



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](#)

2017年 2月
碩士學位 論文

보빈形 近接場 渦電流檢査 시스템의 開發에 關한 研究

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 賢 綜

보빈形 近接場 渦電流檢査 시스템의 開發에 關한 研究

A Study of Bobbin-type Near Field Eddy Current
Testing System

2017年 2月 24日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 賢 綜

보빈形 近接場 渦電流檢査 시스템의 開發에 關한 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

2016年 10月

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

金 賢 綜

金賢綜의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 高 樂 溶



委 員 朝鮮大學校 教授 李 鎭 伊



委 員 朝鮮大學校 教授 趙 昌 鉉



2016年 11月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT	viii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이론적 배경	6
제 1절 근접장 와전류 탐상법	7
제 2절 유한요소해석에 의한 거리별 와전류 분포	10
제 3절 근접장 와전류센서의 원리	16
제 3 장 시스템 개발	18
제 1 절 보빈형 자기카메라	19
1. 센서 기구물	21
2. 보빈형 여자기	24
3. 환형 자기센서 배열	25
4. 신호처리회로	26
제 2 절 자동이송장치	28
1. 시험편 고정	30
2. 센서자동이송	31
3. 스톱퍼	33
제 3 절 소프트웨어	34
1. 데이터 취득 소프트웨어	34
2. 데이터 해석 소프트웨어	36
제 4 장 실험 및 고찰	38
제 1절 시험편	38
1. E38Φ 배관	38
2. F50Φ 배관	42
제2절 실험 결과	45
1. E38Φ 배관	45

2. F50Φ 배관.....	5 1
제 3 절 정량평가 알고리즘.....	5 7
1. 균열 유무 판정.....	5 8
2. 균열 길이 판정.....	6 1
제 5장 결 론.....	6 3
REFERENCE	6 5
Acknowledgements	6 7

표 목차

Table 2-1 Sizes and material properties of each component of the proposed inspection system in ANSYS software	1 1
Table 3-1 Components name and description of the bleed air duct sensor probe	2 3
Table 3-2 Components name and description of the inspection system	2 9
Table 3-3 Components name and function of the measurement software	3 5
Table 3-4 Components name and function of the analysis software.....	3 7
Table 4-1 Cracks sizes on the E38Φ-A bleed air duct.....	3 9
Table 4-2 Cracks sizes on the E38Φ-B bleed air duct.....	4 0
Table 4-3 Cracks sizes on the E38Φ-C bleed air duct.....	4 1
Table 4-4 Cracks sizes on the F50Φ-D bleed air duct.....	4 2
Table 4-5 Cracks sizes on the F50Φ-E bleed air duct	4 3
Table 4-6 Cracks sizes on the F50Φ-F bleed air duct	4 4

도 목 차

Fig. 1 -1 Hydraulic system on an aircraft[1].....	1
Fig. 1 -2 Piping systems on an aircraft[2].....	2
Fig. 1 -3 Sample of a bleed air duct on the Northrop Grumman MQ-4C Triton aircraft[3]	2
Fig. 1 -4 Bleed air duct with (a) GFRP, and (b) without GFRP.....	3
Fig. 1 -5 Construction of IRIS probe[4]	3
Fig. 1 -6 Several samples of MRPC probes[5]	4
Fig. 1 -7 Characteristics of a bleed air duct	4
Fig. 2 -1 Principle of eddy current testing[8].....	7
Fig. 2 -2 Amplitude and phase according to the coil distance	8
Fig. 2 -3 Near field, transient field, and remote field.....	8
Fig. 2 -4 Configuration of magnetic sensor array instead of pick-up coil in ECT.....	9
Fig. 2 -5 3-D element modeling of the proposed inspection system in ANSYS software ...	1 0
Fig. 2 -6 Distribution of eddy current on a pipe simulated in ANSYS software	1 4
Fig. 2 -7 Distribution of eddy current around a crack on a pipe simulated by ANSYS software	1 4
Fig. 2 -8 Distribution of Φ -directional magnetic field on the sensing area simulated by ANSYS software	1 5
Fig. 2 -9 Distribution of r-directional magnetic field on the sensing area simulated by ANSYS software	1 5
Fig. 2 -10 Distribution of z-directional magnetic field on the sensing area simulated by ANSYS software	1 5
Fig. 2 -11 Distribution of magnetic field vector on the sensing area simulated by ANSYS software	1 5
Fig. 2 -12 Principle of hall effect sensor[11]	1 7
Fig. 3 -1 Bobbin-type magnetic camera.....	2 0
Fig. 3 -2 Schematic and prototype of an E38 Φ – bleed air duct sensor probe	2 1
Fig. 3 -3 Schematic and prototype of an F50 Φ – bleed air duct sensor probe.....	2 2
Fig. 3 -4 Bobbin – type exciting coil of a bleed air duct sensor probe	2 4
Fig. 3 -5 Bobbin-type integrated Hall sensor array of a bleed air duct sensor probe.....	2 5
Fig. 3 -6 Power supply circuits of the bobbin-type exciting coil (a, b) and signal processing circuits of the BIHaS(c).....	2 6
Fig. 3 -7 Block diagram of signal processing of BIHaS	2 7
Fig. 3 -8 Full inspection system of bleed air ducts	2 8
Fig. 3 -9 Fixture for bleed air duct pipe during inspection	3 0
Fig. 3 -10 Motor and rollers system for movement of the bleed air duct sensor probe	3 1

