



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](#)

2018年 2月
碩士學位 論文

내삽형 자기카메라를 이용한
습분분리재열기의 비파괴검사 및
평가

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 志 洙

내삽형 자기카메라를 이용한 습분분리재열기의 비파괴검사 및 평가

Nondestructive Testing and Evaluation of Moisture
Separator & Reheater Tube by Using Bobbin-type
Magnetic Camera

2018年 2月 23日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 志 洙

내삽형 자기카메라를 이용한 습분분리재열기의 비파괴검사 및 평가

指導教授 李 鎭 伊

이 論文을 工學碩士 學位申請 論文으로 提出함

2017年 10月

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 志 洙

金志洙의 碩士學位論文을 認准함

委員長

朝鮮大學校 教授

高樂溶 (印)

委 員

朝鮮大學校 教授

趙昌鉉 (印)

委 員

朝鮮大學校 教授

李鎮伊 (印)

2017 年 11 月

朝鮮大學校 大學院

목 차

| | |
|-----------------------------|----|
| ABSTRACT | ix |
| 제 1 장 서 론 | 1 |
| 제 2 장 원리 | 7 |
| 제 1 절 복합자원 보빈형 자기카메라 | 7 |
| 1. 누설자속검사 | 7 |
| 2. 내삽형 와전류검사 | 9 |
| 3. 복합자원 보빈형 자기카메라 | 12 |
| 제 2 절 데이터 해석법 | 16 |
| 1. 차분해석 | 16 |
| 2. Detrend | 19 |
| 3. FFT 해석 | 21 |
| 4. Gabor Transform 해석 | 24 |
| 제 3 절 결합 자동판별 알고리즘 | 27 |
| 1. 결합유무판정 | 27 |
| 2. 결합정량평가 | 28 |
| 제 3 장 실험 및 고찰 | 30 |
| 제 1 절 시험편 | 30 |
| 제 2 절 실험장치 | 37 |
| 1. 특성평가 | 40 |
| 가. 주파수특성 | 40 |
| 나. 입력전류특성 | 45 |
| 다. TSP영향평가 | 47 |
| 제 3 절 결합 검출 및 정량평가 | 52 |
| 1. 결합검출확률 | 52 |
| 2. 결합정량평가 | 59 |
| 제 4 장 결론 | 65 |

REFERENCE 67

표목차

| | |
|---|----|
| Table 3-1 Physical characteristics and sizes of defect specimen S#1 | 31 |
| Table 3-2 Physical characteristics and sizes of defect specimen S#2 | 32 |
| Table 3-3 Physical characteristics and sizes of defect specimen S#3 | 33 |
| Table 3-4 Physical characteristics and sizes of defect specimen S#4 | 34 |
| Table 3-5 Physical characteristics and sizes of defect specimen S#5 | 36 |

도목차

| | |
|---|----|
| Fig. 1 -1 Main system of nuclear power plant | 2 |
| Fig. 1 -2 Damaged MSR tubes..... | 2 |
| Fig. 1 -3 Erosion in the MSR U-bend..... | 3 |
| Fig. 1 -4 Magnetic biased ECT probe..... | 5 |
| Fig. 1 -5 Section view of MSR tube | 5 |
| Fig. 2 -1 Principle of magnetic flux leakage testing | 7 |
| Fig. 2 -2 Principles of eddy current testing..... | 9 |
| Fig. 2 -3 Eddy current circuit..... | 10 |
| Fig. 2 -4 Eddy current distribution due to a crack on a pipe..... | 11 |
| Fig. 2 -5 Construction of combined ECT | 13 |
| Fig. 2 -6 Comparison of MFLT, ECT and combined ECT | 13 |
| Fig. 2 -7 Different magnetic sources of histogram : (a) MFLT of histogram, (b) ECT of histogram, (c) Combined ECT of histogram..... | 14 |
| Fig. 2 -8 Compared MFLT to ECT and combined ECT of magnetic sources..... | 15 |
| Fig. 2 -9 Specimen S#1..... | 17 |
| Fig. 2 -10 Normal data..... | 17 |
| Fig. 2 -11 Differential data processing..... | 18 |
| Fig. 2 -12 Subtract back-data processing..... | 18 |
| Fig. 2 -13 Principle of detrend data processing | 19 |
| Fig. 2 -14 Detrend data processing result (N=4)..... | 20 |
| Fig. 2 -15 Detrend data processing result (N=8)..... | 20 |
| Fig. 2 -16 Detrend data processing result (N=14)..... | 20 |
| Fig. 2 -17 Block diagram of FFT data processing | 22 |
| Fig. 2 -18 A sample of FFT data processing..... | 22 |
| Fig. 2 -19 A sample of magnetic image with FFT data processing | 23 |
| Fig. 2 -20 Principles of FFT and Gabor transform data processing..... | 25 |
| Fig. 2 -21 Comparison of FFT and Gabor transform data processing results | 26 |
| Fig. 2 -22 Unmanned crack recognition algorithm 1 | 27 |
| Fig. 2 -23 Section view at crack center of defect in scan direction (Z-axis)..... | 28 |
| Fig. 2 -24 3D surface view of a defect signal : (a) Gabor transform data processing (b) Differential data processing | 29 |
| Fig. 3 -1 Specimen S#1 (STS439, FBH, cutting process)..... | 31 |
| Fig. 3 -2 Specimen S#2 (STS410, FBH, rolling process)..... | 32 |
| Fig. 3 -3 Specimen S#3 (STS410, FBH, cutting process)..... | 33 |
| Fig. 3 -4 Specimen S#4 (STS410, Tapered wear, cutting process)..... | 34 |
| Fig. 3 -5 Specimen S#5 (STS410, Slit, cutting process)..... | 35 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3-6 Experimental setup..... | 37 |
| Fig. 3-7 Schematic of sensor probe | 38 |
| Fig. 3-8 A photograph of sensor probe | 38 |
| Fig. 3-9 Block diagram..... | 39 |
| Fig. 3-10 Experimental result with different magnetic sources | 41 |
| Fig. 3-11 Evaluation of crack volume: a) linear relationship between sum of absolute crack area signal with crack volume at 900 Hz, b) estimation of ceack volume results at 900 Hz | 42 |
| Fig. 3-12 Experimental result with different current and frequency..... | 43 |
| Fig. 3-13 Frequency responses | 44 |
| Fig. 3-14 Experimental result with different current | 45 |
| Fig. 3-15 System responses due to input current | 46 |
| Fig. 3-16 Distribution of magnetic field when TSP is Positioned around #1 | 48 |
| Fig. 3-17 Distribution of magnetic field when TSP is Positioned around #4 | 49 |
| Fig. 3-18 Distribution of magnetic field when TSP is Positioned around #7 | 50 |
| Fig. 3-19 Effect of TSP | 51 |
| Fig. 3-20 Specimen S#2 (FBH, cutting process) | 53 |
| Fig. 3-21 Specimen S#3 (FBH, rolling process)..... | 54 |
| Fig. 3-22 Specimen S#4 (Tapered Wear, cutting process) | 55 |
| Fig. 3-23 Specimen S#5 (Slit, cutting process)..... | 56 |
| Fig. 3-24 POD Curves | 58 |
| Fig. 3-25 Relation between sum with volume of FBH | 60 |
| Fig. 3-26 Relation between sum with volume of TW | 61 |
| Fig. 3-27 Relation between sum with volume of Slit | 62 |
| Fig. 3-28 Volume estimation : (a) estimation of defect volume results at specimen S#2, (b) estimation of defect volume results at specimen S#3, (c) estimation of defect volume results at specimen S#4, (d) estimation of defect volume results at specimen S#5 | 64 |

약어 설명

| | |
|-------|-----------------------------------|
| MSR | Moisture separator & reheater |
| MFLT | Magnetic flux leakage testing |
| RFECT | Remote field eddy current testing |
| ECT | Eddy current testing |
| FFT | Fast fourier transform |
| FBH | Flat bottom hole |
| TWH | Thru wall hole |
| TW | Tapered wear |
| RMS | Root-mean-square |
| TSP | Tube support plate |
| S/N | Signal to noise |
| AC | Alternating current |
| DC | Direct current |
| A/D | Analog to digital converter |
| POD | Probabillity of detection |

기호 설명

| | |
|-----------|-------------------------|
| \vec{M} | Magnetization |
| \vec{H} | Magnetic field |
| x_m | Magnetic susceptibility |
| \vec{B} | Magnetic flux density |
| μ_0 | Absolute permeability |
| V_{emf} | Electromotive force |
| Φ | Magnetic flux |
| N | Turn of coil |
| L | Inductance |

ABSTRACT

Nondestructive Testing and Evaluation of Moisture Separator & Reheater Tube by Using Bobbin-type Magnetic Camera

Jisu kim

Advisor: Prof. Jinyi Lee, Ph.D.

Dept. of Control and Instrumentation Eng.
Graduate School of Chosun University

This study analyzes the nondestructive testing and evaluation of moisture separator and reheater (MSR) in the secondary system. The MSR is a heat transfer tube in a heat exchanger, which increases the quality of steam used in a high-pressure turbine to reuse it in a low-pressure turbine. As the MSR tube is made of ferromagnetic material (SS439), it shows high strength under the conditions of high temperature and pressure. Nondestructive testing applying existing eddy current inspection technology cannot be carried out on ferromagnetic tubes due to electromagnetic characteristics such as high magnetic permeability and low conductivity. Moreover, the shape of a fin installed at the external wall of this tube to increase heat transfer area leads to leakage flux or distortion of eddy currents, thereby reducing fault detection performance.

This paper proposes a method of signal processing and analysis, which detects faults in the ferromagnetic MSR fin tubes electromagnetically to remove the distribution of eddy currents distorted by external fins and extract valid fault information effectively.

Magnetic flux leakage testing (MFLT), eddy current testing (ECT) and combined ECT were performed and evaluated by using a Bobbin-type magnetic camera to examine the MSR tube. The test results indicate that stripes are repeatedly shown by the external fin in MFLT and that

the S/N ratio increases due to the minimized number of stripes in ECT. However, signal strength is higher in MFLT than that in ECT. The results obtained by conducting combined ECT applying both MFLT and ECT verify that the number of stripes generated by the external fin is lower than that in MFLT and that the S/N ratio increases due to stronger fault signals. For this reason, combined ECT was applied in this study. In addition, the fault detection performance of this method was validated by using a SS439 specimen in which artificial faults such as flat bottom holes, slits, tapered wear, and grooves were added.

제 1 장 서 론

원자력발전소는 Fig. 1-1에 나타낸 바와 같이 1차 계통과 2차 계통으로 나누어진다. 1차 계통의 원자로에 의하여 발생한 열에너지에 의하여 고온 고압의 수증기를 발생시킨 후, 2차 계통의 터빈을 회전시켜 전력을 생산한다. 한편, 2차 계통의 습분분리재열기(MSR, moisture separator and reheater)는 고압터빈에서 사용된 증기의 질을 높여 저압터빈에서 다시 사용할 수 있게 해주는 원자력발전소 열교환기 전열관의 하나이다. 따라서, MSR 튜브에 이상이 생겨 증기에 수분이 많게 되면 발전소의 효율이 떨어지게 되고 또 터빈의 침식 현상이 발생해 고장 및 불시정지의 원인이 된다. 실제로 국내에서는 2005년 1월 한울 2호기 MSR 튜브 누설에 따른 전열관 정비로 4일간 원자로를 정지한 사례가 보고된 바 있다[1] ~ [5].

한편, MSR에 사용되는 SA-268-TP439(SS439) 튜브는 자성체 튜브로써 고온, 고압에서 강도는 우수하다. 그러나, 운전 중에 Fig. 1-2, 3에 나타낸 바와 같은 증기 커팅, 침식, 기계적 진동 및 응력부식균열 등의 사용 중 결함이 발생할 수 있다. 이러한 결함에 기인하여 발전소 정상운전에 지장을 초래할 수 있기 때문에 주기적인 비파괴검사의 수행이 필요하다.

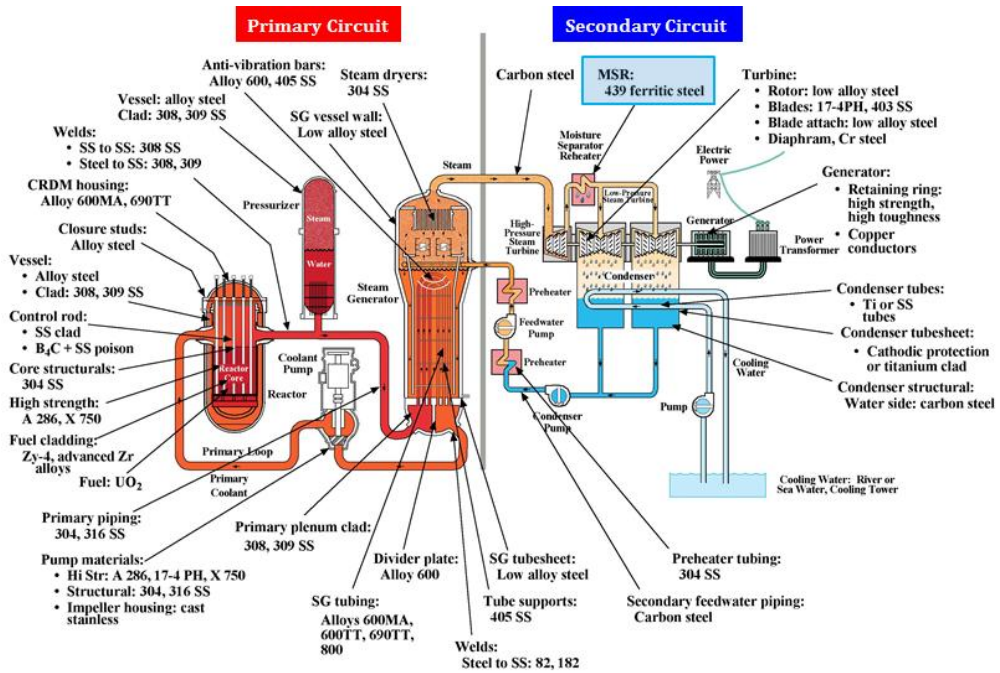


Fig. 1 -1 Main system of nuclear power plant



Fig. 1 -2 Damaged MSR tubes



Fig. 1-3 Erosion in the MSR U-bend

그러나, 자성체 열교환기 튜브는 투자율이 높은 특성으로 인해 투자율 변화로 발생한 신호로부터 실제 결함신호를 구분하기 어려워 기존 비자성체 튜브에 주로 사용되는 일반적인 와전류검사법(ECT, eddy current testing)으로는 검사가 곤란하다. 대체 수단으로 원격장 와전류탐상법(RFECT, remote field ECT), 자기편향 와전류검사(magnetic biased ECT) 및 누설자속 탐상법(MFLT, magnetic flux leakage testing) 등의 방법을 사용하고 있다[6]~[8].

RFECT는 내삽형 탐촉자로써, 여자코일(Exciter Coil)과 측정코일(Pick-up Coil)로 구성된다. 여자코일에서 발생하는 자기에너지는 두 개의 경로로 전파되는데, 하나는 여자코일에서 관 외부로 나가 축방향으로 흐르다가 일정 거리 떨어진 원격장 영역에서 관 내부로 다시 들어오는 간접경로이다. 또 다른 하나는 여자코일 부근의 관 내부에서 영향을 미치는 직접경로이다. 측정코일은 여자코일로부터 직접적인 영

향을 받지 않고 간접경로를 통해 전달되는 에너지만을 감지할 수 있도록 원격장 영역에 위치한다. 전열관 벽을 통과하는 자기장을 이용하기 때문에 관벽 전체의 검사가 가능하며, 여자코일과 측정코일이 결합부위를 지날 때 각각 결합 지시를 하여 하나의 결합에 대해 두 번의 결합 지시가 나타난다. 탐상신호는 센서코일에 유도되는 기전력이 사용되지만, 기전력의 크기가 작은 값이기 때문에 위상신호를 사용한다. 즉, 여자코일과 측정코일 사이의 위상차가 결합을 지시하는 주요 수단이 된다[6] ~ [9]. 또한, RFECT는 부식과 같은 비교적 체적이 큰 결함의 검출에 유리한 반면 SCC와 같은 균열성 결함과 관지지판(TSP, Tube Support Plate)에서의 결함 검출능이 충분하지 않다는 한계를 가지고 있다. 또한, 원격장을 발생 및 측정하기 위하여 여자코일과 픽업코일을 각 코일의 직경대비 2~4배의 간격으로 배치해야 하기 때문에 센서부의 총 길이가 길어지고, 결과적으로 U-bend와 같은 곡선부에서는 검사가 곤란하다는 한계를 가지고 있다. 한편, RFECT에서 발견한 이상신호를 확인하기 위하여 내시경을 통한 육안검사 확인을 별도로 추가 실시함에 따라, 검사 및 결과 해석에 추가시간이 소요되는 등의 문제점이 발생하고 있다.

자기편향 와전류검사법(Magnetic Biased ECT)은 Fig. 1-4에 나타낸 바와 같이 와전류탐상기의 내부에 영구자석 또는 전자석을 삽입하여, 자성체튜브의 내벽을 완전포화 또는 부분포화시키는 구조를 가진다. 강자성체는 투자율이 상자성체의 10~200배 정도로 크며, 재질의 성분, 냉간가공, 열적이력, 잔류자화에 기인하여 부분적인 투자율 분포가 균일하지 않다. 와전류 신호는 결함의 유무 뿐 아니라, 투자율의 변화도 측정하기 때문에 인위적으로 투자율의 변화를 '0'에 가깝게 만들어줄 필요가 있다. 투자율 변화를 '0'으로 만들어 줄 수 있는 방법은 시험편을 큐리온도 이상에서 검사하거나, 완전 포화시키는 방법이 있으며, 현실적으로 포화시키는 방법이 가능하다. 여기에서 동일한 자화력이라도 투자율이 높은 재질이거나 시험편의 두께가 얇으면 포화자화가 가능하나, 투자율이 낮은 재질 또는 MSR과 같은 시험편의 두께가 두꺼운 경우에는 부분포화가 일어날 수 있다.

뿐 만 아니라, MSR 튜브는 Fig. 1-5와 같이 외벽에 열전달 면적을 증대하기 위
 한 핀이 가공되어 기존의 와전류검사에 의하면 핀 자체의 형상에 기인하여 결함
 검출능이 현저히 저하되는 단점을 가지고 있다.

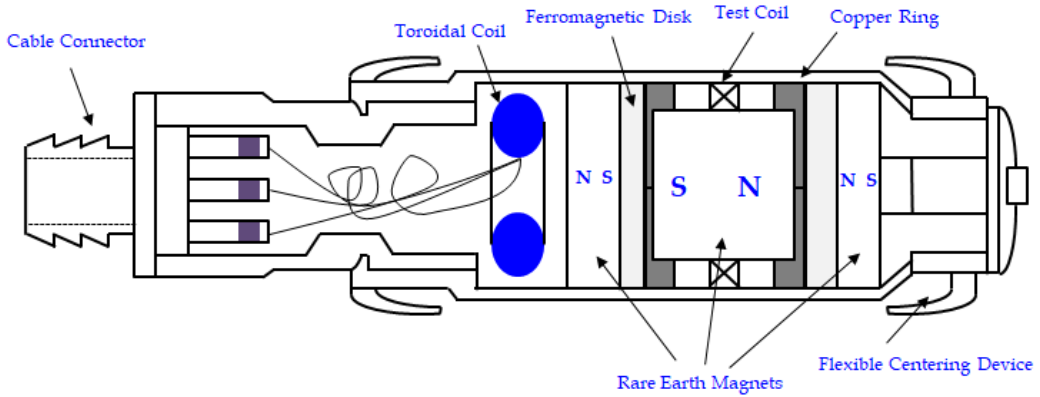


Fig. 1-4 Magnetic biased ECT probe

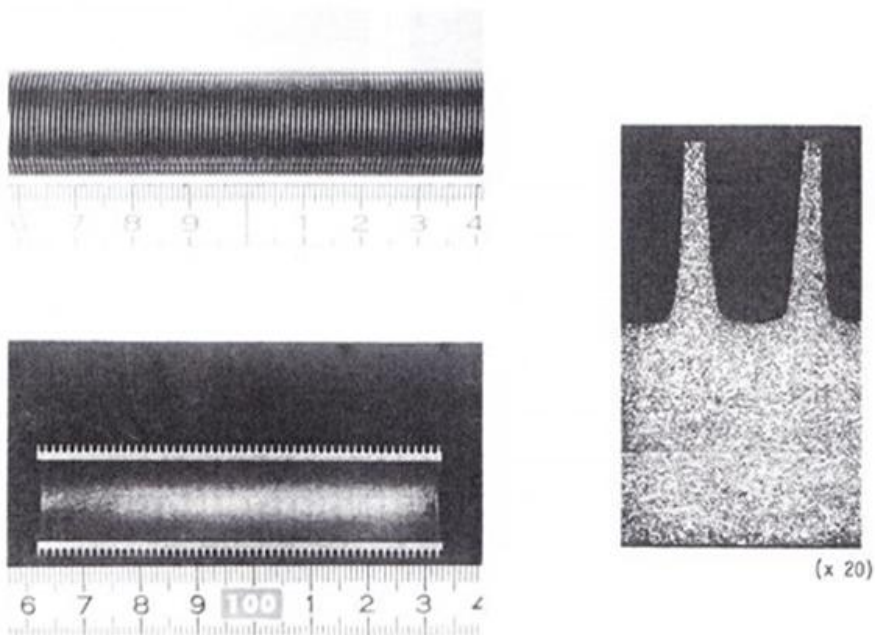


Fig. 1-5 Section view of MSR tube

<http://www.tubular.nssmc.com/product-services/specialty-tube/product/low-fin-tube-for-moisture-separator-heater>

누설자속탐상법은 피측정체인 소구경 전열관 내부에 원통형의 자석을 삽입하여 시험편을 부분적으로 자화시키고, 결함의 존재에 기인한 누설자속을 자기센서에 의하여 측정하는 검사방법이다[10-11]. 하지만, MSR 튜브와 같이 외벽에 핀이 가공되어 있을 경우에는 결함 뿐 아니라, 핀에 의한 누설자속이 발생하게 되어 결함 검출능이 저하될 수 있다.

