함된

ERIKA 소프트웨어 안에 주어진다. 열 측정 공식은 식 2-1에서와 같이 표현된다. 여기에서 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.

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

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

식 2-4에서 $I(T)$는 온도 T일 때 흑체로부터 방사량에 비례하는 신호 값으로서 물체, 대기, 주변에 관한 함수이다. 식 2-4은 불투명 물체, Lambertian 표면, 일정 분광 방사율(grey body)이라는 가정을 갖는다.

스캐너로부터 반사된 방사에너지의 교정, 다시 말해 스캐너와 그 고유 광학계로부터 반사되어진 스캐너 온도에 의한 방사에너지 교정은 Thermovision 900에서 자동적으로 실행된다. 이것은 두 흑체 온도를 기준으로 4개의 온도센서 스캐너를 사용하는 마이크로프로세서로 컨트롤된 시스템에 의해 실행된다. 이러한 교정기능은 블랙바디온도와 스캐너의 신호 출력간의 비선형 관계를 표현해 주는 것이며 각 렌즈와 각 필터, 영역 조합은 그 자신이 교정 기능을 가지고 있다. 이 기능에 대한 상수는 스캐너에 저장되어 있고 시스템은 자동으로 사용된 조합에 대하여 적당한 상수를 선택한다. 또한 플랭크법칙과 스캐너 및 필터의 분광 응답을 이용하여 계산하지만 더 많은 정확한 결과는 측정에 의해서 얻을 수 있다. 이는 많은 블랙바디 소스가 스캐너로 측정되었을 때 측정 중에 이루어 질 수 있는 것이다.

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

$$I = \frac{R}{\exp(\frac{B}{T}) - F} \qquad (2\text{-}5)$$

식 2-5에서 I는 온도 값이고 R은 대응인자, B는 분광인자, F는 모형인자며, T는 물체의 온도이며 스캐너의 출력 신호는 입사된 방사에너지와 비례한다는 가정을 갖는다.

검출기의 응답은 비선형이기 때문에 네 번째 측정 상승의 보정 기능이

Thermovision 900에 덧붙어 작은 비선형 에러를 보정하여 준다.

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

식 2-6에서 U는 스캐너 안에 A/D 변환기로부터의 비디오 신호이며 L은 비선형 상수, I_s는 Object signal이다. 또한 Object signal은 측정 표시 단위이고 이 신호는 비선형적인 교정을 거친 후 표시된다. 이 신호는 광 방사에너지와 비례한다.
피사체 매개변수들의 선정은 특정한 측정 상황을 설명한다. 그리고 대상물 온도에서 방사에너지 값의 전환에 앞서 피사체의 교정을 위해 요구한 매개변수들 즉 방사율과 대기에 의한 영향을 소프트에서 포함하고 있다. 피사체 매개변수들은 방사계수, 대기온도, 주위 온도, 피사체거리, 상대 습도, 반사된 주위 온도 영향을 포함하고 있다.

방사율의 경우 실제 피사체는 거의 “블랙"이 아니기 때문에 방사요인은 측정 식으로 나타난 적외선 온도 측정으로 고려하여야 한다. 피사체 방사는 측정 될 수도 있고 표에서 찾을 수 있다. 보통 피사체 재질과 표면은 약 0.1~0.95 범위에서 방사율을 갖는다. 광택이 많이 나는(거울) 표면은 0.1이하로 떨어지고 산화 혹은 페인트 표면은 방사가 아주 크게 증가한다. 사람 피부 방사율은 1에 가깝게 표시된다. 반사된 주위온도에서 불투명한 피사체의 반사요인은 $\rho = 1-\epsilon$로서 얻을 수 있다. 따라서 낮은 방사 요인은 피사체로부터의 방사율이 같은 온도의 흑체의 그 것보다 낮을 뿐만 아니라, 주위로부터 바람직하지 않은 복사가 피사체에서 반사되어 스캐너로 들어오게 됨을 의미한다. 측정 식은 이 복사를 보정하며, 이 보정은 반사된 주위온도(피사체 주위 온도의 평균 값)에 근거한 것이다. 대부분 대기온도, 반사 주위 온도 값은 같은 것이라 생각한다. 대기온도는 피사체와 스캐너 사이의 대기의 온도를 말한다. 그 경로의 온도가 과도하게 변화한 경우, 그 때의 평균값이 사용된다.

계산된 투과율은 스펙트럼 대역에서 대기흡수 적외선 복사의 구성을 사용하고 있다. 가장 중요한 가스들은 물(기체)과 이산화탄소이다. 이 흡수는 피사체에서의 측정은 적외선 복사를 엷게 할 것이다. 이 대기 희박 효과는 측정 공식에 의해 보상된다. 측정 공식은 피사체와 스펙트럼 안의 복사에 의한 앞 렌즈사이의 대기 투과율을 의미하는 상수 τ를 사용한다. 이 τ는 피사체 거리, 대기 온도, 상대습도의

기능으로써 τ가 계산된 소프트웨어로 계산 할 수 있고, τ값이 측정에 의해 또는 Lowtran과 같은 고기능 대기용 모델로부터 알려 질 수 있다면 직접 입력에 의해 계산될 수도 있다. 만약 오퍼레이터가 τ값을 입력한다면 추정된 τ는 소프트웨어에 의해 계산된 값을 무시 할 것이다. 효과적인 대기 투과율을 계산하기 위해서 소프트웨어가 사용한 식은 2-7과 같이 경험적이다.

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

식 2-7에서 τ는 효과적인 대기 투과율이고, X는 무게 요인, α_1와 α_2는 감쇠 계수, β_1과 β_2는 수증기와 관련된 감쇠 계수, d는 물체와 스캐너 렌즈 앞쪽 사이의 거리, W는 equivalent water content(소프트웨어로부터 계산된 상대습도와 대기 온도의 함수)이다. 대기 상수 $X, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$는 수증기 함수와 피사체 거리 사이에 계산된 것으로 알고리즘에 알맞게 계산되며 Lowtran 대기 모델에서 모든 스펙트럼은 Thermovision 900 스캐너와 전형적인 대기 안에 표준 필터에 의해 값을 이끌어 내 사용된다. 이 모든 대기 상수는 새 필터를 선택했을 때 자동적으로 적재된 것과 스캐너 안에 포함된다.

추정 투과율에서 가끔 측정 조건은 트릭이 있을 수 있고, 대기를 통한 전송 계산에 있어서 정상적인 연산 방식이 적용되지 않을 수 있다. 그와 같은 경우 그것은 종렬 추종 투과율로 값을 세팅하므로 자동적으로 계산된 대기 전송을 무시 할 수가 있다. 즉 이는 측정통로에서 사파이어 윈도우가 있을 경우인 것이다. 이러한 윈도우는 0.87의 투과율을 갖고 있고, 이는 계산된 투과율을 곱해야 한다. 추정 투과율 값은 보통 전혀 값을 갖지 않으나 0은 사용되지 않는다.

상대습도는 피사체와 스캐너 사이의 대기의 상대 습도이다. 이 매개변수는 유효 대기 투과율의 계산에 사용된다.

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

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

식 2-8에서 I_o는 물체 방사를 위한 디지털 값이고, I_o'는 스캐너로부터 받아들인 총 방사량(디지털 값에서), R, B, F는 보정 매개변수, T_o는 물체의 온도, ϵ_o는 물체의 방사율, τ_o는 물체의 투과율, I_α은 (a)에 의하여 변환된 주변의 온도, I_{atm}은 식 2-9에 의하여 변환된 대기의 온도이며, 투과율 τ는 계산된 투과율 공식에 의해 계산된다. 공식에서 W 인자는 다음 식에 의해 계산된다.

$$W = \text{RelHum} \times \text{precipitable water content} \tag{2-10}$$

Water content는 다음 식에서 표현할 수 있다.

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

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

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

적외선 열화상 테크닉은 기본적인 Pulse 적외선 열화상테크닉과 Lock-in 적외선 열화상 테크닉, Pulse-phase 적외선 열화상 테크닉이 있다.

Pulse 적외선 열화상 테크닉은 적외선 열화상 테크닉에 있어서 가장 보편적인 열자극 방법 중 하나로 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문이며 짧은 순간의 열 자극은 사용이 편리한 heating sources를 이용하여 평판에 직접 주사하는 방법을 취한다. 더욱이 신속한 열 자극은 재료의 손상을 방지한다.

기본적으로 Pulse 테크닉은 시편에 순간의 열 자극을 주고, 이때의 온도 변화를 기록하는 것이다. 이러한 현상의 금속에서의 온도 변화는 금속 내부에서 전파의 산란으로 인하여 매우 빨리 변화한다. 이에 시편의 결함 검출에 있어서 깊이에 따라 표면 온도를 관찰하였을 때 주위의 온도가 달리 나올 것이다. 깊은 결함일수록 명암의 대비가 확실하여 검출하기 편리하다.

Fig. 2-8 Infrared thermography (Pulse technique)

Fig. 2-8은 Pulse Technique 기법이며, Fig. 2-9는 Lock-in Technique기법이다. Lock-in 적외선 테크닉은 모듈레이터 램프의 레이저 공학에서 기초되었다. 측정 대상체에 저주파의 thermal wave를 동시에 주사하여 IR 장비로 측정을 하는 원리이다. 또한 IR 장비 검출기로 주사된 물체에 대해서 수많은 점 중에서 단지 1개의 점에 대해서만 모니터링이 가능하다.[19][20]

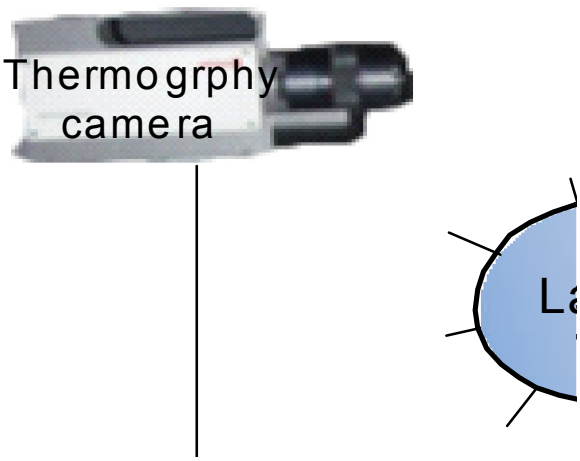


Fig. 2-9 Infrared thermography (Lock-in Technique)

2. 초음파 서모그래피

균열 또는 접합면의 결함 등이 존재하는 물체에 초음파를 입사시키면 균열, 결함 부위의 표면에서 국부적인 열이 발생 된다. 이는 고에너지 초음파 여기 탄성파가 물체의 균열, 박리 등의 결함 부위를 통과할 때 서로 맞닿은 결함 면이 균일하게 진동하지 않고 결함 면 사이의 마찰(friction), 문지름(rubbing) 또는 부딪침(clapping) 현상 에 의해 탄성파의 일부가 열로 변환되기 때문이다. 이러한 열을 적외선 열화상 카메라로 관측하면 물체 내에 고에너지 초음파 펄스를 인가하여 결함 부위에서 국부적으로 발생되는 열을 적외선 열화상 카메라로 관측하여 결함을 검출하는 것을 초음파 열화상 검사기법으로 정의한다. 초음파 여기 탄성파가 구조물에 전달될 때 결함 부위에서만 선택적으로 발열현상이 나타난다. 이를 적외선 열화상 카메라로 관측하면 구조물의 건전 부위는 휘도가 낮은 검은 배경으로 보이게 되고, 균열 등의 결함 등의 결함 부위는 휘도가 높은 밝은 영역으로 보이게 된다. 이러한 휘도(그레이 레벨)가 높은 밝은 지점을 핫 스폿(hot spot)으로 부르고 있다. 결함이 있는 구조물의 적외선 열화상 이미지에서는 전체적으로 어두운 배경에서 결함 위치만 밝은 영역으로 뚜렷이 대비되므로 용이하게 핫 스폿을 관측할 수 있으며 이를 처리하여 구조물의 결함 위치를 신속 정확하게 검출할 수 있다. 초음파 서모그래피를 이용한 비파괴 검사는 주로 항공기, 자동차 등의 복합재료의 결함 검출에 사용되고 있다. Fig. 2-10은 초음파 서모그래피의 결함 검출 원리를 나타내고 있다.[(2)(4)]

