creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-20000

2020年 2月
博士學位論文

電磁氣 非破壞檢査 技法에 의한 構造物 鎔接部 및 볼트締結部의 健全性 評價에 관한 研究

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

朴 主 鉉

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

電磁氣 非破壞檢査 技法에 의한 構造物 鎔接部 및 볼트締結部의 健全性 評價에 관한 研究

Integrity Evaluation of Welded and Bolted Joints through Electromagnetic Nondestructive Testing Techniques

2020 年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

朴 主 鉉

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

電磁氣 非破壞檢査 技法에 의한 構造物 鎔接部 및 볼트締結部의 健全性 評價에 관한 研究

指導教授 李 鎭 伊

이 論文을 工學博士 學位申請 論文으로 提出함.

2019年 10月

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

朴 主 鉉

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

朴主鉉의 博士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校 敎授	高樂濬 (印)
委 員	朝鮮大學校 敎授	朴昌鉉 (印)
委 員	朝鮮大學校 敎授	李鎭伊 (印)
委 員	朝鮮大學校 敎授	李熙鍾 (印)
委 員	光州大學校 敎授	李浸容 (印)

2019年 12月

朝鮮大學校 大學院

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT ..... **xi**

제 1 장 서 론 ..... - 1 -

제 1 절 연구배경 ..... - 1 -

제 2 절 연구목표 ..... - 12 -

제 2 장 이론적 배경 ..... - 14 -

제 1 절 용접부에서의 응력 및 자속밀도분포 상관관계 ..... - 15 -

1. 용접부에서의 응력변화 ..... - 15 -

2. 변형률이 자속밀도에 미치는 영향 ..... - 20 -

제 2 절 볼트체결부에서의 열화 및 자기히스테리시스 상관관계 ..... - 32 -

1. 볼트체결부의 결함유형 ..... - 32 -

2. 자기히스테리시스가 열화에 미치는 영향 ..... - 37 -

제 3 장 시스템 개발 ..... - 44 -

제 1 절 용접부 잔류응력 측정시스템 ..... - 45 -

1. 자속밀도분포 측정용 센서 ..... - 45 -

2. 병렬형 다중채널 신호처리장치 ..... - 47 -

3. 데이터수집 소프트웨어 ..... - 50 -

4. 해석 소프트웨어 ..... - 54 -

제 2 절 볼트체결부 기계적 열화 측정시스템 ..... - 64 -

1. 자기히스테리시스 측정용 센서 ..... - 64 -

2. 고속 단일채널 펄서-리시버 신호처리 장치 ..... - 66 -

3. 데이터수집 및 해석 소프트웨어 ..... - 69 -

4. **Max-Min rate** 알고리즘 ..... - 72 -

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 실험 및 고찰 - 77 -
제 1 절 용접부 모사 시험편 실험 - 78 -
1. 실물 결함 시험편 실험 및 고찰 - 78 -
2. 목업시험편 실험 및 고찰 - 82 -
3. 초음파검사와 비교 - 92 -
제 2 절 볼트체결부 모사 시험편 실험 - 95 -
1. 실물 결함 시험편 실험 및 고찰 - 95 -
2. 목업시험편 실험 및 고찰 - 99 -
3. 초음파검사와 비교 - 107 -
제 5 장 결 론 - 114 -
REFERENCE - 116 -
Ackowledgements - 123 -

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표목차

Table 1 -1 Failure type of the fastening bolt ..... - 8 -
Table 3 -1 NI USB-6255 specifications ..... - 49 -
Table 3 -2 Data acquisition software configuration and function ..... - 53 -
Table 3 -3 Analysis software configuration and function ..... - 57 -
Table 3 -4 NI USB-6216 specifications ..... - 68 -
Table 3 -5 Data acquisition & analysis software configuration and function ..... - 71 -
Table 3 -6 Factors for damage determination ..... - 72 -
Table 4 -1 Size of weld specimens ..... - 78 -
Table 4 -2 Size of bolt specimens ..... - 96 -
Table 4 -3 Magnetic hyteresis experiment result of mock-up specimenst ..... - 112 -
Table 4 -4 Magnetic hyteresis and ultrasonic testing comparison of mock-up specimens .. - 113 -

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

도목차

Fig. 1 -1 Rapid increase in aging structures for over 30 years [6] ..... - 2 -
Fig. 1 -2 Large structure collapse case: Seong-su Bridge [7] ..... - 2 -
Fig. 1 -3 Large structure collapse case: Investigation of failures of 154kV tubular-type transmission tower [9] ..... - 3 -
Fig. 1 -4 Type of welded defect ..... - 5 -
Fig. 1 -5 Three method for high-tensile fastening bolt ..... - 6 -
Fig. 1 -6 Fracture surface due to fatigue failures - CI(Crack Initiation), RF(Rapid Fracture) [26] ..... - 7 -
Fig. 1 -7 Necking of the cap screw ..... - 9 -
Fig. 1 -8 Early detection of the damage by the NDT technique ..... - 10 -
Fig. 2 -1 Type of stress according to external load ..... - 15 -
Fig. 2 -2 Elongation of circular rod by tensile load ..... - 16 -
Fig. 2 -3 Stress-Strain curve ..... - 17 -
Fig. 2 -4 Schematic illustrations of heat cycles in welding and residual stress results [48] ..- 18 -
Fig. 2 -5 Typical distributions of residual stress in plate butt joints ..... - 19 -
Fig. 2 -6 Change of magnetic domain due to external magnetic field [49] ..... - 21 -
Fig. 2 -7 Magnetic domain of ferromagnetic material ..... - 22 -
Fig. 2 -8 Movement of magnetic wall by external load(spontaneous magnetization) ..... - 23 -
Fig. 2 -9 Cross section of welded specimen ..... - 24 -
Fig. 2 -10 Fracture surface of tubular-type transmission tower ..... - 25 -
Fig. 2 -11 Experimental setup for measuring electromagnetic distribution of welded cross section (external load) ..... - 26 -
Fig. 2 -12 Experimental conditions (conceptual) ..... - 26 -
Fig. 2 -13 Experimental conditions (external load & magnetic fields) ..... - 27 -
Fig. 2 -14 Measuring residual magnetization using Hall sensor (without external load) ..... - 29 -
Fig. 2 -15 Measuring residual magnetization using Hall sensor(with external load) ..... - 29 -
Fig. 2 -16 Magnetic flux leakage distribution of welded joint by applying vertical magnetic field ..... - 30 -
Fig. 2 -17 Magnetic flux leakage distribution of weleded joint after vertical magnetic field removal ..... - 30 -
Fig. 2 -18 Magnetic flux leagage distribution after horizontal magnetic field removal ..... - 31 -
Fig. 2 -19 Singularity observation of magnetic flux leakage after horizontal magnetic field removal ..... - 31 -
Fig. 2 -20 Examples of stress-corrosion cracking in PWR power plants [59] ..... - 33 -
Fig. 2 -21 Fatigue failure of a bolt due to repeated unidirectional bending [61] ..... - 34 -
Fig. 2 -22 Movement of edge dislocation through a crystal [64] ..... - 35 -
Fig. 2 -23 Movement of mixed dislocation through a crystal [65] ..... - 36 -

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2 -24 Magnetic domain model and magnetization curve.....- 38 -
Fig. 2 -25 Magnetic hysteresis loop.....- 39 -
Fig. 2 -26 Magnetization curves according to magnetic characteristics.....- 40 -
Fig. 2 -27 Periodic magnetic hysteresis phenomenon .....- 42 -
Fig. 2 -28 Differential amplification signal by material .....- 42 -
Fig. 2 -29 Permeability variation by material.....- 43 -
Fig. 3 -1 Design of scanner for measuring magnetic flux density distribution of chevron shaped weld .....- 45 -
Fig. 3 -2 Scanner for measuring magnetic flux density distribution of chevron shaped weld- 46 -
Fig. 3 -3 Parallel multichannel signal processor block diagram.....- 47 -
Fig. 3 -4 Parallel multichannel signal processor external case (front and rear).....- 48 -
Fig. 3 -5 Data acquisition software flow chart.....- 51 -
Fig. 3 -6 Data acquisition sotfware for magnetic flux density distribution measurement of chevron shaped weld .....- 52 -
Fig. 3 -7 Analysis software flow chart.....- 55 -
Fig. 3 -8 Analysis software for magnetic flux density distribution measurement of chevron shaped weld .....- 56 -
Fig. 3 -9 Original data plot .....- 58 -
Fig. 3 -10 Signal processed data plot (differential analysis method).....- 58 -
Fig. 3 -11 Principle of detrend signal processing (detrend area setting).....- 59 -
Fig. 3 -12 Results of adaptive backdata signal processing .....- 59 -
Fig. 3 -13 Results of adaptive backdata signal processing (absolute value).....- 60 -
Fig. 3 -14 Principle of FFT data processing method.....- 61 -
Fig. 3 -15 FFT data processing result .....- 61 -
Fig. 3 -16 Gabor transform processing method .....- 62 -
Fig. 3 -17 Gabor transform data processing result.....- 62 -
Fig. 3 -18 Design of sensor probe for magnetic hysteresis measurement.....- 65 -
Fig. 3 -19 Sensor probe for magnetic hysteresis measurement.....- 65 -
Fig. 3 -20 High speed single channel pulser-receiver signal processor block diagram .....- 66 -
Fig. 3 -21 High speed single channel pulser-receiver signal processor .....- 67 -
Fig. 3 -22 Data acquisition & analysis software flow chart.....- 70 -
Fig. 3 -23 Data acquisition & analysis software .....- 71 -
Fig. 3 -24 Signal characteristics of facors for damage determination.....- 73 -
Fig. 3 -25 Pulse response according to the specimens.....- 75 -
Fig. 3 -26 Interrelationship of factors for damage determination .....- 76 -
Fig. 4 -1 Welded specimen .....- 79 -
Fig. 4 -2 Welded specimen #1 experiment result.....- 80 -
Fig. 4 -3 Welded specimen #2 experiment result.....- 81 -
Fig. 4 -4 Mock-up specimen (Tubular type & Circular type) .....- 83 -
Fig. 4 -5 Field experiment (welding line).....- 84 -
Fig. 4 -6 Tubular-type R1, R2 welding line experiment result (Forward scan) .....- 86 -
Fig. 4 -7 Tubular-type R1, R2 welding line experiment result (Reverse scan).....- 87 -

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4 -8 Tubular-type L1, L2 welding line experiment result (Forward scan).....- 88 -
Fig. 4 -9 Tubular-type L1, L2 welding line experiment result (Reverse scan) .....- 89 -
Fig. 4 -10 Circular-type R1, R2 welding line experiment result (Forward scan) .....- 90 -
Fig. 4 -11 Circular-type R1, R2 welding line experiment result (Reverse scan) .....- 91 -
Fig. 4 -12 Distribution of magnetic flux density in welded specimen #1 .....- 93 -
Fig. 4 -13 Ultrasonic schematic of welded specimen .....- 93 -
Fig. 4 -14 Experiment results of ultrasonic B-scan measured in the welding line direction .- 93 -
Fig. 4 -15 Experiment results of A-scan at specific locations.....- 94 -
Fig. 4 -16 Defect shape of bolt specimens.....- 95 -
Fig. 4 -17 Experimental results of bolt specimens using magnetic hysteresis sensor.....- 98 -
Fig. 4 -18 Algorithm results of bolt specimens using magnetic hysteresis sensor.....- 98 -
Fig. 4 -19 Mock-up specimen standard bolt .....- 99 -
Fig. 4 -20 Field experiment (bolted joints) .....- 100 -
Fig. 4 -21 Magnetic hysteresis calibration method (sensor signal).....- 101 -
Fig. 4 -22 Magnetic hysteresis calibration method (algorithm).....- 101 -
Fig. 4 -23 Experimental results of tubular type mock-up specimens.....- 103 -
Fig. 4 -24 Algorithm results of tubular type mock-up specimens.....- 103 -
Fig. 4 -25 Experimental results of circular type mock-up specimens.....- 104 -
Fig. 4 -26 Algorithm results of circular type mock-up specimens.....- 104 -
Fig. 4 -27 Classification of abnormal signal for experiment results (Tubular-type).....- 105 -
Fig. 4 -28 Classification of abnormal signal for experiment results (Circular-type) .....- 106 -
Fig. 4 -29 Calibration method for ultrasonic tesing.....- 107 -
Fig. 4 -30 Position of the ultrasonic probe relative to the bolt specimen .....- 108 -
Fig. 4 -31 Ultrasonic tesing of bolt specimens .....- 108 -
Fig. 4 -32 Measurement trajectory using ultrasonic testing of mock-up specimens.....- 109 -
Fig. 4 -33 Ultrasonic testing experiment result of mock-up specimens.....- 111 -

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

약어 설명

SMAW	Shielded Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
SAW	Submerged Arc Welding
IP	Incomplete Penetration
LF	Lack of Fusion
CI	Crack Initiation
RF	Rapid Fracture
NDT&E	Nondestructive Testing & Evaluation
RT	Radiography Testing
UT,	Ultrasonic Testing
PT	Liquid Penentrant Testing
ECT	Eddy Current Testing
MFLT	Magneic Flux Leakage Testing
HAZ	Heat Affected Zone
SCC	Stress Corrosion Crack
PWR	Pressurized Water Reactor
IASCC	Irradiation Assisted Stress Corrosion Crack
HMM	Hard Magnetic Material

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

SMM	Soft Magnetic Material
NMM	Normal Magnetic Material
LIGiS	Linearly Integrated GMR Sensor array
LPF	Low Pass Filter
PGA	Programmable Gain Amplifier
NI	National Instrument
SPB	Signal Processing Board
EM	Electormagnetic
DAQ	Data Acquisition System
TDMS	Technical Data Management Streaming
FT	Fourier Transform
FFT	Fast Fouier Transform
DFT	Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fouier Transform

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기호 설명

σ	Stress [N/mm^2]
ε	Strain
ΔL	Deformed length
E	Modulus of elasticity [Pa]
σ_x	longitudinal residual stress
σ_m	Maximum stress in the welding line
$\vec{M}$	Magnetization vector
$\vec{m}$	Magnetic dipole moment
$\vec{H}$	External magnetic field [A/m]
$\vec{B}$	Magnetic flux density [T]
χ_m	Magnetic susceptibility
μ	Permeability [H/m]
μ_0	Permeability in free space [H/m]
μ_r	Relative permeability [H/m]
$\vec{M}_{eqv}$	Equivalent magnetization
S_k	Magnetic domain area
k	Hall constant
I	Input current

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

V_H	Hall voltage
H^0	Initial magnetic field
H^V	Magnetic field in the vertical magnetization state
H^{VR}	Residual magnetization with vertical magnetization removed
H^H	Magnetic field in the horizontal magnetization state
H^{HR}	Residual magnetization with horizontal magnetization removed
W_m	Magnetic energy
V_{avr}	Moving average
V_{adap}	Adaptive backdata
ω	Angular frequency

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Integrity Evaluation of Welded and Bolted Joints through Electromagnetic Nondestructive Testing Techniques

JuHyun Park
Advisor: Prof. Jinyi Lee, Ph.D.
Dept. of Control and Instrumentation Eng.
Graduate School of Chosun University

Large-scale facility structures, such as power transmission and distribution facilities, nuclear and thermal power plants, petrochemical plants, high-speed railways, and ships, use large bolts for welding or fastening their main parts. Welding causes material change, deformation, and residual stress due to local heating and cooling of the joint. In addition, the large bolts used might be exposed to vibration, shock, and cyclic loading during operations, resulting in mechanical degradation and fatigue cracks. Enormous economic loss and casualties can occur as a result of the damages caused by material change, corrosion, degradation, and fatigue cracks in the welds and bolted joints in large-scale facility structures. Therefore, periodic inspection of the welds and bolted joints, which are the major joints of large-scale facility structures, to evaluate structural integrity is important to increase safety levels in society. This paper proposes a system for rapid inspection of welded and bolted joints of large-scale facility structures using electromagnetic fields without contact.

To evaluate the integrity of large-scale facility structures, the different types of defects occurring in welds were identified and the effects of stress changes on magnetic flux density distribution were theoretically investigated. To verify the validity of the theoretical approach, the magnetic flux density distribution in the weld cross section based on the external load or magnetic field application was measured. With the use of magnetic flux density distribution that

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

changes with load, residual stress was observed in the stress concentration zone and weld cross section. Based on these theoretical and experimental considerations, an inspection system was constructed as a prototype to test the welds of tubular-type transmission towers, which are part of large-scale facility structures. The measurements obtained from the inspection system may indicate changes in magnetic flux density due to the weld defects. In addition, the results measured using the inspection system was verified by comparing them with the results obtained through ultrasonic testing.

Further, the various types of defects that can occur in bolted joints were examined and the effects of mechanical degradation due to cyclic loading on magnetic hysteresis were theoretically investigated. The non-uniformity of the materials during the fabrication process and degradation and fatigue of the specimens due to prolonged use cause distortion of magnetic hysteresis by changing the shape and distribution of the domain were investigated. To verify the validity of this theoretical approach, a pulsed magnetic hysteresis inspection system consisting of a pulsed magnetic field application device, sensor capable of measuring the time variation of magnetic flux density, and signal processing circuit was constructed. Based on the results obtained from the inspection system, the primary factors indicating the change of magnetic hysteresis due to mechanical degradation were derived. For accurate determination between the integrity and degradation specimens, two lines on the same slope were randomly set as thresholds and these acted as boundaries between integrity and degradation during the evaluation.

To verify the validity of the algorithm based on these inspection systems and experimental considerations, the results were compared with that of ultrasonic testing. Further, welds and bolted joints of tubular-type transmission towers, which were broken during the actual on-site operation, were used for the experiment and verification purpose. Apart from this, the usability was examined through a broken specimen collected on-site and a transmission tower mock-up specimen fabricated in real size .

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

전력 송배전 설비, 원자력 · 화력발전소, 석유화학플랜트, 고속철도, 선박 등과 같은 대형기기 구조물은 막대한 자본, 시간 및 기술이 투자되어 건설되고, 경제성과 신뢰성이 보장되는 한 수십년간 사용하게 된다. 한편, 대형기기 구조물 중 강구조물은 철근콘크리트 구조물에 비하여 재료적 특성, 현장 적용성 및 재활용 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 강재는 재료의 강도가 우수하면서도 균일하여 큰 하중을 지지할 수 있어 구조물의 안전성을 보장한다.[1] 또한, 가공성이 뛰어나서 모재를 목적에 맞는 형태 및 크기로 변형하고 조립할 수 있으며, 경우에 따라 훌륭한 조형미를 제공할 수도 있다. 또한, 해체 후에는 재활용도가 높아 환경친화적인 재료로 각광을 받고 있다.[2]

한편, 강구조물은 사용 환경(온도, 처짐, 비틀림 및 진동)을 고려한 신중한 설계가 요구된다. 설계를 따르지 않는 강재의 사용 또는 부실시공은 구조물의 부식을 유발하거나 설계시 목표로 했던 재료적 장점을 담보할 수 없게 된다.[3] 또한, 한도를 초과한 외부하중, 가혹한 환경하에서의 장기간 활용, 그리고 설계시 예측하지 못하였던 인자로 인하여 구조물에는 부식, 열화, 피로균열과 같은 손상이 발생할 수 있다. 이러한 손상은 재질 및 구조의 불연속부인 용접 및 접합부에서 발생할 가능성이 높다.[4]

1970년대 급격한 경제성장으로 건설된 대형기기 구조물은 응력집중, 충격 및 반복하중을 받는 환경에서 장기간 운영에 따라 노후화되고, 일부는 설계수명이 경과되었으며 그 비율은 점차 증대될 전망이다.[5] 국토교통과학기술진흥원의 자료(Fig. 1 -1)에 의하면 30년 이상된 노후화 구조물은 2014년 239개소(전체 구조물 중 2.6%)에서 2025년에는 7배 증가한 1,681개소(전체 구조물 중 12.9%)가 될 것으로 전망하고 있다.[6] 따라서, 대형기기 구조물들이 급속히 노후화되는 현 시점에서 구조물의 안전성 및 내구성을 확보하기 위한 방안들이 연구되어야 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

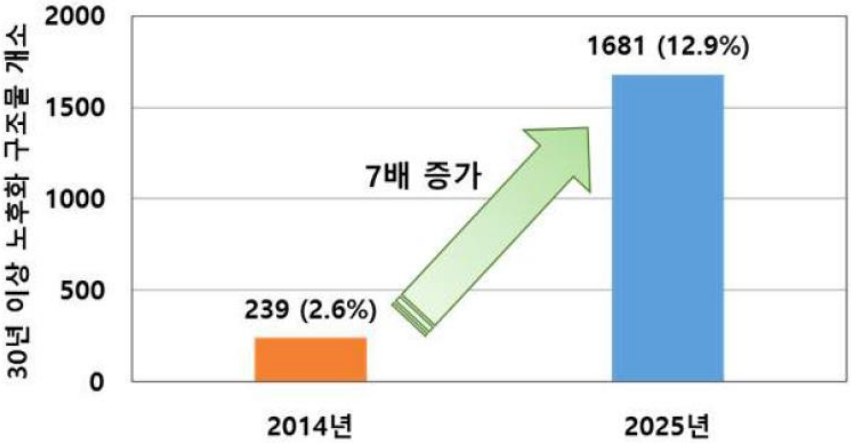


Fig. 1 -1 Rapid increase in aging structures for over 30 years [6]

따라서, 시공상의 결함, 사용중의 손상 및 경년열화에 등에 의하여 구조물들이 내구성을 상실하게 되면 Fig. 1 -2와 Fig. 1 -3에 나타낸 바와 같이 인명피해를 포함한 사회적 · 경제적 손실을 초래할 수 있다. 1992년 10월 21일 성수대교 제 5 · 6교각 사이 상부 트러스 약 50m가 붕괴해 무너지는 사고가 발생하였다.[7] 사고원인은 성수대교 건설 당시 다리 밑 부분을 이루고 있는 상부트러스가 제대로 연결되지 않았으며 압력을 분산시키는 이음새에도 결함이 생긴 것에 기인한다. 또한, 볼트를 무리하게 체결하다가 구멍의 모양이 변형되어 볼트의 강도가 약해진 것도 하나의 원인으로 지적되고 있다.[8] 결과적으로 사망자 32명, 부상자 17명의 인명피해를 입었다

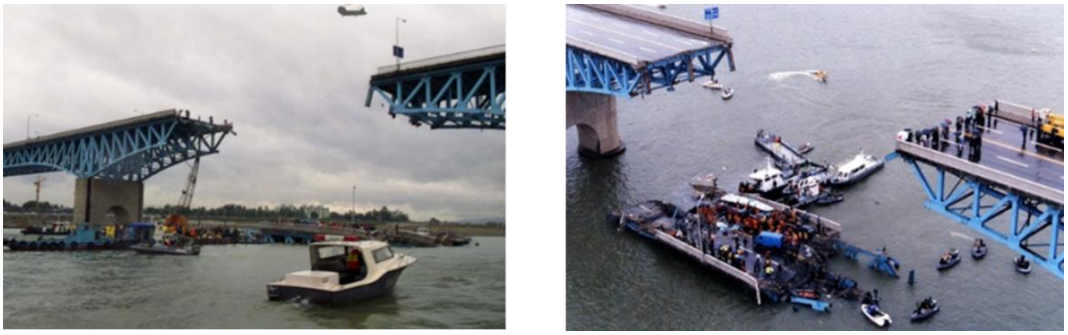


Fig. 1 -2 Large structure collapse case: Seong-su Bridge [7]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2012년 3월 19일 충남 아산시 배방읍에 소재한 154kV 관주형 철탑이 붕괴하는 사고가 발생하였다.[9] 철탑 절손 원인규명 보고서에 따르면 하부 2단 종심 용접부의 파단면에서 대형횡균열이 발견되었다. 사고 단면에서 발견된 횡균열은 길이 95mm, 깊이 15mm로서 구조물의 파괴인성을 초과하는 임계 균열 크기 이상이었으며, 용접 시 발생된 균열으로 용접부 전반에서 발견되었다. [10]

Fig. 1 -3 Large structure collapse case: Investigation of failures of 154kV tubular-type transmission tower [9]

대형기기 강구조물들은 여러 다른 부재들을 서로 접합 또는 체결하는 방식으로 제작된다. 대표적인 접합 및 체결 방법에는 용접과 볼트 체결이 주로 사용된다. 일반적으로 강구조물에 사용되는 용접은 피복 아크 용접(SMAW, Shielded Metal Arc Welding), 가스 텅스텐 아크 용접(GTAW, Gas Tungsten Arc Welding), 서브머지드 아크 용접(SAW, Submerged Arc Welding) 세 가지로 분류할 수 있다.[11]

SMAW은 금속심선에 피복재를 바른 용접봉을 사용하는 용접으로서 가장 많이 사용한다. 피복 아크 용접법은 아크에 의한 고열로 피복재가 기화하며 공기중의 산소나 질소의 침입을 막고, 내부심선은 용착금속으로 용융되어 모재와 결합하는 방식이다.[12] GTAW은 피복되지 않은 금속 심선 주위에 불활성가스(예 : 아르곤 가스)를 분출시켜 아크를 보호하고 외부의 공기침입을 방지하는 용접방법이다. GTAW는 피복재가 아닌 가스로 실드 효과를 발휘하므로 바람이 강한 경우 방풍장치가 요구

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

되나, 피복아크용접보다 시공속도가 빠르고, 용접에 의한 변형도 적으며, 피복재의 함입 우려가 없다는 장점을 가진다.[13] SAW은 공장에서 수행하는 기계에 의한 자동용접으로, 긴 이음부를 연속적으로 용접해야 하는 경우에 적용된다. 이음부 표면에 미세한 입상의 플럭스를 뿌리고, 금속심선을 플럭스속에 집어넣은 상태에서 용접하므로 플럭스가 내부아크를 보호하게 된다. 높은 용접 품질을 기대할 수 있으며, 대형의 용접부에 적용이 가능하다.[14]

한편, 이러한 용접에 의한 접합은 자재의 두께에 제한이 없으며, 복잡한 형상의 구조물을 제작할 수 있고 경량화 할 수 있다. 반면에 용접사의 기량에 따라 품질이 크게 좌우되고, 내부 결함을 현장에서 검사하기 곤란하다는 단점을 가진다. 또한, 접합부위의 국부적인 가열 및 냉각에 의해 재질변화, 변형 및 잔류응력이 존재할 수 있다.[15] 이러한 용접과정에서 발생한 재질의 변화와 구조물의 손상은 강도를 저하시키거나, 결함의 시작점으로 작용하여 구조물 파손이 원인이 될 수 있다. Fig. 1 -4는 용접공정에서 발생할 수 있는 용접결함의 종류들을 나타낸다.

용입불량(IP, Incomplete Penetration)은 개선용접 또는 필렛용접 할 때 용접전류가 낮아 아크 열이 루트 밑부분까지 충분하게 용융 시키지 못했을 때 발생한다. 또한, 용접속도가 부적당할 때, 개선각이 부적절할 때, 잘못된 용접봉을 선택했을 때 발생하며 외부에서 잘 발견할 수 없는 결함으로 접합의 강도가 약하게 되어 이부분에서 반복하중이 작용하면 균열이 일어날 수 있다.[16] 언더컷(undercut)은 용접과정 중 모재가 함몰되어 생기는 표면결함으로 함몰부가 날카로운 형상을 가지고 있어 응력집중에 의한 균열로 발전할 수 있는 결함이다.[17] 용접 전류가 과다할 때, 아크 길이가 길 때, 운봉속도가 너무 빠를 때 발생하기 쉽다. 융합부족(LF, Lack of Fusion)은 용접조작의 실패에 의한 것으로 용접봉과 모재 또는 각 패스간 용접부 사이를 충분히 용융시키지 못한 상태에서 용접금속이 흘러 들어가 메워진 상태의 결함이며 날카로운 선 모양의 끝단부를 형성하기 때문에 균열과 동일하게 다루어진다.[18] 개재물(inclusion)이란 슬래그(slag), 플럭스(flux), 텅스텐(tungsten)과 같이 용접부 내에 들어 있는 이물질을 말한다. 용해된 금속을 보호하기 위해 사용되는

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

플럭스가 용착 금속의 내부에 잔류하거나 용접표면에 박혀 있는 것을 말하며, 루트부, 용접 패스의 경계 혹은 패스내의 혼입 형태로 존재한다.[19] 기공(porosity)은 용접시 발생된 가스가 용접금속 내에 갇힌 상태로 응고된 결함으로 용접부 전 길이에 불균일하게 연속하여 발생하는 경우와 국부적으로 발생하는 경우가 있다.[20] 용접균열(crack)은 용접부에서 생기는 결함 중에서 가장 치명적인 결함으로서 용접으로 인한 하중 또는 응력이 해당 재질의 인장강도를 초과할 때 발생하게 된다. 또한, 균열이 발생하는 금속의 온도를 기준으로 고온 균열과 저온 균열, 용접 축방향을 기준으로 종균열(longitudinal crack)과 횡균열(transverse crack)로 분류할 수 있다.[21]

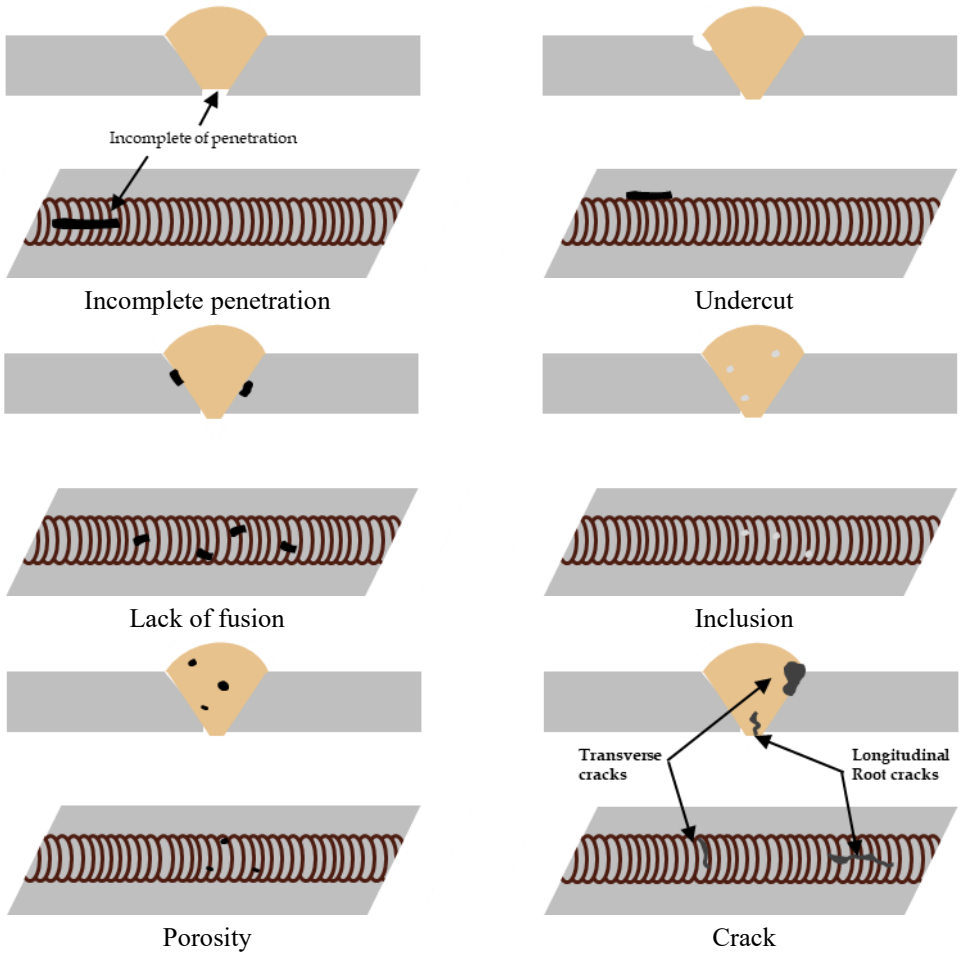
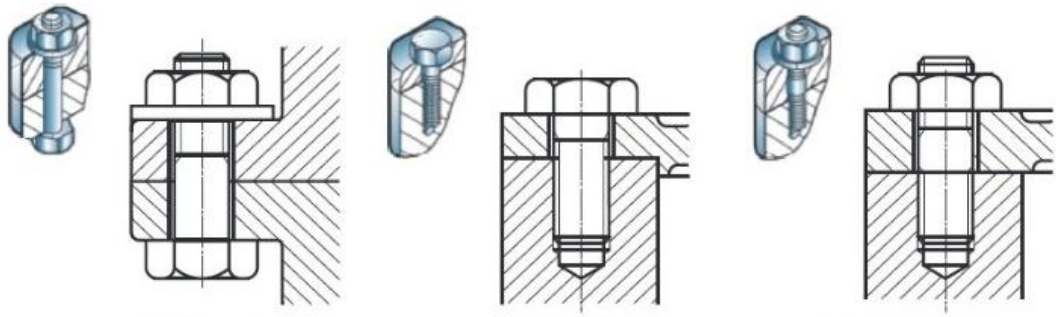


Fig. 1 -4 Type of welded defect

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한편, 볼트체결은 부재를 볼트 또는 너트로 둘 이상의 부품을 연결하는 방식으로서 대형 강구조물의 경우 고장력 볼트를 사용하여 체결한다. 고장력 볼트는 일반볼트에 비해 높은 인장 강도를 가지고 있으며, 기계 · 선박 등 철골구조체의 접합에 주로 사용된다.[22] 고장력 볼트를 이용한 체결은 다른 접합방식의 접합부에 필수적으로 발생되는 국부적인 집중응력이 발생하지 않아 응력전달이 원활하고, 강성 및 내력이 크며, 반복하중에 대해서도 높은 피로강도를 발휘할 수 있다.[23]

볼트는 대상물의 체결방식에 따라 (a) 관통볼트(through bolt), (b) 탭볼트(tap bolt), (c) 스터드 볼트(stud bolt)등으로 분류할 수 있다. 관통볼트는 가장 보편적인 형태의 체결방식으로 볼트를 조립체 사이에 관통한 후 너트로 체결한다. 탭볼트는 볼트몸체에 나사산이 있어 너트를 사용하지 않고 체결하는 볼트이다. 스터드볼트는 볼트를 모재에 고정하고 돌출부에 부품을 부착 후 너트로 체결한다.



(a) through bolt (b) Tap bolt (c) stud bolt

Fig. 1 -5 Three method for high-tensile fastening bolt

그러나, 볼트 체결부는 외부의 반복적인 하중, 충격, 진동뿐만 아니라 시간의 경과에 따라 체결력이 감소할 수 있다.[24] 결합 시 볼트에 충분한 인장력이 주어졌는대도 불구하고 체결력이 감소되면 너트 풀림 및 손상으로 인하여 전체 분리, 체결부의 미끄러짐(변위), 체결부 Fretting(부식), 너트 진동에 의한 이완(변위) 등 고장이 발생할 수 있다. 이러한 기본 고장 형태는 Table 1-1에 열거한 바와 같이 고장을 유발하는 원인과 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 체결된 상태, 즉 정하중 시 볼트

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가 파손되는 경우의 파단면은 볼트 축과 90° 이상 차이가 있다. 이것은 인장과 비틀림 응력의 조합으로 인한 볼트 강성의 초과 때문이고, 순수 인장 파괴는 볼트축에 90° 에서 일어난다.[25] 또한, 변동 순환 하중으로 볼트가 파손된 경우는 피로 손상에 의한 것이다. 이러한 경우, 파단면상에 Fig. 1 -6과 같은 "beach mark"가 나타난다. 또 다른 고장의 원인은 부식을 동반한 정적 또는 피로 파손이다.

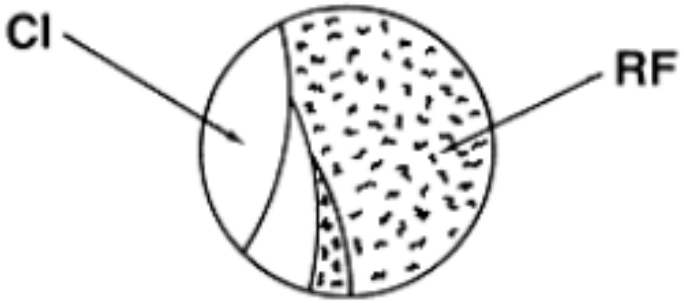


Fig. 1 -6 Fracture surface due to fatigue failures - CI(Crack Initiation), RF(Rapid Fracture) [26]

한편, 등급이 낮은 볼트의 사용 또는 적용되는 하중보다 매우 낮은 항복 강도의 볼트를 사용하면 Fig. 1 -7에 나타낸 바와 같은 네킹(necking) 현상이 발생한다. 이러한 경우, 하중이 완화되면 증가된 길이에 의해 볼트의 진동이 발생되고 너트가 헐거워진다. 이러한 상태에서 볼트를 다시 조이면 하중이 낮은 상태에서도 볼트가 신장된다. 이는 병목 지역의 금속 분포량이 부족하기 때문이며, 대개의 경우 너트를 다시 조일 때 볼트가 완전히 파손된다.[27] 따라서, 부적절한 체결부품의 사용을 지양하고, 하중에 견딜 수 있는 체결 볼트를 선택하고, 상호 체결 정도가 적절해야 한다. 볼트 체결부의 고장을 미연에 방지하기 위해서는 (1)적절한 체결 부품의 선정, (2)적절한 체결 부품의 설계 변수, (3)설치 및 정비 절차의 중요성 사항을 신중히 고려해야 한다.[28]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1 -1 Failure type of the fastening bolt

주요 원인 (인자)		정하중시 파단	피로 손상	이완	체결부누설
설계 및 제작	볼트축의 방향 댐핑			●	
	이완 효과		●	●	
	나사 뿌리 반경		●		
	볼트 체결부 강성률		●		●
	나사의 Run-out		●		
	너트 수축 끼워 맞춤	●			
	부품 마무리		●		
	부적절한 열처리	●			
	공구의 흠		●		
조립 관례	체결면의 조건				●
	나사부 윤활	●	●	●	
	사용된 공구의 형태	●			
	부적절한 Preload			●	●
운전 조건	하중 이동의 크기	●	●		
	온도 순환				●
	부식	●	●	●	●

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

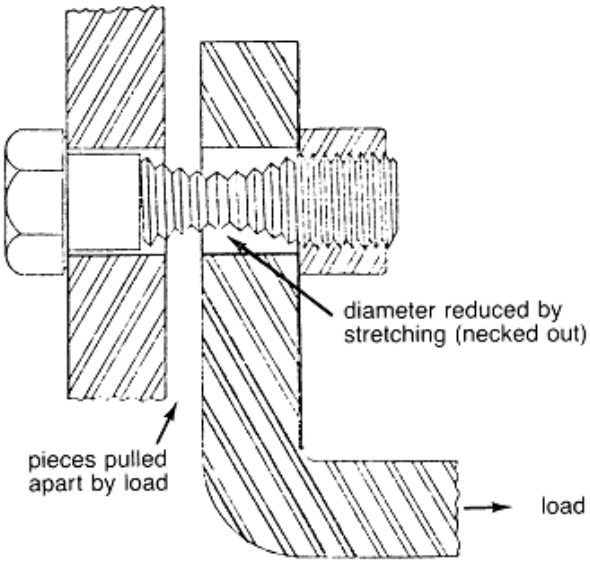


Fig. 1 -7 Necking of the cap screw

상술한 대형기기 구조물의 용접부 및 볼트체결부에서 발생할 수 있는 결함 및 손상을 조기에 발견하여 적절한 정비를 수행하면, 설계수명까지 안전한 사용은 물론 수명연장도 가능하다.(Fig. 1 -8) [29] 이러한 재료, 부재, 제품 및 구조물의 안정적인 사용 및 수명연장을 위하여 적절한 시기에 비파괴검사 및 평가(NDT&E, Nondestructive Testing & Evaluation)가 필요하다. 비파괴 검사는 검사 대상물에 손상을 주지 않고 시험체의 성질이나 상태, 결함 존재 유무 등을 알아내기 위한 검사를 뜻한다. 비파괴검사 및 평가를 이용하여 구조물 및 산업설비의 건전성을 확인하고 평가하면 구조물 혹은 설비의 안전과 품질을 확보하여 신뢰성을 증대시킬 수 있다.[30-31]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

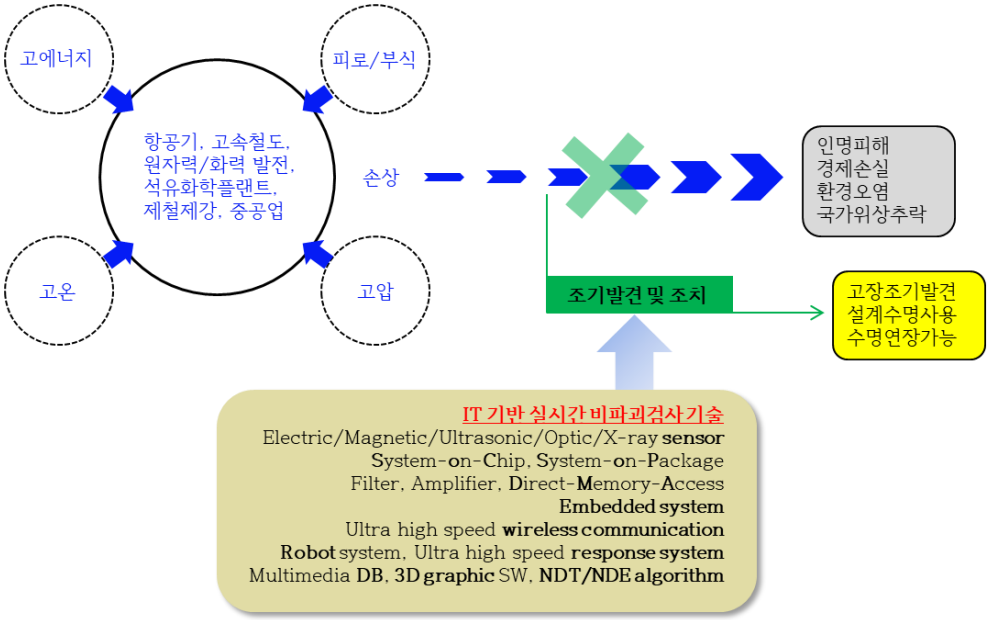


Fig. 1 -8 Early detection of the damage by the NDT technique

현재 구조물에 적용할 수 있는 비파괴검사방법으로는 방사선검사(RT, Radiography Testing), 초음파검사(UT, Ultrasonic Testing), 침투탐상검사(PT, Liquid Penentrant Testing), 와전류검사(ECT, Eddy Current Testing), 누설자속검사(MFLT, Magneic Flux Leakage Testing)가 있다. 방사선검사는 X선 및 감마선 등 방사선이 물질을 투과하는 성질을 이용하여 결함의 존재 유무를 필름으로 판단하는 비파괴검사법이다. 방사선이 시험체를 투과하는 정도는 재료의 밀도, 결함, 두께변화에 따라 달라진다. 방사선검사는 대형기기 구조물의 제작 공정에서 구조물의 건전성을 검사하는데 활용될 수 있으나, 현장에 설치되었을 때에는 검사장비의 접근성이 제한되어 적용하기 곤란하다.[32-33] 초음파검사는 물체에 가해진 초음파가 내부결함을 만나면 반사되는 성질을 이용하여 제품의 결함을 검사하는 방법으로, 용접부 및 볼트체결부를 검사하는데 유용한 방법 중 하나이다. 하지만, 커플런트를 지속적으로 공급할 필요가 있으며, 접촉이 필수적이어서 전수 검사하는데 긴 검사 시간이 소요되고, 검사자의 숙련도에 따라 결과의 해석에 차이가 발생하게 된다.[34-35] 침투탐상검사는 소재의 표면에 생긴 결함부에 침투액을 스며들게 한 후 현상액으로 결함을 검출하는 방법으로 용이하

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 하지만, 전처리 및 후처리 공정이 필요하며, 인체에 유해한 침투제를 사용해야 하고, 침투제가 완전히 제거되지 않을 경우 시험편에 오염물질을 남기게 된다.[36] 와전류검사는 전자기유도 원리를 이용한 검사법으로 최근 신뢰도가 향상되고, 검사 속도가 증대된 장비와 프로브가 개발되어 적용되고 있다. 그러나, 주요 대형기기 구조물의 재질인 탄소강은 표피효과에 의하여 와전류의 침투깊이가 얕아 용접부 및 볼트체결부 내면의 손상을 측정하기 곤란하다.[37-38] 누설자속검사는 강자성체 금속의 비파괴검사에 적합하다. 그러나, 잔류응력과 같이 기계적 변형에 기인한 물성변화를 측정하기 곤란하다.[39]

종래의 다양한 비파괴검사법이 활용되고 있지만 대형기기 구조물을 검사 및 진단하기 위해서는 현실적으로 사회적 · 경제적 어려움이 있다. 대형기기 구조물의 신규 제작 및 사용연한의 장기화에 따라 유지관리 대상은 점차 증가하고 있는 반면에, 전문검사자의 고령화, 학령인구의 감소, 이공계회피 및 열악한 환경하에서 장기간 근무에 따라 검사 · 진단 전문인력은 점차 감소하고 있는 추세이기 때문이다. 또한, 우리나라의 한국의 구조물 안전 및 유지관리 기술 수준은 미국(100%)에 비하여 79.2%에 불과하다.[40] 이에 따른 구조물의 유지하기 위한 대처방안, 정책 및 연구가 이루어지고 있지만 확실한 지침이 미흡한 상태이다.

