



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](#)

2021年 8月
博士學位 論文

非磁性體 熱交換器 傳熱管 非破壞檢查
시스템 開發

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

沈 淳 輔

非磁性體 熱交換器 傳熱管 非破壞檢查
시스템 開發

Development of Non-destructive Testing System
for Heat Exchanger Tubes of Paramagnetic Metal

2021年 8月 27日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

沈 淳 輔

非磁性體 熱交換器 傳熱管 非破
壞檢査 시스템 開發

指導教授 李 鎮 伊

이 論文을 工學博士 學位申請 論文으로 提出함






2021年 4月

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

沈 淳 輔

沈淳輔의 博士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校 教授	高樂溶	
委 員	朝鮮大學校 教授	趙昌鉉	
委 員	朝鮮大學校 教授	李鎮伊	
委 員	韓國航空宇宙産業 研究員	李湔容	
委 員	株式會社 로보로 研究員	金正玟	

2021年 6月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT	viii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구 필요성	5
제 3 절 연구목표	8
제 2 장 이론적 배경	9
제 1 절 와전류 검사	9
제 2 절 신호처리기법	11
제 3 절 결합 추정 알고리즘	12
제 3 장 시스템 개발	15
제 1 절 검사 프로브	16
1. 차동형 보빈 코일	16
2. 환형 배열 자기센서	18
제 2 절 원격 전원 및 진폭-위상 신호처리 회로	21
1. 원격 직류 안정화 전원	22
2. 원격 교류 안정화 전원	23
3. 진폭 및 위상 신호처리회로	25
4. 인터페이스	37
제 3 절 소프트웨어	39
제 4 장 실험 및 고찰	41
제 1 절 시험편	42

1. 인공 시험편	42
2. 인출 시험편 (자연결함).....	45
제 2 절 실험장치.....	46
제 3 절 검사장비 성능 평가.....	47
1. 결함 반복 측정 실험	47
2. 스캔속도 영향 평가.....	49
3. 360° 커버리지 성능	51
제 4 절 결함 검출능 평가.....	53
1. 결함 유무 판정	53
2. 결함 형상 판별	66
3. 정량평가	76
4. 인출 시험편(자연결함) 측정 결과.....	78
제 5 장 결론	111
REFERENCE	113
Acknowledgements	118

List of Table

Table 1 -1 High-pressure feedwater heater accident area	4
Table 3 -1 NI-DAQ specifications	38
Table 4 -1 Physical characteristics and sizes of defect specimen #A	42
Table 4 -2 Physical characteristics and sizes of defect specimen #B.....	43
Table 4 -3 Physical characteristics and sizes of defect specimen #C.....	44
Table 4 -4 Natural defect specimens.....	45
Table 4 -5 Error evaluation by repeated defect measurement.....	48
Table 4 -6 Change of maximum value according to inspection speed.....	49
Table 4 -7 Phase changes with specimen #A	54
Table 4 -8 Phase changes with specimen #B	58
Table 4 -9 Phase changes with specimen #C	62
Table 4 -10 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N1	79
Table 4 -11 Comparison of experimental results for specimen N1	81
Table 4 -12 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N2	83
Table 4 -13 Comparison of experimental results for specimen N2.....	84
Table 4 -14 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N3	86
Table 4 -15 Comparison of experimental results for specimen N3.....	87
Table 4 -16 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N4	89
Table 4 -17 Comparison of experimental results for specimen N4.....	97
Table 4 -18 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N5	100
Table 4 -19 Comparison of experimental results for specimen N5.....	101
Table 4 -20 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N6	103
Table 4 -21 Comparison of experimental results for specimen N6.....	107
Table 4 -22 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N7	109
Table 4 -23 Comparison of experimental results for specimen N7.....	110

List of Figures

Fig. 1 -1 Construction of nuclear power plant	2
Fig. 1 -2 An example of a cylindrical shell and tube heat exchanger	3
Fig. 1 -3 Major flaws of heat exchanger tube	5
Fig. 2 -1 Principles of eddy current testing.....	9
Fig. 2 -2 Comparison of Lissajous curve between flaw and dent.....	12
Fig. 2 -3 Comparison of signal rotating direction according to frequency	13
Fig. 2 -4 The flaw classification algorithm.....	14
Fig. 3 -1 Proposed inspection system	15
Fig. 3 -2 Developed probe	17
Fig. 3 -3 GMR Sensors on a flexible PCB.....	18
Fig. 3 -4 Details of GMR sensor array and excitation coil	19
Fig. 3 -5 Principle of excitation current and induced time-varying magnetic field	20
Fig. 3 -6 Configuration of controller	21
Fig. 3 -7 DC power supplier and amplifiers	22
Fig. 3 -8 AC power generation unit	23
Fig. 3 -9 Triple waveforms	24
Fig. 3 -10 Power amplifiers	24
Fig. 3 -11 Frequency input and output signal, and its comparison with (a) 0° phase , and (b) 90° phase square wave	25
Fig. 3 -12 Multiplying Output with (a) 0° phase, and (b) 90° phase square wave	28
Fig. 3 -13 Integral of each outputs after (a) 0° phase, and (b) 90° phase multiplying.....	29
Fig. 3 -14 Block diagram of the signal processing circuit	31
Fig. 3 -15 High pass filter circuit.....	32
Fig. 3 -16 Block diagram and amplitude gain of programmable amplifier	33
Fig. 3 -17 Verification of gain of programmable amplifier.....	34
Fig. 3 -18 Experimental results after multiplying 0° and 90° phase square pulse	35
Fig. 3 -19 Amplitude and phase signal processing board	36
Fig. 3 -20 Data collection device.....	37
Fig. 3 -21 Measurement software	39
Fig. 3 -22 Analysis software	40
Fig. 4 -1 Specimen #A	42
Fig. 4 -2 Specimen #B	43
Fig. 4 -3 Specimen #C	44
Fig. 4 -4 Natural flaw specimens.....	45
Fig. 4 -5 Experimental setup.....	46
Fig. 4 -6 Experimental result of repetition.....	48
Fig. 4 -7 Effect of scanning speed	50
Fig. 4 -8 Raw data for evaluating coverage performance	52
Fig. 4 -9 360° coverage performance.....	52

Fig. 4 -10 Lissajous curve with specimen #A (1/2)	55
Fig. 4 -11 Lissajous curve with specimen #A (2/2)	56
Fig. 4 -12 Lissajous curve with specimen #B (1/2)	60
Fig. 4 -13 Lissajous curve with specimen #B (2/2)	60
Fig. 4 -14 Lissajous curve with specimen #C (1/3)	63
Fig. 4 -15 Lissajous curve with specimen #C (2/3)	64
Fig. 4 -16 Lissajous curve with specimen #C (3/3)	65
Fig. 4 -17 Continuous magnetic images with specimen #A	67
Fig. 4 -18 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #A	68
Fig. 4 -19 Continuous magnetic images with specimen #B	70
Fig. 4 -20 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #B	71
Fig. 4 -21 Continuous magnetic images with specimen #C	73
Fig. 4 -22 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #C	75
Fig. 4 -23 Phase angle change according to defect depth: relationship between depth and phase	76
Fig. 4 -24 Phase angle change according to the flaw depth: Quantitative analysis of depth	77
Fig. 4 -25 Continuous ECT signals with specimen N1	78
Fig. 4 -26 Lissajous curve with specimen N1	79
Fig. 4 -27 Continuous magnetic images with specimen #N1	80
Fig. 4 -28 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N1	80
Fig. 4 -29 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N1	81
Fig. 4 -30 Continuous ECT signals with specimen N2	82
Fig. 4 -31 Lissajous curve with specimen N2	82
Fig. 4 -32 Continuous magnetic images with specimen #N2	83
Fig. 4 -33 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N2 (50kHz)	84
Fig. 4 -34 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N2	84
Fig. 4 -35 Continuous ECT signals with specimen N3	85
Fig. 4 -36 Lissajous curve with specimen N3	86
Fig. 4 -37 Continuous magnetic images with specimen #N3	86
Fig. 4 -38 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N3	87
Fig. 4 -39 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N3	87
Fig. 4 -40 Continuous ECT signals with specimen N4	88
Fig. 4 -41 Lissajous curve with specimen N4 (1/3)	90
Fig. 4 -42 Lissajous curve with specimen N4 (2/3)	91
Fig. 4 -43 Lissajous curve with specimen N4 (3/3)	92
Fig. 4 -44 Continuous magnetic images with specimen #N4	93
Fig. 4 -45 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N4 (1/3)	94
Fig. 4 -46 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N4 (2/3)	95
Fig. 4 -47 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N4 (3/3)	96
Fig. 4 -48 Continuous ECT signals with specimen N5	98
Fig. 4 -49 Lissajous curve with specimen N5	99
Fig. 4 -50 Continuous magnetic images with specimen #N5	100

Fig. 4 -51 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N5.....	101
Fig. 4 -52 Continuous ECT signals with specimen N6.....	102
Fig. 4 -53 Lissajous curve with specimen N6.....	103
Fig. 4 -54 Continuous magnetic images with specimen #N6	104
Fig. 4 -55 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N6 (1/4).....	104
Fig. 4 -56 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N6 (2/4).....	105
Fig. 4 -57 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N6 (3/4).....	106
Fig. 4 -58 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N6 (4/4).....	107
Fig. 4 -59 Continuous ECT signals with specimen N7.....	108
Fig. 4 -60 Lissajous curve with specimen N7.....	108
Fig. 4 -61 Continuous magnetic images with specimen #N7	109
Fig. 4 -62 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N7 (1/2).....	109
Fig. 4 -63 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N7 (2/2).....	110

Nomenclature

AC	Alternating current
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BIGiS	Bobbin-type Integrated GMR sensor Array
DAQ	Data acquisition device
DC	Direct current
ECT	Eddy current testing
GMR	Giant Magnetoresistive
HPF	High pass filter
IC	Integrated circuit
MR	Magnetoresistive
PCB	Printed circuit board
PEEK	Polyether ether ketone
SCC	Stress Corrosion Cracking
SMPS	Switched Mode Power Supply
V_G	GMR sensor output voltage
V_{AVR}	Average width of sensor signal
Z	Coil impedance

ABSTRACT

Development of Non-destructive Testing System for Heat Exchanger Tubes of Paramagnetic Metal

Sim Sunbo

Advisor: Prof. Jinyi Lee, Ph.D.

Dept. of Control and Instrumentation Eng.

Graduate School of Chosun University

A heat exchanger is one of the key components in petrochemical plants, district heating, and thermal and nuclear power plants. In the heat exchanger, heat energy is transferred from a high-temperature medium to a low-temperature medium through a heat exchanger tube, which is a metallic separator. The heat exchanger tube used in high-temperature and water chemistry environments, such as high-pressure feedwater heaters in nuclear power plants, which are made of austenitic stainless steels (STS304), a non-magnetic material. Despite the use of heat- and corrosion-resistant material, the high temperatures, high pressures, and vibrations in such environments may lead to flaws. As an indicative example, between 1976 and 1996, out of a total of 166 failure records of the main body of feedwater heaters and internal equipment, 144 cases included a failure due to leaks in the heat exchanger tube; thus, 87% of the total cases involved failures. This indicates that the primary-side and secondary-side media separated by the metallic separator are not mixed, which precludes the inherent function of the heat exchanger tube, i.e., exchange of heat with high efficiency. In order to prevent this problem, a quantitative evaluation of the presence of flaws in the tube as well as the shapes of the flaws should be performed through periodic inspection. In the conventional method of eddy current testing (ECT), a bobbin probe and motorized rotating pancake coil (MRPC) are used to detect the presence of flaws and examine the shapes of the flaws. However, the bobbin probe has limitations in that it cannot

distinguish between cracks and volumetric flaws, which poses a challenge in detecting crack-like flaws in the circumferential direction. On the other hand, with MRPC, the probe, driven by a motor, rotates at 900 rpm, and the eddy current distributions in the inner and outer walls of the tube are quantitatively evaluated. However, MRPC also has operational limitations in that the scanning speed is very low, i.e., 0.5 inches/s, the on-site installation of the inspection system is not straightforward, and the signal analysis process is complicated. In addition, since the inner wall of the tube and the probe are in direct contact, the service life of the probe is short due to wear, and the cost of the probe, including the rotating mechanism, is high. Therefore, when MRPC is used to inspect all the heat exchanger tubes at a power plant, the downtime of the plant for nondestructive testing needs to be prolonged, which leads to a major disruption in the power supply. As a result, the use of MRPC is limited to critical parts, such as steam generator tubes, and is not suitable for general non-magnetic tubes.

In this regard, to overcome the limitations associated with quantitative evaluation of ECT using the bobbin probe and to consider the field requirements in terms of scanning speed and the service life of ECT with MRPC, this study aims to develop a magnetic camera for nondestructive testing of non-magnetic heat exchanger tubes.

The magnetic camera includes a differential bobbin coil and an encircling array magnetic sensor. The differential bobbin coil applies an induced current to the inner wall of the tube and measures the impedance and phase difference according to the presence, type, and size of flaws. Then, the flaw information included in the time-varying magnetic field induced by the exciting coil is measured by the semiconductor-based magnetic sensor with an encircling array. The amplitude and phase difference distribution of the time-varying magnetic field measured by the magnetic sensor array contains information on the shape and size of the flaws as well as information for detecting the presence of flaws. To implement this mechanism, exciting coils, magnetic sensor arrays, a remote DC and AC-stabilized power supply, and parallel multi-channel amplitude-phase signal processing circuits were developed. In addition, dedicated software for

the proposed system was developed.

To test the developed magnetic camera, an artificial tube specimen made of non-magnetic material (STS304) was fabricated. Each test specimen was processed by simulating flaws commonly detected in feedwater heaters, e.g., slits and wears of various shapes that can be formed due to corrosion, erosion, and vibration. In addition, by simultaneously using both the differential bobbin coil and the encircling array magnetic sensor, the presence, locations, and shapes of the flaws were determined, and the depths of the flaws were quantitatively measured.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

화력 및 원자력 발전소와 석유화학플랜트 등과 같은 대형 인프라는 막대한 인적, 경제적, 시간적 투자를 통하여 구축된다. 따라서, 높은 열에너지와 수화학 반응을 극복하면서 장시간 운영함에 따라 발생하는 기구적 손상이 파손에 이르지 않도록 유지보수하면서 설계수명까지 안정적으로 운용되어야 한다. 한편, 근래에는 설계 당시에 기대하였던 구조물의 신뢰성이 확보되고, 운용상의 경제성이 유지된다면 설계수명이 경과하더라도 지속적인 사용이 가능한 손상허용공학적 측면이 강조되고 있다. 이러한 설계수명까지의 안정적 사용과 손상허용공학적 측면에서의 지속적인 사용에 중요한 선결 요건 중 하나가 구조물과 구성품에 발생하는 손상의 유무, 위치, 그리고 크기를 정량적으로 파악하기 위한 비파괴검사 및 평가 기술이다.

본 연구는 대형기기 구조물 중 특히 열교환기 전열관의 비파괴검사에 관한 것이다. 본 장에서는 먼저 열교환기의 역할, 종류, 그리고 본 연구에서 적용하고자 하는 열교환기와 재질, 현재의 문제점과 이를 극복하기 위하여 본 연구에서 제안하는 방법을 개략적으로 설명한다.

열교환기(heat exchanger)는 석유화학플랜트, 지역난방, 화력 및 원자력 발전설비 등의 중요한 구성 요소 중 하나로서, 열에너지를 매질을 통하여 전달하는 수단이다. 한 예로 지역난방설비는 도시 근교의 열병합발전소에서 전력생산에 활용된 폐열(1차측 매질)을 열수송관을 통하여 빌딩, 공장 및 주거지역에 전송한다. 이후, 각 건물에 설치된 열교환기를 통하여 2차측 매질에 열에너지를 전달한 후, 열병합발전소에 회수한다. 그리고, 각 건물에서 사용되는 난방 및 온수(2차측 매질)는 얇은 금속 격막으로 1차측 매질과는 분리된다. 또 다른 예로 Fig.1-1에 나타낸 바와 같은 원자력발전설비에서는 증기발생기, 가압기, 습분분리재열기, 급수가열기, 복수기와 같은 다양한 열교환기가 사용된다. 원자로에서 핵반응을 통하여 얻어진 열에너지가 1차

측 매질을 가열하고, 증기발생기(steam generator)에서 2차측 매질을 고온, 고압의 증기로 변환시킨다. 이러한 2차측 매질은 터빈에 분사되어 전력을 생산하는데 활용된다. 이러한 열교환기에 의하면, 온도가 높은 1차측의 매질이 가지고 있는 열에너지를 금속성 경계막을 통하여 2차측 매질에 전달한다. 즉, 금속성 경계막을 통하여 열전달이 이루어지며, 결과적으로 1차측 매질과 2차측 매질이 서로 섞이지 않은 상태에서 에너지를 전달할 수 있다. 일반적으로 1차측 매질은 내부식성 유체를 포함하고, 일부 오염된 상태에서 재활용된다. 그리고, 2차측 매질은 가정용 온수로 활용되거나, 터빈에 직접 분사되어 발전에 활용된다. 따라서, 1차측 매질과 2차측 매질은 서로 섞이지 않으면서, 높은 효율로 열교환이 이루어져야 할 필요가 있다.

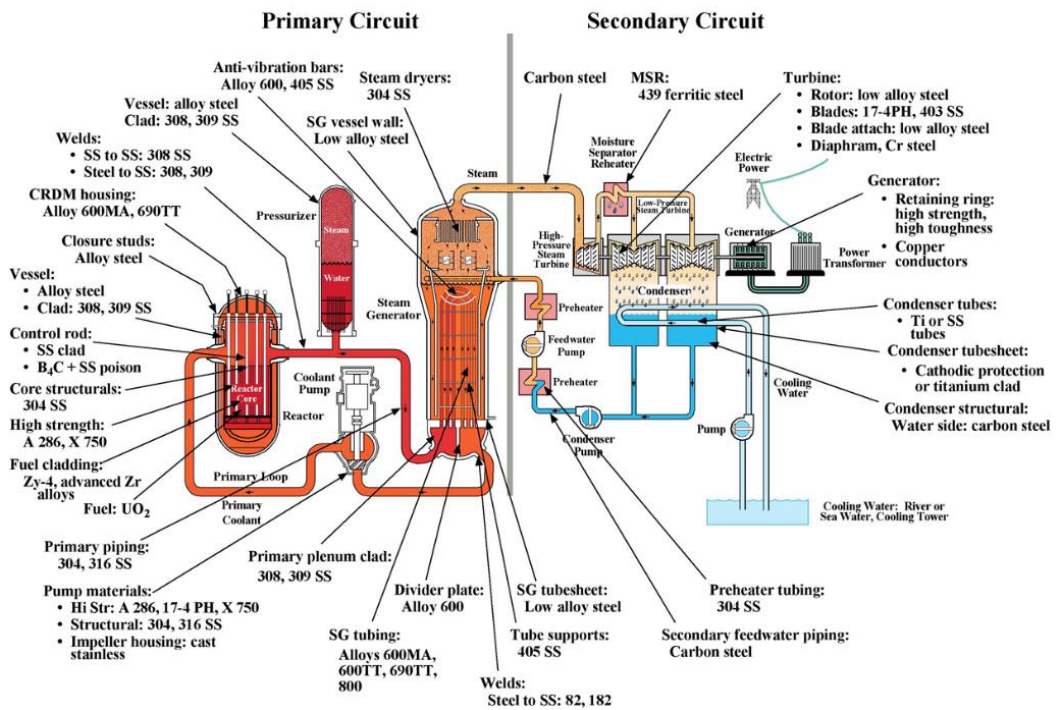


Fig. 1 -1 Construction of nuclear power plant [1]

본 연구에서는 열전달 면적이 넓어서 열전달 효율이 높고, 신뢰성이 뛰어난 셸·튜브형 열교환기(shell & tube type heat exchanger)를 적용 대상으로 한다. 한 예로, Fig.1-2에 나타낸 바와 같은 원자력발전설비의 급수가열기는 급수(전열관측)를 가열하기 위해 추기증기를 사용하며, 저압(LP)가열기와 고압(HP)가열기로 구성된다. 저압가열기는 급수펌프의 흡입구 측에 위치하고 복수기의 물이 급수펌프로 들어가기 전에 복수기 집수정으로부터 응축수를 가열하기 위해 사용된다. 고압가열기는 급수펌프의 출구 측에 위치하고 저압가열기로부터 급수가 증기발생기로 들어가기 전에 급수를 더 높은 온도로 가열하기 위해 사용된다. 추기 증기계통은 응축수와 급수를 예열하여 발전소 열사이클의 종합효율을 개선하기 위해 저압터빈과 고압터빈의 여러 지점으로부터 증기를 빼낸다. 고압가열기로부터 배수된 응축수는 저압터빈으로부터 추기된 증기와 함께 저압가열기의 급수를 가열하기 위해 사용된다. 보통 저압 급수가열기는 복수기의 목부분(터빈 하부)에 위치한다.

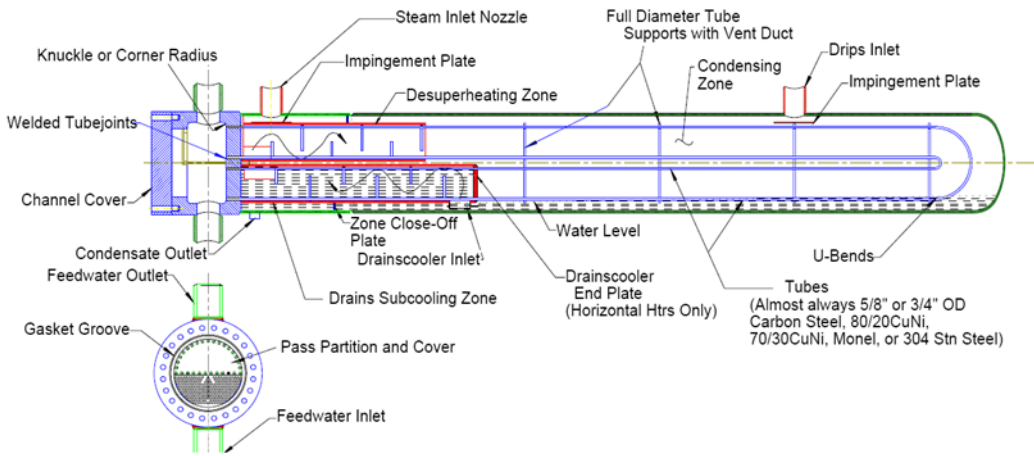


Fig. 1 -2 An example of a cylindrical shell and tube heat exchanger [2]

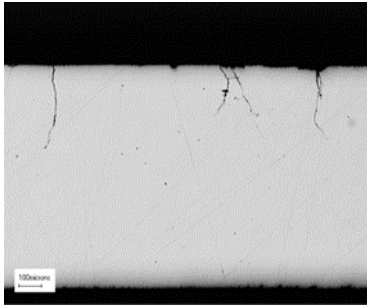
Table 1-1은 원통 다관식 열교환기의 하나인 고압급수가열기의 손상 사례를 보여준다. 급수가열기 동체와 내부기기에서 1976년부터 1996년 사이에 발생한 고장기록 총 166건 중, 전열관의 누설이 144건으로서 전체의 87%에 달한다. 이는 1차측 매질과 2차측 매질은 서로 섞이지 않으면서, 높은 효율로 열교환이 이루어져야 하는 열교환기의 기능을 상실함을 의미한다.

Table 1-1 High-pressure feedwater heater accident area [2]

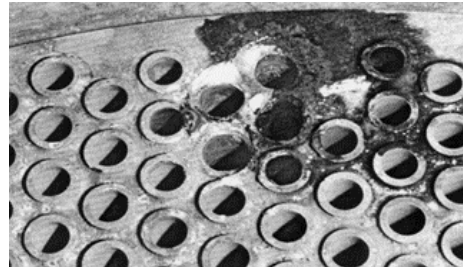
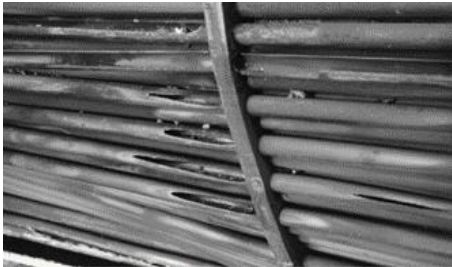
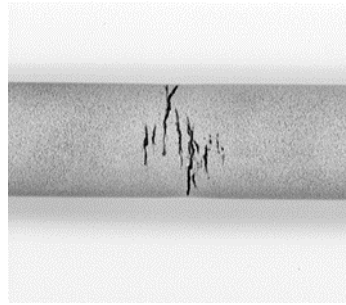
• 전열관 누설	144 건 (87%)
• 맨웨이 커버	11 건 (6%)
• Partition plate	4 건 (2%)
• 다이어프램	3 건 (2%)
• 출구측 노즐	2 건 (1%)
• 검사공(Inspection port)	1 건 (<1%)
• 충돌 배플	1 건 (<1%)

제 2 절 연구 필요성

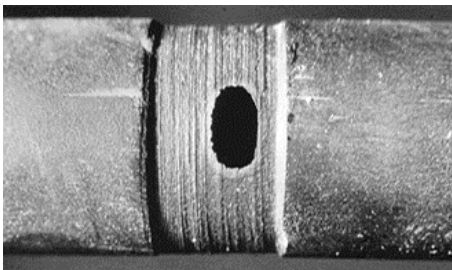
급수가열기 전열관은 강도와 함께 내열성과 내부식성이 요구되는 바, 비자성체인 오스테나이트계스테인레스강인 STS 304가 사용되고 있다. 전술한 급수가열기에서 가장 일반적으로 발생할 수 있는 주요 손상원인은 Fig.1-3에 나타낸 바와 같은 부식(corrosion), 침식(erosion) 및 진동(vibration) 이다[2-4].



(a) Corrosion



(b) Erosion



(c) Vibration

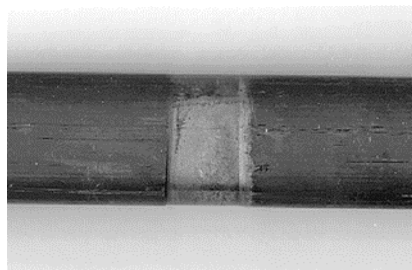


Fig. 1 -3 Major flaws of heat exchanger tube[2]

첫번째 손상 원인인 부식에 의하여 발생하는 결함의 유형은 응력부식균열(SCC, stress corrosion cracking)이다. SCC는 대부분 장기간의 운전기간 동안 전열관 외면에 축적된 극소량의 염소에 의해 발생한다. 전열관 외면의 상대적으로 높은 증기속도, 전열관 벽온도 및 발전소 운전시간에 따라 전열관 외면에 오염이 발생한다. 두번째 손상 원인인 침식은 전열관 입구측(tube inlet) 침식, 관판(tubesheet) 침식, 그리고, 충돌(impingement) 침식이다. 그리고, 마지막 손상 원인인 진동은 소성 전열관과 셸측의 유동유체에 의해 가해지는 변동력과 상호작용에 의해 유발된다. 그리고, 전열관 진동에 의해 발생할 수 있는 전열관 손상형태는 프레팅(fretting), 충돌(collision), 균열(cracking) 등이다.

이러한, 균열성 결함 및 체적성 결함을 검출하여 열교환기 전열관의 건전성을 확인하기 위한 비파괴검사법으로 와전류탐상검사(ECT, eddy current testing)이 사용된다[5-7]. ECT는 발전소 계획예방정비기간 동안 보빈형 탐촉자(bobbin probe)를 사용하여 주기적으로 수행하고 있으며, 검사결과에 따라 관두께 정비기준을 초과한 전열관에 대해 관막음 정비를 수행하고 있다. 그러나 보빈형 탐촉자를 사용한 ECT로 건전성을 확인한 후 발전소가 재가동되었음에도 불구하고, 운전 중에 가열기 전열관에서 예상치 못한 누설과 같은 비정상 운전상황이 발생됨에 따라 규제기관에서 검사에 대한 규제를 강화하고 있다. 이에 보빈형 탐촉자에서 검출된 이상지시에 대해 별도의 3차 평가 및 증기발생기 검사에 준하는 회전형 탐촉자(MRPC, motorized rotating pancake coil)를 이용한 ECT를 적용한 확인 검사를 요구하고 있으며, 확인이 어려울 경우 보수적으로 접근하여 전열관 정비를 요구하고 있다[8-9].

하지만 현재 2차측 열교환기 전열관 건전성평가를 위한 주요 검사기법으로 사용되고 있는 보빈형 탐촉자는 검사속도가 고속(40inch/sec)으로서 짧은 기간 동안에 많은 수량의 전열관 검사가 가능하고 체적성 결함을 포함한 다양한 형태의 결함을 용이하게 검출할 수 있지만, 검출된 결함에 대한 판별(균열과 체적성 결함 구분 및 크기측정)이 및 원주방향 균열의 검출감도가 미흡하여 균열성 결함이 체적성 결함으로 잘못 평가 될 수 있다.

한편, 회전형 탐촉자는 탐촉자 헤드 후방에 설치된 모터에 의해 900rpm으로 회전하면서 0.5inch/sec의 느린 속도로 전열관 내면을 헬리컬 스캔하여 보빈탐촉자의 이상지시를 판별하는데 사용되고 있다. 하지만, 검사속도가 매우 느리고 검사장비의 현장 설치와 신호분석이 복잡하여 발전소 계획예방 공기에 영향을 미칠 수 있다. 또한 탐촉자 사용수명이 짧고 고가인 단점을 가지고 있다.

한편, 팬케익형 코일센서를 원주 방향으로 배열하고, 전열관의 축 방향으로 스캔하는 환형 배열 ECT 시스템(이하, X- probe)은 고속 검사 및 정량 평가를 위하여 개발되었다[10-14]. 그러나 배열형 코일센서를 동시에 활성화하면 인접한 코일 사이에 전자기적 간섭이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 코일 사이의 간격을 늘리거나, 센서를 교차하여 활성화할 필요가 있다. 결과적으로 공간분해능 또는 검사 속도의 저하가 우려된다.

보빈형 탐촉자에 의하여 검출된 결함의 판별이 필요하여 추가적으로 회전형 탐촉자를 현장에 적용하기 위해서는 현재 사용하고 있는 보빈형 탐촉자 검사시스템과는 별도로 회전형 탐촉자를 구동하고, 신호를 수집하기 위한 고가의 복잡한 검사시스템을 현장에 설치하는 것이 필요하다. 따라서 회전형 탐촉자의 이러한 단점을 보완하여 검출된 결함의 판별을 위한 고신뢰도 검사시스템의 개발이 필요하다.

본 연구실에서는 자기소스(magnetic source), 배열형 자기센서, 신호처리회로, 인터페이스, 컴퓨터로 구성된 자기카메라를 개발하였다[15-21]. 자기소스의 경우 DC형과 AC형으로 분류되며, 투자율이 높은 강자성체 금속의 결함을 검출할 때에는 DC형 자원을 인가한다[22]. 반면에 상자성체 금속의 경우에는 도전율을 고려하여 AC형 자원을 인가한다[23]. 피측정체에 자원을 인가하면, 결함의 존재 및 크기에 따라 결함 주변에서 전자기장의 분포가 왜곡된다. 따라서, 자기센서를 이용하여 왜곡된 전자기장의 분포를 측정하면 결함의 크기 및 위치를 추정할 수 있다. 자기센서는 GMR센서, MR센서, Hall센서 및 코일이 사용될 수 있다[24-26]. 또한, 공간분해능 향상을 위하여 자기센서를 선형, 보빈형, 면적형 및 원통형으로 배열하는 방법이 개발되어 왔다[27-30].

제 3 절 연구목표

본 연구는 상술한 보빈형 탐촉자를 적용한 ECT의 정량 평가 측면에서의 한계를 극복하고, 회전형 탐촉자를 적용한 ECT의 검사 속도와 사용 수명에 대한 현장의 요구 사항을 반영하기 위한 열교환기 전열관 비파괴검사용 자기카메라를 개발하는 것을 목표로 하였다. 자기카메라는 두 세트의 보빈형 코일을 포함한다. 먼저 첫번째 보빈형 코일에 의하여 전열관 내벽에 유도전류를 인가하고, 결함의 유무, 종류, 크기에 따른 임피던스 및 위상차를 측정한다. 그리고, 두번째 보빈형 코일에 의하여 전열관에 시변자계(time-varying magnetic field)를 유도하고, 결함에 의하여 왜곡된 전자기장의 분포를 환형으로 배열한 반도체 기반 자기센서에 의하여 측정한다. 자기센서 배열에 의하여 측정한 시변자계의 진폭과 위상차 분포는 결함의 유무 뿐 아니라 형상 및 크기에 관한 정보를 포함한다. 이러한 원리를 구현하기 위하여, 여자코일, 자기센서배열, 원격신호처리회로 및 전용 소프트웨어를 개발하였다. 또한, 전술한 급수가열기 전열관을 모사한 STS304 재질의 튜브에 부식, 침식, 진동에 의하여 발생할 수 있는 슬릿, 마모, 공식을 모사한 인공 결함을 도입하였다. 이러한 인공 결함 시험편을 이용하여 개발한 자기카메라의 성능을 검증하였다.

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 제 1장은 서론이다. 제 2장은 이론적 배경의 와전류검사와 신호처리기법 및 결함 추정 알고리즘에 대해 설명한다. 제 3장은 본 연구를 통하여 제안된 검사 프로브, 진폭 및 위상 신호처리회로, 원격 직류.교류 안정화전원을 설명한다. 제 4장에서는 개발된 시스템의 성능평가 및 인공 시험편과 자연 결함 시험편의 실험결과 및 정량평가 결과를 설명한다. 제 5장은 결론이다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 와전류 검사

와전류탐상검사(ECT, eddy current testing)는 대상 시험체에 와전류를 유도하여, 재료의 불연속 부분에 대한 임피던스 변화를 측정하고 시험체의 상태를 분석하는 비파괴검사 기술이다. 따라서, 전기전 변화 및 자기적 변화에 의한 금속 특성을 측정하는데 사용될 수 있다. 검사 시 탐촉자가 시험체에 접촉이 되지 않고 고속으로 검사가 가능하기 때문에 주변 운전 환경에 방해 받지 않으며, 방사능 피폭 등과 같이 위대한 환경의 원자력 발전소의 비파괴검사에 널리 적용되고 있다. 또한, 와전류 흐름에 영향을 미치는 두께, 곡률, 탐촉자와 재료간 거리 등의 기하학적 영향을 측정할 수 있다[31-32].

Fig. 2-1은 ECT의 원리를 나타낸다. 코일에 교류전류를 인가하게 되면 전류가 흐르는 수직 방향으로 교류자기장(1차 자기장)이 발생한다. 이때, 도체를 관통하는 교류자기장에 의한 기전력(2차 자기장)이 발생한다. 이러한 전자기 유도현상에 의하여 도체에 형성된 전류를 와전류라고 한다. 이때, 불연속부의 존재 유무 및 크기에 기인한 코일의 임피던스 변화를 측정함으로써 결함을 검출하고, 평가한다[33-35].

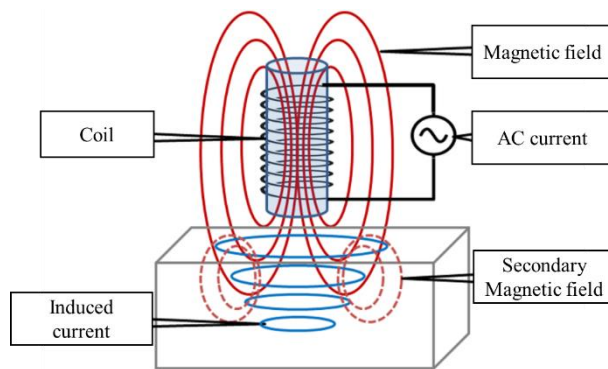


Fig. 2 -1 Principles of eddy current testing

본 소속 연구실에서는 ECT의 대체기술로 교류형 자기카메라와 와전류를 이용한 비파검사법을 제안하였다[36-37]. 본 연구에서도 동일한 원리를 사용하였다.

코일을 이용하여 전자기 유도 현상을 이용한 와전류검사법이다. 자기장을 이용한 자기장 변화를 자기센서를 이용하여 왜곡된 부위를 측정하는 것이다. 이러한 자기장의 변화는 코일의 임피던스를 변화시키고, 변화된 임피던스를 측정하여 피측정체의 재질, 형상, 결함의 유무를 평가한다. 보빈 코일에 의하여 1차 시변자계를 인가하면, 전도성인 소구경 배관에는 유도전류 및 2차 시변자계가 발생한다. 이때 발생하는 2차 시변자계는 저항(R, resistance), 인덕턴스(L, inductance), 캐패시턴스(C, capacitance) 성분을 포함하고 있어, 결함 존재, 크기 및 위치에 따라 진폭 뿐 아니라 위상차도 발생한다.

한편, 코일에 의하여 발생하는 기전력은 식 (1)의 Faraday-Lenz의 법칙에 의하여 표현할 수 있다. 즉,

$$V_{emf} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = -N \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

여기에서, N , Φ , $d\vec{B}/dt$, s 는 각각 코일의 권수, 코일을 통과하는 총자속, 시변자속밀도, 코일의 면적을 나타낸다. 즉, 많은 수의 권수, 높은 주파수 및 넓은 코일 면적에 의하여 보다 큰 신호를 얻을 수 있어, 결과적으로 결함검출능이 향상된다. 하지만, 고속으로 와전류분포를 측정하는 X-probe에 의하면 센서의 조밀한 배열이 필수적이므로, 권수 및 코일면적은 센서의 공간분해능을 저하시키는 원인이 된다.

제 2 절 신호처리기법

경향제거 해석 신호처리는 원 데이터를 보존하면서 결함 정보를 명확하게 할 수 있는 신호처리기법 중 하나이다. 식 (2)을 통하여 원 데이터를 이동평균하고, 식 (3)와 같이 원신호와의 차를 구한다. 이러한 경향제거 신호처리는 저대역통과 필터의 기능과 함께 고주파수 잡음을 제거하면서 원 데이터의 경향을 그대로 반영하기 때문에 결함 정보를 전달하면서, 원 데이터의 경향도 반영할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 경향제거 신호처리를 기본으로 하여 실험데이터를 해석하였다.

