



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](#)

2021년 8월  
박사학위 논문

전자기적 방법을 이용한 배관  
용접부의 대체 표면 비파괴검사  
기술 개발

조선대학교 대학원

제어계측공학과

최 은 호

# 전자기적 방법을 이용한 배관 용접부의 대체 표면 비파괴검사 기술 개발

Development of Alternative Surface Non-Destructive  
Evaluation Technique Based on Electromagnetic Method  
Applied to Pipe Welding

2021년 8월 27일

조선대학교 대학원

제어계측공학과

최 은 호

# 전자기적 방법을 이용한 배관 용접부의 대체 표면 비파괴검사 기술 개발

지도교수 이 진 이

이 논문을 공학박사 학위신청 논문으로 제출함

2021년 4월

조선대학교 대학원

제어계측공학과

최 은 호



## 최은호의 박사학위논문을 인준함

위원장            조선대학교 교수      고낙용



위 원            조선대학교 교수      조창현



위 원            조선대학교 교수      이진이



위 원            한국항공우주산업 연구원      이호용



위 원            주식회사 로보로 연구원      김정민



2021년 6월

조선대학교 대학원

## 목 차

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xii</b>
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>- 1 -</b>
제 1 절 연구배경 .....	- 1 -
제 2 절 연구목표 .....	- 7 -
<b>제 2 장 이론적 연구 및 검증 .....</b>	<b>- 9 -</b>
제 1 절 응력변화에 따른 전자기 모델 .....	- 9 -
1. 변형률에 따른 자화의 이론적 고찰 .....	- 9 -
2. 응력에 기인한 자속밀도 변화의 실험적 검증 .....	- 14 -
가. 시험편 제작 .....	- 14 -
나. 3차원 자속밀도 측정 장치 .....	- 16 -
다. 응력변화에 따른 자속밀도 변화 실험 .....	- 19 -
제 2 절 맥스웰 방정식 기반 유한요소 해석 .....	- 24 -
1. 맥스웰 방정식 기반 유한요소 해석 .....	- 24 -
2. 실험적 검증 .....	- 27 -
<b>제 3 장 실험 및 고찰 .....</b>	<b>- 32 -</b>
제 1 절 배관용접부 결함 모사 시험편 .....	- 32 -
제 2 절 비교실험 .....	- 34 -
1. 방사선 검사 .....	- 34 -
2. 초음파 검사 .....	- 36 -

3. 잔류자화 검사.....	- 40 -
가. TMR 센서를 이용한 3축 잔류자화 측정 .....	- 40 -
나. GMR센서를 이용한 무극성 잔류자화 측정.....	- 42 -
4. 누설자속 검사.....	- 45 -
5. 와전류 검사.....	- 49 -
제 3 절 자기카메라.....	- 52 -
1. 시스템 구성.....	- 52 -
2. 결과비교.....	- 73 -
제 4 장 취득 데이터 인공지능 해석.....	- 74 -
제 1 절 신호해석 전처리.....	- 74 -
1. 차분처리.....	- 74 -
2. 경향제거 신호처리.....	- 76 -
3. 차분-경향제거-절대처리.....	- 77 -
제 2 절 다변량 특이 스펙트럼 해석.....	- 78 -
1. 이론적 배경.....	- 78 -
2. 고유치 해석.....	- 86 -
제 3 절 데이터 생성.....	- 93 -
제 4 절 인공지능 해석.....	- 98 -
1. 이론적 배경.....	- 98 -
2. 실험 데이터를 활용한 인공지능 해석.....	- 104 -
제 5 장 배관 용접부 검사 시스템 제작.....	- 105 -
제 1 절 정적 평형 스캐너.....	- 105 -
1. 이론적 배경.....	- 105 -
2. 시제품제작.....	- 110 -

제 2 절	센서탐촉자.....	- 113 -
제 3 절	소프트웨어.....	- 118 -
1.	스캐너 구동 및 신호 취득 소프트웨어 .....	- 118 -
2.	신호지시 소프트웨어 .....	- 121 -
제 6 장	결 론.....	- 125 -
REFERENCE	.....	- 128 -
Acknowledgements	.....	- 136 -

## 표목차

Table 3 -1 Specifications of artificial defect .....	- 33 -
Table 3 -2 Defect type and position .....	- 35 -
Table 3 -3 Comparison of experimental results .....	- 73 -
Table 4 -1 Classification of defect and non-defect signals .....	- 98 -
Table 5 -1 Configuration of measurement and scanner control software .....	- 119 -
Table 5 -2 Configuration of signal analysis software .....	- 123 -

## 도목차

Fig. 1 -1 Pipes in industrial facilities .....	- 1 -
Fig. 1 -2 Type of welded defect .....	- 3 -
Fig. 1 -3 Rupture of district heating pipe near Baekseok station .....	- 4 -
Fig. 1 -4 Liquid penetrant examination .....	- 5 -
Fig. 1 -5 Magnetic particle examination .....	- 6 -
Fig. 2 -1 Magnetic domain model.....	- 10 -
Fig. 2 -2 B - H Curve .....	- 11 -
Fig. 2 -3 Magnetic domain model with the change of stress .....	- 13 -
Fig. 2 -4 Drawings of flat welded specimen .....	- 15 -
Fig. 2 -5 Welded specimen and sectional shape.....	- 15 -
Fig. 2 -6 3-axis magnetic flux density measuring sensor.....	- 16 -
Fig. 2 -7 3-axis sensor position experiment.....	- 17 -
Fig. 2 -8 3-axis sensor position.....	- 17 -
Fig. 2 -9 3-axis magnetic flux density measuring system.....	- 18 -
Fig. 2 -10 4-point bending test mechanism.....	- 19 -
Fig. 2 -11 Change of magnetic flux density due to stress;.....	- 22 -
Fig. 2 -12 Magnetic flux density distribution in the cross section of the base metal .....	- 23 -
Fig. 2 -13 Magnetic flux density distribution in the cross section of the welded .....	- 23 -
Fig. 2 -14 Analysis area and boundary conditions.....	- 26 -
Fig. 2 -15 Mesh of the solving domain and mesh quality according to the displacement .....	- 26 -
Fig. 2 -16 Experimental setup.....	- 27 -
Fig. 2 -17 Specimen and crack position.....	- 28 -
Fig. 2 -18 Measurement of length and width of the cracks using microscope; .....	- 28 -
Fig. 2 -19 Cracks depth measurement .....	- 29 -
Fig. 2 -20 Impedance variation at 10 kHz .....	- 30 -
Fig. 2 -21 Impedance variation at 20 kHz .....	- 30 -
Fig. 2 -22 Impedance variation at 40 kHz .....	- 30 -
Fig. 2 -23 Impedance variation at 80 kHz .....	- 31 -
Fig. 3 -1 Specimen and artificial defect drawings .....	- 32 -
Fig. 3 -2 Specimen.....	- 33 -
Fig. 3 -3 RT result of welding pipe specimen; (a) all area, (b) defect area.....	- 35 -
Fig. 3 -4 Ultrasonic testing system .....	- 36 -
Fig. 3 -5 Ultrasonic sensor position .....	- 37 -
Fig. 3 -6 Experiment result #1 .....	- 37 -
Fig. 3 -7 Experiment result #2 .....	- 38 -
Fig. 3 -8 Experiment result #3 .....	- 38 -
Fig. 3 -9 Welding line direction test result;.....	- 39 -
Fig. 3 -10 Measurement system using TMR sensor and ECT probe .....	- 40 -

Fig. 3 -11 Residual magnetization measurement result using TMR sensor.....	- 41 -
Fig. 3 -12 Residual magnetization measurement system using LIGiS .....	- 43 -
Fig. 3 -13 LIGiS mesuerment position .....	- 43 -
Fig. 3 -14 Residual magnetization measurement result using LIGiS .....	- 44 -
Fig. 3 -15 MFLT result using LIGiS (100mA) .....	- 46 -
Fig. 3 -16 MFLT result using LIGiS (200mA) .....	- 47 -
Fig. 3 -17 Difference between 100mA and 200mA .....	- 48 -
Fig. 3 -18 Eddy current testing result .....	- 50 -
Fig. 3 -19 ECT Signal processing result; (a) 20kHz Result, (b) 40kHz Result .....	- 51 -
Fig. 3 -20 LIGiS and exciting coil .....	- 52 -
Fig. 3 -21 Magnetic camera measurement system.....	- 53 -
Fig. 3 -22 Signal processing block diagram .....	- 54 -
Fig. 3 -23 Experiment result (10kHz, 250mA).....	- 55 -
Fig. 3 -24 Cracks in the left HAZ (10kHz, 250mA).....	- 56 -
Fig. 3 -25 Cracks in the weld line (10kHz, 250mA).....	- 57 -
Fig. 3 -26 Cracks in the right HAZ (10kHz, 250mA).....	- 58 -
Fig. 3 -27 Internal defects (10kHz, 250mA, IP) .....	- 59 -
Fig. 3 -28 Internal defects (10kHz, 250mA, Porosity, IP) .....	- 60 -
Fig. 3 -29 Experiment result (20kHz, 250mA).....	- 61 -
Fig. 3 -30 Cracks in the left HAZ (20kHz, 250mA).....	- 62 -
Fig. 3 -31 Cracks in the weld line (20kHz, 250mA).....	- 63 -
Fig. 3 -32 Cracks in the right HAZ (20kHz, 250mA).....	- 64 -
Fig. 3 -33 Internal defects (20kHz, 250mA, IP) .....	- 65 -
Fig. 3 -34 Internal defects (20kHz, 250mA, Porosity, IP) .....	- 66 -
Fig. 3 -35 Experiment result (40kHz, 250mA).....	- 67 -
Fig. 3 -36 Cracks in the left HAZ (40kHz, 250mA).....	- 68 -
Fig. 3 -37 Cracks in the weld line (40kHz, 250mA).....	- 69 -
Fig. 3 -38 Cracks in the right HAZ (40kHz, 250mA).....	- 70 -
Fig. 3 -39 Internal defects (40kHz, 250mA, IP) .....	- 71 -
Fig. 3 -40 Internal defects (40kHz, 250mA, Porosity, IP) .....	- 72 -
Fig. 4 -1 Specimen.....	- 74 -
Fig. 4 -2 Raw data.....	- 75 -
Fig. 4 -3 Differential processing.....	- 75 -
Fig. 4 -4 Mean subtraction processing.....	- 76 -
Fig. 4 -5 Absolute adaptive after differential processing .....	- 77 -
Fig. 4 -6 Block diagram of the MSSA algorithm.....	- 79 -
Fig. 4 -7 Example of reconstitution of input signal .....	- 82 -
Fig. 4 -8 Example of eigenvalue distribution .....	- 83 -
Fig. 4 -9 Correlation matrix decomposition by MSSA.....	- 84 -
Fig. 4 -10 Example of signal analysis by weighted correlation matrix group .....	- 85 -
Fig. 4 -11 Reconstitution of input signal .....	- 86 -
Fig. 4 -12 Eigenvalue distribution .....	- 87 -

Fig. 4 -13 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 0~200mm).....- 88 -  
 Fig. 4 -14 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 200~400mm).....- 89 -  
 Fig. 4 -15 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 400~600mm).....- 90 -  
 Fig. 4 -16 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 600~800mm).....- 91 -  
 Fig. 4 -17 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 800~1000mm).....- 92 -  
 Fig. 4 -18 Automatic extraction of defect data .....- 95 -  
 Fig. 4 -19 Classification of handwritten by deep learning.....- 99 -  
 Fig. 4 -20 Binarization of magnetic camera images .....- 103 -  
 Fig. 4 -21 Training and application process by deep learning .....- 103 -  
 Fig. 4 -22 Classification result of defect and non-defect .....- 104 -  
 Fig. 5 -1 Static balancing scanner for inspection of pipe welding.....- 108 -  
 Fig. 5 -2 Distance adjustment part of static balancing scanner.....- 109 -  
 Fig. 5 -3 Assembly drawing of sensor unit-1 and sensor unit-2 .....- 110 -  
 Fig. 5 -4 Assembly drawing of magnetizer unit-1 and magnetizer unit-2 .....- 111 -  
 Fig. 5 -5 Prototype static balancing scanner for inspection of pipe welding .....- 112 -  
 Fig. 5 -6 Assembly drawing of sensor case inside sensor unit-1 .....- 113 -  
 Fig. 5 -7 Assembly drawing of sensor case inside magnetizer unit-1 .....- 113 -  
 Fig. 5 -8 Assembly drawing of sensor case inside sensor unit-2 .....- 114 -  
 Fig. 5 -9 Assembly drawing of sensor case inside magnetizer unit-2.....- 114 -  
 Fig. 5 -10 Prototype of magnetizer unit-1 and magnetizer unit-2.....- 115 -  
 Fig. 5 -11 Prototype of sensor unit-1 and sensor unit-2.....- 116 -  
 Fig. 5 -12 Overall configuration of static balancing scanner.....- 117 -  
 Fig. 5 -13 Measurement and scanner control software .....- 119 -  
 Fig. 5 -14 Signal analysis software .....- 121 -



## 약어 설명

SMAW	Shielded Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
SAW	Submerged Arc Welding
IP	Incomplete Penetration
LF	Lack of Fusion
PR	Porosity
LPE	liquid Penetrant Examination
MPE	Magnetic Particle Examination
NDE	Nondestructive Evaluation
RT	Radiography Testing
UT	Ultrasonic Testing
ECT	Eddy Current Testing
MFLT	Magnetic Flux Leakage Testing
HAZ	Heat Affected Zone
SCC	Stress Corrosion Crack
MMM	Metal Magnetic Memory
TMR	Tunnel Magnetoresistance
SSS	Single Sensor Scanning

LIGiS	Linearly Integrated GMR Sensor array
LIHaS	Linearly Integrated Hall Sensor array
BIHaS	Bobbin-type Hall sensor array
CIHaS	Cylinder-type Integrated Hall sensor array
AIHaS	Area-type Hall sensor array
MSSA	Multivariate Singular Spectral Analysis
LPF	Low Pass Filter
HPF	High Pass Filter
SMPS	Switched Mode Power Supply
PGA	Programmable Gain Amplifier
NI	National Instrument
SPB	Signal Processing Board
DAQ	Data Acquisition System
cDAQ	Compact Data Acquisition System

## 기호 설명

$\sigma$	Stress [N/mm <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	Strain
$\Delta L$	Deformed length
$E$	Modulus of elasticity [Pa]
$\sigma_x$	longitudinal residual stress
$\sigma_m$	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]
$\chi_m$	Magnetic susceptibility
$\mu$	Permeability [H/m]
$\mu_0$	Permeability in free space [H/m]
$\mu_r$	Relative permeability [H/m]
$\vec{M}_{eqv}$	Equivalent magnetization
$S_k$	Magnetic domain area
$k$	Hall constant
$I$	Input current

$V_H$	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
$\omega$	Angular frequency

## ABSTRACT

### Development of Alternative Surface Non-Destructive Evaluation Technique Based on Electromagnetic Method Applied to Pipe Welding

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

Pipes for transporting fluid are widely used in industry, and their lengths extend from several kilometers to hundreds of kilometers. Welding is widely used as a means of applying a relatively short length of factory produced pipe to such a long-distance pipe installation. Welding has the advantage of having relatively few restrictions on the thickness and shape of the target material, and of reducing the weight of the equipment. On the other hand, changes of physical properties, deformation, and residual stress due to local heating and cooling accompanying welding may exist and may cause defects. In particular, the possibility of defects is greatly increased during long-term operation in high temperature, high pressure and corrosive environments such as petrochemical plants, heat transport pipes, nuclear power plants, ect.

For pressure piping, carbon steel piping is used in most major sections, with the exception of sections requiring particularly high corrosion resistance. It has good weldability, low cost and excellent heat resistance compared to stainless steel and other alloy steels.

The non-destructive testing method applied to assess the strength of the carbon steel pipe welds is divided into a surface volumetric testing. Ultrasonic testing (UT) and radiographic testing (RT) are applied as volumetric testing methods. For surface inspection of pipe welds, which is the subject of this paper, liquid penetrant examination (LPE) and magnetic particle

examination (MPE) are applied. However, LPE and MPE have a complex inspection process of pre-treatment (cleaning), application of penetrant and magnetic particle, residual penetrant removal, developer application, inspection and post-treatment (cleaning and demagnetization). As a result, the inspection time increases, and the use of penetrants, developers, and magnetic particles, which are chemical substances harmful to the human body, is essential. However, when magnetic powder and penetrant in the form of powder and liquid are applied to the lower part of the pipe, which is a position against gravity, they are not applied evenly to the surface of the welded part and fall off by gravity. In addition, when inspecting a welded part, a defect signal and a pseudo-defect signal are mixed and appear due to material changes, residual stress, etc. occurring during the welding process. The distinction between the defect signal and the pseudo-defect signal is made by subjective judgment based on the inspector's experience, which leads to a problem of reliability of the inspection result.

Therefore, it does not use chemicals harmful to the human body, is not affected by the inspection location, can scan the entire welding line in a short time and can improve the reliability of inspection results Alternative Surface Examination (ASE) method needs to be developed.

Therefore, this thesis proposes an alternative surface inspection method applied to pipe welding that can be converted in order to:

1. No use of chemicals.
2. Shortens the inspection speed by a simple inspection process.
3. Has a sensitivity equal to or higher than that of the existing surface inspection method.
4. Not affected by inspection position.
5. Use of artificial intelligence techniques for measurement results to improve the reliability of defect detection capability.
6. Propose an alternative surface inspection method for pipe welds that can create a database of inspection results.

In order to achieve the proposed goal, a non-destructive testing system using an electromagnetic method was developed. When magnetic sensors are arranged and used, the residual magnetic flux density, leakage magnetic flux density, and time-varying magnetic field

distribution in a certain area can be measured and imaged. It has the advantage that it can be measured and imaged. Therefore, using a magnetic sensor and an excitation coil, the method of applying an electromagnetic field and the defect detection capability depending on the type of magnetic sensor were investigated. As a result, we developed the optimal arrangement of the magnetic sensor and the signal processing circuit that can measure the selected electromagnetic field application method and the distribution of the generated magnetic field around the defects in the welded part, and that can move and measure automatically along the circumferential welded part of the pipe. We have developed an ASE system for pipe welds consisting of static balance scanners. In addition, the possibility was confirmed by analyzing the defect signal using various signal processing techniques and artificial intelligence techniques to improve the defect detection capability and reliability. Moreover, the usefulness of the inspection system was verified using a test piece simulating the welding of a carbon steel pipe, which is widely used for piping in various industries such as petrochemical plants, heat transport pipes and nuclear and thermal power generation facilities.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

배관은 대부분의 산업시설에서 필수적으로 사용되며, 배관의 설치길이는 수 킬로미터에서 수백 킬로미터에 이른다. 또한 대부분의 배관은 복잡한 순환 구조로 되어있으며, 주요설비와 배관은 대부분 용접으로 접합되어있다. 이러한 용접에 의한 접합은 대상 자재의 두께 및 형상에 대한 제한이 없으며, 경량화 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 용접 시 동반되는 국부적인 가열 및 냉각으로 인한 재질의 변화, 변형 및 잔류응력이 존재할 수 있으며, 결함 발생의 원인이 될 수 있다[1]. 특히, 석유화학플랜트, 열수송관, 원자력·화력발전설비 등과 같은 고온, 고압환경에서 장기간 운용시 결함 발생 가능성이 크게 증가하게 된다[2].



[http://m.steeldaily.co.kr/news/article\\_photo.asp](http://m.steeldaily.co.kr/news/article_photo.asp)



<https://www.yna.co.kr/view/AKR20191001162400111>



<https://www.edaily.co.kr/news/>

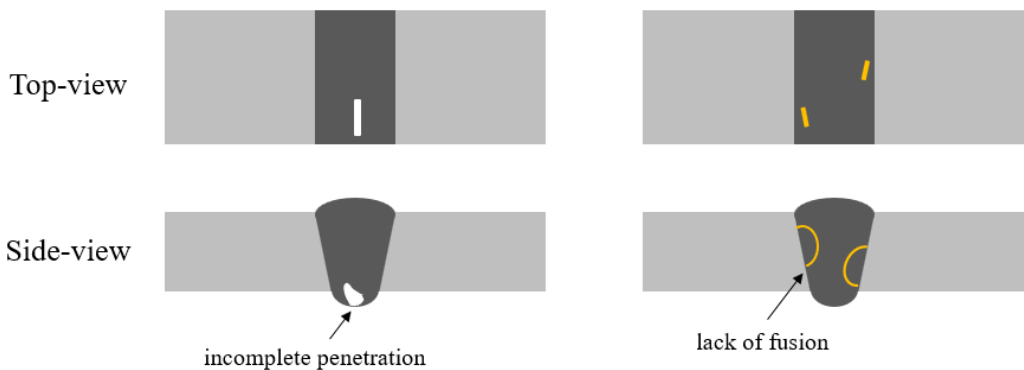


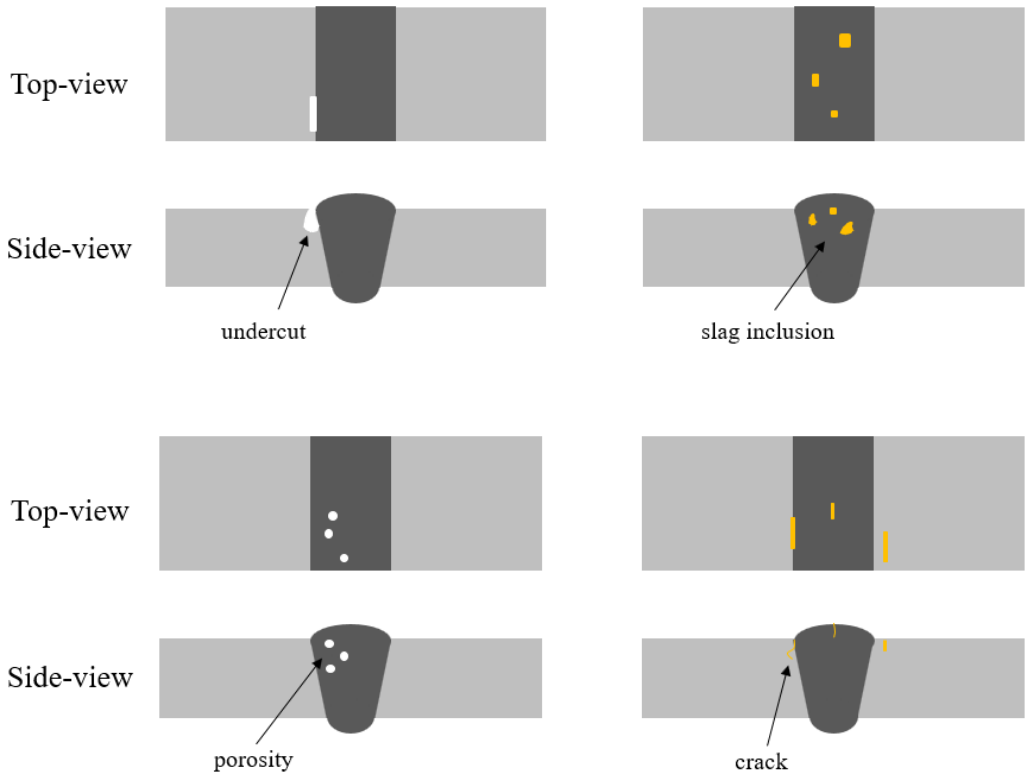
<https://blog.daum.net/redseal508/87>

**Fig. 1 -1 Pipes in industrial facilities**



Fig. 1-2는 용접부에서 발생할 수 있는 대표적인 결함을 나타낸다. 용입부족(IP, Incomplete Penetration)은 올바른 용접봉을 사용하지 않거나 용접 전류가 낮아 아크의 힘이 루트부까지 닿지 않아 발생하게 된다. IP의 경우 용접부 루트에 표면 균열로 진행될 수 있다[3]. 융합불량(LF, Lack of Fusion)은 용접부 모재와 용착금속 사이가 완전히 융합되지 않아 발생하는 결함이다. 대부분의 경우 용접사의 기량 부족으로 인해 발생한다[4]. 언더컷(Undercut)은 용접과정 중 모재가 과하게 용융되어 발생하는 표면결함으로 언더컷부위에 응력이 집중되어 균열로 발전할 가능성이 높다[5]. 슬래그 혼입(Slag Inclusion)은 용착금속의 내부 또는 모재와 융합부 사이에 슬래그가 남는 결함이다. 용접사의 기량 부족이나 전층의 잔류 슬래그가 남아있는 채로 다음 용착금속에 혼입되어 발생하게 되며 압력용기의 용접과 같이 강도가 중요한 곳에서는 치명적인 결함으로 알려져 있다[6]. 기공(Porosity)은 용접시 발생하는 가스가 용착금속 내에 갇힌 상태로 응고되는 결함으로 용접부 내 국부적 또는 용접부 전체에 연속적으로 발생하여 용접부의 강도를 저하시킨다[7]. 균열(Crack)은 용접부에서 발생하는 결함 중 가장 치명적인 결함이다. 용접으로 인한 하중 또는 응력이 해당 재질의 인장강도를 초과하여 발생하게 되며, 배관의 파열 및 누출사고의 직접적인 원인이 된다[8].



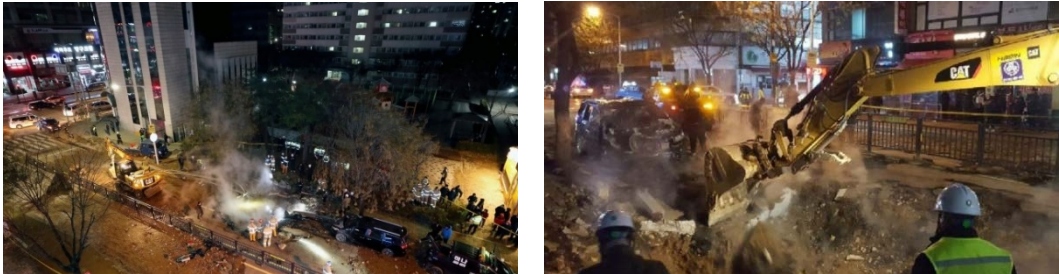


**Fig. 1 -2 Type of welded defect**

한편, 용접부에서 발생하는 결함은 배관의 노후화와도 직접적인 연관이 있다. 배관의 설계수명은 일반적으로 15~20년으로 알려져 있다[9]. 노후 배관은 주기적인 검사를 통한 유지·보수를 진행해야 하며, 방치할 시 큰 사고로 이어질 수 있다.

한 예로 2018년 12월 4일 경기도 고양시 일산동구 백석동에 있는 백석역 부근에서 온수배관이 파열되며, 95~110℃의 물과 수증기가 지상으로 유출되는 사고가 발생하였다. 이 사고로 사망자 1명, 부상자 40여명의 인명피해가 발생하였으며, 인근 아파트 2천800여 가구에 난방용 열공급이 중단되는 피해가 발생하였다. 사고의 원인으로는 27년된 노후 배관의 용접부가 파열되어 사고가 발생한 것으로 밝혀졌다[10]. 또한 국가 산업단지인 울산, 여수등의 석유화학플랜트에서 크고 작은 유출 사고가 꾸준히 발생하고있으며, 원자력·화력발전소 내 배관 용접부에서 누출 사고가 발생하고있다[11]. 시간이 지남에 따라 노후배관의 비율은 계속 증가하고 있으

며, 취약부위인 배관 용접부의 결함을 조기에 발견하기 위한 비파괴검사법의 필요성이 증대되고 있다.



**Fig. 1 -3 Rupture of district heating pipe near Baekseok station [12]**

강자성체 배관 용접부의 건전성을 평가하기 위해 적용되고 있는 비파괴검사 방법은 표면검사(Surface examination) 및 체적검사(Volumetric examination)로 나뉘어진다. 체적검사 방법으로는 초음파검사(UT, Ultrasonic Testing) 및 방사선검사(RT, Radiographic Testing)가 적용되고있다. 본 논문의 대상인 용접부 표면 검사는 침투검사(LPE, Liquid Penetrant Examination) 및 자분검사(MPE, Magnetic Particle Examination)가 적용되고 있다[13].

LPE는 검사대상의 표면이 손상되지 않는 범위내에서 표면에 존재하는 이물질 을 제거한 후, 침투력이 강한 적색 또는 형광색의 침투제를 도포한다. 도포된 침투제는 외력에 상관없이 가느다란 관을 타고 상승하는 모세관 현상에 의해 불연속부 로 침투하게 된다. 이후, 표면의 잔류 침투제를 제거한 후 현상제를 도포하면 불연 속부 내 침투제가 현상제 위로 흡출된다. 이때 직접 또는 자외선을 이용하여 관찰 하면 결함의 형태 및 크기를 알 수 있다. 하지만, 모세관 현상을 이용하는 LPE는 적용 대상 표면에 개구부가 반드시 존재해야 하며, 이는 표면 직하 결함의 검출이 불가능함을 말한다. 또한, 검사자가 인체에 유해한 화학물질인 세척제, 침투제, 현 상제에 노출되며 Fig 1-4에 나타낸 바와 같이 전처리(Pre-cleaning), 침투제 도포 (Penetrationg), 잔류 침투제 제거(Penetrant removal), 현상제 도포(Developing), 검사

(Inspection), 후처리(Post-cleaning) 총 5단계의 복잡한 검사 공정으로 인해 검사시간이 증가하게 된다[14]. 또한, 검사 후 그 결과를 각각 사진으로 촬영하여 기록하고 있으며 분말 및 액상 형태인 침투제 및 현상제를 중력의 영향을 받는 위치인 배관 하부에 도포할 경우 용접부 표면에 고르게 도포되지 못하고 중력에 의해 낙하하게 되는 문제점을 가지고 있다.

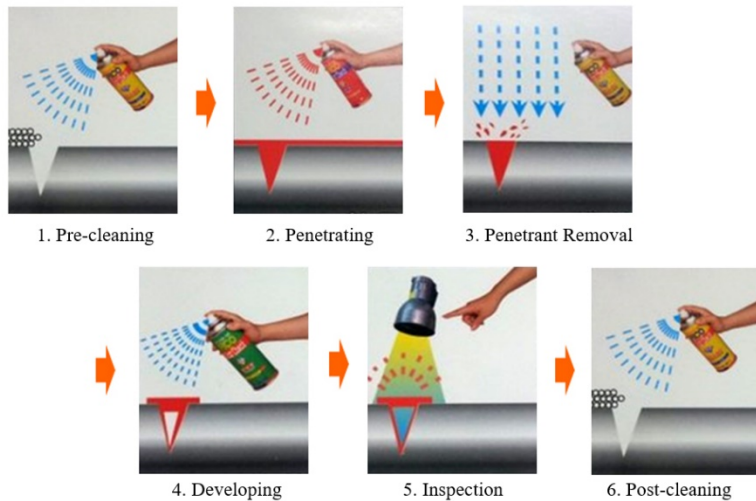
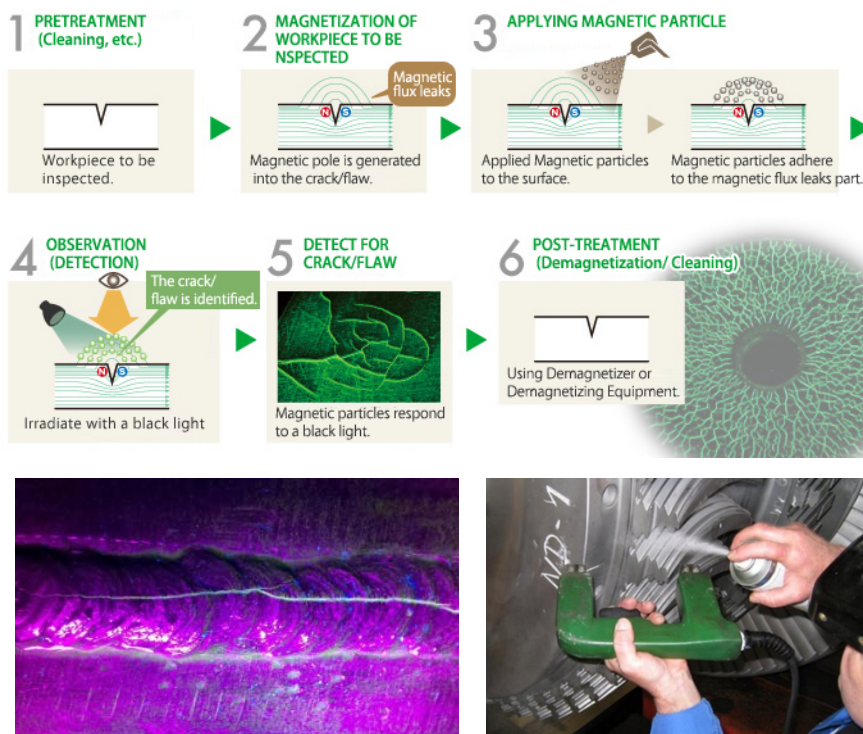


Fig. 1 -4 Liquid penetrant examination [15-16]

MPE는 시험체에 자기장을 적용하여 자화시킬 때, 시험체 표면 및 표면적하에서 자속이 발생하게 되며, 불연속부가 존재할 경우 자속이 외부 공간으로 누설된다. 또한, 불연속부 경계에서 자극이 나타나며 주변으로 누설자속에 의한 자기장의 왜곡이 발생한다. 이때 자분을 적용하면 자분이 자화되며 불연속부를 따라 밀집하게

된다. 이 밀집된 자분의 형태를 관찰하여 결함의 존재 여부를 판단할 수 있다. 하지만, Fig. 1-5에 나타낸 바와 같이 전처리(세정), 시험체 자화, 자분 적용, 관찰 및 결함 판정, 후처리(탈자) 등 복잡한 검사 공정으로 인해 검사시간이 증가한다[17]. 또한, LPE와 마찬가지로 검사 후 그 결과를 각각 사진으로 촬영하여 기록하고 있으며, 분말 및 액상 형태인 자분을 중력에 반하는 위치인 배관 하부에 도포할 경우 용접부 표면에 고르게 도포되지 못하고 중력에 의해 낙하하게 되는 문제점을 가지고 있다.



**Fig. 1 -5 Magnetic particle examination [18]**

따라서, 본 연구에서는 LPE 및 MPE를 대체하기 위해 기존 검사법 대비 동등 이상의 감도를 가지며, 일정 면적의 용접부를 단시간에 스캔 가능하며 데이터베이스화 할 수 있는 대체표면검사(ASE, Alternative Surface Examination) 시스템을 개발한다.

## 제 2 절 연구목표

본 연구는 배관 용접부 표면의 종래 검사법인 LPE 및 MPE를 대체하기 위한 비파괴검사기술의 개발을 목표로 한다. 검사 대상은 석유화학플랜트, 열수송관, 원자력·화력발전설비 등 여러 산업의 배관으로 널리 사용되는 탄소강 재질 배관의 용접부 표면이다.

먼저 배관 용접부 모재의 재질, 형상, 제조방법, 열·응력부하, 잔류응력, 두께, 용입부족(IP, Incomplete Penetration) 및 융합불량(LF, Lack of Fusion) 등의 영향으로 인해 변화하는 전자기적 특성값에 대한 연구를 진행하고, 전자기적 특성값인 전류밀도, 전류, 전도율, 저항, 주파수, 침투깊이에 따라 변화하는 정적 자속밀도분포와 시변자속밀도분포에 대한 연구를 진행한다. 이를 바탕으로 배관 용접부 시험편의 두께변화, 균열성 결함, IP 결함 및 LF 결함이 정적·시변자속밀도에 미치는 영향을 측정 및 해석한다.

이후 용접과정에서 발생하는 국부적인 가열 및 냉각에 의한 재질의 변화, 변형, 및 잔류응력으로 인해 발생하는 유사결함 신호와 결함신호를 구분하기 위해 다양한 전자계 인가방법에 대한 실험을 진행한다. 전자계 인가 방법으로는 정자계 및 교번자계를 시험편 축방향으로 인가하여 측정한다. 교번자계의 경우 다양한 주파수를 적용하며 유사결함-결함 신호 차별화 가능 여부를 확인하였다.

또한, 유사결함 신호와 결함 신호의 구분 및 결함 검출 가능성을 입증하기 위하여 배관용접부 표면의 자속밀도분포를 실시간으로 시각화할 수 있는 장치를 시제작한다. 먼저 결함 및 용접과정에서 발생하는 영향으로 인해 변화하는 정적-시변자속밀도분포를 측정 및 해석하기 위하여 응력에 기인한 자속밀도 변화의 실험적 검증 및 맥스웰 방정식 기반 유한요소 해석을 진행한다. 이후, 배관 용접부 표면에 인가하는 자계의 종류, 방향, 크기 및 주파수에 의한 자속밀도분포의 변화를 가시화할 수 있는 최적의 자기카메라를 시제작한다. 이후, 자동화 검사가 가능한 배관 용접부 검사용 스캐너를 제작하여, 기초 실험을 통해 선별된 최적의 자계 인가조건에 따른 자기카메라 및 자화기를 탑재하여 유사결함-결함 신호를 구분하고, 검출된



결함 신호를 정량적으로 평가할 수 있는 대체 표면검사기술을 개발한다. 이를 위하여 다양한 조건에서의 실험을 통해 데이터를 생성한 후, 인공지능 기법을 이용하여 결함신호를 추출 및 판정한다.

요약하면, (1) 시험체에 대한 전자기모델 확립, (2) 용접 과정에서 발생하는 변형을 평가하여, (3) 용접부에 대한 전자기모델을 수정하고, (4) 이러한 이론적 연구 결과를 바탕으로 최적의 자기카메라 및 스캐너 시제품 제작, (5) 실험을 통한 데이터 생성, (6) 유사결함-결함 신호 구분을 위한 인공지능 기법을 적용하여 소프트웨어를 제작 및 적용한 배관 용접부 표면 대체검사 기술 개발을 최종 목표로 한다.

본 논문은 총 6장으로 구성된다. 제 1장은 서론이며, 제 2장에서는 이론적 연구 및 검증에 대해 설명한다. 제 3장은 실험 및 고찰이며, 제 4장은 취득 데이터 인공지능 해석이다. 제 5장은 배관 용접부 검사 시스템 제작이며, 제 6장은 결론이다.

## 제 2 장 이론적 연구 및 검증

### 제 1 절 응력변화에 따른 전자기 모델

#### 1. 변형률에 따른 자화의 이론적 고찰 [19]

자화벡터 ( $\vec{M}_k$ )는 식 2.1에 나타난 바와 같이 단위체적당의 자기쌍극자모멘트 ( $\vec{m}$ )의 총합으로 정의된다. 한편, 같은 방향의  $\vec{m}$ 을 가지는 영역이 큐리 온도 이하에서 자발적으로 영역화한 것을 자구라 한다. 등가자화( $\vec{M}_{eqv}$ )는 식 2.2에 나타난 바와 같이 여러 개의 자구로 이루어진 강자성체 재질 전체의 자화벡터의 합으로 표현할 수 있다. 여기에서  $S_k$ 와  $A$ 는 각 자구의 면적과 전체 면적을 나타낸다. 따라서,  $\frac{S_k}{A}$ 는 각 자구의 면적비를 나타낸다.

$$\vec{M}_k = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n\Delta v} \vec{m}_i}{\Delta v} \quad (2.1)$$

$$\vec{M}_{eqv} = \sum_{k=1}^N \frac{S_k}{A} \cdot \vec{M}_k \quad (2.2)$$

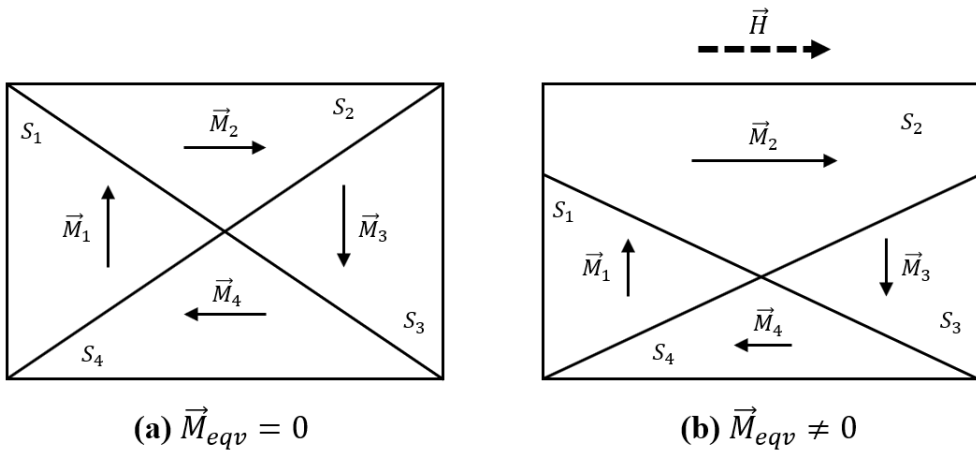
자벽은 자구의 경계로서 수 마이크로미터 정도의 폭을 가진다. Fig. 2.1 (a)는 강자성체의 자구모델로서 외부자계( $\vec{H}$ )가 인가되지 않을 때에는 서로 다른 방향을 가지는 자구가 평형을 이루고, 결과적으로  $\vec{M}_{eqv}$ 가 “zero”가 되어 안정한 상태로 존재한다. 하지만,  $\vec{H}$ 가 인가되면, Fig. 2.1 (b)와 같이 자벽이 이동하여  $\vec{H}$ 와 같은 방향의  $\vec{m}$ 을 가지는 자구의 넓이가 넓어져서  $\vec{M}_{eqv}$ 는 더 이상 “zero”가 아니게 된다. 이때,  $\vec{H}$ 에 의한 자벽 이동의 용이성은 각 물질의 특징인 자화율( $X_m$ )에 의존하며,  $\vec{M}_{eqv}$ 는 식 2.3과 같이 표현된다.

$$\vec{M}_{eqv} = x_m \vec{H} \quad (2.3)$$



한편, 식 2.4는 강자성체 재질의 외측에서 인가되는  $\vec{H}$ 와 강자성체 재질의 내측에서 발생하는  $\vec{M}_{eqv}$ 에 의하여 발생하는 공간상의 자속밀도( $\vec{B}$ )를 표현한다. 여기에서  $\mu_0$ ,  $\mu_r$ ,  $\mu$ 는 각각 자유공간상의 투자율, 비투자율, 투자율을 나타낸다.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{M}_{eqv} + \mu_0 \vec{H} = \mu_0(x_m + 1)\vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (2.4)$$



**Fig. 2-1 Magnetic domain model**

Fig. 2-2는  $\vec{H}$ 에 대한  $\vec{B}$ 의 관계를 나타낸다. 초기조건( $\vec{H}=0$ )에서는  $\vec{M}_{eqv}$ 가 “zero”가 되고, 따라서  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} = 0$  이 된다. 이때,  $\vec{H}$ 가 “positive” 방향으로 증가하면, 같은 방향의 자기쌍극자모멘트( $\vec{m}$ )를 가지는 자구의 면적이 넓어지고, 결과적으로  $\vec{M}_{eqv}$  및  $\vec{B}$ 가 증가한다.  $\vec{H}$ 가 더욱 커져서 전체적인 자구가  $\vec{H}$ 와 같은 방향의  $\vec{m}$ 을 가지게 되면, 더 이상의 자벽의 이동은 없다. 이때의 자속밀도를 포화자속밀도,  $\vec{B}_s$ 라 한다. 한편,  $\vec{H}$ 의 크기가 점차 감소하여 “zero”가 되더라도,  $\vec{B}$ 는 “zero”가 되지 않는 자기이력현상이 나타난다. 이를 잔류자속밀도,  $\vec{B}_r$ 라 한다. 그리고, 자속밀도를 “zero”로 만들기 위해서는 “negative”한 외부자계가 추가로 인가되어야 하며, 이를 보자력,  $\vec{H}_c$ 라 한다. 그리고,  $\vec{H}$ 가 “negative” 방향으로 계속하여 감소하면, 같은 방향의 자기쌍극자모멘트( $\vec{m}$ )를 가지는 자구의 면적이 넓어지고, 결과적으로  $\vec{M}_{eqv}$

및  $\vec{B}$ 가 최소값을 가진다. 양 포화자속밀도와 음 포화자속밀도는 크기는 같고, 방향은 반대이다. 또한, 양 보자력과 음 보자력도 크기는 같고, 방향이 반대이다. 한편,  $\vec{B} - \vec{H}$  곡선의 각 점에서  $|\vec{H}|$ ,  $|\vec{B}|$ 와 원점이 이루는 삼각형의 면적은 식 2.5와 같이 표현되며, 자기에너지,  $W_m$ 라고 한다.

$$W_m = \frac{1}{2} \int_v \vec{H} \cdot \vec{B} dv \quad (2.5)$$

전술한 바와 같이 자구모델에서는 안정화된 상태, 즉 자기에너지가 최소화되기 위하여 Fig. 2-1(a)에 나타낸 바와 같이 자화벡터 ( $M_k$ )가 서로 상쇄되도록 자구가 배열한다. 그리고, 외부자계( $\vec{H}$ )가 인가되면, Fig. 2-1(b)에 나타낸 바와 같이 같은 방향의 자구의 넓이가 넓어지면서, 등가자화( $\vec{M}_{eqv}$ )가 더 이상 “zero”가 아니며, 결과적으로 공간상의 자속밀도가 변화하게 된다.