한편, 종래의 비파괴검사법은 (a)전처리 및 후처리 공정이 필요하며, (b)숙련된 기술이 요구되고, (c)평가자에 따라 결과 해석 차이가 발생할 수 있으며, (d)검사대상 및 목적에 따라 적용방법이 다르고, 경우에 따라서 (e)접촉매질이 지속적으로 필요하며, (f)검사 시 장시간 요구된다는 한계가 있다. 따라서, 본 논문에서는 (1)설계, 시공 및 경년열화로 인하여 구조물의 용접부 및 볼트체결부에서 발생할 수 있는 결함 및 손상을 조기 진단할 수 있고, (2)넓은 영역에서 (3)고속, 고분해능 및 고감도로 검사가 가능하며, (4)종래의 비파괴검사방법의 한계를 극복하고, (5)검사결과를 보존할 수 있으며, (6)해외제품의 의존도를 줄일 수 있는 국산 원천기술에 의한 비파괴검사법을 적용하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 연구목표

본 논문은 대형기기 구조물의 주요 접합부인 용접부 및 볼트체결부를 주기적으로 검사할 수 있는 방안을 제안하고, 시제품을 제작하여, 실험적으로 검증하는 것을 목표로 한다.

이를 위하여 용접부에서 발생하는 결함의 유형을 파악하고, 응력변화가 자속밀도분포에 미치는 영향을 이론적으로 고찰한다. 이론적 접근의 타당성을 검증하기 위하여 시편에 외부하중 및 자기장을 인가하고 용접부 단면의 자속밀도분포를 측정한다. 이러한 이론 및 실험적 고찰을 바탕으로 관주형 송전탑의 용접부를 검사할 수 있는 검사시스템을 시제작한다. 검사시스템을 이용하여 측정한 자속밀도변화가 용접결함을 지시하는 것을 검증하기 위하여 초음파검사 결과와 비교한다.

볼트체결 구조물에서 발생하는 결함의 유형을 파악하고, 반복하중에 의한 기계적 열화가 자기히스테리시스에 미치는 영향을 이론적으로 설명한다. 이러한 이론적 접근의 타당성을 검증하기 위하여 펄스형 자계인가장치, 자속밀도의 시간변화를 측정할 수 있는 센서, 신호처리회로로 구성되는 펄스형 자기히스테리시스 검사시스템을 시제작한다. 검사시스템을 이용하여 측정한 결과로부터 기계적 열화에 따른 자기히스테리시스의 변화를 지시하기 위한 주요인자를 도출한다. 이러한 검사시스템과 실험적 고찰에 기반한 알고리즘의 타당함을 검증하기 위하여 초음파검사 결과와 비교한다.

또한, 관주형 송전탑의 용접부 검사시스템은 쉐브론형태의 검사대상체를 고려한 스캐너와 함께 신속한 실험결과의 획득을 위한 배열형 고감도 반도체기반 자기센서, 그리고 병렬형 멀티채널 신호처리장치를 설계하여 제작한다. 또한, 볼트체결부 검사시스템은 다양한 크기의 볼트를 체결된 상태에서 검사하기 위한 센서프로브의 설계 · 제작과 함께 자기히스테리시스의 시간적 변화를 측정하기 위한 초고속 AD변환장치를 구현한다.

그리고, 실제 현장 운용중 파손된 관주형 송전탑의 용접부 및 볼트를 실험 및

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

검증에 활용한다. 이와는 별도로 실물 크기의 관주형 송전탑 목업시험편의 용접부와 볼트체결부에 도입한 여러가지 형태 및 크기의 인공 결함을 대상으로 최종 시제작한 검사시스템을 적용하여 그 유용성을 파악한다.

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 제 1장은 서론이며, 제 2장에서는 이론적 배경으로 용접부에서의 응력변화가 자속밀도분포에 미치는 영향을 이론적으로 해석한다. 외부하중 또는 자기장 인가에 따른 용접부 단면의 자속밀도변화를 실험적 고찰로 활용하였다. 또한, 볼트체결부에서는 발생할 수 있는 결함의 유형에 대해서 파악하였으며, 반복하중에 의한 기계적 열화가 자기히스테리스에 미치는 영향을 서술하였다. 제 3장은 이론적 접근의 타당성을 검증하기 위한 대형구조물 용접부 및 볼트체결부 검사시스템 개발에 대하여 서술하였다. 검사시스템은 센서, 신호처리장치, 소프트웨어로 구성하였다. 제 4장은 상술한 검사시스템의 유용성을 검증하기 위하여 실제 현장 운용중 파손된 관주형 송전탑의 실물 결함 시험편 및 실물크기의 목업시험편을 활용하여 실험을 진행하였다. 제 5장은 결론이다

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

+

제 2 장 이론적 배경

용접부에서는 국부적인 가열 및 냉각에 기인한 재질변화, 수축, 변형 및 잔류응력과 함께, 용입불량(incomplete penetration), 언더컷(undercut), 융합부족(lack of fusion), 개재물(inclusion), 기공(porosity), 용접균열(crack)이 존재할 수 있다. 이러한 용접과정에서 발생한 재질 변화, 변형 및 용접결함은 구조물의 강도를 저하시키거나, 관주형 송전탑과 같이 하중 및 습기가 노출된 환경하에서 장시간 활용할 경우 결함 발생 및 진전의 기점이 될 수 있다. 하지만, 제작되어 현장에 설치되어 있는 구조물의 용접부를 비파괴검사하기 위한 방법에는 많은 제약이 따른다. 예를 들어 방사선투과시험은 방사선 발생장치와 감광필름 사이에 피측정체가 위치해야 하고, 방사선 차폐시설이 있는 곳에서 검사해야 하므로 현장 적용성이 현저히 저하된다. 초음파검사의 경우, 검사영역 전체를 음향매질로 도포해야 하는 어려움이 있다. 자분탐상 또는 침투탐상은 페인트를 제거하는 불편함과 함께 바람과 습도의 영향을 많이 받기 때문에 현장 검사에는 많은 제약이 따른다. 그리고, 와전류탐상법은 투자율이 높은 자성체의 경우, 침투깊이가 얕기 때문에 효율적인 검사가 이루어지지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 용접부에서 발생하는 잔류자화가 변형률 및 잔류응력에 영향을 받는다는 가정을 이론 및 실험적으로 제시하였다. 제 1절은 응력, 변형률 그리고 자속밀도변화의 상관관계를 이론적으로 설명하고, 실험적으로 검증하였다.

한편, 체결용 대형볼트는 운전 시 기계진동, 충격하중 및 반복하중이 노출되고, 결과적으로 전위밀도가 증가하여 피로균열로 진전할 수 있다. 제 2절에서는 전위밀도의 증가가 자구의 이동에 방해요소로 작용하고, 결과적으로 자기히스테리시스 곡선 및 자기에너지의 변화를 유발한다는 이론을 제시한다. 이러한 이론적 배경을 바탕으로 출력된 신호를 어떻게 해석할 것인지에 대하여 서술하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 절 용접부에서의 응력 및 자속밀도분포 상관관계

1. 용접부에서의 응력변화

일반적으로 강구조물에서 응력(stress)은 재료에 압축, 인장, 굽힘, 비틀림 등의 하중(외력)을 가했을 때, 힘의 크기에 대응하여 재료 내에 생기는 저항력을 뜻한다.[41] 응력의 크기는 작용하는 힘에 비례하며, 일정한 힘을 받을 경우에는 면적이 작을수록 증가한다. Fig. 2 -1에 나타낸 바와 같이 응력은 하중의 종류에 따라 인장응력, 압축응력 및 전단응력으로 분류할 수 있다.

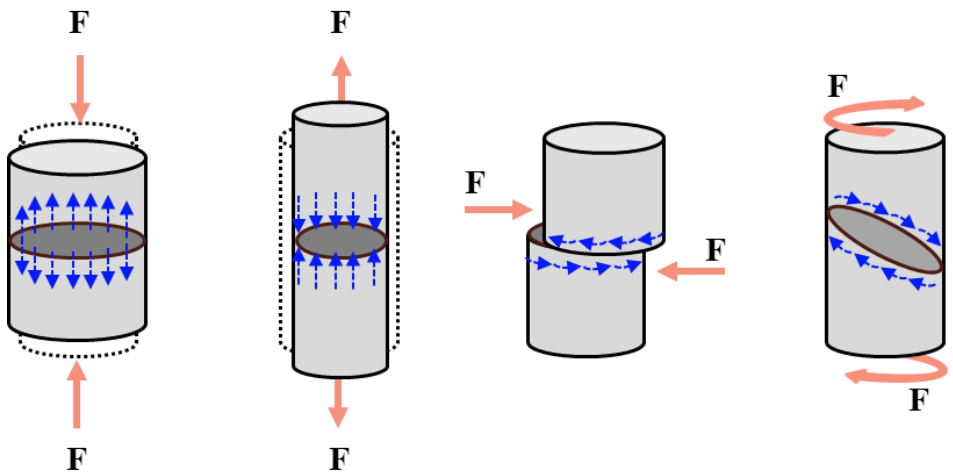


Fig. 2 -1 Type of stress according to external load

특정 금속 재료에 외력이 가해졌을 때 재료 내부에서 생기는 응력에 의하여 변형이 발생하고 그 정도에 따라 파손이 발생하기도 한다. 물체에 작용하는 힘을 점진적으로 증가시키면 물체의 형상변화인 변형(deformation)과 내부의 저항력인 응력(stress)도 점진적으로 증가한다.[42] 응력과 변형률은 각각 식 (1)과 식 (2)로 표현할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

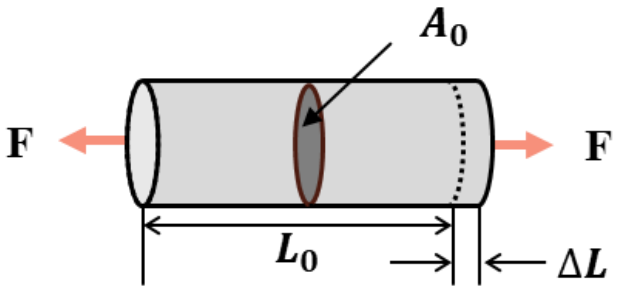


Fig. 2 -2 Elongation of circular rod by tensile load

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{L' - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{2}$$

Fig. 2 -3은 일반적인 연성 재료의 응력-변형률 선도를 나타낸다. 원점 O부터A까지는 응력과 변형률이 비례관계를 가지는 탄성 구간이다. 이 구간에서는 하중에 의해 변형된 재료는 하중 제거시 탄성에 의해 본래의 모습으로 돌아온다. 이 때, 응력과 변형률과의 관계, 즉 기울기를 탄성계수(E, modulus of elasticity) 또는 영률(young's modulus)로 일컫는다. 점 B에서 C까지의 재료의 거동을 항복(yielding)이라고 하며, B점은 비례한도를 나타내는 항복점(yielding stress)이라고 한다. 이 영역에서 재료는 완전소성(perfect plasticity)이 되고 하중이 추가적으로 작용하지 않아도 변형이 발생한다. 또한, 소성 상태에서 변형이 계속되면 변형경화(strain hardening)로 인해 응력은 극한 강도에 이를 때까지 커지게 된다. 극한 강도에 이를 때까지 재료의 단면의 넓이는 푸아송 비에 따라 균일하게 감소하지만, 극한 강도를 넘으면서 특정한 구간의 단면의 넓이가 더 급격하게 감소하는 네킹(necking)현상이 발생하며, 이에 따라서 진응력은 재료가 파괴될 때까지 증가하게 된다. 그러나 공칭 응력-변형도 선도에서 이는 응력의 감소로 나타난다. 재료는 결국 불안정한 넥(neck)으로 인해 파단(fracture)에 이르게 된다.[43]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

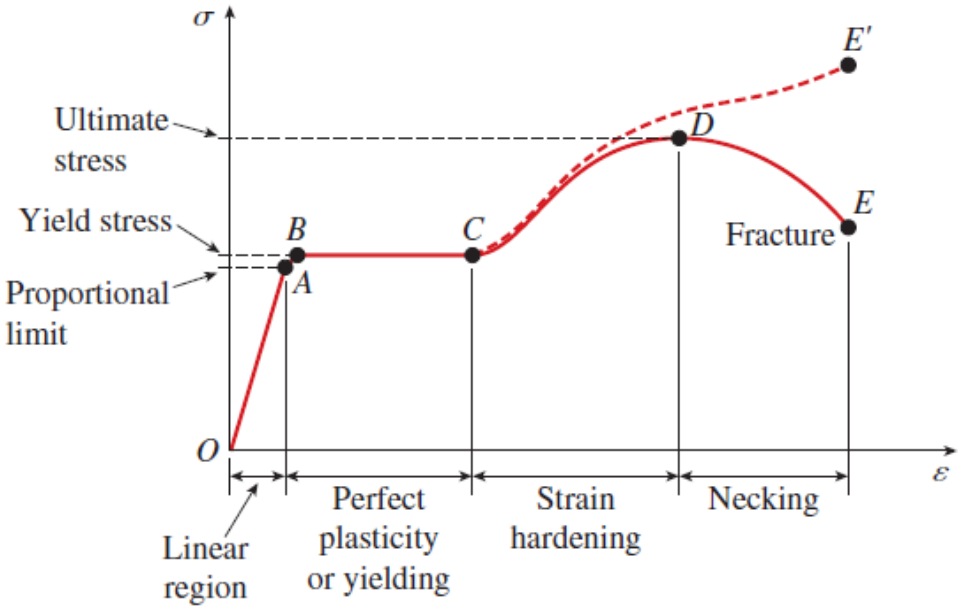


Fig. 2 -3 Stress-Strain curve

한편, 재료나 구조물의 제조단계에 이미 존재하는 내부응력을 초기응력이라 하고, 재료에 가해진 외력이 제거된 후에도 재료 속에 여전히 남아 있는 내부응력을 잔류응력이라 한다. 잔류응력은 절삭, 압연, 단조, 가열, 냉각, 용접, 도금 등 급격한 온도 및 조건변화로 금속이나 세라믹 등에 생기는 불균일한 소성변형의 일부이다.[44] 특히, 급격한 가열 및 냉각이 동반되는 용접공정에서 발생할 수 있으며 용접 결함에 의하여 국부적인 잔류응력의 변화가 잔존하게 된다. 또한, 부재의 두께가 두꺼울수록, 구속도가 클수록, 냉각속도가 빠를수록, 소재의 경화능이 클수록 잔류응력이 증가할 수 있다.[45]

잔류응력은 일반적으로 거시적 잔류응력(macro-residual stress), 미시적 잔류응력(micro-residual stress)으로 나누어질 수 있다. 거시적인 잔류응력은 물체 크기의 길이에 연속적으로 변화하고, 미시적 잔류응력은 재료의 미시적 부분에 국한된다. 거시적 잔류응력은 불균일한 소성가공, 용접 중 가열 및 냉각에 의한 팽창 및 수축, 주조 시 냉각속도 차이 등에 의해 발생할 수 있으며, 미시적으로는 용질원자와 전위

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

간의 상호작용에 의해 발생할수 있고, 스틸소재의 경우 급냉에 의한 마르텐사이트 변태에 의해 발생할 수 있다.[46]

한편, Fig. 2-4는 일반적인 용접부의 열팽창 및 수축과정에서 발생할 수 있는 잔류응력의 메커니즘을 나타낸다. 이 메커니즘을 통해 용접이 시작되는 시점부터 종료되는 지점까지 온도와 잔류응력을 이해할 수 있다. Fig. 2-4의 (1) 단면 A-A는 용접과정이 이루어지지 않는 부분으로 온도와 잔류응력의 영향을 받지 않는다. Fig. 2-4의 (2) 단면 B-B는 용접이 진행중인 과정으로 온도가 급격히 상승하고, 고온에 의하여 용접부에 압축 잔류응력이 발생한다. 반면에 용접부위와 떨어진 부분에서는 모재가 구속이 되기 때문에 인장 잔류응력이 나타난다. Fig. 2-4 (3) 단면 C-C는 용접하고 나서의 잔류열이 남아있어 인장 잔류응력이 존재하지만 크지 않다. Fig. 2-4 (4) 단면 D-D 용접이 종료되고 일정 시간이 지난상태로 용접부가 냉각되는 과정에서 열수축되어 용접 진행방향과 직교하는 인장 잔류응력이 발생한다.[47]

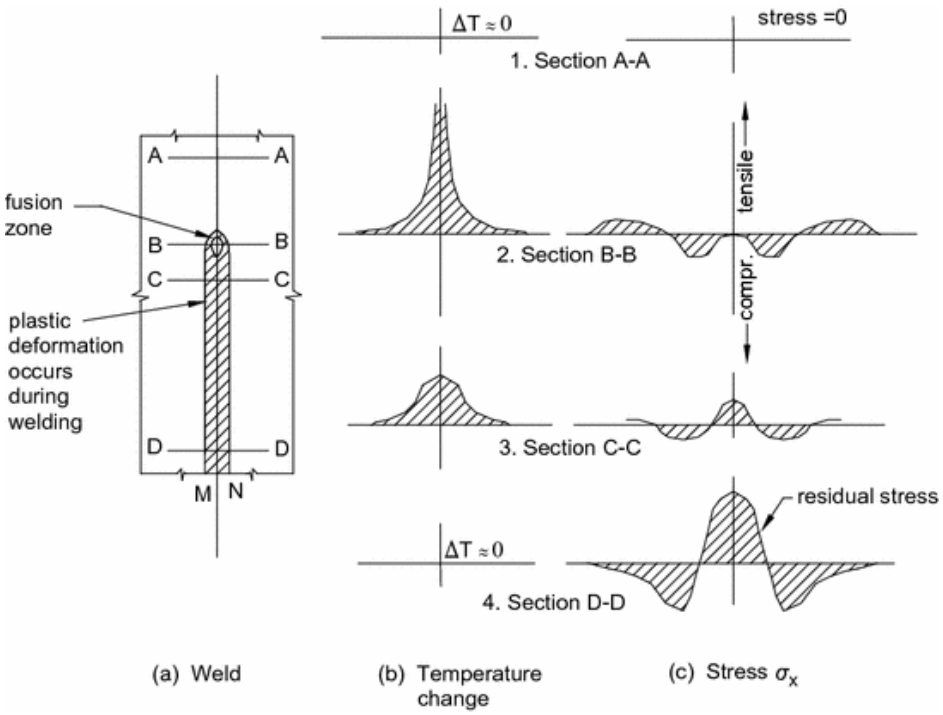
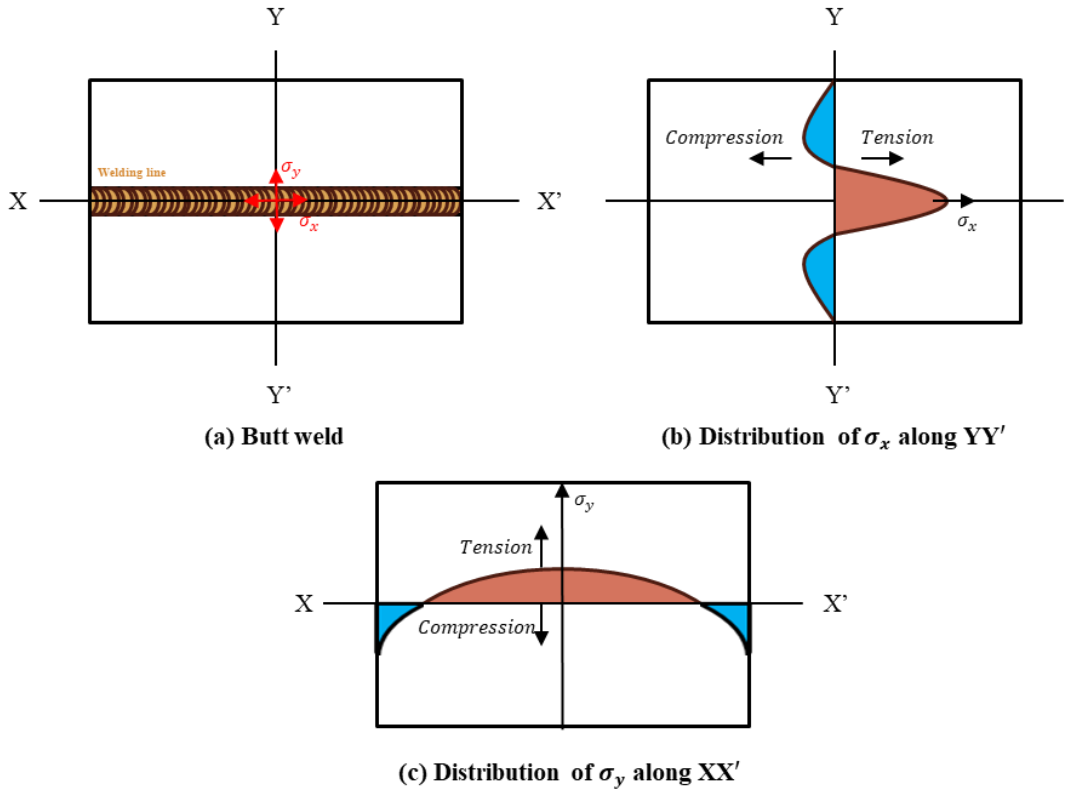


Fig. 2-4 Schematic illustrations of heat cycles in welding and residual stress results [48]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2 -5는 맞대기 용접부에 생성되는 잔류응력의 전형적인 분포를 나타낸다. 잔류응력의 성분은 횡방향 응력과 종방향 응력으로 분류되며 각각 σ_x와 σ_y로 표시된다. Fig. 2 -5 (b)와 (c)는 상술한 바와 같이 용접선을 따라 횡방향 응력, 종방향 응력 모두 피로 및 파괴에 취약한 인장 잔류응력이 발생하며, 용접과 다른 외부영역에서는 압축 잔류응력이 발생한다. Masubuchi & Martin[48]은 용접부에서 발생하는 종방향 잔류응력 분포 σ_x를 식 (3)과 같이 추정하였다. 여기서 σ_m 은 용접라인에서의 최대 응력이고, y는 용접 라인으로부터의 거리, b는 인장응력의 폭이다.

$$\sigma_x(y) = \sigma_m[1-(\frac{y}{b})^2]e^{-[1/2(y/b^2)]} \quad (3)$$



(a) Butt weld

(b) Distribution of σ_x along YY′

(c) Distribution of σ_y along XX′

Fig. 2 -5 Typical distributions of residual stress in plate butt joints

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 변형률이 자속밀도에 미치는 영향

본 절에서는 재료의 변형을 동반한 응력변화가 자속밀도분포의 변화를 유발하는 것을 이론적으로 설명한다. 이를 위하여, 자기쌍극자모멘트, 자화, 외부자기장, 자화율, 투자율 및 자속밀도의 개념을 먼저 설명하고자 한다. 자구(magnetic domain)란 같은 방향의 자화벡터($\vec{M}$)를 가지는 구역을 말한다. 자화벡터는 식 (4)에 나타낸 바와 같이 단위체적당의 자기쌍극자모멘트($\vec{m}$) 로 정의된다.

$$\vec{M} = \lim_{\Delta v \to 0} \frac{\sum_{i=0}^{n} \vec{m}_i}{\Delta v} \tag{4}$$

서로 다른 방향의 자화벡터를 가지는 자구는 자벽(magnetic wall)에 의하여 경계지어진다. 즉, 자벽은 자기쌍극자모멘트가 급격히 변화하는 자구의 경계로서 수 마이크로미터 정도의 폭을 가진다.[49] 또한, 외부에서 자기장($\vec{H}$)이 인가되면, 자벽이 이동하여 같은 방향의 자기쌍극자모멘트를 가지는 자구의 넓이가 넓어진다. 외부자기장에 의한 자화특성, 즉 자벽 이동의 용이성은 각 물질의 특징인 자화율(X_m)에 의존하며, 식 (5)와 같이 표현된다. 외부자기장($\vec{H}$)과 자성체 내부의 자화($\vec{M}$)에 의한 공간상의 자속밀도($\vec{B}$)는 식 (6)과 같이 표현된다. 여기서 μ은 자성체가 자화되는 정도를 나타내는 매질상수이며, 진공상의 투자율(μ_0)과 비투자율(μ_r)의 곱으로 표현된다.

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \tag{5}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \tag{6}$$

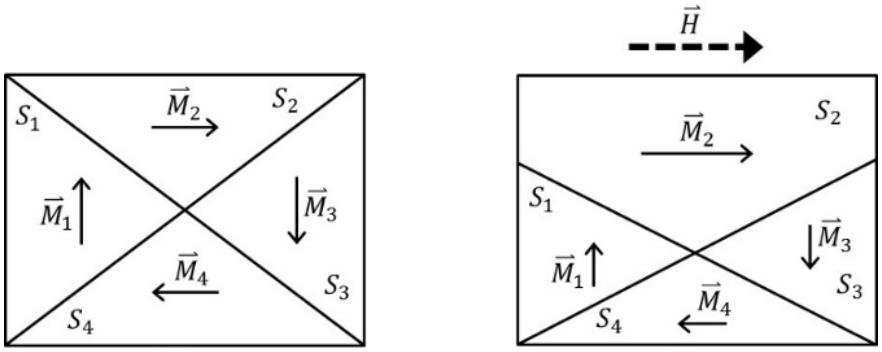
자구모델에서는 식 (7)로 표현되는 자기에너지가 최소화되기 위하여 Fig. 2 -6 (a)에 나타낸 바와 같이 자구들이 강자성체 내부에서 루프를 형성한다. 이때 전체 영역에서의 등가자화($\vec{M}_{eqv}$)는 식 (8)와 같이 표현될 수 있다. s_k는 각 자구의 면적, A는 전체면적을 나타낸다. 즉, 등가자화는 각 자화의 면적비율과 그 합으로 표현할

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수 있다. Fig. 2 -6 (a)의 모델에서는 $\vec{M}_1$ 과$\vec{M}_3$, $\vec{M}_2$와$\vec{M}_4$ 가 각각 동일면적(s_1=s_3, s_2=s_4)의 자구, 동일한 세기 및 반대 방향의 벡터($\vec{M}_1 = -\vec{M}_3$ $\vec{M}_2 = -\vec{M}_4$)를 가지므로 등가자화가 0이 된다. 이때, 외부에서 자기장이 인가되면, Fig. 2 -4 (b)에 나타낸 바와 같이 같은 방향의 자구의 넓이가 넓어지면서, 등가자화($\vec{M}_{eqv}$)가 더 이상 0이 아니면서 자기에너지의 균형이 붕괴된다. 따라서, 공간상의 자속밀도가 변화하게 된다.

$$W_m = \frac{1}{2}\int_{v'}^{0} \frac{\vec{B}}{\mu} \cdot \vec{B} dv' = \frac{1}{2}\int_{v'}^{0} \frac{{\mu_0}^2}{\mu} (\vec{M} + \vec{H}) \cdot (\vec{M} + \vec{H}) dv' \tag{7}$$

$$\vec{M}_{eqv} = \sum_{k=1}^{N} \vec{M}_k \frac{S_k}{A} \tag{8}$$



(a) $M_{eqv} = 0$ (b) $M_{eqv} \neq 0$

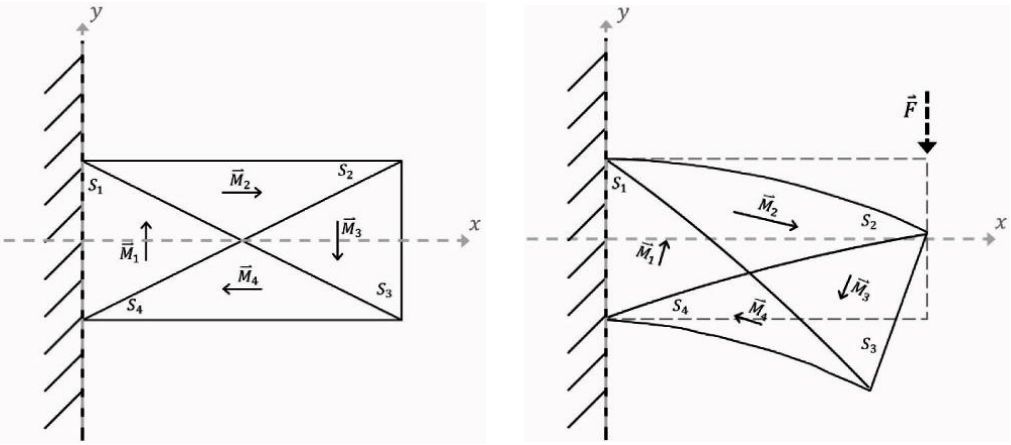
Fig. 2 -6 Change of magnetic domain due to external magnetic field [49]

한편, 자기에너지의 균형은 외부자기장뿐 아니라, 재료 내부의 응력(σ)에 의하여 붕괴될 수 있다. 응력은 식 (9)에 나타낸 바와 같이 탄성률(E)과 변형률(ε)의 곱으로 정의된다. Fig. 2 -7 (a)는 외팔보 모델에서 외부자기장이 인가되지 않은 상태에서 자구모델을 나타낸다. 또한, Fig. 2 -7 (b)는 동일 모델에 외부자기장의 인가 없이 탄성영역에서의 기계적인 하중만 인가되었을 때 자구모델을 나타낸다. 외부자기장이 없으므로 식 (6)은 식 (8)를 이용하여 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\sigma = \frac{|\vec{F}|}{A} = \varepsilon E \tag{9}$$

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{M}'_{eqv} = \frac{\mu_0}{A}\sum_{k=1}^{N} s_k{}' \vec{M}_k{}' \tag{10}$$



(a) $M_{eqv} = 0$ (b) $M_{eqv} \neq 0$

Fig. 2 -7 Magnetic domain of ferromagnetic material

응력이 부여되기 전과 후의 자구면적 s_k, $s_k{}'$은 식 (11)에 나타낸 바와 같이 변형률(ε_k)과 비례하여 변화된다. 따라서, 식 (10)은 식 (9)와 (11)을 대입하여 식 (12)와 같이 표현될 수 있다. 즉, 시험편에 부여되는 외부 하중 또는 시험편 자체의 응력변화에 따라, 자구의 면적(s_k') 및 자화벡터($\vec{M}_k{}'$)가 변화되어 전체 자속밀도 분포($\vec{B}'$)가 영향을 받는다. 그리고, 국부적인 인장응력 또는 압축응력이 발생하는 영역에서의 자속밀도가 양 또는 음의 값으로 표현될 수 있음을 시사한다. 한편, 응력이 부가된 후의 자구내 자화벡터($\vec{M}_k{}'$)는 응력이 부여되기 전의 자구내 자화벡터($\vec{M}_k$)와 다른값을 갖게 된다.

$$s_k{}' = \varepsilon_k s_k \tag{11}$$

$$\vec{B}' = \frac{\mu_0}{A}\sum_{k=1}^{N} \varepsilon_k s_k \vec{M}'_k = \frac{\mu_0}{AE}\sum_{k=1}^{N} \sigma_k s_k \vec{M}'_k \tag{12}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이러한 자화현상은 외부자기장, 응력 및 변형에 의하여 자기에너지의 균형이 붕괴되어 발생하기도 한다. 즉, Fig. 2 -8에 나타낸 바와 같이 외부하중 및 응력변화에 따라, 자구의 영역이 변화되어 결과적으로 외부로 자속이 누설된다. 특히, 용접부에서는 기계적 또는 열응력이 발생할 수 있으며, 결과적으로 자구의 분포 변화에 기인한 자발자화(spontaneous magnetization) 현상이 나타난다. 따라서, 구조물의 용접부에서는 잔류응력, 개재물, 외부 반복하중에 의해 자발자화 현상이 나타날 개연성이 다대하다. 따라서, 용접부에서의 자속밀도분포를 고감도 초소형 자기센서를 이용하여 측정하면, 잔류응력 또는 용접결함에 기인한 국부적인 응력의 분포를 추정할 수 있다.[50-51]

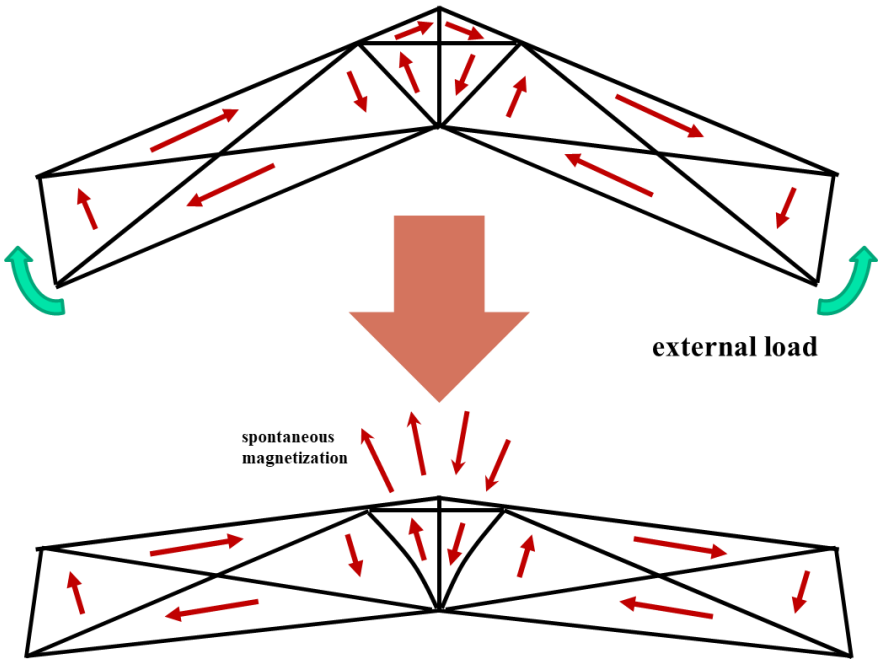


Fig. 2 -8 Movement of magnetic wall by external load(spontaneous magnetization)

국부적인 응력변화가 자속밀도의 분포에 영향을 미칠 수 있음을 검증하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. Fig. 2 -9는 두께 22mm인 탄소강(A572 grade 65)을 150도로 기울인 상태에서 맞대기 용접한 시험편의 단면을 나타낸다. 시험편은

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2012년 충남 아산에서 붕괴된 관주형 송전탑의 용접 접합부위에서 취득하였으며, 용접부의 최대 두께는 26mm이다. Fig. 2-10은 붕괴된 송전탑의 용접부 손상 단면을 관찰한 사진이다. 용접부 및 열영향부의 전형적인 형상이 관찰된다. 25.1kg의 하중을 Fig. 2-11에 나타낸 바와 같이 시험편의 끝단으로부터 44mm의 위치에 부가한 후, 3축 홀센서를 이용하여 자속밀도를 측정하였다. 시험편의 용접방향을 X축, 용접부와 수직인 방향을 Y축, 송전탑의 중심방향을 Z축으로 정의하였다. 한편, 홀센서는 식 (13)에 나타낸 바와 같이 자속밀도의 변화를 전압으로 출력할 수 있다. k, I는 각각 홀상수 및 입력전류를 나타내며, 센서면에 수직인 방향의 자속밀도와 선형적인 관계의 홀전압(V_H)을 출력한다.

$$V_H = kIBcos\theta \tag{13}$$

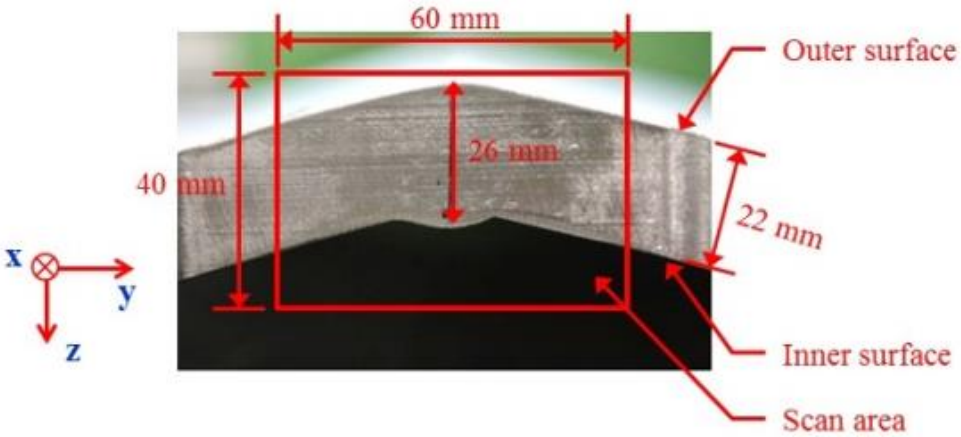


Fig. 2-9 Cross section of welded specimen

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

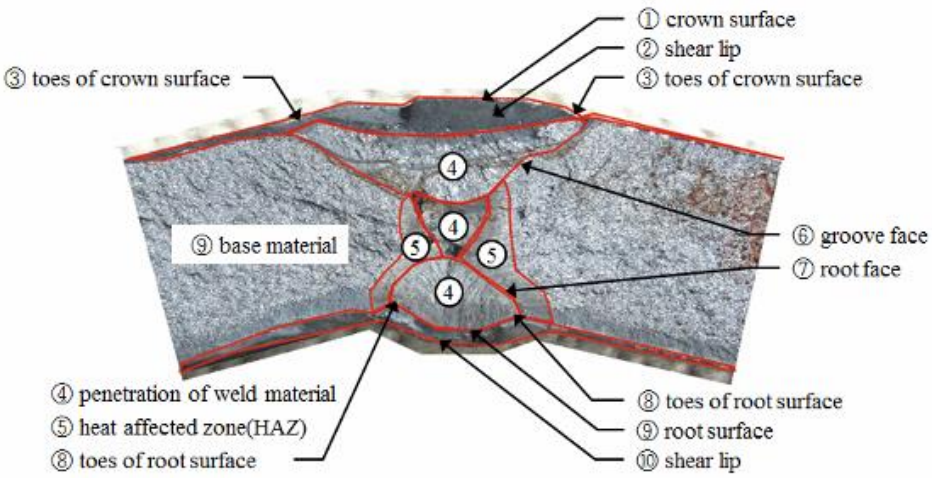


Fig. 2 -10 Fracture surface of tubular-type transmission tower

Fig. 2 -11은 시험편의 용접단면에서 여러 가지 전자기적 조건에 따른 자기장 분포를 측정하기 위한 실험장치이다. 3축 자기센서는 XYZ 스테이지에 장착되어 일정한 리프트오프를 유지하면서, 용접단면(YZ축)의 자기장 분포를 측정한다. 자기센서는 홀센서를 사용하였으며, 다른 센서에 비하여 감도는 높지 않지만 자기장의 세기에 비례한 신호가 선형적으로 출력되기 때문에 본 실험에서 사용하였다.