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

$$V_{DT}(i, j) = V_0(i, j) - V_{AVR}(i, j, N) \quad (3)$$

제 3 절 결함 추정 알고리즘

Fig.2-2는 시험편의 체적 변화가 이루어진 80% 깊이의 평저공(FBH, flat bottom hole)과 체적 변화가 없는 함몰(Dent) 영역에 대한 보빈 코일 신호의 리사주 선도를 나타낸다. (a)체적 변화가 있는 경우 보빈 코일이 결함을 통과 할 때 4/4분면에서 시작하여 2/4분면에서 종료되는 패턴을 보인다. 반면에 (b)체적 변화가 없는 경우는 결함을 통과할 때 2/4분면에서 시작하여 4/4분면에서 종료되는 패턴을 보인다[38].

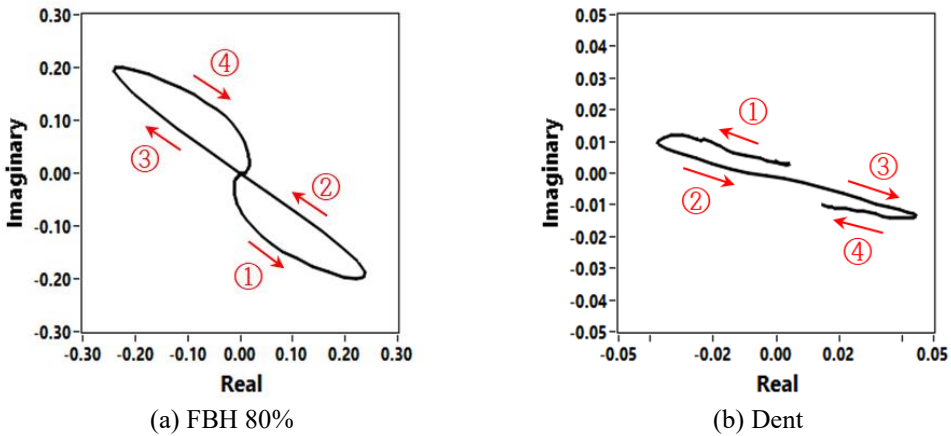


Fig. 2 -2 Comparison of Lissajous curve between flaw and dent

또한 Fig.2-3에 나타낸 바와 같이 (a)외면에 존재하는 80% 깊이의 평저공(FBH, flat bottom hole) 결함은 주파수가 높아짐(50kHz, 100kHz, 150kHz)에 따라 리사주 선도가 시계 방향으로 회전 한다. 하지만 (b)내면에 존재 하는 10% 환형 마모(ID Groove)의 경우 주파수가 높아짐에 따라 반 시계 방향으로 회전 한다.

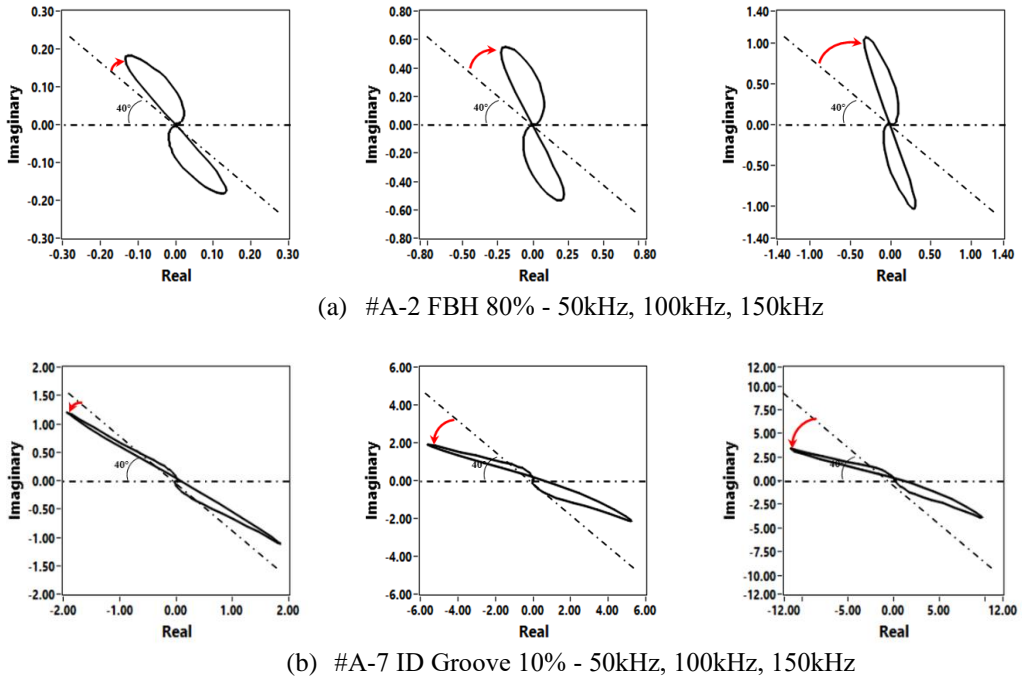


Fig. 2-3 Comparison of signal rotating direction according to frequency

이상의 결과를 정리한 보빈 코일을 이용한 결함의 유무 및 위치 판별 알고리즘은 Fig.2-4와 같다. 보빈 코일로부터 취득한 리사주 선도의 패턴을 이용하여 체적성 결함 여부를 판단한다. 또한, 주파수에 따른 회전의 방향으로부터 결함의 위치 내부(ID)와 외부(OD)를 판별한다. 그리고, 결함의 형태 및 면적은 환형 배열 자기센서의 영상으로부터 판별한다.

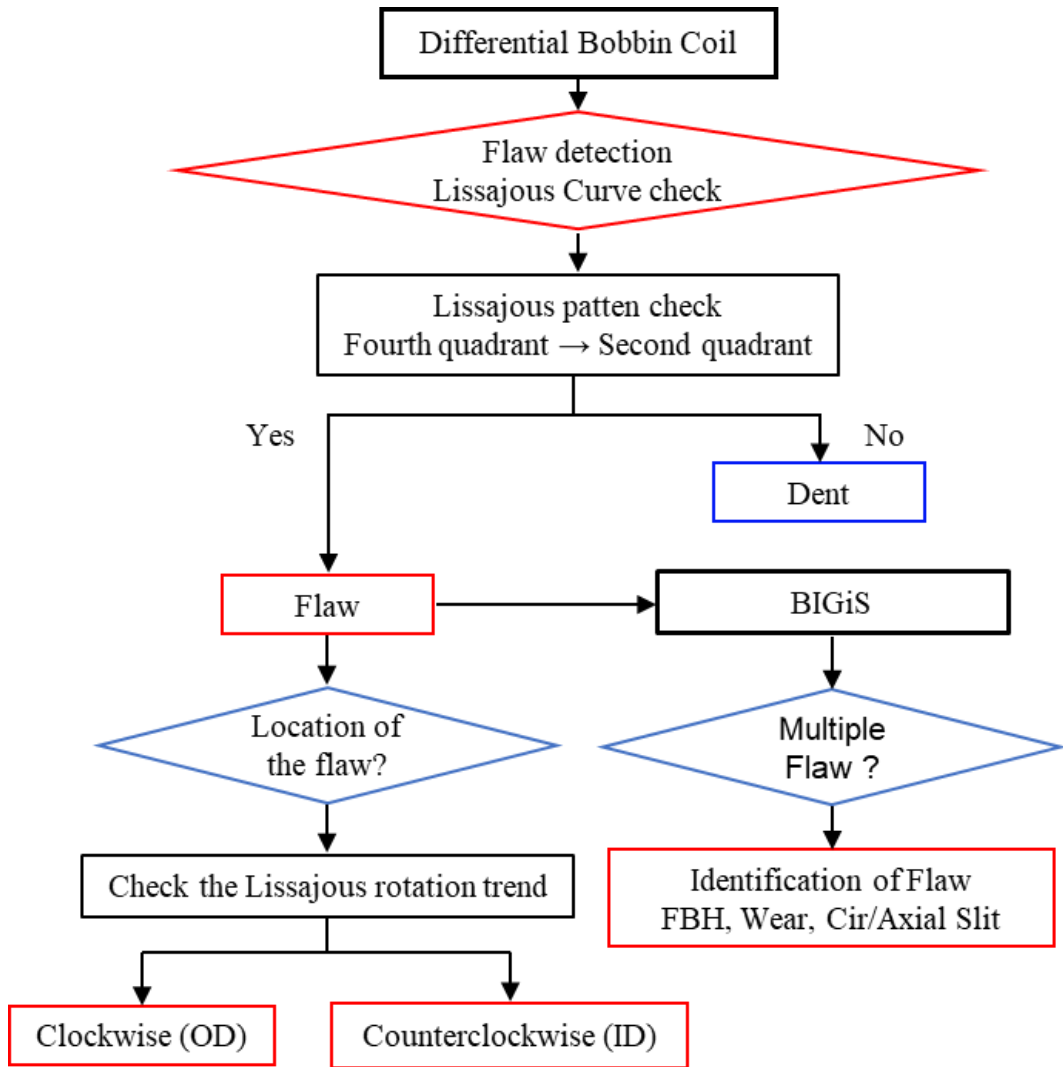


Fig. 2 -4 The flaw classification algorithm.

제 3 장 시스템 개발

본 장에서는 전열관을 검사하기 위한 비파괴검사 시스템을 보고한다. 본 연구를 통하여 개발한 전열관 비파괴검사 시스템은 Fig. 3-1에 나타난 바와 같이 (a)검사 프로브와 (b)원격 직류 안정화 전원, 원격 교류 안정화 전원, 진폭 및 위상 신호처리회로, 인터페이스(데이터 수집장치)를 포함한 검사장치와 (c)소프트웨어로 구성된다. 이하 자세한 내용을 소개한다.

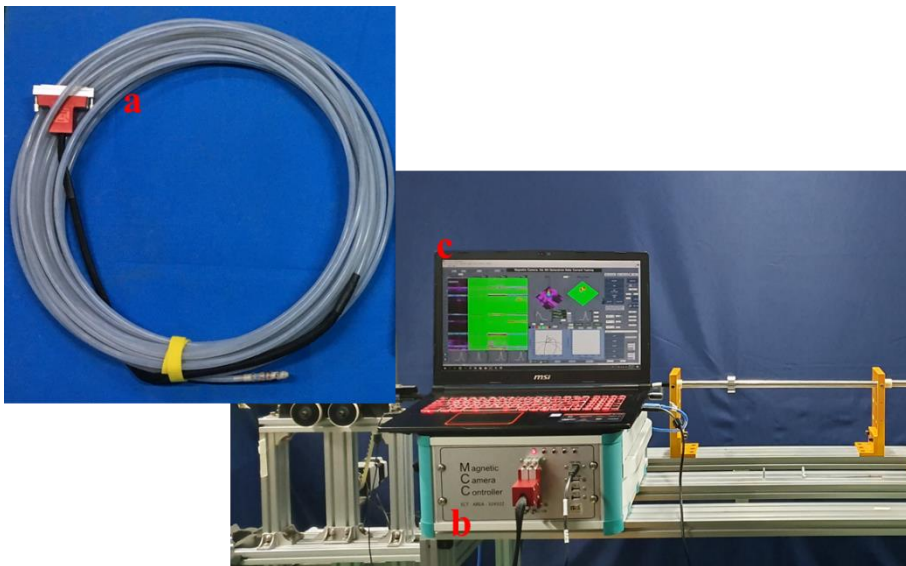


Fig. 3 -1 Proposed inspection system

제 1 절 검사 프로브

1. 차동형 보빈 코일

Fig. 3-2에 나타난 바와 같이 검사 프로브는 차동형 보빈 코일 센서와 환형 배열 자기센서(BIGiS, bobbin-type integrated GMR sensor array)로 이루어져 있다. 차동형 보빈 코일은 권수 192turns, 폭 1.5mm, 중심간격 2mm의 보빈형 코일을 배치하였다. 보빈형 코일은 시험편에 삽입한 코일과 시험편 상호간에 발생하는 상호유도작용에 의한 임피던스의 변화를 복소수 평면으로 표현함으로써 검사 대상의 건전성을 검사한다. 보빈형 코일 자체의 임피던스(Z_0)는 일반적으로 식 (4)로 정의할 수 있으며, R_0 은 복소수 평면에서 실수부를 나타내고, jX_0 는 허수부를 나타낸다.

교류전원이 인가된 보빈형 코일을 시험편에 삽입하면 코일에서 발생하는 1차 시변자계에 의해 시험편의 환형 방향으로 유도전류가 발생한다. 이와 같은 유도전류는 2차 시변자계를 발생시키며, 1차 시변자계와 합성되어 코일의 임피던스 변화를 야기한다. 전도성 시험편에 삽입된 코일의 임피던스(Z_s)는 식(5)와 같다.

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (4)$$

$$Z_s = R_s + jX_{L,s} \quad (5)$$

차동형 보빈코일은 식 (6)에 나타난 바와 같이 인접하게 배치한 두 코일 사이의 신호의 차이를 나타낸다. 따라서, 2차 시변자계의 왜곡을 유발하는 인자가 없을 때에는 두 코일의 임피던스($Z_{s,1} = Z_{s,2}$)는 같으며, 차동 임피던스(ΔZ_s)는 0이 된다. 따라서, 복소평면에서는 0으로 표현된다. 그러나, 2차 시변자계의 왜곡이 발생하는 결함 구간에서는 선행하는 코일의 임피던스($Z_{s,1}$)와 후행하는 코일의 임피던스($Z_{s,2}$)는 차이를 가지게 된다. 따라서, 차동 임피던스를 복소평면에 구현한 리사주 선도를 이용하여 결함의 유무를 판별할 수 있다. 뿐만 아니라, 결함의 위치 및 크기도 평가할 수 있다. 본 연구에서는 차동 임피던스를 식 (7)과 같이 공기 중의 리액턴

스($X_{L,0}$)로 나누어 정규화하여 복소평면에 표현하였다.

$$\Delta Z_s = Z_{s1} - Z_{s2} = \Delta R_s + jX_{L,s} \quad (6)$$

$$\Delta Z_{nor} = \frac{\Delta Z_s}{X_{L,0}} = \frac{\Delta R_s}{X_{L,0}} + j \frac{X_{L,s}}{X_{L,0}} \quad (7)$$

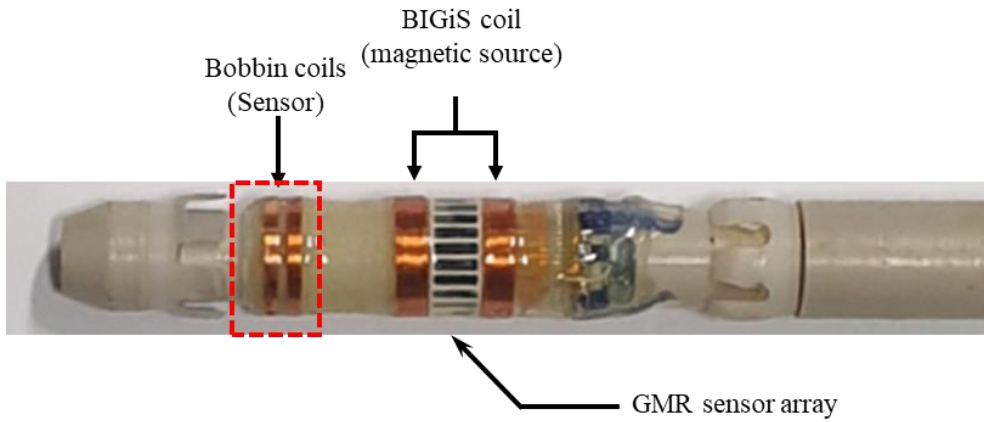


Fig. 3 -2 Developed probe

2. 환형 배열 자기센서

Fig. 3-3에 나타낸 바와 같이 GMR 센서를 1.5mm 간격으로 배열 할 수 있는 플렉시블 PCB를 제작하였다. 외경이 10mm인 peek 재질의 기구부에 유연 인쇄회로 기판(flexible PCB, printed circuit board)을 접착하여 고정하였다.

Fig. 3-4는 실제 검사프로브의 보빈형 여자 코일과 환형으로 배열한 GMR 센서를 나타낸다. GMR 센서 22개를 1.5mm 간격으로 원호방향으로 배열하여 분해능은 약 16.36° 가 된다. 여자기 보빈 코일은 권수 180 turns, 폭 3mm, 중심 간격 8mm의 보빈 코일을 환형 배열 센서의 양측에 배치하였다.

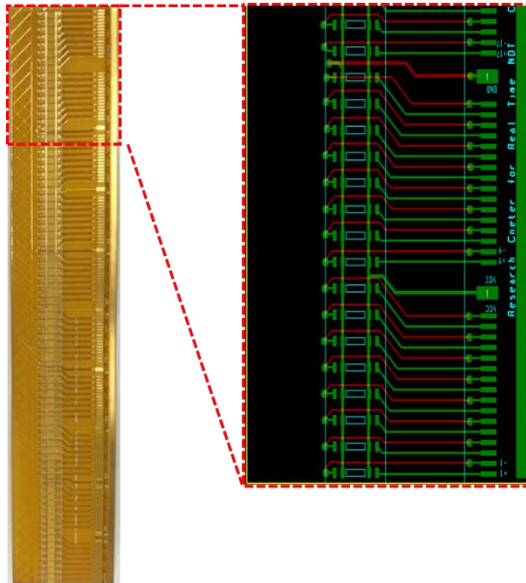


Fig. 3 -3 GMR Sensors on a flexible PCB

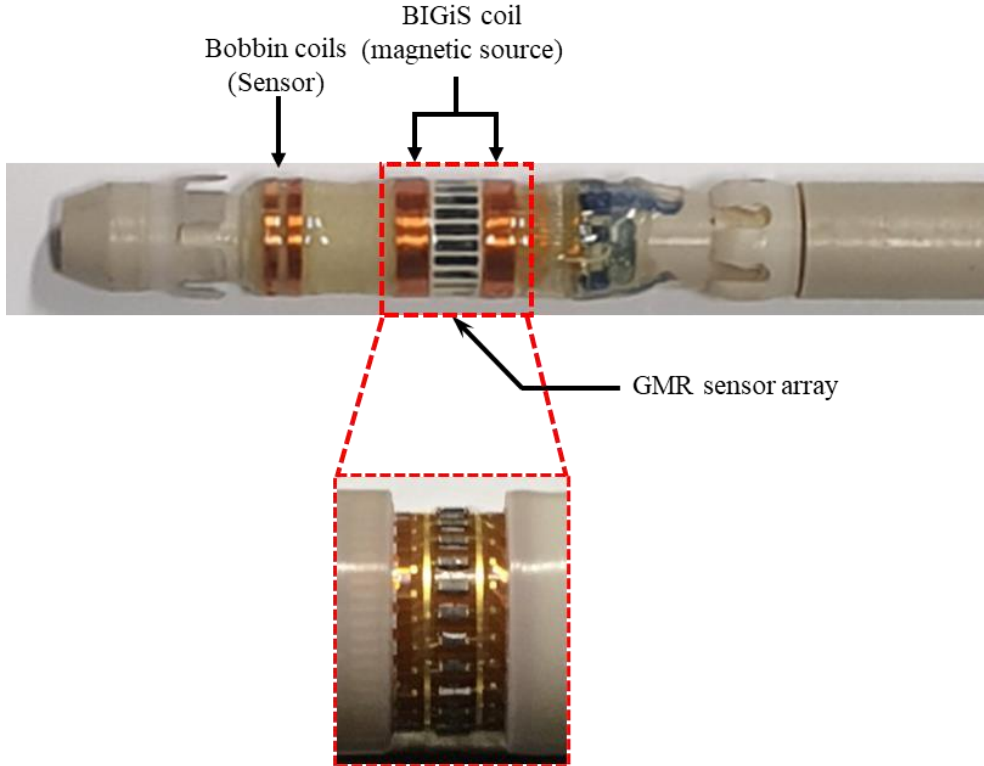


Fig. 3-4 Details of GMR sensor array and excitation coil

GMR 센서 양단의 보빈 코일에 의하여 1차 시변자계를 인가하면, 전도성 배관에는 유도전류 및 2차 시변자계가 발생한다. 따라서, 인접한 차동형 보빈코일에 서로 마주보는 1차 시변자계를 인가하면, 코일과 코일의 중심에는 2차 시변자계가 상쇄되어 0이 되는 영역이 환형으로 발생한다. 그리고, 결함 영역을 지날 때 이러한 2차 시변자계의 균형은 Fig.3-5에 나타낸 바와 같이 붕괴된다.

GMR 센서와 같이 자속밀도를 측정할 수 있는 소자를 2차 시변자계가 상쇄되는 영역에 배치하고, 배관 내부의 축방향으로 스캔하면 소구경 배관의 전체적인 2차 시변자계 분포를 측정할 수 있다. GMR 센서에 의하여 측정할 수 있는 시변자계는 식 (8)로 표현할 수 있다[39]. V_G 는 GMR 센서의 출력전압을 나타낸다. GMR 센서는 센서면에 수평인 방향, 즉 B_z 또는 B_θ 에 민감하게 반응한다. 본 연구에서는 GMR 센서를 Z방향에 민감하도록 배열하였다. C1, C2는 GMR 센서의 고유특성을

나타내는 상수이며, p 는 입력전압이다. 상기 식은 외부자계가 인가되었을 때, 극성에 관계없이 비선형적으로 증가하면서 포화에 이르게 됨을 표현한다.

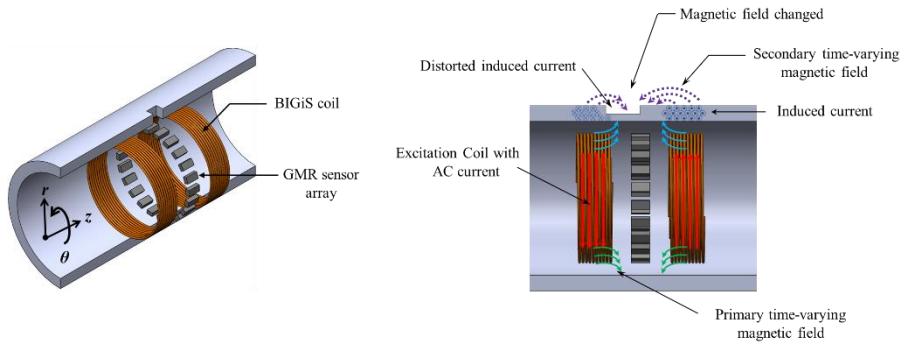


Fig. 3-5 Principle of excitation current and induced time-varying magnetic field

$$V_G(r, \theta, z) = C_1 \times \rho \times \left(1 - e^{-B_z^2}\right) + C_2 \quad (8)$$

제 2 절 원격 전원 및 진폭-위상 신호처리 회로

Fig.3-6은 (a)전력 증폭기 전원, (b)원격 직류 안정화 전원, 원격 교류 안정화 전원, (c)진폭 및 위상 신호처리회로, (d)데이터 수집장치를 포함한 컨트롤러를 나타낸다. 이하 자세한 설명을 한다.

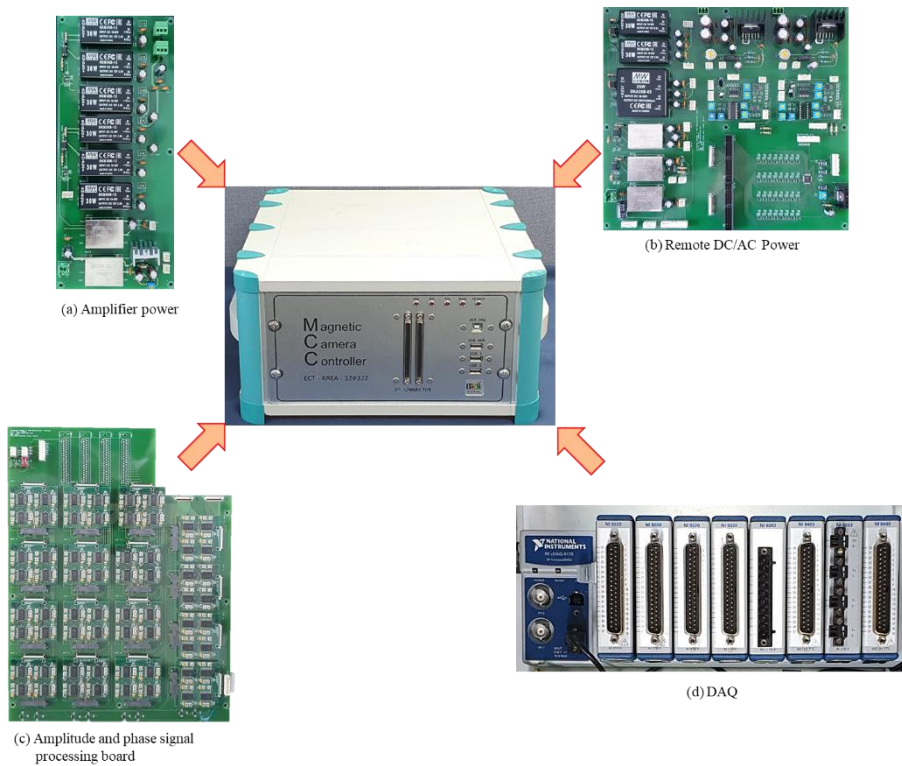


Fig. 3 -6 Configuration of controller

1. 원격 직류 안정화 전원

Fig.3-7은 개발한 원격 직류 안정화 전원을 구성 및 실물을 나타낸다. AC/DC 변환기에 의하여 일반 가정 및 산업 현장에 공급되는 220V의 교류전원을 $\pm 24V$ 직류전원으로 변환한다. 변환된 $\pm 24V$ 직류전원은 DC/DC 변환기의 소형 SMPS(Switched Mode Power Supply)에서 센서 및 신호처리회로, 교류 안정화 전원의 구동에 필요한 직류전원으로 변환하여 공급한다. 또한, 외부에서 디지털 신호를 제어하여 각각의 SMPS의 출력을 제어할 수 있다. 직류 안정화 전원은 센서, 증폭부, 필터를 포함한 신호처리회로와 교류 안정화 전원을 구동하기 위한 5V, $\pm 5V$, $\pm 12V$ 의 전원을 공급하는 목적으로 제작하였다.

AC 220V의 산업용 AC전원을 (a) DC전원으로 변환하여 부전원부 (b)~(f)에 24V 직류전원(DC)을 공급한다. (b)는 컨트롤 전원으로 부전원들을 제어 시 사용된다. (c)는 정전압 5V로 GMR 센서 전원에 사용된다. (d~f)는 $\pm 5V$, $\pm 12V$ 의 전원을 교류 안정화 전원, 위상 및 진폭 신호처리회로의 구동 전원으로 사용하였다.

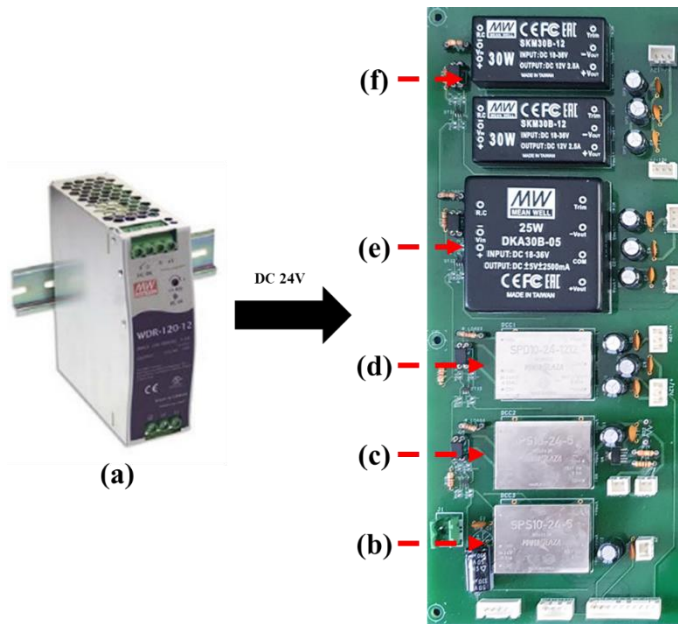


Fig. 3 -7 DC power supplier and amplifiers

2. 원격 교류 안정화 전원

Fig.3-8은 개발한 원격 교류 안정화 전원을 구성 및 실물을 나타낸다. 원격 교류 안정화 전원은 센서 프로브에 장착된 코일에 1~150kHz 주파수의 교류 전원을 입력하는 목적으로 활용된다. 2개의 동일한 교류 안정화 전원과 2개의 교류전원 전력증폭기를 제작하였다. 직류 안정화 전원과 마찬가지로 별도의 스위치 작동 없이 원격 디지털 신호에 의하여 교류전원의 입출력을 제어하였다.

주파수를 발생하는 함수발생부(a)는 전용 IC를 채택하여 파형 왜곡을 최소화하였으며, Fig 3-9와 같이 출력되는 파형은 정현파, 삼각파, 구형파 3가지 파형을 출력할 수 있었다. 이 중 정현파는 프로브에 장착된 여자 코일의 교류전원 값으로 입력된다. 또한 동일한 위상의 삼각파는 구형파로 변화시키고, 구형파는 위상을 90° 지연시켜 위상 신호처리회로의 Reference 값으로 입력된다. 전력증폭부(b)에는 Fig.3-10은 별도의 $\pm 36V$ 전원을 공급하여 입력 후 증폭된 교류전원이 코일에 입력된다. 전력증폭부는 최대 40Vp-p의 출력을 얻을 수 있으며, 고용량의 콘덴서를 이용하여 장시간에도 안정적인 출력을 얻을 수 있었다. 한편, 장시간 사용 시 발생하는 발열 문제를 해결하고자 알루미늄 재질의 방열판과 팬 모터를 사용하여, 발열 문제를 해결하였다.

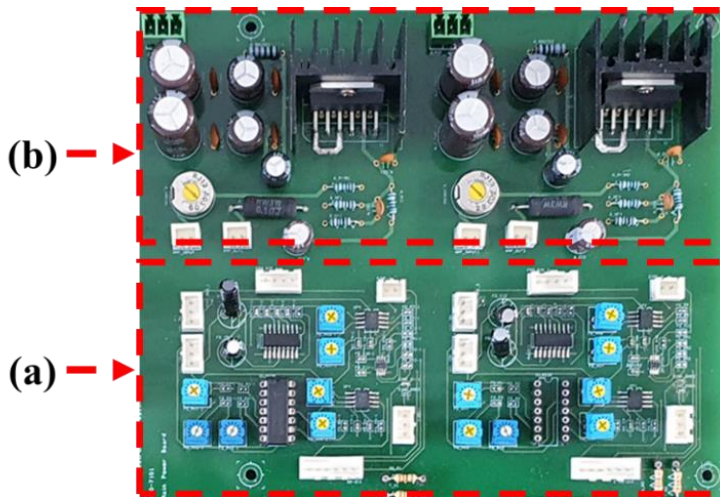


Fig. 3 -8 AC power generation unit

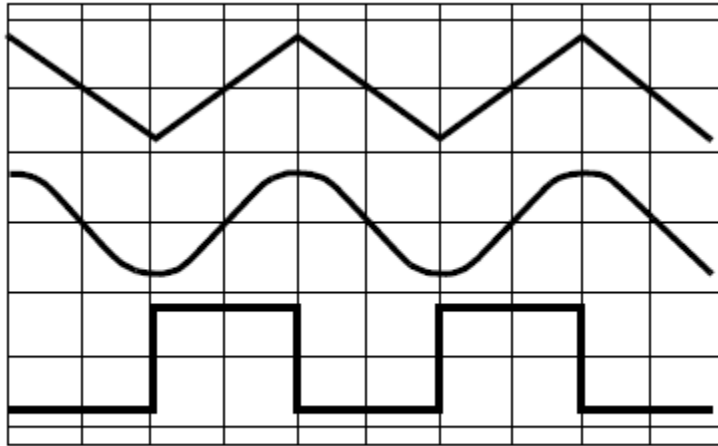


Fig. 3 -9 Triple waveforms



Fig. 3 -10 Power amplifiers

3. 진폭 및 위상 신호처리회로

본 연구에서는 결함의 크기와 위치(전열관 안쪽과 바깥쪽)에 따른 진폭과 위상 차의 변화를 측정하기 위하여 다음 원리의 신호처리회로를 개발하였다. Fig.3-11은 사인파 형태의 입력(input)과 출력(output), 그리고 입력 신호에 대하여 위상차가 각각 0° , 90° 인 사각파를 나타낸다. 전열관에 삽입되기 전의 출력 신호(output)의 위상은 입력신호(input)와 같다고 가정한다. 그리고, 여자 코일을 전열관 시험편에 삽입하면, 역기전력의 발생으로 출력신호의 진폭이 작아지고, 위상차가 발생한다. 하지만, Fig.3-11에서는 입력신호와 출력신호의 진폭을 같다고 가정하였다. 이러한 가정은 각 신호를 정규화(normalizing)함으로서 실현할 수 있다.

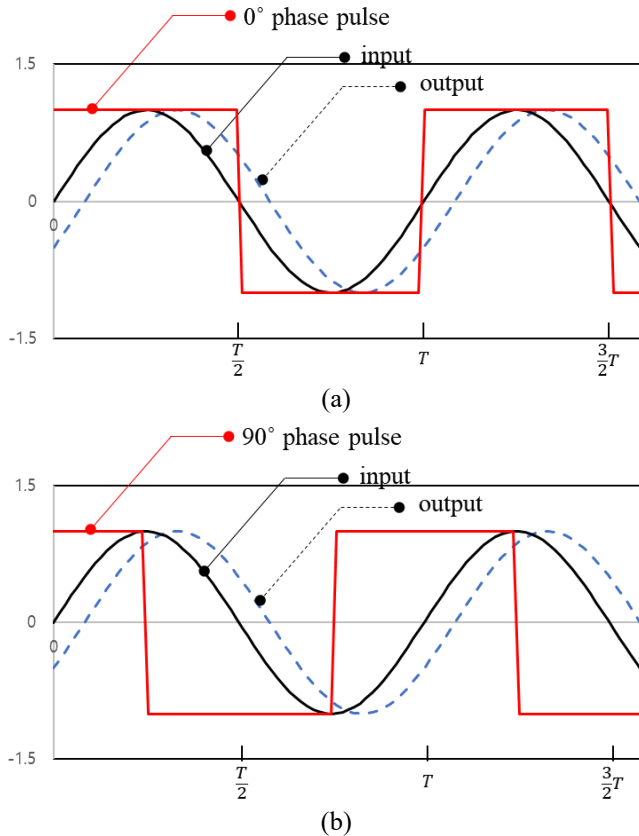


Fig. 3 -11 Frequency input and output signal, and its comparison with (a) 0° phase , and (b) 90° phase square wave

Fig.3-12는 출력신호의 위상차가 각각 30°, 60°, 90°로 변화한 경우의 출력신호에 대하여, Fig.3-11에 나타낸 0°와 90°도 위상의 사각파를 곱한 결과를 나타낸다. 0° 도 위상의 사각파(식 (13))를 곱한 결과를 수식으로 표현하면, 식 (9)~(12)과 같다. 그리고, 90°도 위상의 사각파를 곱한 결과를 수식으로 표현하면, 식 (14)~(17)과 같다.

$$V_{out}(R, 0^\circ, t, 0) = S(t) \times R \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (9)$$

$$V_{out}(R, 30^\circ, t, 0) = S(t) \times R \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{6}\right) \quad (10)$$

$$V_{out}(R, 60^\circ, t, 0) = S(t) \times R \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{3}\right) \quad (11)$$

$$V_{out}(R, 90^\circ, t, 0) = S(t) \times R \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (12)$$

$$S(t) = S(t + T) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t \leq \frac{T}{2}) \\ -1 & (\frac{T}{2} \leq t \leq T) \end{cases} \quad (13)$$

$$V_{out}(R, 0^\circ, t, 90^\circ) = S\left(t - \frac{T}{4}\right) \times R \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (14)$$

$$V_{out}(R, 30^\circ, t, 90^\circ) = S\left(t - \frac{T}{4}\right) \times R \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{6}\right) \quad (15)$$

$$V_{out}(R, 60^\circ, t, 90^\circ) = S\left(t - \frac{T}{4}\right) \times R \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{3}\right) \quad (16)$$

$$V_{out}(R, 90^\circ, t, 90^\circ) = S\left(t - \frac{T}{4}\right) \times R \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi}{2}\right) \quad (17)$$

식 (9)의 경우, Fig.3-12(a)에서 0° 위상의 사각파를 곱한 결과로서, 반주기 ($0 \sim T/2$)까지는 +1을 곱하고, 나머지 반주기($T/2 \sim T$)까지는 -1을 곱한다. 결과적으로 위상차가 0° 의 출력신호(실선)는 반파 정류된 형태의 신호가 출력된다. 그리고, 식 (12)으로 표현되는 경우, 즉 위상차가 90° 의 출력신호(노란색 점선)를 $S(t)$ 에 곱하면, 반주기($0 \sim T/2$)까지는 원래의 출력신호를 출력한다. 그러나, 나머지 반주기($T/2 \sim T$)에서는 원래의 출력신호가 반전되어 출력된다. 그리고, 이러한 경향은 위상차가 30° 의 출력신호(파란색 점선)와 90° 의 출력신호(보라색 점선)인 식 (10)와 식 (11)에 의하여 그 형태가 변화한다.

한편, 식 (14)의 경우, Fig.3-12(b)에서 0° 위상의 사각파를 곱한 결과로서, 사반주기($0 \sim T/4$)까지는 +1을 곱하고, 그 다음 반주기($T/4 \sim 3/4T$)까지는 -1을 곱하고, 그 다음 사반주기($3/4T \sim T$)까지는 다시 +1을 곱한다. 결과적으로 위상차가 0° 의 출력신호(실선)는 일부($0 \sim T/4$, $3/4T \sim T$)에서는 반파 정류된 형태의 신호가 출력되고, 또 다른 영역($T/4 \sim 3/4T$)에서는 식 (21)에 의하여 반전되어 출력된다. 그리고, 이러한 경향은 위상차가 30° 의 출력신호(파란색 점선)와 90° 의 출력신호(보라색 점선)인 식 (15)와 식 (16)에 의하여 그 형태가 변화한다.