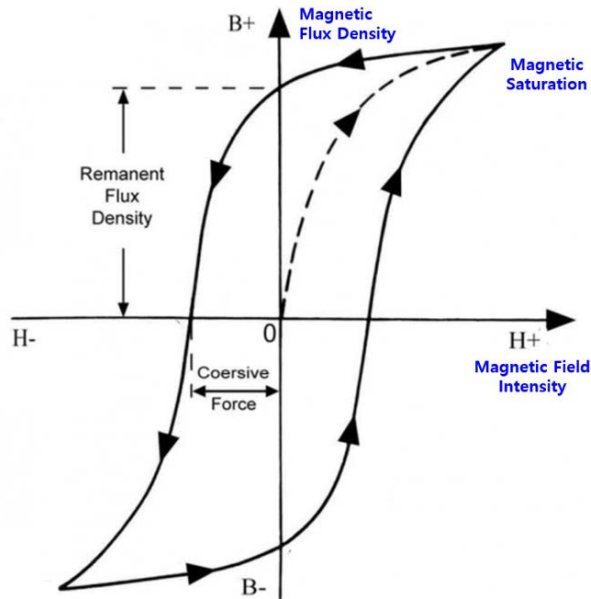


Fig. 2 -2 B - H Curve [20]

등가자화벡터( $\vec{M}_{eqv}$ )는 외부자계 뿐 아니라, 응력( $\sigma$ )에 의해서도 변화될 수 있다. 응력은 식 2.6에 나타낸 바와 같이 탄성률( $E$ )과 변형률( $\epsilon_{xy}$ )의 곱으로 정의된다. Fig. 2-3 (a)는 외팔보 모델에서 외부자계가 인가되지 않은 상태에서 자구모델을 나타낸다. 또한, Fig. 2-3 (b)는 동일 모델에  $\vec{H} = 0$ 인 상태에서 탄성영역의 기계적 하중이 인가되었을 때 자구모델을 나타낸다.  $\vec{H}$ 이므로 식 2.4는 식 2.2를 이용하여 식 2.7과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma = \frac{|\vec{F}|}{A} = \epsilon_{xy}E \quad (2.6)$$

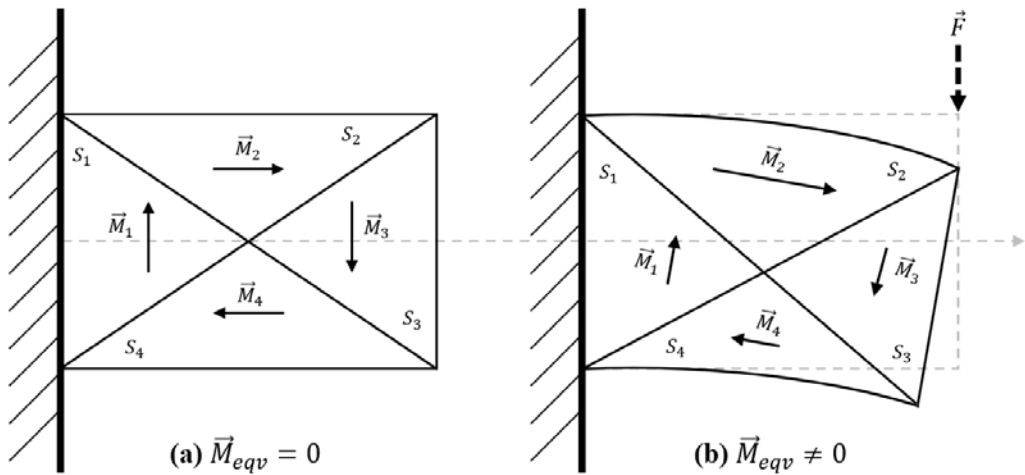
$$\vec{B}_{stress} = \mu_0 \vec{M}'_{eqv} = \frac{\mu_0}{A} \sum_{k=1}^N S_k' \cdot \vec{M}_k' \quad (2.7)$$

한편, 응력이 부여되기 전과 후의 자구면적  $S_k$ 와  $S_k'$ 은 식 2.8에 나타낸 바와 같이 변형률( $\epsilon_{xy,k}$ )에 비례하여 변화된다. 따라서, 식 2.7은 식 2.6과 식 2.8을 대입하여 식 2.9와 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 공간상의 자속밀도( $\vec{B}$ )가 영향을 받는다. 그리고, 국부적인 압축응력 또는 인장응력이 발생하는 영역에서의 자속밀도가 양 또는 음의 값으로 표현될 수 있음을 시사한다. 한편, 응력이 부여된 후의 자구내 자화벡터( $\vec{M}_k'$ )는 응력이 부여되기 전의 자구내 자화벡터( $\vec{M}_k$ )와 벡터값이 다르다.

$$S_k' = \epsilon_{xy,k} S_k \quad (2.8)$$

$$\vec{B}_{stress} = \frac{\mu_0}{A} \sum_{k=1}^N \epsilon_{xy,k} S_k \cdot \vec{M}_k' = \frac{\mu_0}{AE} \sum_{k=1}^N \sigma_k S_k \cdot \vec{M}_k' \quad (2.9)$$

한편, 용접 과정에서 발생하는 열팽창 및 열수축 과정, 용접결합의 존재에 기인한 시험편 내부의 국부적인 냉각속도의 차이에 의하여 변형률과 응력이 변화한다. 이러한 기계적 변화는 상술한 식 2.9에 의하여 자속밀도의 분포를 유발한다. 따라서, 용접부에서의 자속밀도분포를 고감도 초소형 자기센서에 의하여 측정하면, 식 2.9에 의하여 잔류응력 또는 용접결합에 기인한 국부적인 응력의 분포를 추정할 수 있다.



**Fig. 2-3 Magnetic domain model with the change of stress**

## 2. 응력에 기인한 자속밀도 변화의 실험적 검증

### 가. 시험편 제작

응력변화에 의한 전자기적 특성 변화를 실험적으로 검증하기 위하여 Fig. 2-4와 같은 평판형 용접시험편을 제작하였다. 폭 150mm, 길이 300mm, 두께 9mm인 두 개의 탄소강(SA106) 판재를 맞대기 용접하였다. 용접선에 수직인 방향으로 총 6개, 용접선과 평행인 방향으로 총 4개의 시험편을 와이어 커팅으로 분할하였다. 커팅된 각 시험편의 크기는 폭 150mm, 길이 50mm, 두께 9mm 이다. 용접선과 평행인 방향의 시험편은 모재시험편, 용접면에 수직인 방향의 시험편은 용접시험편으로 구분하였다.

Fig. 2-5는 절단한 용접시험편을 나타내며, 각 시험편은 절단면을 2, 3, 4, 5, 6으로 구분하고, 각 경계면의 좌측과 우측을 각각 A면과 B면으로 명명하였다. Fig. 2-5의 하단은 6A 단면 사진을 나타내며, 측정된 영역은 그림에 표시한 바와 같다. 용접부 단면에서 용접선 방향을 Z축, 시험편의 면방향을 Y축으로 하였고, Z축과 Y축과 수직인 방향을 X축이라 하였다. 3축 TMR 센서에 의하여 각 방향의 자속밀도분포를 측정하였다.

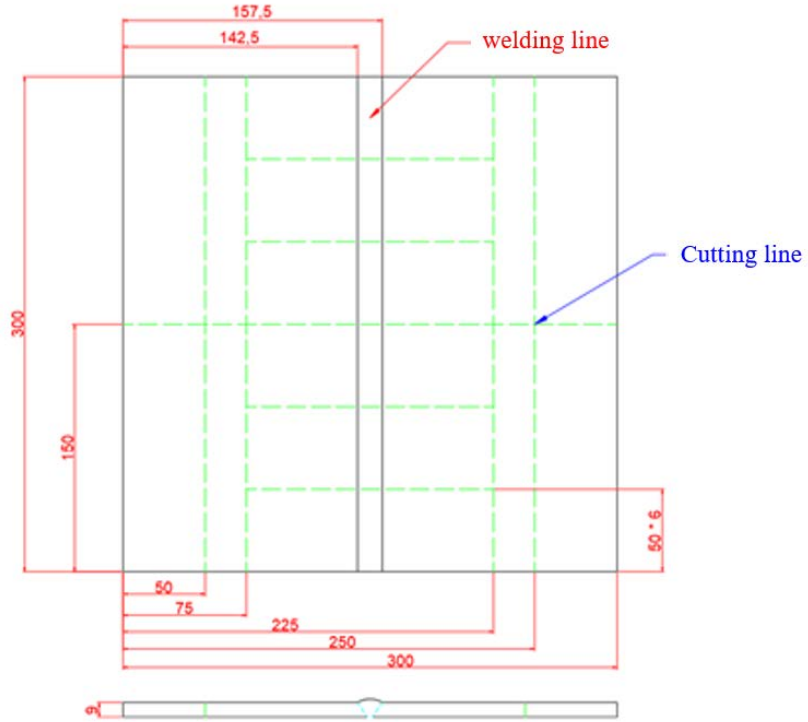


Fig. 2 -4 Drawings of flat welded specimen

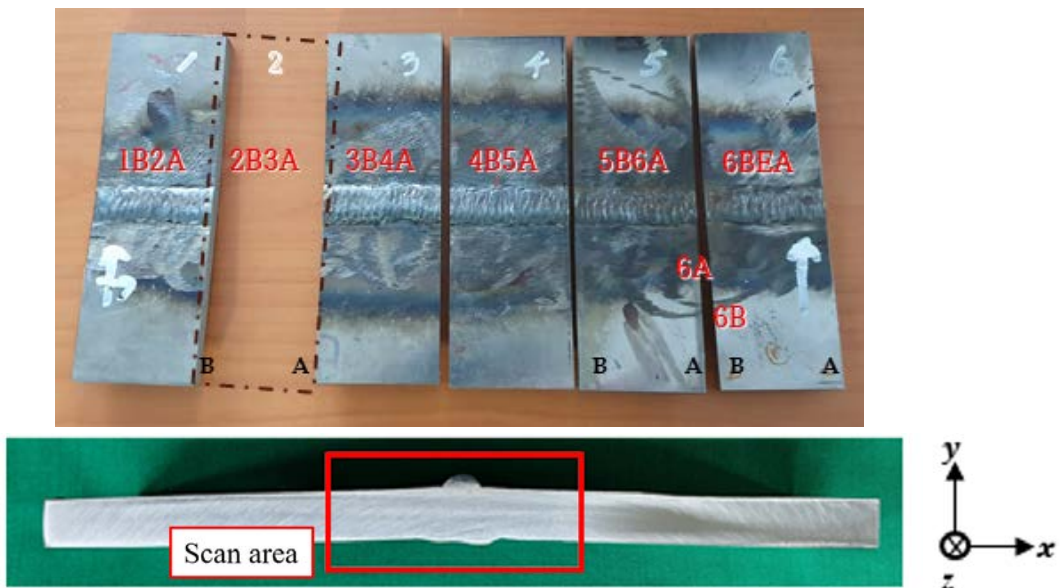
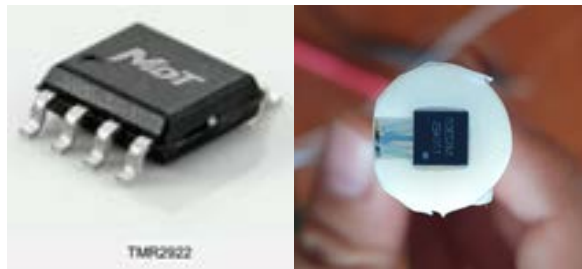


Fig. 2 -5 Welded specimen and sectional shape

### 나. 3차원 자속밀도 측정 장치

자기카메라는 1개의 센서를 평면상에서 정밀하게 스캔하여 공간상의 자속밀도 분포를 측정하는 SSS (single sensor scanning), 선형으로 배열한 자기센서를 배열의 수직인 방향으로 스캔하는 선형 홀센서배열 (LIHaS, linearly integrated Hall sensor array) 와 선형 GMR 센서열 (LIGiS, linearly integrated GMR sensor array), 열교환기 전열관 내부에 삽입하여 튜브를 검사하기 위한 보빈형 홀센서배열 (BIHaS, bobbin-type Hall sensor array)와 보빈형 GMR 센서배열 (BIGiS, bobbin-type GMR sensor array), 그리고, 실린더형 홀센서배열 (CIHaS, cylinder-type integrated Hall sensor array), 매트릭스 형태로 배열하여 실시간으로 자속밀도분포를 영상화하기 위한 면적형 홀센서배열 (AIHaS, area-type Hall sensor array) 등을 포함한다[21~27].

본 논문에서는 용접부 단면에서  $10\mu\text{m}$ 의 공간분해능을 가지는 3축 자속밀도분포를 측정하기 위하여 시제작한 정밀 SSS를 이용하였다. SSS에 장착한 센서는 Fig. 2-6에 나타낸 바와 같이 3축 TMR 센서이며,  $25\text{mV/V/Oe}$ 의 감도를 가진다. 이를 12배 선형 증폭하였다.



**Fig. 2 -6 3-axis magnetic flux density measuring sensor**

3축 TMR 센서에 의하여 1A의 전류를 인가한 80mm의 도선에서 발생하는 자속 밀도를 Fig. 2-7에 나타낸 바와 같이 X축, Y축 및 45도 방향으로 스캔하면서 측정한 결과로부터 각 벡터성분의 정확한 위치를 측정한 결과를 Fig. 2-8에 나타낸다. 즉, Y

축과 Z축 성분은 센서의 중앙에 위치하고, X축 성분은 중심으로부터 1.6mm 및 1.2mm 이격된 위치에서 측정된다. 따라서, X, Y, Z축 각 성분의 자속밀도분포를 측정하여 X축 위치를 좌표 조정한 후, 각 성분을 영상화하였다.

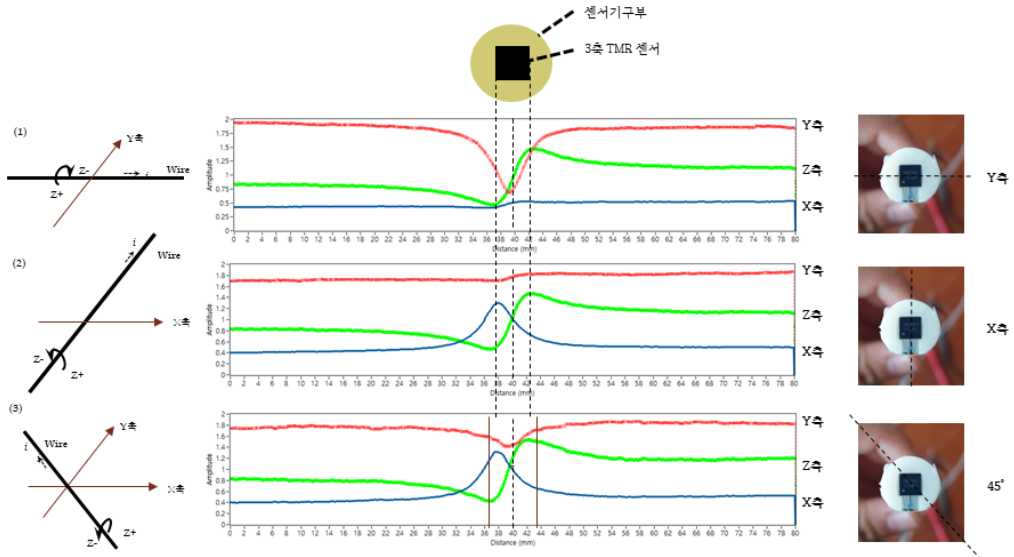


Fig. 2 -7 3-axis sensor position experiment

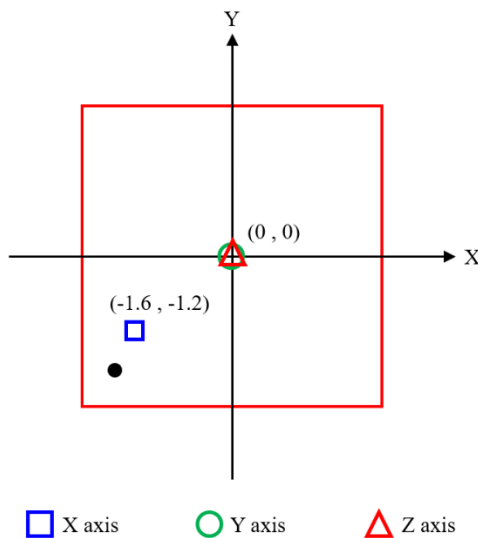
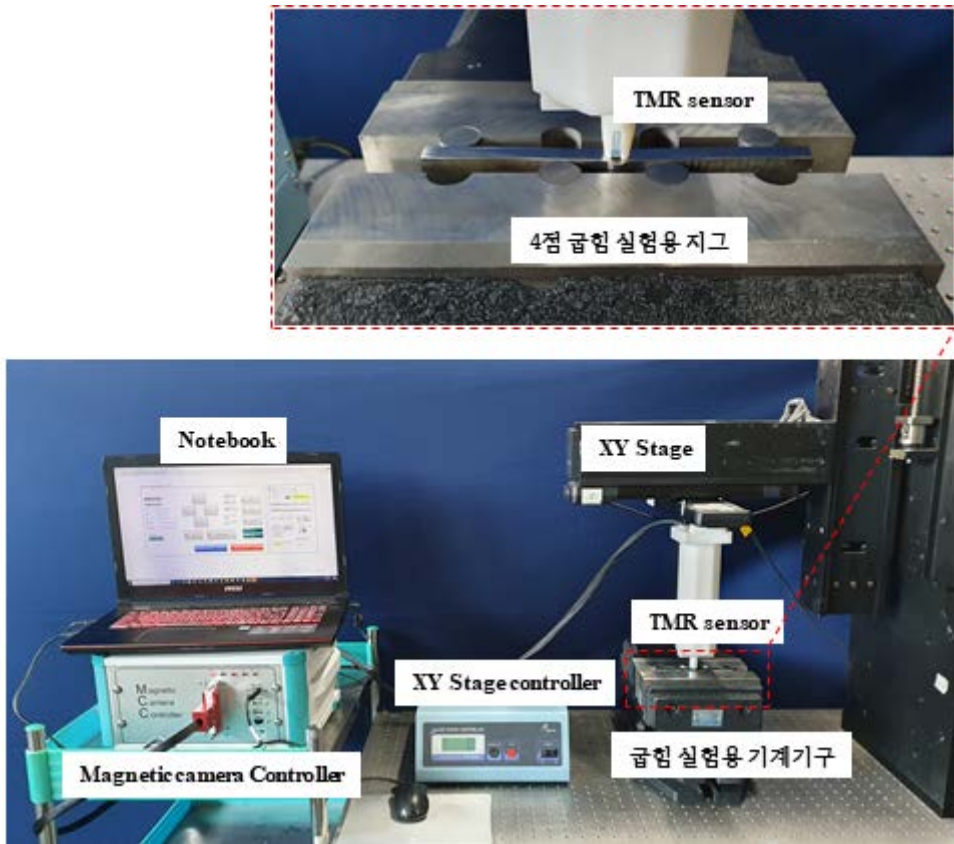


Fig. 2 -8 3-axis sensor position



Fig. 2-9는 3축 TMR센서에 의하여 피측정면(용접부 단면)의 3축 자속밀도분포를 정밀 측정하기 위한 실험장치를 나타낸다. 4점 굽힘 실험용 지그에 용접부 시험편을 장착하고, 응력을 가한 상태에서 용접부 단면에서의 자속밀도분포를 측정한다. 이때 외부자계가 인가되지 않은 상태에서 측정한 응력 부하 전후의 자속밀도분포로부터 응력에 의한 잔류자화(자발자화)와 용접에 의한 잔류자화를 측정할 수 있다.



**Fig. 2 -9 3-axis magnetic flux density measuring system**

### 다. 응력변화에 따른 자속밀도 변화 실험

Fig. 2-10은 상기 용접시험편에 응력을 인가하기 위한 4점 굽힘시험용 기계기구를 나타낸다. 직경 16mm, 표점거리 40mm, 120mm인 원통형 기구를 이용하여 용접 시험편을 고정한 후, Y방향으로 압축함으로써 시험편에 응력을 가하였다.

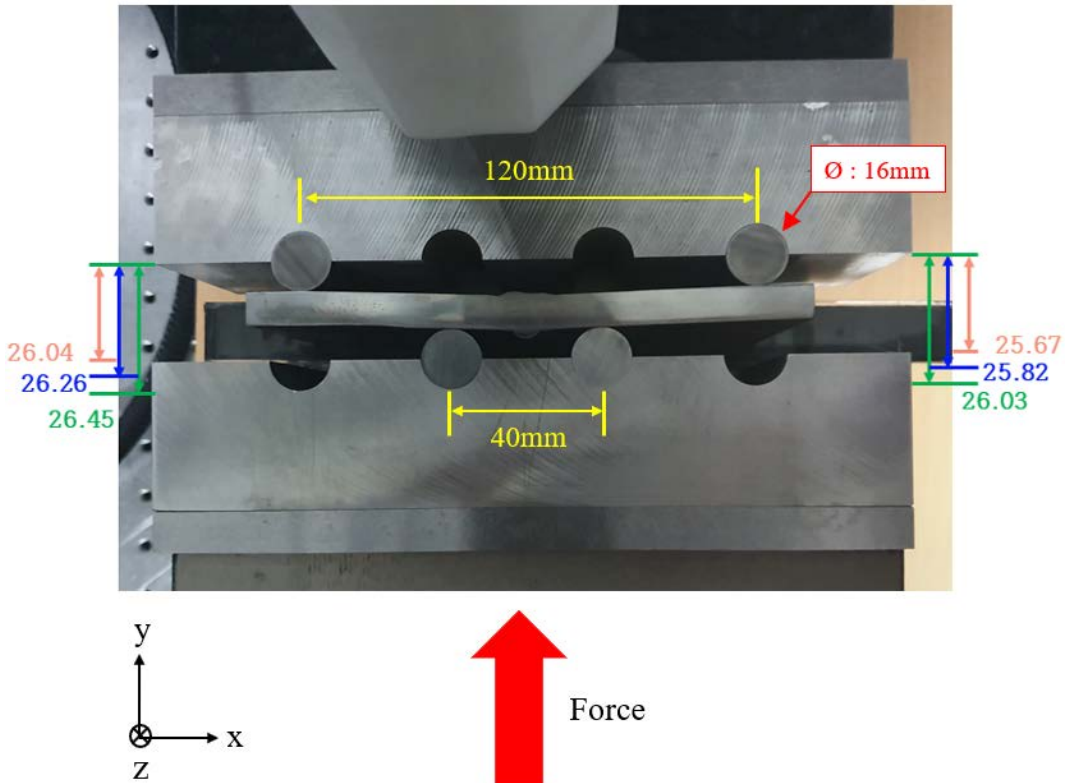


Fig. 2 -10 4-point bending test mechanism

Fig. 2-11 (a)는 4점 굽힘시험전, Fig. 2-11 (b)는 0.2mm 변형을 유발하는 응력의 인가, (c)는 0.4mm 변형을 유발하는 응력의 인가, (d)는 응력 인가 전후의 자속밀도분포의 강도를 색상으로 표현한 것이다. Y방향으로 압축 시 굽힘응력은 실험용 기구를 통하여 시험편에 가해지는 변형량으로 식 2.10과 같이 나타낸다[28-30].

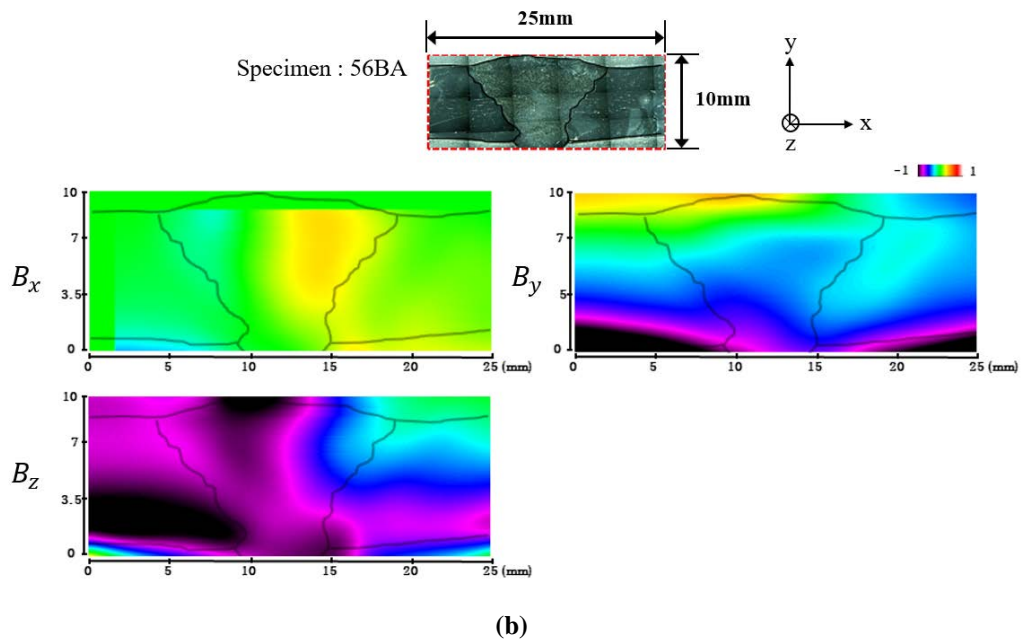
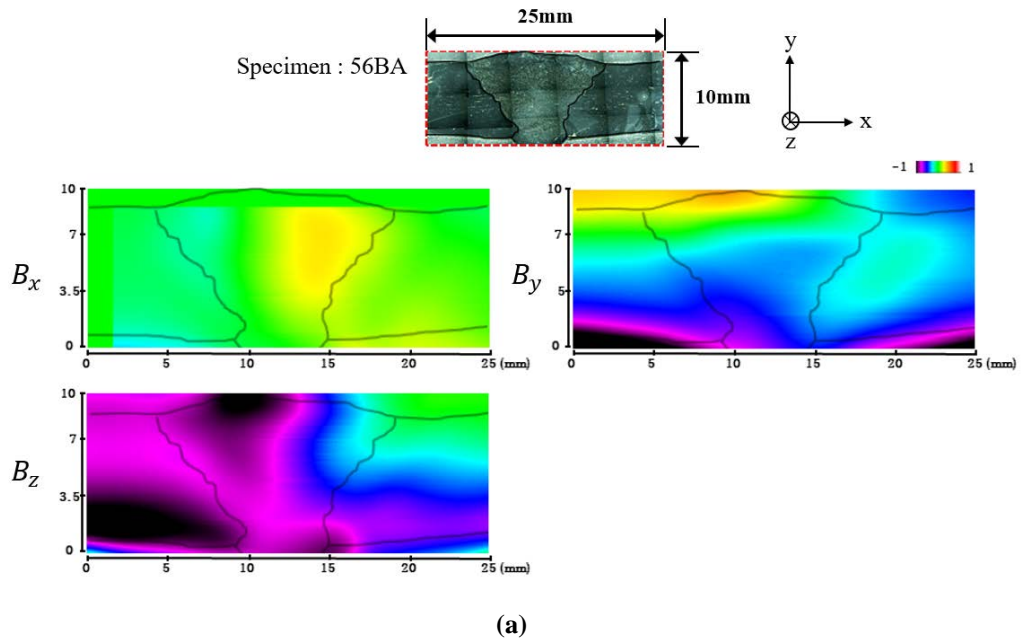
$$\varepsilon = \frac{6T(L_1 - L_2) \Delta l}{L_1^3 - 3L_1L_2^2 + 2L_2^3} \quad (2.10)$$

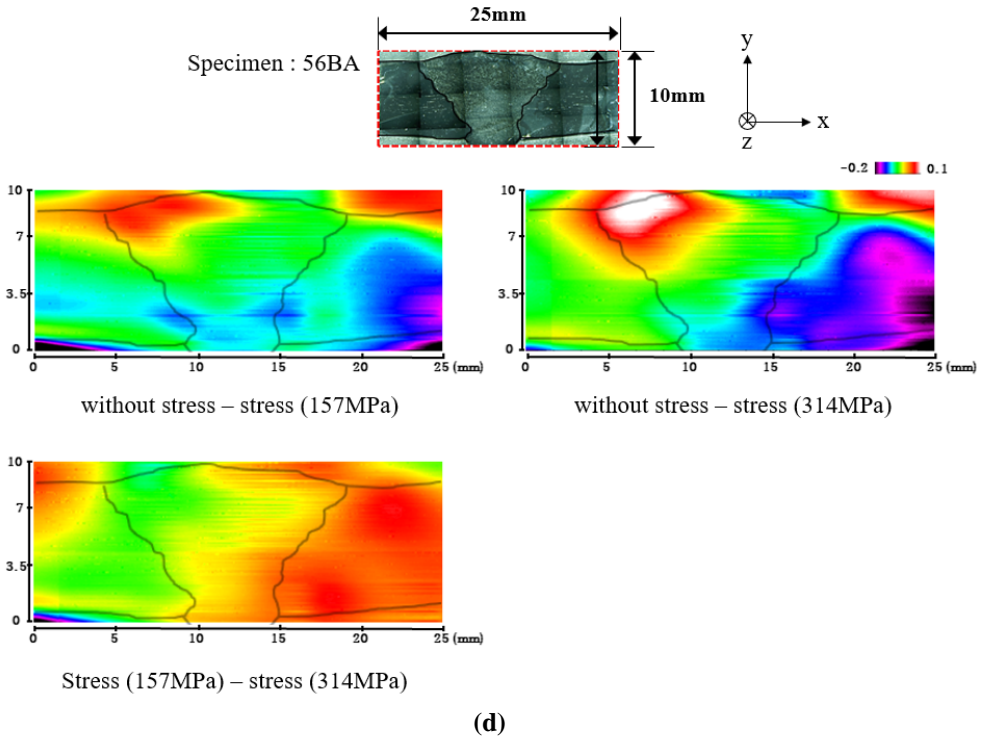
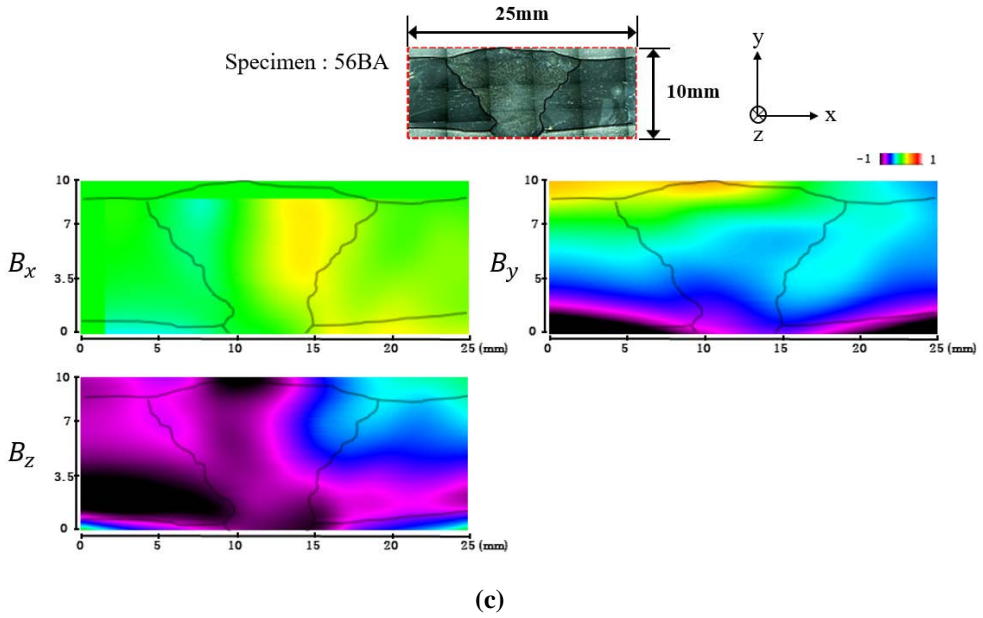
식 2.10에 표점거리, 시험편의 두께 및 탄성계수를 활용하여 0.2mm 및 0.4mm의 변위에 대한 굽힘응력은 157, 314Mpa로 환산할 수 있다. 따라서, 용접시험편에 157Mpa, 314Mpa의 굽힘응력을 가했을 때 응력차에 의하여 자속밀도변화를 관찰할 수 있다.

해석 결과, Fig. 2-11 (a)에 나타낸 바와 같이 강자성체인 SA106A의 용접부에서는 응력이 인가되지 않을 때에도 잔류자화, 특히 z-방향의( $B_z$ )의 잔류자화가 강하게 나타난다. 한편,  $B_y$ 는 시험편의 상부와 하부에서 서로 다른 극이 나타난다.

Fig. 2-11 (c)의 경우에는 Fig. 2-11 (a)의 경우에 비하여 크게 변화하지 않은 것 같이 보인다. 하지만, 이들의 차이를 나타내는 Fig. 2-11 (d)에 의하면 부하되는 응력이 증대할수록  $B_x$ 와  $B_z$ 의 좌측 상단의 crown toe에서 큰 자속밀도 변화가 발생한다. 일반적으로 자분탐상, 와전류탐상 및 누설자속탐상에서는 시험편에 수직인 y방향의 성분을 측정하므로, 용접부의 잔류응력 또는 압력에 의한 응력변화는 종래의 비파괴검사 기술에 의하면 결함에 의한 신호 이외에 추가되는 불특정 바이어스 신호가 혼재될 가능성이 높다.

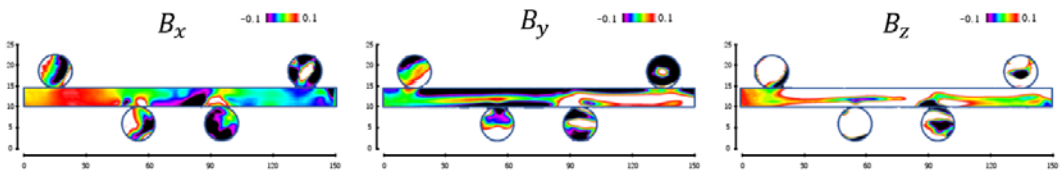
따라서, 본 논문에서는 자기센서의 선택시 시험편 표면에 수직인 방향의 자속 밀도( $B_y$ )가 아닌 시험편 표면에 수평인  $B_x$ ,  $B_z$  성분을 취득하는 반도체 기반 자기 센서인 GMR 센서를 도입하였다.



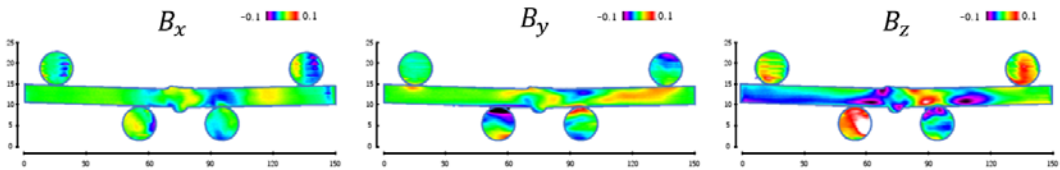


**Fig. 2 -11 Change of magnetic flux density due to stress;**  
**(a) without stress, (b) stress of 157MPa, (c) stress of 314MPa, (d) stress difference**

Fig. 2-12와 Fig. 2-13은 SA106 시험편 모재부와 용접부에서 4점 굽힘 시험 중 응력의 영향에 따른 자속밀도분포를 측정된 응력부하 전후의 결과를 비교 검토한 결과를 나타낸다. 모재의 경우, Fig. 2-12와 같이 4점 굽힘의 접촉면에서 큰 자속밀도 변화가 나타난다. 또한, x방향의 경우에는 그림에서 좌우, y방향의 경우에는 그림에서 상하 부분으로 자극이 분리되는 경향을 알 수 있다. 용접부의 경우에는 Fig. 2-13과 같이 자속밀도 분포의 변화가 응력부에서 집중된다.



**Fig. 2 -12 Magnetic flux density distribution in the cross section of the base metal**



**Fig. 2 -13 Magnetic flux density distribution in the cross section of the welded**

## 제 2 절 맥스웰 방정식 기반 유한요소 해석

### 1. 맥스웰 방정식 기반 유한요소 해석

본 연구에 사용된 수치해석 모델의 지배 방정식은 다음과 같이 주어진 전자기 이론의 기초를 설명하는 Maxwell 방정식에서 유도하였다. 즉, 전자기 와전류 문제를 설명하기 위해 전도 전류가 지배적이라는 가정을 고려하여 얻었다[31].

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \quad (2.11)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$\vec{j} = \vec{j}_0 - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.13)$$

관계식  $\vec{B} = \mu \vec{H}$  및 자기포텐셜  $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ 를 사용하여 교체한 후 Z-방향 성분  $\vec{A}(0,0,A_z)$ 만 사용하면, 자기 벡터 포텐셜(MVP, magnetic vector potential) 측면에서 2차원 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\vec{\nabla} \times \left\{ \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{A}_z) \right\} - j\omega\sigma \vec{A}_z = -\vec{j}_{s2} \quad (2.14)$$

여기에서  $\vec{j}$ 는 총 전류밀도,  $\vec{j}_{s2}$ 는 소스 전류밀도,  $\mu$ 는 시험편의 투자율,  $\sigma$ 는 열영향부(HAZ, heat affected zone) 및 용접 영역에서의 전기전도도,  $\omega$ 는 각 주파수이다.

HAZ 영역과 용접 영역에서 투자율은 각각  $\mu_1 = [\mu'_a, \dots, \mu_{THAZ}]$  및  $\mu_2 = [\mu'_a, \dots, \mu_{TW}]$ 로 표시된다. THAZ 및 TW는 각각 HAZ 영역 및 용접 영역의 유한 요소 메시에서 얻은 삼각형 요소의 총수를 나타낸다. 식 2.14를 Green의 정리를 이용하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$[M] + j\omega[N][A] = [F] \quad (2.15)$$



여기에서  $[M]$ 은 stiffness matrix,  $[N]$ 는 dynamic matrix,  $[A]$ 는 구하고자 자기포텐셜이며,  $[F]$ 는 소스벡터에 해당한다.

한편, 용접 영역에 결함이 있으면 물리적 특성이 변경되어 코일 임피던스가 변화한다. 임피던스 계산을 위한 몇 가지 방법이 있으며, 차이점은 수치 모델 및 연구할 장치의 구성으로 인한 솔루션과 직접적인 관계가 있는 상태 변수의 선택에 있다. 본 연구에서 임피던스  $Z$ 는 다음과 같이 MVP (실수 및 허수 부분)로부터 계산된다[32-33]. 여기에서  $N$ 은 코일 권수,  $S$ 는 코일 면적,  $r$ 은 코일의 반경이다.

$$\text{Re}(Z) = -\frac{N^2}{JS^2} \omega \iint_s 2\pi r \text{Im}(A) ds \quad (2.16)$$

$$\text{Im}(Z) = -\frac{N^2}{JS^2} \omega \iint_s 2\pi r \text{Re}(A) ds \quad (2.17)$$

응용 프로그램에서는 MATLAB에서 구현된 SFEM 코드 분석을 사용하여 SA106 배관 용접부의 인공균열에 대하여 해석하였다. 배관의 반경은 탐촉자 크기보다 훨씬 더 큰 160mm이므로 배관벽은 전도판으로 간주할 수 있다[34-35]. 이에 따라 해석 대상의 문제는 단순화되고, Fig. 2-14와 같이  $(x, y)$  평면에서 2차원으로 간주된다.

해결 영역 해상도는 해석된 검사 장치 및 공기와 관련된다. 균질한 Dirichlet 유형의 물리적 경계 조건을 연구 분야에 적용하여 물리적 특성이 다른 6개 영역으로 나누었다. Fig. 2-15에 나타낸 바와 같이, 우리가 고려한 메쉬에서 공기 영역이 탐촉자의 영향 영역을 포함할 만큼 충분히 커서 연구 분야의 경계에서 방출된 전자기장을 무시할 수 있음을 보여준다.



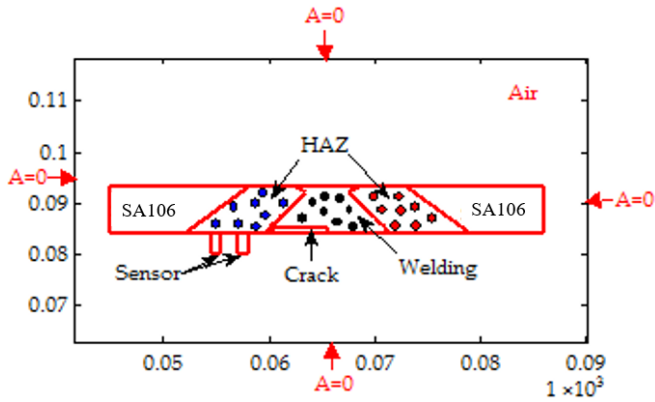


Fig. 2-14 Analysis area and boundary conditions

해석 영역은 Fig. 2-15 (a)와 같이 유한 요소 메쉬로 분할하였다. 해석한 장치의 실제 형상을 재현하고 측정 결과에 접근하기 위해 38,400개의 삼각형 요소와 19,269 개의 노드를 자동 생성된 하위 도메인으로 세분화하여 이산화하였다. 시뮬레이션 작업에서 이 사실을 고려하기 위해 와전류는 코일 근처에 국부적으로 배치하여 이동하였다[36]. 이때 각 탐촉자 위치에서 메쉬 분할이 반복되도록 해석하였다. 이 기술을 사용하면 양질의 요소로 탐촉자 주변의 조밀하고 미세한 메시를 얻을 수 있다. 탐촉자 변위의 함수로서 삼각형 메쉬 품질은 Fig. 2-15 (b)에 나타난 바와 같다. 메쉬 품질은 0.75 이상이며 결과적으로 정확한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있다.

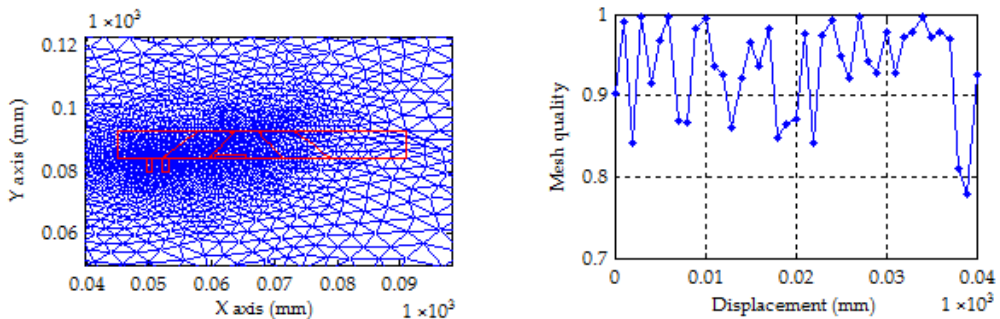


Fig. 2-15 Mesh of the solving domain and mesh quality according to the displacement

## 2. 실험적 검증

Fig. 2-16은 실험 장치이다. 맞대기 용접된 탄소강(SA106) 배관 시험편을 회전형 스테이지 플랫폼에 장착하고, LIGiS, 데이터수집기(NI cDAQ) 및 컴퓨터로 구성된다. LIGiS에서 얻은 출력 신호는 아날로그-디지털 변환기를 통해 컴퓨터로 전송하였다. LIGiS를 검사 영역에 근접시켜서 21mm/s의 속도로 회전하면서 측정하였다.