Fig. 2 -12와 Fig. 2 -13은 실험조건을 나타낸다. 먼저, 아무런 하중도 가하지 않은 상태에서 용접부 단면의 자기장 분포(a)를 측정하였다. 다음, 기계적인 하중을 용접선상에 부여(b)한 후 용접부 단면에서의 자기장 분포를 측정하였다. 마지막으로, 수직 방향(c) 및 수평방향(d) 자기장을 인가한 후 각각의 경우 용접부 단면의 자기장 분포를 측정하였다. 88mT의 최대 자기장을 가지는 자원(magnetic source)을 단면으로부터 44mm 떨어진 곳에 배치하여 수직으로 자기장을 인가하였고, 용접선을 중심으로 서로 70mm 이격된 위치에 자원을 배치하여 수평으로 자기장을 인가하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

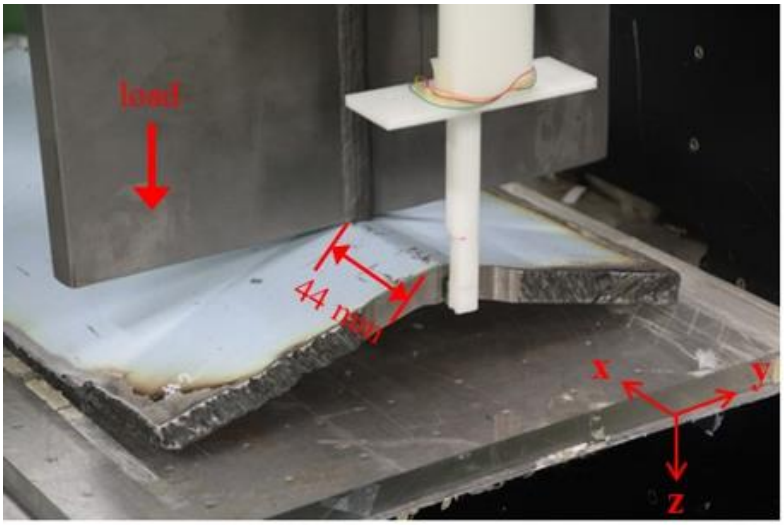


Fig. 2 -11 Experimental setup for measuring electromagnetic distribution of welded cross section (external load)

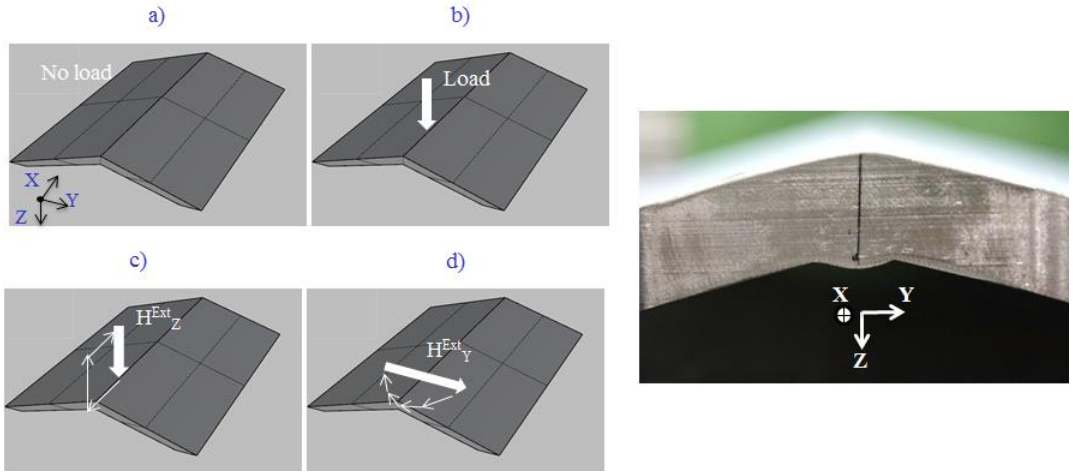


Fig. 2 -12 Experimental conditions (conceptual)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

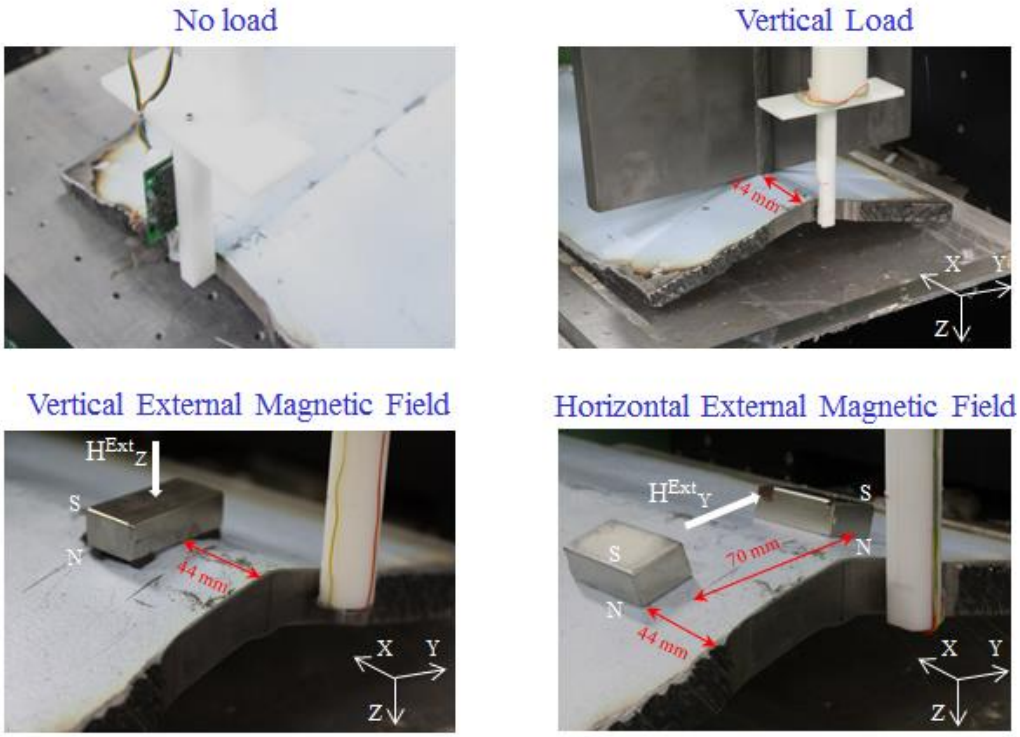


Fig. 2 -13 Experimental conditions (external load & magnetic fields)

식 (14)부터 식 (17)은 수직방향, 식 (18)부터 식 (20)은 수평방향에서의 자기장을 인가하였을 때 수식적으로 표현하였다. 초기상태의 자기장을 H^0, 수직방향으로 인가되었을 때 자기장을 H^V, H^V에서 H^0를 뺀 값을 ΔH^V라 하였다. 수직방향의 자기장을 제거한 상태의 자기장은 H^{VR}이라 하고, H^{VR}에서 초기상태 자기장 H^0를 뺀 값을 ΔH^{VR}이라 하였다. $d\Delta H^V/dy$와 $d\Delta H^{VR}/dy$는 급격히 자기장이 변화하는 곳을 표현하기 위하여 도입하였다. 수평방향으로 인가되었을 때 자기장을 H^H이라 하고, H^H에서 초기상태에서의 자기장 H^0를 뺀 값을 ΔH^H라 하였다. 수평방향의 자기장을 제거한 상태의 자기장을 H^{HR}이라 하고, H^{HR}에서 초기상태 자기장 H^0를 뺀 값을 ΔH^{HR}이라 하였다. $d\Delta H^V/dy$와 $\mathrm{d}\Delta H^{VR}/dy$ 역시 급격히 자기장이 변화하는 곳을 표현할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Delta H^V = H^V - H^0 \tag{14}$$

$$\frac{d}{dy}\Delta H^V = \frac{dH^V}{dy} - \frac{dH^0}{dy} \tag{15}$$

$$\Delta H^{VR} = H^{VR} - H^0 \tag{16}$$

$$\frac{d}{dy}\Delta H^{VR} = \frac{dH^{VR}}{dy} - \frac{dH^0}{dy} \tag{17}$$

$$\Delta H^H = H^H - H^0 \tag{18}$$

$$\frac{d}{dy}\Delta H^H = \frac{dH^V}{dy} - \frac{dH^0}{dy} \tag{19}$$

$$\Delta H^{HR} = H^{HR} - H^0 \tag{20}$$

$$\frac{d}{dy}\Delta H^{HR} = \frac{dH^{HR}}{dy} - \frac{dH^0}{dy} \tag{21}$$

초기 상태에서 잔류자화를 측정한 결과를 Fig. 2 -14에 나타낸다. 용접부 양 선단 및 하부에서 X, Y, Z축 방향의 잔류자화가 관찰되어 잔류응력이 존재하고 있음을 시사한다. 특히 X축 성분에서는 크라운 표면부근, Y축 성분에서는 용접부 자체의 신호가 크며, Z축 성분에서는 그루브와 루트부의 경계에서 큰 자기장 변화가 발생하였다. Fig. 2 -15는 시험편 상부에 20kgf의 하중을 가한 상태에서 상기 Fig. 2 -14와 동일한 실험을 수행한 결과를 나타낸다. 하중이 가해지지 않은 상태에 비하여 큰 변화를 보이고 있지는 않지만, 열영향부 근방에서 자속밀도 분포가 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

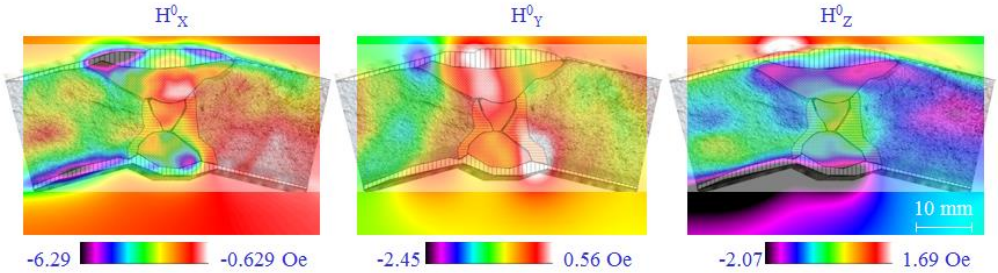


Fig. 2 -14 Measuring residual magnetization using Hall sensor (without external load)

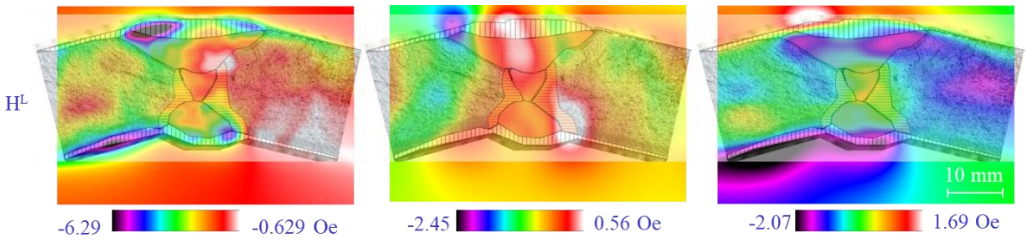


Fig. 2 -15 Measuring residual magnetization using Hall sensor(with external load)

수직방향의 자기장이 인가되는 경우, Fig. 2 -16에 나타낸 바와 같이 자기장의 세기가 세서 국부적인 변화를 감지하기 곤란하였다. 그러나, 수직방향의 자원을 제거한 후, 잔류자화를 측정한 결과(Fig. 2 -17)에 따르면 용접 영역에서 모재와는 확연히 다른 자기장 분포를 보인다. 이는 모재와 용접부 자체의 자기적인 특징이 변화하였음을 시사한다. 시험편의 초기상태 자기장을 측정한 Fig. 2 -14와 비교하면, X축 및 Y축 자기장 성분의 경우 유사한 영역(용접 상부, 용입경계, 열영향부, 용접 하부 및 용접경계)에서 잔류자화가 나타난다. 그러나, Z축 성분에서는 수직방향 자기장에 의하여 탈자되었다. 결과적으로 Z축 방향으로 자기장을 인가한 후 제거하면, Z축 방향에 대한 탈자(또는 자화)는 가능하지만 X축 및 Y축 방향의 자기장 성분은 잔류함을 알 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

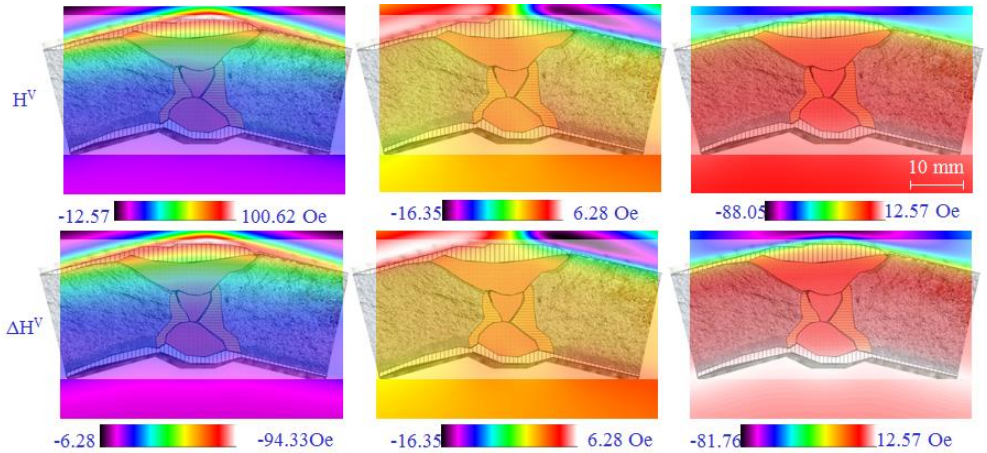


Fig. 2 -16 Magnetic flux leakage distribution of welded joint by applying vertical magnetic field

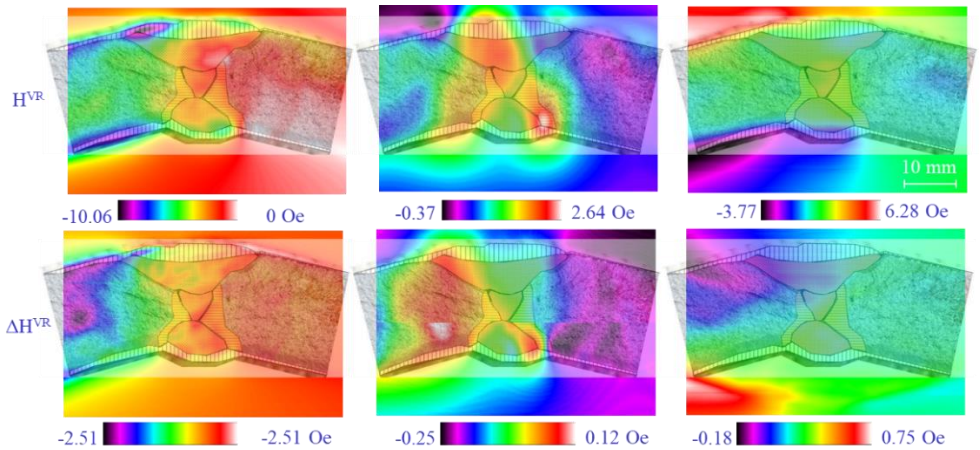


Fig. 2 -17 Magnetic flux leakage distribution of weleded joint after vertical magnetic field removal

Fig. 2 -18은 수평방향으로 자기장을 인가한 후 제거하여 누설자속을 측정한 결과를 나타낸다. X축 성분에서는 크라운 표면에서 잔류자화 분포가 변화되었으며, 용접부의 잔류응력변화는 Y축 성분에서 구별할 수 있다. Fig. 2 -19는 수평방향 자기장 인가 전후에 발생한 누설자속 변화의 변곡점을 나타낸다. 전체적으로 용접부, 전단 립, 그리고, 모재와 용접부와의 사이에서 자기장의 변화를 파악할 수 있다. 특히, 슬래그나 개재물로 추정되는 부분에서도 큰 자기장의 변화가 발생하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

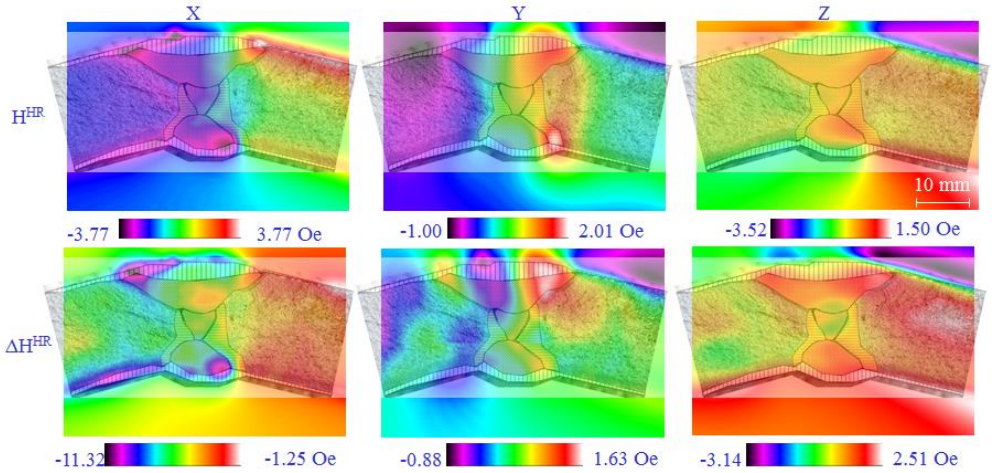


Fig. 2 -18 Magnetic flux leagage distribution after horizontal magnetic field removal

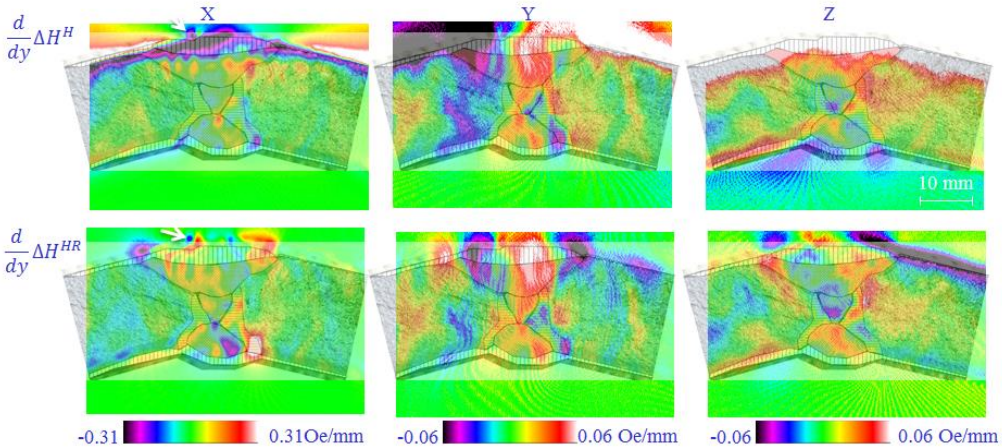


Fig. 2 -19 Singularity observation of magnetic flux leakage after horizontal magnetic field removal

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 볼트체결부에서의 열화 및 자기히스테리시스 상관관계

1. 볼트체결부의 결함유형

볼트 체결부는 장기간 사용에 따라 외부의 반복적인 하중, 충격, 진동 등에 의해 체결력이 감소할 수 있다. 체결력이 감소되면 너트의 풀림 혹은 체결부의 손상이 발생하게 되고, 전체분리, 과도진동 등 구조물의 고장이 발생할 수 있다. 이러한 볼트 체결부 체결력 감소의 주요 원인으로는 과체결(over-tightening), 진동(vibration), 임베딩(embedding) 및 열팽창 차이(differential thermal expansion) 등이 있다. 과체결은 잘못된 토크렌치를 사용하여 과도하게 고정될 경우 볼트가 연신되고 클램프가 약해지게 된다. 이로 인해 체결단면 사이에 미끄러짐이 발생이 되고 경우에 따라서 볼트에 전단 응력이 가해져 결국 파손될 수 있다.[52] 진동은 충격 및 외부하중으로 고정된 볼트와 판재사이에서 횡방향으로 작용한다. 진동으로 인해 결합된 너트가 풀리게 되고 체결부의 클램프 힘을 저하시킨다.[53] 임베딩은 볼트의 접촉면이 소성변형되며 결합력이 줄어드는 현상이다.[54] 열팽창 차이에 의한 체결력 감소는 볼트와 체결부의 재질이 다른 경우, 빠른 환경 변화 또는 사이클링이 빈번한 산업공정으로 인한 온도의 큰 차이로 볼트 재질이 빠르게 팽창하거나 수축하여 볼트가 풀리는 경우이다.[55]

한편, 볼트의 풀림, 이완 및 변위는 반복적인 하중으로 인하여 결함으로 진전할 수 있다.[56] 결함은 응력이 집중되는 지점에서 주로 발생하며 기존 결함으로 시작하여 각 하중에 따라서 길이 및 크기가 점차적으로 증가한다. 또한, 결함이 실제로 임계길이까지 도달하게 되면 재료전체로 진전되고 파손에 이를 수 있다. 응력부식균열(SCC, Stress Corrosion Crack) 및 피로균열(fatigue crack)이 이러한 결함에 해당한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

응력부식균열은 재료의 단면을 통한 미세 균열이 성장하는 특징을 가지는 재료 파괴 메커니즘이다. 응력부식균열은 부식에 민감한 물질이 높은 인장 응력을 받는 동안 부식성 환경에 노출 될 때 발생한다. 발생된 균열은 가해진 응력의 방향과 직교하는 방향으로 성장하고, 기계적 과부하에 의한 재료의 치명적인 취성파괴에 이를 있을 만큼 충분한 길이가 될 때까지 계속된다.[57] Fig. 2 -20은 가압 경수로(PWR, Pressurized Water Reactor) 발전소의 배플 포머(baffle former) 볼트에 발생한 응력부식균열 사례를 나타낸다. 추출된 볼트를 조사한 결과에 의하면 배플 포머 볼트의 고장의 주요 원인은 언더 헤드의 주기적 반복적인 하중에 의한 방사선 조사유기 응력부식균열 (IASCC, Irradiation Assisted Stress Corrosion Crack)로 판단하고 있다.[58]

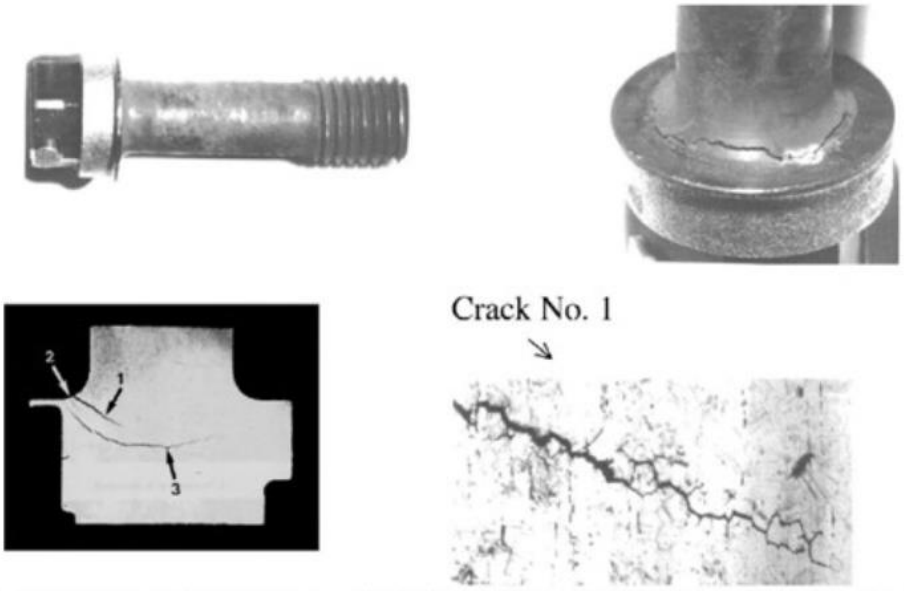


Fig. 2 -20 Examples of stress-corrosion cracking in PWR power plants [59]

한편, 피로는 재료가 장기간에 거쳐서 반복적 응력을 받을 때 발생하며 재료가 가진 파손강도보다 훨씬 낮은 응력에서 파손된다.[60] Fig. 2 -21은 체결된 볼트에서 피로가 성장하여 피로균열이 발생한 사례를 보여준다. 왼쪽 그림에서와 같이 볼트 파단

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

면의 하단부에서부터 미세 균열이 시작되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 미세 균열은 하중의 반복에 따라 점차 진전되면서 부채꼴 모양을 형성하게 된다. 이것은 마치 해변에서의 파도의 형상과 유사한다는 의미로 beachmarks 또는 clamshell marks 라고 불리운다.[61] 이러한 피로균열은 크기가 증가하여 전위 밀도가 높아지게 된다. 전위밀도가 높아지게 되면 피로균열은 전체면적으로 확장되고, 결국은 하중을 지지하지 못한 상태로 갑작스런 파손이 발생한다. 한편, 피로에 의해 파손된 볼트 단면에서는 래칫(rachet)을 볼 수 있다. 래칫은 선형으로 생기며 표면에서 시작하여 균열 진전 방향을 알 수 있다. 가장 일반적으로 표면에 수직으로 존재하지만 피로 균열과 함께 생기기 때문에 균열이 발생하는 방향으로 진행이 된다.[62]

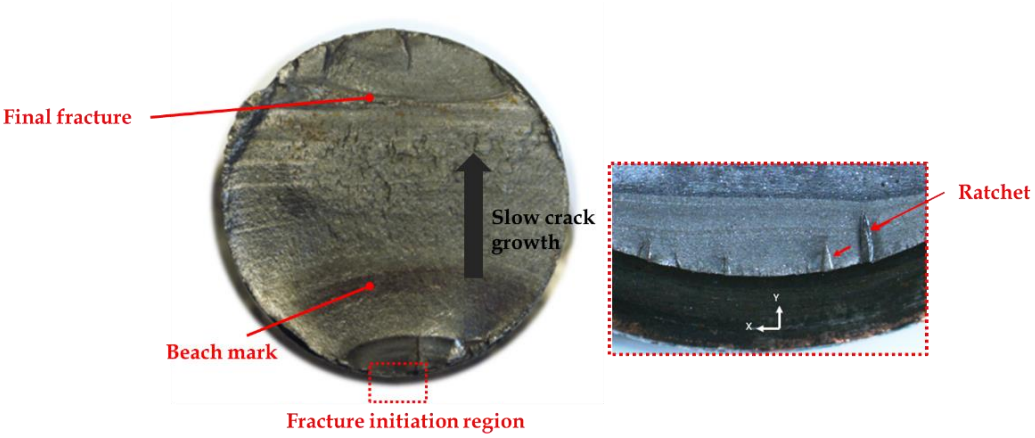


Fig. 2 -21 Fatigue failure of a bolt due to repeated unidirectional bending [61]

한편, 전위(dislocation)는 금속 결정체 속에 포함되는 격자결함의 일종으로 결정구조에서 원자의 위치가 어긋나는 것을 뜻한다. 또한, 일정부분에 응력이 가해지면 전위밀도가 높아지게 되며 결과적으로 슬립에 의한 소성변형이 발생한다.[63] 전위의 종류는 원자와 전위선의 방향에 따라서 칼날전위(edge dislocation), 나선전위(screw dislocation) 및 혼합전위(mixed dislocation)가 있다. Fig. 2 -22는 칼날전위가 발생했을 때 원자간의 소성변형이 진행되는 과정을 나타낸다. 일반적인 결정구조에서 상부와 하부에 전단응력이 가해졌을 때 (a)에서부터 (c)로 원자가 하나씩 교차하는

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

것을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 결정립계에 도달할 때까지 계속되며, 원자 평면을 통과하여 결합을 깨고 인접한 다른 원자와 재결합을 한다.[64] 이 때 칼날전위는 원자 평면상에서 수평방향으로 진전된다. 한편, 나선 전위는 동일한 전단응력이 가해졌을 때 원자와 수직방향으로 전위가 나타난다. 전위선을 중심으로한 나선형상의 격자면이 존재하는 형태로 소성변형을 용이하게 한다. 이 때 하나의 전위에 의해 발생하는 변형벡터를 버거스 벡터(burgers vector)라고 하며 그 크기는 원자 하나의 간격 정도이다.[65] Fig. 2 -23은 에지전위와 나선전위가 혼합된 혼합전위를 나타낸다. 혼합전위의 버거스 벡터의 방향은 원자가 조밀하게 배열된 방향으로 진전되며 두 전위의 크기는 동일하다.

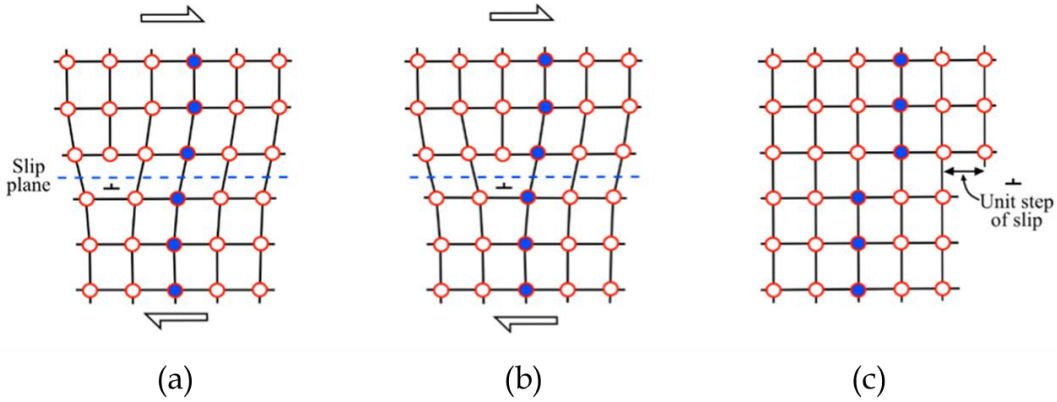


Fig. 2 -22 Movement of edge dislocation through a crystal [64]

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

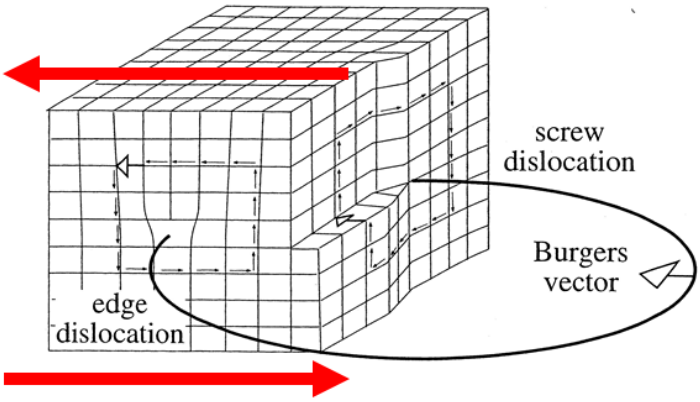


Fig. 2 -23 Movement of mixed dislocation through a crystal [65]

이러한 결정 내부의 소성변형은 취성 파괴가 없이 응력이 결정에 작용될 때 격자 결함에 의해 촉진하게 된다.[66] 따라서, 금속결정에 외력이 가해지면 전위의 이동에 의해 변형이 일어나기 때문에 이상적인 전단강도 보다 작은 응력에 의해서 기계적 피로 및 열화가 생길 수 있다. 또한, 동일한 금속에서도 원자의 배열, 입자의 크기, 불순물의 존재 및 결함 존재등에 의해 국부적으로 전위차가 발생할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 자기히스테리시스가 열화에 미치는 영향

상술한 바와 같이 같은 방향의 자기모멘트($\vec{m}$)를 가지는 영역이 큐리온도 이하에서 자발적으로 영역화한 것을 자구(magnetic domain)라 하고, 자구와 자구의 경계를 자벽(domain wall)이라 한다. 외부에서 자계($\vec{H}$)가 인가되면, 자벽이 이동하여 외부자계와 같은 방향의 자구의 면적이 넓어져서 자화($\vec{M}$)된다. 이때 자화의 세기는 외부 자계의 세기와 물질 고유의 자화율(χ_m)에 비례하며, 식 (22)로 표현된다. Fig. 2-24는 자구모델을 기반으로 한 자화곡선(magnetization curve)을 나타낸다. 횡축은 외부자계이며, 종축은 자화(magnetization)를 나타낸다. 초기조건에서는 각각 동일한 면적을 가지면서 상호 90도의 방향을 가지는 자기모멘트에 의하여 총 자화는 “0”이다. 이때, 외부자계가 인가되면 같은 방향의 자기모멘트를 가지는 자구의 면적이 넓어지고, 총 자화는 양의 값을 가진다. 전체적인 자구는 외부자계와 같은 방향의 자기모멘트를 가지게 되고, 더 이상의 자벽의 이동은 없다. 따라서, 포화자화(saturation magnetization)에 이르게 된다. 이때 외부자계의 크기가 감소하면 같은 방향의 자기모멘트를 가지는 자구의 면적은 비례하여 감소하지 않고, 결과적으로 외부자계($\vec{H}$)의 크기가 “0”이 되었음에도 불구하고, 자화($\vec{M}$)는 “0”이 되지 않는다.

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \tag{22}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

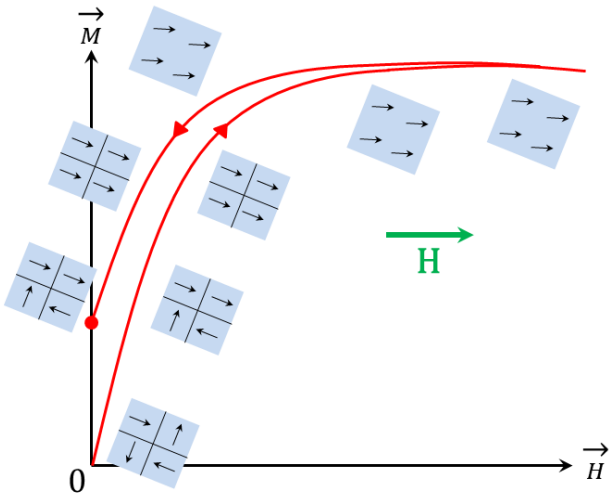


Fig. 2 -24 Magnetic domain model and magnetization curve

한편, 자속밀도($\vec{B}$)는 다음 식에 나타낸 바와 같이 외부자계($\vec{H}$)와 자화($\vec{M}$)의 합으로 표현되며, 비투자율(μ_r) 또는 투자율(μ)에 비례한다.

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H} + \mu_0\vec{M} = \mu_0(1+\chi_m)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H} \qquad (23)$$

Fig. 2 -25는 상술한 원리에 의한 외부자계와 자속밀도의 관계를 나타낸다. 횡축은 외부자계(H), 종축은 자속밀도(B)를 나타낸다. 외부자계가 인가되면, 초기에는 서서히 자화가 이루어진다. 이때, 외부자계에 대한 자속밀도의 초기변화율을 초기투자율(initial permeability)이라고 한다. 외부자계의 크기가 커짐에 따라 자화가 용이하게 이루어지는 영역에서의 변화율을 최대투자율(maximum permeability)이라 한다. 외부자계가 점점 커지면, 자속밀도의 변화가 둔화되어 포화에 이르게 된다. 이를 포화자속밀도(saturation flux density)라 한다. 다시 외부자계를 서서히 감소하여 "0" 이 되더라도 자속밀도가 잔류한다. 이를 잔류자속밀도(remanent flux density)라 한다. 자속밀도가 "0" 이 되게 하기 위해서는 음의 외부자계를 부가해야 하며, 이를 보자력(coecive force)이라 한다. 이러한 현상, 즉 외부자계에 대한 응답이 비선형적인 현상을 자기이력(magnetic hysteresis)이라 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

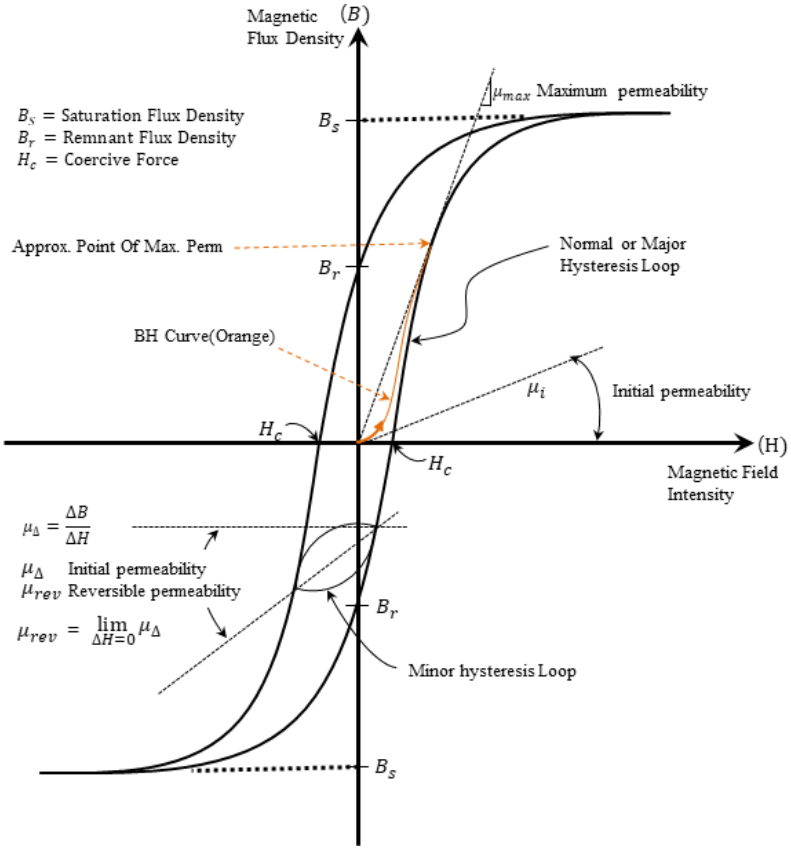


Fig. 2 -25 Magnetic hysteresis loop

Fig. 2 -26은 재질에 따른 자화곡선, 즉 자기이력현상을 나타낸다. 다이아몬드 기호로 표시된 이력곡선은 Hard Magnetic Material (HMM), 삼각형 기호로 표시된 이력곡선은 Soft Magnetic Material (SMM)의 특성을 나타낸다. 네모형 기호로 표시된 이력곡선은 HMM과 SMM의 중간단계, 즉 Normal Magnetic Material (NMM)을 나타낸다. HMM의 자화곡선에 의하면, 포화에 이르기 위해서는 SMM에 비하여 상대적으로 큰 외부자계가 인가되어야 한다. 또한, HMM의 잔류자화 및 보자력은 SMM에 비하여 크다. 즉, HMM을 자화시키기 위해서는 보다 큰 에너지를 필요로 한다. 이때 자화에 필요한 자기에너지는 다음 식으로 정의한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$W_m = \frac{1}{2}\int_v^0 \vec{H} \cdot \vec{B}\, dv \qquad (24)$$

따라서, 자기에너지는 상기 Fig. 2 -23의 자구모델에서 같은 방향의 자기모멘트를 가지는 자구의 면적이 넓어지는 과정, 즉 자벽의 이동과 밀접한 관계를 가진다. 즉, HMM은 자벽의 이동이 어렵고, SMM은 자벽의 이동이 쉽다.