따라서, 본 연구는 원자력발전소 MSR 열교환기 전열관 튜브의 내면 및 외면에 존재하는 마모, 균열(축방향, 원주방향) 및 기하학적 결함을 검출하고, 평가할 수 있는 내삽형 비파괴검사 시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다.

본 논문은 총 4장으로 구성된다. 제 1장은 서론이다. 제 2장은 습분분리재열기의 결함을 검출하기 위한 내삽형 자기카메라의 이론적 배경과 함께, 데이터 표현법, 자동결함추출 알고리즘에 대하여 설명한다. 제 3장은 본 연구를 통하여 제안된 검사시스템을 검증하기 위한 시험편 및 실험 결과를 보고한다. 제 4장은 결론이다.

제 2 장 원리

제 1 절 복합자원 보빈형 자기카메라

1. 누설자속검사

누설자속탐상법(MFLT, magnetic flux leakage testing)은 강자성체인 피측정체에 전 자석이나 영구자석을 사용하여 자기장을 인가하여 자화시키고, 이에 따라 발생된 자속(magnetic flux)이 결함, 부식등에 의해 자속의 일부가 누설된다. 이러한 누설자속(MFL, magnetic flux leakage)을 코일 또는 자기센서를 이용하여 측정 및 평가를 하여 결함의 정보를 추정하는 방법이다[12-13].

Fig. 2-1은 강자성체 재질인 피측정체에 존재하는 결함에 의해 자속이 누설되는 현상을 나타낸다. 여자기인 자석을 이용하여 자기장(\vec{H})을 인가하면, 검사체 내부가 자화(\vec{M})된다. 자화는 Eq (1)에 나타난 바와 같이 자화율(magnetic susceptibility)과 외부자기장 \vec{H} 의 곱으로 표현된다[14].

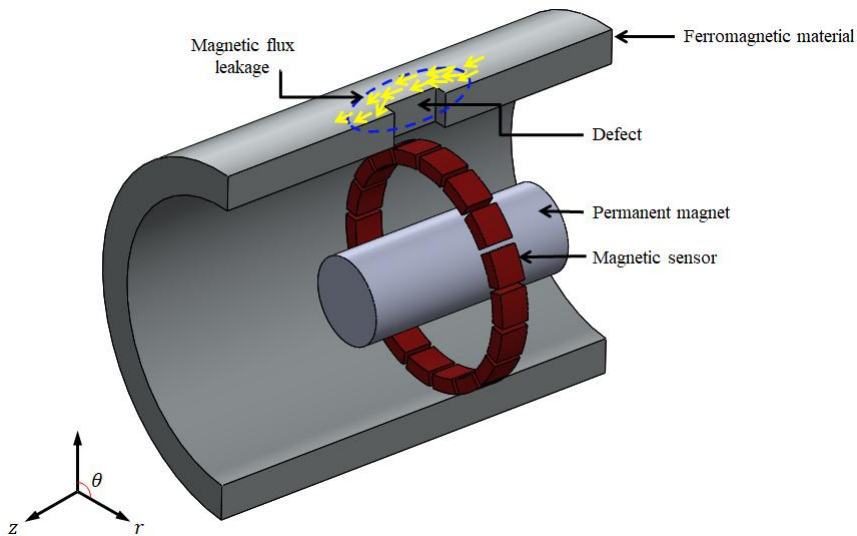


Fig. 2 -1 Principle of magnetic flux leakage testing

$$\vec{M} = x_m \vec{H} \quad (1)$$

만약, 결함이 없다면 시험편 내벽의 자속밀도 (\vec{B})는 Eq (2)에 나타난 바와 같이, 외부자기장과 자화의 합으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{H} \\ &= \mu_0 (\vec{H} + x_m \vec{H}) \\ &= \mu_0 (1 + x_m) \vec{H} \\ &= \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \end{aligned} \quad (2)$$

하지만, 결함이 있는 경우 시험편의 자화율(x_m) 대신에 공기를 포함한 자화율의 영역의 변화가 나타나므로 상기 Eq (2)는 다음 Eq (3)으로 표현할 수 있다. 여기에서 A_T 는 전체영역, A_C 는 결함영역을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \vec{B}_C &= \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \left(\frac{A_T - A_C}{A_T} x_m \right) \vec{H} \\ &= \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \left(1 - \frac{A_C}{A_T} \right) x_m \vec{H} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서, 결함유무에 따라 Eq (4)에 나타난 바와 같은 국부적으로 $\Delta \vec{B}$ 의 차이가 나타나게 되며, 이를 자기센서에 의하여 측정한다.

$$\Delta \vec{B} = \vec{B} - \vec{B}_C = \mu_0 \frac{A_C}{A_T} x_m \vec{H} \quad (4)$$

2. 내삽형 와전류검사

전자기 비파괴검사의 한 종류인 와전류 탐상법(ECT, eddy current testing)은 교류 전류가 인가된 송신코일을 피검사체에 전자기 유도를 통한 와전류를 생성시켜 발생하는 유도전류가 수신코일의 임피던스의 변화를 구함으로써 결함을 검사하는 방법이다. 전자기유도를 이용하여 검사하며, 피측정체와 프로브가 비접촉식이기 때문에 고속검사가 가능하며, 원자력발전소, 화력발전소, 석유화학플랜트등에 주로 이용된다. 와전류신호는 결함의 유무, 형상 및 크기등에 따라 각각 다른 신호의 변화가 나타나며, 이러한 변화를 해석하여 결함을 판단한다. ECT는 표피효과로 인한 침투 깊이의 제한으로 깊은 곳에 있는 결함의 검출이 곤란하여 두께가 얇은 재질에 주로 사용되며 결함뿐만아니라 재질의 특성, 두께, 투자율 등 전자기적 변화도 측정할 수 있다. 하지만 이러한 특성들로 인해 결함검출에 있어서 제한적으로 작용할 수 있다[15].

Fig. 2-2는 ECT의 원리를 나타내며, 코일에 교류전류를 인가하게 되면 자계가 흐르는 수직방향으로 와전류가 발생하게 되고, 이때 시험편에 유도전류를 발생시킨다. 이러한 유도전류는 재질, 두께, 결함, 전자기적 특성등에 대한 영향으로 유도전류가 왜곡된다. 이러한 자계의 변화는 코일의 임피던스를 변화시키고, 변화된 임피던스를 측정하여 피측정체의 재질, 형상, 결함의 유무를 평가한다[16].

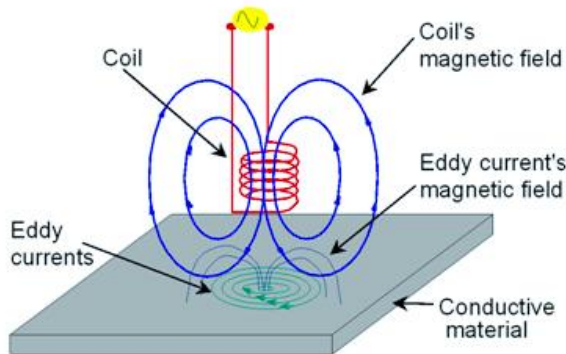


Fig. 2-2 Principles of eddy current testing
 (자료출처: <http://www.ndt-kits.com>)

본 연구에서는 이러한 ECT의 원리와 동일하지만 결함에 기인한 와전류의 왜곡을 Fig. 2-4과 같은 내삽형 자기카메라의 자기센서를 이용하여 측정한다. 이러한 구조에서 코일에 와전류를 인가하면 피측정체의 중심으로부터 자기장이 유도되며, 이러한 자기장에 의해 수직방향으로 유도전류가 발생한다. 이러한 원리를 가지는 회로를 Fig. 2-3에 나타내었다. 패러데이 전자기 유도법칙에 의하면, 기전력 V_{emf} (electromotive force, [V])은 Eq (5)에 나타낸 바와 같이 자속 Φ (magnetic flux, [wb])의 시간 변화에 비례하고, 그 방향은 자속의 반대방향이다. 여기에서 N_2 는 픽업코일의 권선수이고 \vec{B}_{12} 는 코일 1에 의하여 발생한 자속이 코일 2에 미치는 자속밀도이다[17]. 이러한 자속밀도는 Eq (6)에 나타낸 바와 같이 코일의 권선수, 인덕턴스, 그리고 흐르는 전류에 비례한다.

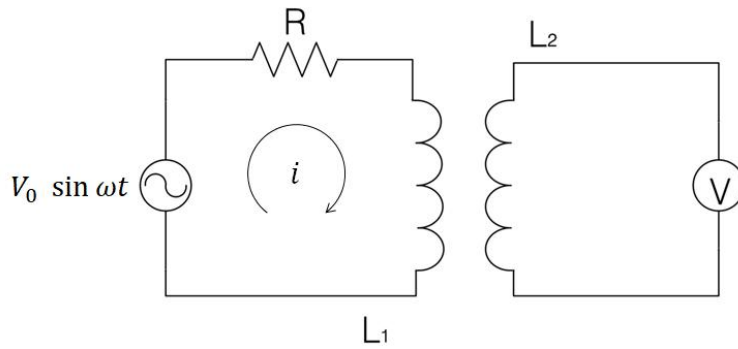


Fig. 2-3 Eddy current circuit

$$V_{emf} = -N_2 \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -N_2 \frac{\partial}{\partial t} \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = N_2 \oint_S \left(-\frac{\partial \vec{B}_{12}}{\partial t} \right) d\vec{s} \quad (5)$$

$$|\vec{B}_{12}| \propto N_1 L_1 i_1 \quad (6)$$

Kirchihoff의 전압법칙에 의하면 코일과 저항에 의하여 구성되는 회로의 전압강하는 Eq (7)과 같이 표현될 수 있다. 또한, 해는 Eq (8)과 Eq (9)에 의하여 표현된다. 따라서, Eq (6)의 자속밀도는 Eq (8)의 i_1 에 비례하고, 결과적으로 결함의 존재에 기인하여 진폭과 위상차가 변화한다. 본 연구에서는 자기센서를 이용하여 결함의 존재에 기인한 진폭 및 위상차의 변화를 자속밀도의 변화로부터 측정한다.

$$L_1 \frac{d^2 i_1}{dt^2} + R \frac{di_1}{dt} = \omega V_0 \cos \omega t \quad (7)$$

$$i_1 = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2}} \sin(\omega t - \delta) \quad (8)$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} \quad (9)$$

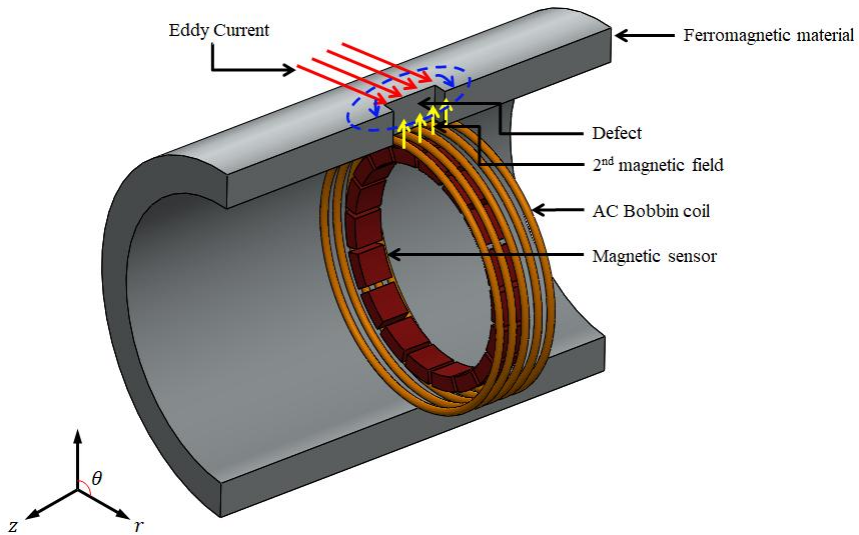


Fig. 2-4 Eddy current distribution due to a crack on a pipe

3. 복합자원 보빈형 자기카메라

일반적으로 누설자속탐상법은 자화방향과 결함의 방향이 수직일 때 결함 검출 능력이 최대가 된다. 또한, 와전류탐상법은 유도전류와 결함의 방향이 수직일 때 결함 검출능력이 최대가 된다. 따라서, 소구경 전열관 튜브 시험편에서는 누설자속탐상법은 원호방향 결함, 와전류탐상법은 축방향 결함의 검출에 적합하다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 2-5와 같이 두 가지 자원, 즉 영구자석에 의한 누설자속과 코일에 의한 와전류를 동시에 인가하는 복합자원을 채택하였다. 이러한 복합자원 보빈형 자기카메라는 페라이트계 강자성체 재질인 시험편을 국부적으로 자화시켜, 재질의 투자율을 국부적으로 일정하게 만드는 부분자화 ECT의 효과를 얻을 수 있다 [18-19].

Fig. 2-6은 Fig. 2-5의 구조를 가지는 보빈형 자기카메라를 이용하여 영구자석(MFLT), 보빈코일(ECT) 및 복합자원(Combined ECT)을 각각 인가하였을 때의 자계 분포를 나타낸다. ECT 및 Combined ECT에서는 900 Hz를 인가하였다. MFLT에 의하면 MSR 외벽의 핀으로부터 누설된 자속에 기인하여 줄무늬가 나타난다. 이러한 줄무늬는 ECT에서는 최소화될 수 있다. 한편, 복합자원에서는 일부 줄무늬가 나타나기는 하지만 작은 결함, 즉 #7~9도 검출할 수 있을 정도로 S/N비가 향상된다.

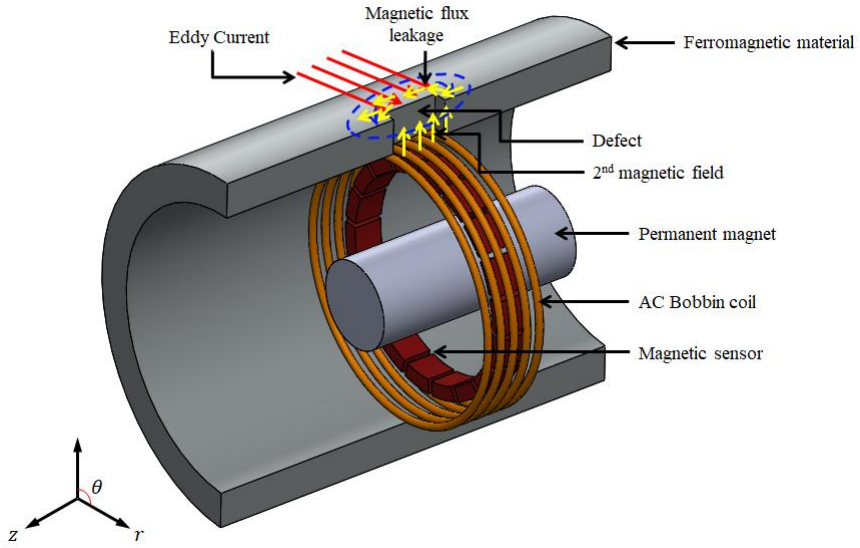


Fig. 2-5 Construction of combined ECT

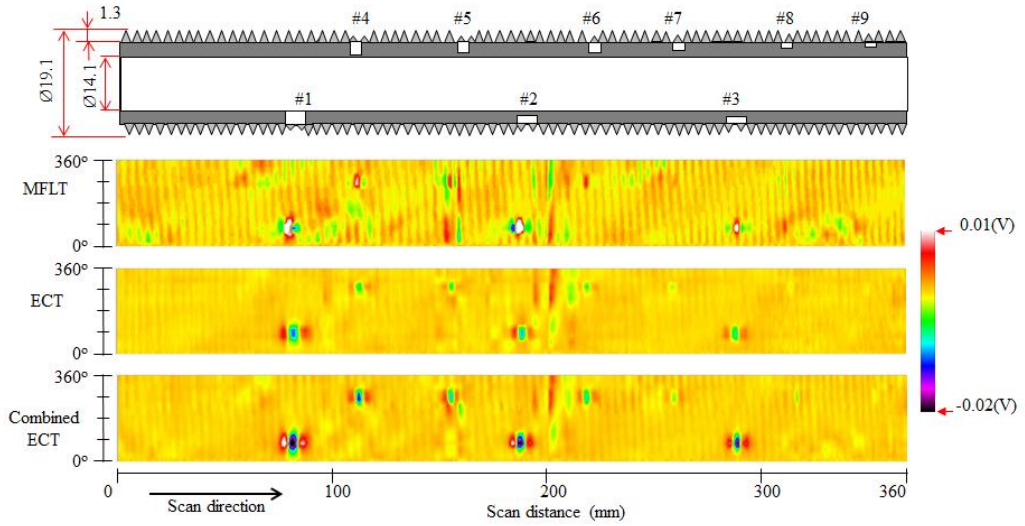


Fig. 2-6 Comparison of MFLT, ECT and combined ECT

Fig. 2-7은 상기 Fig. 2-6의 각각의 자원에 따른 자기분포영상의 히스토그램을 나타낸다. 히스토그램에 따르면 MFLT신호인 Fig. 2-7 (a)는 외부 핀으로부터 누설된 자속인 줄무늬의 영향으로 0.0029 ~ 0.0025V 인근에서 높은 데이터 분포를 나타내고 결합신호가 양측에 넓게 분포한다. ECT신호인 Fig. 2-7 (b)는 MFLT에 비하여 줄무늬의 영향은 적지만 결합신호 (0.0029V이상, -0.0025V이하) 또한 작다. 반면에 Fig. 2-7 (c)에 나타낸 Combined ECT는 0.0016V~ -0.0011V 의 줄무늬도 있지만 결합신호의 강도 및 빈도도 증가한다. Fig. 2-8은 각 방법에서 결합의 신호 (0.00016V이상, -0.0011V이하)의 적분값을 비교한 결과이다. Combined ECT에서 잡음신호대비 결합신호의 강도 및 빈도수가 248개로 MFLT(68개)와 ECT(44개)에 비해 가장 높았다. 따라서, 본 시스템에서는 Combined ECT를 채택하였다.

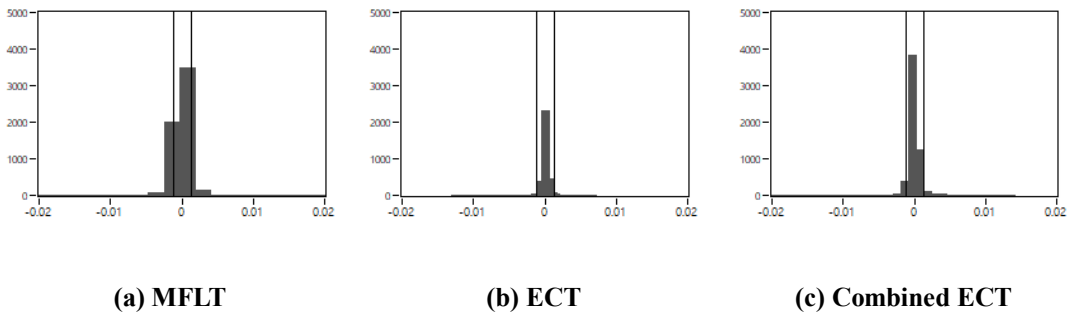


Fig. 2-7 Different magnetic sources of histogram : (a) MFLT of histogram, (b) ECT of histogram, (c) Combined ECT of histogram

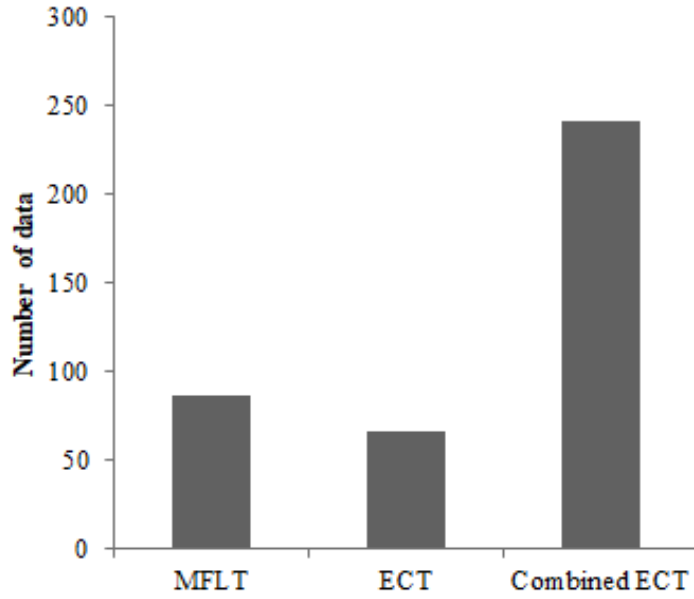


Fig. 2-8 Compared MFLT to ECT and combined ECT of magnetic sources

제 2 절 데이터 해석법

1. 차분해석

보빈형 자기카메라는 홀센서를 환형으로 배열하여 반지름 방향의 성분을 가진 시변자계를 측정한다. 홀센서는 Eq (11)에 표현한 바와 같이 센서면에 수직인 방향의 자속밀도($B \cos \theta$)에 비례하는 신호를 출력한다. 여기에서 $\sin \omega t$ 는 시변자계임을 의미한다.

