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]I804:24011-200000266639

2018年 2月
碩士學位 論文

# 블리드에어덕트의 自動缺陷探傷에 관한 研究

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

王 多 斌

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 블리드에어덕트의 自動缺陷探傷에 관한 研究

Automatic Recognition of Defect
on the Bleed Air Duct

2018年 2月 23日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

王 多 斌



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 블리드에어덕트의 自動缺陷探傷에 관한 研究

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

王 多 斌



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 王多斌의 碩士學位論文을 認准함

委員長　　朝鮮大學校 敎授 高樂濬 (印)

委　員　　朝鮮大學校 敎授 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 1장 서 론 ..... 1

제 2장 원리 ..... 8

제 1절 보빈형 자기카메라에 의한 결함검출 ..... 8

제 2절 데이터표현 ..... 10

1. 차분해석 ..... 10

2. Detrend ..... 13

3. Fast Fourier Transform ..... 15

4. Gabor Transform ..... 18

제 3절 자동결함탐상 알고리즘 ..... 21

1. 용접신호 최소화 알고리즘 ..... 21

2. 자동 결함위치판정 알고리즘 ..... 25

제 4절 360° 커버리지 성능 평가 ..... 26

제 3장 실험 및 고찰 ..... 28

제 1절 시험편 ..... 28

제 2절 자기센서배열 및 여자코일 ..... 31

제 3절 실험결과 ..... 35

1. 주파수 실험 ..... 35

2. 각도실험 ..... 41

제 4절 360° 커버리지 평가 ..... 48

제 5절 결함 자동탐상 및 정량평가 ..... 65

제 4장 결 론 ..... 70



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 표목차

Table 3-1 Artificial crack size ..... 29



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 도목차

Fig. 1-1 Case of bleed air duct failure ..... 2
Fig. 1-2 Fractured surface of straight portion of the crack in the failed duct ..... 3
Fig. 1-3 The failed and undamaged duct assembly ..... 3
Fig. 1-4 Internal rotary inspection system ..... 4
Fig. 1-5 Motorized rotating pancake coil ..... 5
Fig. 1-6 Bobbin-type magnetic camera for BAD inspection ..... 6

Fig. 2-1 Crack inspection principle of bobbin-type magnetic camera ..... 9
Fig. 2-2 Normal data ..... 11
Fig. 2-3 Differential data processing ..... 12
Fig. 2-4 Backdata subtract processing ..... 12
Fig. 2-5 Principle of degrend data processing ..... 13
Fig. 2-6 Detrend data processing result (N=4) ..... 14
Fig. 2-7 Detrend data processing result (N=9) ..... 14
Fig. 2-8 Detrend data processing result (N=13) ..... 14
Fig. 2-9 Block diagram of FFT data processing ..... 16
Fig. 2-10 A sample of FFT data processing ..... 16
Fig. 2-11 A Sample of magnetic image with FFT data processing ..... 17
Fig. 2-12 Principles of FFT and Garbor transform data processing ..... 19
Fig. 2-13 Comparison of FFT and Garbor transform data processing results ..... 20
Fig. 2-14 Unmanned crack inspection algorithm ..... 21
Fig. 2-15 Gabor transform result and its absolute ..... 22
Fig. 2-16 Signal extraction of weld line, supporter and suspension ..... 23
Fig. 2-17 Unmanned crack inspection algorithm ..... 24
Fig. 2-18 Unmanned crack recognition algorithm 2 ..... 25

Fig. 3-1 Artificial cracks of BAD tube ..... 28



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3-2 Angular position of each artificial crack ..... 30
Fig. 3-3 Schematic and photograph of sensor ..... 31
Fig. 3-4 Excitation coil ..... 32
Fig. 3-5 Circumferential sensor array ..... 32
Fig. 3-6 Block diagram ..... 33
Fig. 3-7 Bleed air duct inspection system ..... 34
Fig. 3-8 Experimental result with 5kHz and 120mA of exciting current ..... 36
Fig. 3-9 Experimental result with 10kHz and 120mA of exciting current ..... 36
Fig. 3-10 Experimental result with 15kHz and 120mA of exciting current ..... 37
Fig. 3-11 Experimental result with 20kHz and 120mA of exciting current ..... 37
Fig. 3-12 Experimental result with 25kHz and 120mA of exciting current ..... 38
Fig. 3-13 Experimental result with 30kHz and 120mA of exciting current ..... 38
Fig. 3-14 Experimental result with 35kHz and 120mA of exciting current ..... 39
Fig. 3-15 Experimental result with 40kHz and 120mA of exciting current ..... 39
Fig. 3-16 Frequency response at #6 crack ..... 40
Fig. 3-17 Magnetic images with several data processing method ..... 42
Fig. 3-18 Differential processing images on the different scanning angle ..... 43
Fig. 3-19 Detrend processing images on the different scanning angle ..... 44
Fig. 3-20 FFT processing images on the different scanning angle ..... 45
Fig. 3-21 Gabor processing images on the different scanning angle ..... 46
Fig. 3-22 Absolute integrations according ot the scanning angle (#6, 10mm) ..... 47
Fig. 3-23 Experimental setup for 360° coverage performance ..... 49
Fig. 3-24 A photograph of rotation part ..... 49
Fig. 3-25 Relatibe positions of coil, sensor array and crack ..... 50
Fig. 3-26 Data acqiosotopm rage arpimd #3 and #10 ..... 50
Fig. 3-27 Diagram drawing process of 360° coverage performance ..... 52
Fig. 3-28 Distribution of $V_{FFT}$ according ot the relative distance between the sensor, coil and crack on the #3 ..... 53
Fig. 3-29 Relationship between absolute sum and distance (#3) ..... 54
Fig. 3-30 360° coverage performance with crack #3 ..... 56
Fig. 3-31 Average and minimum values in the 360° coverage performance at #3 ..... 57
Fig. 3-32 Distribution of $V_{FFT}$ according ot the relative distance between the sensor, coil and



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

crack on the #10 ..... 59
Fig. 3-33 Relationship between absolute sum and distance (#10) ..... 60
Fig. 3-34 360° coverage performance with crack #10 ..... 64
Fig. 3-35 Average and minimum values in the 360° coverage performance at #10 ..... 64
Fig. 3-36 Unmanned crack inspection result ..... 66
Fig. 3-37 Unmanned crack position recognition errors ..... 67
Fig. 3-38 Data processing area for estimating the crack length ..... 68
Fig. 3-39 Relationship between the crack length and the sum of absolute ..... 69
Fig. 3-40 Length estimation result ..... 69



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 기호 설명

| | |
|---|---|
| BAD | Bleed Air Duct |
| ECS | Environment Control System |
| GFRP | Glass Fiber Reinforced Plastic |
| IRIS | Internal Rotary Inspection System |
| MRPC | Motorized Rotating Pancake Coil |
| DC | Direct Current |
| AC | Alternating Current |
| GMR | Giant Magnetic Resistance |
| MR | Magnetic Resistance |
| HPF | High Pass Filter |
| RMS | Root-Mean-Square |
| FFT | Fast Fourier Transform |
| S/N | Signal-to-Noise ratio |
| G | Gabor transform |
| Max | Maximum value of the differential RMS of Hall voltage to a circular arc Direction [V/mm] |
| $X_C$ | Central location of Crack |
| ABS | Acrylonitrile-Butadiene-Styrene |
| I/O | Input/Output unit |
| S | Sum of absolute of crack data |
| Min | Minimun of 360coverage data |
| V | Hall Voltage [V] |
| L | Length of Crack [mm] |



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 아래 첨자

| | |
|---|---|
| CVRG | Coverage |
| AVR | Average of crack data |
| DT | Detrend |
| S | Sum of absolute of crack data |
| C | Crack |



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# ABSTRACT

## Automatic Recognition of Defect on the Bleed Air Duct

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

In this paper, the unmanned recognition algorithm of defect on the bleed air duct and 360° coverage performance of non-destructive inspection system composed of bobbin coil and annular array magnetic sensor is reported. When an alternating current is applied to the bobbin coil, an induced current is generated in the direction of the arc of the specimen. The induction current is distorted by the crack generated in the circumferential direction of the specimen, and eddy currents are generated at both ends of the defect. Thus, the time-varying magnetic field strength in the radial direction changes at both ends of the defect. On the other hand, the Hall sensors are arranged at intervals of 8.18 degrees. Therefore, if the crack passes between the sensor and the sensor, the defect detection capability may be degraded. In this study, the relationship between the spatial resolution of the sensor and the 360 degree coverage performance was experimentally investigated while turning the specimen at 0 degree intervals. The specimen is a titanium bleed air duct with an inner diameter of 38 mm and a thickness of 0.45 mm.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 제 1장 서 론

블리드에어덕트(BAD, bleed air duct)는 엔진의 열을 재활용하여 동체의 얼음을 제거하거나, 항공기 조종석의 난방 및 가압에 활용하기 위한 부품이다. BAD는 항공기의 제한된 공간 내에서의 효율적인 배치 및 분기 등을 위하여 복잡한 구조를 가진다. 또한, 공기역학적 특성과 함께 팽창과 압축 및 공간적 배치를 고려하여, 일부 서스펜션 구조와 용접부를 포함한다. 한편, 항공기의 운영 중에 BAD는 고온 및 상온과 같은 주기적인 부하에 노출된다. 그리고, 고온 고압의 가스의 흐름에 따른 진동을 동반하므로 균열의 발생 및 전파가 용이하다.

한편, 환경제어시스템(ECS, environment control system)의 필수 구성 요소인 BAD가 고장이 나면, 연료 라인이나 배선이 손상될 수 있다. 또한, 항공기에서 덮개 패널이 열리거나, 조종실 및 항공 전자 시스템의 에어컨이 작동하지 않아 비행 안전이 손상 될 수 있다. 실제로 지난 10여 년 간 제트 전투기의 BAD에서 여러 번의 고장 사례가 보고된 바 있다. 모든 파손은 미익에 위치한 BAD 튜브의 중간부근에서 발생하였으며, 모든 결함은 용접부에 인접한 균열과 깊은 연관성을 가진다. Fig. 1-1은 F-5 전투기에서 발생한 BAD 파손 사례를 나타낸다 [1]. 파손 당시, 비행 중 엔진 rpm은 0으로 표시되었고, 조종사는 조종실 동체 뒤쪽의 배면 커버(dorsal cover)가 없어져 심한 진동을 인지하였다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

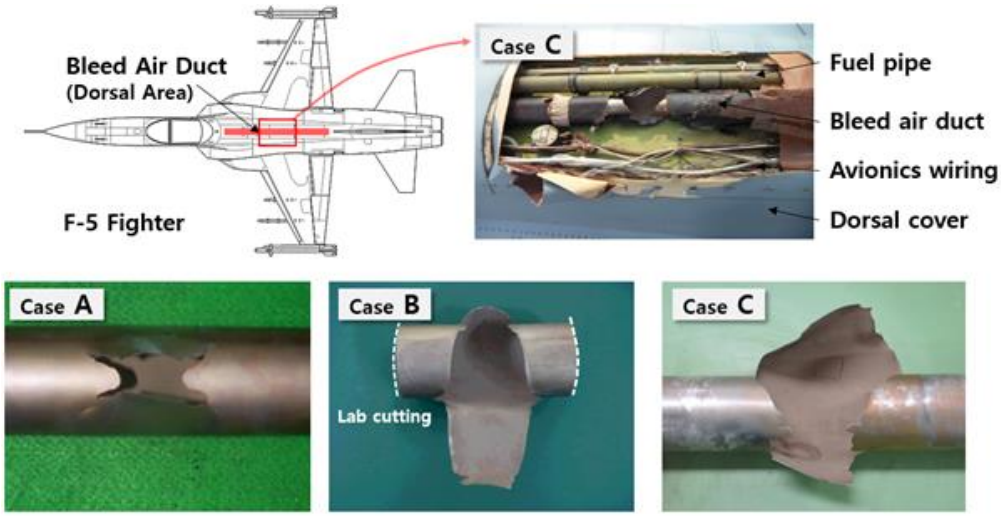



**Fig. 1-1 Case of bleed air duct failure**

Fig. 1-1에 나타낸 바와 같이 균열은 X자 형태로서 직선 중앙 부분에서 시작되었으며, 이후 나선형으로 갈라졌다. 이런 종류의 X자 형태의 균열은 동압력에 의한 BAD 구동 불량의 특성이다 [2]. BAD는 높은 강도 대 중량비, 내부식성, 성형성 및 적절한 기계적 성질을 고려하여 티타늄을 사용한다 [3]. 상업적으로 순수한 티타늄은 주로 205℃에서의 강도와 315℃에서의 내산화성을 요구하는 부품에 사용되는 공기 분배 라인에 적용된다. 티타늄 BAD의 고장은 용접부에 인접한 균열과 밀접한 관계가 있다는 것이 보고된 바 있다 [4, 5]. Fig. 1-2 [1]는 X자 형태의 균열을 분석한 결과를 나타낸다. 초기균열을 Fig. 1-2(a) [1]에서 나타낸 바와 같이 연성파괴영역으로 정의하였을 경우, 상기 Fig. 1-1에서 Case A, B, C의 초기균열의 길이는 각각 31, 29, 28mm이다 [1].



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

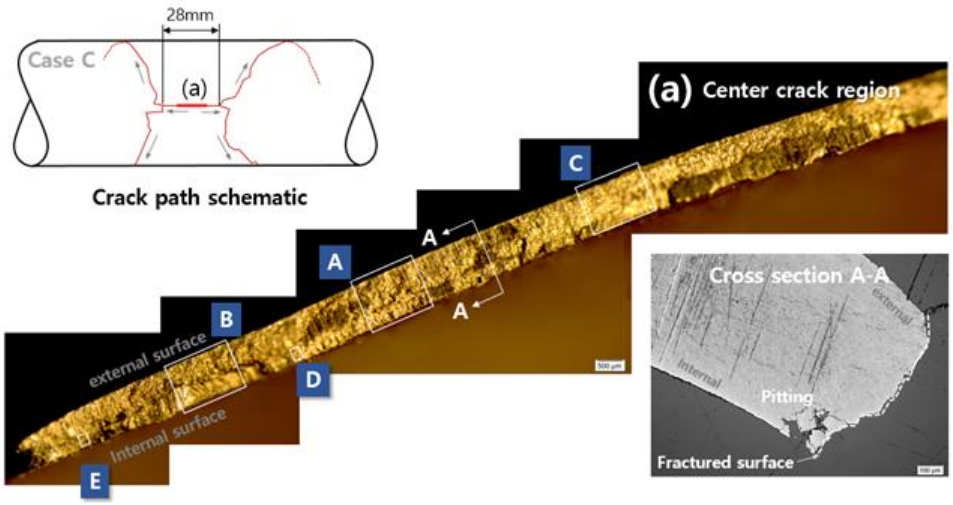



**Fig. 1-2 Fractured surface of straight portion of the crack in the failed duct**

한편, BAD는 효율적인 열전달과 파손시 인접한 구조물에의 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 1-3 [1]에 나타낸 바와 같이 유리섬유강화플라스틱(GFRP, glass fiber reinforced plastic)으로 둘러싼 형태를 가진다. 따라서, 검사는 해당 GFRP 피복을 제거하지 않고 수행해야 한다.

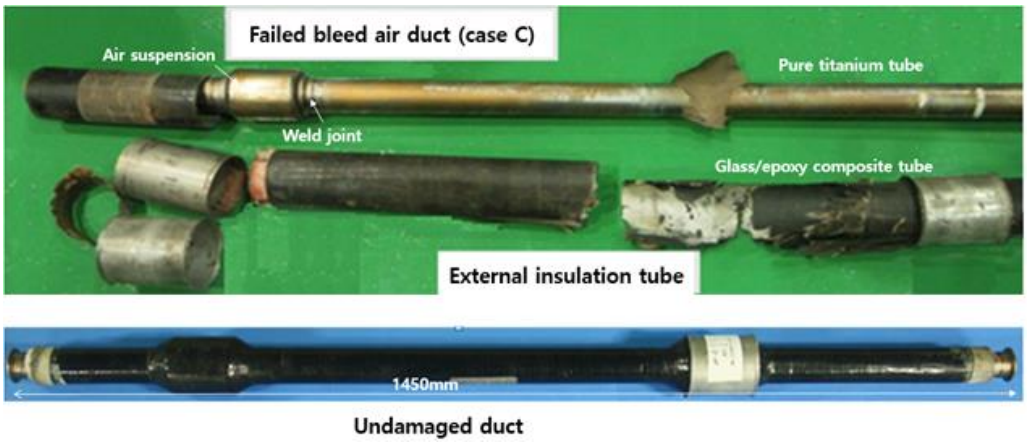



**Fig. 1-3 The failed and undamaged duct assembly**

GFRP 피복을 제거하지 않은 상태에서 BAD를 검사할 수 있는 수단으로서, 회



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전형 초음파(IRIS, internal rotary inspection system)와 회전형 와전류(MRPC, motorized rotating pancake coil)의 적용을 고려할 수 있다. IRIS는 Fig. 1-4 [6]에 나타낸 바와 같이 배관 내부에 회전하는 초음파센서를 설치하여 전진시키면서 연속적인 신호를 측정함으로서, 배관 내부의 초음파 C-scan 영상을 획득하는 시스템이다 [6]. 높은 공간분해능을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 접촉 매질이 필요하고, 나선형으로 이송하기 위한 정밀 스캔 장치가 구비되어야 하며, 검사 시간이 길다는 단점을 가지고 있다. MRPC(Fig. 1-5 [7])는 IRIS와 마찬가지로 나선형으로 회전 · 전진하는 센서에 의하여 와전류 C-scan 영상을 얻을 수 있다 [7]. 그러나, 검사시간이 길고, 접촉식 센서로서 소모품이 지속적으로 소요되며, BAD의 서스펜션과 같은 불연속면을 포함한 배관 내면의 결함을 검출하기 곤란하다는 문제는 한계로 인식된다.

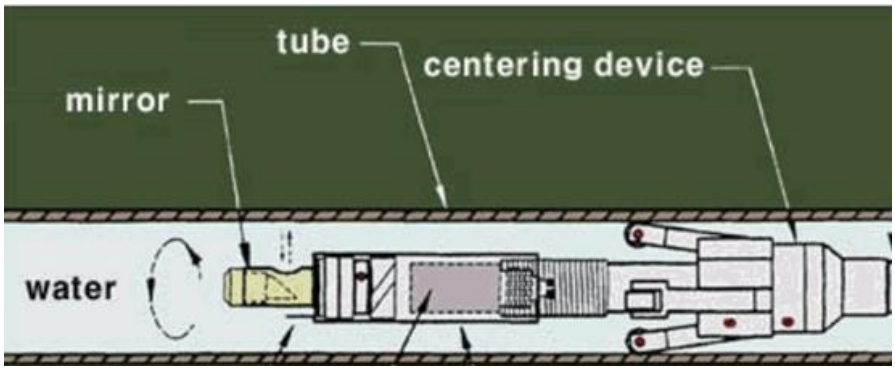



**Fig. 1-4 Internal rotary inspection system**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

**Fig. 1-5 Motorized rotating pancake coil**

한편, 티타늄 재질의 박막구조에서 결함검출능이 우수한 와전류 탐상법의 장점을 활용하면서, 용접부 및 서스펜션과 같은 불연속면을 가지는 BAD의 비파괴검사를 위한 시스템이 개발 및 보고된 바 있다 [8]. 해당 연구에서는 용접부와 같은 불연속면에서 센서를 보호하면서 lift-off의 감소를 최소화하기 위하여 근접장 와전류 탐상법을 활용하였다. 근접장 와전류에 의한 효율적인 유도전류의 인가 및 결함의 존재에 기인한 전자기장 분포를 측정하기 위하여, 여자코일, 센서배열, 센서기구물 및 신호처리회로로 구성하였다. 또한, 검사 정밀도를 향상시키기 위하여 자동이송기구를 제작하였으며, 상술한 센서부와 일체화하여 BAD 내부의 와전류 분포를 측정, 영상화 및 해석할 수 있도록 하였다. 그리고, 이들 하드웨어를 운용할 수 있는 측정 및 해석용 소프트웨어를 개발하였으며, 5mm 이상의 축방향 균열을 탐지할 수 있었다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

**Fig. 1-6 Bobbin-type magnetic camera for BAD inspection**

하지만, 상기 보빈형 자기카메라에 의한 BAD의 결함 검출은 작업자에 의한 판정이 필수적으로서, 숙련도에 따라 결함 검출 및 인지가 상이해질 수 있다. 또한, BAD의 결함이 용접부 인근에 위치한 경우에는 결함 검출이 곤란하므로, 이러한 한계를 극복해야 한다. 한편, 축방향의 균열성 결함이 센서와 센서 사이에 위치할 경우, 결함의 검출 성능이 저하될 수 있으므로, 360도 커버리지 성능을 제시해야 한다.

따라서, 본 연구는 보빈형 자기카메라에 의하여 BAD 용접부 인근의 결함 검출을 포함하는 결함 자동판별 알고리즘을 제안하고, 360도 커버리지 성능을 제시하는 것을 목적으로 한다.

본 논문은 총 4장으로 구성된다. 제 1장은 서론이다. 제 2장은 블리드에어덕트의 균열을 검출하기 위한 보빈형 자기카메라의 이론적 배경과 함께, 데이터 표현기



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

법, 자동결함탐상 알고리즘, 360도 커버리지 성능 평가법에 대하여 설명한다. 제 3장은 본 연구를 통하여 제안된 자동결함추출 알고리즘과 360도 커버리지 성능평가 결과를 보고한다. 제 4장은 결론이다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 제 2장 원리

## 제 1절 보빈형 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[9]. 또한, 상자성체 금속의 경우에는 도전율을 고려하여 AC형 자원을 인가한다[10]. 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, Hall 센서 및 코일이 사용될 수 있다 [11-13]. 또한, 전자기장 분포를 측정할 경우, 측정시간 단축 및 공간분해능 향상을 위하여 자기센서를 선형, 보빈형, 면적형 및 원통형으로 배열하는 방법이 개발되어 왔다 [14-16]. 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 필터가 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.

BAD의 검사를 위한 보빈형 자기카메라는 Fig. 2-1 [8]과 같이 자원으로 내삽형 코일을 사용한다[8]. 내삽형 코일에 교류전원을 입력하면, 시험편인 티타늄 배관에



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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 [17].

따라서, 배관에 결함이 없을 때 발생하는 축방향(z-방향) 시변자계는 자기센서에 큰 영향을 미치지 않게 된다 [18]. 그러나, 배관에 결함이 존재할 때에는 유도전류가 배관의 표면을 따라 왜곡되며, 결과적으로 반지름방향의 시변자계가 발생한다. 따라서, 보빈형으로 배열된 홀센서에 의하여 결함의 존재 및 크기에 기인한 시변자계의 분포를 정량적으로 측정한다 [19].