Fig. 3 -11 Motor controller component of the inspection system.....	3 2
Fig. 3 -12 Stopper component for stopping of sensor movement.....	3 3
Fig. 3 -13 Bleed air duct software: Measurement mode.....	3 4
Fig. 3 -14 Bleed air duct software: Analysis mode.....	3 6
Fig. 4 -1 A bleed air duct pipe: E38Φ-A.....	3 8
Fig. 4 -2 A bleed air duct pipe: E38Φ-B.....	4 0
Fig. 4 -3 A bleed air duct pipe: E38Φ-C.....	4 1
Fig. 4 -4 A bleed air duct pipe: F50Φ-D.....	4 2
Fig. 4 -5 A bleed air duct pipe: F50Φ-E.....	4 3
Fig. 4 -6 A bleed air duct pipe: F50Φ-F.....	4 4
Fig. 4 -7 Experimental results in of the E38Φ-A bleed air duct.....	4 6
Fig. 4 -8 Experimental results in of the E38Φ-B bleed air duct.....	4 8
Fig. 4 -9 Experimental results in of the E38Φ-C bleed air duct.....	5 0
Fig. 4 -10 Experimental results in of the F50Φ-D bleed air duct.....	5 2
Fig. 4 -11 Experimental results in of the F50Φ-E bleed air duct.....	5 4
Fig. 4 -12 Experimental results in of the F50Φ-F bleed air duct.....	5 6
Fig. 4 -13 Crack detection and crack length evaluation algorithm.....	5 7
Fig. 4 -14 Crack area data selection for detection and quantitative evaluation.....	5 8
Fig. 4 -15 Crack detection data graph of for cracks on E38Φ bleed air ducts.....	5 9
Fig. 4 -16 Crack detection data graph of for cracks on F50Φ bleed air ducts.....	6 0
Fig. 4 -17 Estimated length of cracks on E38Φand F50Φ bleed air ducts.....	6 2

약어 설명

FRP	Fiber Reinforced Plastic
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic
IRIS	Internal Rotary Inspection System
MRPC	Motorized Rotating Pancake Coil
NF	Near Field
TF	Transient Field
RF	Remote Field
MR	Magneto-resistive Sensor
GMR	Giant Magneto-resistive Sensor
FEM	Finite Elements Method
MURX	Relative permeability in X direction
RSVX	Electrical resistivity in X direction [$\Omega \cdot m$]
RMS	Root Mean Square value
DAQ	Data Acquisition Device
BIHaS	Bobbin-type Integrated Hall Sensor

기호 설명

V_H	Hall voltage output
K	Hall coefficient
B	Magnetic flux density [Wb/m ²]
I	Sensor input current
φ	Phase difference
T	Tesla

ABSTRACT

A Study of Bobbin-type Near Field Eddy Current Testing System

Hyeonjong Kim

Advisor: Prof. Jinyi Lee, Ph.D.

Dept. of Control and Instrumentation Eng.