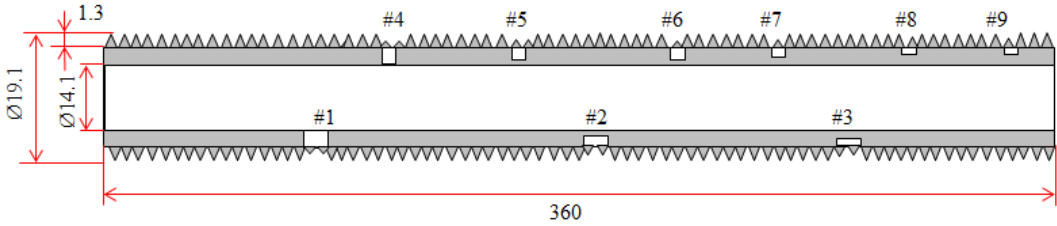
$$V_H = kBI \cos \theta \cdot \sin \omega t \quad (11)$$

k , I 는 홀상수 및 입력전류이다. 시변자계의 경우에는 RMS(root mean square) 회로에 의하여 Eq (12)로 표현되는 진폭으로 나타낼 수 있다.

$$V_S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (kBI \cos \theta \sin \omega t)^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} kBI \cos \theta \quad (12)$$

Fig. 2-10은 보빈형 자기카메라를 활용한 Fig. 2-9의 시험편을 이용한 실험 결과의 예를 나타낸다. 종축은 축방향, 횡축은 각도를 나타낸다. 즉, 배열된 각각의 센서가 횡축의 각도를 대변하며, 축방향으로 스캔할 때 유사한 신호레벨이 지시되는 것은 동일한 센서에 의하여 측정되었기 때문이다. 결과적으로 배열된 각각의 센서의 물리적 특성, 즉 감도 및 바이어스전압의 차이에 의하여 결함 유무를 판정하기 곤란하다. 이러한 오차는 다음 Eq (13)으로 표현되는 차분해석에 의하여 최소화할 수 있다. 여기에서 i 와 j 는 각각 축방향 스캔거리와 센서 번호를 나타낸다.

$$\Delta V(i, j) = V_S(i + 1, j) - V_S(i, j) \quad (13)$$



**Fig. 2-9 Specimen S#1
(First specimen)**

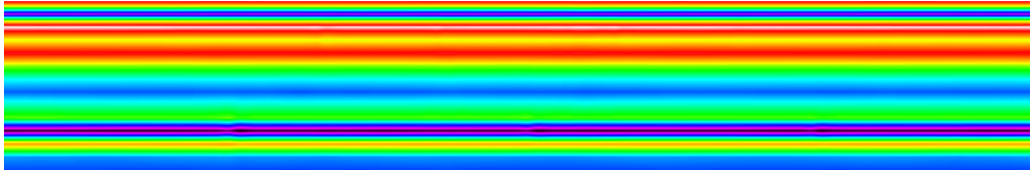


Fig. 2-10 Normal data

Fig. 2-11은 상기 Eq (13)의 원리를 이용하여 Fig. 2-10의 결과를 재해석한 것이다. 센서 상호의 물리적 특성 차이가 최소화됨으로써, 결함의 유무 및 위치, 나아가 크기까지 평가할 수 있다.

한편, 이러한 차분해석은 Eq (14) 및 Fig. 2-12로 표현되는 배경 차분 신호처리 (subtract back-data processing)와는 큰 차이가 있다. 환형으로 배열된 각 센서의 검사 개시위치에서의 출력, $V_s(0,0)$ 을 기준으로 축방향으로 이동하면서 측정한 각각의 신호출력 $V_s(i,j)$ 의 차이를 지시함으로써, 홀센서 출력의 바이어스 오차를 제거하는 것이 배경 차분 신호처리이다. 반면에 차분해석은 인접한 자계의 분포 차이를 지시하므로 바이어스 오차 뿐 아니라 감도오차까지 제거할 수 있다는 특징을 가진다. 하지만, V_b 가 원래의 자계특성, 즉 결함의 양단에서 N극과 S극의 특성을 보이는 반면에, V_s 는 원래의 자계 특성을 지시하지 못한다는 한계를 가진다.

$$V_b(i,j) = V_s(i,j) - V_s(0,0) \quad (14)$$

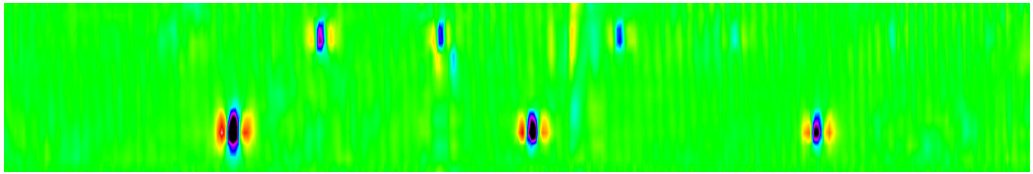


Fig. 2 -11 Differential data processing

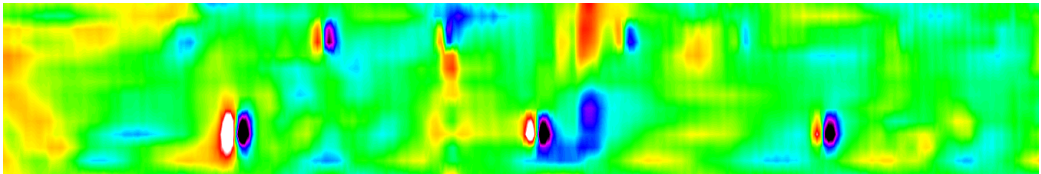


Fig. 2 -12 Subtract back-data processing

2. Detrend

Fig. 2-11 및 Fig. 2-12의 경우에는 결합 정보의 명확성 및 원 데이터의 보존 측면에서 서로 장단점을 교차 보유하고 있다. 본 절에서 설명하는 **detrend** 신호처리는 원 데이터의 보존기능과 함께 결합 정보의 명확성을 부여할 수 있는 신호처리기법 중 하나이다. **detrend** 신호처리는 Eq (15)로 표현되는 이동평균을 이용하여 Eq (16)과 같이 원신호와와의 차를 구한다. 이러한 **detrend** 신호처리는 저대역통과필터의 기능과 함께 고주파수 잡음을 제거하면서 원 데이터의 경향을 그대로 반영하기 때문에 Fig. 2-12에 나타낸 바와 같이 결합 정보를 명확하게 전달하면서, 원 데이터의 경향도 반영할 수 있다. 하지만, 이동평균하는 폭에 따라 결합 정도의 명확성이 저하될 수 있다. Fig. 2-14은 N이 4의 경우이다. Fig. 2-15와 Fig. 2-16은 N을 8과 14로 설정하여 **detrend** 처리한 결과로써, N이 작을수록 명확한 결합신호를 얻을 수 있지만 데이터의 왜곡이 심화될 수 있음을 나타낸다. 반면에 N이 크면 원 데이터의 형태를 유지할 수 있지만, 전체적인 잡음 제거 효과를 얻기 곤란하다는 단점이 보인다. 본 연구에서는 N을 8로 설정하였다. Fig. 2-13은 **detrend** 신호처리의 원리를 나타낸다.

$$V_{AVR}(i, j, N) = \frac{1}{N} \sum_{\tilde{i}=i-\frac{N}{2}}^{i+\frac{N}{2}} V_s(\tilde{i}, j) \quad (15)$$

$$V_{DT}(i, j) = V_s(i, j) - V_{AVR}(i, j, N) \quad (16)$$

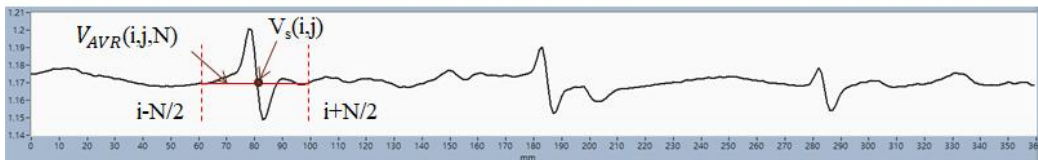


Fig. 2-13 Principle of detrend data processing

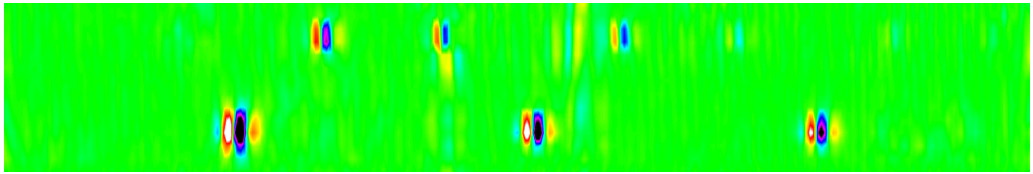


Fig. 2 -14 Detrend data processing result (N=4)

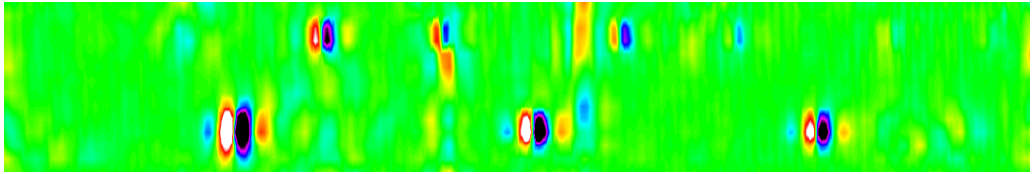


Fig. 2 -15 Detrend data processing result (N=8)

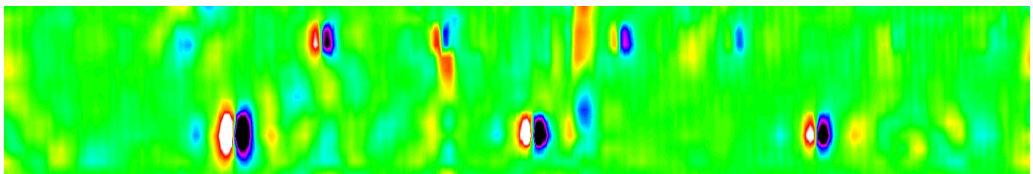


Fig. 2 -16 Detrend data processing result (N=14)

3. FFT 해석

푸리에변환(Fourier transform)은 시간에 대한 함수를, 함수를 구성하고 있는 주파수 성분으로 분해하는 작업이다. Fig.2-10, 2-11, 2-12, 2-14, 2-15, 2-16에 나타낸 보빈형 자기카메라의 실험결과에서 횡축은 거리를 나타낸다. 일정한 간격 또는 일정한 스캔속도로 측정할 경우, 시간으로 환산할 수 있으므로 Eq (17)과 같이 주파수 성분으로 분해하는 푸리에변환으로 처리할 수 있다. 한편, 고속 푸리에 변환(FFT, fast Fourier transform)은 이산 푸리에 변환과 그 역변환을 빠르게 수행하는 효율적인 알고리즘이다.

$$FT(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j\omega x} dx \quad (17)$$

Fig.2-17과 Fig.2-18은 FFT를 이용한 데이터처리에 관한 블록다이어그램 및 각 단계에서의 신호유형을 나타낸다. 먼저, 입력된 데이터를 FFT 해석함으로써, 잡음 및 신호 대역의 주파수를 분리한다. 전기적인 잡음에 해당하는 고주파수를 제거한다. 또한, 전력 및 리프트오프의 정확도에 기인하는 저주파수 신호를 제거한다. 나머지 주파수 대역의 신호를 적용하면 Fig.2-18의 좌측 상부의 신호가 좌측 하부의 신호로 바뀌어 S/N비가 향상된다. 실제로 Fig.2-19는 FFT 해석 결과를 나타낸다. 1차로 차분 해석한 데이터에서는 결함 신호뿐 아니라 빗금 무늬의 고주파수 신호가 나타나서 결함 유무를 판정하는데 어려움이 있다. 하지만, FFT 해석한 결과 0.02Hz의 저주파수 이하 및 0.24Hz 이상의 고주파수 이상의 신호를 삭제한 결과, 매우 명확한 결함 신호가 추출된다. 여기에서 횡축은 mm임에도 불구하고, 초(sec)로 계산하였기 때문에 매우 낮은 주파수로 계산되지만 결함 검출 측면에서는 큰 의미가 없다. FFT 해석은 전술한 Normal, 차분해석 및 detrend 해석 결과 모두에 적용할 수 있다는 특징을 가진다.

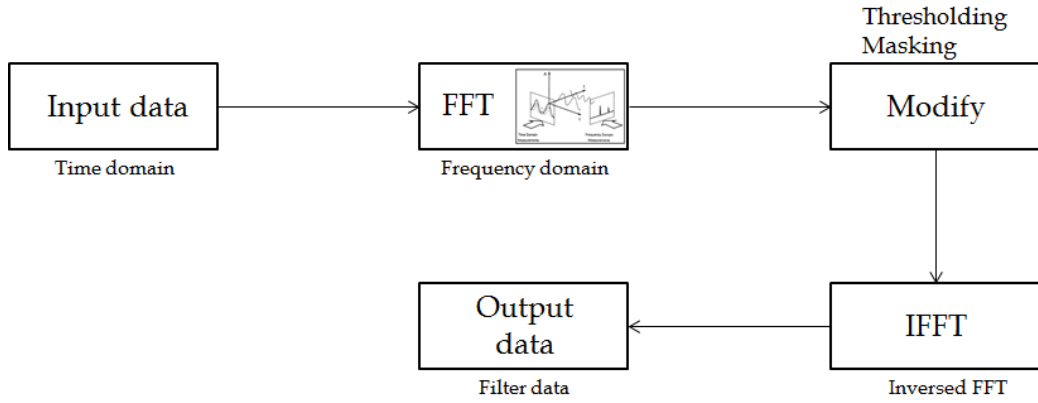


Fig. 2 -17 Block diagram of FFT data processing

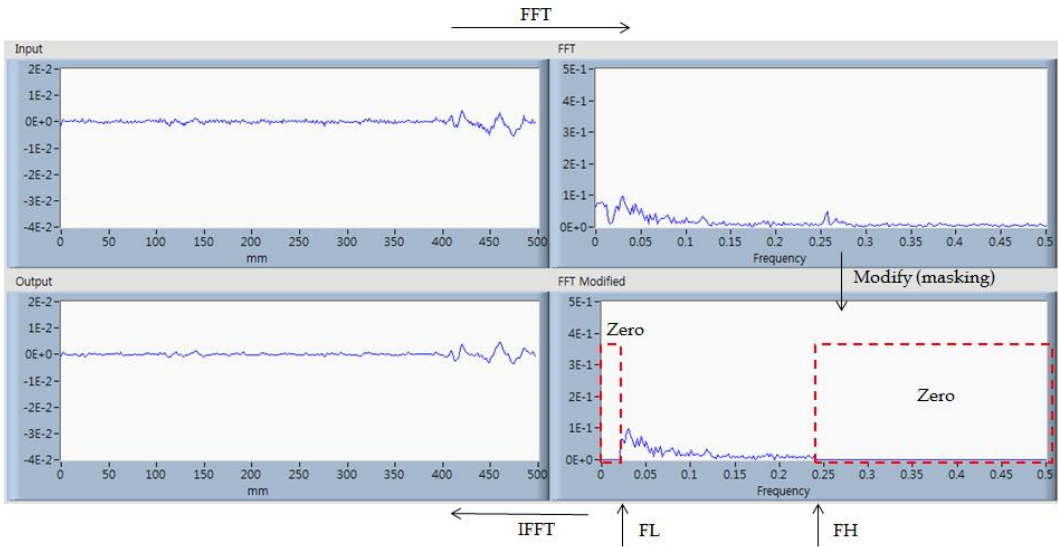


Fig. 2 -18 A sample of FFT data processing

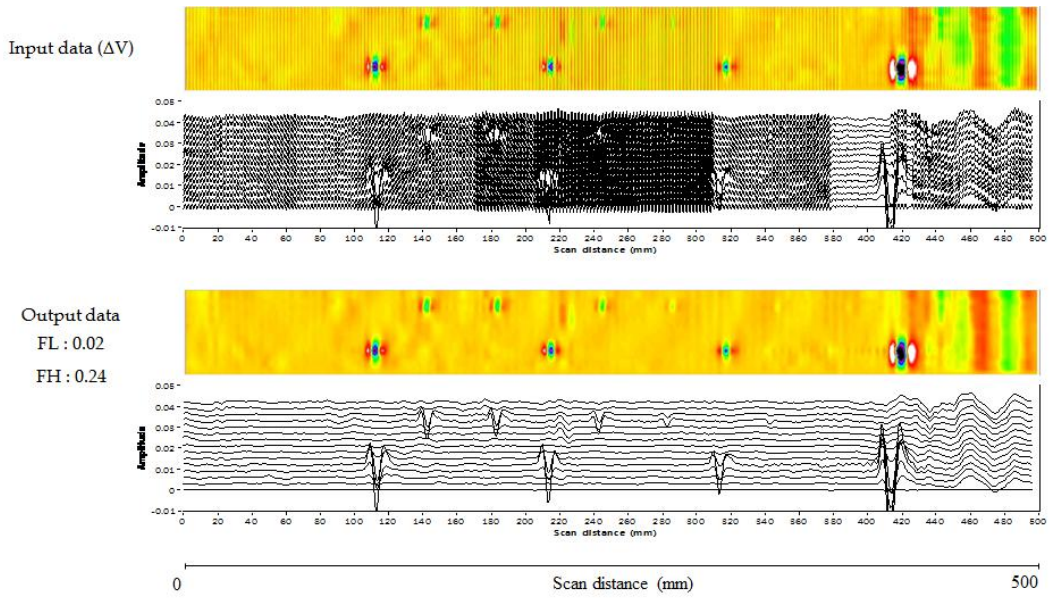


Fig. 2-19 A sample of magnetic image with FFT data processing

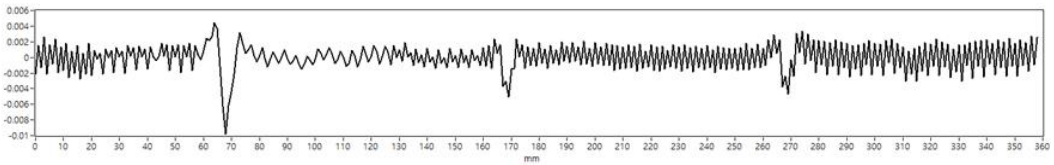
4. Gabor Transform 해석

가버 변환(Gabor transform)은 윈도우함수를 가우스분포함수(정규분포)로 사용하는 푸리에변환이다. 여기에서 윈도우함수는 전체 구간에서 특정 부분을 추출해내기 위하여 곱해주는 함수이다. 상기 FFT 해석이 전체 데이터에 대한 FFT 해석 및 특정 주파수의 제거인 반면에 가버 변환은 Eq (18) ~ (19)에 나타난 바와 같이 detrend와 유사하게 연속되는 특정부분에서 FFT 해석 및 특정 주파수의 weighting 기법이다.

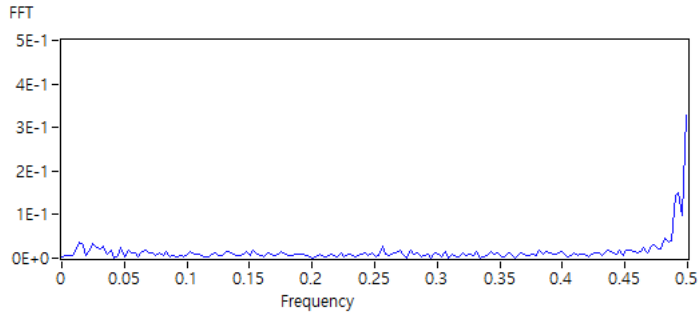
$$G(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-\pi(x-\tau)^2} e^{-j\omega x} dx \quad (18)$$

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau, \omega)e^{-j\omega x} d\tau d\omega \quad (19)$$

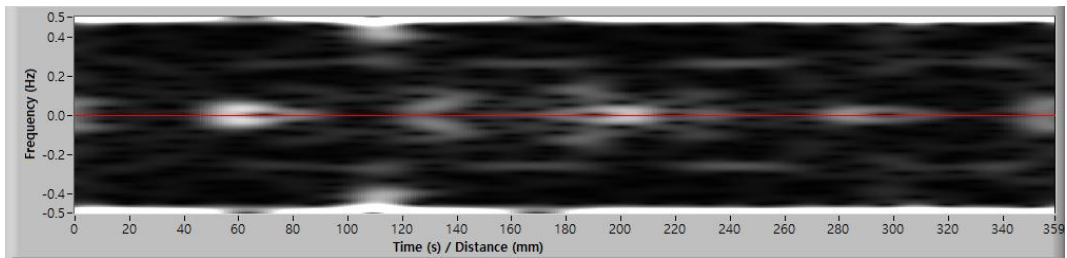
한 예로 Fig. 2-20은 원 데이터에 대한 FFT 해석 결과 및 가버 변환 결과를 나타낸다. Fig. 2-20 (a)는 원 데이터로써 몇 가지 주파수가 시간별(거리별)로 불연속적으로 나타나고 있다. Fig. 2-20 (b)는 상기 원 데이터 전체에 대한 FFT 해석 결과로써, 전체 데이터에 대한 해석 결과를 나타낸다. 따라서, 340~360mm 인근에서 나타나는 저잡음 신호와 140~270mm 인근에서 나타나는 고잡음 신호에서 결합 신호만을 동일한 조건으로 추출하는 것은 비효율적이다. 반면에 Fig. 2-20 (c)는 횡축이 거리를 나타내고, 종축이 주파수 분석 결과이다. 종축의 주파수 분석 결과는 윈도우에 포함된 데이터를 해석한 결과이며, 윈도우를 축방향으로 이동하면서 연속적인 FFT 해석 결과를 도시할 수 있다. 각각의 데이터에 가우스분포를 가지는 주파수를 곱해 줌으로써, 완만한 S/N비 향상 효과를 얻을 수 있다.



