creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266826

2018年 2月
碩士學位 論文

環形配列 磁氣센서를 利用한 高壓給水加熱器 傳熱管의 非破壞檢査

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

丁 明 澈

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

環形配列 磁氣센서를 利用한 高壓給水加熱器 傳熱管의 非破壞檢査

Non-Destructive Testing of Heat Exchanger Tubes in the High Pressure Water Feeder Using the Bobbin-type Integrated Magnetic Sensor Arrays

2018 年 2月 23 日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

丁 明 澈

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

環形配列 磁氣센서를 利用한 高壓給水加熱器 傳熱管의 非破壞檢査

指導敎授 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

丁 明 澈

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

丁明澈의 碩士學位論文을 認准함

委員長　　朝鮮大學校 敎授 高樂溶 (印)

委　員　　朝鮮大學校 敎授 趙昌鉉 (印)

委　員　　朝鮮大學校 敎授 李鎭伊 (印)

2017 年 11 月

朝鮮大學校 大學院

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT xii

제 1 장 서 론 1

제 2 장 원리 6

제 1 절 결함검출의 원리 6

1. 코일센서 6

2. 환형배열 자기카메라에 의한 결함검출 7

제 2 절 데이터 표현 9

1. 차분해석 9

2. 경향제거해석 11

3. 고속 푸리에 변환 12

4. 가버 변환 15

제 3 절 결함검출 알고리즘 18

제 3 장 실험 및 고찰 20

제 1 절 시험편 20

제 2 절 센서 및 자원 24

제 3 절 실험결과 28

1. 시변자계 분포 28

2. 주파수 특성 32

가. 코일센서 32

나. 환형배열 홀센서 38

다. 입력전류 특성 43

제 4 절 시험편별 결함 탐상 결과 45

1. 코일센서 45

2. 홀센서 배열 52

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 절 결함 평가 56
1. 자동탐상 56
2. 정량평가 63
제 4 장 결론 74
REFERENCE 76

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표목차

Table 1-1 High-pressure feedwater heater accident area[1] 2
Table 3-1 Sizes of flat bottom hole (FBH) 21
Table 3-2 Sizes of Tapered wear (TW) 21
Table 3-3 Sizes of Flat wear (FW) 22
Table 3-4 Sizes of Slit 23
Table 3-5 Specification of sensor 24
Table 3-6 Specification of coil 25
Table 3-7 Specification of signal processing 26
Table 3-8 Specification of scanner 27

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

도목차

Fig. 1 -1 Representative steam turbine cycle of nuclear power plant 2
Fig. 1 -2 Damage type of high-pressure feedwater heater 3
Fig. 2 -1 Crack inspection principle of bobbin-type magnetic camera[4] 8
Fig. 2 -2 Normal data 10
Fig. 2 -3 Differential data processing 10
Fig. 2 -4 Subtract back-data processing 10
Fig. 2 -5 Principle of detrend data processing 11
Fig. 2 -6 Detrend data processing result (N=6) 12
Fig. 2 -7 Detrend data processing result (N=10) 12
Fig. 2 -8 Detrend data processing result (N=15) 12
Fig. 2 -9 Block diagram of FFT data processing 13
Fig. 2 -10 A sample of FFT data processing 14
Fig. 2 -11 A sample of magnetic image with FFT data processing 14
Fig. 2 -12 Principles of FFT and Gabor transform data processing 16
Fig. 2 -13 Comparison of FFT and Gabor transform data processing results 17
Fig. 2 -14 Defect detection algorithm 18
Fig. 2 -15 Example Defect detection algorithm 19
Fig. 3 -1 Flat bottom hole (FBH) specimen 20
Fig. 3 -2 Tapered wear (TW) specimen 21
Fig. 3 -3 Flat wear (FW) specimen 22
Fig. 3 -4 Slit specimen 23
Fig. 3 -5 Sensor 24
Fig. 3 -6 Block diagram 26
Fig. 3 -7 Experimental set-up 27
Fig. 3 -8 Contour-type magnetic images (FBH, 10kHz, 200mA) 30
Fig. 3 -9 Waterfall-type magnetic images (FBH, 10kHz, 200mA) 31
Fig. 3 -10 X and Y data by exciting coil 33
Fig. 3 -11 Lissajous diagram in the ID/OD groove and TSP with 100mA exciting current 34
Fig. 3 -12 Lissajous diagram in the FBH with 100mA exciting current 35
Fig. 3 -13 Impedance and phase corresponding to frequency 36
Fig. 3 -14 Impedance and phase relationship by frequency 37
Fig. 3 -15 Distribution of magnetic field (FBH, 100mA, ΔV) 39
Fig. 3 -16 Distribution of magnetic field (FBH, 100mA, V_{Dtrd}) 40
Fig. 3 -17 Distribution of magnetic field (FBH, 100mA, |ΔV|) 41
Fig. 3 -18 Distribution of magnetic field (FBH, 100mA |Δ V_{Dtrd} |) 42
Fig. 3 -19 Distribution of magnetic field corresponding to input current (FBH, 20kHz, ΔV). 43
Fig. 3 -20 Distribution of magnetic field corresponding to input current (FBH, 20kHz, V_{Dtrd})

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

..... 43
Fig. 3 -21 Distribution of magnetic field corresponding to input current (FBH, 20kHz, |ΔV|)44
Fig. 3 -22 Distribution of magnetic field corresponding to input current (FBH, 20kHz, $|V_{Dtrd}|$) 44
Fig. 3 -23 Impedance graph with 20kHz, 200mA 46
Fig. 3 -24 Phase graph with 20kHz, 200mA..... 47
Fig. 3 -25 Lissajous diagram in the FBH with 20kHz 200mA 48
Fig. 3 -26 Lissajous diagram in the TW with 20kHz 200mA..... 49
Fig. 3 -27 Lissajous diagram in the FW with 20kHz 200mA 50
Fig. 3 -28 Lissajous diagram in the Slit with 20kHz 200mA 51
Fig. 3 -29 Distribution of ΔVwith 20kHz, 200mA 52
Fig. 3 -30 Distribution of V_{Dtrd} with 20kHz, 200mA 53
Fig. 3 -31 Distribution of |ΔV| with 20kHz, 200mA 54
Fig. 3 -32 Distribution of $|V_{Dtrd}|$ with 20kHz, 200mA 55
Fig. 3 -33 Inspection factors in the FBH with 20kHz, 200mA 57
Fig. 3 -34 Inspection factors in the TW with 20kHz, 200mA..... 58
Fig. 3 -35 Inspection factors in the FW with 20kHz, 200mA..... 59
Fig. 3 -36 Inspection factors in the Slit with 20kHz, 200mA 60
Fig. 3 -37 Estimate center position result in Hall sensor 61
Fig. 3 -38 Estimate center position result in coil sensor 62
Fig. 3 -39 Data processing area for estimating the depth of damage in FBH specimen 64
Fig. 3 -40 Relationship between the depth of damage and the sum of absolute in FBH 65
Fig. 3 -41 Depth estimation result in FBH..... 66
Fig. 3 -42 Data processing area for estimating the depth of damage in TW specimen..... 67
Fig. 3 -43 Relationship between the depth of damage and the sum of absolute in TW..... 67
Fig. 3 -44 Depth estimation result in TW 68
Fig. 3 -45 Data processing area for estimating the depth of damage in FW specimen..... 69
Fig. 3 -46 Depth estimation result in FW on Hall sensor 69
Fig. 3 -47 Relationship between the depth of damage and the phase in FW 70
Fig. 3 -48 Data processing area for estimating the depth of damage in Slit specimen 71
Fig. 3 -49 Relationship between the Length of damage and the sum of absolute in Slit 71
Fig. 3 -50 Length estimation result in Slit 72
Fig. 3 -51 Relative depth and phase on all specimen..... 73

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

약어 설명

SCC	Stress corrosion cracking
FAC	Flow accelerate corrosion
MRPC	Motorized rotating pancake coil
ECT	Eddy current testing
HPF	High pass filter
LPF	Low pass filter
BPF	Band pass filter
GMR	Giant magnetic resistance
RMS	Root-mean-square
AC	Alternating current
DC	Direct current
DAQ	Data acquisition device
FBH	Flat bottom hole
TW	Tapered wear
FW	Flat wear
TSP	Tube support plate
AI	Analog input

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기호 설명

k	Hall constant
I	Input current to Hall sensor
V_H	Hall sensor voltage output
V_S	Root-mean-square of Hall voltage
Z	Coil impedance
ΔZ	Differential coil impedance
ΔZ_{nor}	Normalized diffrentail coil impedance
ΔV	Differential of root-mean-square of Hall voltage
V_{Dtrd}	Detrend of root-mean-square of Hall voltage
V_{FFT}	Fast Fourier transform of root-mean-square of Hall voltage
V_{Gabor}	Gabor transform of root-mean-square of Hall voltage
R	Magnitude of coil impedance
ϕ	Phase of coil impedance

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Non-Destructive Testing of Heat Exchanger Tubes in the High Pressure Water Feeder Using the Bobbin-type Integrated Magnetic Sensor Arrays

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

A non-destructive testing system is developed for the inspection of austenitic stainless steel heat exchanger tubes. First, integrated Hall sensor arrays are disposed under absolute type coil. When an alternating current is applied to the bobbin coils, an induced current in circumferential direction is generated in the heat exchanger tube. In this structure, an eddy current is generated around the defect, and the impedance of bobbin coil changes. Therefore, it is possible to estimate the presence and location of a defect by analyzing the bobbin coil signal, i.e., the amplitude and phase shift. Furthermore, the eddt currents generated around the defects distort the time-varying magnetic field distribution, so the shape of defect can be evaluated by the measurement of these distortions using the bobbin-type integrated Hall sensor array and the AC amplification signal processing circuit. The developed system is verified using the artificial defects introduced into the SS304 heat exchanger tubes of the high-pressure water feeder.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

그림 1은 원자력발전소의 대표적인 증기터빈 사이클을 나타낸다. 여기에서 급수가열계통은 터빈복수기의 응축수 또는 급수가 다시 증기발생기로 유입되기 전에 예열시켜 발전소 열효율을 높이는 역할을 한다. 이 계통은 여러 가열기와 제어장치로 구성되며, (1) 계통의 효율을 최대로 유지하기 위해 급수가열기 내의 수위를 적절하게 유지하고 배수시키고, (2) 급수가열기에 가열 증기를 공급하며, (3) 응축된 추기증기 배수의 유체경로를 제공하여 급수와 응축계통으로 순환시키며, (4) 급수가열기 배수를 수집하고, (5) 응축이 어려운 가스가 갇히게 되는 것을 방지하는 기능을 한다. 따라서, 급수가열기는 원자력발전소의 정상운전 및 발전소 신뢰도와 유용성에 크게 영향을 미치며, 발전소 종합효율을 결정하는 중요한 기기 중 하나이다. 특히, 발전소의 운전 신뢰도와 열출력 성능은 고압급수가열기 상태에 따라 영향을 많이 받게 된다. 국내외 발전소의 많은 사례에서 알 수 있듯이 급수가열계통에 고장이 발생할 경우, 이로 인해 발전소 정상운전에 지장을 초래하고 큰 경제적 손실이 발생한다.

급수가열기 동체와 내부기기에서 1976년부터 1996년 사이에 발생한 고장기록(총 166건)은 표 1과 같으며, 이 전체 기록에서 전열관 누설이 차지하는 비율은 약 87%로서 급수가열기의 안정적 운전을 위해서는 전열관 관리가 매우 중요한 것을 알 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

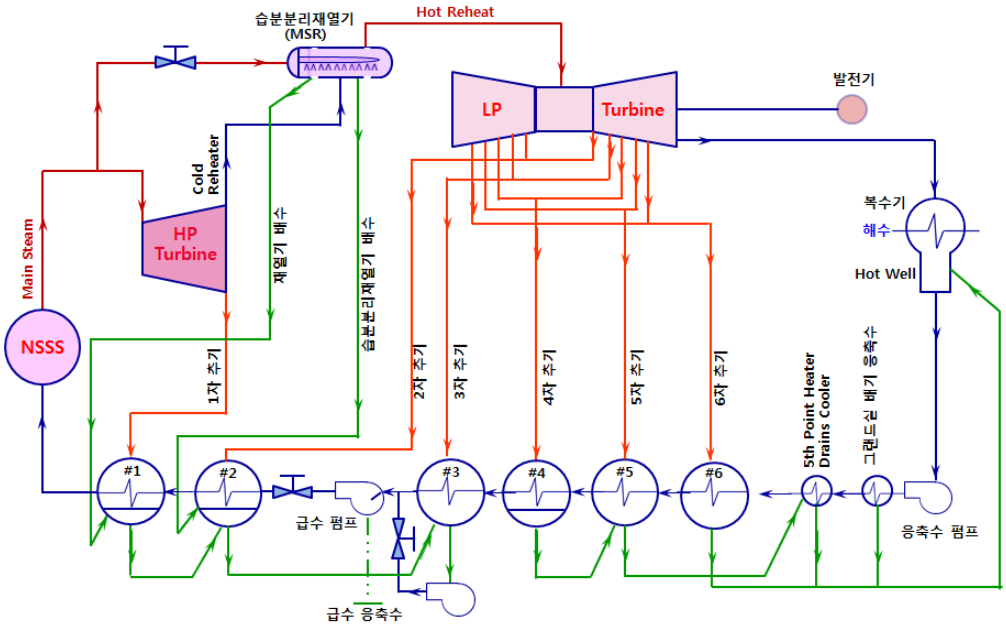


Fig. 1-1 Representative steam turbine cycle of nuclear power plant

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

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

이와 같이 발전소 정상운전을 위한 중요 기기인 고압급수가열기는 특정 운전 환경에서 발전소 수명기간 동안 사용이 가능하도록 설계되어 있으나, 발전소의 다른 중요 기기와 마찬가지로 운전연수가 증가함에 따라 가열기의 건전성 유지에 큰 지장을 초래할 수 있는 손상이 전열관에서 검출되고 있다. 원자력발전소의 급수가열기에서 가장 일반적으로 발생할 수 있는 세 가지의 주요 손상기구는 Fig.1-2에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나타낸 바와 같이 부식(corrosion), 침식(erosion) 및 진동(vibration)이다.

Fig. 1-2 Damage type of high-pressure feedwater heater

한편, 전열관 검사결과에 대한 후속조치로서 전열관에서 균열이 발견될 경우에는 관두께 정비기준과 무관하게 관막음 조치를 취해야 한다. 하지만, 체적성 결함은 관두께 정비기준을 초과한 전열관에 대해 관막음 조치 후 운전이 가능하다. 따라서, 균열성 결함이 체적성 결함으로 잘못 평가되어 미 보수상태로 남아 있는 경우, 발전소 정상 출력운전 중에 전열관 파열에 의한 누설발생의 위험성을 내포하게 된다.

이러한 한계를 보완하기 위하여 보빈탐촉자 검사결과 검출된 결함에 대하여

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

추가적으로 회전형 탐촉자를 적용하여 결함의 진위여부와 방향등을 평가한다[2]. 회전형 탐촉자는 탐촉자 헤드 후방에 설치된 모터에 의해 900rpm으로 회전하면서 0.5inch/sec의 속도로 전열관 내면을 헬리컬 스캔하여 보빈탐촉자의 이상지시를 판별하는데 사용되고 있다. 하지만, 검사속도가 느리고, 탐촉자 사용수명이 짧다는 단점을 가지고 있어 전수검사에 활용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 회전형 탐촉자의 이러한 단점을 보완하여 검출된 결함의 판별을 위한 고신뢰도 검사시스템의 개발이 필요한 실정이다.

한편, 소구경 전열관 내벽을 따라 능동형 코일센서를 환형으로 배열하여 축방향으로 스캔하여 보다 빠른 속도로 결함 유무 판별 및 정량 평가에 활용할 수 있는 X-probe 시스템이 개발된 바 있다. MRPC에 비하여 빠른 속도로 결함을 검출할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 능동형 코일센서의 경우, 환형으로 배열된 모든 센서를 동시에 구동할 때 상호 간섭이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 센서 간의 간격을 넓히거나, 센서와 센서의 간격이 간섭을 회피할 수 있을 정도의 거리를 유지한 채로 교차로 구동해야 한다[3].

Lee 등은 소구경 전열관의 비파괴검사를 위하여 여자코일과 환형 또는 실린더형으로 배열한 자기센서를 이용하여 와전류를 영상화하고, 결함을 검출 및 평가하는 보빈형 자기카메라를 개발하여 보고한 바 있다[4]. 코일에 교류전류를 인가하면, 전열관의 원호방향으로 유도전류가 발생한다. 결함이 존재하면 유도전류가 왜곡되어, 전열관 내부의 시변 자계가 왜곡된다. 이러한 시변자계를 환형 또는 실린더형으로 배열된 GMR센서 또는 홀센서에 의하여 측정하여 결함 유무는 물론 형상 및 크기를 정량적으로 평가할 수 있다. 특히, 결함의 존재에 기인한 시변자계의 세기를 반도체기반 수동형 자기센서에 의하여 측정하므로, X-probe와는 달리 센서 간의 간섭이 없어서 공간분해능을 높일 수 있으며, 센서를 교차로 구동할 필요가 없다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 진폭의 변화에 의존하기 때문에 ID와 OD와 같은 결함의 위치를 추정하기 곤란하다는 단점을 가지고 있었다[5].

따라서, 본 연구에서는 전열관에 유도전류를 인가하기 위한 보빈 코일을 자원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

뿐아니라 센서로도 활용하는 새로운 형태의 보빈형 자기카메라를 개발하였다. 보빈 코일에 의하여 임피던스 및 위상차를 측정하여 결함유무를 판정하면서 리사쥬선도를 도시한다. 또한, 환형배열 홀센서에 의하여 결함의 존재, 형상 및 크기에 기인한 교번자계의 분포를 측정하여 영상화한다. 그리고, 리사쥬선도와 교번자계 분포를 해석하여 결함의 위치, 종류, 형상 및 크기를 정량적으로 평가하였다.

본 논문은 총 4장으로 구성된다. 제 1장은 서론이다. 제 2장은 고압급수가열기의 손상을 검출하고, 평가하기 위한 리사주선도와 환형배열 홀센서의 이론적 배경과 함께, 데이터 표현법, 자동결함추출 알고리즘에 대하여 설명한다. 제 3장은 본 연구를 통하여 제안된 자동결함추출 알고리즘 결과를 보고한다. 제 4장은 결론이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 원리

제 1 절 결함검출의 원리

1. 코일센서

보빈형 코일을 사용하는 ECT 시스템은 소구경 배관 시험편에 삽입한 코일과 시험편 상호간에 발생하는 상호유도작용에 의한 임피던스의 변화를 복소수 평면으로 표현함으로서 검사 대상의 건전성을 검사한다. 보빈형 코일 자체 임피던스(Z_0)는 일반적으로 식(1)로 정의할 수 있으며, 식(1)에서 R_0은 복소수 평면에서 실수부를 나타내고, jL_0는 허수부를 나타낸다.

$$Z_0 = R_0 + jX_{L,0} \tag{1}$$

교류전원이 인가된 보빈형 코일을 배관 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 소구경 배관 시험편에 삽입된 코일의 임피던스(Z_S)는 식(2)와 같다.

$$Z_s = R_s + jX_L \tag{2}$$

한편, 차동형 보빈코일은 식 (3)에 나타낸 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 표현하면 결함의 유무를 용이하게 판별할 수 있다. 뿐만 아니라, 결함의 위치 및 크기도 평가할 수 있다. 본 연구에서는 차동 임피던스를 식 (4)와 같이 공기 중의 리액턴스($X_{L,0}$)로 나누어 정규화하여 복소평면에 표현하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Delta Z_s = Z_{s_1} - Z_{s_2} = \Delta R_s + j\Delta X_{L,s} \tag{3}$$

$$\Delta Z_{nor} = \frac{\Delta Z_s}{X_{L,0}} = \frac{\Delta R_s}{X_{L,0}} + \mathrm{j}\frac{\Delta X_s}{x_{L,0}} \tag{4}$$

2. 환형배열 자기카메라에 의한 결함검출

자기카메라는 자원(magnetic source), 자기센서, 신호처리회로, 인터페이스, 컴퓨터로 구성된다. 자원의 경우 DC형과 AC형으로 분류되며, 각각 누설자속탐상법 및 와전류탐상법에 해당된다. 따라서, 투자율이 높은 강자성체 금속의 결함을 검출할 때에는 DC형 자원을 인가한다[6]. 또한, 상자성체 금속의 경우에는 도전율을 고려하여 AC형 자원을 인가한다[7]. 피측정체에 DC형 또는 AC형 자원을 인가하면, 결함의 존재 및 크기에 따라 결함 주변에서 전자기장의 분포가 왜곡된다. 따라서, 전자기장의 분포를 자기센서로 측정하면 결함의 존재뿐 아니라, 위치와 크기도 추정할 수 있다.

자기센서는 GMR센서, MR센서, Hall센서 및 코일이 사용될 수 있다[8-10]. 또한, 전자기장 분포를 측정할 경우, 측정시간 단축 및 공간분해능 향상을 위하여 자기센서를 선형, 보빈형, 면적형 및 원통형으로 배열하는 방법이 개발되어 왔다[11-13]. 이러한 수동형 자기센서 구동방식을 활용함으로서, 종래의 코일기반 와전류검사법에 비하여 센서 상호 간섭을 최소화할 수 있어 공간분해능을 향상시킬 수 있다. 또한, 동시에 센서 구동이 가능하여 검사 속도를 향상시키고, 증폭 및 필터링과 같은 신호처리 방법도 용이하다. 한편 교류자원을 인가할 경우, 결함 주변에서 전기장의 왜곡에 기인한 시변자계가 발생하게 된다. 따라서 AC 증폭, 고대역 통과 필터(HPF, high pass filter) 및 저대역 통과 필터(LPF, low pass filter)가 필요하며, 진폭을 측정하기 위한 평활화회로(RMS, root-mean-square)와 위상을 측정하기 위한 위상차회로(phasor)가 적용된다. 각각의 진폭 및 위상차 신호는 AD변환기를 통하여 컴퓨터에 입력, 해석에 활용된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고압급수가열기 검사용 보빈형 와전류센서는 Fig. 2-1과 같이 자원으로 내삽형 코일을 사용한다[4]. 내삽형 코일에 교류전원을 입력하면, Fig.2-1(a)와 같이 시험편인 배관에 유도전류가 발생한다. 유도전류는 원주방향(θ-방향)으로 발생하며, 따라서 배관에 결함이 없을 때에는 축방향(z-방향)의 시변자계가 발생한다. 한편, 내삽형 코일에 인접하여 홀센서를 환형으로 배열하였다. 홀센서는 센서 표면에 수직인 방향의 자기장의 세기에 비례한 전압을 출력하게 되므로, 이러한 구조에서는 반지름방향(r-방향)의 자기장을 측정한다[14]. 따라서, 배관에 결함이 없을 때 발생하는 축방향(z-방향) 시변자계는 자기센서에 큰 영향을 미치지 않게 된다[15]. 그러나, 배관에 결함이 존재할 때에는 Fig.2-1(b)와 같이 유도전류가 배관의 표면을 따라 왜곡되며, 결과적으로 반지름방향의 시변자계가 발생한다. 따라서, 보빈형으로 배열된 홀센서에 의하여 결함의 존재 및 크기에 기인한 시변자계의 분포를 정량적으로 측정한다[16].

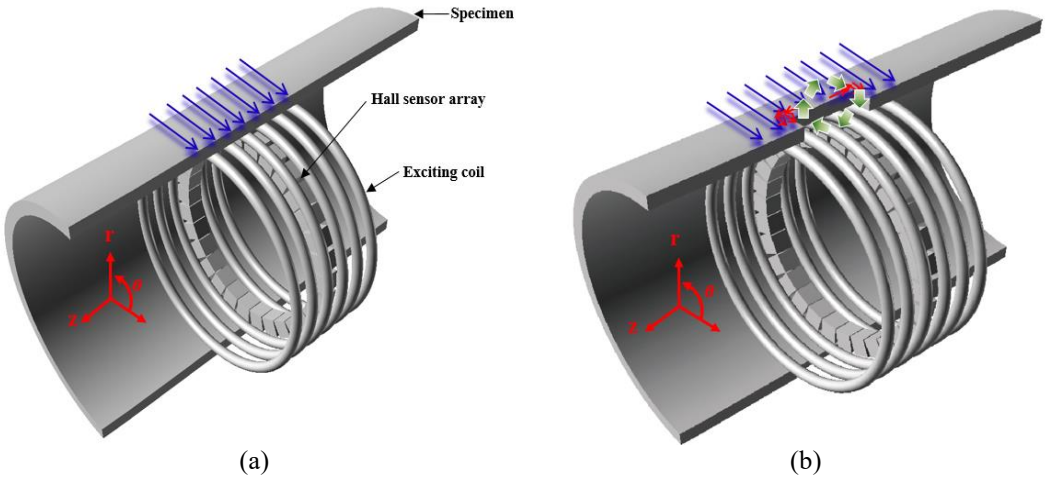


Fig. 2-1 Crack inspection principle of bobbin-type magnetic camera[4]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 데이터 표현

1. 차분해석

보빈형 자기카메라는 홀센서가 환형으로 배열되어 있으며 반지름 방향의 성분을 가진 시변자계, 즉 홀센서의 수직방향으로 시변자계를 측정한다. 홀센서는 식 (5)로 표현되며 홀센서의 수직방향으로 홀상수(k), 입력전류(I) 및 센서 수직 방향의 자속밀도에 비례하는 신호가 출력된다. sinωt는 시변자계임을 뜻한다. 시변자계의 경우 식 (6)과 같이 RMS(root mean square)로 변환하면 진폭을 알 수있다.

$$V_H = kBI\cos\theta \cdot \sin\omega t \tag{5}$$

$$Vs = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (kBI\cos\theta \cdot \sin\omega t)^2\, dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} kkBI\cos\theta \tag{6}$$

Fig.2-2는 보빈형 자기카메라의 실험결과로 식 (6)을 거친 센서의 출력신호이다. 종축은 축방향, 횡축은 각도를 나타낸다. 환형으로 배열된 각각의 센서는 감도 및 바이어스의 전압에 차이가 있어 신호해석이 원활하지 않다. 이러한 이유로 식 (7)로 표현되는 차분해석법을 통하여 감도 및 바이어스에 의한 특성을 최소화함으로써 해석이 원활해진다. 여기에서 i는 각각 축방향 스캔거리, j는 센서 번호를 나타낸다. 식 (8)은 식 (7)로부터 얻어진 차분신호를 절대값으로 표현한 것이다.

$$\Delta V(i \cdot j) = V_s(i+1, j) - V_s(i \cdot j) \tag{7}$$

$$|\Delta V(i \cdot j)| = |V_s(i+1, j) - V_s(i \cdot j)| \tag{8}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

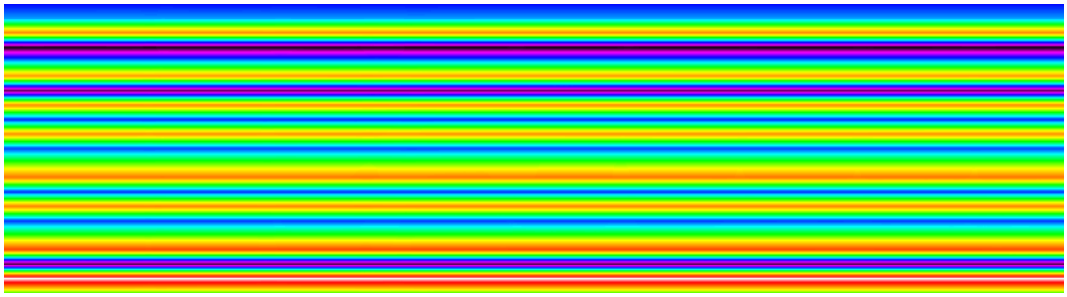


Fig. 2-2 Normal data

Fig.2-3은 Fig.2-2의 결과를 식 (7)에 의하여 재해석한 것이다. 센서 상호의 물리적 특성 차이가 최소화함으로서, 결함의 유무, 위치, 크기까지 평가할 수 있다.