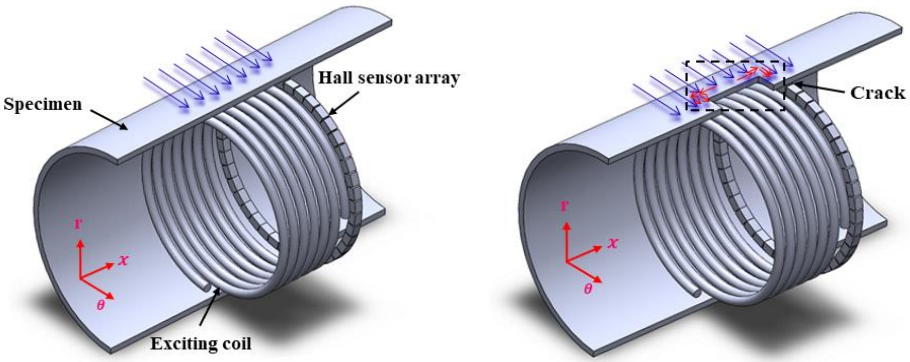



**Fig. 2-1 Crack inspection principle of bobbin-type magnetic camera**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 제 2절 데이터표현

### 1. 차분해석

보빈형 자기카메라는 홀센서를 환형으로 배열하여 반지름 방향의 성분을 가진 시변자계를 측정한다. 홀센서는 식 (1)에 표현한 바와 같이 센서면에 수직인 방향의 자속밀도($B\cos\theta$)에 비례하는 신호를 출력한다. sinωt는 시변자계임을 의미한다.

$$V_H = kBI\cos\theta \cdot \sin\omega t \tag{1}$$

여기에서 k, I는 홀상수 및 입력전류를 의미한다. 시변자계의 경우에는 RMS(root mean square) 회로에 의하여 식 (2)로 표현되는 진폭으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$V_S = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T kBI\cos\theta\sin\omega t^2\,dt} = \frac{1}{\sqrt{2}}kBI\cos\theta \tag{2}$$

Fig. 2-2는 보빈형 자기카메라를 활용한 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 식 (3)으로 표현되는 차분해석에 의하여 최소화할 수 있다. 여기에서 i와 j는 각각 축방향 스캔거리와 센서 번호를 나타낸다.

$$\Delta V(i,j) = V_S(i+1,j) - V_S(i,j) \tag{3}$$



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

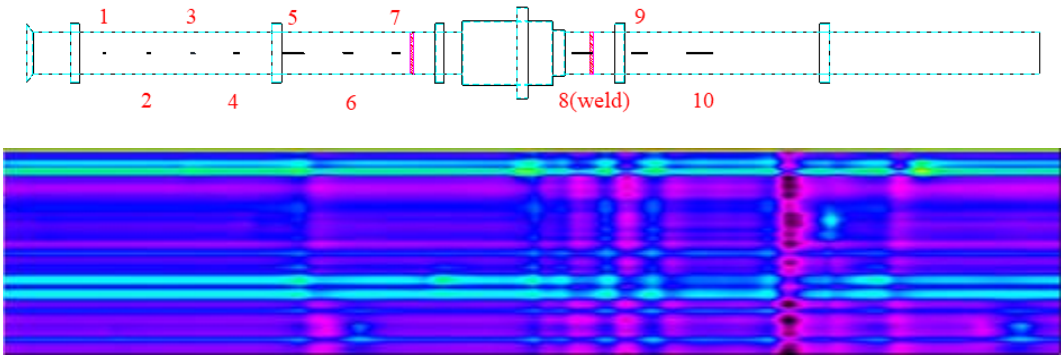



**Fig. 2-2 Normal data**

Fig. 2-3은 상기 식 (3)의 원리를 이용하여 Fig.2-2의 결과를 재해석한 것이다. 센서 상호의 물리적 특성 차이가 최소화됨으로서, 결함의 유무 및 위치, 나아가 결함의 크기까지 추정할 수 있다.

한편, 이러한 차분해석은 식 (4) 및 Fig. 2-4로 표현되는 배경 차분신호처리(backdata subtract processing)와는 큰 차이가 있다. 즉, 환형으로 배열된 각 센서의 검사 개시위치에서의 출력, $V_S(0,0)$을 기준으로 축방향으로 이동하면서 측정한 각각의 신호출력 $V_S(i,j)$의 차이를 지시함으로서, 홀센서 출력의 바이어스 오차를 제거하는 것이 배경 차분신호처리이다. 차분해석이 인접한 자계의 분포 차이를 지시하므로 바이어스 오차뿐 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.

$$V_b(i,j) = V_S(i,j) - V_S(0,0) \tag{4}$$



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

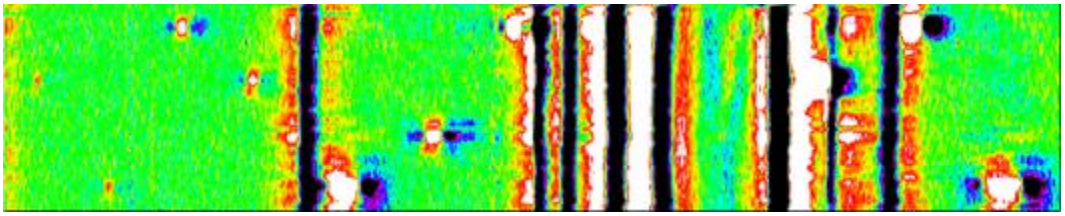


**Fig. 2-3 Differential data processing**

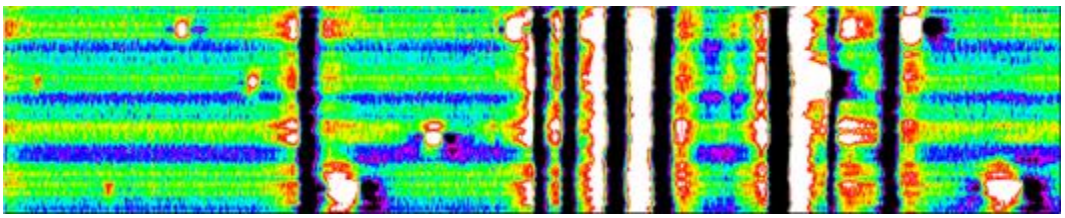


**Fig. 2-4 Backdata subtract processing**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 2. Detrend

상기 Fig. 2-3 및 2-4의 차분해석과 차분신호처리 경우에는 결함 정보의 명확성 및 원 데이터의 보존 측면에서 서로 장단점을 교차 보유하고 있다. 본 절에서 설명하는 detrend 신호처리는 원 데이터의 보존기능과 함께 결함 정보의 명확성을 부여할 수 있는 신호처리기법 중 하나이다. detrend 신호처리는 식 (5)로 표현되는 이동평균을 이용하여 식 (6)과 같이 차분한다. 이러한 detrend 신호처리는 저대역통과필터의 기능과 함께 원 데이터의 경향을 그대로 반영하기 때문에 Fig. 2-6에 나타낸 바와 같이 결함 정보를 명확하게 전달하면서, 원 데이터의 경향도 반영할 수 있다. 하지만, 이동평균하는 폭에 따라 결함 정도의 명확성이 저하될 수 있다. Fig. 2-6은 N이 4의 경우이다. Fig. 2-7과 Fig. 2-8은 N을 9와 13로 설정하여 detrend 처리한 결과로서, N이 작을수록 명확한 결함신호를 얻을 수 있다. 반면에 N이 크면 전체적인 잡음 제거 효과를 얻을 수 있지만 원데이터의 왜곡이 심화된다. 본 연구에서는 결함의 정보를 자동으로 인식하는 것이 목적이므로, N을 4로 설정하였다.

$$V_{AVR}(i,j,N) = \frac{1}{N}\sum_{\tilde{\imath}=i-\frac{N}{2}}^{i-\frac{N}{2}} V_S(\tilde{\imath},j) \tag{5}$$

$$V_{DT}(i,j) = V_S(i,j) - V_{AVR}(i,j,N) \tag{6}$$

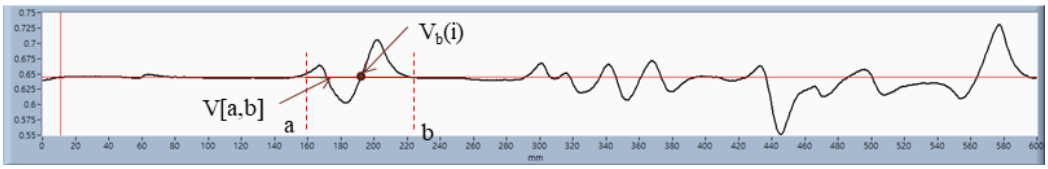



**Fig. 2-5 Principle of degrend data processing**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

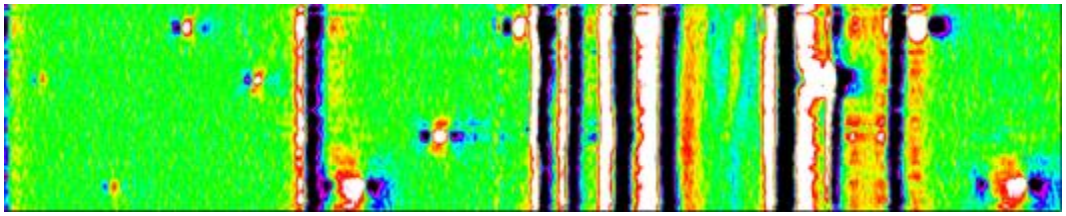


**Fig. 2-6 Detrend data processing result (N=4)**

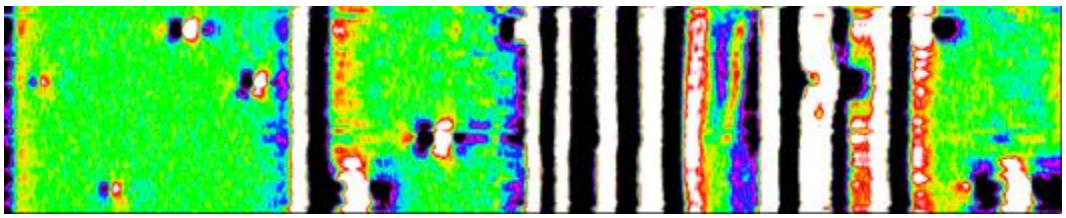


**Fig. 2-7 Detrend data processing result (N=9)**

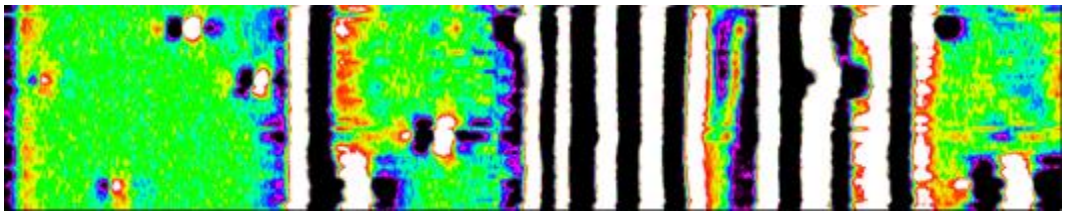


**Fig. 2-8 Detrend data processing result (N=13)**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

### 3. Fast Fourier Transform

푸리에변환(Fourier transform)은 시간에 대한 함수를, 함수를 구성하고 있는 주파수 성분으로 분해하는 작업이다. Fig. 2-2, 2-3, 2-4, 2-6, 2-7, 2-8에 나타낸 보빈형 자기카메라의 실험결과에서 종축은 거리를 나타낸다. 일정한 간격 또는 일정한 스캔 속도로 측정할 경우, 시간으로 환산할 수 있으므로 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. 식 (7)은 푸리에 변환의 예를 나타내며, 각가속도 ω가 주파수성분에 해당된다.

$$FT(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-j\omega x} dx \tag{7}$$

$$f(x) = inputsignal \tag{8}$$

Fig. 2-9와 Fig. 2-10은 FFT를 이용한 데이터처리에 관한 블록다이어그램 및 각 단계에서의 신호유형을 나타낸다. 먼저, 입력된 데이터를 FFT 해석함으로서, 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. 2-10의 좌측 상부의 신호가 좌측 하부의 신호로 바뀌어 S/N비가 향상된다. 실제로 Fig. 2-11은 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.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

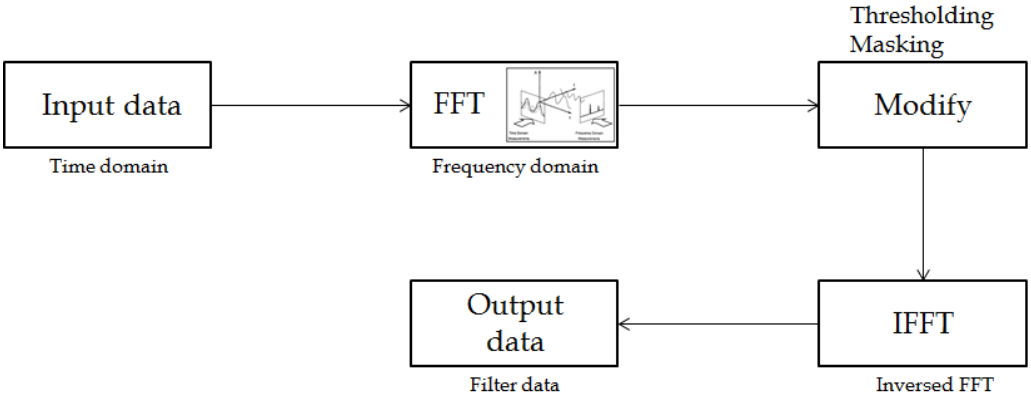



**Fig. 2-9 Block diagram of FFT data processing**

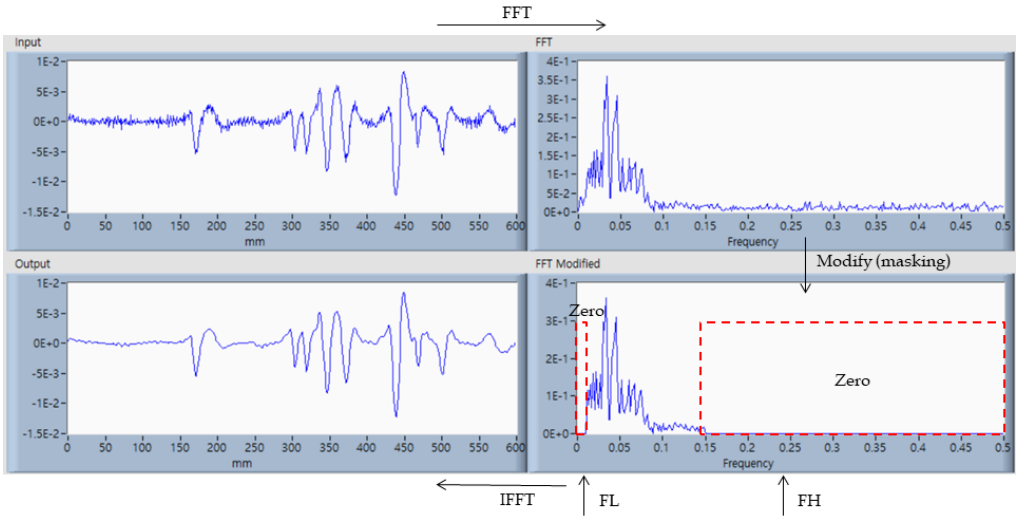



**Fig. 2-10 A sample of FFT data processing**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

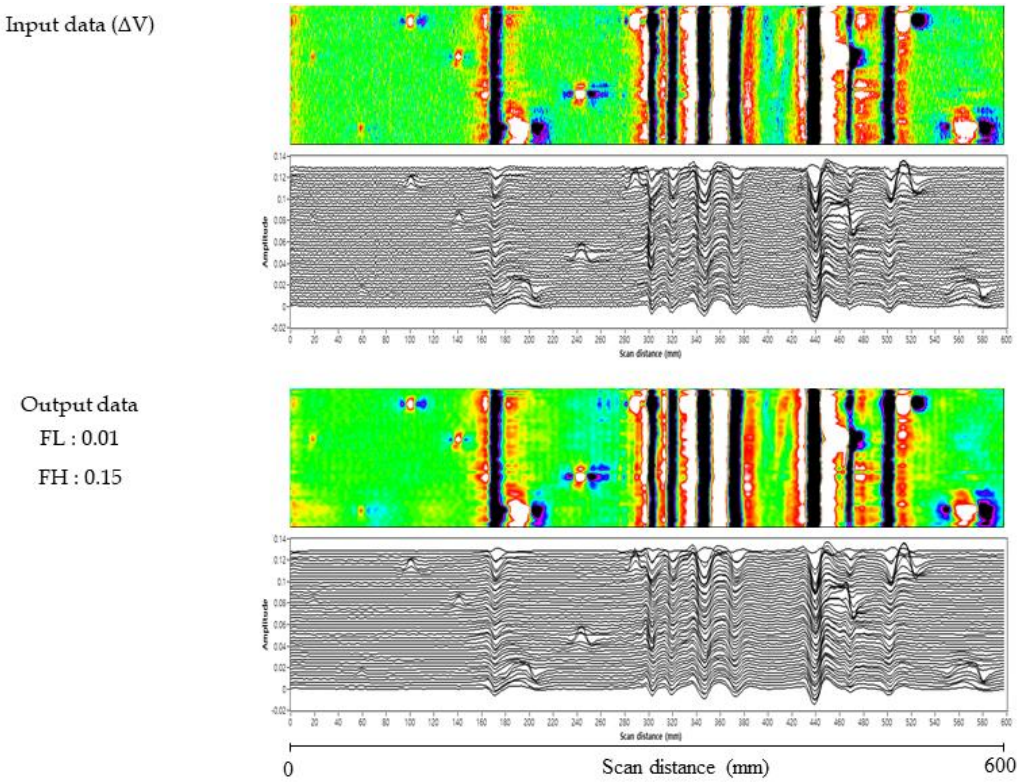



**Fig. 2-11 A Sample of magnetic image with FFT data processing**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 4. Gabor Transform

가버 변환(Garbor 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 식 (8)과 (9)에 나타낸 바와 같이 detrend와 유사하게 연속되는 특정부분에서 FFT 해석 및 특정 주파수의 weighting 기법이다.

$$G(\tau,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-\pi(x-\tau)^2} e^{-j\omega x} dx \tag{9}$$

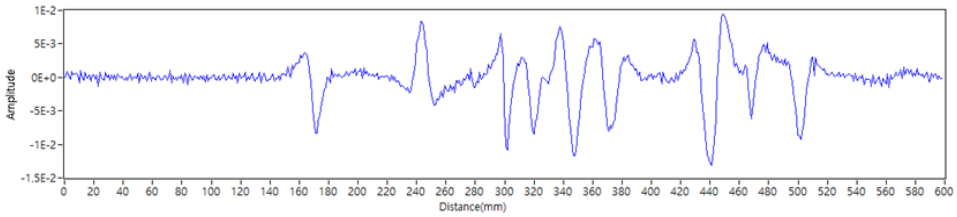
$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} G(\tau,\omega)\, e^{-j\omega x} d\tau dx \tag{10}$$

한 예로 Fig. 2-12는 원 데이터에 대한 FFT 해석 결과 및 가버 변환 결과를 나타낸다. Fig. 2-12(a)는 원 데이터로서 몇 가지 주파수가 시간별(거리별)로 불연속적으로 나타나고 있다. Fig. 2-12(b)는 상기 원 데이터 전체에 대한 FFT 해석 결과로서, 전체 데이터에 대한 해석 결과를 나타낸다. 따라서, 0~150mm 인근에서 나타나는 저주파 신호와 300~550mm 인근에서 나타나는 용접부신호를 포함한 고주파 신호에서 결함 신호만을 동일한 조건으로 추출하는 것은 비효율적이다. 반면에 Fig. 2-12(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 곱해줌으로서, 완만한 S/N비 향상 효과를 얻을 수 있다.

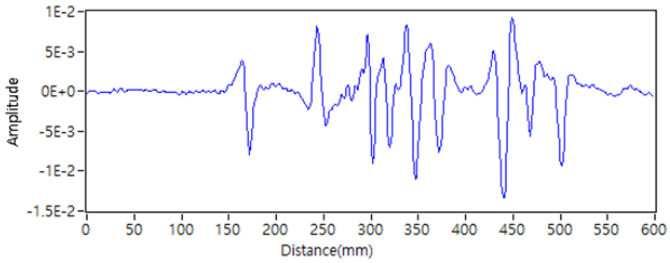


Collection @ chosun

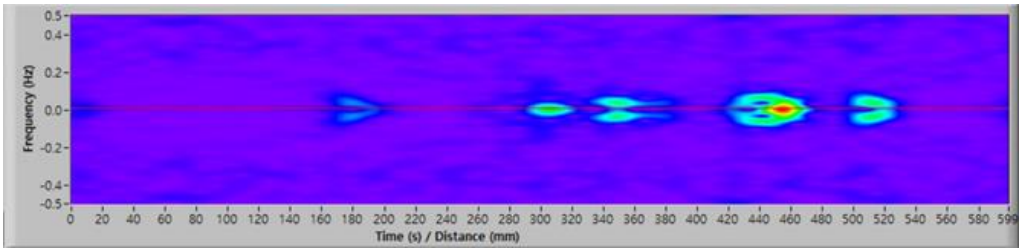
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY




(a) Original data




(b) FFT processing




(c) Gabor transform

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

Fig. 2-13은 보빈형 자기카메라에 의하여 측정한 소구경 배관 내벽의 전자기장 분포에 FFT 및 가버변환을 적용한 결과를 나타낸다. FFT 결과에서 주목할 점은 하부의 4개의 결함을 지시하는 전자기장의 왜곡 데이터에서 결함이 없는 영역(점선영역)에서 발생하는 주파수 신호가 완전히 제거되지 않았다는 점이다. 하지만 가버변환에서는 이러한 잡음이 제거되었다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

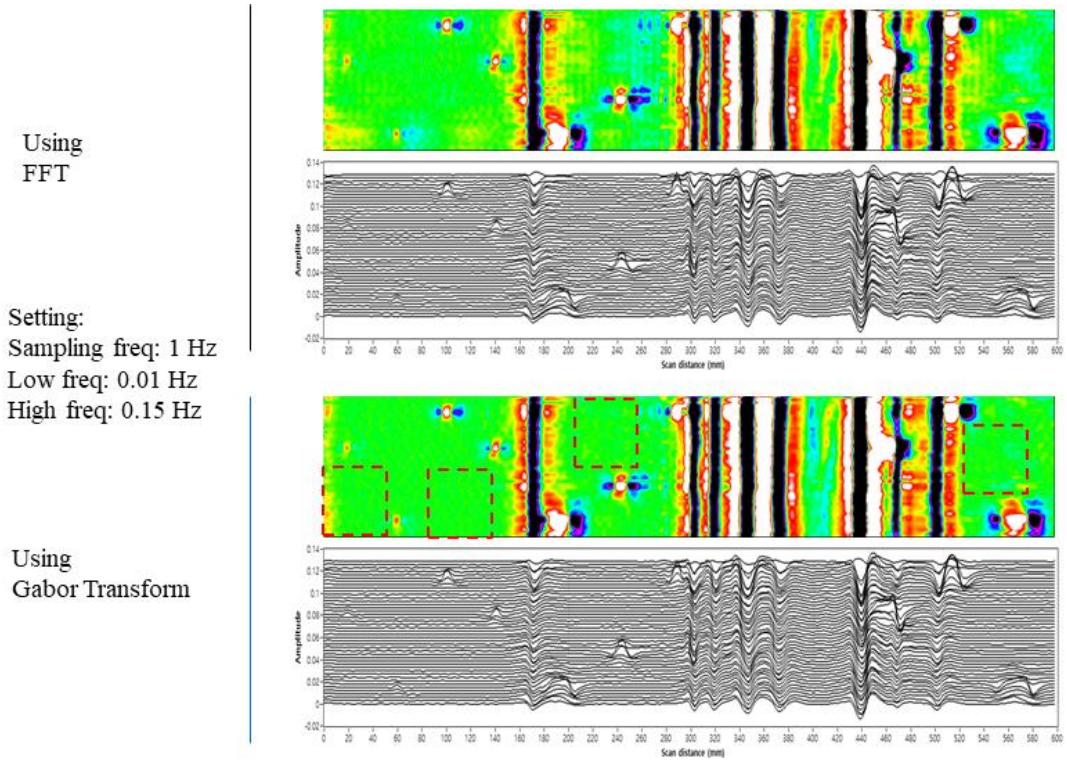



**Fig. 2-13 Comparison of FFT and Garbor transform data processing results**

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 기법에 의한 기법을 동시에 활용한다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 제 3절 자동결함탐상 알고리즘

## 1. 용접신호 최소화 알고리즘

Fig. 2-14는 서스펜션 및 용접선을 자동으로 추출하여, 해당 신호를 최소화하기 위한 용접신호 최소화 알고리즘과 자동 위치판정 알고리즘으로 구성되는 자동 결함탐상 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 해당 알고리즘은 전술한 네가지 데이터 표현기법 중에서 특히 차분해석과 가버 변환을 동시에 활용한다.