(a) Original data



(b) FFT processing



(c) Gabor transform

Fig. 2-20 Principles of FFT and Gabor transform data processing

Fig. 2-21은 보빈형 자기카메라의 실험결과에 FFT 및 가버변환 기법을 적용한 결과를 나타낸다. FFT 결과에서 주목할 점은 하부의 4개의 결함을 지시하는 전자기장의 왜곡 데이터에서 결함이 없는 영역에서 발생하는 주파수 신호가 완전히 제거되지 않았다는 점이다. 하지만 가버 변환에서는 이러한 4개의 결함 신호의 사이에 있는 주파수 신호가 제거되었다.

Using
FFT

Setting:
 Sampling freq: 1 Hz
 Low freq: 0.05 Hz
 High freq: 0.18 Hz

Using
Gabor Transform

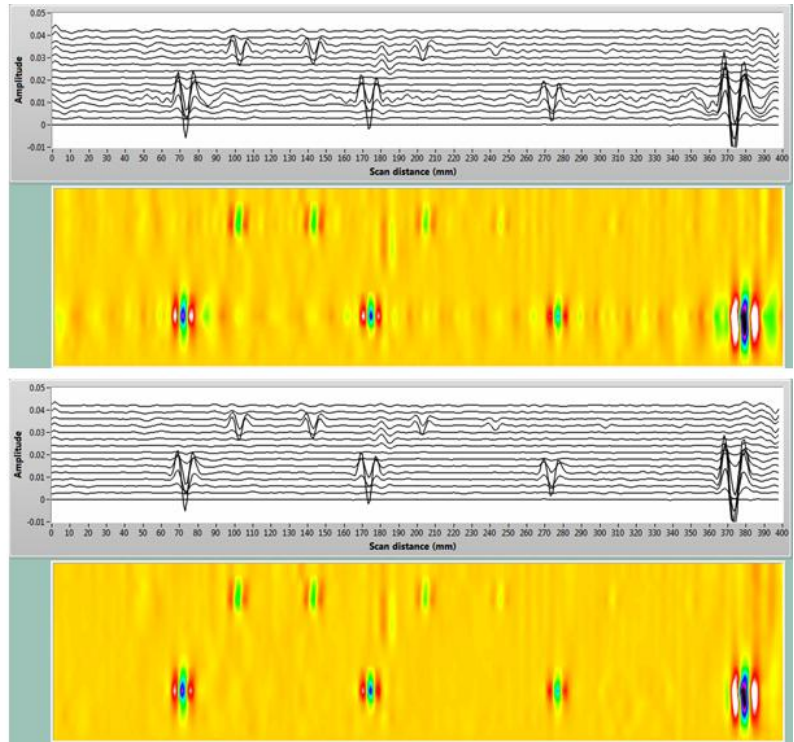


Fig. 2-21 Comparison of FFT and Gabor transform data processing results

이상의 네가지 데이터 표현기법, 즉 차분해석, detrend, FFT, 가버 변환은 어느 특정 기법에 우위가 있는 것이 아니라, 경우에 따라 결함 지시의 명확성이 상이할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 데이터를 표현할 때, 이상의 네가지 기법을 동시에 활용한다.

제 3 절 결함 자동판별 알고리즘

1. 결함유무판정

Fig. 2-33은 결함 자동검사 알고리즘을 나타낸다. 차분해석에 의하여 결함 지시의 명확성을 확보한 후, 특정 윈도우를 설정한다. 해당 윈도우 내에 있는 데이터를 히스토그램으로 표현하면, 결함이 없는 영역에서는 잡음 신호만 나타나므로 잡음의 평균을 중심으로 뾰족한 신호 분포를 보인다. 한편, 결함을 포함하는 윈도우에서는 최대 및 최소 자계분포 신호를 포함하므로 넓게 퍼진 형태의 히스토그램을 보인다. 따라서, 결함 유무를 자동으로 판정할 때에는 Eq (20)과 (21)로 표현되는 표준편차를 활용할 수 있다. 여기에서 $m \times n$ 은 윈도우의 크기를 나타낸다.

$$M(i, j) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Delta V(i, j) \quad (20)$$

$$\sigma(i, j) = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta V(i, j) - M(i, j))^2} \quad (21)$$

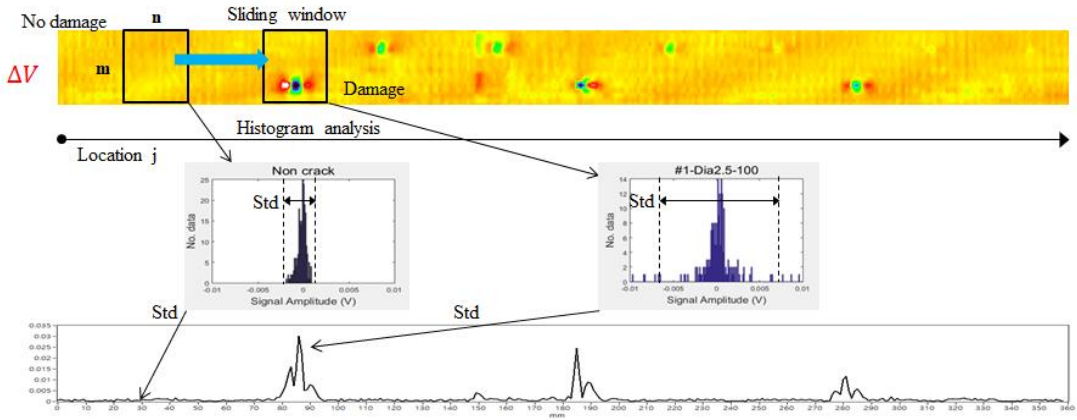


Fig. 2-22 Unmanned crack recognition algorithm 1

2. 결함정량평가

Fig. 2-23은 결함중심영역의 라인신호를 나타낸다. 결함의 크기가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 결함의 크기는 결함의 지름과 깊이에 따라 Peak-to-Peak값이 높아진다. Fig. 2-23 (a)는 Detrend 해석한 신호를 나타내고, Fig. 2-23 (b)는 차분해석한 신호를 나타낸다. Peak-to-peak의 크기는 차분해석 보다 Detrend 해석에서 더욱 크게 나타난다. Fig. 2-23의 결과에서 볼수 있듯이 h는 결함의 깊이와 직경에 비례한다. 이것은 전자기장과 결함의 상호작용이 깊이뿐만 아니라 길이와 폭에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 즉 결함에서의 자계분포는 결함의 체적과 밀접한 관계가 있다. Fig. 2-24와 같이 M과 N을 설정하여 결함영역에서 자계분포의 합을 구한 후, Eq (22)와 Eq (23)을 이용하여 각 결함의 체적을 계산한값과 실제체적을 정량적으로 비교하여 평가한다.

$$P = a \times Vol + b \quad (22)$$

$$Vol = \frac{P - b}{a} \quad (23)$$

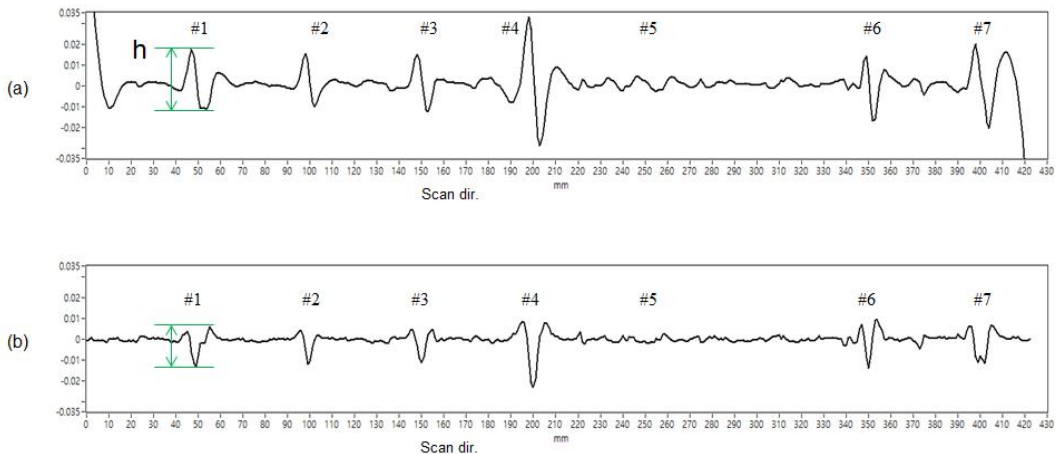
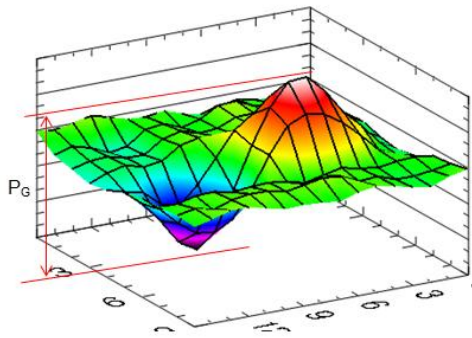
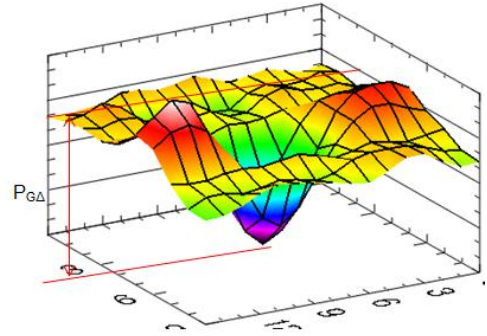


Fig. 2-23 Section view at crack center of defect in scan direction (Z-axis)



(a)



(b)

Fig. 2-24 3D surface view of a defect signal : (a) Gabor transform data processing
(b) Differential data processing

제 3 장 실험 및 고찰

제 1 절 시험편

본 연구는 전술한 바와 같이 원자력발전소 MSR 열교환기 전열관 튜브의 내면 및 외면에 존재하는 마모, 축방향 균열 및 원주방향 균열을 검출하기 위한 내삽 보빈형 자기카메라를 개발하는 것을 목적으로 한다. 개발된 자기카메라의 성능을 검증하기 위하여 Fig.3-1~Fig.3-5에 나타낸 5개의 시험편(STS439, STS410)에 인공결함을 도입하였다.

Fig. 3-1은 밀링에 의하여 Table 3-1의 형상 및 크기를 가지는 편저공(FBH, flat bottom hole)을 가공한 인공 시험편을 나타낸다. STS439 재질의 시험편 내경은 14.1mm, 핀을 포함한 외경은 19.1mm이며, 절삭가공에 의하여 방열핀(핀높이 1.3mm)을 1mm 간격으로 가공하였다. 인공결함은 직경 1.3, 2.5mm이며, 핀의 높이를 제외한 튜브두께 대비 결함깊이가 10~100%로써 시험편의 외부에 위치한다. 또한, 직경이 2.5mm인 #1, #2, #3은 직경이 1.3mm인 결함과 180°의 위치에 배치하였다.

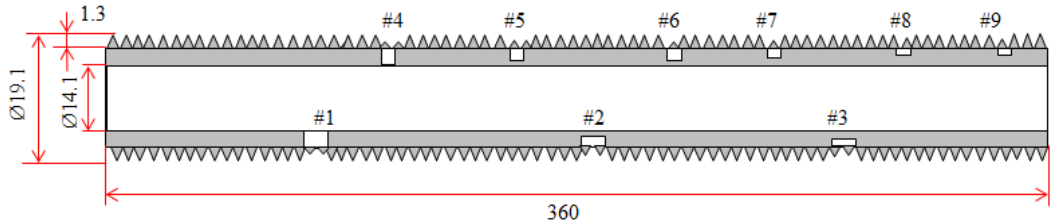


Fig. 3-1 Specimen S#1 (STS439, FBH, cutting process)

Table 3-1 Physical characteristics and sizes of defect specimen S#1

| # | Depth (%) | Depth (mm) | Diameter (mm) | Type |
|---|-----------|------------|---------------|------|
| 1 | 100 | 1.2 | 2.5 | TWH |
| 2 | 87 | 1.04 | 2.5 | FBH |
| 3 | 58 | 0.7 | 2.5 | FBH |
| 4 | 100 | 1.2 | 1.3 | TWH |
| 5 | 80 | 0.96 | 1.3 | FBH |
| 6 | 60 | 0.72 | 1.3 | FBH |
| 7 | 40 | 0.48 | 1.3 | FBH |
| 8 | 20 | 0.24 | 1.3 | FBH |
| 9 | 10 | 0.12 | 1.3 | FBH |

Fig.3-2는 FBH, Groove결함 시험편으로써, 밀링에 의하여 Table 3-2의 형상 및 크기를 가지는 인공결함을 도입하였다. STS410 재질의 시험편 내경은 14.2mm, 편을 포함한 외경은 19.2mm이며, 절삭가공에 의하여 방열핀(핀높이 1mm)을 1mm 간격으로 가공하였다. 인공결함은 외경 1.3~4.8mm이며, 핀의 높이를 제외한 튜브두께 대비 결함깊이가 19~100%인 편저공(FBH, flat bottom hole)을 시험편의 외부로부터 가공하였다. 또한, #5는 직경 4.8mm, 깊이 19%인 4개의 FBH를 90도 간격으로 가공하였다. #6은 폭이 3.2mm이고, 깊이가 19%인 이면 환형마모(OD groove)이며, #7은 폭 1.6mm이고, 깊이가 10%인 내면 환형마모(ID groove) 결함이다.

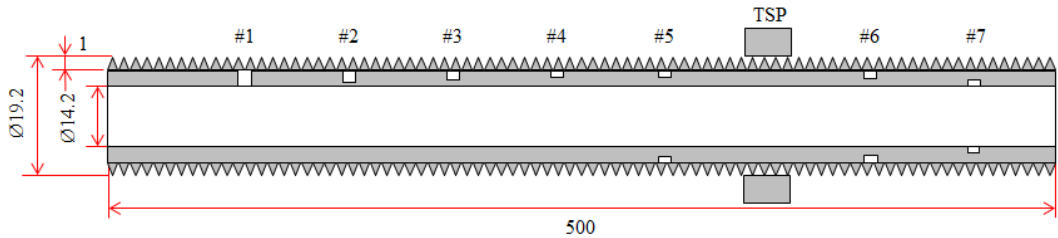


Fig. 3-2 Specimen S#2 (STS410, FBH, rolling process)

Table 3-2 Physical characteristics and sizes of defect specimen S#2

| # | Depth (%) | Depth (mm) | Diameter (mm) | Type |
|---|-----------|------------|---------------|-----------|
| 1 | 100 | 1.5 | 1.3 | TWH |
| 2 | 85 | 1.28 | 2 | FBH |
| 3 | 53 | 0.8 | 2.8 | FBH |
| 4 | 45 | 0.67 | 4.8 | FBH |
| 5 | 19 | 0.28 | 4.8 | 4-FBH 90° |
| 6 | 19 | 0.28 | 3.2 | OD Groove |
| 7 | 10 | 0.12 | 1.6 | ID Groove |

Fig.3-3은 FBH, Groove결함 시험편으로써, 밀링에 의하여 Table 3-3의 형상 및 크기를 가지는 인공결함을 도입하였다. STS410 재질의 내경은 14.1mm, 핀을 포함한 외경은 19.5mm이며, 전조가공에 의하여 방열핀(핀높이 0.7mm)을 1mm 간격으로 가공하였다. 인공결함은 외경 1.3~4.8mm이며, 핀의 높이를 제외한 튜브두께 대비 결함깊이가 25~100%인 편저공(FBH, flat bottom hole)을 시험편의 외부로부터 가공하였다. #5는 직경 4.8mm, 깊이가 25%인 4개의 FBH를 90도 간격으로 가공하였다. #6은 폭이 3.2mm이고, 깊이가 21%인 이면 환형마모(OD groove)이며, #7은 폭 1.6mm이고, 깊이가 10%인 내면 환형마모(ID groove) 결함이다.

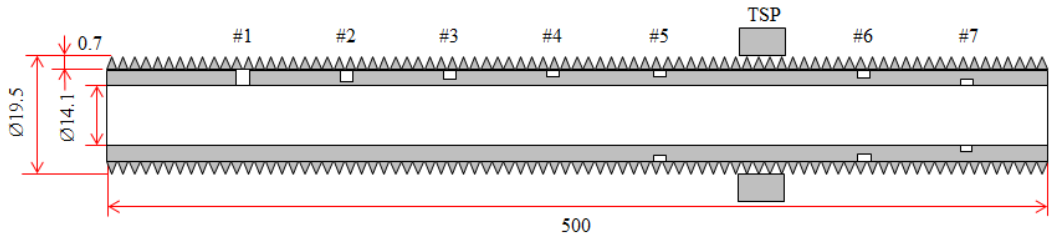


Fig. 3-3 Specimen S#3 (STS410, FBH, cutting process)

Table 3-3 Physical characteristics and sizes of defect specimen S#3

| # | Depth (%) | Depth (mm) | Diameter (mm) | Type |
|---|-----------|------------|---------------|-----------|
| 1 | 100 | 2 | 1.3 | TWH |
| 2 | 75 | 1.5 | 2 | FBH |
| 3 | 44 | 0.88 | 2.8 | FBH |
| 4 | 35 | 0.7 | 4.8 | FBH |
| 5 | 25 | 0.5 | 4.8 | 4-FBH 90° |
| 6 | 21 | 0.42 | 3.2 | OD Groove |
| 7 | 10 | 0.12 | 1.6 | ID Groove |

Fig.3-4는 Tapered wear결함 시험편으로써,밀링에 의하여 Table 3-4의 형상 및 크기를 가지는 인공결함을 도입하였다. STS410 재질의 내경은 14.4mm, 핀을 포함한 외경은 19.4mm이며, 절삭가공에 의하여 방열핀(핀높이 1.0mm)을 1mm 간격으로 가공하였다. 인공결함은 축방향으로 1.5°의 경사를 가지는 경사형 마모(TW, tapered wear)로써, #1~#4는 폭 12.7mm, 깊이 25~50%의 이면결함이다. 또한, #5~#7는 폭 12.4, 10.6, 6.5mm, 깊이 18, 12, 6%이다.

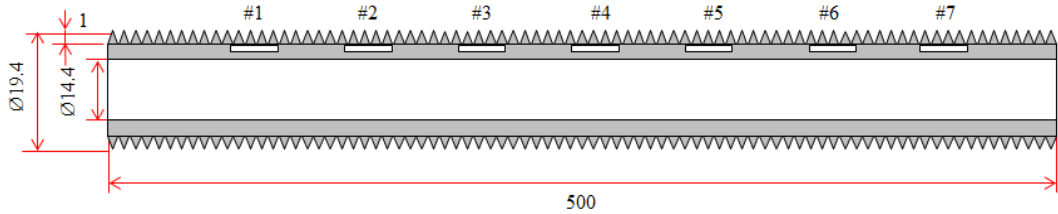


Fig. 3-4 Specimen S#4 (STS410, Tapered wear, cutting process)

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

| # | Depth (%) | Depth (mm) | Length (mm) | Type |
|---|-----------|------------|-------------|--------------|
| 1 | 6 | 0.1 | 6.5 | Tapered wear |
| 2 | 12 | 0.2 | 10.6 | Tapered wear |
| 3 | 18 | 0.3 | 12.4 | Tapered wear |
| 4 | 25 | 0.4 | 12.7 | Tapered wear |
| 5 | 37 | 0.6 | 12.7 | Tapered wear |
| 6 | 43 | 0.7 | 12.7 | Tapered wear |
| 7 | 50 | 0.8 | 12.7 | Tapered wear |

Fig.3-5는 Slit결합 시험편으로써, 방전가공에 의하여 Table 3.5의 형상 및 크기를 가지는 인공결함을 도입하였다. STS410 재질의 내경은 14.4mm, 핀을 포함한 외경은 19.4mm이며, 절삭가공에 의하여 방열핀(핀높이 1.0mm)을 1mm 간격으로 가공하였다. 폭 0.3mm, 길이 10mm인 슬릿형 인공결함을 각각 원호방향(#1~5) 및 축방향(#6~10)으로 가공하였다. #1, #5, #10은 관통결함이며, #2, #3, #4는 핀높이를 제외한 튜브두께 대비 결함길이가 33, 66, 80%인 이면결함이다. 또한, #6, #7, #8, #9는 결함의 깊이가 20, 20, 33, 80%인 이면결함이다. 이러한 결함 배치에 의하면, #6과 #7에서는 동일한 자계분포가 발생하므로, 시스템의 반복정밀도를 파악할 수 있다. 또한, 결함의 방향 및 깊이에 따른 자계분포의 차이를 검토할 수 있다.