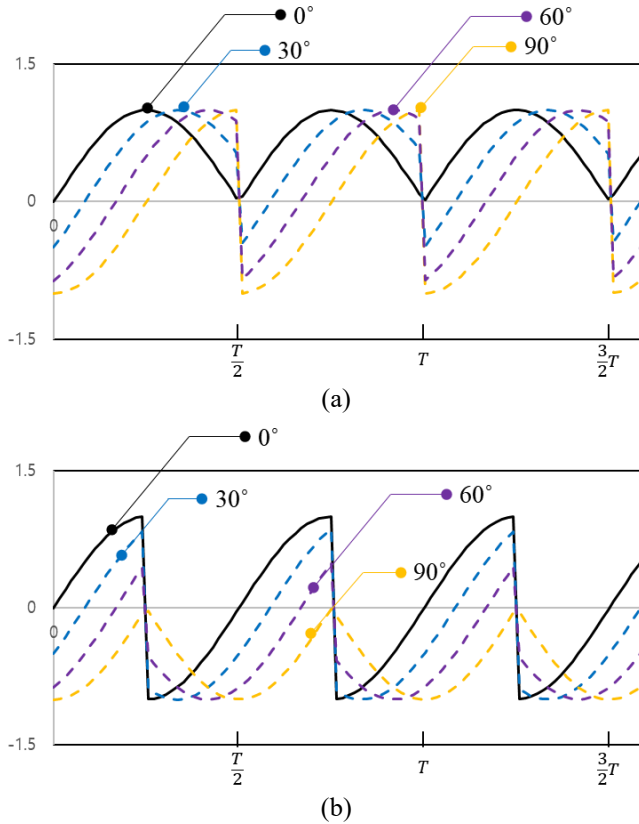


Fig. 3-12 Multiplying Output with (a) 0° phase, and (b) 90° phase square wave

상술한 식 (9)~(17)에 의하여 출력된 각각의 신호를 주기 T 만큼 적분하면, Fig.3-13에 나타낸 바와 같이, 위상차의 변화를 정량적으로 평활화하여 지시할 수 있다. 즉, Fig.3-13(a)에서는 식 (9)을 이용하여 0° 위상의 사각파를 곱한 결과를 적분하여 최대값(굵은 실선)을 평활화하여 얻을 수 있고, 식 (12)을 이용하여 90° 위상의 사각파를 곱한 결과를 적분하여 “0” 을 평활화(노란색 점선)하여 얻을 수 있음을 의미한다. 그리고, 30° 와 90° 의 위상차를 정량적으로 계산할 수 있다. 또한, Fig.3-13(b)에서는 식 (13)을 이용하여 0° 위상의 사각파를 곱한 결과를 적분하여 “0” 을 평활화(굵은 실선)하여 얻을 수 있고, 식 (17)을 이용하여 90° 위상의 사각파를 곱한 결과를 적분함으로써 음수 형태의 최소값(노란색 점선)을 평활화하여 얻을 수 있다. 그리고, 30° 와 90° 의 위상차를 정량적으로 계산할 수 있다.

이상의 결과는 식 (18) 에 나타낸 바와 같이 0° 위상을 곱한 값의 적분의 경우에는 와전류의 실수부로 표현되고, 식 (19)에 나타낸 바와 같이 90° 위상을 곱한 값의 적분의 경우에는 와전류 신호의 허수부로 표현된다. 그리고, 이들 두개의 공식을 식 (20)와 식 (21)에 대입하면, ECT 신호에 대한 진폭(Z)과 위상차(φ)로 환산될 수 있다.

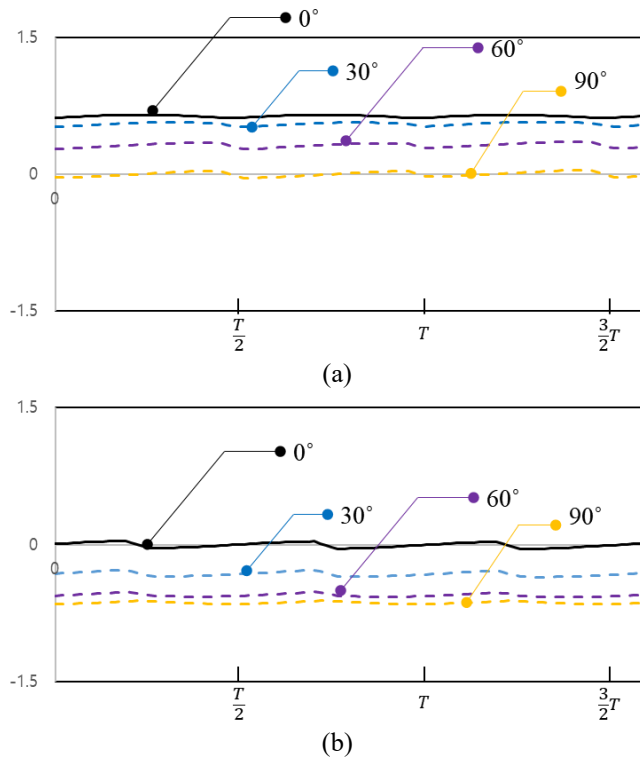


Fig. 3 -13 Integral of each outputs after (a) 0° phase, and (b) 90° phase multiplying

$$Rx(r, \phi, z) = \int_0^{2\pi} V_G(r, \phi, z) \sin \omega t \, dt \quad (18)$$

$$Im(r, \phi, z) = \int_0^{2\pi} V_G(r, \phi, z) \cos \omega t \, dt \quad (19)$$

$$Z(r, \phi, z) = \sqrt{Re(r, \phi, z)^2 + Im(r, \phi, z)^2} \quad (20)$$

$$\Phi(r, \phi, z) = \tan^{-1} \frac{Im(r, \phi, z)}{Re(r, \phi, z)} \quad (21)$$

이상의 이론적 배경을 실현하기 위한 진폭 및 위상 신호처리 회로의 블록다이 어그램은 Fig. 3-14에 나타낸 바와 같다. GMR 센서는 각각 2개씩의 전원 입력단자, 출력단자로 구성된다. 입력 단자에 정전압 전원 5V를 입력하면, 자기장의 세기에 따라 출력단자에 전압차가 발생한다. 그리고, 차동증폭회를 구성함으로써, 결함의 존재 유무와 크기에 기인하여 왜곡되는 자기장의 세기를 측정할 수 있다. (a)는 바이어스 자기장을 소거하기 위한 필터회로를 나타낸다. (b)는 신호를 1차적으로 증폭 하는 전치 증폭회로를 나타내며, (c)는 전치 증폭된 신호를 소프트웨어적으로 이득 을 가변하여 증폭할 수 있는 프로그래머블 증폭회로를 나타낸다. (d) 분리된 증폭된 신호를 각 위상차 신호별로 Demodulator에 의하여 곱하는 복조회로이다. (e)는 분리 된 신호를 평균을 취하여 DC신호로 변환하는 적분회로이다.

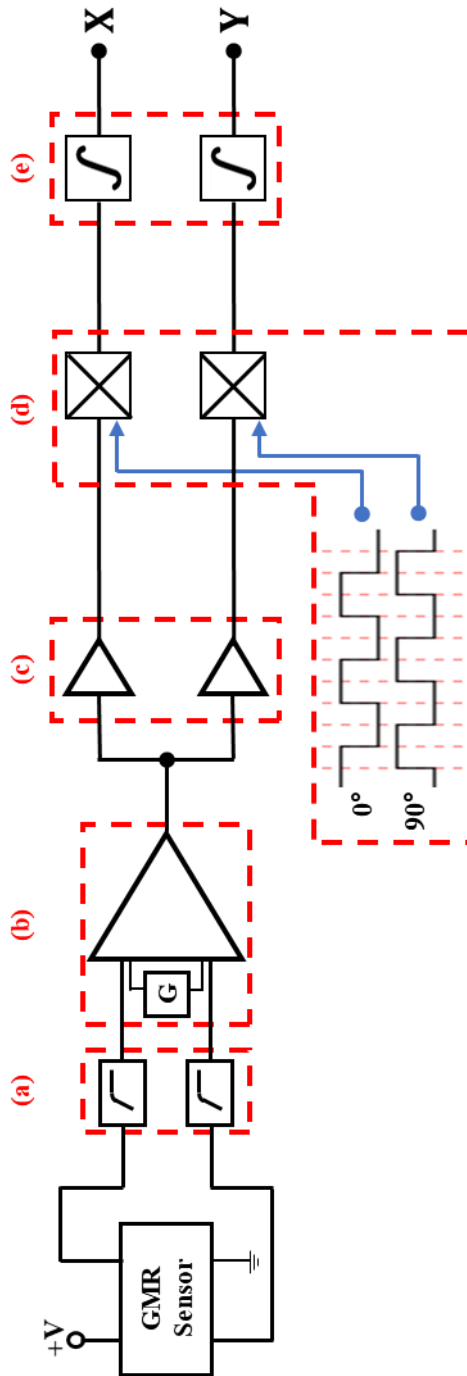


Fig. 3 -14 Block diagram of the signal processing circuit

Fig. 3-15는 고대역통과필터(HPF, high pass filter) 회로를 나타내며, R과 C에 의하여 차단주파수를 조정할 수 있다. 본 연구에서는 $5.6k\Omega$ 과 $100nF$ 을 사용함으로써 $284Hz$ 의 차단주파수를 실현하였다. HPF는 잔류자화 또는 강자성체가 혼재되어 있는 상태에서의 결함 검출을 가능하게 할 수 있다. 식 (22)는 필터회로에 의한 차단주파수 의한 직류신호의 특성을 수식화한 것이다.

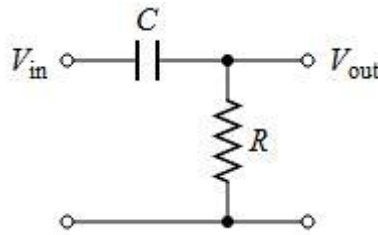


Fig. 3 -15 High pass filter circuit

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{22}$$

식 (23)은은 전치 증폭 회로에 의한 증폭 Gain을 수식화 한것이다. R_G 는 240Ω 을 사용하여 약 207의 증폭을 이루었다.

$$\text{Gain} = 1 + \frac{49.4 k\Omega}{R_G} \tag{23}$$

Fig 3-16은 프로그래머블 증폭회로를 나타낸다. 전치 증폭회로에서 증폭된 GMR센서 신호를 2차로 원격 증폭을 가능하게 한다. 본 연구에서는 1~7배를 증폭할수 있도록 설계하였다. Fig.3-17은 프로그래머블 증폭 회로를 사용하여 실제 증폭되는 신호를 나타낸다.

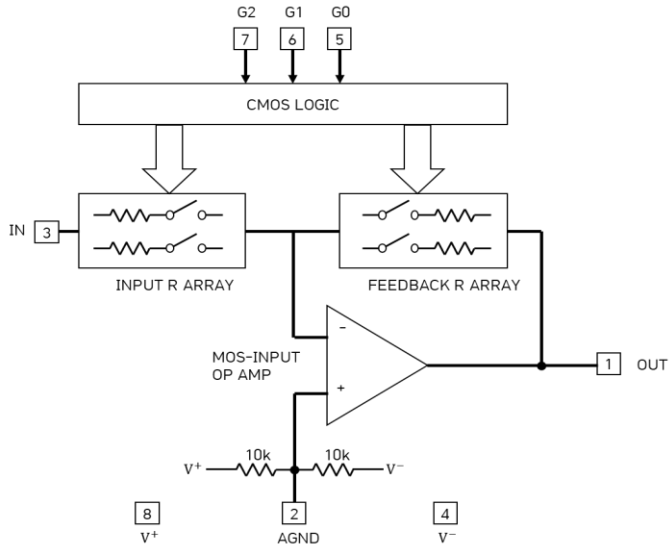


Table 3. LTC6910-3

G2	G1	G0	NOMINAL VOLTAGE GAIN		NOMINAL LINEAR INPUT RANGE (V_{p-p})			NOMINAL INPUT IMPEDANCE ($k\Omega$)
			Volts/Volt	(dB)	Dual 5V Supply	Single 5V Supply	Single 3V Supply	
0	0	0	0	-120	10	5	3	(Open)
0	0	1	-1	0	10	5	3	10
0	1	0	-2	6	5	2.5	1.5	5
0	1	1	-3	9.5	3.33	1.67	1	3.3
1	0	0	-4	12	2.5	1.25	0.75	2.5
1	0	1	-5	14	2	1	0.6	2
1	1	0	-6	15.6	1.67	0.83	0.5	1.7
1	1	1	-7	16.9	1.43	0.71	0.43	1.4

Fig. 3 -16 Block diagram and amplitude gain of programmable amplifier



Fig. 3 -17 Verification of gain of programmable amplifier

Fig. 3-18은 위에서 전술한 진폭 및 위상차 신호처리 회로의 출력신호를 보여준다. 위 그래프에서 나타낸 것 같이 센서에서 출력되는 신호(노란색)에 각 0° , 90° 의 위상차를 준 사각파를 입력하였다. 센서 출력 신호에 위상각이 다른 신호를 곱하여 출력된 신호를 구현하였다.

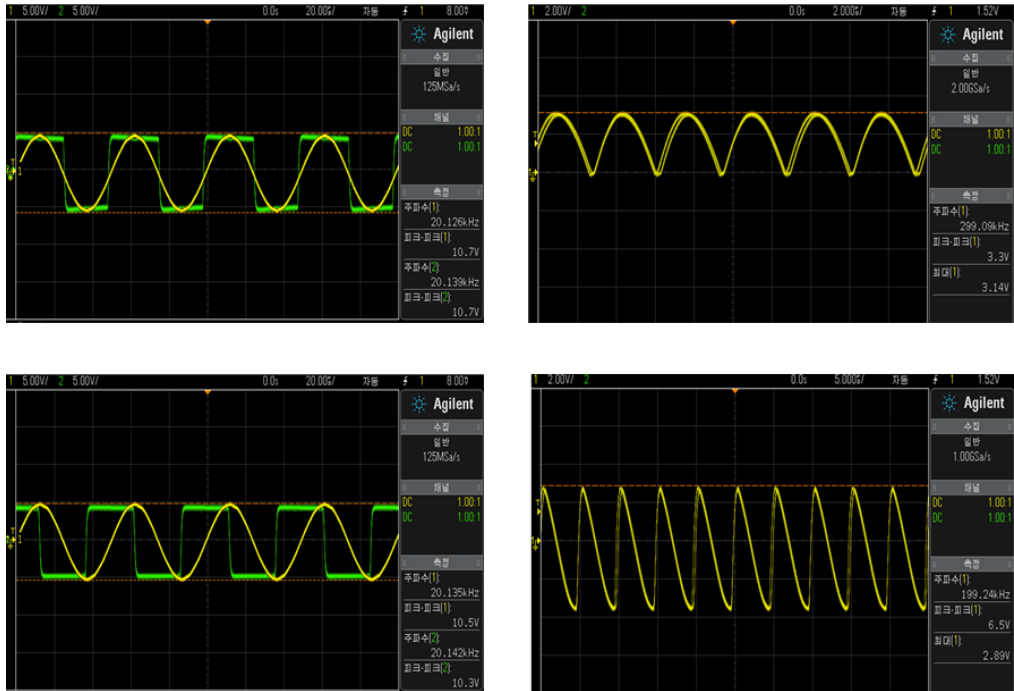


Fig. 3-18 Experimental results after multiplying 0° and 90° phase square pulse

Fig 3-19는 본 연구를 통하여 제작한 위상 신호처리회로로 고대역통과필터(HPF, high pass filter), 교류증폭, 복조기, 적분기를 나타낸다. 총 2채널의 신호처리회로가 내장되어 있으며, 마더보드에 16장의 신호처리보드가 연결될 수 있도록 하였다. 따라서, 1개의 마더보드에서 32채널의 X, Y 센서 신호를 동시에 병렬 처리할 수 있다.

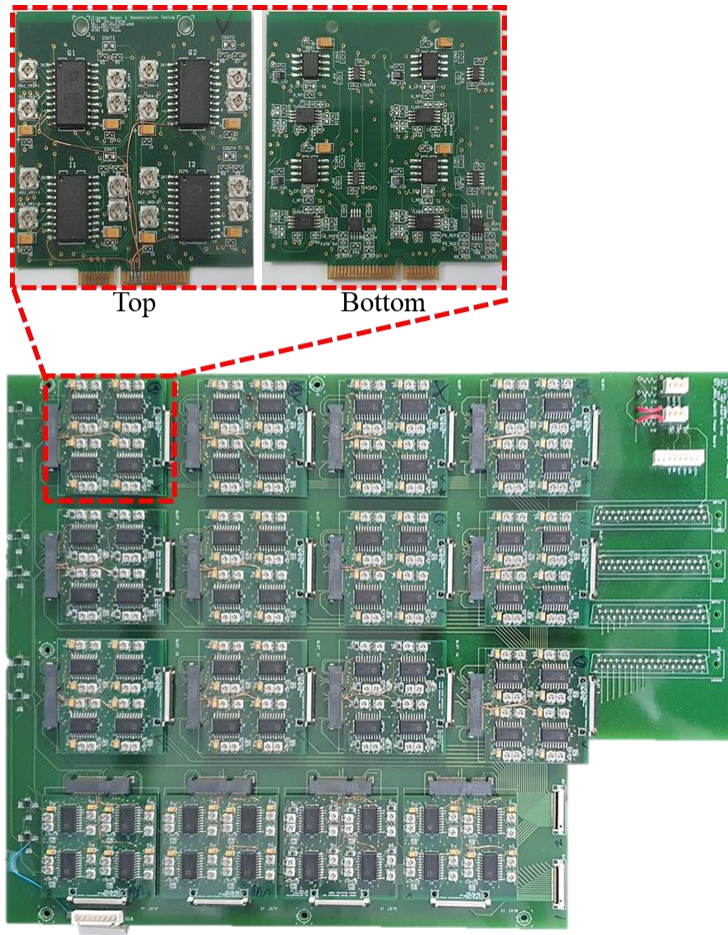


Fig. 3 -19 Amplitude and phase signal processing board

4. 인터페이스

본 연구에서는 원격 직류·교류 안정화 전원 제어 및 다채널 AD변환을 위하여 Fig.3-20에 나타낸 바와 같이 NI-DAQ(NI 9178, NI 9220, NI 9263, NI9223, NI 9403)를 사용하였다. 환형 배열된 GMR 센서 신호는 신호처리 후 X, Y 신호로 출력 되기 때문에 16채널의 AD 변환기(NI 9220)를 4개를 사용하여 각각 최대 32채널 16bit의 AD변환을 사용하였다. 보빈 코일 신호는 4채널의 AD 변환기(NI 9223)를 사용하였다. 또한 원격 직류·교류 안정화 전원 제어하기 위해 Digital I/O (NI 9403), Analog output(NI 9263)을 사용하였다.

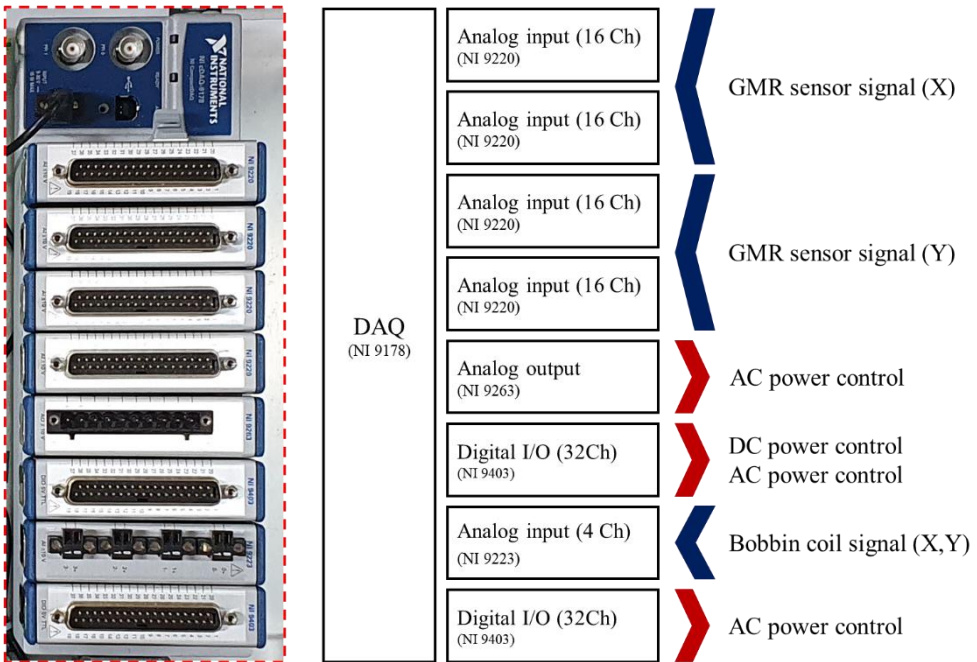


Fig. 3 -20 Data collection device

Table 3-1 NI-DAQ specifications

Analog Input (NI 9220)		Analog Output (NI 9263)	
Analog Input Channels	16	Analog Output Channels	4
Analog Input Resolution	16 bit	Analog Output Resolution	16 bit
Voltage Range	$\pm 10.6V$	Voltage Range	$\pm 10.4V$
Sample rate	100 KS/s	Current Drive	$\pm 1Ma$ per channel maximum
Analog Input (NI 9223)		Digital I/O (NI 9403)	
Analog Input Channels	4	Digital Channels	32
Analog Input Resolution	16 bit	In put/Out put type	TTL.single-ended
Voltage Range	$\pm 10.7V$	Voltage Range	-0.25V to 5.25V
Sample rate	1 MS/s		

제 3 절 소프트웨어

Fig.3-21, Fig.3-22는 진폭 및 위상 신호처리회로, 원격 직류·교류 안정화 전원, 인터페이스 및 자동이송장치(Push-Puller)를 구동하기 위한 측정 및 해석 소프트웨어를 나타낸다. 보빈형 자기카메라의 환형 배열된 22개의 GMR 센서와 보빈 코일 신호를 25m 신호 케이블을 통하여 검사 장비에 전송한다. (a)는 데이터취득(DAQ, data acquisition) 설정창을 나타낸다. 설정창에서는 측정하는 센서의 개수와 여자코일, 보빈 코일에 입력 되는 교류전원의 주파수 및 진폭을 설정한다. 또한 데이터 취득 속도(sample rate)를 설정한다 (b)는 환형 배열된 GMR 센서 신호를 신호처리 후 각 Amplitude, Phase 신호 영상을 나타낸다. 측정되는 신호는 실시간으로 표현된다. (c)는 GMR 센서와 도시에 측정 되는 보빈 코일의 X,Y 신호를 실시간으로 보여준다.

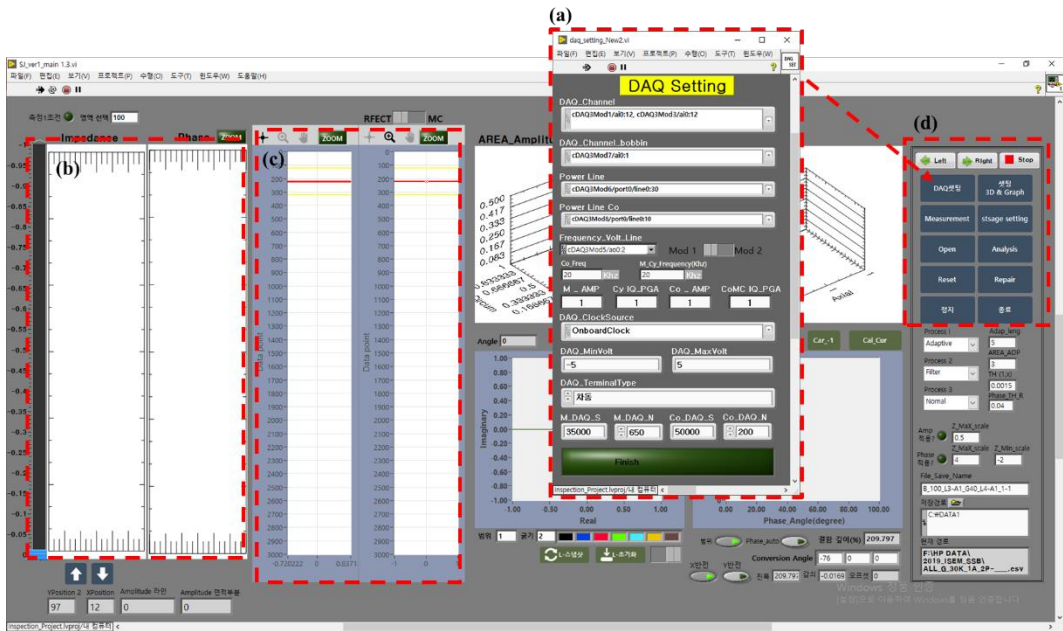


Fig. 3 -21 Measurement software

Fig.3-24의 (a)에서 ‘open’ 버튼은 클릭하면 (b)와 같은 활성화 창이 열람되며 정장 되었던 GMR 센서의 (c) Amplitude, Phase 신호와 (d) 보빈 코일 신호를 불러온다. (e)에서는 측정된 Amplitude, Phase 영상에서 특정 영역을 확대하여 3D surface 로 결합의 형상을 확인할 수 있다. (f)는 측정된 보빈코일의 X,Y 신호의 리사주 커브를 보여준다. (g)는 결합 깊이 100%~20%의 평가 영역을 나타낸다. (h)는 “차분해석”, “경향제거”, “고속푸리에변환”, “가버 변환” 과 같은 신호처리기법을 선택할 수 있다. 본 연구에서는 경향제거 신호처리기법만 활용하였다.

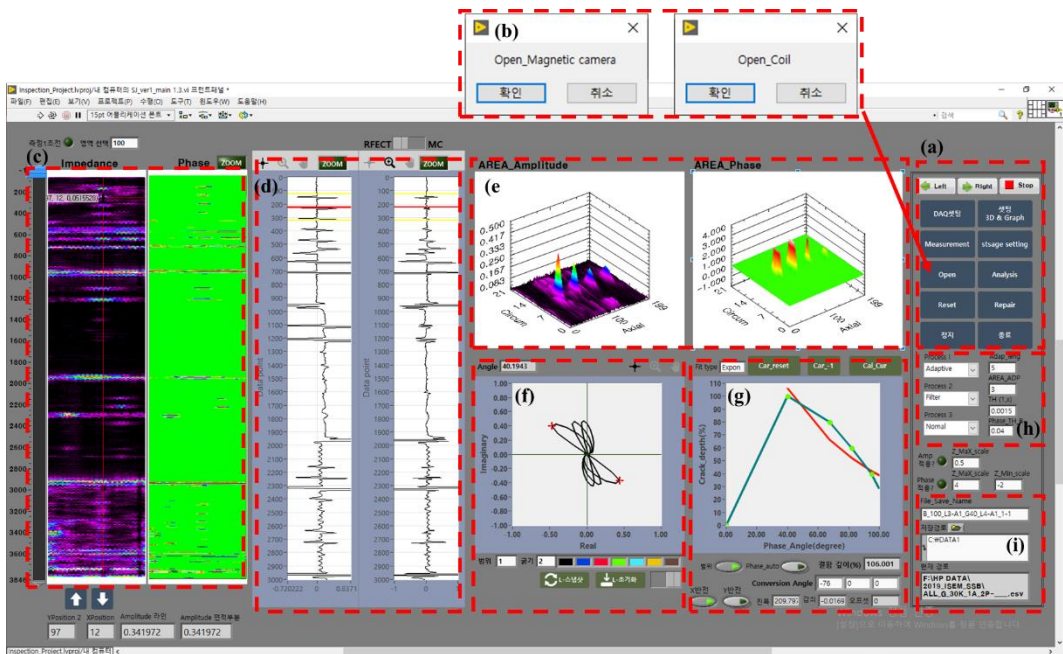


Fig. 3 -22 Analysis software

제 4 장 실험 및 고찰

본 장에서는 평저공(flat bottom hole), 내·외면의 환형 마모(groove), 마모(tapered wear, flat wear), 축 방향(Axial crack), 원주 방향 균열(Circumferential crack) 결함을 내경 13.33mm 두께 1.27mm 의 STS404 시험편에 인공 결함을 제작하였다. 또한 고압 급수가열기에서 인출한 실제 결함이 있는 시험편도 검사하였다. 인공 시험편을 이용하여 열교환기 전열관 비파괴검사 시스템의 유용성을 확인한 결과를 보고한다. 개발된 검사 프로브와 검사 장비를 이용하여 검사하였으며, 자동이송 장치(push-puller)를 이용하여 50mm/s 속도로 검사하였다.

제 1 절 시험편

1. 인공 시험편

인공 시험편은 제안된 검사 시스템의 성능을 검증하기 위해 사용한 인공 결함 시험편이다. 시험편은 오스테나이트계스테인리스강(STS304) 재질로서, 내경(ID, inside diameter)이 13.3mm이고 두께가 1.27mm이다. Fig.4-1과 Table 4-1은 시험편 표면에 평저공(FBH, flat bottom hole)을 시험편의 외부로부터 가공하였다. #A-1 결함은 100% 관통 홀형 결함으로 가공하였다, #A-2~4 결함은 깊이 80~20% 깊이로 결함을 가공하였다. #A-5는 직경 4.763mm, 깊이 20%인 4개의 FBH를 90° 간격으로 가공하였다 #A-6 결함은 폭 3.175mm, 깊이가 20%인 외면 환형마모(OD groove)이며, #A-7은 폭 1.27mm, 깊이가 10%인 내면 환형마모(ID groove) 결함이다.

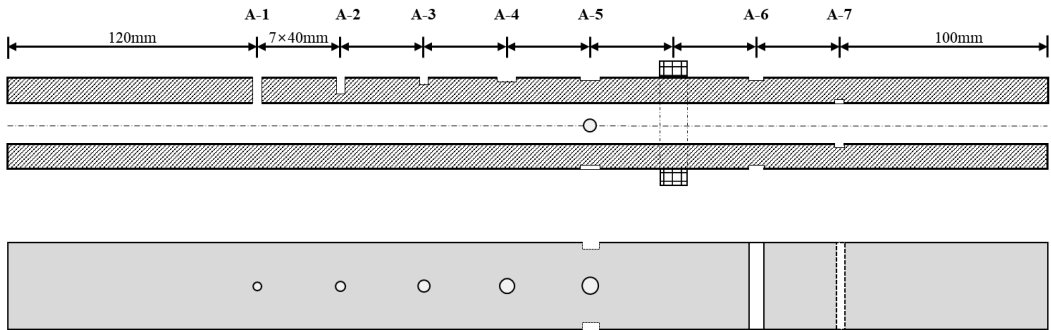


Fig. 4 -1 Specimen #A

Table 4 -1 Physical characteristics and sizes of defect specimen #A

#	Depth (%)	Depth (mm)	Diameter (mm)	Type
A-1	100	TWH	1.321	FBH
A-2	80	1.016	1.984	FBH
A-3	60	0.762	2.778	FBH
A-4	40	0.508	4.763	FBH
A-5	20	0.254	4.763	FBH
A-6	20	0.254	3.175	OD groove
A-7	10	0.127	1.588	ID groove

Fig.4-2과 Table 4-2는 한개의 시험편에 여러 가지 형태의 결함을 모사한 시험편이다. 표면에 180°에 위치한 #B-1 TW(tapered wear), #B-2 FW(flat wear)는 40% 깊이로 직각으로 파여져 있으며 다른 한쪽은 6.32mm 의 길이를 가지도록 경사형으로 가공된 결함이다. #B-3은 20% 깊이에 직경 2.778mm의 평저공(FBH) 결함이다. #B-4~5는 시험편에 축 방향(AN, axial notch)과 원주 방향(CN, circumferential notch)으로 40% 폭 0.127mm 깊이에 9mm 길이 결함이다. #B-6은 함몰(Dent) 형상으로 10% 깊이에 폭 5mm, 길이 10mm 형상을 가진다. #B-7 증기절단(SC, steam cut)을 모사한 결함으로서 깊이 20%, 폭 10mm, 길이 40mm이다.

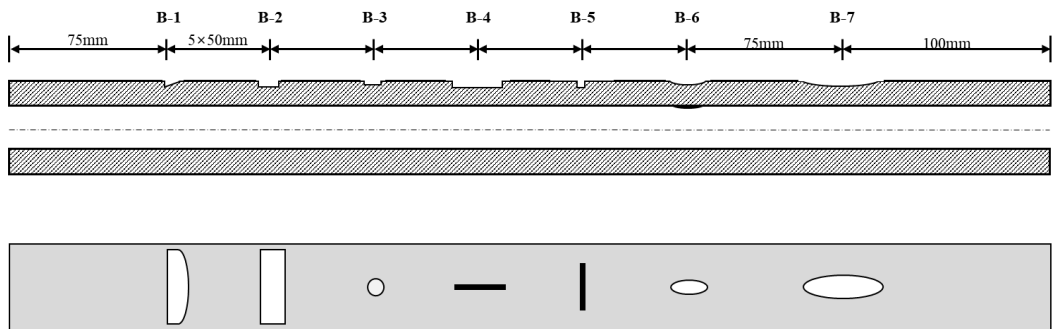


Fig. 4 -2 Specimen #B

Table 4 -2 Physical characteristics and sizes of defect specimen #B

#	Depth (%)	Depth (mm)	Diameter (mm)	Type
B-1	40	0.508	6.32	180° TW
B-2	40	0.508	6.32	180° FW
B-3	20	0.254	2.778	FBH
B-4	40	0.508	0.127/9.0	OD AN
B-5	40	0.508	0.127/9.0	OD CN
B-6	10	0.127	5/10	Dent
B-7	20	0.254	10/40	SC

Fig.4-3과 Table 4-3은 관통 구멍(TWH, through wall hole)과 AN과 CN의 결함을 서로 마주본 상태의 시험편이다. #C-1~2는 100%의 관통형 결함이다. #C-3~6은 원주방향으로 서로 마주 보는 축 노치 및 원주 노치로 100%~20% 깊이의 결함을 외면에 모사하였다. 또한, #C-7~9 결함 역시 원주방향으로 서로 마주 보는 축 노치 및 원주 노치로 60%~20% 깊이의 결함을 내면에 모사하였다.

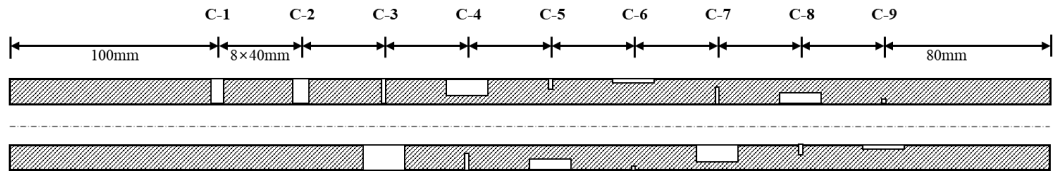


Fig. 4 -3 Specimen #C

Table 4 -3 Physical characteristics and sizes of defect specimen #C

# No	Depth (%)	Depth (mm)	Diameter (mm)	Type
C-1	100	TWH	1.0	FBH
C-2	100	TWH	1.76	FBH
C-3	100	TWH	0.127/9.0	OD CN / OD AN
C-4	60	0.762	0.127/9.0	OD AN / OD CN
C-5	40	0.508	0.127/9.0	OD CN / OD AN
C-6	20	0.254	0.127/9.0	OD AN / OD CN
C-7	60	0.762	0.127/9.0	ID CN / ID AN
C-8	40	0.508	0.127/9.0	ID CN / ID AN
C-9	20	0.254	0.127/9.0	ID CN / ID AN

2. 인출 시험편 (자연결함)

Fig. 4-4는 실제 고압급수가열기에서 추출한 전열관 시험편으로서 자연 결함이 포함되어 있다. 총 7개의 인출 시험편으로 N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7의 각 전열관 위치를 나타낸다. Table 4-4는 각 시험편의 실제 결함 수를 나타낸다.



Fig. 4 -4 Natural flaw specimens

Table 4 -4 Natural defect specimens

# No	identification	length	number of flaws
1	N1	108.3	2
2	N2	104.7	1
3	N3	105.6	1
4	N4	100.8	13
5	N5	88.0	4
6	N6	105.8	2
7	N7	108.0	1

제 2 절 실험장치

Fig.4-5는 본 연구를 통하여 개발한 보빈형 검사프로브 및 진폭 및 위상 신호 처리회로를 검증하기 위한 실험장치를 나타낸다. 검사프로브, 자동이송장치(Push-Puller), 전원 및 진폭 및 위상 신호처리장치(Control box), 노트북으로 구성된다. 500mm 시험편을 3개로 연결하여 검사를 진행하였다. 검사 속도는 50mm/s 로 검사 하였다.

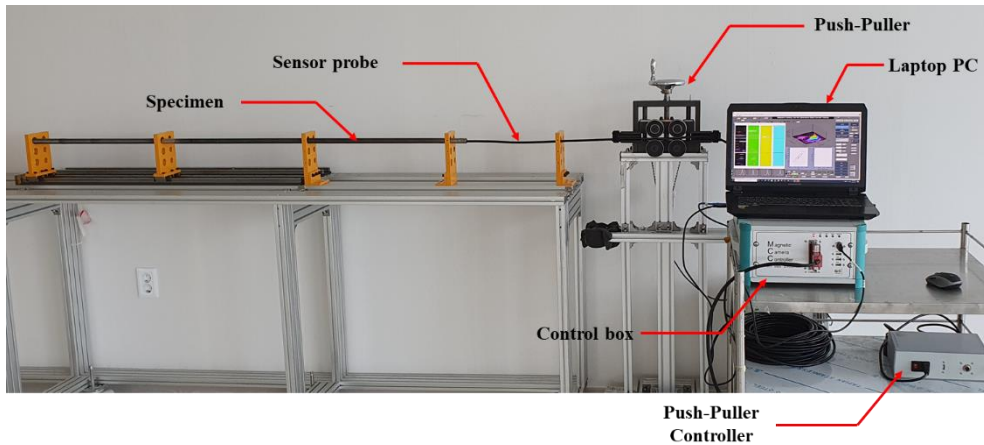


Fig. 4 -5 Experimental setup

제 3 절 검사장비 성능 평가

1. 결함 반복 측정 실험

서로 다른 깊이를 가지는 인공 결함 시험편을 활용하여 결함 검출능 및 크기에 대한 측정 오차를 평가하였다. 측정 결과는 식(24)에 의하여 표현되는 실효출력 오차(RMSE, root-mean-square error)에 의하여 평가하였다. 여기에서 $f(x_i)$ 는 amplitude 또는 phase에 의하여 도출된 깊이 평가용 정량평가식이다. y_i 는 n 회 측정된 값에 의하여 각각 평가된 결과를 나타낸다. 따라서, $y_i - f(x_i)$ 는 편차를 의미한다. 동일한 결함에 대하여 10회씩 측정하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2}{n - 2}} \quad (24)$$

시험편은 평저공(FBH, flat bottom hole) 시험편은 사용하였다. #A-1~5 결함은 깊이가 100~20% 깊이로 가공된 결함이다. 입력주파수는 각각 50kHz를 사용하였다. 10회 측정한 후, 정량평가 한 결과 Fig.4-6에 나타낸 바와 같이 5.85mV의 RMSE를 나타냈다.