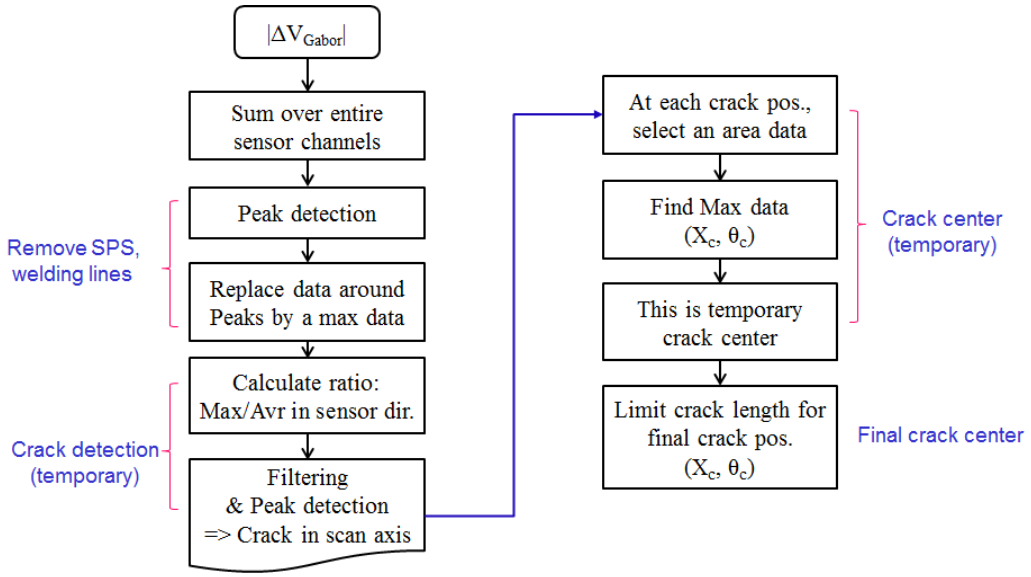



**Fig. 2-14 Unmanned crack inspection algorithm**

본 절에서는 특히 용접신호 최소화 알고리즘을 설명한다. 먼저, Fig. 2-15는 가버변환을 수행한 후, 차분해석에 의하여 표현한 결과(이하, $\Delta V_{Garbor}$)의 절대값 분포(이하, $|\Delta V_{Garbor}|$)를 나타낸다. $\Delta V_{Garbor}$에 의하면 작업자는 양의 값과 음의 값을 가지는 시변 자계에 의하여 결함 유무 및 위치를 판정할 수 있다. 또한, $|\Delta V_{Garbor}|$에 의하면 모든 데이터는 양의 값으로 표현될 수 있다. 지지대(support plate), 서스펜션(air suspension) 및 용접부(welding lines)는 결함신호와는 달리 환형 방향으로 연속된 높



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

은 시변자계강도를 나타낸다. 따라서, 이들 신호에 인접한 #5, #7, #8, #9의 결함을 판별하기 곤란하다.

따라서, 용접신호 최소화 알고리즘에서는 먼저 지지대, 서스펜션, 용접부의 위치를 자동으로 추출한다. Fig. 2-16에 나타낸 바와 같이 식 (11)으로 표현되는 환형으로 배열된 모든 센서의 $|\Delta V_{Garbor}|$ 값을 이동거리에 따라 표현하고, 임계값 0.004V 이상인 피크값을 추출한다.

$$\sum(i) = \sum_{j=1}^{No.Sensor(44)} |\Delta V_{Garbor}(i,j)| \tag{11}$$

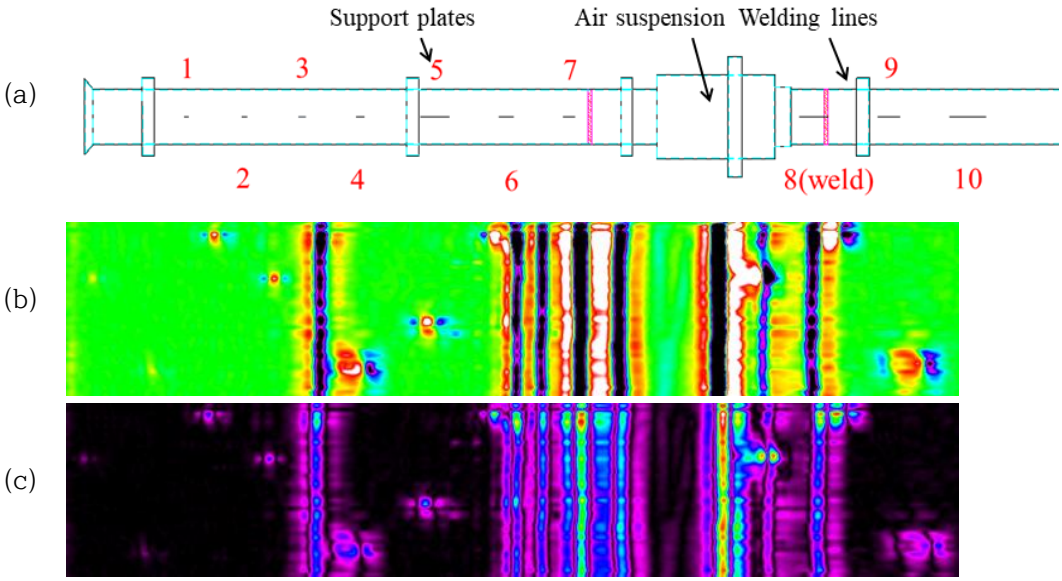



**Fig. 2-15 Gabor transform result and its absolute**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

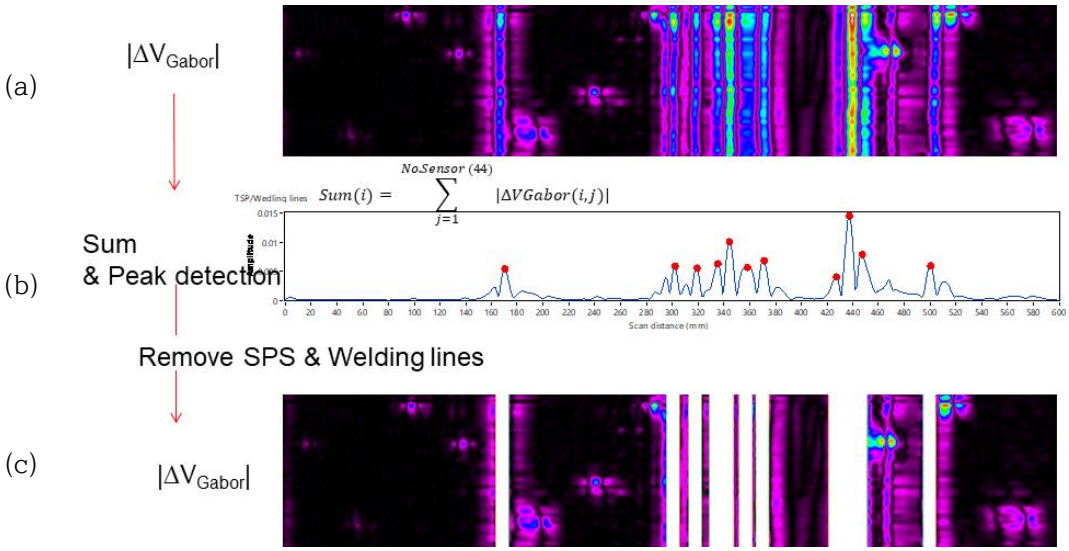



**Fig. 2-16 Signal extraction of weld line, supporter and suspension**

Fig. 2-17은 용접신호 최소화 알고리즘의 후처리과정을 나타낸다. 해당 피크값을 중심으로 전후 10mm의 전체 신호를 임의의 최대값(0.02V)으로 대체한다. 이러한 분포에서 환형으로 배열된 각 센서의 최대값((b) Max(i), 식 (12))과 평균값((c) Average(i), 식 (13))을 구한다. 또한, 식 (14)에 표현한 바와 같이 Max(i)와 Average(i)의 비를 이송거리에 따라 도시하면 Fig. 2-17(d)와 같이 지지대, 서스펜션, 용접부의 신호를 최소화할 수 있다. 또한, 결함 신호는 전체 센서의 평균값보다 크게 되어 결함의 추출이 용이하게 된다. 한편, Fig. 2-17(e)는 $|\Delta V_{Gabor}|$를 Average(i)로 나눈 값으로서 Fig. 2-15(b), Fig.2-15(c), Fig. 2-16(c)의 용접신호를 포함한 $|\Delta V_{Garbor}|$의 분포에 비하여 명확한 결함 검출 판독성을 획기적으로 향상시킬 수 있다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

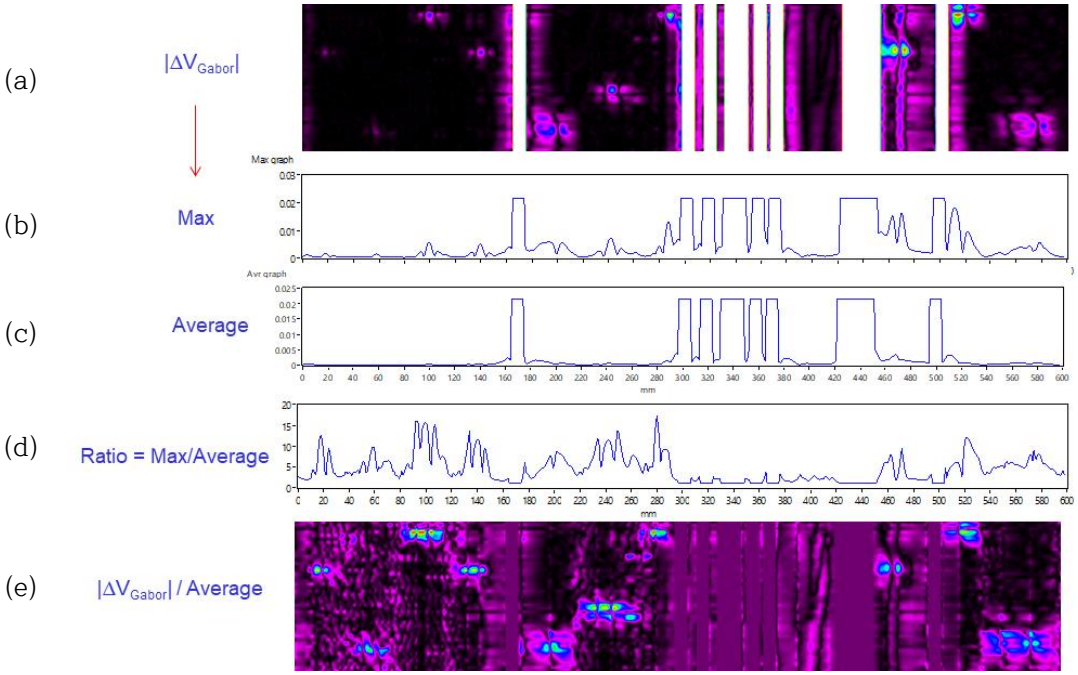



**Fig. 2-17 Unmanned crack inspection algorithm**

$$Max(i) = Max\left(|\Delta V_{Gabor}(i,j)|_{j=1:44}\right) \tag{12}$$

$$Average(i) = \frac{1}{44}\sum_{j=1}^{44}|\Delta V_{Garbor}(i,j)| \tag{13}$$

$$Ratio(i) = \frac{Max(i)}{Avrage(i)} \tag{14}$$



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 2. 자동 결함위치판정 알고리즘

Fig. 2-18은 용접신호 최소화 알고리즘을 적용한 결과를 활용한 자동 결함위치 판정 알고리즘의 적용예를 나타낸다. 식 (14)의 Ratio(i)의 분포에서 잡음에 기인한 고주파신호와 리프트오프의 변화에 기인한 저주파신호를 제거하여 축방향 스캔거리에 따른 결함의 중심위치($X_C$)를 추출하기 위하여 대역통과필터(BPF, band pass filter)를 적용한다. 본 연구에서는 15kHz의 주파수를 대역 통과하여, Fig. 2-18(b)의 결과를 얻었다. 피크값을 추출하면, 해당 위치에 결함이 위치한다. 다만, 결함의 길이가 긴 경우에는 BPF를 통과하더라도 결함의 양 선단에서 피크값이 검출될 수 있다. 따라서, 최대 결함길이인 25mm를 고려하여 30mm이내의 거리에 위치한 인접한 피크는 그 사이에 결함이 존재하는 것으로 판정(Fig. 2-18(c))하였다. 한편, Fig. 2-18(d)에 나타낸 바와 같이 각각의 피크위치에서 환형배열 자기센서의 출력($\Delta V_{Garbor}$)의 최대값의 위치를 추출하면, 환형방향의 결함위치($\theta_C$)를 지시할 수 있다.

이상의 알고리즘에 의하면, 용접신호를 최소화하고, 결함지시의 가독성을 최대화할 수 있으며, 결함의 위치($\theta_C$, $X_C$)를 자동으로 지시할 수 있다.

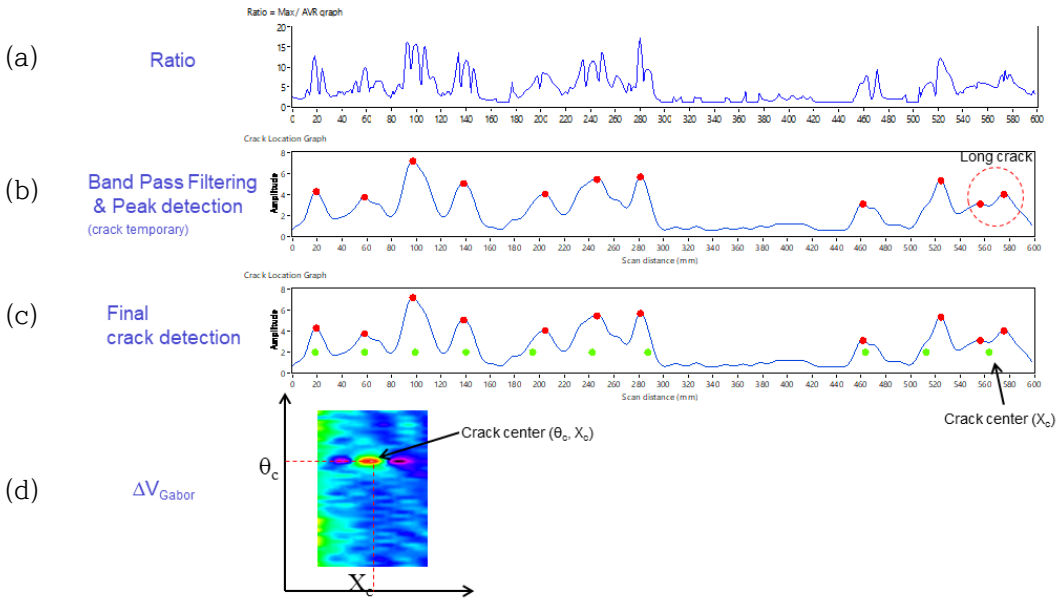



**Fig. 2-18 Unmanned crack recognition algorithm 2**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 제 4절 360° 커버리지 성능 평가

전술한 바와 같이 F-5 전투기에서 발생한 BAD 파손 사례에서는 균열은 X자 형태로서 축방향 균열이 나선형으로 갈라졌다 [1]. 이런 종류의 X자 형태의 균열은 동압력에 의한 BAD 구동 불량의 특성이다 [2]. 또한, 티타늄 BAD의 고장은 용접부에 인접한 균열과 밀접한 관계가 있다는 것이 보고된 바 있다 [4, 5].

한편, 축방향의 균열성 결함이 센서와 센서 사이에 위치할 경우, 결함의 검출 성능이 저하될 수 있으므로, 360° 커버리지 성능을 제시해야 한다. 이는 탐촉자 코일의 360° 원호방향 적용범위를 검증하는 것으로서, 배열형 탐촉자에 요구되는 여러 가지 성능 중에서 가장 중요한 성능 중 하나이다. 본 연구에서는 원호방향 360°를 검사하기 위하여 총 44개의 센서를 포함한 보빈형 자기카메라가 적용되었다. 이러한 구조에서는 환형으로 배열한 각 센서가 약 ±4.1° 의 영역을 분할하여 측정하게 된다. 따라서, 360° 커버리지 성능을 파악하기 위하여, 여유점을 가질 수 있도록 ±8.2° 의 영역에서 0.76° 간격으로 20~21개의 데이터를 취득하였다.

본 연구에서 적용한 360° 커버리지 성능을 평가하기 위한 방법은 결함위치에서 시험편을 원호방향으로 회전하면서 44개의 센서로부터 데이터를 취득한다. 각 센서의 최대값은 균열의 중심이 해당 센서의 중심과 일치하였을 때의 결과이다. 센서로부터 멀어질수록 신호의 크기가 작아진다. 한편, 각 센서의 물리적 특성에 기인하여 최대값이 동일하지 않고 차이가 있다. 따라서, 360° 커버리지 성능 평가에서는 식 (15)에 나타낸 바와 같이 정규화(normalizing)함으로서 상호 비교할 수 있도록 하였다. 즉, 각 채널에서 취득한 최대값($V_{Peak}(j)$)의 전후에서 취득한 출력값($V(j\pm\theta_{CVRG})$)을 $V_{Peak}(j)$로 나눈 백분율을 정규화($V_{Normal}(j\pm\theta_{CVRG})$하여 도시하였다.

$$V_{Normal}(j \pm \theta_{CVRG}) = \frac{V(\pm\theta_{CVRG})}{V(\theta_{Max})} \times 100\% \qquad (15)$$
$$intup : V(\theta), out\ \ put : V_{Nomal}(\theta_{CVRG})$$



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다음은 채널과 채널 사이의 가상 교차점을 형성시키기 위한 방법을 나타낸다. 전술한 바와 같이, 균열의 중심에서 약 ±8.2° 의 영역을 0.76° 간격으로 측정하여 취득한 20~21개의 데이터를 활용하여 360° 커버리지 성능을 평가한다. 이때, 인접한 센서의 중심점에서 정확하게 측정할 수 없다. 따라서, 식 (16)에 나타낸 바와 같이 새로운 교차점을 생성하였다.

$$V_{Cross}(\pm\theta_{CVRG}) = Max\left(V^{1}_{Normal}(\pm\theta_{CSRG} \pm 4.1°), V^{2}_{Normal}(\pm\theta_{CSRG} \pm 4.1°)\right) \quad (16)$$



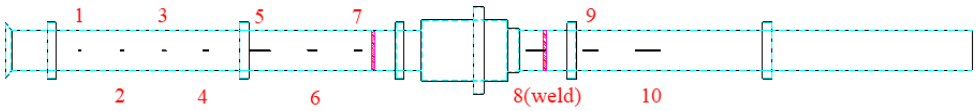
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

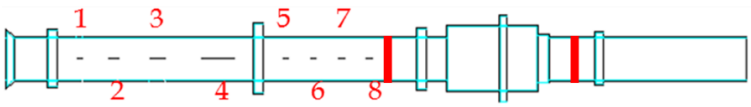
# 제 3장 실험 및 고찰

## 제 1절 시험편

Fig. 3-1은 근접장 보빈형 자기카메라에 의하여 BAD 용접부 인근의 결함 검출을 포함하는 결함 자동판별 알고리즘과 360도 커버리지 성능을 검증하기 위한 2개의 시험편을 나타낸다. 티타늄 재질의 길이가 각각 930mm, 667.6mm이며 내경 Φ38mm, 두께 0.45mm인 F-5E용 BAD에 관통형 슬릿을 방전 가공하였다. 각각의 슬릿형 균열은 폭 0.1mm이며, 길이는 축방향으로 3~30mm이다. 또한, 각각의 균열은 Fig. 3-2에 위치한 바와 같이 0~270° 의 위치에 가공하였다. Fig. 3-1 (a)는 #5의 좌측과 #9의 우측에는 서포터, #7의 좌측에는 용접부, #8의 좌측과 우측에는 서스펜션과 용접부가 존재하며 Fig. 3-1 (b)는 #5의 좌측에는 서포터, #8의 우측에는 용접부가 존재한다. Table 3-1은 각각의 배관에 가공된 총 10개, 8개의 인공균열의 길이, 폭, 깊이, 각도를 나타낸다.




(a) specimen 1




(b) specimen 2

**Fig. 3-1 Artificial cracks of BAD tube**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

**Table 3-1 Artificial crack size**

| No. | Length [mm] | Width [mm] | Depth | Axial distance on the scanning range [mm] | Angle [°] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 0.1 | Through hole | 19 | 0 |
| 2 | 4 | 0.1 | Through hole | 59 | 180 |
| 3 | 5 | 0.1 | Through Hole | 99 | 90 |
| 4 | 6 | 0.1 | Through hole | 139 | 0 |
| 5 | 20 | 0.1 | Through hole | 192 | 180 |
| 6 | 10 | 0.1 | Through hole | 242 | 270 |
| 7 | 8 | 0.1 | Through hole | 292 | 90 |
| 8 | 20 | 0.1 | Through hole | 460 | 0 |
| 9 | 15 | 0.1 | Through hole | 514 | 90 |
| 10 | 25 | 0.1 | Through hole | 565 | 180 |

(a) specimen 1

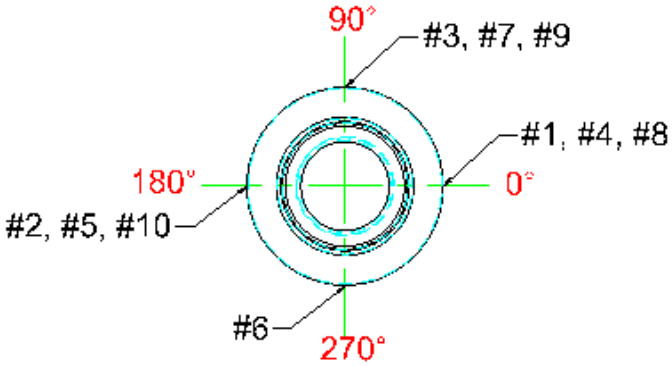
| No. | Length [mm] | Width [mm] | Depth | Axial distance on the scanning range [mm] | Angle [°] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 0.1 | Through hole | 60.3 | 0 |
| 2 | 10 | 0.1 | Through hole | 90.3 | 180 |
| 3 | 15 | 0.1 | Through hole | 130.3 | 90 |
| 4 | 30 | 0.1 | Through hole | 185.3 | 0 |
| 5 | 3 | 0.1 | Through hole | 246.4 | 180 |
| 6 | 4 | 0.1 | Through hole | 271.4 | 270 |
| 7 | 6 | 0.1 | Through hole | 296.4 | 90 |
| 8 | 8 | 0.1 | Through hole | 321.4 | 0 |

(b) specimen 2

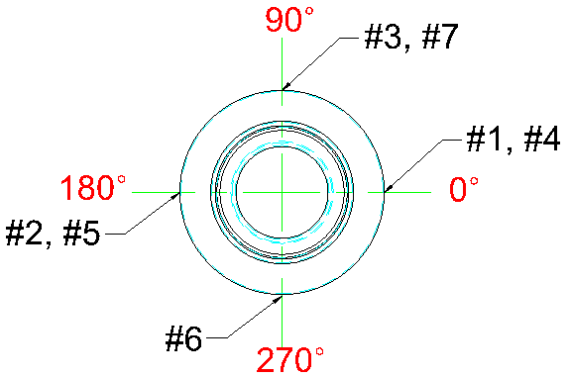


Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY




(a) specimen 1




(b) specimen 2

**Fig. 3-2 Angular position of each artificial crack**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 제 2절 자기센서배열 및 여자코일

Fig. 3-3은 근접장 보빈형 자기카메라의 센서부를 나타낸다. 이하 내경이 38mm 배관은 E38Φ로 표기한다. 기구물은 플라스틱(ABS수지) 재질로서, 외경 및 길이가 각각 38mm, 143mm이다. 시험편의 내벽을 따라 센서부가 이송할 때 이송기구와 연결하기 위한 체결부가 센서부의 양단에 배치된다. 한편, 시험편에 유도전류를 인가하기 위한 여자코일과, 결함 근방에서 왜곡된 시변자계의 강도를 측정하기 위한 자기센서배열은 동축상에 배치된다. 이때, 여자코일과 자기센서배열을 시험편 내벽과 일정한 lift-off를 유지하기 위하여 양단에 유연 구조의 지지부를 배치하였다. 지지부는 용접부를 회피하면서 스캔 중 센서의 회전을 방지하기 위하여 축방향의 홈을 가지도록 가공하였다. 내부에는 우레탄을 삽입하여 신축성을 부여하였으며, 배관 내부의 단차 즉, 서스펜션 구조와 충돌에 의한 센서의 손상을 방지한다. 이러한 구조에서 센서의 lift-off는 2.15mm이다.