Graduate School of Chosun University

The bleed air duct (BAD), include some suspension structure and welding zones for efficient inner placement and separation considering fluid mechanics and air pressure. If the BAD is exposed to corrosive gas and humidity by long use, can get some cracks and might lead to destructions. Also, some BADs can be met with serious accident when there's damage in the near of fuel pipe. Therefore, in appropriate manners, there should be regular check-ups that examining flaws and should take right actions on it. In the research, we suggested non-destructive examination system for checking a BAD's cracks in non-continuous areas such as suspension and welding zones. In this study, we developed bobbin-type Hall sensors array (BIHaS) in near-field eddy current testing (NFECT) for inspection of the BAD. The BIHaS is placed beside an exciting bobbin-type coil in the NFECT to minimize the lift-off. We analyzed distortion of electromagnetic field distribution due to crack existence by finite element method (FEM). Using the result from the analysis, we designed and produced excite coil, sensor arrangement, and signal processing circuit. There are two types of sensor probe will be presented, which are used to inspect 38mm and 50mm inner diameter bleed air ducts. In the $\Phi 38$ mm sensor probe, the exciting coil 80 turns of 0.2mm coated copper wire a on 34mm diameter and 5mm width in a plastic cylinder probe; the BIHaS has 45 hall sensors with interval of 8 degree (2.65mm) on 34mm diameter probe. And, in the $\Phi 50$ mm sensor probe, the

exciting coil 80 turns of 0.2mm coated copper wire a on 48mm diameter and 5mm width in a plastic cylinder probe; the BIHaS has 63 hall sensors with interval of 5.7 degree (2.49mm) on 48mm diameter probe. Bobbin-type magnetic camera, which integrated exciting coil and BIHaS, is placed inside a fixed BAD, can move and measures signal at speed of 30mm/sec. The sensor output signal passed through filters, differential-type amplifiers, root-mean-square circuits, and transferred to a computer by AD converter (USB-6255, NI). Transferred signal displayed by 3D contour surface graph and 2D waterfall graph, and be used to evaluate the defect's size. We verified effectiveness of the developed system by implementing 3mm ~ 30mm axial directional artificial cracks on several titanium BADs, which have thickness of 0.45mm and inner diameters of 38mm and 50mm.

제 1 장 서 론

제트항공기는 공기흡입구(air inlet duct)로 공기를 흡입하여 압축기와 연소실에서 공기를 압축하여 후방의 노즐로 분출하여 추진력을 얻게 된다. 이때 보다 효율적인 연료저장, 연료공급, 유회환, 공기 공급, 냉난방 등의 목적을 달성하기 위하여, Fig. 1-1 과 같이 수많은 배관 및 덕트로 구성된다.

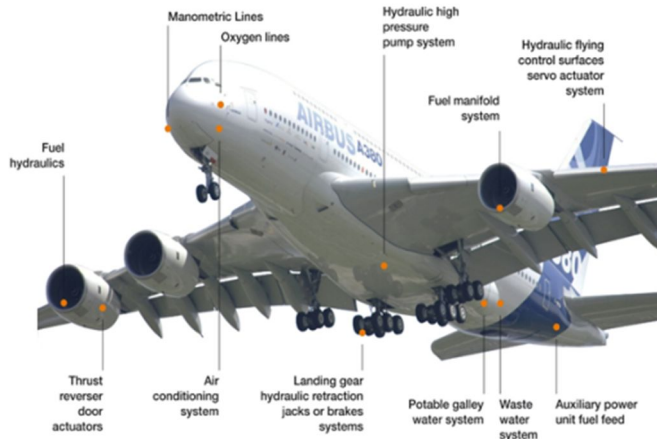


Fig. 1 -1 Hydraulic system on an aircraft[1]

중력을 극복하고 3차원 공간상에서 고속으로 이동하는 항공기의 고유 목적에 따라, 상술한 배관 및 덕트는 티타늄합금과 같은 경량 고강성 재질의 박막 구조가 사용된다. 한 예로 블리드에어덕트(bleed air duct)는 Fig. 1-2 나타낸 바와 같이 엔진의 열을 재활용하여 동체의 얼음을 제거하거나, 항공기 내부의 난방에 활용하기 위한 부품으로서, 제한된 공간 내에서의 효율적인 배치 및 분기 등을 위하여 Fig. 1-3 과 같은 복잡한 구조를 가진다. 또한, 유체 역학적 특성과 함께 팽창과 압축 및 공간적 배치를 고려하여, 일부 서스펜션 구조와 용접부를 포함한다.