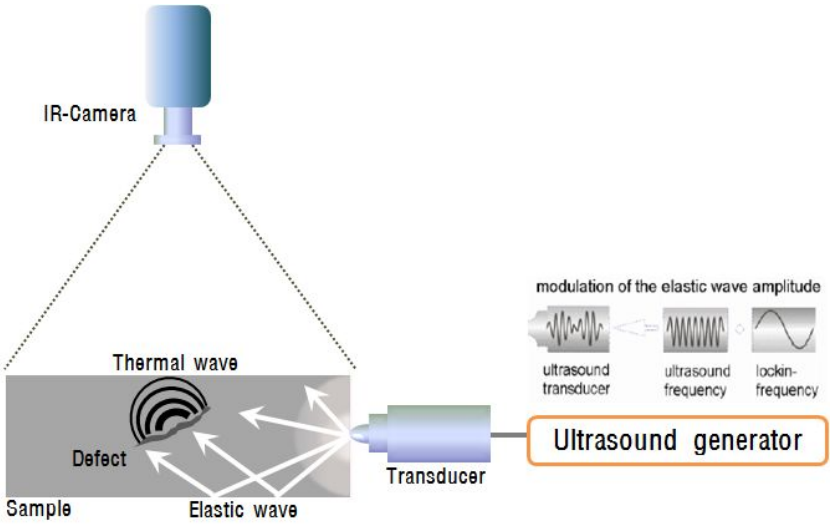


Fig. 2-10 Diagram of Heating System using Ultrasonic Excitation

초음파가 물체의 결함 부위를 통과 할 때 서로 맞닿은 두 결함 면은 균일하게 진동하지 않는다. 결함 면 사이의 마찰이 탄성파의 일부를 열로 변환시킨다. 이러한 발열현상을 적외선 열화상 카메라로 관측하면 구조물의 균열과 같은 결함을 효율적으로 검출 할 수 있다. 고에너지 초음파 펄스 (폭: 50~300ms, 주파수: 20~40kHz, 진폭: 2kV)를 검사시편에 인가하여 결함 부위에서 국부적인 열이 발생되도록 한다. 적외선 열화상 카메라를 이용하여 초음파 펄스 인가 전후의 시간 경과에 따른 결함 부위의 발열 현상을 관측한다. 20kHz 대역 주파수의 초음파는 수십 cm의 파장 성분을 갖는다. 또한 파장 길이보다 훨씬 먼 거리를 진행 할 경우에도 초음파는 충분한 진폭 에너지를 가지면서 전파된다. 재료의 손실이 없을 겨우 초음파는 감쇠 없이 수파장 이상의 거리를 전파 할 수 있다. 일반적으로 고체에서 음파의 속도는 수 km/s이다. 초음파 여기 펄스가 인가되는 순간에 $1\mathrm{m}^2$ 이내의 크기를 갖는 구조물의 전 검사 영역을 음장(sound field)이 완전히 투과한다. 수 kHz 대의 영상 획득시간을 갖는 초고속 적외선 열화상 카메라를 이용할 경우 수십 μs 이내에 결함을 검출할 수 있다. 따라서 구조물의 결함 부위에서의 발열을 효과적으로 여기하기 위해 가청 주파수의 경계에 위치하는 15kHz~40kHz 대역의 여기 주파수를 사용하며 일반적으로 20kHz 대역이 널리 사용된다.[3~5]

제 3 절 열화상 시스템 구성 및 초음파 가진기 구성 원리

1. 적외선 열화상 시스템

본 연구에 사용한 적외선열화상카메라 Thermovision 900 system은 AGEMA 적외선 SYSTEM AB에서 생산한 적외선 SCANING SYSTEM을 사용하였다. 이중 채널 마이크로 프로세서를 기초로 하는 제어기 부분에서는 2개의 68020 프로세서가 사용되고 32 비트 VME버스, 2개의 16비트 IR버스가 사용된다. 스캐너의 냉각방식은 열 전기적이며 검출형태는 2개의 스프리트, 직렬 스캐닝, 2~5.4 마이크론 스펙트럼 응답을 보이며 온도 범위는 -10℃~500℃(고온 필터 사용 시 2,000℃까지 검출 가능), 민감도는 30℃에서 0.1℃, 공간 해상도는 140원소/Line(50%변조), IR라인 주파수 3.5kHz, 심플/라인 204를 갖추고 있다. Fig. 2-11은 적외선 열화상 카메라 Thermovision 900 system의 전체적인 모습과 이동성을 위해 노트북컴퓨터와 연결할 수 있는 Research package 900의 구성도를 나타낸다.[1]

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

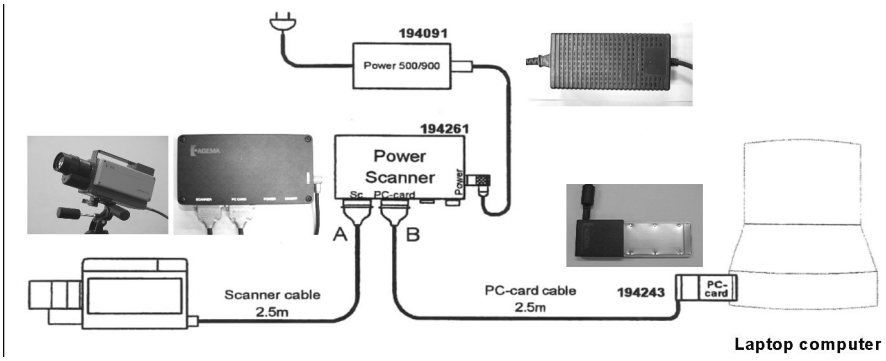


Fig. 2-11 Component of thermovision 900 system

가. 시스템 제어기

시스템 제어기는 산업표준 VME bus를 기초해서 만들어진 마이크로컴퓨터이며 OS9 운영시스템 아래 X윈도우 시스템을 사용하고 2개의 68020 프로세서를 사용하며 화상조절을 위해 특별히 내장된 조절 장치와 Enhanced 키보드를 사용하고 4+8Mb DRAM를 포함하고 있다. 또한 두 개의 스캐너 신호를 동시에 전송 할 수 있는 시스템을 가지고 있다. Fig. 2-12는 시스템 제어기의 신호 처리 방식과 제어 이동 경로를 나타내었다.

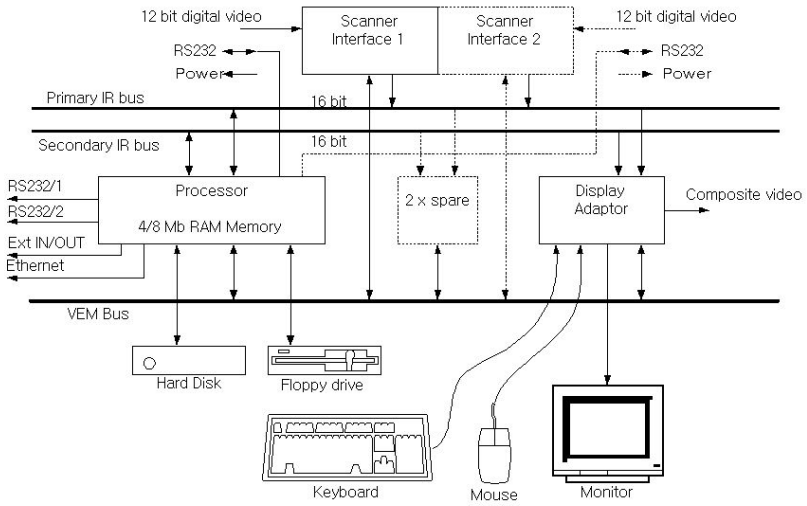


Fig. 2-12 Schematic diagram of system controller

3개의 메인 버스는 산업표준 VME 32비트 시스템버스, 스캐너 인터페이스를 위한 2개의 IR버스로 프로세서 장치에서 사용한다. 프로세서 장치는 기본적인 싱글 혹은 듀얼 스캐너 시스템을 위해 사용 할 수 있는 5개의 보드 슬롯 중 프로세서를 위한 것 1개, 스캐너 인터페이스와 디스플레이 인터페이스 보드 등 3개를 사용한다. 스캐너로부터 데이터입력은 완전한 온도범위에서 고 해상도를 주는 12비트 디지털 형태이다. 화상데이터는 12비트 형태로 저장됨으로써 차후 분석은 리얼 분석과 같은 정확도로 수행 될 수 있다. 시스템 Ethernet interface 혹은 2개의 RS232-C 커넥터 중 하나를 경유해서 멀리 호스트 컴퓨터에 연결되어 제어 될 수 있고 데이터를 교환 할 수 있다.[1]

나. 스캐너

스캐너 기기는 적외선을 디지털신호로 전환 할 수 있고 이는 시스템 컨트롤러로써 해석 할 수 있다. 또한 칼라 혹은 그래이스케일로 물체의 상을 보여주는데 사용되고 있다. 스캐너에서 적외선 복사는 12비트 디지털신호로 변환된다. 이는 중간 케이블 또는 광섬유 접속 부위를 지나 Process unit로 들어간다. 스캐너는 광스캐닝 모듈 LK4, 검색 모듈 합병 신호 변조기, 신호-수치 변환기, 마이크로프로세서 보드 및 서보 모터 제어 보드로 구성된다. 주사는 부교착이고 2개의 다른 프레임 레이트에서 발생된다. Fig. 2-13은 스캐너의 파츠별 구성을 나타내고 있다.

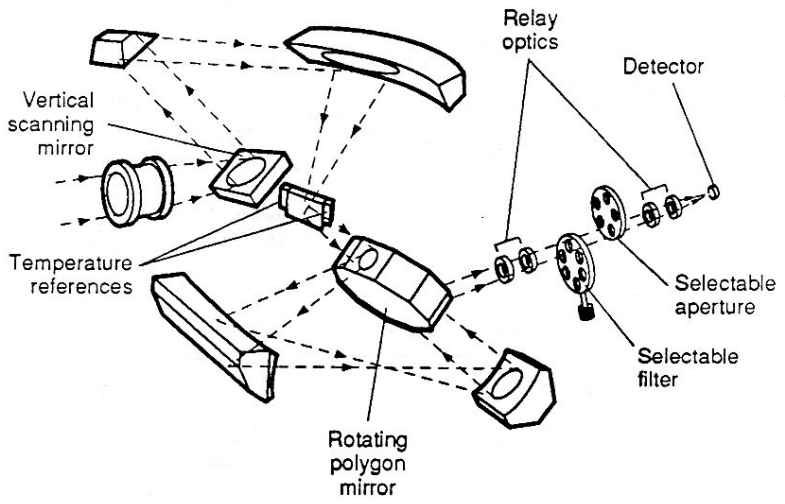


Fig. 2-13 Exploded view of the scanner optical path

스캐너는 복사선을 광학 스캐닝 모듈에 있는 첫 번째 스캐닝밀러에 초점을 맞추고 이 거울은 DC모터토크에 의해 수평면으로 진동한다. 진동밀러의 빔은 3개의 고정 밀러에 의해 회전다각형밀러의 꼭짓점으로 도달한다. 진동밀러와 회전다각형밀러는 서보 모터 제어 보드로부터 제어된다. 회전다각형밀러로부터 관련된 빔은 다각형의 반대 면에 2개의 멀리 고정된 밀러에 의해 초점이 맞추어져 있다. 필터, 휠, 최종으로 검출기의 초점이 맞추어지고 선택할 수 있는 구경을 포함하여 교체 시각을 설치함으로 통과한다. 검출기 출력은 전치증폭기를 통하여 통과되고 아날로그에서 디지털 컨버터로 제어 회로를 얻을 수 있다. 12비트 신호 통과로부터 프로세서 보드까지 시스템 제어기에 전송을 위한 병렬에서 직렬형태로 바뀐다. 2개

의 온도를 보상하기 위해 스캐너는 3개의 분리된 온도센서와 스캐너에 의해 복사 방출을 보상하기 위한 2개의 기준이 있다.

Fig. 2-14에서는 스캐너의 신호 처리와 제어 경로를 나타내었다.[1]

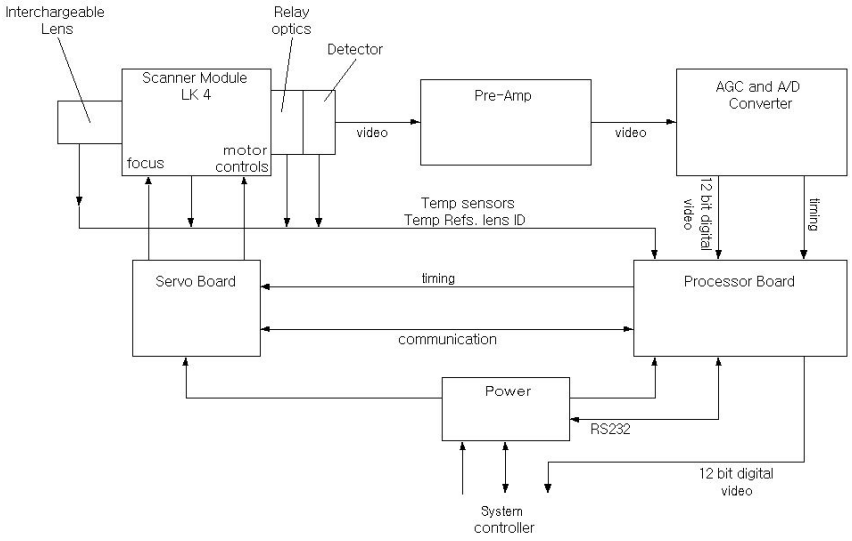


Fig. 2-14 Schematic diagram of scanner

2. 초음파 가진기 원리 및 구성[24]

초음파 가진기는 초음파 융접기에 근거하며 초음파 발진기(Generater), 초음파 진동자(Transducer), 부스터(Booster) 및 혼(Horn)으로 구성된다. 발진기는 50~60Hz의 전기적 에너지를 고출력의 고주파수(15~40Khz)로 변환하여 진동자에 공급하는 장치이다. 진동부에는 진동자와 부스터가 있으며 진동자는 발진기에서 공급되는 고주파수의 전기적 에너지를 수직운동의 기계적 에너지로 변환하여 주는 일종의 변환장치이다. 부스터는 용착시 혼에 요구되는 진폭을 얻기 위해 혼과 진동자 사이에 장착하는 고정혼을 지칭하는 장비이다. 혼은 진동자에서 발생한 기계적 진동에너지와 가압력을 대상물에 가해주는 역할을 한다.