한편, 이러한 차분해석은 식 (9) 및 Fig.2-5로 표현되는 배경 차분 신호처리(subtract back-data processing)와는 차이가 있다. 즉, 센서의 초기검사 위치에서의 출력, $V_S(0,0)$을 기준으로 측정방향으로 이동하면서 각각의 신호출력 $V_S(i,j)$의 차이를 지시함으로서, 출력의 바이어스 오차만을 제거하는 것이 배경 차분 신호처리이다. 반면에 식 (7)의 차분해석은 인접한 자계의 분포 차이를 지시하므로 바이어스 오차뿐 아니라 감도오차까지 제거할 수 있다.

$$V_b(1,j) = V_s(i,j) - V_s(0,0) \tag{9}$$

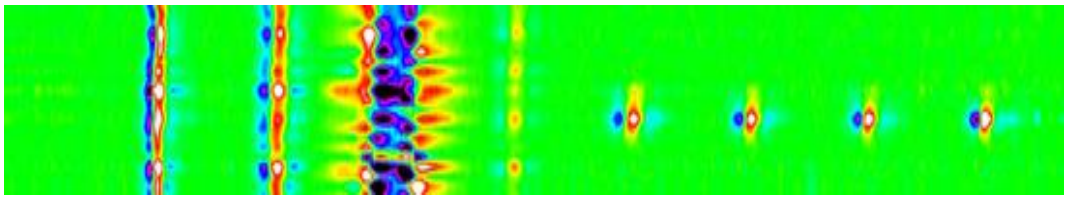


Fig. 2-3 Differential data processing

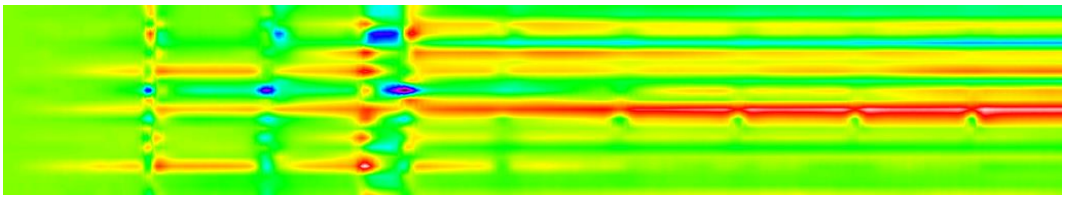


Fig. 2-4 Subtract back-data processing

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 경향제거해석

경향제거해석 신호처리(V_{Dtrd})는 원 데이터를 보존하면서 결함 정보를 명확하게 할 수 있는 신호처리기법 중 하나이다. 식 (10)을 통하여 원 데이터를 이동평균하고, 식 (11)을 통하여 차분한다. 식 (12)는 경향제거해석 결과의 절대값 표현이다. 식(13)은 경향제거해석을 차분해석하고 절대값으로 표현한 절대차분경향제거해석이다. 경향제거해석은 저대역통과필터의 역할을 수행하면서 원 데이터의 경향을 반영할 수 있으나, 이동 평균의 폭에 따라 결함 정보의 왜곡이 심화될 수 있다. Fig.2-6에서 Fig.2-8은 경향제거해석의 결과이다. 각 결과는 이동평균의 폭 변화에 따른 결함의 존재에 기인한 전자기장 분포의 왜곡을 보여준다. 이동평균의 폭이 커질수록 결함 정보가 흐려짐을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 결함의 존재에 따른 전자기장 분포의 왜곡을 최소화하면서 잡음 신호를 줄일 수 있도록 N=6으로 설정하였다.

$$V_{AVR}(i,j,N) = \frac{1}{N}\sum_{\tilde{i}=i-\frac{N}{2}}^{i-\frac{N}{2}} V_5(\tilde{i},j) \tag{10}$$

$$V_{Dtrd}(i,j) = v_s(i,j) - V_{AVR}(i,j,N) \tag{11}$$

$$|V_{Dtrd}(i,j)| = |v_s(i,j) - V_{AVR}(i,j,N)| \tag{12}$$

$$|\Delta V_{Dtrd}(i,j)| = V_{Dtrd}(i+1,j) - V_{Dtrd}(i,j) \tag{13}$$

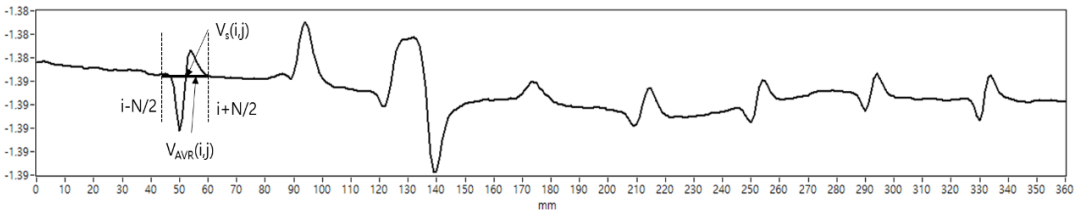


Fig. 2-5 Principle of detrend data processing

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

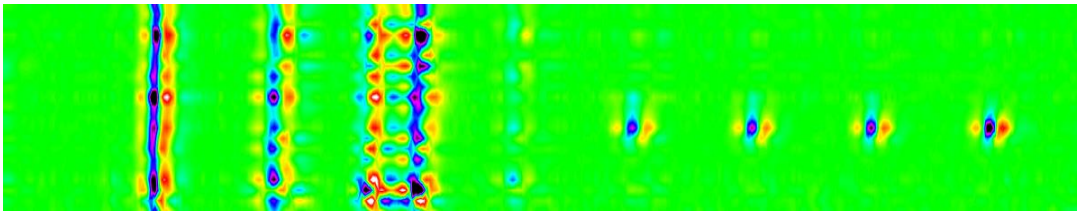


Fig. 2-6 Detrend data processing result (N=6)

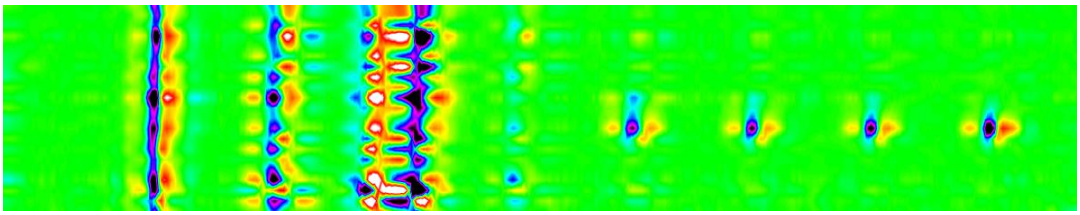


Fig. 2-7 Detrend data processing result (N=10)

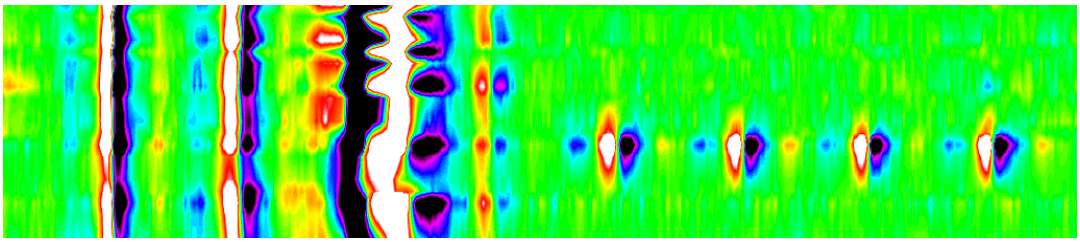


Fig. 2-8 Detrend data processing result (N=15)

3. 고속 푸리에 변환

푸리에변환(Fourier transform, V_{FFT})은 신호의 주파수 패턴을 분석하여 특징을 추출하는 기법이다. 보빈형 자기카메라의 실험결과에서 종축은 거리를 나타낸다. 일정한 간격과 스캔속도를 가지기 때문에 시간(t)를 거리(x)로 환산하여 주파수 성분을 표현할 수 있다. 한편, 고속 푸리에 변환(FFT, fast Fourier transform)은 이산 푸리에 변환과 그 역변환을 빠르게 수행하는 효율적인 알고리즘이다. 식 (14)는 푸리에 변환의 예를 나타내며, 각가속도 ω가 주파수성분에 해당된다. 식 (15)는 식 (14)의 고속푸리에 변환의 절대값 표현을 나타낸다. 식 (16)은 식 (14)의 결과를 차분해석하고 절대값으로 표현한 절대차분푸리에해석이다. 여기서 i는 축방향 스캔거리이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$FFT(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j\omega x}\,dx \tag{14}$$

$$|FFT(\omega)| = |\int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j\omega x}\,dx\,| \tag{15}$$

$$|\Delta FFT(\omega)| = \ |FFT(i+1,\omega) - FFT(i,\omega)| \tag{16}$$

Fig.2-9는 고속푸리에 변환을 이용한 데이터 표현법의 블록다이어그램이다. 먼저, 입력된 신호는 전술한 바와 같이 시간으로 환산될 수 있다. 거리로 환산된 데이터는 푸리에 변환을 통하여 주파수 성분으로 분리된다. 분리된 신호에서 결함 신호를 제외한 노이즈 신호는 제거한다. 결함 신호는 역푸리에 변환을 거친다. Fig.2-10은 고속 푸리에 변환 과정을 나타낸다. Fig.2-11은 고속푸리에변환으로 표현된 데이터를 나타낸다.

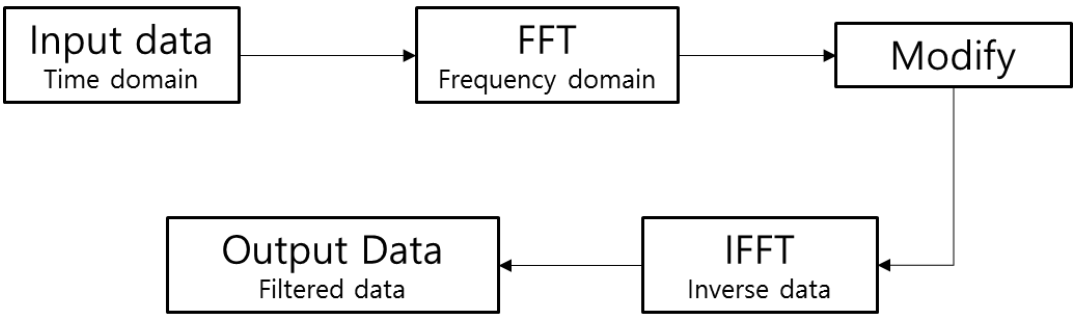


Fig. 2-9 Block diagram of FFT data processing

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

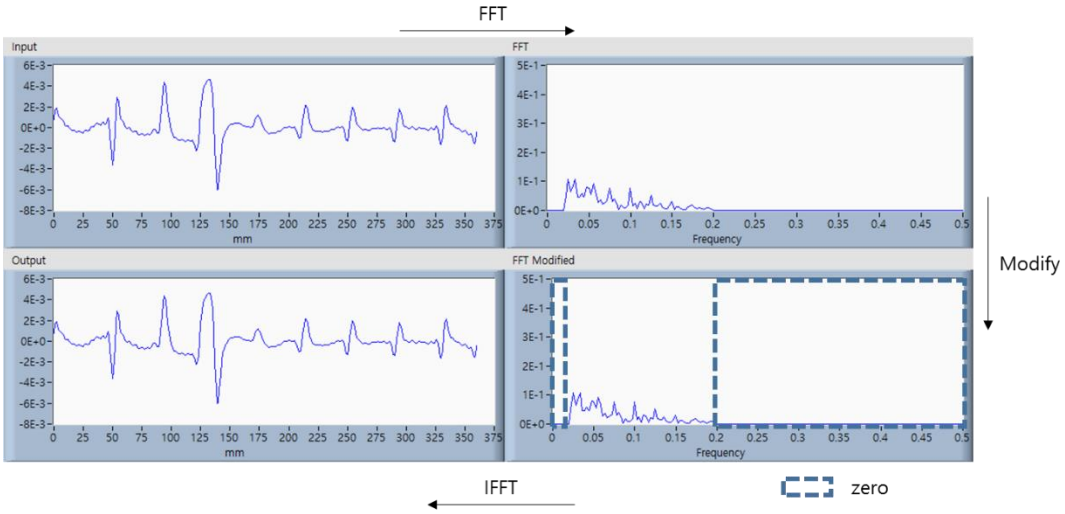
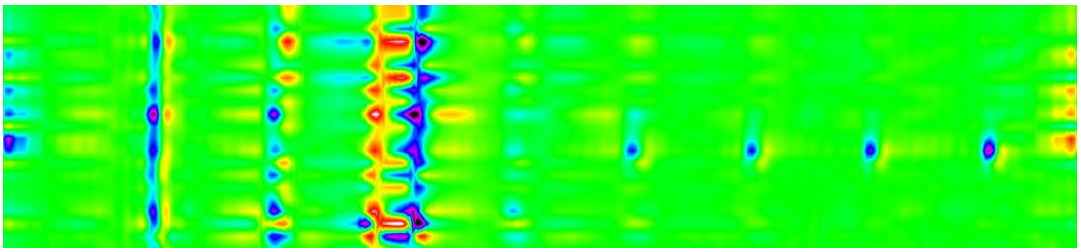


Fig. 2-10 A sample of FFT data processing

(a) Input data



(b) Output data

Fig. 2-11 A sample of magnetic image with FFT data processing

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 가버 변환

가버 변환(Gabor transform, V_{Gabor})은 연속된 윈도우상에서 가우스분포 함수를 적용한 푸리에 변환의 일종이다. 즉 상기 고속푸리에 변환이 전체 데이터에 대한 해석기법으로서 특정 주파수를 제거하는 반면에, 가버 변환은 연속되는 특정 영역에 대한 고속푸리에 변환 및 특정 주파수의 특징 추출 기법이다. 이러한 가버 변환에 의하여 구간별로 서로 다른 주파수의 잡음이 있는 상황에서도 관심 대역의 주파수만을 부각시켜 관찰할 수 있다. 식 (19)와 식 (20)은 각각 가버 변환결과의 절대값 표현과 절대가버해석의 차분해석이다.

$$G(\tau,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-\pi(x-\tau)^2} e^{-j\omega x}\, dx \tag{17}$$

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

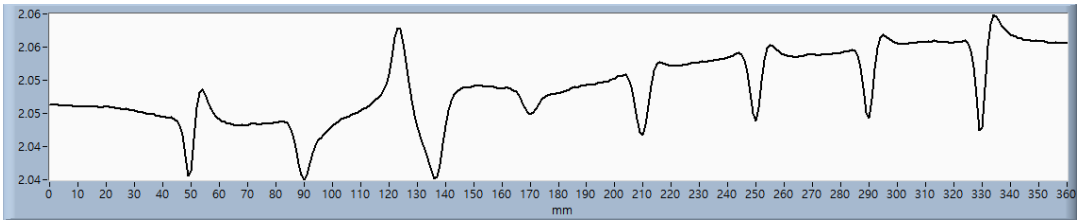
$$|V_{Gabor}(i,j)| = |G(\tau,\omega)| \tag{19}$$

$$|\Delta V_{Gabor}(i,j)| = V_{Gabor}(i+1,j) - V_{Gabor}(i,j) \tag{20}$$

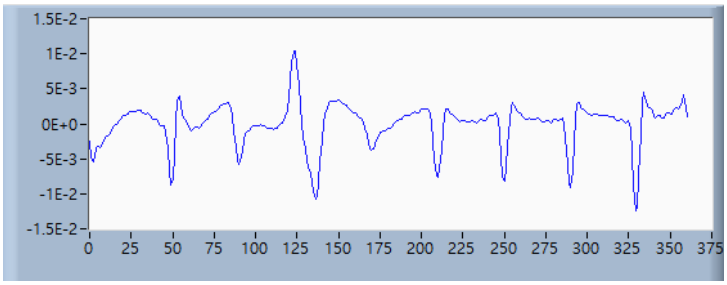
Fig.2-12는 원 데이터에 대한 고속 푸리에 변환과 가버 변환 결과를 나타낸다. Fig.2-13은 고속푸리에 변환과 가버 변환 결과를 비교한다. 가버 변환의 경우 고속푸리에 해석 결과보다 결함의 특징을 추출하기 원활하였다. 주변 노이즈 신호에 대해서도 제거 비율이 향상되었다.

Collection @ chosun

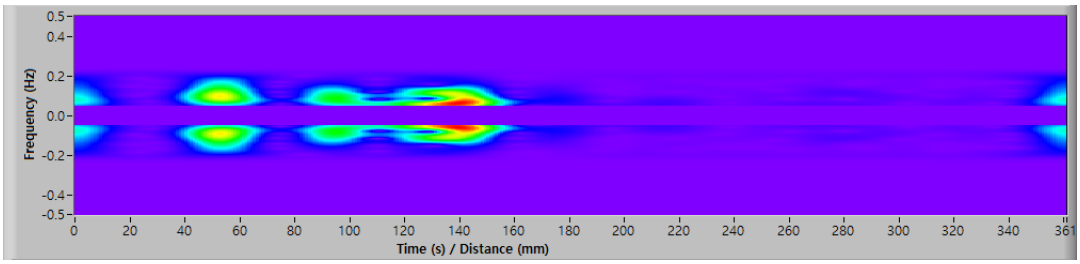
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Original data



(b) FFT processing

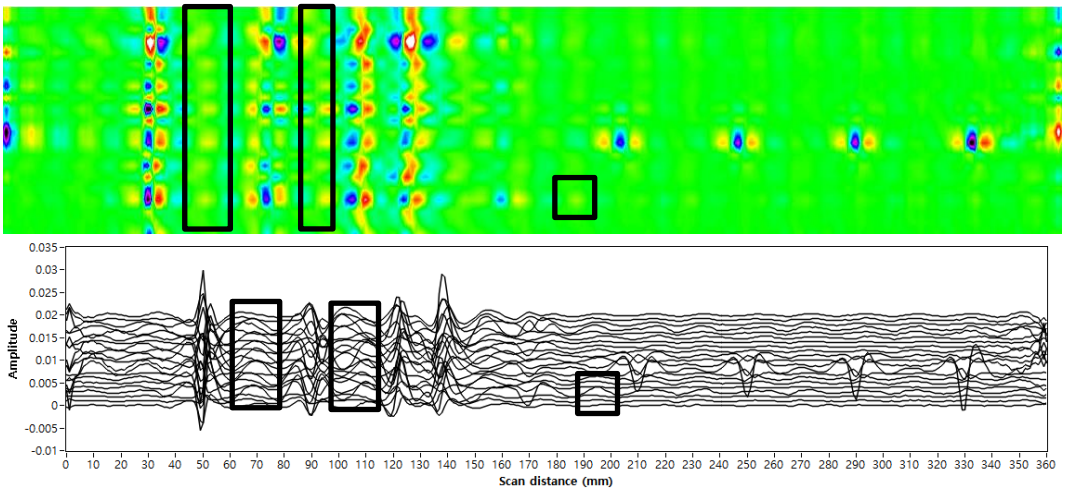


(c) Gabor transform

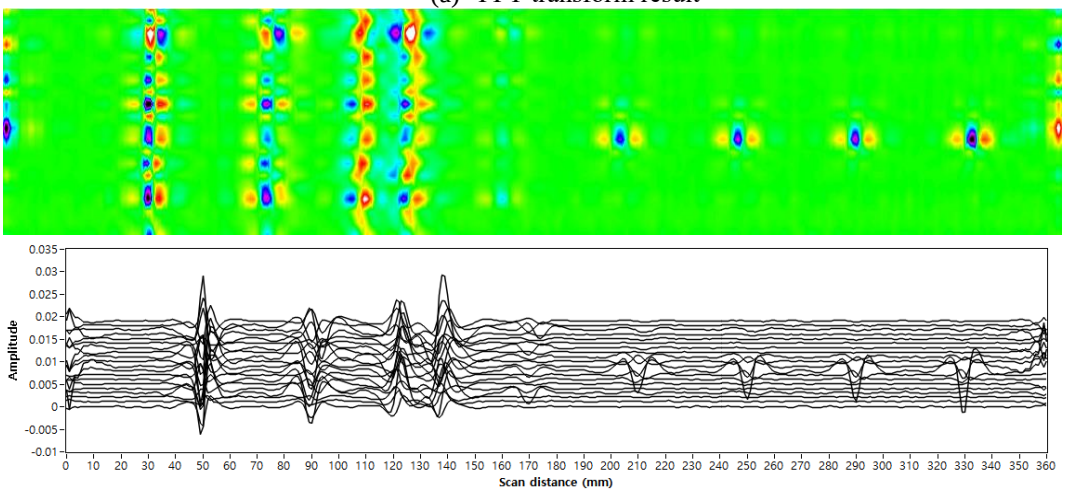
Fig. 2-12 Principles of FFT and Gabor transform data processing

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) FFT transform result



(b) Gabor transform result

Fig. 2-13 Comparison of FFT and Gabor transform data processing results

이상의 대표적인 네가지 데이터 표현기법과 각 표현기법 결과의 차분해석과 절대 차분해석으로 총 11가지의 표현법을 설명하였다. 차분해석(ΔV), 경향제거해석(V_{Drtd}), 고속 푸리에 변환(V_{FFT}), 가버 변환(V_{Gabor})은 어느 특정 기법에 우위가 있는 것이 아니라, 경우에 따라 결함 지시의 명확성이 상이할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 데이터를 표현할 때, 이상의 네 가지 기법을 주로하여 총 11가지 표현법을 활용한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 결함검출 알고리즘

Fig.2-14와 Fig.2-15는 결함검출 알고리즘과 적용 예를 나타낸다. 홀센서의경우 절대차분해석데이터를 적용한다. 코일센서의경우 X, Y값이 양 또는 음의 값을 가지므로 음의 값을 가지는 경우 절대값을 적용한다. Fig.2-15 (a)는 홀센서에서 절대차분해석한 결과이다. 스캔방향으로 절대차분해석결과 신호는 바이어스 오차와 감도 오차가 제거되고 명확성을 확보할 수 있다. 또한 절대값을 취함으로서 결함의 길이나 깊이에 따라 절대값 총합이 선형적으로 증가하므로 정량평가시 활용도가 높다. (b)는 절대차분해석결과를 스캔방향으로 종축에 대한 절대값을 계산한 결과를 도시한다. 각 결함의 양선단에서 반응하므로 하나의 결함은 두개의 피크를 갖는다. 또한 잡음신호가 포함되어 있다. 그러므로 (b)의 결과에 대하여 대역통과필터(BPS, Band pass filter)를 적용하여 잡음신호 제거와 신호를 유연하게 만든다. 그 후 임계값을 지정하여 피크검출을 적용한다.

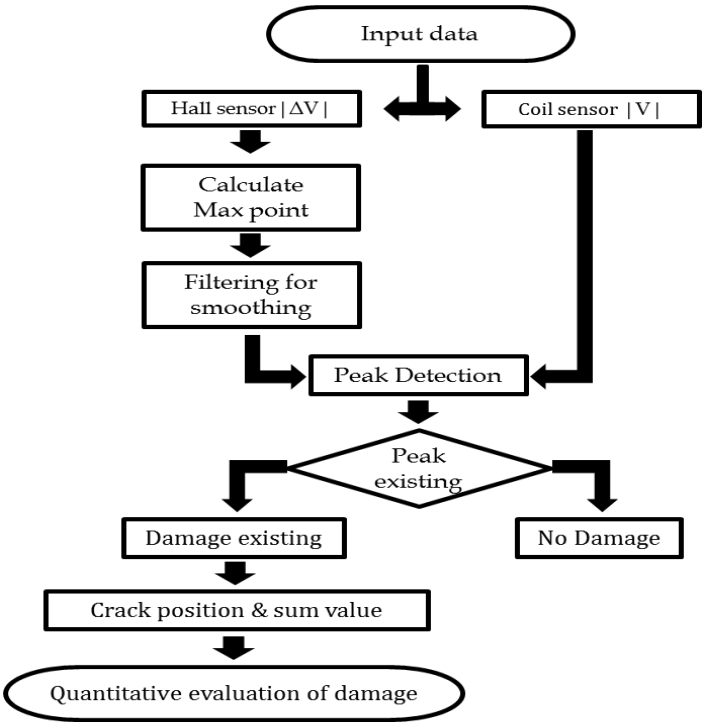
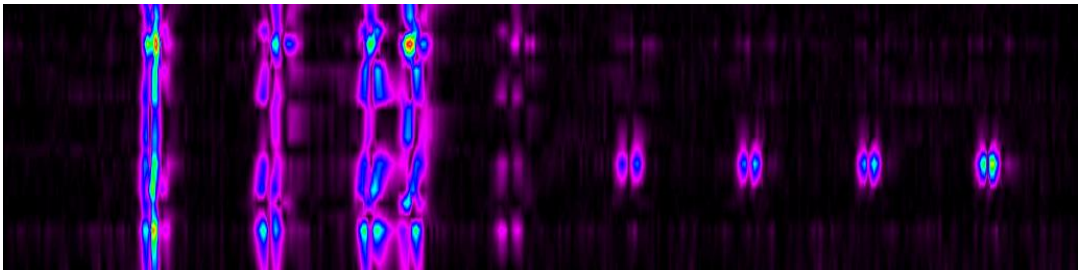


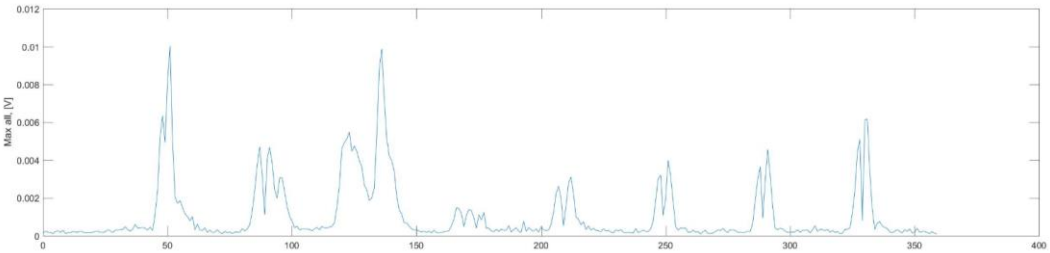
Fig. 2-14 Defect detection algorithm

Collection @ chosun

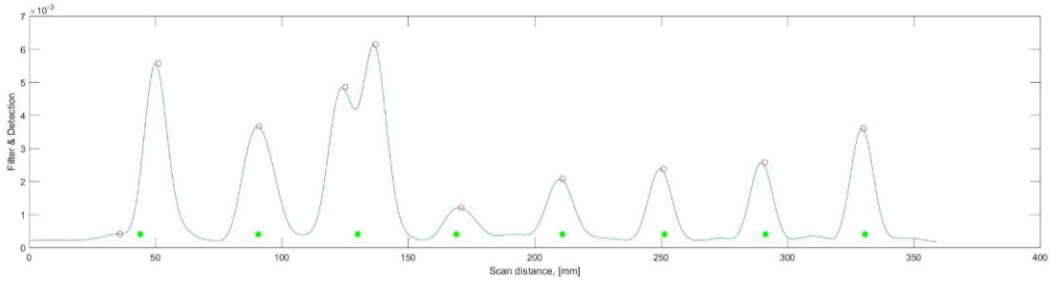
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) |ΔV|, 3D surface



(b) |ΔV|, Max



(c) |ΔV|, Filtered Max

Fig. 2-15 Example Defect detection algorithm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 실험 및 고찰

제 1 절 시험편

Fig.3-1에서 Fig.3-4는 환형배열 홀센서를 이용한 고압급수가열기 전열관의 비파괴검사 및 평가를 위하여 도입한 스테인레스강(STS304) 재질의 시험편이다. 각 결함은 고압급수가열기에서 실제 직면할 수 있는 편저공(FBH, flat bottom hole), 경사마모(TW, tapered wear), 편마모(FW, flat wear) 및 균열(slit)을 모사하였다. 또한, 각 시험편에 도입한 결함의 종류 및 크기는 Table 3-1에서 Table 3-4에 나타냈다.