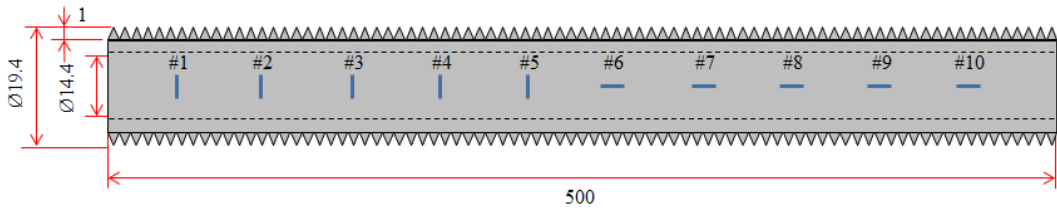


Fig. 3-5 Specimen S#5 (STS410, Slit, cutting process)

Table 3-5 Physical characteristics and sizes of defect specimen S#5

| # | Depth (%) | Depth (mm) | Length (mm) | Width (mm) | Type |
|----|-----------|------------|-------------|------------|--------------------------|
| 1 | 100 | 1.5 | 0.3 | 10 | θ -direction Slit |
| 2 | 33 | 0.5 | 0.3 | 10 | θ -direction Slit |
| 3 | 66 | 1 | 0.3 | 10 | θ -direction Slit |
| 4 | 80 | 1.2 | 0.3 | 10 | θ -direction Slit |
| 5 | 100 | 1.5 | 0.3 | 10 | θ -direction Slit |
| 6 | 20 | 0.3 | 10 | 0.3 | Z-direction Slit |
| 7 | 20 | 0.3 | 10 | 0.3 | Z-direction Slit |
| 8 | 33 | 0.5 | 10 | 0.3 | Z-direction Slit |
| 9 | 80 | 1.2 | 10 | 0.3 | Z-direction Slit |
| 10 | 100 | 1.5 | 10 | 0.3 | Z-direction Slit |

제 2 절 실험장치

Fig.3-6은 본 연구를 통하여 개발한 내삽 보빈형 자기카메라 및 이를 검증하기 위한 실험장치를 나타낸다. 내삽 보빈형 자기카메라는 센서부(sensor probe), 전원 및 신호처리장치(control box), 컴퓨터(laptop PC)로 구성된다.

센서부는 Fig.3-7에 나타낸 바와 같이 원통형 영구자석의 주변에 환형 자기센서배열 및 보빈코일을 배치한 구조를 가진다. Fig.3-8은 이러한 구조를 가지는 센서프로브의 한 예를 나타낸다. 자성체 튜브검사를 위한 종래의 RFECT에 의하면, 원격장을 측정하기 위하여 여자코일과 픽업코일을 각 코일의 직경대비 2~4배의 간격으로 배치해야 하기 때문에 센서부의 총 길이가 길어지고, 결과적으로 U-band와 같은 곡선부에서는 검사가 곤란하다는 한계를 가지고 있었다. 하지만, Fig.3-7 및 Fig.3-8과 같은 복합자원형 와전류검사법에 의하면 전체적인 센서의 길이가 짧아져서 곡관부에서의 검사도 원활히 이루어질 수 있다.

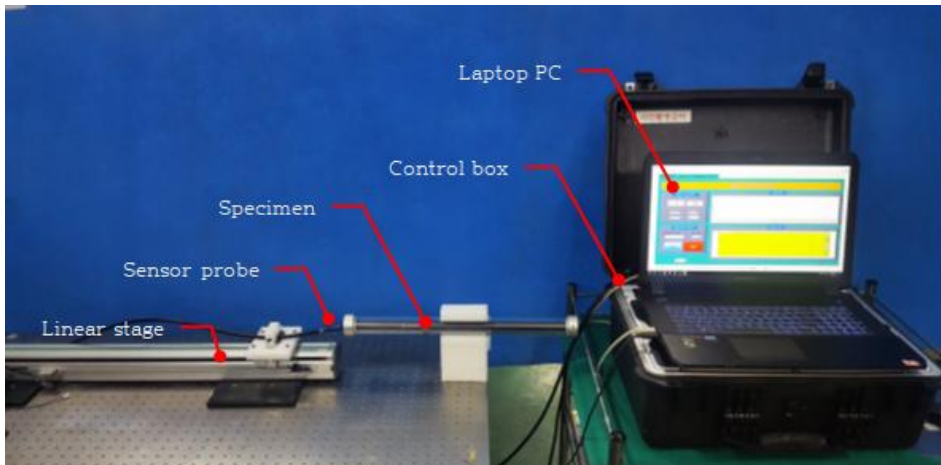


Fig. 3-6 Experimental setup

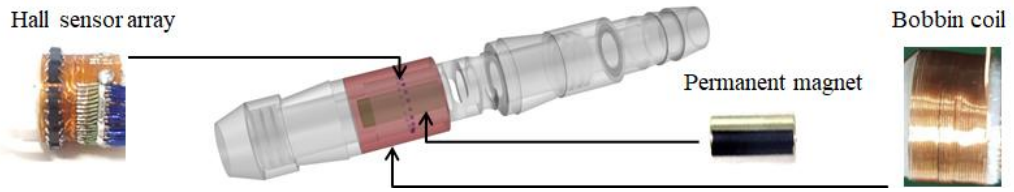


Fig. 3-7 Schematic of sensor probe

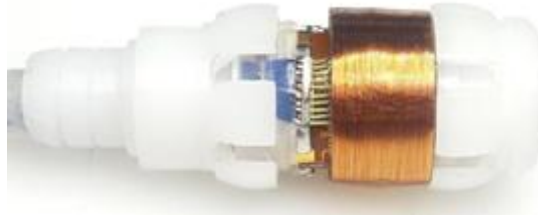


Fig. 3-8 A photograph of sensor probe

Fig.3-9는 신호처리장치를 포함한 시스템의 블록다이어그램을 나타낸다. 먼저 컴퓨터에서 다중기능 I/O 디바이스(NI-6255)를 통하여 AC 전원 및 DC 전원을 구동한다. AC 전원은 센서부의 보빈코일에 교류전류를 인가한다. DC 전원은 환형배열 자기센서 및 증폭기, 신호처리회로에 전원을 공급한다. 각 센서의 출력은 교류증폭 회로(60dB)를 거친 후, 평활화회로(RMS, root-mean-square)를 거친 후, 상기 다중기능 I/O 디바이스에 내장된 AD 변환기를 통하여 컴퓨터에 입력된다. 한편, 검증을 위한 스캐너는 행정거리 600mm이며, 최대 이송속도는 150mm/s이다. 본 연구에서는 450mm의 거리를 30mm/s의 속도로 이송할 수 있도록 세팅하였다. 스캔 방향 공간 분해능, 즉 자계영상의 축방향 공간분해능은 1mm이다. AD 변환기의 분해능은 16비트이고, 14개 센서 출력을 18kS/s의 속도로 취득하였다.

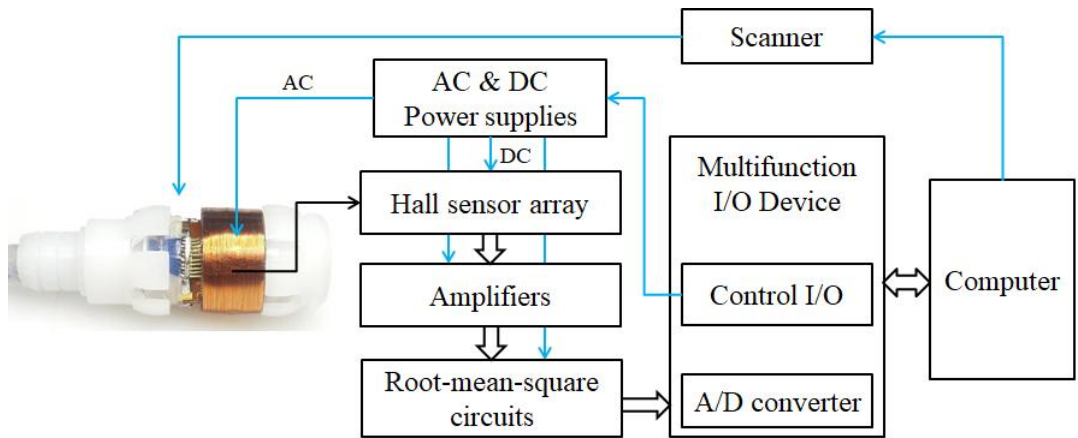


Fig. 3-9 Block diagram

1. 특성평가

가. 주파수특성

Fig. 3-10은 FBH 결함을 도입한 시험편 S#1을 이용하여 각 자원에 따른 신호 경향을 파악한 결과이다. 횡축은 스캔방향, 즉 시험편의 축방향 거리이며, 종축은 센서배열방향, 즉 시험편의 원호방향 각도를 나타낸다. 원호방향 90° 부근에서 $\varnothing 2.5$, 100% (#1), $\varnothing 2.5$, 87% (#2), $\varnothing 2.5$, 58% (#3)가 검출되고 있음을 알 수 있다. 또한, 270° 부근에서 직경 $\varnothing 1.3$ 의 결함들이 검출되고 있다. 결함의 직경이 $\varnothing 2.5$, 깊이가 100%인 #4가 가장 큰 결함신호를 보이고 있으며, 직경 $\varnothing 2.5$, 깊이가 10%인 #9는 검출하기 곤란하다.

한편, 영구자석만을 자원으로 채택한 경우의 자계분포(MFLT)에서는 외부편에 기인한 줄무늬가 반복적으로 나타난다. 또한, 이러한 줄무늬는 보빈코일만을 자원으로 채택한 경우의 자계분포(ECT)에서는 최소화되어 S/N비가 향상된다. 하지만, 신호의 강도면에서는 MFLT에 비하여 저하된다. 영구자석과 보빈코일의 교번전류를 자원으로 채택한 경우의 자계분포(combined ECT)에서는 편에 기인한 줄무늬가 MFLT에 비하여 저하되고, 결함신호가 커져서 MFLT 및 ECT에 비하여 결함의 판독이 용이해진다.

Fig. 3-12은 Combined ECT에서 보빈코일에 입력하는 교번전류를 100~300mA로 변화시키면서 주파수를 300~2,000Hz로 인가한 경우의 자계분포를 나타낸다. 200mA의 입력전류에서 각 주파수에 따른 신호의 강도를 비교한 결과 가시적인 개선점을 파악하기 곤란하다. 하지만, 각 결함 영역에서의 자계분포의 최대값을 100%로 하고, 각 주파수별로 백분율로 표현하면, Fig. 3-13에 나타난 바와 같이 600Hz에서만 최대값이 나타난 #9 결함 이외의 모든 경우에서 900Hz에서 최대값을 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 본 시스템에서의 최적 주파수는 900Hz로 설정하였다.

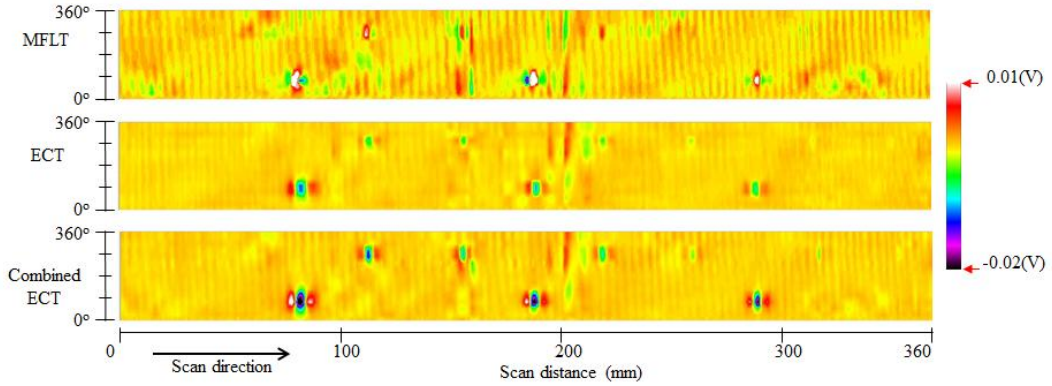


Fig. 3-10 Experimental result with different magnetic sources

Fig. 3-11은 ECT와 Combined ECT에 대한 결함 체적의 정량적인 평가이다. Eq (24)를 이용하여 각 결함 영역의 자계분포합을 계산하고, 계산한 값을 이용해 결함 체적을 추정하여 실제 결함체적과 비교하여 표현하였다. Fig. 3-11 (a)는 900 Hz에서 각 결함 체적과 결함 영역의 자계분포합에 대한 선형관계를 나타낸다. 결함 신호는 Combined ECT에서 ECT보다 높은 감도를 나타내었다. Fig. 3-11 (b)에서 실제 체적과 추정 체적을 비교하였을때 ECT와 Combined ECT에 대해 각각 $0.585mm^3$, $0.582mm^3$ 의 표준편차로 균열 체적을 추정할 수 있었다. Eq (25)는 결함 체적을 추정 하는데 사용 되었다[20].

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |\Delta V_{RMS}(i, j)| \quad (24)$$

$$S = a \times Vol + b \quad (25)$$

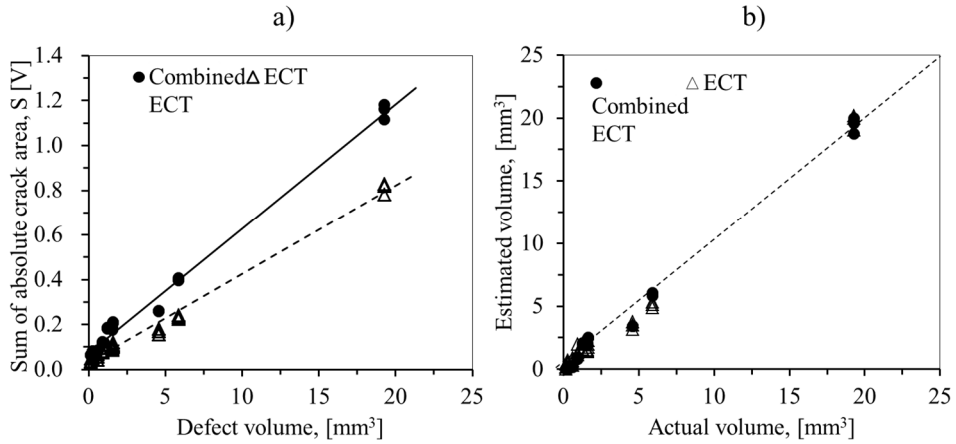


Fig. 3-11 Evaluation of crack volume: a) linear relationship between sum of absolute crack area signal with crack volume at 900 Hz, b) estimation of ceack volume results at 900 Hz.

여기에서 M과 N은 각각 스캔길이와 센서번호이고 위 실험에서 M=20, N=10을 사용하였다. a와 b는 Fig. 3-11에서 표현된 결함영역 신호의 감도와 바이어스이다.

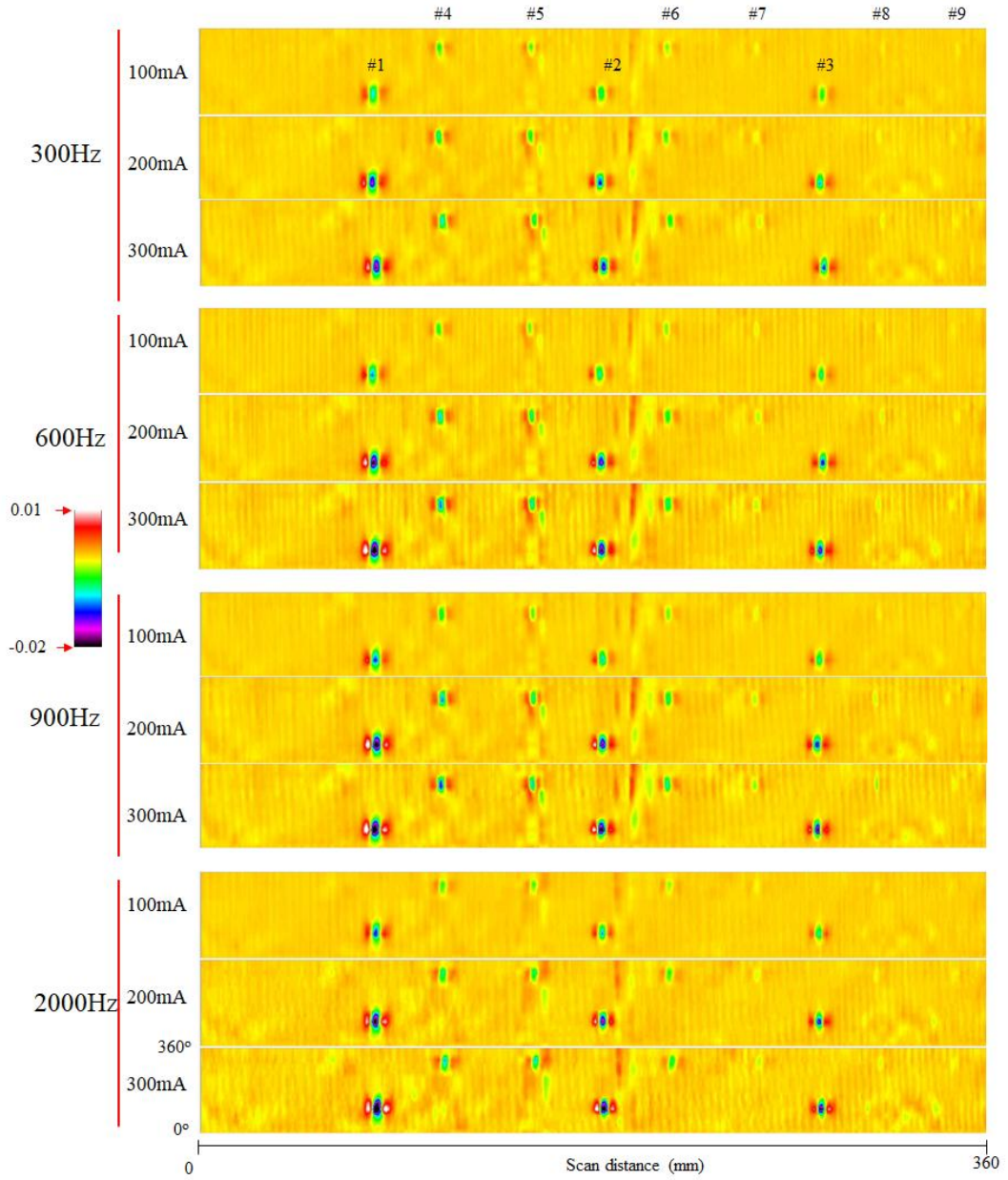


Fig. 3 -12 Experimental result with different current and frequency

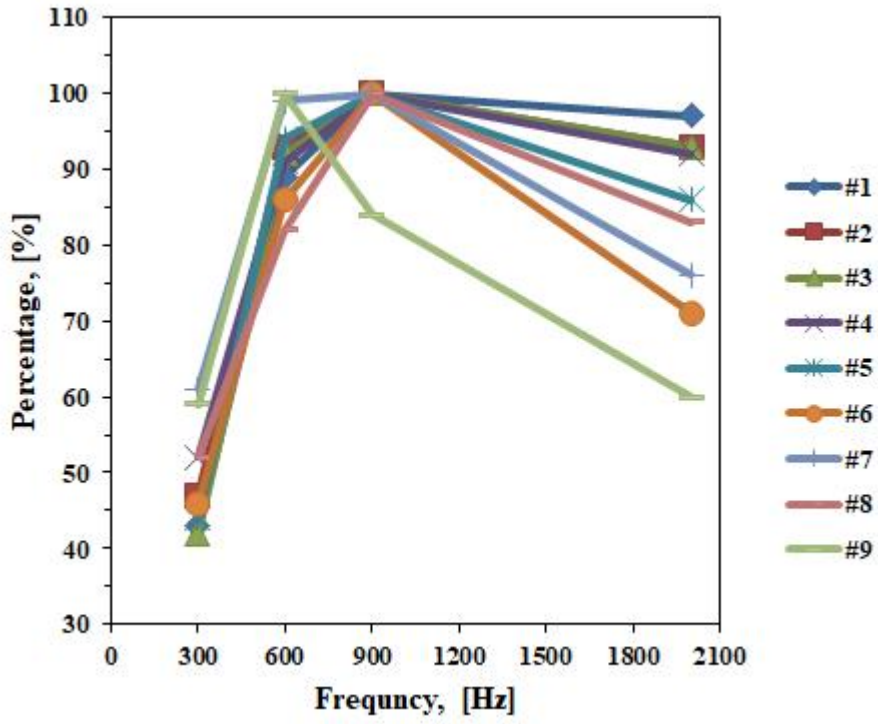


Fig. 3 -13 Frequency responses

나. 입력전류특성

Fig. 3-14은 Combined ECT에서 보빈코일에 입력하는 교번전류의 주파수를 900Hz로 고정한 후, 전류의 세기를 100~300mA로 변화시켰을 때 각 결함별 자계분포를 나타낸다. Fig. 3-15에 나타난 바와 같이 결함의 크기에 따라 다르지만, 전반적으로 100mA에 비하여 300mA의 경우가 약 2배 정도의 높은 출력을 얻을 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 개발한 AC 전원의 출력 범위 내에서 최대의 결함 검출능을 얻을 수 있는 300mA를 입력 전류로 선택하였다.