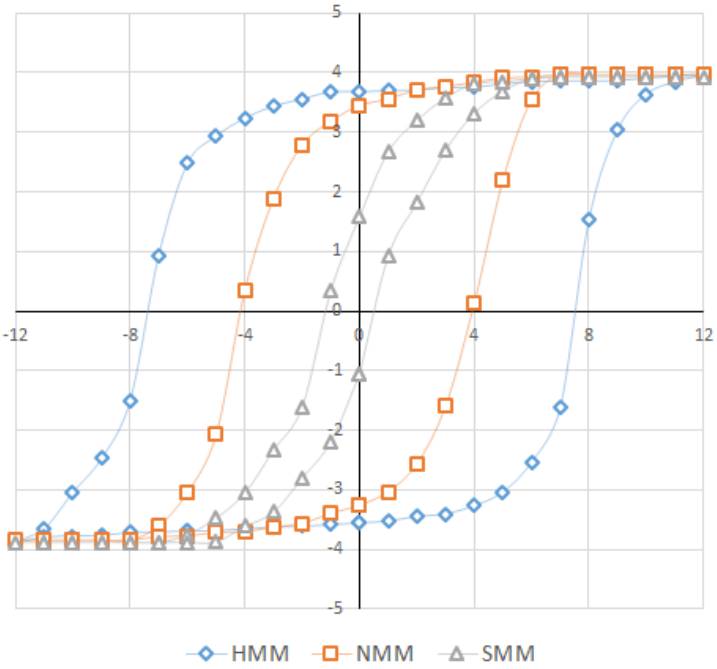


Fig. 2 -26 Magnetization curves according to magnetic characteristics

자벽의 이동은 재질 자체의 고유특성이기도 하지만, 동일한 재질이라고 하더라도 변형 방향, 석출물, 결정립 크기, 전위, 균열 등과 같은 자벽의 이동을 방해하는 요소에 의하여 HMM으로 변화될 수 있다. 즉, 압연공정에 의해 제조된 금속재료는 압연방향과 동일한 방향으로는 자벽의 이동이 용이하며, 압연방향과 수직인 방향으로의 자벽의 이동성이 제한된다. 석출물이 있거나, 결정립이 작아지는 경우에도 재료의 자화에 높은 자기에너지를 필요로 한다. 또한, 전위밀도가 높거나 또는 균열이 발생하면, 자화가 곤란하다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라서, 동적하중에 의한 전위밀도 증가 및 균열의 생성은 축방향 외부자계에 대한 자기이력현상의 왜곡을 유발하고, HMM의 특성을 띄게 된다. Fig. 2-27은 각각 HMM, NMM, SMM의 자기히스테리시스 과정에서 시간에 따른 자속밀도의 크기를 나타낸다. 즉, 주기적으로 연속인 외부자계의 변화에 따른 자속밀도가 변화하는 과정을 도시한다. 0~12, 13~24, 25~36, 36~48의 시간영역을 제 1구간(positive ramp), 제 2~3구간(negative ramp), 제 4구간(positive ramp)으로 정의하고, 2개 사이클의 자기히스테리시스를 예시하였다.

포화자화에 이르게 하기 위하여 충분한 외부자계를 인가하였을 때, HMM, NMM, SMM의 진폭은 동일하다. 한편, 전술한 바와 같이 HMM은 NMM 및 SMM에 비하여 높은 잔류자화를 가진다. 따라서, 시간축으로 24와 72 지점의 값을 읽으면 체결부의 자기적 변화를 측정할 수 있다. 또 다른 방법으로는 여자전류에 대한 응답지연을 측정하면 재질 변화를 측정할 수 있다. 즉, Fig. 2-28에서 HMM은 SMM에 비하여 응답지연(response delay)을 나타낸다.

Fig. 2-28은 펄스형 외부자계를 입력하였을 때, 공기 중의 자속밀도와 Fig. 2-27의 값의 차이를 나타낸다. 참고로 펄스형 외부자계를 입력하더라도 Fig. 2-27의 패턴은 ramp 입력과 큰 차이를 보이지 않으며 자화 시간만 단축된다. Fig. 2-28에서 주목할 점은 시간축 48 지역, 즉 두 번째 사이클의 전후의 신호 경향이다. 두 번째 사이클 직전의 SMM의 경우, HMM에 비하여 음의 값이 크다는 점을 주목해야 한다. 또한, 두 번째 사이클이 시작된 직후의 최대값은 HMM의 경우가 SMM에 비하여 크다. 또한, 또한, “0”에 이르는 시간이 길며, 결과적으로 그 면적이 넓어진다.

Fig. 2-29는 Fig. 2-27의 각 점에서의 미분을 나타낸다. 이는 Fig. 2-27에서 외부자계에 대한 자속밀도의 기울기, 즉 투자율을 나타낸다. 시간축 48의 직후에 발생하는 최저 피크값의 크기 및 위치가 변화하며, 이를 측정함으로서 체결부 볼트의 이상 유무를 판별할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이상의 이론적 고찰로부터 충분한 외부자계가 인가되었을 때 응답지연 및 제 1구간의 면적을 바탕으로 볼트 체결부의 건전성 평가 시스템을 설계하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

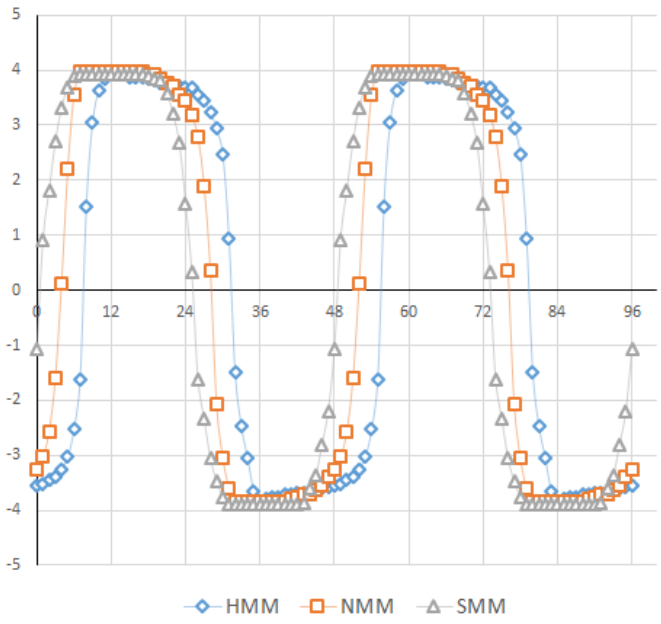
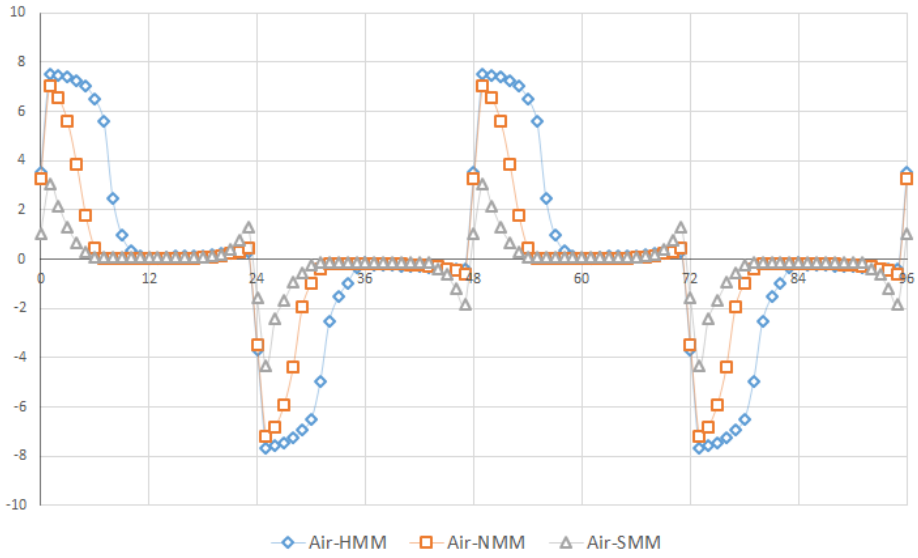


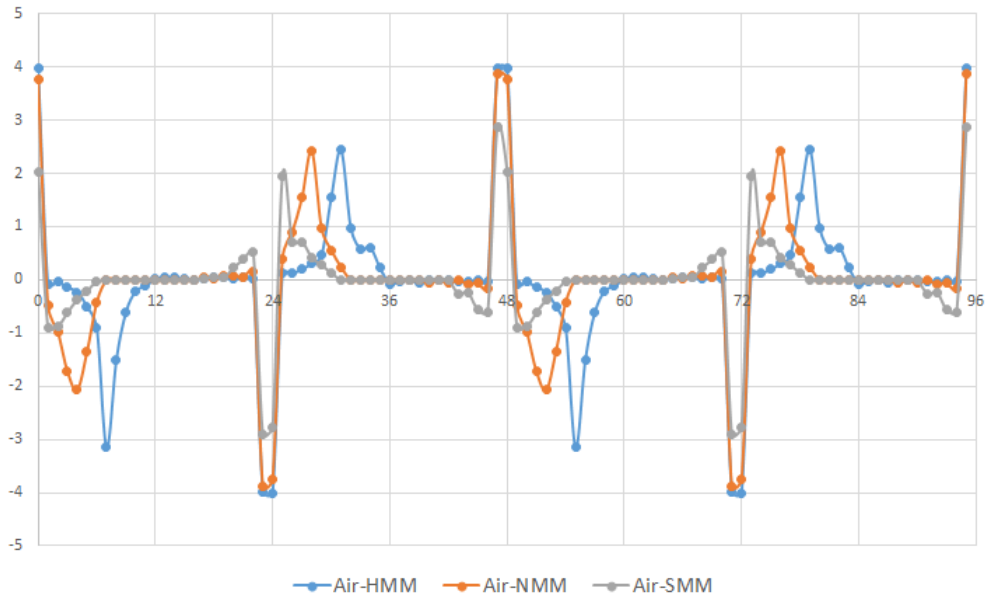
Fig. 2 -27 Periodic magnetic hysteresis phenomenon



.

Fig. 2 -28 Differential amplification signal by material

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



.

Fig. 2 -29 Permeability variation by material

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 시스템 개발

제 2장에서 기술한 이론적 배경 및 실험적 고찰을 바탕으로 대형구조물 용접부 및 볼트체결부에 적용할 수 있는 비파괴검사시스템을 시제작하였다. 용접부 검사시스템은 쉐브론형태의 검사대상체를 고려한 스캐너, 신속한 실험결과의 획득을 위한 배열형 고감도 반도체기반 자기센서, 그리고 병렬형 다중채널 신호처리장치를 설계하고 제작하였다. 볼트체결부 검사시스템은 다양한 크기의 볼트를 체결된 상태에서 검사하기 위한 센서프로브 및 자기히스테리시스의 시간적 변화를 측정하기 위한 초고속 아날로그-디지털(AD)변환장치를 구현하였다. 이하 각 시스템별로 구성요소를 자세히 설명한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 절 용접부 잔류응력 측정시스템

1. 자속밀도분포 측정용 센서

Fig. 3 -1과 Fig. 3 -2는 자속밀도분포 측정용 센서의 2D 설계도와 실물사진을 각각 나타낸다. 자속밀도분포 측정용 센서(이하 센서스캐너)는 수동스캔으로서, 관주용 송전탑의 외부용접부 각도(150˚)에 맞추어 제작하였다. 또한, 바퀴는 4개의 바퀴를 연동하여 엔코더의 슬립을 제거하였고, 우레탄 바퀴로 인하여 용접부를 따라 유연하게 측정 가능하도록 하였다. 이러한 구조에서 센서스캐너가 용접부 표면에서 균일한 리프트오프를 가질 수 있도록 수동으로 조정이 가능한 리프트오프 조절기구를 추가적으로 장착하였다. 센서는 32개 채널의 LIGiS(Linearly Integrated GMR Sensor array)로 구성되며, 평면방향의 자기장 세기를 측정할 수 있도록 하였다. LIGiS는 총 32개의 GMR센서를 1.2mm 간격으로 배열하였다.

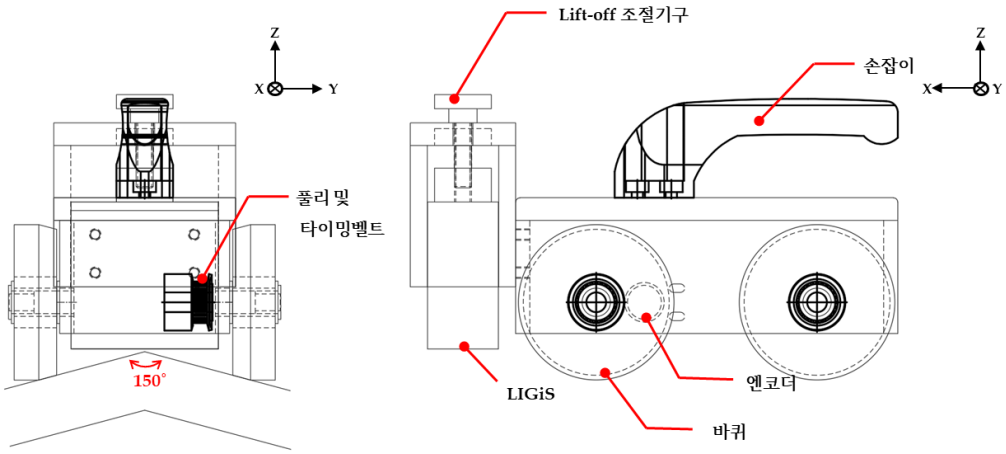


Fig. 3 -1 Design of scanner for measuring magnetic flux density distribution of chevron shaped weld

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

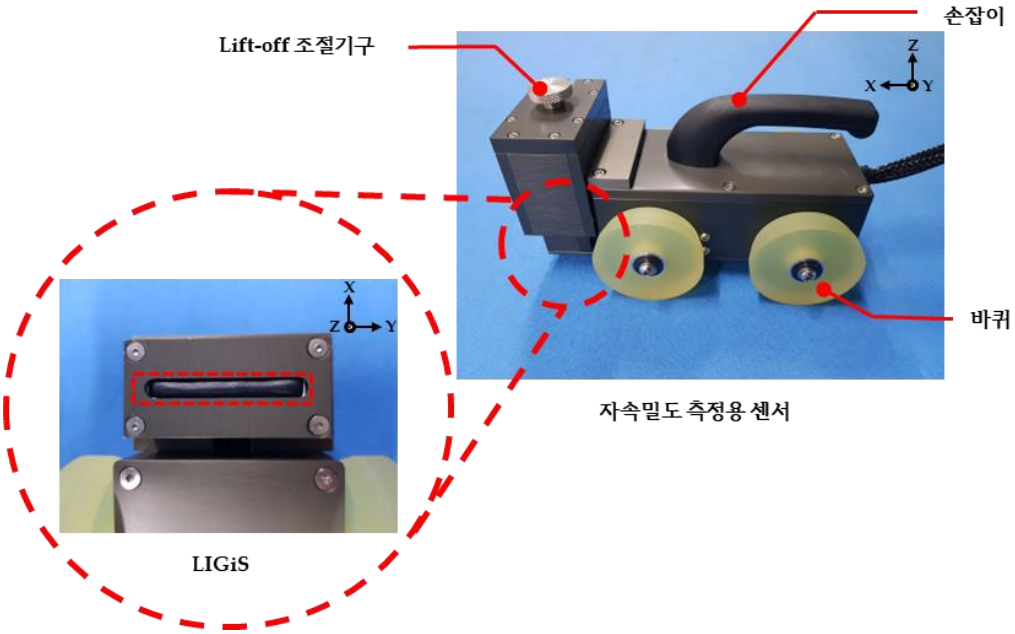


Fig. 3 -2 Scanner for measuring magnetic flux density distribution of chevron shaped weld

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 병렬형 다중채널 신호처리장치

Fig. 3-3은 용접부 검사시스템의 병렬형 다중채널 신호처리 장치 블록 다이어그램을 나타낸다. 신호처리장치, 센서(LIGiS) 및 엔코더에 필요한 전원은 컴퓨터에 의하여 원격으로 제어하였다. 신호처리회로에 입력된 센서 신호는 저대역통과필터(LPF, Low Pass Filter), 차동형 증폭기(differential-type amplifier), 프로그래머블 이득증폭기(PGA, Programmable Gain Amplifier)를 거쳐 출력되었다. 필터 및 증폭기를 통과하여 출력된 센서 신호는 다기능 데이터수집장치(DAQ, Data Acquisition System)로 입력되고, 저장, 영상화 및 결함평가에 활용하였다. 한편, 신호처리회로는 8채널씩 모듈화하여 슬롯형으로 제작하였다. 그리고, 총 4개의 슬롯형 모듈을 마더보드에 연결하여 32채널의 입력 신호를 동시에 병렬처리할 수 있도록 하였다. 한편, LIGiS 및 병렬형 다중채널 신호처리장치의 신호는 스캔방향으로 0.78mm 이동할 때마다 발생하는 엔코더의 트리거 신호를 이용하여 취득하였다.

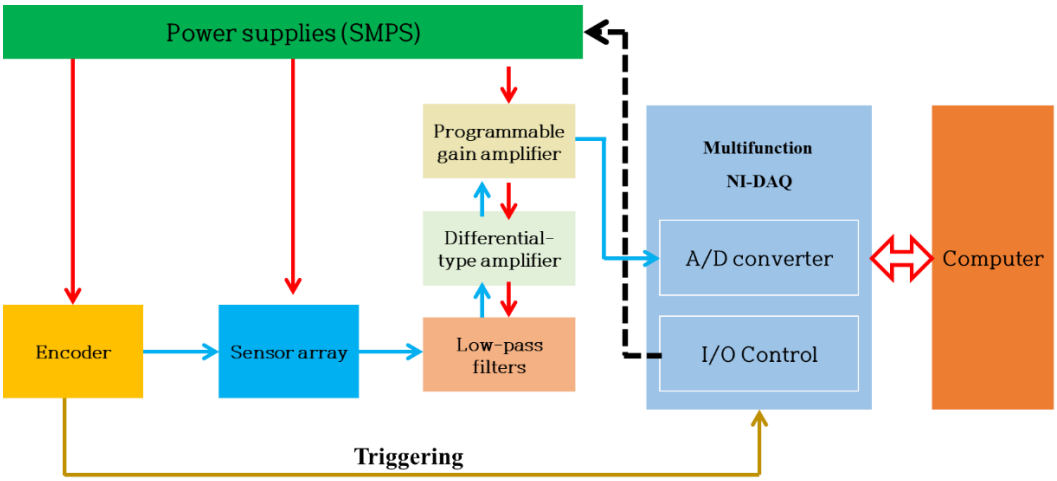


Fig. 3-3 Parallel multichannel signal processor block diagram

병렬형 다중채널 신호처리장치는 Fig. 3-4에 나타낸 바와 같이 알루미늄재질의 인스트루먼트 케이스(348mm×300mm×166mm)로 제작되었다. 신호처리 장치 전

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

면에는 전원 상태 표시등(LED), 센서 접속단자, USB 접속단자가 있다. 전원 상태 표시등은 좌측부터 Main, SPB(Signal Processing Board), PGA, Sensor, EM(Electromagnetic) source로서, 신호처리 장치의 상태별로 전원여부를 확인할 수 있다. 센서 접속단자에는 자속밀도 측정용 센서의 후단부 커넥터가 조립되며, USB는 DAQ장비의 접속단자와 메인 허브 접속단자를 컴퓨터에 연결하여 공용으로 사용하였다. 신호처리 장치 후면에는 메인전원을 공급하기 위한 전원스위치(100~220VAC)를 배치하였고, 소형환풍기에 의하여 신호처리장치의 냉각을 보조하였다. 또한, 여기서 사용된 DAQ는 채널수, 측정속도, 유지보수 용이성 및 소프트웨어 호환성을 고려하여, NI(National Instruments)사 USB-6255를 도입하였다. 선정된 USB-6255의 사양은 Table 3-1에 나타낸다.

Fig. 3 -4 Parallel multichannel signal processor external case (front and rear)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3 -1 NI USB-6255 specifications

Analog Input	
Number of channels	40 differential or 80 single ended
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the AI Absolute Accuracy section
Sample rate	
Single channel maximum	1.25 MS/s
Multichannel maximum (aggregate)	750 kS/s
Minimum	No minimum
Timing resolution	50 ns
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Input coupling	DC
Input range	±0.1 V, ±0.2 V, ±0.5 V, ±1 V, ±2 V, ±5 V, ±10 V
Maximum working voltage for analog	±11 V of AI GND
CMRR (DC to 60 Hz)	100 dB

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 데이터수집 소프트웨어

Fig. 3-5는 LIGiS를 포함한 센서스캐너와 병렬형 다중채널 신호처리 장치에 의하여 구성되는 용접부 잔류응력 측정장치를 구동하기 위한 데이터수집 소프트웨어의 알고리즘이다. 먼저 설정창에서 센서 갯수, 원격제어 전원 포트 및 엔코더 등의 정상적인 연결을 확인하기 위한 설정값을 확인한다. 설정이 완료되면 센서스캐너를 수동스캔하여 용접부의 관심영역 신호를 취득한다. 측정이 완료되면 자동적으로 c:\data의 경로에 데이터가 TDMS(Technical Data Management Streaming) 파일 형식으로 저장되고, quick analysis 모드로 전환된다. quick analysis 모드는 측정된 영역에서 자속밀도분포를 즉시 확인할 수 있다. 또한, original, differential, adaptive backdata의 신호처리기법을 사용하여 기본적으로 해석 및 선택할 수 있다. 신호처리기법에 대한 자세한 설명은 '해석 소프트웨어'에서 서술하고자 한다.

Fig. 3-6에 나타낸 데이터수집소프트웨어는 설정모드, 측정모드 및 quick analysis 모드로 진행된다. 설정모드는 소프트웨어 화면 우측상단에 위치한 'scan setting' 버튼을 눌러 작동한다. 버튼을 누르면 Fig. 3-6(a)와 같이 DAQ configuration 팝업창이 활성화되며, 센서 채널, 전원 원격제어, 샘플링 속도, 신호 증폭비 및 엔코더 등을 설정할 수 있다. 설정이 완료 되면 엔코더 트리거에 맞춰서 소프트웨어 중심부 그래프에 데이터가 실시간으로 지시된다. 측정이 완료되면 정지버튼을 눌러 측정된 데이터는 자동 저장되고 quick analysis모드로 전환된다. 한편, Fig. 3-6(c)의 quick analysis 모드에서는 측정한 데이터를 즉시 기본적인 해석이 가능한 특징을 가진다. 화면구성은 ① waterfall 그래프, ② 3d surface 그래프, ③ 관심영역 waterfall, ④ 관심영역 3d surface, ⑤ 관심영역 선택 제어창, ⑥ 동작버튼, ⑦ 화면 전환 탭으로 구성되어 있다. ①은 전체 측정영역을 나타내는 그래프이며, 32채널의 모든 센서 데이터가 1개의 화면에 지시된다. ②는 ①과 동일한 영역에서의 자속밀도분포를 3D 그래프로 표현한 것이다. ③, ④은 ①의 붉은 선 안의 데이터를 확대하여 보여주며, 그 영역의 데이터를 각각 waterfall과 3d surface그래프로 표현한 것이다. ⑤는 전체

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

영역의 라인 오프셋을 조정하거나, 특정 영역 범위를 설정하기 위한 것이다. ⑥는 측정모드와 해석모드의 화면전환을 위한 탭으로 구성된다. 측정모드 소프트웨어의 세부적인 기능은 Table 3-2에 나타낸 바와 같다.

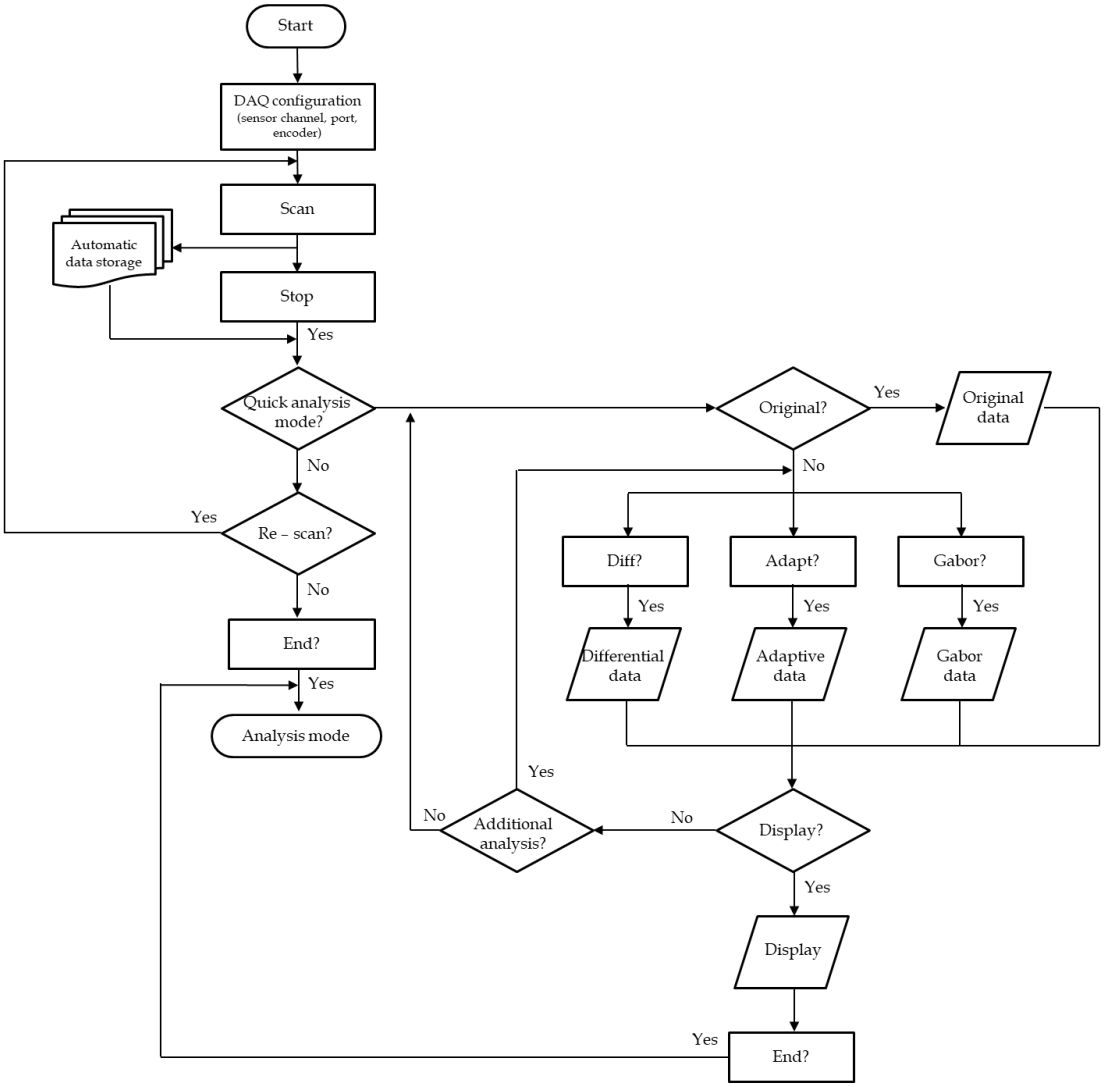
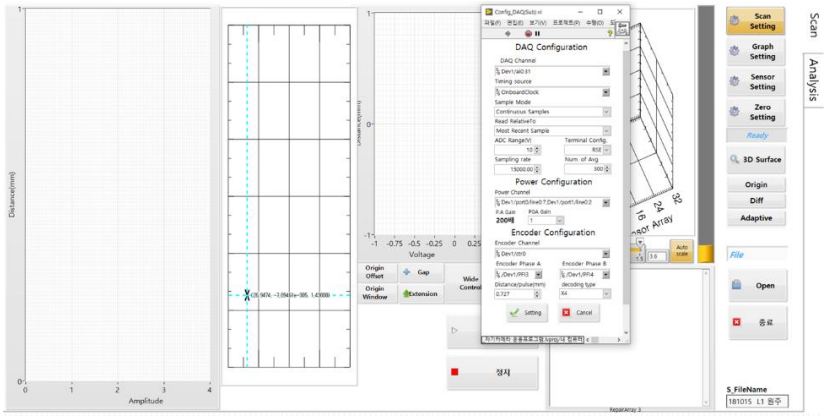
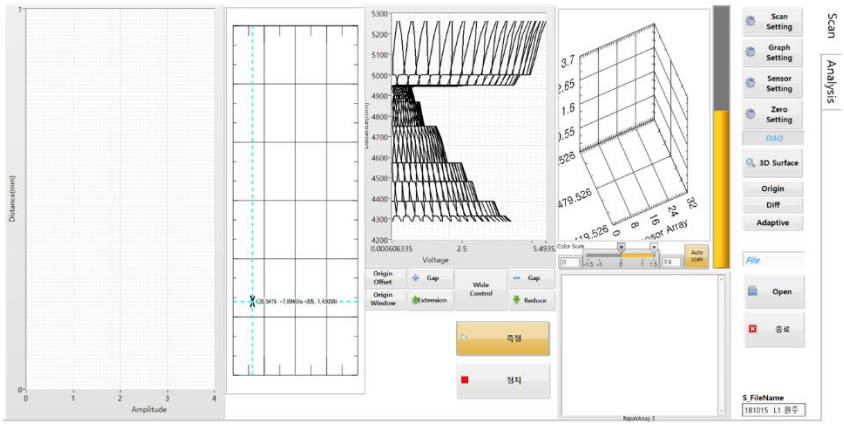


Fig. 3 -5 Data acquisition software flow chart

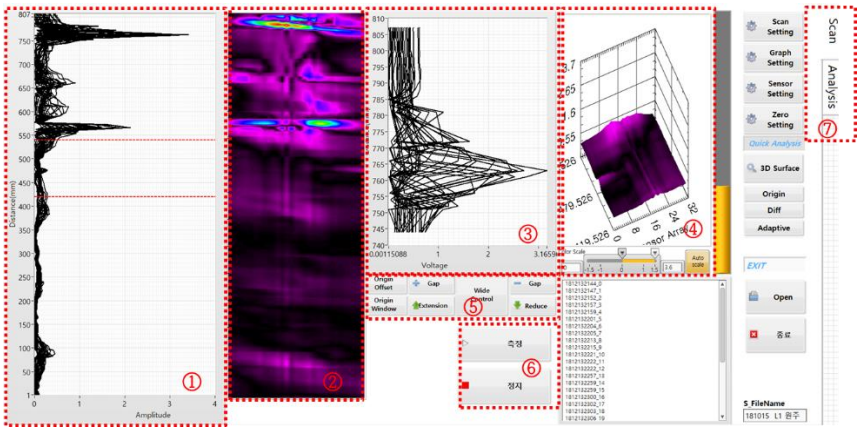
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 설정모드



(b) 측정모드



(c) quick analysis 모드

Fig. 3 -6 Data acquisition sotfware for magnetic flux density distribution measurement of chevron shaped weld

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3 -2 Data acquisition software configuration and function

기호	명 칭	기 능
①	waterfall 그래프	· 측정한 전체 영역에서 각 센서별 신호를 waterfall 그래프로 표현
②	3d surface 그래프	· 측정한 전체 영역에서 자속밀도분포를 3d surface 그래프로 표현
③	관심영역 waterfall	· 센서별 측정값 표시창(A)에서 선택한 영역을 waterfall 그래프로 표현
④	관심영역 3d surface	· 센서별 측정값 표시창(A)에서 선택한 영역을 3d surface 그래프로 표현
⑤	관심영역 선택 제어창	· ① 의 붉은색 커서들을 이용한 관심영역의 폭 및 오프셋을 설정
⑥	동작 버튼	· 프로그램 측정, 정지
⑦	화면 전환 탭	· 측정모드와 해석모드의 선택

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 해석 소프트웨어

Fig. 3-7은 해석 소프트웨어의 알고리즘을 나타낸다. 해석을 시작하기 위해서는 데이터수집 소프트웨어를 통하여 측정된 데이터를 먼저 불러온다. 데이터 파일형식은 TDMS로 내재적인 계층 구조(파일, 그룹, 채널)로 측정횟수만큼 저장이 되며 순차적으로 정렬이 되어 원하는 데이터를 선택할 수 있다. 원하는 데이터를 선택하게 되면 original data가 기본적으로 설정되어 있고 다양한 신호처리기법(differential, adaptive, FFT, gabor transform)을 통하여 데이터 해석이 가능하다. 또한, 전체영역 및 특정영역의 자속밀도분포가 관찰할 수 있고 해석을 마치면 새로고침을 통하여 다른 데이터를 선택가능하다.

Fig. 3-8은 상기 알고리즘을 기반으로 프로그래밍한 해석 소프트웨어를 나타낸다. 화면의 우측 상단에 있는 열기버튼을 통하여 측정된 데이터를 불러오게 되면 데이터 해석이 가능하다. 해석소프트웨어 화면구성은 ① waterfall 그래프, ② 3d surface 그래프, ③ 관심영역 waterfall, ④ 관심 영역 3d surface, ⑤ 관심 영역 적분값 그래프, ⑥ TDMS 데이터 파일 리스트, ⑦ 화면 전환 탭으로 구성되어 있다. ①~④ 는 데이터수집 소프트웨어의 quick analysis모드와 동일한 기능이며, ⑤는 ③의 모든 채널을 모두 합산하여 1개의 그래프로 표현한 것이다. 또한, ⑥ 은 TDMS 형식으로 저장되어 원하는 파일을 선택할 수 있다. ⑦은 측정모드와 해석모드의 화면전환을 위한 탭으로 구성된다. ⑧은 원하는 신호처리기법을 선택하여 데이터 표현이 가능하다. 해석 소프트웨어의 세부적인 기능은 Table 3-3에 나타내었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

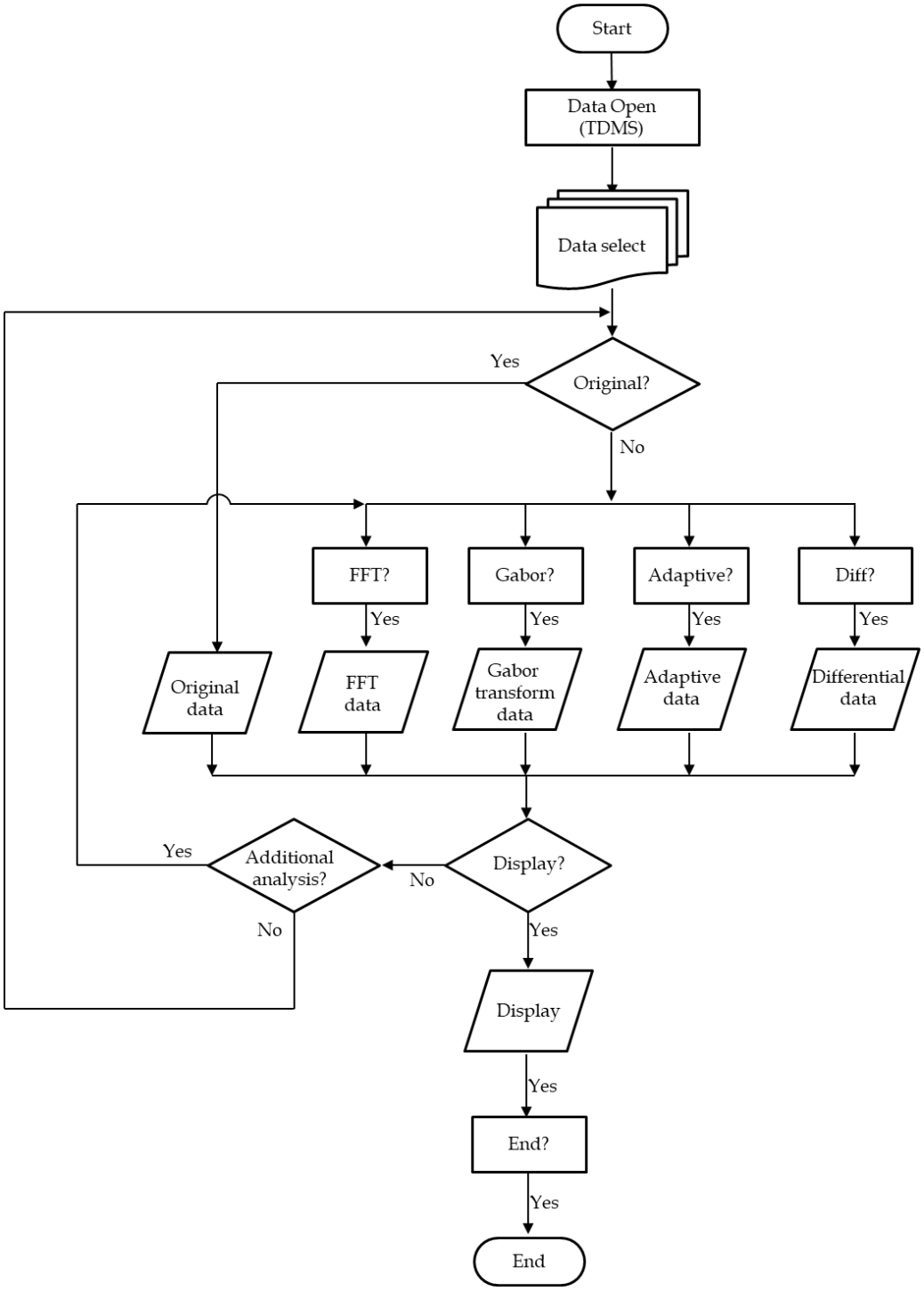


Fig. 3 -7 Analysis software flow chart

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

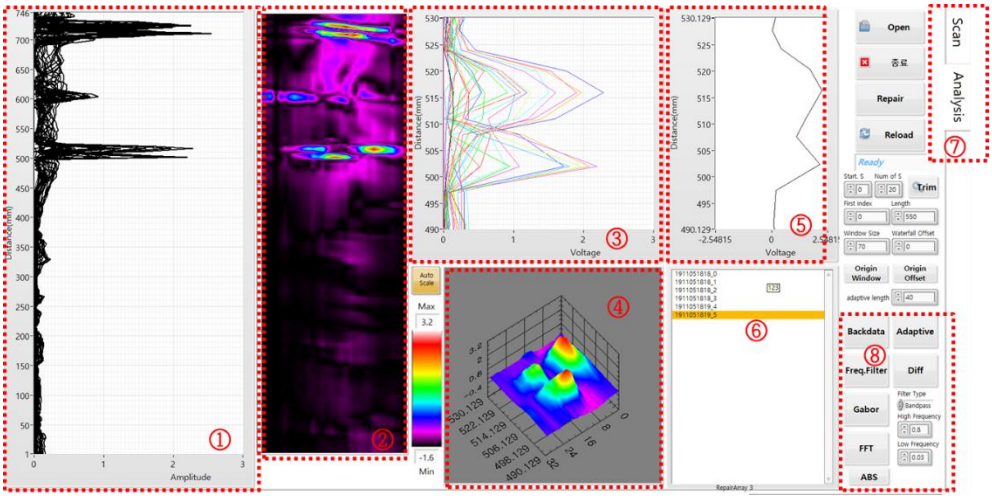


Fig. 3 -8 Analysis software for magnetic flux density distribution measurement of chevron shaped weld

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3 -3 Analysis software configuration and function

기호	명 칭	기 능
①	waterfall 그래프	· 측정한 전체 영역에서 각 센서별 신호를 waterfall 그래프로 표현
②	3d surface 그래프	· 측정한 전체 영역에서 자속밀도분포를 3d surface 그래프로 표현
③	관심영역 waterfall	· 센서별 측정값 표시창(A)에서 선택한 영역을 waterfall 그래프로 표현
④	관심 영역 적분값 그래프	· 관심 영역에서 거리에 따른 각 센서의 적분값을 표현
⑤	관심 영역 3d surface	· 관심 영역에서 자속밀도분포를 3d surface 그래프로 표현
⑥	TDMS 데이터 파일 리스트	· 동일한 파일명으로 반복실험을 하게 될 경우, 자동으로 일련번호를 가지는 데이터베이스가 생성 (TDMS 데이터파일) · TDMS 데이터파일의 리스트를 표시하여 선택
⑦	화면 전환 탭	· 측정모드와 해석모드의 선택

한편, 해석 소프트웨어에서는 “차분해석”, “경향제거”, “고속푸리에변환”, “가버 변환” 과 같은 신호처리기법을 통하여 용접부의 자속밀도분포를 해석할 수 있다. 차분해석기법(differential analysis method)은 센서에서 출력된 원본데이터를 거리축으로 미분하는 해석 방법이다. 한 예로, Fig. 3 -9는 센서스캐너에 의하여 용접부 실물결함시험편#1의 자속밀도분포를 측정한 원본데이터를 나타낸다. 이때 횡축은 센서의 진폭이며, 종축은 이동거리이다. 여기에서 선형으로 배열된 각각의 센서는 감도 및 바이어스 전압이 서로 다르기 때문에 원신호에 의한 해석이 곤란하다. 따라서, 차분해석법은 식 (25)로 정의할 수 있으며, 이러한 오차를 최소화할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 식에서 i와 j는 각각 측정거리와 센서번호를 나타내며 식 (26)는 식 (25)으로 얻어진 차분신호를 절대값으로 표현한 것이다. 한편, 식 (25)와 식 (26)에 의한 차분해석기법을 적용하면 Fig. 3-10과 같이 표현된다.