Table 4-5 Error evaluation by repeated defect measurement

	D		E		F		G		H	
	$f(x_i)=20\%$		$f(x_i)=40\%$		$f(x_i)=60\%$		$f(x_i)=80\%$		$f(x_i)=100\%$	
	y_i	deviation	y_i	deviation	y_i	deviation	y_i	deviation	y_i	deviation
1	26.07	-6.07	41.01	-1.01	53.24	6.76	73.90	6.10	105.77	-5.77
2	26.99	-6.99	41.07	-1.07	56.28	3.72	72.30	7.70	107.51	-7.51
3	26.08	-6.08	39.31	0.69	54.09	5.91	75.01	4.99	110.25	-10.25
4	25.75	-5.75	41.35	-1.35	54.52	5.48	71.05	8.95	106.97	-6.97
5	25.72	-5.72	38.78	1.22	55.31	4.69	72.73	7.27	106.88	-6.88
6	25.64	-5.64	41.72	-1.72	54.76	5.24	70.14	9.86	104.31	-4.31
7	25.71	-5.71	39.02	0.98	56.86	3.14	71.75	8.25	104.75	-4.75
8	25.99	-5.99	40.58	-0.58	57.25	2.75	73.19	6.81	105.43	-5.43
9	25.99	-5.99	40.58	-0.58	55.68	4.32	73.19	6.81	109.03	-9.03
10	25.93	-5.93	40.84	-0.84	57.61	2.39	72.62	7.38	106.04	-6.04
RMSE	6.71		1.19		5.19		8.42		7.74	
	5.85									

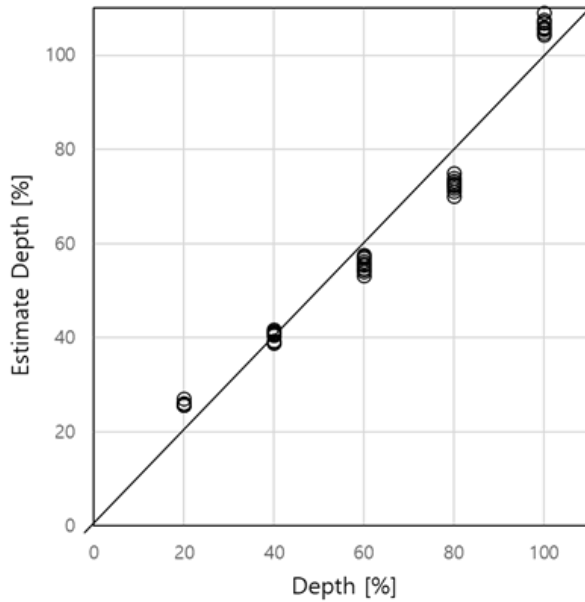


Fig. 4-6 Experimental result of repetition

2. 스캔속도 영향 평가

결함의 크기를 평가하는데 영향을 미칠 수 있는 검사 속도에 따른 수집신호의 품질을 검증하는 것이다. 시험편 #A의 결함 #A-1_100%, #A-2_80%, #A-3_60% OD FBH을 대상으로 하였다. 검사속도는 5" /sec~25" /sec 범위에서 스캔속도를 5" /sec 단위로 증가시키며 수행하였다.

Table 4-6은 5" /sec ~ 25" /sec의 속도로 스캔하였을 때, 3개의 FBH에 대하여 출력되는 신호를 나타낸다. 각 결함의 위치를 정확하게 지시하지만, 25" /sec에서는 결함 신호가 약해진다. 이때 각 결함에 대하여 속도에 따른 최대값의 변화를 Table 4-6에 나타낸다. 여기에서 속도에 따른 최대값의 변화를 정량적으로 파악하기 위하여 식 (25)로 표현되는 δS 를 구하였다. 그 결과, Fig.4-7에 나타난 바와 같이 5" /sec에서 최대 출력값을 100%이라 하였을 때, 스캔속도에 따라서 감소하여 10" /sec에서는 $\delta S=70\%$, 25" /sec에서는 $\delta S=30\%$ 까지 저하하였다.

$$\delta S = \frac{100 \times V_{max}(\phi, z, v)}{V_{max}(\phi, z, 5)} (\%) \quad (25)$$

Table 4-6 Change of maximum value according to inspection speed

Depth(%)	Inspection speed (inch/sec)					
	5	10	15	20	25	
100%	47	44	37.7	28.7	28	$\times 10^{-4}$
80%	33.7	37.4	31.2	26.3	25	$\times 10^{-4}$
60%	33.2	40	35	27.5	26.7	$\times 10^{-4}$

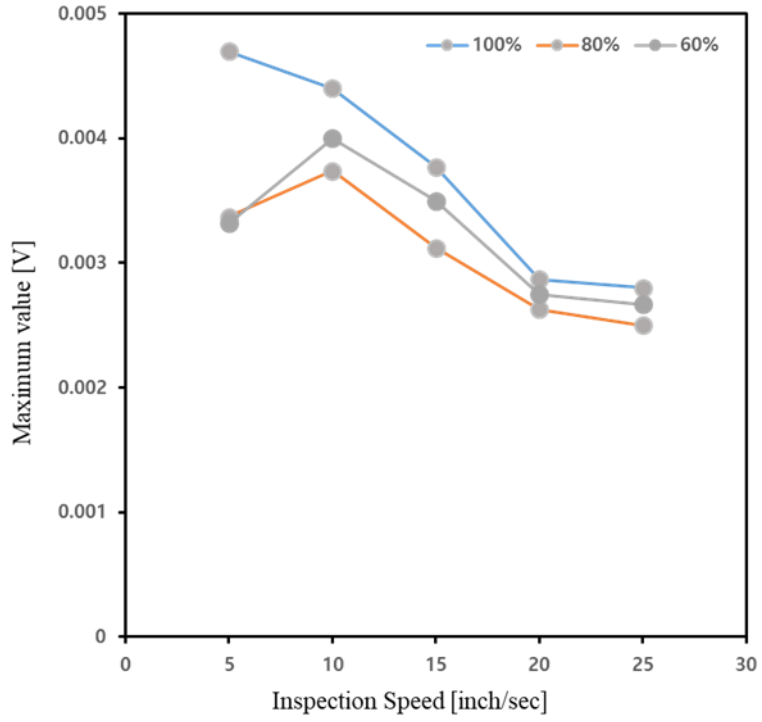


Fig. 4 -7 Effect of scanning speed

3. 360° 커버리지 성능

360° 커버리지 성능은 배열형 ECT에서 가장 중요한 성능 중 하나이다[40-41]. 이는 전술한 바와 같이 자기센서를 환형으로 배열하였을 때, 센서간의 전자기적 간섭을 최소화하기 위하여 공간분해능을 저하시킬 필요가 있기 때문이다. 즉, 공간분해능의 저하는 결함의 검출 성능을 저하시킨다. 따라서, 결함이 인접한 센서 사이에 존재함에도 불구하고, 결함 검출능을 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 360° 커버리지 성능을 평가하기 위하여 자기카메라의 센서부를 시험편에 내삽한 후, 60%의 FBH에 위치하였다. 그리고, 시험편을 회전하면서 각 센서별 출력을 측정하였다. Fig 4-8은 측정예로서 종축은 센서의 각 채널을 나타내며, 횡축은 회전각도를 나타낸다. 4회 이상 회전하여 데이터를 취득한다. 그리고, 빗금 무늬는 각 채널별 최대값($V_{max}(i)$)을 지시한다. 360° 커버리지의 평가는 다음 식으로 표현되는 정규화(normalizing)한 값을 원형 그래프에 표현하여 정성적으로 비교하였다. 정량적으로는 정규화한 값의 평균과 최소값으로 비교하였다.

$$V_{normal}(i, \emptyset) = \frac{V(i, \emptyset)}{V_{max}(i)} (\%) \quad (26)$$

$$V_{average} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^n \sum_{\emptyset=1}^m V_{normal}(i, \emptyset) (\%) \quad (27)$$

$$V_{min} = \min\{V_{normal}(i, \emptyset)\} (\%) \quad (28)$$

본 연구에서 적용한 자기카메라의 BIGiS는 1.5mm의 센서 공간분해능(16.36° 각도분해능)을 가지며, Fig.4-9에 나타낸 바와 같이 평균 95~96%, 최소 83%의 360° 커버리지를 얻을 수 있었다.

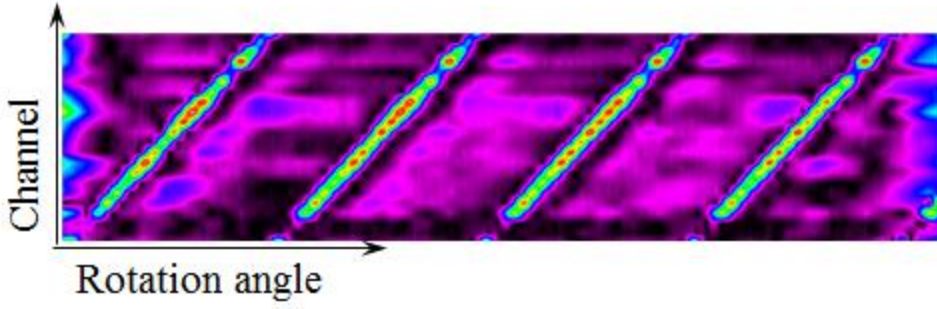


Fig. 4 -8 Raw data for evaluating coverage performance

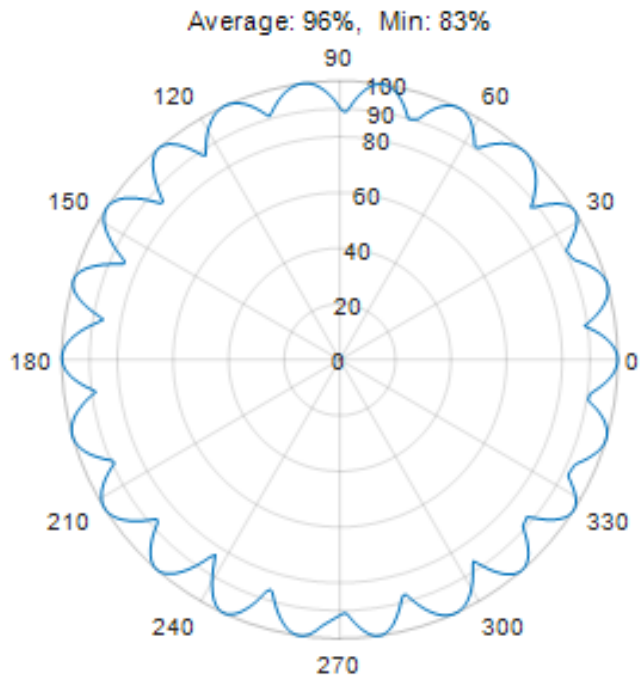


Fig. 4 -9 360° coverage performance

제 4 절 결함 검출능 평가

1. 결함 유무 판정

Fig.4-10, Fig.4-11은 Fig.4-1의 평저공 결함과 환형 마모 결함을 가지는 시험편의 차동형 보빈 코일 실험 결과를 나타낸다. 차동형 보빈 코일에 주파수 50kHz, 100kHz, 150kHz의 교류 전원을 입력하였다. 주파수가 높아짐에 따라 결함 유무 및 리사주선도의 위상각을 측정하였다.

#A-1는 평저공 관통 결함(THW)으로 다른 결함의 깊이 검출에 있어 기준이 되는 신호로 사용하기 위해 50kHz, 100kHz, 150kHz에서의 위상각을 40°로 설정하였다. 이는 위상각 퍼짐 및 결함 측정에 대한 ASME 코드 요건을 참고하였다[42-44]. -X 축을 0°로 지정하여 +X 축으로 벌어지는 위상각을 측정한다. 이때 결함에 대한 리사주 선도는 4/4분면에서 2/4분면으로 신호가 나타난다. #A-2는 80% 깊이, 직경 1.984mm를 가지는 평저공 결함을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 55.26°를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 67.47°, 150kHz에서는 70.89°의 위상각을 얻을 수 있다.

#A-3은 60% 깊이의 평저공 결함을 나타낸다. 50kHz에서의 위사각은 62.89°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 81.61°, 150kHz는 83.42°의 위상각을 측정하였다.

#A-4는 40% 깊이의 평저공 결함을 나타낸다. 50kHz에서의 위사각은 73.38°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 94.60°, 150kHz는 95°의 위상각을 측정하였다.

#A-5는 20% 깊이의 4개의 평저공 결함이 90°에 위치에 있는 것을 나타낸다. 결함은 4개를 지시하지만 차동형 보빈 코일에서는 결함의 수와 상관 없이 깊이에 따른 리사주 선도를 표현 되었으며 리사주 선도의 결과만으로는 결함의 수를 알수는 없다. 50kHz에서의 위사각은 81.62°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 103.29°, 150kHz는 114.32°의 위상각을 측정하였다.

#A-6은 외면에 20% 깊이의 환형 마모를 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 73.24°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 97.06°, 150kHz는 101.30°의 위상각을 측정하였다.

#A-7은 내면에 10% 깊이의 환형 마모를 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 30.25°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 19.56°, 150kHz는 17.36°의 위상각을 측정하였다.

#A-1~5의 결함은 동일한 모양의 평저공 결함에 깊이 20% 씩 깊어지는 결함을 나타낸다. 측정 결과에서는 50kHz, 100kHz, 150kHz의 주파수와 상관없이 깊이가 얕을수록 위상각이 커진다. 한편, 외면에 존재하는 결함의 경우에는 주파수가 높아짐에 따라 위상각이 커지며, 리사주 신호는 시계방향으로 회전한다. 반면에 내면에 존재하는 결함에 경우에는 40° 이하의 리사주 선도가 나타난다. 그리고, 주파수가 높아짐에 따라, 위상각은 시계 반대 방향으로 회전한다.

이러한 정성평가를 통하여 결함 유무는 물론 결함의 위치(ID, OD)를 판별할 수 있다.

Table 4-7 Phase changes with specimen #A

#	Type	Depth (%)	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
A-1	THW	100	40.00	40.00	40.00
A-2	FBH	80	55.26	67.47	70.89
A-3	FBH	60	62.89	81.61	83.34
A-4	FBH	40	73.38	94.60	95.00
A-5	FBH	20	81.62	103.29	114.32
A-6	OD groove	20	73.24	97.06	101.30
A-7	ID groove	10	30.25	19.56	17.36

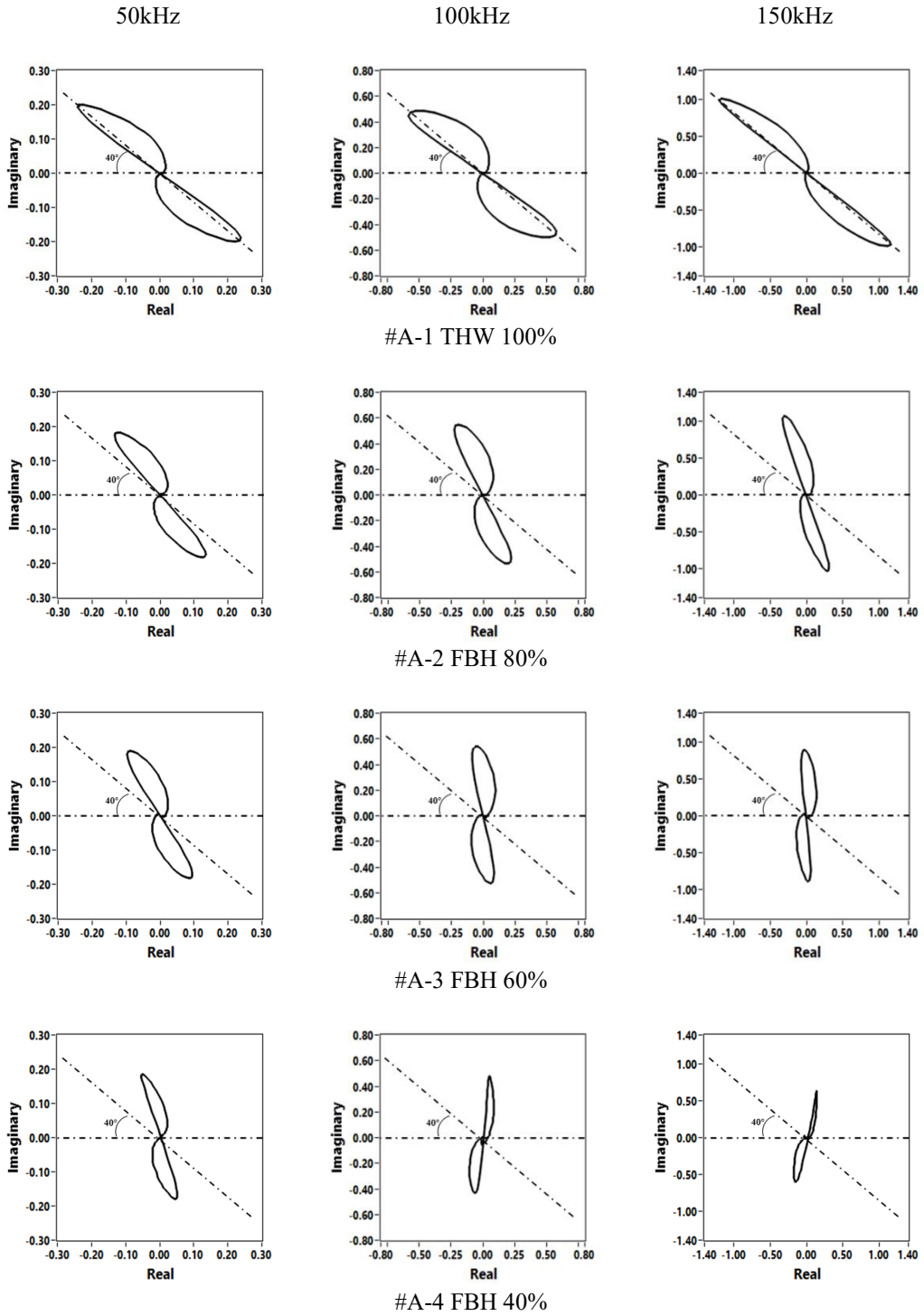


Fig. 4 -10 Lissajous curve with specimen #A (1/2)

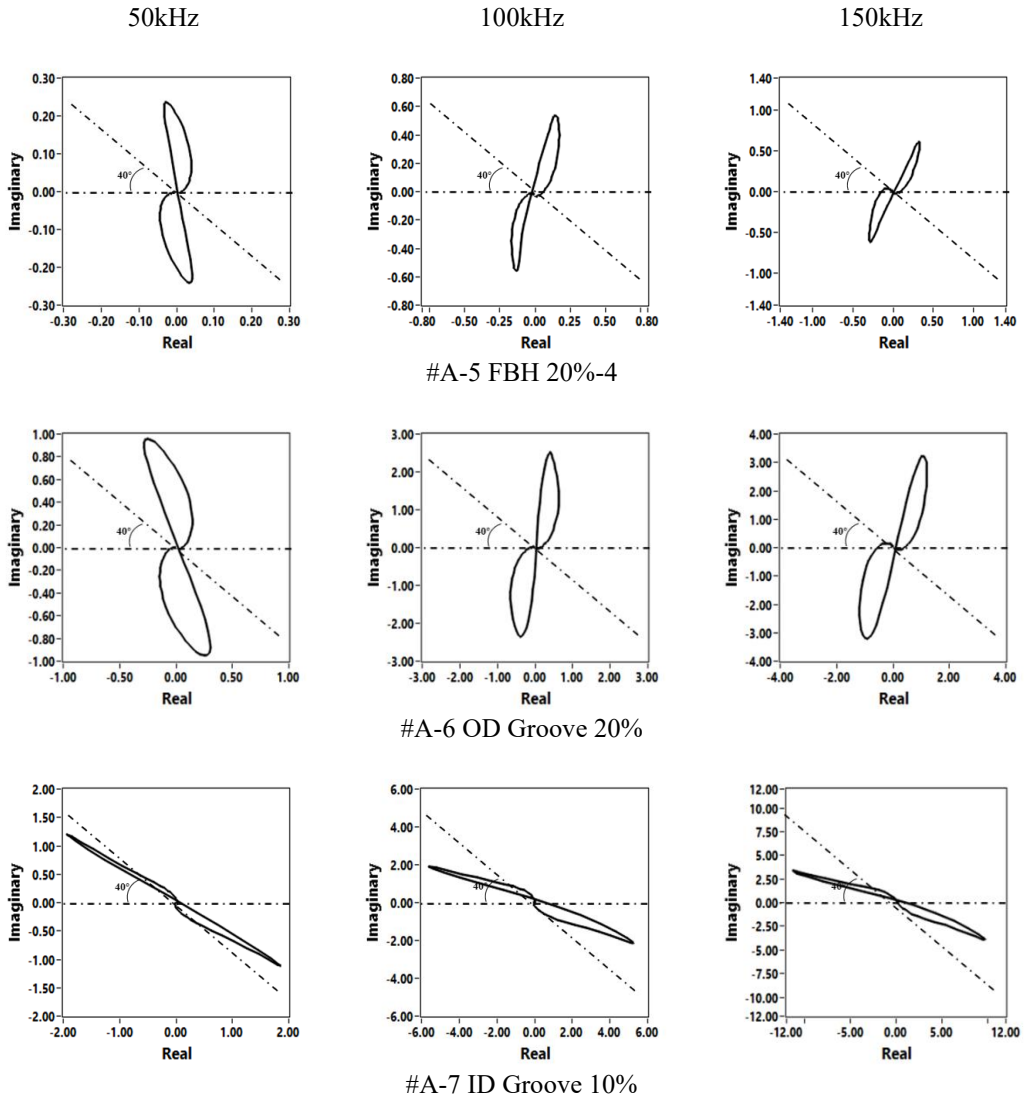


Fig. 4 -11 Lissajous curve with specimen #A (2/2)

Fig.4-12, Fig.4-13, Table 4-8은 Fig.4-2의 TW(tapered wear), FW(flat wear)와 평저공(FBH), 축 방향(AN, axial notch)과 원주 방향(CN, circumferential notch)의 슬릿결함, 함몰(Dent) 형상, 증기 절단(SC, steam cut)의 결함들을 가지는 시험편의 차동형 보빈 코일 실험 결과를 나타낸다. 차동형 보빈 코일에 주파수 50kHz, 100kHz, 150kHz의 교류 전원을 입력하였다. 주파수가 높아짐에 따라 결함 유무 및 리사주선도의 위상각을 측정하였다.

#B-1는 깊이 40%의 TW 결함을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 50.04°를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 67.98°, 150kHz에서는 70.66°의 위상각을 얻을 수 있다. #B-2는 깊이 40%의 180°로 넓게 퍼진 FW 결함을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 49.38°를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 68.23°, 150kHz에서는 72.12°의 위상각을 얻을 수 있다. #B-3은 20% 깊이의 평저공 결함을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 49.47°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 68.99°, 150kHz는 78.46°의 위상각을 측정하였다.

#B-4는 40% 깊이의 축 방향(AN, axial notch) 결함을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 59.23°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 81.15°, 150kHz는 87.34°의 위상각을 측정하였다. #B-5는 40% 깊이의 원주 방향(CN, circumferential notch) 결함을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 44.65°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 64.10°, 150kHz는 71.91°의 위상각을 측정하였다.

#B-6는 10% 깊이의 함몰(Dent) 되어 있는 결함을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 15.61°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 6.45°, 150kHz는 12.91°의 위상각을 측정하였다. #B-7는 20% 깊이로 40mm 길이로 넓게 퍼져있는 증기 절단(SC, steam cut)에 의한 결함형상을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 80.66°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 105.75°, 150kHz는 110.46°의 위상각을 측정하였다.

#B-1~2의 결함은 동일한 깊이 40%의 TW, FW 결함을 나타낸다. 서로 결함 모양은 다르지만 깊이가 같은 경우에는 $\pm 2^\circ$ 의 범위에서 위상각의 차이가 나타났다.

결과적으로 결함 형상에 관계없이 결함 깊이를 평가할 수 있다. 또한 동일한 40%의 깊이를 가지는 축방향 결함(AN, axial notch)의 경우는 리사주 선도에서 결함 유무 및 결함을 지시하는 패턴이 나타났다. 그러나, 과 원주 방향(CN, circumferential notch) 결함의 경우에는 이러한 경향이 보이지 않았다. 종래의 상용화된 ECT의 경우에도, 원주 방향의 결함은 검출하기 곤란하다.

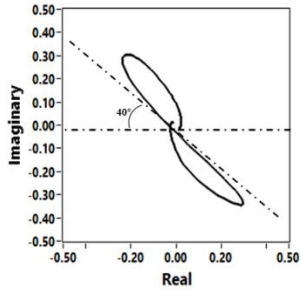
측정 결과에서는 50kHz, 100kHz, 150kHz의 주파수에 관계없이 깊이가 얕아질수록 위상각이 커진다. 또한, 주파수가 높아짐에 따라 OD 결함의 깊이에 따른 위상각이 커지며, 리사주선도의 패턴은 시계방향으로 회전한다.

#B-6의 Dent 결함을 제외한 결함들은 주파수가 높아짐에 따라 시계방향으로 회전한다. 또한, 주파수 변화에 따른 위상각의 변화도 커진다. 결함의 존재에 기인한 리사주 선도의 패턴은 4/4분면에서 2/4분면에서 끝난다. 하지만, #B-6의 Dent 결함은 주파수가 변화에 따른 위상각이 시계방향의 변화가 아니다. 또한, 리사주 선도의 패턴은 2/4분면에서 4/4분면에서 끝나므로, 결함의 리사주선도 패턴과는 다르다.

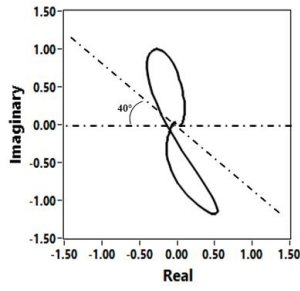
Table 4-8 Phase changes with specimen #B

#	Type	Depth (%)	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
B-1	180° TW	40	50.04	67.98	70.66
B-2	180° FW	40	49.38	68.23	72.12
B-3	FBH	20	49.47	68.99	78.46
B-4	OD AN	40	59.23	81.15	87.34
B-5	OD CN	40	44.65	64.10	71.91
B-6	Dent	10	15.61	6.45	12.91
B-7	SC	20	80.66	105.75	110.46

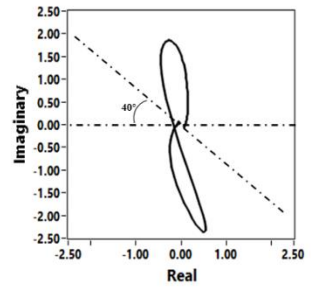
50kHz



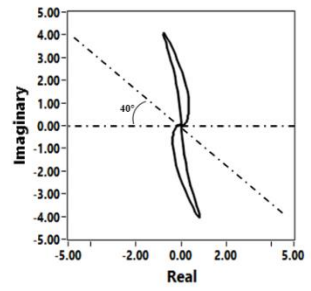
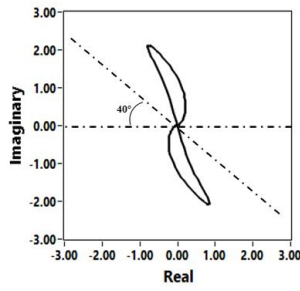
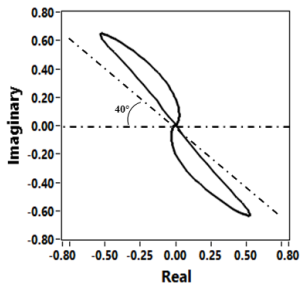
100kHz



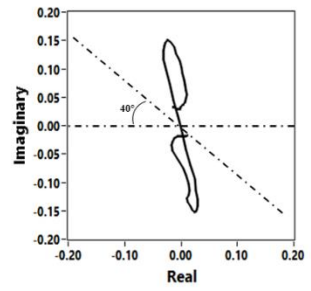
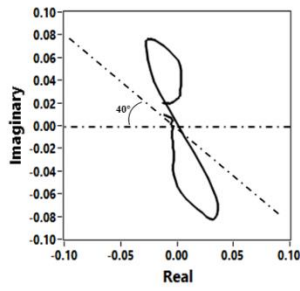
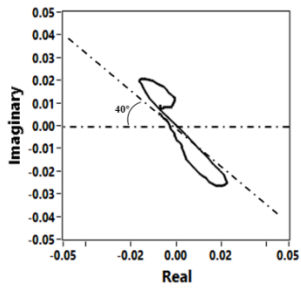
150kHz



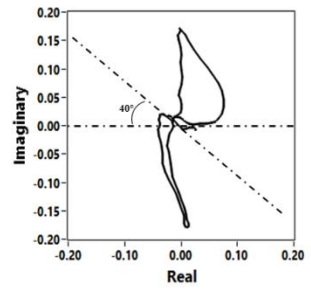
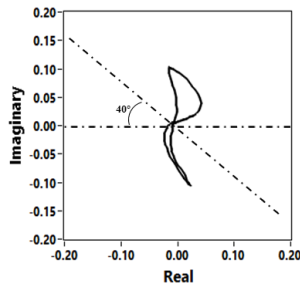
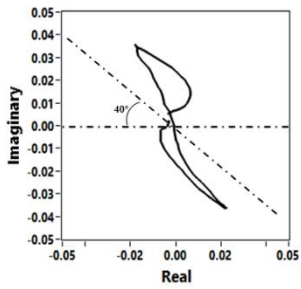
#B-1 TW 40%



#B-2 FW 40%



#B-3 FBH 20%



#B-4 OD AN 40%

Fig. 4 -12 Lissajous curve with specimen #B (1/2)

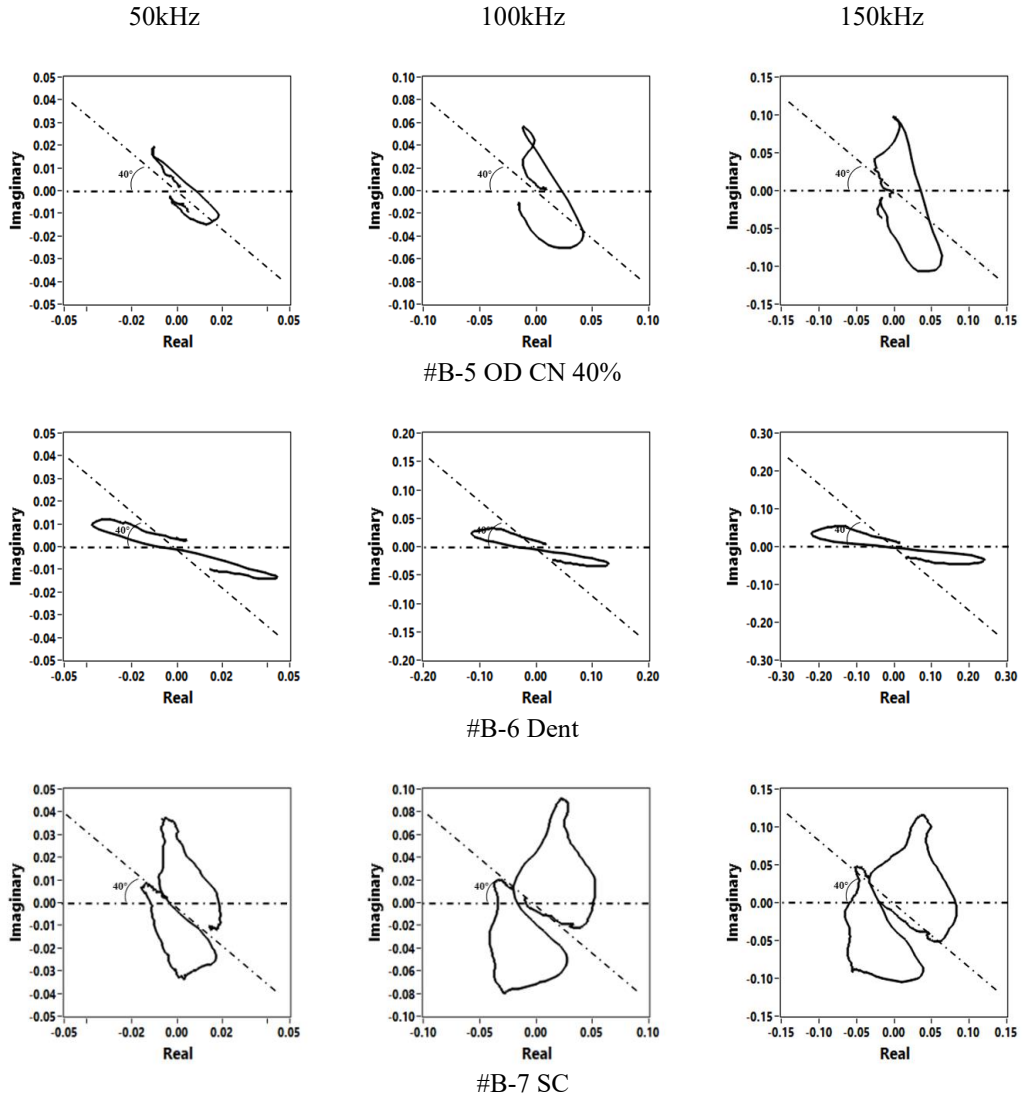


Fig. 4 -13 Lissajous curve with specimen #B (2/2)

Fig.4-14, Fig.4-15, Fig.4-16은 Fig.4-3의 관통형의 평저공(TWH)과 축 방향(AN, axial notch)과 원주 방향(CN, circumferential notch)의 슬릿결합이 서로 180°에 위치하며 마주보고 있는 결합을 나타낸다. 또한 외면과 내면에 걸쳐 결합을 표시하였다. 차동형 보빈 코일에 주파수 50kHz, 100kHz, 150kHz의 교류 전원을 입력하였다. 주파수가 높아짐에 따라 결합 유무 및 리사주선도의 위상각을 측정하였다.

#C-1,2는 평저공 관통 결합(THW)으로 다른 결합의 깊이 검출에 있어 기준이 되는 신호로 사용하기 위해 50kHz, 100kHz, 150kHz에서의 위상각을 40°로 설정해 놓았다. 리사주 선도의 신호는 결합 패턴을 가지는 4/4분면에서 2/4분면으로 그려진다. #C-3은 깊이 100% 관통형 슬릿 결합을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 42.21°를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 41.30°, 150kHz에서는 40.16°의 위상각을 얻을 수 있다.

#C-4는 60% 깊이의 외면에 위치한 AN/CN 결합을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 73.28°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 90.25°, 150kHz는 93.46°의 위상각을 측정하였다. #C-5는 40% 깊이의 외면에 위치한 CN/AN 결합을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 102.03°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 125.13°, 150kHz는 134.11°의 위상각을 측정하였다. #C-6는 20% 깊이의 외면에 위치한 AN/CN 결합을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 55.81°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 56.99°, 150kHz는 45.79°의 위상각을 측정하였다.

#C-7는 60% 깊이의 내면에 위치한 CN/AN 결합을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 39.43°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 36.32°, 150kHz는 35.12°의 위상각을 측정하였다. #C-8는 40% 깊이의 내면에 위치한 AN/CN 결합을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 29.02°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 22.16°, 150kHz는 18.75°의 위상각을 측정하였다. #C-9는 20% 깊이의 내면에 위치한 CN/AN 결합을 나타낸다. 50kHz에서의 위상각은 35.32°도를 나타낸다. 주파수가 증가 함에 따라 100kHz에서는 29.45°, 150kHz는 28.75°의 위상각을 측

정하였다.

측정 결과에서는 동일 위치에 여러 개의 결함이 존재할 경우, 한개의 결함이 있는 것으로 인식한다. 또한, 50kHz, 100kHz, 150kHz의 주파수가 높아짐에 따라 외면의 결함은 시계 방향으로 회전을 하며, 내면 결함은 시계 반대 방향으로 회전을 하였다. 모든 결함의 리사주 선도에 패턴은 2/4분면에서 4/4분면에서 끝나는 패턴을 보였다. 한편, 20%의 결함을 제외한 나머지 결함들은 깊이가 얕아질수록 위상각이 커지는 것을 알 수 있다.

이러한 정성평가를 통하여 결함 유무는 물론 결함의 위치(ID, OD)를 판별할 수 있다. 한편, #C-7~9의 ID AN/CN 결함의 리사주 선도는 주파수가 변화에 따른 위상각이 시계반대방향의 변화가 나타나므로 내면 결함의 특징을 보였다. 또한, Table 4-9은 주파수 변화에 따른 결함 별 위상각을 나타낸다.