초음파 진동자의 재료는 주로 피에조(Piezo) 재료를 이용하며, 초음파를 발생시키는 음원에 따라서 자왜형, 압전·전왜형 및 전자형 진동자 등이 있으며, 현재 압전·전왜형 볼트체결형 란쥬반 진동자(Bolt-clamped langevin Transducer : BLT)를 가장 많이 사용하고 있다. Fig. 2-15는 초음파 가진 장치의 구성을 나타내고 있다.

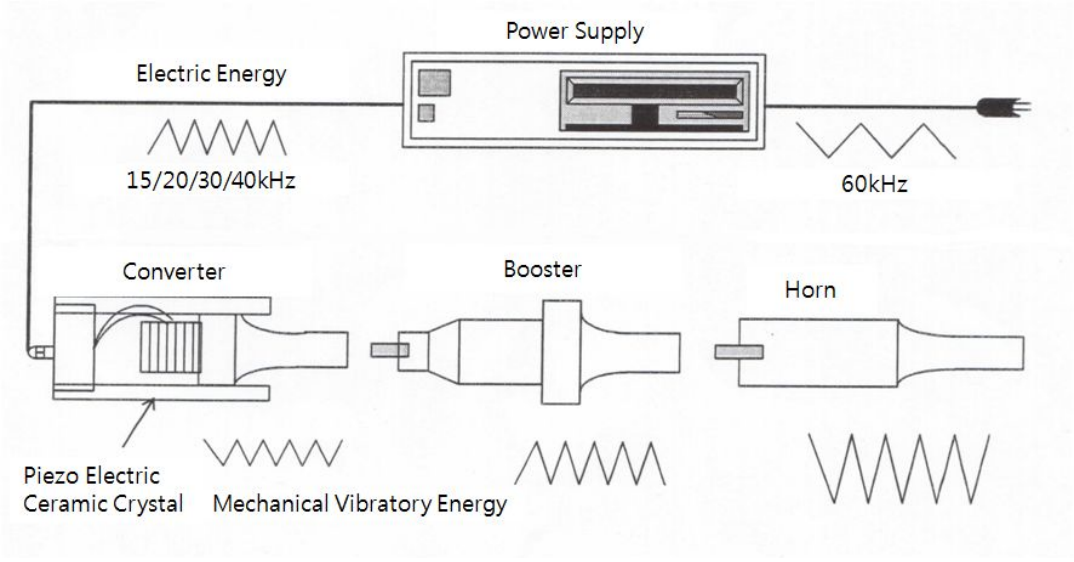


Fig. 2-15 The composition of ultrasonic exciter

공진주파수에 따라서 28kHz, 40kHz, 50kHz, 60kHz 등으로 구분되며 일반적으로 플라스틱의 용접에서는 20~40kHz, 금속의 고상용접에는 20~60kHz, 반도체 공정에서 사용되는 와이어 본딩(Wire bonding)에는 60~100kHz의 주파수 범위를 사용하고 있다. 이러한 주파수의 범위는 절대적인 것이 아니며 필요에 따라 적합한 영역을 선택하여 사용한다.

부스터와 혼의 경우에 사용자가 결정할 수 있는 사양은 부스터와 혼의 증폭비 형상이다. 그러나 많은 경우에 부스터는 제조업체에서 초음파 진동자와 함께 제공하며 부스터의 증폭비 값이 일정 범위 내에서 표준사양이 결정되어 있는 관계로 사용자는 혼을 적절하게 설계하여야 한다. 식 3-13는 혼의 이론적 개념을 나타내었으며 Fig. 2-16은 커넥터의 이론적 개념을 나타내고 있다.

공정 증폭비 = 혼의 진폭 / 초음파 진동자의 진폭

혼의 증폭비 = 공정 증폭비 / 부스터의 증폭비

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2F} \ , \ C = \sqrt{\frac{E}{P}} \qquad (3\text{-}13)$$

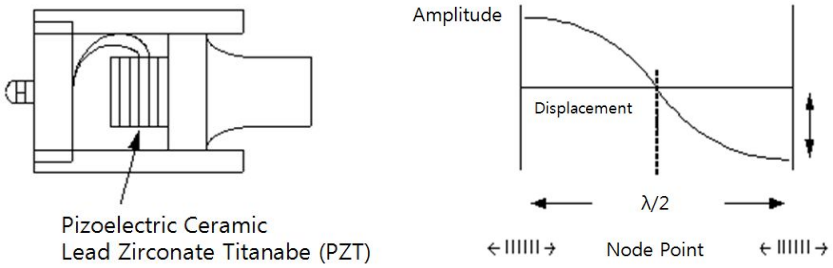


Fig. 2-16 Converter of the theoretical concepts

제 3 장 시험장치 구성 및 시험편 제작

제 1 절 시험장치 구성 및 시험편 제작

1. 시험장치 구성

본 논문에 사용한 적외선열화상카메라는 AGEMA사의 Thermovision 900 system이며 초음파 가진기는 대영초음파의 DYW-430H 핸드건 타입의 부스터 일체형 가진기이다. 사양은 입력전원 AC180~245V, 초음파 가진시간 0.1~5sec 연속발진이 가능하며, 주파수조정범위는 30kHz이다. 출력은 400W이며 제원은 Fig. 3-1와 같다.

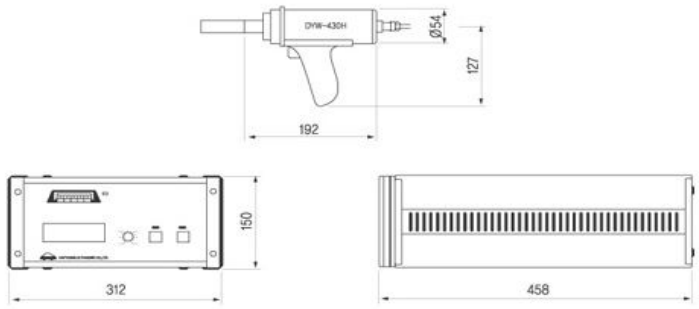
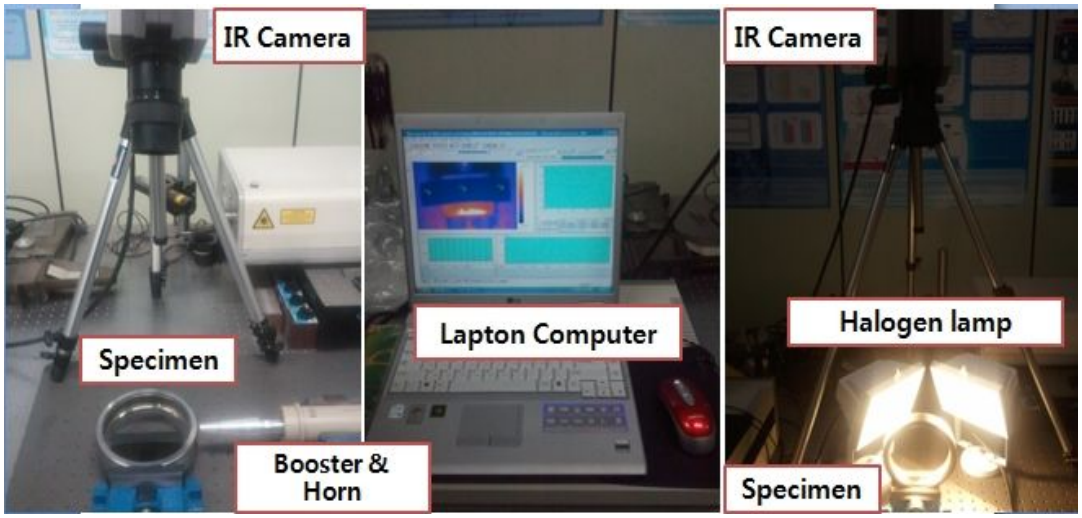


Fig. 3-1 DYW-430H Spec

시험에 사용된 핸드건 타입의 가진기는 시험의 용이성을 위하여 버튼식으로 수정하였으며, Fig. 3-2은 발진기이다. 시험장치는 Fig. 3-3와 같이 실험장치 구성을 보여주고 있다. (a)는 가진장치의 구성 모습을 보여주고 있으며, (b)는 할로겐 장치 구성을 보여주고 있다. 가진기의 가진시 시험편과 혼의 진동으로 인한 움직임을 최소화 하기위하여 지그와 볼트로 체결 고정하였다.

Fig. 3-2 DYW-430H



(a) Ultrasonic test equipment (b) Halogen test equipment

Fig. 3-3 The composition of experiment equipment

2. 초음파 혼

대상체에 최적의 초음파 펄스를 입사하기 위하여 관련 논문 및 자료를 참고하여 원뿔형의 혼을 설계하고 두랄루민 재질로 제작하였다. Fig. 3-4 는 2D설계도면과 제작한 Cone type의 혼의 이미지를 나타내고 있다.

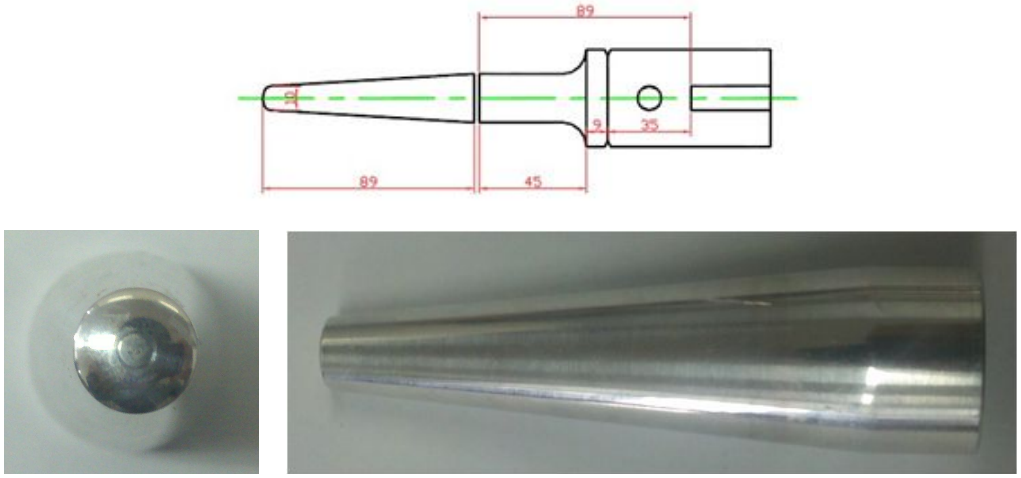
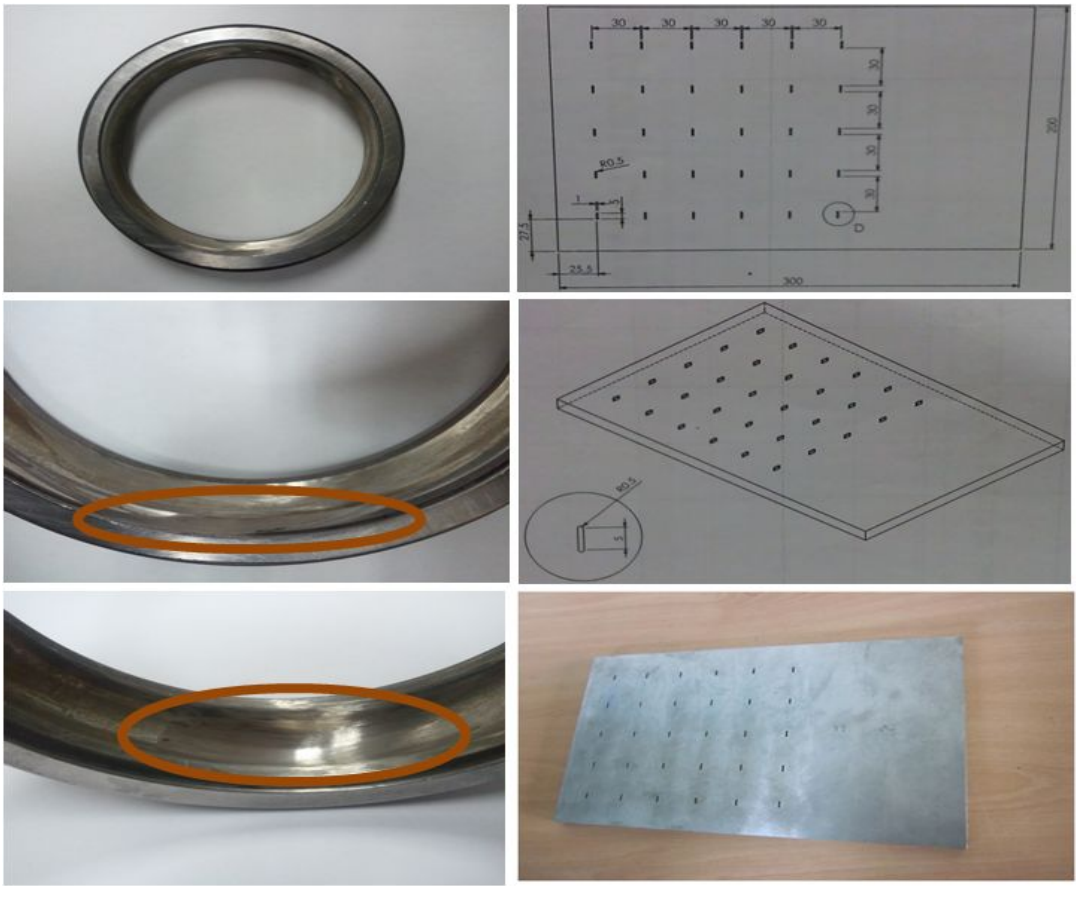