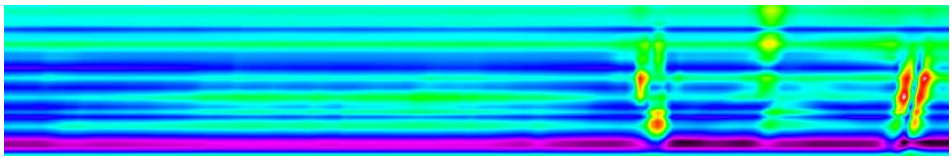


Fig. 3-9 Original data plot

$$\Delta V(i \cdot j) = V_s(i+1, j) - V_s(i \cdot j) \tag{25}$$

$$|\Delta V(i \cdot j)| = |V_s(i+1, j) - V_s(i \cdot j)| \tag{26}$$

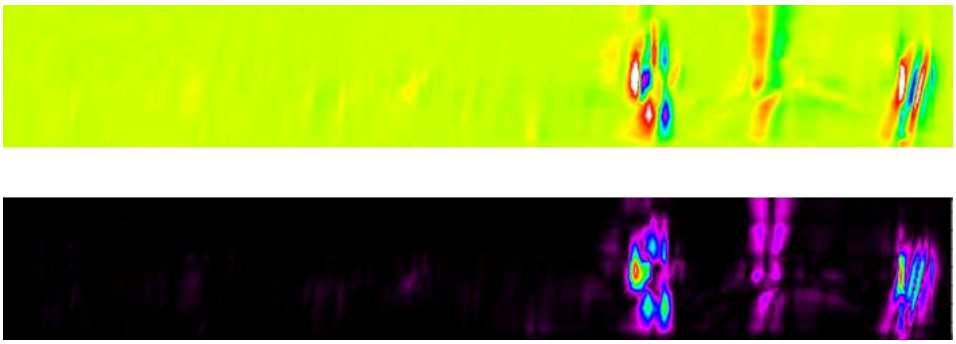


Fig. 3-10 Signal processed data plot (differential analysis method)

한편, 경향제거기법(adaptive backdata method)은 detrend 신호처리를 이용하여 결함정보를 명확하게 추출하는 기법이다. detrend 신호처리는 식 (27)과 Fig. 3-11에 표현되는 바와 같이 원본데이터의 특정영역(N)을 지정하여 특정영역의 이동평균을 계산한다. 이동평균으로 처리된 데이터는 다시 원본데이터로 차분한다. 이러한 detrend 신호처리는 Fig. 3-12에 나타낸 바와 같이 결함 정보를 명확하게 전달하면서, 원본데이터의 경향도 반영할 수 있다. 하지만, 이동평균하는 특정영역에 따라 결함 정도의 명확성이 저하될 수 있다. Fig. 3-13의 (a), (b), (c)는 N을 각각 5, 10, 20으

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

로 설정하여 detrend 처리한 결과이다. Fig. 3 -13은 식 (28)을 이용하여 절대값으로 표현하였다. 그림에 나타낸 바와 같이 N이 작을수록 배경신호의 경향성이 제거되고, 명확한 결함신호를 얻을 수 있다. 반면에 N이 크면 전체적인 잡음 제거 효과를 얻을 수 있지만 원본데이터의 왜곡이 심화된다. 본 연구에서는 결함의 정보를 자동으로 인식하는 것이 목적이므로, N을 5로 설정하였다.

$$V_{\mathrm{avr}}(i,j) = \frac{1}{N}\sum_{\tilde{i}=i-\frac{N}{2}}^{i+\frac{N}{2}} V_s(\tilde{i},j) \tag{27}$$

$$V_{adpt}(i,j) = V_s(i,j) - V_{\mathrm{avr}}(i,j) \tag{28}$$

$$\left|V_{adpt}(i,j)\right| = \left|V_s(i,j) - V_{\mathrm{avr}}(i,j)\right| \tag{29}$$

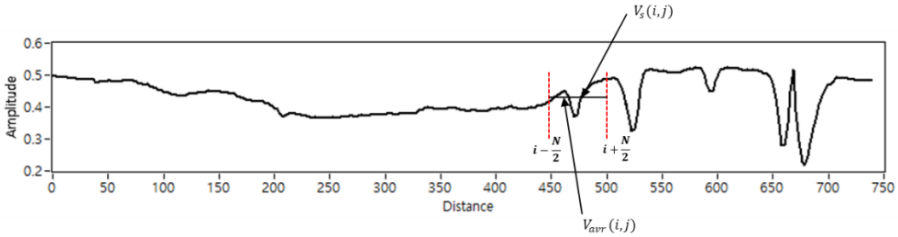
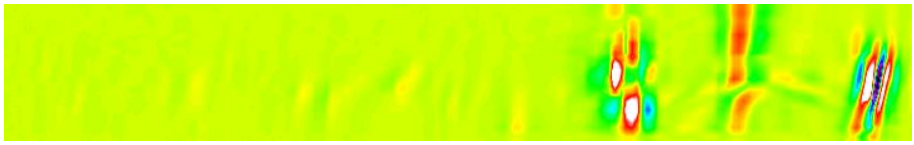
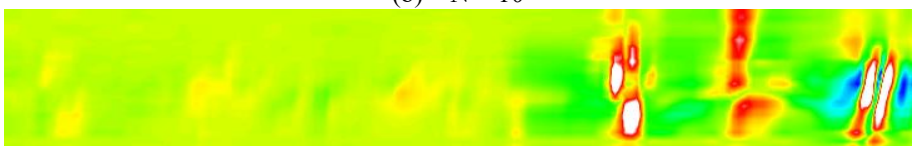


Fig. 3 -11 Principle of detrend signal processing (detrend area setting)



(a) N = 5

(b) N = 10

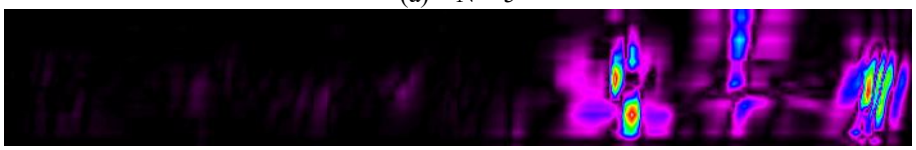


(c) N = 20

Fig. 3 -12 Results of adaptive backdata signal processing

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) N = 5



(b) N = 10

(c) N = 20

Fig. 3 -13 Results of adaptive backdata signal processing (absolute value)

푸리에 변환(FT, Fourier Transform)은 시간에 따른 신호의 진폭 데이터를 주파수별 강도 데이터로 변환하는 기법이다. 연속적으로 취득한 원본데이터는 다양한 주파수 패턴이 존재하고 개별 성분을 추출할 수 있다. 본 연구에서는 용접부의 자속밀도분포를 엔코더에 의하여 0.78mm의 동일한 간격으로 측정하기 때문에 시간(t)를 거리(x)로 환산하여 주파수 성분을 표현이 가능하다. 한편, 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)은 이산 푸리에 변환(DFT, Discrete Fourier Transform)과 그 역변환(IFFT, Inverse Fast Fourier Transform)을 빠르게 연산하는 효율적인 알고리즘이다. 푸리에 변환과 역변환은 식 (30)과 식 (31)로 나타낼 수 있고, 이때 ω는 각주파수 성분에 해당된다.

$$FT(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j\omega x}\,dx \tag{30}$$

$$f(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} FT(\omega)e^{j\omega x}\,d\omega \tag{31}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3 -14와 Fig. 3 -15는 FFT를 이용한 데이터처리에 관한 신호유형과 해석 결과를 나타낸다. 먼저, 입력된 데이터를 FFT 해석함으로써, 잡음 및 신호 대역의 주파수를 분리한다. 전기적인 잡음에 해당하는 고주파수와 리프트오프의 정확도에 기인하는 저주파수 신호를 소거한다. 따라서, 소거한 신호를 제외한 나머지 주파수 대역의 신호를 IFFT로 적용하면 좌측 상부의 신호가 좌측 하부의 신호로 바뀌어 S/N비가 향상된다. FFT의 저주파수 및 고주파수는 해석 소프트웨어를 통하여 입력할 수 있고, 본 논문에서는 0.03Hz의 저주파수 이하 및 0.35Hz 이상의 고주파수 이상의 신호를 소거하여, 명확한 결함 신호를 추출할 수 있었다.

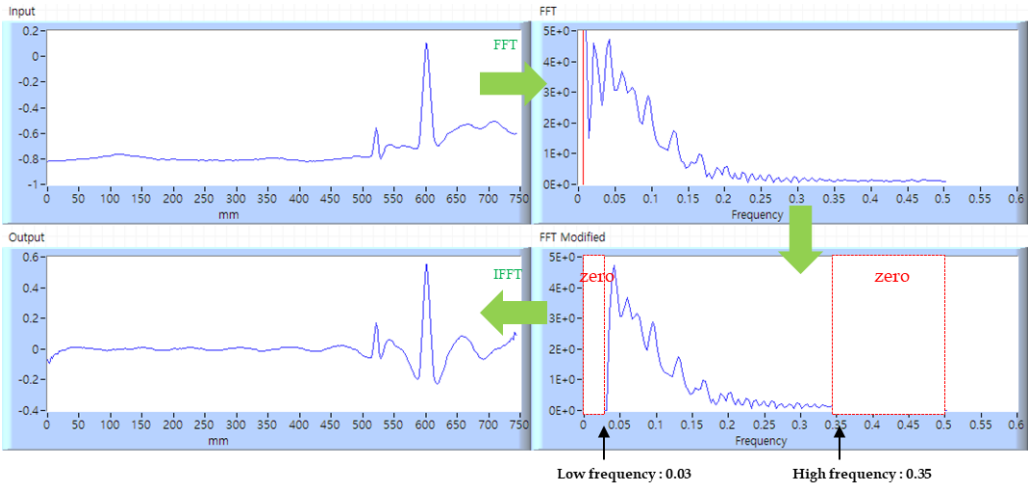


Fig. 3 -14 Principle of FFT data processing method

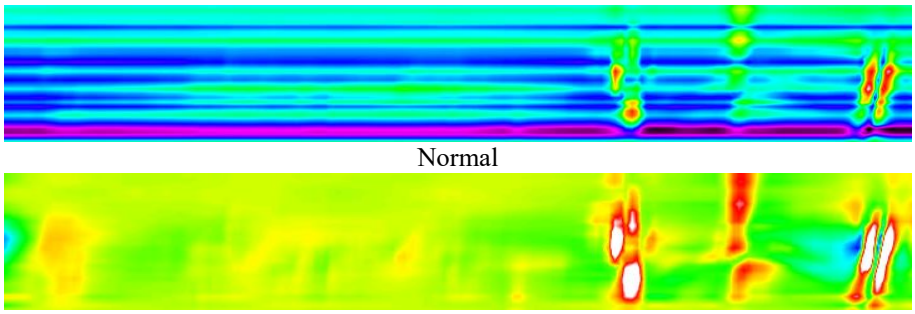


Fig. 3 -15 FFT data processing result

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가버 변환(gabor transform)은 가우시안형태의 윈도우함수를 사용하여 푸리에 변환을 적용하는 기법이다. FFT에 의하면, 전체영역의 주파수의 성분을 알 수 있는 반면에 시간의 경과에 따른 주파수 변화를 관찰하기 어렵다. 그러나, 가버 변환은 특정 구간내에서 FFT 분석과 함께 가우시안형태의 윈도우가 시간(거리) 축으로 이동하면서 적용하기 때문에 시간에 따른 주파수의 특성을 알 수 있다. 따라서, 가버 변환과 역 가버 변환은 식 (32)와 식 (33)으로 표현된다. 또한, detrend와 유사하게 형태로 특정 주파수를 입력하여 노이즈를 제거하게 되면 완만한 S/N비 향상 효과를 얻을 수 있다. Fig. 3-16은 원본데이터에 가우시안함수를 적용한 스펙토그램를 나타내며 0.03Hz의 저주파수 이하 및 0.35Hz 이상의 고주파수 이상의 신호를 소거하였다. 한편, 식 (32)와 식 (33)에 의한 가버 변환을 적용하면 Fig. 3-17과 같이 표현된다.

$$G(\tau,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-\pi(x-\tau)^2 e^{-j\omega x}} dx \tag{32}$$

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} G(\tau,\omega) e^{-j\omega x}\, d\tau d\omega \tag{33}$$

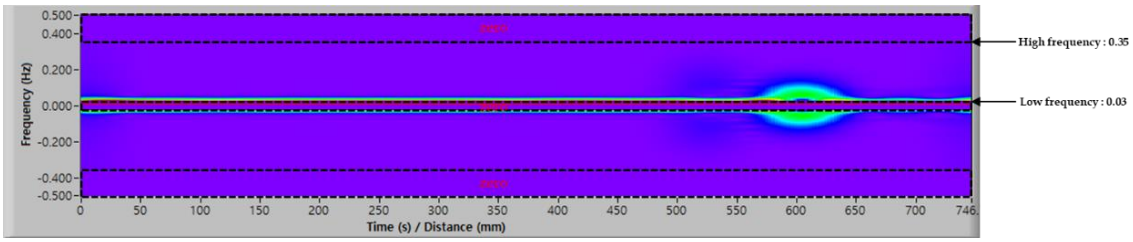


Fig. 3-16 Gabor transform processing method

Fig. 3-17 Gabor transform data processing result

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

따라서, 본 논문에서는 데이터를 표현할 때, 이상의 네가지 기법을 활용하였다. 이상의 네가지 데이터 표현기법, 즉 차분해석, 경향제거, 고속 푸리에 변환, 가버 변환은 어느특정 기법에 우위가 있는 것이 아니라, 경우에 따라 결함 지시의 명확성이 상이할수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 볼트체결부 기계적 열화 측정시스템

1. 자기히스테리시스 측정용 센서

Fig. 3 -18과 Fig. 3 -19는 자기히스테리시스 측정용 센서 3D 설계도와 실물사진을 나타낸다. 이 센서는 구조물에 체결되어 있는 볼트의 자기히스테리시스를 측정하기 위한 장치로, 볼트헤드에 장착하는 방식으로 검사할 수 있다. 장착 시 코일센서가 삽입된 기구부 상단에 스프링를 배치하여 센서의 움직임을 최소화하도록 하였다. 또한, 피측정 대상체의 인입, 센터링 및 고정이 용이하도록 6면에서 스프링과 결합된 기구부에 의하여 볼트헤드부분을 밀어주는 구조로 제작하였다. 또한, 볼트 외경기준으로 최대 79mm, 최소 66mm 크기의 볼트가 장착 가능하도록 설계하였으며, KS B 1002 규격에서는 M42부터 M52의 대형볼트를 검사할 수 있다. 자기히스테리시스 측정용 센서는 두 개의 코일을 동시에 사용하며 차동형으로 연결되어 있다. 1개의 센서는 참조신호로서 공기중에 노출되고, 나머지 하나는 피측정 대상체인 볼트에 배치한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

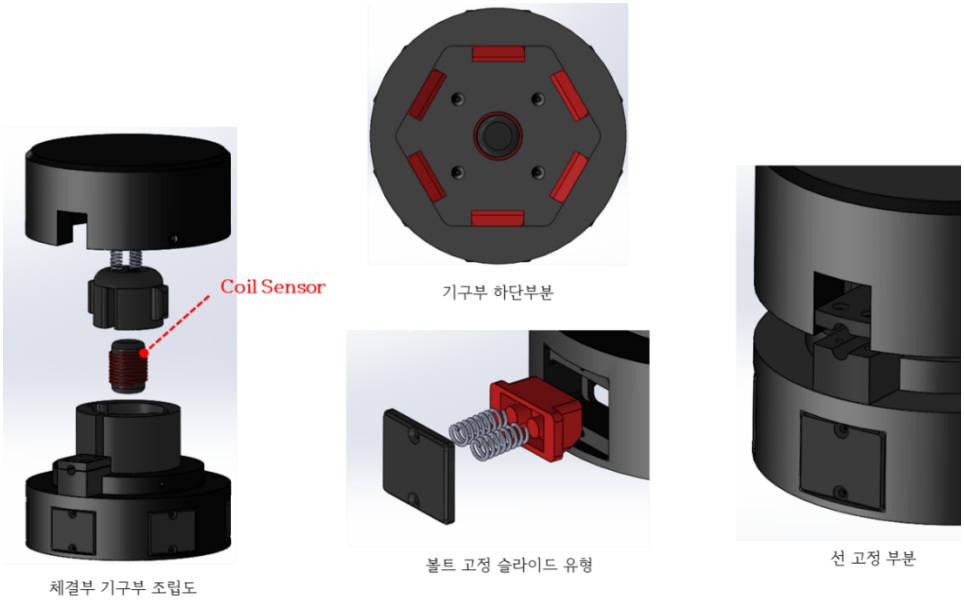


Fig. 3 -18 Design of sensor probe for magnetic hysteresis measurement

Fig. 3 -19 Sensor probe for magnetic hysteresis measurement

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 고속 단일채널 펄서-리시버 신호처리 장치

Fig. 3 -20은 볼트체결부를 검사하기 위한 고속 단일채널 펄서-리시버 신호처리 장치의 블록 다이어그램을 나타낸다. 함수발생기(function generator), 전력증폭기(power amp) 및 신호처리회로에 필요한 전원은 컴퓨터에 의하여 원격으로 제어하였다. 함수발생기에 의하여 출력된 펄스파(square wave)는 트리거 기능을 하며, 동시에 전력증폭기로 입력되었다. 증폭된 신호는 브릿지 회로를 통하여 코일센서로 인가되며, 펄스파에 의한 코일신호의 변화는 차동형 연산증폭기를 거쳐 초고속 A/D 변환기에 의하여 수집되었다. 또한, 차동형 연산증폭기는 단일채널로 구동할 수 있는 PCB를 제작하여 활용하였다.

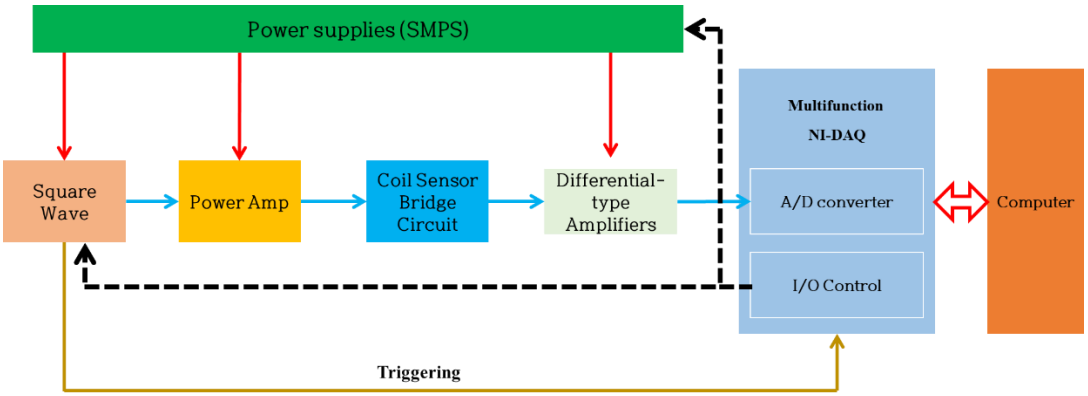


Fig. 3 -20 High speed single channel pulser-receiver signal processor block diagram

고속 단일채널 펄서-리시버 신호처리장치는 Fig. 3 -21에 나타낸 바와 같이 알루미늄재질의 인스트루먼트 케이스 (220mm×256mm×60mm)로 제작되었다. 신호처리 장치 전면에는 전원 상태 표시등(LED), 센서 커넥터 접속단자, USB 접속단자가 있다. 전원 상태 표시등은 좌측부터 Main, SPB(Signal Processing Board), Sensor, EM(Electromagnetic) source로서, 신호처리 장치의 상태별로 전원여부를 확인할 수 있다. 센서 접속단자에는 참조용 및 측정용 센서를 원형 커넥터 홈에 맞춰 연결하

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여 조립된다. USB 접속 단자는 DAQ 전용으로 노트북과 연결하도록 하였다. 한편, 신호처리 장치 후면에는 메인전원을 공급하기 위한 전원스위치(100~220VAC)를 배치하였고, 소형환풍기에 의하여 신호처리장치의 냉각을 보조하였다. 여기서 사용된 DAQ는 단일채널로 400ks/s 속도로 데이터를 취득하기 위한 NI(National Instruments)사 USB-6216를 도입하였다. 선정된 USB-6216의 사양은 Table 3-4에 나타낸다.

Fig. 3 -21 High speed single channel pulser-receiver signal processor

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3 -4 NI USB-6216 specifications

Analog Input	
Number of channels	8 differential or 16 single ended
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the AI Absolute Accuracy section
Sample rate	
Single channel maximum	400 kS/s
Multichannel maximum (aggregate)	400 kS/s
Minimum	No minimum
Timing resolution	50 ns
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Input coupling	DC
Input range	±0.2 V, ±0.5 V, ±1 V, ±2 V, ±5 V, ±10 V
Maximum working voltage for analog	±10.4 V of AI GND
CMRR (DC to 60 Hz)	100 dB

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 데이터수집 및 해석 소프트웨어

Fig. 3 -22는 볼트체결부의 자기히스테리시스를 측정하기 위한 데이터수집 소프트웨어의 알고리즘이다. 프로그램을 시작과 동시에 센서채널, 원격제어 전원 포트 및 외부 트리거 포트 등의 장치 및 DAQ 연결여부를 먼저 확인한다. 볼트의 표본 시험편을 통해 취득한 교정데이터는 후술 예정인 자동 알고리즘 그래프(Max-Min rate)에 출력된다. 해당 데이터는 볼트의 건전성 평가에 기준이 되며, 검사를 통하여 측정된 결과는 교정데이터 위에 디스플레이된다. 검사방법은 자기히스테리시스 측정용 센서로 볼트헤드에 장착시킨 후 프로그램을 동작시킨다. 신호처리 장치에 의한 펄스파는 일정한 간격으로 트리거를 발생시키 때문에 한 주기에 대한 코일신호 변화를 연속적으로 관찰할 수 있다. 또한, 자동 알고리즘 그래프를 통하여 볼트의 건전 및 열화를 평가할 수 있다.

Fig. 3 -23은 상기 알고리즘을 기반으로 프로그래밍한 소프트웨어를 나타낸다. ①은 DAQ의 센서채널, 외부트리거, 함수발생기의 펄스 주파수 및 펄스의 주기를 설정한다. ②는 펄스파에 의하여 발생하는 코일신호의 원본그래프와 미분을 적용한 그래프로 표현한다. 이 그래프는 연속적으로 코일 신호가 변화하는 것을 관찰할 수 있다. ③ 주기적으로 인가되는 펄스에 동기화하여 반주기 분량의 출력신호의 면적을 나타낸다. ④는 ②의 그래프에서 최대값과 최소감소율을 이용한 자동 알고리즘 그래프로서 열화를 평가할 수 있다. ⑤는 동작버튼이며, “신호확인” 에서는 신호를 확인한다. 즉, 현재 출력된 센서의 신호를 고정(검은색)하고, 비교할 수 있는 두 번째 신호(적색)를 출력하여 센서의 변화를 관찰할 수 있다. 또한, “자동저장”은 ②와 ③ 의 그래프를 자동으로 저장하는 기능을 부여한다. 측정하기 전 측정 후 열기 버튼을 통하여 알고리즘 그래프를 관찰할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

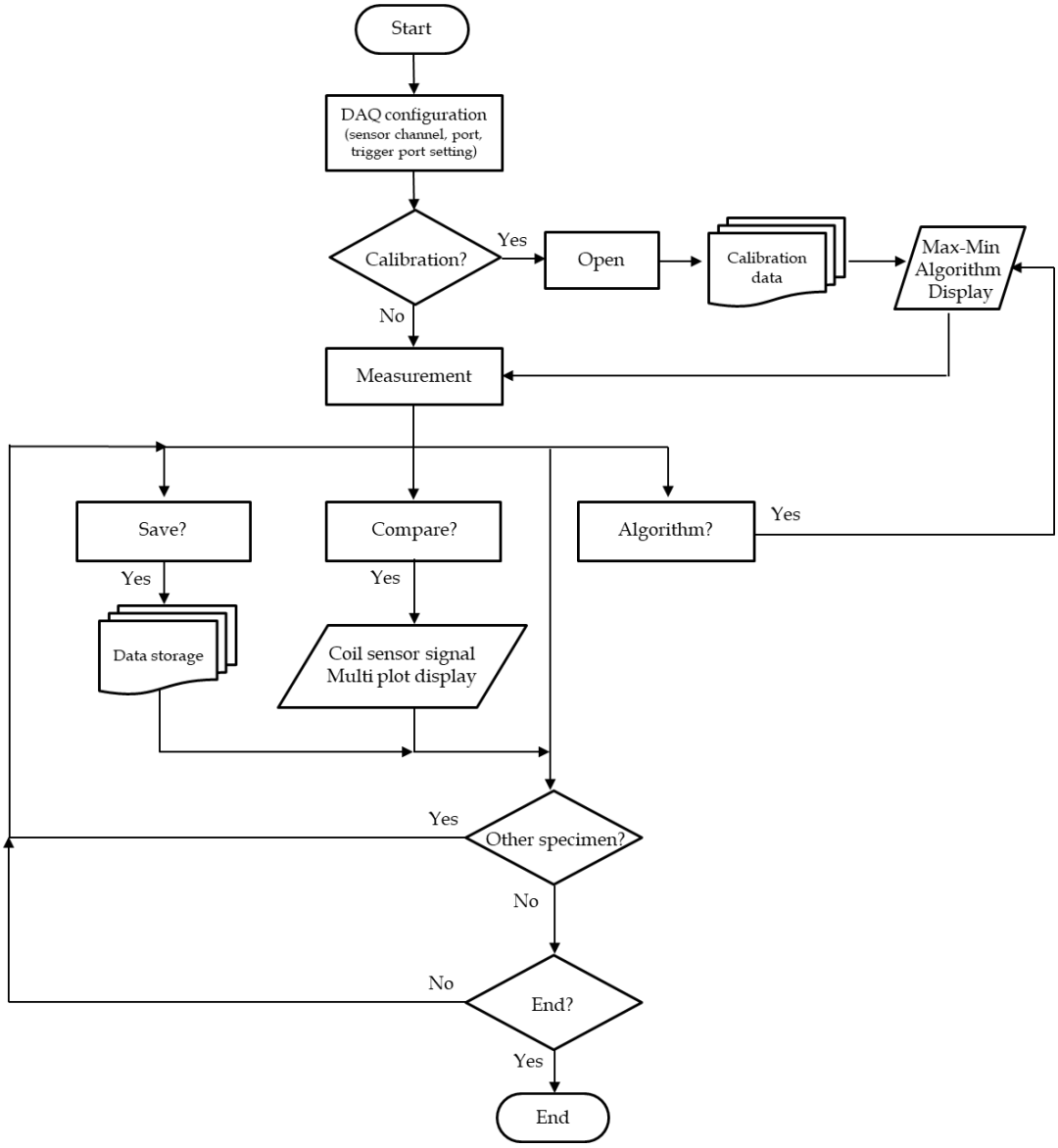


Fig. 3 -22 Data acquisition & analysis software flow chart

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

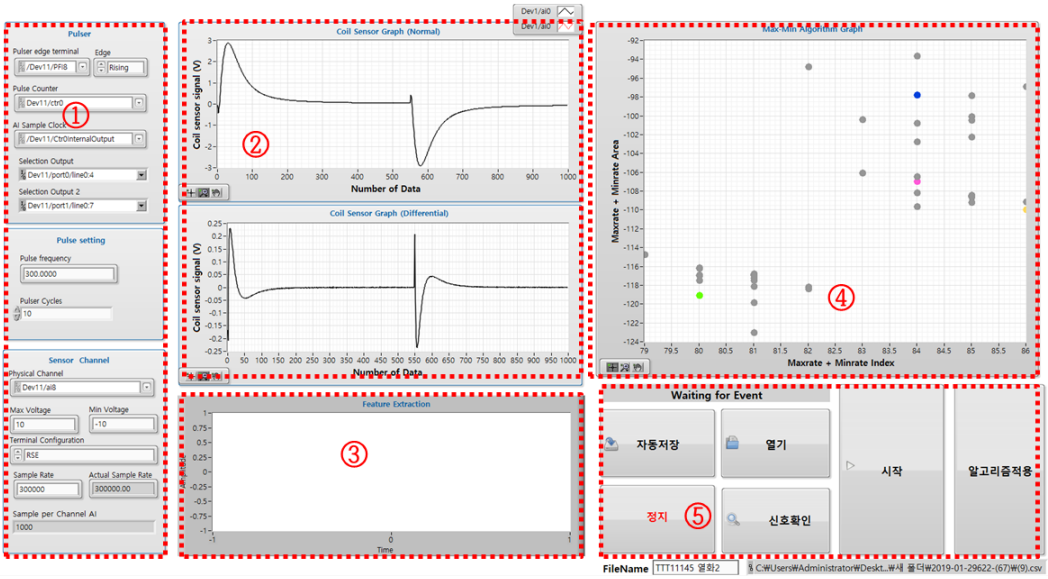


Fig. 3 -23 Data acquisition & analysis software

Table 3 -5 Data acquisition & analysis software configuration and function

기호	명 칭	기 능
①	DAQ setting	· DAQ의 센서채널, 외부트리거, 함수발생기의 펄스 주파수 및 펄스의 주기를 설정
②	Coil Sensor Graph	· 펄스파에 의하여 생기는 코일 신호 원본 및 미분 그래프
③	Feature Extraction	· 실시간으로 측정되는 원본 신호의 절반주기에 대한 진폭합을 나타내는 그래프 (실시간으로 코일신호의 면적을 표현)
④	Algorithm Graph	· ②그래프에 대한 신호를 활용하여 볼트 건전성을 평가하는 알고리즘 그래프
⑤	동작버튼	· 상태 메시지-검사 중 운용소프트웨어 상태를 표현 · 신호 셋팅, 측정 시작, 자동저장, 열기 · 실시간으로 원 그래프에 대한 알고리즘 평가

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. Max-Min rate 알고리즘

Fig. 3 -24는 자기히스테리시스 측정용 센서, 고속 단일채널 신호처리 장치 및 데이터수집 소프트웨어에 의하여 볼트검사를 하였을때 코일신호의 절반주기를 나타낸다. 코일신호의 진폭은 펄스형 외부자계를 인가한 직후에서 상승하다가 다시 감소하며 시간의 경과에 따라 0으로 수렴하는 형태이다. 이러한 코일신호 형태 및 신호에서 관찰되는 공통적인 인자들을 활용하여 체결부 볼트의 건전성 평가 할 수 있는 알고리즘을 도출하였다. Table 3-6은 주요 판정인자의 종류와 위치를 나타낸다. 최대값(Max)은 펄스형 외부자계를 인가한 후 시작 직후의 최대값에 해당한다. Positive area는 펄스형 외부자계를 인가한 후, 제 1구간의 면적에 해당한다. 그리고, Max rate은 펄스형 외부자계 인가 후, 제 1구간 직후의 최대투자율 및 위치에 해당한다. 그 이외에도 그림에서 정의하는 바와 같이 Max, Min, Rising point, Zero, Min rate, Positive area, Negative area를 손상판정의 인자로 추출하였다.

Table 3 -6 Factors for damage determination

No.	Interests	Components
1	Max	Index, amplitude
2	Min	Index, amplitude
3	Rising point	Index, amplitude
4	Zero	Index, amplitude
5	Max (rate)	Index, amplitude
6	Min (rate)	Index, amplitude
7	Positive area	Amplitude
8	Negative area	Amplitude
9	Max+Min rate	Index {Max (rate) + Min (rate)}
10	Max-Min rate area	Σ Substract {Max ~ Min (rate)}

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

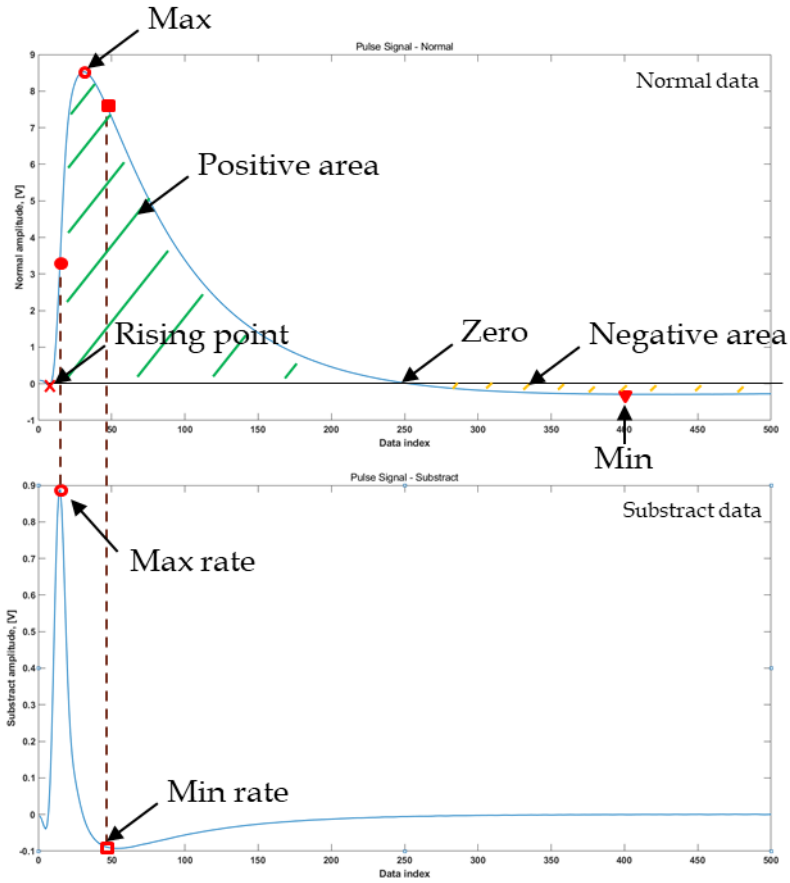


Fig. 3 -24 Signal characteristics of facors for damage determination

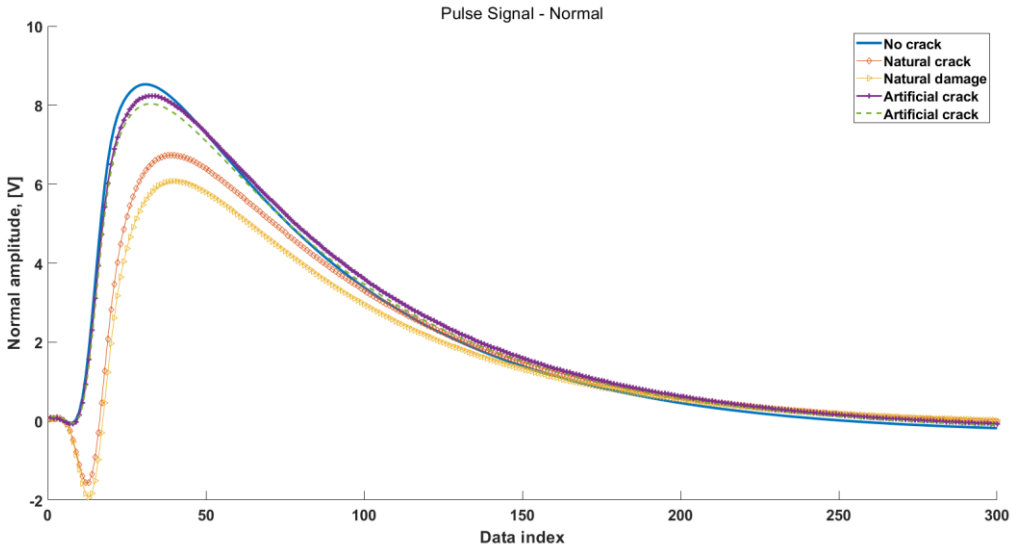
Fig. 3 -25는 볼트 시험편에 대한 응답특성과 주요 인자들의 위치를 나타낸다. 시험편은 건전 시험편, 자연 결함 시험편, 열화 시험편 및 인공 결함 시험편을 활용하였다. 강한 펄스형 외부자계를 인가하였을때 자기히스테리시스의 응답특성은 시험편별로 미세한 차이를 보인다. 특히, Fig. 3 -25의 자연결함 및 열화시험편은 피크가 작아지고 시작직후 음의 값에 대한 특징을 가지고 있다. 이 시험편의 경우는 피크가 작아지고, 우측으로 이동하므로 HMM (Hard Magnetic Material)화 되어서 피로에 의하여 전위밀도가 높아지고 있음을 시사한다. 한편, Fig. 3 -25의 인공결함시험편은 시작직후 음의 값 특징이 없고 건전시험편보다 피크가 작은 것으로 확인되었다.