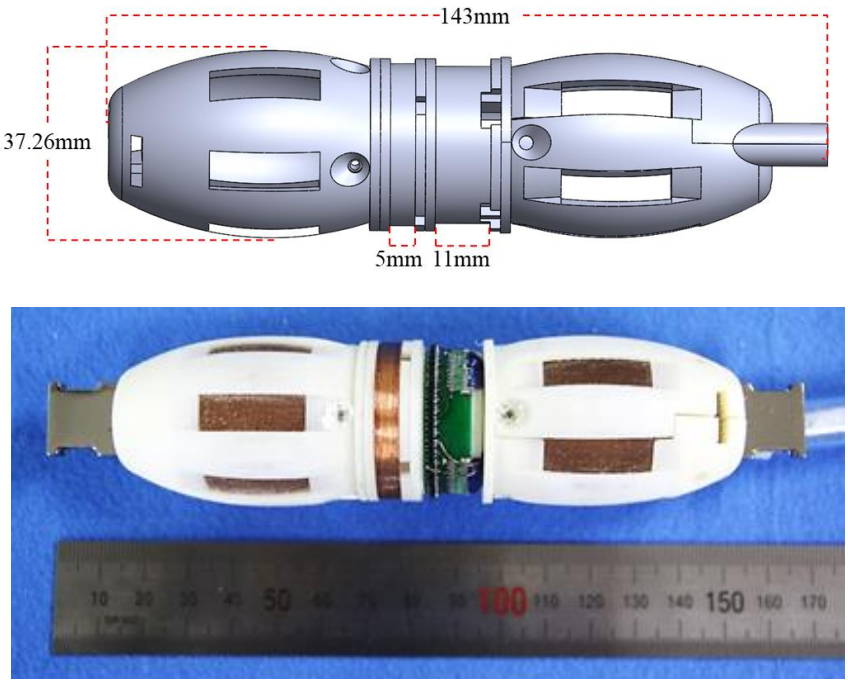



**Fig. 3-3 Schematic and photograph of sensor**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3-4는 Fig. 3-3에서 설명한 여자코일을 나타낸다. 코일 직경 및 권수는 0.2mm, 80회이며, 외경과 폭은 34mm, 5mm이다. Fig. 3-5는 자기센서배열을 나타낸다. 반지름방향(r-방향)으로 자기이방성을 가지는 44개의 홀센서를 환형으로 배열하였다. 센서 배열의 외경은 32.9mm이며, 공간분해능은 8.18° (2.42mm)이다.

Fig. 3-6은 신호처리 블록다이어그램이다. 컴퓨터와 연결된 다기능 I/O 디바이스(NI-6255)에 의하여 직류안정화전원과 교류안정화전원을 제어한다. 직류안정화전원은 홀센서 및 신호처리보드의 구동에 활용한다. 또한, 교류안정화전원은 여자코일의 구동에 활용되었다. 각각의 홀센서에 의하여 취득한 신호는 고대역 통과필터(HPF, high pass filter)를 통하여 바이어스 신호를 제거한 후, 교류증폭기에서 신호를 증폭한다. 이후에는 RMS 회로에 의하여 교류신호의 진폭을 직류신호로 변환한다. 각각의 직류신호는 다기능 I/O 디바이스의 데이터수집기능을 활용하여 디지털 신호로 변환한 후 컴퓨터에 전송한다.

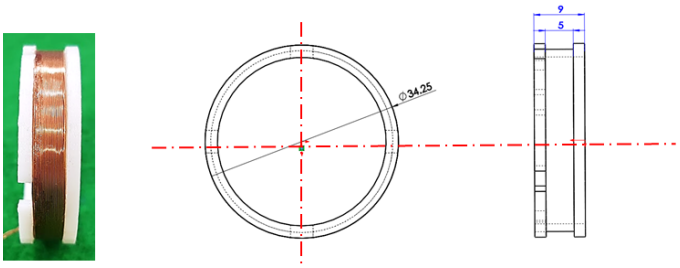



**Fig. 3-4 Excitation coil**

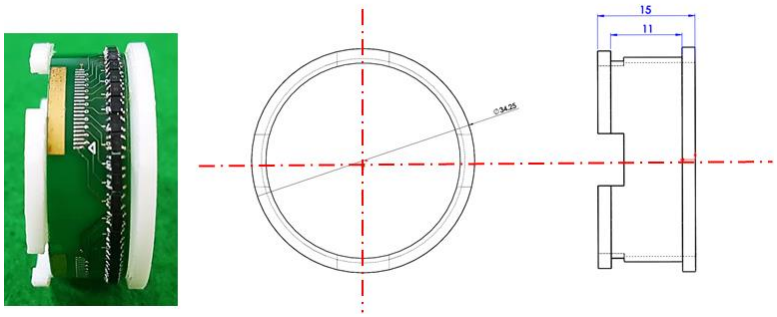



**Fig. 3-5 Circumferential sensor array**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

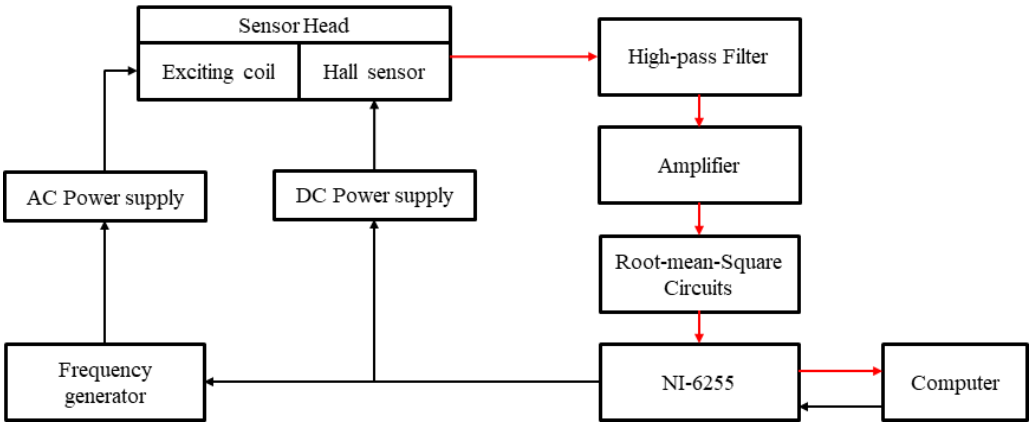



**Fig. 3-6 Block diagram**

Fig. 3-7은 근접장 보빈형 자기카메라를 장착한 BAD 검사시스템을 나타낸다. 시스템은 BAD 고정부(①), 센서부(②), 이송벨트(③), 벨트 텐션 조정장치(④), 모터 제어장치(⑤), 전원 · 신호선(⑥), 직류 · 교류안정화전원(⑦), 신호처리회로(⑧), 제어용 노트북(⑨) 및 근접센서(⑩)로 구성된다. BAD 시험편을 BAD 고정부에 고정하고, 센서부와 이송벨트를 BAD 시험편의 내부를 통하여 체결한다. 또한, 벨트 텐션 조정장치를 이용하여 이송벨트를 팽팽하게 유지한 후, 모터제어장치를 구동하여, 센서부가 BAD 시험편 내부를 관통하여 스캔한다. 한편, 전원신호선은 센서부에 직류 및 교류전원을 인가하면서, 센서의 출력을 전송한다. 이송장치의 구동, 직류전원인가, 교류전원인가 및 데이터취득은 노트북에 의하여 제어한다. 한편, 센서부가 스캔 영역을 이탈하여 손상되는 것을 방지하기 위하여 근접센서를 설치하였다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

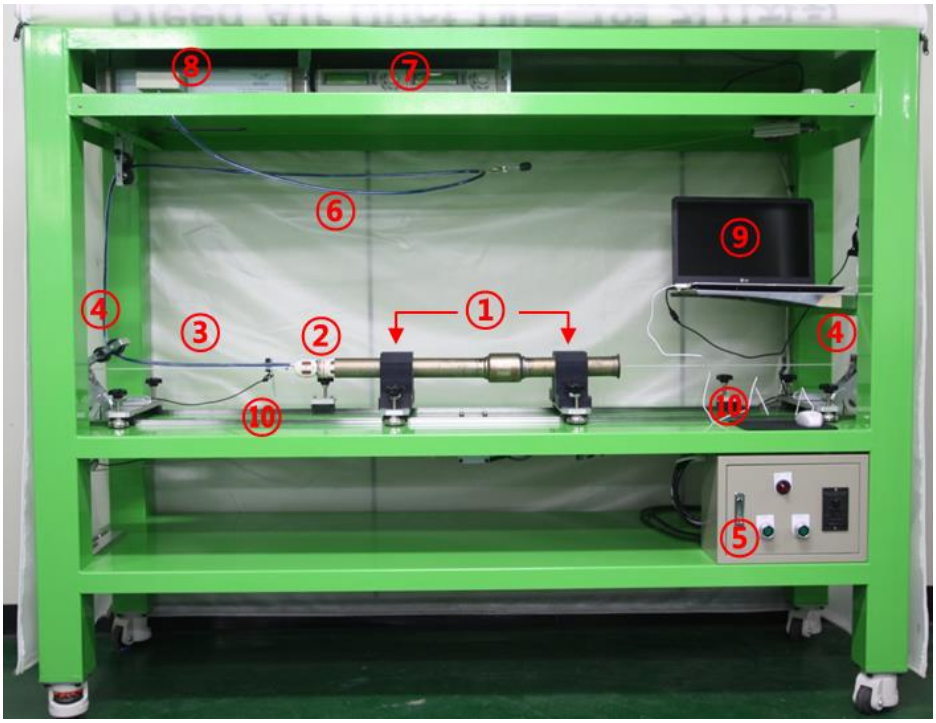



**Fig. 3-7 Bleed air duct inspection system**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 제 3절 실험결과

### 1. 주파수 실험

근접장 보빈형 자기카메라에 인가하는 최적주파수를 선정하기 위하여 주파수 특성 실험을 수행하였다. Fig. 3-8에서 Fig. 3-15은 여자코일 인가주파수를 5~40kHz로 변환하면서 BAD 시험편의 내벽을 따라 스캔한 시변자계의 진폭분포를 $\Delta V$, $V_{Detrend}$, $\Delta V_{FFT}$, $\Delta V_{Gabor}$ 처리한 결과를 나타낸다. 이때 입력전류는 120mA로 동일한 조건을 부여하였다. 전체적으로 $\Delta V$와 $V_{Detrend}$에 비하여 $\Delta V_{FFT}$ 및 $\Delta V_{Gabor}$가 보다 명확한 결함 정보를 지시할 수 있었다. 이는 FFT 및 Gabor 변환이 특정 주파수 신호를 최소화하는 대역통과필터(BPF, band-pass filter)의 역할을 수행하여 S/N비가 개선되었기 때문이다.

5kHz에서는 결함 #1, #2의 유무 확인이 곤란하였으나, 인가 주파수가 20kHz 이상의 경우에는 길이 3mm인 #1의 결함도 명확하게 검출할 수 있었다. 또한, 각 그래프의 종축 즉, 환형배열 자기센서의 원호방향 각도에서도 결함의 위치를 명확하게 판별할 수 있었다. 한편, #5, #7, #8, #9와 같이 서포터, 서스펜션 및 용접부에 인접한 결함의 유무 판정은 상대적으로 곤란함을 알 수 있다.

Fig. 3-16는 길이 10mm인 #6 결함의 중심을 지나는 센서의 출력을 주파수별로 비교한 결과이다. 최대 감도를 나타내는 주파수는 25~30kHz임을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서는 작업자가 아닌 소프트웨어에 의하여 결함을 자동으로 탐지할 수 있는 알고리즘의 도출도 하나의 목적인 바, #1과 #2의 결함을 육안으로 관찰하기 곤란한 15kHz의 인가주파수를 활용하여 360° 커버리지 성능평가, 결함검출능 및 정량평가를 수행하였다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

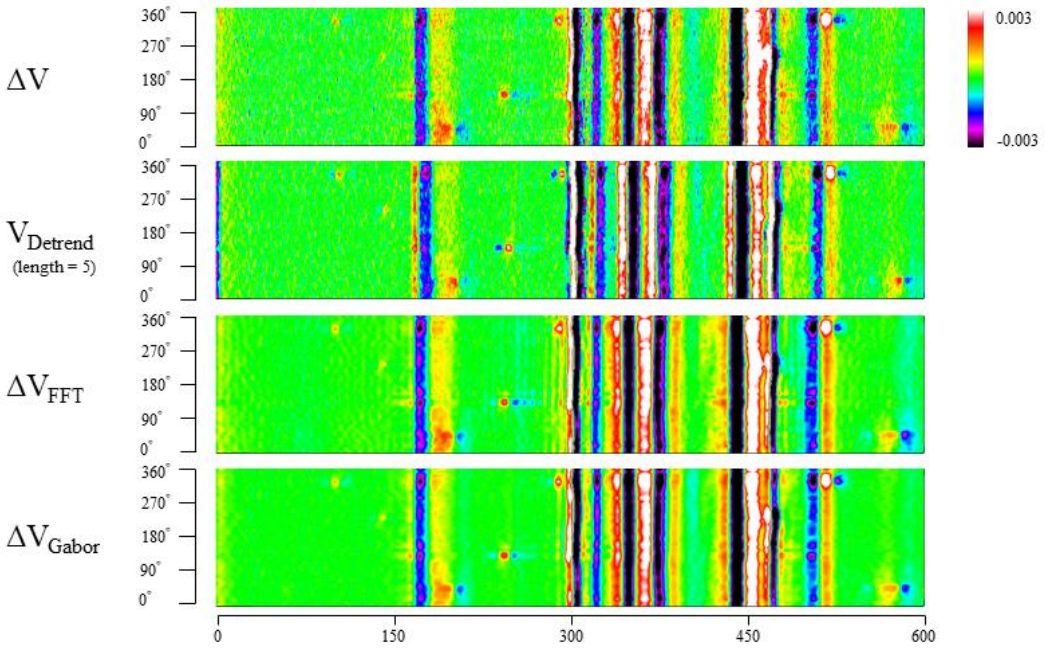



**Fig. 3-8 Experimental result with 5kHz and 120mA of exciting current**

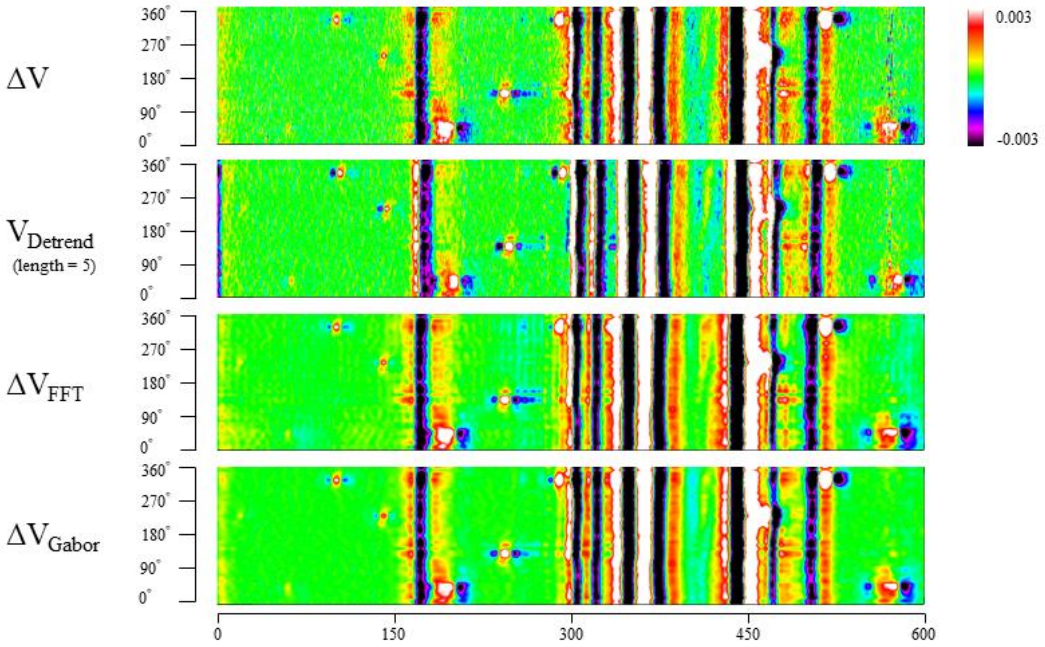



**Fig. 3-9 Experimental result with 10kHz and 120mA of exciting current**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

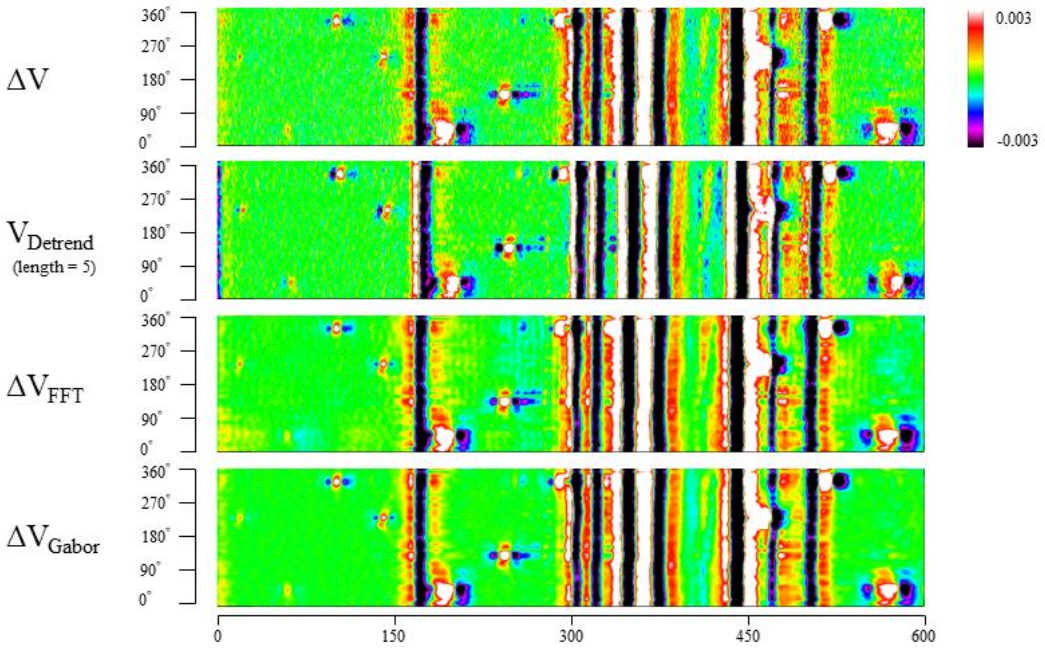



**Fig. 3-10 Experimental result with 15kHz and 120mA of exciting current**

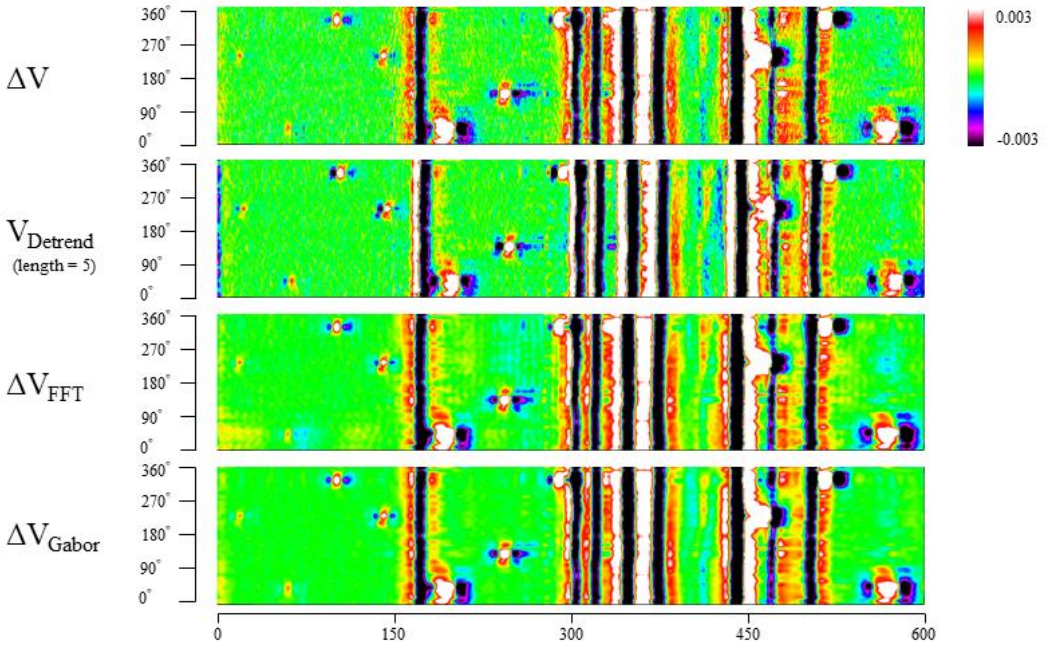



**Fig. 3-11 Experimental result with 20kHz and 120mA of exciting current**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

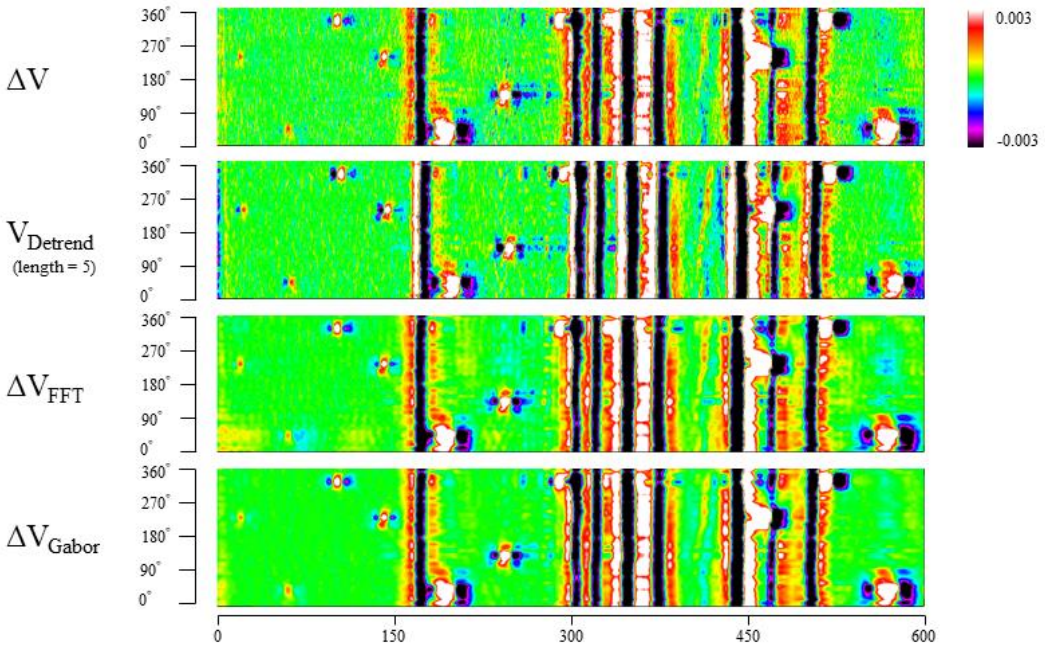



**Fig. 3-12 Experimental result with 25kHz and 120mA of exciting current**

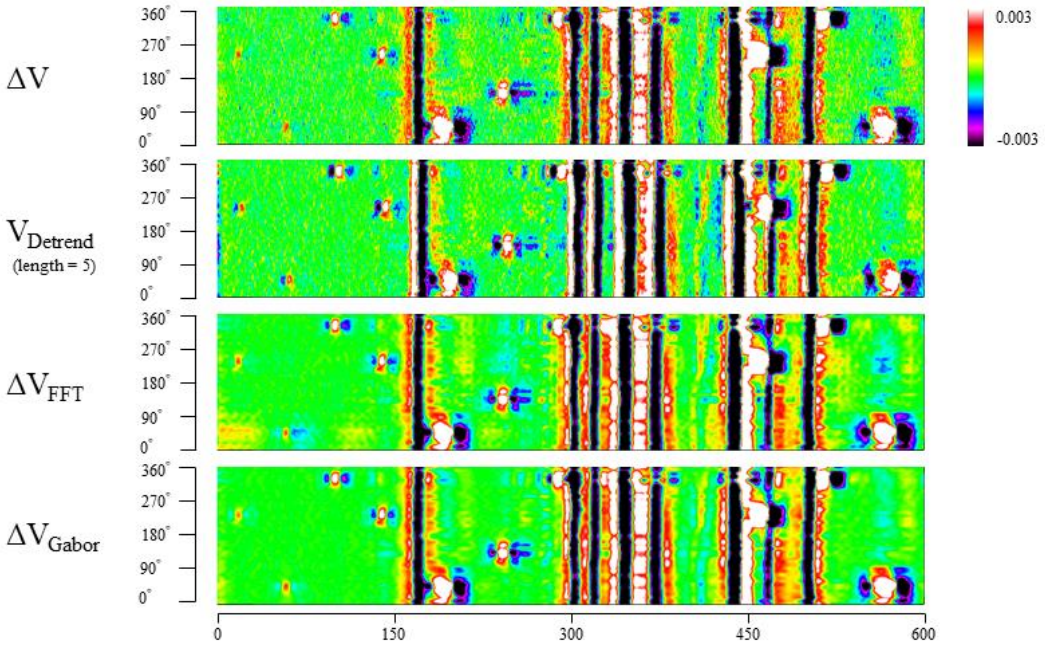



**Fig. 3-13 Experimental result with 30kHz and 120mA of exciting current**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