Fig. 3-4 2D design drawings and images of the produced horns

3. 시험편 제작

시험편은 풍력발전기에 쓰이는 재질과 같은 SUJ2(베어링강)로 채택하여 시험편을 제작하였고, 직경 150mm, 두께 35mm, 베어링을 사용하였다. (a)베어링의 2번째 이미지는 내경의 위쪽 부분을 약 4cm 길이로 연마를 하였고, 초음파 서모그래피를 적용하여 실험하였다. (a)베어링의 3번째 이미지의 경우는 내경의 깊이를 30%, 50%정도 5cm 길이로 연마결함을 주어 Halogen lamp를 적용한 실험을 수행 하였다. 플랜지 시험편은 가로 300mm, 세로 200mm이며, 30mm 간격으로 결함을 만들었고, 결함의 크기는 5mm이며, 개부는 30개(5X6)의 인공 결함을 주어 실험을 진행 하였다. 풍력발전기에 들어가는 같은 재질인 SM45C(탄소강)재질로 주문 제작하였으며, 제작한 시험편은 Fig. 3-5와 같으며 (a)는 베어링, (b)는 플랜지 시험편이다.



(a) Bearing specimen (b) Flange specimen

Fig. 3-5 Manufactured specimen

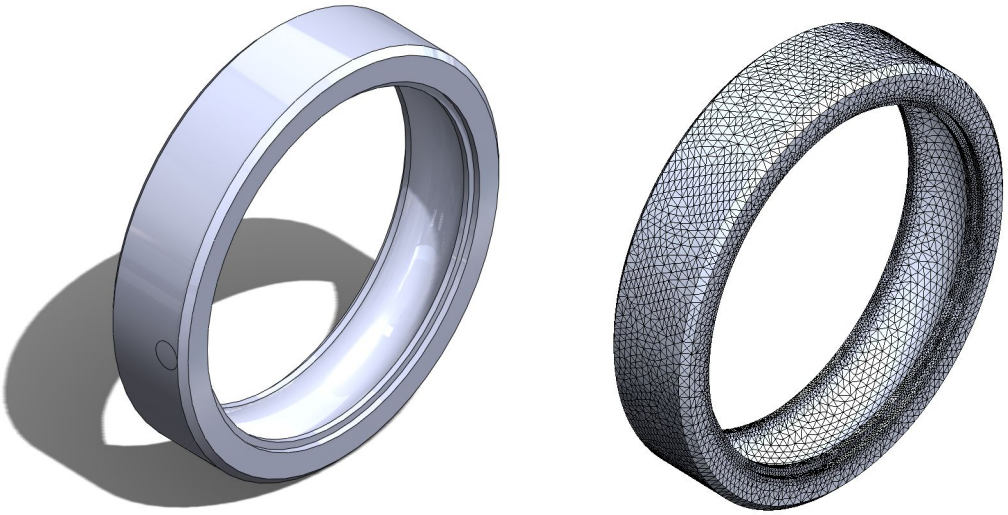
제 4 장 연구 결과 및 분석

제 1 절 베어링 시험편에 대한 열전달 해석

1. 초음파 서모그래피의 열전달 해석

시험편의 초음파 서모그래피 기법을 적용한 열패턴 분석 실험 전에 시험편을 3D-Modeling 하여, 유한요소법을 이용하여 열전달 해석을 수행하였다.

열전달 해석은 초음파 가진에 의한 정상상태의 선형적 열분포 및 발생 경향의 경향 예측을 위한 것이므로, 비교적 FEM 해석이 용이한 SolidWorks 2012의 Simulation 모듈을 사용하여 해석을 진행하였다. 해석모델은 전동체에 의한 베어링 외륜의 마모와 마멸 발생할 수 있다는 가정 하에 모델링하였다. Fig. 4-1(a)은 열전달 해석을 위한 3D로 모델링 된 FEM 해석모델을 나타내고 있으며, Fig. 4-1(b)는 FEM 해석모델의 Meshing 처리한 상태를 나타내고 있다.



(a) 3D-Model for FEM Analysis (b) Meshing of FEM Model

Fig. 4-1 Pre-process for Thermal Transfer Analysis

가. 경계조건

열전달 해석을 위한 경계조건은 초음파 가진용 혼의 접촉부에 20[℃], 베어링의 전체 노출면에 대하여 대류계수 5[(W/m2)/K], 초음파 가진용 혼의 접촉부의 열유속 17,454[W/m2]로 경계조건을 정의하였다. Fig. 4-2는 열전달 해석을 위한 FEM 모델의 경계조건이 정의된 상태를 나타낸 것이다. 재질은 베어링강(SUJ 2)를 적용하였다.

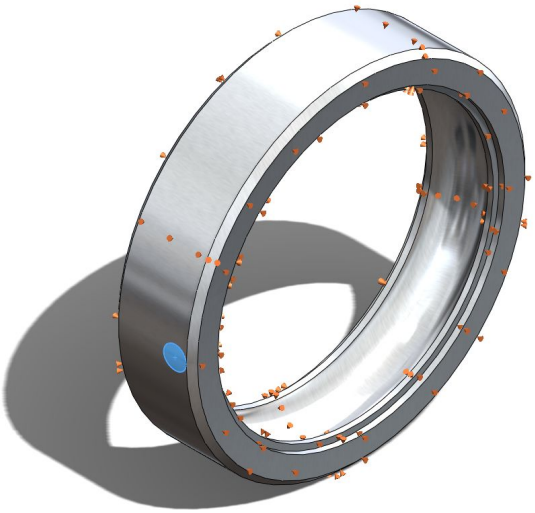


Fig. 4-2 Pre-process for Boundary Condition

나. 열전달 해석결과

(1) 인공결함부위의 발생 분석

Fig. 4-3과 Fig. 4-4의 해석결과에서 볼 수 있듯이 인공결함이 형성된 부분에서 최고온도 25℃가 발생되었으며, 외륜의 전동체 지지부의 두께에 따른 열전도율이 상이하므로 인공결함 부분에서는 이상발열이 발생하였다. Fig. 4-4는 인공결함부분에서 열전달 형태를 보다 정확히 분석하기 위하여 단면 클리핑을 수행한 결과이며, 초음파 가진 시 발생한 초음파가 시험편 내부로 입사되어 인공결함부위에서 발열 특성을 보이고 있음을 예측할 수 있었다.

열전달 해석 결과와 실험값와 비교하여 열분포 및 발열특성에 대해서 결과값의 비교분석이 필요할 것으로 판단된다.

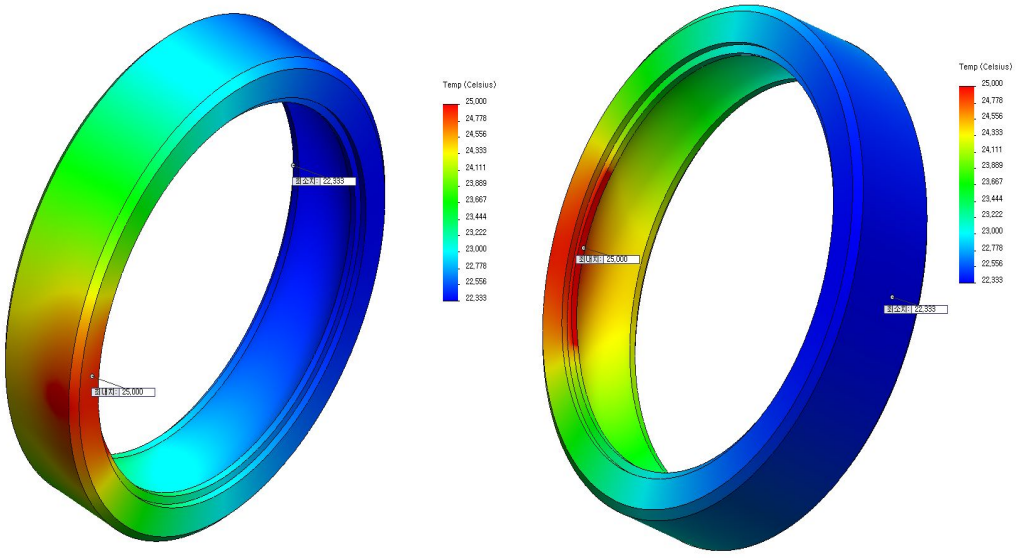


Fig. 4-3 Result of Thermal Transfer Analysis(Temperature Distribution)

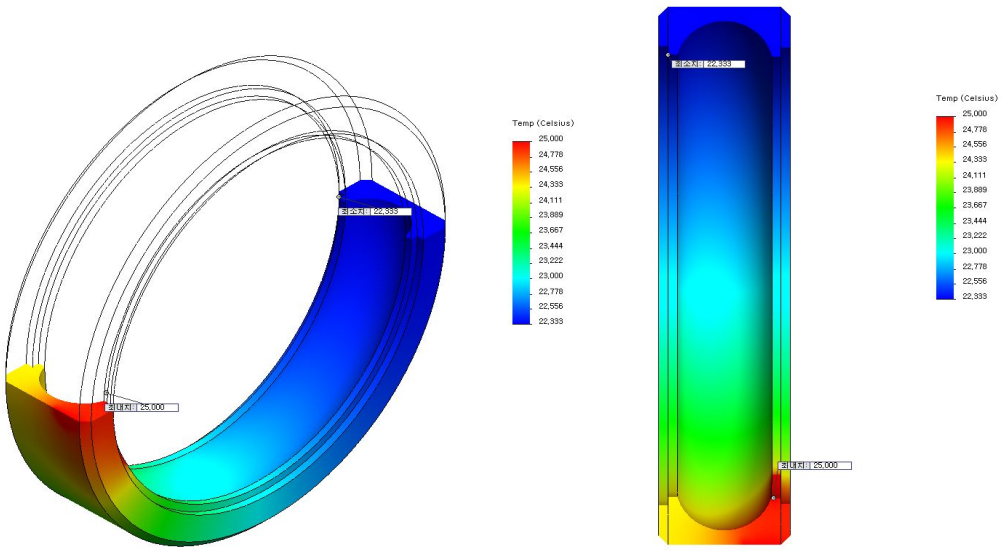
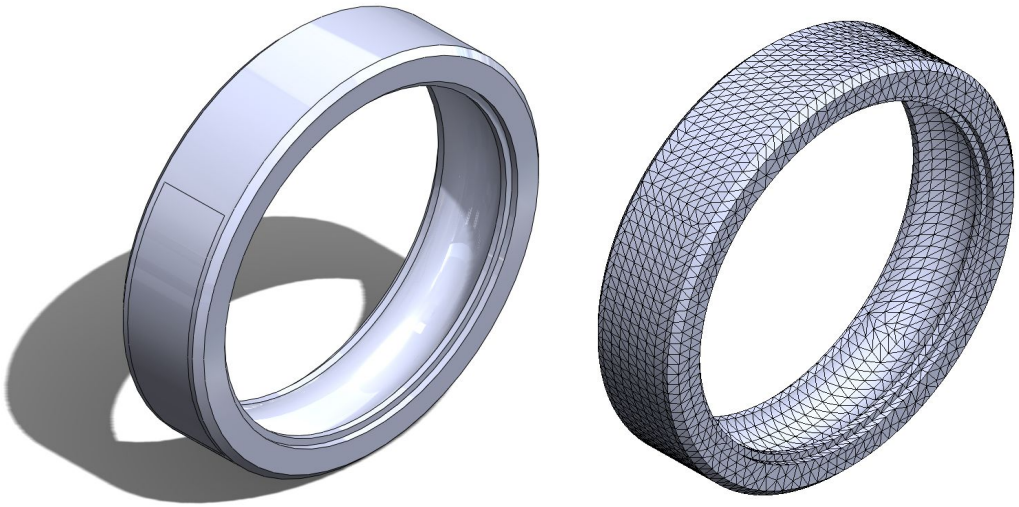


Fig. 4-4 Result of Thermal Transfer Analysis
(Temperature Distribution_Surface Clipping)

2. Halogen lamp 열원 적용 해석

시험편의 Halogen lamp 열원 전달기법을 적용한 열패턴 분석 실험 전에 시험편을 3D-Modeling 하여, 유한요소법을 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. 열전달 해석은 할로겐 열원 전달에 의한 정상상태의 선형적 열분포 및 발생 경향의 경향 예측을 위한 것이므로, 초음파 가진 시 해석과 동일하게 FEM 해석이 용이한 SolidWorks 2012의 Simulation 모듈을 사용하여 해석을 진행하였다. 해석모델은 전동체에 의한 베어링 외륜 내부의 일부분이 마모와 마멸 발생할 수 있다는 가정하에 모델링하였다. Fig. 4-5(a)은 열전달 해석을 위한 3D로 모델링 된 FEM 해석모델을 나타내고 있으며, Fig. 4-5(b)는 FEM 해석모델의 Meshing 처리한 상태를 나타내고 있다.