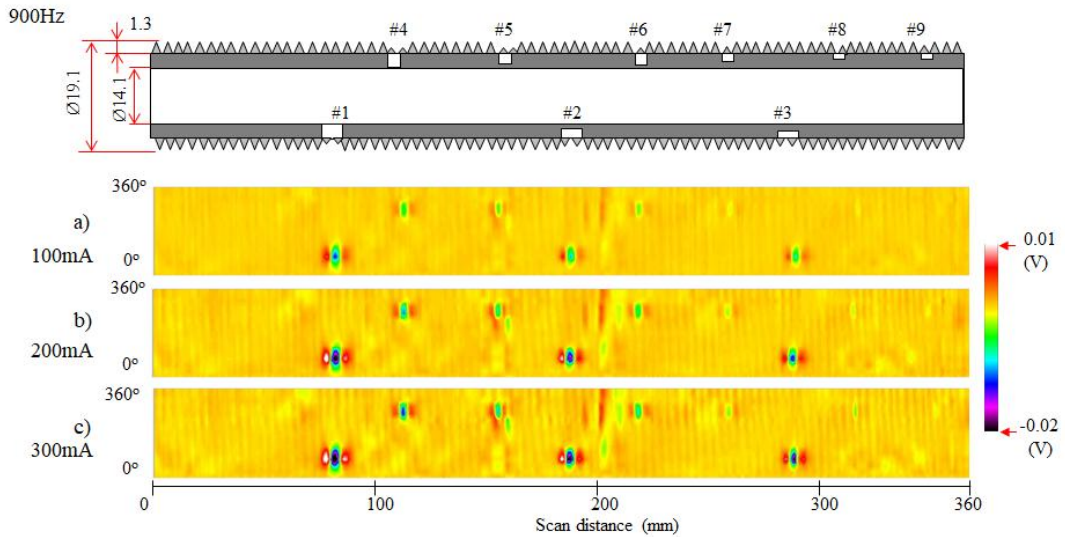


Fig. 3-14 Experimental result with different current

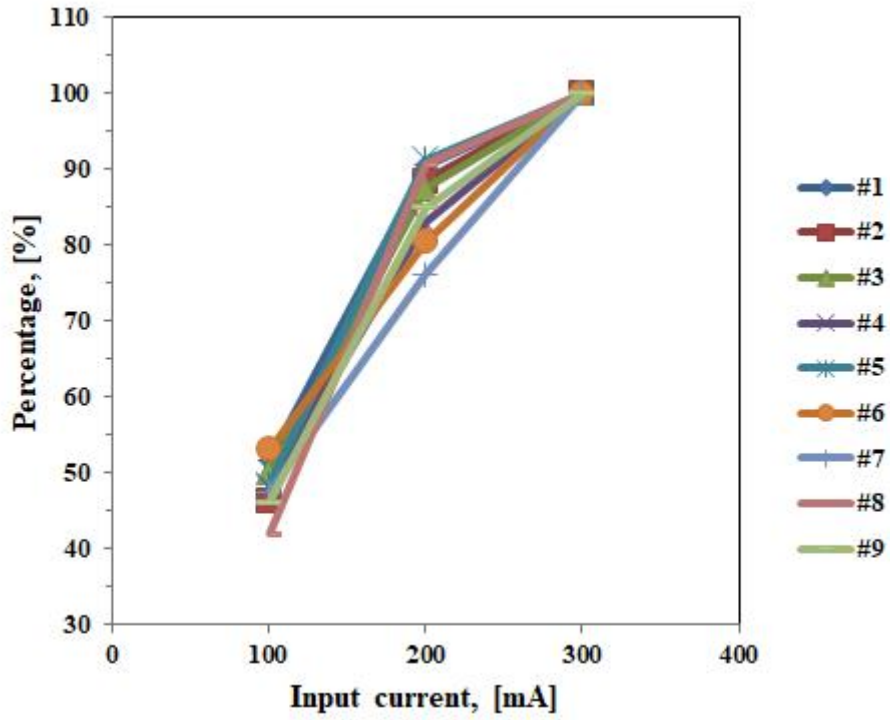


Fig. 3 -15 System responses due to input current

다. TSP영향평가

전열관 튜브 지지대(TSP, tube support plate)는 열교환기의 종류에 따라 상이하지만, 탄소강 또는 마르텐사이트계 스테인레스강과 같은 강자성체 금속이 사용된다. TSP는 전열관 튜브와 근접해 있어서, 열전달 매질의 유동 및 진동에 따른 마모 및 부식을 유발할 수 있다. 그러나, 일반적인 보빈형 ECT에서는 TSP의 강자성 특성에 따라 매우 큰 신호가 발생하여, TSP 주변의 결함을 검출하기 곤란하다. 따라서, 본 연구에서는 FBH 결함을 도입한 시험편 S#2를 이용하여 TSP의 존재에 따른 결함의 검출능을 파악하였다.

Fig.3-16는 TSP가 $\varnothing 1.3$, 100% (#1) 결함의 결함의 좌측, 중앙, 우측에 각각 위치하였을 때의 자계분포를 나타낸다. 전체적으로 TSP의 위치에 따른 자계분포의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 경향은 TSP가 $\varnothing 4.8$, 45% (#4) 및 1.6mm, 10% (#7)의 위치에 있을 경우(Fig. 3-17, Fig. 3-18)에도 동일하다.

Fig. 3-19은 TSP의 유무 및 위치에 따른 $\varnothing 1.3$, 100% (#1), $\varnothing 4.8$, 45% (#4), 1.6mm, 10% (#7) 결함 주변에서의 자계 분포를 상대 비교한 결과를 나타낸다. TSP의 폭은 16.5mm이다. TSP의 우측 선단, 중앙 및 좌측 선단에 결함의 중심이 위치한 경우를 상호 비교하기 위하여 결함과 TSP의 상대적인 위치를 횡축으로 표현하였다. 또한, 각 결함에서 TSP가 없는 경우의 최대값을 100%로 하고, 각 TSP 위치에 따른 해당 결함에서의 상대적인 최대값 비율을 종축에 표시하였다. TSP가 결함의 중앙에 위치한 경우에는 TSP가 없는 경우에 비하여 큰 변화가 없었다. 반면에 TSP의 양 선단이 결함의 중심에 위치한 경우에는 10% 정도의 최대값 변화가 있었으며, 결함탐상능력에 영향을 미치지 않는 오차 범위이다.

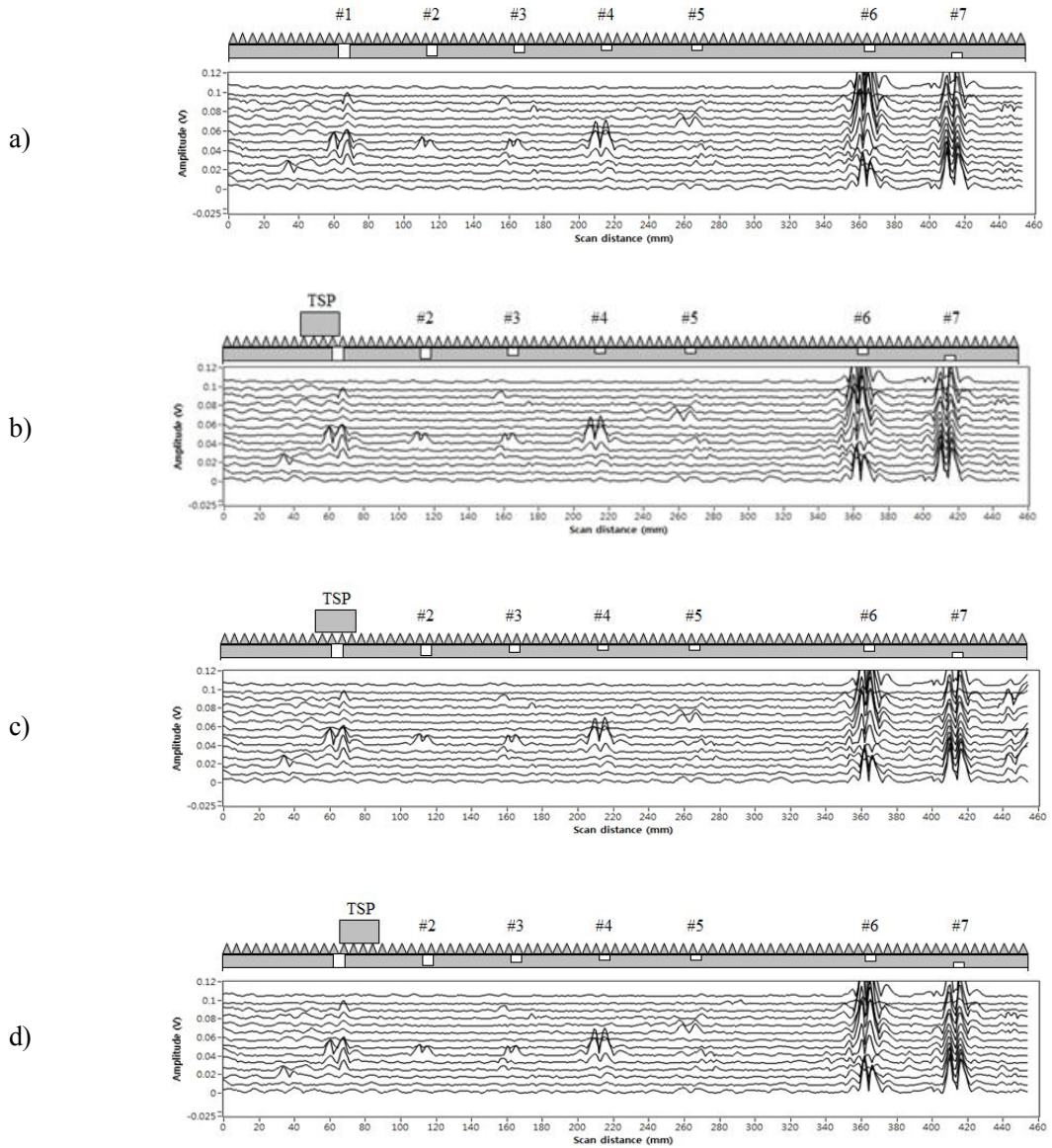


Fig. 3-16 Distribution of magnetic field when TSP is Positioned around #1

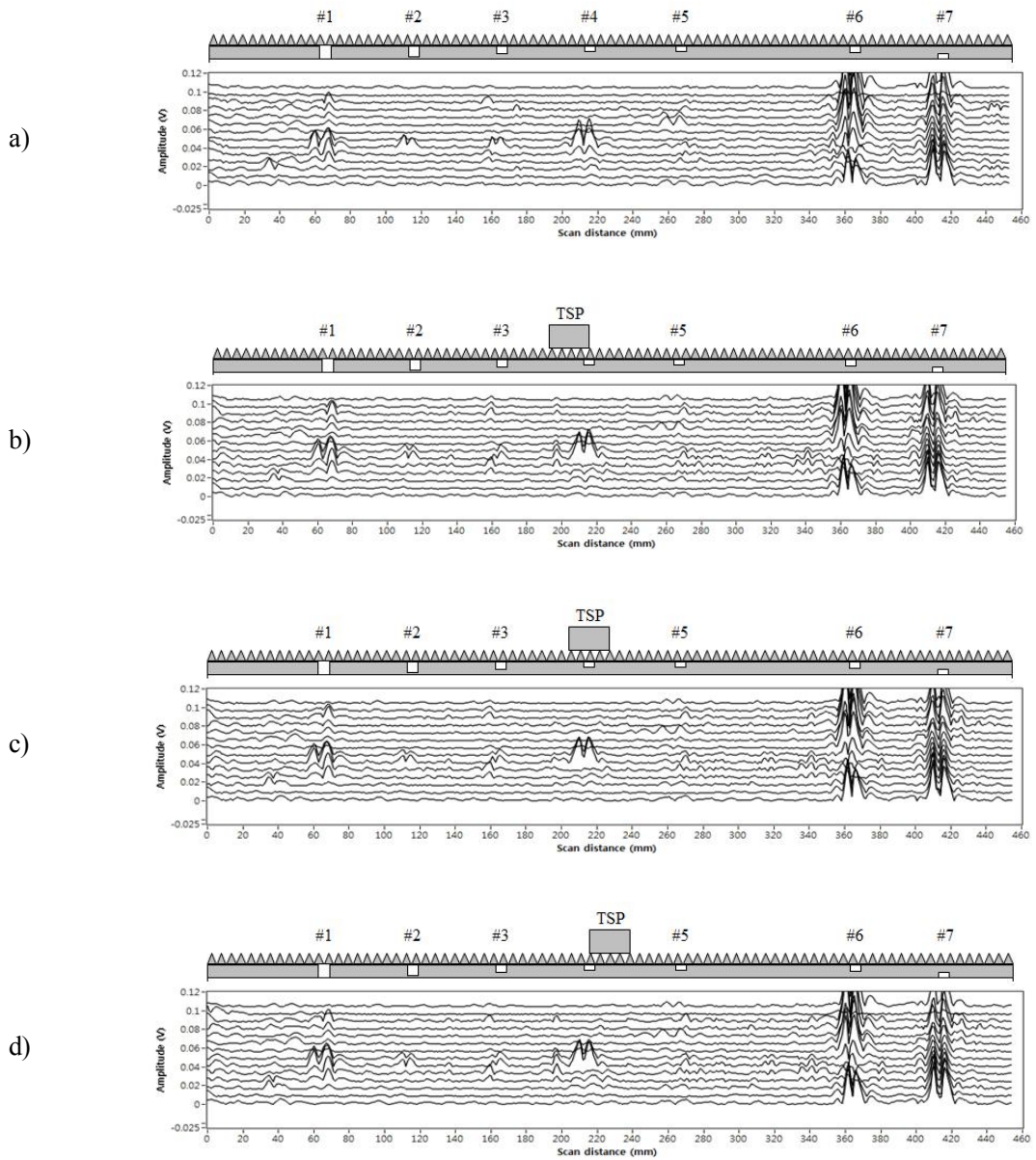


Fig. 3-17 Distribution of magnetic field when TSP is Positioned around #4

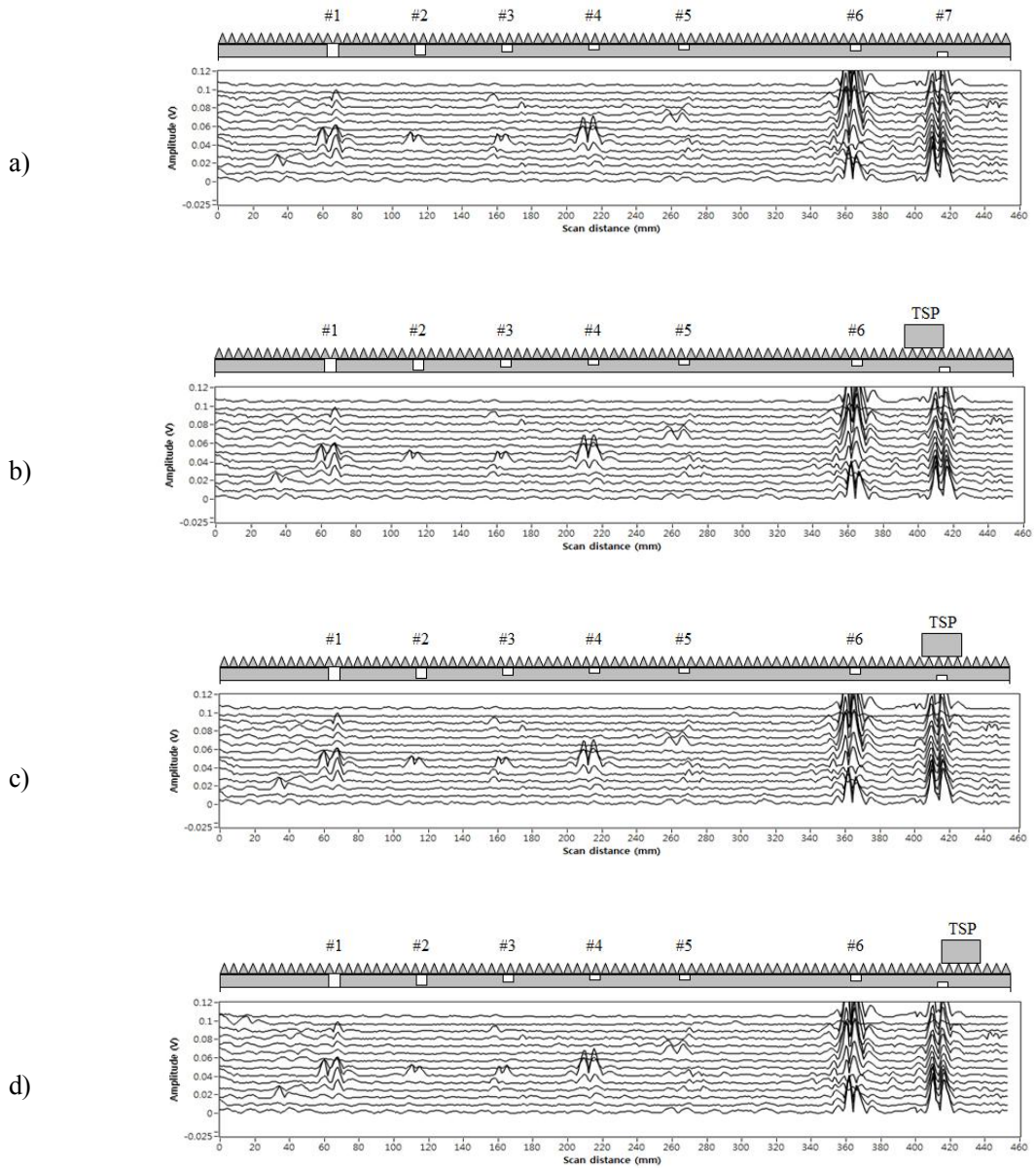


Fig. 3-18 Distribution of magnetic field when TSP is Positioned around #7

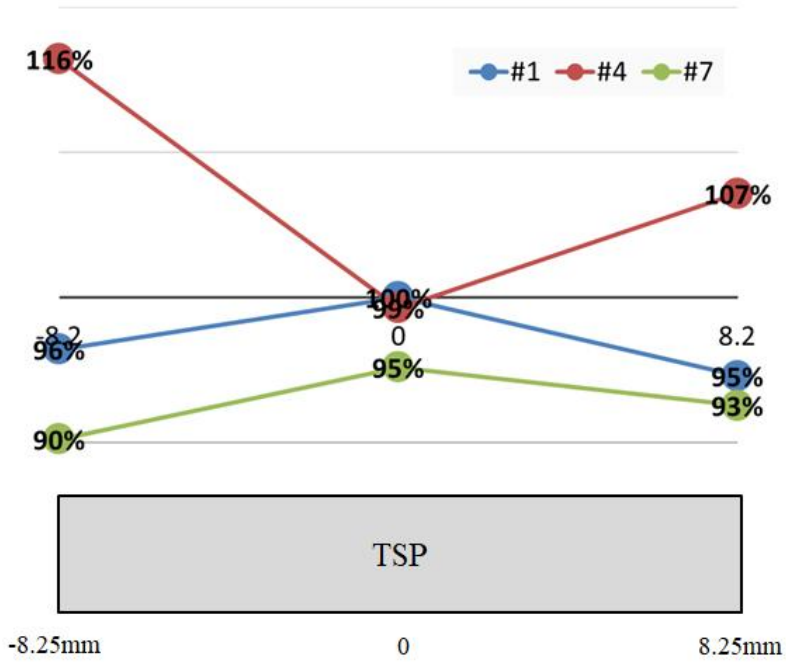


Fig. 3-19 Effect of TSP

제 3 절 결함 검출 및 정량평가

1. 결함검출확률

제 2장 3절에서 설명한 결함유무판정알고리즘을 이용하여 Specimen S#2 ~ Specimen S#5의 결함을 자동판별 하였다. Fig. 3-20은 Specimen S#2의 실험결과를 나타낸다. 결함유무결함유무판정알고리즘을 이용하였을 때 $\phi 4.8$, 19% (#5)결함을 제외한 모든 결함을 검출하였다. Specimen S#3의 실험결과에서는 Fig. 3-21에 나타낸 바와 같이 모든 결함을 검출하였다. Fig. 3-22에서 Specimen S#4의 실험에서는 총 7개의 결함을 검출하였다. 하지만, #1, #4번 인근에 있는 이상신호를 검출하였다. 이 이상신호는 여러 번의 반복실험결과에도 나타나는 것으로 시험편 자체의 내재결함으로 판단된다. Fig. 3-23은 Specimen S#5의 실험결과로써 원주방향의 폭 0.3 mm, 길이 10 mm, 깊이 0.5 mm의 (#2)결함, 축방향의 폭 10 mm, 길이 0.3 mm, 깊이 0.3mm의 #6, #7번, 깊이 0.5 mm인 (#8)결함을 제외하고 검출하였다. 여기에서 축방향 결함은 결함검출능이 떨어진다. 이것은 자원의 문제로 축방향결함은 ECT에서 검출능이 좋은 반면 MFLT에서는 검출능이 낮다는 단점을 가지고 있고, 원주방향결함에서는 MFLT에서 검출능이 좋고, ECT에서 검출능이 낮다는 점이다. 여기에서는 MFLT가 ECT보다 자계강도가 세기 때문에 축방향 결함보다 원주방향결함의 검출능이 우수하다.