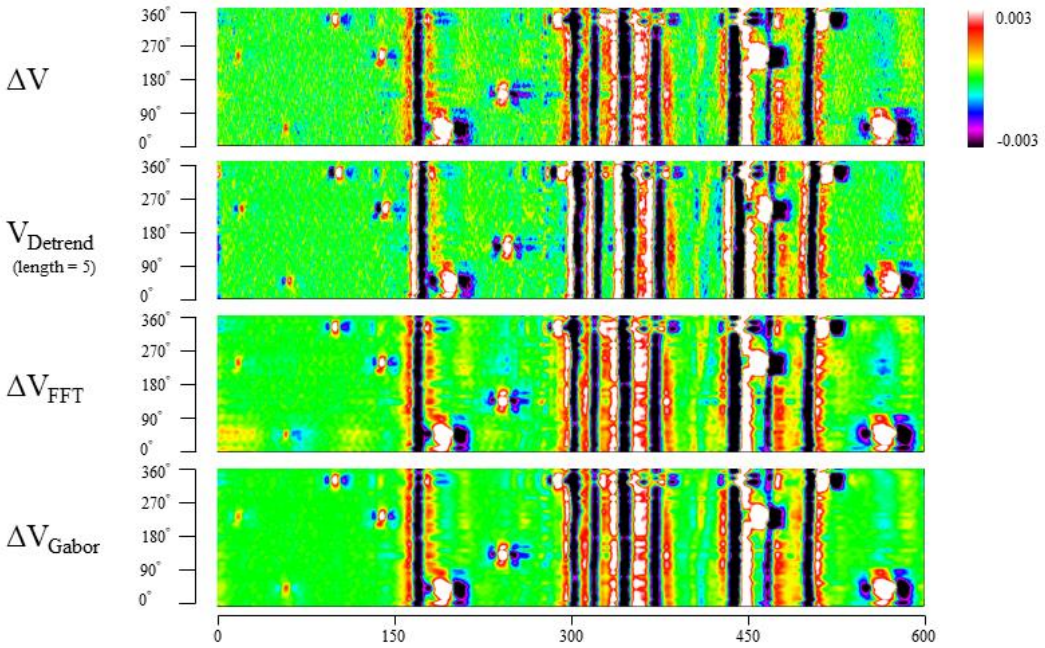



**Fig. 3-14 Experimental result with 35kHz and 120mA of exciting current**

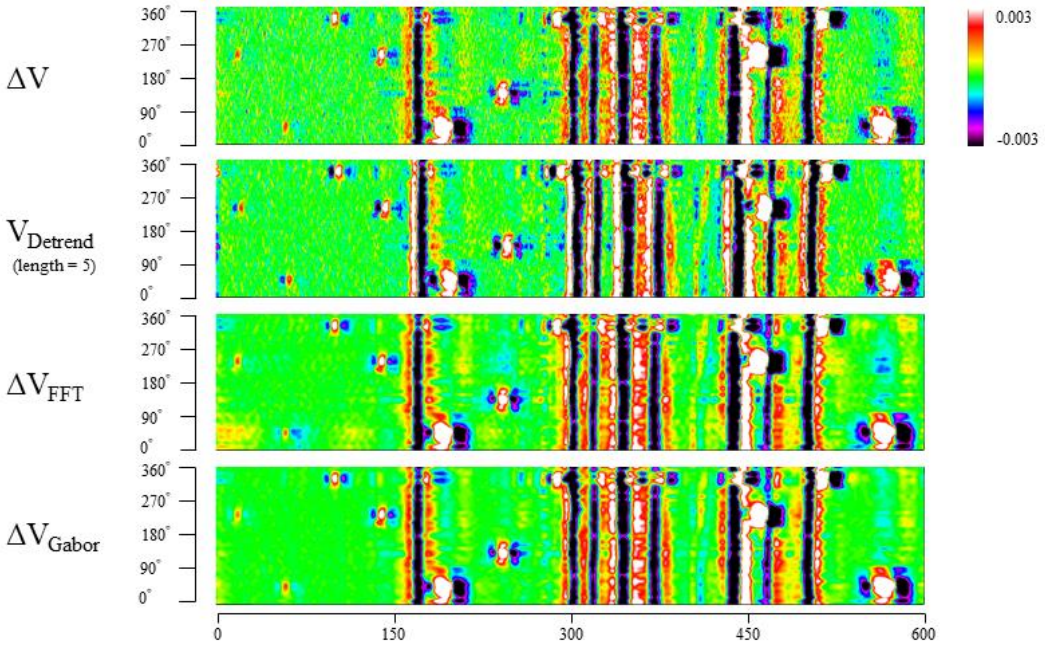



**Fig. 3-15 Experimental result with 40kHz and 120mA of exciting current**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

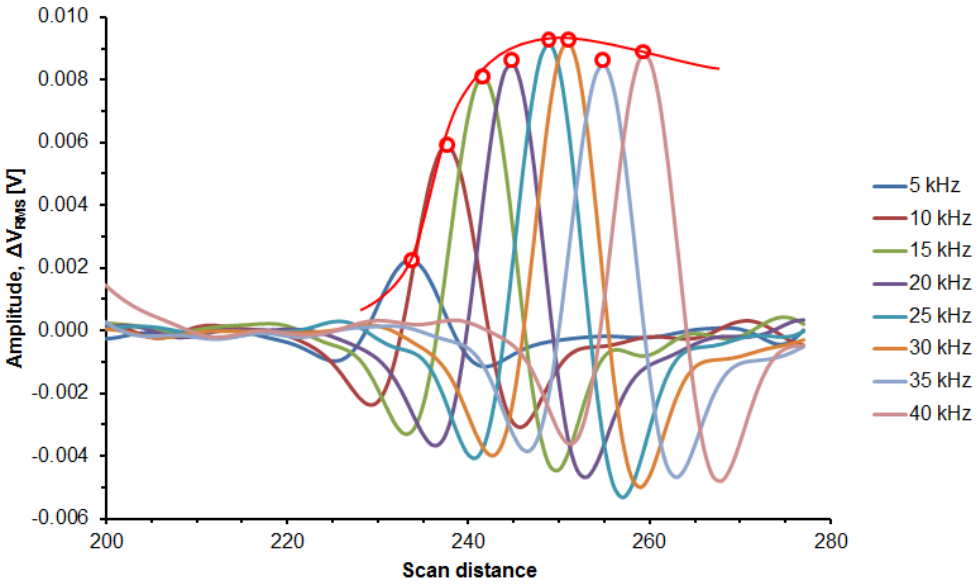



**Fig. 3-16 Frequency response at #6 crack**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 2. 각도실험

Fig. 3-17는 여자코일에 15kHz, 150mA의 교류전류를 인가한 후 취득한 자계분포를 나타낸다. #6과 #10과 같이 결함의 길이가 긴 경우에는 인접한 두 개의 센서 사이로 슬릿형 결함이 통과하더라도 결함의 존재에 기인한 시변자계의 변화가 비교적 넓게 분포하기 때문에 환형자기센서배열과 시험편의 원호방향의 상대적인 위치에 큰 영향을 받지 않는다. 하지만, #1, #2, #3과 같이 결함의 길이가 작아서, 시변자계의 변화가 적은 경우에는 센서배열과 시험편의 상대적인 위치가 결함 검출능 및 정량평가에 영향을 미칠 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 환형배열 자기센서를 원호방향으로 0~20° 의 범위에서 1° 씩 회전하면서 결함검출능을 평가하였다. 총 44개의 센서가 8.18° 의 간격으로 배열되어 있으므로, 이러한 각도실험에 의하면 0.18~1° 의 공간분해능으로 각도에 따른 결함검출능을 판단할 수 있다.

Fig. 3-18~21는 상술한 각도실험의 결과로서, $\Delta V$, $V_{Detrend}$, $\Delta V_{FFT}$, $\Delta V_{Gabor}$의 데이터 처리 방법에서 #1, #2, #3의 3mm 이상의 모든 결함이 검출되었다. 다만, Fig. 3-18의 0~3° 의 경우, #1과 #2의 데이터가 유사하다. 이는 13~14° 의 영상을 비교하면, 결함길이가 4mm인 #2의 데이터가 3mm인 #1에 비하여 크게 나오는 것과 다르게 나타남을 알 수 있다. 이러한 오류는 Fig. 3-20과 같이 FFT 해석을 수행한 결과에서는 심화된다. 즉, Fig. 3-20의 0~3° 의 자계분포는 결함 길이 4mm(#2)의 경우에 비하여, 3mm(#1)의 경우가 더 크게 판정될 수 있다.

Fig. 3-22은 각도에 따른 결함 정량평가의 오류가능성을 파악하기 위하여, 결함길이 10mm인 #6의 $\Delta V$, $V_{Detrend}$, $\Delta V_{FFT}$, $\Delta V_{Gabor}$의 절대값 적분(식 17~20)을 각도에 따라 도시한 결과이다. 각도변화에 따라 결함 검출능의 변화가 거의 없다. 이는 센서와 센서 사이에 결함이 위치하더라도 검출 및 평가가 가능함을 알 수 있다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$S = \sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}|\Delta V_S(i,j)| \tag{17}$$

$$S = \sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}\left|\Delta V_{S(Detrend)}(i,j)\right| \tag{18}$$

$$S = \sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}\left|\Delta V_{S(FFT)}(i,j)\right| \tag{19}$$

$$S = \sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}\left|\Delta V_{S(Gabor)}(i,j)\right| \tag{20}$$

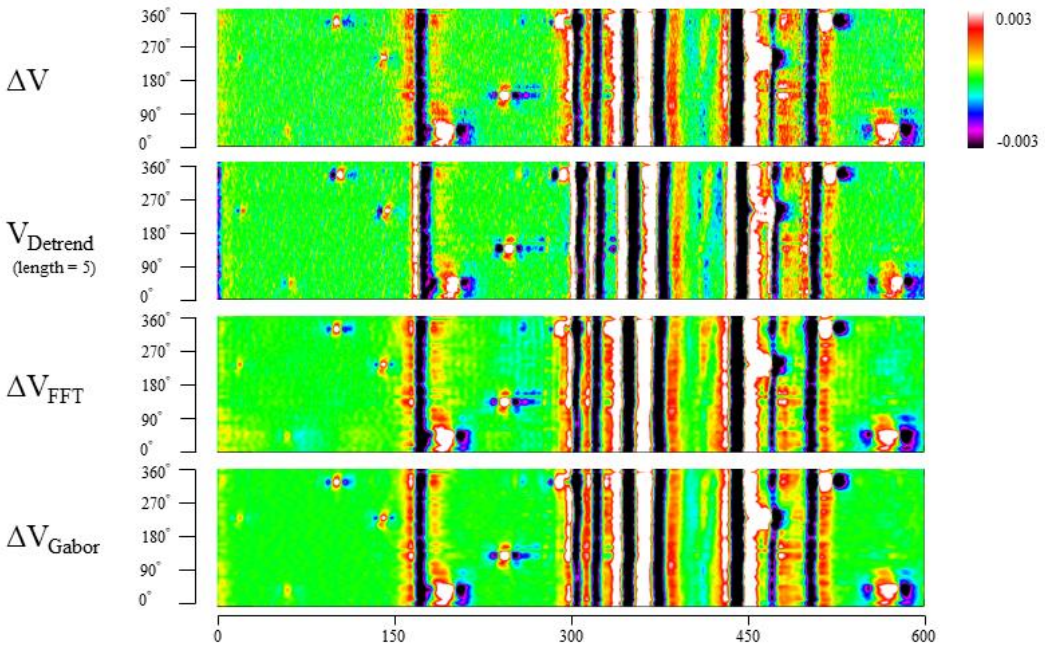



**Fig. 3-17 Magnetic images with several data processing method**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

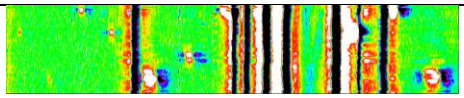
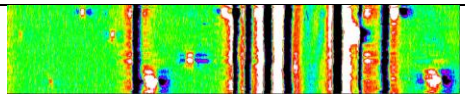
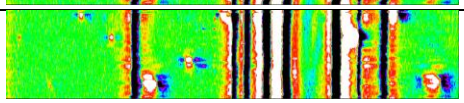
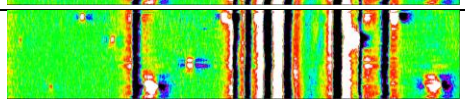
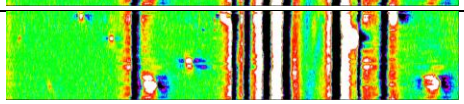
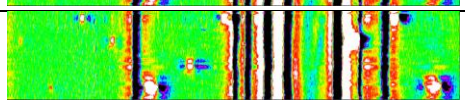
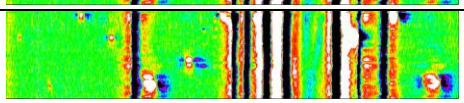
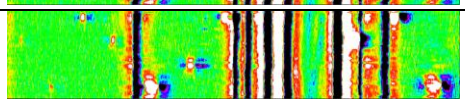
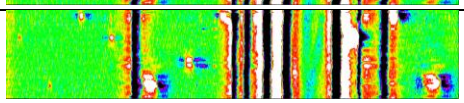
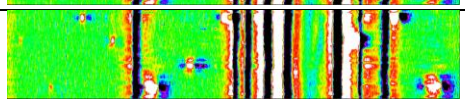
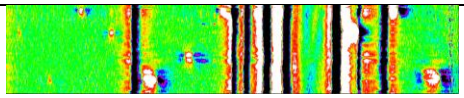
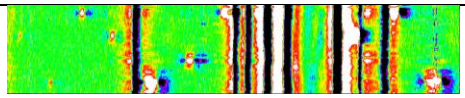
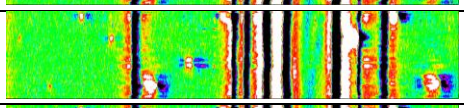
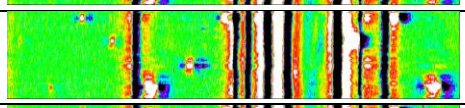
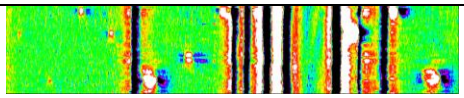
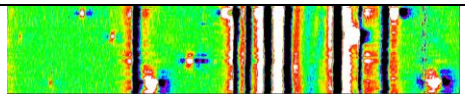
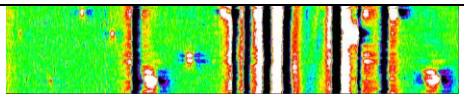
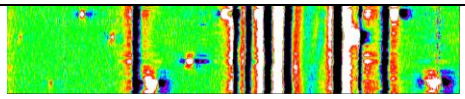
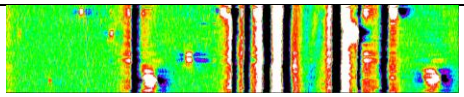
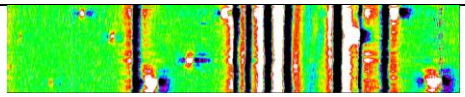
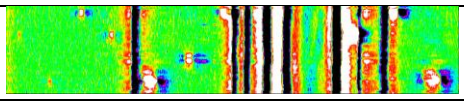
| | | | |
|---|---|---|---|
| 0° |  | 11° |  |
| 1° |  | 12° |  |
| 2° |  | 13° |  |
| 3° |  | 14° |  |
| 4° |  | 15° |  |
| 5° |  | 16° |  |
| 6° |  | 17° |  |
| 7° |  | 18° |  |
| 8° |  | 19° |  |
| 9° |  | 20° |  |
| 10° |  | | |

**Fig. 3-18 Differential processing images on the different scanning angle**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

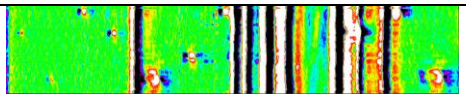
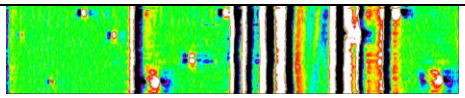
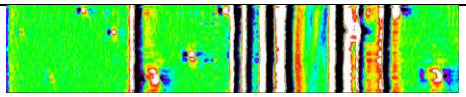
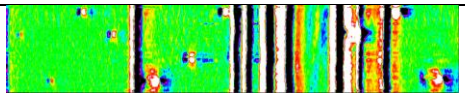
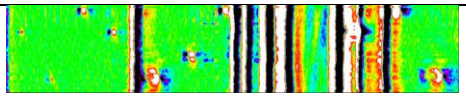
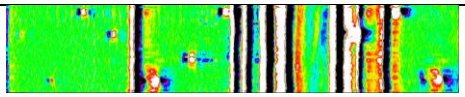
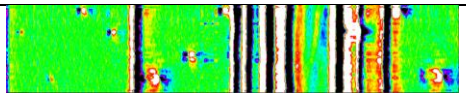
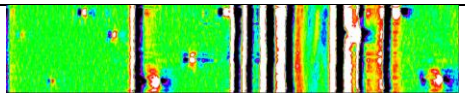
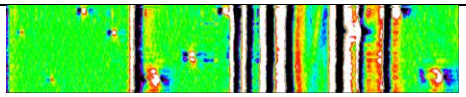
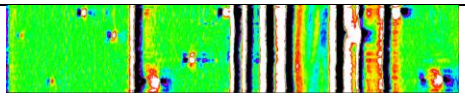
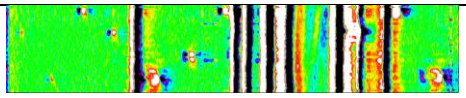
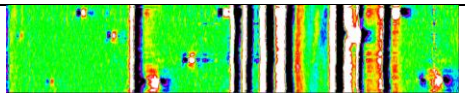
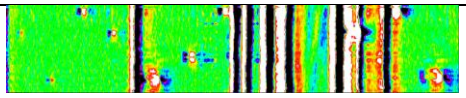
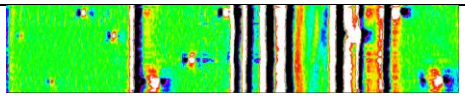
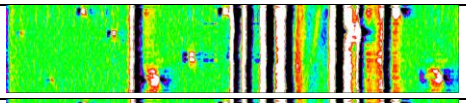
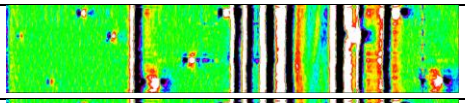
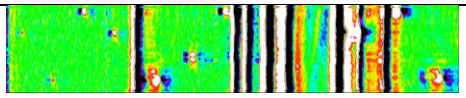
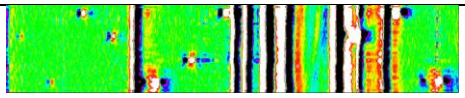
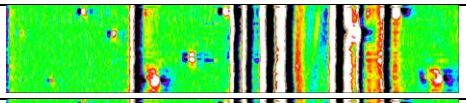
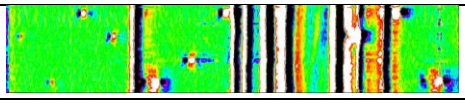
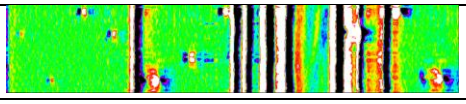
| | | | |
|---|---|---|---|
| 0° |  | 11° |  |
| 1° |  | 12° |  |
| 2° |  | 13° |  |
| 3° |  | 14° |  |
| 4° |  | 15° |  |
| 5° |  | 16° |  |
| 6° |  | 17° |  |
| 7° |  | 18° |  |
| 8° |  | 19° |  |
| 9° |  | 20° |  |
| 10° |  | | |

**Fig. 3-19 Detrend processing images on the different scanning angle**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

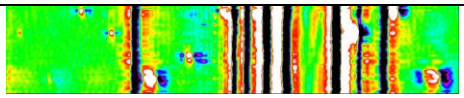
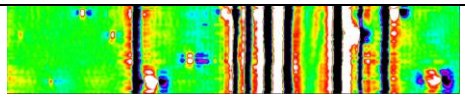
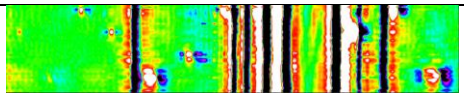
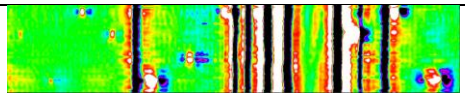
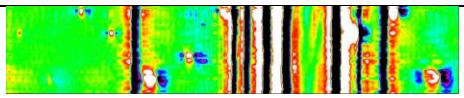
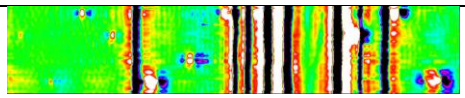
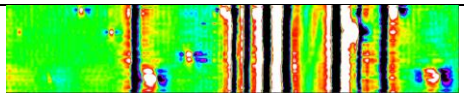
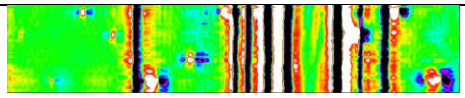
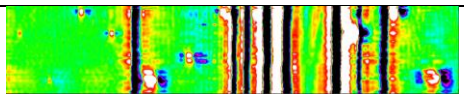
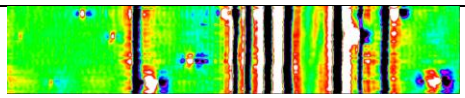
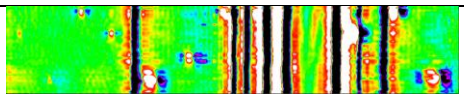
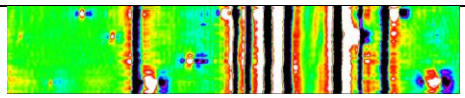
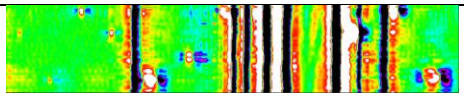
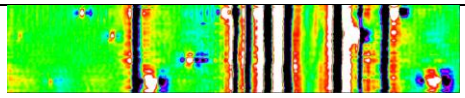
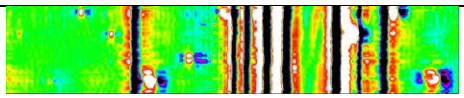
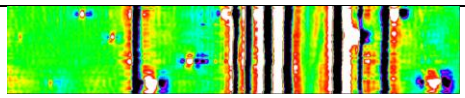
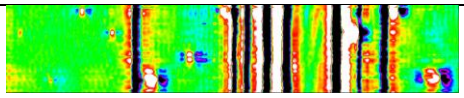
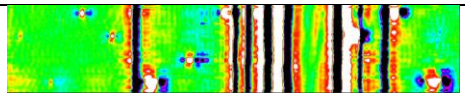
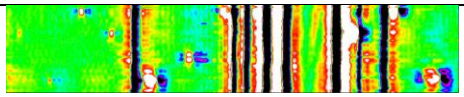
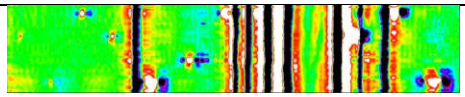
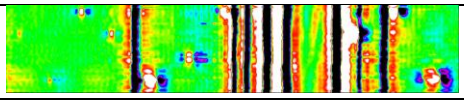
| | | | |
|---|---|---|---|
| 0° |  | 11° |  |
| 1° |  | 12° |  |
| 2° |  | 13° |  |
| 3° |  | 14° |  |
| 4° |  | 15° |  |
| 5° |  | 16° |  |
| 6° |  | 17° |  |
| 7° |  | 18° |  |
| 8° |  | 19° |  |
| 9° |  | 20° |  |
| 10° |  | | |