(a) 3D-Model for FEM Analysis (b) Meshing of FEM Model

Fig. 4-5 Pre-process for Thermal Transfer Analysis

가. 경계조건

열전달 해석을 위한 경계조건은 할로겐 열원 전달부에 25[℃], 베어링의 전체 노출면에 대하여 대류계수 5[(W/m2)/K], 할로겐 열원 전달부의 열유속 17,454[W/m2]로 경계조건을 정의하였다. Fig. 4-6은 열전달 해석을 위한 FEM 모델의 경계조건이 정의된 상태를 나타낸 것이다. 재질은 베어링강(SUJ2)를 적용하였다. 또한 시험편의 감육 정도에 따른 열전달 특성을 분석하기 위하여 베어링의 외륜 내부의 감육량 30%, 50% 의 2가지 경우에 대해서 열전달 해석을 수행하였다.

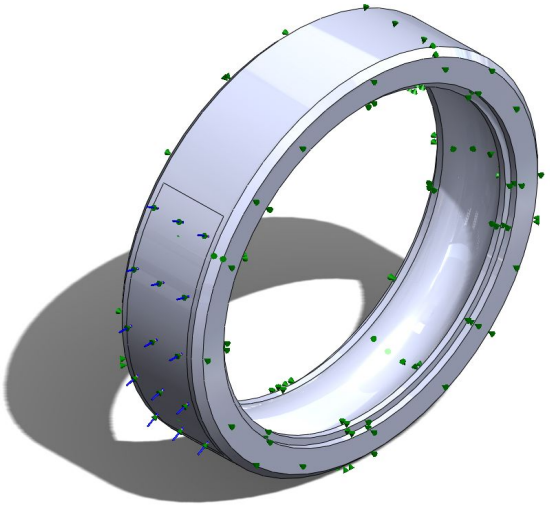


Fig. 4-6 Pre-process for Boundary Condition

나. 열전달 해석결과

(1) 인공결함부위의 발생 분석

Fig. 4-7과 Fig. 4-8의 해석결과에서 볼 수 있듯이 인공결함이 형성된 부분에서 최고온도 30℃가 발생되었으며, 외륜의 전동체 접촉부의 인공결함에 따른 열전도율이 상이하므로 베어링 외륜의 내측에서 이상발열이 발생하였다. Fig. 4-8는 인공결함부분에서 열전달 형태를 보다 정확히 분석하기 위하여 단면 클리핑을 수행한 결과이며, 할로겐 열원 입사 시 전도된 열원이 시험편 내부로 전달되어 인공결함부위에서 이상발열의 특징을 보이고 있음을 예측할 수 있었다. Fig. 4-9와 Fig. 4-10에서 볼 수 있듯이 시험편의 감육정도에 따른 발열특성 및 열전달량이 상이한 것으로 알 수 있었다. 베어링 외륜의 두께 감소에 따른 인공결함부위의 최고온도

값은 감육량이 30%일 때 25℃이며, 감육량이 50%일 경우에는 35.5℃로 예측할 수 있었다. 따라서 감육 방법을 통한 열전달 해석 결과값과 할로겐 열원 전달 기법을 통한 실험값 비교분석이 필요할 것으로 판단된다.

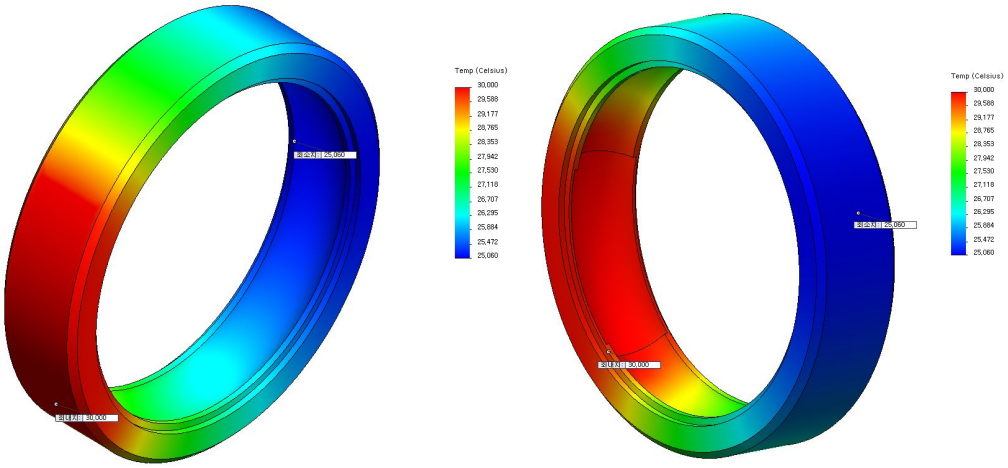


Fig. 4-7 Result of Thermal Transfer Analysis
(Temperature Distribution_Wall Thinning 30%)

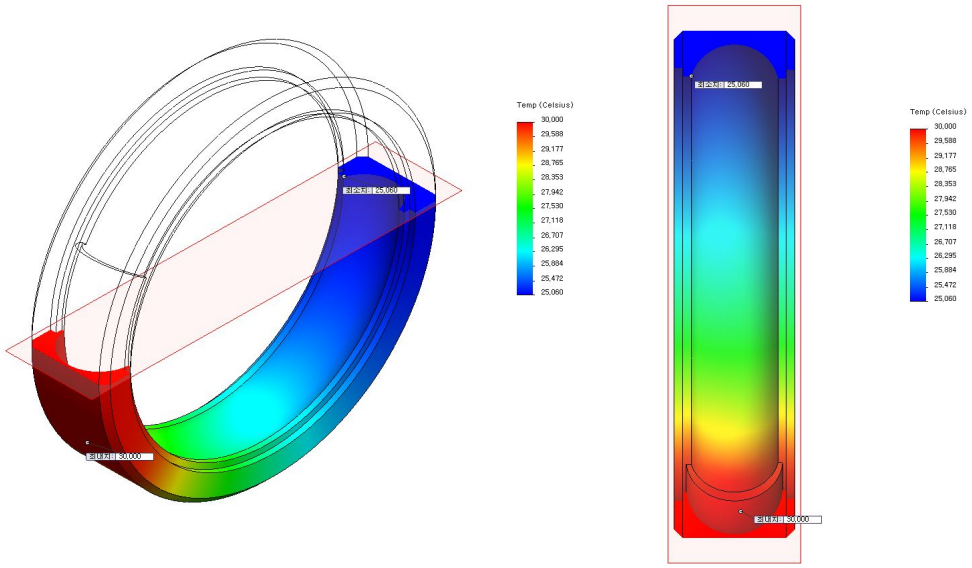


Fig. 4-8 Result of Thermal Transfer Analysis
(Temperature Distribution_Surface Clipping_Wall Thinning 30%)

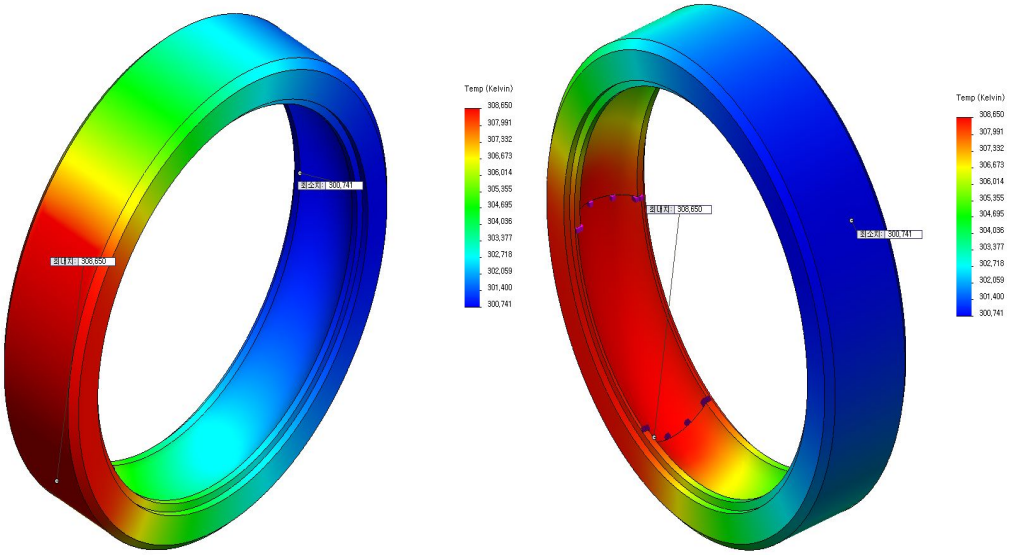


Fig. 4-9 Result of Thermal Transfer Analysis
(Temperature Distribution_Wall Thinning 50%)

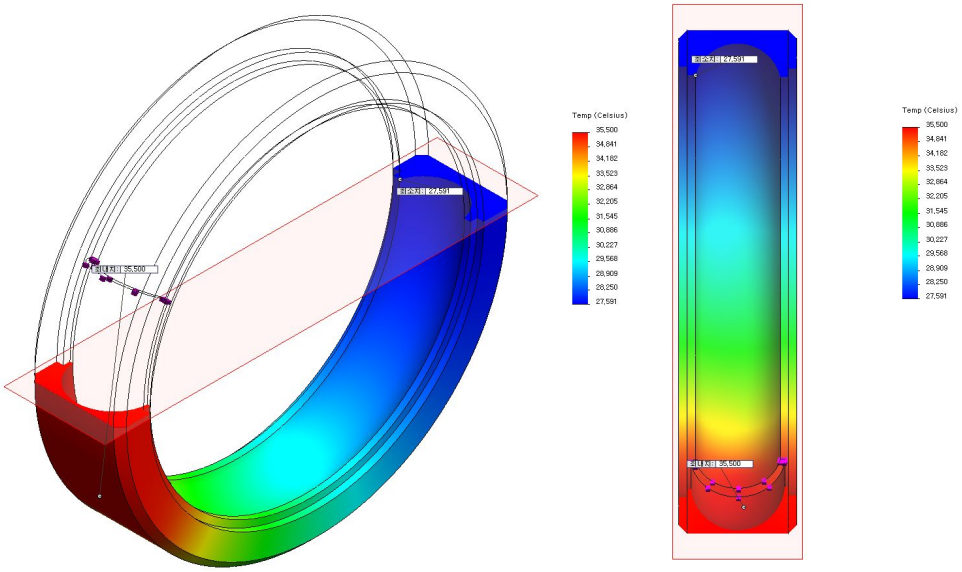


Fig. 4-10 Result of Thermal Transfer Analysis
(Temperature Distribution_Surface Clipping_Wall Thinning 50%)

제 2 절 초음파 서모그래피 및 할로겐 램프 열원 적용

1. SUJ2(베어링) 재질의 감육결함 분석

가. 초음파 서모그래피를 이용한 베어링 감육결함 부분에 대한 실험

본 실험에서는 Horizontal방법으로 실험 수행 및 분석 하였다. 실험 중 가진기의 진동에 의해 시험편과 가진기가 움직이지 않도록 시험편과 혼을 지그에 고정을 시키고 초음파 펄스가 최대한 입사 될 수 있도록 베어링과 혼을 밀착시켰으며, 30KHz를 60초 동안 5초 간격으로 초음파 펄스를 인가하고, Fig. 4-11은 적외선 열화상 카메라로 측정하고 있는 영상을 보여주고 있다.