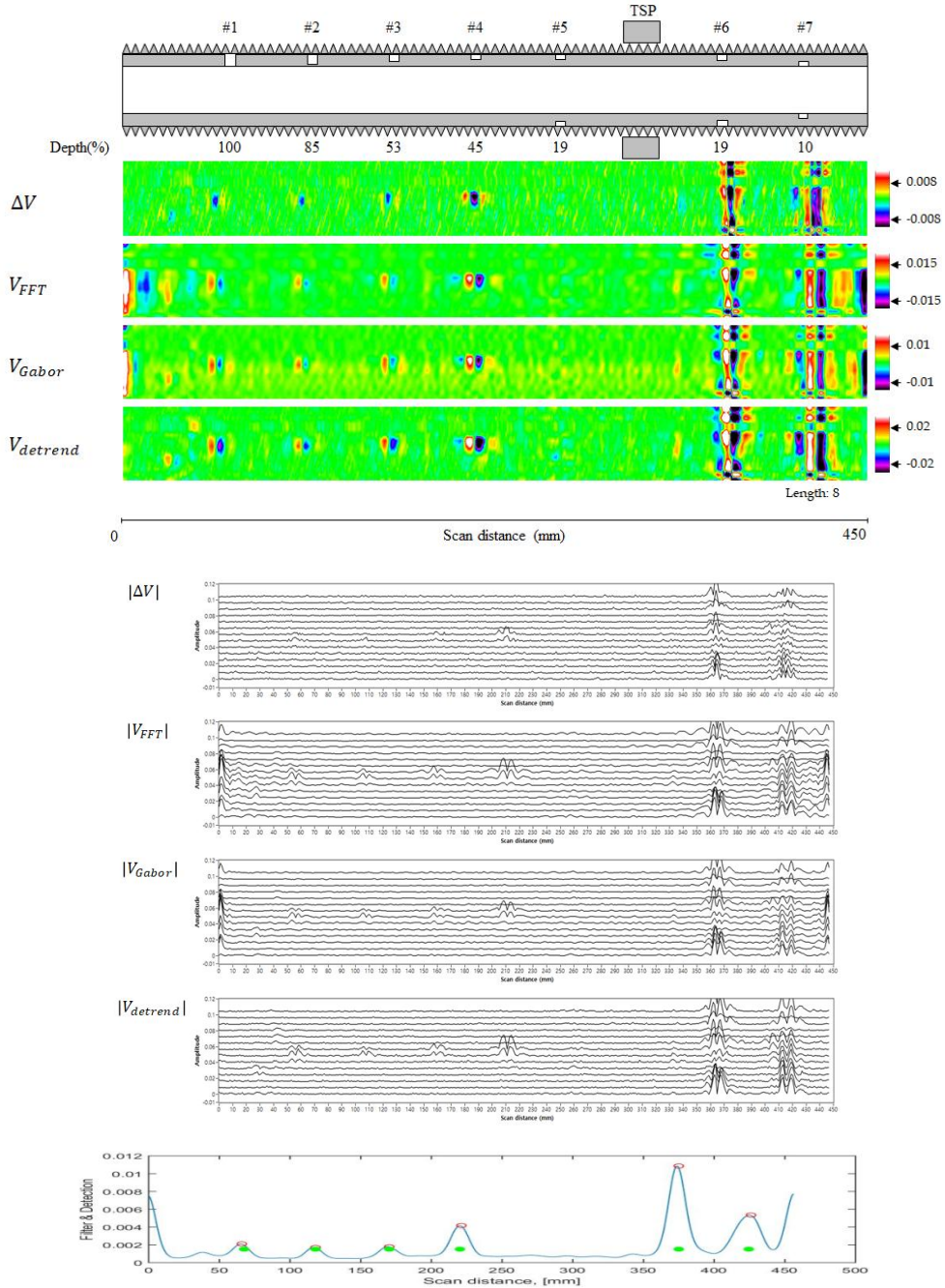


Fig. 3-20 Specimen S#2 (FBH, cutting process)

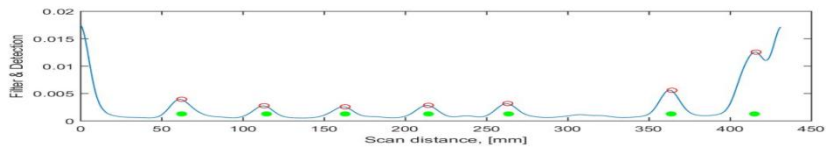
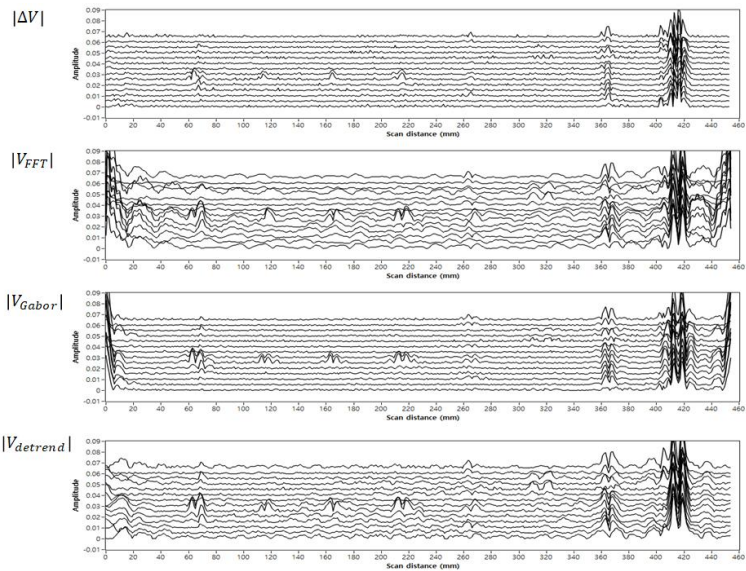
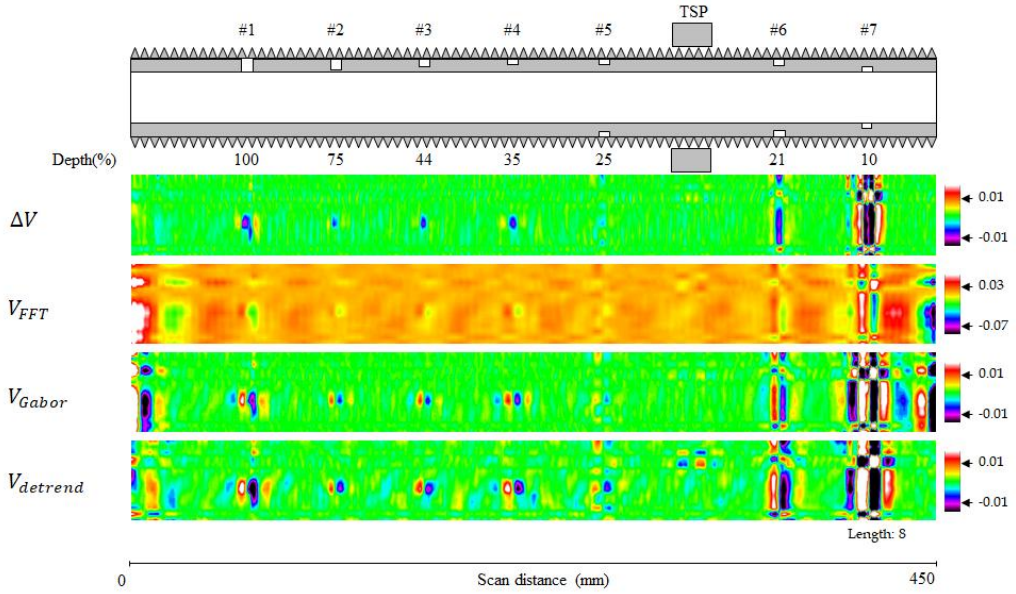


Fig. 3-21 Specimen S#3 (FBH, rolling process)

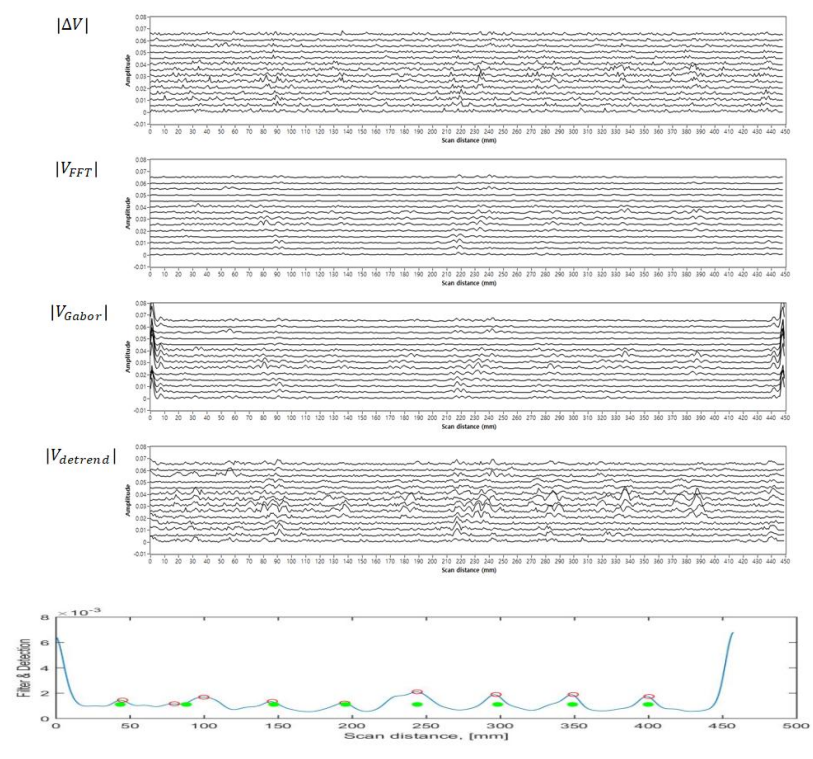
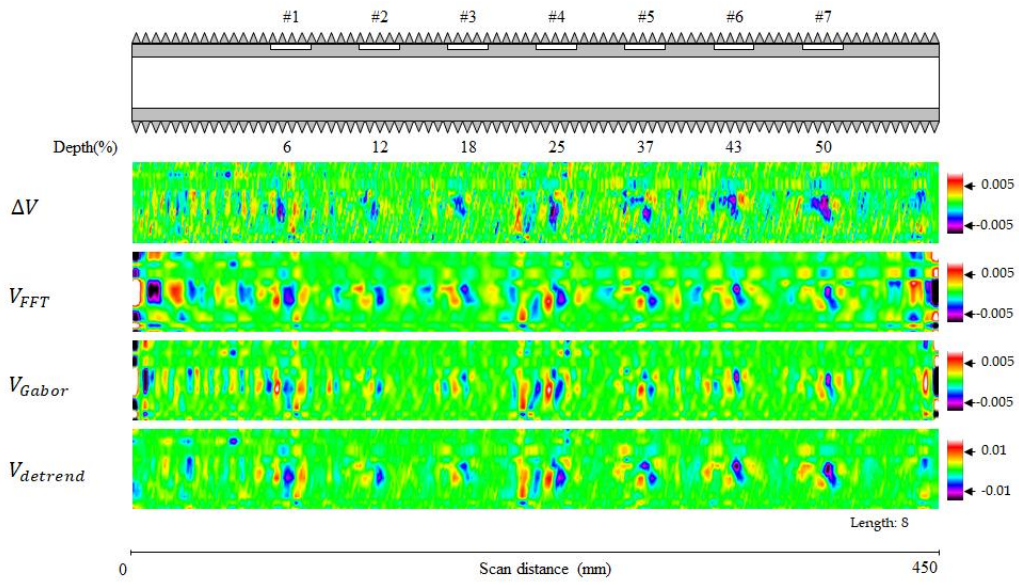


Fig. 3 -22 Specimen S#4 (Tapered Wear, cutting process)

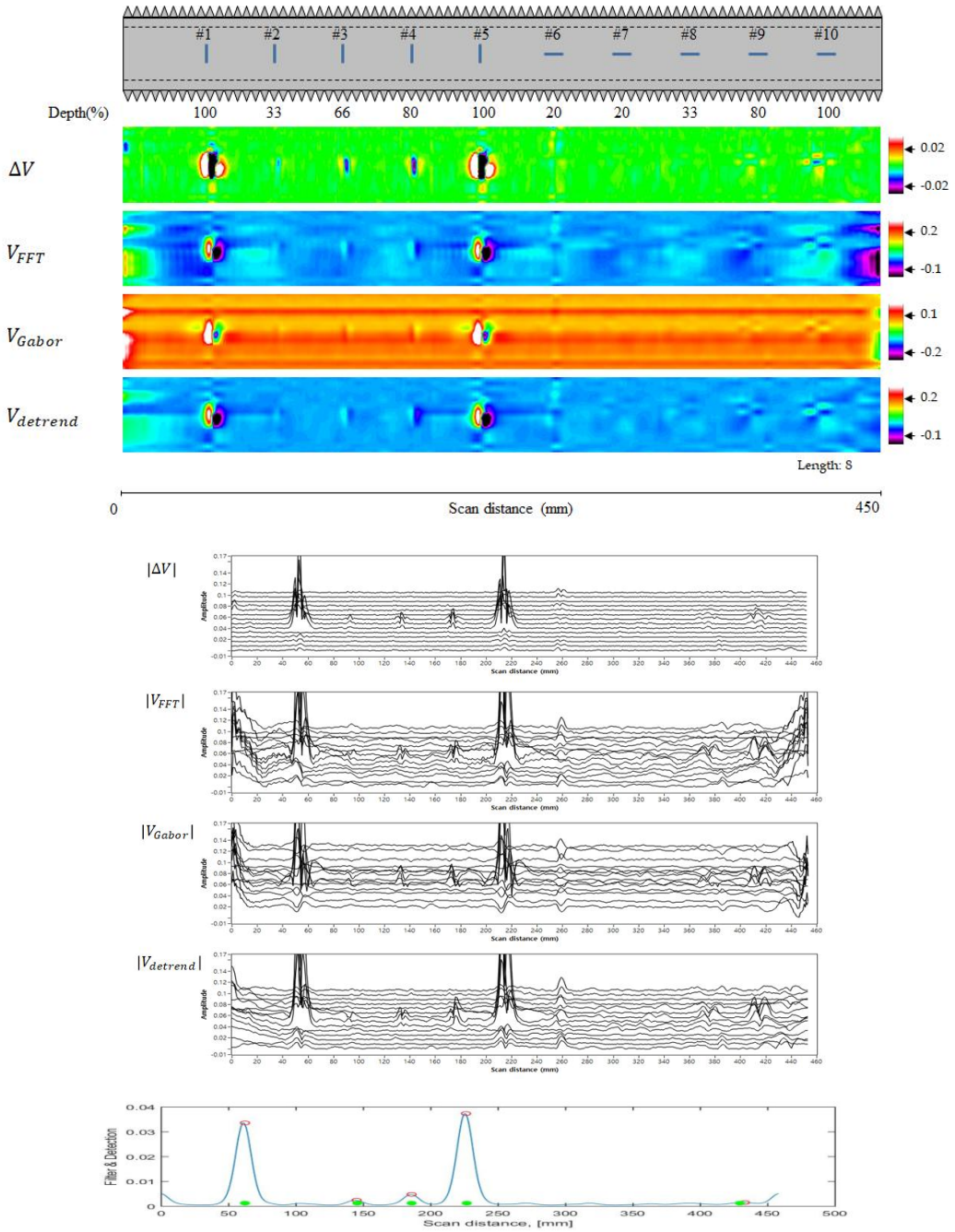
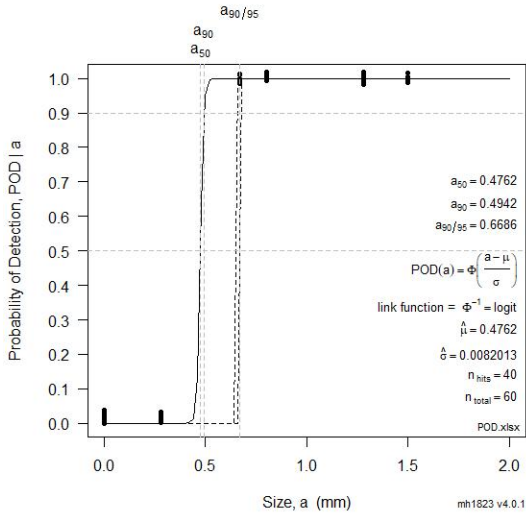
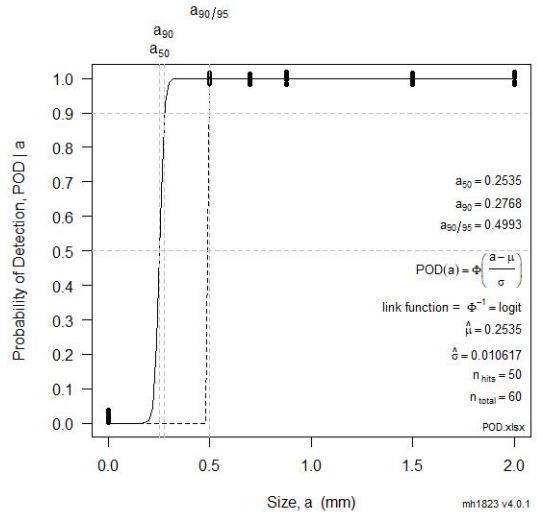


Fig. 3-23 Specimen S#5 (Slit, cutting process)

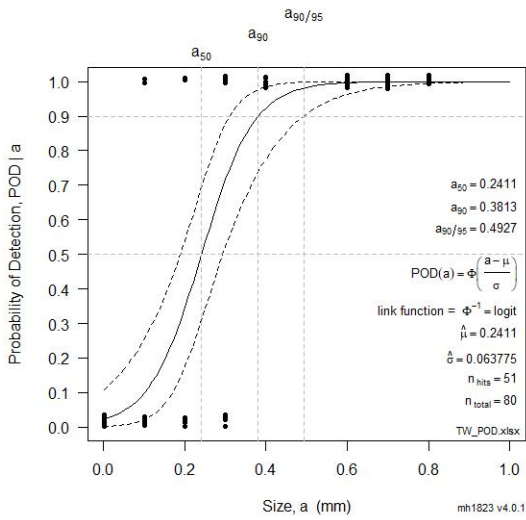
Fig. 3-24는 각 시험편의 결함에 대한 POD(POD: Probability of detection)곡선을 나타낸다. 결함의 검출(0 : 결함없음, 1: 결함있음)은 무결함영역의 RMS값에서 1.5 배 이상의 값을 임계값으로 설정하였다. 각 POD곡선은 10회 반복실험한 실험결과를 바탕으로 평가하였고 Charles Annis[POD Paper 18-20]가 개발한 mh1823 소프트웨어 V.4.0.1.을 사용하였다. 상술한 검출 알고리즘을 이용하여 획득한 Hit/Miss(1/0)데이터는 logit model을 사용하여 해석하였다. Fig. 3-24 (a)는 Specimen S#2 시험편 4개의 FBH결함과 1개의 무결함영역을 이용하여 수행하였다. POD곡선에 의하면 깊이 0.4942mm와 0.6686mm인 FBH결함을 각각 90%와 90/95%의 POD로 검출할 수 있었다. 이는 깊이 0.6686mm 이상의 FBH결함을 90%확률로 검출하고 95%의 신뢰성을 가지고 있음을 나타낸다. Fig. 3-24 (b)는 Fig. 3-24 (a)와 마찬가지로 FBH이지만 외부 핀의 가공방법이 다른 Specimen S#3으로 실험하였다. 여기에서 POD곡선은 깊이 0.2768mm와 0.4993mm인 FBH결함을 각각 90%와 90/95%의 POD로 검출할 수 있었다. 이는 깊이 0.4993mm 이상의 FBH결함을 90%확률로 검출하고 95%의 신뢰성을 가지고 있음을 나타낸다. Fig. 3-24 (c)는 Specimen S#4 시험편의 7개의 TW결함과 1개의 무결함영역을 이용하여 POD해석을 수행하였다. POD곡선에 의하면 깊이 0.3813mm와 0.4927mm인 TW결함을 각각 90%와 90/95%의 POD로 검출할 수 있었고 이는 깊이 0.4927mm 이상의 TW결함을 90%확률로 검출하고 95%의 신뢰성을 가지고 있음을 나타낸다. Fig. 3-24 (d)는 Slit 결함을 가진 Specimen S#5를 이용하여 5개의 원주방향결함과 1개의 무결함영역에 대하여 수행하였다. POD곡선에 의하면 깊이 0.7745mm와 0.996mm인 원주방향결함을 각각 90%와 90/95%의 POD로 검출할 수 있었고 이는 깊이 0.996mm 이상의 원주방향결함을 90%확률로 검출하고 이에 대한 신뢰성은 95%임을 나타낸다.