**Fig. 3-20 FFT processing images on the different scanning angle**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

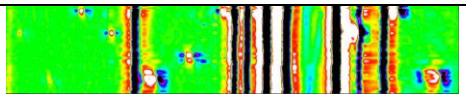
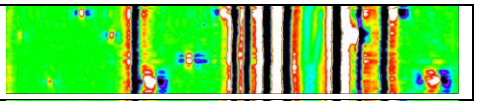
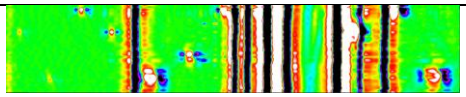
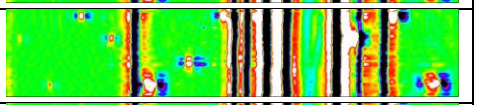
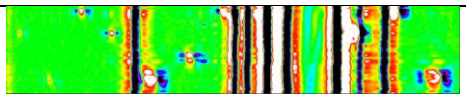
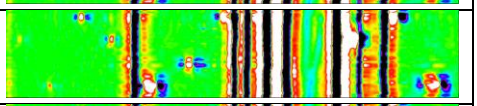
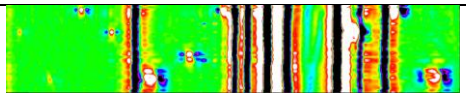
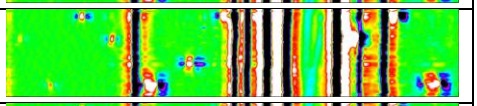
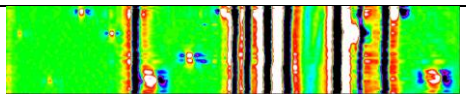
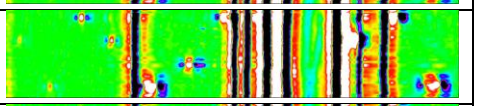
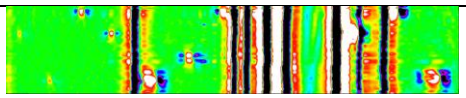
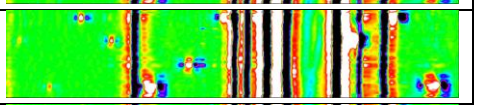
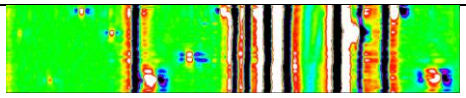
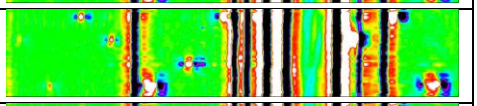
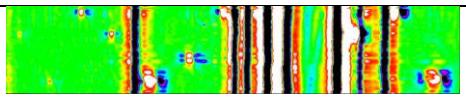
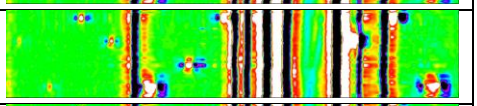
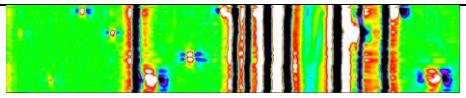
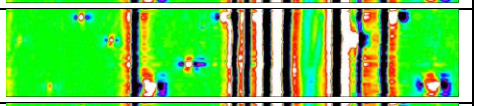
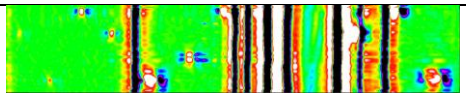
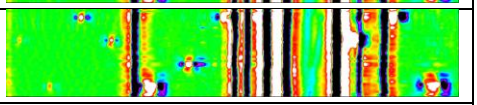
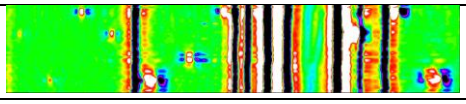
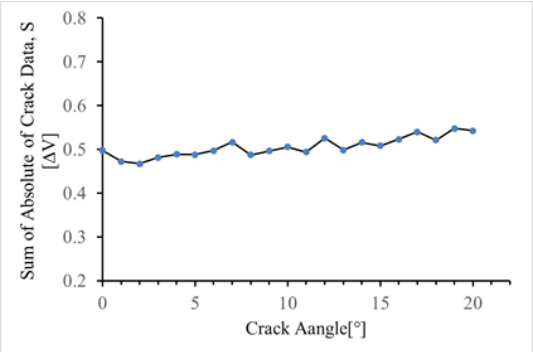
| | | | |
|---|---|---|---|
| 0° |  | 11° |  |
| 1° |  | 12° |  |
| 2° |  | 13° |  |
| 3° |  | 14° |  |
| 4° |  | 15° |  |
| 5° |  | 16° |  |
| 6° |  | 17° |  |
| 7° |  | 18° |  |
| 8° |  | 19° |  |
| 9° |  | 20° |  |
| 10° |  | | |

**Fig. 3-21 Gabor processing images on the different scanning angle**

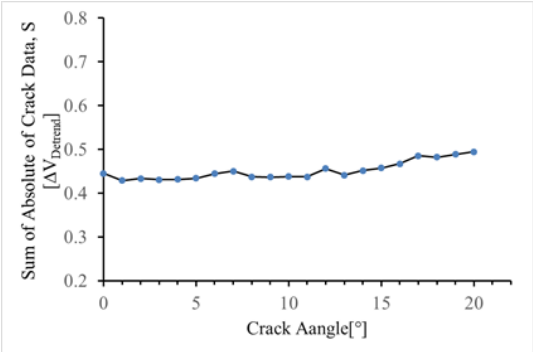


Collection @ chosun

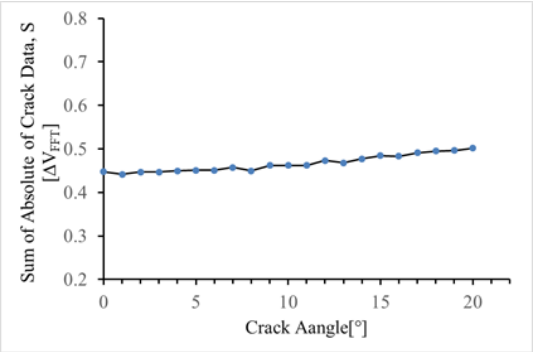
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



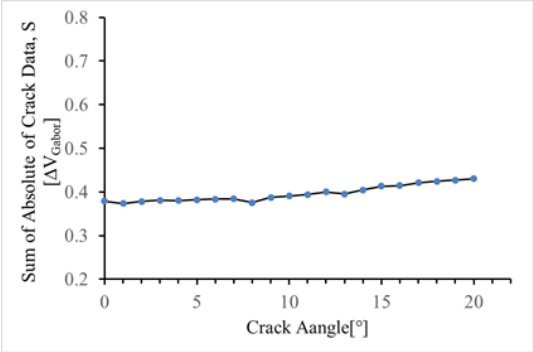

(a) ΔV




(b) $V_{Detrend}$




(c) $\Delta V_{FFT}$




(d) $\Delta V_{Gabor}$

**Fig. 3-22 Absolute integrations according ot the scanning angle (#6, 10mm)**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 제 4절 360° 커버리지 평가

총 44개의 환형배열 자기센서를 포함하는 보빈형 자기카메라에 의한 360° 커버리지 성능을 제시하기 위하여 Fig. 3-23와 같이 회전기구, 시험편, 센서, 컨트롤박스 및 컴퓨터로 구성되는 실험장치를 구축하였다. 시험편은 Fig. 3-24에 나타낸 바와 같이 베어링지지 기구물에 장착하고, 정속회전용 DC 모터와 타이밍벨트에 의하여 회전시켰다. 한편, 시험편이 회전하는 동안 센서는 결함 길이 5mm 및 25mm인 #3과 #10 결함 부근에 위치하여 고정된다. 시험편은 #3을 기준으로 반시계방향 225°의 위치에 축방향 용접부가 존재한다. #10의 경우에는 시계방향으로 90° 의 위치에 축방향 용접부가 존재한다. 이들 용접부는 단접관(welded pipe)의 접합부에 기인한다.

Fig. 3-25에 나타낸 바와 같이 센서가 #3에 위치할 때에는 반시계방향으로 회전하였으며, #10에 위치할 때에는 시계방향으로 회전하였다. 따라서, #3을 활용한 360° 커버리지 성능평가에서는 결함에 기인한 시변자계의 왜곡이 측정된 후에 다음 시변자계의 왜곡 신호까지 2/3 지점에 축방향 용접부 신호가 측정된다. 또한, #10을 활용한 360° 커버리지 성능평가에서는 결함신호와 결함신호의 3/4 지점에 축방향 용접부 신호가 측정된다.

일반적인 360° 커버리지 성능평가는 각 센서별 최대 출력값이 도출되는 지점에서 센서 또는 시험편을 원호방향으로 회전하면서 측정한다. 각 센서별 최대 출력값이 도출되는 지점을 파악하기 위하여 Fig. 3-26(a), (b)에 나타낸 바와 같이 센서, 코일 및 결함의 위치에 따른 시변자계의 분포를 측정하였다. 즉, 길이가 5mm인 #3의 경우에는 폭이 5mm인 여자코일의 중심으로부터 결함 선단까지의 거리가 5.5mm인 지점부터 시작하여, 결함이 코일과 센서를 지나서 센서로부터 1mm에 또 다른 결함 선단이 위치하는 지점까지 20mm의 거리를 1mm 간격으로 이동하면서 측정하였다. 또한, 길이가 25mm인 #10의 경우에는 센서 배열의 중심으로부터 결함



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

선단까지의 거리가 1mm인 지점부터 시작하여, 결함이 센서와 코일을 지나서 코일의 중심으로부터 15.5mm에 또 다른 결함 선단이 위치하는 지점까지 38mm의 거리를 1mm 간격으로 이동하면서 측정하였다.

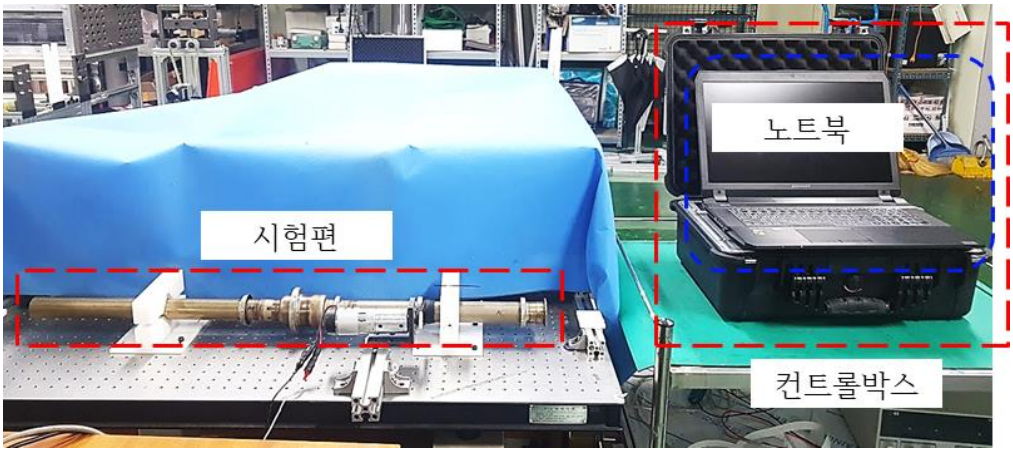



**Fig. 3-23 Experimental setup for 360° coverage performance**

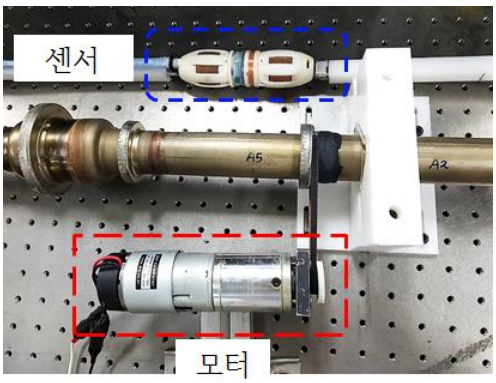
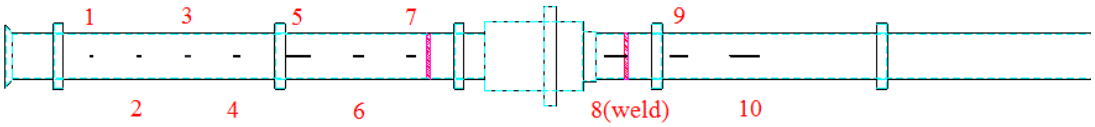



**Fig. 3-24 A photograph of rotation part**

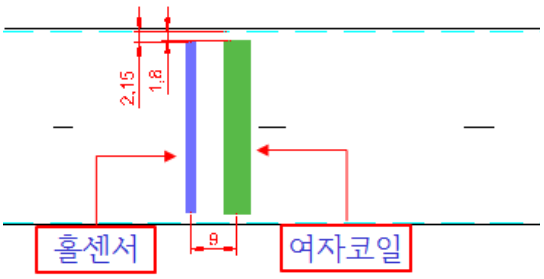


Collection @ chosun

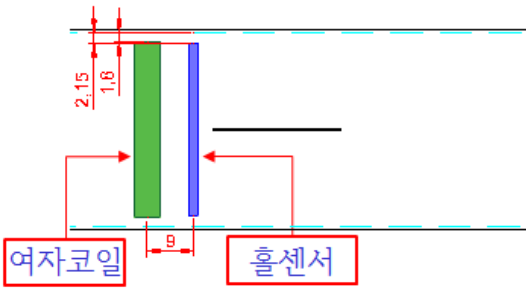
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY




(a) specimen

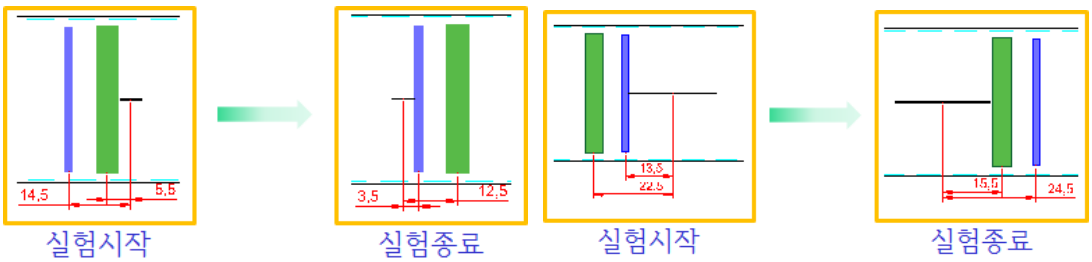



(b) #3 (5mm length)




(c) #10 (25mm length)

**Fig. 3-25 Relatibe positions of coil, sensor array and crack**




(a) #3 (5mm length)

(b) #10 (25mm length)

**Fig. 3-26 Data acqiosotopm rage arpimd #3 and #10**

Fig. 3-27은 360° 커버리지 성능을 파악한 결과를 도시하기 위한 과정을 나타낸다. 먼저, 상기 Fig. 3-23 및 Fig. 3-24의 시스템에서 시험편을 회전시키면서 44채널 전체의 데이터를 취득하면, Fig. 3-27(a)와 같은 normal 데이터를 얻을 수 있다. 횡방향은 측정시간으로서 회전각도를 대체한다. 종축은 각 센서를 나타낸다. 한 예로 제일 하단의 제1열은 첫 번째 센서를 지시하며, 횡축에서 반복되는 최대값은 해당 센서가 결함의 위치를 통과하였음을 나타낸다. 따라서, 전체적으로 사선모양은 각



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

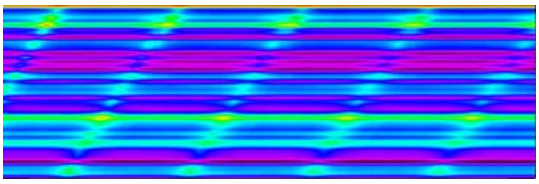
각의 센서가 결함의 위치를 차례로 통과하고 있음을 나타낸다. 한편, 각 채널별 감도 및 바이어스 오차에 기인하여 횡방향으로 줄무늬가 나타난다. 이러한 오차를 최소화하기 위하여 FFT 변환을 수행한 결과가 Fig. 3-27(b)이다. FFT 변환한 후, Fig. 3-27(c)에 나타낸 바와 같이 2회전에 해당하는 데이터를 선택한 후, 평균한 값을 활용하여 Fig. 3-27(d)와 같이 각 채널별 360˚ 커버리지 성능을 도시하였다. 즉, 각 채널별 최대 평균값을 100%로 하고, 각 채널별 최대평균값을 중심으로 ±8.2˚ 의 영역에서 0.76˚ 간격의 평균값을 최대평균값 대비 백분율로 표시하였다. 또한 가상 교차점을 생성시켜 연속적으로 표현하였다.

Fig. 3-28는 길이가 5mm인 #3의 경우, 센서-코일-균열의 상대위치에 따른 채널별 회전각 대비 출력을 나타낸다. 각각의 센서가 균열을 통과할 때 넓은 영역에 걸친 시변자계의 왜곡이 발생한다. 또한, 최대 출력값 사이에 좁은 사선은 용접부를 지시한다. 센서-코일-균열의 상대위치에 따른 최대 출력을 판단하기 위하여 측정영역에서의 절대값의 총합을 Fig. 3-29에 도시하였다. 결함의 중심이 여자코일의 중심에서 센서의 사이(5~11mm)에서 위치할 때 최대 출력을 얻을 수 있다.

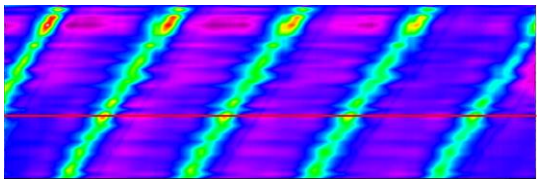


Collection @ chosun

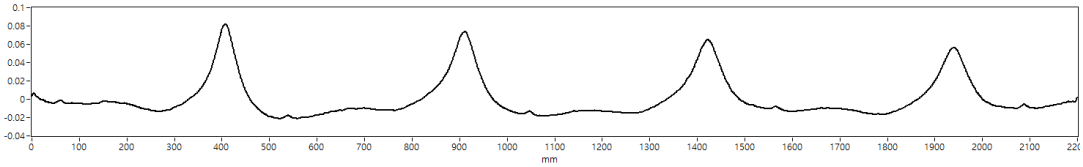
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Normal



(b) $V_{FFT}$




(c) peak detection

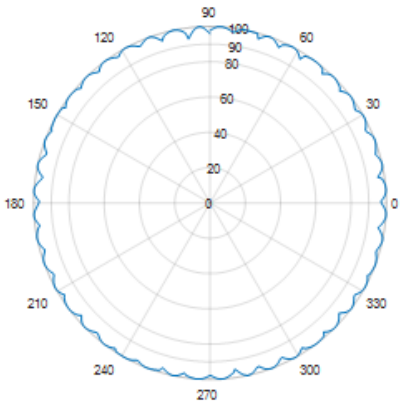



**Fig. 3-27 Diagram drawing process of 360° coverage performance**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

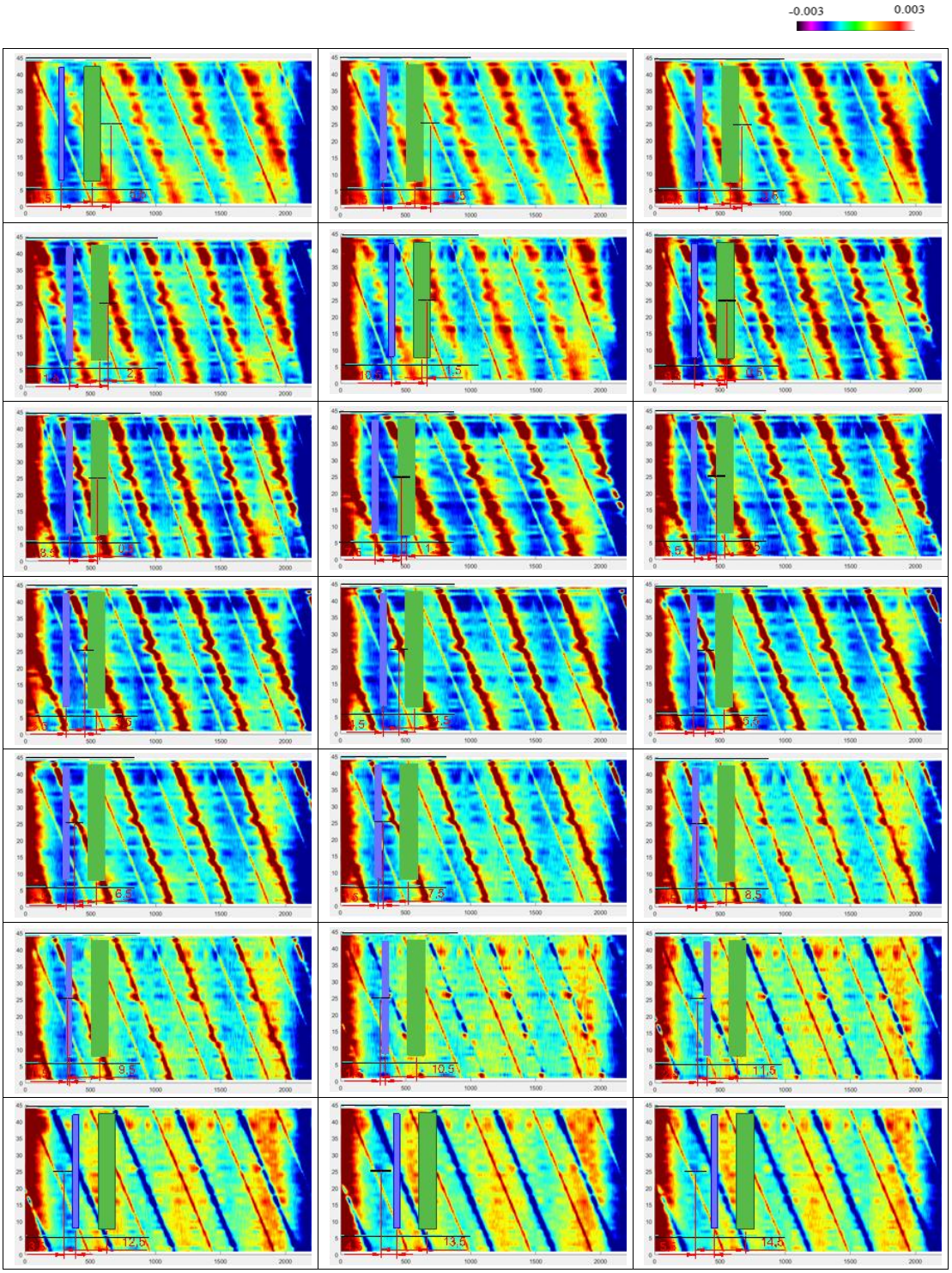



**Fig. 3-28 Distribution of $V_{FFT}$ according ot the relative distance between the sensor, coil and crack on the #3**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