Fig.3-1과 Table 3-1은 편저공과 환형 결함을 도입한 시험편이다. 시험편의 외경과 내경은 각각 15.87mm, 0.254mm 이며, 두께는 1.27mm이다. #G_1과 #G_2는 내부(ID)와 외부(OD)에 도입한 환형 결함이다. 각 결함의 깊이는 두께 대비 10%와 20%이다. #H_1, #H_2, #H_3, #H_4, #H5는 깊이 20, 40, 60, 80, 100%인 편저공이다. 여기에서 #H_1은 4개의 편저공이 환형으로 90° 간격으로 배열되었으며, 나머지 편저공은 각각 1개씩이다. #G_2와 #H_1의 사이에는 탄소강 재질의 튜브지지판(TSP, tube support plate)이 위치한다.

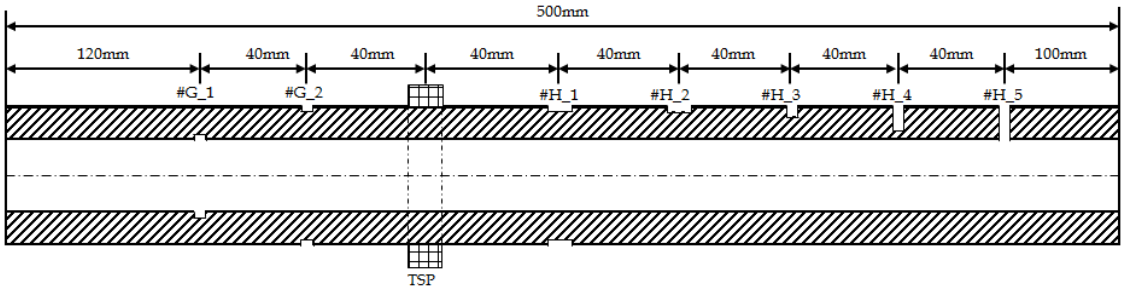


Fig. 3-1 Flat bottom hole (FBH) specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3-1 Sizes of flat bottom hole (FBH)

Location	#G_1	#G_2	TSP	#H_1	#H_2	#H_3	#H_4	#H_5
Flaw Depth	0.127	0.254		0.254	0.508	0.762	1.016	Hole
Flaw % of Wall	10%	20%	N/A	20%	40%	60%	80%	100%
Flaw Width/Dia	1.588	3.175	15.875 /40.00	4.763	4.763	2.778	1.984	1.321
Flaw Type	ID Groove	OD Groove	TSP	FBH	FBH	FBH	FBH	TWH

Fig.3-2와 Table 3-2는 경사형 마모(TW)를 도입한 시험편이다. 시험편의 외경과 내경은 각각 15.87mm, 13.33mm이며, 두께는 1.27mm이다. 각 결함의 한쪽은 두께 대비 60, 40 및 20% 깊이의 직각으로 파여져 있으며, 다른 한쪽은 9.53, 6.32, 3.18mm의 길이를 가지도록 경사형으로 가공하였다. 한편, 폭은 180°이다.

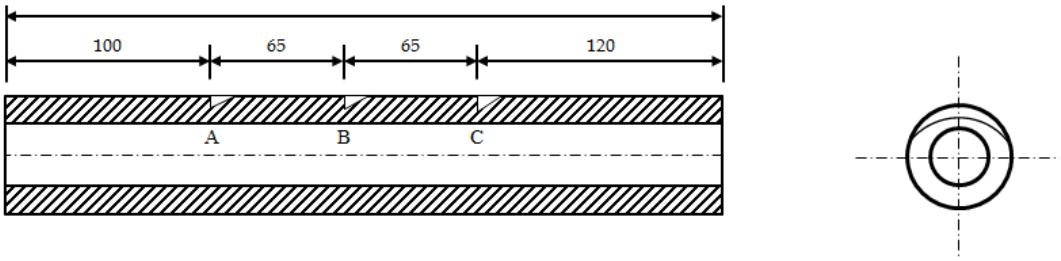


Fig. 3-2 Tapered wear (TW) specimen

Table 3-2 Sizes of Tapered wear (TW)

Location	A	B	C
Flaw Depth	0.254	0.508	0.762
Flaw % of Wall	20%	40%	60%
Flaw Width/Dia	3.18	6.32	9.53
Flaw Type	180º Tapered Wear	180º Tapered Wear	180º Tapered Wear

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig.3-3과 Table 3-3은 편마모(FW)를 도입한 시험편이다. 시험편의 외경과 내경은 각각 15.87mm, 13.33mm이며, 두께는 1.27mm이다. 각 결함은 두께 대비 60, 40 및 20% 깊이의 직각으로 파여져 있다. 한편, 폭은 180°로서, 중앙이 제일 깊으며, 양 선단에서는 얕은 형태로 가공하였다.

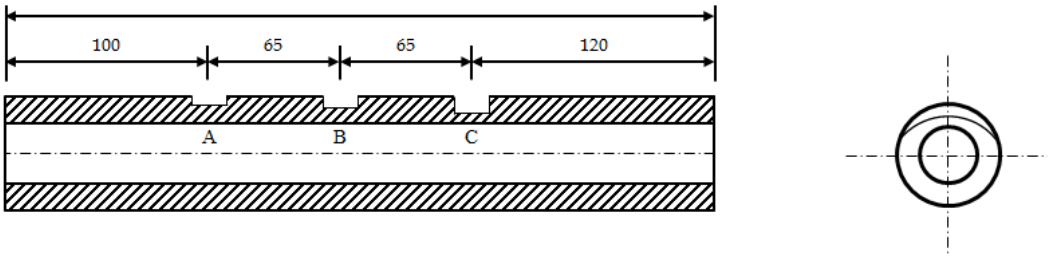


Fig. 3-3 Flat wear (FW) specimen

Table 3-3 Sizes of Flat wear (FW)

Location	A	B	C
Flaw Depth	0.254	0.508	0.762
Flaw % of Wall	20%	40%	60%
Flaw Width/Dia	15.875	15.875	15.875
Flaw Type	180º Flat Wear	180º Flat Wear	180º Flat Wear

Fig.3-4와 Table 3-4는 Slit을 도입한 시험편이다. 시험편의 외경과 내경은 각각 15.87mm, 13.33mm이며, 두께는 1.27mm이다. 좌측 4개의 결함은 환형 방향의 슬릿이며, 길이가 2, 5, 7, 9mm이다. 우측 4개의 결함은 축방향의 슬릿이며, 길이가 2, 5, 7, 9mm이다. 전체 결함의 깊이는 두께 대비 40%이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

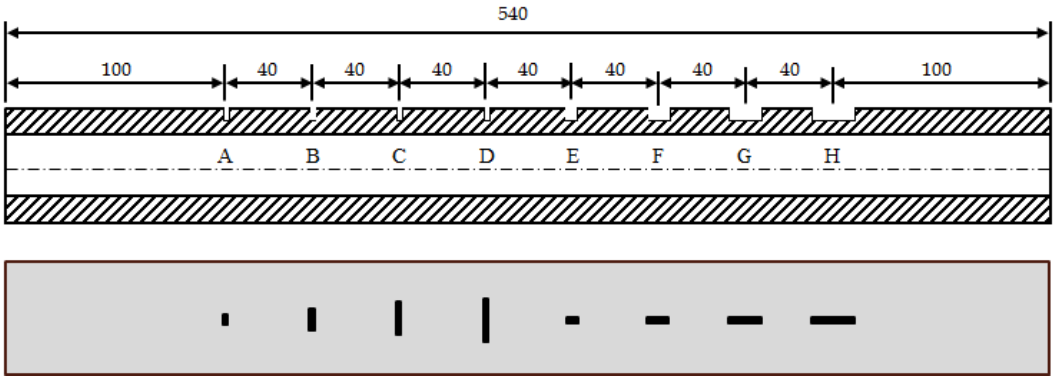


Fig. 3 -4 Slit specimen

Table 3-4 Sizes of Slit

Location	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**
Flaw Type	OD CIRC	OD CIRC.	OD CIRC.	OD CIRC	OD AXIAL	OD AXIAL	OD AXIAL	OD AXIAL
Depth IN % of Wall	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
Physically Meas. Depth	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508
Flaw Width/Dia	2mm	5mm	7mm	9mm	2mm	5mm	7mm	9mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 센서 및 자원

Fig. 3-5는 코일을 자원으로 하는 환형배열 홀센서의 센서부를 나타낸다. 비자성체인 플라스틱(ABS수지) 재질의 기구물 외측에 플렉시블 PCB를 점착하고, 총 21개의 홀센서를 배열하였다. 센서의 외경은 11.8mm이며, 이러한 구조에서는 센서의 공간분해능은 1.5mm, 17.1°를 얻을 수 있다. 또한, 센서와 시험편 내벽면까지의 거리, 즉 리프트오프는 1.4mm이다. 각 센서는 2V로서 정전압 구동하였다.

한편, 시험편에 유도전류를 인가하기 위한 여자코일의 사양을 Table 3-6에 나타낸다. 0.1mm 직경의 동선을 80회 감았으며, 코일의 폭은 4mm이다. 여자코일에는 10~90kHz, 100~300mA의 교류전류를 인가하였다. 여자코일에 의하여 유도된 전류는 결함 근방에서 시변자계의 분포를 왜곡시킨다. 이러한 시변자계의 세기를 측정하기 위한 홀센서배열은 여자코일의 중심과 동심상에 배치된다. 이때, 여자코일과 홀센서배열을 시험편 내벽과 일정한 lift-off를 유지하기 위하여 양단에 유연 구조의 지지부를 배치하였다.

Fig. 3-5 Sensor

Table 3-5 Specification of sensor

contents	specification
number of sensor	21 channel
spatial resolution	1.5mm (17.1°)
external diameter of sensor array	11.8mm
lift-off	1.4mm

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3-6 Specification of coil

contents	specification
Wire diameter and turns	0.1t, 80turns
Bobbin type coil outer diameter	12mm
Coil width & Number of layers	4mm, 2layers
Coil input current	100mA - 300mA
Coil input frequency	10kHz - 90kHz (10kHz interval)

Fig. 3-6은 신호처리 블록다이어그램이다. 컴퓨터와 연결된 다기능 I/O 디바이스에 의하여 직류안정화전원과 교류안정화전원을 제어한다. 직류안정화전원은 홀센서 및 신호처리보드의 구동에 활용한다. 또한, 교류안정화전원은 여자코일의 구동에 활용되었다. 각각의 홀센서에 의하여 취득한 신호는 Table 3-7에 나타낸 바와 같이 300Hz의 고대역 통과필터(HPF, high pass filter)를 통하여 바이어스 신호를 제거한 후, 교류증폭기에서 60dB로 증폭하였다. 이후에는 RMS 회로에 의하여 교류신호의 진폭을 직류신호로 변환한다. 한편, 코일에 인가되는 교류전류는 별도로 구비되는 복조회로(demodulator)를 통하여, 원신호와 90°의 위상차를 가지는 신호로 분할 출력하였다. 각각의 직류신호는 다기능 I/O 디바이스의 데이터수집기능을 활용하여 디지털 신호로 변환한 후 컴퓨터에 전송한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

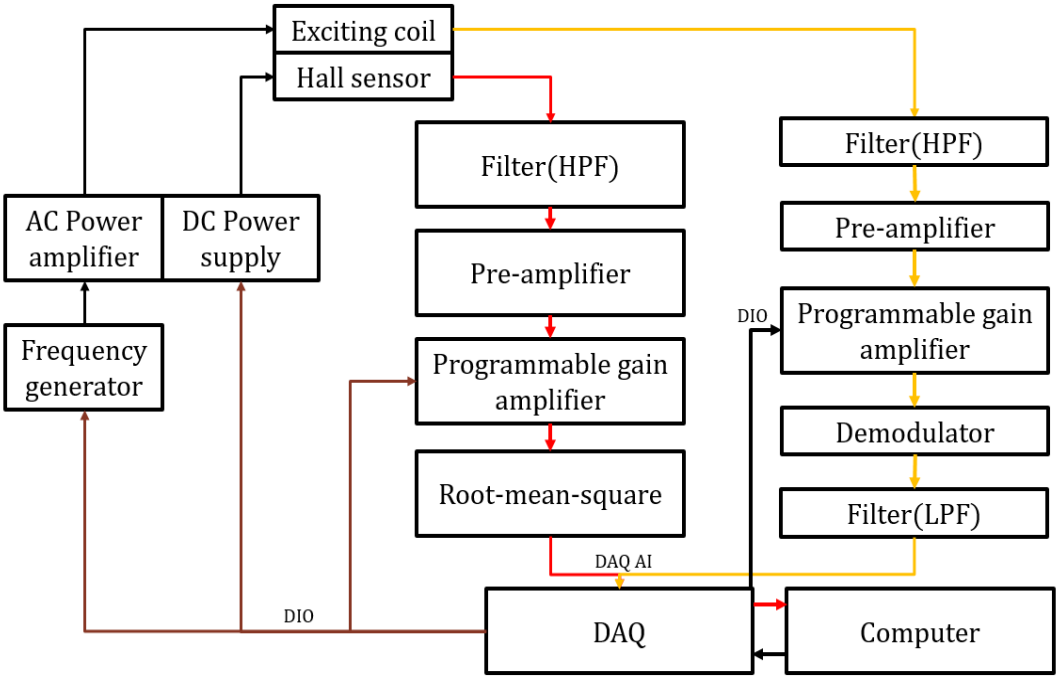


Fig. 3 -6 Block diagram

Table 3-7 Specification of signal processing

contents	specification	
	Hall sensor	**coil sensor**
Cut off frequency	HPF - 300Hz	
Amplifier gain	60dB,	20dB
Process circuit	True RMS-to-DC,	Demodulator/ Phasor

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

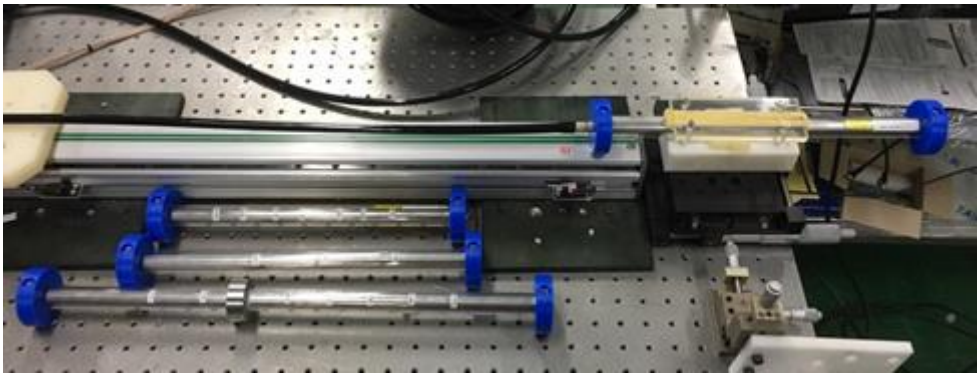


Fig. 3-7 Experimental set-up

Table 3-8 Specification of scanner

contents	specification
Scan speed	60mm/s
Scan resolution	1mm
Resolution method	Time base

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 실험결과

1. 시변자계 분포

Fig.3-8과 Fig.3-9는 여자코일에 10kHz, 200mA의 전류를 인가하여 편저공 시험편(Fig.3-1)에 삽입하였을 때, 환형배열 홀센서에 의하여 취득한 자계분포를 해석방법에 따라 비교한 결과이다. 종축은 센서의 배열 즉, 각도를 나타내며, 횡축은 축방향 거리를 나타낸다. 좌측부터 10% ID, 20% OD, TSP, 20% 4-FBH, 40% FBH, 60% FBH, 80% FBH, 100% FBH이 위치한다. 전체적으로, 차분해석(ΔV), 푸리에해석(V_{FFT}), 가버해석(V_{Gabor}), 경향제거해석(V_{Dtrd}), 절대차분해석(|ΔV|), 절대푸리에해석($|V_{FFT}|$), 절대가버해석($|V_{Gabor}|$), 절대경향제거해석($|V_{Dtrd}|$), 절대차분푸리에해석($|\Delta V_{FFT}|$), 절대차분가버해석($|\Delta V_{Gabor}|$), 절대차분경향제거해석($|\Delta V_{Dtrd}|$)의 총 11개의 해석법으로 표현한 결과를 상호 비교하였다.

Fig. 3-8은 등고선 형태로 표현한 결과이다. 최고치와 최저치를 각각 흰색과 검정색으로 표현하고, 높은 값으로부터 낮은 값 순으로 무지개색으로 표현하였다. 이러한 구조에서는 붉은 색 계열은 높은 자계분포 강도, 보라색 계열은 낮은 자계분포 강도를 나타낸다. 차분해석(ΔV)은 자계분포의 왜곡이 급격히 변화하는 곳, 예를 들어 결함의 양 선단에서 큰 변화를 지시한다. 푸리에해석(V_{FFT})은 가버해석(V_{Gabor})과 마찬가지로 자계분포 자체의 크기를 정량적으로 지시할 수 있다. 그러나, 일부 잡음 신호가 완전히 제거되지 못한다. 그럼에도 불구하고, 가버해석이 푸리에해석에 비하여 결함 판별이 용이함을 알 수 있다. 한편, 경향제거해석(V_{Dtrd})은 가버해석 및 푸리에해석에 비하여 보다 명확하게 결함의 유무 및 형태를 지시할 수 있다. 특히, 좌측으로부터 4번째 결함은 4개의 편저공(FBH)가 90° 간격으로 배치되어 있다. 이를 명확하게 지시할 수 있음은 결함 검출뿐 아니라 형상 추정도 명확하게 할 수 있음을 시사한다. 따라서, 본 논문에서는 등고선으로 표현된 자계분포에서는 특히, 차분해석(ΔV)과 경향제거해석(V_{Dtrd})에 주목한다.

Fig. 3-9는 상술한 Fig.3-8의 결과를 워터폴 형태로 표현한 결과이다. 센서 개수

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

만큼의 선형 그래프를 배열하여 표현한다. 상기 등고선 표현이 색상으로 표현하는 반면에, 워터폴 표현은 정량적인 크기로 표현할 수 있다. 따라서, 상기 Fig.3-8의 등고선 표현과 동시에 비교하면 결함 유무와 크기의 가독성을 향상시킬 수 있다. 전술한 바와 같이 차분해석(ΔV)은 자계분포의 왜곡이 급격히 변화하는 곳, 예를 들어 결함의 양 선단에서 큰 변화를 지시한다. 푸리에해석(V_{FFT})은 가버해석(V_{Gabor})과 마찬가지로 자계분포 자체의 크기를 정량적으로 지시할 수 있다. 한편, 경향제거해석(V_{Dtrd})은 가버해석 및 푸리에해석에 비하여 보다 명확하게 결함의 유무 및 형태를 지시할 수 있다. 좌측으로부터 4번째 결함, 즉 4개의 편저공(FBH)을 명확하게 지시할 수 있다.

한편, 워터폴 표현의 경우, 음의 값은 인근의 양의 값과 중첩되어 가독성이 저하될 수 있다. 따라서, 절대표현이 보다 정확한 결함 정보를 지시할 수 있다. 본 연구에서는 절대값 표현중에서 특히, 절대차분해석($|\Delta V|$)과 절대경향제거해석($|V_{Dtrd}|$)에 주목하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

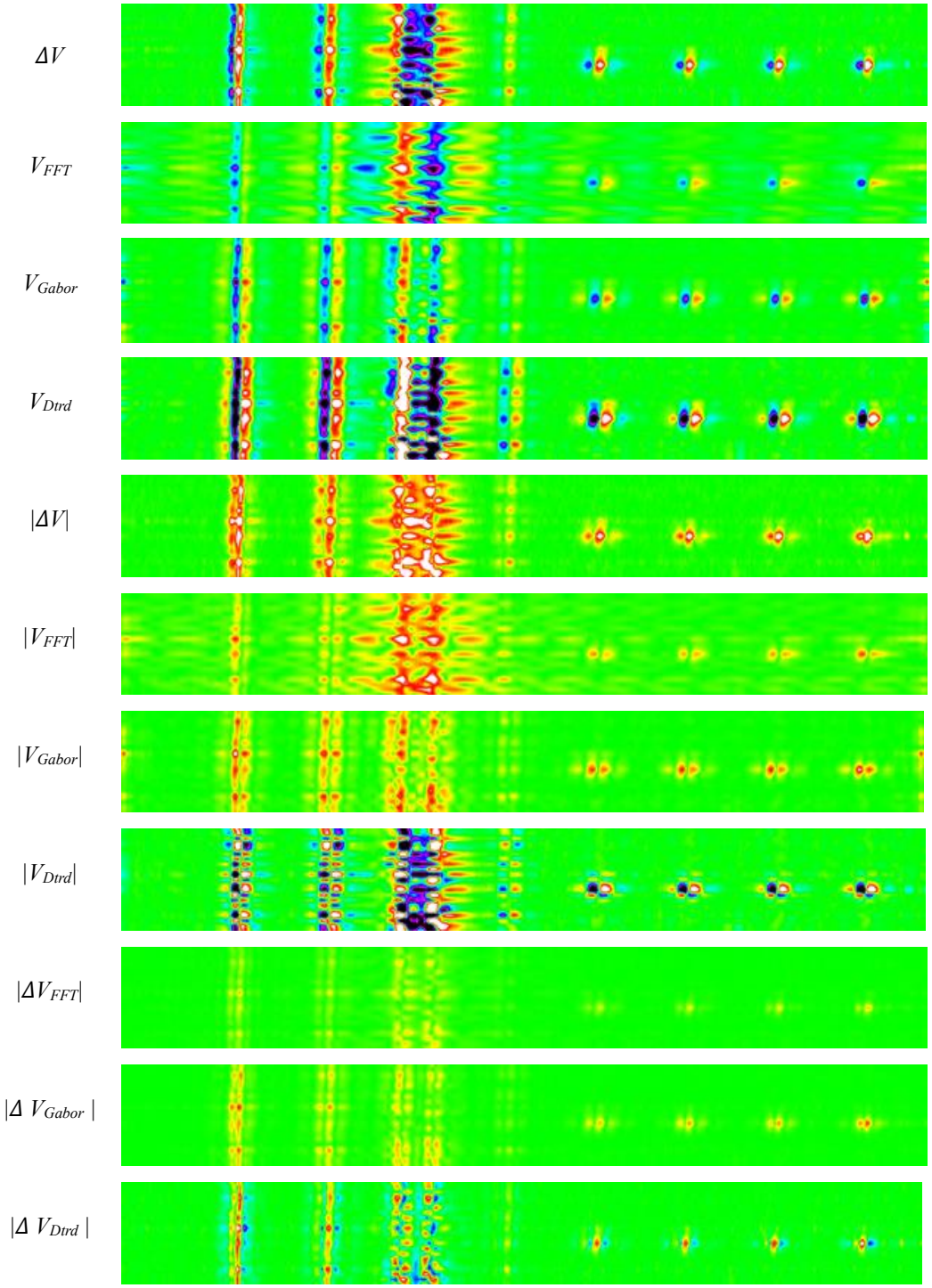


Fig. 3-8 Contour-type magnetic images (FBH, 10kHz, 200mA)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

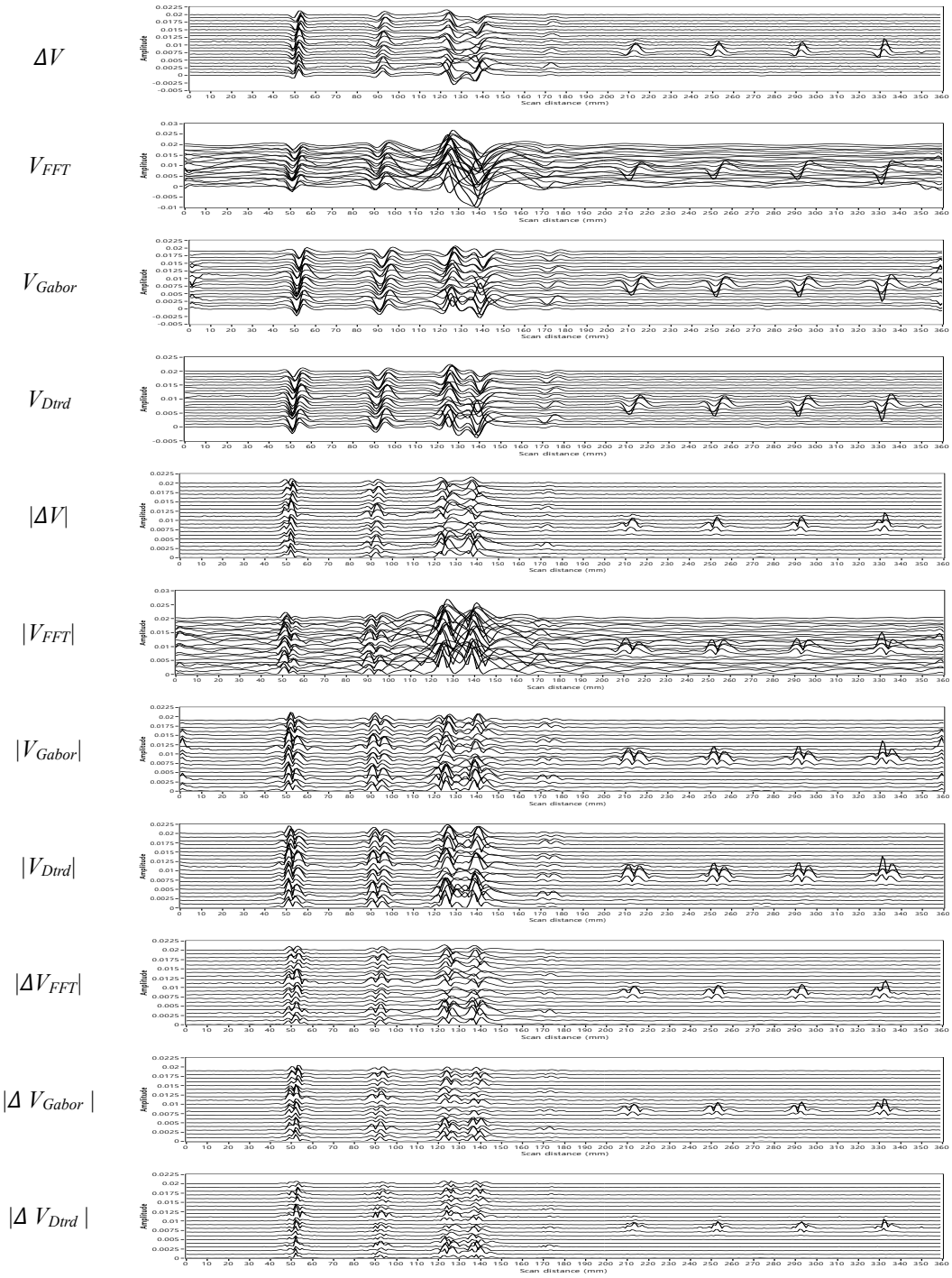


Fig. 3-9 Waterfall-type magnetic images (FBH, 10kHz, 200mA)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 주파수 특성

가. 코일센서

Fig.3-10은 여자코일에 100mA, 10~90kHz의 교류전류를 입력하고, 편저공(Fig.3-1) 시험편을 스캔하면서 측정한 여자코일의 신호변화를 나타낸다. 좌측과 우측은 각각 다음 식으로 표현되는 90° 위상의 적분값이다. 한편, Fig.3-11에 나타낸 리사주선도는 X값과 Y값을 좌표상에 연속적으로 지시한 것으로서, 결함의 존재여부 및 위치, 크기를 정성적으로 나타낼 수 있다.

$$X = Rcos(\omega t + \Phi) \tag{21}$$

$$Y = Rsin(\omega t + \Phi) \tag{22}$$

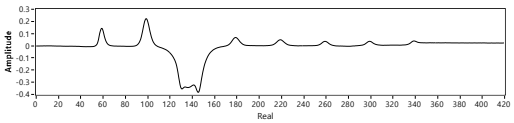
Fig.3-10에서 X값의 분포를 보면 좌측의 첫 번째 및 두 번째 피크값은 ID groove(#G_1)와 OD groove(#G_2)를 지시한다. 그리고, 세 번째 (-) 피크값은 TSP를 지시한다. 주파수가 높아짐에 따라 ID 피크값이 OD 피크값보다 상대적으로 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 이는 표피효과에 의하여 주파수가 높을수록 표면에 유도되는 전류밀도가 높아지고, 결과적으로 센서에서 가까운 ID 결함에서 왜곡되는 전류밀도의 상대적인 크기가 증가하기 때문이다. 이면결함인 편저공의 신호도 주파수가 커짐에 따라 점점 작아지고, 결과적으로 결함 검출능이 저하된다.