Fig. 3 -26은 상술한 5종류의 시험편을 활용하여 취득한 주요 인자의 상호관계

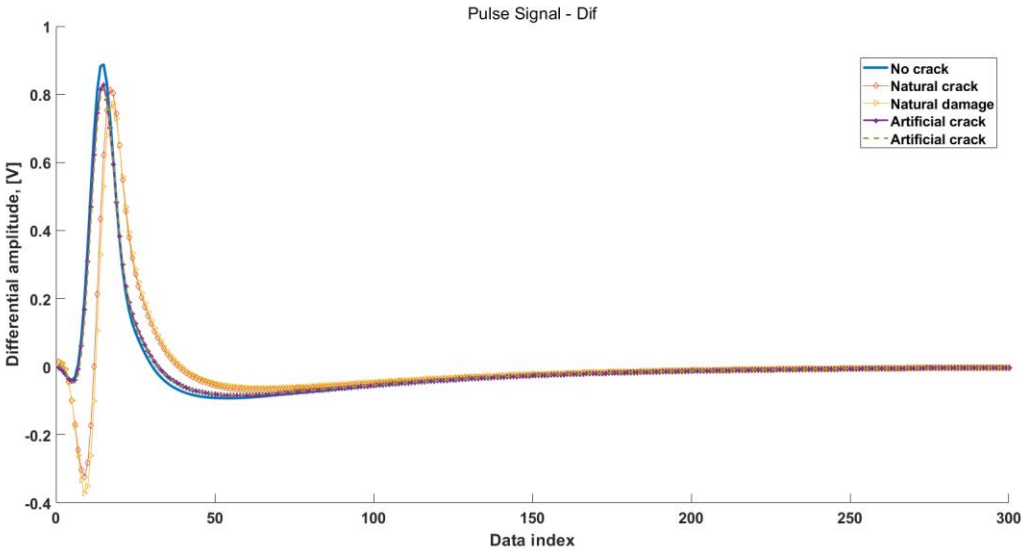
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

를 나타낸다. 이 결과는 시험편당 30회의 반복실험을 통하여 (a)~(h)까지 다양한 인자들을 비교 후 검증하였다. (a)의 경우 Max point에 대한 index와 amplitude를 x축 및 y축으로 나타낸 결과로서 건전시험편에 비하여 열화 또는 자연결함 시험편이 상대적으로 Max point의 amplitude가 작고 index는 오른쪽에 위치한 것으로 볼 수 있다. (b) Min point, (c) Max rate point 및 (e) Rising point 에 대한 인자를 활용하였지만 해당 결과에 따르면 대부분 동일선상에 존재하여 시험편별로 큰 변화를 확인 할 수 없었다. 또한, (f) Positive areas & Negative areas 에 대한 결과는 센서 신호의 양수 및 음수의 값을 전체적으로 계산되었기 때문에 실험에 의한 오차가 크게 생길 우려가 있다. 손상정도를 정확히 판정하기 위해서는 Fig. 3 -26 (a), (d), (h)와 같이 각 시험편별로 특성화되어야 하고 쉽게 구분가능 해야 한다. 결과적으로, 주요인자를 통하여 상호비교한 결과 (h)를 활용할 수 있는 Max+Minrate의 index, Max~Minrate area 알고리즘을 채택하였다. 또한, 해당 알고리즘을 통하여 건전시험편은 좌하향, 열화 및 자연결함시험편은 우상향으로 지시하여 볼트의 건전성을 평가하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



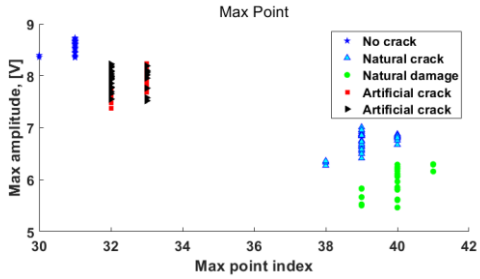
(a) Normal



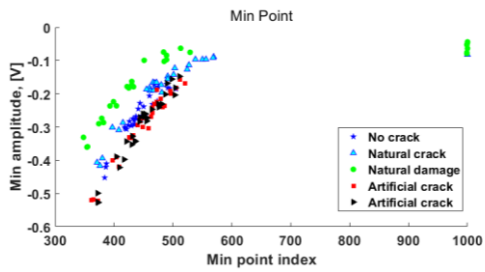
(b) differential

Fig. 3 -25 Pulse response according to the specimens

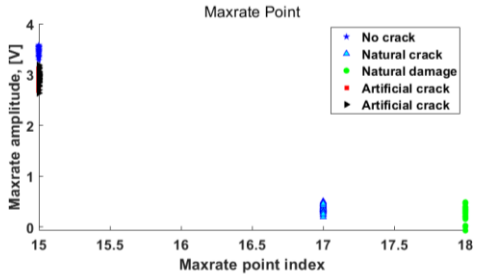
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



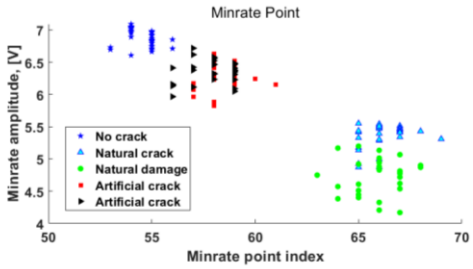
(a) max piont & amplitude



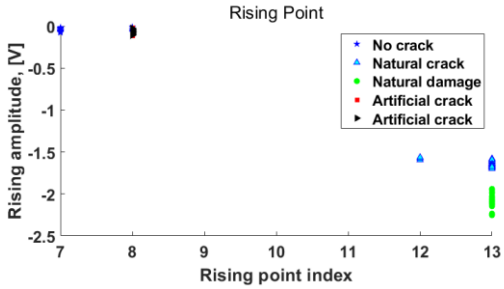
(b) min point & amplitude



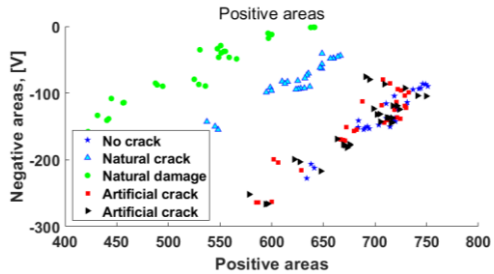
(c) maxrate point & amplitude



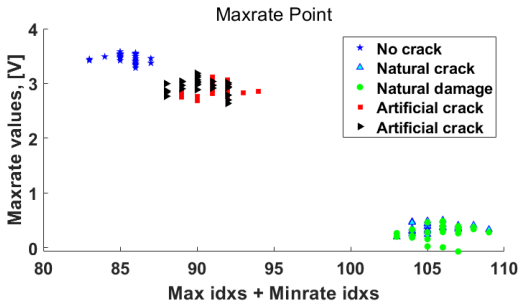
(d) minrate point & amplitude



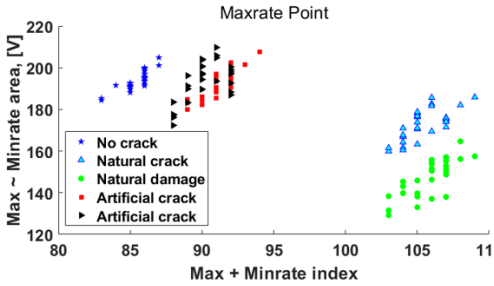
(e) rising point & amplitude



(f) positive areas & negative areas



(g) max+min rate point & values



(h) max+min rate point & area

Fig. 3 -26 Interrelationship of factors for damage determination

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 실험 및 고찰

개발한 대형기기 구조물 용접부 및 볼트체결부 검사시스템의 유용성을 검증하기 위하여 실제 현장 운용중 파손된 관주형 송전탑의 용접부 및 볼트를 실험 및 검증에 활용하였다. 이와는 별도로 실물 크기의 관주형 송전탑 목업시험편의 용접부와 볼트체결부에 도입한 여러가지 형태 및 크기의 인공 결함을 대상으로 최종 시제작한 검사시스템을 적용하여 그 유용성을 파악하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 절 용접부 모사 시험편 실험

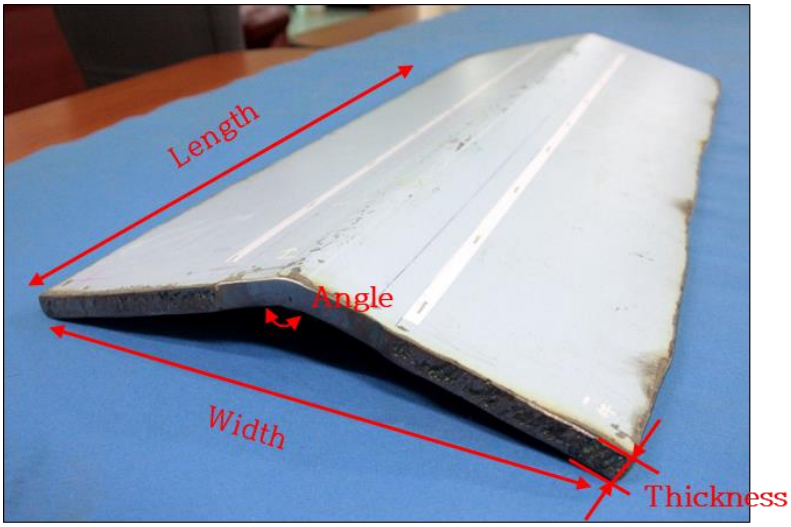
1. 실물 결함 시험편 실험 및 고찰

용접부 잔류응력 측정 시스템을 검증하기 위한 실물 결함 시험편은 현장에서 실제 파손되어 폐기된 송전탑의 용접부 일부를 채취하여 활용하였다. Fig. 4 -1에 나타낸 바와 같이 채취한 시험편의 재질은 탄소강(A572 grade 65)이며, 맞대기 용접에 의하여 제작되었다. 실물 결함 시험편 #1은 두께가 18mm, 폭이 400mm이며 150˚의 쉐브론 형태이다. #2는 #1과 폭 및 각도는 동일하나, 두께가 22mm이다. #1, #2 시험편에 관한 자세한 크기는 Table 4-1에 나와 있다. 맞대기 용접에 의하여 작업된 용접부의 폭은 20~25mm이며 용접비드의 높이도 불연속적이다. 본 연구에서는 시험편 상부에 센서스캐너를 놓고 용접부를 따라 측정하면서 실시간으로 지시되는 용접부의 자속밀도분포를 관찰하였다.

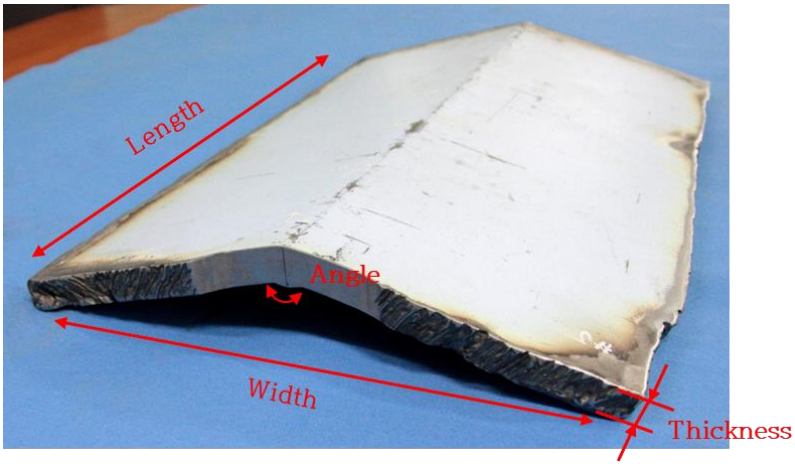
Table 4 -1 Size of weld specimens

	Length	Width	Thickness	Angle
#1	905mm	400mm	18mm	150º
#2	625mm	400mm	22mmm	150º

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



#1 specimen



#2 specimen

Fig. 4 -1 Welded specimen

Fig. 4 -2와 Fig. 4 -3은 실물 결함 시험편 #1과 #2 용접부의 실험결과를 나타낸다. 자속밀도분포는 동일한 2차원 평면상에서 측정하였기 때문에 리프트오프가 각각 다르다. 시험편 #1의 경우 530mm, 620mm, 750mm 지점에서 큰 자기장의 신호를 알 수 있고, 이는 용접결함에 기인한 잔류응력이 존재하기 때문이다. 또한, 0~400mm 사이에서 작은 이상 신호들을 관찰할 수 있다. 시험편 #2의 경우

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

90~200mm, 310mm, 420mm 지점에서 자속밀도분포가 크게 변화하고 있다. 용접부의 자속밀도분포는 제 3장에서 서술한 차분해석, 경향제거, 고속푸리에변환, 가버변환의 신호기법을 활용하였다.

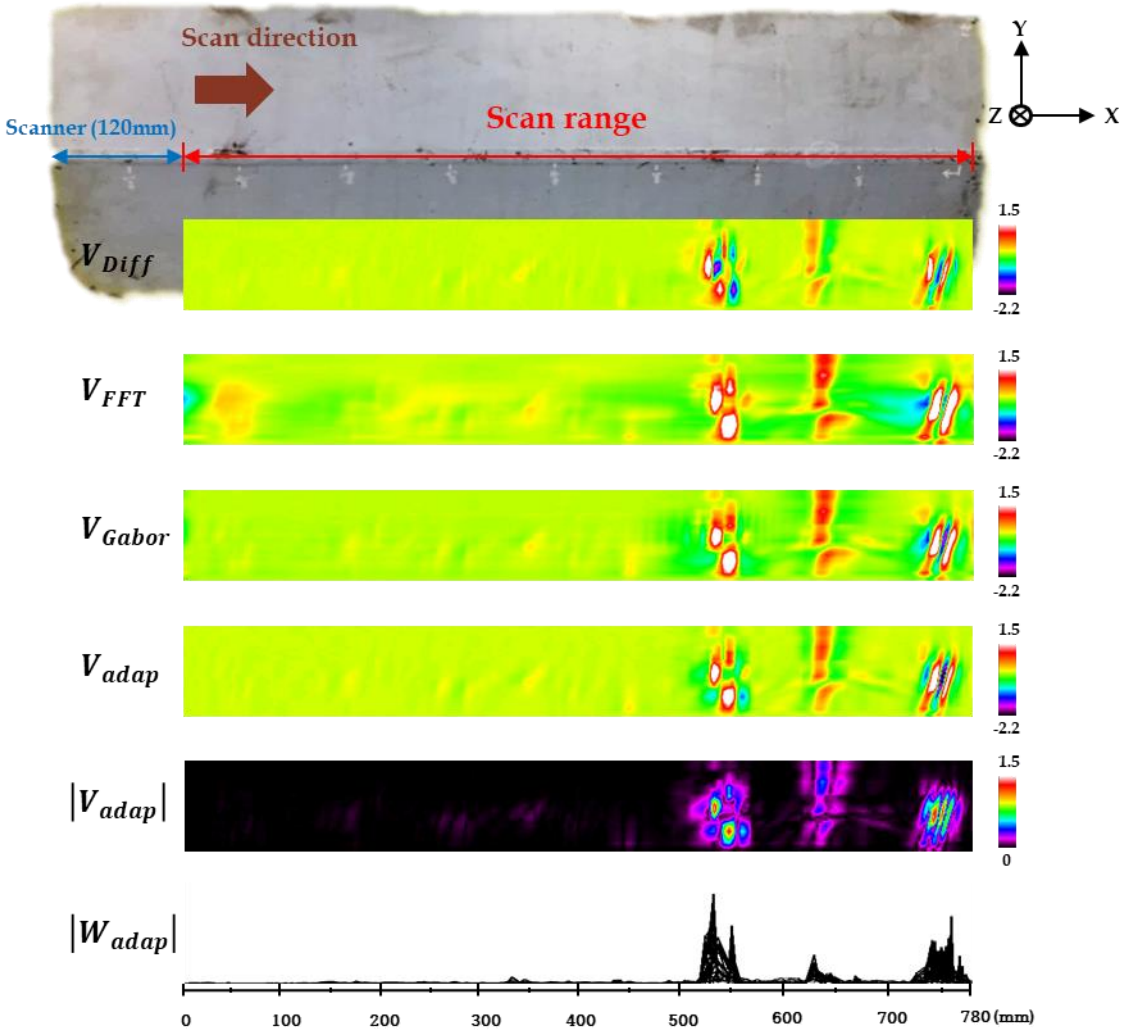


Fig. 4 -2 Welded specimen #1 experiment result

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

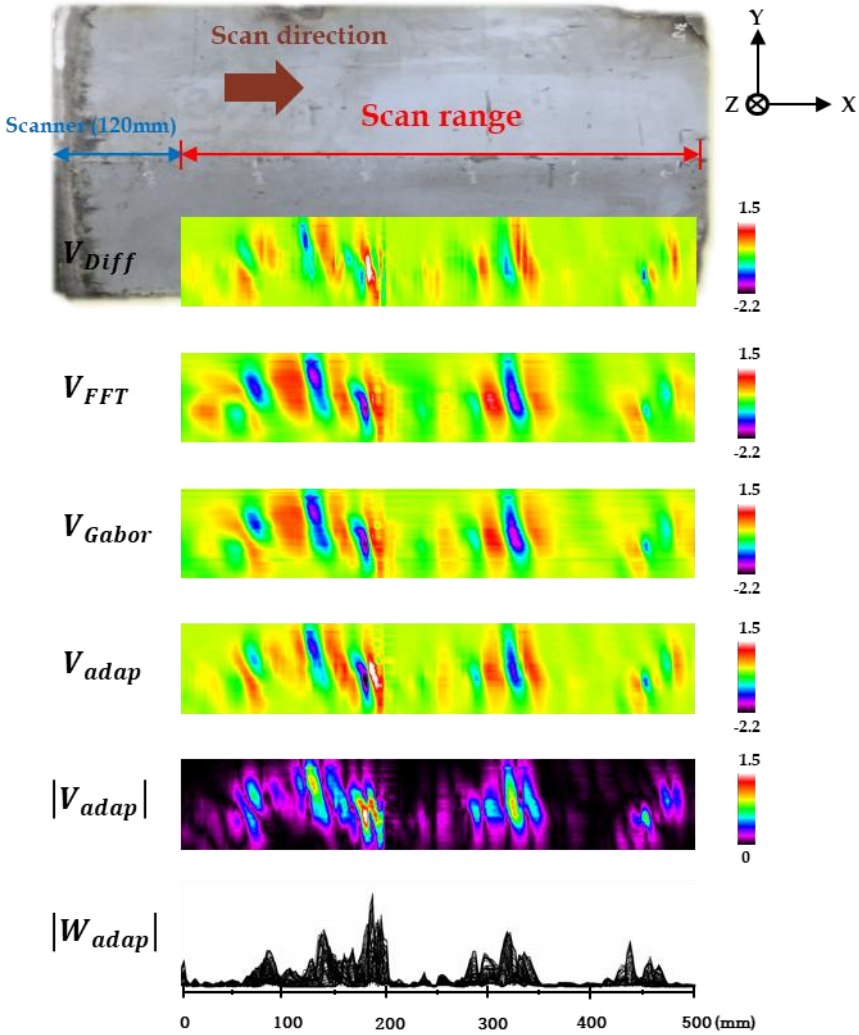
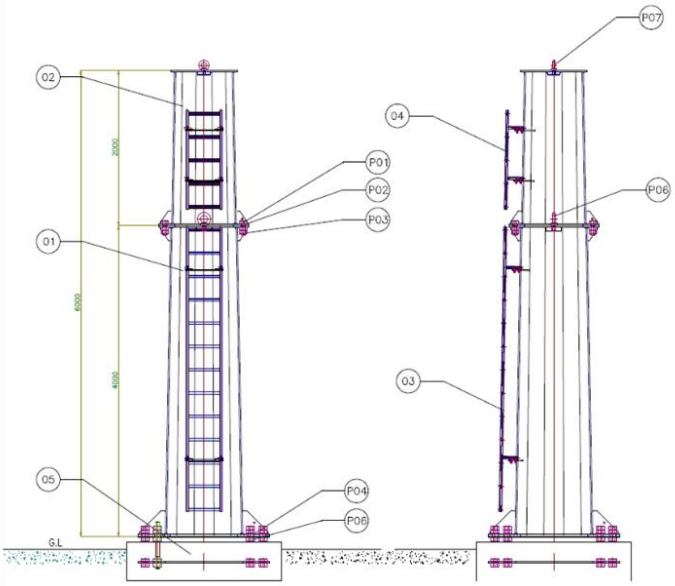


Fig. 4 -3 Welded specimen #2 experiment result

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 목업시험편 실험 및 고찰

Fig. 4 -4는 용접부 잔류응력 측정 시스템을 검증하기 위한 목업시험편을 나타낸다. 목업시험편은 12각의 형태로 용접된 관주형 또는 원주형으로 제작되었다. 총 2단 구조로 되어 있으며, 제 1단은 4m, 제 2단은 2m로서 총 6m의 높이를 가진다. 관주형 송전탑은 35.2mm 두께로서 총 4개의 용접선을 가지며, 사다리를 기준으로 우측의 두 개 용접선을 R1, R2로, 좌측의 2개 용접선을 L1, L2로 명명하였다. 원주형 송전탑은 34mm 두께로서 총 2개의 용접선을 가지며, 사다리를 기준으로 우측의 용접선을 R1, 좌측의 용접선을 L1으로 명명하였다. 지면으로부터 각각 관주형은 340mm, 원주형은 159mm까지 플랜지가 설치되어 있다. 자속밀도분포는 각기 다른 플랜지를 포함한 스캐너(153mm, S) 윗부분에서 3,000~3,200mm범위를 정방향 및 역방향으로 측정하였다. Fig. 4 -5는 센서스캐너를 목업시험편에 적용하여 실험하는 사진을 나타낸다. 송전탑 하부 또는 리프트의 저면에 신호처리 장치와 컴퓨터를 설치하고, 사다리를 이용하여 송전탑 용접부를 검사하였다.



조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

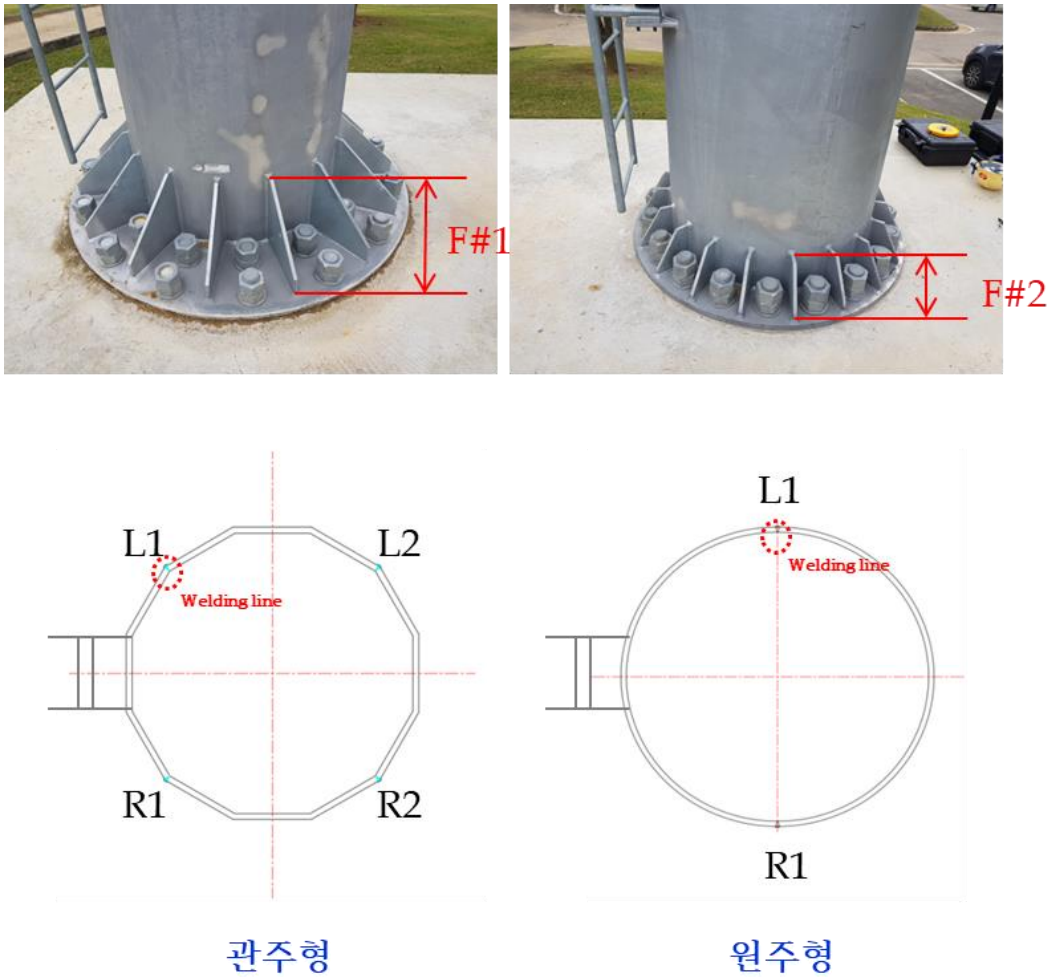


Fig. 4 -4 Mock-up specimen (Tubular type & Circular type)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4 -5 Field experiment (welding line)

Fig. 4 -6과 Fig. 4 -7은 관주형 송전탑의 제 1단 R1과 R2의 용접선에서 정방향 및 역방향으로 측정한 결과로서, 지상에서 493mm, 즉 플랜지(340mm)를 포함한 스캐너높이(153mm)로부터 상단방향으로 3,000 ~ 3,200mm의 영역을 나타낸다. 좌측 waterfall그래프는 모든 채널의 신호를 1개의 그래프 상에 표현한 것으로서, 횡축과 종축은 각각 신호의 크기와 높이를 나타낸다. 또한, 우측 3d surface 그래프에서 횡축은 1.2mm 간격의 센서를 지시하고, 종축은 0.78mm의 측정간격을 나타낸다. 용접부마다 각기 다른 리프트오프로 측정된 결과이기 때문에 최대값 1/4 알고리즘을 적용한다. 최대값 1/4에 해당하는 출력을 threshold로 하여 이보다 큰 값을 이상신호로 책정하였다. 따라서, Fig. 4 -6의 정방향 R1에서는 600mm, 1150mm, 1450mm, 1600mm, 3350mm에서 이상신호가 발생하였다. R2에서는 1050mm, 1200mm, 2550mm, 2700mm 3100mm에서 이상신호가 발생하였다. Fig. 4 -7의 역방향 R1에서는 1120mm, 1220mm, 1400mm, 1550mm, 2200mm, 3400mm에서 이상신호가 발생하였다. R2에서는 1050mm,

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1250mm, 1450mm, 1550mm 2550mm, 3050mm, 3180mm, 3500mm에서 이상신호가 발생하였다.

Fig. 4 -8와 Fig. 4 -9는 관주형 송전탑의 제 1단 L1과 L2의 용접선에서 측정한 결과이다. Fig. 4 -8의 정방향 L1에서는 700mm, 1000mm, 1810mm, 1900mm, 2000mm, 2550mm, 3200mm에서 이상신호가 발생하였다. L2에서는 800mm, 1000mm, 1150m, 3200mm 310에서 이상신호가 발생하였다. 정방향 L1에서는 700mm, 1000mm, 1810mm, 1900mm, 2000mm, 2550mm, 3200mm에서 이상신호가 발생하였다. Fig. 4 -9의 역방향 L1에서는 600mm, 1000~1200mm, 1450mm, 1850mm, 2500mm, 2600mm, 2950mm, 3100mm, 3180mm에서 이상신호가 발생하였다. 정방향 L2에서는 850mm, 1050mm, 1200mm, 2480mm, 3250mm에서 이상신호가 발생하였다.

정방향 스캔과 역방향 스캔의 결과가 다른 이유는 두 가지가 있다. 첫째, GMR 센서는 반도체 공정 시 45° 간격으로 배열하여 설계되어있다. 따라서, 정방향은 용접부의 45°, 역방향은 용접부의 225°의 방향의 자속밀도 분포를 측정한다. 둘째, 정방향과 역방향 스캔에서 용접부의 같은 위치를 측정하지 못하고, 중심선에서 3~5mm 정도의 오차가 발생할 수 있다. 중심선에서 약간 벗어나면 좌측과 우측의 센서는 리프트오프의 변화를 유발한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

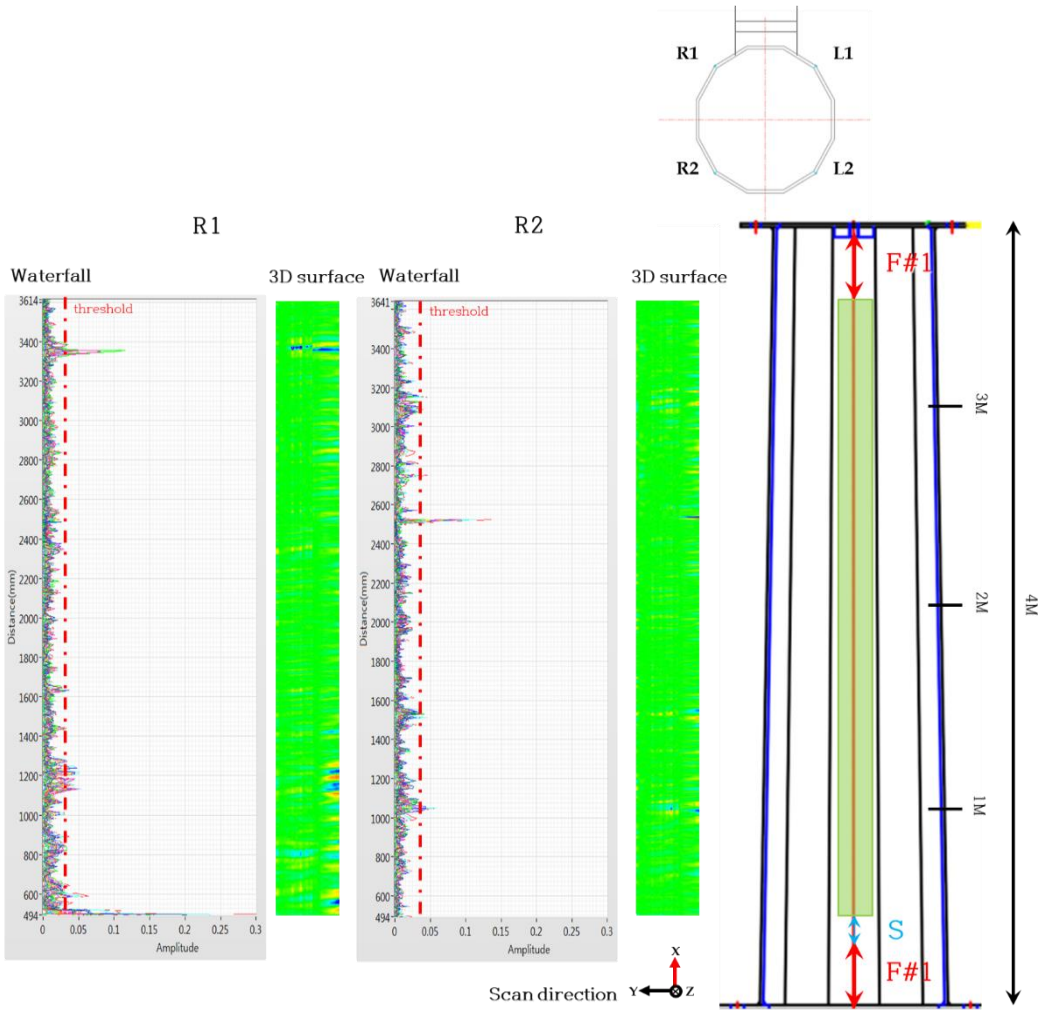


Fig. 4 -6 Tubular-type R1, R2 welding line experiment result (Forward scan)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

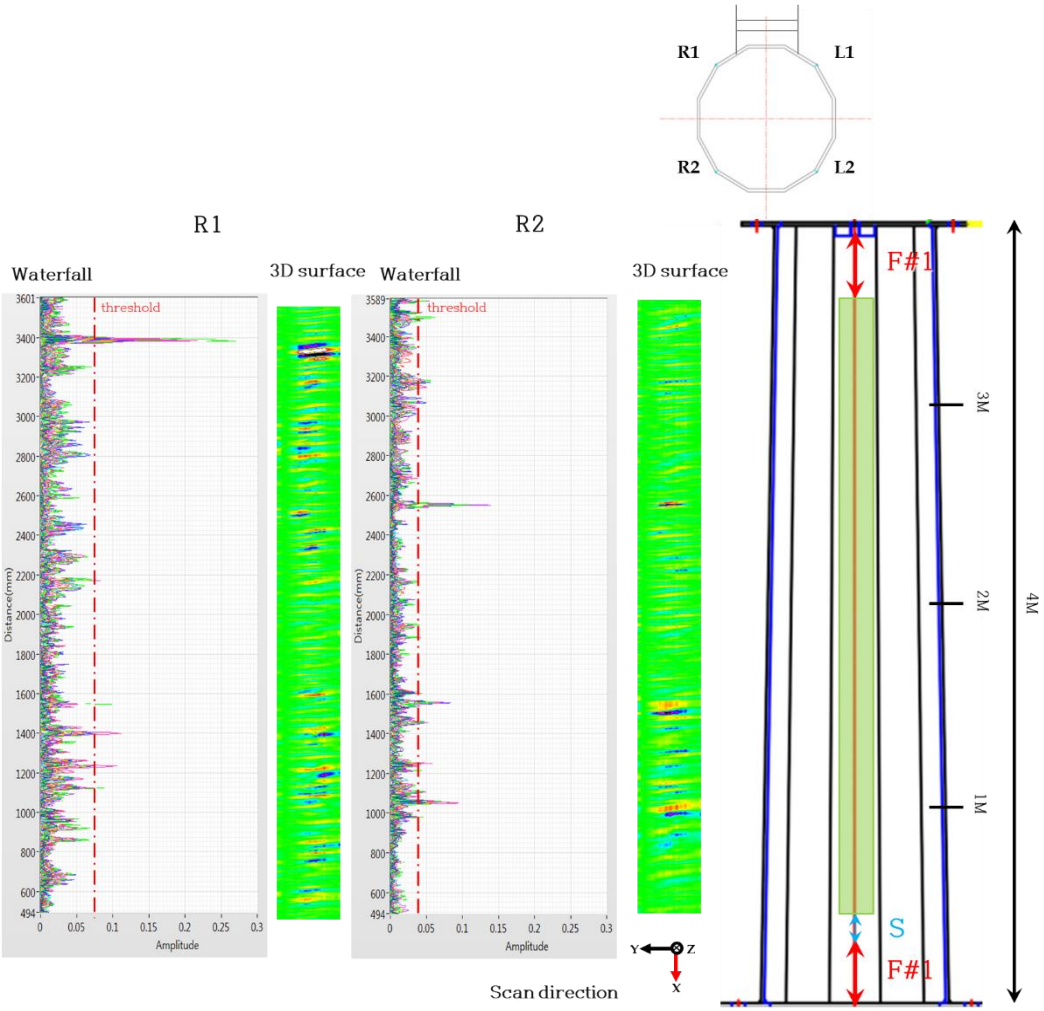


Fig. 4 -7 Tubular-type R1, R2 welding line experiment result (Reverse scan)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

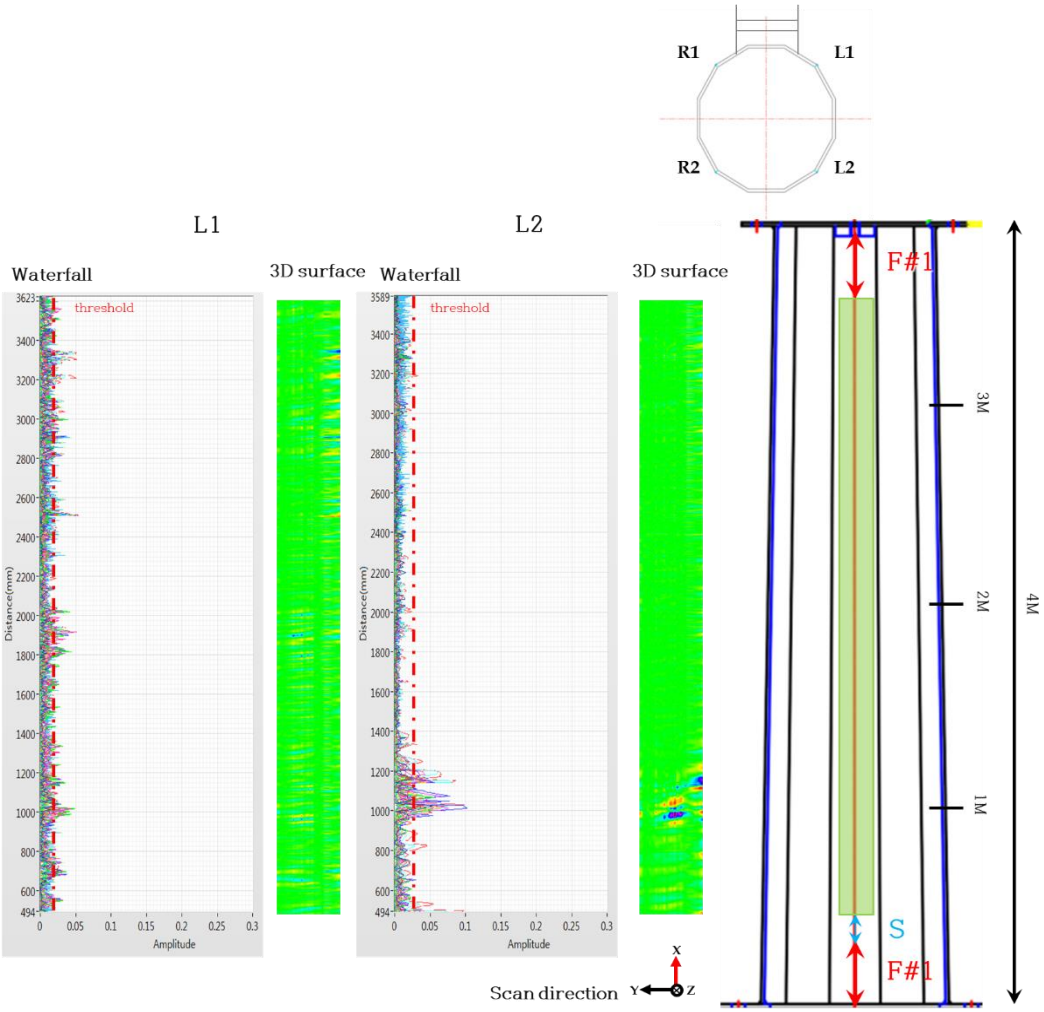


Fig. 4 -8 Tubular-type L1, L2 welding line experiment result (Forward scan)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

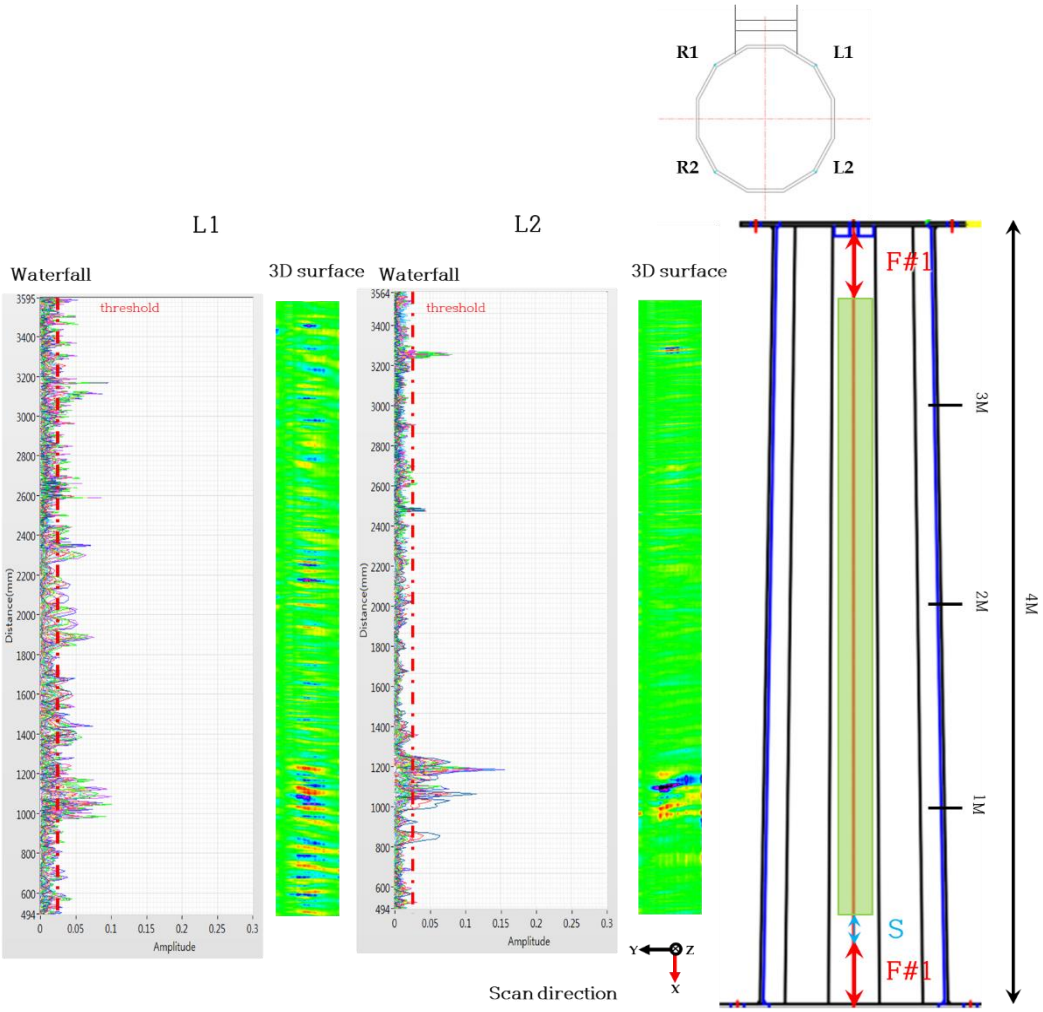


Fig. 4 -9 Tubular-type L1, L2 welding line experiment result (Reverse scan)

Fig. 4 -10과 Fig. 4 -11은 원주형 송전탑의 R1과 L1 용접선에서 측정한 결과로서, 지상에서 312mm, 즉 플랜지(159mm)를 포함한 스캐너높이(153mm)로부터 상단방향으로 3,000 ~3,200mm의 영역을 나타낸다. 관주형 송전탑과 마찬가지로 최대값 1/4알고리즘을 적용하여 이상신호를 평가하였다. Fig. 4 -10의 정방향 R1에서는 400mm, 600mm, 710mm, 880mm, 1400mm에서 이상신호가 발생하였으며, 2700mm~3500nn까지 이상신호가 연속적으로 관찰되었다. L1에서는 400mm, 680mm, 1190mm, 2200mm

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2790mm에서 이상신호가 발생하였다. Fig. 4 -11의 역방향 R1에서는 610mm, 900mm, 1150mm, 1400mm, 1500mm, 1780mm, 2050mm, 2250mm, 2900mm, 3590mm에서 이상신호가 발생하였다. L1에서는 400mm, 700mm, 1190mm, 1550mm, 3280mm에서 이상신호가 발생하였다.