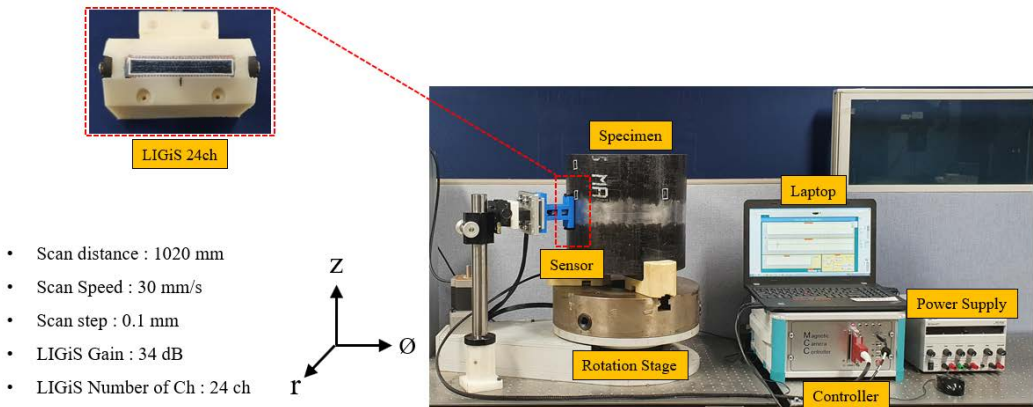
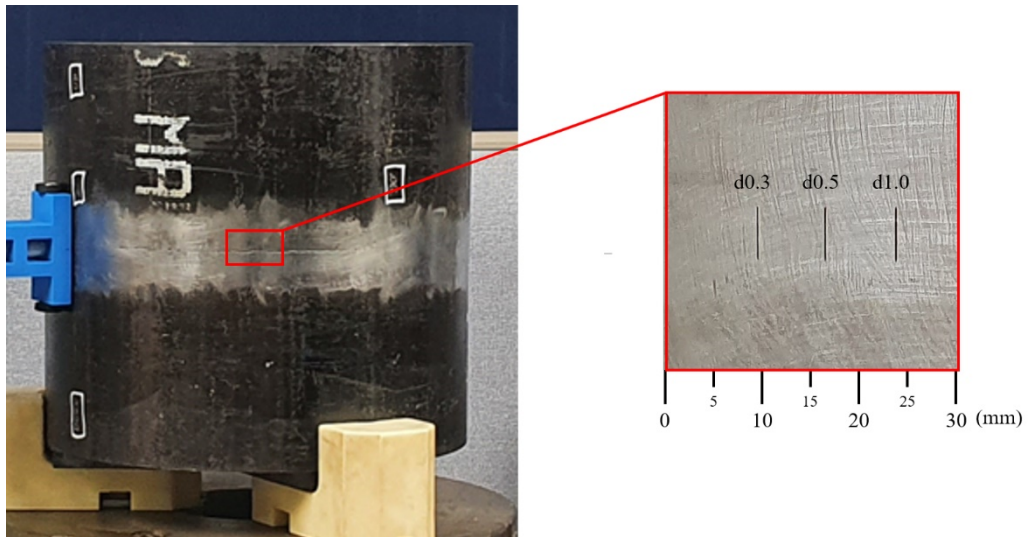
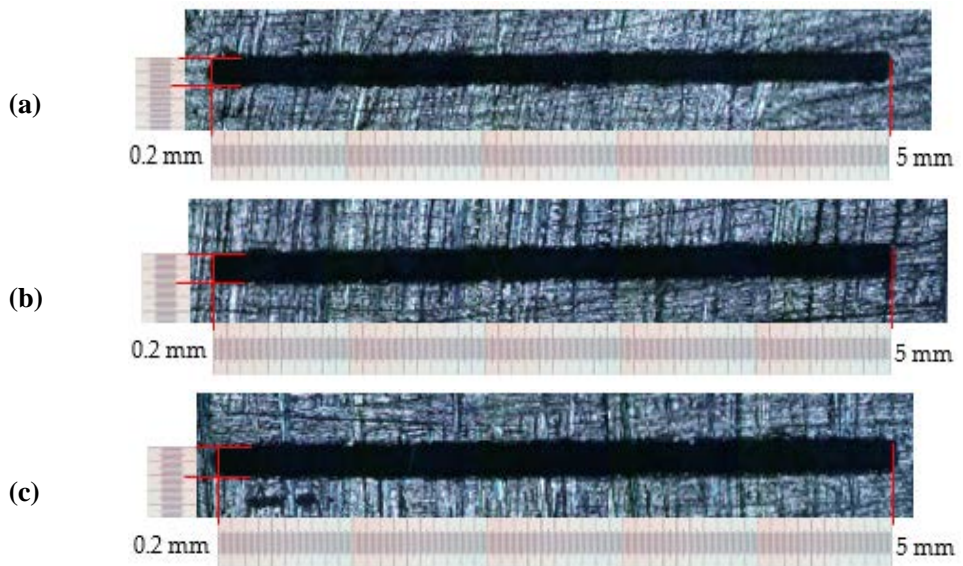


Fig. 2 -16 Experimental setup

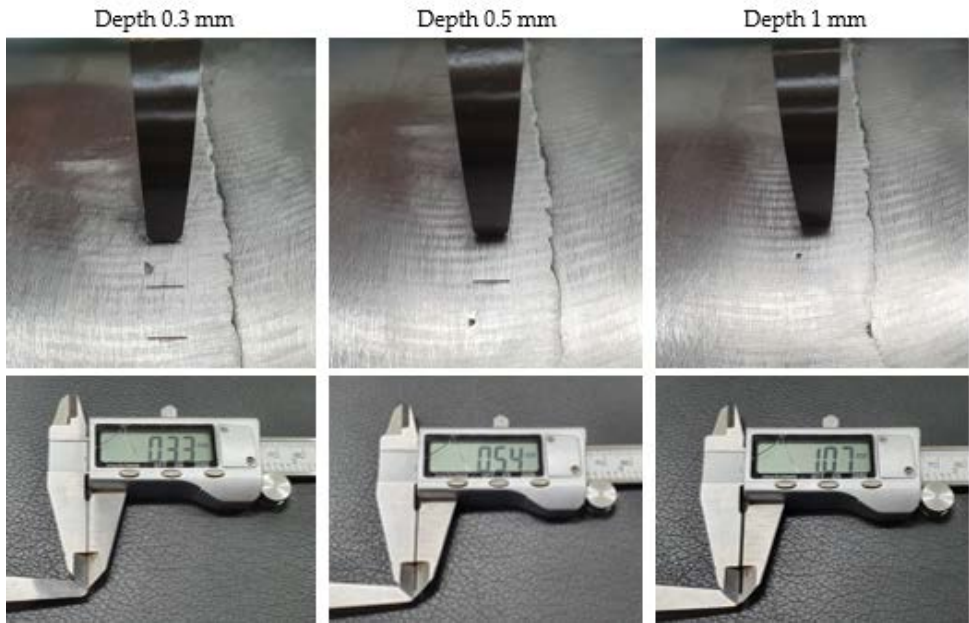
한편, 방전가공에 의하여, 깊이가 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm이고, 길이가 5mm, 폭이 0.2mm인 인공균열(각각 d0.3, d0.5, d1.0로 표현)은 Fig. 2-17과 같이 7mm 간격으로 배치하였다. 또한, 인공균열의 폭과 길이는 Fig. 2-18과 Fig. 2-19에 나타난 바와 같이 현미경 분석 및 깊이 게이지를 사용하여 실측하였다.



**Fig. 2 -17 Specimen and crack position**



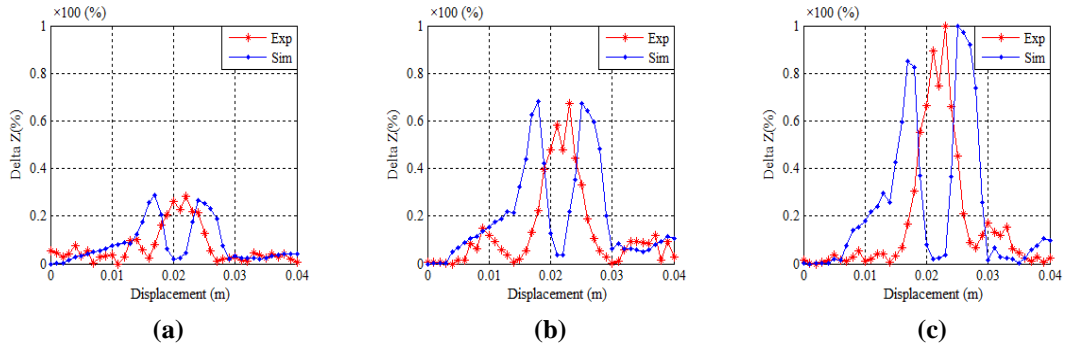
**Fig. 2 -18 Measurement of length and width of the cracks using microscope;**  
**(a) depth 0.3 mm, (b) depth 0.5 mm, (c) depth 1 mm**



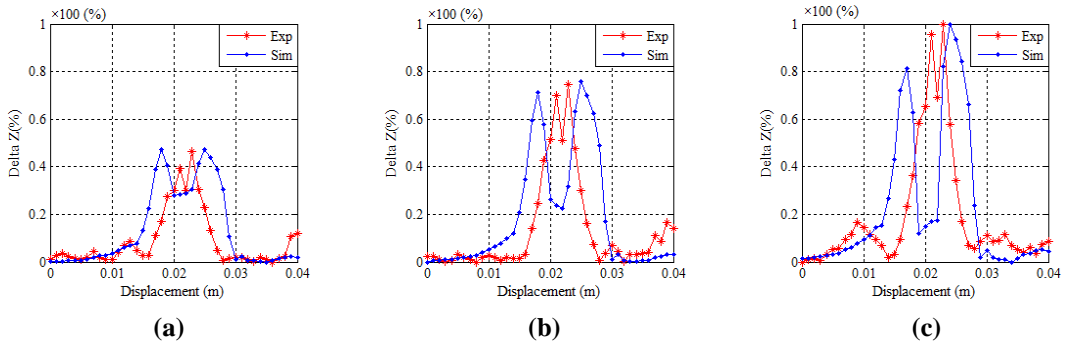
**Fig. 2 -19 Cracks depth measurement**

KEPIC MI 기술 표준[37]을 참조하여, HAZ 길이는 12.7mm (1/2인치)로 가정하였다. 다양한 침투깊이를 고려하기 위하여 4개의 주파수 즉, 10kHz, 20kHz, 40kHz, 80kHz를 인가하여 측정하였다.

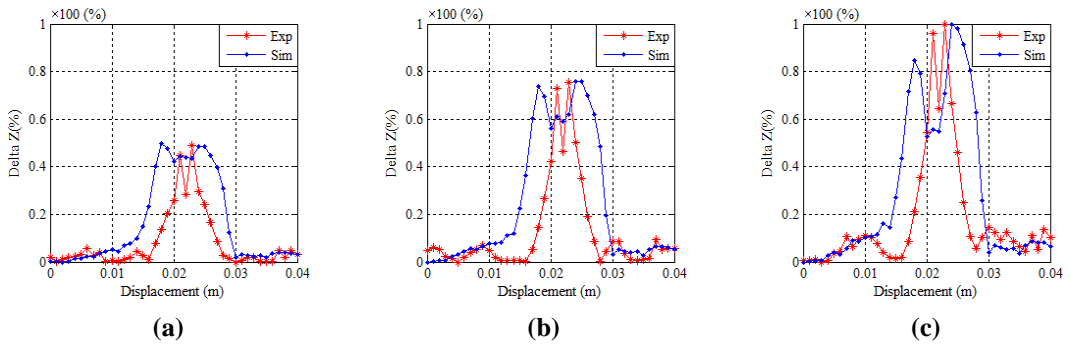
실험 및 시뮬레이션으로 인한 와전류 측정은 실제 양에 기반하여 실시하였으며, 결과는 임피던스 변화를 검토하였다. 각 결과는 Fig. 2-20~Fig. 2-23에 나타낸 바와 같이 비교를 위하여 정규화하였다. 임피던스 변화는 용접 균열에 대하여 분석하였다. 정규화된 임피던스는  $\Delta Z\% = (Z - Z_0) / (Z - Z_0)_{max}$ 로 계산하였다.  $Z_0$  및  $Z$ 를 사용하면 균열이 없는 영역의 임피던스와 HAZ 및 균열이 있는 용접의 임피던스를 비교할 수 있다.



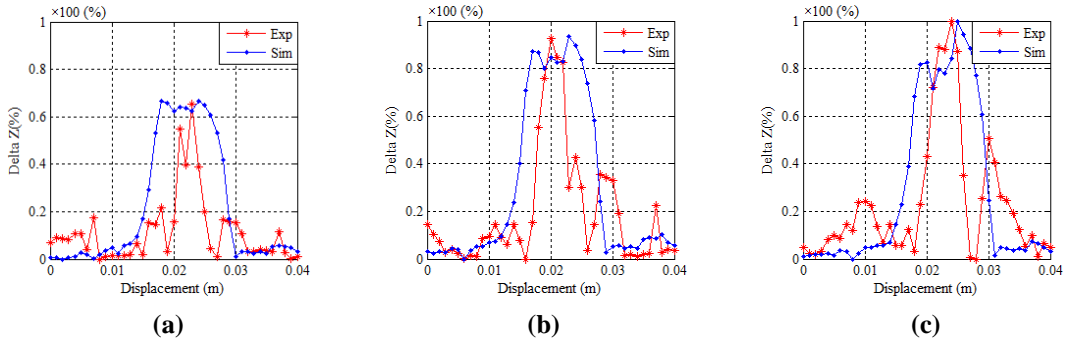
**Fig. 2 -20 Impedance variation at 10 kHz**  
 (a) depth=0.3 mm, (b) depth=0.5 mm, (c) depth=1 mm



**Fig. 2 -21 Impedance variation at 20 kHz**  
 (a) depth=0.3 mm, (b) depth=0.5 mm, (c) depth=1 mm



**Fig. 2 -22 Impedance variation at 40 kHz**  
 (a) depth=0.3 mm, (b) depth=0.5 mm, (c) depth=1 mm



**Fig. 2 -23 Impedance variation at 80 kHz**  
**(a) depth=0.3 mm, (b) depth=0.5 mm, (c) depth=1 mm**

균열을 특성화하기 위해 적용된 방법은 와전류 응답이 탐촉자의 주파수에 의존한다는 사실에 기반한다. 작동 주파수, 탐지 및 최적 주파수를 고려하면 와전류의 침투 깊이가 중요하다. 따라서 와전류 응답은 균열 표면의 깊이 방향에 민감하다. 임피던스 신호의 모양은 각 깊이와 각 주파수에 대해 동일하지는 않다. 하지만, 신호는 환경 변화(용접 및 균열)에 해당하는 피크에서 변동을 나타낸다. 따라서, 이것은 용접 영역에 축방향 균열이 존재하기 때문으로 이해할 수 있다.

여러 매개 변수로 인해 약간의 편차가 관찰되었지만 시뮬레이션 결과는 대체적으로 실험 신호의 추세와 모양을 재현한다. 따라서, 와전류검사는 검사 대상에 따른 침투깊이를 고려하여 주파수를 선정하여야 한다.

## 제 3 장 실험 및 고찰

### 제 1 절 배관용접부 결함 모사 시험편

Fig. 3-1과 Table 3-1은 두께 9mm, 외경 323.9mm의 탄소강(SA106) 재질 배관 시험편에 방전가공에 의하여 도입한 인공결함의 위치와 치수를 나타낸다. 총 4개 구역에 (1) 결함의 길이방향(Group #1), (2) 용접부 및 열영향부에 도입한 용접선에 수직인 방향의 결함(Group #2), (3) 용접부 및 열영향부에 도입한 용접선에 수평인 방향의 결함(Group #3) 및 (4) 결함의 길이 및 방향이 다른 결함(Group #4)을 각각 도입하였다. 각 그룹은 90도 간격이며, 결함의 중심거리는 7~12mm이다.

Fig. 3-2은 제작된 탄소강 재질의 배관용접부 시험편을 나타낸다.

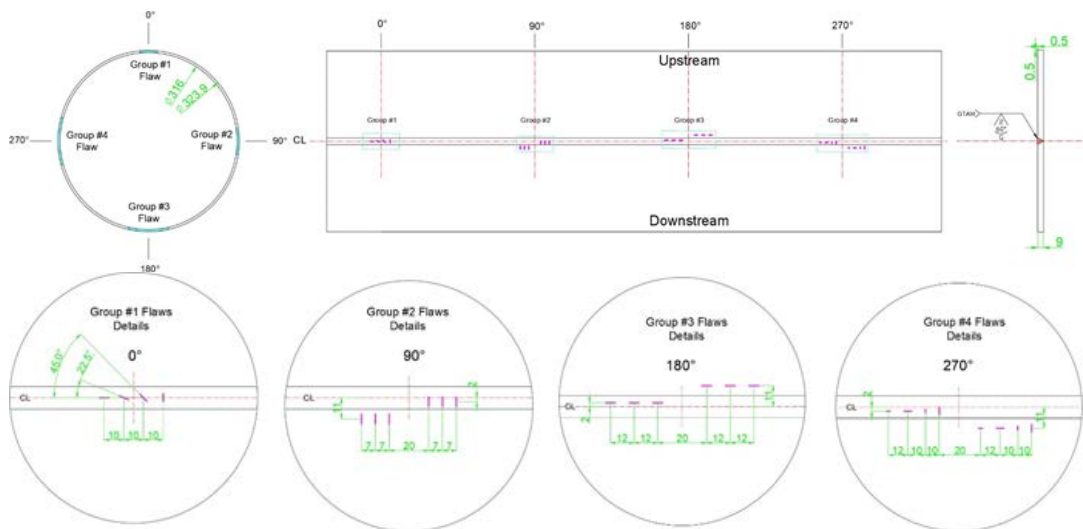


Fig. 3 -1 Specimen and artificial defect drawings



**Table 3 -1 Specifications of artificial defect**

	Group #1	Group #2	Group #3	Group #4	Tolerance
Number of defect	4	6	6	8	
Direction	0°, 22.5° 45°, 90°	90°	0°	0°, 90°	
Depth (mm)	1.5	0.3, 0.5, 1.0 0.3, 0.5, 1.0	0.3, 0.5, 1.0 0.3, 0.5, 1.0	0.3, 0.5, 0.3, 0.5 0.3, 0.5, 0.3, 0.5	±0.05
Length (mm)	5.0	5.0	5.0	2.0, 4.0, 2.0, 4.0 2.0, 4.0, 2.0, 4.0	±0.5
Width (mm)	0.20	0.20	0.20	0.20	+0.0, -0.1



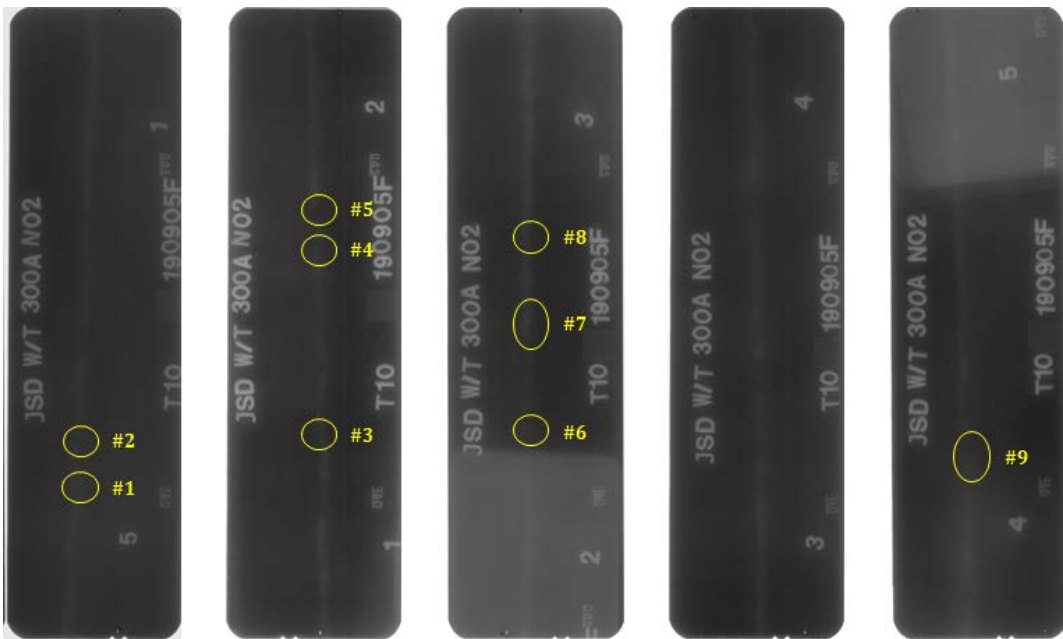
**Fig. 3 -2 Specimen**



## 제 2 절 비교실험

### 1. 방사선 검사

상술한 Fig. 3-2의 배관용접부 시험편에서 전자기장의 왜곡을 일으키는 별도의 원인을 미리 파악하기 위하여 방사선검사를 실시하였다. Fig. 3-3 (a)는 검사 결과 전체 영역을 나타낸다. Fig. 3-3(b)는 Fig. 3-3(a)에 표기된 #1 ~ #9에 대한 결함 영역 확대 영상을 나타낸다. 각 영역에서 용입부족(IP, Incomplete Penetration)과 기공(Porosity)이 존재함을 지시하였으며, 결함 종류 및 위치에 대한 상세 정보는 Table 3-2에 나타내었다. 하지만, 방전가공에 의하여 도입한 표면 인공결함은 검출하지 못하였다. 이후 Fig. 3-3의 필름 영상을 디지털화하여, 전자기 비파괴검사 결과와 비교하였다.



(a)

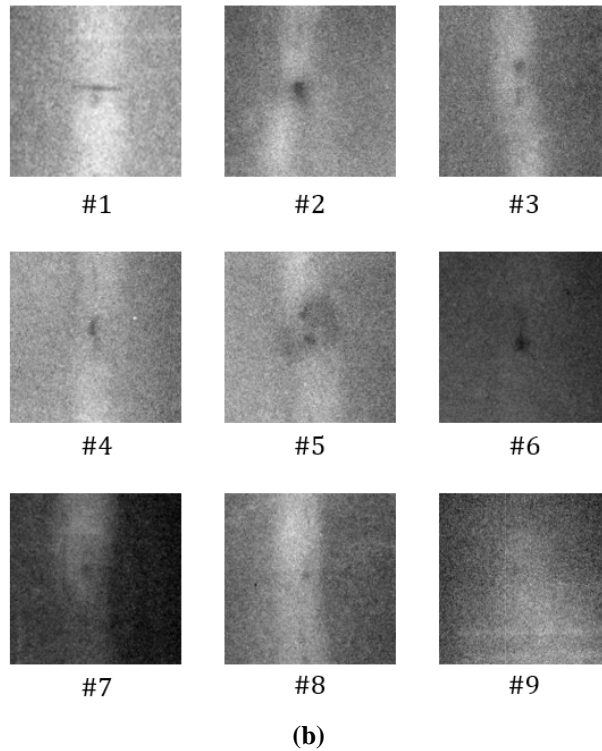


Fig. 3-3 RT result of welding pipe specimen; (a) all area, (b) defect area

Table 3-2 Defect type and position

No.	Position (angle)	Defect
#1	10°	용입부족(IP)
#2	25°	용입부족(IP)
#3	80°	용입부족(IP)
#4	110°	용입부족(IP)
#5	125°	용입부족(IP)
#6	165°	용입부족(IP)
#7	195°	용입부족(IP)
#8	225°	기공 (Porosity)
#9	285°	용입부족(IP)

## 2. 초음파 검사

Fig. 3-4는 탄소강 재질의 배관 시험편의 용접부 표면의 초음파 분포를 측정하기 위한 실험 장치이다. 입력 주파수는 5MHz이며, 입사각 60°의 경사형 초음파 센서를 사용하였다. 회전형 스테이지에 배관형 시험편을 거치한 후, 원주방향으로 회전하며 측정하였다. 스캔 간격은 1.7mm이다.

Fig. 3-5에 나타난 바와 같이 센서 위치를 5mm씩 이동하여 HAZ(#1), 용접부와 HAZ의 경계(#2), 용접부 중심(#3)에 대해 데이터를 취득하였다.

Fig. 3-6은 #1 위치의 실험 결과를 나타낸다. 용접부 내부 결함 및 HAZ 표면 결함신호를 특정할 이상 신호는 나타나지 않았다. Fig. 3-7은 #2 위치의 실험 결과를 나타낸다. 용접부 내부 결함 및 용접부 경계면 결함신호를 특정할 이상 신호는 나타나지 않았다. Fig. 3-8은 #3 위치의 실험 결과를 나타낸다. 용접부 내부 결함 및 용접부 표면 결함신호를 특정할 이상 신호는 나타나지 않았다.

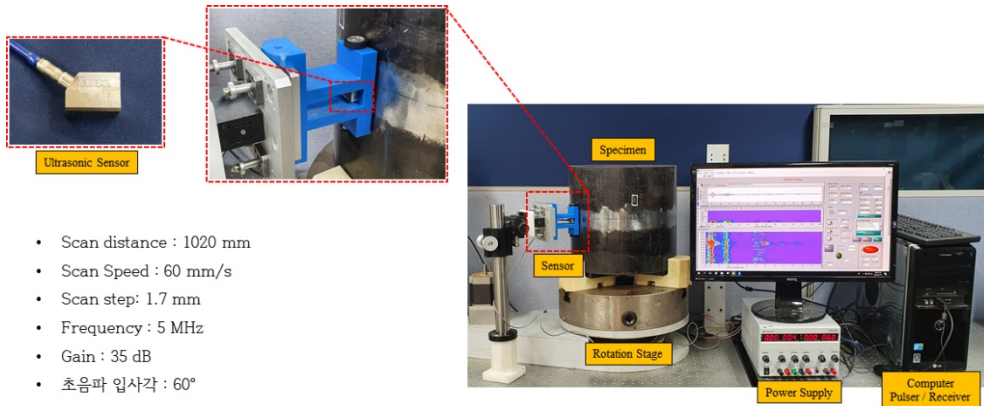
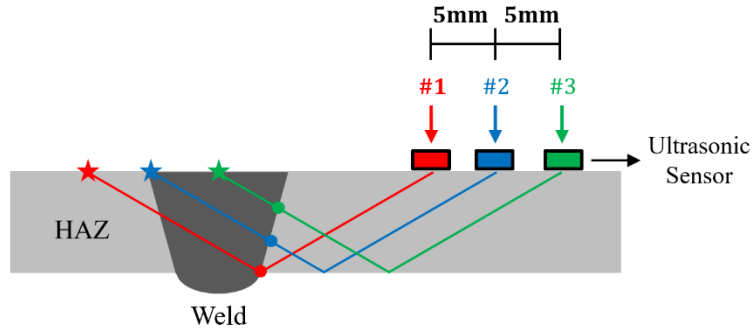
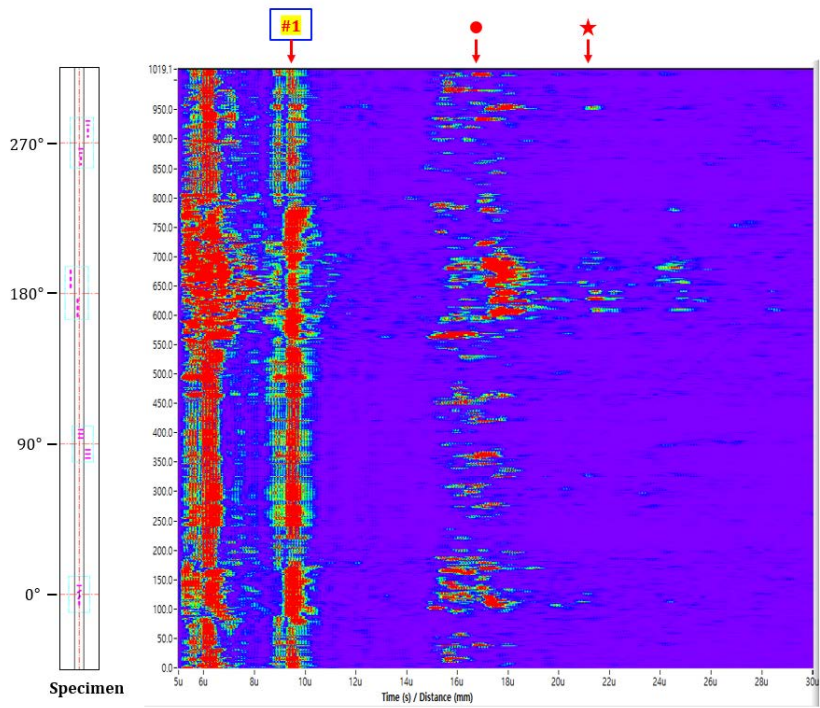


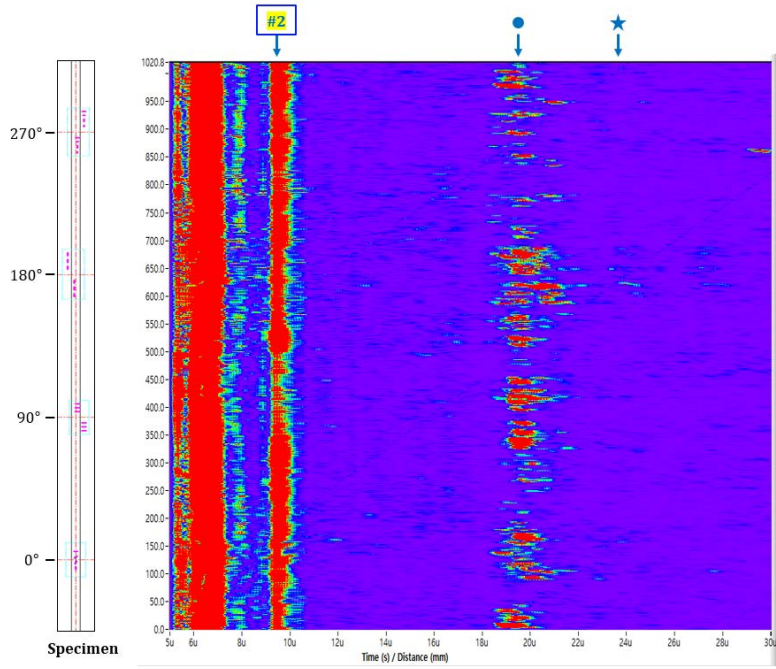
Fig. 3 -4 Ultrasonic testing system



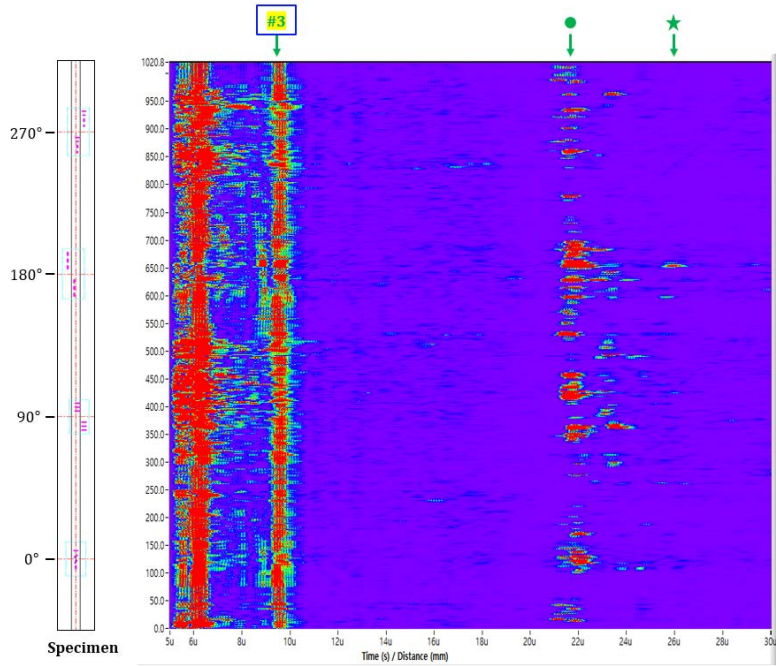
**Fig. 3 -5 Ultrasonic sensor position**



**Fig. 3 -6 Experiment result #1**



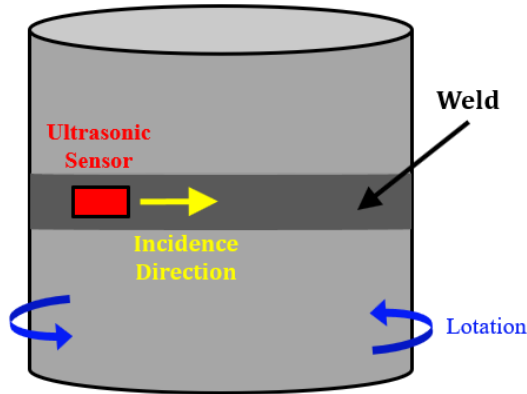
**Fig. 3 -7 Experiment result #2**



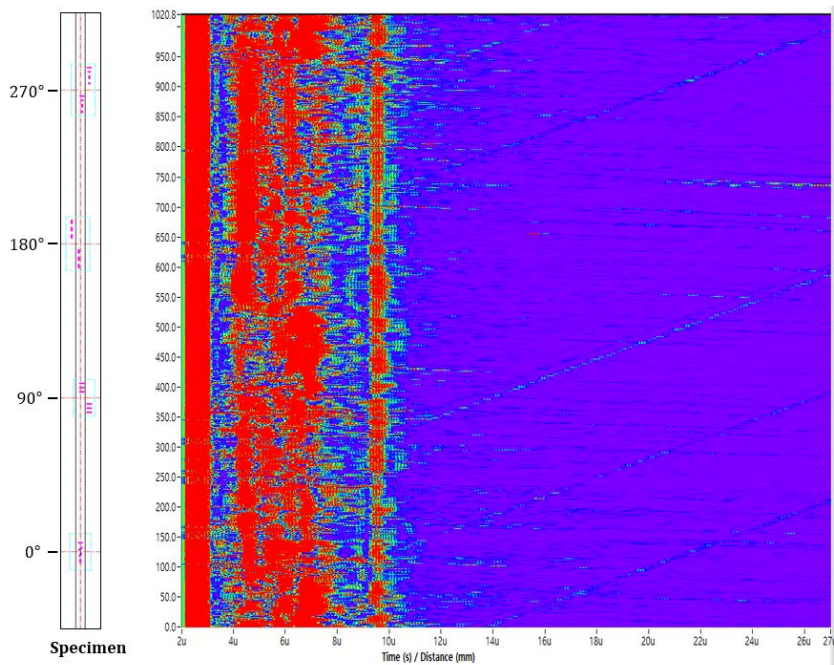
**Fig. 3 -8 Experiment result #3**



Fig. 3-9의 (a)에 나타난 바와 같이 초음파 센서를 용접부 중심에 위치시킨 후, 초음파 입사방향 및 스캔 방향을 용접방향과 동일하게 측정하였다. Fig. 3-9의 (b)는 측정결과이다. 용접부 내부결함 및 표면결함 신호를 특정할 이상 신호는 나타나지 않았다.



(a)



(b)

**Fig. 3-9 Welding line direction test result;**  
**(a) sensor position and measurement direction, (b) result**

### 3. 잔류자화 검사

#### 가. TMR 센서를 이용한 3축 잔류자화 측정

Fig. 3-10은 TMR(Tunnel Magnetoresistance) 센서 및 ECT 센서를 이용하여 탄소강 재질 배관 시험편의 용접부 표면 잔류자화 분포 및 와전류 분포를 측정하기 위한 실험 장치이다. 이 실험장치는 이후 진행할 와전류 검사에서도 활용된다. 회전형 스테이지에 시험편을 거치한 후  $\phi$ 축 방향으로 회전시키며 측정하였다. 또한, 용접부를 중심으로 양쪽 열영향부까지 측정하기 위하여 z축 방향으로 1mm씩 센서위치를 이동시키며 총 40mm의 영역의 잔류자화를 측정하였다.

용접부 표면의 잔류자화 분포 측정은 3축( $\phi$ 축, z축, r축)을 동시에 측정 가능한 고감도 TMR센서를 사용하여 측정하였으며, 그 결과를 TMR센서의 측정결과 및 RT결과와 비교하였다.

Fig. 3-11은 실험 결과를 나타내며,  $\phi$ 축, z축, r축 잔류자화는 0도, 90도, 270도에 존재하는 일부 인공결함 영역에서만 자속밀도분포의 변화가 검출되었다.

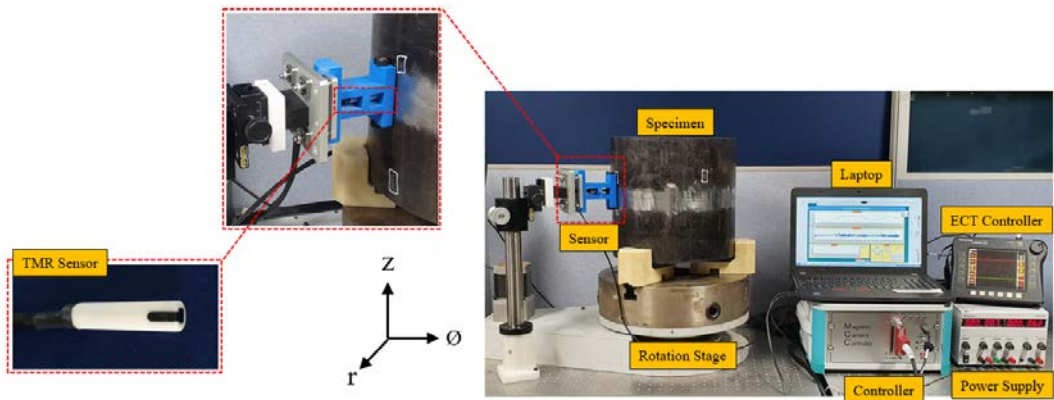


Fig. 3 -10 Measurement system using TMR sensor and ECT probe

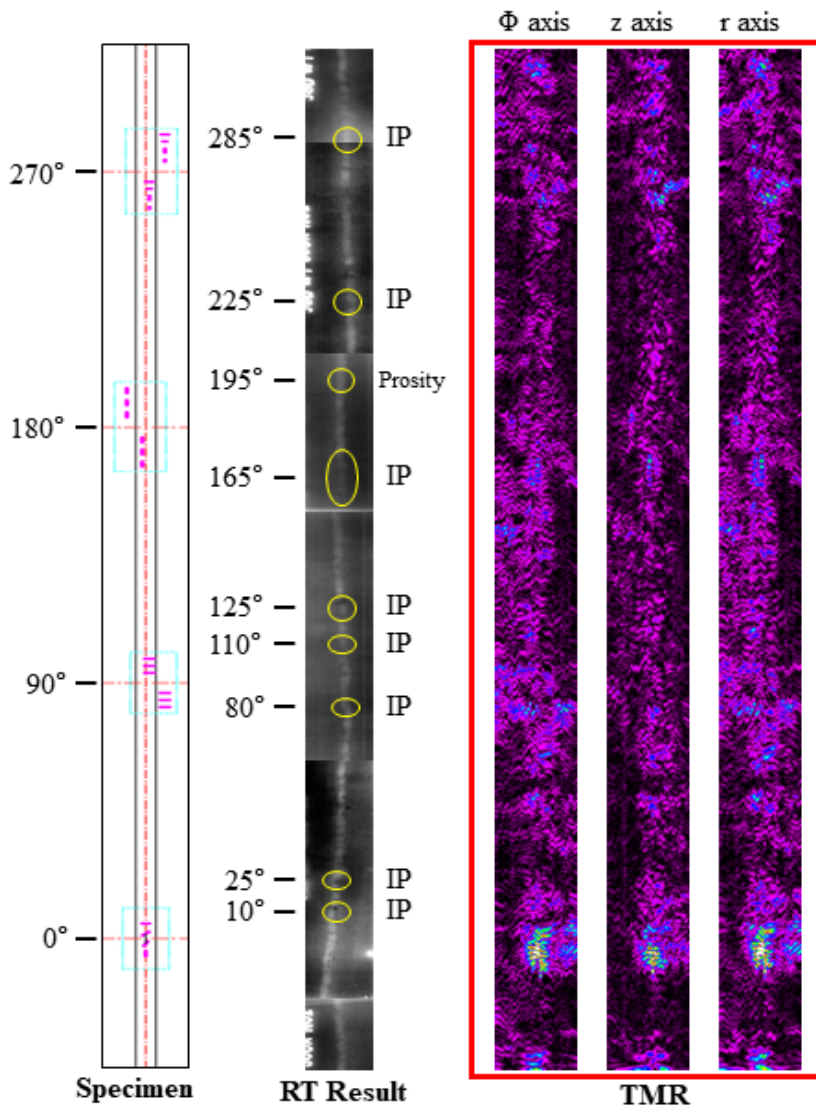


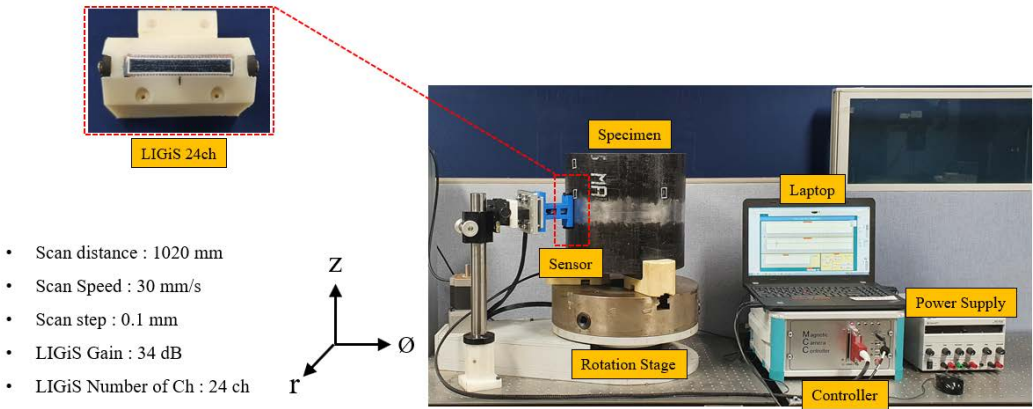
Fig. 3 -11 Residual magnetization measurement result using TMR sensor



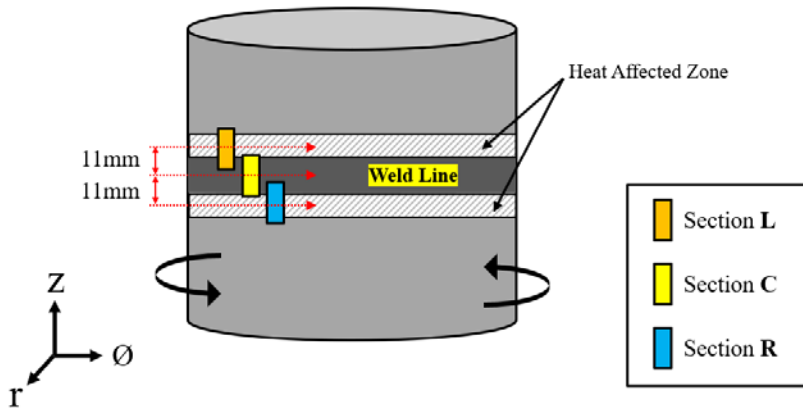
## 나. GMR센서를 이용한 무극성 잔류자화 측정

Fig. 3-12은 탄소강 재질의 배관 시험편의 용접부 표면의 잔류자화 분포를 측정하기 위한 실험 장치이다. 회전형 스테이지에 시험편을 거치한 후  $\phi$ 축 방향으로 회전시키며 측정하였다. 또한, Fig. 3-13에 나타낸 바와 같이 용접부를 중심으로 양쪽 열영향부까지 측정하기 위하여 센서위치를 용접부 중심을 기준으로 z축 상, 하방향으로  $\pm 11\text{mm}$  이동하여 총 3개의 구간(L, C, R 구간)으로 나누어 측정한 후 겹치는 부분을 제외하고 총 40mm 영역으로 합쳐서 표현하였다. 이후 설명할 LIGiS를 이용한 모든 실험은 같은 방식으로 측정 및 표현하였다.

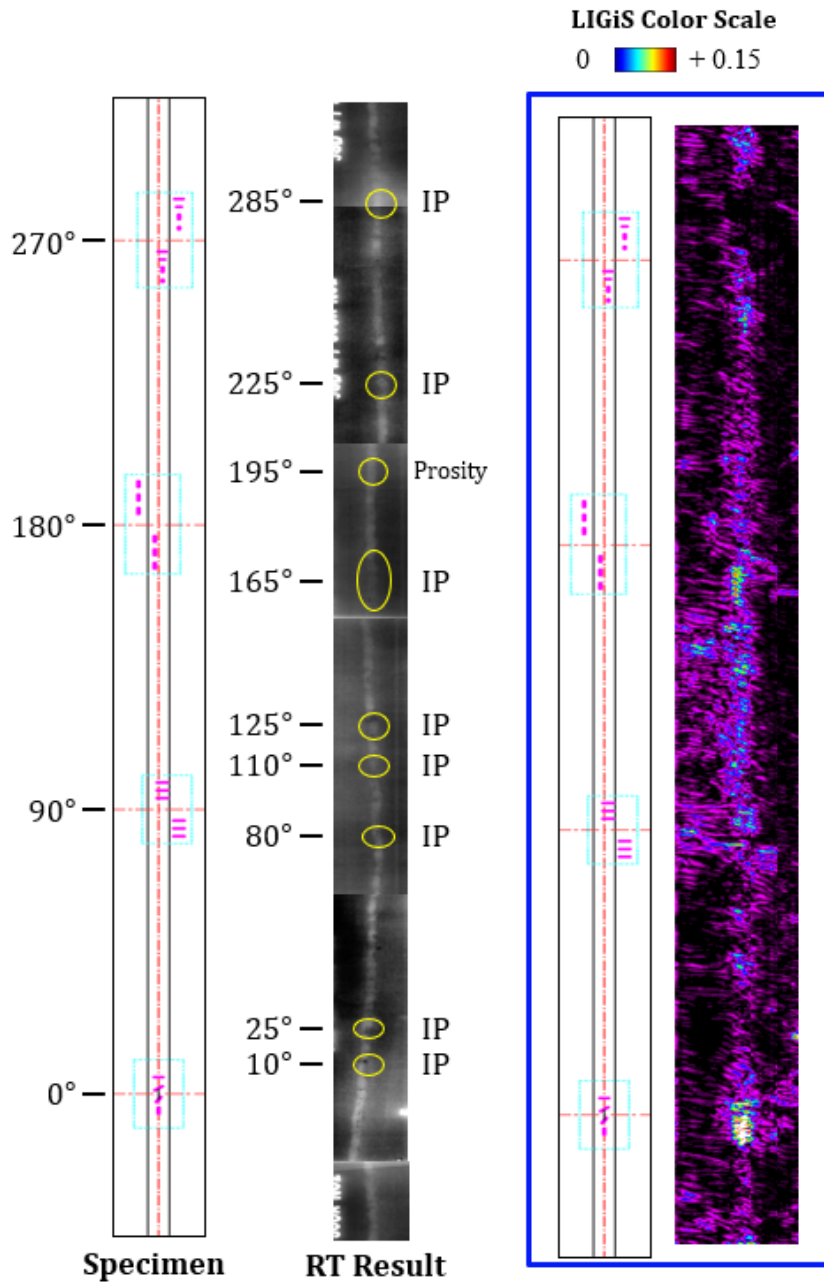
$\phi$ -와 r-방향에 각각  $45^\circ$  로 기울어진 선형배열 GMR 센서(LIGiS, linearly integrated GMR sensors array)에 의하여 잔류 자속밀도분포를 측정한 결과를 Fig. 3-14에 나타낸다.  $0^\circ$  그룹의 인공결함과  $90^\circ$  그룹의 용접부 중심에 위치한 인공결합에서는 잔류자화가 관찰되지만, 나머지 영역에서는 인공결함으로 인한 잔류자화 신호를 명확하게 구분하기 곤란하다.