Table 4-9 Phase changes with specimen #C

#	Type	Depth (%)	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
C-1	FBH	100	42.34	42.22	41.20
C-2	FBH	100	40.67	38.7	42.34
C-3	CN / AN	100	42.21	41.30	40.16
C-4	OD AN / OD CN	60	73.28	90.25	93.46
C-5	OD CN / OD AN	40	102.03	125.13	134.11
C-6	OD AN / OD CN	20	55.81	56.99	45.79
C-7	ID CN / ID AN	60	39.43	36.32	35.12
C-8	ID CN / ID AN	40	29.02	22.16	18.75
C-9	ID CN / ID AN	20	35.32	29.35	28.75

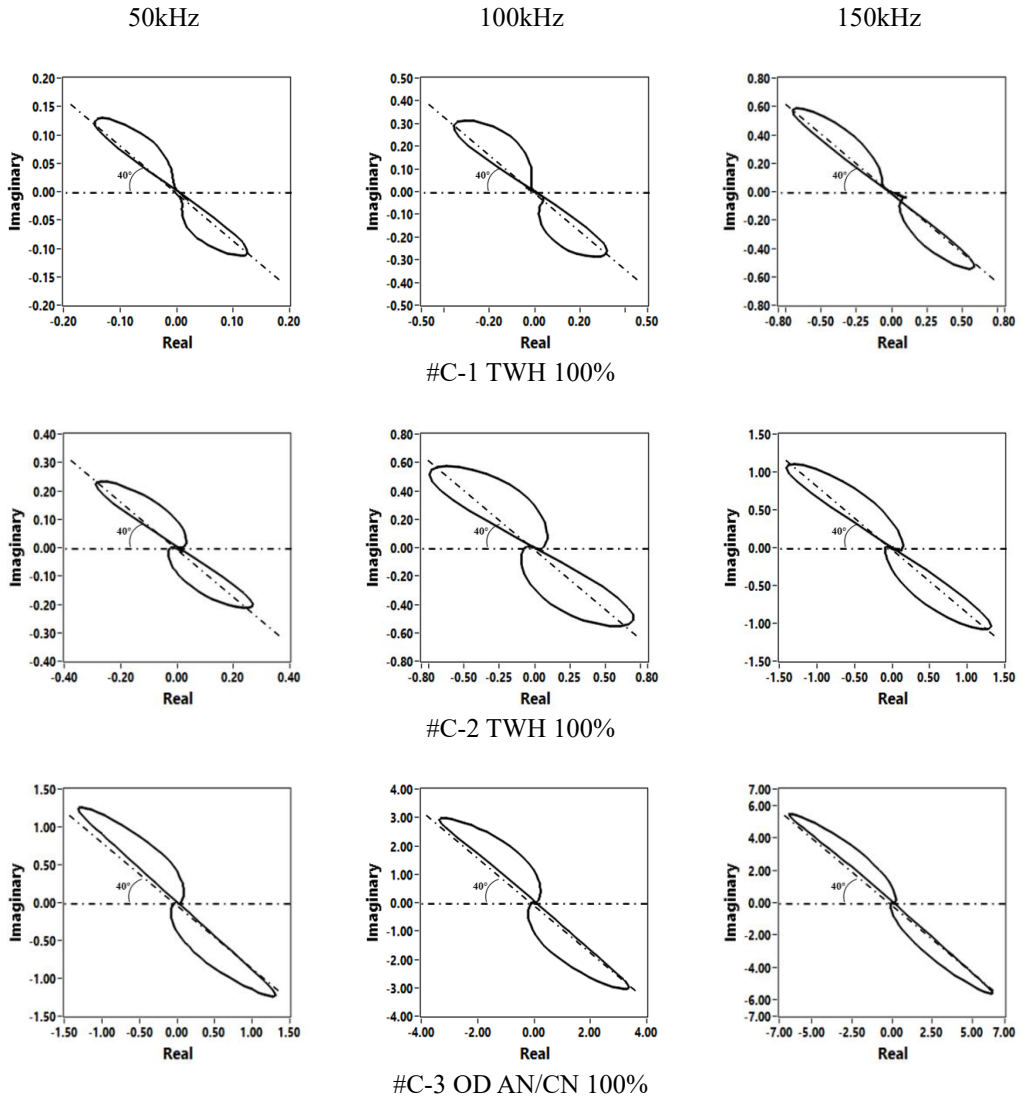


Fig. 4 -14 Lissajous curve with specimen #C (1/3)

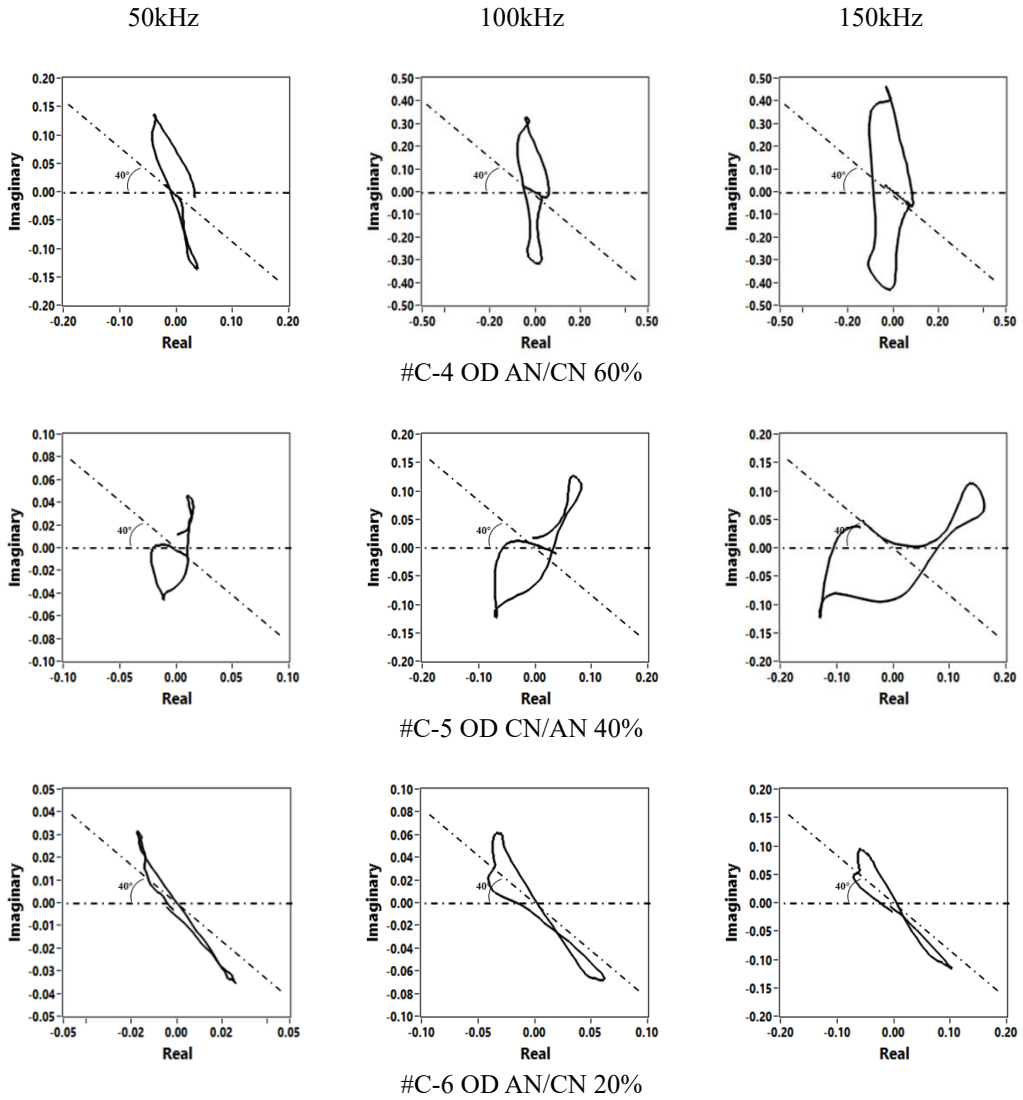


Fig. 4 -15 Lissajous curve with specimen #C (2/3)

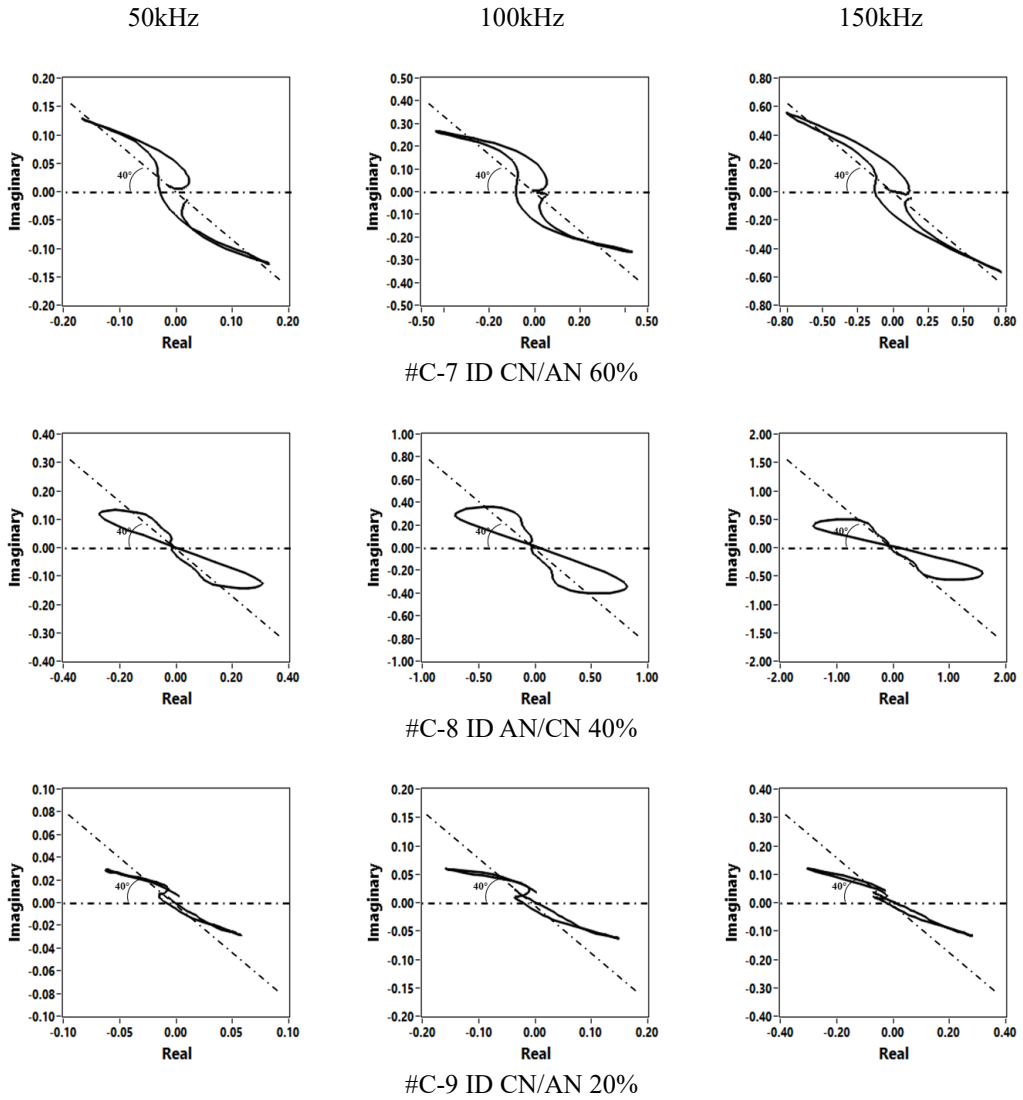


Fig. 4 -16 Lissajous curve with specimen #C (3/3)

2. 결함 형상 판별

Fig.4-17은 Fig.4-1의 시험편 이용하여 실험한 자기카메라의 배열형 자기센서 (BIGiS)에 의한 측정 결과를 나타낸다. Fig.4-18은 각 결함의 형상을 해석하기 50mm 영역만큼을 따로 확대하여 표현하였다. 측정된 신호는 X, Y 신호와 소프트웨어 처리를 한 Amplitude, Phase 4가지 신호를 가지고 결함 해석을 한다. 사용 주파수는 50kHz를 사용 하였다.

#A-1~4 결함의 경우 평저공 결함을 나타낸다. 깊이 100%~40%로 변화함에 따라 출력 되는 amplitude 신호의 값도 줄어든다. 이를 통해 변화에 따른 출력신호를 확인 할 수 있다. 또한 20% 깊이에 90° 간격으로 4개의 평저공을 가지는 #A-5의 경우에는 영상에 나타나는 것과 같이 4개의 신호가 지시된다. 차동형 보빈 코일에 서 알 수 없는 결함 형상과 결함 개수 및 전열관 내에서의 결함 위치를 파악 할 수 있다.

#A-6은 20% 깊이의 OD 환형 마모를 나타내며, 22개 센서 전역에서 신호를 감지하여 원주방향 전반에 걸쳐 결함이 존재함을 알 수 있다. 또한 #A-7은 내면에 10% 깊이의 환형 마모를 나타내며, #A-6과 같이 표현 된다. 결함 깊이에 따른 진폭의 변화를 알 수 있다.

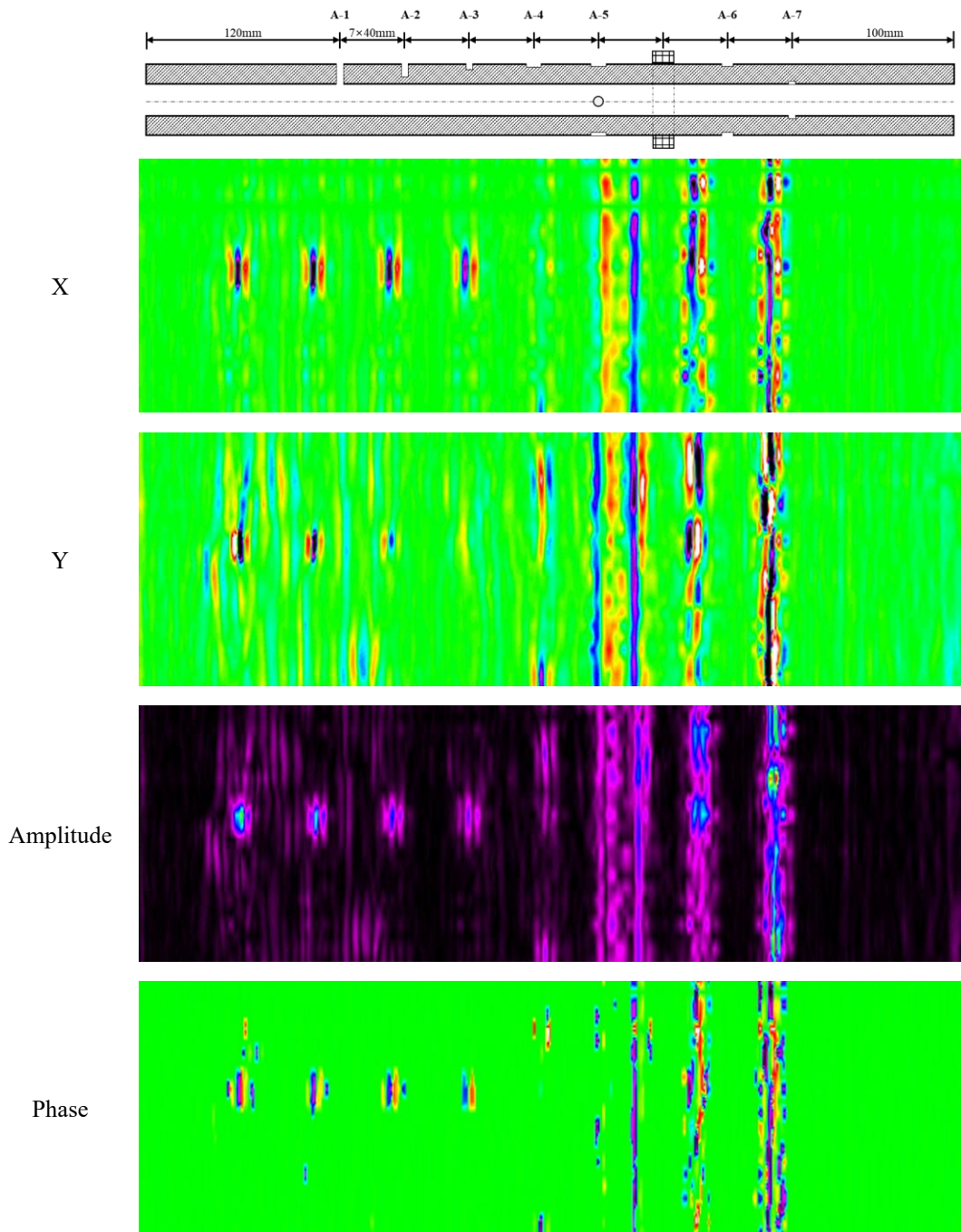
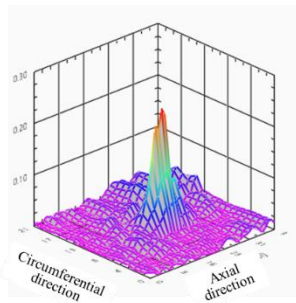
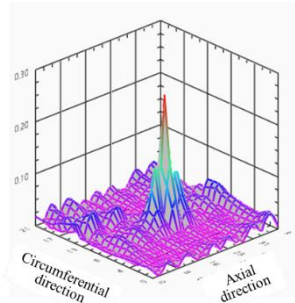


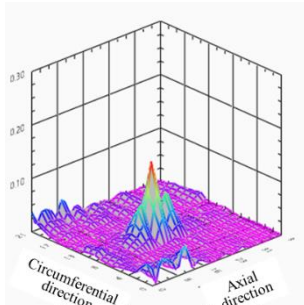
Fig. 4 -17 Continuous magnetic images with specimen #A



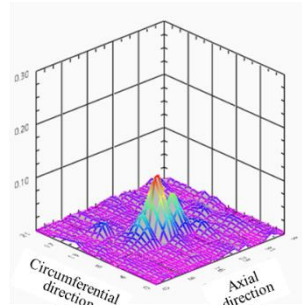
#A-1 THW



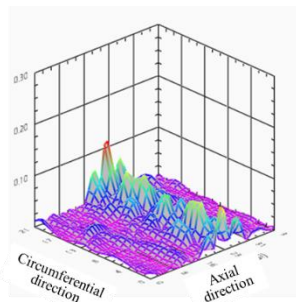
#A-2 FBH 80%



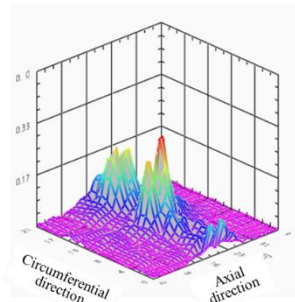
#A-3 FBH 60%



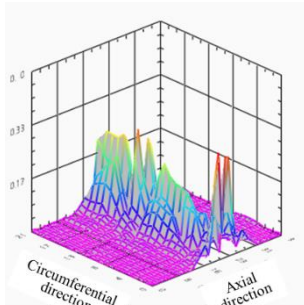
#A-4 FBH 40%



#A-5 FBH 20%-4



#A-6 OD Groove 20%



#A-7 ID Groove 10%

Fig. 4 -18 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #A

Fig.4-19는 Fig.4-2의 시험편 이용하여 실험한 BIGiS 측정 영상 결과를 나타낸다. Fig.4-20은 각 결함의 형상을 해석하기 50mm 영역만큼을 따로 확대하여 표현하였다. 측정된 신호는 X, Y 신호와 이를 계산하여 얻은 진폭(amplitude)과 위상각(phase)의 4가지 신호로 환산하였다. 사용 주파수는 50kHz이다.

#B-1~2 결함의 경우 TW, FW를 나타낸다. 결함 영상에서도 두결함은 넓은 영역에 걸쳐 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 #B-4의 경우 축방향 슬릿형 결함으로 일부 센서에서만 검출되나, 축방향으로 긴 형태의 자기영상을 얻을 수 있다. #B-5의 원주방향 슬릿형 결함은 축방향에 비해 상대적으로 많은 갯수의 센서에서 신호가 감지되며, 이를 연결한 원주 방향으로 긴 형태의 자기영상을 얻을 수 있다.

#B-6은 Dent 결함도 영상에 나타나는 것을 알 수 있다. #B-7의 SC는 결함과 동일 하게 넓은 영역에서 영상이 나타나는 것을 알 수 있다.

BIGiS 결과에서 넓은 영역의 마모 결함과 작은 영역에 축 방향, 원주 방향의 슬릿 결함을 측정 할 수 있었다. 또한 결함의 형상을 정성적으로 평가할 수 있었다.

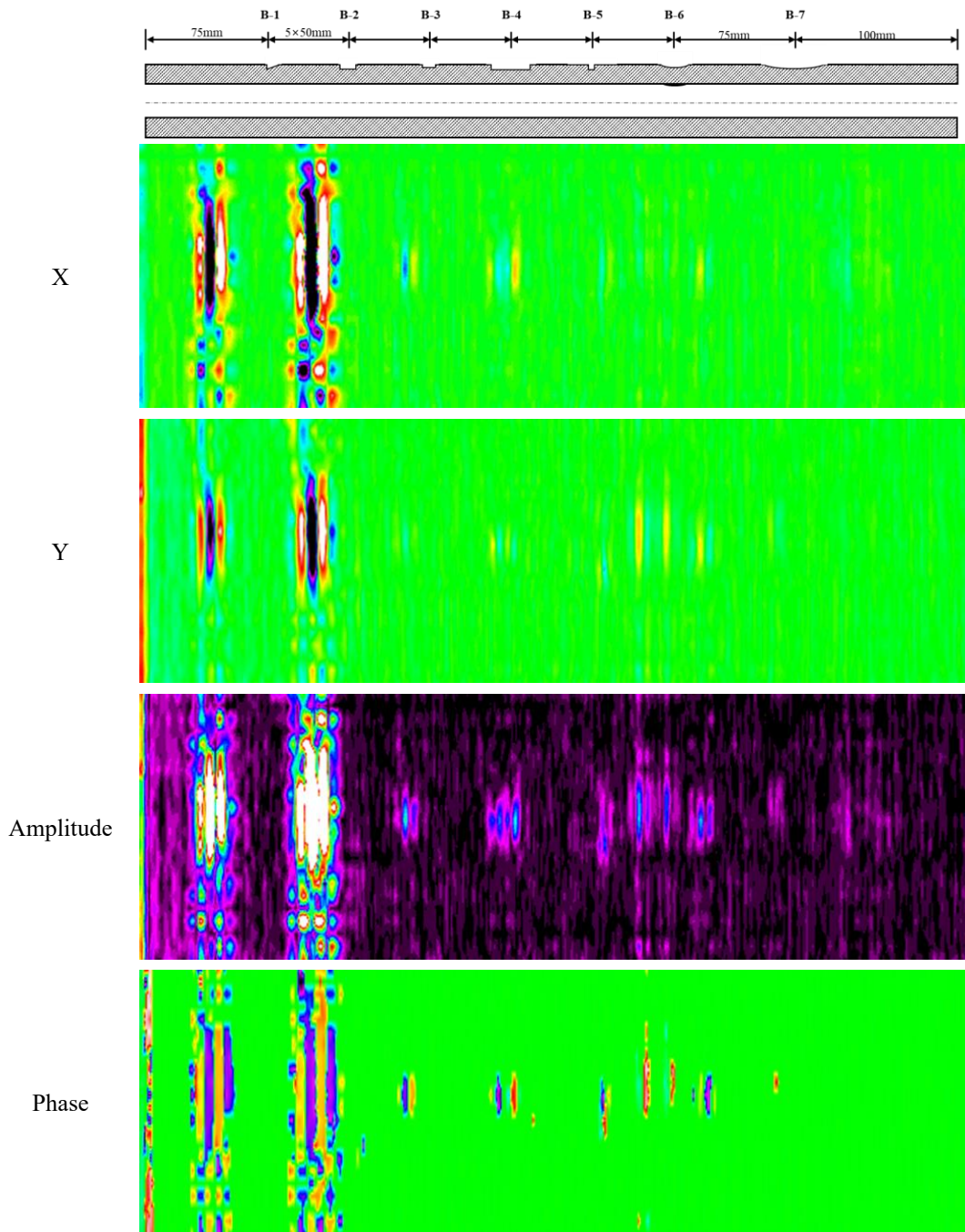
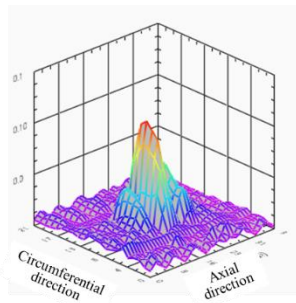
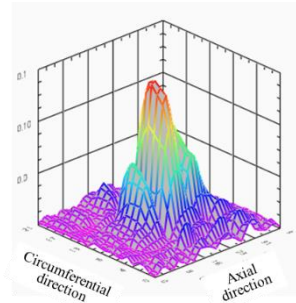


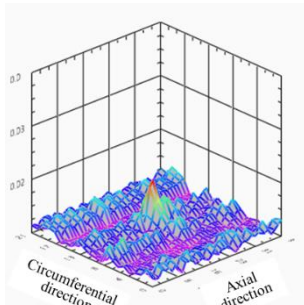
Fig. 4 -19 Continuous magnetic images with specimen #B



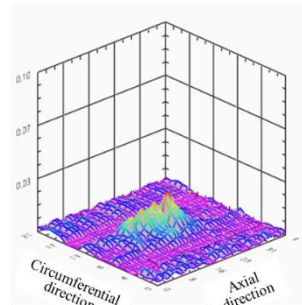
#B-1 TW 40%



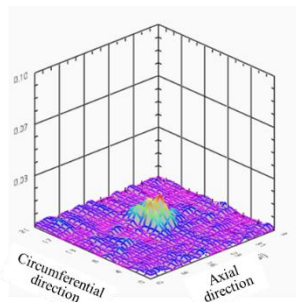
#B-2 FW 40%



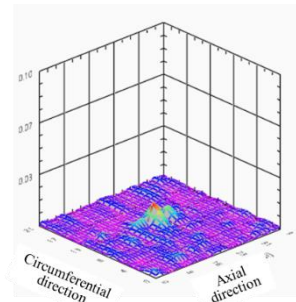
#B-3 FBH 20%



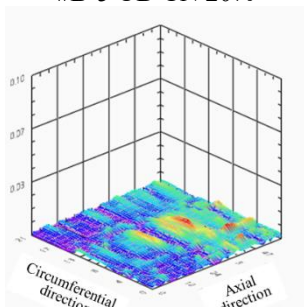
#B-4 OD AN 40%



#B-5 OD CN 20%



#B-6 Dent 10%



#B-7 SC 10%

Fig. 4 -20 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #B

Fig.4-21은 Fig.4-3의 시험편을 이용하여 실험한 BIGiS 측정 영상 결과를 나타낸다. Fig.4-18은 각 결함의 형상을 해석하기 50mm 영역만큼을 따로 확대 하여 표현하였다. 측정된 신호는 X, Y 신호와 소프트웨어 처리를 한 Amplitude, Phase 4가지 신호를 가지고 결함 해석을 한다. 사용 주파수는 50kHz이다.

#C-1~2 결함의 경우 관통형 평저공 결함을 나타낸다. 깊이는 100%로 동일 하나 결함의 직경이 각각 1mm, 1.7mm로 크기가 다르다. 이에 따른 결과 영상에서도 #C-1보다 #C-2의 결함 영상이 더 크게 나타는 것을 알 수 있다.

#C-3~6의 경우 관통형 슬릿 결함과 외면의 슬릿형 결함을 나타낸다. 깊이 100%의 AN/CN에서는 100%의 축방향 결함이 신호가 크게 나타는 것을 알 수 있다. 40%의 서로 마주 보는 결함의 경우 2개의 결함을 영상을 통해 확인 할 수 있다. 20%의 결함의 경우에는 축방향 결함의 영상만을 취득하였다.

#C-7~9의 경우 내면에서의 서로 마주 보는 AN/CN 결함들의 형상을 나타낸다. 축 방향의 결함에서 더 큰 신호가 나타났다. 깊이 60%, 40% 경우에는 OD의 경우에 비하여 ID가 보다 더 명확한 신호를 지시하였다. 20% 결함의 경우 AN 결함만 나타낼 뿐 CN 결함은 나타내지 못하였다.

BIGiS의 측정 영상으로 차동형 보빈 코일과는 다르게 결함의 형상 크기 뿐만 아니라 결함의 위치와 결함의 수를 확인할 수 있다.

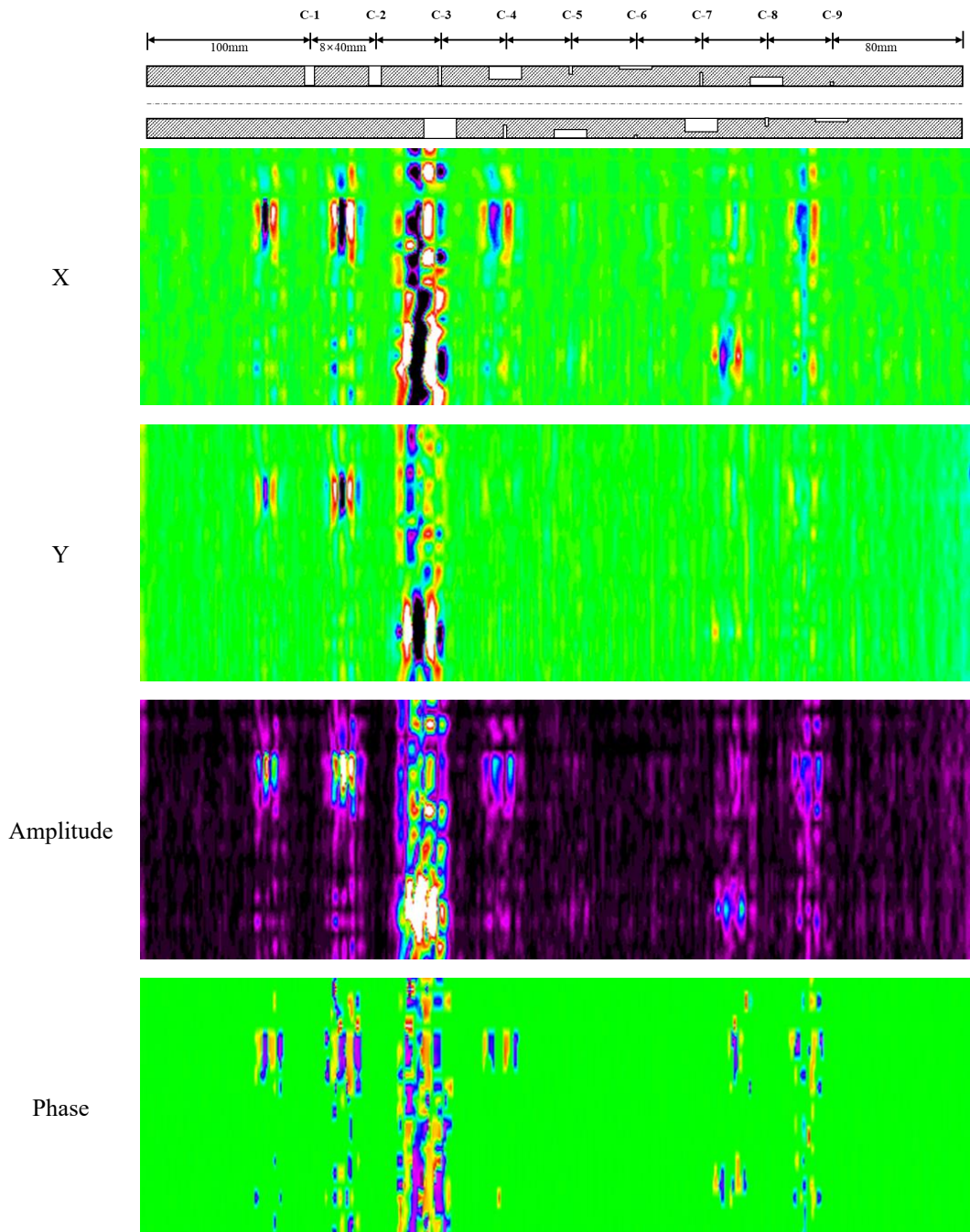
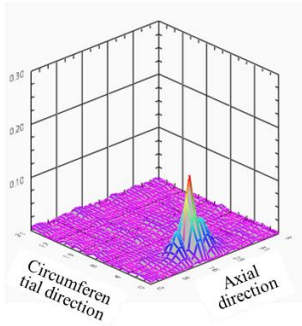
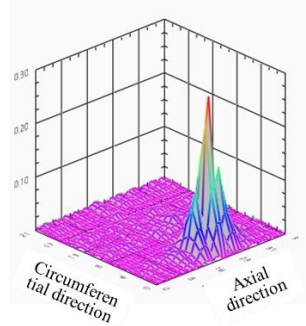


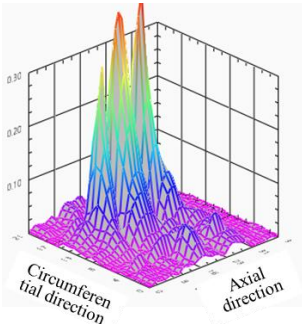
Fig. 4 -21 Continuous magnetic images with specimen #C



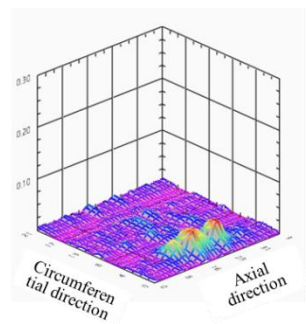
#C-1 TWH



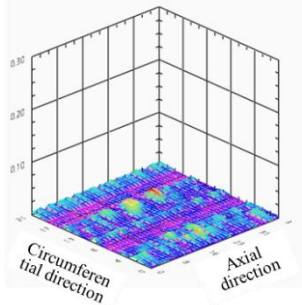
#C-2 THW



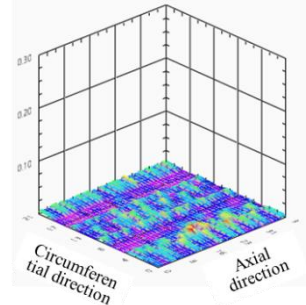
#C-3 OD CN / OD AN 100%



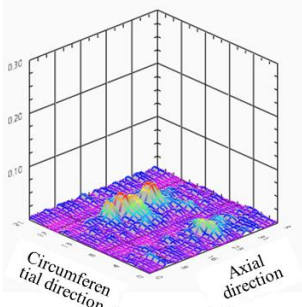
#C-4 OD AN / OD CN 60%



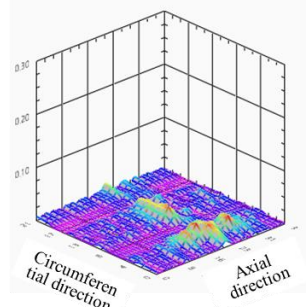
#C-5 OD CN / OD AN 40%



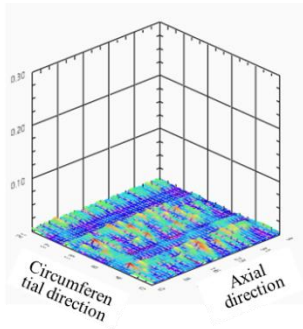
#C-6 ID AN / OD CN 20%



#C-7 ID CN / ID AN 60%



#C-8 ID AN / OD CN 40%



#C-9 ID CN / ID AN 20%

Fig. 4 -22 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #C

3. 정량평가

Fig-23은 FBH의 깊이에 따른 위상 각 변화를 나타낸다. 차동형 보빈 코일에 50kHz, 100kHz, 150kHz의 주파수에 따른 결함의 깊이의 상관관계를 도식한 것이다. 결함의 깊이가 증가 할수록 위상각의 크기가 커지며, 주파수가 높아짐에 따라 결함의 위상각의 범위가 커지는 경향을 볼 수 있다. 이러한 주파수에 따른 결함 깊이에 대한 관계는 식 (24), (25), (26)와 같이 표현될 수 있다.

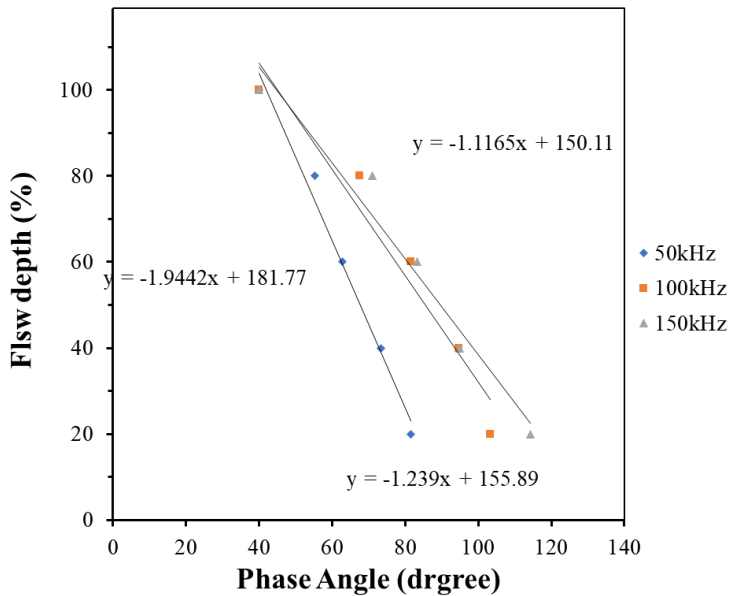


Fig. 4 -23 Phase angle change according to defect depth: relationship between depth and phase

$$Depth_{50kHz} = -1.9442x + 181.77 \quad (24)$$

$$Depth_{100kHz} = -1.239x + 155.89 \quad (25)$$

$$Depth_{150kHz} = -1.1165x + 150.11 \quad (26)$$

차동형 보빈 코일에서의 위상각 변화를 사용하여 다른 결함의 깊이를 정량적으로 평가할 수 있다. Fig. 4-24는 실험식 (25)에 의하여 평가한 결함 깊이를 나타낸다. 다른 형상의 환형 마모, 슬릿형, 마모 결함들의 형상에 관계 없이 결함 깊이에 따른 결과를 나타내었다. 표준편차는 5.98%이다.

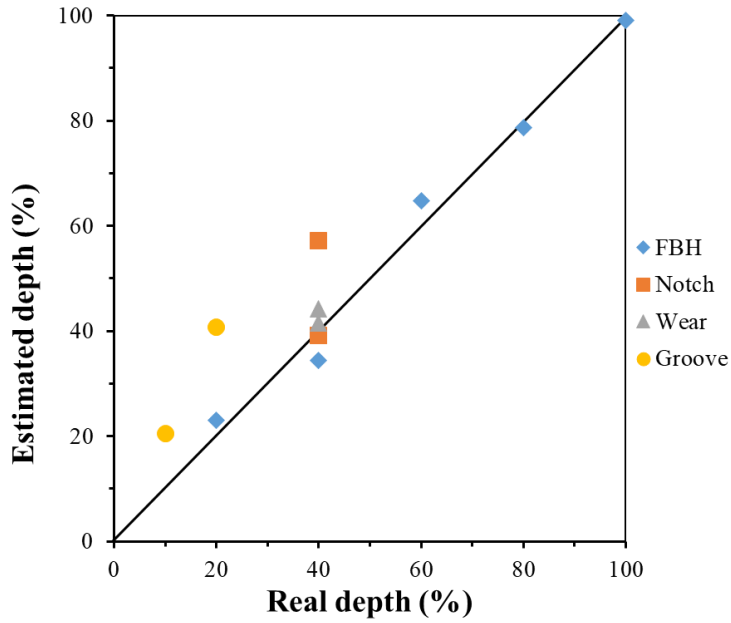


Fig. 4 -24 Phase angle change according to the flaw depth: Quantitative analysis of depth of the flaw.