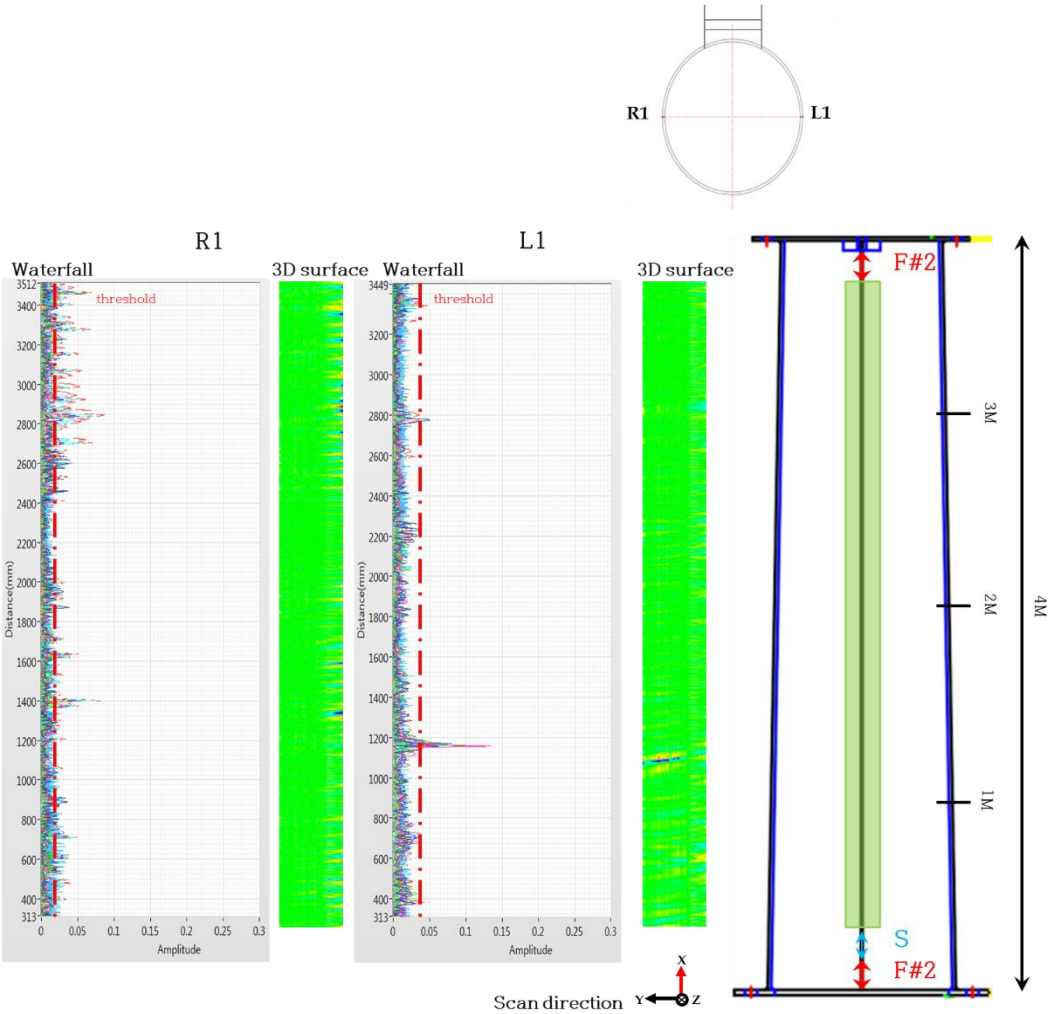


Fig. 4 -10 Circular-type R1, R2 welding line experiment result (Forward scan)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

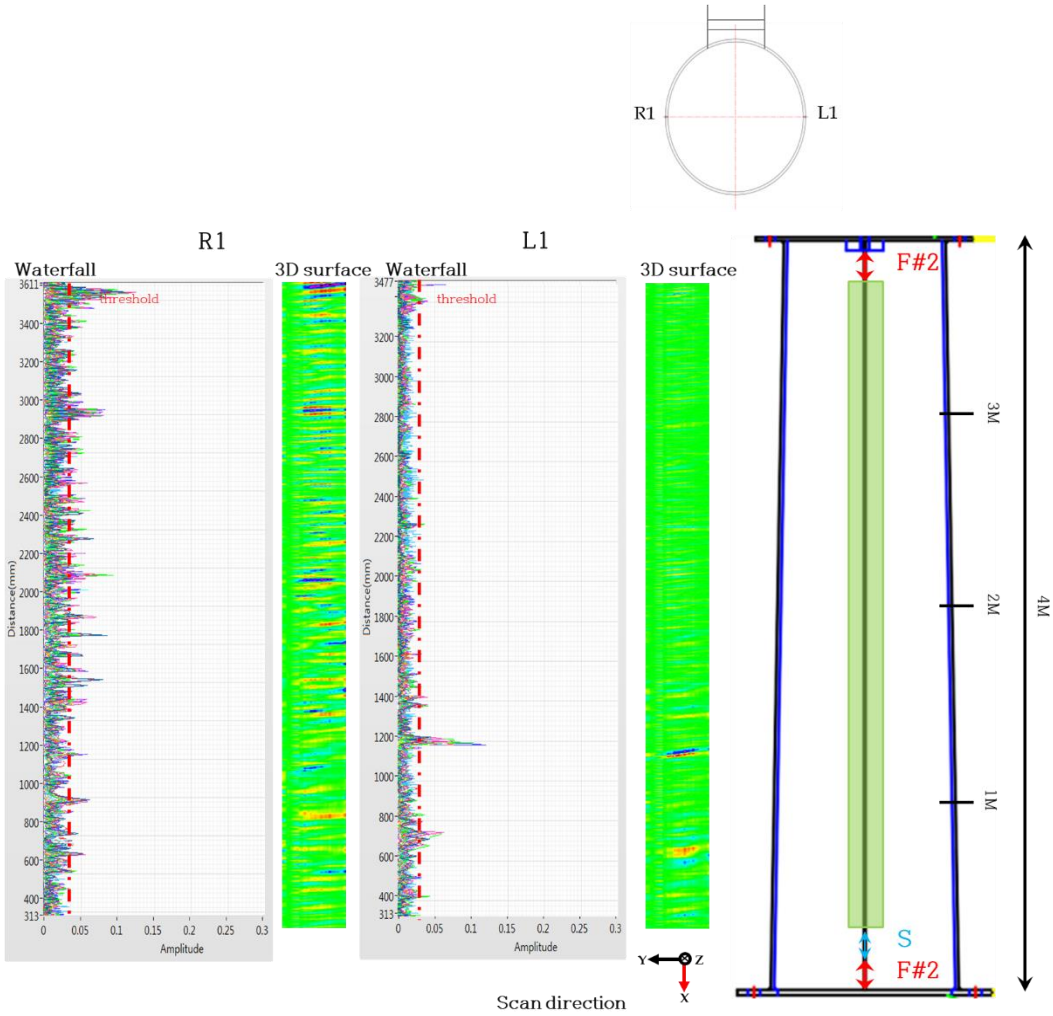


Fig. 4 -11 Circular-type R1, R2 welding line experiment result (Reverse scan)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 초음파검사와 비교

Fig. 4 -12는 실물 결함 시험편에서 센서스캐너에 의하여 역방향으로 측정한 자속밀도분포를 나타낸다. 용접선(X축 방향)을 따라서 측정하였으며, 30, 150, 240mm 부근에서 이상 신호를 검출하였다. Fig. 4 -13은 자속밀도분포 특이점과 용접부 결함과의 상관관계를 확인하기 위한 초음파검사의 개요를 나타낸다. 60° 경사형 탐촉자에 의하여 루트부 토우를 경유하여, 용접부 침투부위를 관통하는 초음파 전파 궤도를 선택하였다. 루트부 토우, 그루브와 루트부 경계, 크라운 직하 즉 전단 립이 발생했던 지점을 각각 빨강, 파랑, 노랑색의 점으로 표시하였다.

Fig. 4 -14의 종축은 시간축을 나타내며, 표면으로부터 거리로 환산한 결과를 별도로 표시하였다. 전반적으로 그루브와 루트부 경계 부근에서 용입불량으로 추정되는 X축 방향으로 연속적인 결함 신호가 나타나고 있다. 자속밀도분포가 급격히 변화한 #1, #2, #3, #4, #7에서 초음파 결함 신호가 발생하였다. 그러나, 초음파 결함 신호가 다수 발생한 450~650mm 영역에서는 상대적으로 약한 자속밀도분포의 변화가 검출되었다. 한편, 초음파 결함신호가 발생하지 않은 #6은 자속밀도분포의 변화가 거의 없었다. #1~7의 각 위치에서 Y축 방향으로 5mm 간격으로 초음파 프로브를 이동하면서 B-scan한 결과를 Fig. 4 -15에 나타낸다. 사선으로 표현한 부분은 각각 루트 면와 크라운 표면의 추정위치를 나타낸다. 또한, #1~7의 각 위치에서 자속밀도분포와 비교한 결과, 자속밀도분포의 급격한 변화가 발생한 영역(#1, #2, #3, #4, #7)에서 초음파 결함신호도 동반하여 변화하고 있음을 알 수 있다. 다만, #5의 경우에는 초음파로 검출된 결함 신호가 자속밀도분포와 연관성을 가지고 있지는 않았다. 이는 작은 결함이 넓은 영역에 분포하여 오히려 잔류응력이 완화되었기 때문으로 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

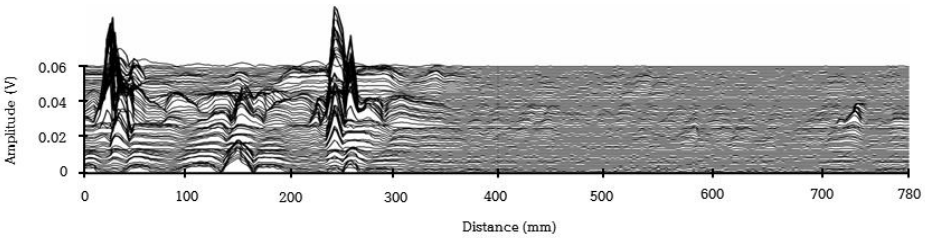


Fig. 4 -12 Distribution of magnetic flux density in welded specimen #1

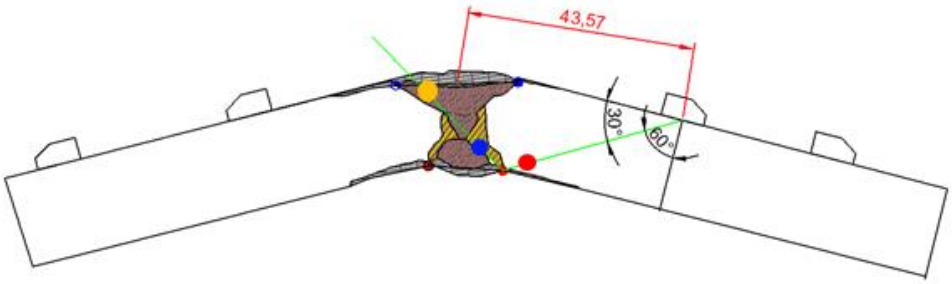


Fig. 4 -13 Ultrasonic schematic of welded specimen

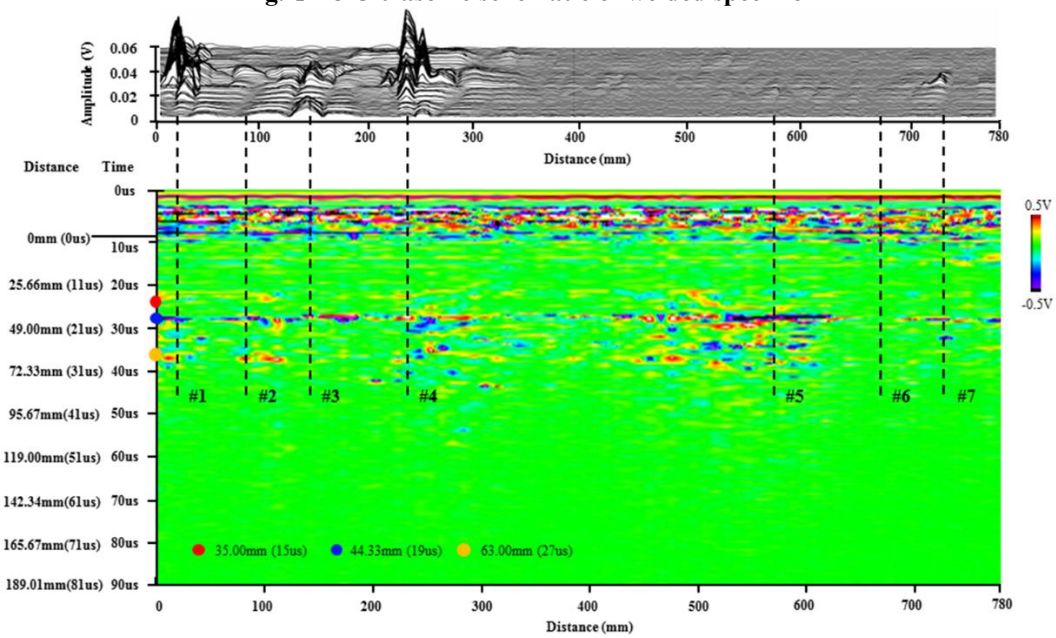


Fig. 4 -14 Experiment results of ultrasonic B-scan measured in the welding line direction

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

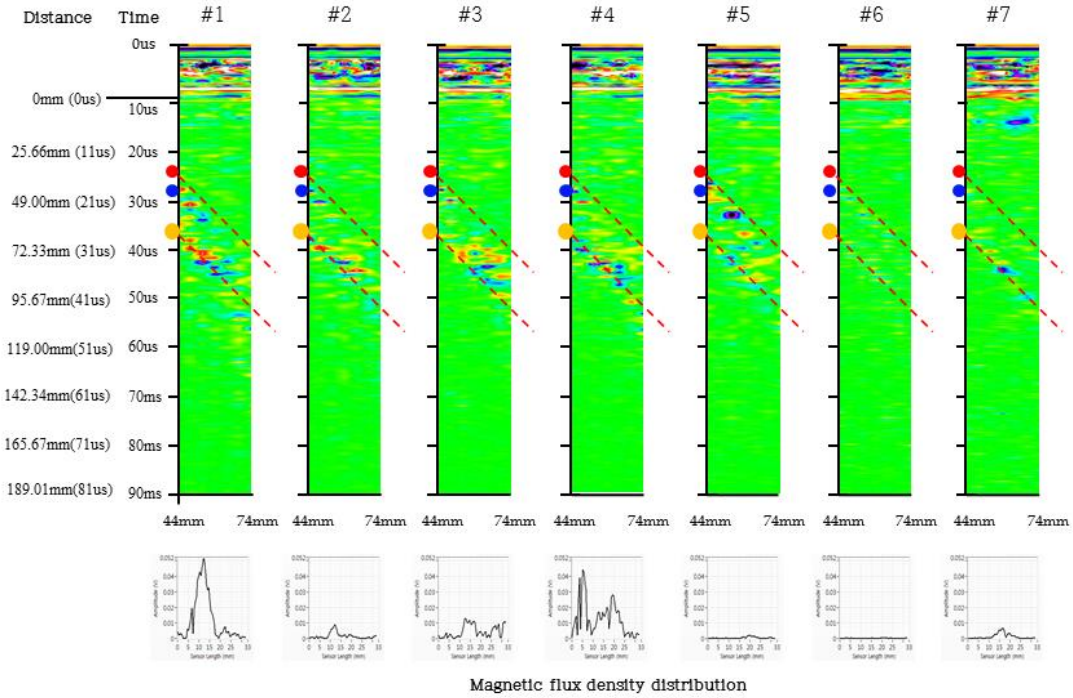


Fig. 4 -15 Experiment results of A-scan at specific locations

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 볼트체결부 모사 시험편 실험

1. 실물 결함 시험편 실험 및 고찰

Fig. 4 -16은 볼트체결부 기계적 열화 측정시스템의 유용성을 검증하기 위한 KS B 1002 규격볼트(M52, M48, M42)의 건전, 인공결함 및 열화 볼트 시험편 형상을 나타낸다. 건전시험편이란 구매한 신품의 상태를 의미하며, 인공결함은 볼트헤드와 몸통이 잇닿는 부분을 와이어커팅에 의하여 절단함에 있어서, 지그재그 형태로 결함을 도입하였다. 또한, 열화 시험편은 실제 현장에서 파손되어 교체된 볼트시험편이다. D, L, H, Ø는 Fig. 4 -16에 나타낸 바와 같이 볼트머리의 최단 길이 및 높이, 볼트 전체 높이, 그리고 몸통 직경 치수이다. 자세한 볼트의 크기는 Table 4-2에 나와 있다.

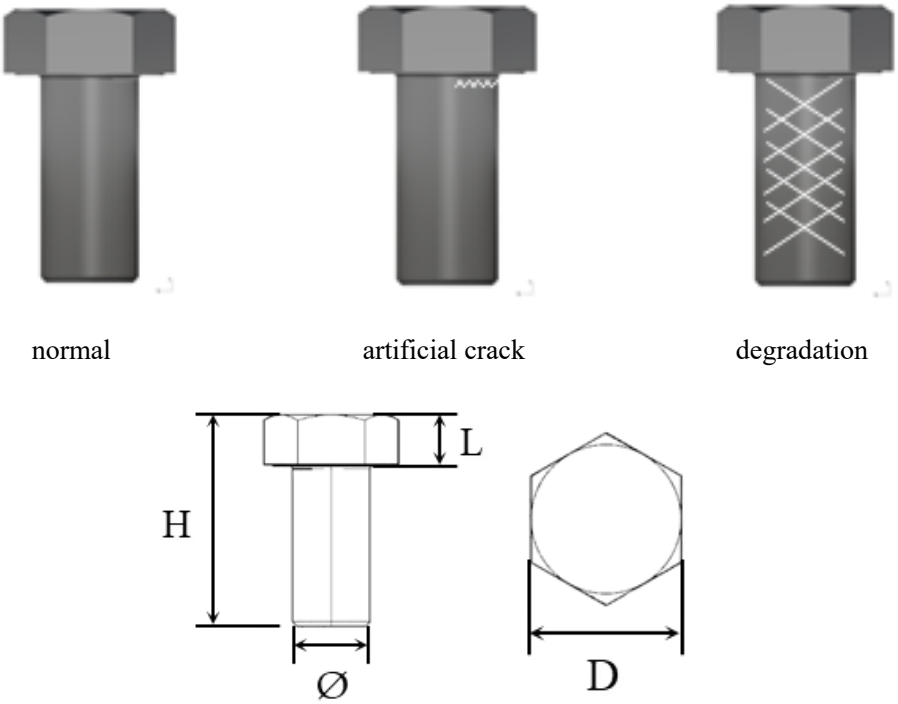


Fig. 4 -16 Defect shape of bolt specimens

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4 -2 Size of bolt specimens

시험편				
	normal	artificial crack	degradation ⓐ	degradation ⓑ
D	78.2mm	74.8mm	64.6mm	75.4mm
L	36.2mm	30.4mm	26.8mm	30.6mm
H	181.5mm	180.4mm	75.5mm	165.6mm
Ø	51.7mm	47.7mm	41.7mm	47.8mm
수량	7	1	1	1
Type	M52	M48	M42	M48
제작사	XYLX 8.8	XYLX 8.8	DW 8.8	D㈜J 8.8

Fig. 4 -17은 자기히스테리시스 측정용 센서에 의하여 상기 시험편에 펄스자계를 입력하고, 시간적으로 변화하는 코일신호의 출력을 나타낸다. 순간적으로 인가되었을 때 코일신호는 0.03ms 인근에서 피크가 존재한다. 건전시험편을 기준으로 인공결함 시험편 및 열화시험편은 보다 낮은 피크를 가진다. 또한, 최대값 피크의 위치도 오른쪽으로 이동한다. 이는 시험편에 순간적으로 인가되었을때의 자기히스

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

테리시스의 변화로 자화되는 시간 또는 속도를 알 수 있다. 건전시험편은 쉽게자화가 되고 인공결함 및 열화 시험편은 건전시험편보다 시간이 오래걸리고 자화되는 에너지가 많이 필요로 한다.

Fig. 4 -18은 Fig. 4 -17의 경향성을 바탕으로 제 3장에서 제시하였던 Max-Min rate 알고리즘을 통하여 분석하였다. 최대값(Max)과 최소감소율(Min rate)의 시간(index), 최대값(Max)과 최소감소율(Min rate)의 크기를 반영하는 넓이(area)를 활용하여 각각 횡축, 종축으로 지시하였다. 각 시험편당 30회씩 반복실험한 결과이다. 넓이는 양의 값을 가지지만, 임의로 음의 값으로 변환시켜서 그래프의 종축에서 위쪽으로 갈수록 자구의 이동을 방해하는 HMM으로 지시하였다. 또한, 횡축에서는 우측을 지시하는 값은 자기적인 반응속도가 느림을 의미하여, 마찬가지로 HMM임을 지시한다. 결과적으로 자연결함은 우측 상단을 지시하여 HMM화 되었음을 의미하며, 건전시험편은 좌측 하단을 지시하여 SMM임을 지시한다. 또한, 인공결함 시험편은 건전시험편보다 HMM쪽으로 치우치는 경향성을 보임을 알 수 있다. 따라서, 체결부 기계적 열화 측정시스템을 이용하면 피로 및 열화가 누적되어 전위밀도가 높아짐에 따라 건전 및 열화시험편은 확연히 구분이 가능하다. 하지만 인공결함의 경우 피로균열에 의해서 이미 전위밀도가 없어져 응력이 해소된 상태이므로 평가하기가 곤란하다. 그러나 본 논문에서 제시한 자기히스테리스의 변화를 이용하게 되면 건전 및 열화시험편에 차별화된 결과뿐만 아니라 피로균열이 생겼을 때의 인공결함도 관찰할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

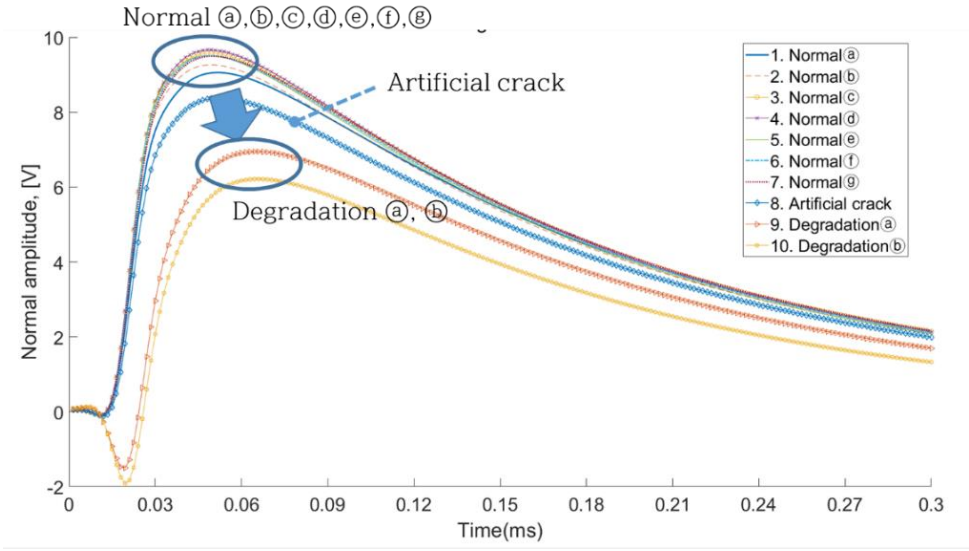


Fig. 4 -17 Experimental results of bolt specimens using magnetic hysteresis sensor

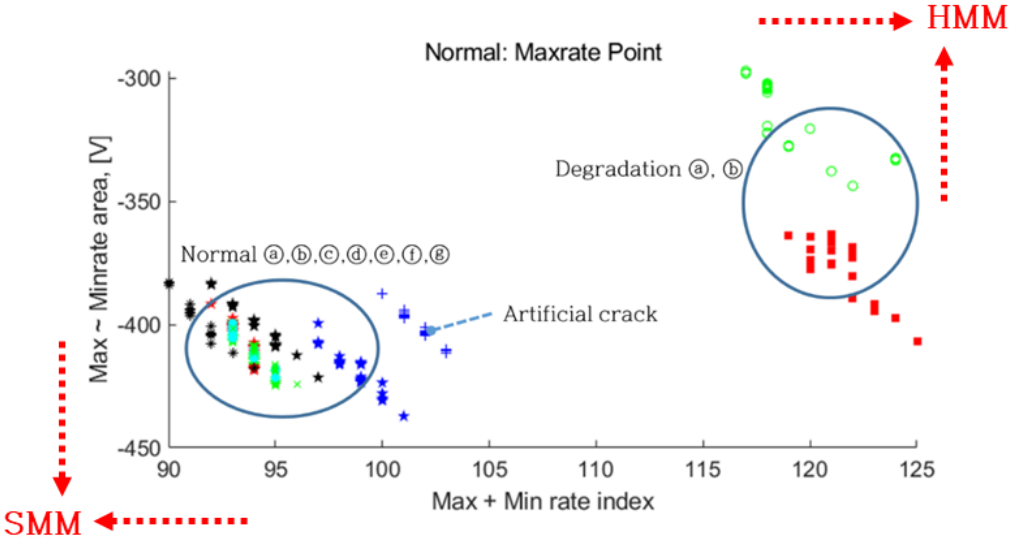


Fig. 4 -18 Algorithm results of bolt specimens using magnetic hysteresis sensor

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 목업시험편 실험 및 고찰

Fig. 4 -19는 관주형 송전탑 체결부의 자기히스테리시스를 측정하여 열화정도를 추정하기 위한 목업시험편을 나타낸다. 용접부와 동일한 목업시험편으로서 총 2단 구조로 되어 있으며, 제 1단은 4m, 제 2단은 2m로서 총 6m의 높이를 가진다. 또한, 제 1단과 제 2단은 총 20개의 볼트와 너트로 체결되어 있다. 체결된 볼트는 KS B 1002 규격 M48로서 볼트헤드가 지면을 향하여 고정되었다. 여기서 사다리를 기준으로 오른쪽 방향으로 R1 ~ R20으로 명명하였다.

Fig. 4 -19 Mock-up specimen standard bolt

Fig. 4 -20은 자기히스테리시스 센서를 목업시험편에 적용하여 실험하는 사진을 나타낸다. 검사시스템은 송전탑 하부 또는 리프트의 저면에 컨트롤박스와 컴퓨터를 설치하고, 사다리를 이용하여 송전탑 체결부의 볼트를 검사하였다. 한편, 관주형 송전탑에서는 R15에 이물질이 존재하고, 원주형 송전탑에서는 R13과 R17이 볼트가 탈락되어서 측정하지 못하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4 -20 Field experiment (bolted joints)

일단 목업시험편 실험에 앞서 보다 정확한 해석을 위하여 현장에서 자체적으로 교정실험을 진행하였다. 교정실험은 표준시험편(건전, 인공결함, 열화 등)에 의하여 진행되며 10번씩 반복실험한 결과를 바탕으로 건전 및 이상여부를 확인하였다. 따라서, 건전과 열화시험편이 구분 가능한 교정실험결과를 기준으로 관주형 및 원주형 목업시험편의 건전 및 이상위치를 평가하였다. Fig. 4 -21과 Fig. 4 -22에 나타낸 바와 같이 교정실험결과는 건전 및 인공결함 시험편은 좌하향 (SMM), 열화시험편은 우상향 (HMM)으로 지시되는 것을 관찰 할 수 있다. 또한, 보다 정확한 판별을 위하여 $y = -4.117x + b$의 기울기에 두개의 선을 임의로 threshold로 잡고 (1) $b \leq 128$를 건전경계로, (2) $b \geq 147$을 열화경계로 평가하였다. 즉, b가 128보다 작거나 같으면 건전한 볼트이고, b가 147보다 크거나 같으면 기계적 열화된 볼트로 추정할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

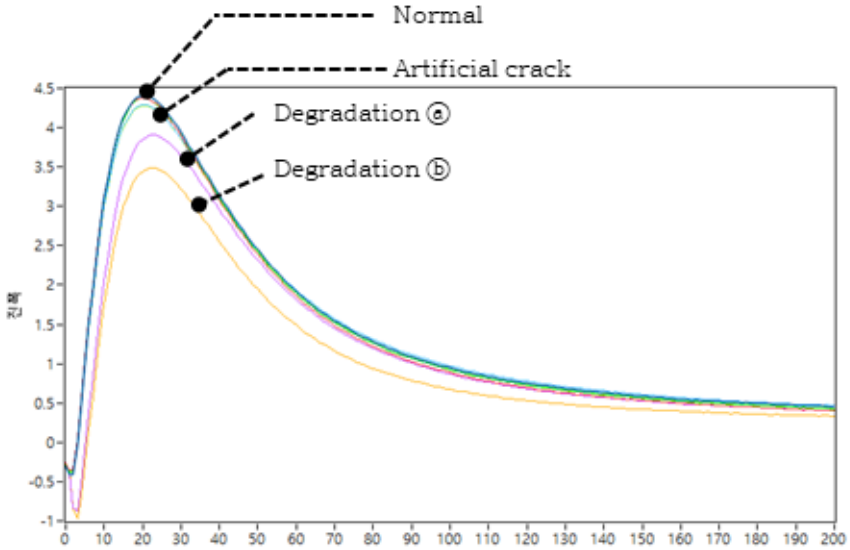


Fig. 4 -21 Magnetic hysteresis calibration method (sensor signal)

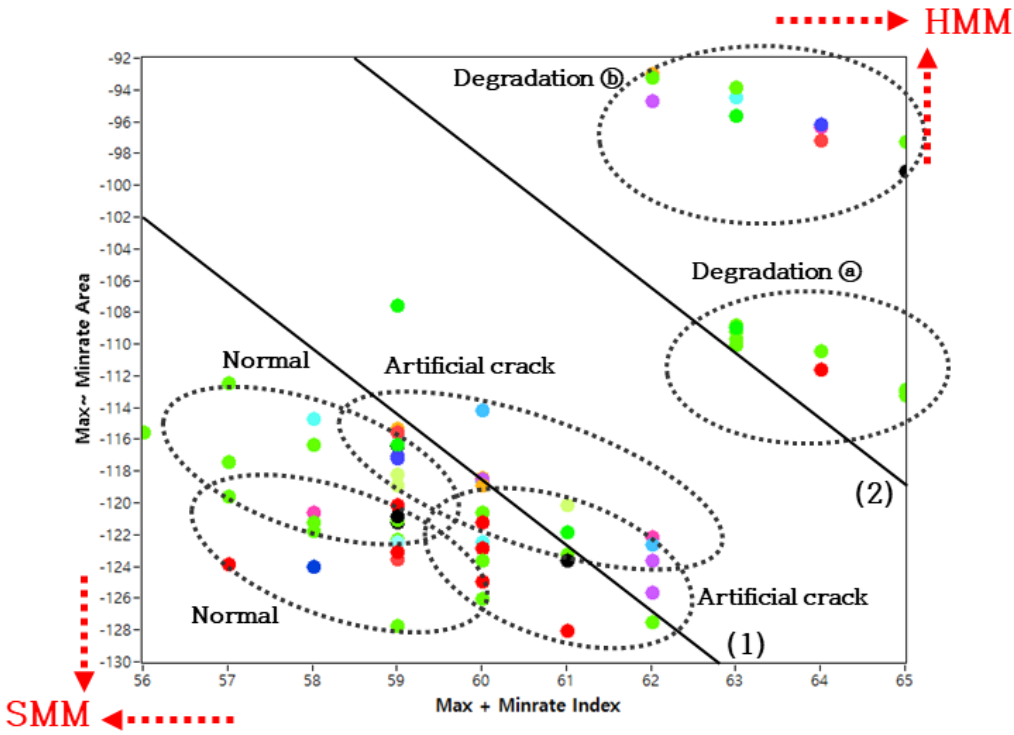


Fig. 4 -22 Magnetic hysteresis calibration method (algorithm)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4 -23은 관주형 목업시험편의 자기히스테리시스 센서에 의하여 측정된 신호를 나타낸다. 관주형 목업시험편 R1~R20개의 볼트중 R7과 R11 볼트가 다른 볼트보다 보다 낮은 피크를 가지며 최대피크의 위치도 동일하지 않다. Fig. 4 -24는 관주형 목업시험편의 Max-Min rate 알고리즘을 이용한 자기히스테리시스 실험결과를 나타낸다. 이 결과에서는 교정실험결과를 회색점으로 표기하여 기준을 잡았고, 그 위에 목업시험편 결과를 지시하였다. 동일한 범위안에서 교정실험결과 보다 전체적으로 우상향(HMM)으로 이동이 된 것을 볼 수 있다. 이는 목업시험편 볼트가 체결된 너트힘에 의하여 볼트 헤드부분에 응력이 집중된 것으로 판단된다. 또한, 체결된 볼트 중 R1, R11은 다른 볼트에 비하여 상향으로, R7은 우상향으로 지시가 되고 (2) b ≥ 147 열화경계로서 기계적 열화볼트로 추정할 수 있다.

Fig. 4 -25는 원주형 목업시험편의 자기히스테리시스 센서에 의하여 측정된 신호를 나타낸다. 원주형 목업시험편 R1~R20개의 볼트중 R9, R11 및 R12 볼트가 다른 볼트보다 보다 낮은 피크를 가지며 최대피크의 위치도 동일하지 않다. Fig. 4-26은 원주형 목업시험편의 Max-Min rate 알고리즘을 이용한 자기히스테리시스 실험결과를 나타낸다. 원주형 목업시험편의 체결된 볼트 중 R9, R11, R12 볼트가 다른 볼트에 비하여 상향으로 군이 형성되며, R15은 우향으로 지시하는 것을 볼 수 있으며 마찬가지로 열화경계로 판정할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

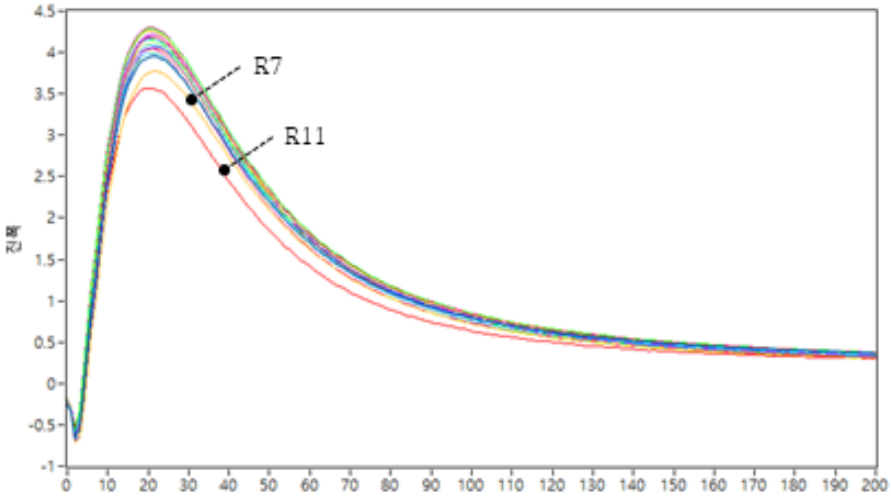


Fig. 4 -23 Experimental results of tubular type mock-up specimens

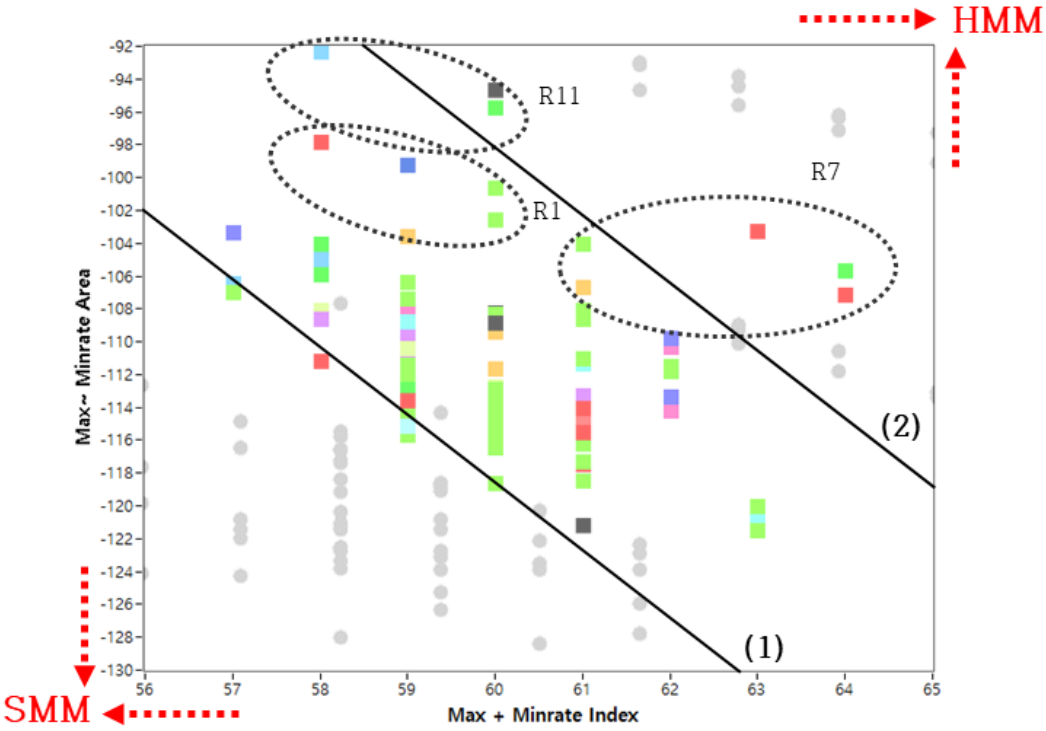


Fig. 4 -24 Algorithm results of tubular type mock-up specimens

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

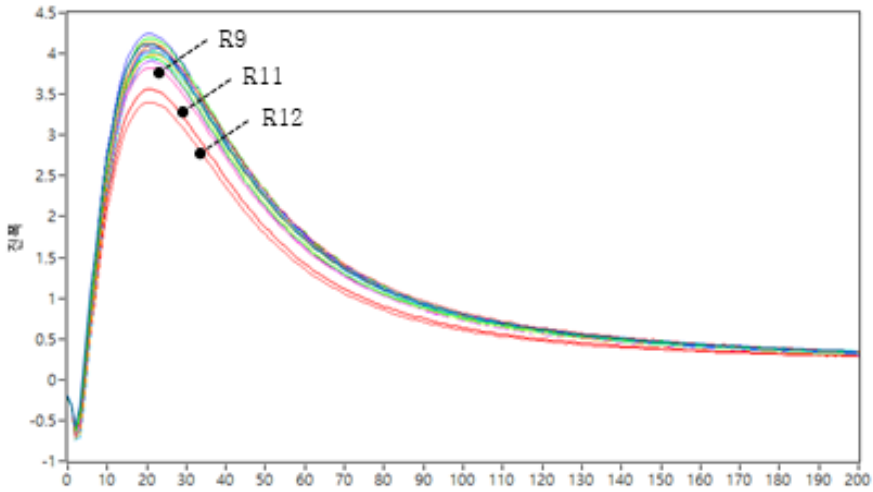


Fig. 4 -25 Experimental results of circular type mock-up specimens

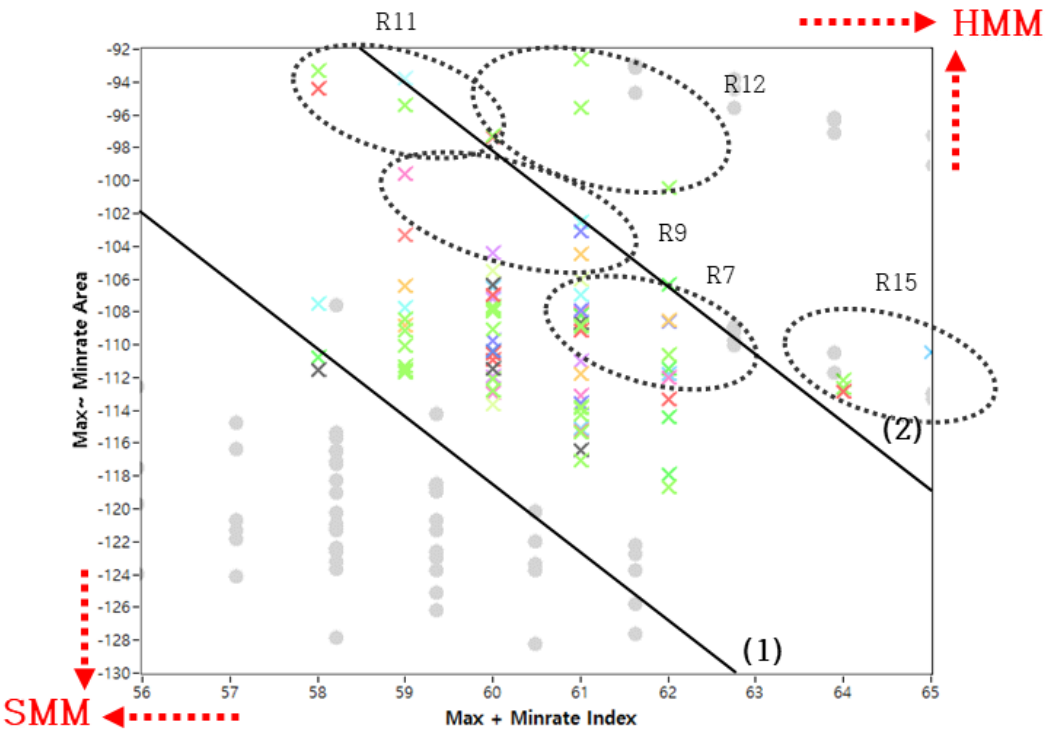
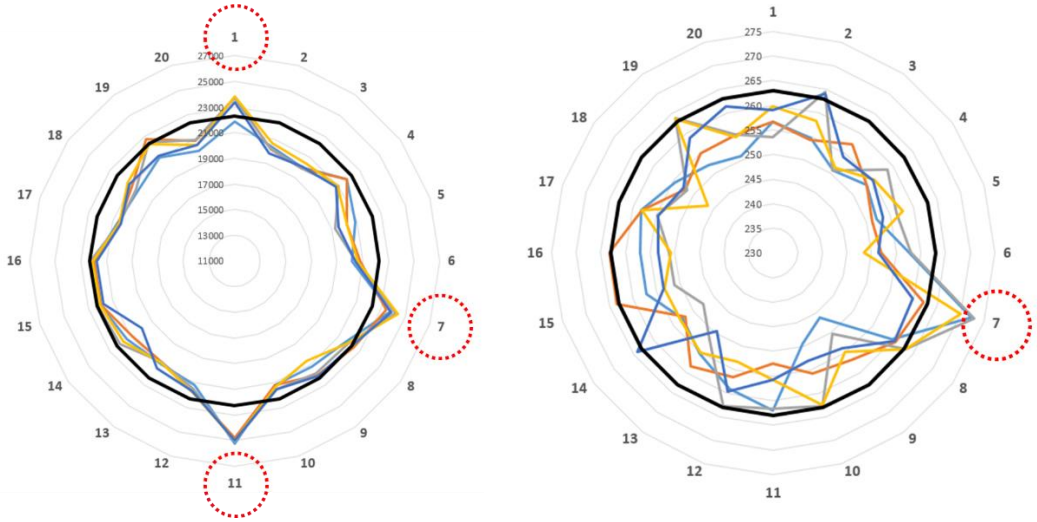


Fig. 4 -26 Algorithm results of circular type mock-up specimens

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

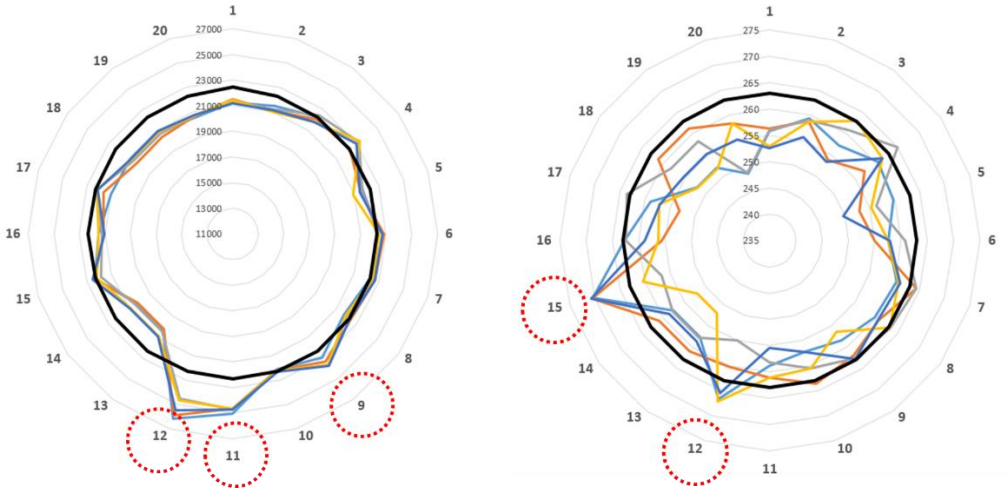
또한, Fig. 4 -24와 Fig. 4 -26 같이 알고리즘 결과에서 X축과 Y축의 면적 또는 기울기를 활용하면 명확하게 이상신호 구분이 가능하다. 상술한 알고리즘 결과들은 동일한 위치에 표현된 데이터라고 해도 X축과 Y축을 기준으로 차이가 존재한다. 또한, 각 데이터의 위치에 대한 면적 또는 원점에서부터 기울기를 계산하여 수식적으로 정의할 수 있다. 따라서, 다음 수식에 의하여 관주형 및 원주형 목업시험편의 이상신호를 Fig. 4 -27과 Fig. 4 -28 같이 표현할 수 있다. 최외각에는 원호방향으로 볼트의 순서가 나열되어 있고, 전체볼트의 데이터값에 대한 평균이 검정색 원형으로 나타내었다. 또한, 평균에서 벗어난 영역을 이상신호로 산출하여 판별하였다. (a)의 결과에 의하면 R1, R7, R11, (b)는 R7 볼트를 이상신호로 지시할 수 있다. 또한, Fig. 4 -28의 결과도 동일하게 적용하여 (a)는 R9, R11, R12, (b)는 R12, R15 볼트를 이상신호로 지시할 수 있다.