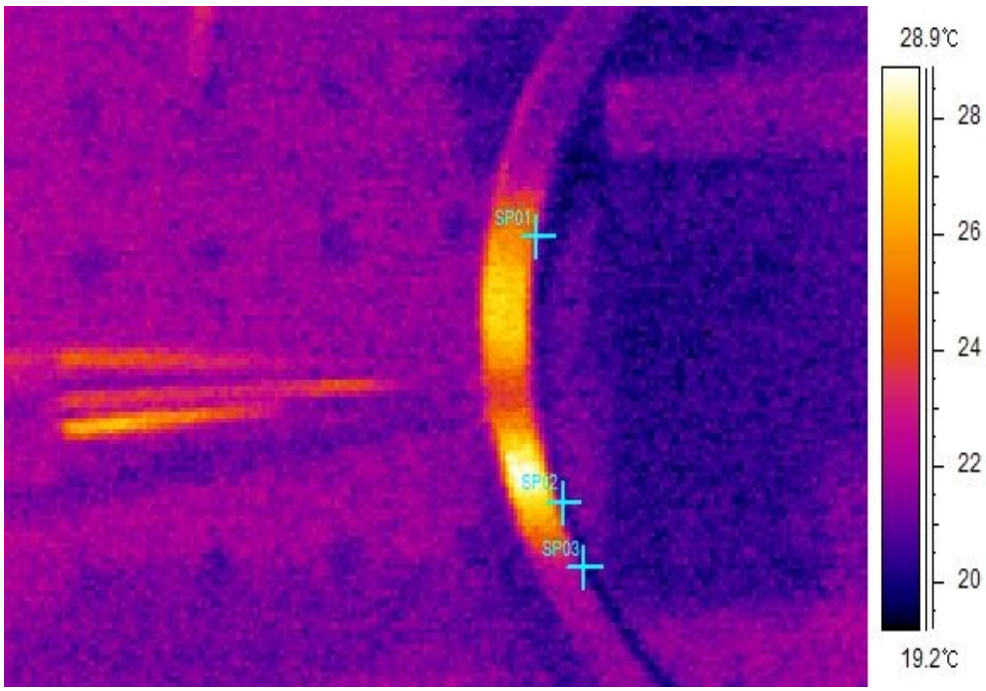


Fig. 4-11 Image of the ultrasonic thermography test for bearing

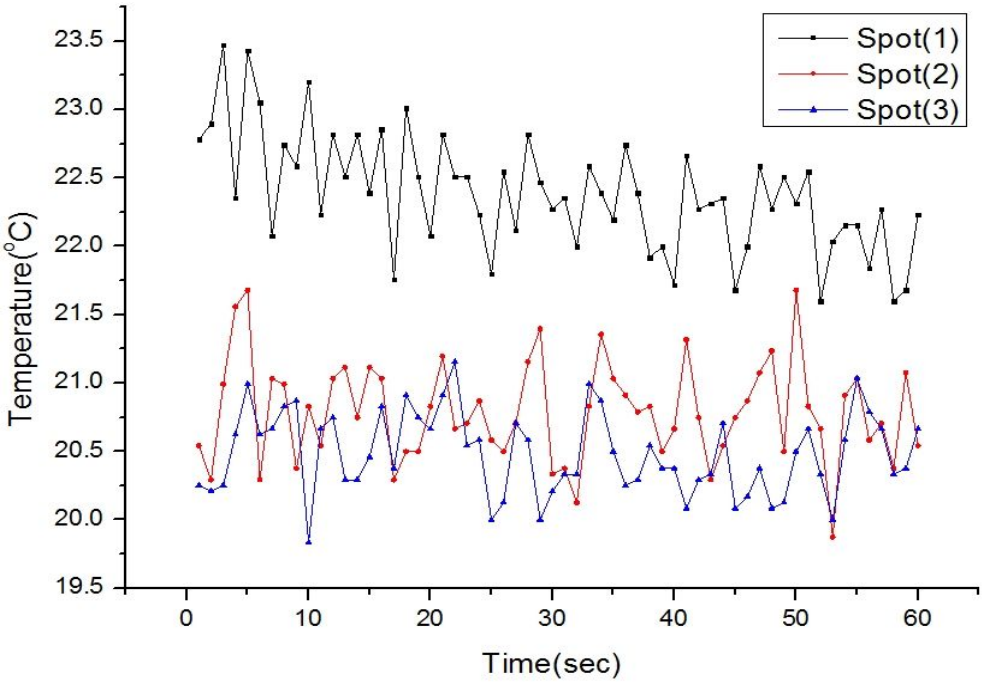


Fig. 4-12 Temperature result graph of
the ultrasonic thermography test for bearing

초음파 가진기로 가진을 한 결과, Fig. 4-12와 같이 연마석으로 연마 한 부분 Spot1에서는 23.5℃까지 올라간 것에 비해 연마를 하지 않았던 Spot2, Spot3의 온도 분포를 비교 분석한 결과 연마석으로 연마를 하였던 부분보다 약 2℃차이가 나는 것을 알 수 있었고, 초음파 가진기를 가지고 미세크랙이 아닌 열전달 열분포를 볼 수 있었다.

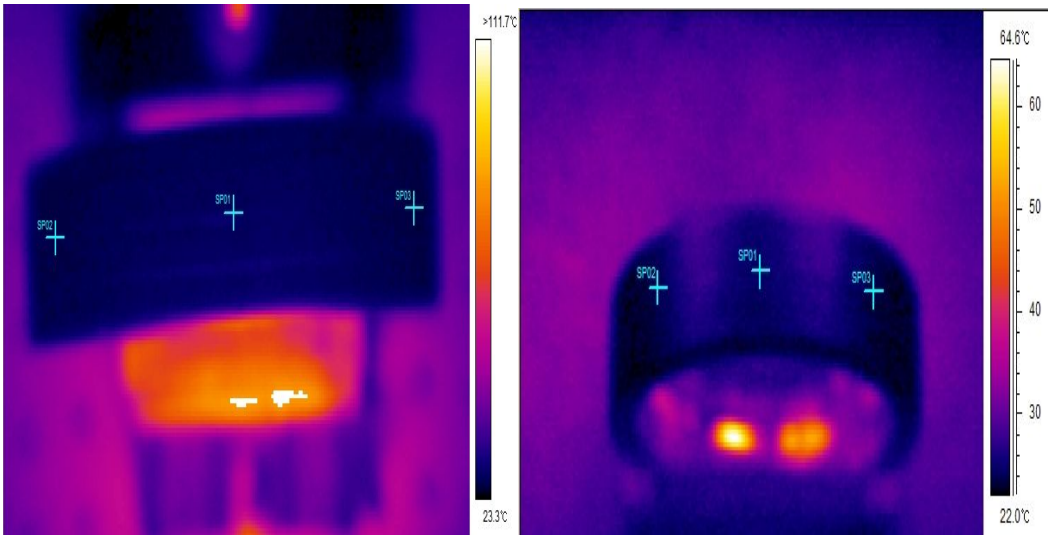
본 실험에서 사용 중인 가진기의 출력은 400W이며, 지금 시험편 베어링보다 더 큰 베어링을 실험 할 경우 400W보다 높은 출력을 낼 수 있는 초음파 가진기로 실험을 한다면, 베어링의 마모된 부분을 적외선 열화상 카메라로 계측 할 수 있다고 예상할 수 있다.

나. Halogen lamp를 이용한 베어링 감육결함 부분에 대한 실험

베어링은 가공 및 사용기간 중에 고온, 고압 같은 유동조건하에 항상 노출되어 있어서, 비파괴 검사를 통하여 불량베어링을 조기에 발견하고 조치함으로써 노동력과 재료, 시간을 절약하게 되어 원가 절감효과를 가지게 되고, 내부 벽에서 두께감수가 발생하면, 감육이 된 베어링이 파열이 되기 쉽다.[27~28]

베어링의 재사용가능 여부의 판정기준을 제시하고 시험편의 발생되는 내부박리, 표면마모, 구조손상 등을 잘 분석함으로써, 풍력발전 사고를 미리 예방을 할 수 있다고 예상된다.

본 실험에서 베어링의 내경을 연마석으로 30%, 50%정도 연마를 하여 마모상태를 계측하였으며, Vertical방법으로 실험 수행 및 분석 하였다. 사용된 시험편은 풍력발전기에서 사용되는 베어링 재질과 같은 재질이며, 직경 150mm, 두께 35mm의 SUJ2(베어링강)를 사용하였다. Halogen lamp의 높이와 시험편의 높이를 일정하게 맞추고 적외선 열화상 카메라로 60초 동안 1초에 1프레임을 설정하여 측정하였고, 출력이 500W인 Halogen lamp 2개를 사용하였다. Fig. 4-13은 감육결함 30%, 50%의 베어링을 Halogen lamp로 측정한 실험이미지를 보여주고 있다.



(a) Wall thinning defect: 30%　　(b) Wall thinning defect: 50%

Fig. 4-13 Bearing test image with the halogen lamp

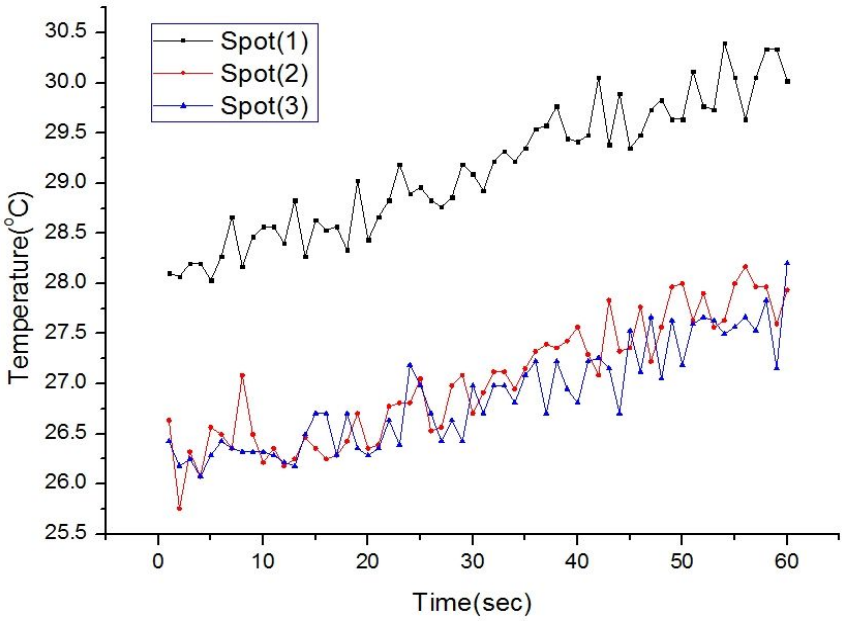


Fig. 4-14 Bearing temperature result graph with the halogen lamp (Wall thinning defect: 30%)

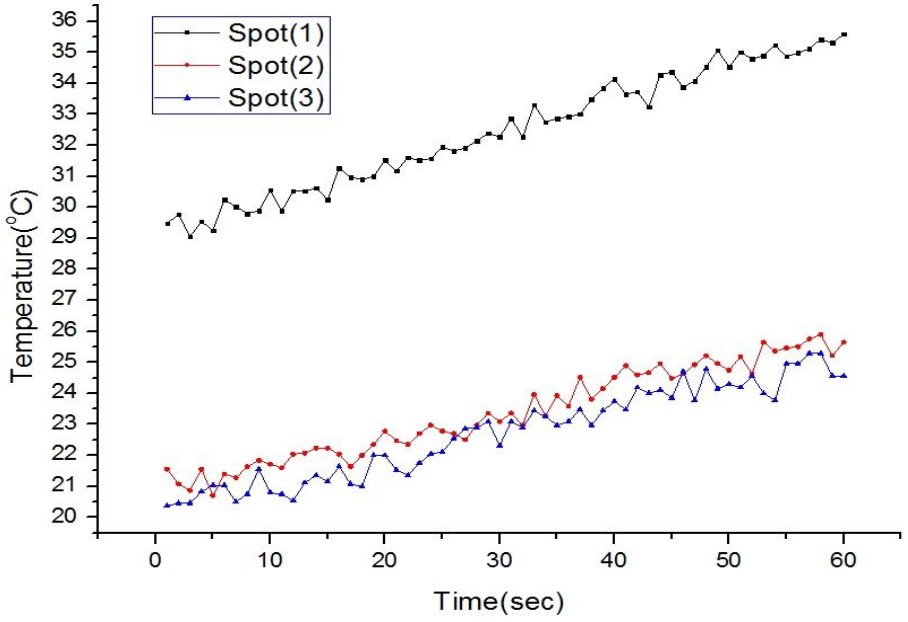


Fig. 4-15 Bearing temperature result graph with the halogen lamp (Wall thinning defect: 50%)

본 실험에서는 시험편의 정확한 온도 데이터를 얻어내기 위해 연마를 한 부분과 연마가 되어있지 않는 부분으로 나누어 3곳에 Spot을 지정하였다.
Halogen lamp를 가열하여 실험을 수행한 결과, Fig. 4-14, Fig. 4-15와 같이 연마석으로 연마 한 부분 Spot1에서 열전도률이 60초 동안 지속적으로 온도가 상승하는 것을 알게 되었다. 연마 30%에서는 28.2℃~30.4℃까지 올라간 것을 알 수 있었고, 연마를 하지 않았던 Spot2, Spot3의 열전도률이 거의 차이가 없이 비슷한 온도를 보이며, 26.6℃~28℃온도 분포로 상승하는 것을 알 수 있었다. 연마 50%에서는 29.5℃~35.5℃까지 온도가 상승하는 것을 알 수 있었으며, 연마 30%와 같이 연마를 하지 않았던 Spot2, Spot3에서는 온도 차이가 거의 없이 비슷한 온도로 상승하는 것을 볼 수 있었다. 총 3곳의 Spot을 비교 분석한 결과 연마석으로 연마를 하지 않았던 부분보다 감육결함이 있는 부분에서는 2℃~6℃차이가 나는 것을 온도 결과 그래프를 통하여 알 수 있었다.