4. 인출 시험편(자연결함) 측정 결과

본 연구에서 개발한 차동형 보빈 코일과 BIGiS의 자기카메라에 대한 실제 자연 결함 시험편에 대해 종래의 검사 방법인 보빈 ECT와 MRPC 결과를 비교 검증하였다. 보빈탐촉자와 MRPC의 결함 검출 위치 및 결함 판정에 대해 자기카메라의 실험결과를 비교하였다.

Fig.4-25, Fig.4-26은 자연 결함 시험편 N1의 대한 개발 된 차동형 보빈 코일에 의한 실험 결과를 나타낸다. 리사주 패턴과 주파수 변화에 따른 위상각 회전을 통한 결함을 검출하였다.

Table.4-10 나타난 바와 같이 2개의 결함이 주파수가 높아 질수록 위상각 변화를 알 수 있다. 또한, 결함 1번은 위치는 기존의 보빈 ECT 검사 결과와 22mm 위치 오차를 가진다. 결함 2번의 위치는 기존의 검사 결과와 31mm의 위치 오차를 보였다. 검출된 결함들은 시계 방향으로 회전하는 것으로 OD 결함임을 알 수 있다.

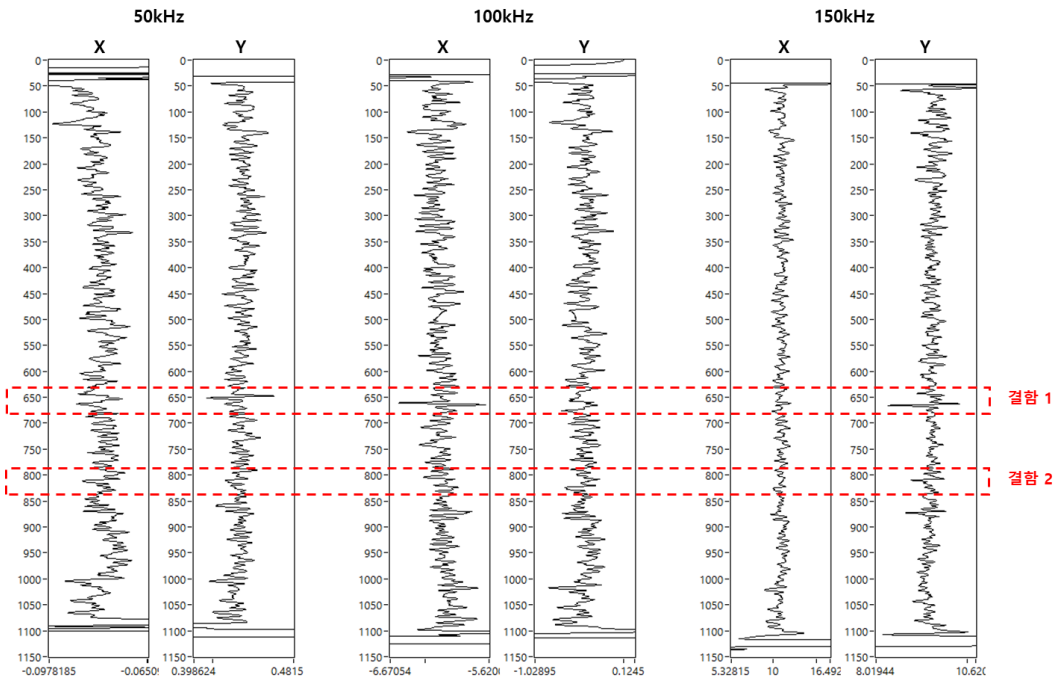


Fig. 4 -25 Continuous ECT signals with specimen N1

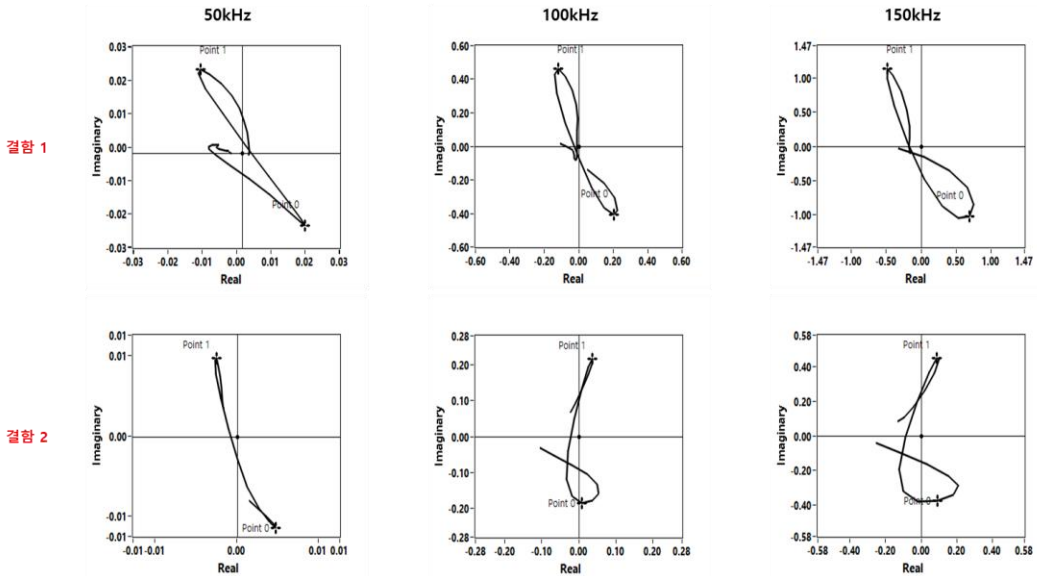


Fig. 4 -26 Lissajous curve with specimen N1

Table 4 -10 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N1

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
flaw1	616.6mm	645mm	57.06	70.38	62.25
flaw2	811.7mm	780.2mm	72.52	94.74	95.68

Fig.4-27, Fig.4-28, Fig.4-29는 BIGiS 측정 결과를 나타낸다. Fig.4-27은 3개의 주파수(30kHz, 50kHz, 80kHz)를 사용한 amplitude 영상을 나타낸다. 638.27mm, 780.2mm에서 결함이 검출되었다. BIGiS에 의한 결함 신호 실험 결과는 Fig4-27, Fig4-28에서 나타내며, 645mm, 804mm에서 결함이 검출되었다. Fig4-29는 BIGiS에 의한 이상 신호 실험 결과 208mm, 263mm, 344mm, 384mm 에서 결함 검출 하였다. ECT 실험 결과, 616.6mm, 811.7mm에서 결함 검출하였다.

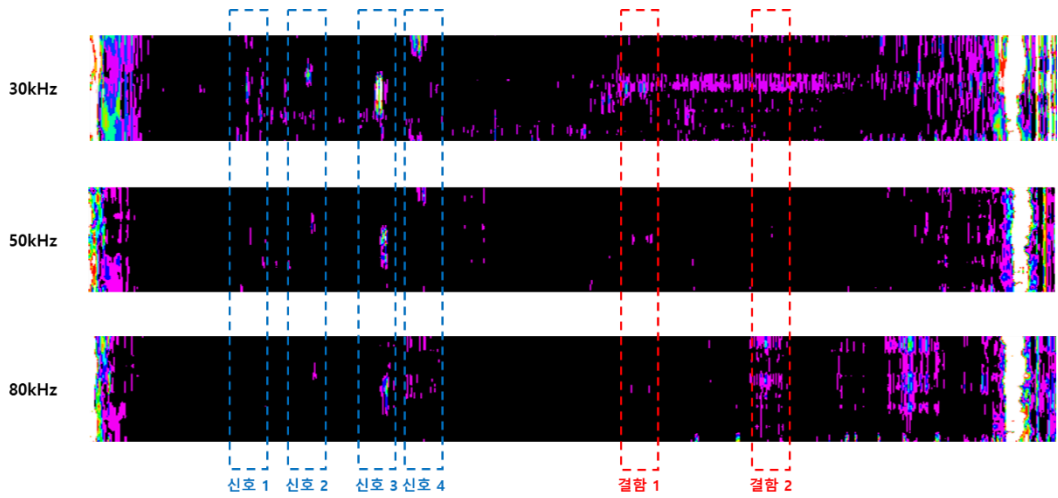


Fig. 4 -27 Continuous magnetic images with specimen #N1

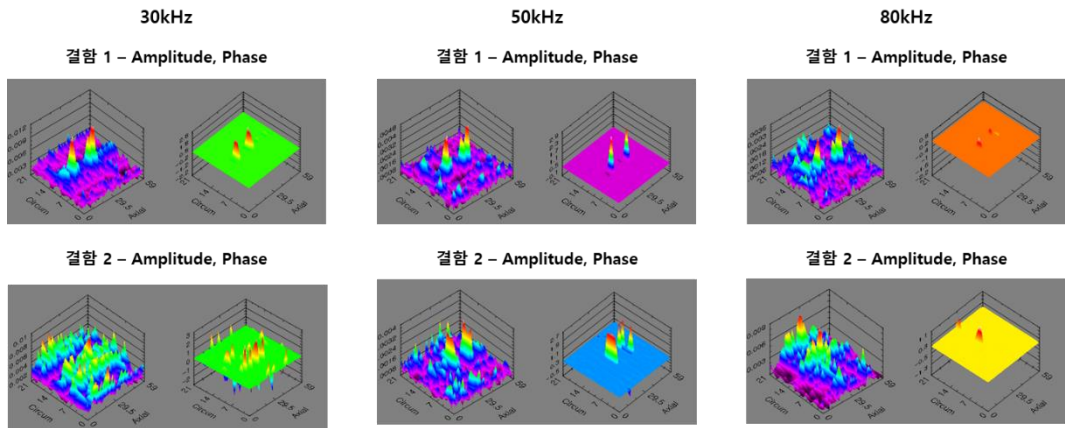


Fig. 4 -28 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N1

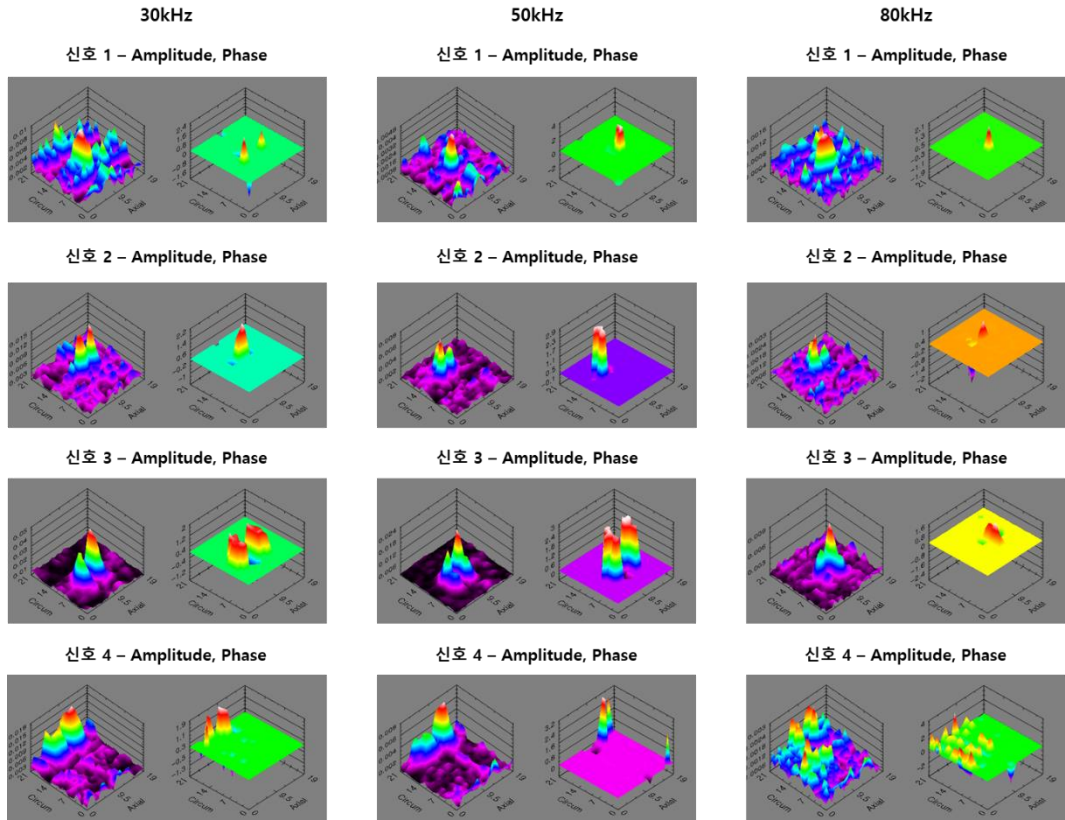


Fig. 4 -29 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N1

Table 4 -11 Comparison of experimental results for specimen N1

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency	classification
flaw 1	616.6mm	axial	638.27mm	645mm (axial)
flaw 2	811.7mm	axial	780.2mm	804mm (axial)

차동형 보빈 코일에 의한 자연결함 시험편 N2의 실험 결과는 Fig.4-30, Fig.4-31에 나타내며, 421.1mm에서 결함 검출 할 수 있다. 검출 된 결함의 리사주 선도는 주파수가 높아 짐에 따라 시계방향으로 회전하는 것으로 OD 결함을 알 수 있다. BIGis에 의한 실험 결과는 Fig.4-32, Fig.4-33, Fig.4-34에서 나타낸다. 414mm에서 결함 검출되었으며, BIGis에 의한 이상 신호 실험 결과, 99mm, 970mm에서 결함이 검출되었다. 한편, 비교 실험에 의한 ECT에서는 383.39mm에서 결함이 검출되었다.

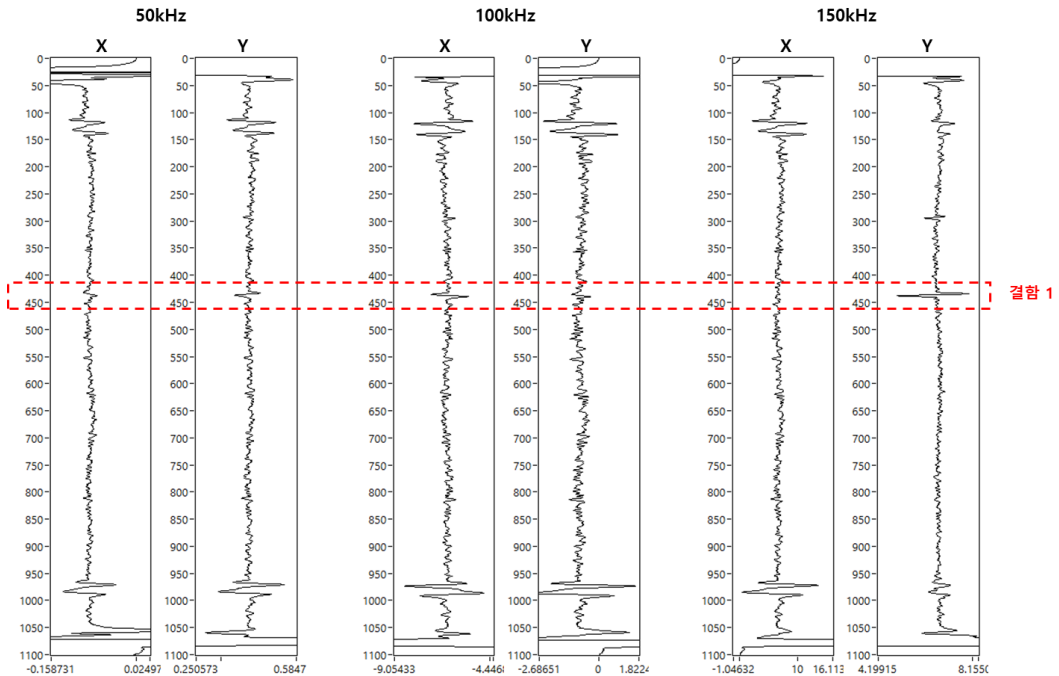


Fig. 4 -30 Continuous ECT signals with specimen N2

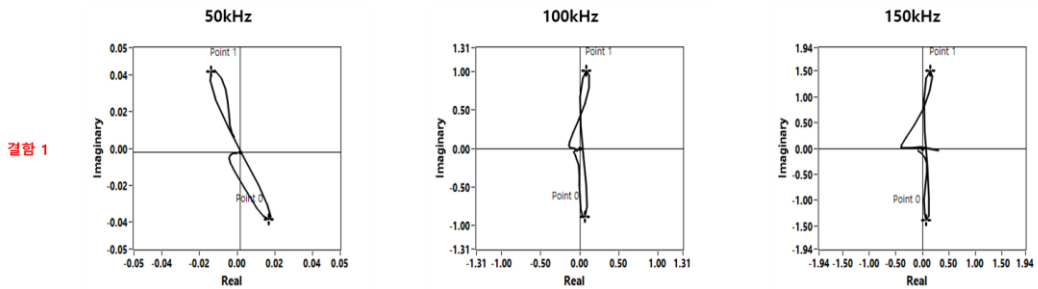


Fig. 4 -31 Lissajous curve with specimen N2

Table 4 -12 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N2

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
flaw 1	383.99mm	421.1mm	69.45	91.06	92.24

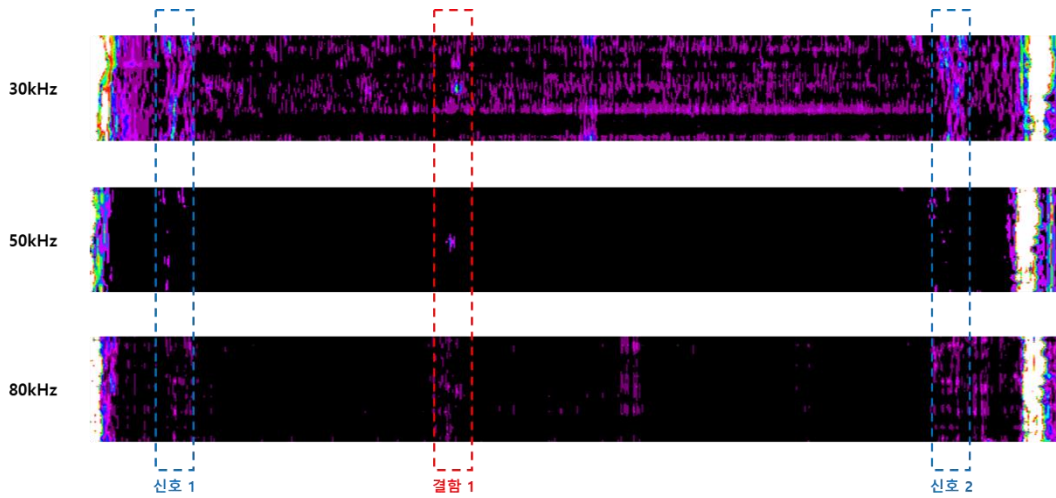


Fig. 4 -32 Continuous magnetic images with specimen #N2

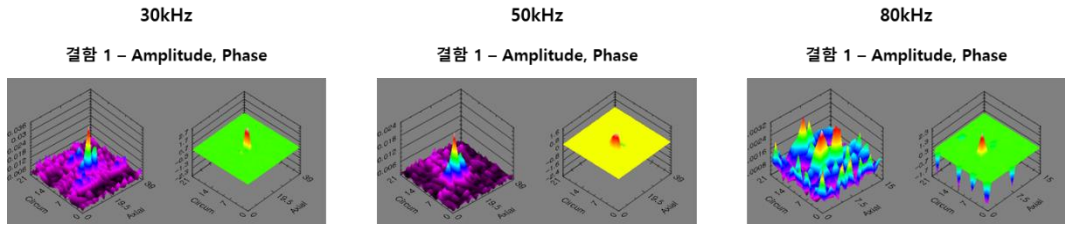


Fig. 4 -33 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N2 (50kHz)

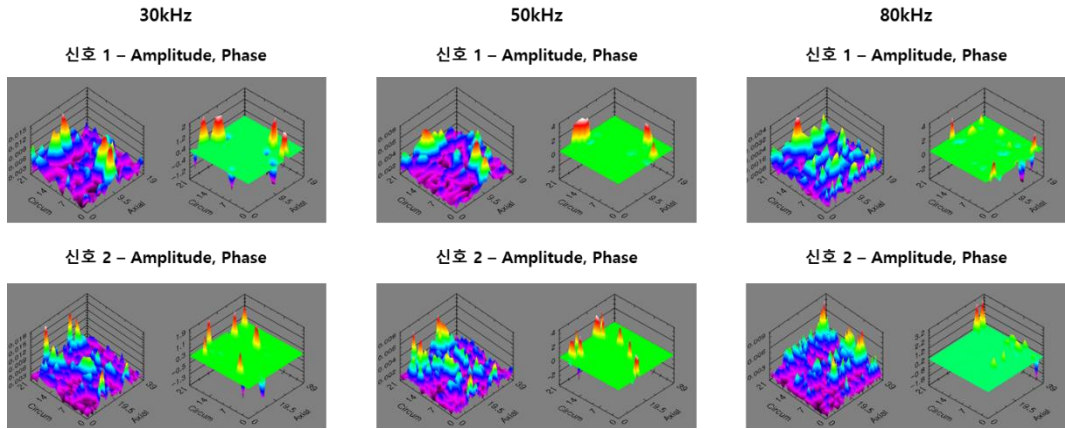


Fig. 4 -34 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N2

Table 4 -13 Comparison of experimental results for specimen N2

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency	classification
flaw 1	383.99mm	axial	421.1mm	414mm (axial)

Fig.4-35, Fig.4-36는 차동형 보빈 코일을 이용하여 자연결함 시험편 N3의 실험 결과는 에 나타낸다. 838.7mm에서 결함 검출을 할 수 있다. 기존의 검사 위치보다 220mm 거리 오차가 있었다. 검출 된 결함의 리사주 선도는 주파수가 높아 짐에 따라 시계방향으로 회전하는 것으로 OD 결함을 알 수 있다. BIGiS에 의한 실험 결과는 Fig.4-37, Fig.4-38, Fig.4-39에 나타낸다. 835mm에서 결함 검출이 되었다. BIGiS에 의한 이상 신호 실험 결과, 86mm, 926mm에서 결함 검출을 할 수 있다. 보빈 ECT 실험 결과, 858.8mm에서 결함검출 되었다.

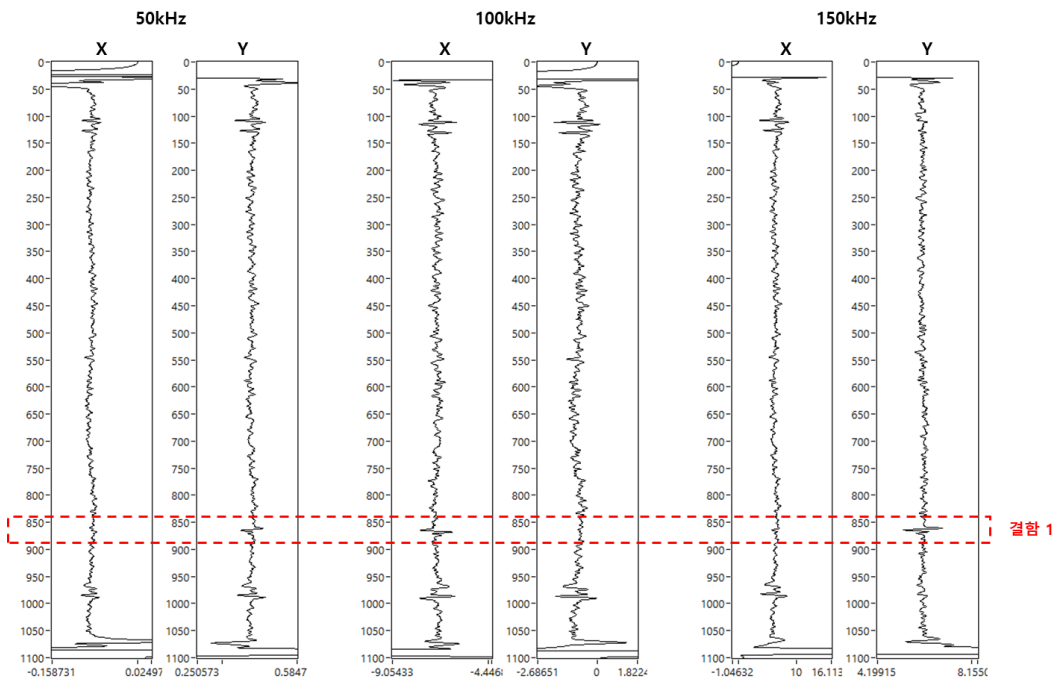


Fig. 4 -35 Continuous ECT signals with specimen N3

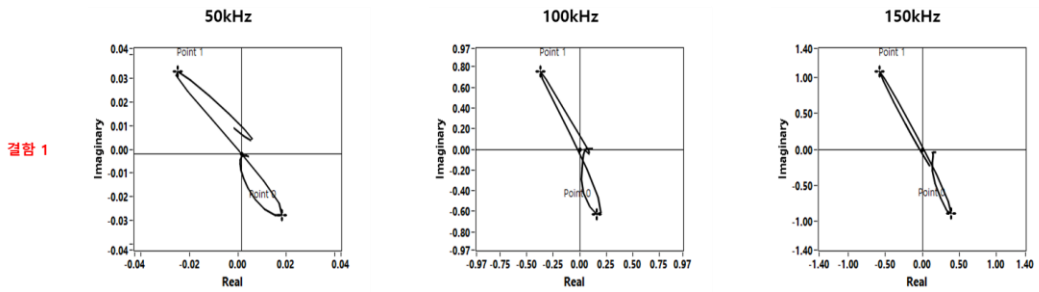


Fig. 4 -36 Lissajous curve with specimen N3

Table 4 -14 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N3

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
flaw 1	616.6mm	838.7mm	54.45	61.45	63.67

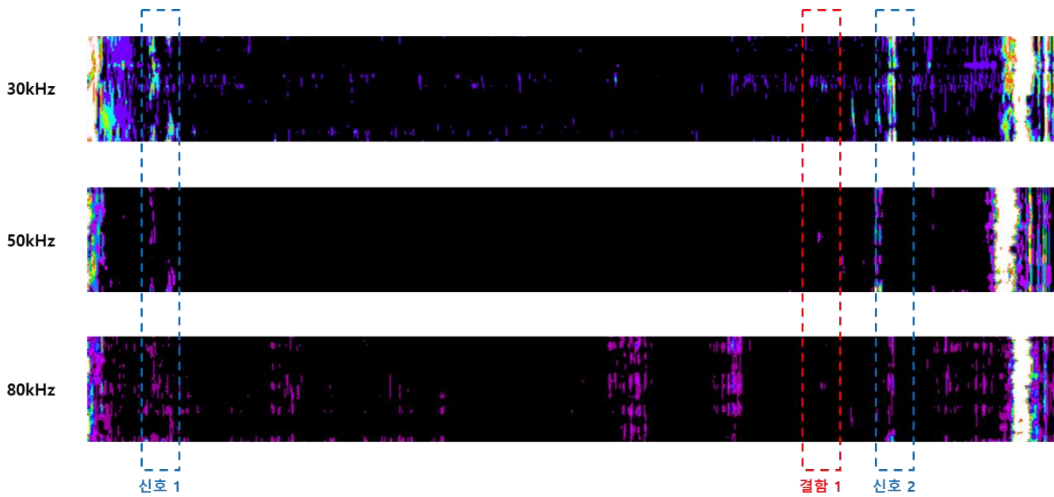


Fig. 4 -37 Continuous magnetic images with specimen #N3

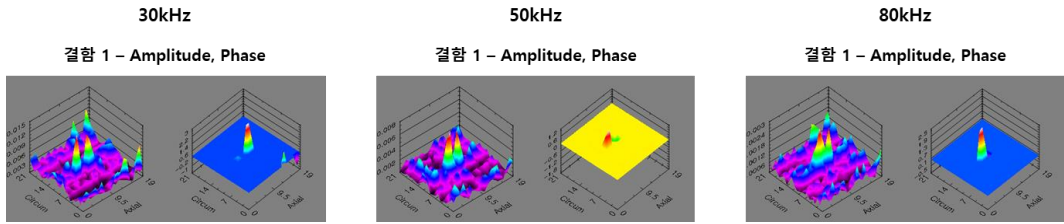


Fig. 4 -38 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N3

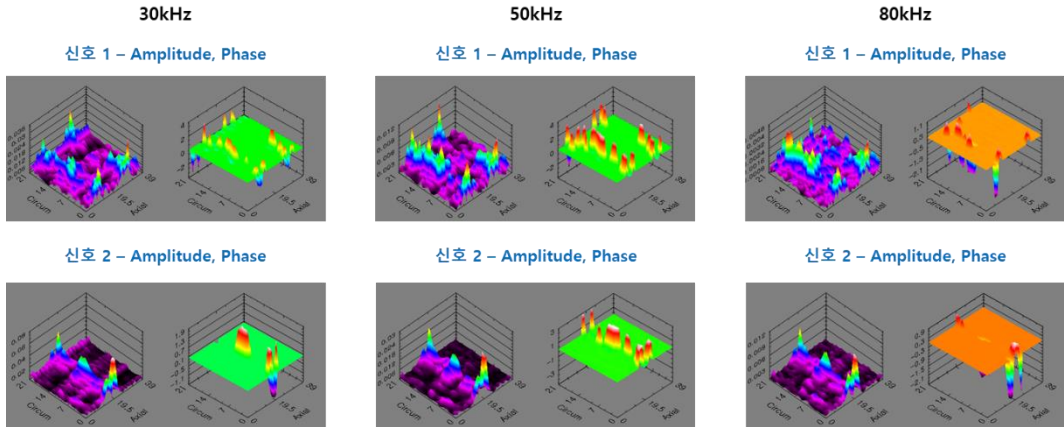


Fig. 4 -39 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N3

Table 4 -15 Comparison of experimental results for specimen N3

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency	classification
flaw 1	616.6mm	axial	838.7mm	835mm (axial)

차동형 보빈 코일을 이용하여 자연결함 시험편 N4에 실험 결과는 Fig.4-40, Fig.4-41, Fig.4-42, Fig.4-43에 나타낸다. 기존 검사 방법과 동일한 13개의 결함을 413mm, 428mm, 457mm, 472mm, 478mm, 522mm, 562mm, 570mm, 621mm, 634mm, 663mm, 688mm, 712mm에서 결함이 검출되었다. 각 결함들에 거리 오차는 ± 24 mm

BIGiS에 의한 실험 결과는 Fig.4-44, Fig.4-45, Fig.4-46, Fig.4-47에 나타낸다. BIGiS에 의한 실험 결과, 169mm, 202mm, 245mm, 356mm, 378mm, 913mm에서 결함 검출을 할 수 있었다. 보빈 ECT 실험 결과, 433.3mm, 442.9mm, 485.0mm, 491.3mm, 524.1mm, 548.7mm, 567.7mm, 577.0mm, 627.2mm, 648.3mm, 670.7mm, 681.7mm, 696.4mm에서 결함이 검출되었다.

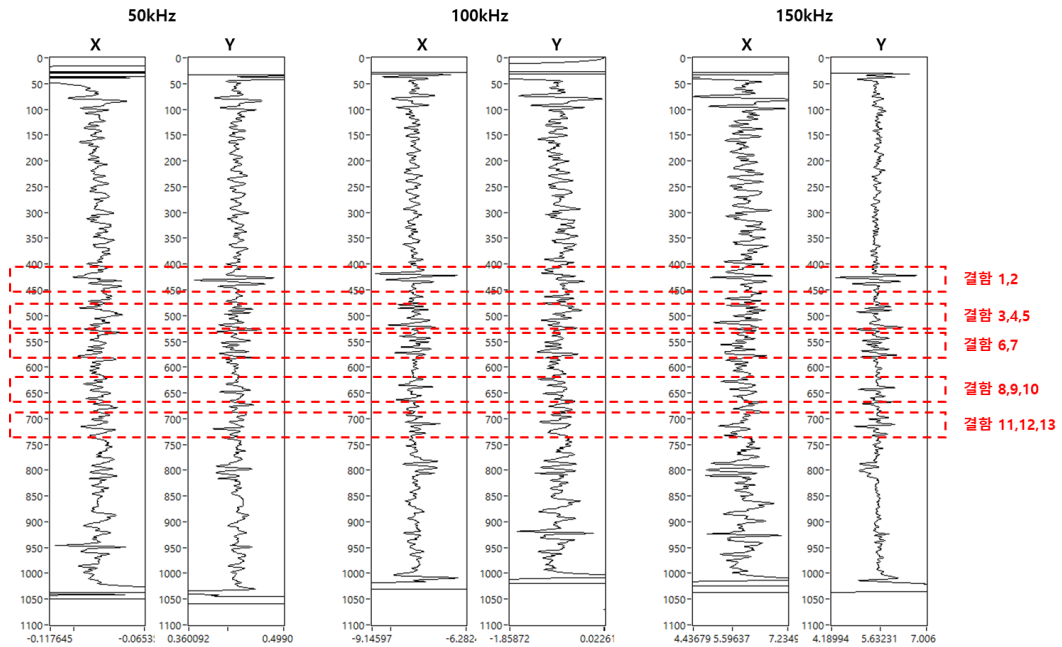


Fig. 4 -40 Continuous ECT signals with specimen N4

Table 4 -16 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N4

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
flaw 1	433.3mm	407mm	61.21	76.17	68.00
flaw 2	442.9mm	422.75mm	68.60	86.78	82.07
flaw 3	485.0mm	470mm	64.46	87.18	82.31
flaw 4	491.3mm	477.35mm	56.67	79.53	75.76
flaw 5	524.1mm	500mm	38.60	25.53	23.81
flaw 6	548.7mm	510mm	68.02	81.99	79.10
flaw 7	567.7mm	532mm	63.63	76.13	69.20
flaw 8	577.0mm	556mm	55.88	66.55	61.64
flaw 9	627.2mm	628.5mm	65.40	82.87	78.78
flaw 10	648.3mm	655mm	62.76	86.85	87.02
flaw 11	670.7mm	683mm	79.21	104.81	114.22
flaw 12	681.7mm	697mm	68.09	89.54	90.74
faw 13	696.4mm	715mm	55.02	67.07	66.06

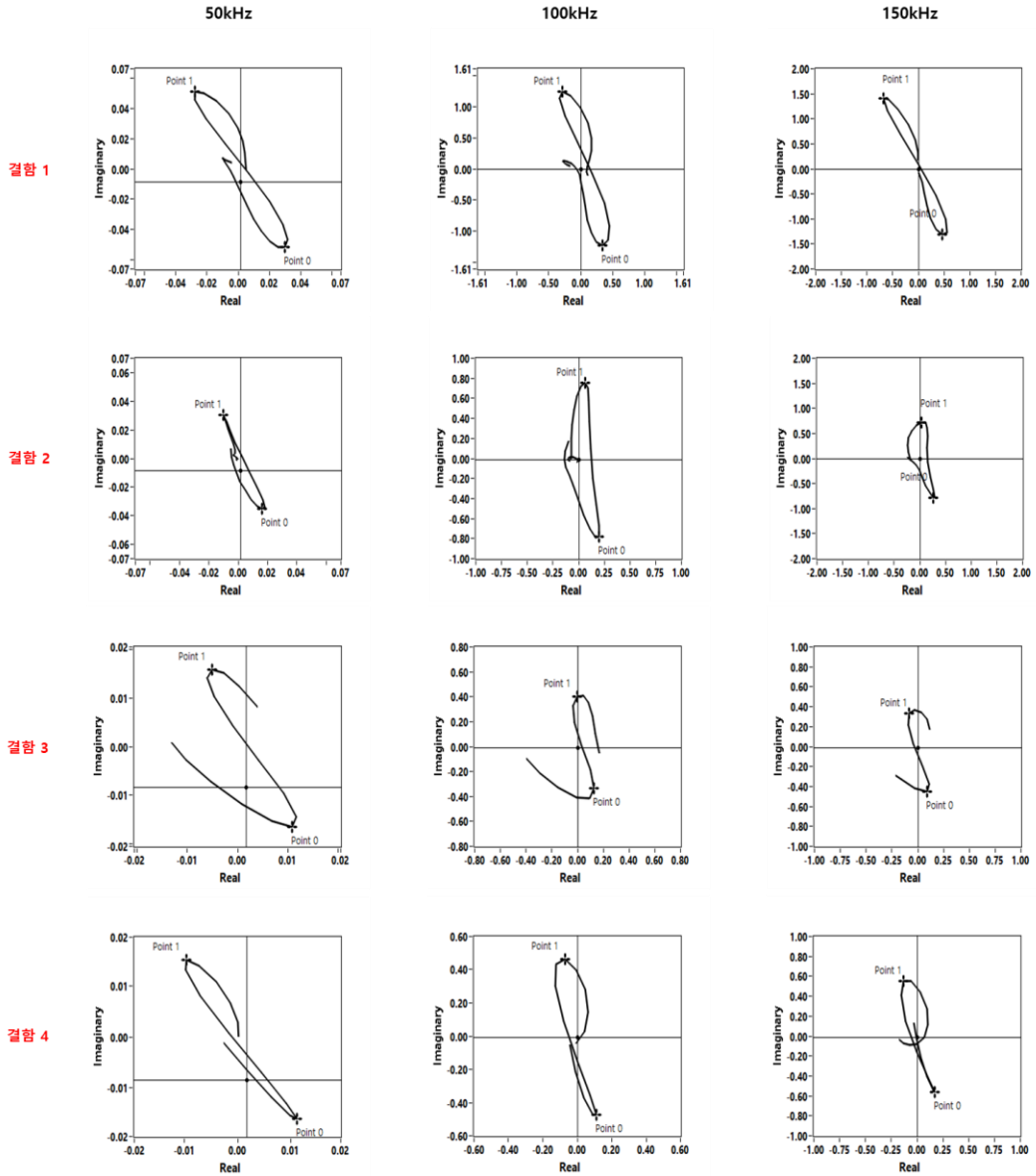


Fig. 4 -41 Lissajous curve with specimen N4 (1/3)