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{23}$$

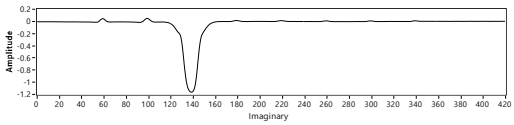
$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) - \omega t \tag{24}$$

Collection @ chosun

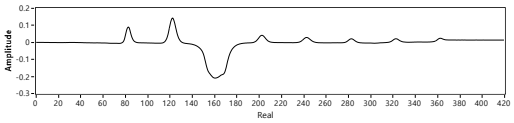
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



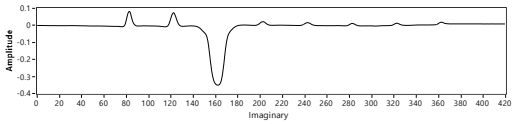
(a) 10kHz X



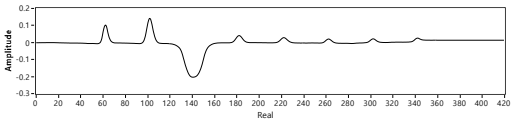
(b) 10kHz Y



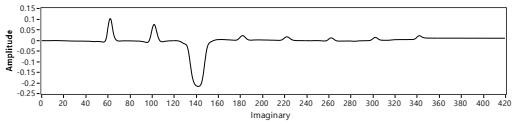
(c) 20kHz X



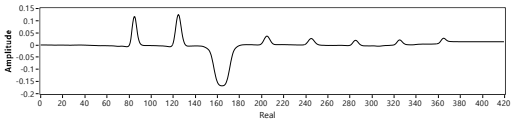
(d) 20kHz Y



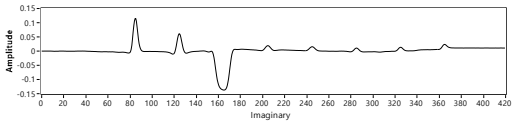
(e) 30kHz X



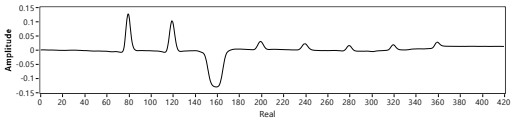
(f) 30kHz Y



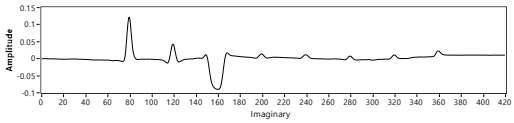
(g) 40kHz X



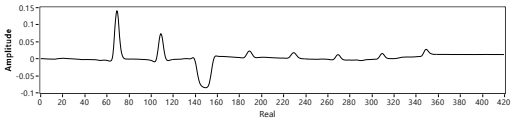
(h) 40kHz Y



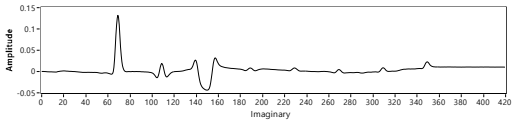
(i) 50kHz X



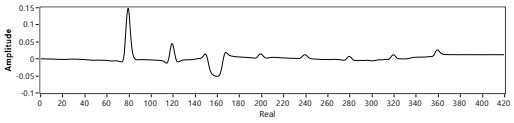
(j) 50kHz Y



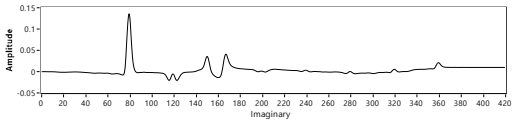
(k) 60kHz X



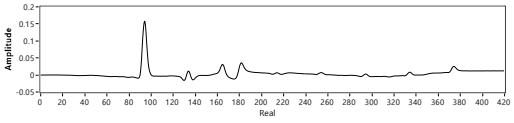
(l) 60kHz Y



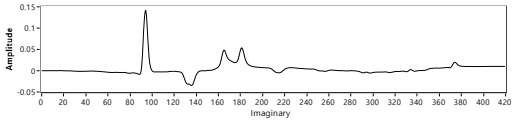
(m) 70kHz X



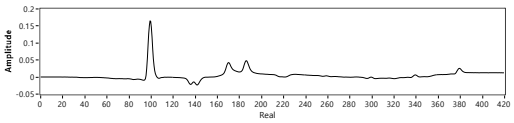
(n) 70kHz Y



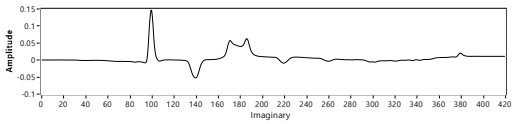
(o) 80kHz X



(p) 80kHz Y



(q) 90kHz X

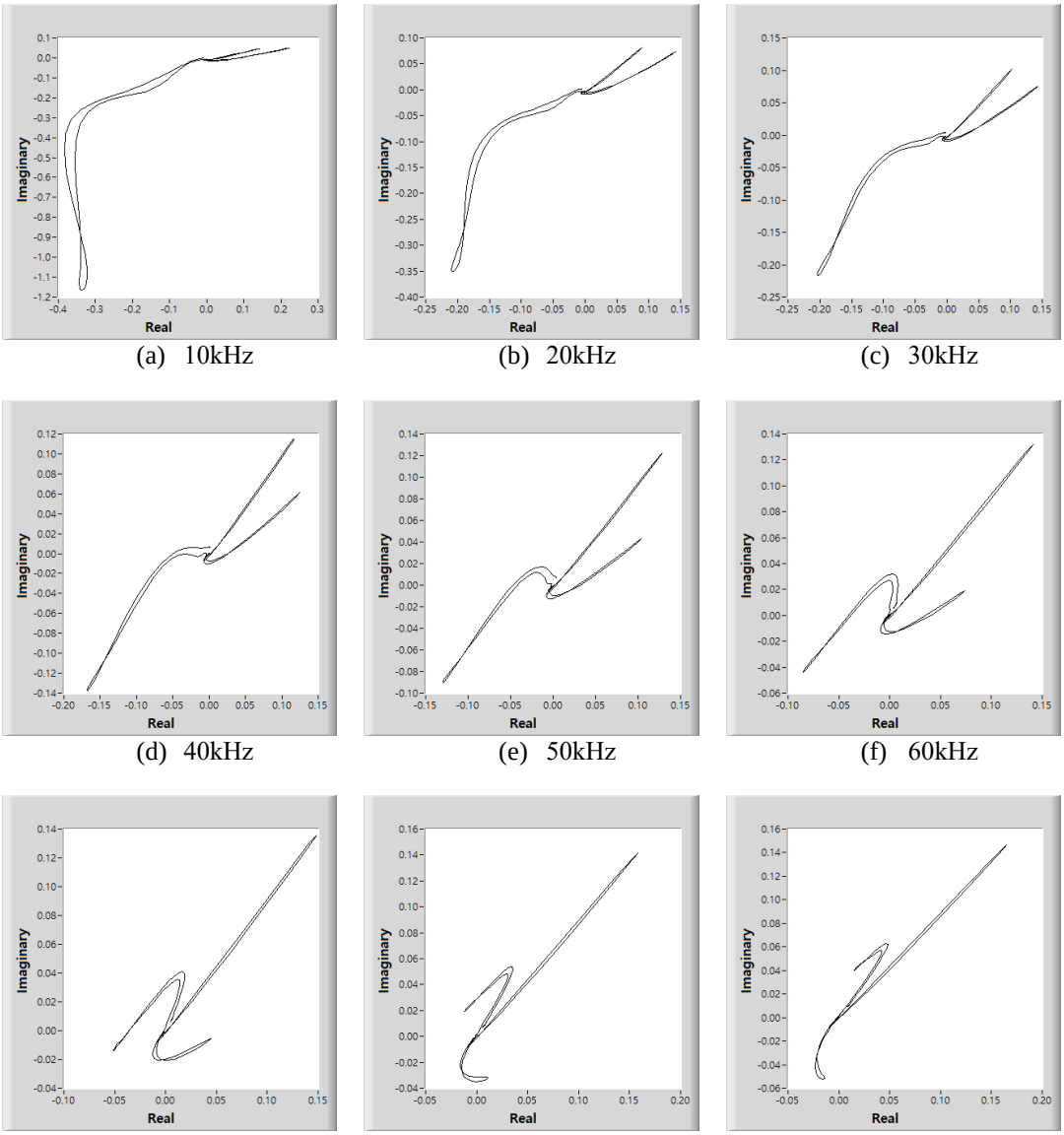


(r) 90kHz Y

Fig. 3-10 X and Y data by exciting coil

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 10kHz (b) 20kHz (c) 30kHz

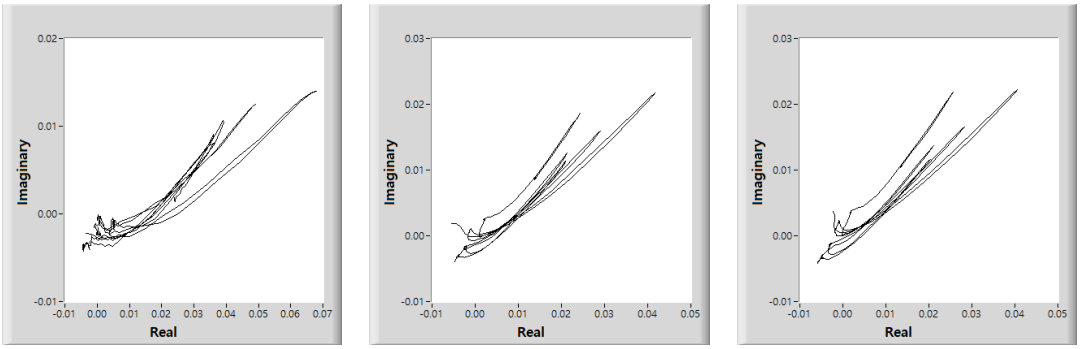
(d) 40kHz (e) 50kHz (f) 60kHz

(g) 70kHz (h) 80kHz (i) 90kHz

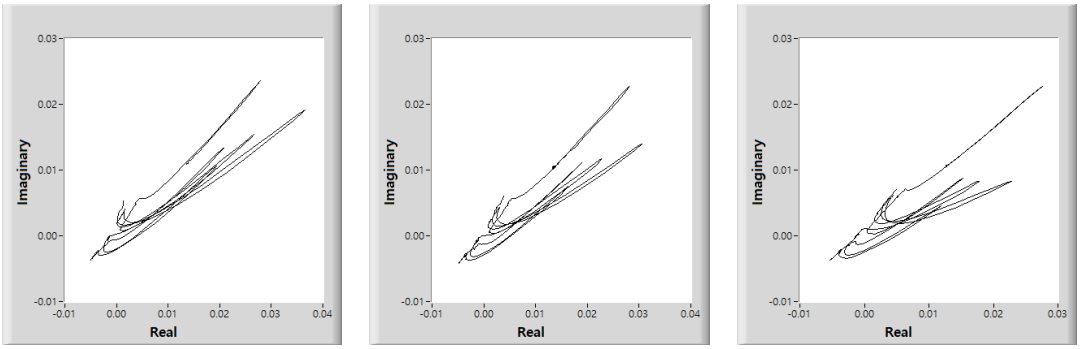
Fig. 3-11 Lissajous diagram in the ID/OD groove and TSP with 100mA exciting current

Collection @ chosun

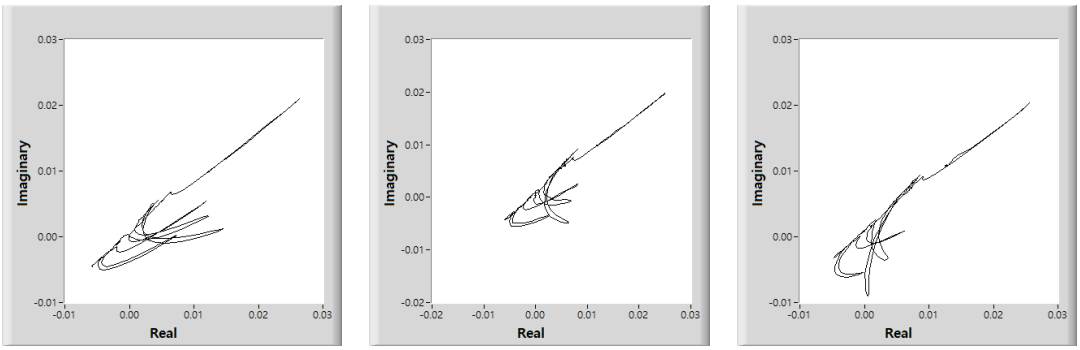
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 10kHz (b) 20kHz (c) 30kHz



(d) 40kHz (e) 50kHz (f) 60kHz

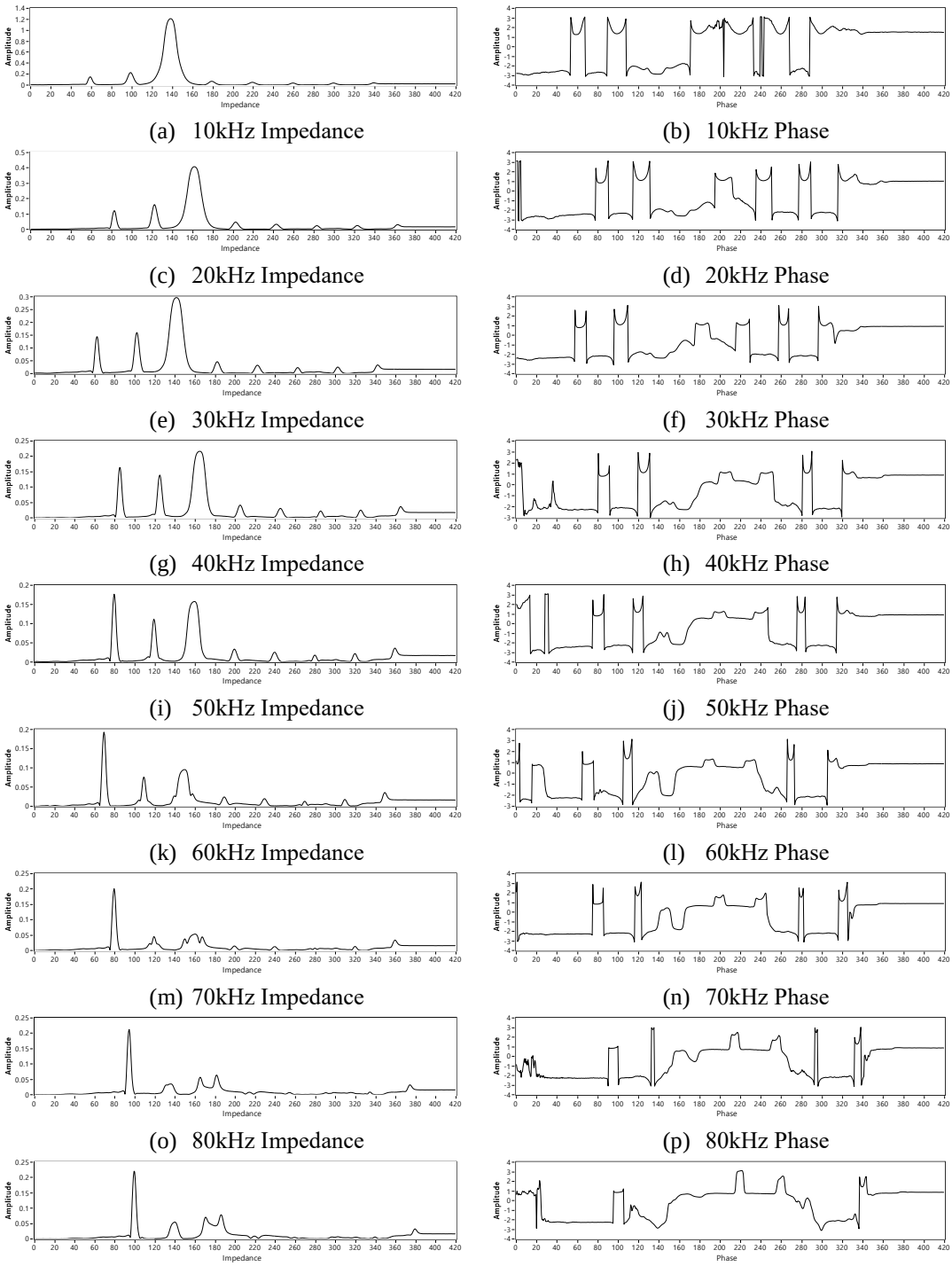


(g) 70kHz (h) 80kHz (i) 90kHz

Fig. 3 -12 Lissajous diagram in the FBH with 100mA exciting current

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 10kHz Impedance (b) 10kHz Phase

(c) 20kHz Impedance (d) 20kHz Phase

(e) 30kHz Impedance (f) 30kHz Phase

(g) 40kHz Impedance (h) 40kHz Phase

(i) 50kHz Impedance (j) 50kHz Phase

(k) 60kHz Impedance (l) 60kHz Phase

(m) 70kHz Impedance (n) 70kHz Phase

(o) 80kHz Impedance (p) 80kHz Phase

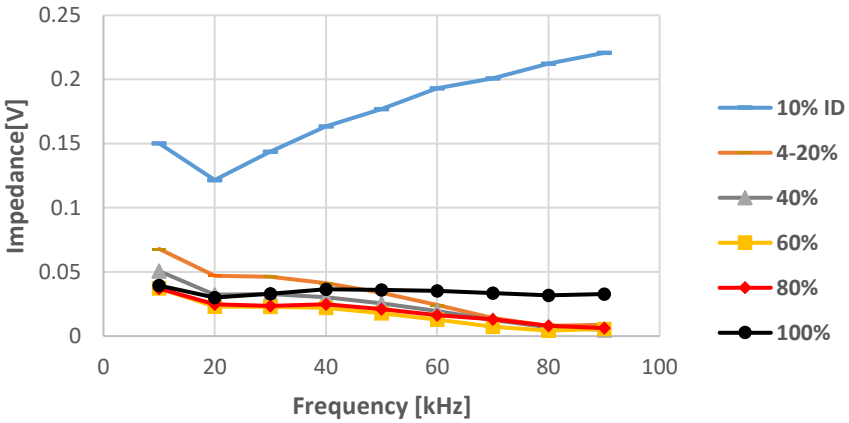
(q) 90kHz Impedance (r) 90kHz Phase

Fig. 3 -13 Impedance and phase corresponding to frequency

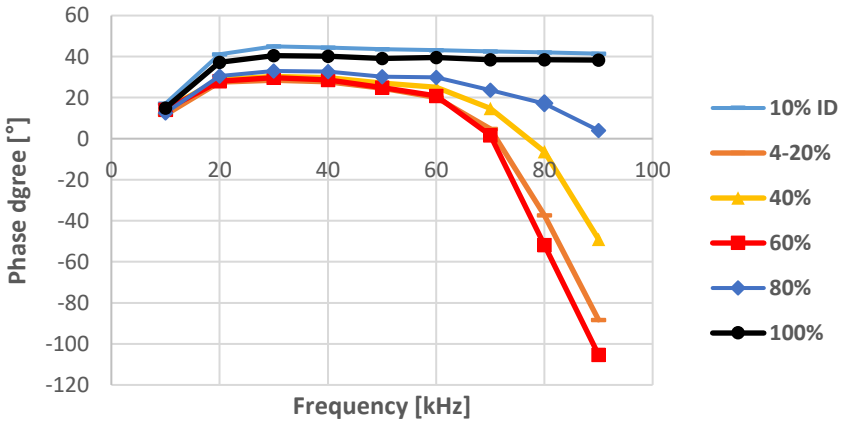
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig.3-14는 주파수별 FBH의 결함에 대한 임피던스와 위상차를 도시한 것이다. 전체적으로 주파수가 상승할수록 각 결함 사이에 위상차가 커지는 것을 확인하였다. 모든 주파수 대역에서 10% ID의 경우가 가장 큰 위상차값을 가지고 있으며 60% 편저공의 경우 변화폭이 가장 크다. 임피던스 그래프에서 각각의 편저공과 10%-ID 결함사이에 차이가 있다. 100% 편저공의 경우 주파수 변화에 따라 완만한 값을 가진다. 4-20% 편저공의 경우 주파수가 상승함에 따라 가장 큰 변화폭을 보였다.



(a) Impednce



(b) Phase

Fig. 3-14 Impedance and phase relationship by frequency

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 환형배열 홀센서

Fig.3-15는 여자코일에 10~90kHz의 교류전류 100mA를 입력하고, 편저공 시험편에 삽입하여 측정한 자계분포 ΔV의 등고선 표현 결과이다. 저주파수에서 희미하였던 자계분포가 20~40kHz의 주파수가 인가되면 점차 명확해진다. 하지만, 결함이 없는 영역, 즉 배경의 자계분포도 점차 높은 값을 나타내고, 결과적으로 오히려 결함 판별력이 저하될 수 있다. 또한, 50kHz 이상의 주파수가 인가되면 결함 주변에서 자계분포의 번짐 현상이 나타난다. 따라서, 자계분포 ΔV의 등고선 표현에서 결함 검출을 용이하게 하기 위해서는 20~30kHz의 주파수가 적합하다.

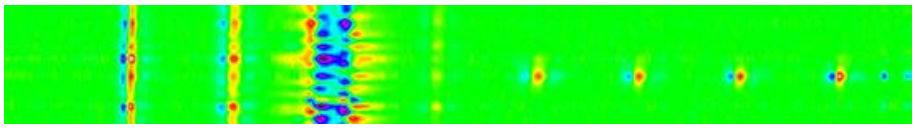
Fig.3-16은 여자코일에 10~90kHz의 교류전류 100mA를 입력하고, FBH 시험편에 삽입하여 측정한 자계분포 V_{Dtrd}의 등고선 표현 결과이다. ΔV등고선 표현에서와 마찬가지로 저주파수에서 희미하였던 자계분포가 20~40kHz의 주파수가 인가되면 점차 명확해진다. 하지만, 결함이 없는 영역, 즉 배경의 자계분포도 점차 높은 값을 나타내고, 결과적으로 오히려 결함 판별력이 저하될 수 있다. 또한, 40kHz 이상의 주파수가 인가되면 결함 주변에서 자계분포의 번짐 현상이 나타난다. 따라서, 자계분포 V_{Dtrd} 의 등고선 표현에서 결함 검출을 용이하게 하기 위해서는 10~30kHz의 주파수가 적합하다.

Fig.3-17은 동일한 조건의 주파수(10~90kHz)의 교류전류(100mA)를 여자코일에 입력하고, FBH 시험편에 삽입하여 측정한 자계분포 |ΔV|의 워터폴 표현 결과이다. 상술한 등고선 표현에서와 마찬가지로 저주파수에서 희미하였던 자계분포가 20~30kHz의 주파수가 인가되면 점차 명확해진다. 또한, 40kHz 이상의 주파수가 인가되면 결함 신호가 오히려 감소할 수 있다. 따라서, 자계분포 |ΔV|의 등고선 표현에서도 20~30kHz의 주파수가 결함 검출에 적합하다.

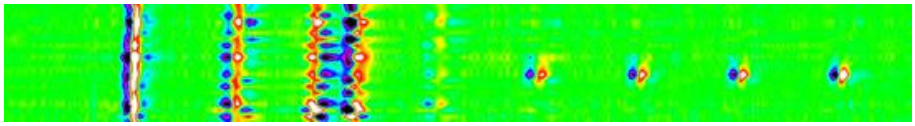
Fig.3-18은 자계분포 $|V_{Dtrd}|$의 워터폴 표현 결과이다. 상술한 여러 가지 표현법에서와 마찬가지로 20~30kHz의 주파수에서 결함 정보를 명확히 인식할 수 있다.