블리드에어덕트는 장기 운영에 따라 습기 및 부식성 가스에 장시간 노출될 경우, 균열이 발생 및 진전하여 파괴에 이를 수 있다. 또한, 일부 블리드에어덕트는

연료를 공급하기 위한 연료관과 인접하게 배치될 수 있으므로, 파손에 이를 경우 항공기 사고에 직결될 수 있다. 따라서, 정기적인 검사를 통하여 결함 유무를 판별하고, 적합한 조치를 취해야 한다.

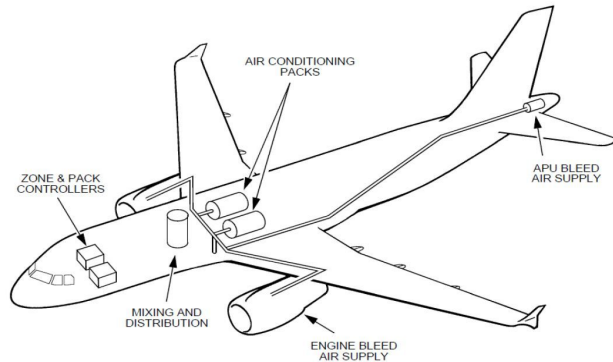


Fig. 1 -2 Piping systems on an aircraft[2]

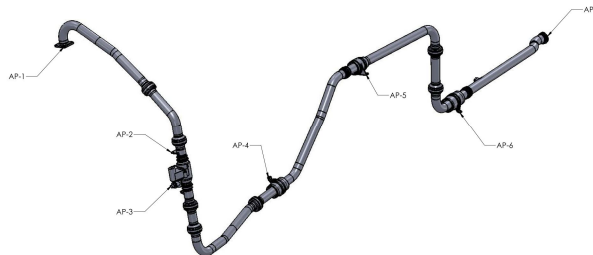


Fig. 1 -3 Sample of a bleed air duct on the Northrop Grumman MQ-4C Triton aircraft[3]

한편, 일부 블리드에어덕트는 효율적인 열전달과 파손시 인접한 구조물에의 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 1-4와 같이 유리섬유강화플라스틱(GFRP, glass fiber reinforced plastic)으로 둘러싼 형태를 가진다. 따라서, 검사를 하는 동안에는 해당 GFRP 피복을 제거하지 않고 검사할 필요가 있다.

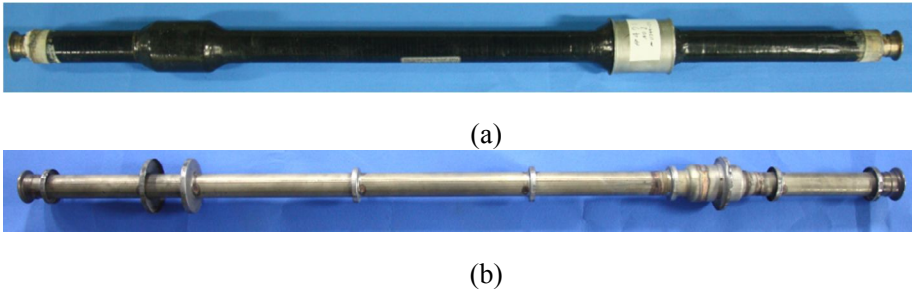


Fig. 1 -4 Bleed air duct with (a) GFRP, and (b) without GFRP

블리드에어덕트와 같은 배관 내부의 결함을 검출하여 건전성을 평가하기 위한 비파괴검사 수단으로 회전형 초음파(IRIS, internal rotary inspection system) 및 회전형 와전류(MRPC, motorized rotating pancake coil)가 활용될 수 있다. IRIS는 Fig. 1-5에 나타낸 바와 같이 배관 내부에 회전하는 초음파센서를 설치하여 전진시키면서 연속적인 신호를 측정함으로써, 배관 내부의 초음파 C-scan 영상을 획득하는 시스템이다. 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. 1-6)는 IRIS와 마찬가지로 나선형으로 회전·전진하는 센서에 의하여 와전류 C-scan영상을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 검사시간이 길다는 단점은 해결해야 할 문제 중 하나이다.