**Fig. 3 -12 Residual magnetization measurement system using LIGiS**



**Fig. 3 -13 LIGiS mesuerment position**



**Fig. 3 -14 Residual magnetization measurement result using LIGiS**

#### 4. 누설자속 검사

Fig. 3-15, Fig. 3-16은 탄소강 재질의 배관 시험편의 용접부 표면에  $\phi$ -방향으로 100mA, 200mA의 직류자계를 인가한 후,  $\phi$ -와 r-방향에 각각  $45^\circ$  로 기울어진 선형 배열 GMR 센서(LIGiS, linearly integrated GMR sensors array)에 의하여 누설자속밀도 (MFL, magnetic flux leakage) 분포를 측정된 결과이다. 결함의 존재에 기인한 누설자속은 명확하게 지시되지 않았다. 한편, 100mA를 인가한 경우와 200mA를 인가한 경우의 차이를 Fig. 3-17에 나타낸다. 이는 결함의 존재에 기인한 누설자속의 영향을 평가하기 위한 것으로 배경 데이터를 제거하는 효과를 가진다. 하지만, 이러한 신호처리방법에도 불구하고, 결함이 검출되지 않았다.

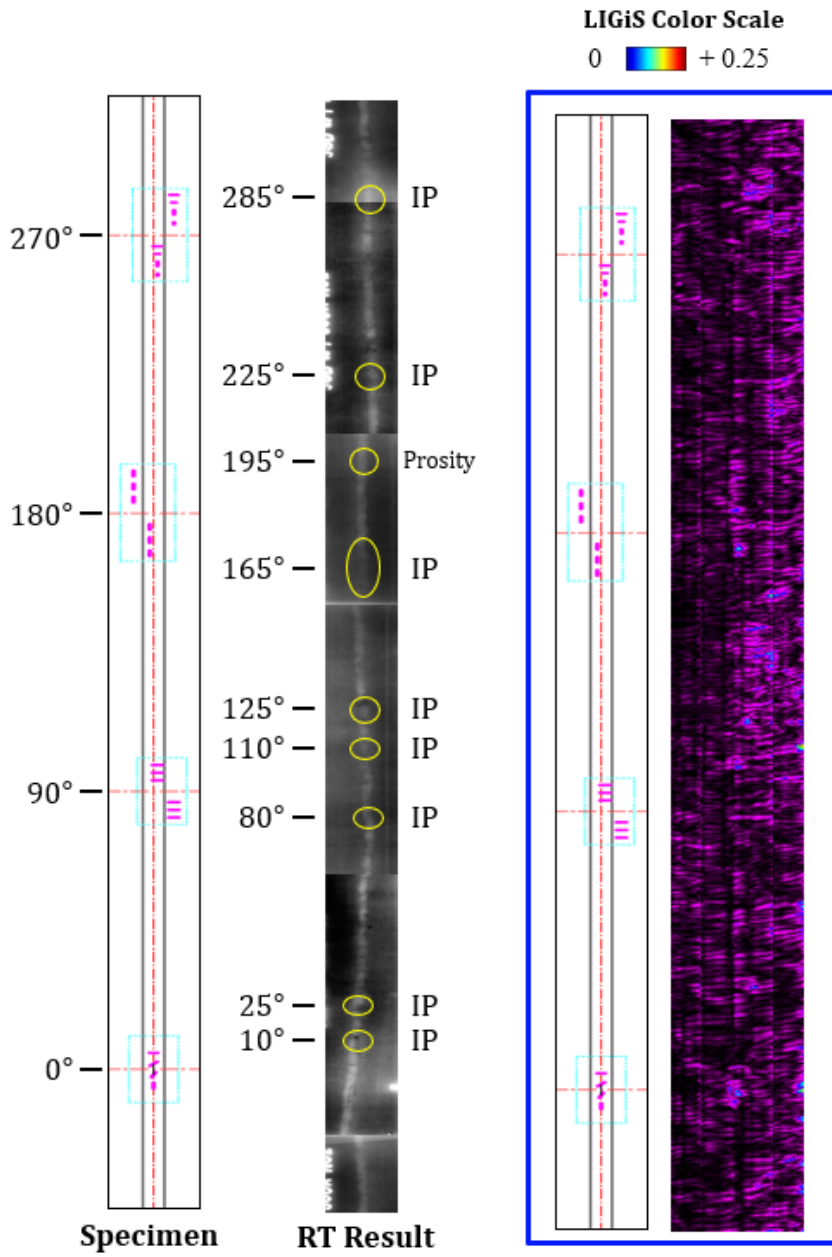


Fig. 3 -15 MFLT result using LIGiS (100mA)

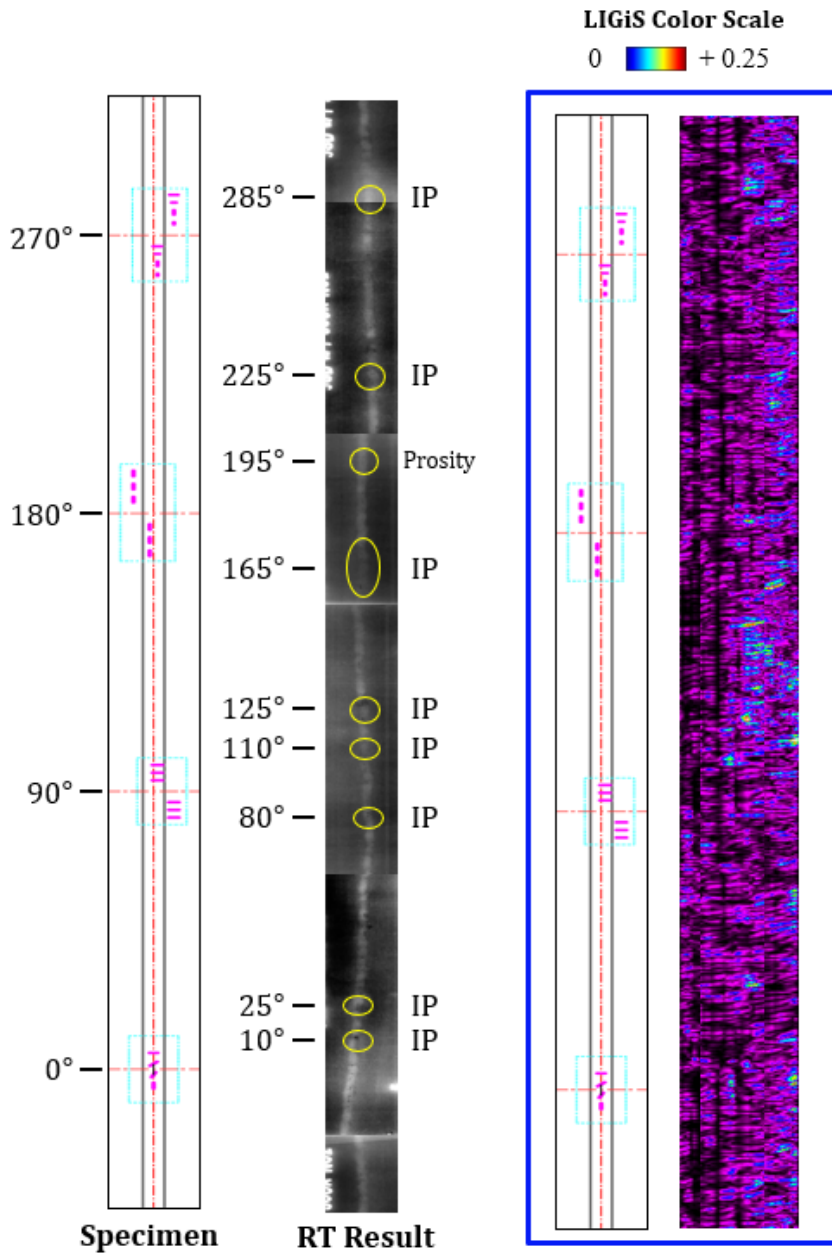
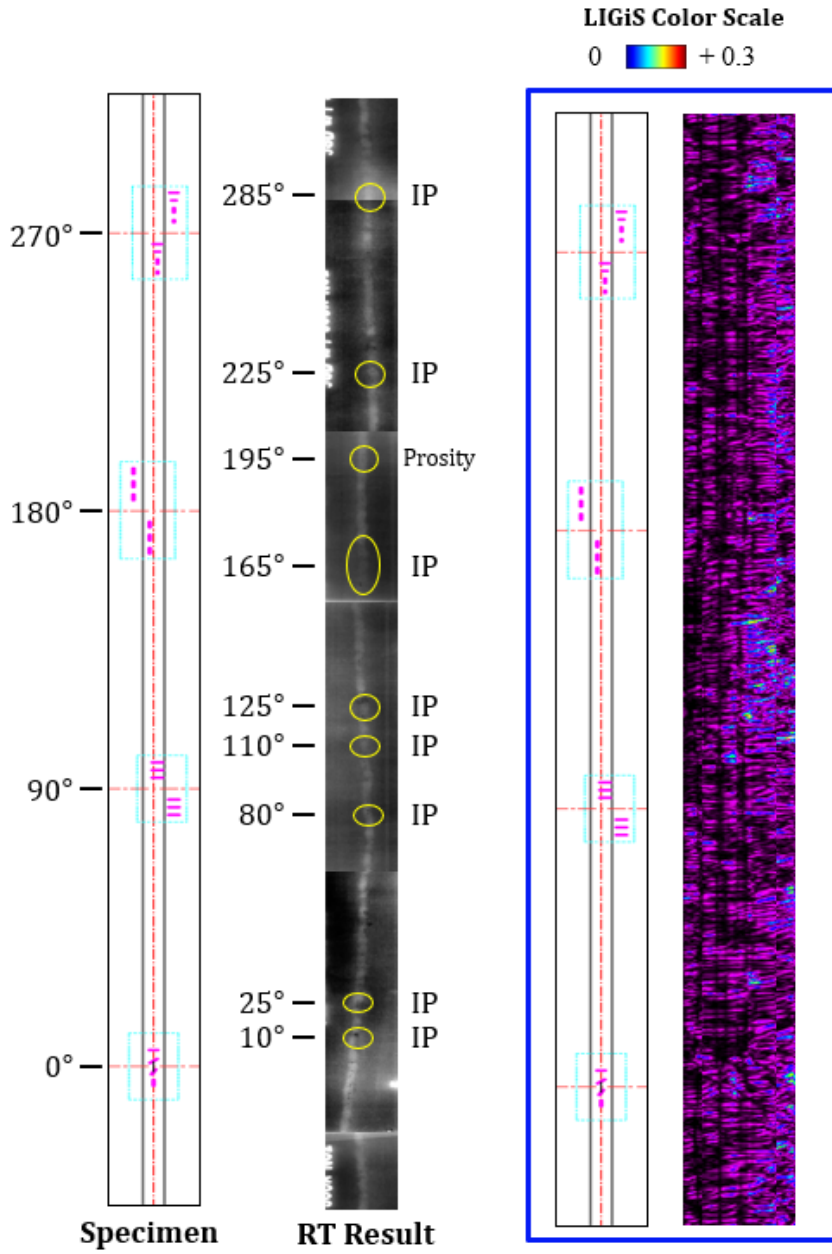


Fig. 3 -16 MFLT result using LIGiS (200mA)



**Fig. 3 -17 Difference between 100mA and 200mA**

## 5. 와전류 검사

Fig. 3-18은 ECT 센서에 10, 20, 40kHz의 주파수를 인가하며 용접부 표면의 와전류 분포를 측정한 결과이다. 표면결함 신호를 측정할 이상 신호는 나타나지 않았다.

Fig. 3-19는 Fig. 3-18의 실험 결과를 바탕으로 다음과 같은 해석을 실시한 결과이다. 먼저 용접부 표면에 결함이 존재하는 경우, 10kHz와 40kHz의 주파수에서 위상각도의 차이가 발생하게 된다. 따라서, 식 3.1에 나타난 바와 같이 10kHz와 40kHz 위상각 차이의 절대값( $\Delta\phi$ )을 구하였다. 그리고 270° 결함그룹의 깊이 0.5mm, 길이 4mm인 축방향 결함 위치에서의  $\Delta\phi$ 를 임계값( $\Delta\phi_{Threshold}$ )으로 지정하여 임계값 이하의 값은 0으로 변환하고, 임계값 이상은 10kHz 결과값과 곱한 결과를 Fig. 3-12 (a)에 나타내었다. 또한 식 3.2에 나타난 바와 같이 40kHz의 결과는 Fig. 3-12 (b)에 나타내었다. 결과적으로 이러한 신호처리에도 불구하고 결함 신호를 특정할 수 없었다.

$$\begin{aligned}
 \Delta\phi_{|10-40|} &= |\phi_{10kHz} - \phi_{40kHz}| \\
 \Delta\phi_{|10-40|} &= |\phi_{10kHz} - \phi_{40kHz}|
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

$$V_{10kHz} = R_{10kHz} \times \begin{cases} 0 & \Delta\phi_{|10-40|} \leq \phi_{Threshold} \\ \Delta\phi_{|10-40|} & \Delta\phi_{|10-40|} > \phi_{Threshold} \end{cases}
 \tag{3.2}$$

$$V_{40kHz} = R_{40kHz} \times \begin{cases} 0 & \Delta\phi_{|10-40|} \leq \phi_{Threshold} \\ \Delta\phi_{|10-40|} & \Delta\phi_{|10-40|} > \phi_{Threshold} \end{cases}
 \tag{3.3}$$



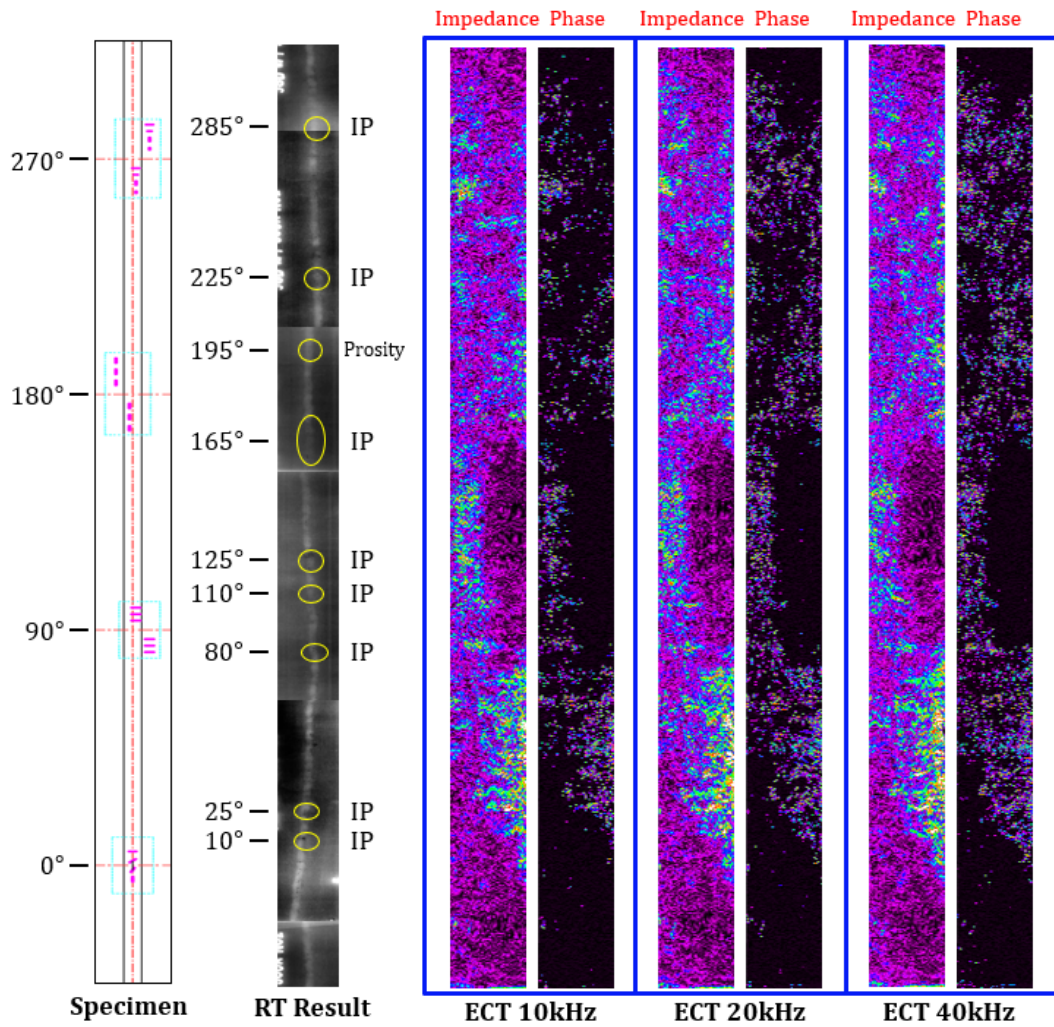


Fig. 3 -18 Eddy current testing result

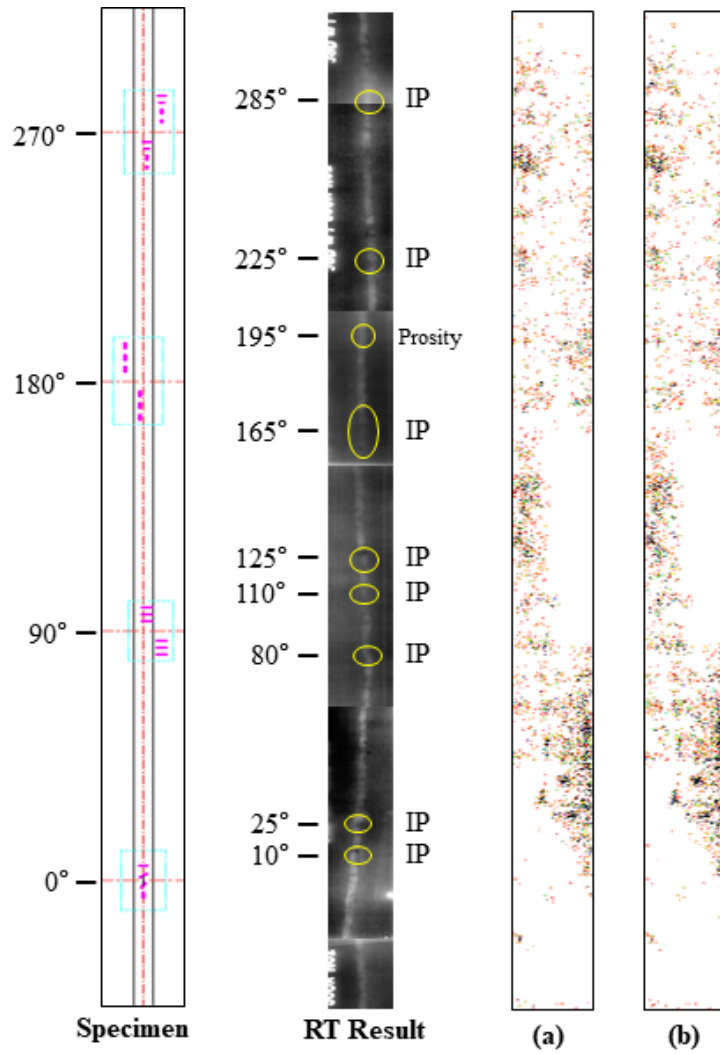


Fig. 3 -19 ECT Signal processing result; (a) 20kHz Result, (b) 40kHz Result

### 제 3 절 자기카메라

#### 1. 시스템 구성

본 연구에서 제작한 자기카메라 탐촉자는 Fig. 3-20에 나타난 바와 같이 코어가 없는 여자 코일을 LIGiS(linearly integrated GMR sensor array) 뒷면에 배치하여 제작하였다. 여자 코일은 직경 0.2mm의 구리선으로 140회 권선하였다. 여자전류는 10~80kHz에서 100~400mA의 AC 전류를 인가할 수 있다. LIGiS에는 0.6~1.2mm 간격으로 16~32 개의 GMR 센서를 배열하였다. GMR 센서는 여자 코일 및 직류 자기장에 의해 포화되는 것을 방지하기 위해 배열의 길이 방향에 대하여 45° 로 배치하였다.

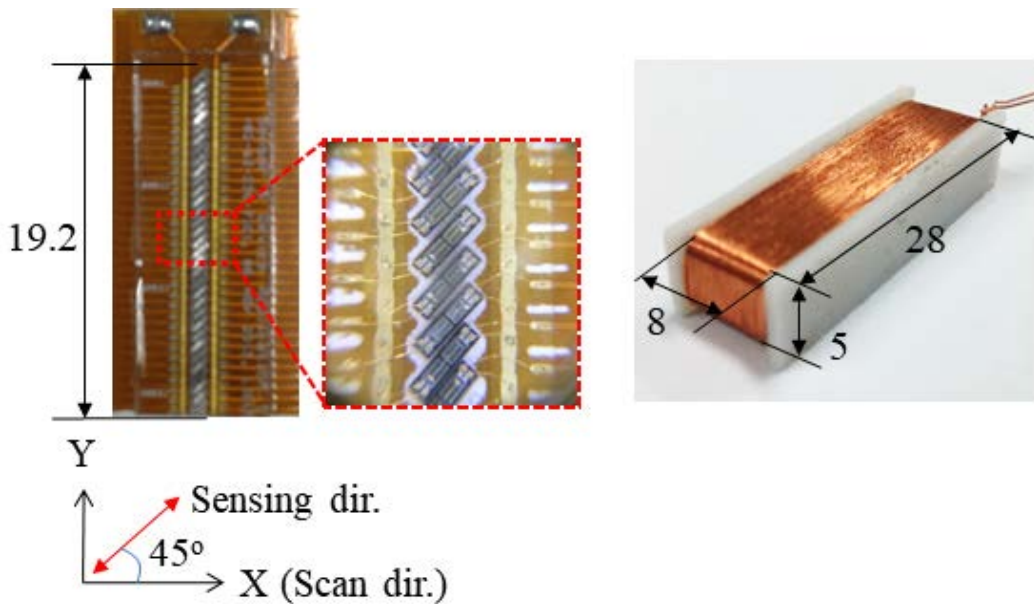


Fig. 3 -20 LIGiS and exciting coil

Fig. 3-21은 실험 장치를 나타낸다. 배관 용접부 시험편, 회전형 스테이지, LIGiS, 자기카메라 컨트롤러 및 컴퓨터로 구성된다. 회전형 스테이지 및 센서 지지대를 이용하여, LIGiS를 검사 영역에 근접시킨 후, 21mm/s의 속도로 회전하면서 측정하였다.

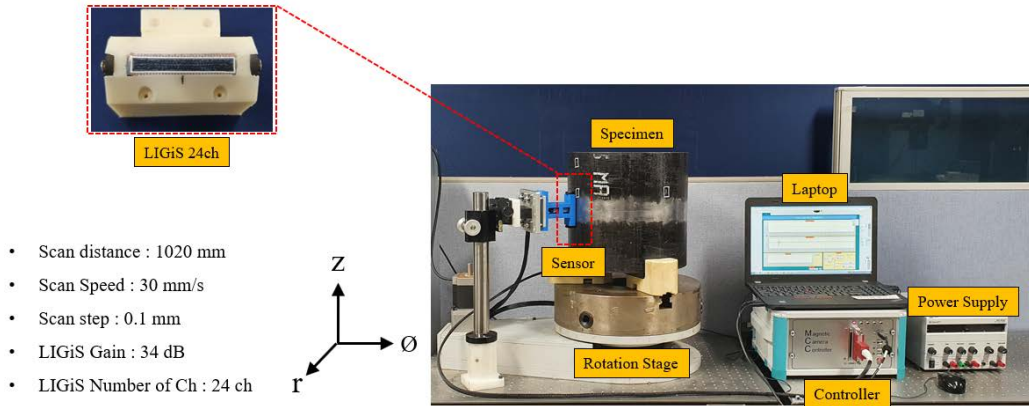
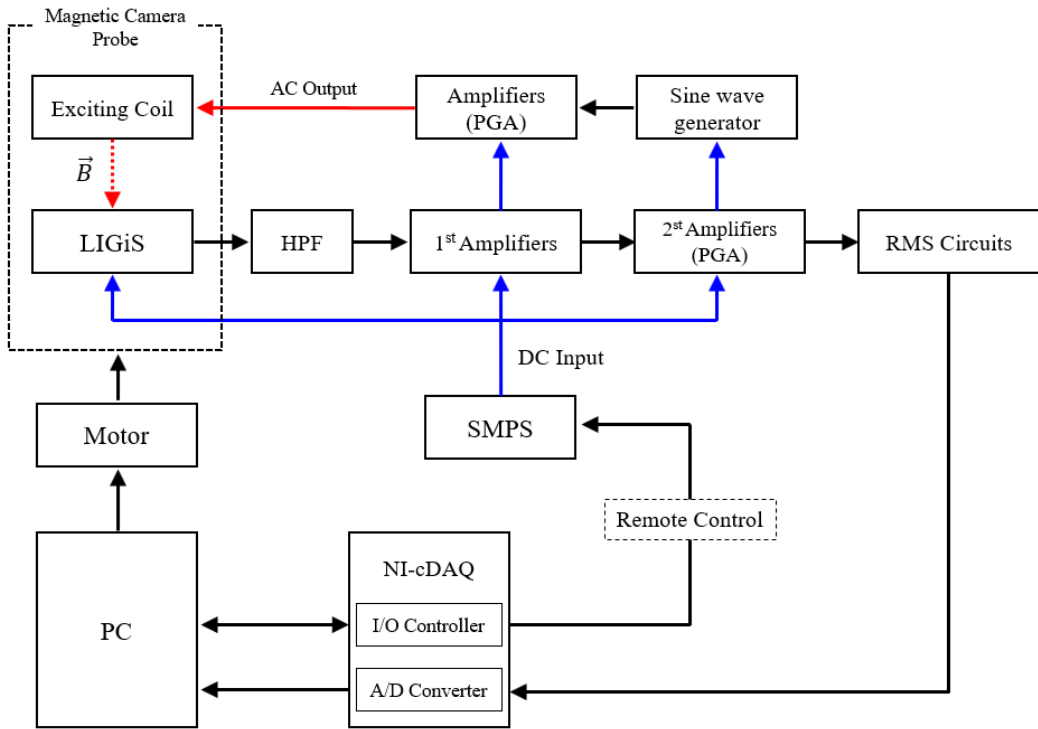


Fig. 3 -21 Magnetic camera measurement system

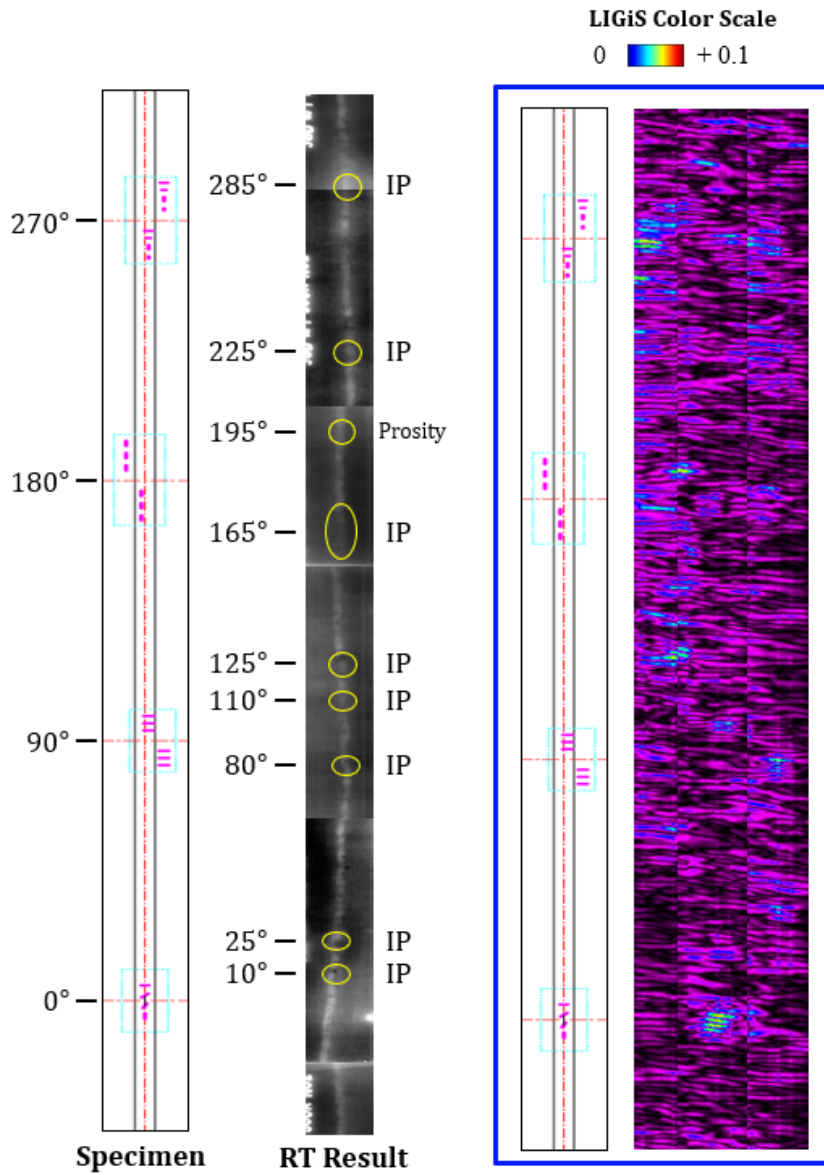
Fig. 3-22는 신호처리 블록다이어그램을 나타낸다. NI-cDAQ 디바이스의 I/O 컨트롤러 및 전용 소프트웨어를 이용하여 여자 코일, LIGiS 및 신호처리회로 전체에 전원을 공급하는 SMPS(Switched Mode Power Supply)를 원격제어하였다. LIGiS의 출력 신호는 차단 주파수가 284Hz인 고역 필터(HPF, High-Pass Filter)를 통과한 후, Gain이 46dB인 차동형 증폭기를 이용하여 1차 증폭하였다. 이후 PGA(Programmable Gain Amplifier)를 이용하여 2차 증폭하였다. 2차 증폭용 PGA의 Gain은 NI-cDAQ의 I/O 컨트롤러를 이용하여 조절할 수 있다. 또한, RMS(Root-Mean-Square) 회로를 사용하여 센서 출력신호를 DC 신호로 변환하였으며, NI-cDAQ A/D 컨버터로 디지털화되어 USB를 통해 PC에서 소프트웨어로 결과를 취득하였다. 여자 코일에 인가되는 교류 전류는 정현파 발생기(Sine wave generator) 및 PGA를 통해 주파수(1Khz~300kHz)와 전류를 원격제어할 수 있다.



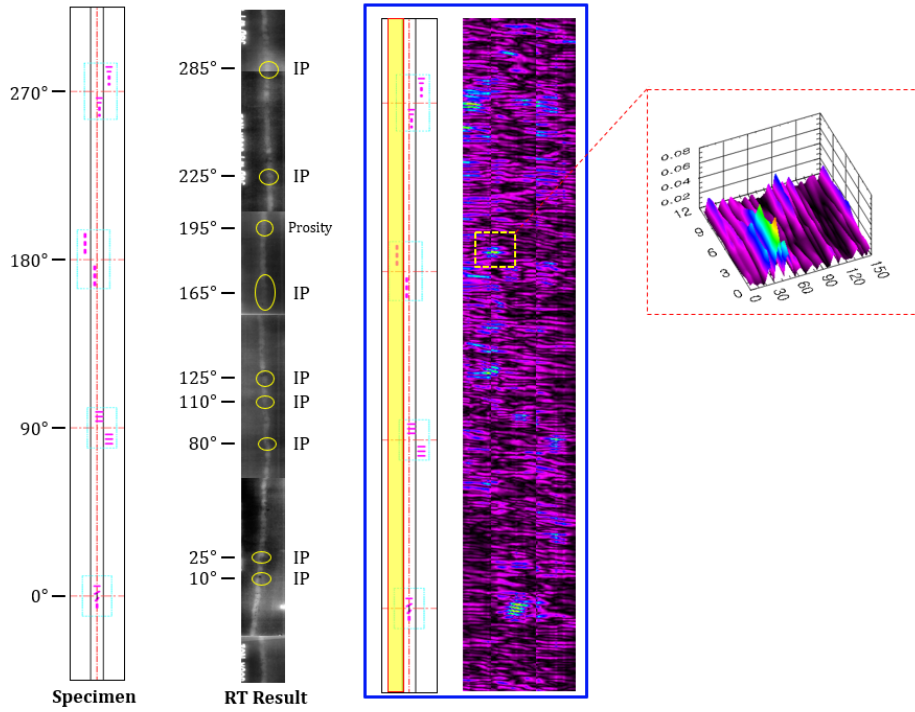
**Fig. 3 -22 Signal processing block diagram**

제작된 자기카메라 탐촉자와 신호처리 회로를 이용한 실험을 진행하였다. 배관 용접부 시험편 표면에  $\phi$ -방향으로 10kHz, 20kHz, 40kHz 250mA의 시변자계를 인가한 후,  $\phi$ -와 r-방향에 각각 45° 로 기울어진 LIGiS에 의해 용접부 표면의 시변자계 분포영상을 취득하였다.  $\phi$ -방향의 교류 자기장은 z방향의 유도전류를 인가하고, 결과적으로  $\phi$ 축 또는 z축의 길이방향을 가지는 모든 균열을 검출할 수 있다.

Fig. 3-23은 10kHz의 시변자계를 인가하였을 때의 결과를 나타낸다. 좀 더 명확하게 결함신호를 확인하기 위하여, Fig. 3-24, Fig. 3-25, Fig. 3-26에 나타낸 바와 같이 각 구간의 결함위치에 해당하는 일정 데이터 영역을 확대하여 표현하였다. 또한, Fig. 3-27, Fig. 3-28에 나타낸 바와 같이 표면결함 뿐만 아니라 내부결함인 IP 및 porosity 결함에 대해서도 검출 가능여부를 확인하였으며, 일부 내부결함의 경우 전 자기장 신호에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

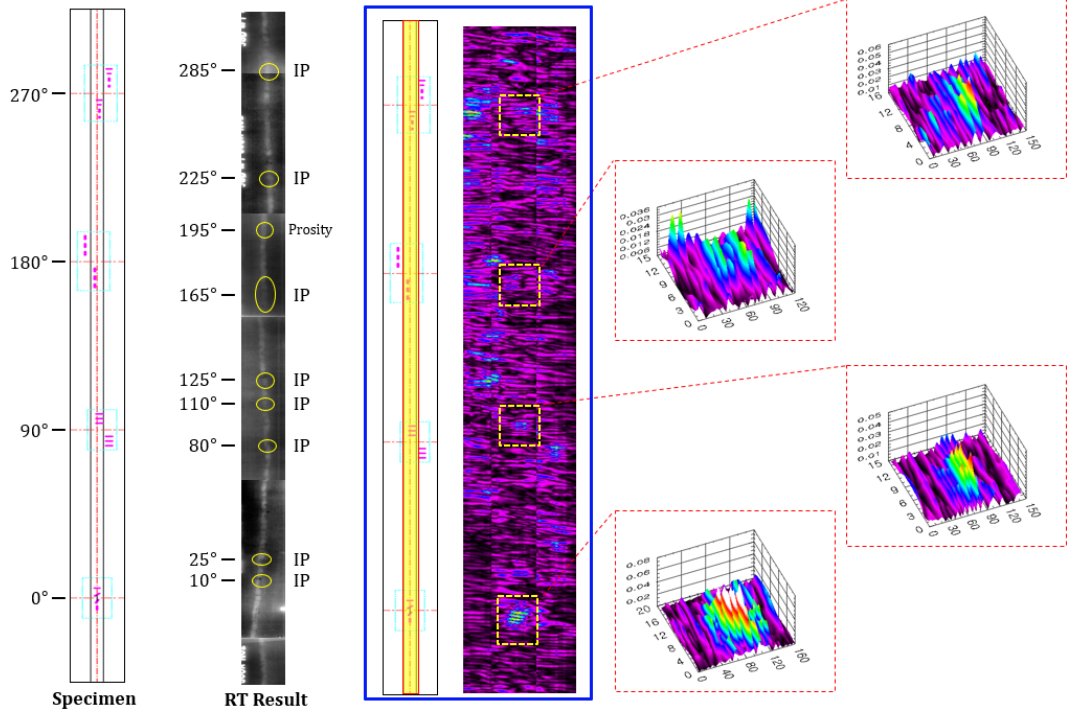


**Fig. 3 -23 Experiment result (10kHz, 250mA)**



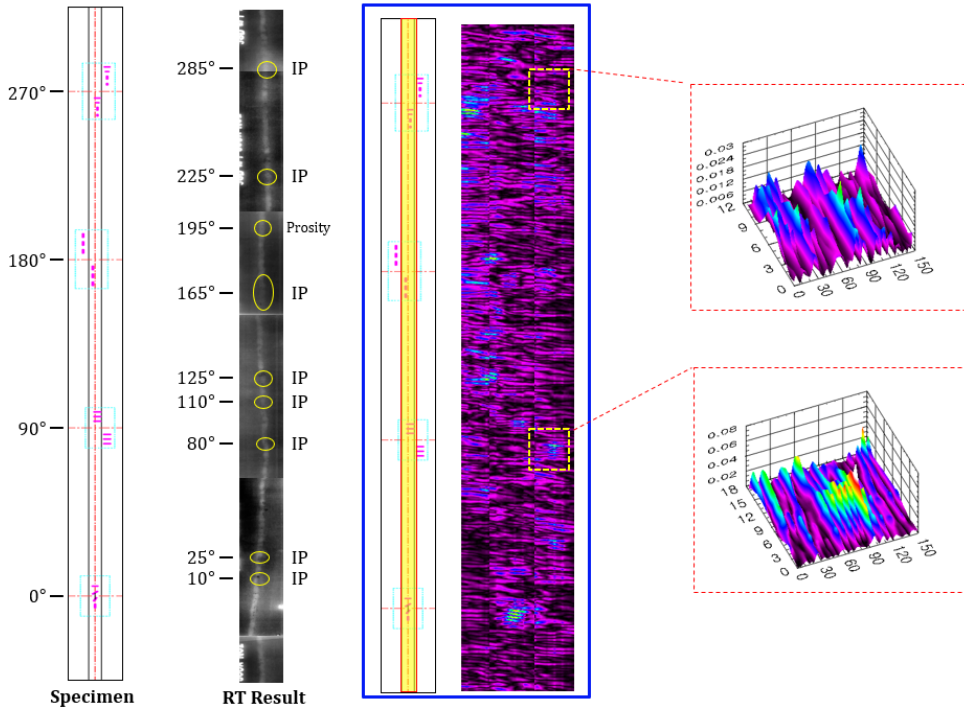
**Fig. 3 -24 Cracks in the left HAZ (10kHz, 250mA)**



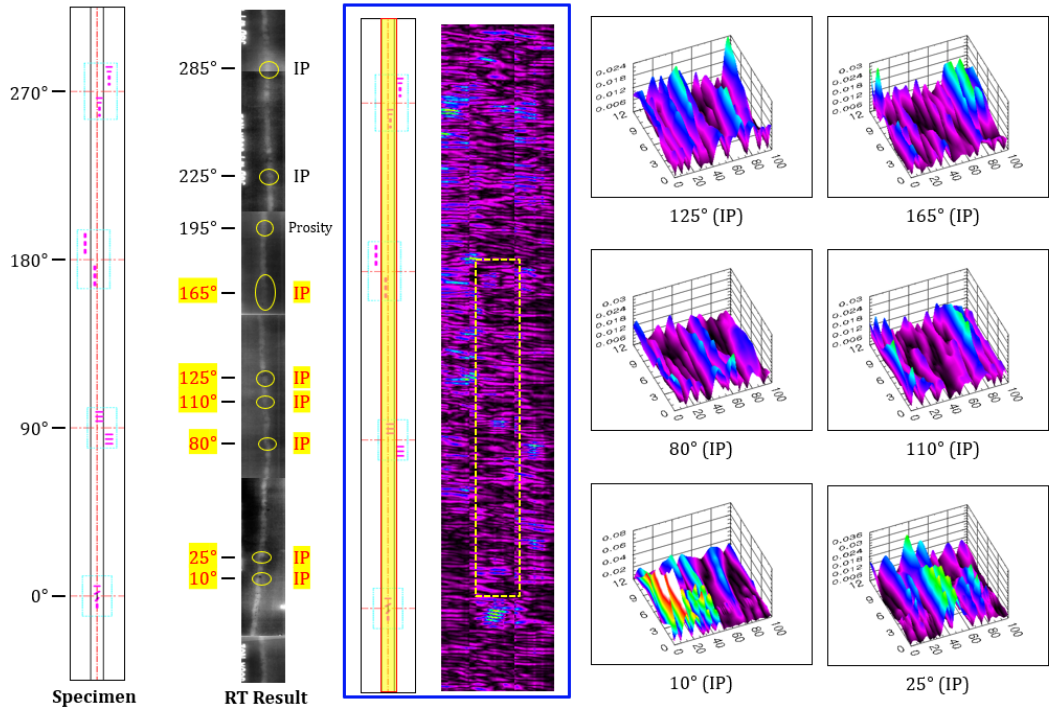


**Fig. 3 -25 Cracks in the weld line (10kHz, 250mA)**

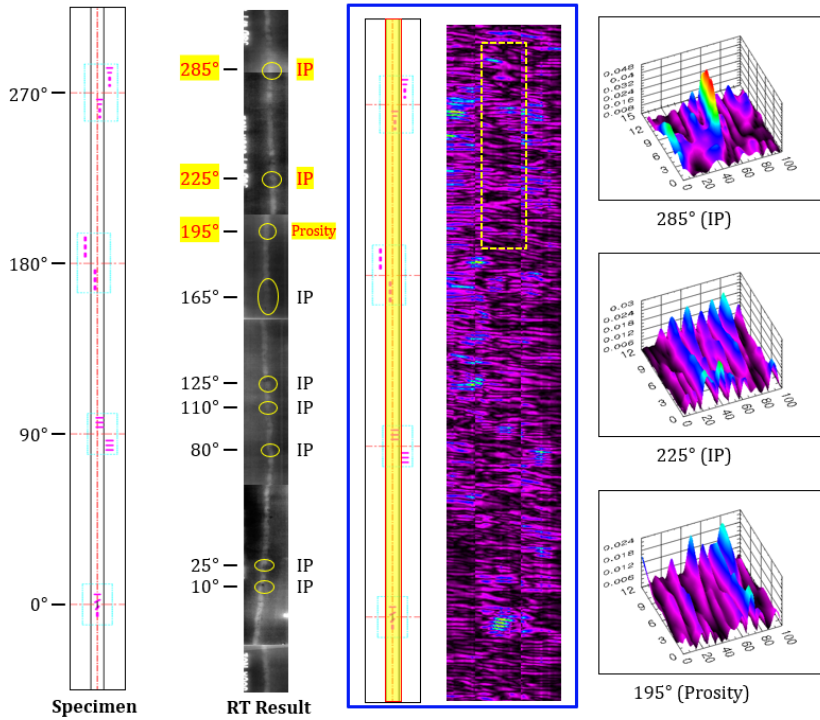




**Fig. 3 -26 Cracks in the right HAZ (10kHz, 250mA)**



**Fig. 3 -27 Internal defects (10kHz, 250mA, IP)**



**Fig. 3 -28 Internal defects (10kHz, 250mA, Porosity, IP)**

Fig. 3-29는 20kHz의 시변자계를 인가하였을 때의 결과를 나타낸다. 좀 더 명확하게 결함신호를 확인하기 위하여, Fig. 3-30, Fig. 3-31, Fig. 3-32에 나타낸 바와 같이 결함위치에 해당하는 일정 데이터 영역을 확대하여 표현하였다. 실험결과, 표면결함으로 인한 전자기장의 왜곡 신호가 10kHz보다 명확하게 나타난다. 또한, Fig. 3-33, Fig. 3-34에 나타낸 바와 같이 표면결함 뿐만 아니라 내부결함인 IP 및 porosity에 대해서도 검출 가능여부를 확인하였다. 10kHz 결과와 비교하였을 때, 신호 레벨은 증가하였으나 결함 검출능에서는 큰 차이를 확인할 수 없었다.