Collection @ chosun

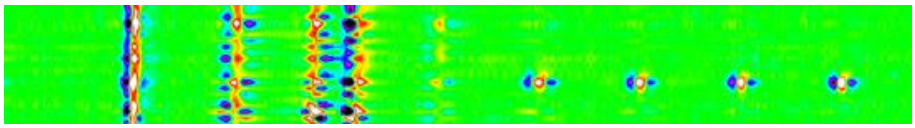
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



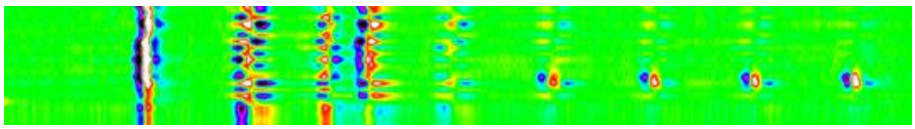
(a) 10kHz



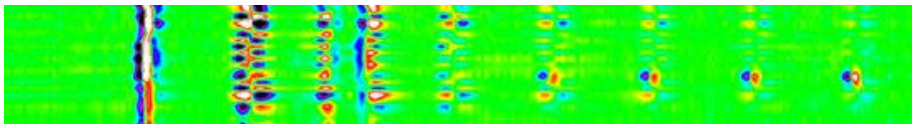
(b) 20kHz



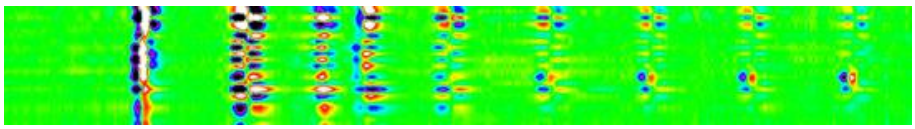
(c) 30kHz



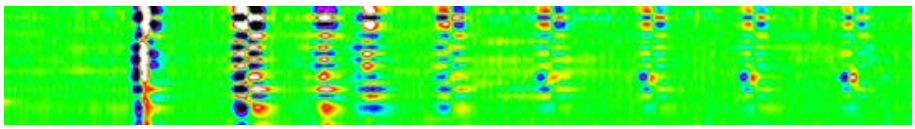
(d) 40kHz



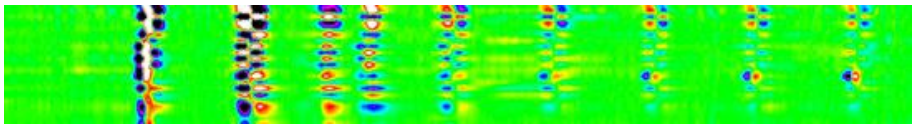
(e) 50kHz



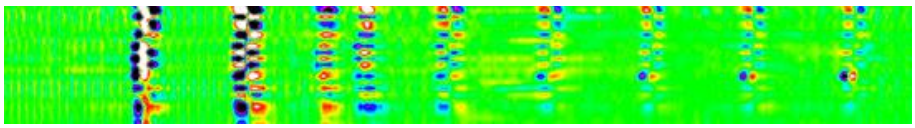
(f) 60kHz



(g) 70kHz



(h) 80kHz

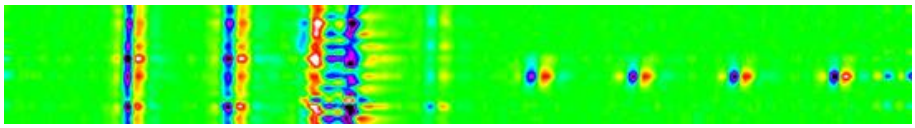


(i) 90kHz

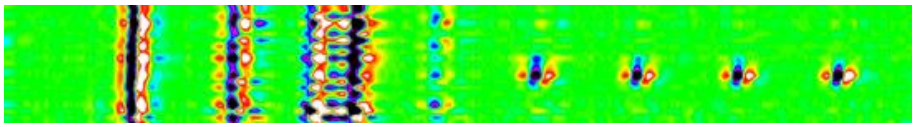
Fig. 3 -15 Distribution of magnetic field (FBH, 100mA, ΔV)

Collection @ chosun

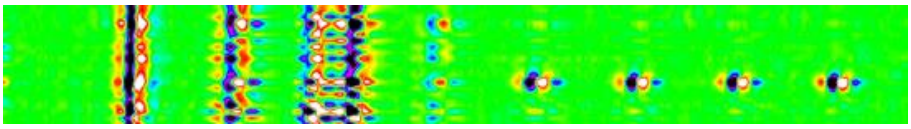
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



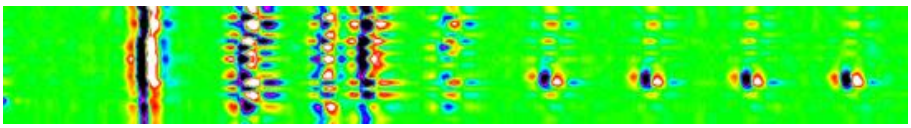
(a) 10kHz



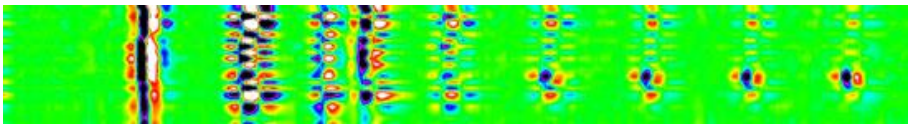
(b) 20kHz



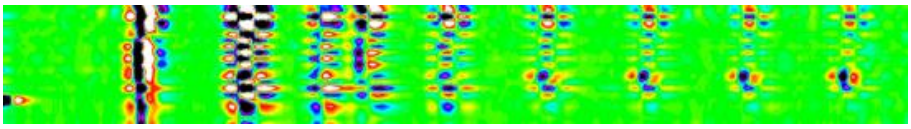
(c) 30kHz



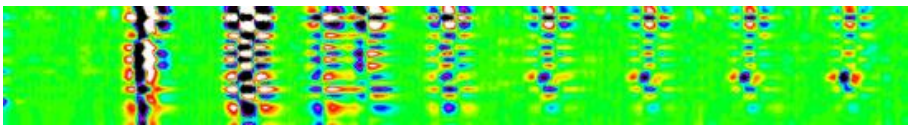
(d) 40kHz



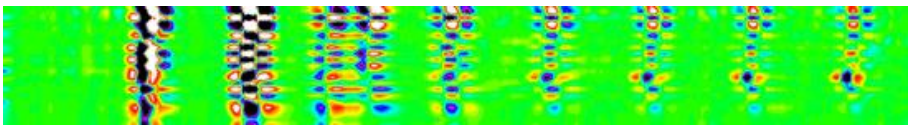
(e) 50kHz



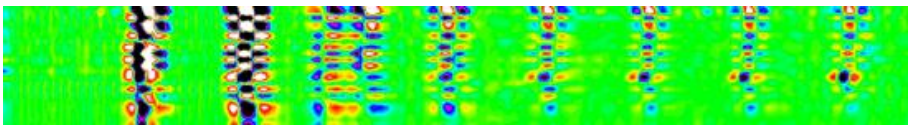
(f) 60kHz



(g) 70kHz



(h) 80kHz

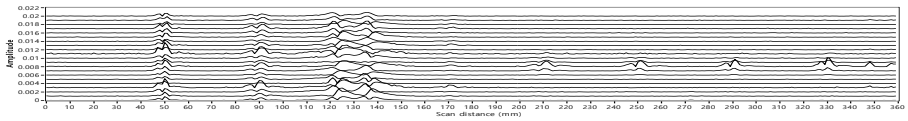


(i) 90kHz

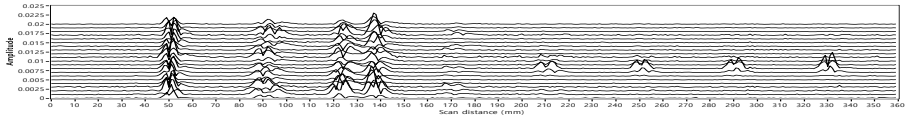
Fig. 3-16 Distribution of magnetic field (FBH, 100mA, V_{Dtrd})

Collection @ chosun

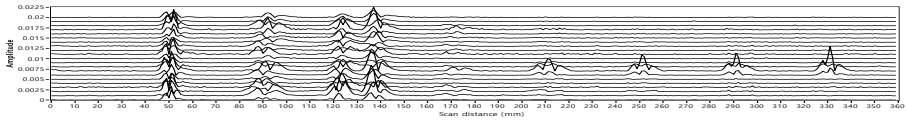
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



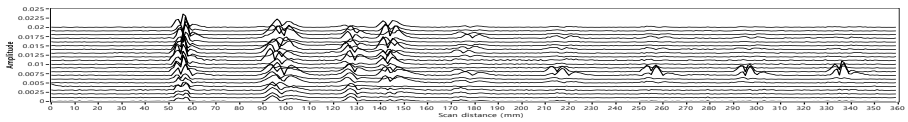
(a) 10kHz



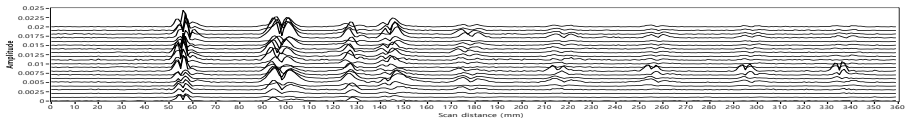
(b) 20kHz



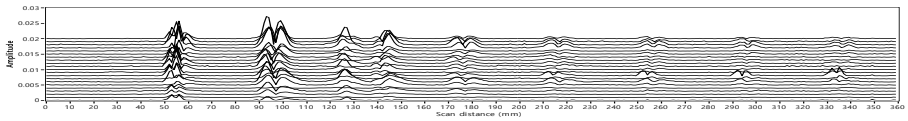
(c) 30kHz



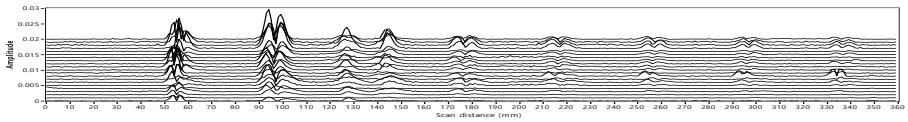
(d) 40kHz



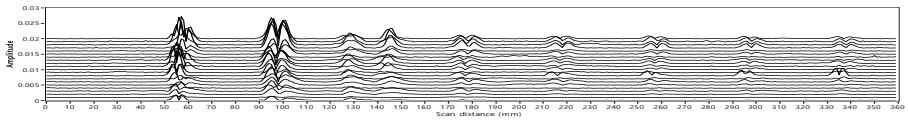
(e) 50kHz



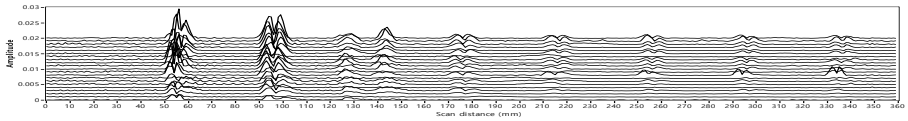
(f) 60kHz



(g) 70kHz



(h) 80kHz

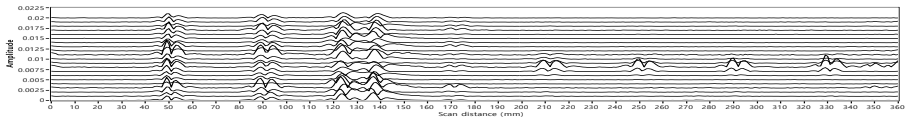


(i) 90kHz

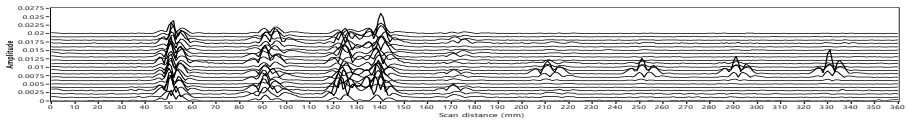
Fig. 3-17 Distribution of magnetic field (FBH, 100mA, |ΔV|)

Collection @ chosun

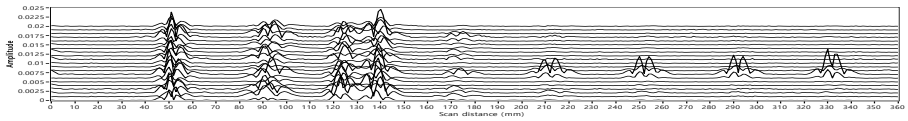
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



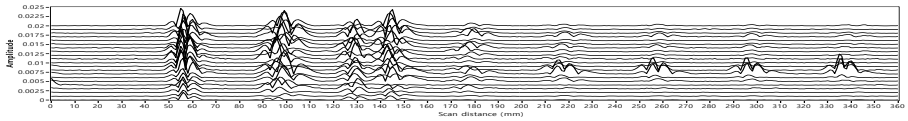
(a) 10kHz



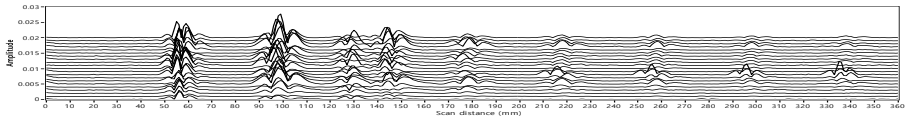
(b) 20kHz



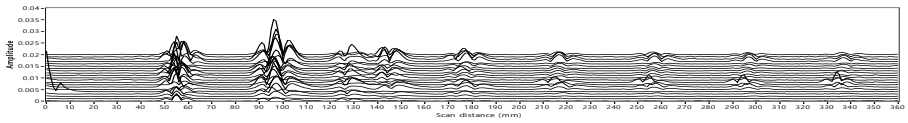
(c) 30kHz



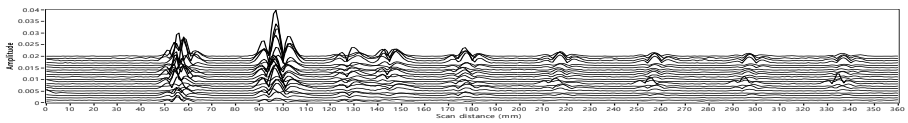
(d) 40kHz



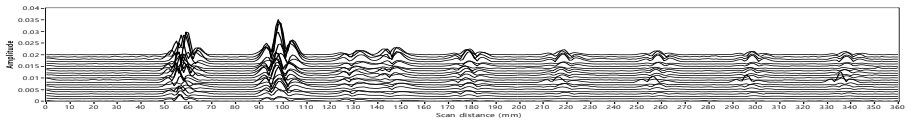
(e) 50kHz



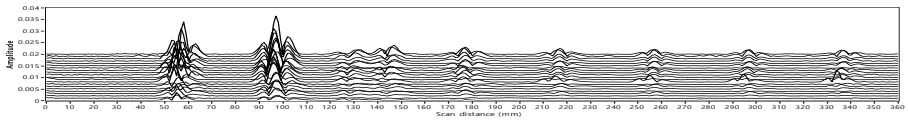
(f) 60kHz



(g) 70kHz



(h) 80kHz



(i) 90kHz

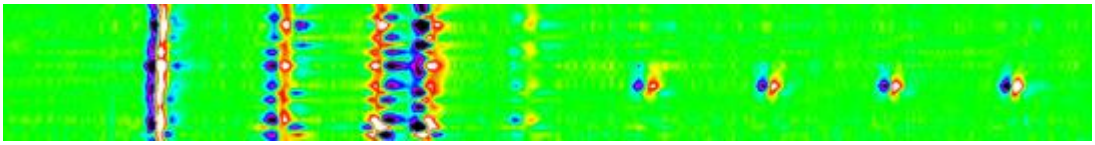
Fig. 3 -18 Distribution of magnetic field (FBH, 100mA $|\Delta V_{Dtrd}|$)

Collection @ chosun

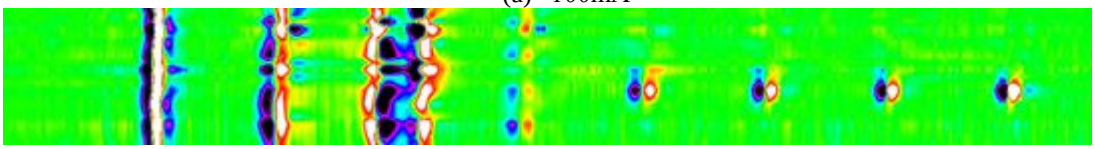
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 입력전류 특성

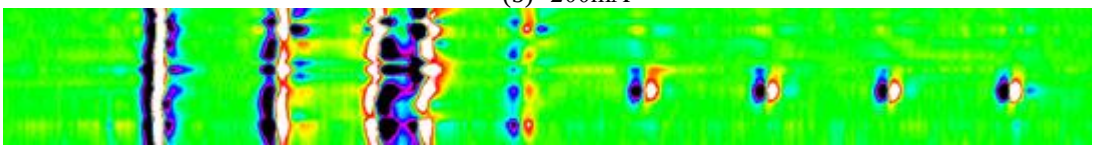
Fig.3-19에서 Fig.3-22는 결함 정보를 명확하게 지시하는 주파수인 20kHz에서 입력전류를 100, 200, 300mA를 입력하면서 취득한 자계분포 ΔV, V_{Dtrd}, |ΔV|, $|V_{Dtrd}|$의 등고선 및 워터폴 표현이다. 전체적으로 입력전류를 증가시키는 것이 결함정보를 보다 명확하게 지시할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 100mA

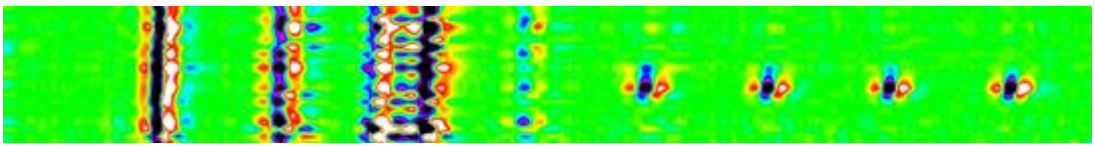


(b) 200mA

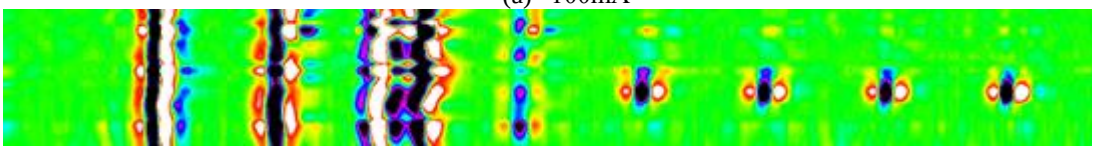


(c) 300mA

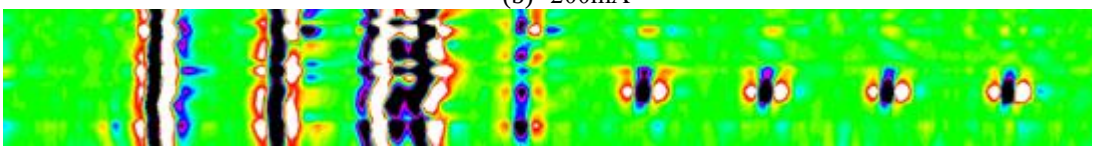
Fig. 3-19 Distribution of magnetic field corresponding to input current (FBH, 20kHz, ΔV)



(a) 100mA



(b) 200mA

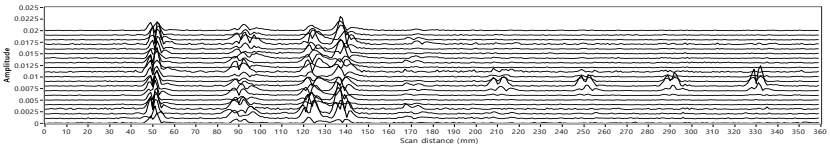


(c) 300mA

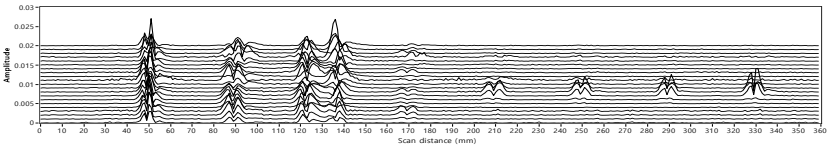
Fig. 3-20 Distribution of magnetic field corresponding to input current (FBH, 20kHz, V_{Dtrd})

Collection @ chosun

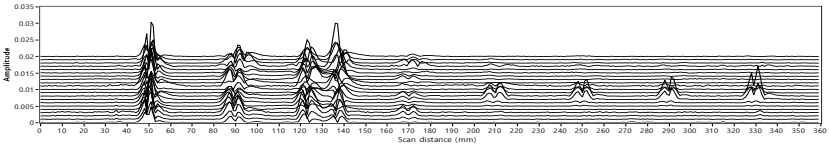
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) 100mA

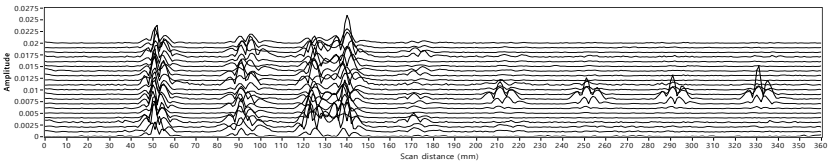


(b) 200mA

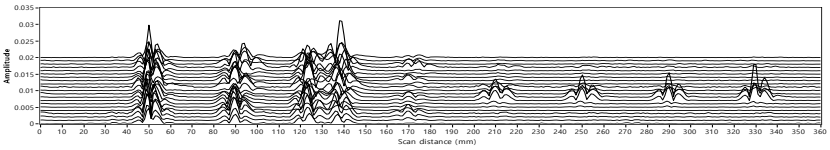


(c) 300mA

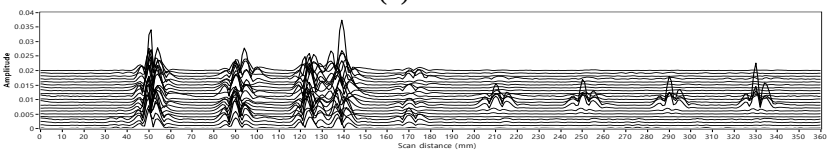
Fig. 3-21 Distribution of magnetic field corresponding to input current (FBH, 20kHz, |ΔV|)



(a) 100mA



(b) 200mA



(c) 300mA

Fig. 3-22 Distribution of magnetic field corresponding to input current (FBH, 20kHz, $|V_{Dtrd}|$)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 절 시험편별 결함 탐상 결과

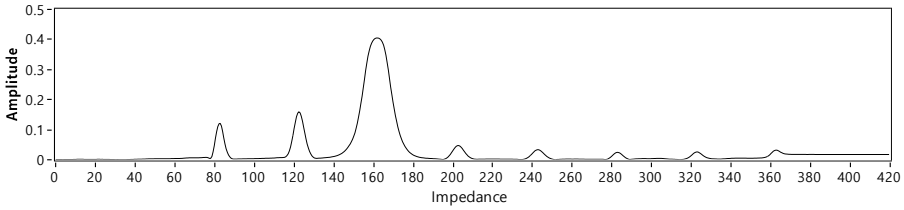
1. 코일센서

Fig.3-23과 Fig.3-24는 20kHz, 200mA의 교류전류를 입력하였을 때, 여자코일을 센서로 활용하여 계산한 임피던스 및 위상차를 나타낸다. Fig.3-25에서 Fig.3-28은 20kHz, 200mA에서 각각 편저공, 테이퍼형 마모, 편마모, 슬릿 시험편의 리사주 선도이다.

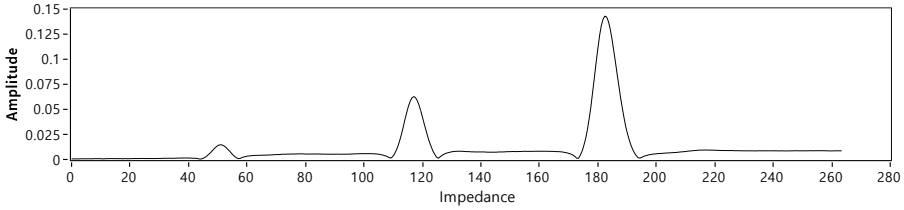
Fig.3-25에서 TSP는 제 3사분면 영역에 위치하였다. 4-20% 편저공(#H_1)에서 100% 편저공(#H_5)에 해당하는 결함에서 길이가 증가할수록 진폭값이 상승하였다. 또한 깊이에 따라 위상차가 증가하는 경향을 보였다. 테이퍼형 마모와 편마모의 경우도 깊이에 따라 위상차가 증가하는 경향을 보였으며 두 결함 사이에 위상차이는 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 길이가 동일한 편마모의 경우 편저공과 테이퍼형 마모의 경향과 다르게 진폭값도 상승하였다. 슬릿결함은 축방향 결함 신호의 경우 길이가 증가할수록 진폭값이 상승하였다. 그러나 환형방향 결함의 경우 신호가 미약하여 판단할수 없었다.

Collection @ chosun

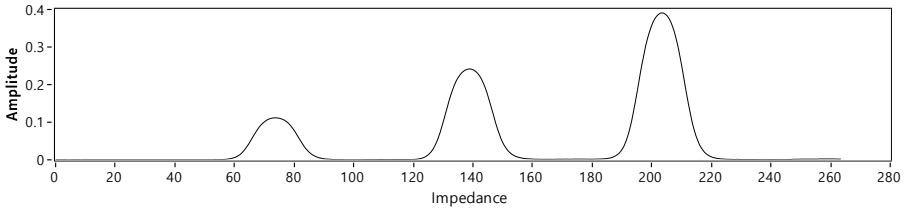
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



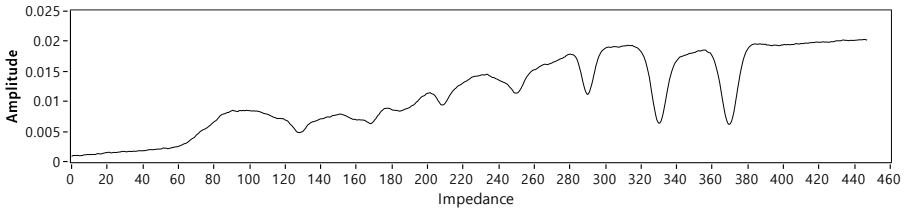
(a) FBH



(b) TW



(c) FW

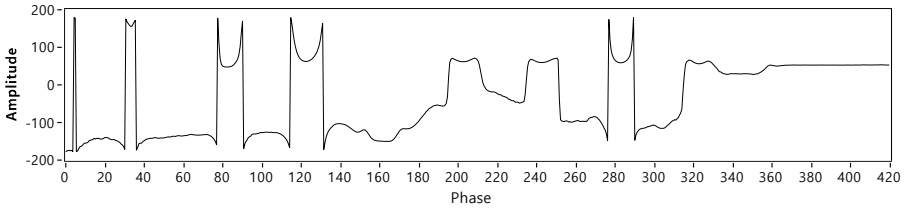


(d) Slit

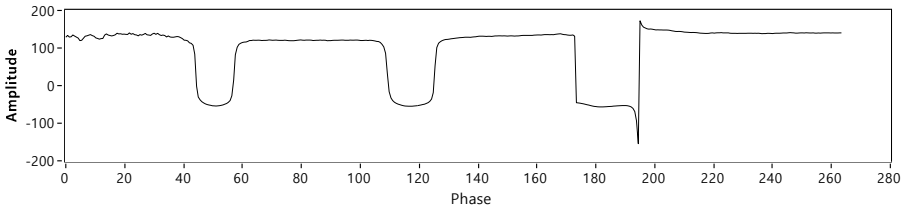
Fig. 3-23 Impedance graph with 20kHz, 200mA

Collection @ chosun

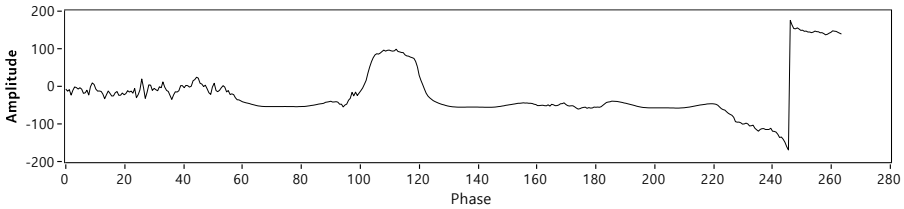
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



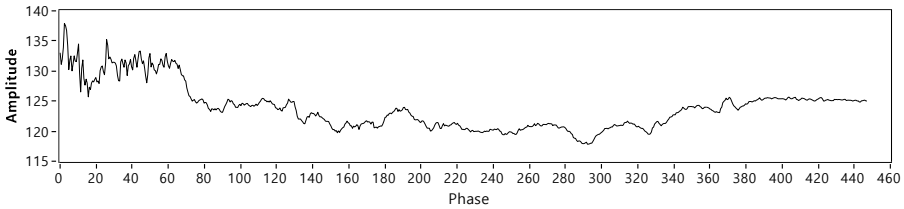
(a) FBH



(b) TW



(c) FW

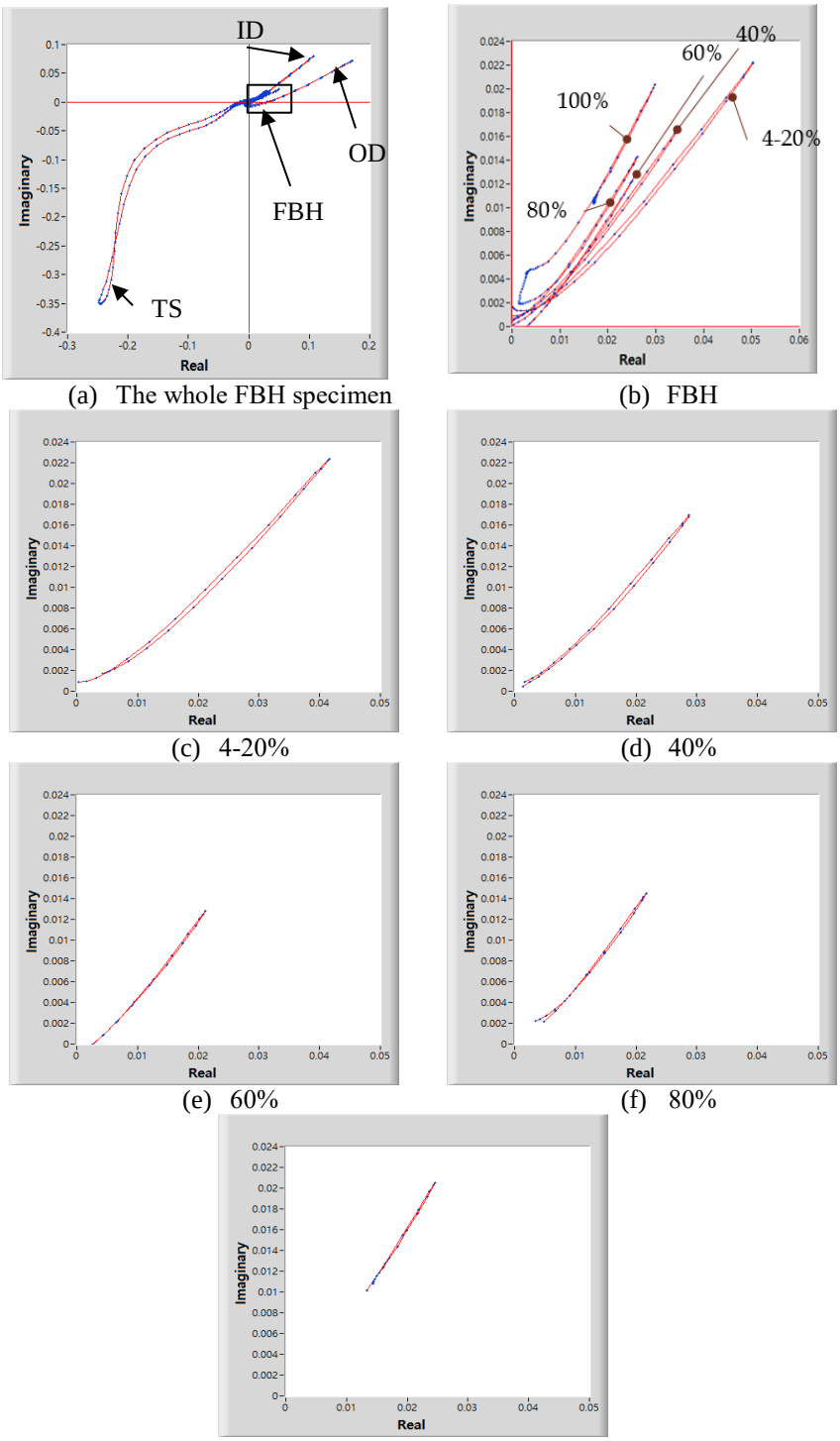


(d) Slit

Fig. 3-24 Phase graph with 20kHz, 200mA

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) The whole FBH specimen (b) FBH