2. SM45C(플랜지) 재질의 열패턴 분석 및 미세크랙 검출

가. 열패턴 분석

본 실험에서는 탄소강(SM45C) 시험편의 열패턴 및 열전달 분석을 하기위해 실험을 수행하였다. 시험편은 탄소강(SM45C)의 소재로 주문 제작하였으며, Fig. 4-16과 같이 2D설계를 하여 설계 도면를 사용하였다. 주문 제작한 시험편은 가로 300㎜, 세로 200㎜이며, 30㎜ 간격으로 결함을 만들었고, 결함의 크기는 5㎜이며, 개부는 30개(5X6)의 인공 결함을 주어 실험을 진행 하였다. 초음파 가진기를 사용하여 가진 하였으며, 시험편은 모든 방향에서 열을 방사함을 알 수 있었고, 실험결과 접촉점 기준으로 약 176.5㎜까지 퍼지는 것을 알 수 있었다. 입사각에 따른 확산 경로는 아직 확인 할 수 없었으며, Fig. 4-17에서는 초음파의 확산 경로와 Fig. 4-18에서는 결함부위 발열 부분에 대해서 나타내고 있다. Fig. 4-19는 Ar1의 Spot1 ~ Spot7 까지의 결함 부위에서 발열이 되고 있는 적외선 열화상 이미지 모습을 보여주고 있다.

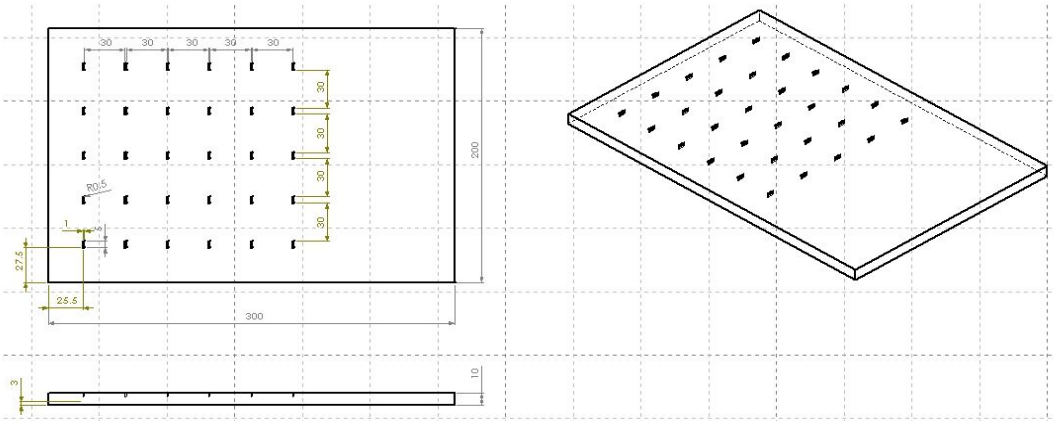


Fig. 4-16 2D design of Experiment specimens

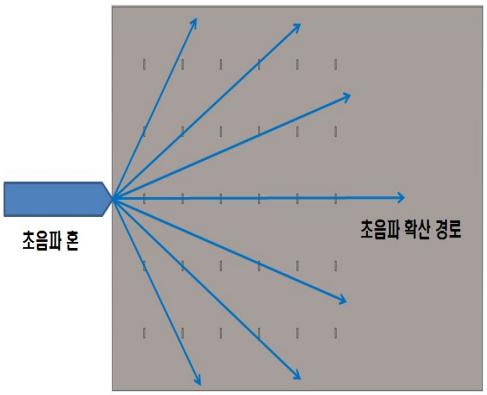


Fig. 4-17 Ultrasound diffusion paths

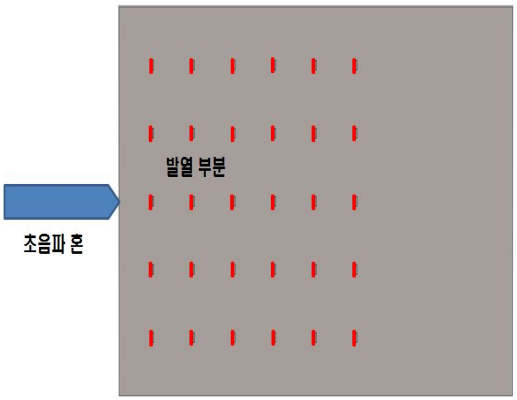


Fig. 4-18 Heat a defective part

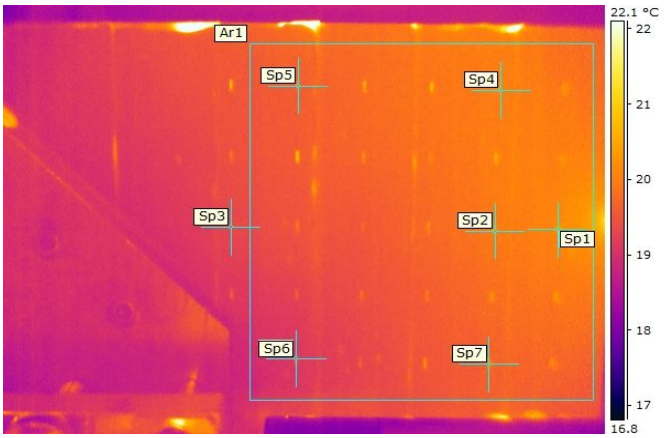


Fig. 4-19 Carbon steel(SM45C)

나. 플랜지 초음파 서모그래피 적용

초음파 서모그래피는 균열 또는 접합면의 결함 등의 존재하는 물체에 초음파를 입사시키면서 균열, 결함부위의 표면에서 국부적인 열이 발생한고, 초음파 여기 탄성파가 구조물에 전달될 때 결함 부위에서만 선택적으로 발열 현상이 나타나고 있다. 본 실험에서는 풍력발전기에 들어가는 플랜지 재질과 같은 재질인 SM45C의 재질로 제작 하였으며, 열패턴 및 열전달 분석을 한 시험편과 동일한 시험편을 사용하였다. 가로 300mm, 세로 200mm이며, 30mm 간격으로 결함을 만들었고, 결함의 크기는 5mm이며, 개부는 30개(5X6)의 인공 결함을 만들었다. 결함 시험편을 18초 동안 5초 간격으로 30KHz 초음파 펄스를 인가하여 1초당 1프레임으로 적외선 열화상 카메라로 계측 측정하였다. 데이터 분석을 위하여 Vertical 방법으로 실험을 수행 하였으며, 초음파 가진시 시험편과 가진기의 움직임을 최소화하기 위해서 모두 지그로 고정하여서 실험을 수행 하였다.

그 결과 Fig. 4-20과 같이 결함부위 Spot1에서 Hot Spot발열이 발생하였고, 결함이 없는 Spot2, Spot3에서는 발열 현상이 없었다.

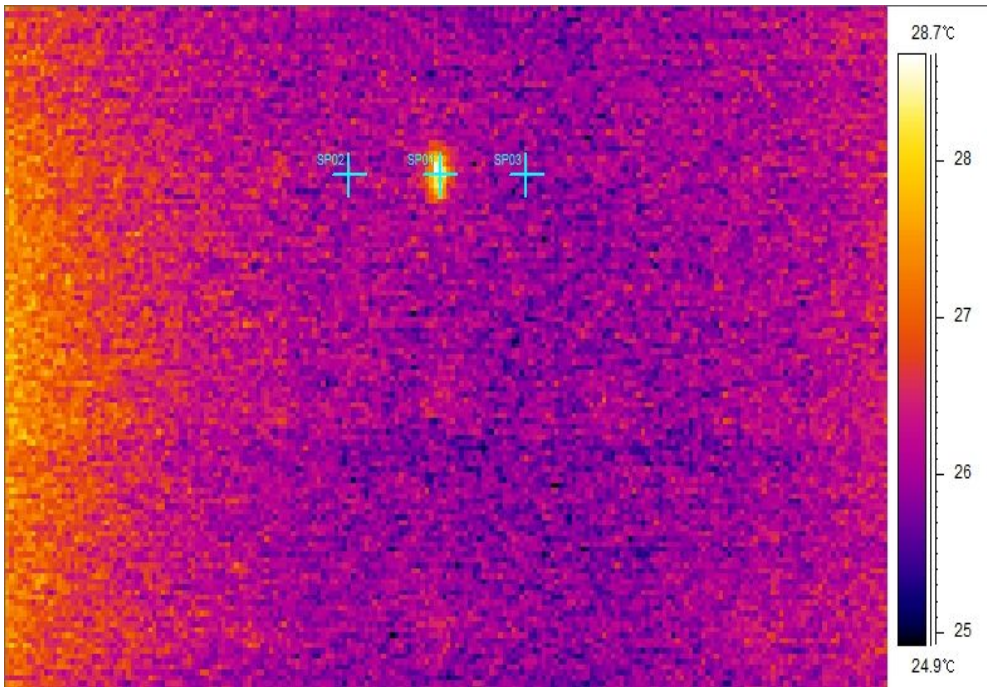


Fig. 4-20 IR test image for the flange: 5mm surface defect

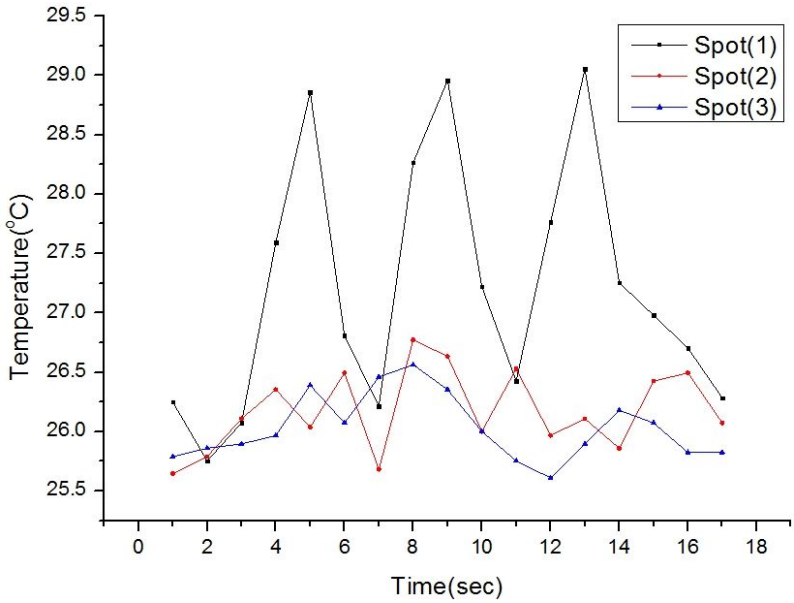


Fig. 4-21 Temperature graph for the flange: 5mm surface defect

시험편의 균열부위의 정확한 온도 데이터를 얻어내기 위해 3개의 spot을 지정하였다. Spot1의 표면결함 부위이며, Spot2, Spot3는 표면결함이 없는 부위를 지정하여, 표면결함이 있는 부위와 표면결함이 없는 부위의 온도 차이를 비교 분석하였다. Fig. 4-21 온도 그래프와 같이 온도차이가 나는 것을 알 수 있었으며, 표면결함이 없는 부분의 Spot2, Spot3의 온도의 편차는 거의 없었다. 반면 결함이 있는 부분의 Spot1 에서는 초음파 가진기의 초음파가 입사되면서 표면결함 부위의 표면에서 국부적인 열이 발생하여, 가진 2초 후 부터 3초 간격으로 표면결함 부위에서 온도가 상승 하는 것을 알 수 있었으며, 표면결함이 없는 부위에 비해 약 3℃의 온도 차이가 나는 것을 실험 온도결과 그래프를 통해 알 수 있었다.

3. 플랜지 시험편의 Lock-in을 적용한 노이즈 제거

본 실험에서는 풍력발전기에 들어가는 플랜지 재질인 SM45C을 사용하여 결함검출 부위에 대한 노이즈를 제거하고 화면 화상영상처리를 하고자 한다.

결함부위의 위상잠금(Lock-in) 적외선 열화상 기법을 이용하여 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 입사하고 이때 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 외부 자극원 으로는 결함의 종류와 대상체의 재질에 따라 조화함수로 제어가 용이한 광, 초음파, 진동 등이 사용된다. 금속결함 검출에 적용되는 경우, 열확산계수가 큰 금속 재료일수록 검출소자의 샘플링 한계로 인하여 결함을 찾는데 어려움이 있다. 따라서 이러한 문제 해결방안으로 위상잠금(Lock-in)기법을 이용하여 열확산계수가 큰 금속의 내부 결함을 검출할 수 있다.[27][30]

Fig. 4-22는 Lock-in 프로그램의 소스 화면을 보여주고 있으며, Fig.4-23은 노이즈를 제거한 화면 화상영상처리의 이미지를 보여주고 있다.