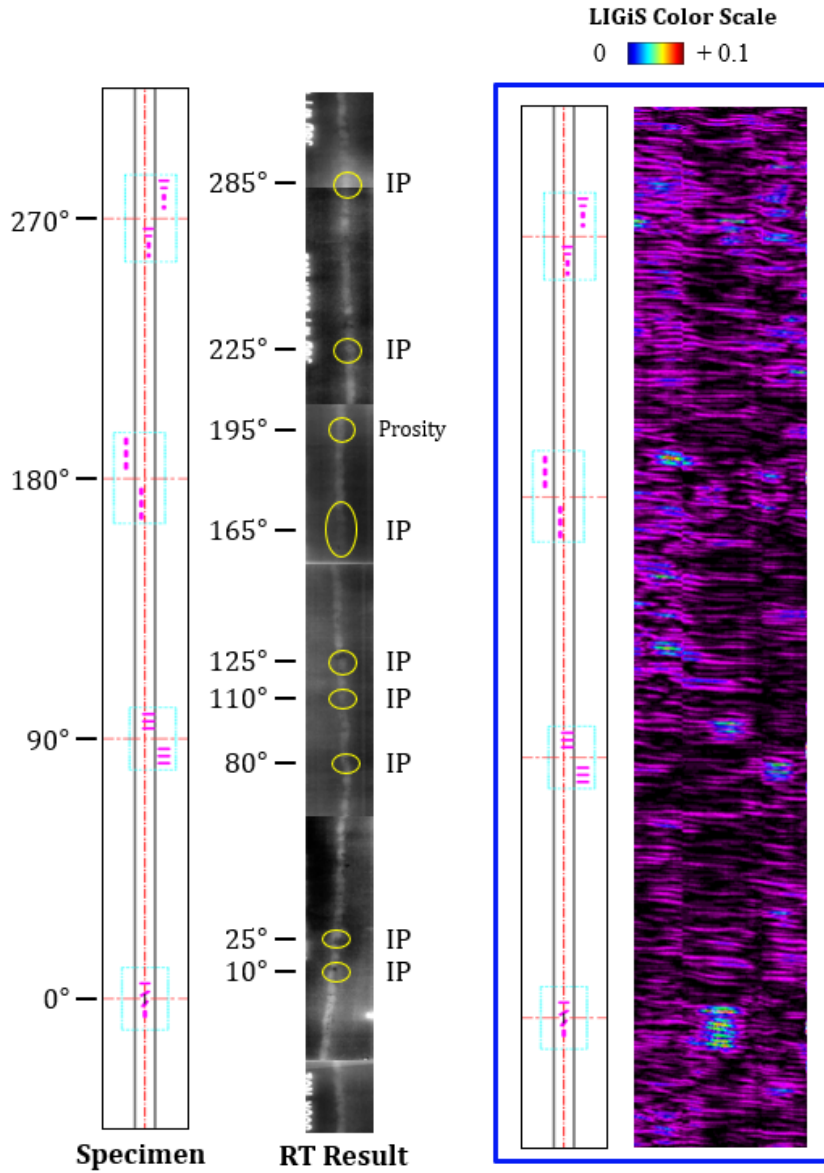
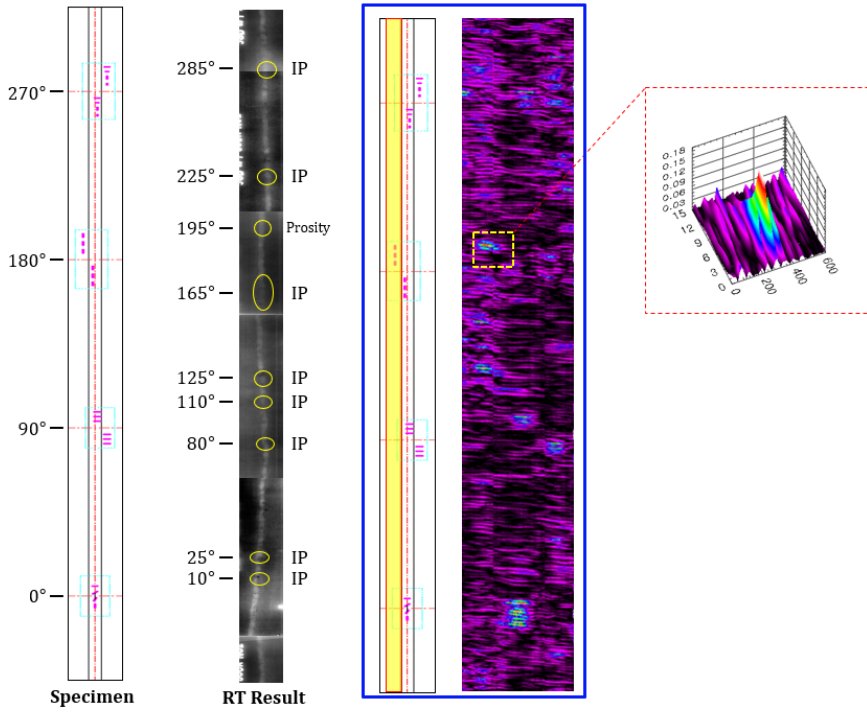
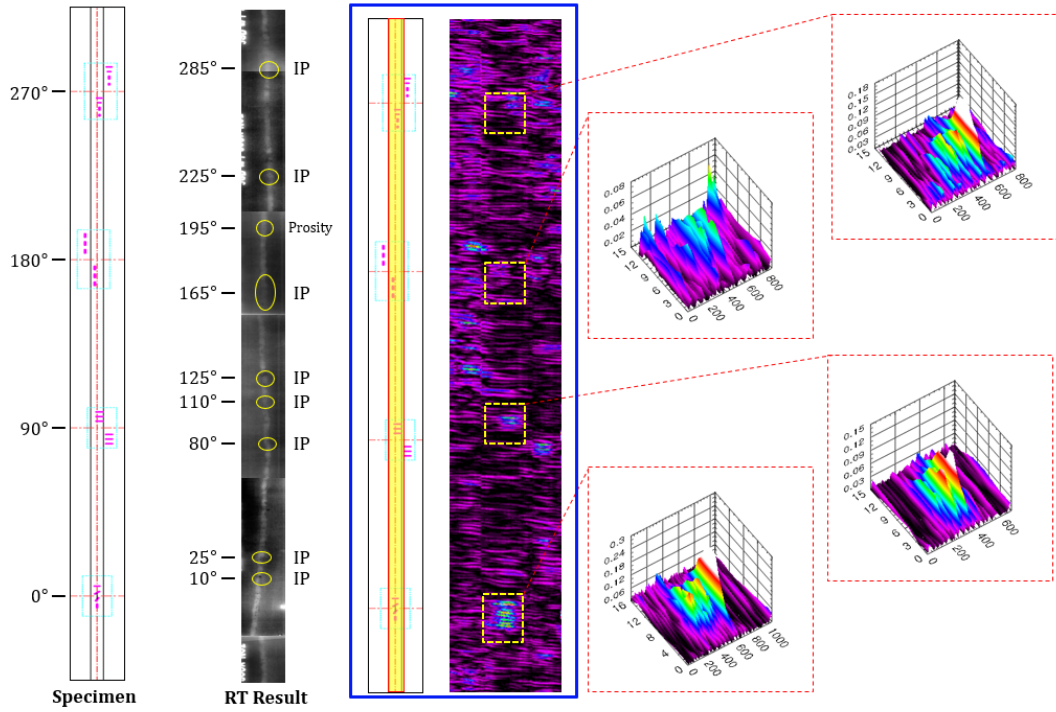


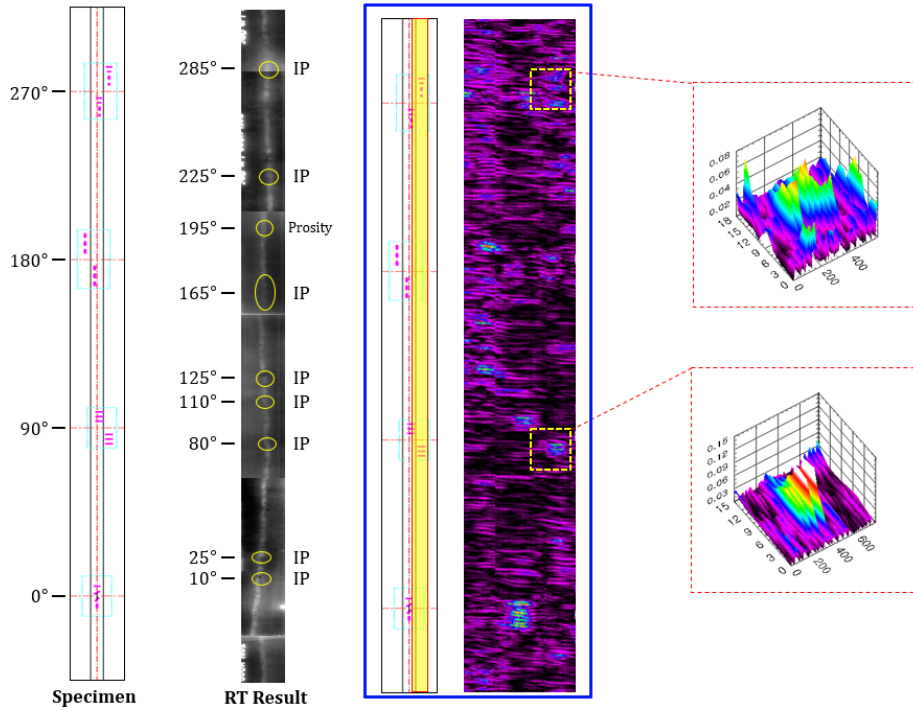
Fig. 3 -29 Experiment result (20kHz, 250mA)



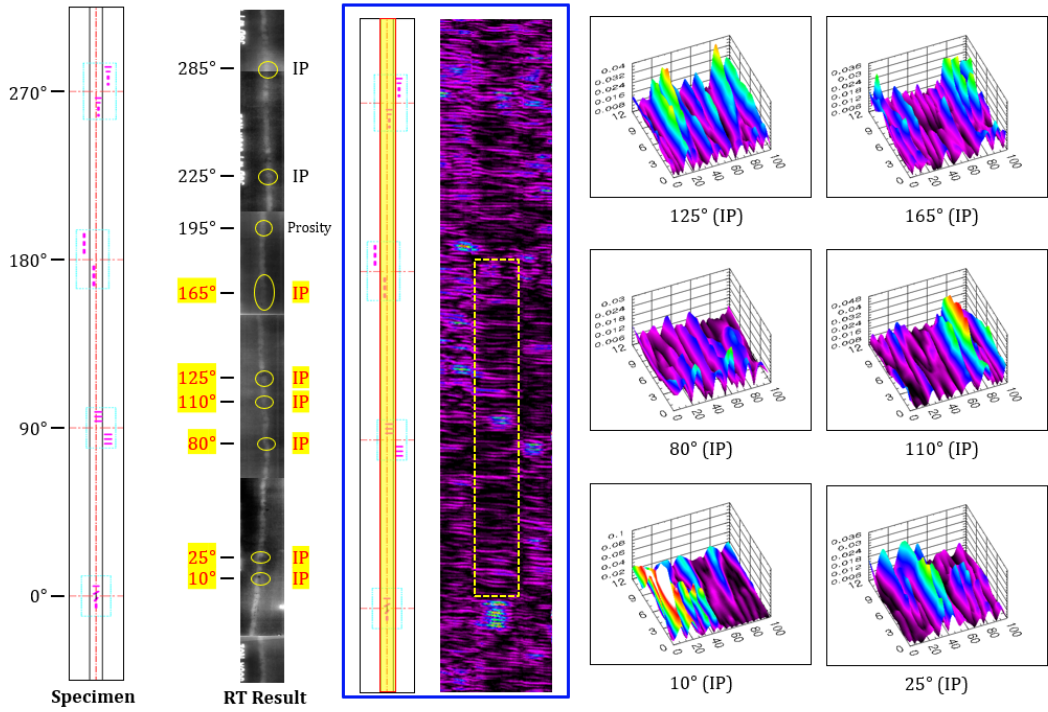
**Fig. 3 -30 Cracks in the left HAZ (20kHz, 250mA)**



**Fig. 3 -31 Cracks in the weld line (20kHz, 250mA)**

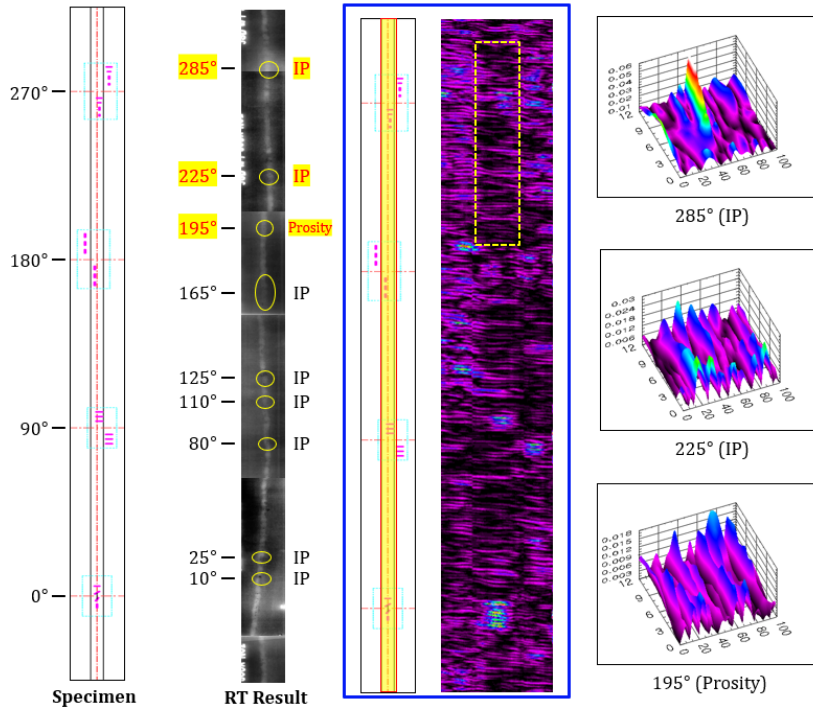


**Fig. 3 -32 Cracks in the right HAZ (20kHz, 250mA)**



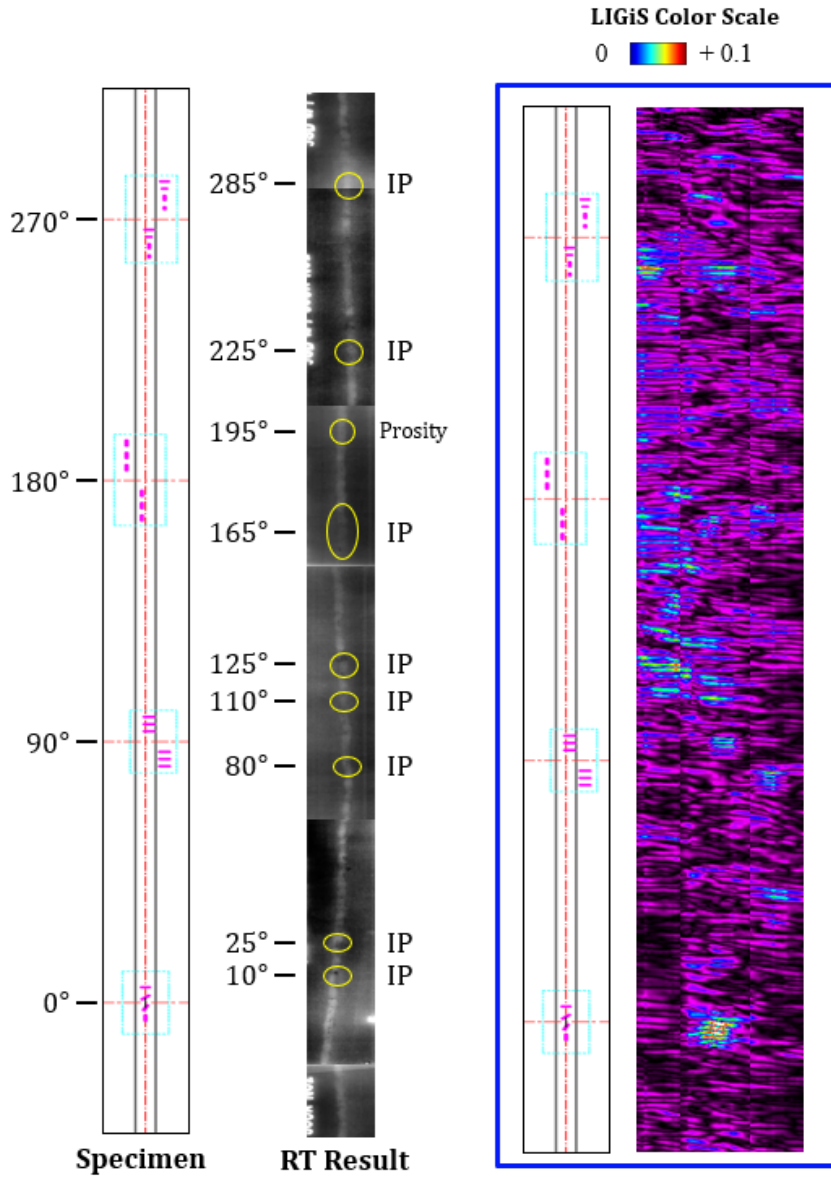
**Fig. 3 -33 Internal defects (20kHz, 250mA, IP)**



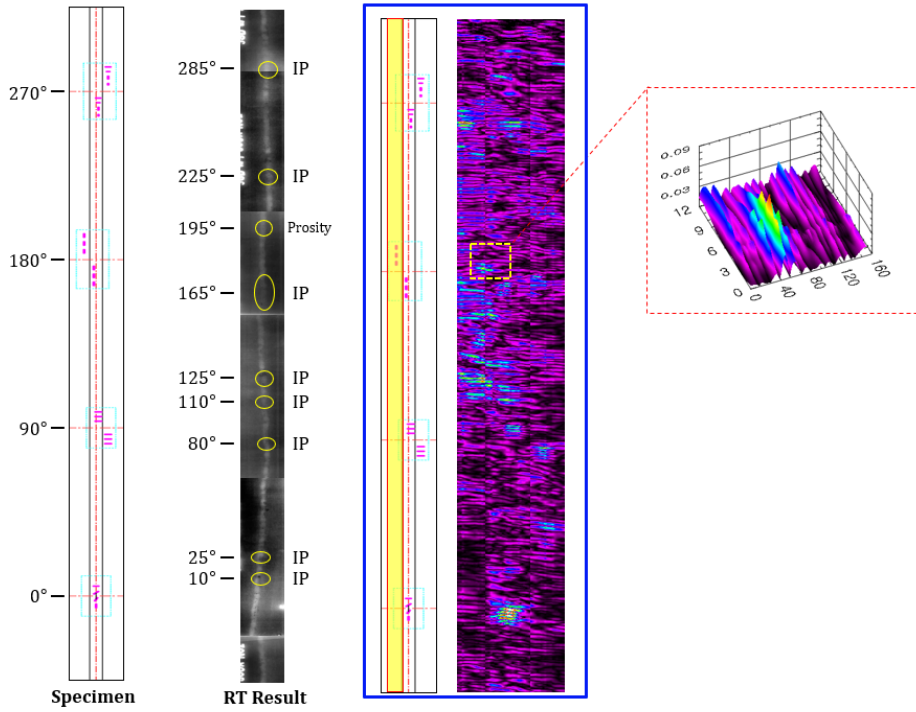


**Fig. 3-34 Internal defects (20kHz, 250mA, Porosity, IP)**

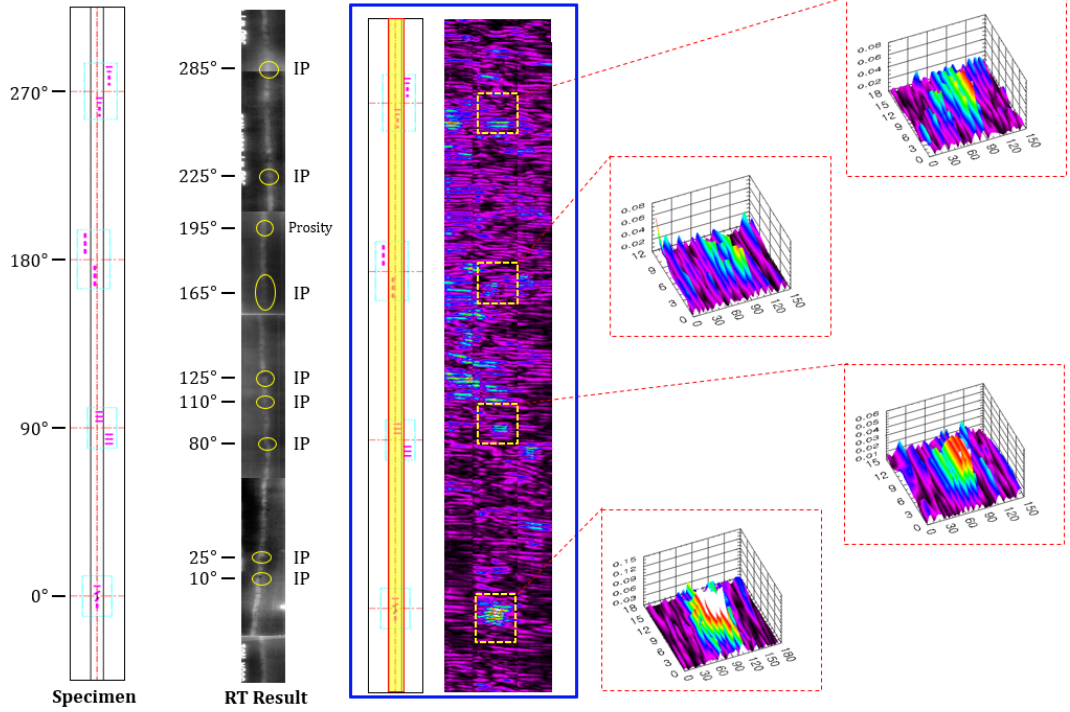
Fig. 3-35는 40kHz의 시변자계를 인가하였을 때의 결과를 나타낸다. 좀 더 명확하게 결함신호를 확인하기 위하여, Fig. 3-36, Fig. 3-37, Fig. 3-38에 나타낸 바와 같이 결함위치에 해당하는 일정 데이터 영역을 확대하여 표현하였다. 실험결과, 20kHz보다 신호 레벨이 작아졌으며, 결함 주변 잡음의 크기는 증가하였다. 또한, Fig. 3-39, Fig. 3-40에 나타낸 바와 같이 표면결함 뿐만 아니라 내부결함인 IP 및 porosity에 대해서도 검출 가능여부를 확인하였다. 이전 결과와 비교하였을 때, 결함 검출능에서는 큰 차이를 확인할 수 없었다.



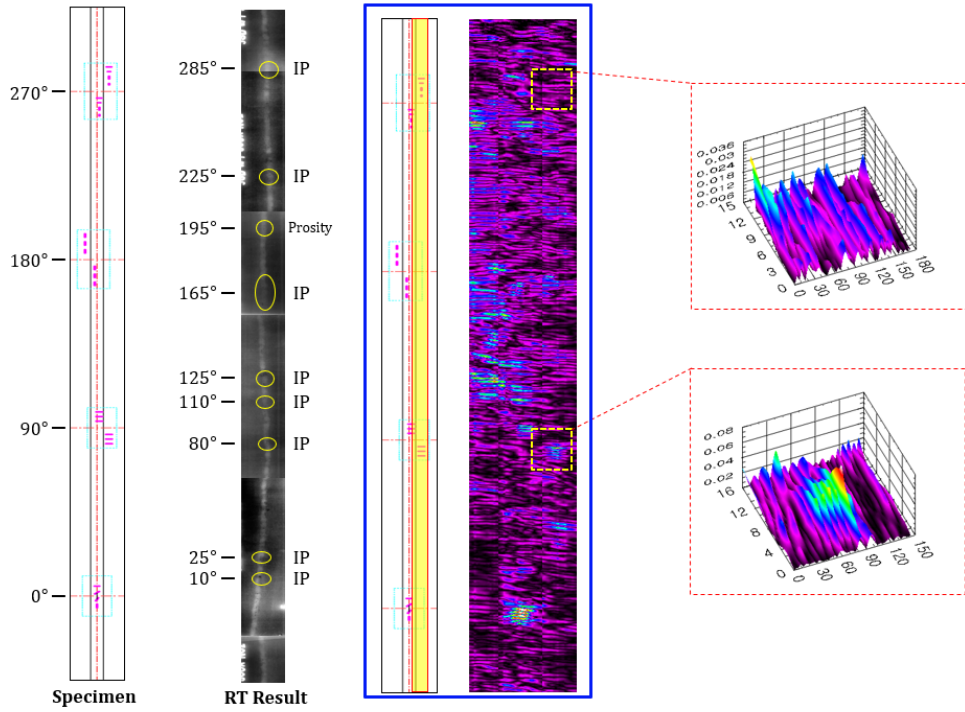
**Fig. 3 -35 Experiment result (40kHz, 250mA)**



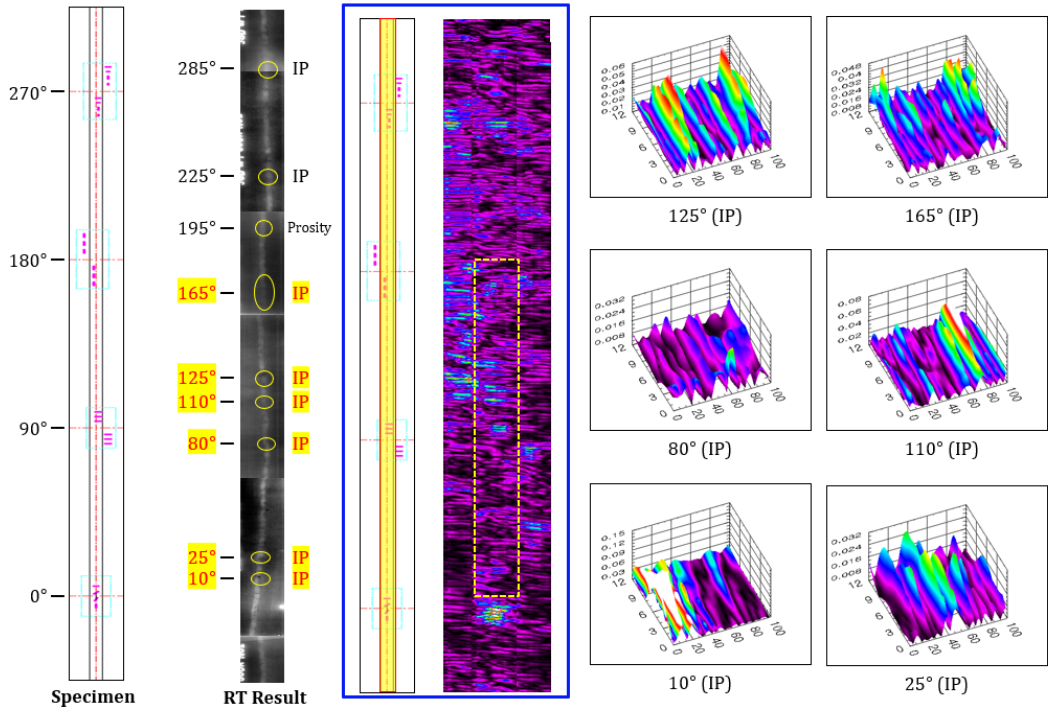
**Fig. 3 -36 Cracks in the left HAZ (40kHz, 250mA)**



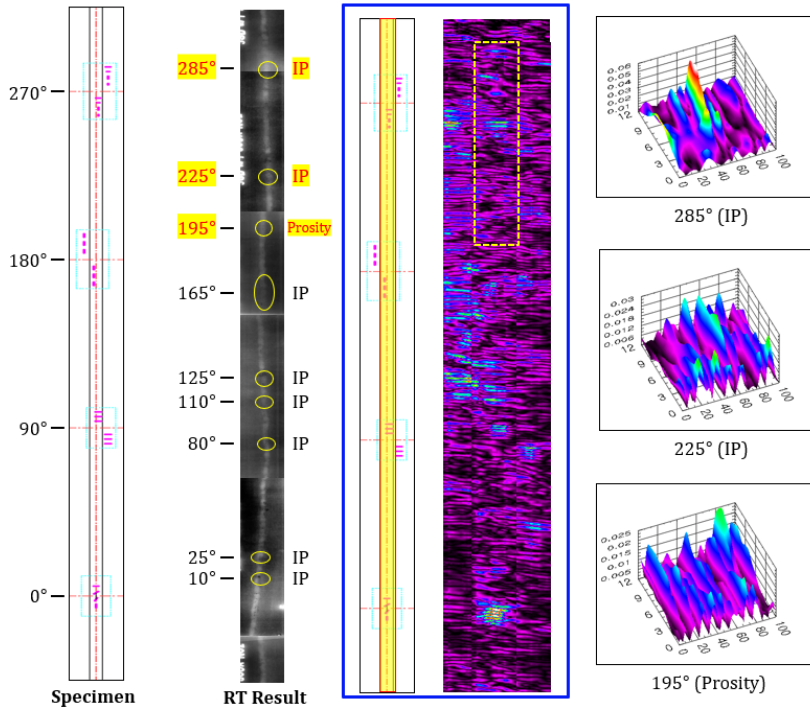
**Fig. 3 -37 Cracks in the weld line (40kHz, 250mA)**



**Fig. 3 -38 Cracks in the right HAZ (40kHz, 250mA)**



**Fig. 3 -39 Internal defects (40kHz, 250mA, IP)**



**Fig. 3 -40 Internal defects (40kHz, 250mA, Porosity, IP)**

## 2. 결과비교

방사선검사, 초음파검사, 와전류검사, 3축 잔류자화검사와 함께 스캔형 자기카메라(LIGiS)에 의한 잔류자화, 누설자속밀도측정(MFLT) 실험 결과를 비교하여 Table 3-3에 정리하였다. LIGiS(시변자속밀도 측정, 20kHz)가 가장 높은 결함 검출능을 얻을 수 있을 것으로 판단하여, 시제품에 적용하였다.

Table 3 -3 Comparison of experimental results

위치(°)		0	~	45	~	90	~	135	~	180	~	225	~	270	~	315	~
결함종류		GS				AS				CS				AS CS			
방사선검사			IP		IP		IP		IP		PR	IP			IP		
초음파 검사 (UT)	용접선방향	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
	축방향 #1	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
	축방향 #2	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
	축방향 #3	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
와전류 검사 (ECT)	10kHz	임피던스	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X	
		위상	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X	
	20kHz	임피던스	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X	
		위상	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X	
	40kHz	임피던스	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X	
		위상	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X	
$V_f$	임피던스	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
	위상	X	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
TMR (MMM)	r-축	○	△		○	X	○		△	○	X	X		△	△		
	Ø-축	○	△		○	X	○		△	○	X	X		△	△		
	z-축	○	△		○	X	○		△	○	X	X		△	△		
LIGiS (MMM)	잔류자화	○	△		△	○	○		△	○	○	X		△	△		
LIGiS (MFLT)	DC-50mA	○	X		X	X	X		X	△	X	X		X	X		
	DC-100mA	○	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
	DC-200mA	△	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
	$\Delta V_{MFL}$	△	X		X	X	X		X	X	X	X		X	X		
LIGiS (시변자속 밀도 측정)	AC-10kHz	○	△		X	○	X		X	○	X	X		○	△		
	<b>AC-20kHz</b>	<b>○</b>	<b>△</b>		<b>X</b>	<b>○</b>	<b>△</b>		<b>X</b>	<b>○</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		<b>○</b>	<b>△</b>		
	AC-40kHz	○	△		X	○	△		X	○	X	X		○	△		



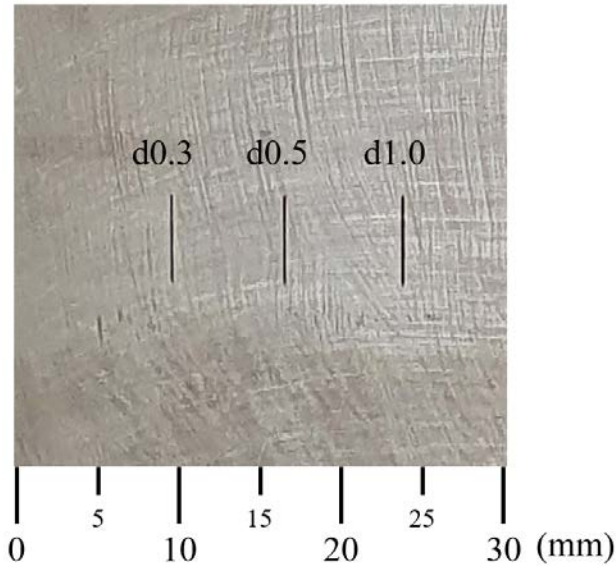
## 제 4 장 취득 데이터 인공지능 해석

### 제 1 절 신호해석 전처리

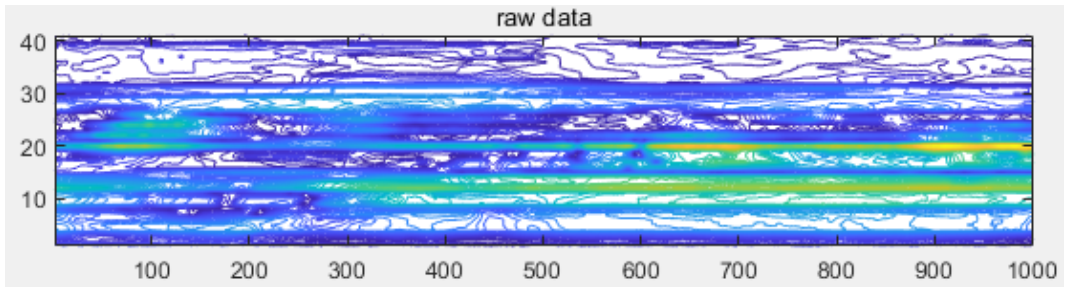
#### 1. 차분처리

Fig. 4-2는 Fig. 4-1의 시험편을 이용한 실험 결과의 예를 나타낸다. 종축은 원주 방향으로 0.1mm간격이며, 횡축은 축방향으로서 1mm의 공간분해능을 가진다. 특정 공간상의 모든 데이터는 동일한 센서임에도 불구하고, 리프트오프, 용접경계선, 투자율 등의 물리적 특성 차이에 의하여 결함 유무를 판정하기 곤란하다. 이러한 오차는 다음 식 4.1로 표현되는 차분해석에 의하여 최소화할 수 있다[38]. 여기에서  $i$ 와  $j$ 는 각각 축방향 스캔거리와 센서 번호를 나타낸다.

$$\Delta V(i, j) = V_0(i + 1, j) - V_0(i, j) \quad (4.1)$$



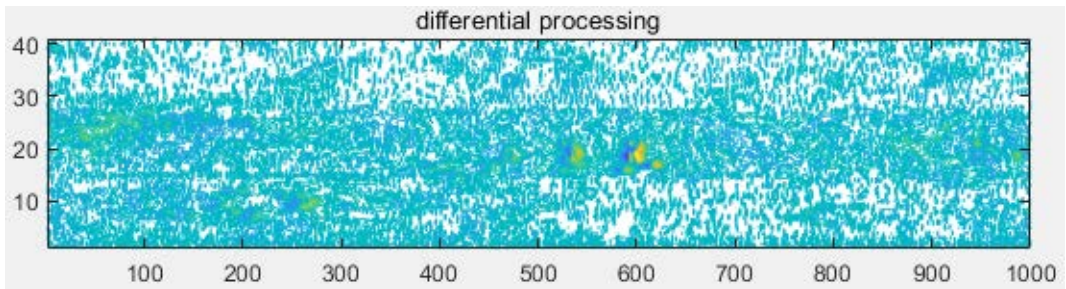
**Fig. 4 -1 Specimen**



**Fig. 4 -2 Raw data**

Fig. 4-3은 상기 식 4.1의 원리를 이용하여 Fig. 4-2의 결과를 재해석한 것이다. 센서 상호의 물리적 특성 차이가 최소화됨으로써, 결함의 유무 및 위치, 나아가 크기까지 평가할 수 있다. 차분해석은 인접한 자계의 분포 차이를 지시하므로 바이어스 오차 뿐 아니라 감도오차까지 제거할 수 있다는 특징을 가진다[39].

$$V_b(i, j) = V_s(i, j) - V_s(0, 0) \quad (4.2)$$



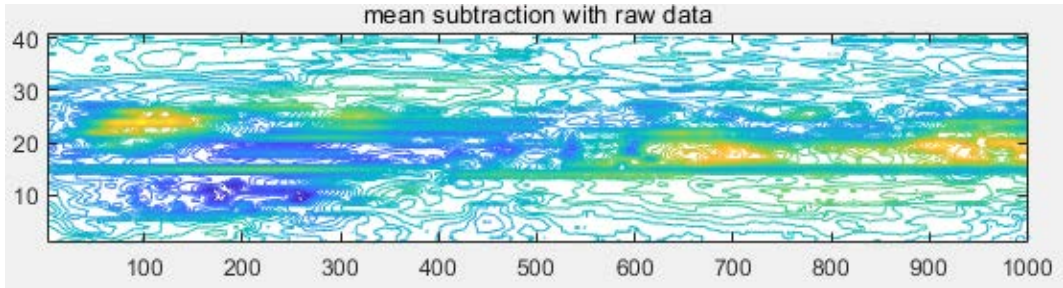
**Fig. 4 -3 Differential processing**

## 2. 경향제거 신호처리

Fig. 4-3의 경우에는 결함 정보의 명확성 및 원 데이터의 보존 측면에서 서로 장단점을 교차 보유하고 있다. 본 절에서 설명하는 경향제거 신호처리는 원 데이터의 보존기능을 부여할 수 있는 신호처리방법 중 하나이다[40]. 경향제거 신호처리는 식 4.3으로 표현되는 이동평균을 이용하여 식 4.4와 같이 원시신호와의 차를 구한다. 이러한 경향제거 신호처리는 저대역통과필터의 기능과 함께 고주파수 잡음을 제거하면서 원 데이터의 경향을 그대로 반영하기 때문에 결함 정보를 전달하면서, 원 데이터의 경향도 반영할 수 있다[41]. 하지만, 이동 평균하는 폭에 따라 결함 정도의 명확성이 저하될 수 있다.

$$V_{AVR}(i, j, N) = \frac{1}{N} \sum_{i=i-\frac{N}{2}}^{i+\frac{N}{2}} V_0(i, j) \quad (4.3)$$

$$V_{DT}(i, j) = V_0(i, j) - V_{AVR}(i, j, N) \quad (4.4)$$

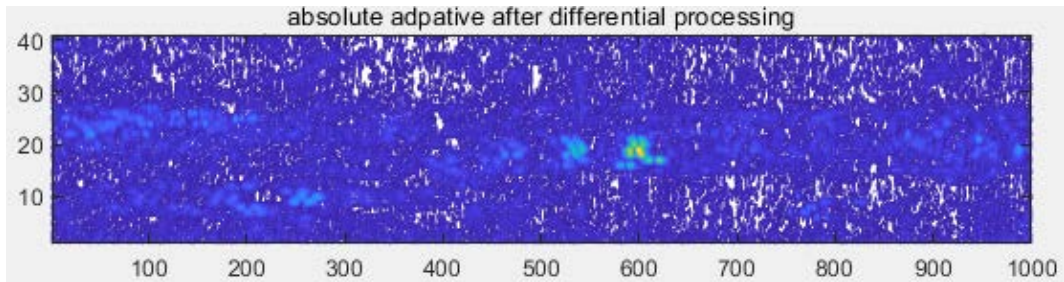


**Fig. 4 -4 Mean subtraction processing**

### 3. 차분-경향제거-절대처리

Fig.4-3 및 Fig. 4-4의 경우에는 결합 정보의 명확성 및 원 데이터의 보존 측면에서 서로 장단점을 교차 보유하고 있다. 본 절에서는 식 4.5로 표현되는 바와 같이 차분처리후, 경향제거를 한 다음에 다시 한번 절대값을 표현하면, Fig. 4-5에 나타난 바와 같이 결합 정보를 명확하게 전달할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 차분-경향제거-절대처리를 활용하여 해석하였다.

$$V_{DT}(i, j) = |\Delta V_0(i, j) - \Delta V_{AVR}(i, j, N)| \quad (4.5)$$



**Fig. 4 -5 Absolute adaptive after differential processing**

## 제 2 절 다변량 특이 스펙트럼 해석 [42]

### 1. 이론적 배경

한 예로 ECT 방식 탐측자의 보빈 코일은 패러데이의 법칙에 따라 시편에 와전류를 생성하기 위해 교류전류가 공급된다. 렌츠의 법칙에 따라 와전류는 결함에 의해 왜곡되고 2차 자기장을 생성한다. 2차 자기장은 코일센서를 포함한 자기센서 또는 이의 배열을 통해 측정되고 이를 통해 결함 여부를 확인할 수 있다. 한편, 와전류는 시편의 두께방향으로 표피 효과를 나타내며 침투하고, 깊이  $d$ 에서의 와전류의 강도는 튜브의 깊이, 투자율( $\mu$ ), 전도도( $\sigma$ ), 여자주파수( $f$ )에 따라 식 4.6과 같이 지수적으로 감소한다. 침투 깊이( $\delta$ )는 식 4.7과 같이 기술되며, 여자주파수를 추정하는데 사용된다[43-45].

$$J_t = J_0 e^{-d\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4.6)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4.7)$$

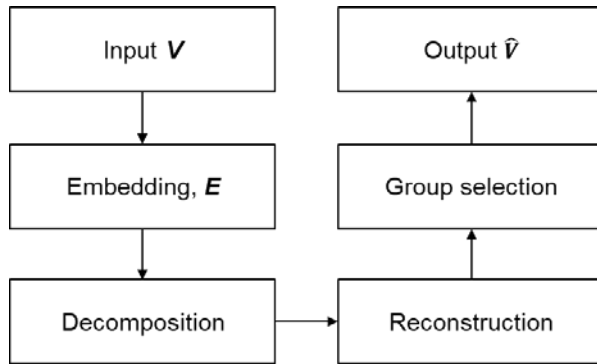
자기센서에서 측정되는 총 자기장( $B(t)$ )은 식 4.8과 같이 부분자화( $B_M$ ), 리프트 오프 변동( $B_V$ ), 재료 열화( $B_D$ ), 여자(보빈) 코일( $B_B$ ), 결함에 의한 와전류( $B_C$ ) 및 형상 변화에 의한 와전류( $B_F$ )에 의한 효과들의 중첩으로 표시된다. 따라서, 센서의 출력 전압은 식 4.9와 같이 센서 표면에 수직인 전체 자기장의  $z$ 방향 성분에 비례한다. 신호처리 회로에서는 각 센서에 대해 아날로그-디지털 변환 전, RMS 회로를 사용하여 시변 신호를 직류신호로 변환하였다. 따라서, 최종적으로 획득된 신호는 식 4.10에 표현된 바와 같이 출력의 RMS 값이다.

$$\begin{aligned}
 B(t) = & B_M + B_V + B_D + B_{B0} \sin(2\pi ft) \\
 & + \sum B_{Coi} \sin(2\pi ft + \Delta\alpha_i) + \sum B_{F0j} \sin(2\pi ft + \Delta\beta_j)
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

$$V_H(t) = k \times I_H \times B_z(t) \tag{4.9}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |V_z(t)|^2 dt} \tag{4.10}$$

이상의 각 자기센서 배열들의 스캔 신호는 다변량 신호로 간주될 수 있다.  $P \times L$ 의 크기를 갖는 자기센서 배열의 2차원 자기신호를  $V(p, l)$  라 하자. 여기서  $P$ 는 자기센서의 번호이고,  $L$ 은 스캔 길이의 인덱스이다. 다변량 특이 스펙트럼 해석 (MSSA, multivariate singular spectral analysis) 절차는 Fig. 4-6의 블록 다이어그램과 같이 네 단계로 구성된다.