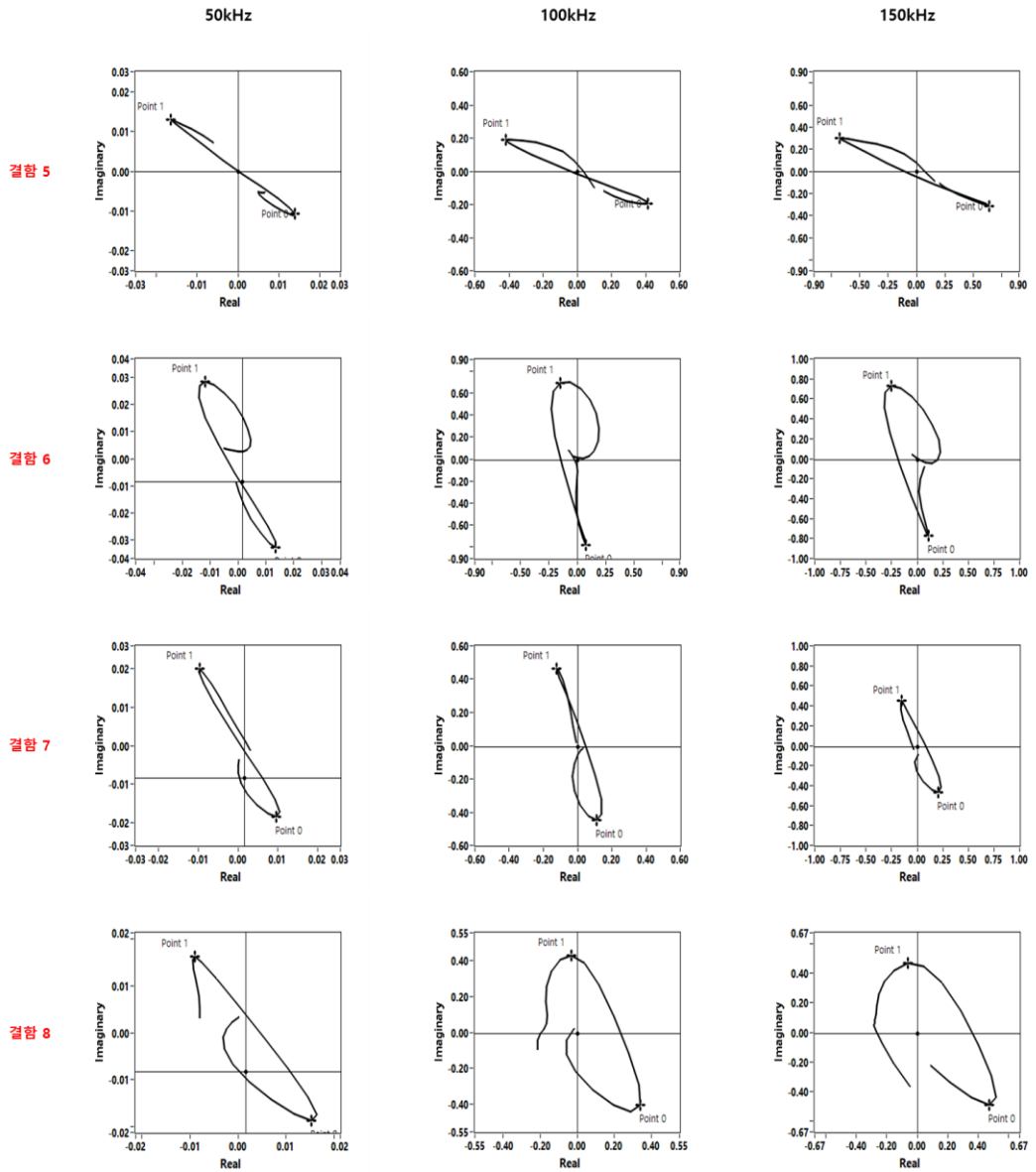


Fig. 4 -42 Lissajous curve with specimen N4 (2/3)

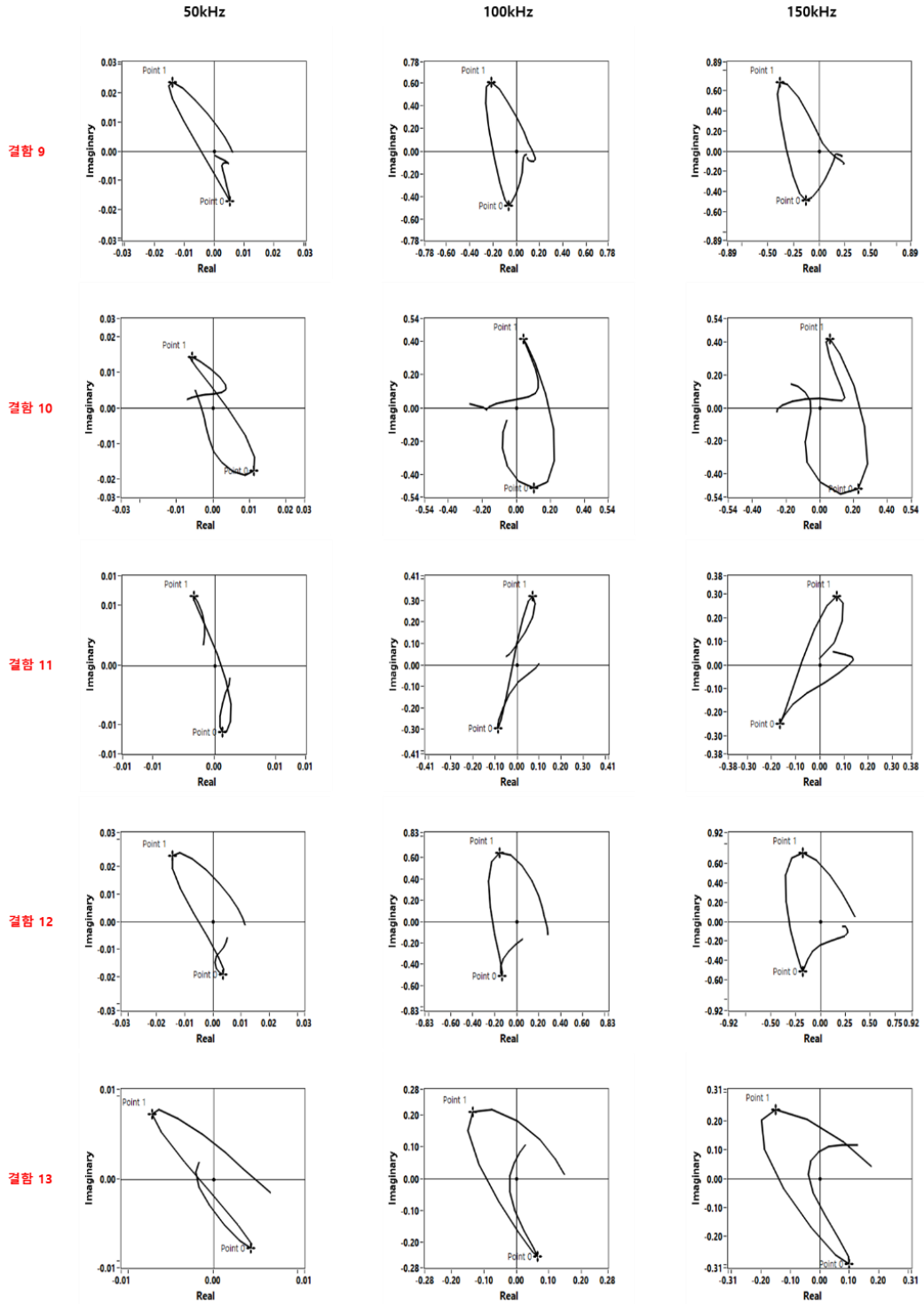


Fig. 4 -43 Lissajous curve with specimen N4 (3/3)

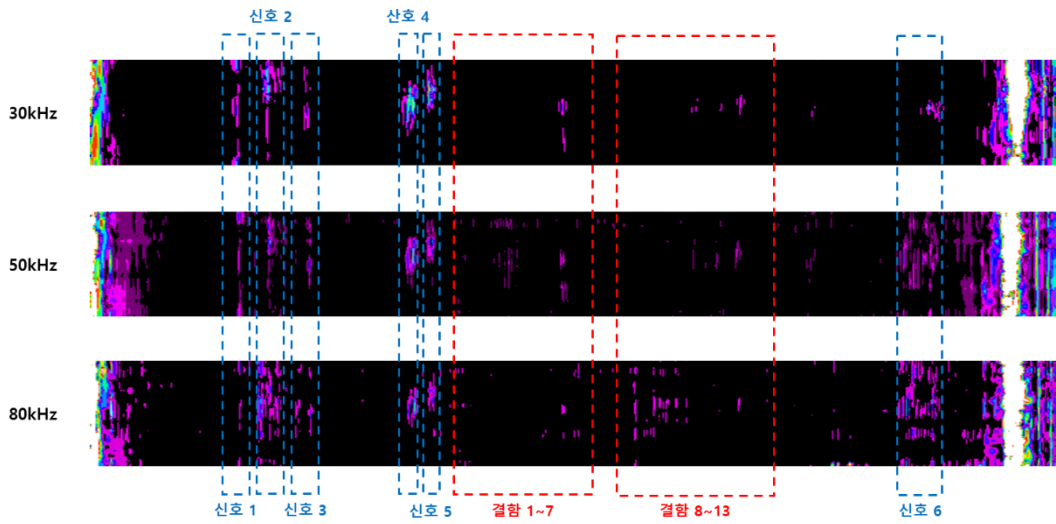


Fig. 4 -44 Continuous magnetic images with specimen #N4

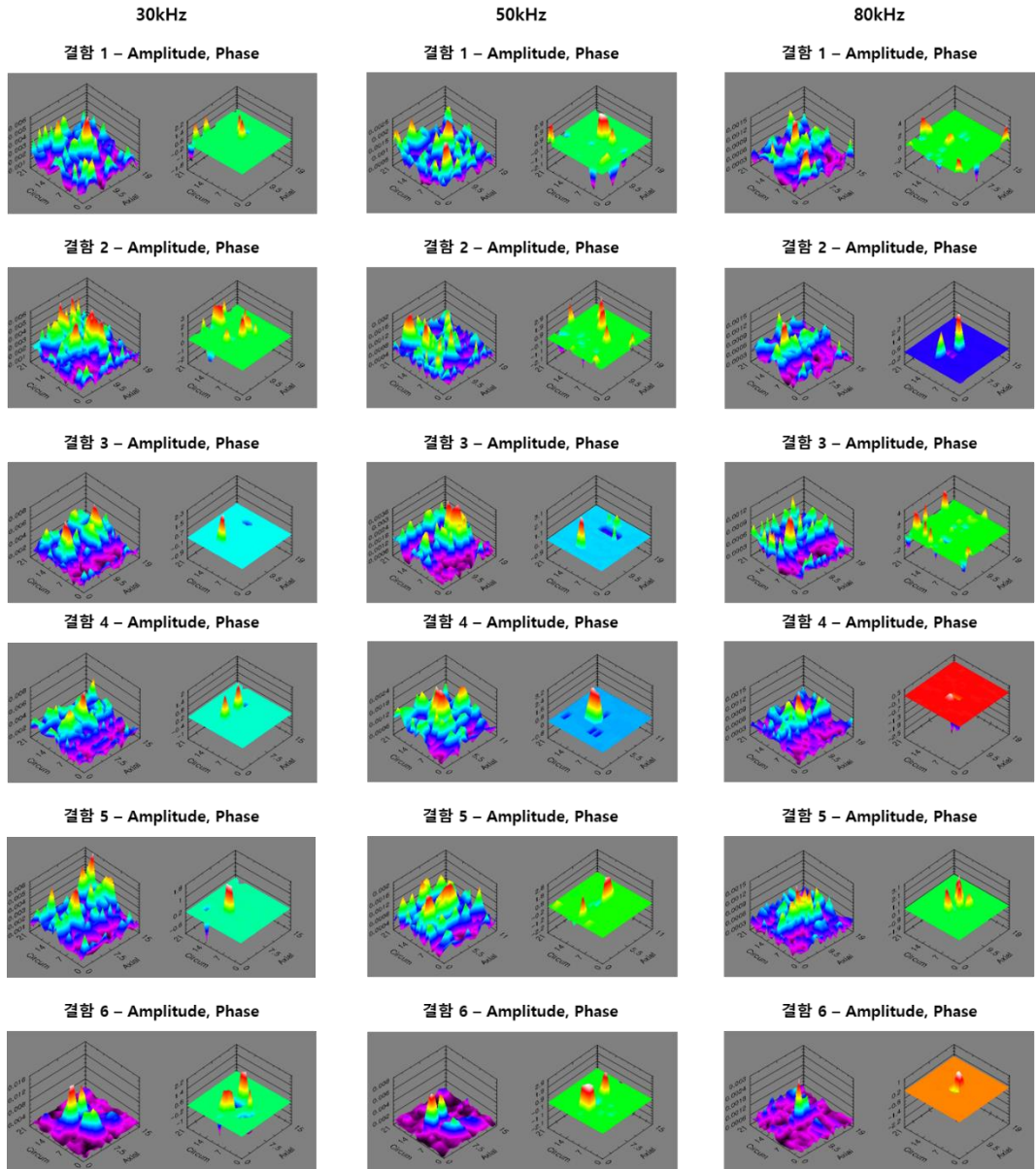


Fig. 4 -45 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N4 (1/3)

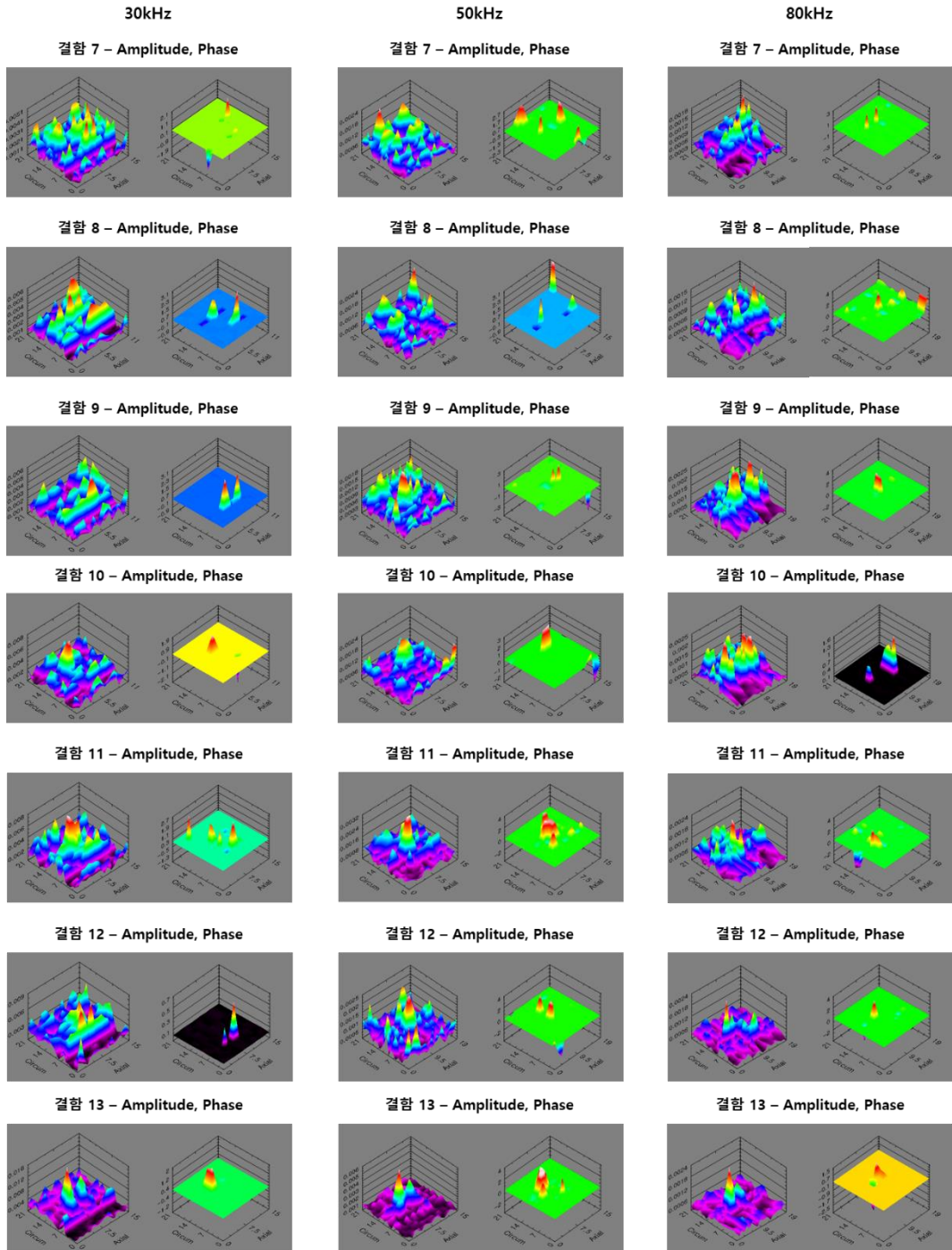


Fig. 4 -46 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N4 (2/3)

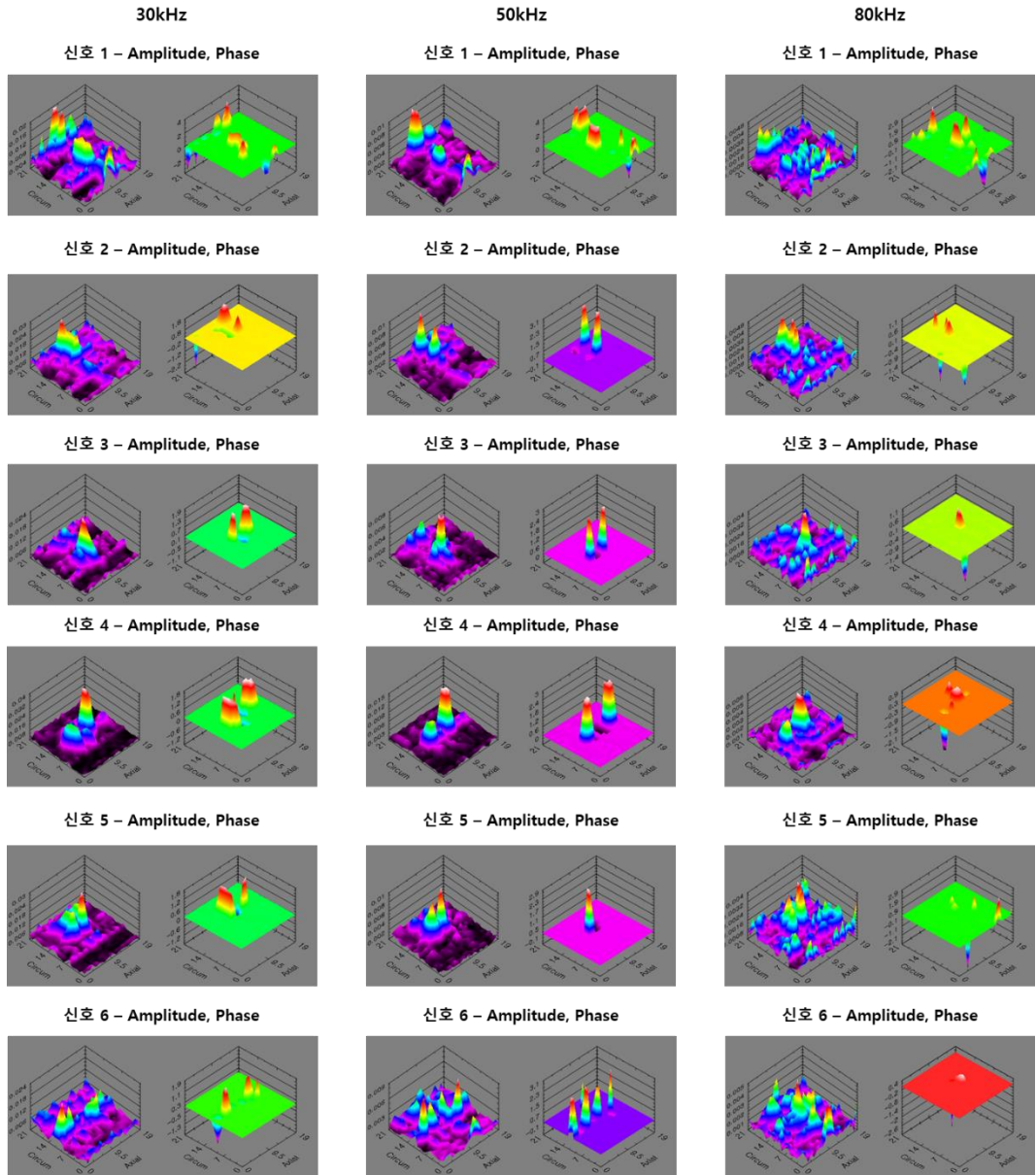


Fig. 4 -47 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N4 (3/3)

Table 4 -17 Comparison of experimental results for specimen N4

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency	classification
flaw 1	433.3mm	axial	407mm	413mm (axial)
flaw 2	442.9mm	axial	422.75mm	428mm (axial)
flaw 3	485.0mm	axial	470mm	457mm (axial)
flaw 4	491.3mm	axial	477.35mm	472mm (axial)
flaw 5	524.1mm	axial	500mm	478mm (axial)
flaw 6	548.7mm	axial	510mm	522mm (axial)
flaw 7	567.7mm	axial	532mm	562mm (axial)
flaw 8	577.0mm	axial	556mm	570mm (axial)
flaw 9	627.2mm	axial	628.5mm	621mm (axial)
flaw 10	648.3mm	axial	655mm	634mm (axial)
flaw 11	670.7mm	axial	683mm	663mm (axial)
flaw 12	681.7mm	axial	697mm	688mm (axial)
flaw 13	696.4mm	axial	715mm	712mm (axial)

차동 보빈 코일을 이용하여 자연결함 시험편 N5의 실험 결과는 Fig.4-48, Fig.4-49에 나타낸다. 결함의 기존 검사 방법과 동일하게 4개의 결함을 모두 찾아내었다. 결함의 위치는 578.5mm, 616.5mm, 698.5mm, 845.0mm 에서 검출 되었으며 결함 1번과 2번은 100mm의 거리 오차가 나타났다.

BIGiS에 의한 실험 결과는 Fig.4-50, Fig.4-51에서 나타낸다. 결함의 위치는 580mm, 615mm, 701mm, 847mm에서 결함 검출을 하였다. 보빈 ECT 실험 결과 488.0mm, 522.3mm, 628.2mm, 861.6mm 에서 결함이 검출되었다.

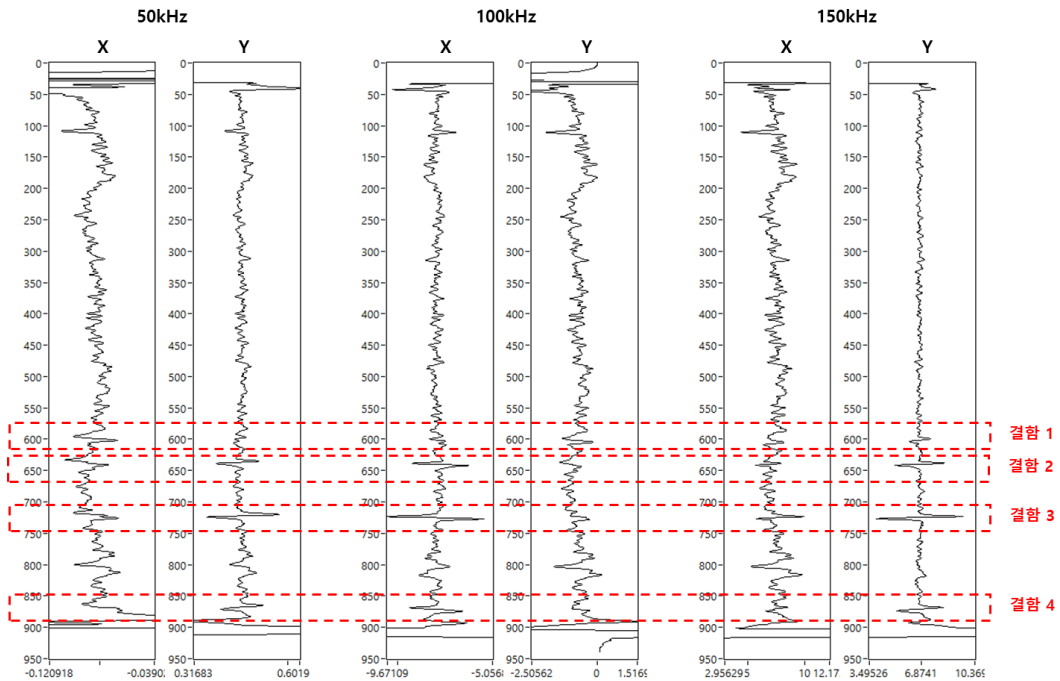


Fig. 4 -48 Continuous ECT signals with specimen N5

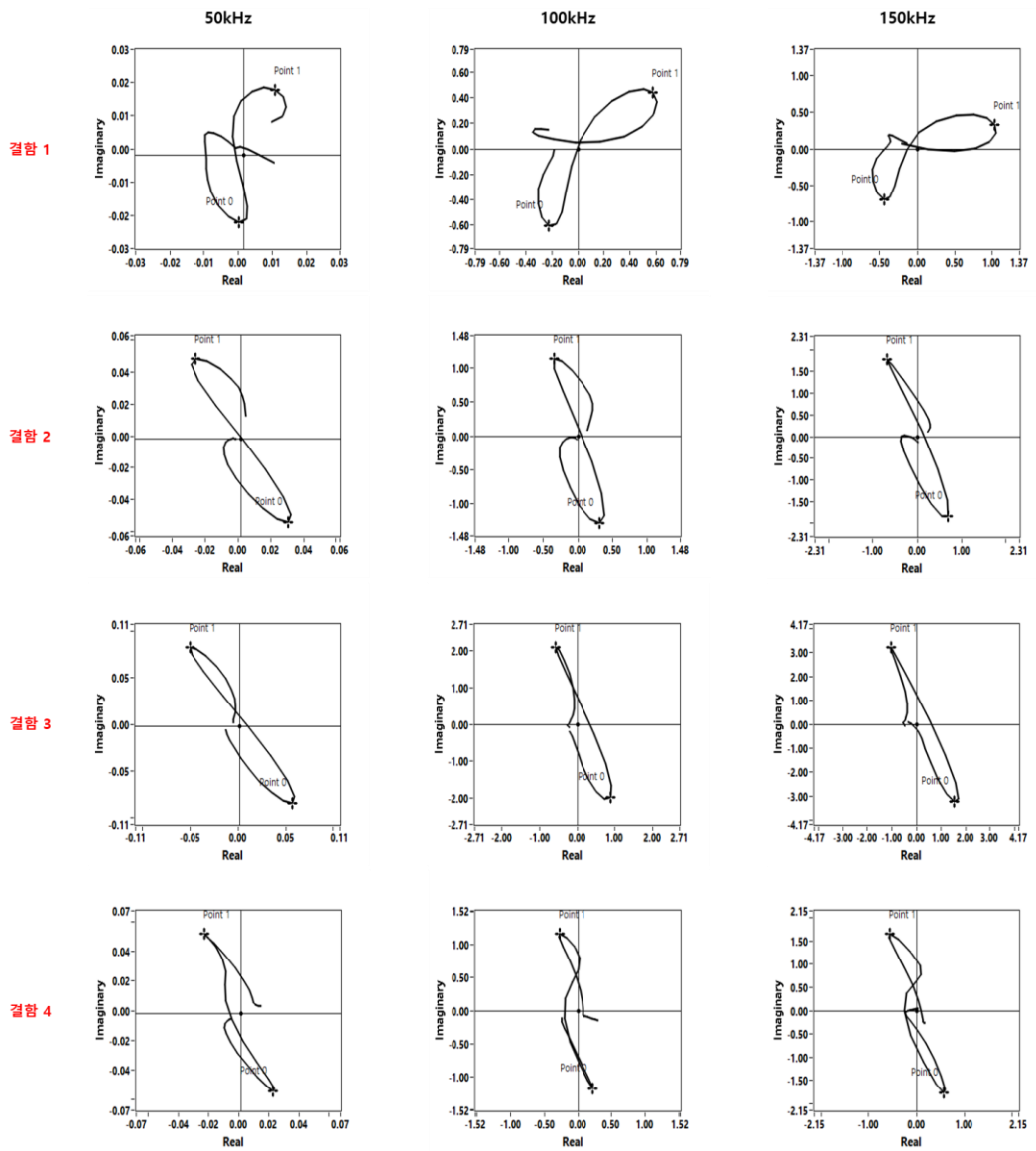


Fig. 4 -49 Lissajous curve with specimen N5

Table 4 -18 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N5

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
flaw 1	488.0mm	578.5mm	104.86	127.94	145.97
flaw 2	522.3mm	616.5mm	61.46	75.49	70.07
flaw 3	628.2mm	698.5mm	57.69	70.91	69.11
flaw 4	861.mm	845.0mm	67.25	78.97	72.60

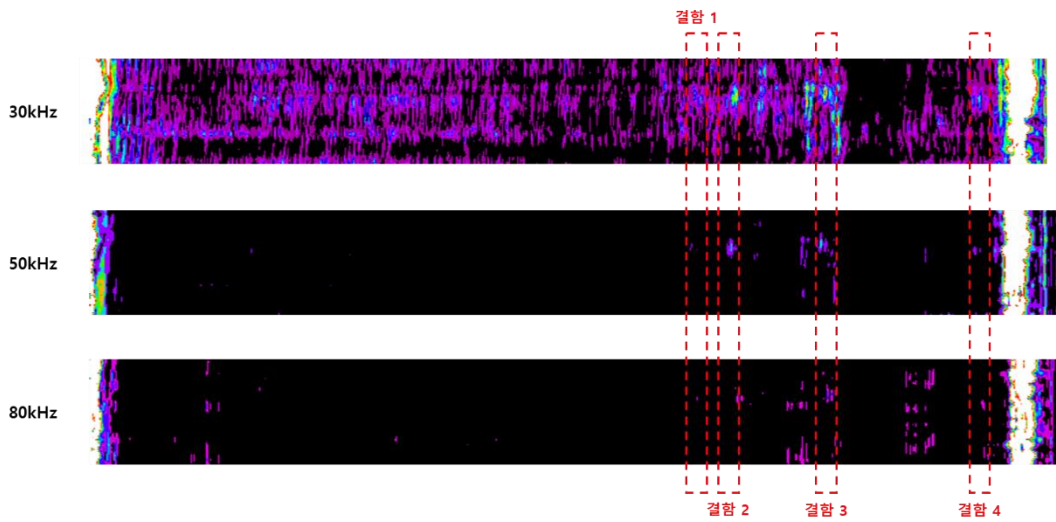


Fig. 4 -50 Continuous magnetic images with specimen #N5

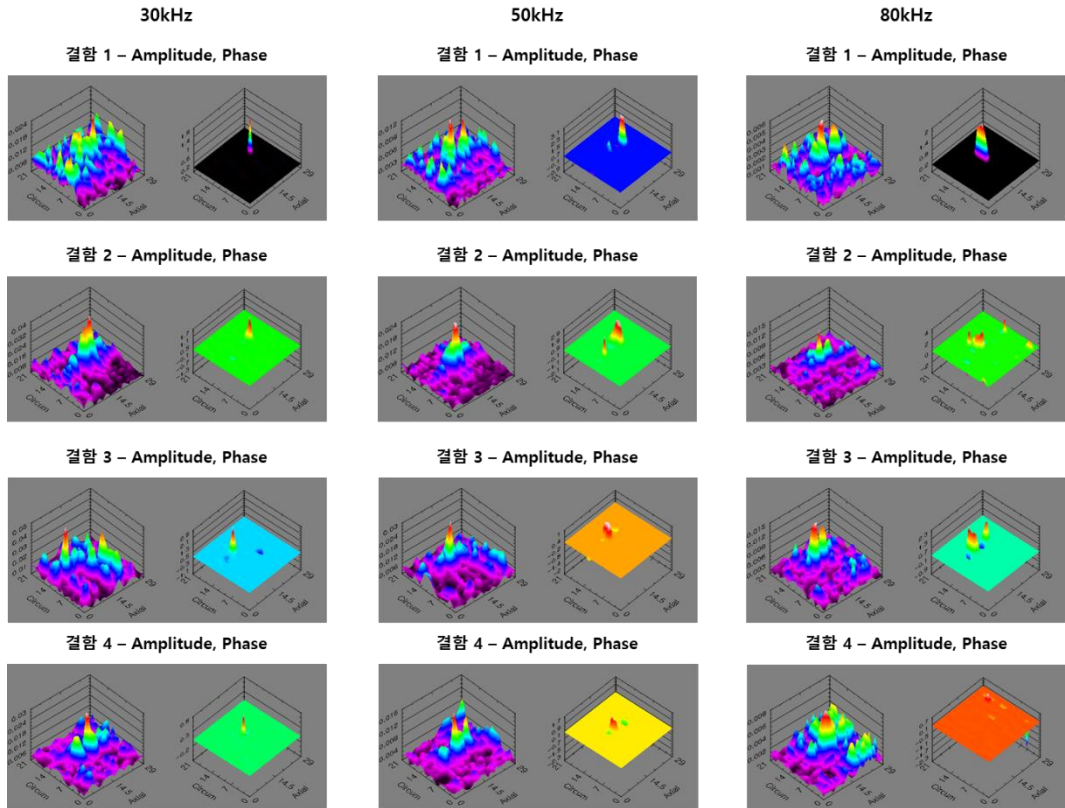


Fig. 4 -51 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N5

Table 4 -19 Comparison of experimental results for specimen N5

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency	classification
flaw 1	488.0mm	axial	578.5mm	580mm (axial)
flaw 2	522.3mm	axial	616.5mm	615mm (axial)
flaw 3	628.2mm	axial	698.5mm	701mm (axial)
flaw 4	861.mm	axial	845.0mm	847mm (axial)

차동형 보빈 코일을 이용하여 자연결함 시험편 N6의 실험 결과는 Fig.4-52, Fig.4-53에 나타낸다. 기존 검사와 동일하게 2개의 결함을 검출 하였다. 검출 된 결함은 233.3mm, 408.0mm의 위치에서 검출되었으며 최대 오차는 100mm이다..

BIGis에 의한 실험 결과는 Fig.4-54~58에 나타낸다. 결함 검출 결과 78mm, 262mm, 283mm, 302mm, 327mm, 355mm, 446mm, 512mm, 536mm, 745mm, 839mm, 980mm, 994mm, 1007mm, 1023mm 위치에서 결함 신호를 확인 하였다. 보빈 ECT 실험 결과 167.1mm, 380.5mm에서 결함이 검출되었다.