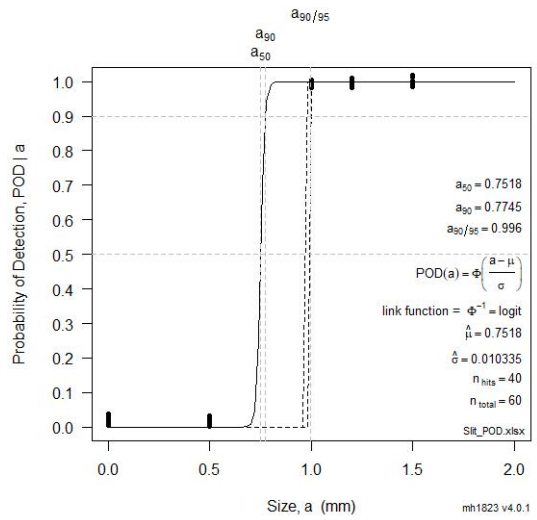
(a) Specimen S#2



(b) Specimen S#3



(c) Specimen S#4



(d) Specimen S#5

Fig. 3 -24 POD Curves

2. 결함정량평가

원리에서 상술한 결함정량평가를 이용하여, 결함의 체적을 정량적으로 평가하기 위하여 결함영역에서 M과 N 크기의 특정 윈도우를 설정하여 결함영역의 합을 구하였다. 이러한 결함영역에서의 추정 체적은 Eq (26), (27)을 이용하여 추정하였다. 여기에서 a와 b는 각각 센서의 감도와 바이어스 신호이다.

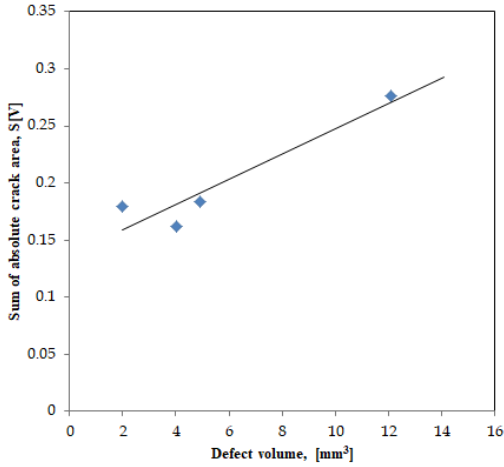
$$\text{Sum} = a \times \text{Vol} + b \quad (26)$$

$$\text{Vol} = \frac{\text{Sum} - b}{a} \quad (27)$$

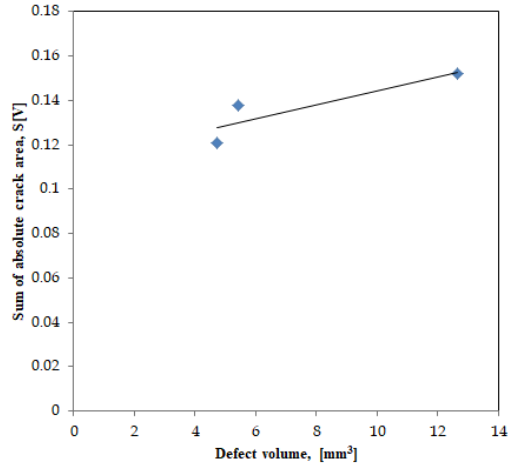
Fig. 3-25는 FBH결함의 체적을 평가하기 위해 결함영역의 합과 실제 결함 체적 사이의 상관관계를 나타내었다. Fig. 3-25 (a)는 Specimen S#2의 시험편을 이용하여, 상관관계를 나타내었다. 결함의 체적이 증가할수록 결함영역의 합도 선형적으로 커지는 경향을 볼 수 있었다. 이러한 관계는 Eq (28)과 같이 표현할 수 있다. Fig. 3-25 (b)도 마찬가지로 FBH의 체적을 평가하기 위해 Specimen S#3의 시험편을 이용한 결함영역의 합과 실제 체적사이의 상관관계를 나타내었다. Specimen S#3의 경우 #1번 결함에서 버(Burr)의 영향으로 실제 체적보다 큰값이 검출되어 나머지 결함의 체적을 추정하는데 있어 큰 오차를 만들기 때문에 제외하였다. 이러한 관계는 Eq (29)에 나타내었다.

$$\text{Vol} = \frac{\text{Sum} - 0.1369}{0.011} \quad (28)$$

$$\text{Vol} = \frac{\text{Sum} - 0.1131}{0.0031} \quad (29)$$



(a) Specimen S#2

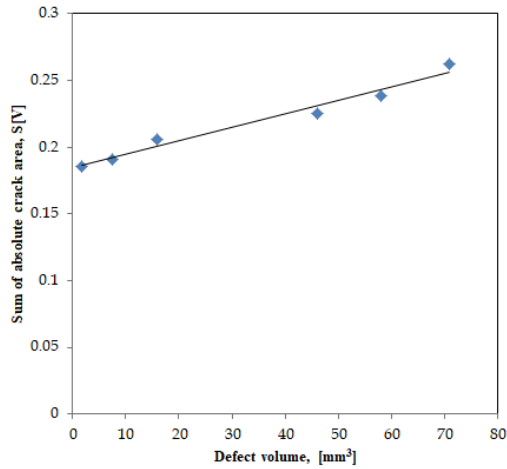


(b) Specimen S#3

Fig. 3-25 Relation between sum with volume of FBH

Specimen S#5은 TW 결함을 가지는 시험편으로써 결함영역의 합과 실제 체적의 상관관계를 Fig. 3-26에 도시 하였다. 깊이 0.4 mm(#4)결함 주위에서 시험편 내재결함으로 판단되는 이상신호가 발생하여 결함의 체적을 추정하는데 있어 큰 오차를 초래 할 수 있기때문에 제외하였다. 이러한 관계는 Eq (30)로 표현할 수 있다.

$$Vol = \frac{Sum - 0.1844}{0.001} \quad (30)$$



(a) Specimen S#4

Fig. 3-26 Relation between sum with volume of TW

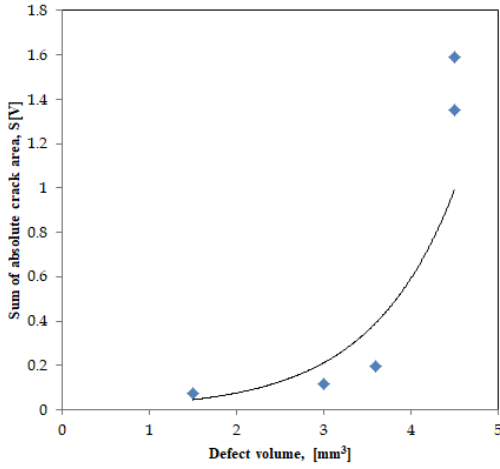
Fig. 3-27 (a)에 나타낸 바와 같이 원주방향 결함에서는 결함의 체적이 커질수록 증가하다가 관통결함에서 매우 큰 자계분포의 왜곡이 발생한 것을 볼 수 있다. 이는 관계식 Eq (31) ~ (33)으로 표현 가능하다. 축방향 결함에서도 결함의 체적이 커질수록 선형적으로 증가하는 것을 Fig. 3-27 (b)에 나타내었다. 이러한 관계는 Eq (34)로 표현 할 수 있다.

$$\text{Sum} = a \times e^{b \times \text{Vol}} \quad (31)$$

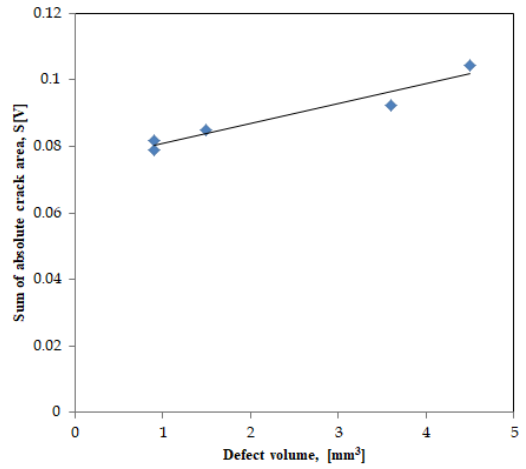
$$\text{Vol} = \frac{\ln(\text{sum}) - \ln(a)}{b} \quad (32)$$

$$\text{Vol} = \frac{\ln(\text{sum}) - \ln(0.0115)}{1.0123} \quad (33)$$

$$\text{Vol} = \frac{\text{Sum} - 0.0769}{0.0048} \quad (34)$$



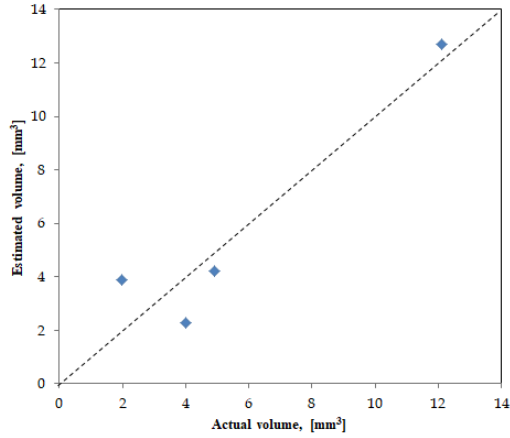
(a) Specimen S#5 - θ Slit



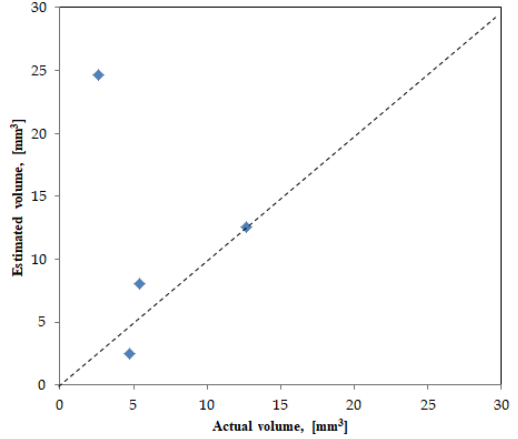
(b) Specimen S#5 - Z Slit

Fig. 3-27 Relation between sum with volume of Slit

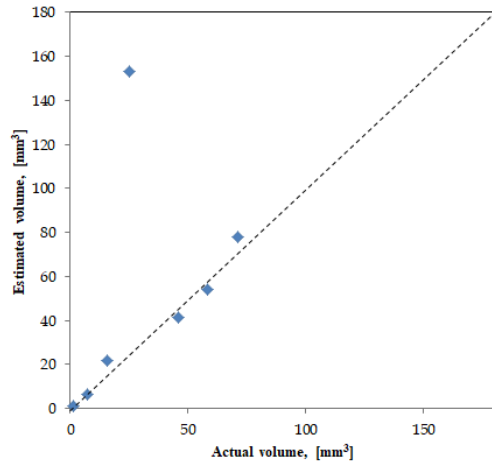
Fig. 3-28은 각 시험편의 실험결과를 정량적으로 평가한 그래프이다. Specimen S#2의 경우 모든 결함에서 실제체적과 비슷한 수준으로 계산되었고, 표준편차는 1.37 mm^3 으로 Fig. 3-28 (a)에 나타내었다. Fig. 3-28 (b)에 나타낸 바와 같이 Specimen S#3의 $\emptyset 1.3$, 100% (#1)결함에서 강한 전자기장의 왜곡이 발생하여 실제 결함체적보다 더욱 큰값이 나타났다. 이 이상신호는 관통결함인 #1을 가공하기 위한 밀링가공 중에 발생한 버(Burr)로 판단된다. Specimen S#3의 표준편차는 $\emptyset 1.3$, 100% (#1)결함을 포함하였을 때 9.65 mm^3 이고, 이 결함을 제외하였을 때 1.98 mm^3 이다. Fig. 3-28 (c) Specimen S#4의 경우 길이 0.4mm, 깊이 12.7mm (#4)결함에서 큰 전자기장의 왜곡이 발생하여 실제 체적보다 훨씬 큰 체적값을 얻었으며, 이 원인은 시험편 내재결함이나 시험편 가공중 발생한 오차로 판단된다. 표준편차는 길이 0.4mm, 깊이 12.7mm (#4)결함을 포함하였을 때 44.8 mm^3 , 제외하였을 때 4.55 mm^3 으로 나타났다. Fig. 3-28 (d) Specimen S#5에서는 원주방향 결함과 축방향 결함을 함께 표현하였으며 전체적으로 균일한 분포를 보이고 있다. 이러한 결함에서 표준편차는 0.56 mm^3 이다.



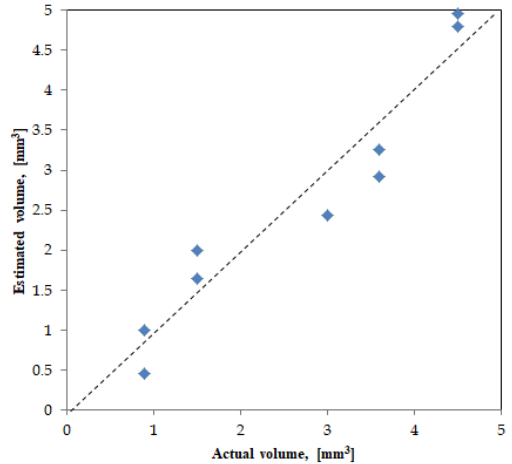
(a) Specimen S#2



(b) Specimen S#3



(c) Specimen S#4



(d) Specimen S#5

Fig. 3-28 Volume estimation : (a) estimation of defect volume results at specimen S#2, (b) estimation of defect volume results at specimen S#3, (c) estimation of defect volume results at specimen S#4, (d) estimation of defect volume results at specimen S#5

제 4 장 결론

자성체 튜브검사를 위한 종래의 원격장외전류탐상법에 의하면, 원격장을 측정하기 위하여 여자코일과 픽업코일을 각 코일의 직경대비 2~4배의 간격으로 배치해야 하기 때문에 센서부의 총 길이가 길어지고, 결과적으로 U-bend와 같은 곡선부에서는 검사가 곤란하다는 한계를 가지고 있었다. 하지만, 복합자원형 와전류검사법에 의하면 전체적인 센서의 길이가 짧아져서 곡관부에서의 검사도 원활히 이루어질 수 있다.

영구자석만을 자원으로 채택한 경우의 자계분포(MFLT)에서는 외부편에 기인한 줄무늬가 반복적으로 나타난다. 또한, 이러한 줄무늬는 보빈코일만을 자원으로 채택한 경우의 자계분포(ECT)에서는 최소화되어 S/N비가 향상된다. 하지만, 신호의 강도면에서는 누설자속탐상법에 비하여 저하된다. 영구자석과 보빈코일의 교번전류를 자원으로 채택한 경우의 자계분포(combined ECT)에서는 편에 기인한 줄무늬가 누설자속탐상법에 비하여 저하되고, 결합신호가 커져서 누설자속탐상법 및 와전류탐상법에 비하여 결합의 판독이 용이해진다.

각 결합 영역에서의 자계분포의 최대값을 100%로 하고, 각 주파수별로 백분율로 표현하면, 600Hz에서만 최대값이 나타난 $\emptyset 1.3$, 10% (#9) 결합 이외의 모든 경우에서 900Hz에서 최대값을 나타냄을 알 수 있다.

Combined ECT에서 보빈코일에 입력하는 교번전류의 주파수를 900Hz로 고정 한 후, 전류의 세기를 100~300mA로 변화시켰을 때 각 결합별 출력의 최대치 비를 나타낸다. 결합의 크기에 따라 다르지만, 전반적으로 100mA에 비하여 300mA의 경우가 약 2배 정도의 높은 출력을 얻을 수 있었다.

TSP의 위치에 따른 자계분포의 변화는 오차범위인 5~10% 정도의 최대값 변화로써 결합탐상능력에 거의 영향을 미치지 않는다.

결합검출확률은 밀링가공 편에 편저공결함과 내외경 환형마모를 모사한 시험편(Specimen S#2)에서 깊이 0.6686mm 이상의 편저공결함을 90%확률로 검출하고 95%

의 신뢰성을 가진다. 전조가공 핀의 시험편에 편저공결함과 내외경 환형마모를 모사한 시험편(Specimen S#3)에서 깊이 0.4993mm 이상의 편저공결함을 90%확률로 검출하고 95%의 신뢰성을 가진다. 경사형마모를 모사한 시험편(Specimen S#4)에서는 깊이 0.4927mm 이상의 경사형 마모를 90%확률로 검출하고 95%의 신뢰성을 가진다. 원주방향, 축방향 균열을 모사한 시험편(Specimen S#5)에서는 깊이 0.996mm 이상의 원주방향결함을 90%확률로 검출하고 이에대한 신뢰성은 95%임을 나타낸다.

정량평가에서 각 시험편의 표준편차는 Specimen S#2에서 1.37 mm^3 , Specimen S#3에서 $\emptyset 1.3$, 100% (#1)결함을 포함하였을 때 9.65 mm^3 , 제외하였을 때 1.37 mm^3 이고, Specimen S#4에서 길이 0.4mm, 깊이 12.7mm (#4)결함을 포함하였을 때 44.8 mm^3 , 제외하였을 때 4.55 mm^3 이다. 그리고 Specimen S#5에서 표준편차는 0.56 mm^3 이다.

REFERENCE

- [1] EPRI, Electromagnetic NDE Guide for Balance-of- Plant Heat Exchanger, Revision 2 (EPRI TR 101772 R2s)
- [2] American Society for Metals. NDE and quality control. In: ASM Handbook; ohio: ASM International; Vol. 17; 1997. p. 181-183
- [3] EPRI. Moisture separator reheater source book; 1997 (Technical report; TR-106345).
- [4] ASNT , 1986 , Nondestructive Testing Handbook , Electromagnetic Testing 4 : 56 ~ 88
- [5] 남민우, 이희중, 김철기. (2008). 원자력발전소 습분분리재열기 튜브 원격장 검사 기술 개발. 비파괴검사학회지, 28(4), 339-345.
- [6] Fukutomi, H., T. Takagi, and M. Nishikawa., "Remote field eddy current technique applied to non-magnetic steam generator tubes, " *NDT & E International*, vol. 34, no. 1, pp. 17-23, 2001.
- [7] Mackintosh, David D., et al. "Remote field eddy current for examination of ferromagnetic tubes." *Materials Evaluation*, vol. 54, no. 6, 1996.
- [8] Young-Kil Shin, "Feasibility Study of Remote Field Eddy Current Testing for Nonmagnetic Steam Generator Tubes," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 21, pp. 518-525, 2001
- [9] 직경 1" 자성관에서의 원격장과전류 탐상 실험 및 결함신호 특성 = RFECT Experiment for 1" Diameter Magnetic Tube and Defect Signal Characteristics, "공업기술 연구(*ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY*), Vol.2, No. - [2002], pp.179-183.
- [10] Hwang, Chang-Chou, and Y. H. Cho. "Effects of leakage flux on magnetic fields of interior permanent magnet synchronous motors." *Magnetics, IEEE Transactions on MAGNETICS*, vol. 37, no. 4, pp. 3021-3024, 2001.

- [11] 이진이, "누설자속탐상법의 결함검출능력 향상에 관한 연구," 대한기계학회, Vol. 2004 No, 11, 2004*Journal of Nondestructive Testing*, vol. 45, pp. 627-630, 2009.
- [12] Lijian YANG, Guoguang ZHANG, Gang LIU, Songwei GAO, "Effect of Lift-off on Pipeline Magnetic Flux Leakage Inspection," 17th World Conference on Nondestructive Testing, pp. 25-28, 2008.
- [13] P. E. Mix, "Magnetic Flux Leakage Theory," in Introduction to nondestructive testing: a training guide, ed: Wiley-Interscience, 2005, pp. 73-78.
- [14] Minkov, D., T. Shoji, and J. Lee/ "Study of the dipole model of a crack." REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION: Vol. 19. 509, No. 1, pp. 521-528 AIP Publishing, 2000.
- [15] 이용, "와전류에 영향을 미치는 인자," 와전류탐상검사, 도서출판 골드, 2000, pp. 15-16.
- [16] P. E. Mix, "Eddy Current Theory," in Introduction to nondestructive testing: a training guide, ed: Wiley-Interscience, 2005, pp. 66-72.
- [17] 정용무, "와전류탐상법(渦電流探傷法)(I)," 비파괴검사학회지, vol. 13, pp. 94-100, 1993.
- [18] Jungmin Kim, "Development and Application of a Magnetic Vector Camera using Heterogeneous Magnetic Sensors," Chosun University, pp. 14-29, 2013.
- [19] Heejong Lee, Chanhee Cho, Seokyeon Song, Donghyun Jee, and Jeehong Jung "Nondestructive Examination of Ferromagnetic Tube Using Magnetic Saturation Eddy Current Technique," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, vol. 28, no. 5, pp. 407-415, 2008.
- [20] Minhuy Le, Jungmin Kim, Jisoo Kim, Hwa-sik Do, and Jinyi Lee, "Electromagnetic testing of moisture separator reheater tubes using a bobbin-type integrated Hall Sensor array," Int J Appl Electromagnet Mech, vol. 55, no. S1, pp. 203-209, 2017.