**Fig. 4 -6 Block diagram of the MSSA algorithm [42]**

제1단계 (Embedding) : 각 차분-경향제거-절대처리한 신호( $V_d$ )는 식 4.11과 같이 슬라이딩과 적층(stack)에 의해 트라젝토리(trajjectory) 배열  $E_p$  (임베딩 배열)로 나타낸다. 여기서 슬라이딩 윈도우의 길이는  $N$ 이고, 적층은 다음 조건을 만족하는  $M$ 을 갖는다[46].  $M=L-M+1$  이다. 슬라이딩 윈도우  $N$ 의 길이는 잡음신호와 결함 신호

의 분리를 위해 가능한 많은 다중 결합 정보를 포함하지만 충분한 분해능(고유값의 개수)을 포함하도록 선택하여야 한다. 모든 자기센서 신호의 임베딩 배열들은 식 4.12와 같이 적층되어 전체 임베딩 배열  $E$ 로 구축된다.

$$E_p = \begin{bmatrix} V_p(1) & V_p(2) & \cdots & V_p(N) \\ V_p(2) & V_p(3) & \cdots & V_p(N+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_p(M) & V_p(M+1) & \cdots & V_p(L) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$E = [E_1, E_2, \dots, E_p] \quad (4.12)$$

제2단계 (decomposition) : 임베딩 배열  $E$ 는 특이 벡터 분해(SVD, singular vector decompositon) 방법에 의해 부분공간행렬로 분해된다. 이 방식의 핵심은 임베딩 행렬  $E$ 를 직교 고유벡터에 투영하는 것이다. 고유벡터는 임베딩 행렬  $E$ 의 공분산행렬  $C$ 에서 특이벡터 분해법으로 찾을 수 있다. 공분산행렬  $C$ 는 식 4.13과 같이 표현되고, 특이벡터 분해는 식 4.14로 표현된다. 여기서,  $U$ 와  $V$ 는 각각 왼쪽과 오른쪽 고유벡터라고 한다. 행렬  $S$ 의 대각선은 고유값( $\lambda_i, 1 \leq i \leq M$ )이며 내림차순으로 정렬된다. 고유값이 높을수록 자기센서 배열신호의 강도가 높아진다. 임베딩 배열  $E$ 는 식 4.15에 표현된 바와 같이 부분공간행렬로 분해된다.

$$C = \frac{1}{PN} EE^T \quad (4.13)$$

$$C = USV^T \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned}
 E &= E_1 + E_2 + \cdots + E_M \\
 &= \sqrt{\lambda_1} U_1 V_1^T + \sqrt{\lambda_2} U_2 V_2^T + \cdots + \sqrt{\lambda_M} U_M V_M^T
 \end{aligned} \quad (4.15)$$

제3단계 (Reconstruction) : 식 4.15의 부분공간행렬  $E^i (1 \leq i \leq M)$ 의 요소들을 대각선 평균화하여 입력신호를 재구성하는데 사용된다.  $M^* = \min(M, N)$ ,  $N^* = \max(M, N)$ ,  $H_p^i (1 \leq p \leq P)$ 는 신호  $V_p$ 에 해당하는  $E^i$ 의 부분행렬이라 가정한다. 즉,  $E^i = [H_1^i, H_2^i, \dots, H_p^i] = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$ 이다. 그러면, 부분공간행렬  $E^i$ 에 대응하는  $V_p$ 의 재구성 신호( $\hat{V}_p$ )는 식 4.16으로 표현된다.

$$\hat{V}_p(l) = \begin{cases} \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l H_p^i(i, l-i+1) & \text{for } 1 \leq l < M^* \\ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M H_p^i(i, l-i+1) & \text{for } M^* \leq l < N^* \\ \frac{1}{L-l+1} \sum_{i=l-M^*+1}^{M^*} H_p^i(i, l-i+1) & \text{for } N^* \leq l \leq L \end{cases} \quad (4.16)$$

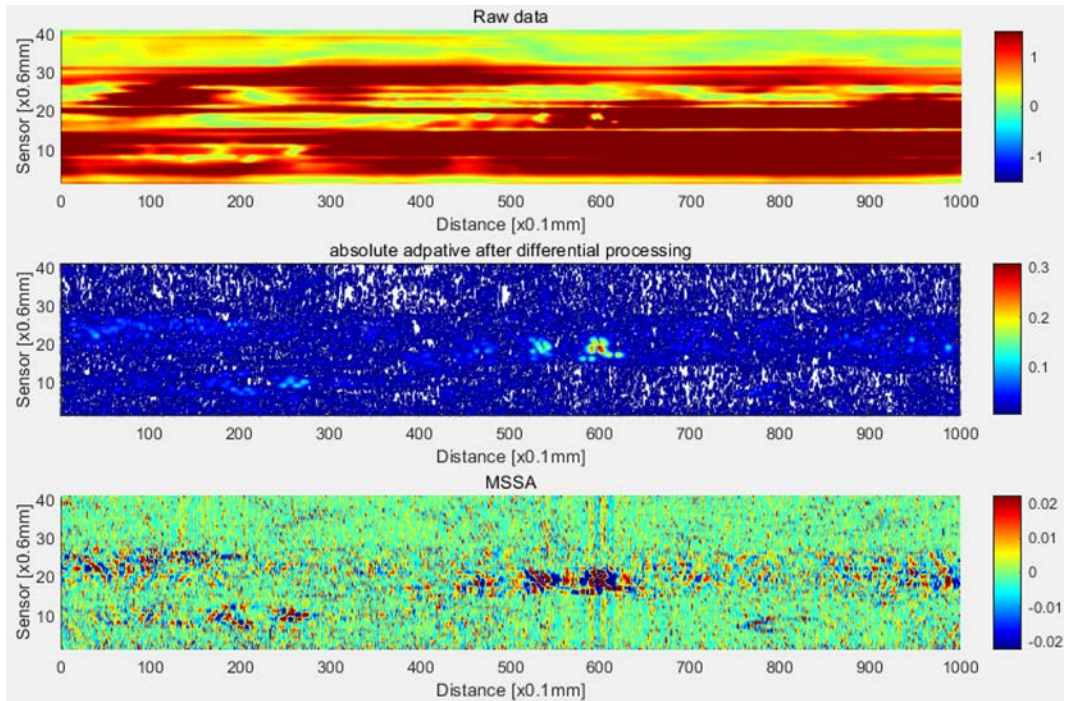
제4단계 (Group selection) : 스캔된 자기신호는 다음의 세가지 구성 요소, 즉 1) 트렌드 신호(오프셋 전압, 용접 경계 및 여자 코일의 교류자기장, 센서의 lift-off 변동, 재료 열화에 의한 투자율 변화). 2) 결함 신호. 3) 전기적 잡음 및 자기 신호로 구성된다. 트렌드 신호는 일반적으로 강도가 높아, 앞 순위의 고유값들에 해당한다. 잡음과 결함 신호는 식 4.17과 같이 각 부분 공간 배열로부터 재구성된 신호 중 가중 상관행렬(Weighted correlation matrix)에 의해 분해될 수 있다. 여기에서  $(X, Y)_\omega = \sum_{i=1}^L \sum_{p=1}^P \omega_i X(p, i) Y(p, i)$ ,  $\|X\|_\omega = \sqrt{(X, X)_\omega}$ ,  $\omega_i = \min(i, M, L-i+1)$ 이다. 가중 상관값이 낮을수록 두 급수(series)는 상관이 낮기 때문에 분리가 더 쉽게 이루어진다.

$$W = \frac{(X, Y)_\omega}{\|X\|_\omega \|Y\|_\omega} \quad (4.17)$$

앞 절에서 나타낸 차분-경향제거-절대처리한 신호는 다변량 입력으로 간주될 수 있다. 센서 탐촉자는 1020mm 길이의 용접부를 0.1mm 거리 분해능으로 스캔하였다. 전체적으로 다변량 특이 스펙트럼 해석 필터의 입력신호는  $P \times L = 41 \times 1000$



의 크기를 갖는다. 적층(stack) 길이  $M$ 은 일반적으로  $L$ 의 절반보다 작게 선택하며[47-48], 본 논문에서는  $M=50$ 을 사용하였다. Fig. 4-7은 원신호, 차분-경향제거-절대처리 및 MSSA 결과 예시를 나타낸다.



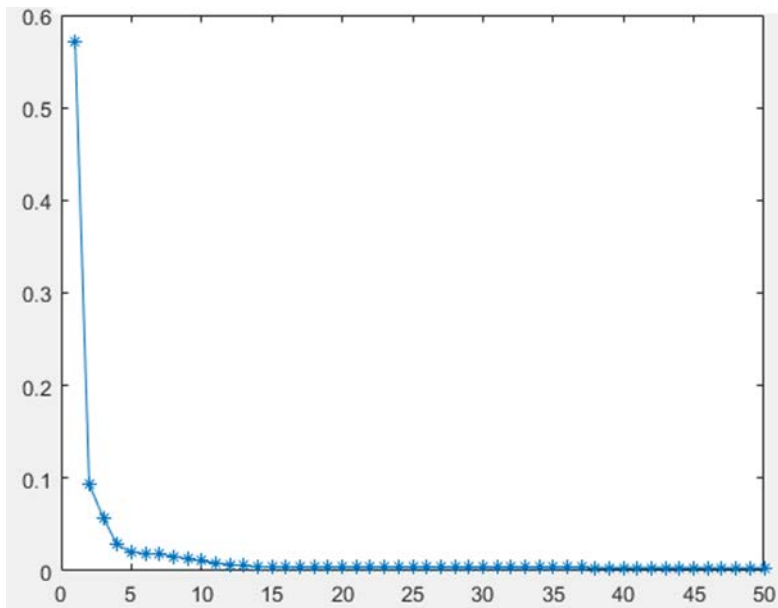
**Fig. 4 -7 Example of reconstitution of input signal**

Fig. 4-8은 정렬 순서에 따른 고유값 분포의 예를 보여준다. 고유값은 총 합에 대해 정규화되어 각 고유값에서 자기 스캔 신호들의 분산들을 나타낸다. 앞에서부터 세개의 고유값은 트렌드 신호에 해당하는 높은 값을 가진다. 중간고유값들은 결합 신호에 해당하며, 나머지 작은 값을 가지는 고유값들은 잡음 신호에 해당한다. 트렌드 신호는 높은 고유값들로 인해 쉽게 구별이 되나, 부식 및 잡음 신호의 고유값을 분리하는 것은 쉽지가 않다. 이에 따라, 부식과 잡음 신호의 분리를 위해 가중상관법(weighted correlation)을 추가로 사용하였다[49-50]. Fig. 4-9에 가중상관 행렬

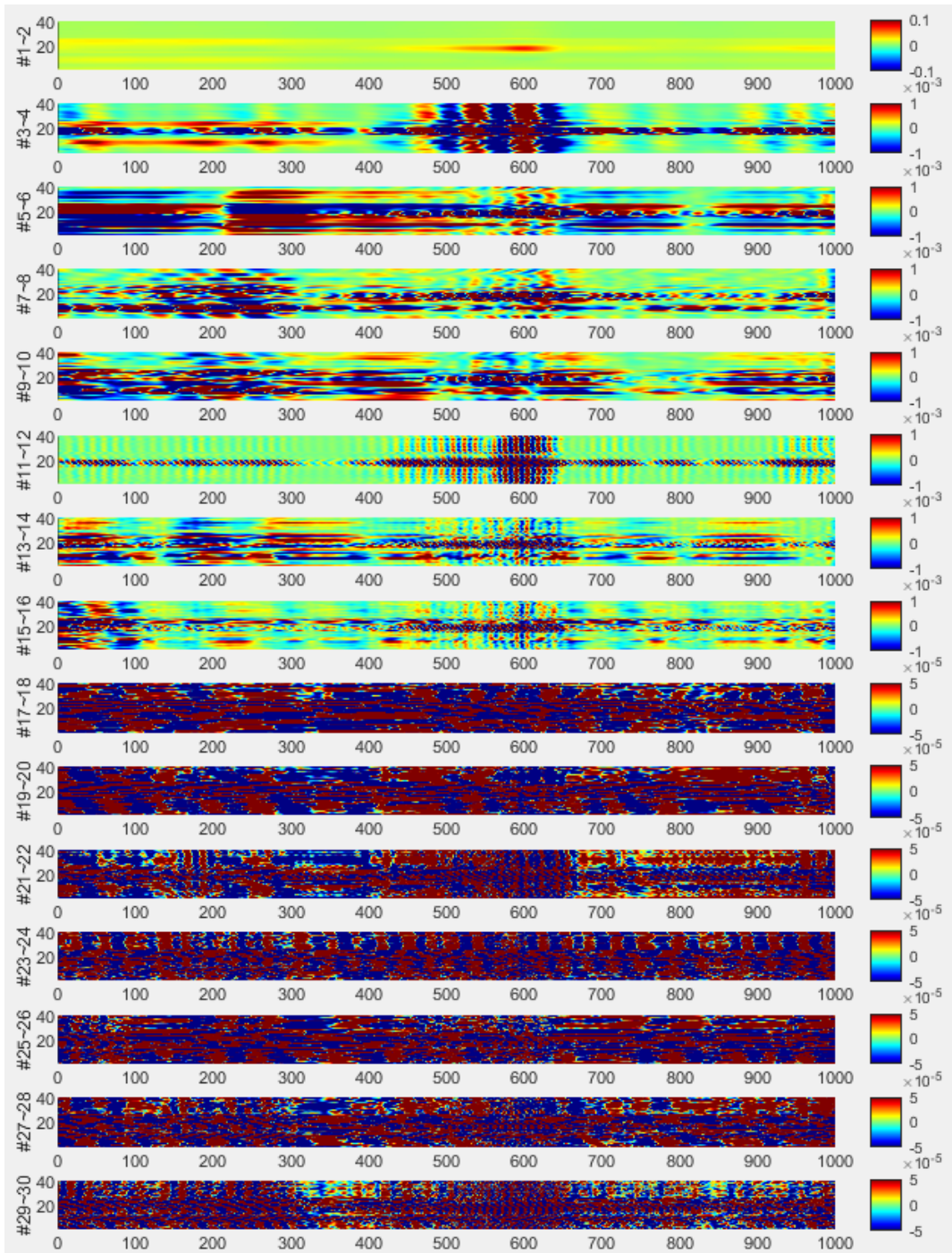
의 예를 시각화하였다. 고유값들 중 낮은 가중 상관값(예를 들면,  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ )의 영역은 잡음신호가 랜덤하므로 결함신호와 낮은 상관관계를 가진다. 그리고, 고유값이  $\lambda_3 \sim \lambda_{10}$  인 영역은 결함신호와 함께 일부 투자율 변화가 감지된다. 고유값이  $\lambda_{11} \sim \lambda_{16}$ 인 영역에서는 결함 신호에 대응한 결과가 명확해지며,  $\lambda_{17} \sim \lambda_{30}$  영역에서는 결함신호보다는 용접부 신호가 주로 추출됨을 알 수 있다.

Fig. 4-10는 가중상관행렬에 의하여 신호가 트렌드, 결함, 용접부 신호로 분해된 결과를 보여준다. 실험 결과 투자율( $B_M$ ), 탐촉자 변동( $B_V$ ), 재료 열화( $B_D$ ), 여자 코일( $B_B$ )의 자기장으로 인한 트렌드 신호가 첫번째 1~10개의 고유값으로 추출될 수 있었다. 소량의 결함 신호가 혼합되어 있었지만, 용접부 경계 및 투자율 변화 신호도 추출이 되었다. 결함 신호는 11차~16차의 고유값으로 성공적으로 추출이 되었다.

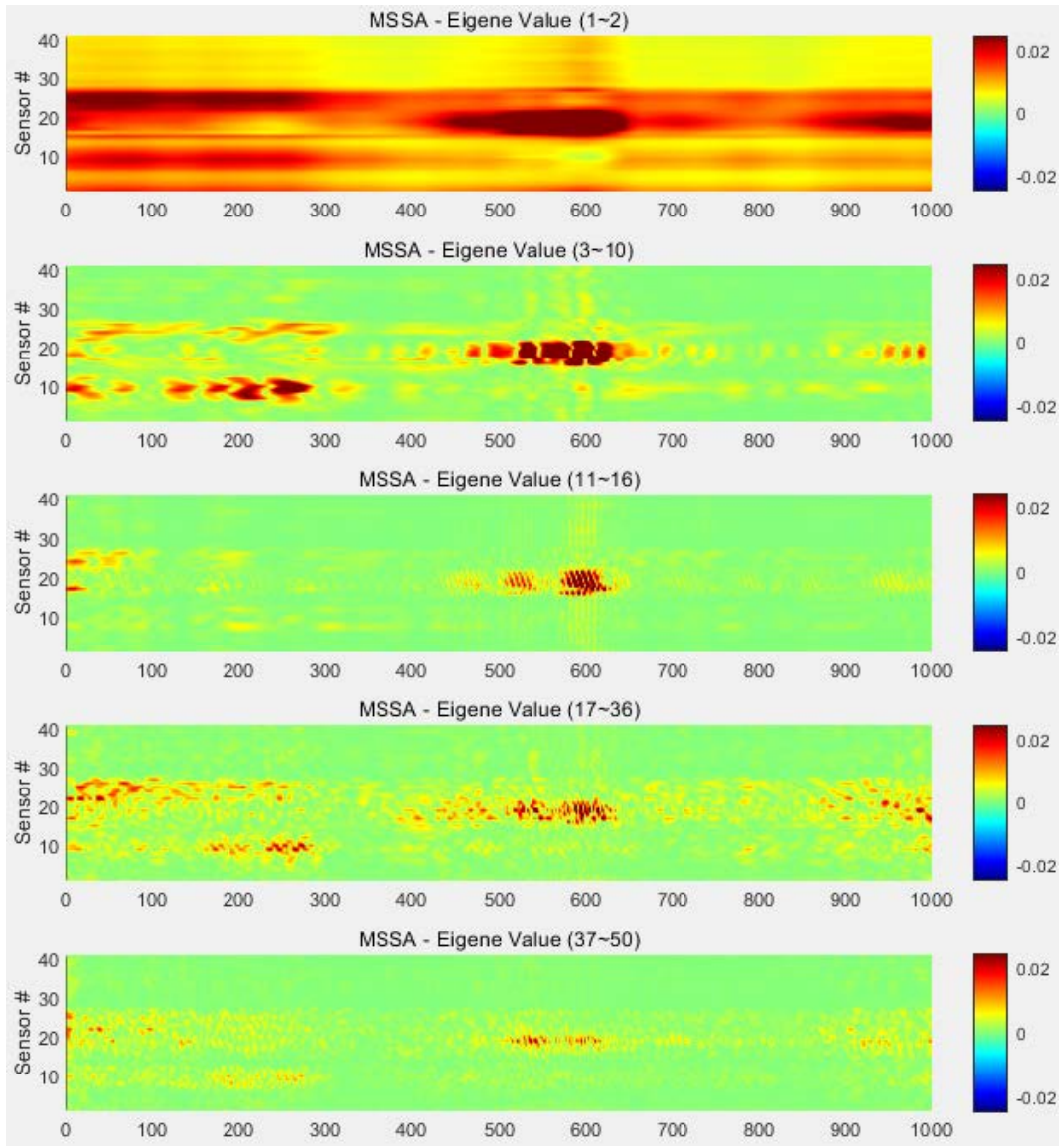
종래의 FFT, Gabor 변환 및 Wavelet 신호해석 방법의 경우, 특정 차단 주파수를 선택해야 한다[51-61]. 반면에 MSSA 필터는 비모수적(nonparametric)인 방법을 사용하는 장점이 있다.



**Fig. 4-8 Example of eigenvalue distribution**



**Fig. 4 -9 Correlation matrix decomposition by MSSA**

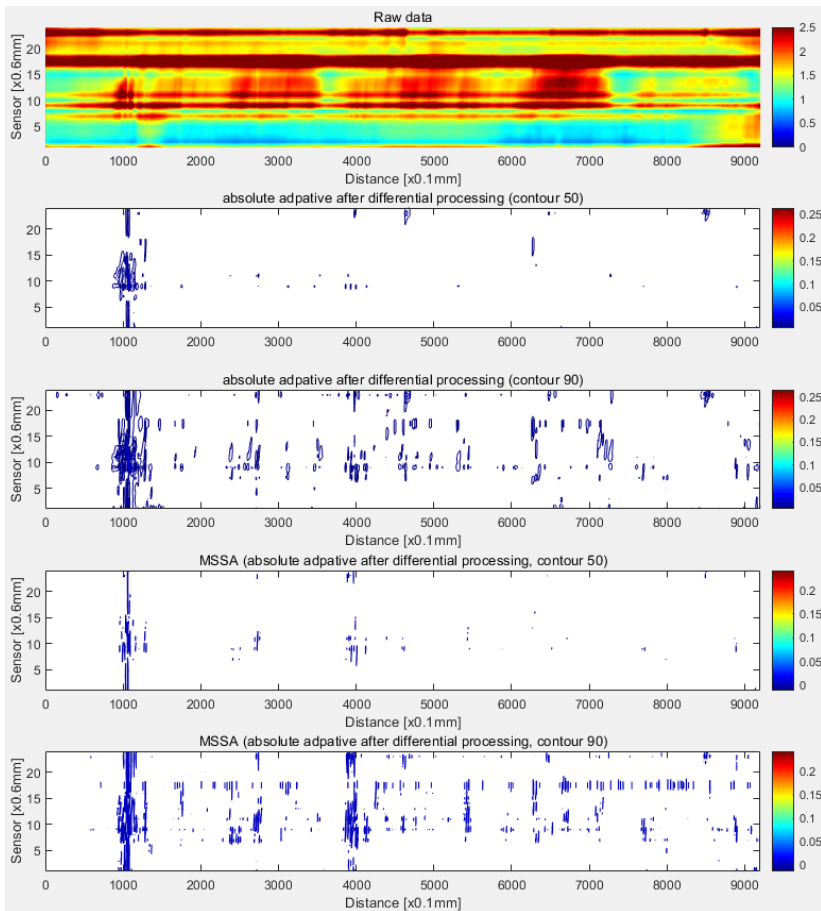


**Fig. 4 -10 Example of signal analysis by weighted correlation matrix group**



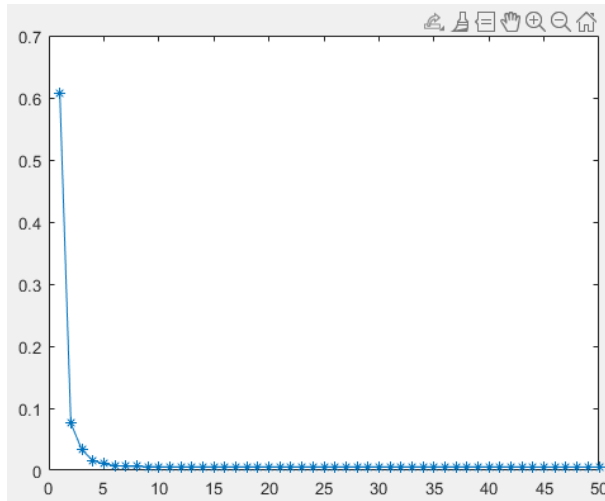
## 2. 고유치 해석

앞서 설명한 동일한 방법으로 실제 취득된 데이터에 의한 결과를 적용하였다. 차분-경향제거-절대처리한 신호는 다변량 입력(24개의 입력)으로 간주될 수 있다. 센서 탐촉자는 1,020mm 길이의 용접부를 0.1mm 거리 분해능으로 스캔하였다. 따라서, 전체적으로 다변량 특이 스펙트럼 해석 필터의 입력신호는  $P \times L = 24 \times 10199$ 의 크기를 갖는다. 적층(stack) 길이 M은 일반적으로 L의 절반보다 작게 선택하며, 본 논문에서는 M=50을 사용하였다. Fig. 4-11은 원신호, 차분-경향제거-절대처리(등고선 50, 90개) 및 MSSA(등고선 50,90개)결과를 나타낸다.



**Fig. 4 -11 Reconstitution of input signal**

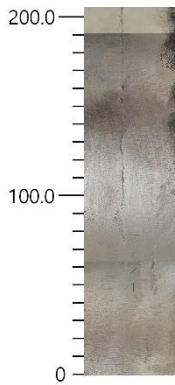
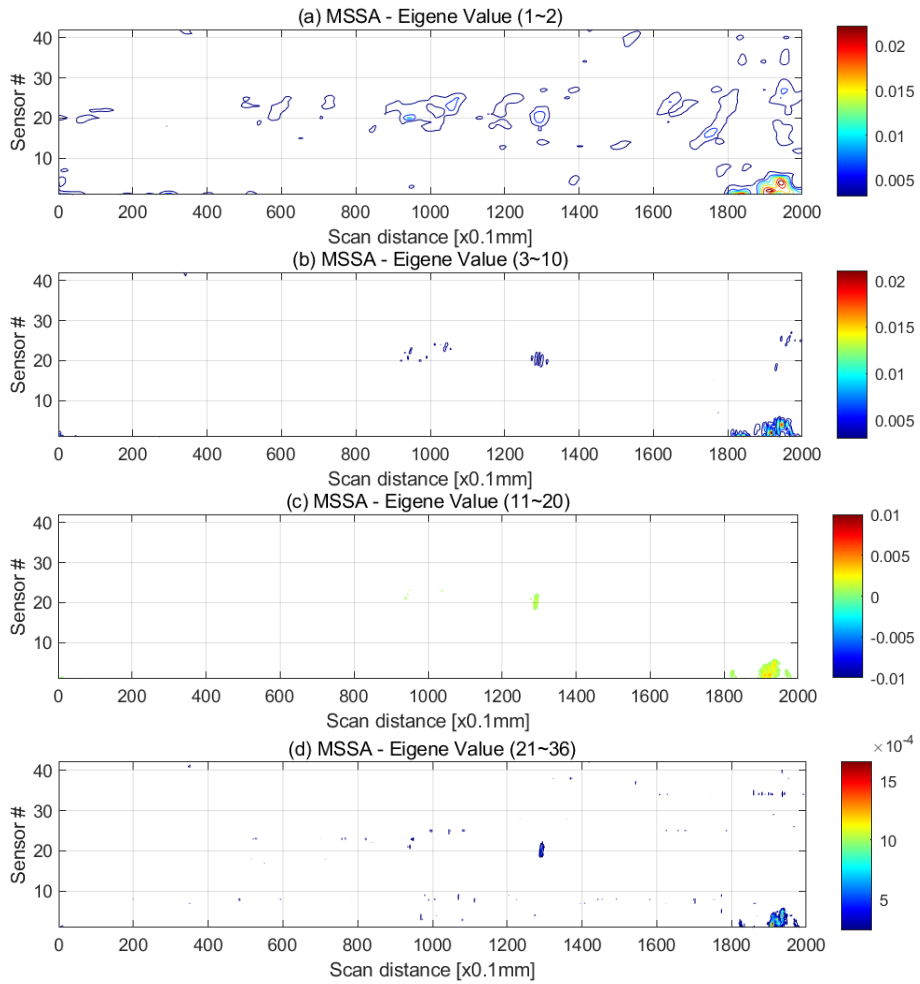
Fig. 4-12는 정렬 순서에 따른 실제 취득된 데이터의 고유값 분포를 나타낸다. 고유값은 총 합에 대해 정규화되어 각 고유값에서 자기 스캔 신호들의 분산들을 나타낸다. 앞에서부터 두 개의 고유값은 트렌드 신호에 해당하는 높은 값을 가진다. 중간적 고유값들은 결합 신호에 해당하며, 나머지 작은 값을 가지는 고유값들은 잡음 신호에 해당한다.



**Fig. 4 -12 Eigenvalue distribution**

트렌드 신호는 높은 고유값들로 인해 쉽게 구별이 가능하지만, 결합 및 잡음 신호의 고유값을 분리하는 것은 쉽지가 않다. 이에 따라, 결합과 잡음 신호의 분리를 위해 가중상관법(w-correlation)을 추가로 사용하였다. Fig. 4-13 ~ Fig. 4-17에 실제 취득된 데이터의 상관 행렬을 시각화하였다. 고유값들 중 낮은 가중 상관값( $\lambda_1 \sim \lambda_2$ )의 영역은 잡음신호가 랜덤하므로 결합신호와 낮은 상관관계를 가진다.

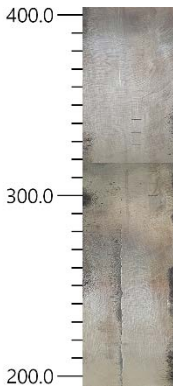
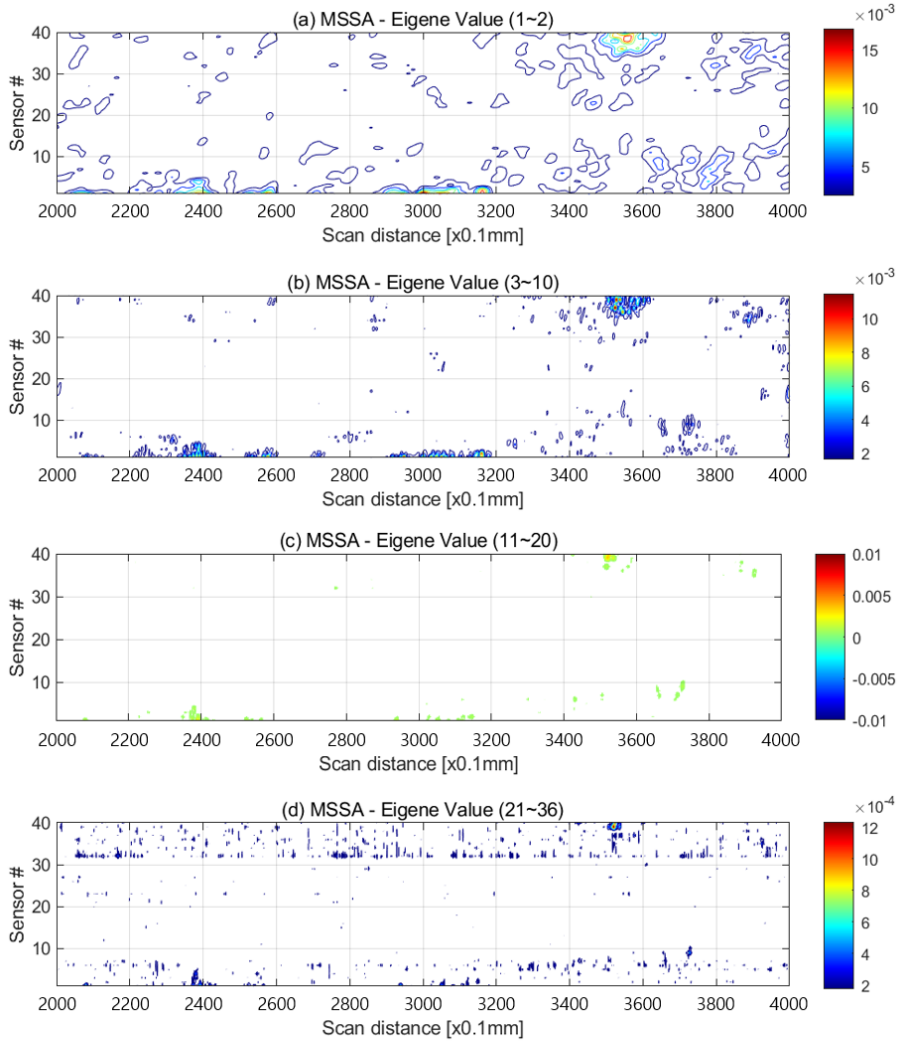
그리고, 고유값이  $\lambda_3 \sim \lambda_{10}$ 인 영역은 결합신호와 함께 일부 투자율 변화가 감지된다. 고유값이  $\lambda_{11} \sim \lambda_{20}$ ,  $\lambda_{21} \sim \lambda_{36}$ 인 영역에서는 잡음 신호가 주로 추출됨을 알 수 있다. 따라서, 결합 신호에 해당하는 고유값  $\lambda_3 \sim \lambda_{10}$  데이터는 다음 절에서 설명할 자동 데이터 생성 및 인공지능 기법에 활용된다.



Attention : (damage number, shape)=(center)

- (#1, C-slit)= (1130)
- (#2, C-slit)= (1240)
- (#3, C-slit)= (1340)
- (#4, C-slit)= (1480)
- (#5, IP)= (1533)
- (#6, IP)= (1958)

**Fig. 4 -13 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 0~200mm)**



Attention : (damage number, shape)=(center)

(#7, IP)= (3464)

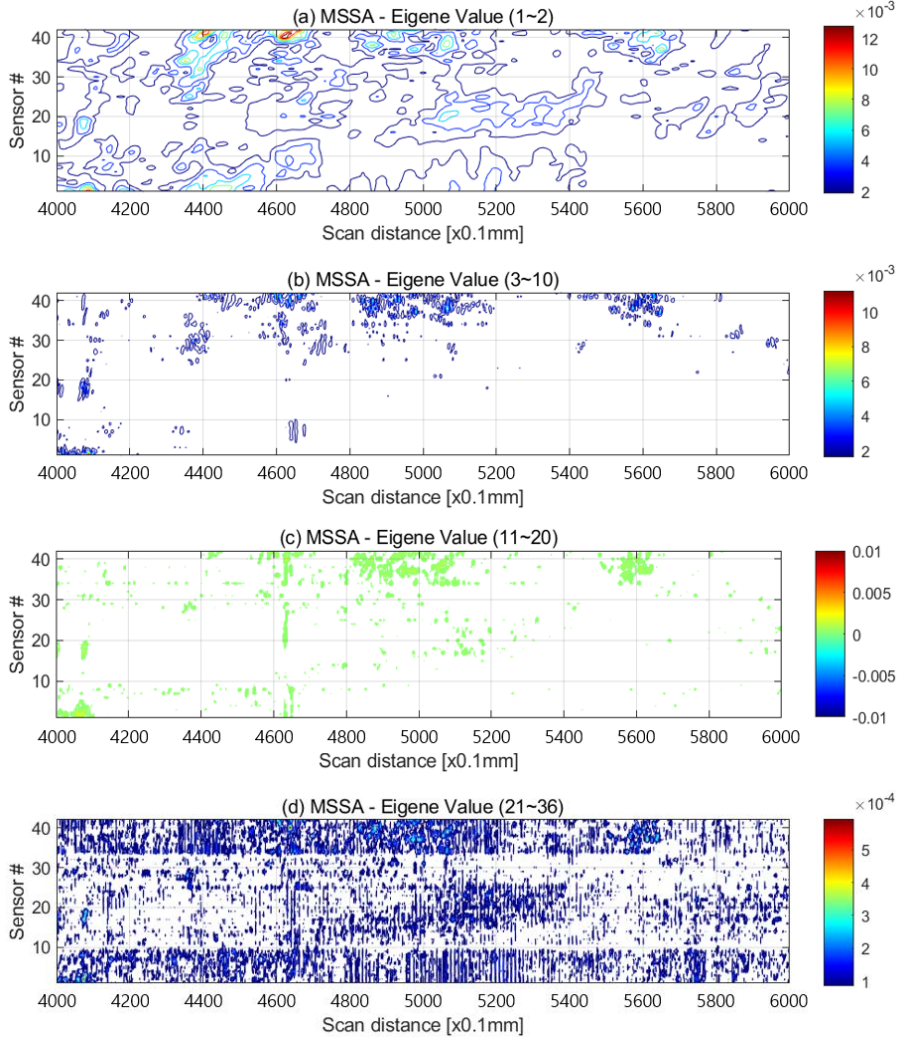
(#8, R-slit)= (3719)

(#9, R-slit)= (3789)

(#10, R-slit)= (3879)

**Fig. 4 -14 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 200~400mm)**





Attention : (damage number, shape)=(center)

(#11, C-slit)= (4069)

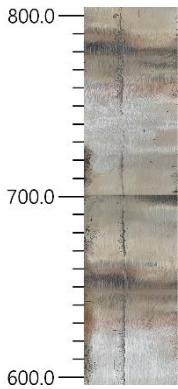
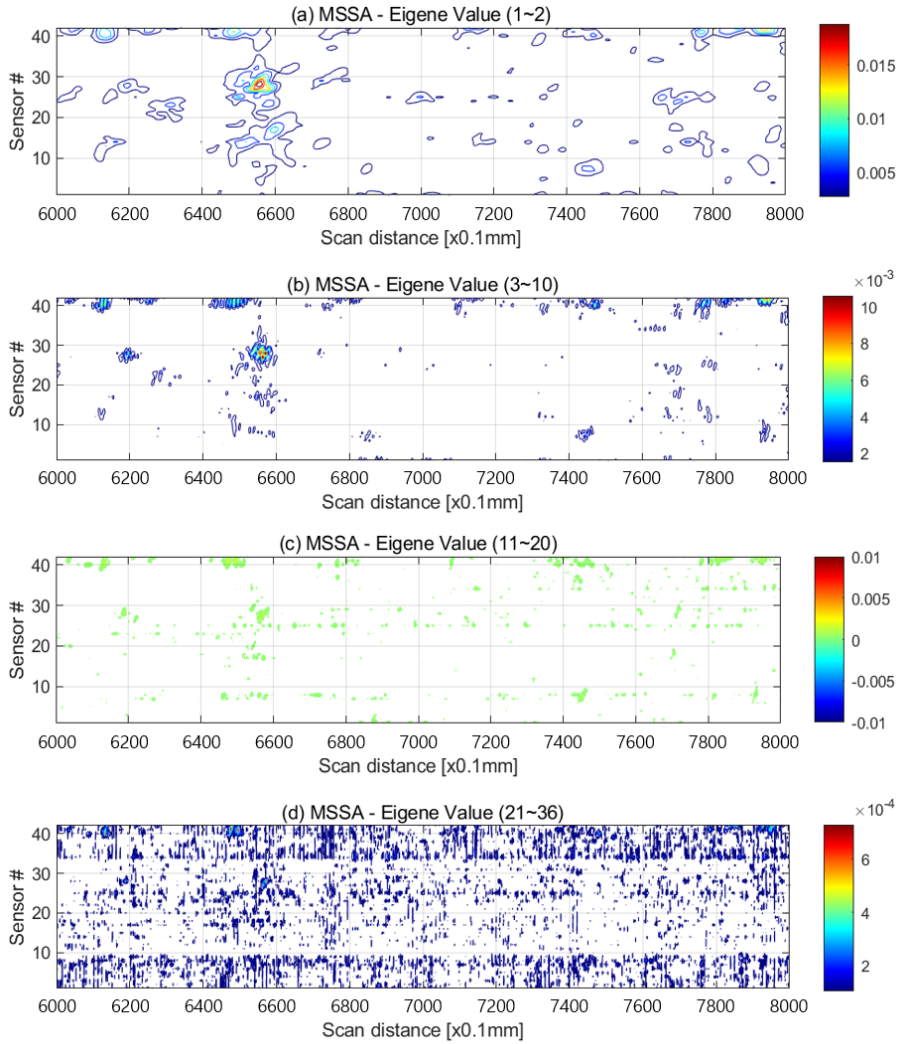
(#12, C-slit)= (4139)

(#13, C-slit)= (4219)

(#14, IP)= (4182)

(#15, IP)= (4607)

Fig. 4 -15 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 400~600mm)



Attention : (damage number, shape)=(center)

(#16, IP)= (6076) / (#17, C-slit)= (6253)

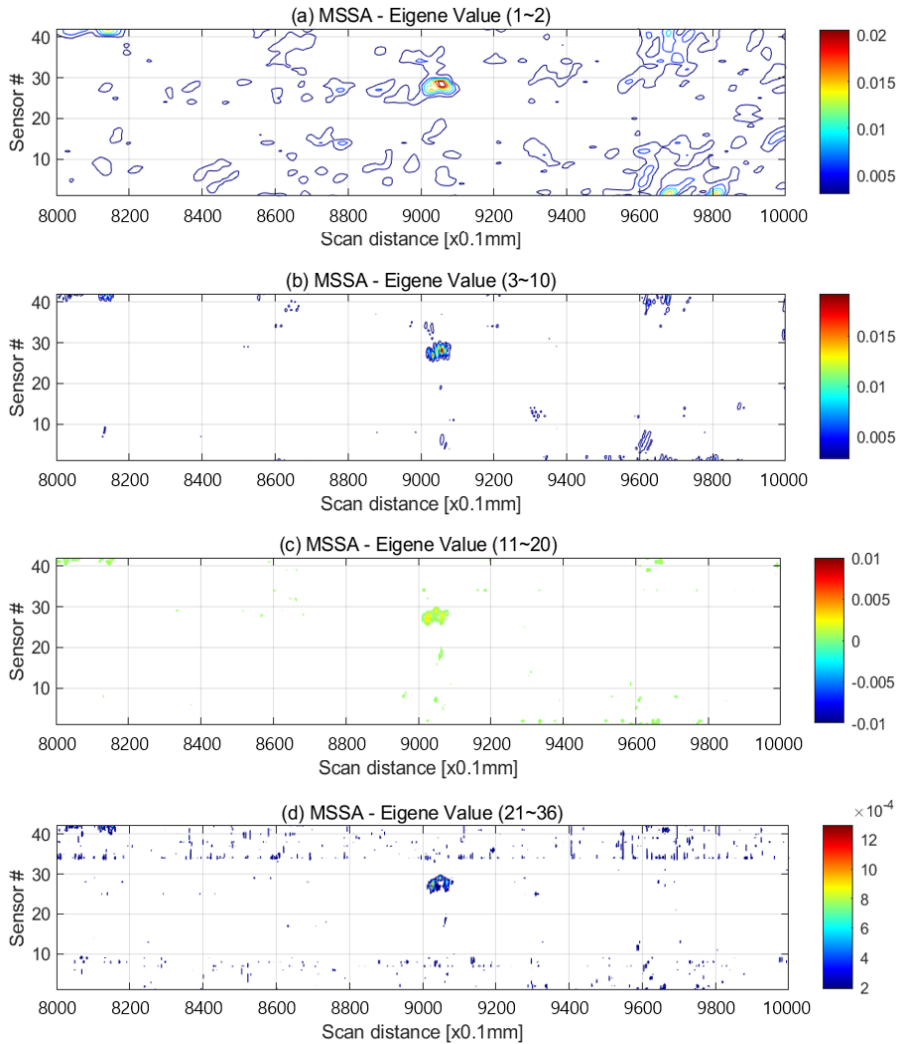
(#18, C-slit)= (6383) / (#19, C-slit)= (6503)

(#20, L-slit)= (6733) / (#21, Porosity)= (6780)

(#22, L-slit)= (6863) / (#23, L-slit)= (6983)

(#24, IP)= (7628)

**Fig. 4 -16 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 600~800mm)**



Attention : (damage number, shape)=(center)

(#25, C-slit)= (8769) / (#26, C-slit)= (8889)

(#27, C-slit)= (8999) / (#28, C-slit)= (9099)

(#29, R-slit)= (9299) / (#30, IP)= (9347)

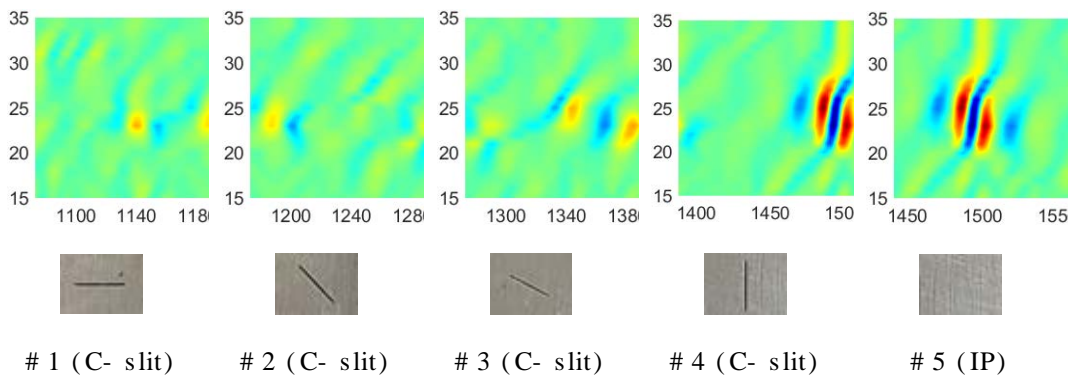
(#31, R-slit)= (9419) / (#32, R-slit)= (9529)

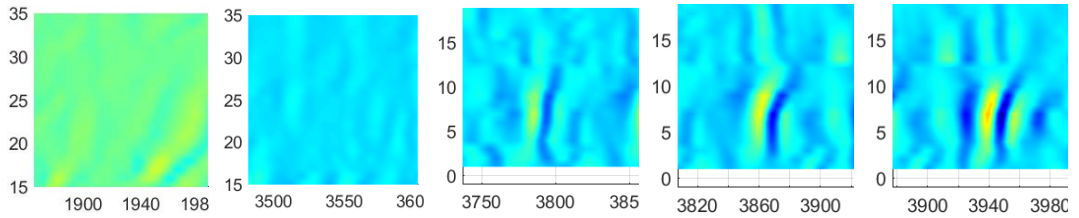
(#33, R-slit)= (9649)

**Fig. 4 -17 Signal analysis by weighted correlation matrix group (section 800~1000mm)**

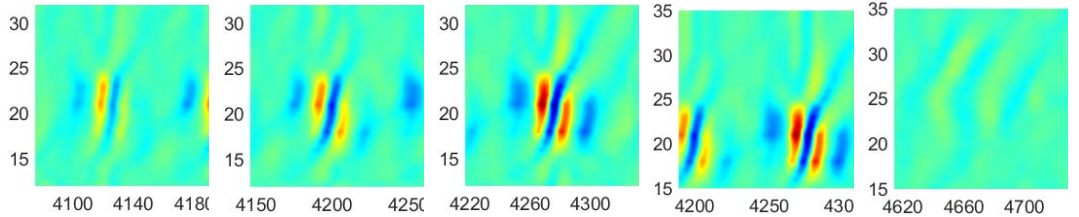
### 제 3 절 데이터 생성

한정된 자원으로 최대한의 많은 데이터를 생성하기 위하여 다음과 같은 방법을 이용하였다. 즉, 여자코일(20kHz, 250mA 인가) 및 LIGiS에 의하여 구성되는 센서를 활용하여, 33개의 인공결함(24) 및 자연결함(9)에 대하여, 0.1mm 간격으로 각각 300회 측정하여,  $51 \times 10,200 \times 300 = 156,060,000$ 포인트,  $33 \times 300 = 9,900$  그룹의 데이터를 생성하였다. 한편, 매번 측정할 때마다 원주방향 측정 위치가 3~10mm 정도 차이가 발생하는 현상을 극복하기 위하여 네 개 인공결함 그룹의 중심위치의 축방향 동일 선상에 자석을 위치하였다. 자석의 위치는 용접부 중심으로부터 140mm 이격되어 있어서 측정 결과에 영향을 미치지 않도록 하였다. 별도의 센서를 구비하여 1번 채널에 자석, 즉, 각 인공결함 그룹의 원주방향 중심 위치를 측정하여 활용하였다. 각 결함 중심위치는 X-ray 검사(IP, porosity)와 육안검사(인공결함)에 의하여 미리 지정하였다. 또한, 결함 중심위치에서 가로 세로 각각 9.6mm의 영역에서 자기카메라 영상을 획득하였다. Fig. 4-18은 자동 추출한 데이터의 일례를 나타낸다.