(c) 4-20% (d) 40%

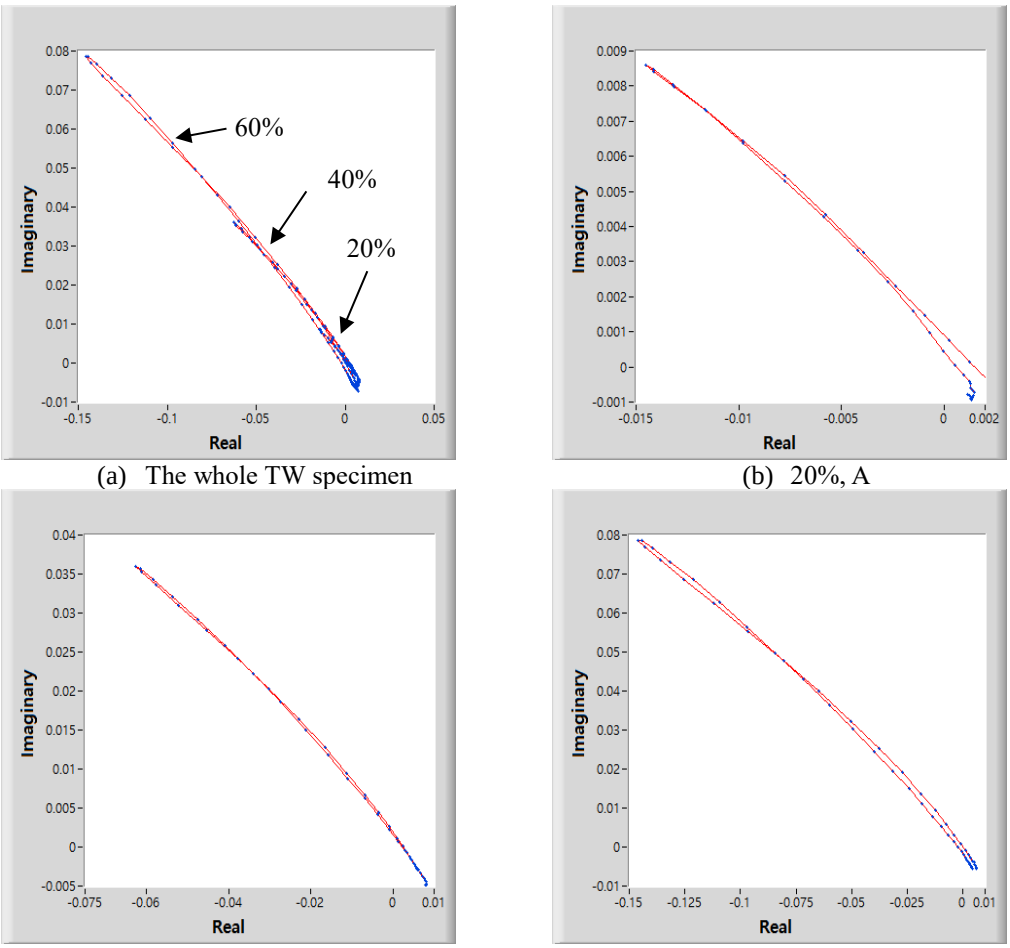
(e) 60% (f) 80%

(g) 100%

Fig. 3 -25 Lissajous diagram in the FBH with 20kHz 200mA

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



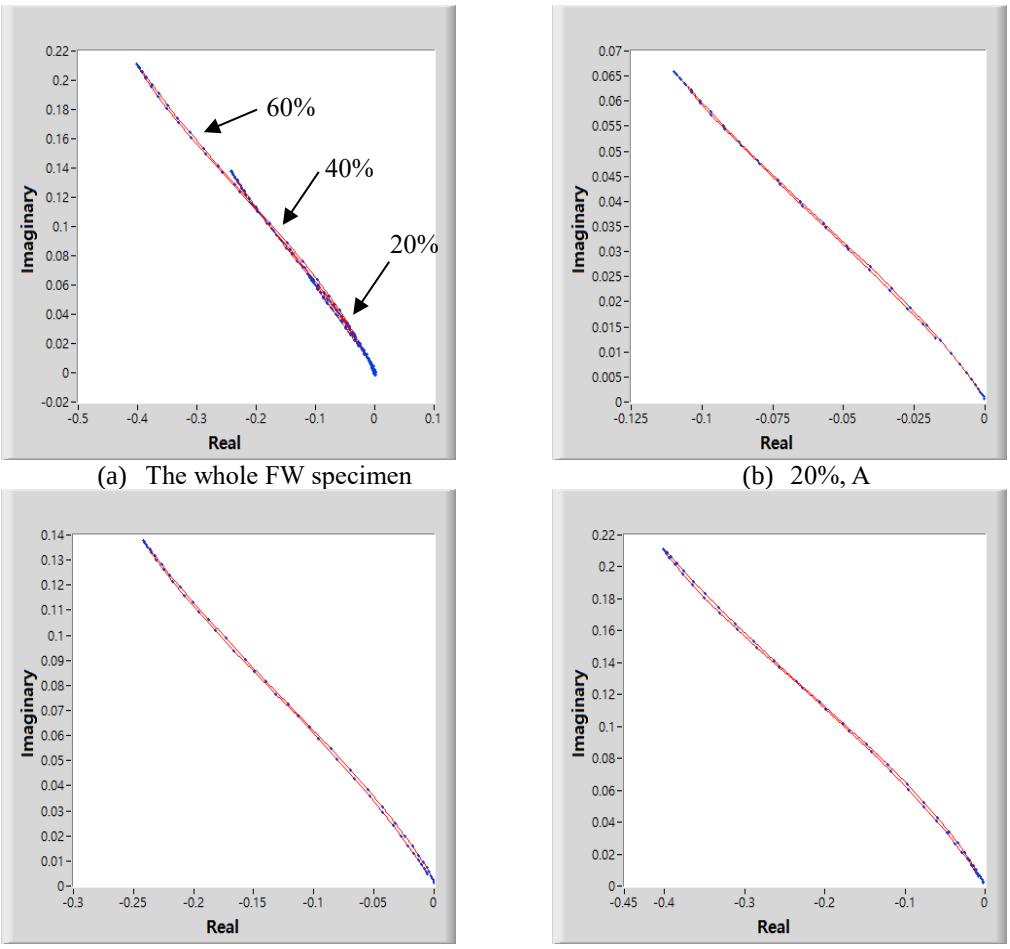
(a) The whole TW specimen (b) 20%, A

(c) 40%, B (d) 60%, C

Fig. 3 -26 Lissajous diagram in the TW with 20kHz 200mA

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



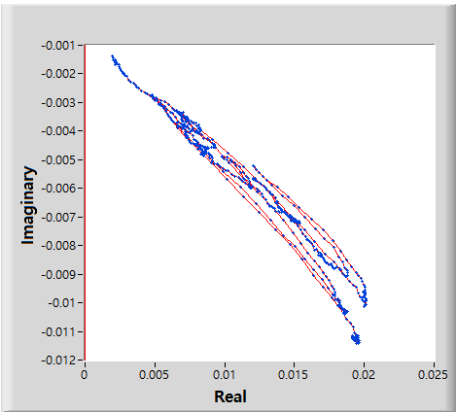
(a) The whole FW specimen (b) 20%, A

(c) 40%, B (d) 60%, C

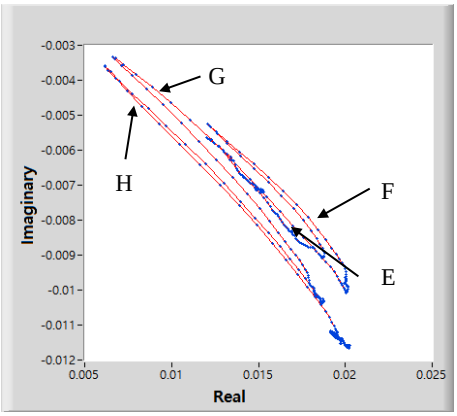
Fig. 3 -27 Lissajous diagram in the FW with 20kHz 200mA

Collection @ chosun

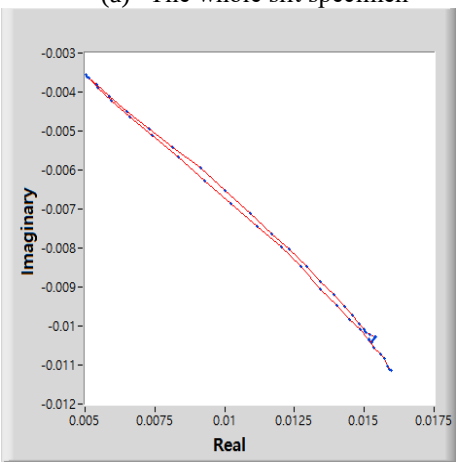
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



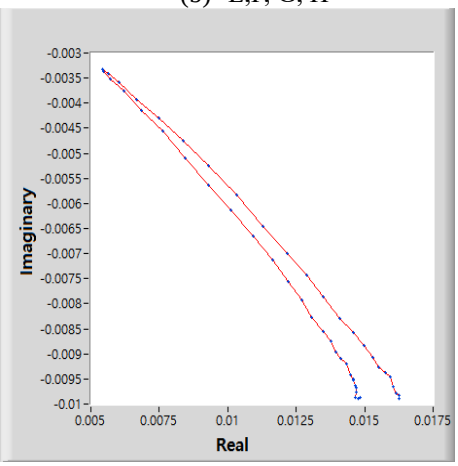
(a) The whole slit specimen



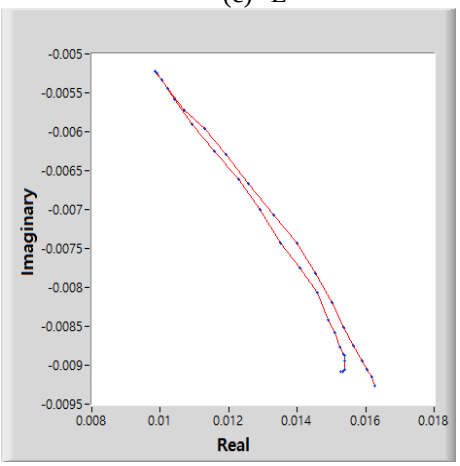
(b) E,F, G, H



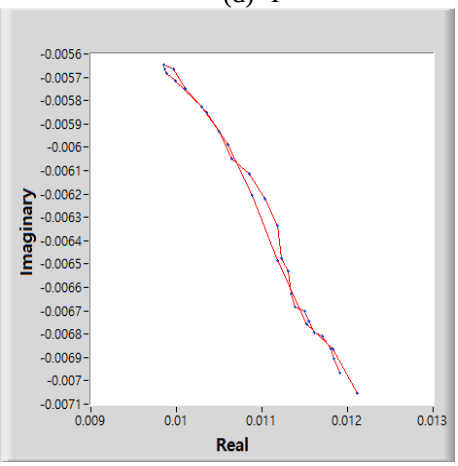
(c) E



(d) F



(e) G



(f) H

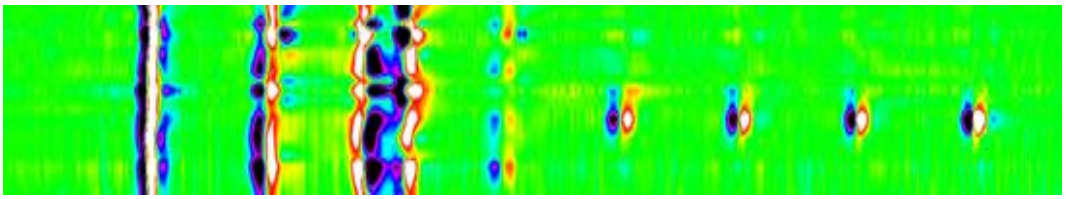
Fig. 3 -28 Lissajous diagram in the Slit with 20kHz 200mA

Collection @ chosun

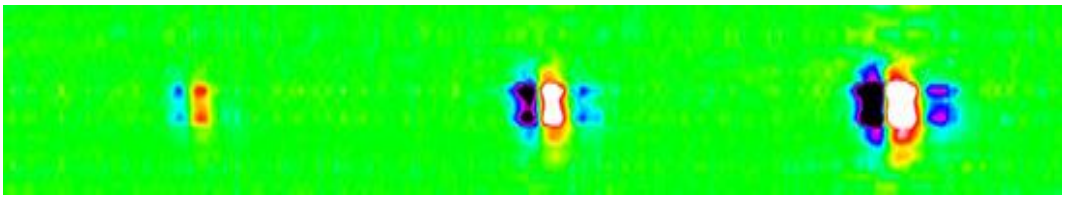
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 홀센서 배열

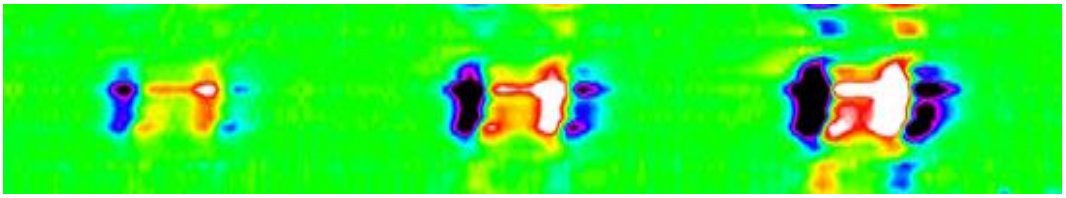
Fig.3-29와 Fig.3-30는 20kHz, 200mA의 교류전류를 입력하였을 때, 환형배열 홀센서에 의하여 측정한 ΔV및 V_{Dtrd}의 분포를 나타낸다. ID, OD, TSP, 4개의 20% 편저공을 포함한 편저공를 검출할 수 있었다. 또한, 깊이 20%, 40%, 60%인 테이퍼형 마모(TW) 및 편마도(FW)도 검출할 수 있다. 길이 2mm 이상의 축방향 슬릿결함은 검출할 수 있으나, 길이 2~9mm인 원호방향 슬릿결함은 검출할 수 없었다.



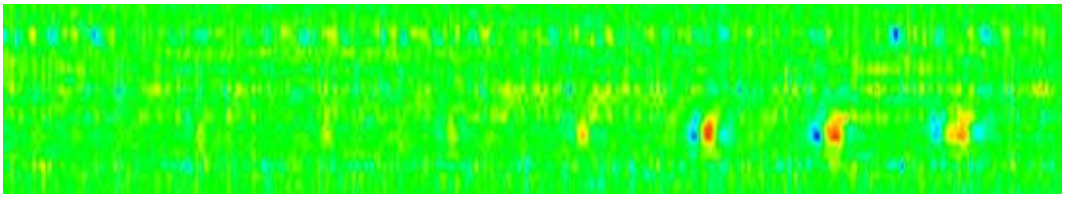
(a) FBH



(b) TW



(c) FW

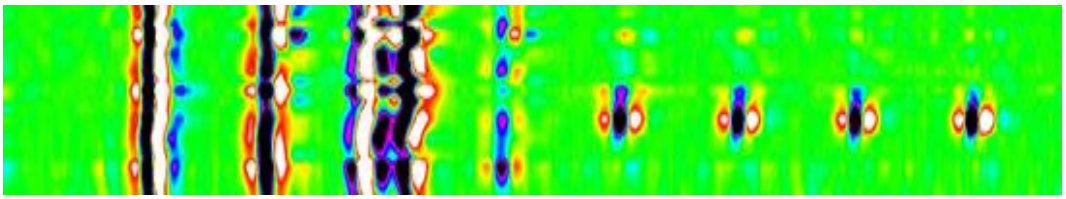


(d) Slit

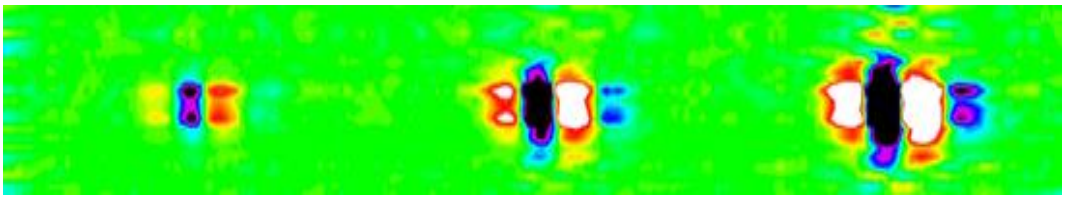
Fig. 3-29 Distribution of ΔVwith 20kHz, 200mA

Collection @ chosun

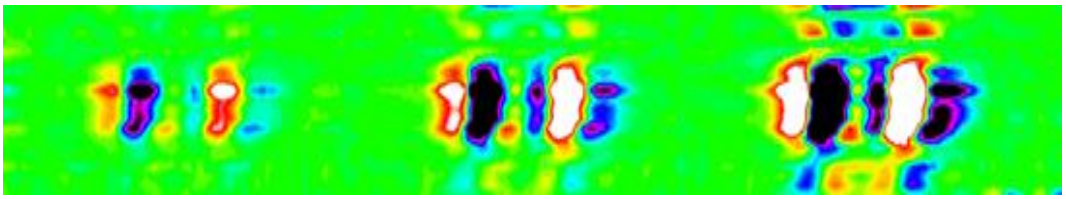
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



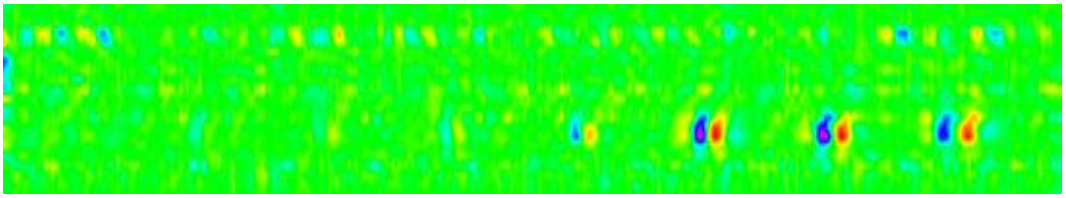
(a) FBH



(b) TW



(c) FW



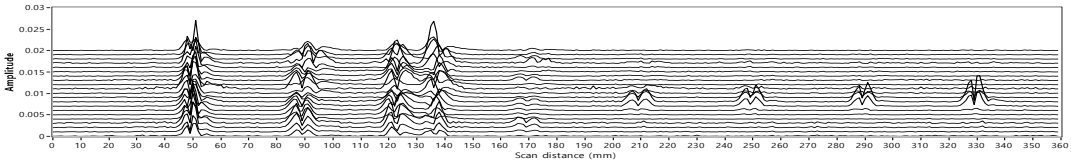
(d) Slit

Fig. 3-30 Distribution of V_{Dtrd} with 20kHz, 200mA

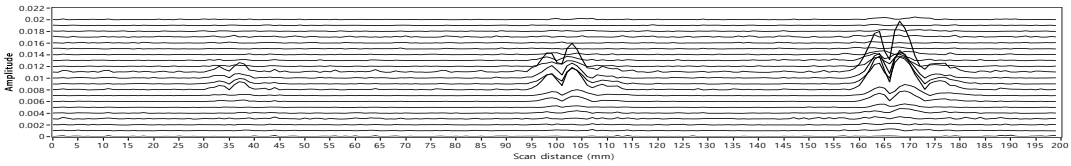
Fig.3-31과 Fig.3-32의 $|\Delta V|$, $|V_{Dtrd}|$의 워터폴 표현에서는 슬릿결함의 검출이 등고선 표현의 경우에 비하여 명확하지 않았다. 그러나, 편저공 시험편의 ID, OD, TSP와 같이 환형으로 360° 에 걸쳐서 발생하는 자계변화와는 달리, TW 및 FW와 같이 원호방향으로 부분적인 결함이 발생한 결과를 명확하게 구분할 수 있다. 또한, 테이퍼형 마모와 편마모가 결함의 폭이 서로 다른 형태의 결함이라는 것을 지시할 수 있었다.

Collection @ chosun

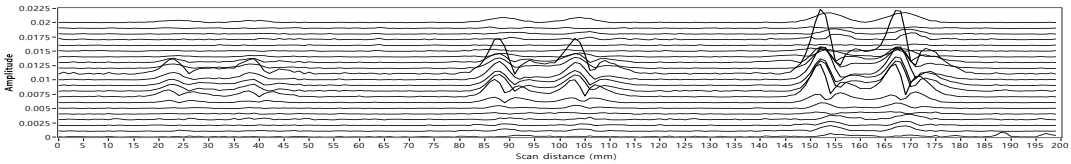
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



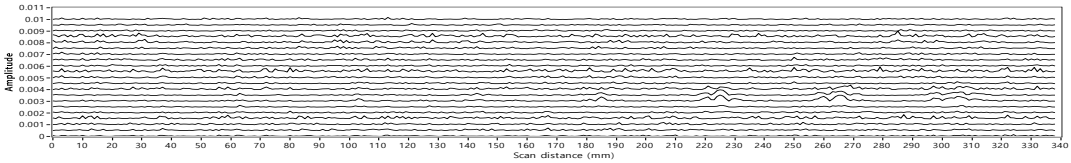
(a) FBH



(b) TW



(c) FW

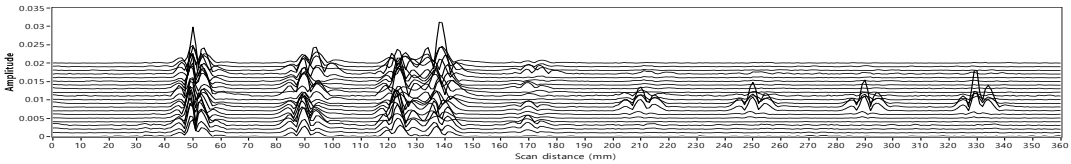


(d) Slit

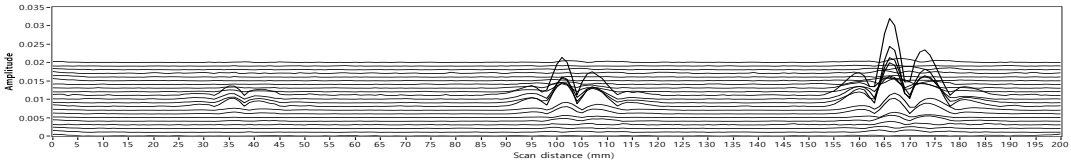
Fig. 3-31 Distribution of |ΔV| with 20kHz, 200mA

Collection @ chosun

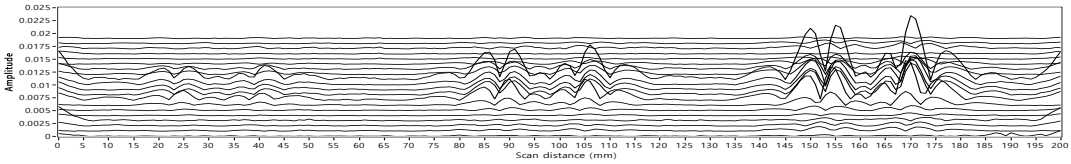
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



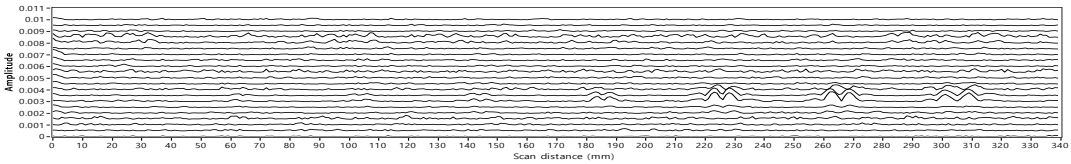
(a) FBH



(b) TW



(c) FW



(d) Slit

Fig. 3-32 Distribution of $|V_{Dtrd}|$ with 20kHz, 200mA

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 절 결함 평가

1. 자동탐상

Fig.3-33에서 Fig.3-36은 여자코일에 20kHz, 200mA의 교류전류를 인가하면서 코일센서(여자코일) 및 환형배열 홀센서에 의하여 취득한 X, Y, Y/X, |ΔV|등고선 표현, |ΔV|분포에서 각각의 축방향 위치에서 원호방향으로 최대값(Max), 최대 5개 값의 평균(Max5), 최대 10개 값의 평균(Max10) 및 전체 센서 출력의 평균값(Avr)을 나타낸다.

Fig.3-33에서 X값, Y값, Max 값에서 피크 검출하면 결함의 유무와 중심위치를 자동으로 지시할 수 있다. TSP는 X 및 Y에서 음의 값을 가지므로 TSP임을 알 수 있다. 그리고, 결함을 지시할 때 ID, OD, TSP는 축방향으로 연속적인 신호가 발생하며, FBH은 원호방향으로 불연속적인 신호가 추출된다. 이러한 경향은 결함이 검출된 지점에서 Max, Max5, Max10, Avr의 차이를 비교함으로서 구분할 수 있다. 즉, 원호방향으로 연속된 데이터(ID, OD, TSP)가 나타났을 때에는 Fig.3-33에 나타낸 바와 같이 Max, Max5, Max10, Avr의 신호 차이가 거의 없다. 그러나, FBH과 같이 원호방향으로 불연속적인 데이터인 경우에는 Max, Max5, Max10, Avr의 값이 점차 감소하는 경향을 보인다.

Fig.3-34는 TW 결함에서도 X값, Y값, Max 값에서 피크 검출하면 결함의 유무와 중심위치를 자동으로 지시할 수 있다. Fig.3-34에서 Max와 Max5는 거의 차이가 없다가 Max10 및 Avr의 값이 점차 감소하는 경향을 보인다. 이는 원호방향으로 최소 5개에서는 동일한 수준의 데이터가 나타나고 있음을 의미한다. TW의 경우 85.7° 로 추정하여 실제 각도와 상이하였다.

Fig.3-35의 FW 결함에서도 X값, Y값, Max 값에서 피크 검출하면 결함의 유무와 중심위치를 자동으로 지시할 수 있다. Fig.3-33에서 Max, Max5, Max10은 거의 차이가 없다가 Avr의 값이 감소하는 경향을 보인다. 이는 원호방향으로 최소 10개에서는 동일한 수준의 데이터가 나타나고 있음을 의미한다. FW의 경우 171.4° 로 추

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

정하여 실제 각도와 거의 일치하였다.

Fig.3-36의 슬릿 결함에서는 홀센서와 코일센서의 신호가 약하여 결함을 평가할 수 없었다.