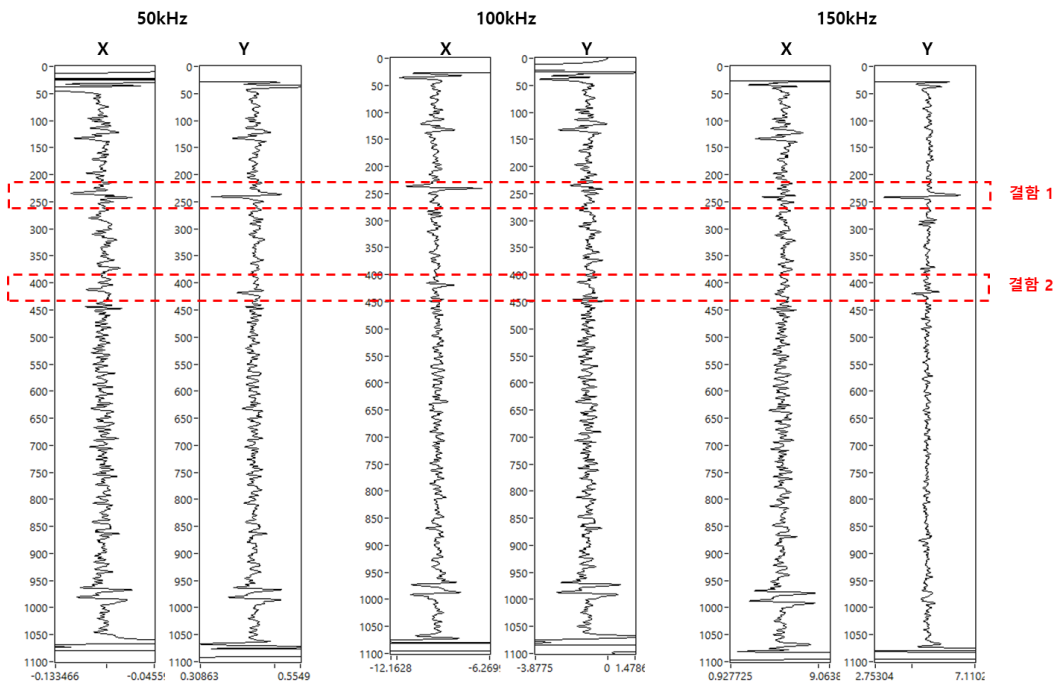


Fig. 4 -52 Continuous ECT signals with specimen N6

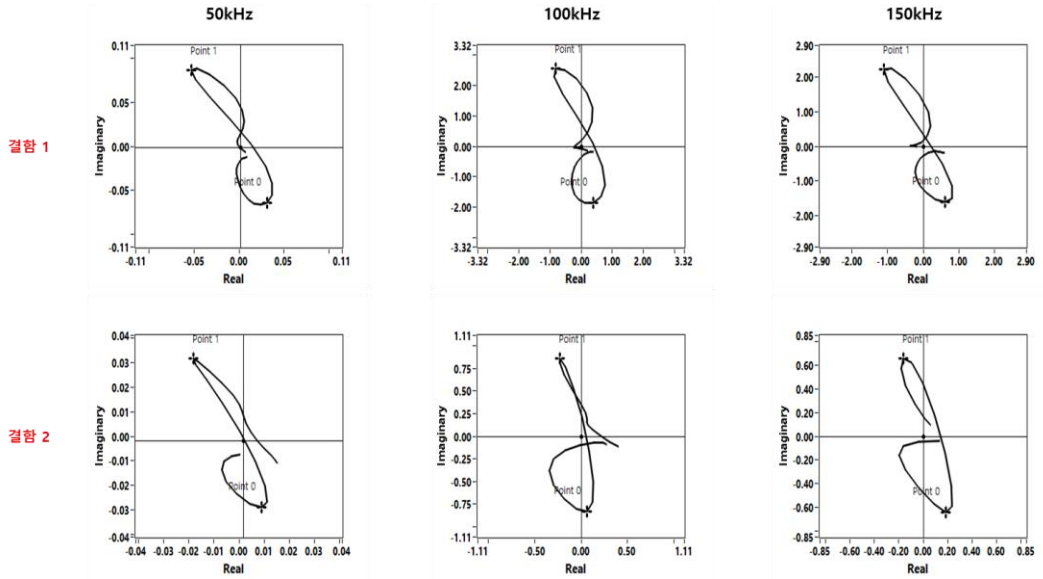


Fig. 4 -53 Lissajous curve with specimen N6

Table 4 -20 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N6

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
flaw 1	117.1mm	233.3mm	60.93	75.34	66.75
flaw 2	380.5mm	408.0mm	66.14	80.90	75.70

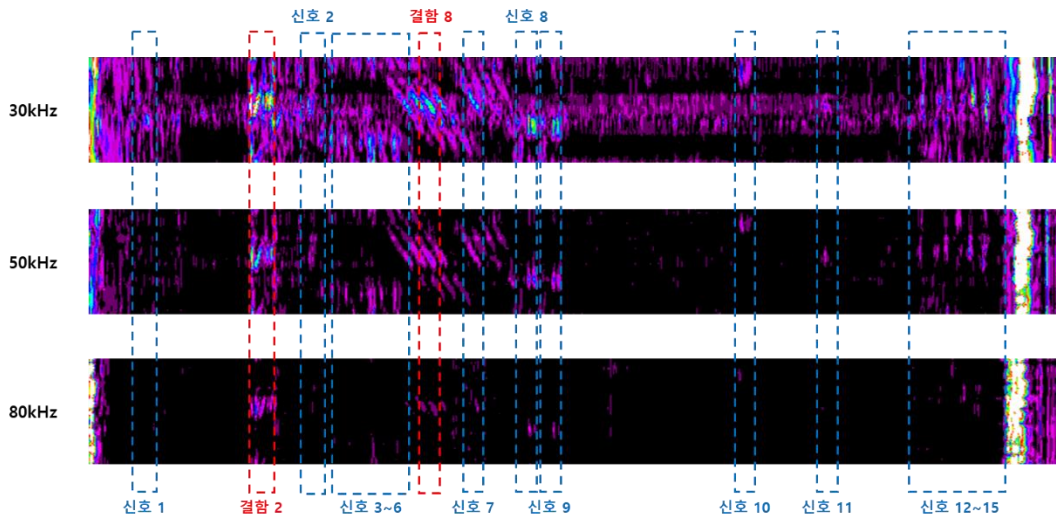


Fig. 4 -54 Continuous magnetic images with specimen #N6

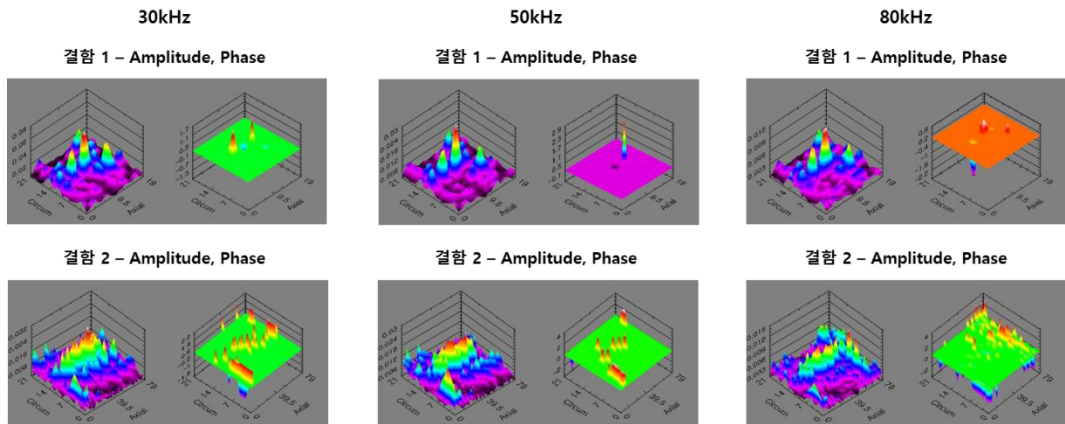


Fig. 4 -55 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N6 (1/4)

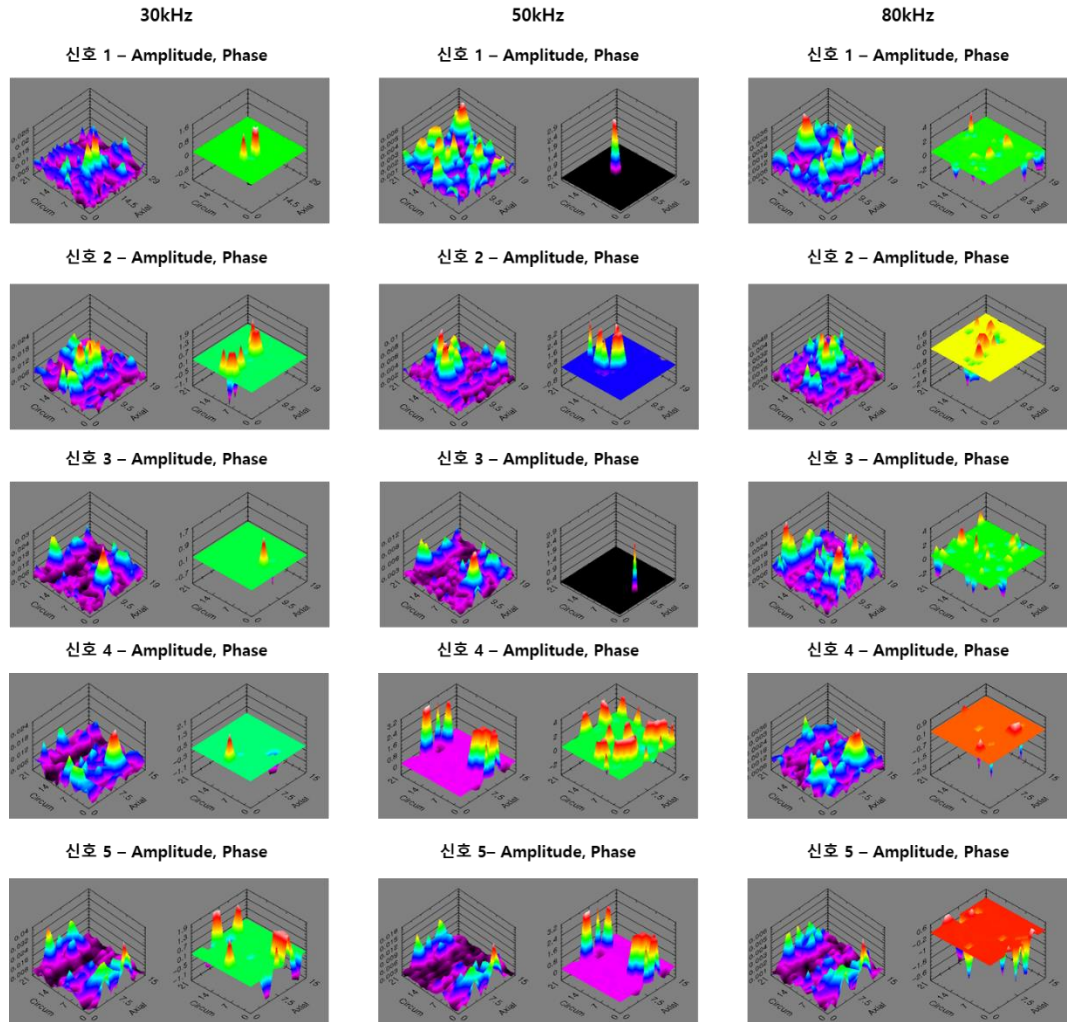


Fig. 4 -56 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N6 (2/4)

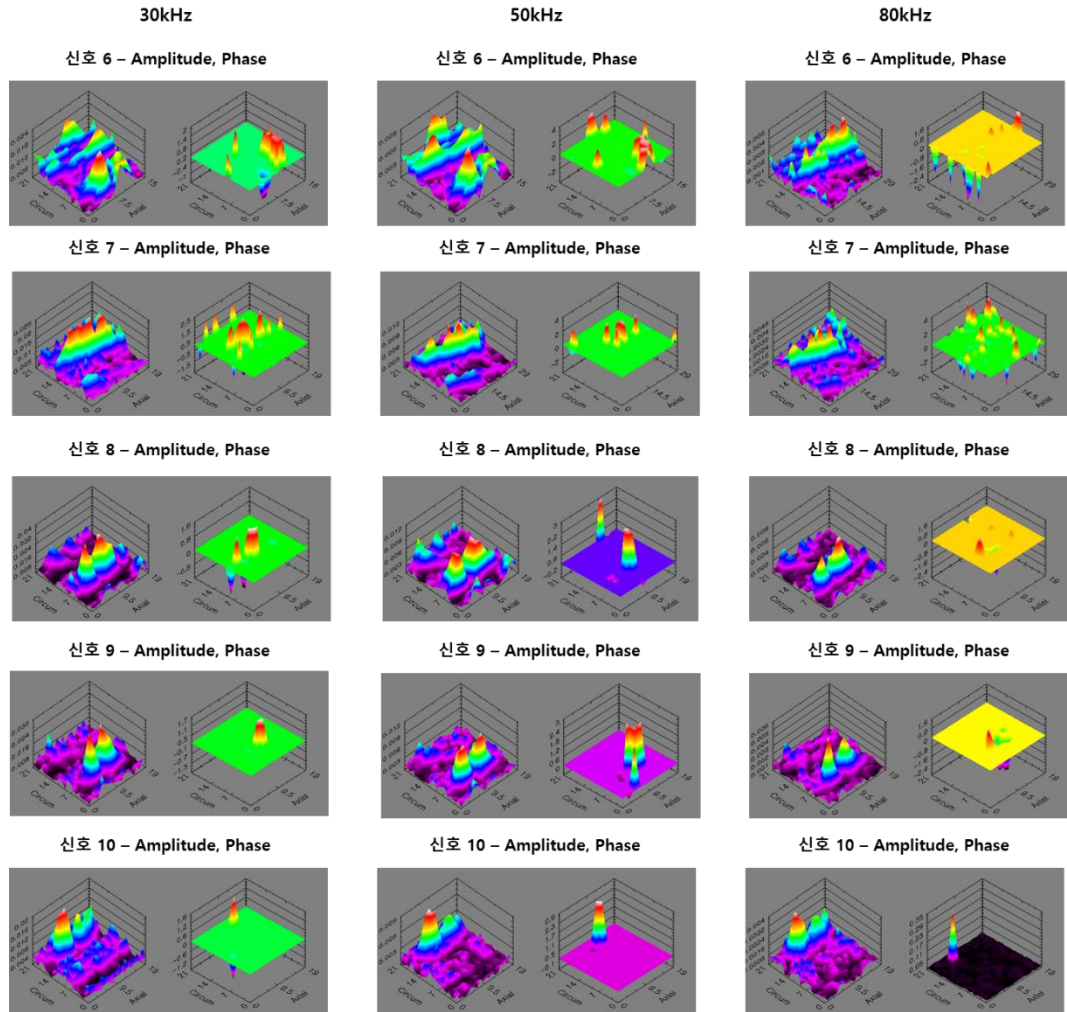


Fig. 4 -57 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N6 (3/4)

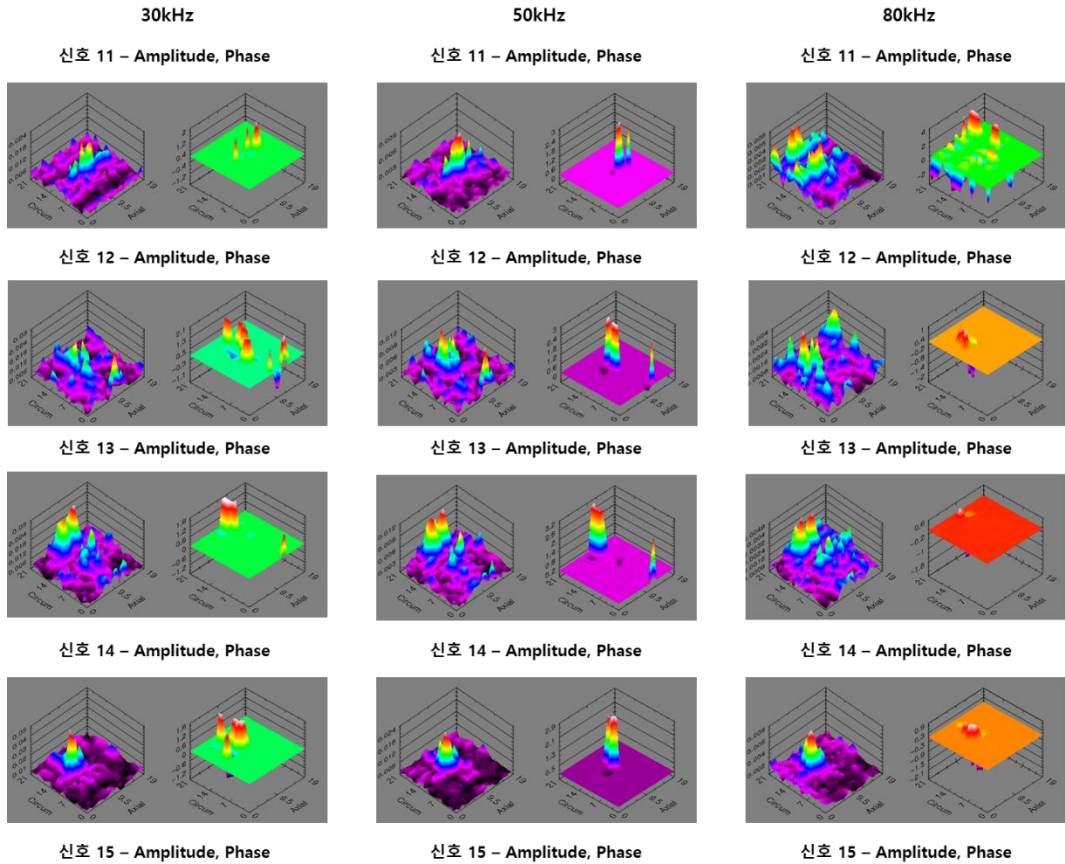


Fig. 4 -58 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N6 (4/4)

Table 4 -21 Comparison of experimental results for specimen N6

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency	classification
flaw 1	117.1mm	axial	233.3mm	217mm (axial)
flaw 2	380.5mm	axial	408.0mm	403mm (axial)

차동형 보빈 코일을 이용하여 자연결함 시험편 N7의 실험 결과는 Fig.4-59, Fig.4-60에 나타난다. 결함검출 위치는 70.5mm에서 확인하였다. 기존 검사와 20mm 오차를 보였다. BIGiS에 의한 실험 결과는 Fig.4-61~63에 나타난다. 71mm, 154mm, 194mm, 959mm, 1025mm에서 결함 검출 하였다. 보빈 ECT 실험 결과 92.5mm에서 결함이 검출되었다.

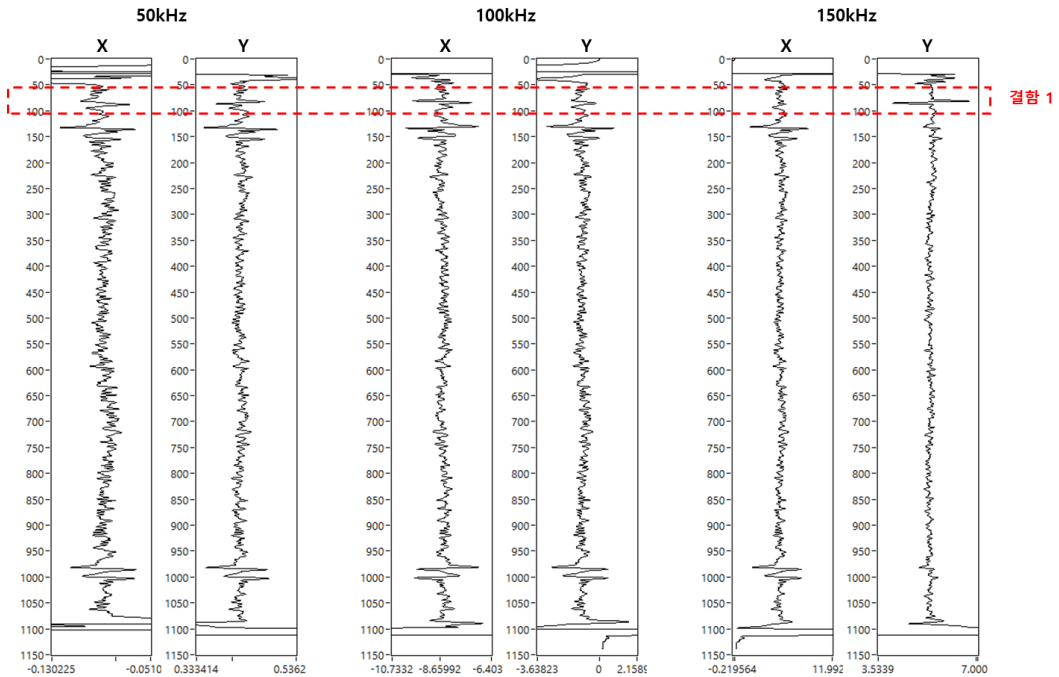


Fig. 4 -59 Continuous ECT signals with specimen N7

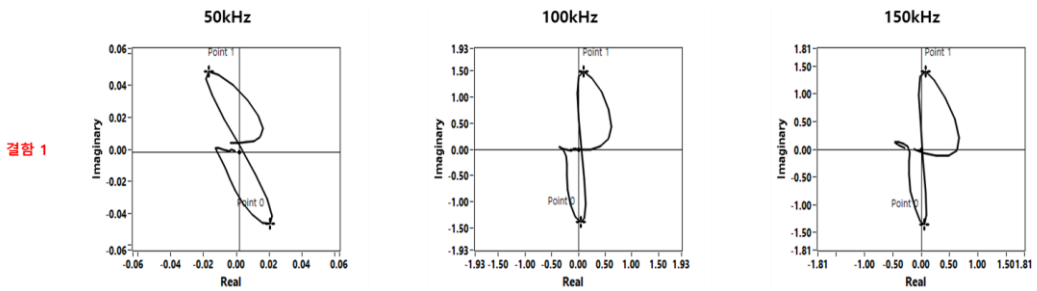


Fig. 4 -60 Lissajous curve with specimen N7

Table 4 -22 Comparison of bobbin ECT and differential bobbin coil for specimen N7

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency		
			50kHz	100kHz	150kHz
flaw 1	92.5mm	70.5mm	68.76	91.79	91.10

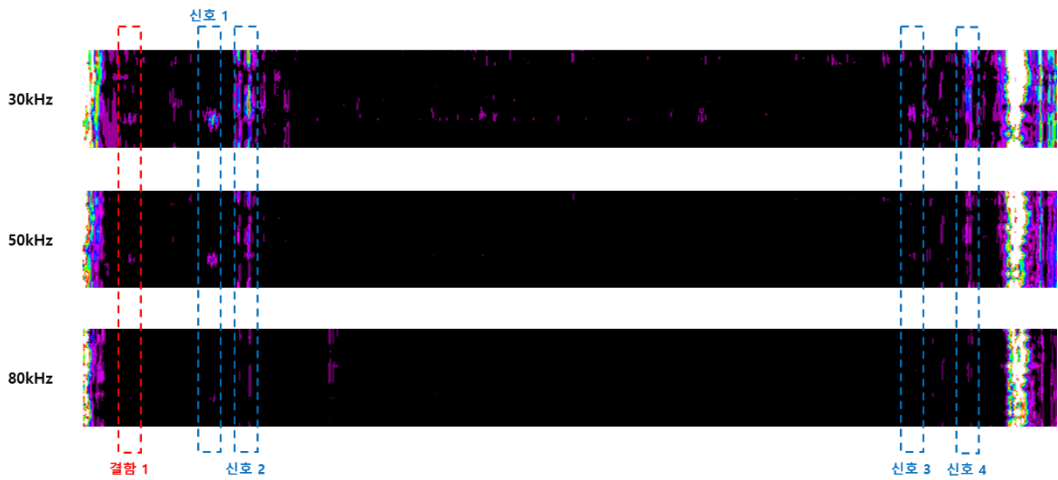


Fig. 4 -61 Continuous magnetic images with specimen #N7

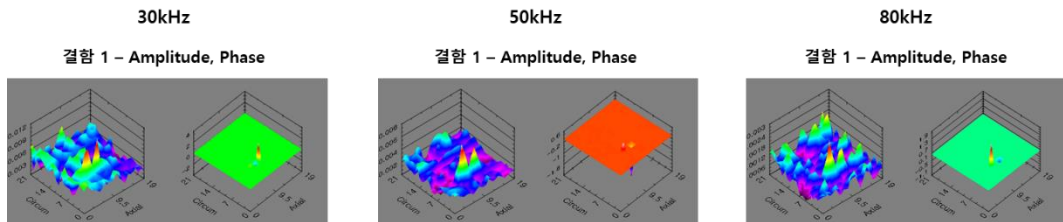


Fig. 4 -62 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N7 (1/2)

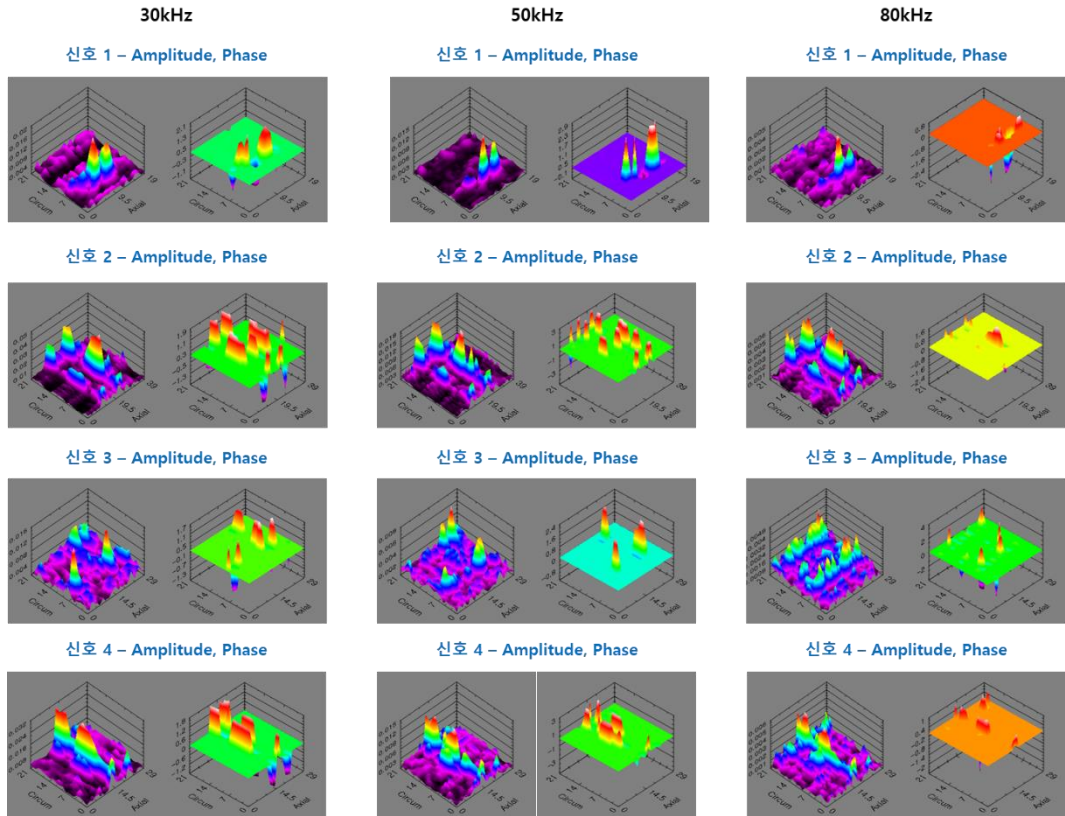


Fig. 4 -63 Distribution of magnetic intensity at each flaw with specimen #N7 (2/2)

Table 4 -23 Comparison of experimental results for specimen N7

classification	conventional bobbin probe	bobbin probe of magnetic camera	Phase angle change by frequency	classification
flaw 1	92.5mm	axial	70.5mm	71mm (axial)

제 5 장 결론

본 연구는 보빈탐촉자를 적용한 ECT의 정량 평가 측면에서의 한계를 극복하고, 회전형탐촉자를 적용한 ECT의 검사 속도와 사용 수명에 대한 현장의 요구 사항을 반영하기 위하여, 비자성체 열교환기 전열관 비파괴검사용 자기카메라를 개발하는 것을 목표로 하였다.

차동형 보빈 코일과 환형 자기센서 배열을 포함한 검사 프로브를 제작하였다. 또한 원격 직류 및 교류 안정화 전원, 그리고 병렬형 다채널 진폭-위상 신호처리회로를 개발하였다. 그리고, 이를 구동하기 위한 전용 소프트웨어를 개발하였다.

개발된 자기카메라를 검증하기 위해 비자성체 전열관 재질(STS304)의 인공 전열관 시험편을 제작하여, 각 시험편에 급수가열기에 발생하는 결함, 즉 부식, 침식, 진동의 의하여 발생할 수 있는 슬릿과 함께 여러 형상의 마모를 모사하여 가공하였다. 또한 차동형 보빈 코일과 환형 배열 자기센서를 동시에 측정하여 결함 유무 및 깊이에 따른 정량평가와 결함 형상 판별을 하였다.

차동형 보빈 코일에서는 주파수(50kHz, 100kHz, 150kHz)에 따른 결함의 회전 방향과 리사주 선도의 패턴을 이용한 알고리즘으로 결함의 위치(내면과 외면)를 파악할 수 있었다. 또한 결함의 깊이 별로 나타난 리사주 선도의 위상각 차이를 가지고 결함의 깊이를 정량평가 할 수 있었다. 100kHz 주파수를 사용하여 결함의 깊이를 표준편차 5.98%로 정량평가 할 수 있었다.

한편, 차동형 보빈 코일에서는 결함의 형상 판별 및 동일 위치에서의 결함은 구분하지 못하였다. 이는 환형배열 자기 센서를 통해 확인할 수 있다. 실험을 통하여 마모 및 슬릿형 결함들을 구분하였고, 동일 위치에 180° 사이의 슬릿형 결함과 90° 간격에 4개의 평저공 결함들을 구분해 낼 수 있다. 그리고, 실제 자연결함 시험편을 사용하여 종래의 검사 방법인 보빈 ECT와 MRPC 결과와 자기카메라의 실험결과를 비교하였다. 종래의 검사 기술에서 검출한 결함에 대해 본 연구에서 개발한 자기카메라도 동일하게 결함을 찾아내었으나, 결함 검출 위치에서의 오차가 발

생하였다. 또한 환형배열 자기 센서에서는 차동형 보빈 코일에서 검출된 결함 뿐만 아니라 다른 위치에서의 이상 신호들을 확인할 수 있었다.

결과적으로 차동형 보빈 코일을 이용하여 결함의 깊이, 위치, 알고리즘을 통한 결함의 유무를 판단했고, 환형배열 자기 센서를 통해 균열성 및 체적성 결함을 구분하고 형상을 판단할 수 있다. 또한 보빈탐촉자, MRPC 처럼 각각의 센서가 아닌 차동형 보빈 코일과 환형배열 자기 센서를 동시에 사용하여 결함의 유무, 위치, 깊이 평가, 결함 형상을 판별할 수 있었다.

REFERENCE

- [1] Tetsuo Shoji, FEB/2012, “Examples of accidents, Countermeasure and Proactive in Nuclear Power Plant”
- [2] EPRI, “EPRI Feedwater Heater Maintenance Guide”, EPRI NP 1003470, 2002
- [3] EPRI, “Guidance for an Effective Heat Exchanger Program”, EPRI NP 1022980,2011
- [4] M. O. Forster Friedrich, "Eddy current systemfor testing tubes for defects, eccentricity, andwall thickness," US patent No. US3693075A(1972)
- [5] J. C. Moulder, S. K. Shaligram, J. A. Bieber,and J. H. Rose, "Pulsed eddy current inspectionsand the calibration and display of inspectionresults," US patent No. US6037768A (2000)
- [6] G. R. Brandly, M. D. MacLean, P. P.Pastushak, D. E. Russell, J. B. Seale, A. A.Shatat and J. C. B. Winslow, "Flexible devicefor remote field eddy current inspection offerrous pipeline containing turns," US patentNo. US6087830A (2000)
- [7] A. Boenisch, "Partial saturation eddy currentsensor apparatus and method of use," USpatent No. 9213018B2 (2015)
- [8] S. Rothstein, "Tube inspection probe with rotating eddy current coil," US patents, US4625165A (1986)
- [9] L. Obrutsky, R. Renaud and R. Lakhan, Steam generator inspections: Faster, cheaper and better, are we there yet?, in: IV Conferencia Panamericana de END (COPAEND 2007), Oct. 2007, 1–17.
- [10] F. Hardy and R. Samson, "Eddy current probe with multi-use coils and compact configuration," US patents, US6344739B1 (2002)
- [11] H.M. Sadek, NDE technologies for the examination of heat exchangers and boiler tubes – principles, advantages and limitations, Insight 48(3) (2006), 181–183
- [12] L. Obrutsky, R. Renaud and R. Lakhan, Steam generator inspections: Faster, cheaper and

- better, are we there yet?, in: IV Conferencia Panamericana de END (COPAEND 2007), Oct. 2007, 1–17.
- [13] M. Kurokawa, R. Miyauchi, K. Enami and M. Matsumoto, New eddy current probe for NDE of steam generator tubes, in: Electromagnetic Nondestructive Evaluation (III), IOS Press, 1999, pp. 57–64.
- [14] G. Lafontaine, F. Hardy and J. Renaud, X-Probe® ECT array: A high-Speed Replacement for Rotating Probes, in: 3th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Nov. 2001, 14–16.
- [15] Lee, J.; Jun, J.; Kim, J.; Choi, H.; Le, M. Bobbin-type Solid-State Hall Sensor Array with High Spatial Resolution for Cracks Inspection in Small-Bore Piping Systems. IEEE Trans. Magn. 2011, 48, 3704–3707.
- [16] Lee, J.; Angani, C.; Kim, J.; Le, M.; Do, H. A review of real time visualization of eddy currents in a small bore-piping system using solid-state Hall sensor arrays. In Proceedings of the 10th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Cannes, France, Oct. 1–3, 2013; Volume 20, pp. 298–305.
- [17] Jun, J.; Lee, J.; Kim, J.; Le, M.; Lee, S. Eddy Current Imager Based on Bobbin-Type Hall Sensor Arrays for Nondestructive Evaluation in Small-Bore Piping System, The 39th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Conf. Proc. 2013, 1511, 502–509.
- [18] Le, M.; Lee, J.; Jun, J.; Kim, J. Estimation of sizes of cracks on pipes in nuclear power plants using dipole moment and finite element methods. NDT E Int. 2013, 58, 56–63.
- [19] Le, M.; Kim, J.; Vu, H.; Do, H.; Lee, J. Localization and Evaluation of Corrosion in a Small-Bore Piping System Using a Bobbin-Type Magnetic Camera. Int. J. Appl. Electromagn. Mech. 2014, 45, 739–745.
- [20] Le, M.; Vu, H.; Kim, J.; Angani, C.S.; Lee, J. Quantitative Evaluation of Corrosion in a Thin Small-Bore Piping System Using Bobbin-Type Magnetic Camera. J. Nondestruct. Eval.

- 2014, 33, 74–81.
- [21] Le, M.; Sim, S.; Kim, J.; Lee, J. Nondestructive Testing of Heat Exchanger Tubes in Balance of Plant using Bobbin Coil and Bobbin-Type Integrated Hall Sensor Array. *Mater. Eval.* 2018, 76, 79–89.
- [22] 16 P.Y. Joubert, Y. Le Bihan and D. Placko, Localization of defects in steam generator tubes using a multi-coil eddy current probe dedicated to high speed inspection, *NDT & E International* 35(1) (2002), 53–59.
- [23] Jungmin Kim, Jongwoo Jun, Jaesun Lee and Jinyi Lee, "An Application of a Magnetic Camera for an NDT System for Aging Aircraft", *Journal fo the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 3, pp.212-224, 2010.
- [24] Jongwoo Jun, jinyi Lee, Kisu Shin and Jungho Hong, "Quantitative Nondestructive Evaluation of the Aluminum Alloy Using the Sheet Type Induced Current and the Single Sensor Scanning", *Key Engineering Materials*, Vols.417-418, pp.641-644, 2010.
- [25] Jinyi Lee, Jiseong Hwang, Jongwoo Jun and Seho Choi, "Nondestructive testing and crack evaluation of ferromagnetic material by using the linearly integrated hall sensor array", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, pp.2310-2317, 2013
- [26] Jungmin Kim, Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Minhhuy Le and Changyun Cho, "Integration of Hall and Giant Magnetoresistive Sensor Arrays for Real-Time 2-D Visualization of Magnetic Field Vectors", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No.11, pp.3708-3711 , 2012.
- [27] 이진이, 이재선, 신기수, “강선 구조물 결함 탐상 및 평가”, *군사과학연구*, 제4권 제1호, pp.61-70, 2010.
- [28] Chandra Sekhar Angani, Jungmin Kim, Minhhuy Le and Hinyi Lee, "Non-destructive testing of inclusions in cold-rolled strip steels using hall and giant magnetoresistance sensor 77arrays", *International Journal of Applied Electromagnetics Mechanics*, 45, pp.747-753 , 2014.

- [29] Minhhuy Le, Jungmin Kim, Hoanghai Vu, Hwa Sik Do and Jinyi Lee, "Localization and evaluation of corrosion in a small-bore piping system using a bobbin-type magnetic camera", *International Journal of Applied Electromagnetics Mechanics*, 45, pp.739-745 , 2014.
- [30] Minhhuy Le, Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Jungmin Kim, "Estimation of sizes of cracks on pipes in nuclear power plants using dipole moment and finite element methods", *NDT&E International*, 58, pp.56-63, 2013.
- [31] 이용, "와전류에 영향을 미치는 인자," 와전류탐상검사, 도서출판 골드, 2000, pp. 15-16.
- [32] J. Galvele, "A stress corrosion cracking mechanism based on surface mobility," *Corrosion Science*, vol. 27, pp. 1-33, 1987.
- [33] K. Sieradzki and R. C. Newman, "Stress-corrosion cracking," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 48, pp. 1101-1113, 1987.
- [34] 정용무, "와전류탐상법(渦電流探傷法)(I)," *비파괴검사학회지*, vol. 13, pp. 94-100, 1993.
- [35] P.E. Mix, "Eddy Current Theory," in *Introduction to nondestructive testing: a training guide*, ed: Wiley-Interscience, 2005, pp. 66-72
- [36] 전중우, 이진이, "요크형 교류 전자기장과 선형배열 홀 센서에 의한 결함 탐상 및 평가," *대한기계학회 춘추학술대회*, 2009.
- [37] 전중우, 황지성, and 이진이, "홀센서를 이용한 상자성체의 비파괴검사," *대한기계학회 춘추학술대회*, 2006.
- [38] Sim, S., Lee, H., Lee, H., & Lee, J. (2019). Flaw Classification Algorithm for Heat Exchanger Tubes Using a Bobbin-Type Magnetic Camera. *Applied Sciences*, 9(23), 5000.
- [39] J. Kim, J. Lee, J. Jun, M. Le and C. Cho, Integration of Hall and giant magnetoresistive sensor arrays for real-time 2-D visualization of magnetic field vectors, *IEEE Transactions on Magnetics* 48(11) (2012), 3708–3711.
- [40] G. Mook, F. Michel, J. Simonin, Electromagnetic Imaging using Probe Arrays, *Proceedings*

of the 10th International Conference of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing
(1–3 September 2009), Ljubljana, Slovenia.

- [41] Le, M., Wang, D., Luong, V. S., Lee, J., & Joo, S. H. (2020). Cylinder-type magnetic cameras and their coverage performance evaluation for inspection of heat exchanger tubes. *Journal of Instrumentation*, 15(12), P12031.
- [42] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. V, Article 8, pp. 165-169, (1995)
- [43] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, App IV, PP.303, (1995)
- [44] EPRI, “Eddy Current Data Quality Parameters for Inspection of Steam Generator Tubes_ Volume 1_ Bobbin Coil Probe”, EPRI NP 1001521, 2001

Acknowledgements

박사 학위 졸업 논문을 쓰면서 많은 도움을 주신 이진이 교수님께 진심으로 감사드립니다. 힘들 때 많은 도움을 주셨고 교수님께 많은 가르침을 받았습니다. 정말 감사하다는 말씀 꼭 드리고 싶습니다. 그리고, 논문 심사를 봐주신 고낙용 교수님, 조창현 교수님, 이호용 교수님, 김정민 박사님께 깊은 감사에 말씀을 드립니다. 이번에 같이 논문을 쓴 은호 형에게도 감사를 전합니다. 또한 항상 같이 고생하며 동고동락 했던 세진이 형, 현종이 형, 명철이 형, 주현이, 부균이, 윤관이, 지수, 희준이, 동철이, 다빈이 모두 고맙습니다.

항상 저를 위해 응원해주시는 부모님께 감사 말씀 드립니다. 항상 열심히 최선을 다해 부끄럽지 않은 사람이 되도록 하겠습니다. 그리고 옆에서 항상 힘이 되주고 행복을 안겨주는 세정이 정말 고맙고 사랑합니다. 모두 감사합니다.

2021년 6월
심순보 올림