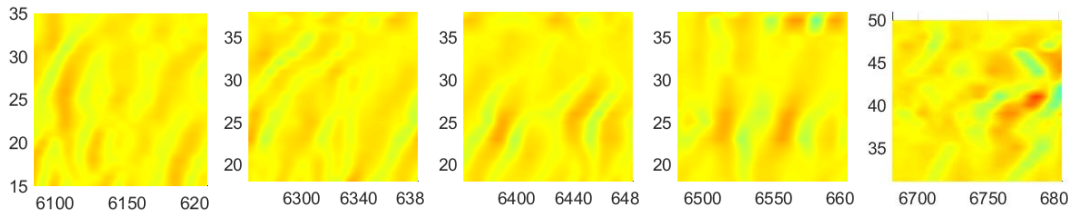




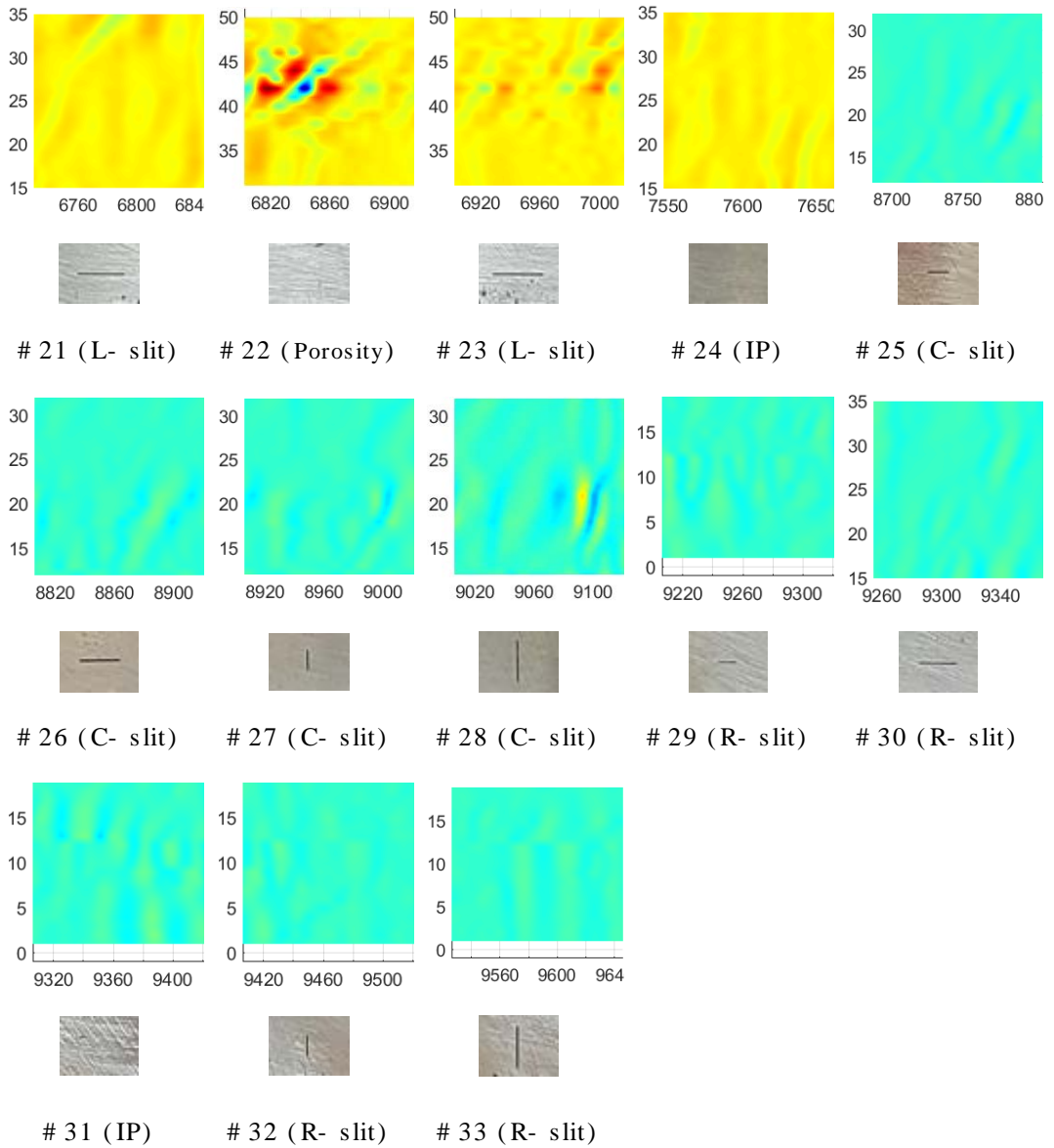
# 6 (IP)      # 7 (IP)      # 8 (R- slit)      # 9 (R- slit)      # 10 (R- slit)



# 11 (C- slit)      # 12 (C- slit)      # 13 (C- slit)      # 14 (IP)      # 15 (IP)



# 16 (IP)      # 17 (C- slit)      # 18 (C- slit)      # 19 (C- slit)      # 20 (L- slit)



**Fig. 4 -18 Automatic extraction of defect data**



배관 용접부의 일정 영역 데이터를 자동으로 추출하는 소프트웨어에 대한 단계별 상세 설명은 다음과 같다.

**Step 1.** 정확한 결함의 위치 지정을 위하여 상기 기술한 바와 같이 실험에 사용된 자석의 위치를 지정하였다. 이후 데이터 길이, 윈도우 넓이 해석범위를 지정한다. 고유값은 결함 신호만 추출하기 위하여  $\lambda_3 \sim \lambda_{10}$ 으로 지정하였다. 다음으로 LIGIS의 센서 번호 0~50을 지정하고, 센서 중심위치를 지정한다.

**Step 2.** 불러올 데이터용 원본 csv 파일 개수를 반복 실험한 횟수인 300로 지정한 후 숫자인 파일명을 문자로 형식으로 변환한다. 이후 불러온 데이터에 대한 신호처리를 진행한다. 신호처리는 절대처리, 전치, 차동해석, 경향제거 후 절대처리를 진행한다.

**Step 3.** 정확한 결함 중심위치를 찾기 위해 자석 신호 중심을 기점으로 실제 결함의 중심위치와 센서 중심위치까지의 거리를 계산하여 입력한 후 적용한다.

**Step 4.** 라인스캔영상을 면적 영상으로 추출하며, 컬러스케일은 최대값에 근접할수록 진한 적색, 최소값에 근접할수록 진한 파란색으로 표현되도록 지정하였다. 영상의 크기는 9.6mm X 9.6mm로 지정하였다.

**Step 5.** 이전 단계를 거쳐 선택된 데이터에 대해 Class별 고유 번호를 지정하였다. 컬러 영상을 저장한 후, 이후 진행할 AI 해석을 위해 2진 영상으로 변환하고 해상도를 28x28로 축소하여 저장하였다.

이러한 과정을 통해 제작된 탄소강 시험편 1종을 이용하여 최대한 많은 양의 데이터를 취득하였으나, 본 논문에서 사용된 시험편이 아닌 다른 시험편 및 실제 운용중인 배관에서의 실험 데이터가 없으므로, 본 논문과 동일한 결과를 얻을 수 있는지에 대한 문제가 제기될 수 있다. 따라서, 이러한 문제를 최소화하기 위해 여러 산업 설비의 대표적인 압력배관으로 사용되는 SA106재질의 시험편을 KEPIC MIA 2200(원전가동중검사) 비파괴검사 방법 (2)항과 부록 D를 기준으로 제작하였으며, 가공된 인공결함 또한 종래 검사법에서 규정하고 있는 최소 검출능인 5mm 보다 작은 결함인 2mm의 결함을 도입하였고 앞선 실험을 통해 검출이 가능함을 확

인하였다. 또한, 배관 용접부에서 인공지능을 활용한 해석방법은 기존에 존재하지 않으며, 종래의 검사법과 달리 결함 판정 시, 검사자의 주관이 개입되지 않으므로 검사자 경험과 관계없이 항상 일정한 결과를 얻을 수 있다.



## 제 4 절 인공지능 해석

### 1. 이론적 배경

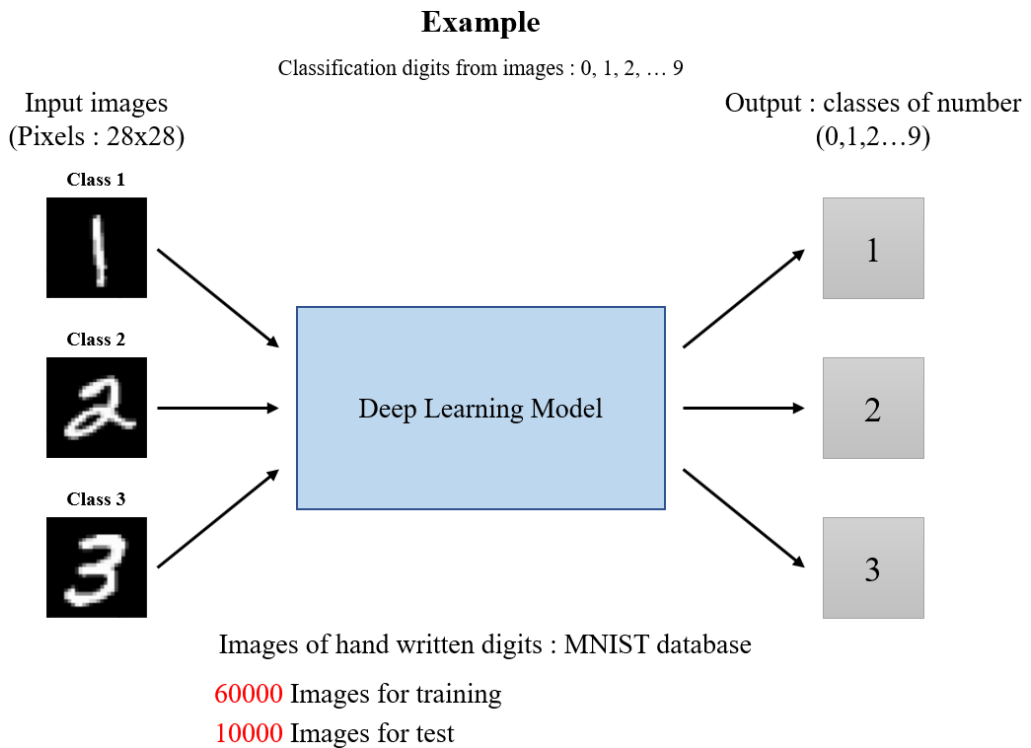
본 논문에서는 Deep Learning을 위하여 MNIST(Modified National Institute of Standards and Technology database)를 활용하였다. MNIST는 손으로 쓴 숫자들로 이루어진 대형 데이터베이스이며, 다양한 화상 처리 시스템을 트레이닝 및 테스트하기 위해 일반적으로 널리 사용되고 있다[62-63]. 따라서, 상기 절에서 서술한 바와 같이 자기카메라 결과 또한 영상데이터로 간주할 수 있으므로, 보편적으로 쉽게 접근할 수 있는 방법인 MNIST 데이터베이스를 이용하여 용접부에서 발생할 수 있는 여러 신호패턴을 학습하였다. 소프트웨어는 Deep Learning Toolbox (Neural Network Toolbox)가 제공되는 Matlab 기반으로 설계되었다[64-66]. Fig. 4-19에 나타난 바와 같이 28×28개의 픽셀로 이루어지는 여러 가지 형태의 이진화 영상을 0~9까지 총 10개의 Classes로 분류하여 학습하였다. 각 Class는 Table 4-1에 나타내었다.

**Table 4 -1 Classification of defect and non-defect signals**

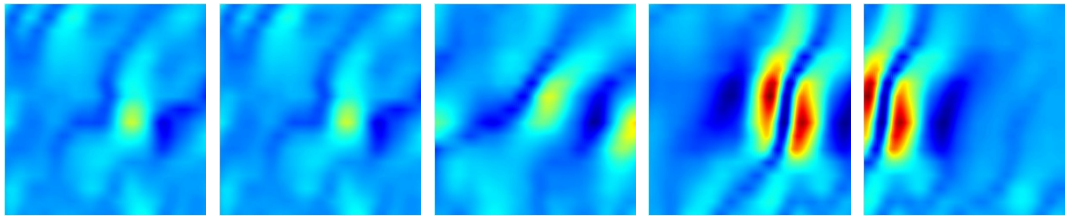
Class	Direction	Shape	Location
1	axial	slit	weld
2	gradient	slit	weld
3	circumferential	slit	weld
4	axial	slit	HAZ
5	circumferential	slit	HAZ
6	-	IP	weld
7	-	porosity	weld
8	background	-	weld
9	background	-	HAZ
0	background	-	boundary

학습에 사용된 이미지는 총 7,500개로서, 본 논문에서 사용하는 9,300~9,900개의 약 80%에 해당한다. 하지만, 손글씨의 이진화 영상의 형태는 매우 명확한 반면에 본 논문에서 대상으로 한, 자기카메라 영상은 이진화되어 있지 않고, 명확하지 않아서 해석에 어려움이 있었다.

따라서, 자기영상 데이터를 Fig. 4-20에 나타낸 바와 같이 이진화한 후, Fig. 4-21에 나타낸 바와 같은 Deep Learning 단계를 거쳐 학습하였다.



**Fig. 4 -19 Classification of handwritten by deep learning [67]**



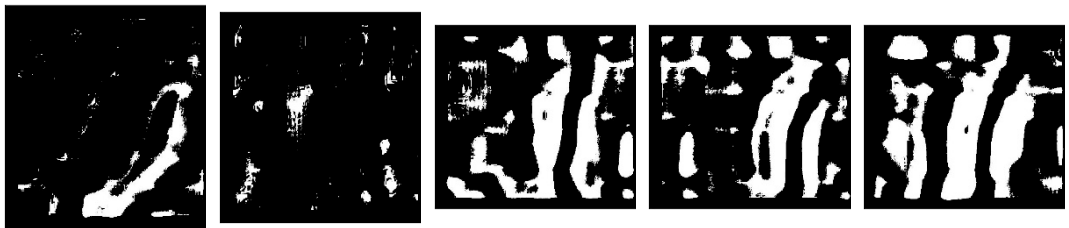
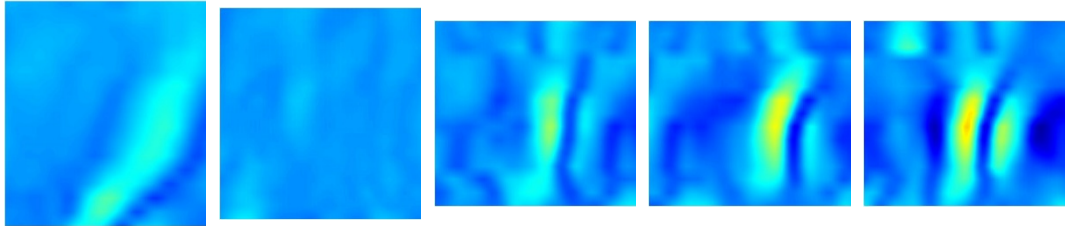
# 1 (C- slit)

# 2 (C- slit)

# 3 (C- slit)

# 4 (C- slit)

# 5 (IP)



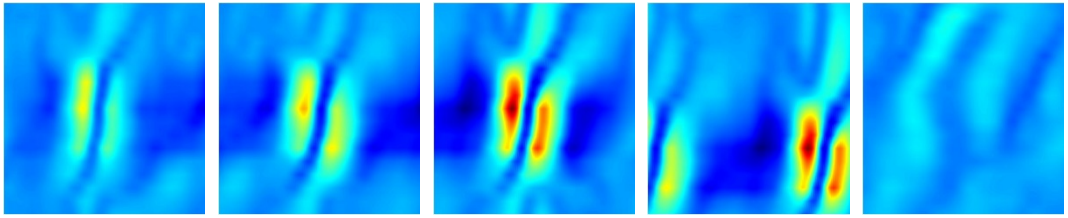
# 6 (IP)

# 7 (IP)

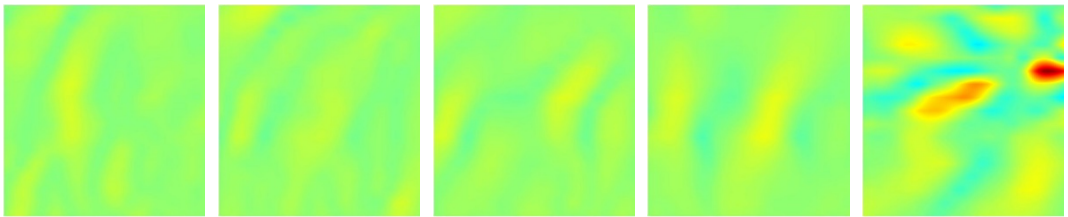
# 8 (R- slit)

# 9 (R- slit)

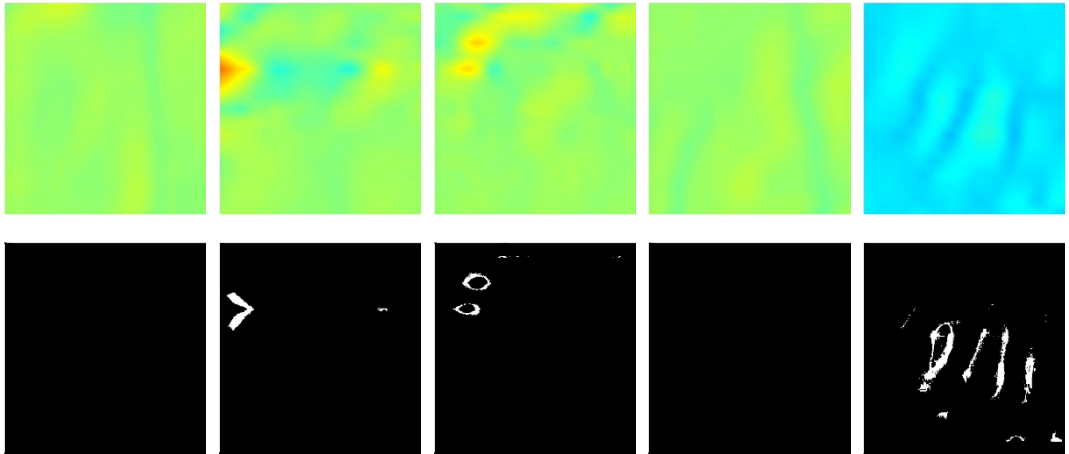
# 10 (R- slit)



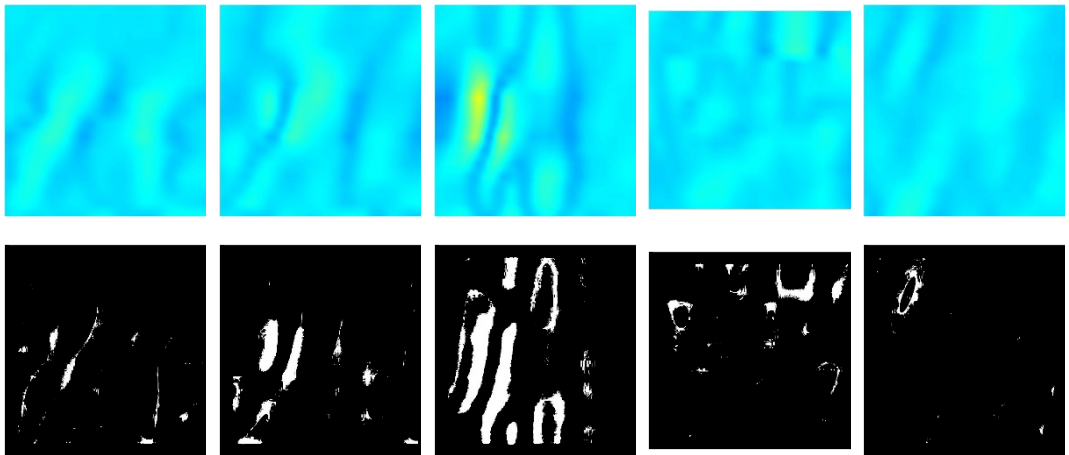
# 11 (C- slit)    # 12 (C- slit)    # 13 (C- slit)    # 14 (IP)    # 15 (IP)



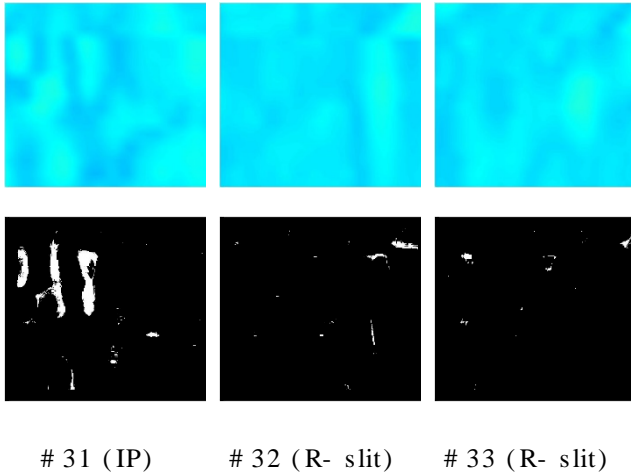
# 16 (IP)    # 17 (C- slit)    # 18 (C- slit)    # 19 (C- slit)    # 20 (L- slit)



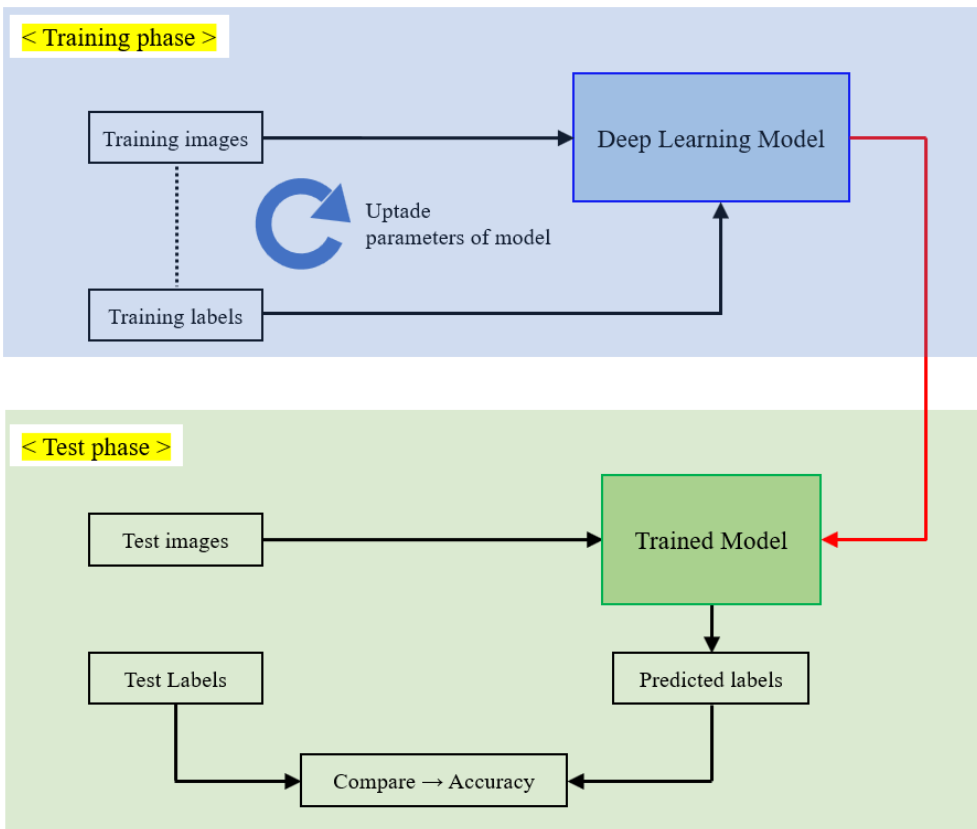
# 21 (L- slit)    # 22 (Porosity)    # 23 (L- slit)    # 24 (IP)    # 25 (C- slit)



# 26 (C- slit)    # 27 (C- slit)    # 28 (C- slit)    # 29 (R- slit)    # 30 (R- slit)



**Fig. 4 -20 Binarization of magnetic camera images**



**Fig. 4 -21 Training and application process by deep learning [68]**

## 2. 실험 데이터를 활용한 인공지능 해석

상술한 Fig. 4-20의 데이터를 이용하여 SA106\_net을 구축하고, 아래 코드에 의하여 검출 정확도를 판정하였다. Fig. 4-22 상단 그래프는 Deep Learning 반복횟수(x축)에 따른 정확도를 나타낸다. 반복횟수가 증가함에 따라 정확도가 높아진다. 하단의 그래프는 반복횟수(x축)에 따른 손실 데이터를 나타내며, 반복횟수가 증가함에 따라 손실된 데이터가 줄어드는 것을 알 수 있다.

결과적으로 82.56%의 정확도로 용접부에 존재하는 축방향(#1), 경사방향(#2), 원주방향(#3) 슬릿형 결함, 열영향부에 존재하는 축방향(#4)과 원주방향(#5) 슬릿형 결함, 용접부에 존재하는 용입불량(#6)과 기공(#7), 그리고 결함이 없는 용접부(#8), 열영향부(#9) 및 경계부(#0)를 구분할 수 있었다.

```
%% Classify Validation Images and Compute Accuracy
YPred = classify(SA106_net,imdsValidation);
YValidation = imdsValidation.Labels;
accuracy = sum(YPred == YValidation)/numel(YValidation)
```

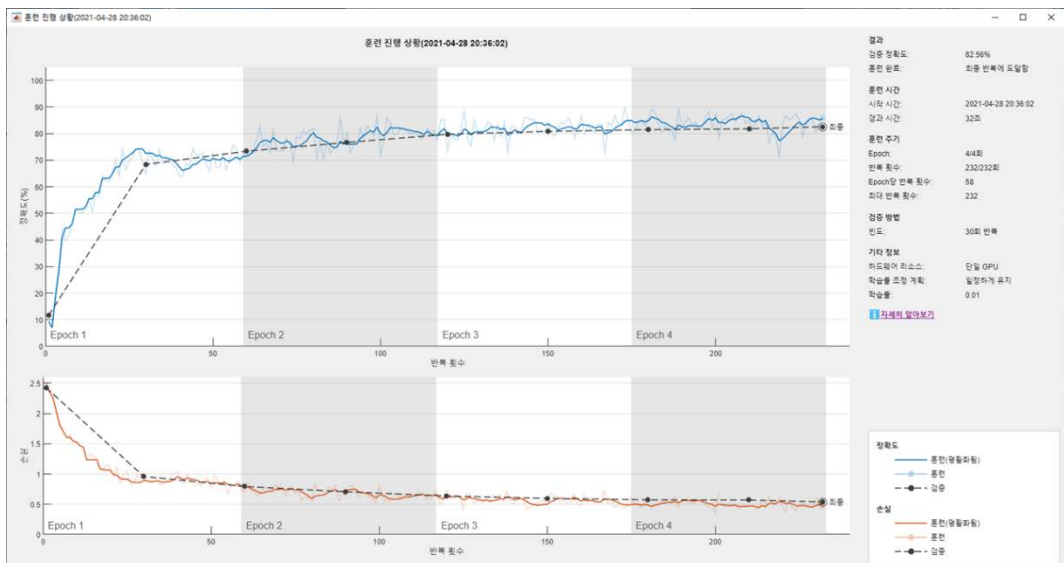


Fig. 4 -22 Classification result of defect and non-defect

## 제 5 장 배관 용접부 검사 시스템 제작

### 제 1 절 정적 평형 스캐너

#### 1. 이론적 배경

유동성 매질을 운송하기 위한 배관은 산업 전반에 걸쳐 널리 사용되며, 그 길이는 수킬로미터에서 수백킬로미터까지 확장하여 사용된다. 공장에서 생산된 비교적 짧은 길이의 배관을 이러한 장거리 배관 설비에 적용하기 위한 수단으로 용접이 많이 사용된다. 용접 접합은 대상 자재의 두께 및 형상에 대한 제한이 비교적 적으며, 설비의 중량을 경량화할 수 있다는 장점을 가진다. 반면에 용접 시 동반되는 국부적인 가열 및 냉각으로 인한 재질의 변화, 변형 및 잔류응력이 존재할 수 있으며, 결함 발생의 원인이 될 수 있다. 특히, 석유화학플랜트, 열수송관, 원자력·화력 발전설비 등과 같은 고온, 고압 및 부식 환경에서 장기간 운용시 결함 발생 가능성이 크게 증가한다. 용접부에서 발생 가능한 결함으로는 용입부족, 융합불량, 언더컷, 슬래그 혼입, 기공, 균열 등이 있으며, 이는 육안으로 검출이 곤란하므로, 주기적인 비파괴검사를 실시하여 배관 용접부의 건전성을 평가해야 한다.

탄소강 배관 용접부의 건전성을 평가하기 위해 적용되고 있는 비파괴검사 방법은 체적검사 및 표면검사로 나누어진다. 체적검사 방법으로는 초음파검사 및 방사선검사가 적용되고 있으며, 본 논문의 대상인 배관 용접부 표면 검사는 침투검사와 자분검사가 적용되고 있다. 하지만, 침투검사 및 자분검사는 전처리(세정), 침투제 및 자분 도포, 잔류 침투제 제거, 현상제 도포, 검사, 후처리(세정 및 탈자)의 복잡한 검사공정을 가진다. 이에 따라 검사 시간이 증가하게 되며, 인체에 유해한 화학물질인 침투제, 현상제 및 자분의 사용이 필수적이다. 그러나, 분말 및 액상 형태인 자분과 침투제를 중력에 반하는 위치인 배관 하부에 도포할 경우 용접부 표면에 고르게 도포되지 못하고 중력에 의해 낙하하게 되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 자분탐상 및 침투탐상의 단점을 극복하기 위한 대체기술로서 화학물질을 사용하지 않고, 기존 표면 검사법 대비 동등 이상의 감도를 가지며, 배관 용접부를



단시간에 스캔 가능한 센서 및 스캐너의 개발이 필요하다.

탄소강 재질의 배관을 검사할 시, 교류자기장 측정, MMM(Metal Magnetic Memory) 및 MFLT 등을 이용하여 측정할 수 있다. 이때 MFLT는 강력한 자기장을 인가하고 결함 주변에서 발생하는 누설자속을 측정해야 한다. 강력한 자기장을 인가하기 위해서는 높은 투자율을 가지는 재질로 제작된 코어와 많은 턴수를 가지는 코일의 권선이 필요하므로, 이에 따른 무게가 매우 증가하게 된다. 또한 배관 표면에 부착하여 스캔할 때, 일정한 리프트오프를 유지하면서 강한 부착력을 극복할 수 있는 이송 수단이 구비되어야 한다.

한편, 무거운 자화기 자체의 중량을 극복하며 금속 배관의 원주방향 용접부를 따라 360° 회전시키기 위해서는 큰 동력을 필요로 한다. 정형 평형 용접부 검사용 스캐너는 이러한 문제점을 해결하기 위해 개발된 것으로, 금속 배관의 용접부위를 따라 회전 구동하면서 용접 부위에서 발생하는 결함을 검사할 수 있으며, 결함의 형태와 크기 및 분포를 정량적으로 평가할 수 있다.

금속 배관의 원주방향 용접부를 따라 검사하는 정적 평형 용접부 검사용 스캐너는 각각 N극과 S극이 인가되는 2개의 바퀴형 자화기를 포함하고 있으며, Fig. 5-1 (a)와 같이 자화기-1 과 자화기-2는 정적 평형을 위해 배관 중심을 기준으로 서로 대칭되는 위치에 배치하였다[69-71]. 각각 N극, S극을 가지는 자화기의 바퀴로 인해 용접라인의 수직방향으로 자화가 이루어지며, 자화 방향으로 GMR센서를 배열하였다. 이를 이용하여 용접부 결함 주변에서 발생하는 누설자속 분포를 측정할 수 있다. 또한 자화기에 의하여 용접라인의 수직방향으로 자화함으로써 비투자율이 1에 가깝게 만들 수 있다. 비투자율이 1에 가까우면 상자성체 금속처럼 취급되고, 자화기-2에 장착된 GMR센서 및 여자코일에 넓은 폭의 주파수를 가지는 전류를 인가할 수 있으므로 보다 효율적으로 결함 정보를 취득할 수 있다. 결과적으로 용접으로 인한 재질변화에 따른 잡음 신호를 무시하고 결함정보를 취득할 수 있다.

센서부-1과 센서부-2는 자화기-1,2와 마찬가지로 정적 평형을 위해 배관 중심을 기준으로 서로 대칭되는 위치에 배치된다. 센서부-1은 배관의 외주면을 따라 구동

할 수 있도록 4개의 바퀴를 장착하였으며, 일정한 리프트오프 유지를 위해 센서부와 센서케이스 사이에 스프링 구조를 사용하였으며, 센서케이스에 별도의 소형 바퀴 4개를 추가로 장착하였다. 센서부-1 내부에는 여자코일 및 용접라인의 수직방향으로 GMR센서가 배열되어 있으며, 여자코일에 교류 전류를 인가하여 ACFM을 통한 결함 검출이 가능하다. 센서부-2는 센서부-1에서 여자코일만 제외하면 모든 구성이 동일하며, 잔류 응력 및 결함으로 인해 발생한 잔류자속밀도를 검출할 수 있다. 또한, 센서부-1에는 배관의 원주방향 용접부를 따라 이동하는 스캐너의 이동거리를 정량적으로 측정할 수 있는 엔코더가 장착되어 있다. 엔코더는 구동부에 장착할 경우 구동 시작 시, 바퀴의 슬립 현상으로 인해 오차가 발생할 수 있으므로, 구동부를 따라 자유롭게 회전하는 센서부-1에 장착하였다[72-73]. 상기 엔코더는 필요 시, 센서부-2에도 장착할 수 있다. 엔코더에서 출력되는 신호는 현재 스캐너의 이동거리 측정 및 결함 위치 추정에 사용된다. 스캐너 구동 시, 센서 출력값과 엔코더를 통한 이동거리값이 동시에 취득 및 저장되며 이를 통해 검출된 결함 신호의 해당하는 용접부의 위치를 추정할 수 있다. 이때, 측정 거리가 누적됨에 따라 엔코더 신호의 오차가 누적될 수 있으나 본 논문에서 사용된 시험편의 원주인 1020mm의 거리를 측정 시, 발생하는 오차는  $\pm 5\text{mm}$  이다.

거리조정부-1은 자화기-1과 센서부-1 사이에 설치되고, 거리조정부-2는 자화기-2와 센서부-2 사이에 설치된다. 거리조정부-1,2는 배관 외경의 오차에 대응하기 위해 정적 평형 용접부 검사용 스캐너의 전체적인 길이를 조절할 수 있도록 제작되었다. 상세 그림은 Fig. 5-2에 나타낸 바와 같다.

구동부-1 및 구동부-2 또한 다른 파트와 마찬가지로 정적 평형을 위해 배관 중심을 기준으로 서로 대칭되는 위치에 배치되어 있으며, 배관 외주면을 따라 주행할 수 있는 모터와 구동캐터필러로 구성되어 있다.

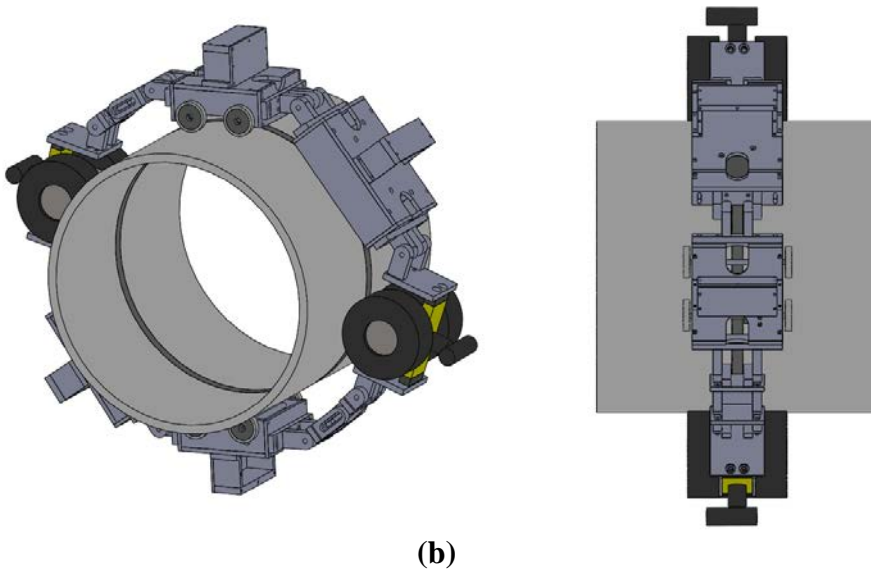
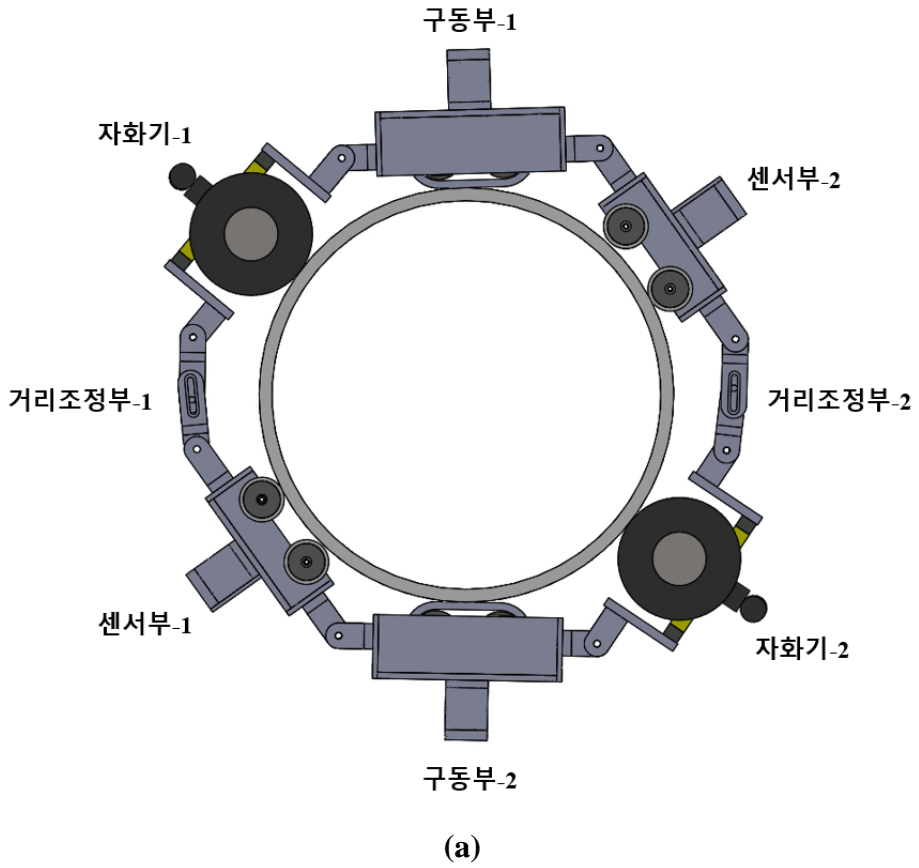
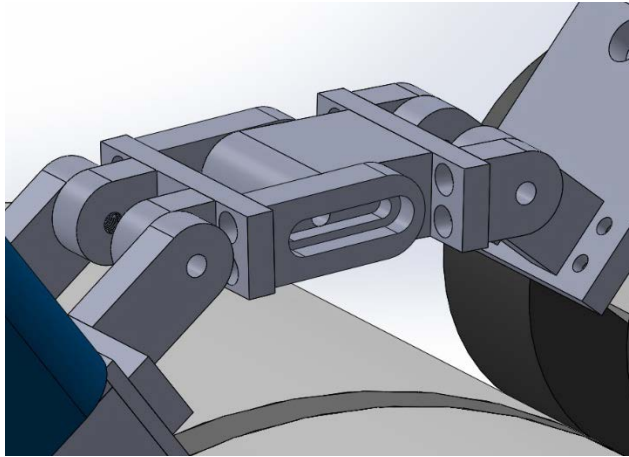


Fig. 5-1 Static balancing scanner for inspection of pipe welding



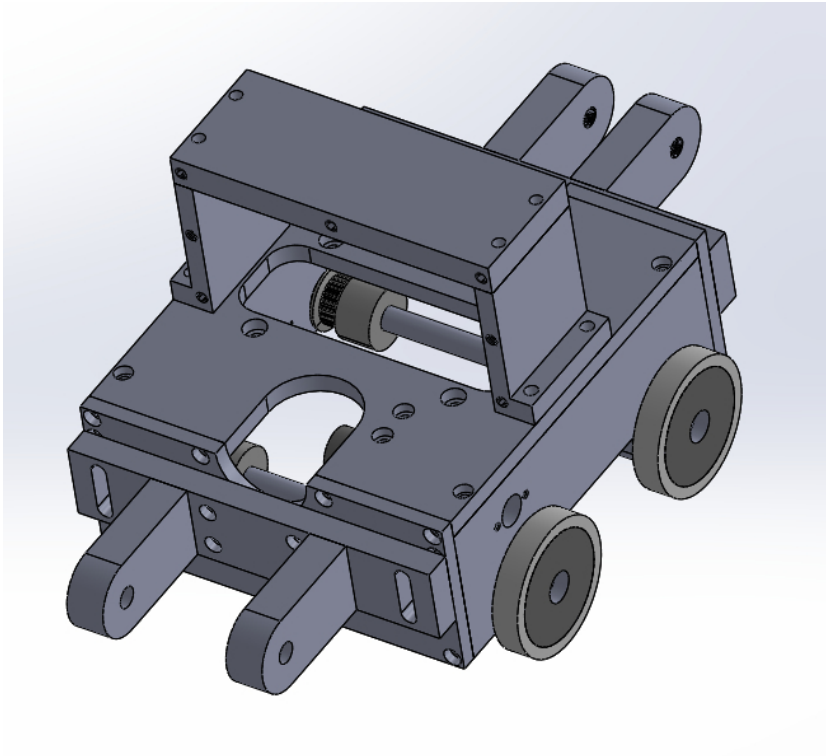
**Fig. 5 -2 Distance adjustment part of static balancing scanner**

결과적으로, 배관 용접부 검사를 위한 정적 평형 스캐너는 비교적 작은 동력으로도 무거운 자화기를 배관의 용접부를 따라서 360° 자동으로 회전시키면서, 4종류의 센서에 의해 취득된 데이터를 통하여 결함 유무를 판정하고, 결함의 형태, 크기 및 분포를 정량적으로 평가하기 위한 수단을 제공한다.

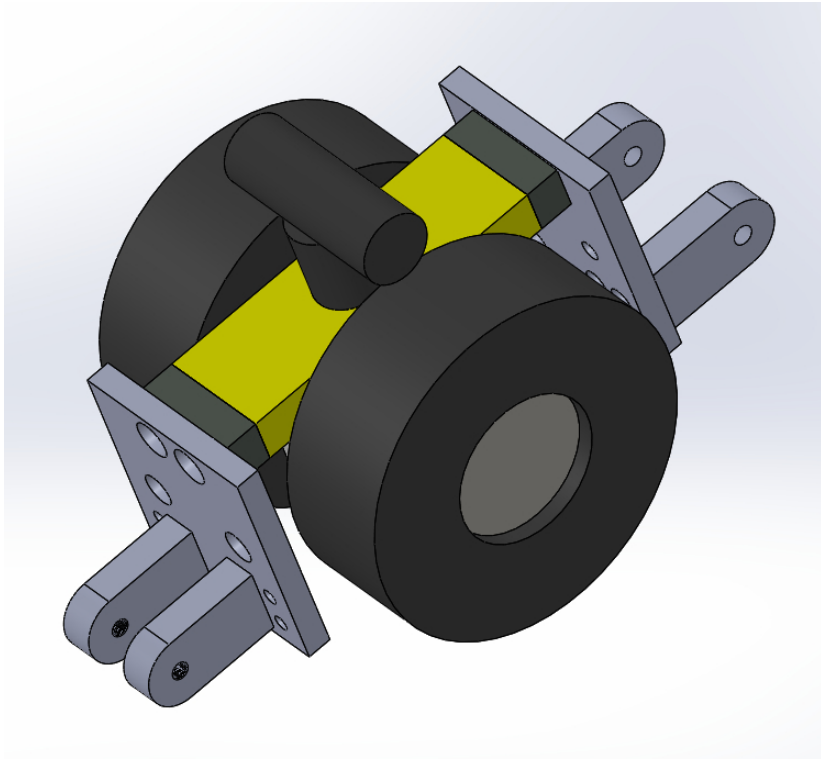
## 2. 시제품제작

이론적 배경을 바탕으로 Fig. 5-3에 나타내는 센서부-1,2를 설계 및 제작하였다. 리프트오프 유지 및 센서를 보호하기 위하여 네 개의 바퀴로 지지하였다. 각 바퀴는 서로 연동되어 엔코더와 연결된다. 이러한 구조는 네 개의 바퀴 중 어느 하나만 시험편에 접촉되더라도 이송 거리를 측정할 수 있다.

한편, Fig. 5-4는 자화기-1,2를 나타낸다. 자화바퀴 사이에서 여자코일에 의하여 국부적인 자화 영역 내에 유도전류를 인가하고, 누설자속과 유도전류의 왜곡에 의한 자속밀도의 분포를 측정할 수 있다. 자석은 노브에 의하여 수동으로 자화기를 작동할 수 있도록 설계하였다.