(a) $X \times Y$ (b) $\sqrt{X^2 + Y^2}$

Fig. 4 -27 Classification of abnormal signal for experiment results (Tubular-type)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) $X \times Y$ (b) $\sqrt{X^2 + Y^2}$

Fig. 4 -28 Classification of abnormal signal for experiment results (Circular-type)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 초음파검사와 비교

관주형 및 원주형 송전탑 목업시험편을 통하여 대형볼트의 펄스자계에 의한 자기히스테리시스를 측정하였다. 하지만 상술한 검사시스템은 자기히스테리시스의 변화를 측정하므로 실질적으로 노치가공된 결함의 평가가 확실하지 않다. 따라서 비교검증을 하기 위하여 초음파검사를 추가적으로 실험을 진행하였다. Fig. 4 -29는 표준 볼트시험편에 의하여 초음파 음속 및 길이를 교정한 결과를 나타낸다. 볼트 두께를 활용한 음속 실험에서 5900mm/s의 속도가 계산되었다. 해당 속도를 활용하여 볼트의 머리두께 및 중심거리를 실제길이와 측정한 결과, 1% 정도의 오차를 가지고 있음을 확인하였다.

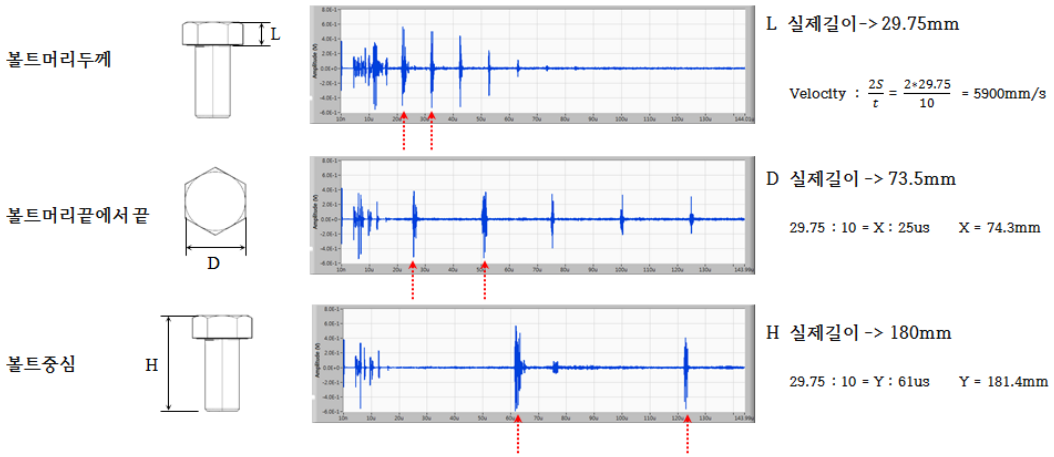


Fig. 4 -29 Calibration method for ultrasonic tesing

Fig. 4 -30과 Fig. 4 -31은 볼트와 몸통이 잇닿는 부분을 원주방향으로 회전하면서 각 위치에서 건전, 인공결함 및 열화시험편을 활용하여 초음파 검사한 결과를 나타낸다. 건전시험편의 글자가 각인된 부분 이외에는 전체 몸통 길이의 데이터가 측정됨을 알 수 있다. 열화 및 인공결함은 머리부분에서 첫 번째 반사파가 측정된다. 인공결함 시험편의 경우에는 건전시험편과 같이 반사파와 반사파의 사이가 명확하게 구분되지만, 열화시험편은 명확하게 구분되지 않음을 알 수 있다. 즉, 열화

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에 의하여 재질적인 불균일이 발생함을 알 수 있다. Fig. 4 -32는 목업시험편에 장착된 볼트의 초음파 검사 개요를 나타낸다. 4m 높이의 환경조건에 의하여 볼트의 중심에서 20mm 떨어진 지점에 탐촉자를 위치시킨 후 상부, 하부, 좌측, 우측를 검사하였다.

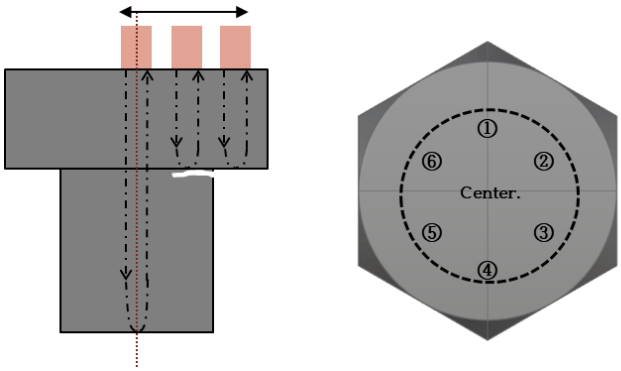


Fig. 4 -30 Position of the ultrasonic probe relative to the bolt specimen

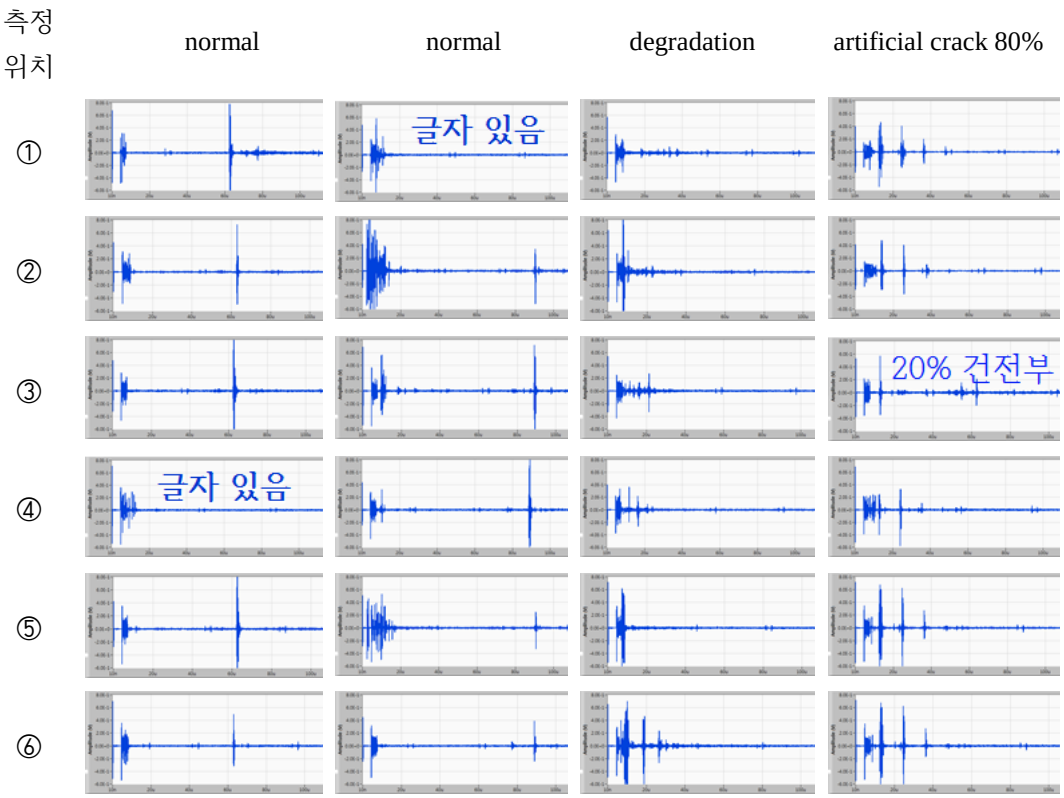


Fig. 4 -31 Ultrasonic tesing of bolt specimens

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

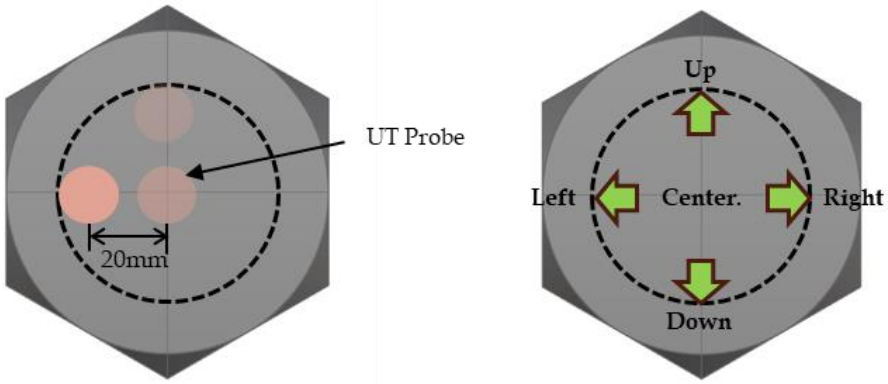
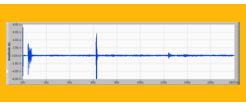
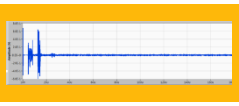
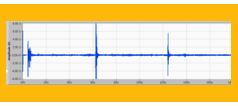
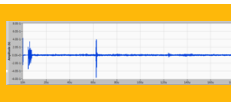
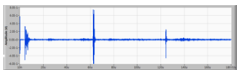
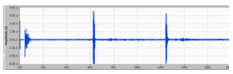
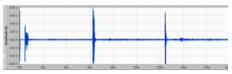
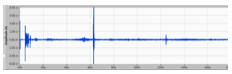
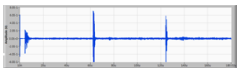
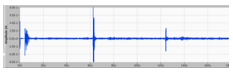
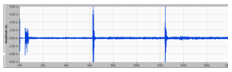
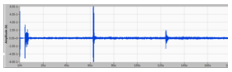
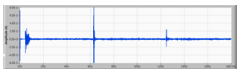
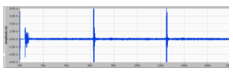
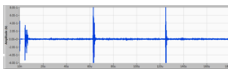
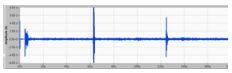
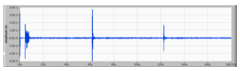
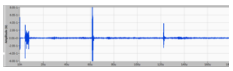
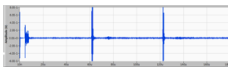
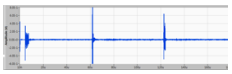
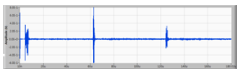
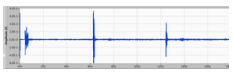
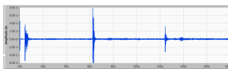
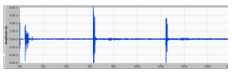
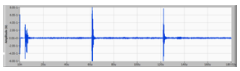
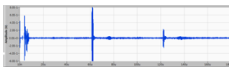
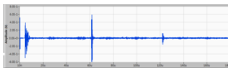
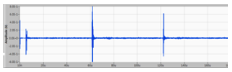
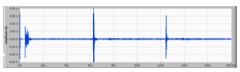
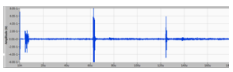
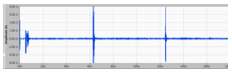
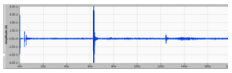
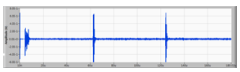
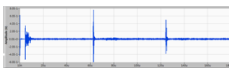
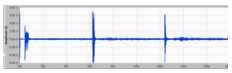
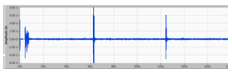
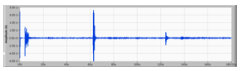
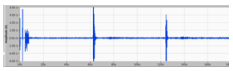
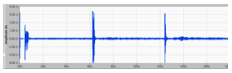
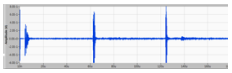
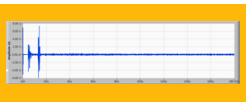
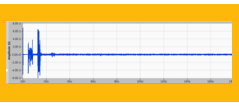
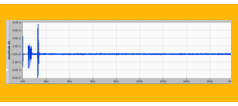
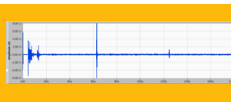
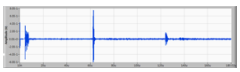
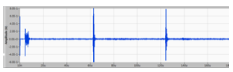
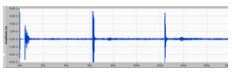
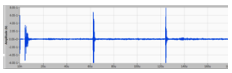
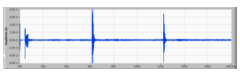
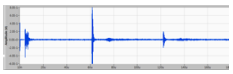
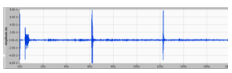
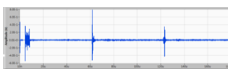
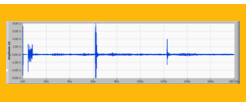
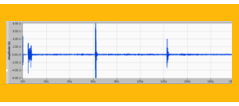
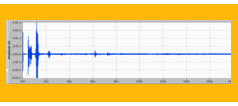
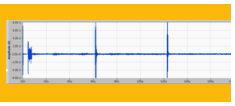


Fig. 4 -32 Measurement trajectory using ultrasonic testing of mock-up specimens

Fig. 4 -33은 목업시험편 초음파 검사 결과를 나타낸다. 초음파 검사는 글자각인이 적혀있지 않는 민자 볼트에 가능하기 때문에 관주형 및 원주형의 볼트 중 일부를 검사하였다. Table 4-4는 본 연구의 검사시스템에 의하여 측정한 판정결과 (Table 4-3)와 초음파 검사의 결과를 상호 비교한 결과이다. 초음파 검사를 통하여 비교검증한 결과 자기히스테리시스의 결과와는 상이하게 관주형 R01, R18, 원주형 R07, R11에서 이상신호를 지시하였다. 하지만 초음파 검사는 노치 결함을 검출하고 있으며, 열화를 측정하고 있지는 않다는 점이다. 초음파검사에 찾지 못했던 R18, R7은 실제적으로 목업시험편을 제작한 후 1년 정도 경과됨으로서, 노치 결함 부위에서 열화가 진전되고 있을 가능성이 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

볼트 번호	상부	하부	좌측	우측
관주 R01				
관주 R03				
관주 R04				
관주 R05				
관주 R07				
관주 R08				
관주 R11				
관주 R13				
관주 R16				
관주 R17				
관주 R18				
관주 R20				
원주 R03				
원주 R07				

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

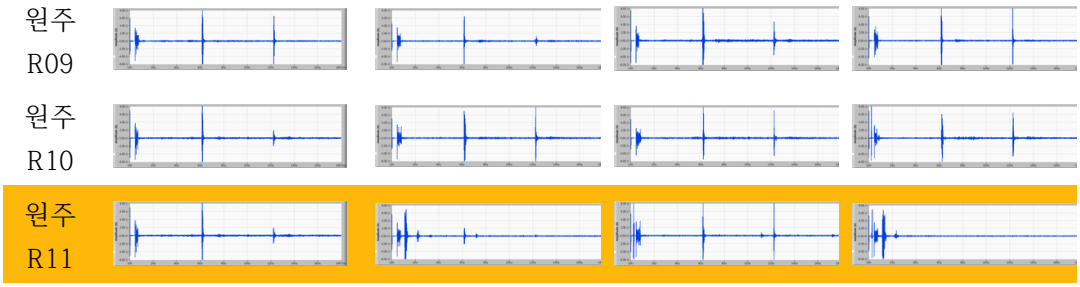


Fig. 4 -33 Ultrasonic testing experiment result of mock-up specimens

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4 -3 Magnetic hyteresis experiment result of mock-up specimenst

관주형 송전탑 체결부			원주형 송전탑 체결부		
볼트번호	측정여부	판정결과	볼트번호	측정여부	판정결과
R01	○	이상	R01	○	건전
R02	○	건전	R02	○	건전
R03	○	건전	R03	○	건전
R04	○	건전	R04	○	건전
R05	○	건전	R05	○	건전
R06	○	건전	R06	○	건전
R07	○	이상	R07	○	건전
R08	○	건전	R08	○	건전
R09	○	건전	R09	○	이상
R10	○	건전	R10	○	건전
R11	○	이상	R11	○	이상
R12	○	이상	R12	○	이상
R13	○	건전	R13	×	×
R14	○	건전	R14	○	건전
R15	×	×	R15	○	건전
R16	○	건전	R16	○	건전
R17	○	건전	R17	×	×
R18	○	건전	R18	○	건전
R19	○	건전	R19	○	건전
R20	○	건전	R20	○	건전

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4 -4 Magnetic hyteresis and ultrasonic testing comparison of mock-up specimens

관주형 송전탑 체결부					원주형 송전탑 체결부				
볼트번호	초음파 비교실험		자기이력 결과		볼트번호	초음파 비교실험		자기이력 결과	
	검사	판정	검사	판정		검사	판정	검사	판정
R01	○	YES	○	True	R01	×	-	○	건전
R02	×	-	○	건전	R02	×	-	○	건전
R03	○	No	○	True	R03	○	No	○	True
R04	○	No	○	True	R04	×	-	○	건전
R05	○	No	○	True	R05	×	-	○	건전
R06	×	-	○	건전	R06	×	-	○	이상
R07	○	No	○	False	R07	○	YES	○	Fail
R08	○	No	○	True	R08	×	-	○	이상
R09	×	-	○	건전	R09	○	No	○	False
R10	×	-	○	건전	R10	○	No	○	True
R11	○	No	○	False	R11	○	YES	○	True
R12	×	-	○	건전	R12	×	-	○	건전
R13	○	No	○	True	R13	×	-	×	×
R14	×	-	○	건전	R14	×	-	○	건전
R15	×	-	×	-	R15	×	-	○	건전
R16	○	No	○	True	R16	×	-	○	건전
R17	○	No	○	True	R17	×	-	×	×
R18	○	YES	○	Fail	R18	×	-	○	건전
R19	×	-	○	건전	R19	×	-	○	건전
R20	○	No	○	True	R20	×	-	○	건전

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결 론

전력 송배전 설비, 원자력 및 화력 발전소, 석유화학플랜트, 고속철도, 선박 등과 같은 대형기기 구조물은 제작이나 조립 시 용접을 이용한 모재의 접합과 대형볼트로 인하여 주요부품을 체결하는 방식을 사용한다. 하지만 용접 시 접합부위의 국부적인 가열 및 냉각에 기인한 재질변화, 변형 및 잔류응력이 존재할 수 있다. 또한, 발전설비의 주로 사용되는 체결용 대형볼트는 운전 시 진동, 충격 및 반복하중이 노출되고, 결과적으로 기계적 열화 및 피로균열이 발생할 수 있다. 이와 같이 대형기기구조물 조립 시 용접부 및 볼트 체결부에서 발생하는 재질변화, 부식, 열화 및 피로에 의한 손상으로 구조물의 일부가 파손될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 설계, 시공 및 경년열화로 인하여 구조물의 용접부 및 볼트체결부에서 발생할 수 있는 결함 및 손상을 조기 진단할 수 있고, 넓은 영역에서 고속, 고분해능 및 고감도로 검사가 가능하며, 종래의 비파괴검사방법의 한계를 극복하고, 검사결과를 보존할 수 있으며, 해외제품의 의존도를 줄일 수 있는 국산 원천기술에 의한 비파괴검사법을 적용하여 대형기기 구조물의 건전성 평가하는 것을 목적으로 한다.

대형기기 구조물의 건전성을 평가하기 위하여 용접부에서 발생하는 결함의 유형을 파악하고, 응력변화가 자속밀도분포에 미치는 영향을 이론적으로 제시하였다. 또한, 외부하중 또는 자기장 인가에 따른 용접부 단면의 실험적 고찰을 통하여 용접부에 내재된 응력집중구역 및 잔류응력을 파악하였다. 이러한 이론 및 실험적 고찰을 바탕으로 대형기기 구조물 즉, 관주형 송전탑 검사시스템을 제작하였다. 검사시스템은 쉐브론형태의 검사대상체를 고려한 스캐너와 고감도 반도체기반 자기센서, 병렬형 다중채널 신호처리장치, 데이터 수집 및 해석 소프트웨어로 구성된다. 센서는 32개 채널로 1.2mm 간격으로 배열되어 있으며 엔코더에 의하여 0.78mm 간격으로 용접부를 따라 측정할 수 있다. 또한, 용접부의 자속밀도분포는 차분해석, 경향제거, 고속 푸리에 변환, 가버 변환과 같은 신호처리기법을 적용하여 활용하였

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 검사시스템에 의하여 실물결함시험편 및 목업시험편을 측정한 결과 자속밀도분포가 크게 변화하는 지점에서 용접결함에 의한 잔류응력을 지시할 수 있다. 또한, 초음파 검사를 통하여 비교검증 하였으며 용접부에서 발생한 이상신호를 동일한 위치에서 관찰할 수 있었다. 따라서, 용접부 검사 시스템에 의하여 용접부의 자속밀도분포 변화를 주기적으로 관찰하고 특정영역에서의 정밀검사가 이루어진다면 보다 신속하게 구조물의 건전성을 평가할 수 있다.

한편, 볼트체결부의 경우 체결력이 약해지는 원인과 더불어 발생할 수 있는 결함의 유형을 파악하였다. 또한, 반복 하중에 의한 기계적 열화가 자기히스테리시스에 미치는 영향을 이론적으로 고찰하였다. 제조과정에서 발생하는 재질의 불균일성 및 장기간 사용에 따른 시험편의 열화와 피로는 자구의 형상과 분포를 변화시켜서 자기히스테리시스의 왜곡을 유발한다. 또한, 이러한 이론적 접근의 타당성을 검증하기 위하여 펄스형 자계인가장치, 자속밀도의 시간변화를 측정할 수 있는 센서 및 신호처리회로로 구성되는 펄스형 자기히스테리시스 검사시스템을 시제작하였다. 펄스형 자계를 볼트 시험편에 가했을 때 순간적으로 측정되는 코일신호를 통하여 자기히스테리시스 변화를 관찰하였다. 검사시스템에 의하여 반복된 실험결과로부터 도출한 Max-Min rate 알고리즘을 통하여 시험편에 대한 건전성을 평가하였다. 건전과 열화시험편의 정확한 판별을 위하여 동일한 기울기에 두 개의 선을 임의로 threshold로 잡고 건전-열화의 경계로 평가하였다. 표준시험편을 통한 교정실험을 진행을 하고 관주형 및 원주형 목업시험편의 이상여부를 파악하였다. 또한, 초음파 검사를 통하여 비교검증한 결과 서로 상이된 결과로 나타나지만 초음파 검사는 노치 또는 피로균열을 측정하고 있고 자기히스테리시스의 방법은 균열이 나기 직전에 기계적 열화를 측정할 수 있다는 점에서 다르다. 따라서, 볼트체결부 검사 시스템에 의하여 순간적으로 관찰되는 자기히스테리시스의 변화는 볼트의 기계적 열화를 추정할 수 있고 구조물의 체결부를 전처리 및 후처리과정 또는 접촉매질 없이 건전성을 평가할 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

REFERENCE

[1] 김동현, 정희영, 김주우, "강교량의 부식 및 파손에 대한 수명평가", *산업기술연구소 논문집*, Vol. 14, pp.103-109, 2006

[2] 조광일, 박찬희, 성택룡, 박용명, "내후성강재의 강교량 적용기술 개발.", *한국강구조학회지*, Vol. 27, No.4, pp.42-46, 2017

[3] 대형 구조물 정밀 안전진단 기술개발 최종보고서, 한국기계연구원, 과학기술부, 1998

[4] 대형 용접구조물의 피로수명 예측기술 개발 보고서, 한국기계연구원, 과학기술부, 2004

[5] 이윤희, 안정훈, 최열, 손동일, 장재일, 권동일. "최신 압입시험기를 이용한 산업설비의 비파괴 안전진단.", *Proceedings of the Korean Institute of Industrial Safety Conference*, pp.9-16, 2000

[6] 무인 검사 장비를 활용한 대형구조물 진단 및 원격 관리 시스템 개발기획 사업보고서, 국토교통과학기술진흥원, 2016

[7] http://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/at_pg.aspx?CNTN_CD=a0002044949&isPc=true

[8] https://web.archive.org/web/20131112144146/http://imnews.imbc.com//20dbnews/history/1994/1940908_6142.html

[9] http://www.djenews.co.kr/news/articleView.html?idxno=2979

[10] 154kV 풍세분기 T/L 관주형 철탑 절손 원인규명 조사 보고서, 한국전력공사 전력연구원, 2012

[11] Han, R., Song, Y. G., Zhang, D. T., Wang, R. F., Zheng, Y. F., & Li, L., "Numerical Simulation of Tube-Plate Welding Structure with T-Shaped Sections.", *Advanced Materials Research* , Vol. 1061, pp. 475-480, 2015

[12] Golonka Sr, Kenneth A., and Gary Spiegelberg., "Power supply for SMAW welding and stud

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

welding." U.S. Patent No. 4, pp. 241,285, 1980.

[13] Choi, K. H., Kim, J. Y., Kim, H. J., Yang, H. K., & Park, J. C., "Effect of dielectric layer in ZnO/dielectric/Si layered structure on GSAW and HVPSAW propagation properties." , *IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium,* Vol. 1, pp. 353-356, 2010

[14] Yang, L. J., Bibby, M. J., Chandel, R. S., "Linear regression equations for modeling the submerged-arc welding process." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 39, No. 1-2, pp. 33-42, 1993

[15] Radaj, Dieter. *Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion*. Springer Science & Business Media, 2012.

[16] Venkatraman, B., Menaka, M., Vasudevan, M., & Raj, B., "Thermography for online detection of incomplete penetration and penetration depth estimation.", *Proceedings of Asia-Pacific Conference on NDT*, 2006

[17] Lei, F., Shujun, C., & Shuyan, Y., "Mechanism of undercut phenomenon in high speed welding.", *Transactions of the China Welding Institution*, Vol. 20, Issue1, 1999

[18] Nacereddine, N., Zelmat, M., Belaifa, S. S., & Tridi, M., "Weld defect detection in industrial radiography based digital image processing.", *Transactions on Engineering Computing and Technology*, Vol.*2*, pp.145-148., 2005

[19] Kasban, H., Zahran, O., Arafa, H., El-Kordy, M., Elaraby, S. M., & El-Samie, F. A., "Welding defect detection from radiography images with a cepstral approach", *Ndt & E International*, Vol.*44, Issue* 2, pp.226-231, 2011

[20] Pastor, M., Zhao, H., Martukanitz, R. P., & Debroy, T., "Porosity, underfill and magnesium lose during continuous wave Nd: YAG laser welding of thin plates of aluminum alloys 5182 and 5754.", *Welding Journal-New York-*, Vol.78, pp.207-s.

[21] Itoh, Y. Z., Suruga, S., & Kashiwaya, H., "Prediction of fatigue crack growth rate in welding residual stress field.",*Engineering Fracture Mechanics"*, Vol.*33, Issue* 3, pp.397-407, 1989

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[22] 나환선, 이현주, "고력볼트 접합부표면의 방식도장변수에 따른 체결력 평가.", *Corrosion Science and Technology*, Vol. 11, No.2, pp.48-55, 2012

[23] 한종욱, & 박영석. "고장력볼트의 인장피로강도에 관한 실험적 연구." *대한토목학회논문집 A*, Vol. 28, No 2, pp.165-170, 2008

[24] 이승용, & 경갑수. "고장력볼트 마찰이음의 합리적 설계 및 시공에 관한 연구." *대한토목학회논문집 A*, Vol. 26, No 3, pp.513-521, 2006

[25] 김성훈, 이승용, 최준혁, & 장동일. "고장력 볼트 이음부의 내부 압축응력 분포." *한국강구조학회 논문집*, Vol. 9, Issue 2, pp. 171-179, 1997

[26] http://www.incosys.co.kr/index.php?option=com_content&view=article&id=561&Itemid=1662

[27] Gil, D. S., Ahn, Y. S., & Park, S. K. "Evaluation for mechanical hardness of gas turbine rotor bolt according to deterioration of specimen." *Journal of the Korea Society For Power System Engineering*, Vol. 15, Issue 4, pp. 19-24, 2011

[28] 김용, 박기영, & 곽성복. 차체 소재 다변화에 따른 체결 및 접합기술. *대한용접·접합학회지*, Vol. 33, Issue 3, pp. 12-18, 2015

[29] 이진이, and 전종우. "IT 융복합 NDT 기술과 자기카메라." *Proceedings of KIIT Conference*, 2010

[30] 이진이, 심순보, and 김세진. "원자력발전소 열교환기 튜브의 비파괴검사를 위한 제 4 세대 와전류탐상법." *비파괴검사학회지*, Vol. 38, Issue 4, pp. 240-249, 2018

[31] 박주현, 이호용, 왕다빈, 황영하, 도화식, & 이진이. "보빈형 홀 센서 배열을 이용한 강자성체 전열관의 비파괴검사." *비파괴검사학회지*, Vol. 39, Issue 4, pp. 209-216, 2019

[32] Raj, B., Subramanian, C. V., & Jayakumar, T. "Non-destructive testing of welds.", 2000

[33] da Silva, R. R., Siqueira, M. H., de Souza, M. P. V., Rebello, J. M., & Calôba, L. P. "Estimated accuracy of classification of defects detected in welded joints by radiographic tests." *NDT & e International*, Vol. 38, Issue 5, pp. 335-343, 2005

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[34] Reid, D. J. "Ultrasonic Testing of Bolts and Pins: Longitudinal Beam Review." *The NDT Technician*, Vol. 15, Issue 1, pp. 1-6, 2016

[35] Fromme, P., Wilcox, P. D., Lowe, M. J., & Cawley, P. "On the development and testing of a guided ultrasonic wave array for structural integrity monitoring." *ieee transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 53, Issue 4, pp. 777-785, 2006

[36] Zolfaghari, A., & Kolahan, F. "Reliability and sensitivity of visible liquid penetrant NDT for inspection of welded components." *Materials Testing*, Vol. 59, Issue 3, pp. 290-294, 2017

[37] Holly Lemire, P.R. Underhil, T.W. Krause, "Applying POD to Improve Bolt Hole Eddy Current Inspection", *4th European-American Workshop on Reliability of NDE*, pp.1-6, 2016

[38] 이창준, 이규성, 신충호, 이경준, & 장윤영. (2016). "Flexible ECA Probe 를 이용한 평판 및 용접부 검사." *비파괴검사학회지*, Vol. 36, Issue 4, pp. 288-294, 2016.

[39] Choe, E., Na, S., Le, M., Kim, J., Nam, Y., Yang, D., & Lee, J. "Nondestructive Inspection of Welds on Pipe Using Scan-type Magnetic Camera." In *ASNT Annual Conference 2017* , pp. 111-114, 2017

[40] 무인 검사 장비를 활용한 대형구조물 진단 및 원격 관리 시스템 개발기획 사업보고서, *국토교통과학기술진흥원*, 2016

[41] Umemoto, M., Tsuchiya, K., Liu, Z. G., & Sugimoto, S. "Tensile stress-strain analysis of single-structure steels." *Metallurgical and materials Transactions A*, Vol. 31, Issue 7, pp. 1785-1794, 2000.

[42] Jha, D. K., Kant, T., & Singh, R. K. "An accurate two-dimensional theory for deformation and stress analyses of functionally graded thick plates." *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, Vol. 6, Issue 2, 2014

[43] Chen, J., & Young, B. "Stress–strain curves for stainless steel at elevated temperatures." *Engineering Structures*, Vol. 28, Issue 2, pp. 229-239, 2006

[44] Coules, Harry E. "Characterising the effects of high-pressure rolling on residual stress in structural steel welds.", 2012

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[45] Soul, F., & Hamdy, N. "Numerical simulation of residual stress and strain behavior after temperature modification." *Welding Processes*, 2012

[46] Sun, M. C., Sun, Y. H., & Wang, R. K. "Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel." *Materials Letters*, Vol. 58, Issue 7-8, pp. 1396-1399, 2004

[47] Syahroni, N., & Hidayat, M. I. P. "3D finite element simulation of T-joint fillet weld: Effect of various welding sequences on the residual stresses and distortions." In *Numerical Simulation-From Theory to Industry*. IntechOpen, 2011

[48] Masubuchi, K. "Analysis of welded structures: residual stresses, distortion and their consequences, 1980.", Vol. 33, 2013

[49] D'yachenko, S. A., Kovalenko, V. F., Tanygin, B. N., & Tychko, A. V. "Influence of the demagnetizing field on the structure of a Bloch wall in a (001) plate of a magnetically ordered cubic crystal." *Physics of the Solid State*, Vol. 50, Issue 1, pp. 32-42, 2008

[50] Le, M., Park, J., Kim, J., Jung, G., & Lee, J. "Nondestructive Testing of Welding Defects in a Tubular-Type Transmission Tower using Magnetic Imaging with Magnetic Sensor Array." *Materials Evaluation*, Vol. 76, Issue 6, pp. 853-861, 2018

[51] Kim, J., Le, M., Park, J., Seo, H., Jung, G., & Lee, J. "Measurement of residual stress using linearly integrated GMR sensor arrays." *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, Issue 2, pp. 623-630, 2018

[52] SAKAI, Tomotugu. "Investigations of bolt loosening mechanisms: 1st report, on the bolts of transversely loaded joints." *Bulletin of JSME* 21, Vol. 21, No 159, pp. 1385-1390, 1978

[53] Huda, F., Kajiwara, I., Hosoya, N., & Kawamura, S. "Bolt loosening analysis and diagnosis by non-contact laser excitation vibration tests." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 40, Issue 2, pp. 589-604, 2013

[54] Friede, R., & Lange, J. "Loss of preload in bolted connections due to embedding and self loosening." *Proc. Stability and ductility of steel structures (SDSS'Rio 2010)*, pp. 287-293, 2010

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[55] Steinbock, Rolf H. "Method for maintaining a clamping force between bolted parts in high temperature." U.S. Patent No. 6381827B1, May 2002.

[56] Milan, M. T., Spinelli, D., Bose Filho, W. W., Montezuma, M. F. V., & Tita, V. "Failure analysis of a SAE 4340 steel locking bolt." *Engineering Failure Analysis*, Vol. 11, Issue 6, pp. 915-924, 2004

[57] Speidel, M. O. "Stress corrosion cracking of aluminum alloys." *Metallurgical Transactions A*, Vol. 6, pp. 631-651, 1975

[58] Allen, T., Busby, J., Meyer, M., & Petti, D. "Materials challenges for nuclear systems." *Materials today*, Vol. 13, Issue 12, pp. 14-23, 2010

[59] Dowling, N. E. "Notched member fatigue life predictions combining crack initiation and propagation." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 2, Issue 2, pp. 129-138, 1979

[60] Gamboa, E., & Atrens, A. "Environmental influence on the stress corrosion cracking of rock bolts." *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, Issue 5, pp. 521-558, 2003

[61] Yasir, Ali S. "Study the effect of cooling rate on fatigue strength and fatigue life of heated carbon steel bars." *Mechanical Engineering Research*, Vol. 3, No. 2, 2013

[62] Molaei, S., Alizadeh, R., Attarian, M., & Jaferian, Y. "A failure analysis study on the fractured connecting bolts of a filter press." *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, Vol. 83, pp. 26-38, 2015

[63] Liao, X. Z., Zhou, F., Lavernia, E. J., Srinivasan, S. G., Baskes, M. I., He, D. W., & Zhu, Y. "Deformation mechanism in nanocrystalline Al: Partial dislocation slip." *Applied Physics Letters*, Vol. 83, Issue 4, pp. 632-634, 2003

[64] Dundurs, J., and T. Mura. "Interaction between an edge dislocation and a circular inclusion." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 12, Issue 3, pp. 177-189, 1964

[65] Healy, Con. "Plasticity of metallic nanostructures: molecular dynamics simulations.", 2014

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[66] Bullough, R., and John R. Willis. "The stress-induced point defect-dislocation interaction and its relevance to irradiation creep." *Philosophical Magazine* ,Vol. 31, Issue 4, pp. 855-861, 1975

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ackowledgements

지난 시간을 되돌아 보면 호기심에 들어왔던 연구실 생활을 하면서 석사졸업하게 됐고 조금 더 배우고 싶은 마음과 열정으로 박사과정을 진학하게 되었습니다. 박사과정을 하면서 정말 많은 노력을 했고 힘들때도 있었지만 연구실사람들끼리 서로 의지하며 버텨서 좋은성과를 이루었던 것이 기억납니다. 많은 사람들의 땀과 노력이 있어 저 또한 성장할 수 있었고 좋은 결실을 맺은 것 같습니다. 지금까지 대학원생활을 하면서 도움을 받았던 분들께 감사의 말씀을 드리고자 합니다.

먼저, 저의 부족했던 학위논문을 좋은논문이 될 수 있도록 학문적인 지도와 세심한 부분까지 아낌없이 가르침을 주신 이진이 교수님 감사드리고 바쁘신 가운데 저의 논문을 심사 및 평가 해주신 고낙용 교수님, 조창현 교수님, 이희종 교수님, 이호용 교수님께 감사의 말씀드립니다. 교수님들의 심사의견으로 논문작성하는데 많은 도움이 되었습니다. 그리고, 대학원과정 중 다양한 분야의 학문지식을 넓혀주신 최한수교수님 반성범교수님 곽근창교수님을 비롯하여 제어계측공학과 모든 교수님들께 감사의 말씀드립니다.

또한, 논문 관련된 시스템 개발에 도움을 주신 에이스이엔지 정진철 사장님, ES정밀 김기주사장님 감사드리고 실물 시험편 제공과 더불어 목업시험편의 검사를 하게 해주신 정계조 부장님, 박상기 부장님, 전력연구원 관계자 분들께 다시 한번 감사의 말씀드립니다.

7년동안 연구실생활을 함께한 순보, 세진이형, 은호형, 다빈이을 비롯하여 많은 사람들 다들 고생했던 만큼 다 잘되었으면 좋겠습니다. 또 지금 함께하고 있지는 않지만 부족했던 나를 항상 믿고 따라준 희준이, 민우, 동철이, 윤관이 고마웠다. 또한, 힘들 때 언제나 부르면 나와서 격려해주는 내 친구 병수, 승원이, 영우, 각자의 길에서 열심히 하고 있는 다른 친구들, 후배들, 선배들 하나하나 이름은 새기지 못하지만 감사하게 생각합니다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

끝으로 언제나 옆에서 응원해주시고 길었던 대학원생활을 잘이겨낼 수 있게 해주신 아버지, 어머니 감사하고 사랑합니다. 그리고 지금은 조카 키우느라 바쁘고 결혼해서 많이보긴 힘들지만 따뜻한 조언해주는 형, 형수님에게도 감사의 인사를 전합니다.

2020년 1월
박주현 올림