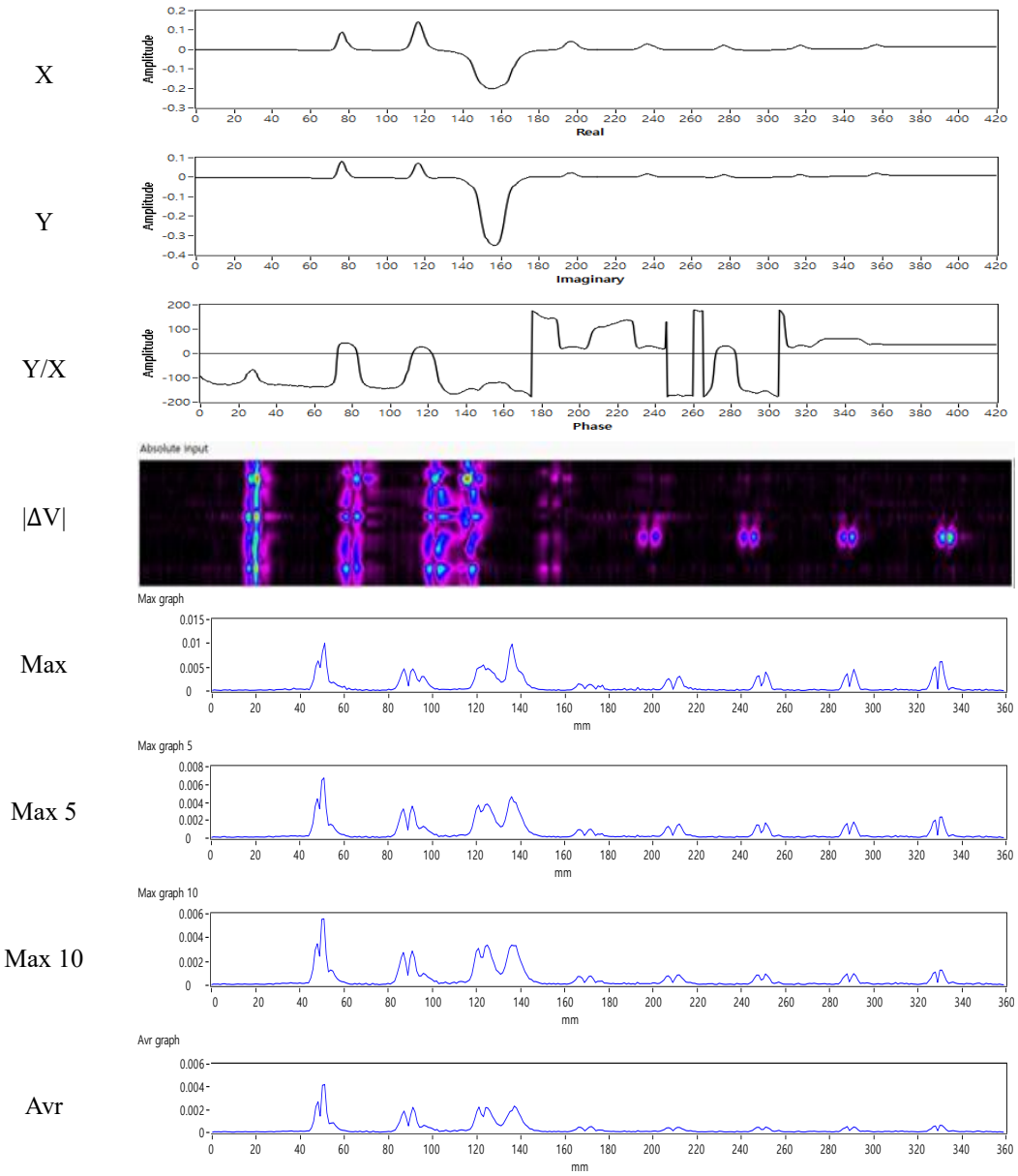


Fig. 3-33 Inspection factors in the FBH with 20kHz, 200mA

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

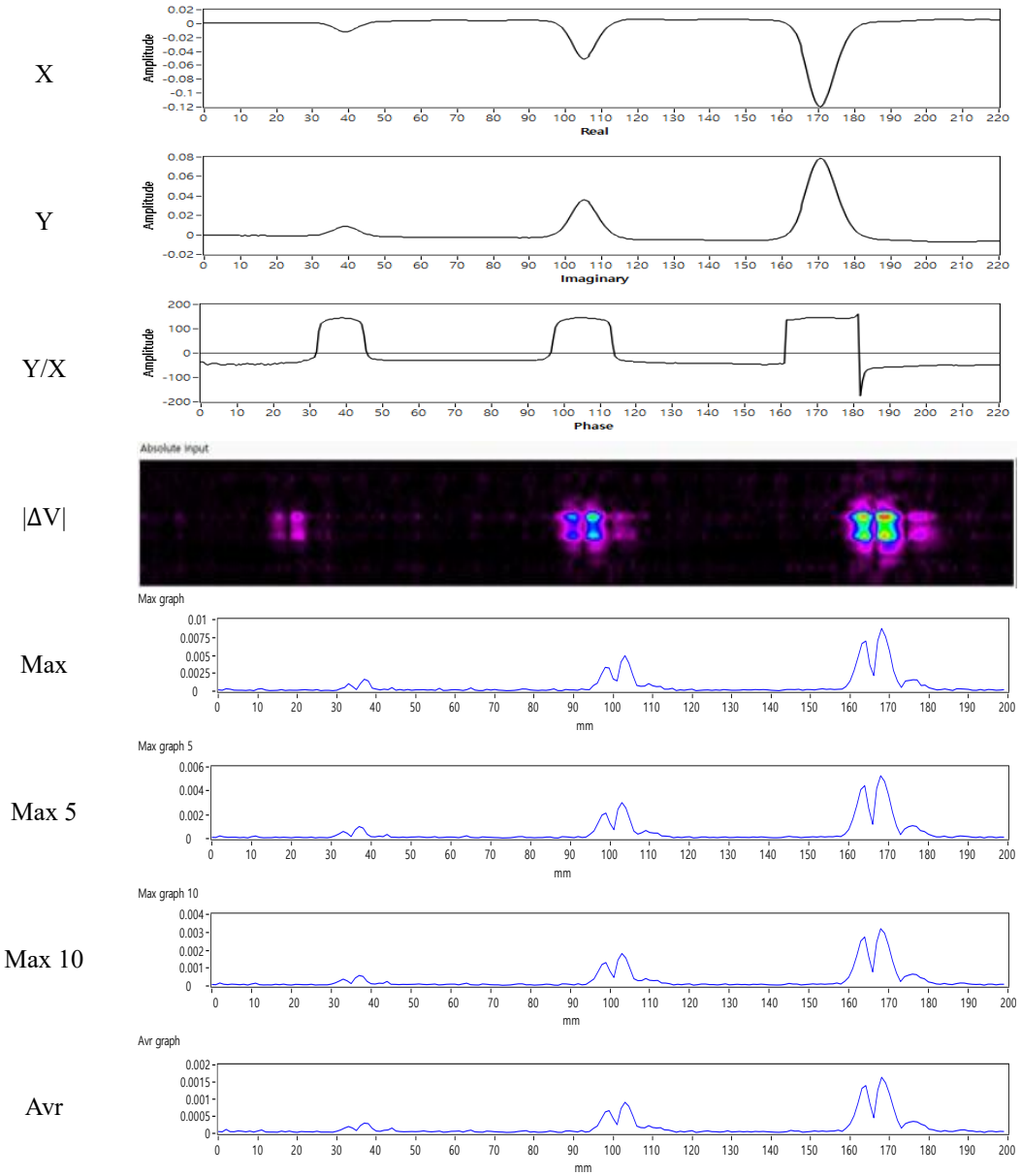


Fig. 3 -34 Inspection factors in the TW with 20kHz, 200mA

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

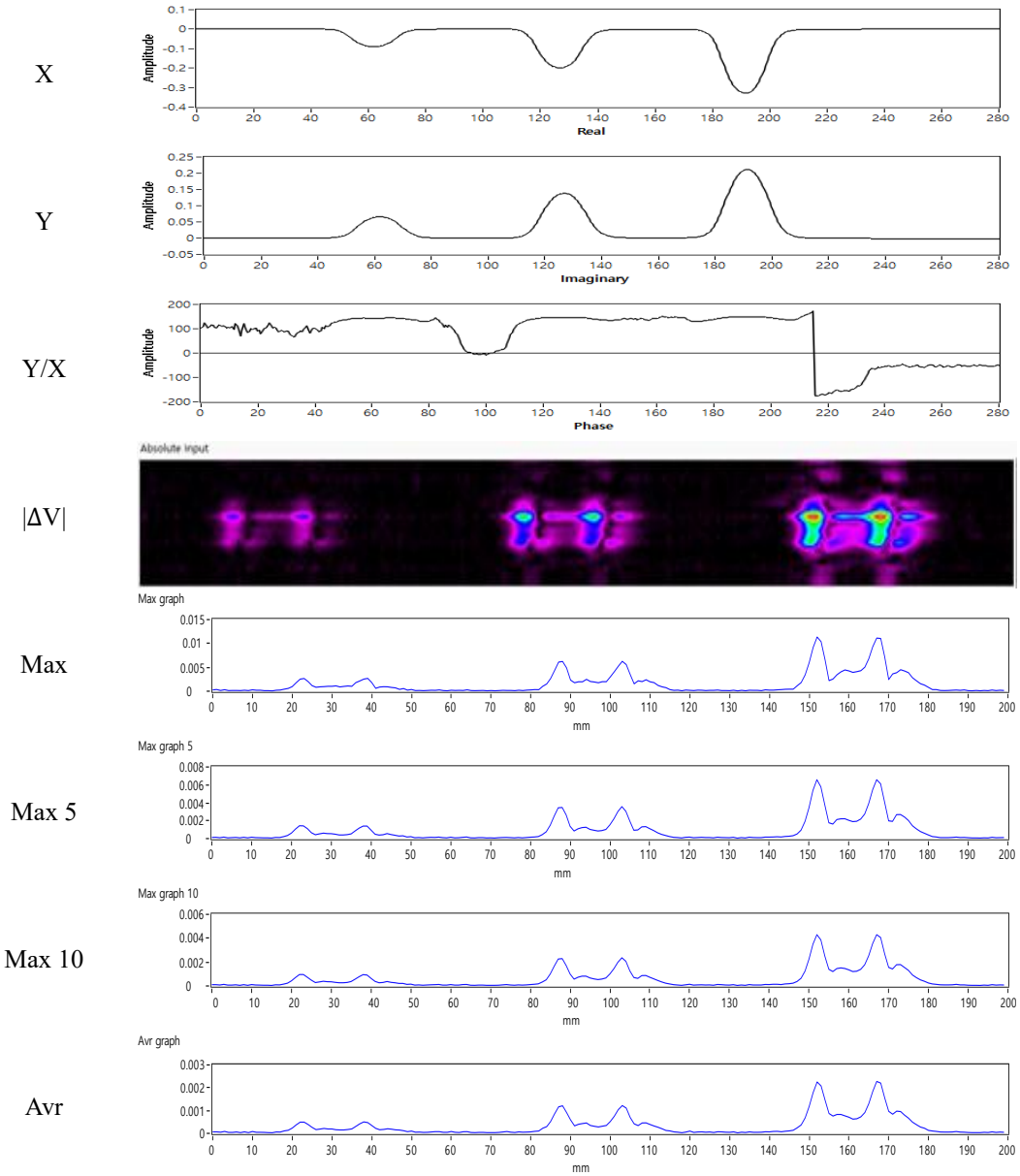


Fig. 3 -35 Inspection factors in the FW with 20kHz, 200mA

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

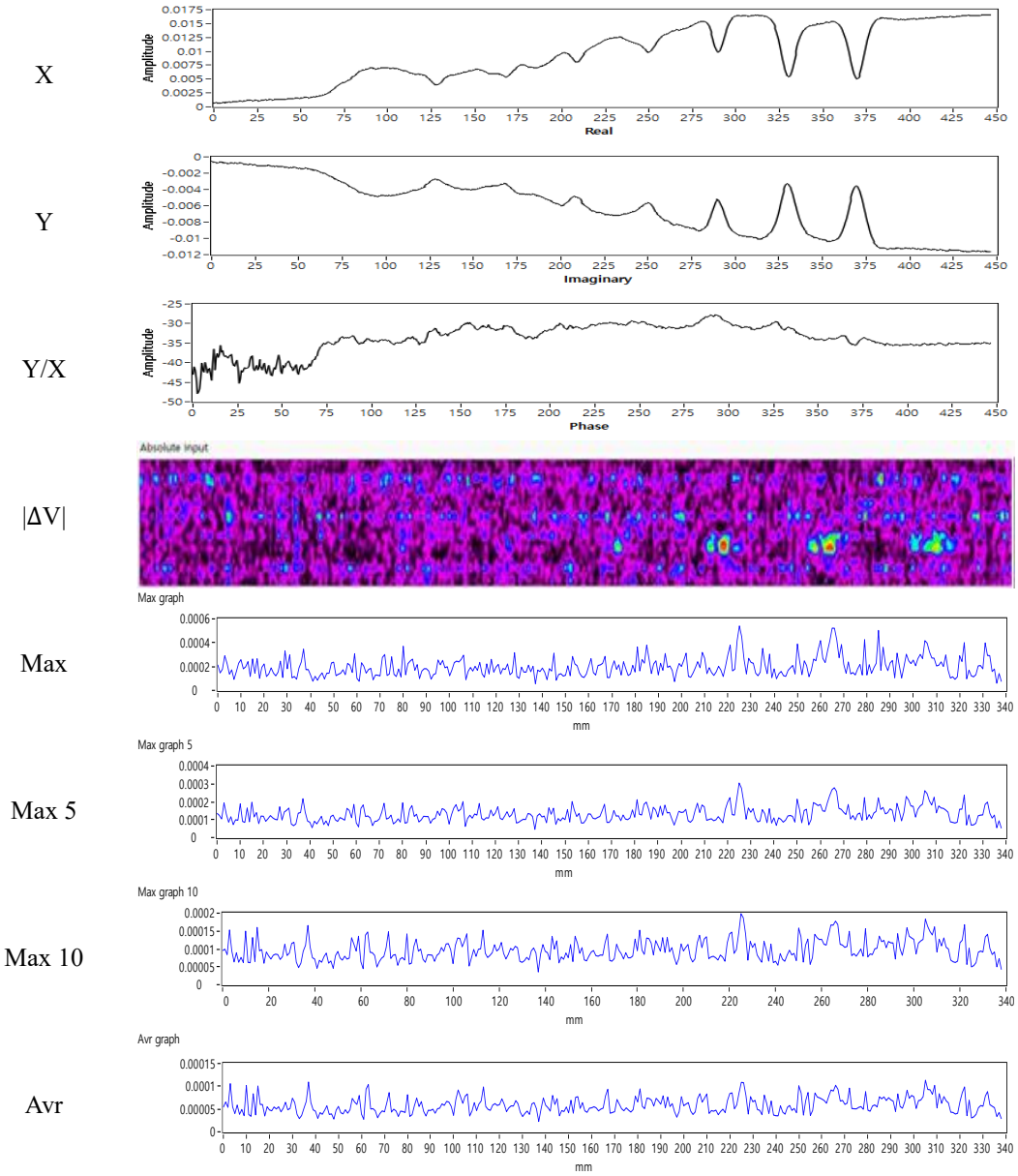
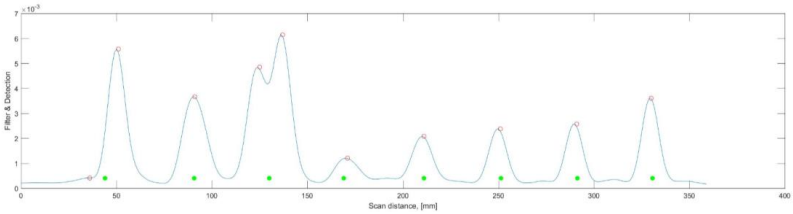


Fig. 3-36 Inspection factors in the Slit with 20kHz, 200mA

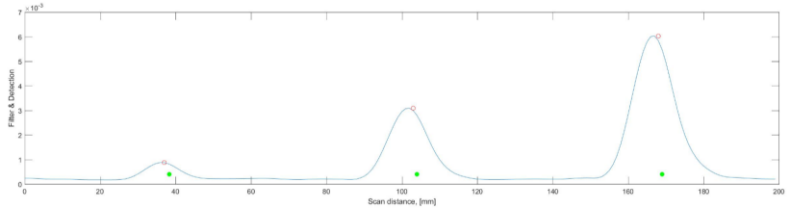
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

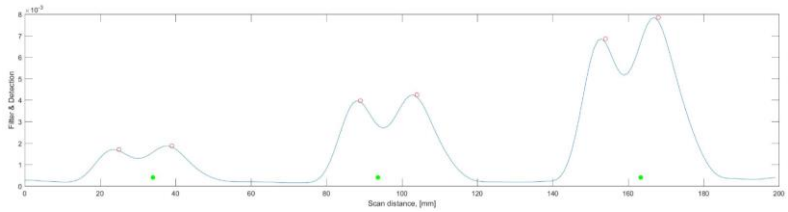
Fig.3-37은 상기 2장에서 서술한 결함검출 알고리즘을 이용하여 홀센서의 결할 검출 결과를 나타낸다. 먼저 홀센서로부터 얻은 결과를 절대차분해석한다. 바이어스 오차와 감도오차를 제거함으로써 결함 데이터는 명확성을 얻는다. 축방향에서 원호방향으로 최대값을 취한다. 마지막으로 피크 검출을 통하여 결함을 검출한다. 편저공, 테이퍼형 마모, 편저공의 경우 검출이 가능하였다. 그러나 슬릿결함의 경우 결함신호가 작아서 결함자동검출 알고리즘을 적용할 경우 검출할 수 없었다.



(a) FBH



(b) TW



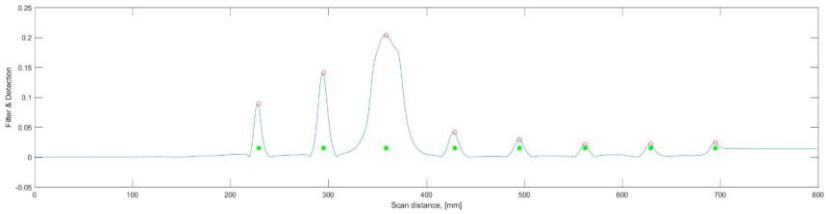
(c) FW

Fig. 3-37 Estimate center position result in Hall sensor

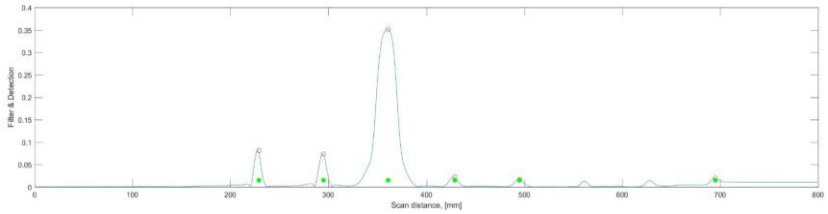
Fig.3-38은 코일센서의 X와 Y값에서 결함검출 결과를 나타낸다. 편저공의 경우 홀센서에 비하여 결함검출이 용이하지 않았다. Y값에서 60% 편저공(#H_3), 80% 편저공(#H_4)에 해당하는 결함을 검출하지 않았다. 테이퍼형 마모와 편마모의 경우 홀센서와 비교하여 하나의 피크를 가지므로 필터없이 검출하는데 용이하였다. 축방향으로 길이가 있는 시험편의 경우 홀센서는 필터를 사용한 경우에도 두 개의 피크를 가지므로 코일센서로의 검출이 유리하다.

Collection @ chosun

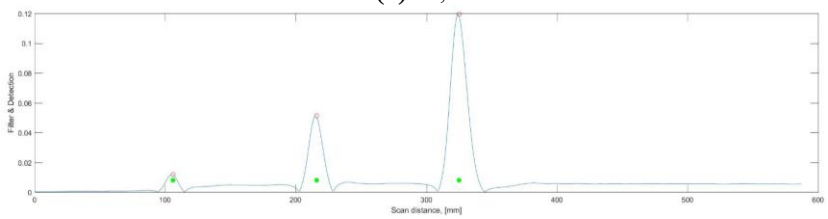
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



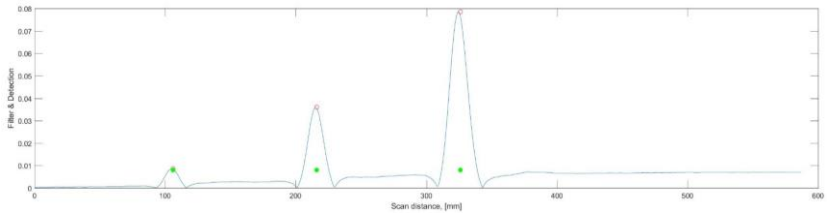
(a) X, FBH



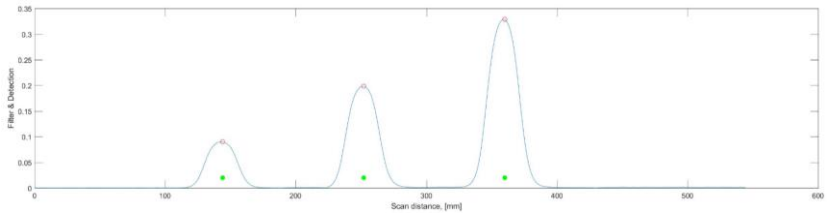
(b) Y, FBH



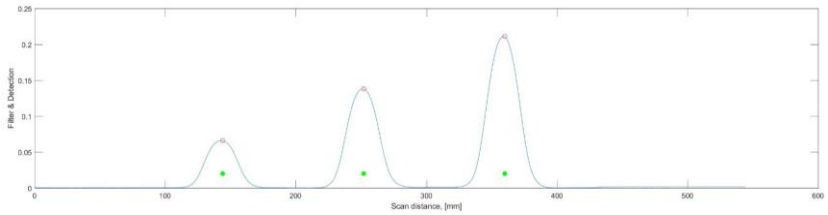
(c) X, FW



(d) Y, FW



(e) X, TW



(f) Y, TW

Fig. 3 -38 Estimate center position result in coil sensor

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

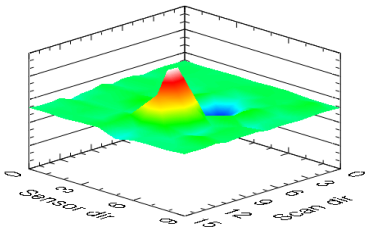
2. 정량평가

결함의 깊이를 추정하기 위하여, 상기 결함검출 알고리즘에 의하여 추정한 결함의 축방향 중심위치를 중심으로 (±10mm)의 영역에서 식 (25)과 같이 ΔV의 절대값 총합을 구하였다. Fig.3-39는 FBH 결함의 중심에서 표현한 ΔV 분포(a)와 전체 결함에 대한 절대값 분포(b)를 나타낸다. 절대값 분포를 채택함으로서, 결함의 크기에 따라 증가하는 ΔV 분포의 세기를 정량적으로 평가할 수 있다.

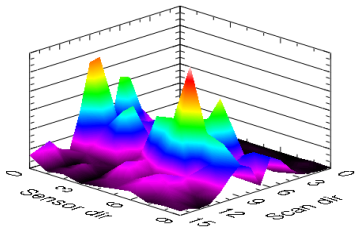
$$S = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} |\Delta V_s(i.j)| \tag{25}$$

Collection @ chosun

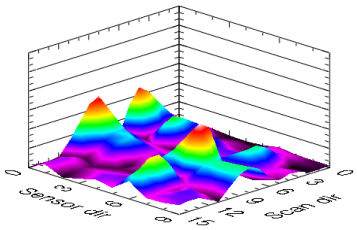
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



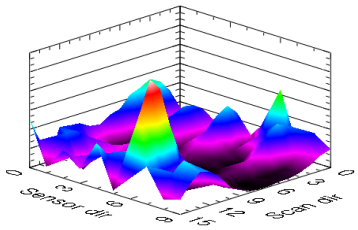
(a) ΔV_{RMS}



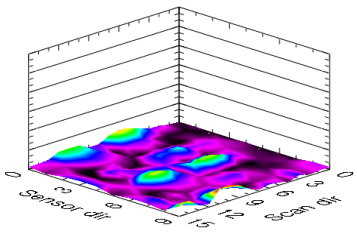
(b) $|\Delta V_{RMS}|$, #G_1



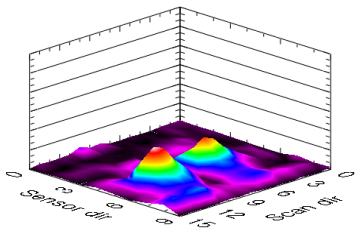
(c) $|\Delta V_{RMS}|$, #G_2



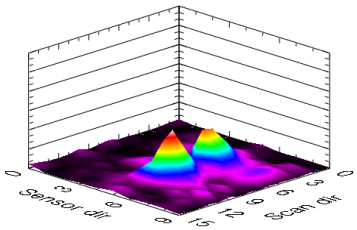
(d) $|\Delta V_{RMS}|$, TSP



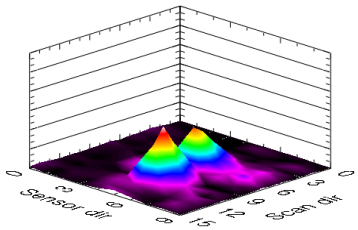
(e) $|\Delta V_{RMS}|$, #H_1



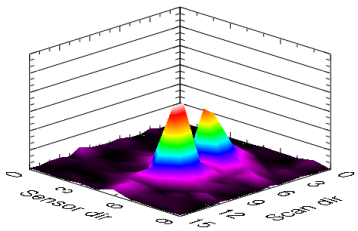
(f) $|\Delta V_{RMS}|$, #H_2



(g) $|\Delta V_{RMS}|$, #H_3



(h) $|\Delta V_{RMS}|$, #H_4



(i) $|\Delta V_{RMS}|$, #H_5

Fig. 3-39 Data processing area for estimating the depth of damage in FBH specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig.3-40은 편저공(Fig.3-1) 시험편을 결함의 깊이에 따라, 절대값 총합이 선형적으로 증가하는 관계를 나타낸다. 이러한 관계로부터 식 (26)로 표현되는 결함 깊이 추정식을 도출할 수 있었다. Fig.3-41은 식 (26)에 의하여 추정한 결함의 깊이를 실제 깊이와 비교한 결과를 나타낸다. 전체적으로 0.4mm의 표준편차로 균열 깊이를 정량 평가할 수 있었다

$$D = 0.0211 \times S - 0.0311 \tag{26}$$

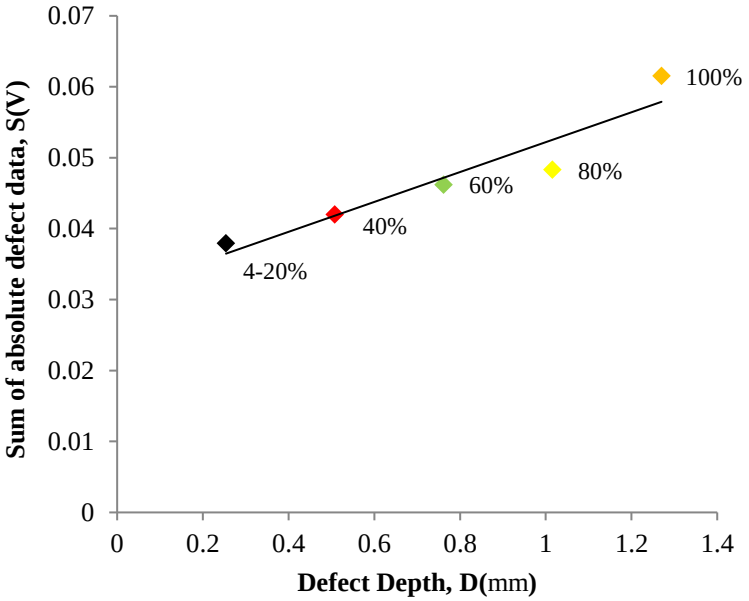


Fig. 3-40 Relationship between the depth of damage and the sum of absolute in FBH