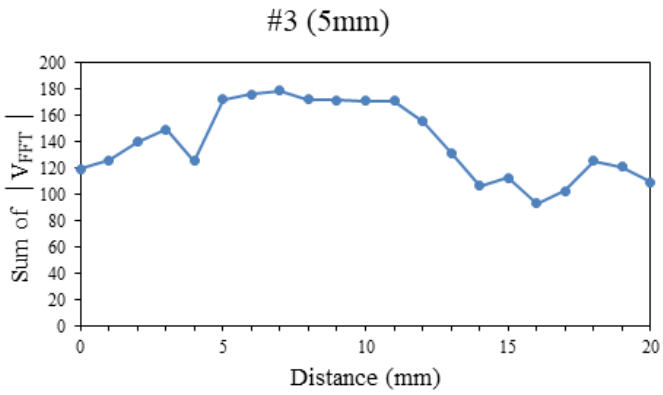


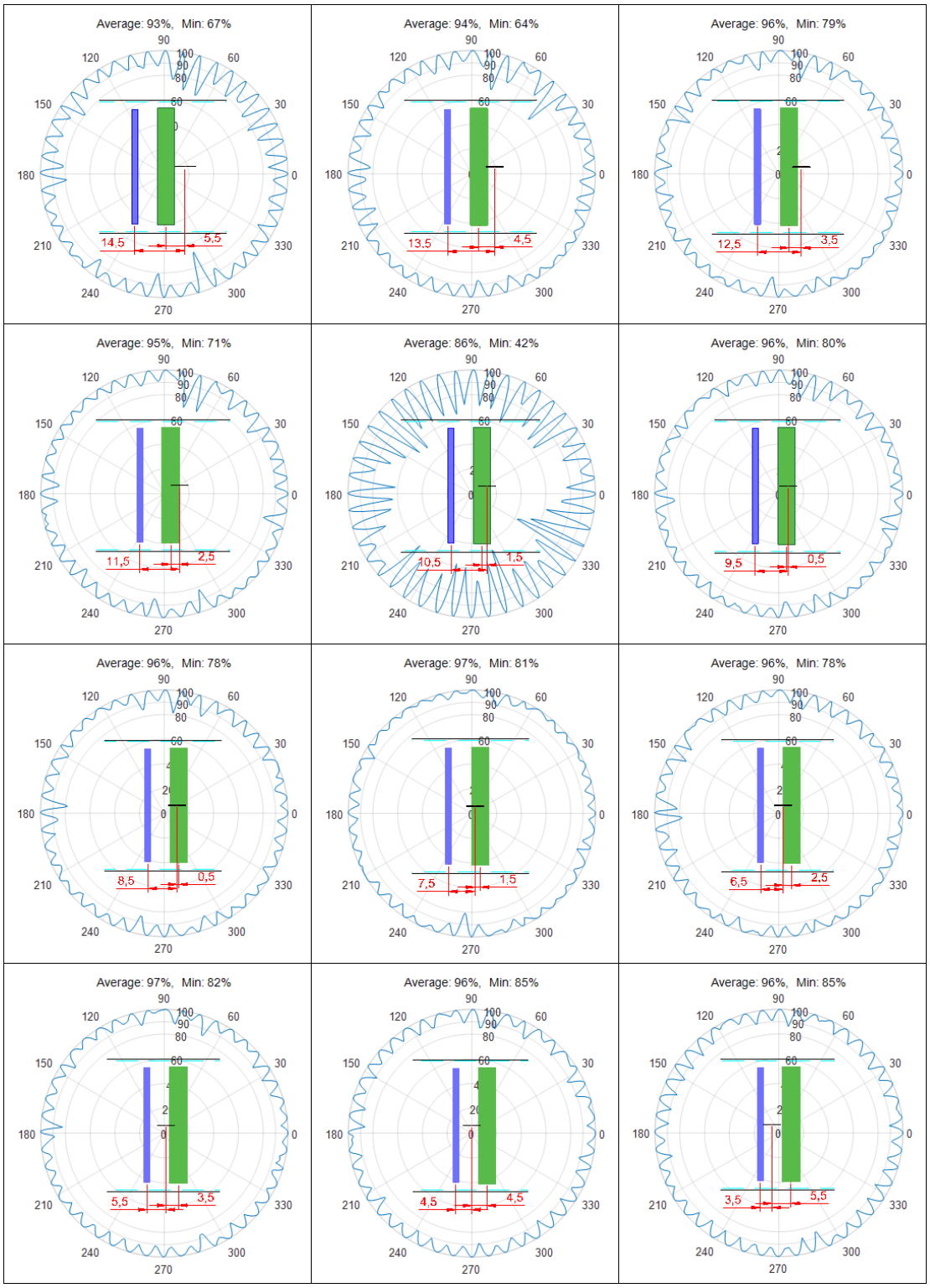

**Fig. 3-29 Relationship between absolute sum and distance (#3)**

Fig.3.30과 Fig. 3-31은 전술한 원리에 의하여 360˚ 커버리지 성능을 나타낸 결과이다. 평균 92~97%의 커버리지 성능을 나타낸다. 또한, 최소값은 약 80% 전후이다. 그러나, 결함의 중심위치가 여자코일(3~4mm) 또는 센서배열(14~17mm)에 위치하였을 때 360˚ 커버리지 성능이 저하된다. 한편, Fig. 3-29에 나타낸 바와 같이 최대 출력을 얻을 수 있는 경우, 즉 결함의 중심이 여자코일의 중심에서 센서의 선단(5~11mm)에 위치하였을 때의 360˚ 커버리지 성능은 평균 96% 이상, 최소 78% 이상이다. 특히, 결함이 여자코일과 360˚ 센서의 사이에 있으면서, 결함의 선단이 여자코일에 걸쳐 있을 경우(10mm)에 360˚ 커버리지 성능은 평균 96%, 최소 85%이며 최대 출력을 얻을 수 있다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY






Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

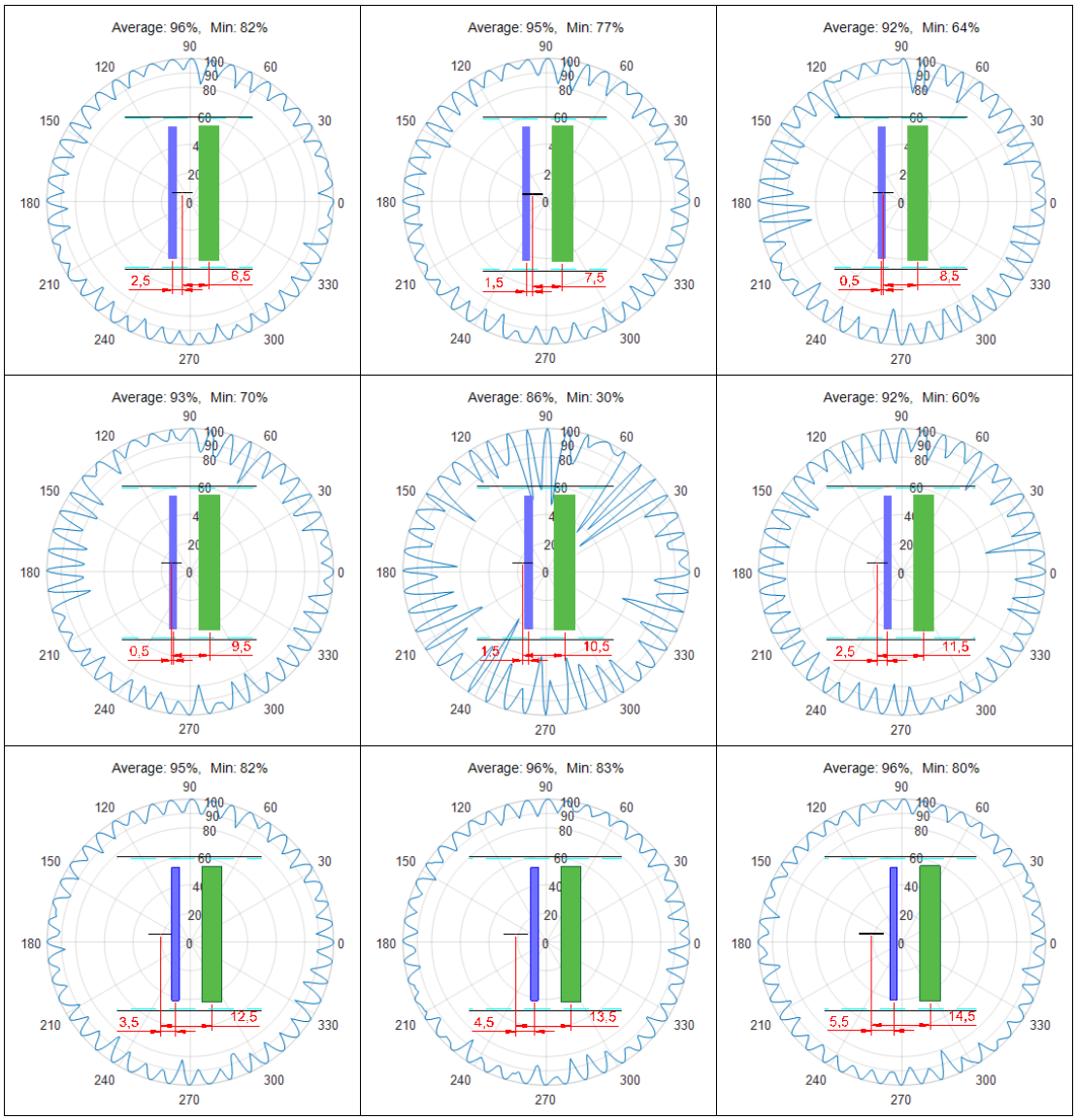



**Fig. 3-30 360° coverage performance with crack #3**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

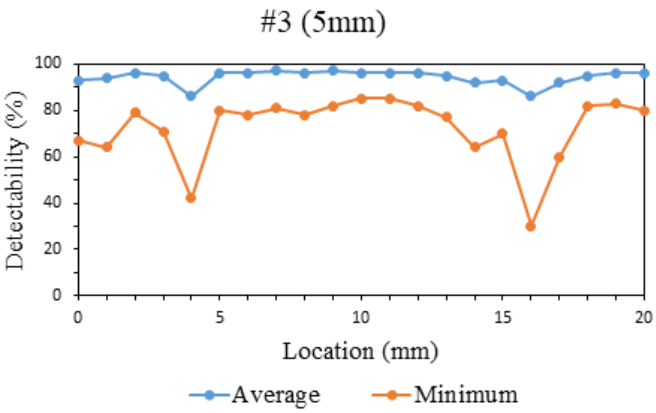



**Fig. 3-31 Average and minimum values in the 360° coverage performance at #3**

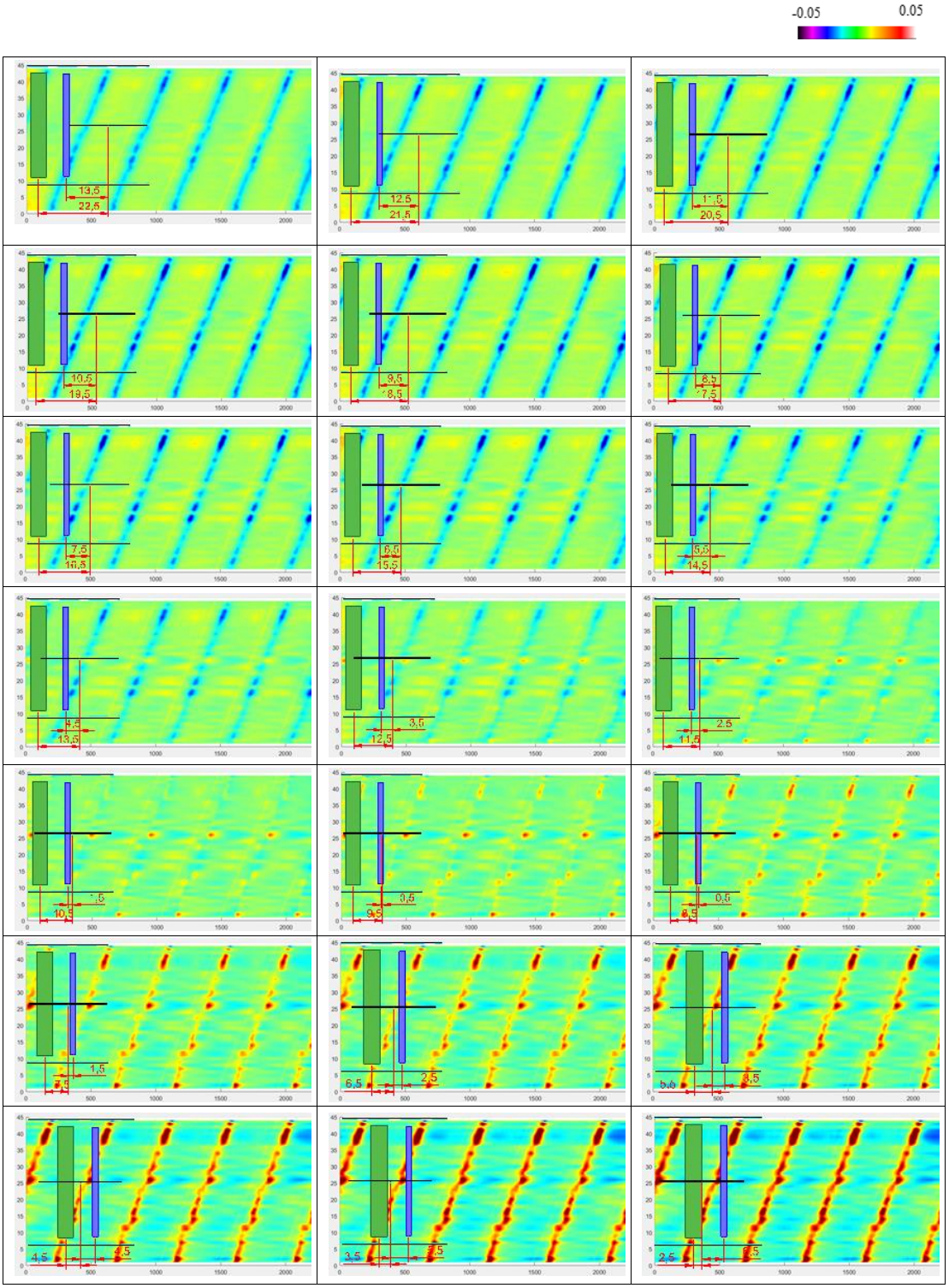
Fig. 3-32은 길이가 25mm인 #10의 경우, 센서-코일-균열의 상대위치에 따른 채널별 회전각 대비 출력을 나타낸다. #3의 경우와 마찬가지로 각각의 센서가 균열을 통과할 때 넓은 영역에 걸친 시변자계의 왜곡이 발생한다. 또한, 최대 출력값 사이에 좁은 사선은 용접부를 지시한다. 센서-코일-균열의 상대위치에 따른 최대 출력을 판단하기 위하여 측정영역에서의 절대합을 Fig. 3-33에 도시하였다. 결함이 여자코일의 전반에 걸쳐있으면서, 결함 선단이 센서의 중앙에 위치(24~28mm)할 때 최대 출력을 얻을 수 있다.

Fig. 3-34과 Fig. 3-35은 전술한 원리에 의하여 360˚ 커버리지 성능을 나타낸 결과이다. #3의 경우에 비하여 높은 평균 97~99%의 커버리지 성능을 나타낸다. 또한, 최소값은 약 81~96%이다. 한편, Fig. 3-33에 나타낸 바와 같이 최대 출력을 얻을 수 있는 경우, 즉 결함의 선단이 센서의 중앙에 위치하였을 때의 360˚ 커버리지 성능은 평균 97%, 최소 90%이다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY






Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

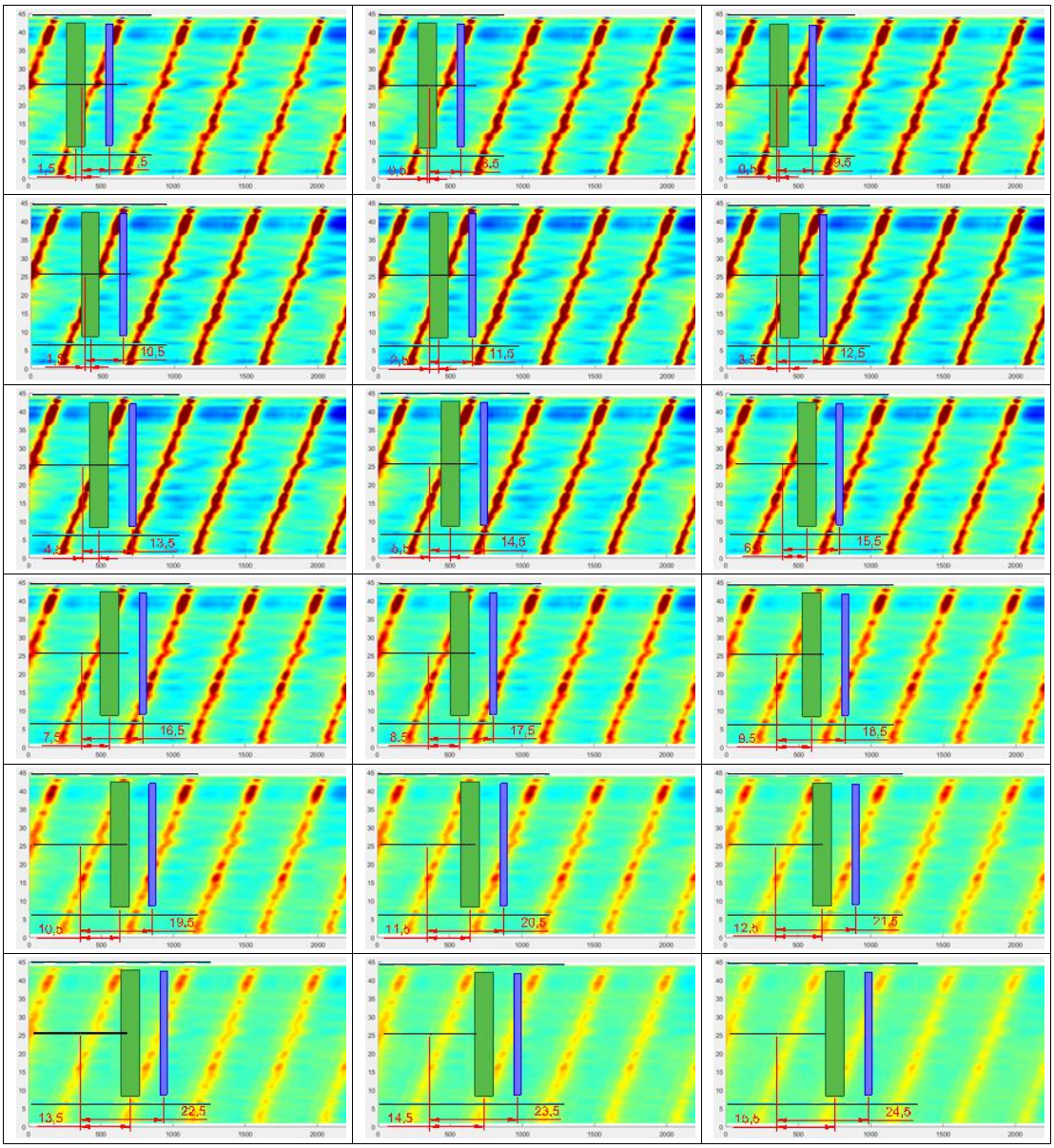



**Fig. 3-32 Distribution of $V_{FFT}$ according ot the relative distance between the sensor, coil and crack on the #10**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

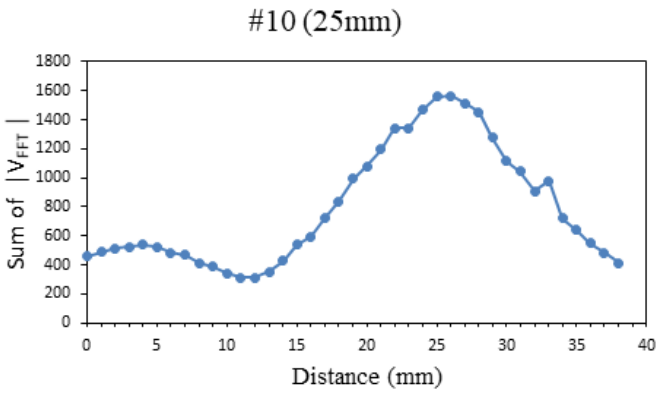
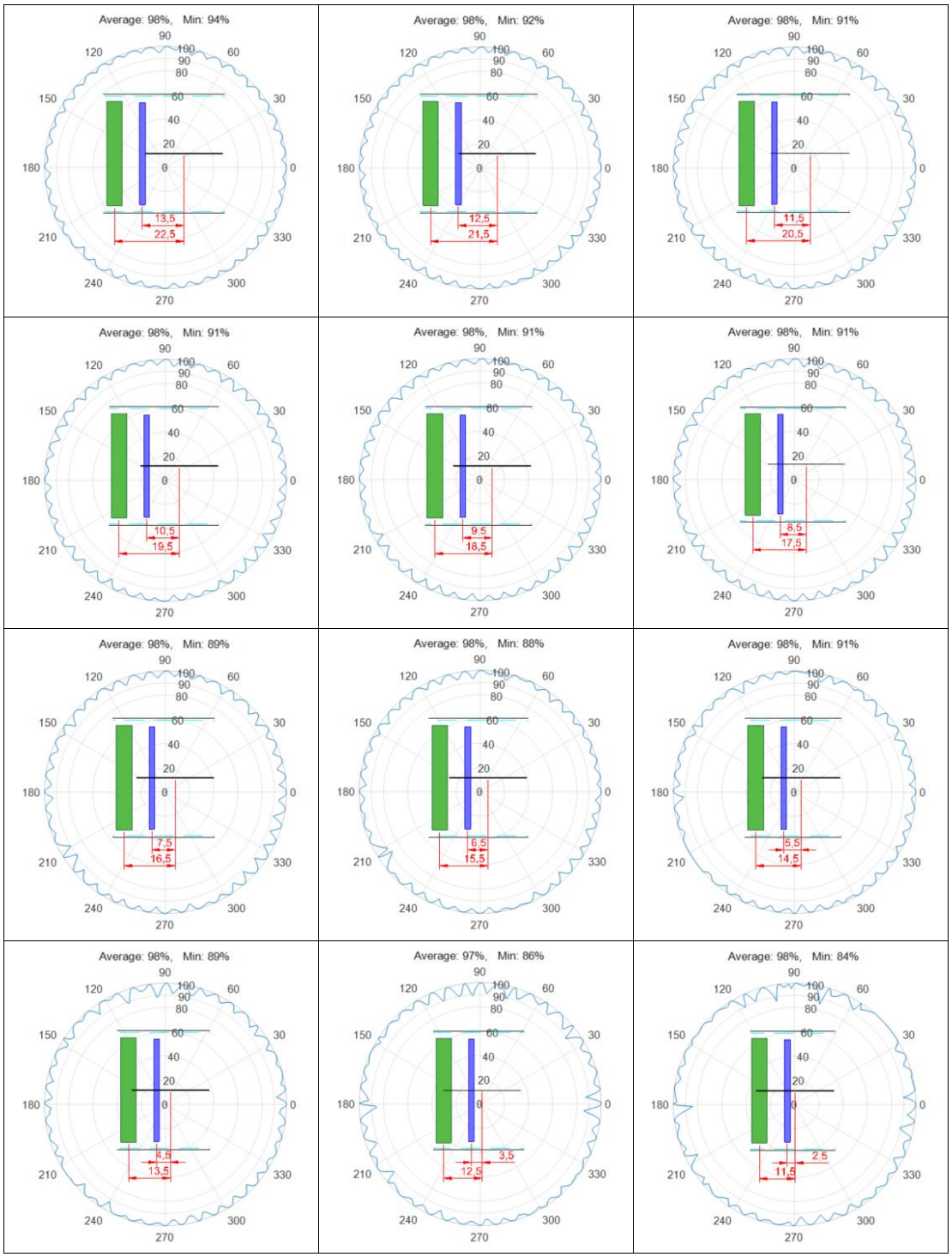



**Fig. 3-33 Relationship between absolute sum and distance (#10)**



Collection @ chosun

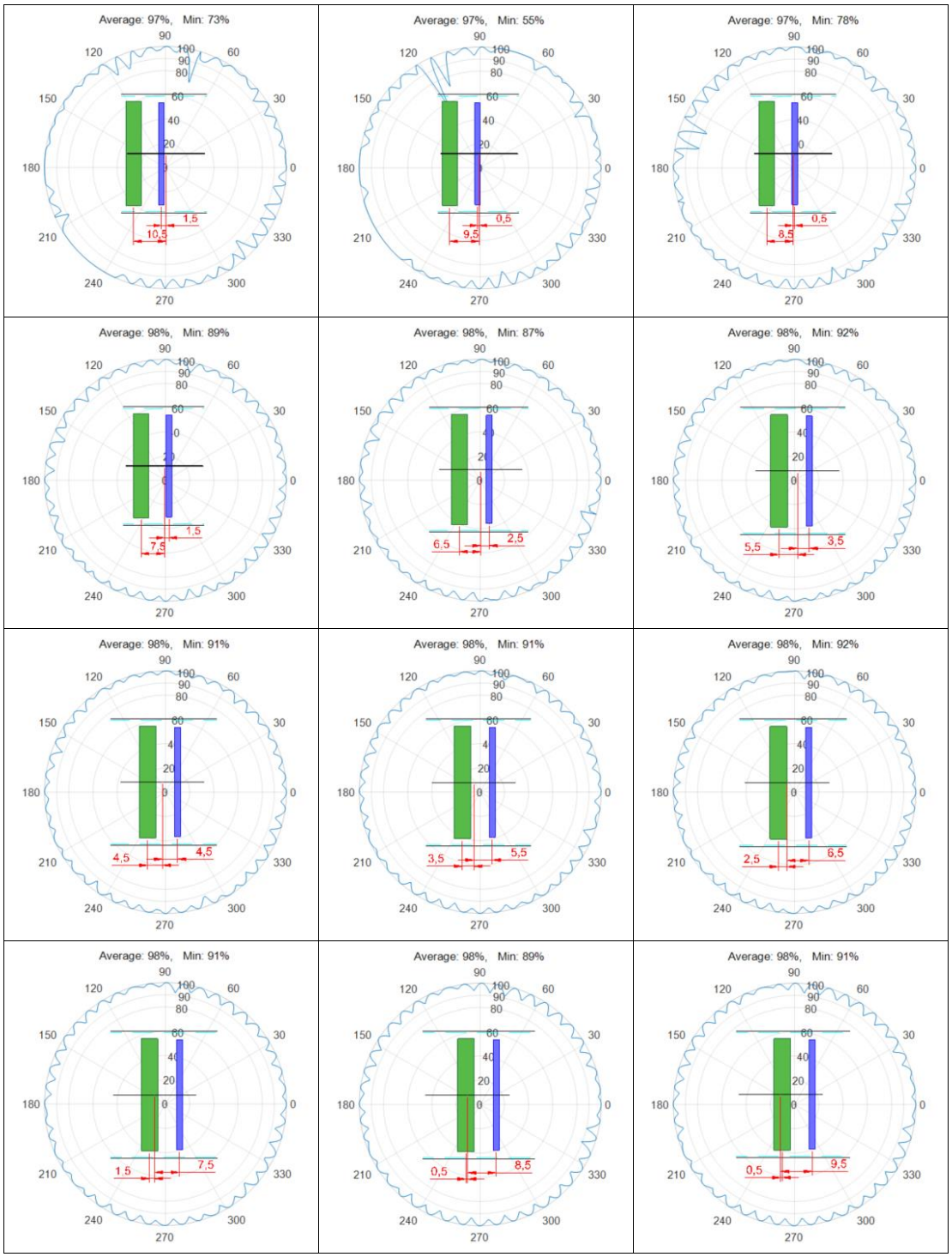
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY






Collection @ chosun

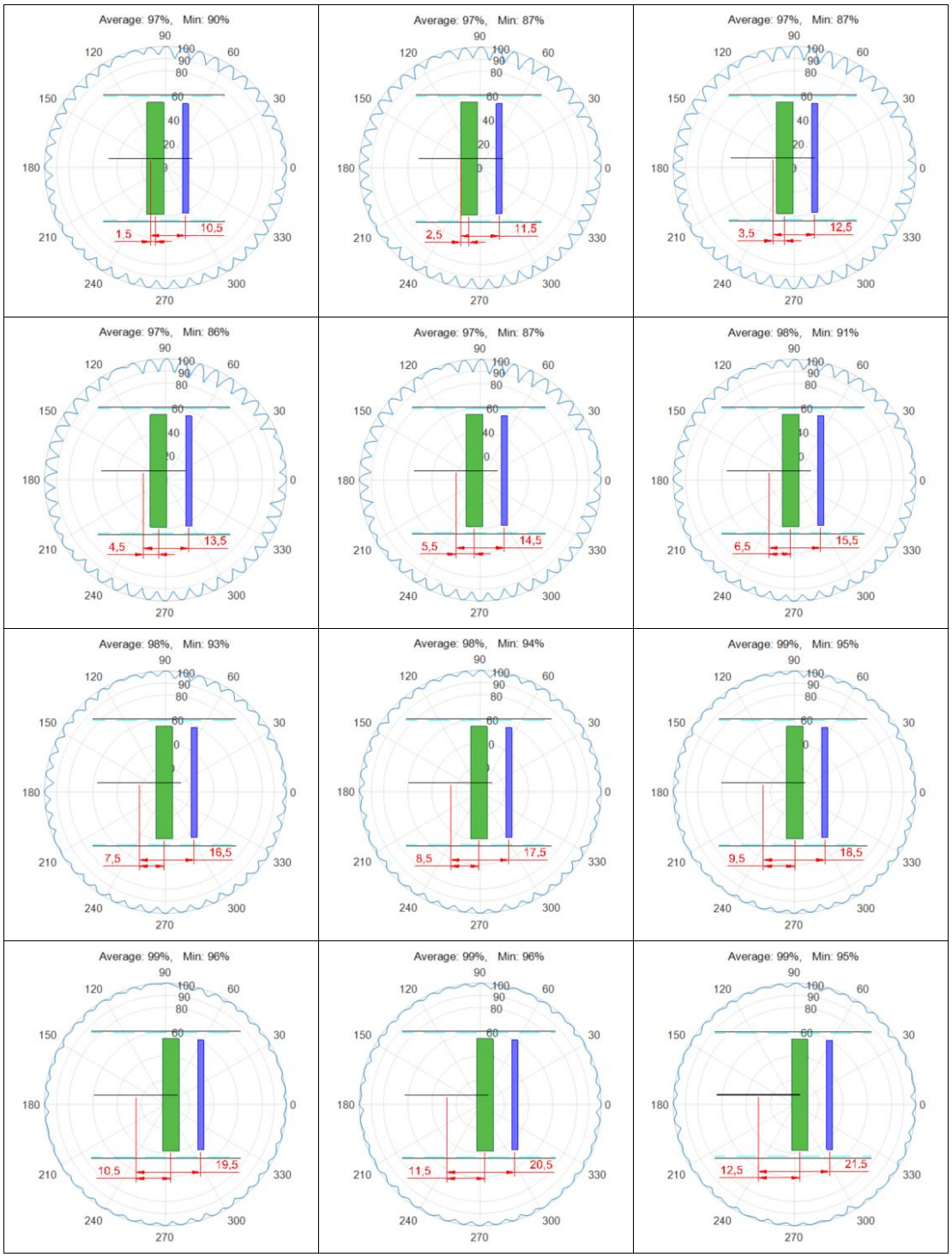
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY






Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY






Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

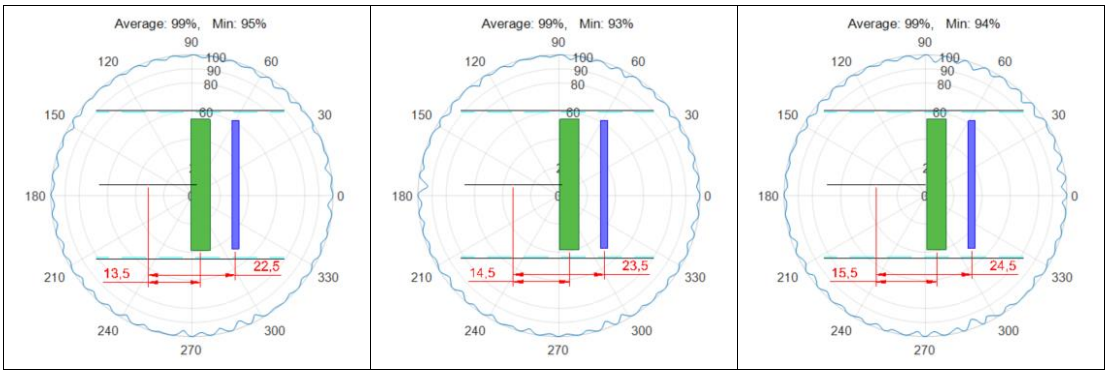



**Fig. 3-34 360° coverage performance with crack #10**

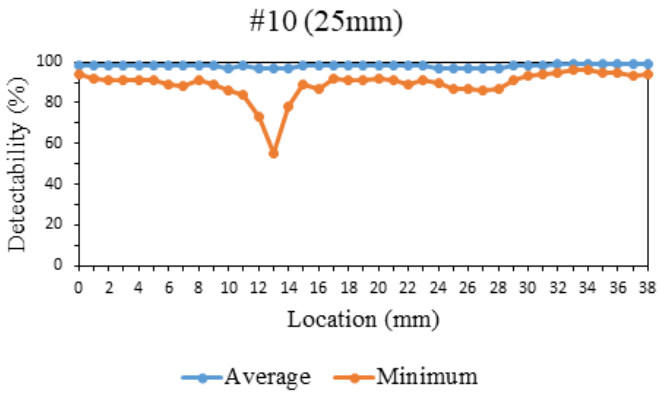



**Fig. 3-35 Average and minimum values in the 360° coverage performance at #10**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 제 5절 결함 자동탐상 및 정량평가

Fig. 3-36은 전술한 결함 자동탐상 알고리즘을 적용한 결과를 나타낸다. Fig. 3-28에 나타낸 바와 같이 $|\Delta V_{Garbor}|$의 분포를 이용한 용접신호 최소화 알고리즘의 적용에 의하여, 지지대, 서스펜션, 용접부 신호를 최소화하고 결함의 판독성을 극대화한다. 이후, 식 (21)~(23)을 이용하여 결함의 유무 및 위치($\theta_C$, $X_C$)를 자동으로 지시하였다. Fig. 3-36에 도시된 3개의 데이터는 Specimen1과 Specimen2를 측정한 결과이다. 3개의 결과물 모두 정성적으로는 검출이 가능하나 Fig. 3-36 c)의 결함6번은 자동검출알고리즘에서 검출이 불가하였다. 이는 결함5번과 6번사이의 거리가 너무 가까워 검출능이 떨어진 것이며 향후 보완이 필요하다.

$$Max(i) = Max\left(|\Delta V_{Gabor}(i,j)|_{j=1:44}\right) \tag{21}$$

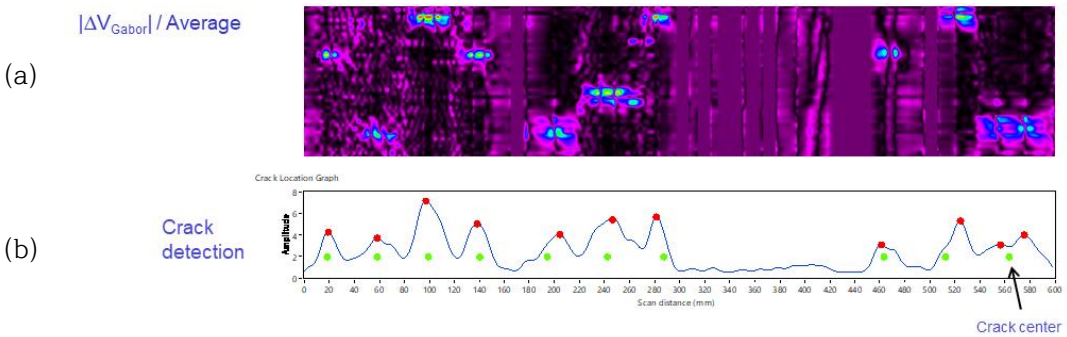
$$Average(i) = \frac{1}{44}\sum_{j=1}^{44}|\Delta V_{Garbor}(i,j)| \tag{22}$$

$$Ratio(i) = \frac{Max(i)}{Avrage(i)} \tag{23}$$

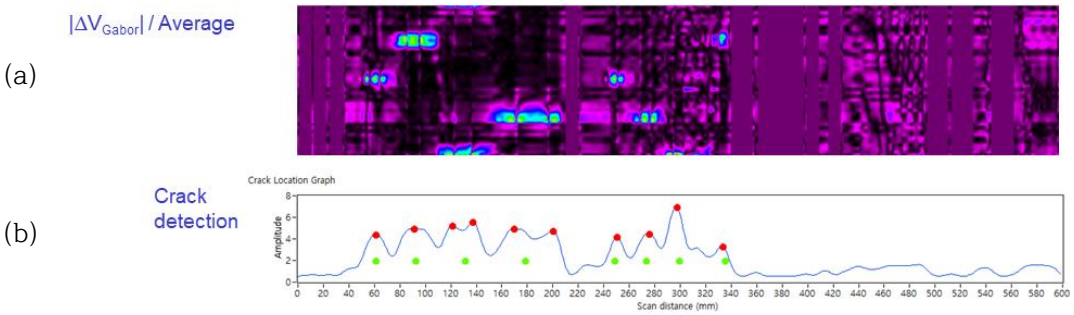


Collection @ chosun

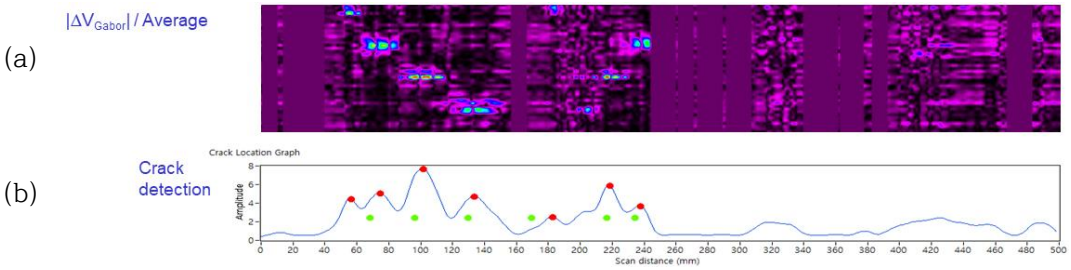
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY




a) specimen 1 result




b) specimen 2-① result




c) specimen 2-② result

**Fig. 3-36 Unmanned crack inspection result**

Fig. 3-37는 결함 자동탐상 및 위치추정 알고리즘을 적용하여, 결함의 위치, 즉 ($\theta_C$, $X_C$) 를 판정한 결과를 나타낸다. 원호방향으로 시험편을 1° 씩 회전하면서, 총 21회의 실험을 수행한 결과, 길이 3mm 이상의 모든 결함을 검출할 수 있었다. 축방향 위치는 용접부 최소화 알고리즘을 적용한 용접부, 서스펜션, 서포터 인근의 균열(#5, #8, #9)에서 3~6mm 정도의 오차가 발생하였다. 또한, 균열의 길이가 긴



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

25mm(#10) 경우에는 결함의 양 선단에서 두 개의 피크가 발생하고, 이의 중심을 추정하는 과정에서 약 3mm의 오차가 발생하였다. 그러나, 그 외의 3~20mm의 길이를 가지는 균열의 중심위치는 1mm 이하의 오차로 위치 추정이 가능하였다. 이는 스캔 간격인 1mm보다 작은 정밀도로 결함의 축방향 위치를 추정할 수 있음을 시사한다. 한편, 균열의 원호방향 위치추정은 용접부(#8)에서 10˚ 정도의 오차가 발생하였으며, 그 이외의 경우에는 센서 배열 간격(8.18˚ )보다 작은 약 4.7˚ 정도의 오차를 보였다.

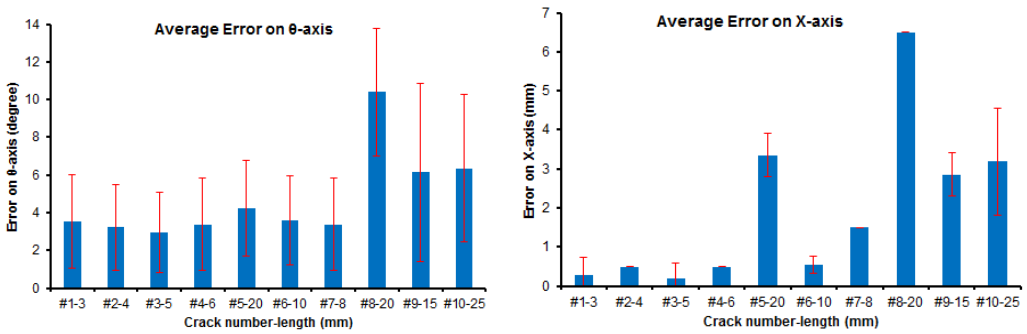



**Fig. 3-37 Unmanned crack position recognition errors**

균열의 길이를 추정하기 위하여, 상기 자동 위치추정 알고리즘에 의하여 추정한 균열의 중심위치, ($\theta_C$, $X_C$)를 중심으로 (±40˚ , ±20mm)의 영역에서 식 (24)과 같이 ΔV의 절대값 총합을 구하였다. Fig. 3-38은 Fig. 3-36의 Unmanned crack inspection result a)에서 #6균열의 중심에서 표현한 ΔV 분포(a)와 이의 절대값 분포(b)를 나타낸다. 절대값 분포를 채택함으로서, 결함의 크기에 따라 증가하는 ΔV 분포의 세기를 정량적으로 평가할 수 있다.

Fig. 3-39은 균열의 길이에 따라, 절대값 총합이 선형적으로 증가하는 관계를 나타낸다. 이러한 관계로부터 식 (25)로 표현되는 균열 길이 추정식을 도출할 수 있었다. Fig. 3-40는 식 (25)에 의하여 추정한 균열의 길이를 실제 길이와 비교한 결과를 나타낸다. 균열의 길이가 작거나 용접부에 걸쳐진 결함인 경우(3~4mm)에는



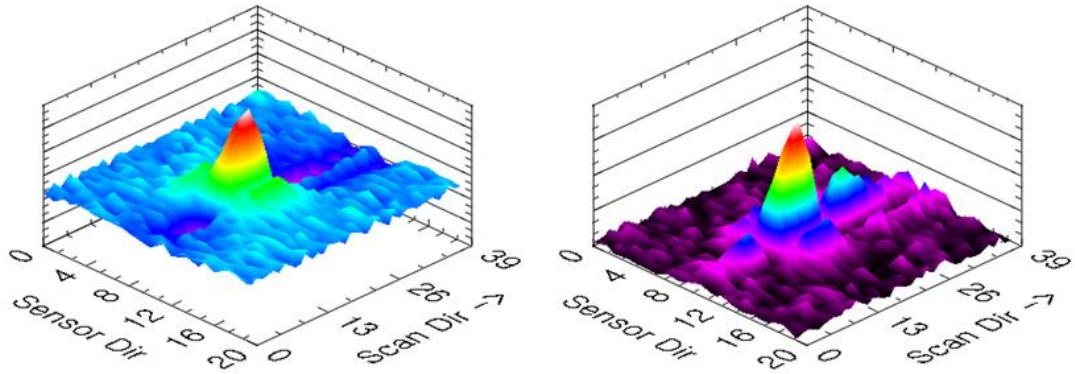
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

비교적 큰 오차를 나타내지만, 전체적으로 2.66mm의 표준편차로 균열 길이를 정량 평가할 수 있었다

$$S = \sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}|\Delta V_S(i,j)| \tag{24}$$

$$L = 59.17 \times S - 2.04 \tag{25}$$




(a) $\Delta V_{RMS}$ (b) $|\Delta V_{RMS}|$

**Fig. 3-38 Data processing area for estimating the crack length**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

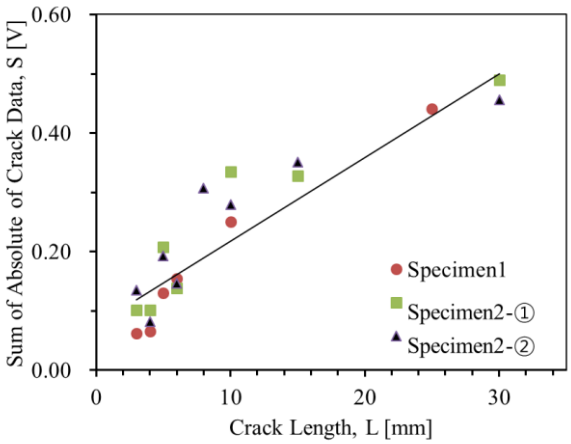



**Fig. 3-39 Relationship between the crack length and the sum of absolute**

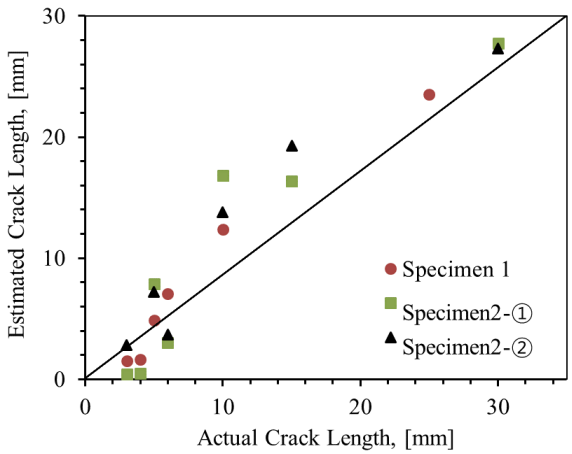



**Fig. 3-40 Length estimation result**



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 제 4장 결 론

본 연구는 보빈형 자기카메라에 의하여 제트항공기 블리드에어덕트(BAD) 용접부 인근의 결함 검출을 포함하는 결함 자동판별 알고리즘을 제안하고, 360˚ 커버리지 성능을 제시하는 것을 목적으로 한다.

여자코일, 44개의 홀센서 배열, 신호처리회로, 인터페이스, 컴퓨터로 구성되는 근접장 보빈형 자기카메라를 구성하였으며, 차분해석, Detrend, 푸리에 변환 및 가버 변환을 이용하여 BAD 내벽의 시변자계 분포를 해석하였다.

근접장 보빈형 자기카메라에 인가하는 최적주파수를 선정하기 위하여, 여자코일 인가주파수를 5~40kHz로 가변하면서 센서의 출력을 주파수별로 비교한 결과, 25~30kHz에서 최대 감도가 지시되었다. 하지만 본 연구에서는 결함을 자동으로 탐지할 수 있는 알고리즘의 도출도 하나의 목적인 바, 15kHz의 150mA의 여자전류를 인가하면서 360˚ 커버리지 성능평가, 결함검출능 및 정량평가를 수행하였다.

인접한 두 개의 센서 사이에 슬릿형 결함이 통과할 경우, 결함의 존재에 기인한 시변자계의 변화를 파악하기 위하여 시험편을 0~20˚ 의 범위에서 1˚ 씩 회전하면서 결함검출능을 평가하였다. 길이 5mm 이하의 작은 균열에서는 균열과 센서의 상대적인 위치에 따라 출력 신호의 크기가 영향을 받을 수 있다. 그럼에도 불구하고, 3mm 이상의 모든 결함을 검출할 수 있었다.

총 44개의 환형배열 자기센서를 포함하는 근접장 보빈형 자기카메라는 5mm 균열에서는 평균 96%, 최소 85%, 25mm 균열에서는 평균 97%, 최소 90%의 360˚ 커버리지 성능을 가진다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

서스펜션, 용접부, 서포터로부터 발생하는 불필요한 데이터를 최소화하기 위한 용접신호 최소화 알고리즘을 제시하여 적용한 결과, 결함의 판독성능을 획기적으로 개선할 수 있었다. 또한, 결함 유무판정 알고리즘을 적용한 결과 길이 3mm 이상의 모든 결함을 검출할 수 있었다. 또한, 위치추정 알고리즘을 적용한 결과, 축방향 위치는 용접부, 서스펜션, 서포터 인근의 균열에서 3~6mm 정도의 오차가 발생하였다. 또한, 균열의 길이가 25mm인 경우에는 약 3mm의 오차가 발생하였다. 그러나, 그 외의 3~20mm의 길이를 가지는 균열의 중심위치는 1mm 이하의 오차로 위치 추정이 가능하였다. 또한, 균열의 원호방향 위치추정은 용접부에서 10° 정도의 오차가 발생하였으며, 그 이외의 경우에는 센서 배열 간격(8.18° )보다 작은 약 4.7° 정도의 오차를 보였다.

결함의 정량평가 알고리즘을 적용한 결과, 균열 길이를 1.76mm의 표준편차로 정량 평가할 수 있었다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# REFERENCE

[1] Bokwon Lee, Ryan L. Karkkainen, Jinyi Lee, Failure Investigation of Pure Titanium Bleed Air Ducts in Jet Fighter, *Engineering Failure Analysis*, under review

[2] T. W. Chao and J. E. Shepherd, Comparison of Fracture Response of Preflawed Tubes Under Internal Static and Detonation Loading, Journal of Pressure Vessel Technology, 126 (2004), pp.345-353

[3] A.M.L. Adib, , C.A.R.P. Baptista, M.J.R. Barboza, C. Haga, C.C.F. Marques, Aircraft engine bleed system tubes: Material and failure mode analysis, Eng. Fail. Anal. 14, 2007, pp. 1605-1617

[4] ASTM B265-13ae1, Standard specification for titanium and titanium alloy strip, sheet, and plate, ASTM Intrnational, 2013.

[5] S.P. Lynch, B. Hole, T. Pasang, Failures of welded titanium aircraft ducts. Eng Failure Anal, 2 (1995), pp. 257–273

[6] http://www.mkckorea.com/catalog/iris

[7] http://www.zetec.co.kr/product/pro_view.php?idx=52

[8] 김현종, “보빈형 근접장 와전류검사 시스템의 개발에 관한 연구”, 조선대학교 대학원 석사학위 논문, 2017

[9] 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)

[10] 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)

[11] 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",



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Journal of Mechanical Science and Technology, 22, pp.2310-2317 (2013)

[12] 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)

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

[14] 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 arrays", International Journal of Applied Electromagnetics Mechanics, 45, pp.747-753 (2014)

[15] 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)

[16] 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)

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

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

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



Collection @ chosun