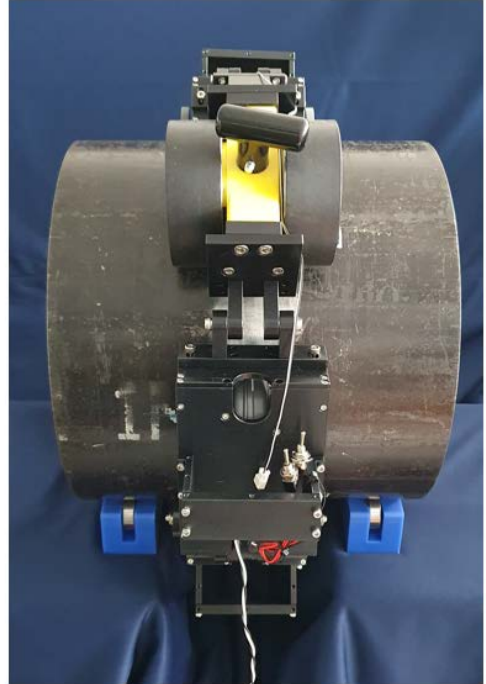


**Fig. 5 -3 Assembly drawing of sensor unit-1 and sensor unit-2**



**Fig. 5 -4 Assembly drawing of magnetizer unit-1 and magnetizer unit-2**

Fig. 5-5는 조립된 배관 용접부 검사용 정적 평형 스캐너 시제품을 나타낸다. 총 중량 12kg 및  $2 \times 130\text{kg}$ 의 자화력을 가지는 스캐너가 배관 용접부를 따라 균일한 리프트오프로 회전할 수 있도록 시제작하였다. 정방향 및 역방향으로 회전할 수 있으며, 이는 소프트웨어를 통해 제어할 수 있다.

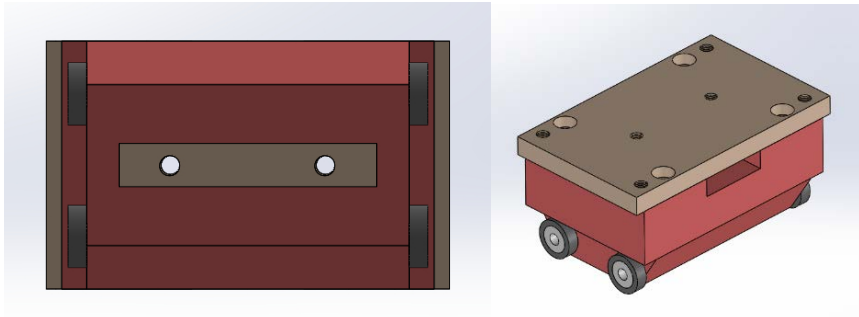


**Fig. 5 -5 Prototype static balancing scanner for inspection of pipe welding**

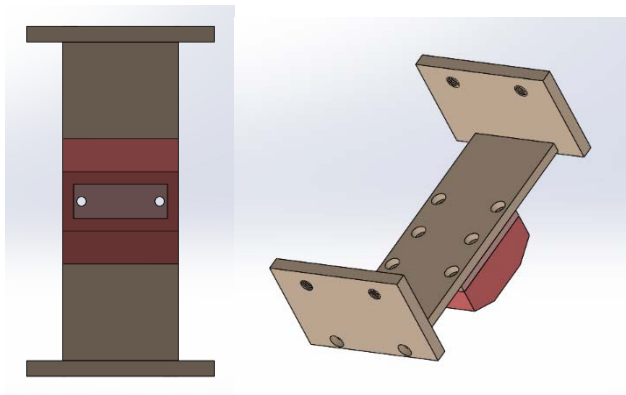
## 제 2 절 센서탐촉자

Fig. 5-6과 Fig. 5-8에 나타내는 기구물에 앞서 제작한 LIGiS 및 여자코일을 수납하였다. 소형 바퀴를 장착하여 모재부를 기준으로 일정한 리프트오프에서 데이터가 취득될 수 있도록 하였다. 한편, 제1센서 및 제2센서는 여자코일에 AC전류의 인가여부에 따라 상호 교체되어 사용될 수 있다.

한편, Fig. 5-7과 Fig. 5-9는 동일한 구조와 크기를 가지며, 자화바퀴 사이에서 여자코일에 AC전류의 인가여부에 따라 상호 교체되어 누설자속 또는 부분포화 와전류 신호를 취득할 수 있다.

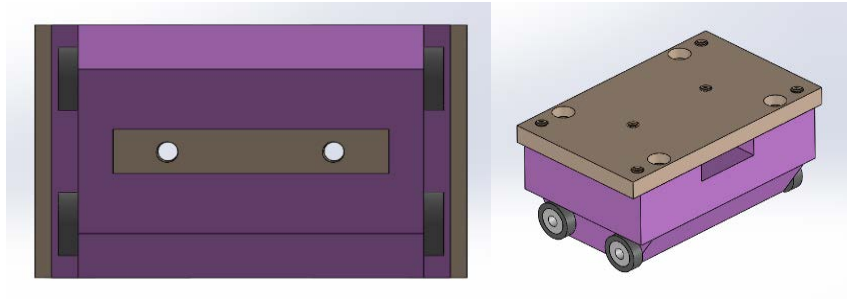


**Fig. 5 -6 Assembly drawing of sensor case inside sensor unit-1**

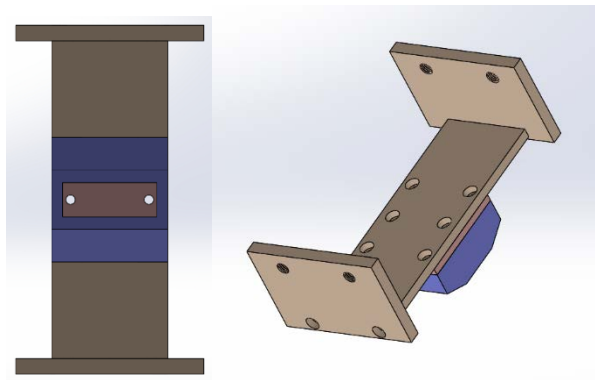


**Fig. 5 -7 Assembly drawing of sensor case inside magnetizer unit-1**





**Fig. 5 -8 Assembly drawing of sensor case inside sensor unit-2**



**Fig. 5 -9 Assembly drawing of sensor case inside magnetizer unit-2**

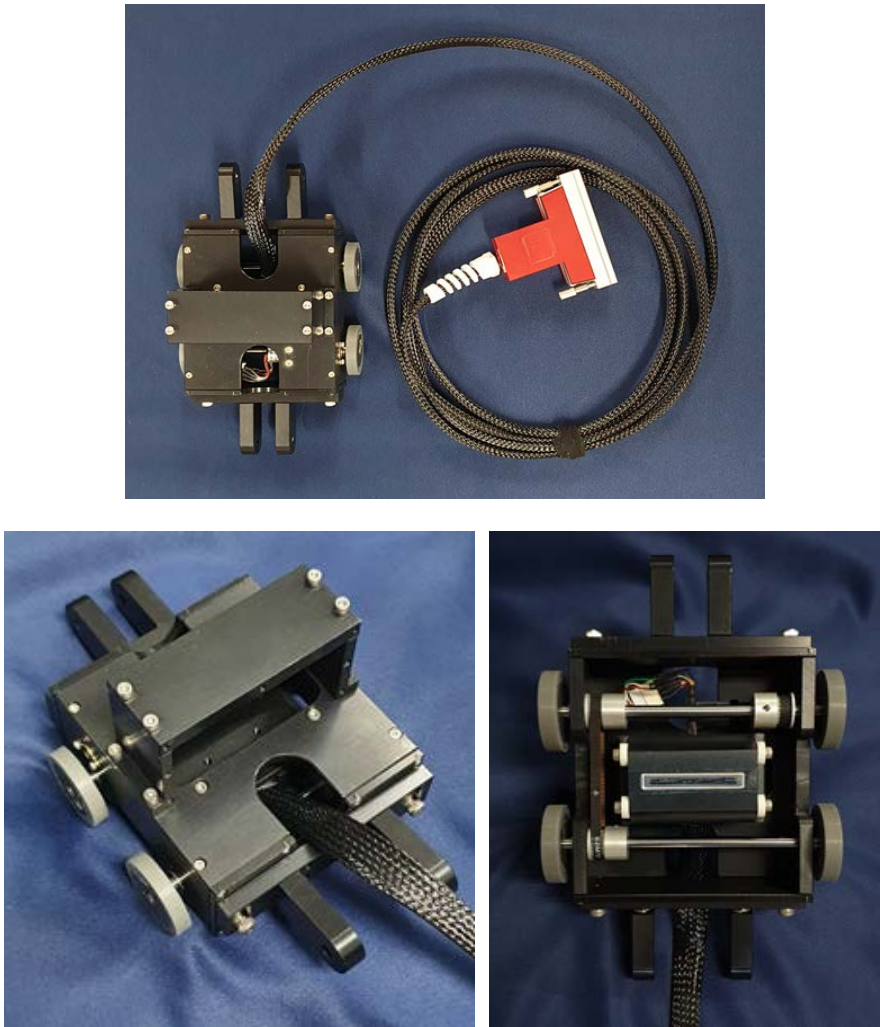
Fig. 5-10은 자화바퀴 사이에 LIGiS 및 코일센서를 장착한 자화기-1, 자화기-2의 시제품을 나타낸다. 바퀴형 자화기는 3kg의 무게를 가지고, 직경 90mm, 자극의 폭 30mm, 자극간 거리 67.6mm이다. 자화기 선단의 노브를 회전시킴으로서 133kg의 자화력을 부여할 수 있다. 자극 사이에 LIGiS와 코일을 장착하였다. 자화력 발생시 배관 용접부를 따라 균일한 리프트오프를 가지고, 회전할 수 있도록 제작하였다.



**Fig. 5 -10 Prototype of magnetizer unit-1 and magnetizer unit-2**

Fig. 5-11은 LIGiS를 장착한 센서부-1 및 센서부-2의 시제품을 나타낸다. 센서의 리프트오프를 유지하기 위한 네 개의 바퀴를 연계한 엔코더를 설치하였다. 이러한 구조는 네 개의 바퀴 중 어느 하나만 모재부에 접촉하더라도 이동 거리를 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 각각의 바퀴는 우레탄으로 둘러싸서 모재부와의 마찰력을 유지할 수 있도록 하였다.

Fig. 5-12는 배관 용접부 검사용 정적 평형 스캐너의 전체 구성을 나타낸다.



**Fig. 5 -11 Prototype of sensor unit-1 and sensor unit-2**



**Fig. 5 -12 Overall configuration of static balancing scanner**

## 제 3 절 소프트웨어

### 1. 스캐너 구동 및 신호 취득 소프트웨어

LabVIEW에 의하여 시제작한 스캐너 구동 및 신호취득 소프트웨어는 Fig. 5-13에 나타낸 바와 같다.

Table 5-1은 신호취득 소프트웨어의 구성과 상세 기능을 나타낸다. 1번은 실시간으로 취득되는 데이터를 2D 그래프로 표현한다. 2번은 3D Surface 그래프를 나타내며, 고속 데이터 취득과 3D 표현을 동시에 진행하면 PC에 많은 부하가 걸리므로 데이터 취득이 끝난 후, 전체 데이터를 일괄적으로 표현하도록 하였다. 3번 히스토리 그래프는 사용자의 선택에 의해 기존 측정된 데이터를 불러와 재측정 데이터와 비교할 수 있다. 4번에 데이터가 저장될 베이스 경로를 지정할 수 있으며, 지정된 경로에 순차적으로 데이터가 csv파일 형태로 자동 저장된다. 5번은 모터(스캐너)의 회전 속도, 이동 거리 및 회전 방향을 제어할 수 있다. 측정 버튼 활성화 시 설정된 값에 맞게 측정, 종료 및 저장이 자동으로 진행되며, 돌발 상황 발생 시 STOP 버튼을 활성화하면 스캐너의 비상 정지가 가능하다. 6번은 cDAQ의 설정 패널이다. Sample mode는 유한측정모드, 연속측정모드 및 하드웨어 타이밍에 의한 단일 포인트 중 선택이 가능하며, 일반적으로 연속측정모드로 사용한다. 입력 터미널 설정은 LabView에서 다양한 모드를 지원하지만 본 시제품에 사용된 cDAQ는 차동모드로만 작동한다. 샘플 속도 설정은 각 채널의 샘플링 속도를 지정할 수 있다. 저사양 DAQ의 경우 최대 샘플링속도/사용하는 센서의 채널 수로 계산하여 설정해야한다. 하지만, 본 시제품에 사용된 cDAQ는 저사양 DAQ와 달리 각 채널당 독립적으로 최대 샘플링 속도를 사용할 수 있으므로, 자기카메라와 같은 다채널 센서의 경우에도 속도 저하 없이 고속으로 데이터 취득이 가능하다. 7번은 모터 컨트롤을 위한 설정패널을 나타낸다. PC와 모터 간 통신 포트 지정 및 펄스 당 거리 값 계산을 위한 세부 설정이 가능하다



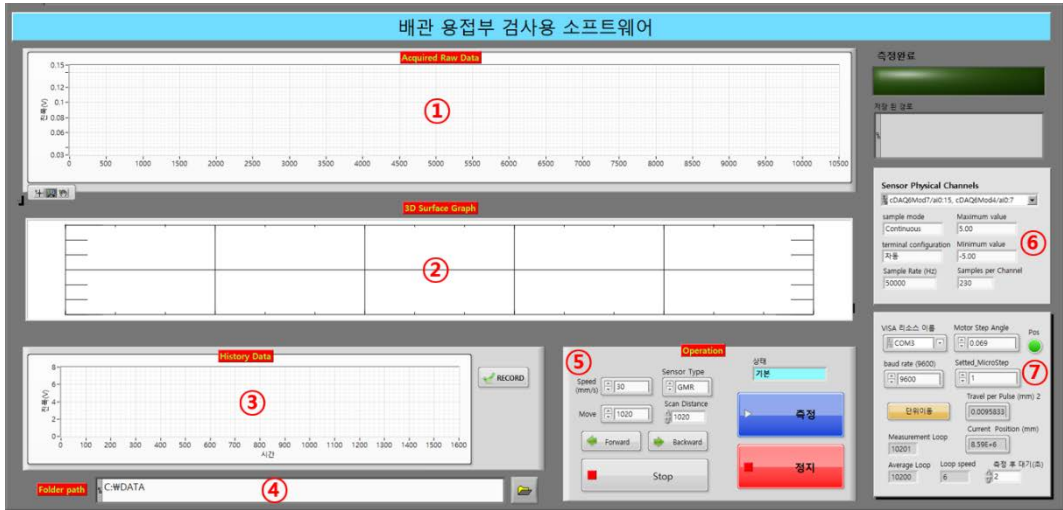


Fig. 5 -13 Measurement and scanner control software

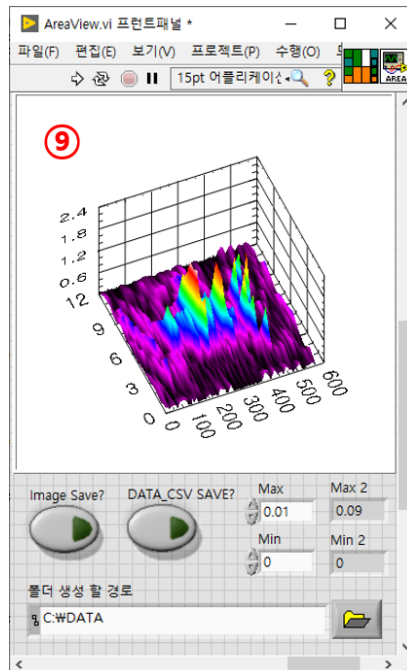
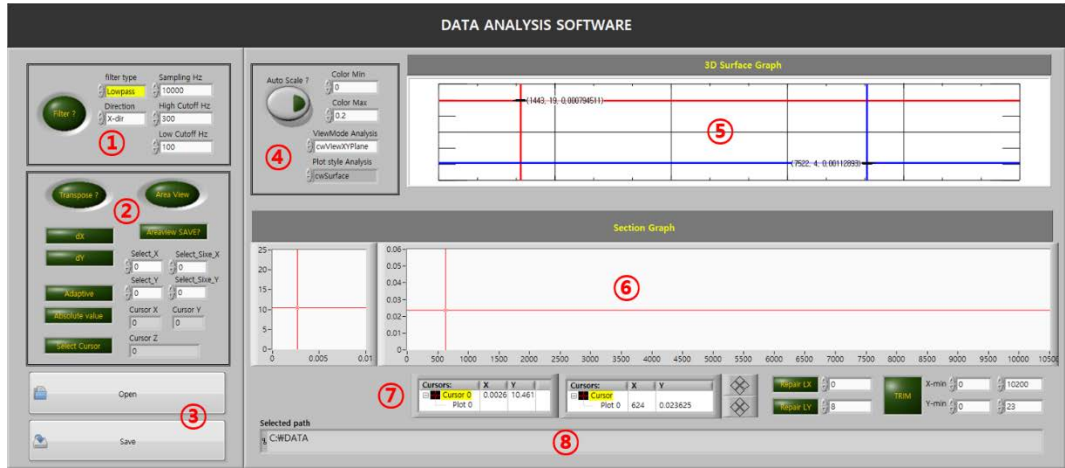
Table 5 -1 Configuration of measurement and scanner control software

①	RawData 그래프	측정 중, RawData 그래프 실시간 출력
②	3D Surface 그래프	측정 완료 후, 측정된 데이터를 3D Surface 그래프로 출력
③	History Data 그래프	기존 데이터 기록 및 현재 데이터와 비교
④	데이터 저장 경로	측정된 데이터를 저장할 경로 설정
⑤	모터(스캐너) 구동 / 측정 시작 및 정지	Speed (mm/s) : 스캐너 회전 속도 설정
		Move : 스캐너의 이동 거리 설정
		Scan Distance : 측정 거리 설정
		Sensor Type : 측정할 센서 타입 선택 (센서별 기존 설정된 셋팅값을 자동 로드)
		Forward : 스캐너 정방향 회전
		Backward : 스캐너 역방향 회전

		상태 : 프로그램의 현재 실행 상태 표시
		측정 : 측정 시작
		정지 : 측정 강제 종료
⑥	DAQ 설정	Sensor Physical Channels : DAQ 내 사용할 Analog Input 채널 설정
		Smample mode : 측정 샘플 모드 설정
		input terminal configuration : 입력터미널 설정
		Sample Rate(Hz) : 각 채널의 샘플링 속도 설정
		Sample per channel : 각 채널이 수집하거나 생성하는 샘플의 개수 설정
		Maximum value : 최대 입력 전압값 설정
		Minimum value : 최소 입력 전압값 설정
⑦	스캐너(모터) 설정	VISA 리소스 이름 : 통신 포트 설정
		Baud rate : 직렬 전송의 변조 속도 설정
		Motor Step Angle / MicroStep : 펄스 당 거리를 설정하기 위한 값 입력

## 2. 신호지시 소프트웨어

상술한 신호취득 소프트웨어를 통하여 취득된 데이터는 Fig. 5-14의 신호지시 소프트웨어를 통해 표현된다.



**Fig. 5 -14 Signal analysis software**



Table 5-2 는 신호지시 소프트웨어의 구성 및 기능을 나타낸다. 1번은 필터에 대한 설정이며, Filter type에서 Lowpass, Highpass, 및 bandpass 필터를 선택할 수 있다. 샘플링 수와 필터 종류에 맞는 차단 주파수를 입력하고 활성화하면 필터가 적용된 데이터를 확인할 수 있다. 2번은 여러 가지 신호처리 및 AreaView에 대한 설정이다. Transpose는 2D 배열로 이루어진 데이터의 행과 열을 전치시킬 수 있다. 다음은 x축 방향 및 y축 방향으로의 미분을 적용하는 기능이다. 다채널 센서를 배열하여 사용하는 경우 각 센서의 출력특성 차이로 인해 Rawdata에서는 결합 신호를 구분하기 곤란하다. 이때 스캔방향으로 미분을 적용하면 바이어스 자기장이 소거되고 결합신호를 추출할 수 있다. Adaptive는 특정 구간 평균값에서 중심값을 차감해주는 방식으로 배경신호를 제거하고, 결합과 같이 급격히 변화하는 신호를 추출한다. 특정구간의 크기는 사용자 임의로 선택 가능하다. Absolute value는 전체 데이터 값을 절대값으로 표현한다. 일반적으로 3D Surface 그래프 내 존재하는 커서는 마우스 드래그를 통하여 조정할 수 있지만, 해석하는 데이터 크기에 따라 세밀한 조정이 곤란할 수 있다. 이때, Select Cursor를 활성화 시, 원하는 좌표값을 입력하면 자동으로 커서가 이동하게 된다. 이를 이용하여, 커서 위치를 기준으로 적용되는 AreaView 영역을 쉽게 지정할 수 있다. 3번은 OPEN 및 SAVE 기능이며, 측정된 데이터 불러오기 및 신호처리한 데이터를 저장할 수 있다. 4번은 3D Surface 그래프에 대한 설정이다. AutoScale을 활성화 시, 불러온 데이터의 최대값과 최소값을 기준으로 Color Scale이 자동 조정된다. ColorScale의 수동 조정은 AutoScale을 비활성화한 후, 원하는 값을 Color Min, Max에 입력하면 5번에 위치한 3D Surface 그래프에 적용 후 출력된다. 6번은 Section 그래프를 나타낸다. 1번 커서(빨간색)의 현재 위치에 해당하는 x축 1라인과 y축 1라인을 그래프에 출력한다. Section 그래프에도 별도의 커서가 존재하며 커서이동을 통해 상세한 데이터값 확인이 가능하다. 7번의 Repair Line은 배열된 센서 중 일부 센서의 고장 및 비정상적으로 낮거나 높은 감도를 띄는 센서로 인한 이상 출력값을 보정하기 위해 이상이 발생한 x축 라인 또는 y축 라인을 보간하는 기능이다. 보간 방식은 설정된 행 또는 열에 인접한 2개의 라인을 더한 후 2

로 나누어 적용한다. TRIM은 설정된 x축 및 y축을 제외한 나머지 영역의 데이터를 삭제한다. 8번 Selected path는 현재 사용자가 불러온 데이터의 경로를 나타낸다. 9번은 앞서 설명한 2번의 AreaView 버튼 활성화 시 나타나는 팝업창이다. 설정된 영역의 데이터는 3D Surface 그래프로 표현되며 사용자가 설정한 영역의 데이터만을 표현하므로 좀 더 명확한 결함 여부 판단이 가능하다. 또한, 현재 출력되고 있는 그래프를 이미지파일 및 csv파일로 저장 가능하다. 저장 경로는 창 하단에 입력한 경로를 따른다.

**Table 5 -2 Configuration of signal analysis software**

①	필터	Filter type : 사용할 필터의 종류 설정
		Direction : 필터를 적용할 데이터 방향 설정
		Sampling Hz : 샘플링 주파수 설정
		High Cut off Hz : 높은 차단 주파수
		Low Cut off Hz : 낮은 차단 주파수
②	신호처리 및 Area View	Transpose : 데이터를 전치 (행,열 변경)
		dx : 데이터를 x방향으로 미분하여 표현
		dy : 데이터를 y방향으로 미분하여 표현
		Adaptive : 특정구간 평균값에서 중심값을 차감하여 데이터 표현
		Absolute value : 데이터 값을 절대값으로 표현
		Select Cursor : 활성화 시, 사용자가 입력한 좌표로 커서 이동

		<p>Area View : 2개의 커서 위치값을 이용하여 선택된 데이터의 일부를 확대하여 표현</p> <p>별도의 팝업창으로 활성화됨 (⑨번 참조)</p>
		Area View Save : 확대된 데이터의 별도 저장
③	데이터 OPEN / SAVE	측정된 데이터를 불러오거나 신호처리가 적용된 데이터를 저장
④	3D Surface 그래프 설정	Auto Scale : 불러온 데이터의 최대값과 최소값을 기준으로 자동으로 스케일 조정
		Color Min : 수동 컬러스케일 설정 시의 최소값
		Color Max : 수동 컬러스케일 설정 시의 최대값
⑤	3D Surface 그래프	불러온 데이터를 3D Surface 그래프로 출력
⑥	Section 그래프	1번 커서(빨간색)의 현재 위치에 해당하는 x축 1라인과 y축 1라인을 그래프로 표현
⑦	Repair Line / TRIM	Repair Line : 설정한 x축 및 y축 라인을 보간
		TRIM : 설정한 영역 외의 데이터를 삭제
⑧	Selected path	현재 불러온 데이터 파일의 경로 표시
⑨	Area View	Image Save : 선택된 영역의 3D Surface 그래프를 이미지 파일로 저장
		Data_csv save : 선택된 영역의 데이터 저장
		Max / Min : 3D Surface 그래프 Color Scale값 설정
		폴더 생성 할 경로 : 이미지 파일 및 csv 파일의 저장 경로 설정

## 제 6 장 결 론

본 논문은 반도체 기반의 자기카메라 기술을 활용하여 탄소강 배관 용접부의 기존 표면검사법(LPE, MPE)의 대체가 가능한 화학물질 무사용 및 검사 시간 단축이 가능한 대체 표면검사기법을 개발하는 것을 최종 목표로 하였다. 이를 위하여 다음과 같은 기술을 개발하고자 하였다.

응력변화에 의한 전자기적 특성 변화를 실험적으로 검증하기 위하여 4점 굽힘 시험시 성분별 자속밀도 분포를 측정하였다. 강자성체인 탄소강(SA106)의 경우에는 외부하중이 부하하지 않은 상태에서도 용접부 근방에서 잔류자화가 측정되었다. 또한, 부하되는 응력이 증대할수록 시험편 표면의 수직방향(By)과 용접선에 수직인 방향 (Bx)의 crown toe에서 큰 자속밀도 변화가 발생한다. 일반적으로 자분탐상, 와전류탐상 및 누설자속탐상에서는 시험편 표면에 수직인 y방향의 성분을 측정하므로, 용접부의 잔류응력 또는 압력에 의한 응력변화는 종래의 비파괴검사 기술에 의하면 결함에 의한 신호 이외에 부가되는 불특정 바이어스 신호가 혼재될 가능성이 다대하다. 따라서, 본 기술개발에서는 자기센서의 선택시 시험편 표면에 수직인 방향의 자속밀도(By)가 아닌 시험편 표면에 수평인 Bx, Bz 성분을 취득하는 반도체 기반 자기센서, GMR 센서를 도입하였다.

상기 대체 표면검사 기술을 반영한 시작품을 제작하기 위하여, 탄소강(SA106) 재질의 배관용접부 시험편을 KEPIC MI(원전가동중검사) MIA 2200 비파괴검사 방법 (2)항과 부록 D를 기준으로 제작하였다. 용접부와 열영향부에 길이 2, 4, 5mm의 여러 가지 방향의 균열형 인공결함을 방전가공에 의하여 도입하였다. 한편, 각 시험편에는 용접부를 가공할 때 발생한 불완전용입(IP)과 기공(porosity)이 발생하였으며, 이를 방사선검사를 이용하여 검출하였다. 또한, 방사선검사, 초음파검사, 와전류검사, 누설자속검사, 잔류자화 및 육안검사를 비교 실험 및 해석하여 활용하였다. 기존의 초음파검사, 와전류검사, 누설자속검사, 육안검사 및 잔류자화 측정에 의하면 IP, porosity, 균열을 모두 검사할 수 있는 단일 수단은 없었다.

강자성체 금속재질의 경우 피검사체를 강력한 자화력으로 자화하고, 결함 주변에서 발생하는 누설자속을 측정한다. 따라서, 재질에 관계없이 배관 용접부 검사를 실시할 때에는 피검사체를 강력하게 자화하기 위한 자화장치가 필요하다. 그러나, 자화력은 코일 권수, 높은 투자율의 코어, 그리고 인가전류에 비례하기 때문에 무겁다. 또한, 무거운 자화기를 금속 배관의 용접부를 따라서 360° 회전시키기 위한 이송수단은 자화기 자체의 중량을 극복해야 하기 때문에 큰 동력을 필요로 한다.

본 논문에서는 정적 평형 원리를 이용하여 비교적 적은 동력으로도 용접부를 따라 360° 회전하며 결함의 형태와 크기 및 분포를 정량적으로 평가할 수 있는 배관 용접부 검사용 정적 평형 스캐너를 개발하였다.

배관 용접부를 대상으로 자기센서에서 측정되는 총 자기장은 국부적인 자화, 리프트오프 변동, 재료 열화, 여자 코일, 결함에 의한 와전류 및 형상변화에 의한 와전류에 의한 효과들의 중첩으로 표시된다. 본 논문에서는 자기카메라의 센서배열들의 스캔 신호가 다변량 신호로 간주될 수 있음에 착안하여 (1) 임베딩, (2) 부분공간행렬 분해, (3) 입력신호의 재구성, (4) 가중상관행렬로 구분하는 단계로 구성되는 다변량 특이 스펙트럼 해석 (MSSA, multivariate singular spectral analysis)법을 개발하였다. MSSA 및 가중상관행렬에 의하여 트렌드, 결함, 용접부 신호로 분해할 수 있었다. 결함 신호는 3차~10차의 고유값으로 추출하였다. 종래의 FFT, Gabor 변환 및 Wavelet 신호해석 방법의 경우, 특정 차단 주파수를 선택해야 하는 반면, MSSA 필터는 비모수적(nonparametric)인 방법을 사용하는 장점이 있다.

측방향 유도면전류용 코일을 배면에 장착한 선형배열 자기센서와 정적 평형 전용스캐너에 의하여 구성되는 시작품에 의하여 실험한 결과, 탄소강 배관 용접부의 경우에는 LIGis 및 여자코일에 20kHz의 주파수를 인가할 때, 최적의 결함 검출 능력을 보였으며, 용접부 및 HAZ부의 측방향 및 원주방향의 길이 2mm 이상인 인공결함을 모두 검출할 수 있었다. 측정 결과는 A-scan과 C-scan으로 지시할 수 있으며, contour로 표현할 수 있다.

또한, 33개의 인공결함(24) 및 자연결함(9)에 대하여, 0.1mm 간격으로 각각 300회 측정하여,  $51 \times 10,200 \times 300 = 156,060,000$ 포인트,  $33 \times 300 = 9,900$  그룹의 데이터를 생성하였다.

생성된 데이터의 약 80%에 해당하는 7,500개의 결함 이미지를 Deep Learning Toolbox (Neural Network Toolbox)가 제공되는 Matlab 기반으로 설계된 인공지능 소프트웨어를 통하여 학습하고 검출 정확도를 판정하였다. 그 결과 82.56%의 정확도로 용접부에 존재하는 축방향, 경사방향, 원주방향, 슬릿형 결함, 열영향부에 존재하는 축방향, 원주방향, 슬릿형 결함과 용접부에 존재하는 용입불량, 기공, 그리고 결함이 없는 용접부, 열영향부 및 경계부를 구분할 수 있었다.

## REFERENCE

- [1] Dong-Hyon Kim, Hie-young Jung, Joo-Yoo Kim, " An Evaluation of Life for Corrosion and Damage of Steel Bridges", Journal of the Institute of Industrial Technology, Vol. 14, pp.103-109, 2006
- [2] 민혁기, 김상범, 김병우, 김형기 and 박률, "산업시설 배관의 섹션화에 의한 노후도 평가", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 28, No.3, pp.123-130, 2016
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Lei, F., Shujun, C., & Shuyan, Y., "Mechanism of undercut phenomenon in high speed welding.", Transactions of the China Welding Institution, Vol. 20, Issue1, 1999
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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

- [9] Park. Yool, Park. Kyung-Soon, “A Study of the Estimation Method for Evaluation Factors of Deterioration of Carbon Steel Pipes by 2D-Contour”, Journal of KIAEBS, Vol.8, No.4, pp. 188~193, 2014
- [10] Lim Joonsun, You Sebok, and Kim Yangso, “Monitoring System based on Bigdata Platform for Safety Management of Road Facilitie”, Journal of KIIT. Vol. 18, No. 11, pp. 139-151, 2020
- [11] 김근옥, 김희춘, 이배화, 전진우 and 김병직, “여수 석유화학단지의 배관관리 시스템에 관한 연구”, Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 7, No. 1, pp. 65~70, 2019
- [12] <https://news.naver.com/main/read.nhn?oid=079&aid=0003187586>
- [13] Richard W. Swayne, “Rules for Inservice Inspection and Tests of Nuclear Power Plant Components”, ASME Code Sec. XI
- [14] Raj, B., Subramanian, C. V., & Jayakumar, T. "Non-destructive testing of welds.", 2000
- [15] <https://draperndt.wordpress.com/tag/dye-penetrant/>
- [16] <https://www.symit.co.kr/sub/business>
- [17] Nagata Junichi, Shirai Tasuku, Tsuru Fusataro, Amako Takeshi, “Development of automatic flaw detection system for magnetic particle indications by the dry powder method”, Mitsubishi Juko Giho, Vol. 23, pp.717-720, 1987
- [18] [http://www.tuv.com/russia/en/magnetic-particle-inspection-\(mpi\)-services.html](http://www.tuv.com/russia/en/magnetic-particle-inspection-(mpi)-services.html)
- [19] Eunho Choe, Jinyi Lee and Hoyong Lee, “Flaw Inspection System for Welded Parts Using a High-Density Flexible Magnetic Sensor Array”, 5th International Conference on Materials and Reliability, 2019
- [20] M.L. Hodgdon, “MATHEMATICAL THEORY AND CALCULATIONS OF MAGNETIC HYSTERESIS CURVES”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 24, No.6, 1988



- [21] Kim, J. M., Jun, J. W., Lee, J. S., & Lee, J. Y., “An application of a magnetic camera for an NDT system for aging aircraft.”, *Journal of the Korean society for nondestructive testing*, 30(3), pp. 212-224, 2010
- [22] Le, M., Jun, J., Kim, J., & Lee, J., “Nondestructive testing of train wheels using differential-type integrated Hall sensor matrixes embedded in train rails.”, *NDT & E International*, 55, pp. 28-35, 2013
- [23] Jung, G., Le, M., Lee, Y. M., Park, S. K., Park, B. M., Kim, J & Lee, J, “Inspection of Welding Discontinuities in Tubular-Type Transmission Towers Using Metal Magnetic Memory.”, *Materials Evaluation*, 76(12), pp. 1662-1669, 2018
- [24] Le, M., Kim, J., Kim, J., Lee, H., & Lee, J., “Signal Analysis of a Bobbin-type Integrated Hall Sensor Array in Electromagnetic Testing for Moisture Separator Reheater Tubes”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 59, pp.1535-1542, 2019
- [25] Sim, S., Lee, H., Lee, H., & Lee, J, “Flaw Classification Algorithm for Heat Exchanger Tubes Using a Bobbin-Type Magnetic Camera”, *Applied Sciences*, 9(23), pp.5000-5010, 2019
- [26] Le, M., Lee, J., Jun, J., Kim, J., Moh, S., & Shin, K, “Hall sensor array based validation of estimation of crack size in metals using magnetic dipole models”, *NDT & E International*, 53(1), pp.18-25, 2013
- [27] 이진이, 심순보, 김세진, “원자력발전소 열교환기 튜브의 비파괴검사를 위한 제 4세대 와전류탐상법” , *한국비파괴검사학회*, 38(4), pp.240-249, 2018
- [28] Kapelevich, Alexander L., and Yuriy V. Shekhtman. "Direct gear design: Bending stress minimization." *Gear technology* 20.5 pp.44-47, 2003
- [29] J Leng, M Xu, M Xu, J Zhang, "Magnetic field variation induced by cyclic bending stress." *NDT & E International* 42.5 pp.410-414, 2009

- [30] Billah, Mohammad Masum, Md Mehedi Hasan, and Jin Jang. "Effect of tensile and compressive bending stress on electrical performance of flexible a-IGZO TFTs." *IEEE Electron Device Letters* 38.7, pp. 890-893, 2017
- [31] Ida, N.; Betzold, K.; Lord, W. Finite element modeling of absolute eddy current probe signals. *J. Nondestruct. Eval*, 3, pp. 147–154, 1982.
- [32] Thomas, J.L. Simplified Modeling of Eddy Current Control of Steam Generator Tubes. Report of Internship, ESA IGELEC; University of Nantes: Nantes, France, 1998.
- [33] Oudni, Z.; Feliachi, M.; Mohellebi, H. Assessment of the probability of failure for EC nondestructive testing based on intrusive spectral stochastic finite element method. *Eur. Phys. J. Appl. Phys*, 2014
- [34] Chen, D.; Shao, K.R.; Lavers, J.D. Very fast numerical analysis of benchmark models of eddy-current testing for steam generator tube. *IEEE Trans. Magn*, 38, pp. 2355–2357, 2002
- [35] Takagi, T.; Hashimoto, M.; Fukutomi, H.; Kurohwa, M.; Miya, K.; Tsuboi, H.; Tanaka, M.; Tani, J.; Serizawa, T.; Harada, Y.; et al. Benchmark models of eddy current testing for steam generator tube: Experiment and numerical analysis. *Int. J. Appl. Electromagn. Mater*, 5, pp. 149–162, 1994
- [36] Takagi, T.; Hashimoto, M.; Sugiura, T.; Norimatsu, S.; Arita, S.; Miya, K. 3D Numerical Simulation of Eddy Current Testing of a Block with a Crack. *Rev. Prog. Nondestr. Eval*, 9, pp. 327–334, 1990
- [37] Korea Electric Association. *MI in Service Inspection of N.P.P*; MIA special ed.; 2005 ed~2009 add; Korea Electric Association: Seoul, Korea, p. 32, 2009
- [38] Le, Minhhuu, Jungmin Kim, Jisoo Kim, Hwasik Do and Jinyi Lee, "Nondestructive testing of moisture separator reheater tubing system using Hall sensor array." *Nondestructive Testing and Evaluation* 33.1 pp. 35-44, 2018

- [39] Jungmin Kim, Minhhuy Le, and Jinyi Lee, "Non-destructive evaluation of far-side corrosion around the multi-layered rivet by using the solid-state hall sensor array." *2014 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. IEEE, 2014.
- [40] Lee, J, Choe, E., Pham, C. T., & Le, M. Measurement of Thinned Water-Cooled Wall in a Circulating Fluidized Bed Boiler Using Ultrasonic and Magnetic Methods. *Applied Sciences*, 11(6), 2498, 2021
- [41] Le, Minhhuy, Jungmin Kim, Dongcheol Yang, Heejung Lee and Jinyi Lee, "Electromagnetic testing of a welding area using a magnetic sensor array." *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 55. S1, pp. 119-124, 2017
- [42] Luong, V. S., Le, M., Nguyen, K. D., Le, D. K., & Lee, J, "Electromagnetic Testing of Moisture Separation Reheater Tube based on Multivariate Singular Spectral Analysis.", *Applied Sciences*, 10(11), 3954, 2020
- [43] Lee H.J.; Cho C.H.; Nam M.W., Eddy current testing of type-439 stainless steel tubing using magnetic saturation technique. *J Mech Sci Technol*, 26(7), 2081–2085, 2012
- [44] Le M.; Kim J.; Kim J.; Do H.S.; and Lee J., Nondestructive testing of moisture separator reheater tubing system using Hall sensor array, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 33(1), pp. 35-44, 2018
- [45] Ramos H.; Postolache O.; Alegria F.; Using the skin effect to estimate cracks depths in metallic structures. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC'09*; IEEE; pp. 1361–1366, 2009
- [46] Lv, H., Jiao, T., Zhang, Y., An, Q., Liu, M., Fulai, L and Wang, J, An adaptive-MSSA-based algorithm for detection of trapped victims using UWB radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(9), pp. 1808-1812, 2015
- [47] Le, Minhhuy, Dang-Khanh Le, and Jinyi Lee. "Multivariate singular spectral analysis for heartbeat extraction in remote sensing of uwb impulse radar." *Sensors and Actuators A: Physical* 306 : 111968, 2020

- [48] Patterson, K., Hassani, H., Heravi, S., & Zhigljavsky, A, “Multivariate singular spectrum analysis for forecasting revisions to real-time data.”, *Journal of Applied Statistics*, 38(10), pp. 2183-2211, 2011
- [49] Griffiths, Peter R., and Limin Shao. "Self-weighted correlation coefficients and their application to measure spectral similarity." *Applied spectroscopy* 63.8, pp. 916-919, 2009
- [50] He, Y. J., Li, M., Zhang, J., & Yao, J. P., Infrared target tracking via weighted correlation filter. *Infrared Physics & Technology*, 73, pp. 103-114, 2015
- [51] Crescini, D., Flammini, A., Marioli, D., & Taroni, A, Application of an FFT-based algorithm to signal processing of LVDT position sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47(5), pp. 1119-1123, 1998
- [52] Gough, Peter T. "A fast spectral estimation algorithm based on the FFT." *IEEE transactions on signal processing* 42.6, pp. 1317-1322, 1994
- [53] Li, Liang-chuan. "A new method of wavelet transform based on FFT for signal processing." *2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems*. IEEE, Vol. 3, pp. 203-206, 2010
- [54] Yao, Jie, Patrick Krolak, and Charlie Steele. "The generalized Gabor transform." *IEEE Transactions on image processing* 4.7, pp. 978-988, 1995
- [55] Wilczok, Elke. "New uncertainty principles for the continuous Gabor transform and the continuous wavelet transform." *Documenta Mathematica* 5, pp. 201-226, 2000
- [56] Zielinski, Tomasz P. "Joint time-frequency resolution of signal analysis using Gabor transform." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 50.5, pp. 1436-1444, 2001
- [57] Pei, Soo-Chang, and Jian-Jiun Ding. "Relations between Gabor transforms and fractional Fourier transforms and their applications for signal processing." *IEEE Transactions on Signal Processing* 55.10, pp. 4839-4850, 2007

- [58] Sifuzzaman, M., M. Rafiq Islam, and M. Z. Ali. "Application of wavelet transform and its advantages compared to Fourier transform.", *Journal of Physical Science*; Vol 13, pp. 121-134, 2009
- [59] Lilly, Jonathan M., and Sofia C. Olhede. "On the analytic wavelet transform." *IEEE transactions on information theory* 56.8, pp. 4135-4156, 2010
- [60] Pan, Q., Zhang, L., Dai, G., & Zhang, H, "Two denoising methods by wavelet transform.", *IEEE transactions on signal processing*, 47(12), pp. 3401-3406, 1999
- [61] Holschneider, M., Kronland-Martinet, R., Morlet, J., & Tchamitchian, P, "A real-time algorithm for signal analysis with the help of the wavelet transform.", In *Wavelets*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp.286-297, 1990
- [62] Kim, Bitna, and Young Ho Park. "Beginner's guide to neural networks for the MNIST dataset using MATLAB." *The Korean Journal of Mathematics* 26.2 (2018): 337-348.
- [63] Deng, Li. "The MNIST database of handwritten digit images for machine learning research [best of the web]." *IEEE Signal Processing Magazine* 29.6, pp.141-142, 2012
- [64] Strik, David PBTB, et al. "Prediction of trace compounds in biogas from anaerobic digestion using the MATLAB Neural Network Toolbox." *Environmental Modelling & Software* 20.6, pp. 803-810, 2005
- [65] Raida, Zbynek. "Modeling EM structures in the neural network toolbox of MATLAB." *IEEE Antennas and propagation Magazine* 44.6, pp. 46-67, 2002
- [66] Ballabio, Davide, and Mahdi Vasighi. "A MATLAB toolbox for Self Organizing Maps and supervised neural network learning strategies." *Chemometrics and intelligent laboratory systems* 118, pp. 24-32, 2012
- [67] <https://machinelearningmastery.com>
- [68] Yao, He Ming, E. I. Wei, and Lijun Jiang, "Two-step enhanced deep learning approach for electromagnetic inverse scattering problems." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 18.11, pp. 2254-2258, 2019

- [69] Park, J. G., Lee, J. Y., Kim, S. H. and Kim, S. R, “Optimal design of passive gravity compensation system for articulated robots.”, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 36(1), pp. 103-108, 2012
- [70] Song, S. W., & Song, J. B, “Development of a 5 DOF Manipulator for Weight Handling based on Counterbalance Mechanism.”, *The Journal of Korea Robotics Society*, 11(4), pp. 242-247, 2016
- [71] Huang, B., Zhao, J., & Sun, L, “Straight walking and stair climbing gait of quadruped robot based on static balance.”, *Robot*, 32(2), pp. 226-232, 2010
- [72] Shin, Dong-Hwan, Jin-Ung An, and Jeon-II Moon. "Estimation of the frictional coefficient of contact point between the terrain and the wheel-legged robot with hip joint actuation." *The Journal of Korea Robotics Society* 6.3, pp. 284-291, 2011
- [73] Jung-Min Kim, Joo-Cheol Do, and Sung-Shin Kim. "Error minimization of angular velocity using encoders and gyro." *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 20.6, pp. 814-819, 2010

## Acknowledgements

처음 연구실에 들어왔을 때가 엇그제 같은데 벌써 많은 시간이 지나 박사 학위 논문을 쓰게 되었습니다. 부족한 저를 여기까지 올 수 있게 해주신 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 언제나 아낌없는 지원과 많은 가르침을 주신 이진이 교수님께 진심으로 존경과 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 매우 바쁘신 와중에도 저의 논문을 심사해주신 고낙용 교수님, 조창현 교수님, 이호용 박사님, 김정민 박사님께도 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 제어계측공학과 모든 교수님들께도 감사드립니다. 교수님들의 올바른 가르침 덕분에 박사 학위라는 좋은 결실을 얻게 되었습니다.

오랜시간 연구실 생활을 함께한 순보, 세진이, 주현이, 다빈이 등 여러 후배들에게도 감사의 말을 전하며, 모두 각자 자기 자리에서 잘 되었으면 좋겠습니다. 좋은 선·후배, 동기들이 함께해서 지금까지 올 수 있었습니다. 다시 한번 모든분들께 감사드립니다.

멀리 떨어져 있지만 아들을 위해 항상 기도해주시고, 응원해주시는 우리 부모님, 희정이, 매제 우리 가족 언제나 고맙고 사랑합니다. 저를 생각해주신 모든 분께 보답하는 마음으로 항상 열심히 하겠습니다. 감사합니다.

2021년 7월  
최 은 호 올림