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

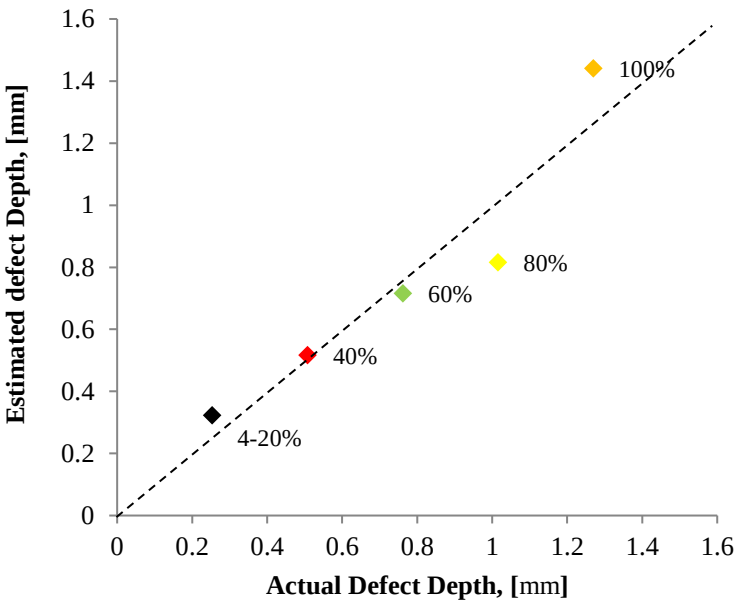


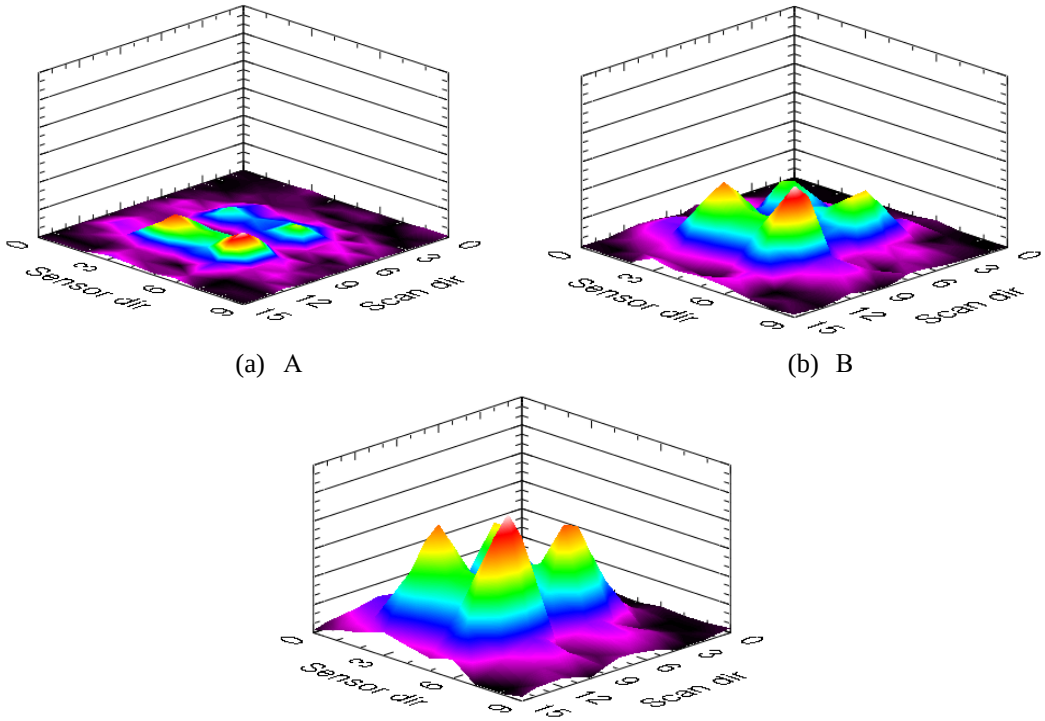
Fig. 3-41 Depth estimation result in FBH

Fig.3-43은 테이퍼형 마모(Fig.3-2) 시험편을 결함의 깊이에 따라, 절대값 총합이 선형적으로 증가하는 관계를 나타낸다. 이러한 관계로부터 식 (27)로 표현되는 결함 깊이 추정식을 도출할 수 있었다. Fig.3-44는 식 (27)에 의하여 추정한 결함의 깊이를 실제 깊이와 비교한 결과를 나타낸다. 전체적으로 0.34mm의 표준편차로 균열 깊이를 정량 평가할 수 있었다.

$$D = 0.1236 \times S - 0.0004 \tag{27}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) A (b) B

(c) C

Fig. 3-42 Data processing area for estimating the depth of damage in TW specimen

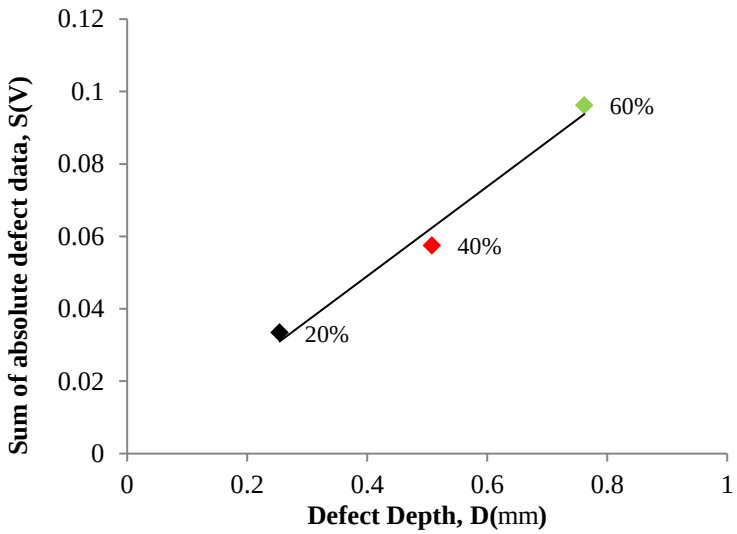


Fig. 3-43 Relationship between the depth of damage and the sum of absolute in TW

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

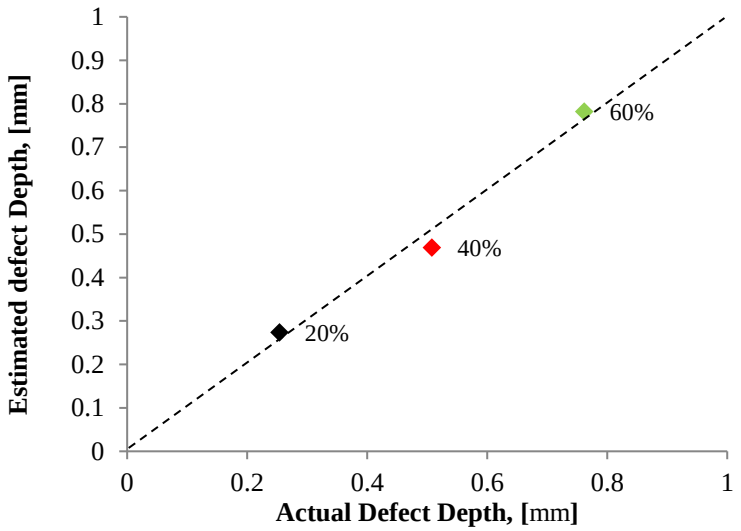


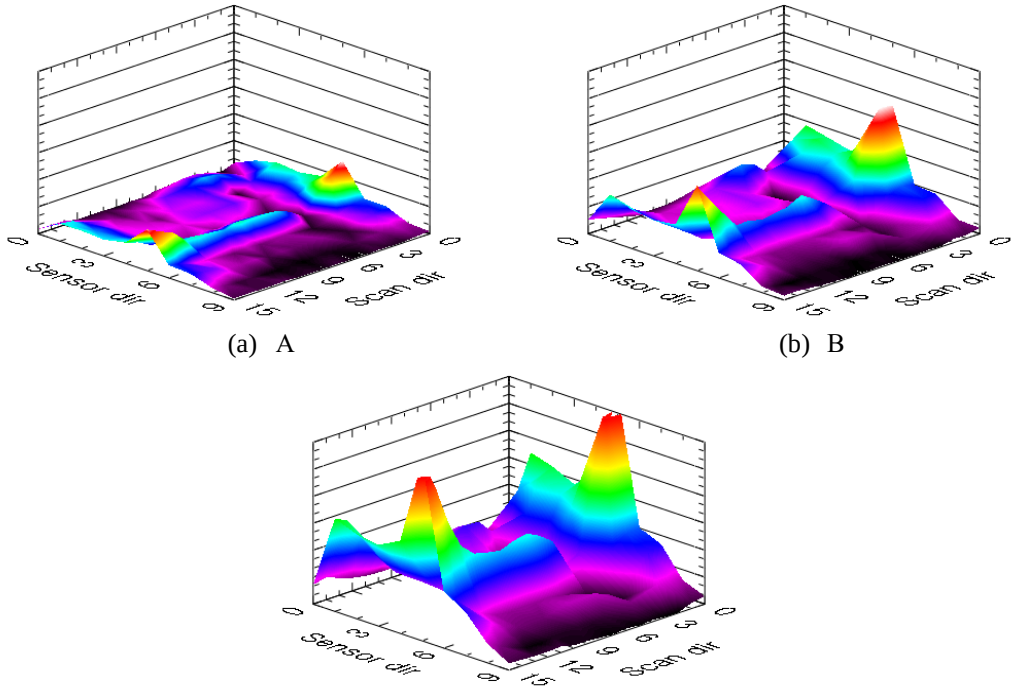
Fig. 3-44 Depth estimation result in TW

Fig.3-46은 편마모(Fig.3-3) 시험편을 결함의 깊이에 따라, 절대값 총합이 선형적으로 감소하는 관계를 나타낸다. 편마모의 경우 작은 결함의 경우에 절대값 총합이 가장 크게 나타난다. 이러한 관계로부터 식 (28)로 표현되는 결함 깊이 추정식을 도출할 수 있었다. Fig.3-47은 식 (28)에 의하여 추정한 결함의 깊이를 실제 깊이와 비교한 결과를 나타낸다. 전체적으로 0.28mm의 표준편차로 균열 깊이를 정량 평가할 수 있었다.

$$D = -0.1457 \times S + 0.1476 \tag{28}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) A (b) B

(c) C

Fig. 3-45 Data processing area for estimating the depth of damage in FW specimen

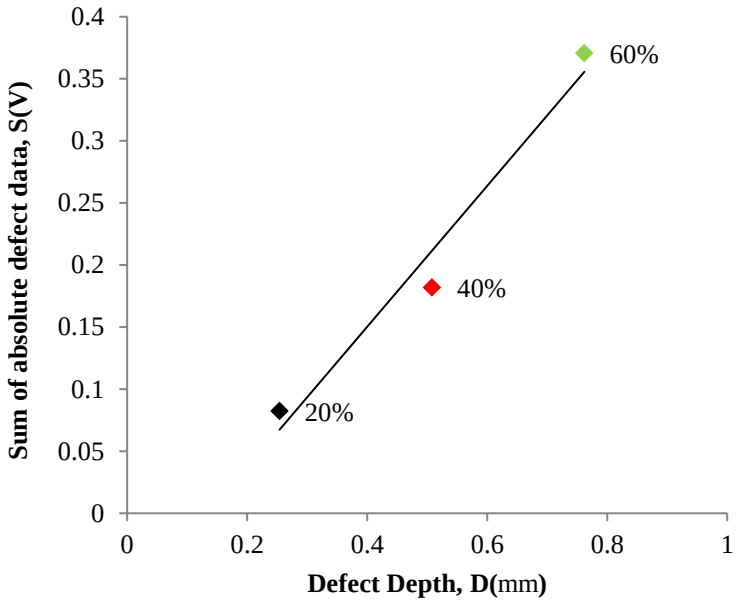


Fig. 3-46 Depth estimation result in FW on Hall sensor

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

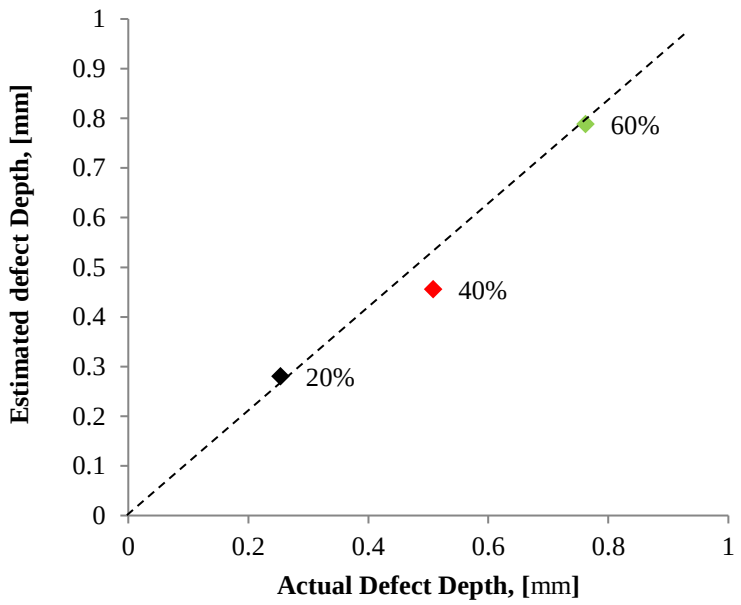


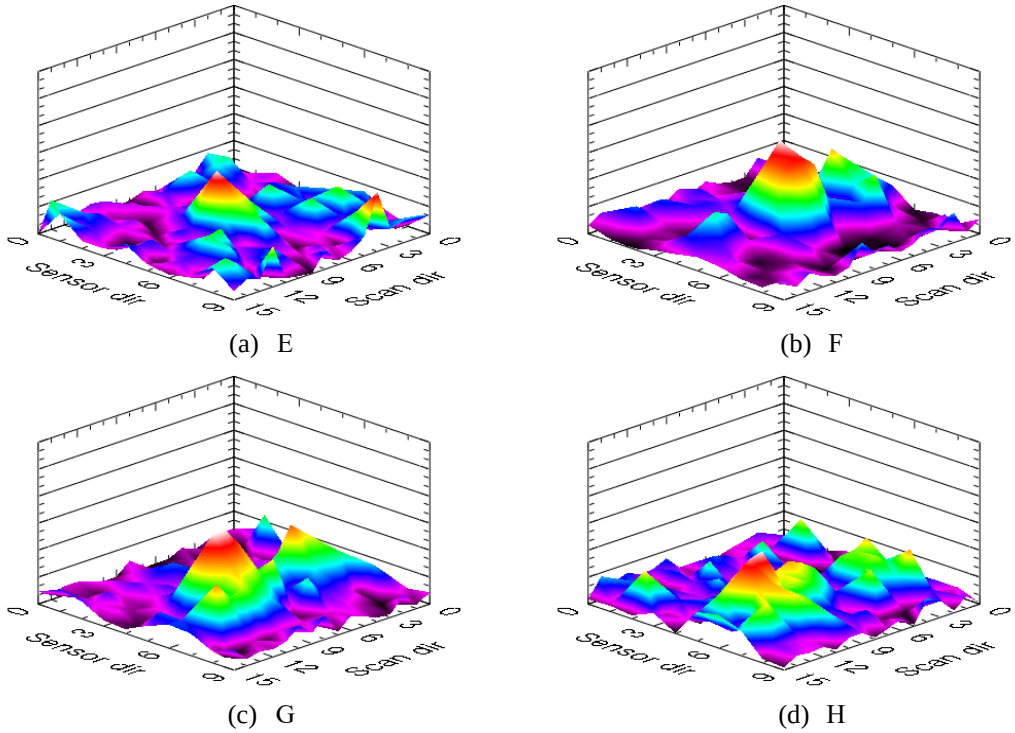
Fig. 3-47 Relationship between the depth of damage and the phase in FW

Fig.3-49은 슬릿(Fig.3-4) 시험편을 결함의 길이에 따라, 절대값 총합이 선형적으로 증가하는 관계를 나타낸다. 이러한 관계로부터 식 (29)로 표현되는 결함 길이 추정식을 도출할 수 있었다. Fig.3-50은 식 (29)에 의하여 추정한 결함의 길이를 실제 깊이와 비교한 결과를 나타낸다. 전체적으로 1.3mm의 표준편차로 균열 깊이를 정량 평가할 수 있었다.

$$L = 0.0008 \times S + 0.0236 \tag{29}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) E (b) F

(c) G (d) H

Fig. 3-48 Data processing area for estimating the depth of damage in Slit specimen

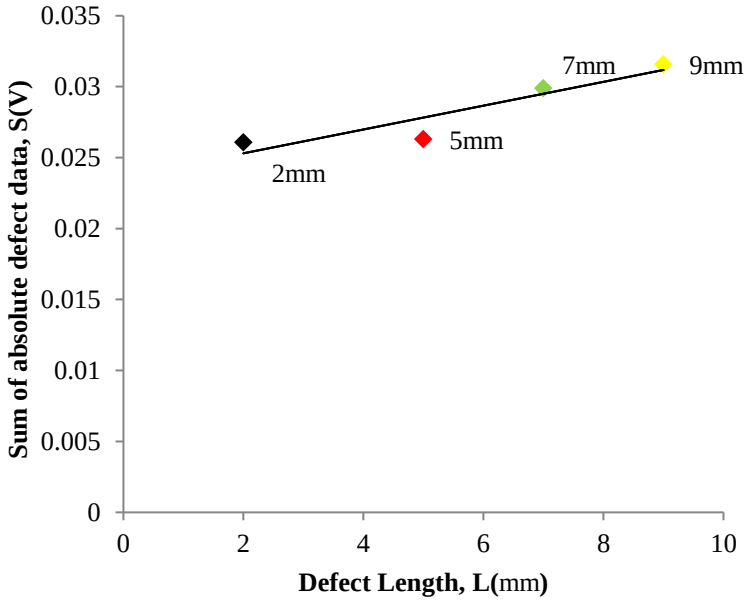


Fig. 3-49 Relationship between the Length of damage and the sum of absolute in Slit

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

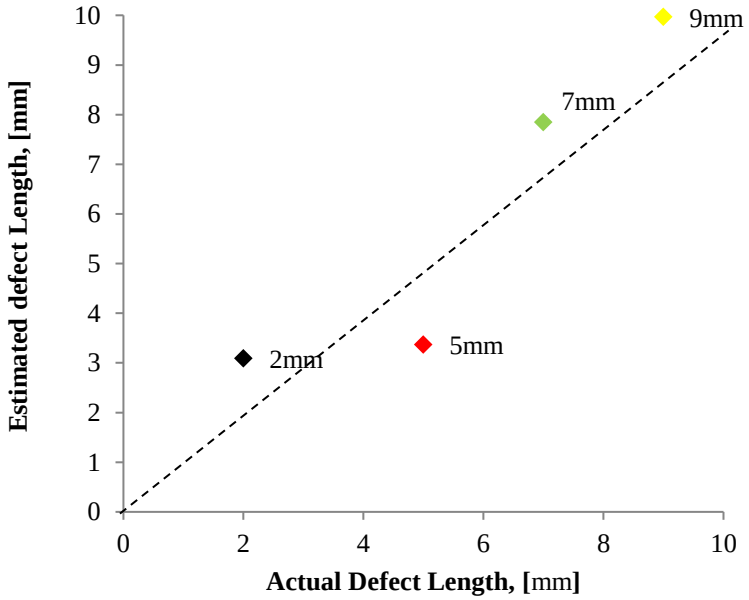


Fig. 3-50 Length estimation result in Slit

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig.3-51은 각 시험편의 결함에 대한 위상차값의 결과이다. FBH는 4-20%, 40%, 60%, 80%, 100% 편저공에 해당하고 10% ID 및 20% OD는 분리하였다. 편마모 및 테이퍼형 마모의 경우 서로 다른 형태임에도 불구하고 깊이에 따른 위상차가 차이가 없었다. 편저공 시험편의 4-20%, 40%, 60%, 80%, 100% 편저공은 깊이가 증가함에 따라 위상차가 증가하였다. 10% ID의 경우 100% 편저공과 가장 근접한 값을 나타내었다. 또한 깊이가 같은 20% OD와 20% 편저공의 위상차값이 차이가 없음을 알 수 있다. 슬릿 시험편의 경우 모두 (-)값을 가졌고 위상차값에 변화가 적었다. 그 결과 마모 형태, 편저공, 슬릿 결함을 구분할 수 있다.

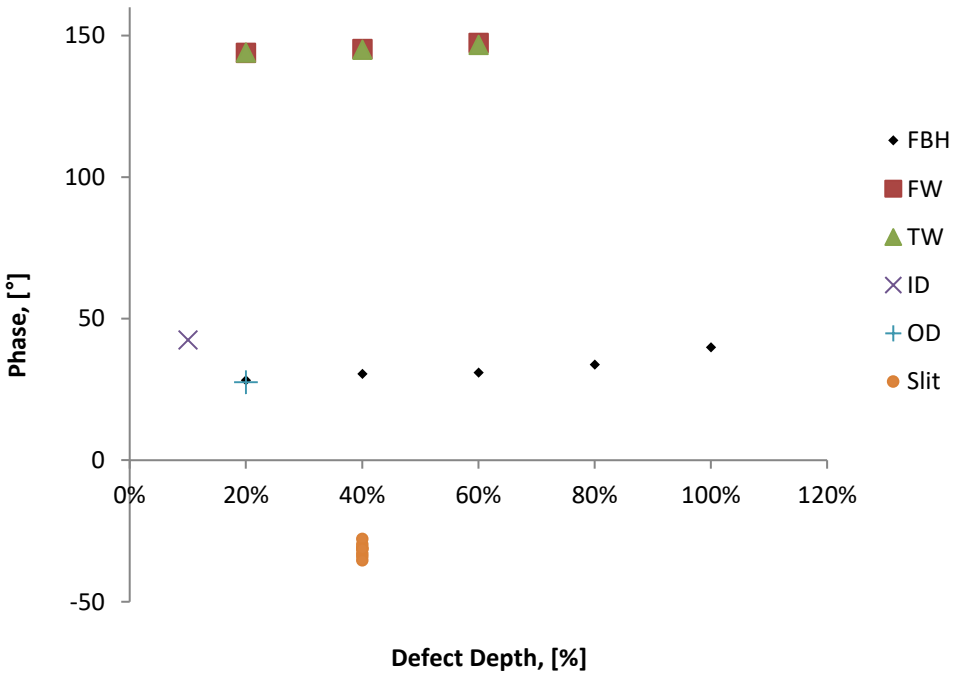


Fig. 3-51 Relative depth and phase on all specimen

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 결론

따라서, 본 연구에서는 전열관에 유도전류를 인가하기 위한 보빈 코일을 자원뿐 아니라 센서로도 활용하는 새로운 형태의 보빈형 자기카메라를 개발하였다. 보빈 코일에 의하여 결함유무를 판정하면서 리사쥬선도를 도시한다. 또한, Solid-State Integrated Hall Sensor Arrays에 의하여 결함의 존재, 형상 및 크기에 기인한 교번자계의 분포를 측정하여 영상화한다. 그리고, 리사쥬선도와 교번자계 분포를 해석하여 결함의 위치, 종류, 형상 및 크기를 정량적으로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

자계분포를 차분해석(ΔV), 푸리에해석(V_{FFT}), 가버해석(V_{Gabor}), 경향제거해석(V_{Dtrd}), 절대차분해석 ($|\Delta V|$), 절대푸리에해석($|V_{FFT}|$), 절대가버해석($|V_{Gabor}|$), 절대경향제거해석($|V_{Dtrd}|$), 절대차분푸리에해석($|V_{FFT}|$), 절대차분가버해석($|\Delta V_{Gabor}|$), 절대차분경향제거해석($|\Delta V_{Dtrd}|$)의 총 11개의 해석법으로 표현한 결과를 비교한 결과, 등고선으로 표현된 자계분포에서는 특히, 차분해석(ΔV)과 경향제거해석(V_{Dtrd})가 결함을 명확하게 지시하였다. 또한, 워터폴 표현의 경우, 절대차분해석($|\Delta V|$)과 절대경향제거해석($|V_{Dtrd}|$)이 유효하였다. 이러한 해석에서 결함의 형태 및 위치, 개수를 추정할 수 있었다.

여자코일을 센서로 활용하여 결함을 검출할 때 10~50kHz가 적합한 여자주파수이다. 또한, 환형배열 홀센서에 의하여 취득한 자계분포에 의하여 결함을 검출할 때에는 10~30kHz의 주파수가 적합하다. 입력전류는 100mA보다 200mA 및 300mA의 경우와 같이 높은 여자전류의 입력에 의하여 보다 명확하게 결함정보를 지시할 수 있다.

10% ID 그루브, 20% OD 그루브, TSP, 4-FBH을 포함한 20% 이상의 깊이를 가지는 FBH를 검출할 수 있었다. 또한, 깊이 20%, 40%, 60%인 TW 및 FW도 검출할 수 있다. 길이 2mm 이상의 축방향 슬릿결함은 검출할 수 있으나, 길이 2~9mm인 원호방향 슬릿결함은 검출할 수 없었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

코일센서에 의한 X값과 Y값, 자계분포에 의한 Max값에서 피크를 검출하면 슬릿결함을 제외한 결함의 유무와 중심위치를 자동으로 지시할 수 있다. TSP는 X 및 Y에서 음의 값을 가지므로 TSP임을 알 수 있다. 검출된 지점에서 Max, Max5, Max10, Avr의 차이를 비교하면, 경사가 없는 경우 결함의 원호방향 각도를 추정할 수 있다. 그러나 경사가 있는 경우 각도를 추정할 수 없다. 또한 코일센서의 위상신호를 분석하여 마모형 결함, 편저공, 슬릿 결함을 구분할 수 있다.

홀센서의 정량평가를 통해서 각 결함의 깊이를 추정할 수 있다. 그 결과 편저공 결함에서 0.4mm, 테이퍼형 마모에서 0.34mm, 편마모에서 0.28mm, 슬릿 결함에서 축방향에 해당하는 결함 네 개에 대하여 1.3mm의 표준편차를 가진다.

여자코일의 경우 결함의 형상이나 원호방향의 결함이 구분 또는 시각적으로 표현되기 어렵다. 그러나 홀센서 의하여 10% ID, 20% OD 그루브 TSP와 같은 환형 결함, 4-20% FBH와 같은 원호방향으로 동위치상에 존재하는 결함의 존재를 쉽게 파악할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

REFERENCE

[1] EPRI, “EPRI Feedwater Heater Maintenance Guide”, EPRI NP 1003470, 2002

[2] 영광원자력 1호기 제2주기 3차 가동중검사(증기발생기 세관 와전류 검사) 최종보고서, 한국전력공사, 2001

[3] G. Lafontaine, et al. “New Generation ECT Array Probe and System as High Speed Alternative to Rotating Probes”, 18th Annual EPRI SG NDE Workshop, 1999

[4] 강부균, “전열관 비파괴검사를 위한 실린더형 자기카메라 개발”, 조선대학교 대학원 석사학위 논문, 2017

[5] “자기센서어레이” 특허청, 2010.4, 10-956164

[6] 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.

[7] 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

[8] 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

[9] Jungmin Kim, Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Minhhuy Le and Changhyun 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.

[10] 이진이, 이재선, 신기수, “강선 구조물 결함 탐상 및 평가”, 군사과학연구, 제4권 제1호, pp.61-70, 2010.

[11] 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

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

arrays", International Journal of Applied Electromagnetics Mechanics, 45, pp.747-753 , 2014.

[12] 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.

[13]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.

[14] J. C. Scully, "The theory of stress corrosion cracking in alloys," Anti-Corrosion Methods and Materials, vol. 19, pp. 5-10, 1972.

[15] J. Galvele, "A stress corrosion cracking mechanism based on surface mobility," Corrosion Science, vol. 27, pp. 1-33, 1987.

[16] K. Sieradzki and R. C. Newman, "Stress-corrosion cracking," Journal of Physics and Chemistry of Solids, vol. 48, pp. 1101-1113, 1987.

Collection @ chosun