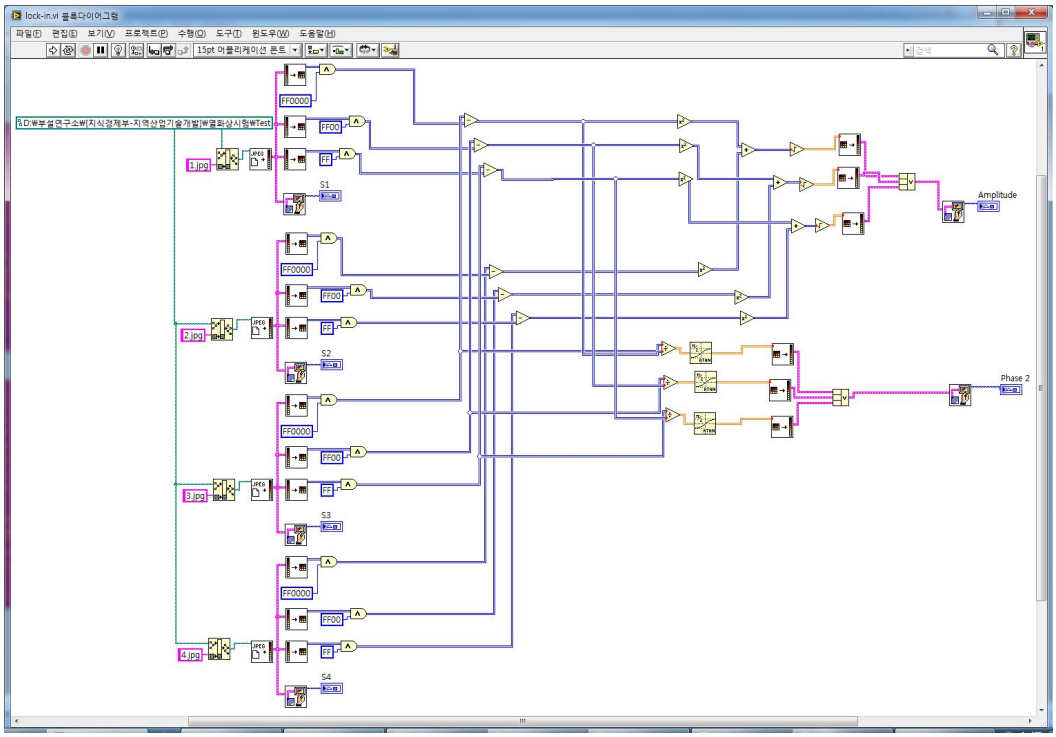


Fig. 4-22 Lock-in program source screen (LabView version)

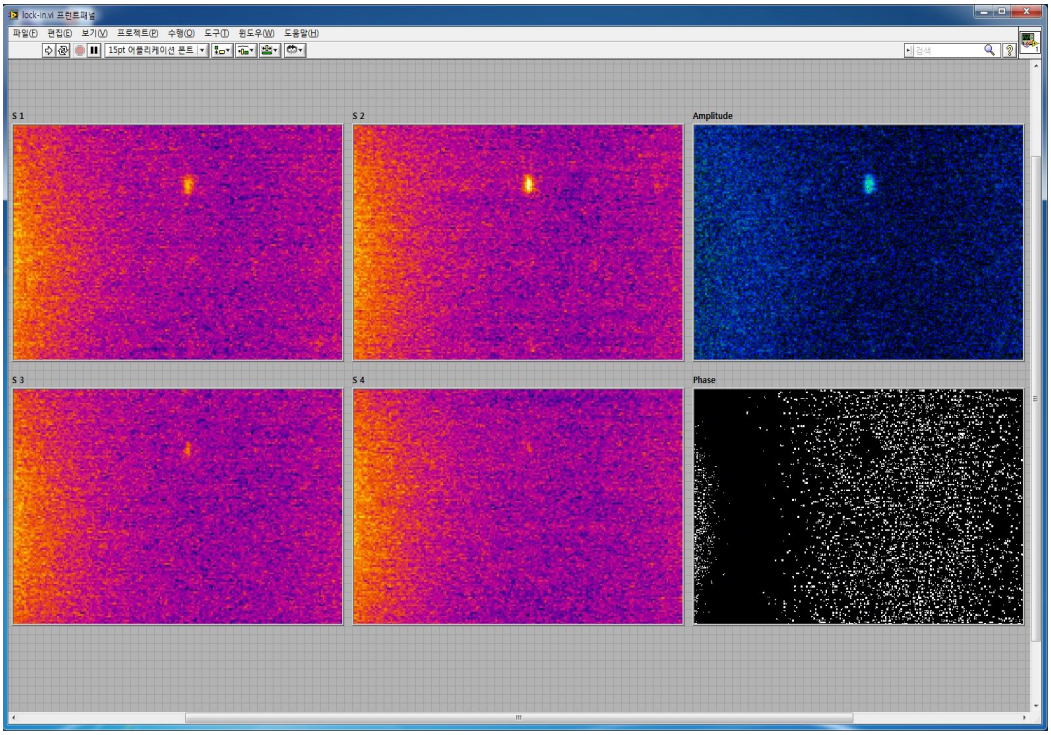


Fig. 4-23 Lock-in program image-processing image (LabView version)

노이즈와 같은 특수한 소리를 제외한 대부분의 파형은 같은 모양의 반복이라고 생각할 수 있다. 위상은 진동이나 파동과 같이 주기적으로 반복되는 현상을 일으키는 말이며, 진폭의 경우는 진동의 중심으로부터 최대한 움직인 거리 혹은 변위를 말한다. Lock-in 프로그램을 통하여 노이즈를 제거 하였으며, Fig 4-23는 진폭과 위상 모두를 보여주고 있다. 초음파 가진 시험 결과를 Lock-in프로그램을 통한 화상영상처리 이미지를 보여주고 있으며, S1 ~ S4까지의 이미지는 가진 후 결함 부위의 발열상태를 보여주고 있고, 초음파 펄스인가가 시작되는 이미지부터 초음파 펄스인가가 끝나는 이미지를 모두 보여주고 있다. S1은 가진 후 발열 2초 후의 영상 이미지부터 가진 후 18초 영상이미지를 Lock-in프로그램으로 통해 보여주고 있다.

제 5 장 결 론

풍력발전기 부품소재의 대한 비파괴 신뢰성평가를 위하여 적외선 열화상 계측 시스템의 적용성 및 신뢰성을 검증하고자 베어링의 감육결함과 플랜지의 결함에 대한 열화상 진단을 하였다. 베어링 시험편에 초음파 서모그래피 기법을 적용하여 결함검출과 Halogen Lamp를 열원으로 채택한 방법 2가지 행태로 결함검출을 하여 열전달 해석 시뮬레이션과 비교 분석하고, 플랜지 시험편에 대해 Lock-in을 이용하여 노이즈 제거, 영상화상처리 기법을 적용하였다. 베어링, 플랜지 시험편에 대한 결론은 다음과 같이 내릴 수 있었다.

1. 초음파 가진기로 베어링 시험편을 가진 한 결과, 연마가 된 부분과 연마가 되지 않았던 부분에서 2℃차이가 나는 것을 알 수 있었으며, 열전달 해석 결과 비슷한 수치를 나타내었다. 시험편 베어링보다 큰 베어링으로 실험을 수행 할 경우 400W보다 높은 출력을 낼 수 있는 초음파 가진기로 실험을 수행을 한다면, 베어링의 마모된 부분을 적외선 열화상 카메라로 계측 할 수 있다고 예상할 수 있다.

2. Halogen Lamp 열원을 이용한 결과에서는 베어링의 내경을 감육결함 30%, 50%정도를 연마를 하여 마모상태를 계측하였다. 연마 30%에서는 28.2℃~30.4℃까지 온도가 상승하는 것을 알 수 있었으며, 연마 50%에서는 29.5℃~35.5℃까지 온도가 상승하는 것을 알 수 있었다. SolidWorks 2012의 Simulation 모듈을 사용한 열전달 해석과 실험 결과가 비슷하며, 감육결함 부분의 온도 차이를 알 수 있었다.

3. 플랜지 시험편을 가진한 결과 결함이 있는 부분에서는 초음파 가진기의 초음파가 입사되면서, 표면결함 부위의 표면에서 국부적인 열이 발생 하였다. 가진 2초 후 3초 간격으로 표면결함 부위에서 26.5℃~29℃까지의 온도상승 알 수 있었으며, 표면결함이 없는 부위에 비해 약 3℃의 온도 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

4. 플랜지 시험편의 결함검출부위에 대한 화상영상처리를 Lock-in프로그램으로 노이즈를 제거하고, 진폭과 위상 모두를 화상영상처리 이미지로 볼 수 있었다. 초음파 펄스인가가 시작되는 발열 2초 후 이미지부터 초음파 펄스인가가 끝나는 발열 18초 이미지를 볼 수 있었다.

REFERENCE

1."Level I Course Manual" Infrared Training Central, 1998, pp. 12~56

2.T. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz and G. Busse, "Ultrasound Burst Phase Thermography (UBP) for Applications in the Automotive Industry", Review of Progress in Quantitative Nondestructive, Vol. 657, 2003, pp. 531~536

3.A. Gleiter, G. Riegert, T. Zweschper, G. Busse, "Ultrasound lock-in thermography for advanced depth resolved defect selective imaging", Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 49, 2007, pp. 272~274

4.T. Zweschper, A. Dillenz, G. Riegert, D. Scjerling and G. Busse, "Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves", Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 45, 2003, pp. 178~182

5.T. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz and G. Busse, "Ultrasound Excited Thermography - Advances Due To Frequency Modulated Elastic Waves", Quantitative Infrared Thermography, Vol. 2-1, 2005, pp. 65~76

6.조신현 “풍력발전 시스템의 풍력발전기 및 풍력발전 컨버터” 특별기고 2008, pp. 114~123

7.이은창, 모세준 “Outlook and Competitive Analysis of the Domestic Wind Power Industry” 산업연구시리즈 2009, pp. 1~37

8.손충렬 “풍력에너지 개발현황 및 원천기술 국산화 방안” 재생에너지 유망 산업 기술/전망 세미나 2009 pp. 58~64

9. S. H. kim, J. Y. Kim, S. H. Choi, S. You, "The research on thermal pattern using the method of ultrasound thermography" KSMPE, 2011, pp.341-345(2010)

10. “해상풍력발전용 부품소재의 융복합 비파괴검사 시스템 개발”(중간보고서), 2011

11. Y. J. Cho, "An Exploratory Study on Optimized Test Conditions of Lock-in Thermography Technique" J.KSNT, Vol.31, No.2, 2011, pp.157-164

12. J. W. Cho, Y. C. Seo, S. H. Jung, S. H. Kim and H. K. Jung, "Fast Defect Detection of PCB using Ultrasound Thermography", KIEE2006, Vol. 55, No. 2, 2006, pp. 68~71

13. J. W. Cho, Y. C. Seo, S. H. Jung, H. K. Jung and S. H. Kim, "A Measurement of Size of the Open Crack using Ultrasound Thermography", 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 13, No. 3, 2007, pp. 218~223

14. J. W. Cho, C. M. Chung, Y. S. Choi, S. H. Jung and H. K. Jung, " A Welding Sefect Inspection using an Ultrasound Pulse Thermography", Joumal of KWJS, Vol. 25, No. 1, 2007, pp. 9~13

15. J. W. Cho, Y, C. Seo, S. H. Jung, H. K. Jung and S. H. Kim, "A Study on Real-Time Defect Detection Using Ultrasound Excited Thermography", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 26, No. 4, 2006, pp. 211~219

16. J. W. Cho, Y. S. Choi, S. H. Jung and H. K. Jung, "A Brazing Defect Detection Using an Ultrasonic Infrared Imaging Inspection", Journal of the

Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 27, No. 5, 2007, pp. 426~431

17. J. W. Cho, Y. C. Seo, S. H. Jung, S. H. Kim and H. Y. Jung, "Defect Detection of Ceramic Heating Plate Using Ultrasound Pulse Thermography", Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 43, No. 4, 2006, pp. 259~263

18. 중소기업진흥공단 “베어링 시장 기술 보고서” 2009, pp. 1~18

19. Rovert Madding, Gray orlove, "INFRAMATION 2004", Vol. 5, 2004.

20. Rovert Madding, Gray orlove, "INFRAMATION 2005", Vol. 6, 2005.

21. 정재학 “신재생에너지-풍력발전” 영남대학교 2005, pp.1~8

22. "Level I Course Manual" Infrared Training Central, 2006, Chapter 6

23. "Level I Course Manual" Infrared Training Central, 2006, Chapter 7

24. http://www.dywelder.com/, “초음파 가진기의 원리”

25. http://www.kr.nsk.com/, “베어링 재료”

26. http://www.kims.re.kr/, “중대형 풍력터빈의 주요재료”

27. K. S. Kim, H. C. Jung, H. S. Chang, H. S. Kim, S. W. La,"Defect Detection of Wall Thinned Straight Pipe using Shearography and Lock-in Infrared Thermography", J.KSPE, Vol.26, No.11, 2009, pp.55-61

28. K. W. Nam, H. S. Gwon, "Evaluation of Behavior of Failure on Wall Thinned pipe Under internal pressure", KSME, 2011, pp.79-84

29. S. H. Choi, J. Y. Kim, S. H. Kim, C. H. Kim, "Nondestructive Ultrasound Infrared Thermography according to effect of fre-quency and power", KSTLE, 2011, pp.88-89

30. M. K. Kim, K. S. Kim, S. P. Yang, S. S. Kim, H. M. Kim, J. G. Song, "Defect detection of Aluminum 6061-T6 using Lock-in photo-infrared thermography technique" KSPE, 2008, pp523~524