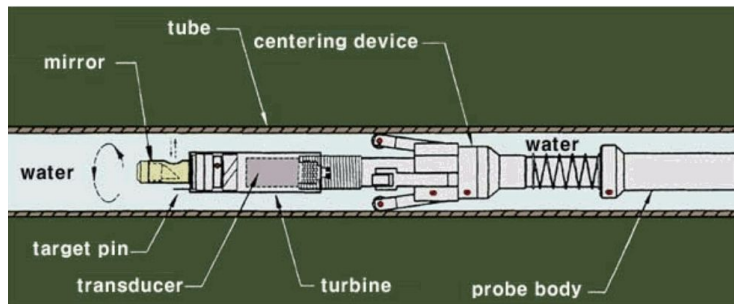


Fig. 1 -5 Construction of IRIS probe[4]



Fig. 1-6 Several samples of MRPC probes[5]

한편, 블리드에어덕트는 Fig. 1-7에 나타난 바와 같이 박막 구조이면서, 용접부 및 서스펜션과 같은 불연속면이 있다는 점과 접촉 매질의 투입이 허락되지 않는다는 면에서 종래의 IRIS 또는 MRPC의 적용이 곤란하다.

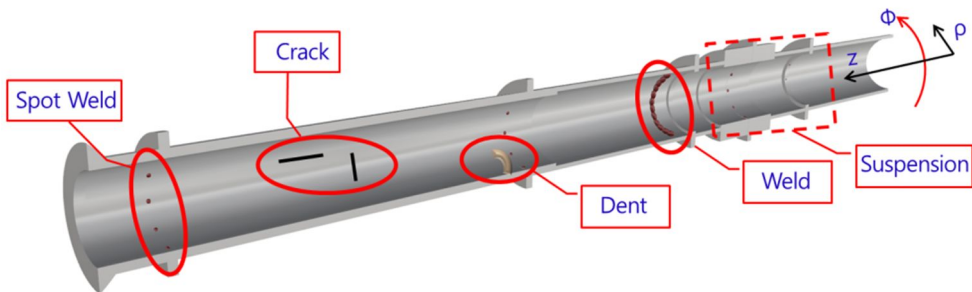


Fig. 1-7 Characteristics of a bleed air duct

따라서, 본 연구에서는 티타늄 재질의 박막구조에서 결함검출능이 우수한 와전류 탐상법의 장점을 활용하면서, 용접부 및 서스펜션과 같은 불연속면을 가지는 블리드에어덕트의 비파괴검사 시스템을 개발하고자 하였다. 용접부와 같은 불연속면에서 센서를 보호하면서 lift-off의 감소를 최소화하기 위하여 근접장 와전류 탐상법을 활용하였다. 근접장 와전류에 의한 효율적인 유도전류의 인가 및 결함의 존재에 기인한 와전류의 변화, 전자기장 분포의 왜곡을 유한요소법에 의하여 해석하였다.

이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 여자코일, 센서배열, 센서기구물 및 신호처리 회로를 설계 제작하였다. 또한, 검사 정밀도를 향상시키기 위하여 자동이송기구를 제작하였으며, 상술한 센서부와 일체화하여 블리드에어덕트 내부의 와전류 분포를 측정, 영상화 및 해석할 수 있도록 하였다. 이들 하드웨어를 운용할 수 있는 측정 및 해석용 소프트웨어를 개발하였다. 이상의 하드웨어 및 소프트웨어에 의하여 본 연구의 목표를 달성하였는지 확인하기 위하여, 길이 3~30mm의 길이를 가지는 인공균열을 두께가 0.45mm이고, 각 내경이 38mm 및 50mm의 티타늄재질의 블리드에어덕트에 방전 가공하여, 실험 및 검증하였다.

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 제 1장은 서론이며, 제 2장은 블리드에어덕트 탐상을 위한 비파괴 검사방법의 이론적 배경에 대하여 설명한다. 제 3장은 본 연구를 통하여 제작한 비파괴검사시스템에 대하여 소개한다. 제 4장은 제 2장의 원리 및 제 3장의 시제품을 이용하여 블리드에어덕트 결함 탐상에 적용한 결과를 보고한다. 제 5장은 결론이다.

제 2 장 이론적 배경

와전류 탐상법은 전기적으로 도체인 검사체에 시변 전자기장을 인가하고, 결함의 존재에 기인한 전자기장의 왜곡을 측정하여 결함유무 및 크기를 추정하는 검사 방법이다.

본 연구에서는 배관에 존재하는 결함을 검사하기 위한 와전류 탐상법을 수치 해석적으로 모사하기 위하여 유한요소해석법(FEM, finite elements method)을 이용하였다. FEM 수치해석 프로그램인 ANSYS(Ver.11.0 SP1 UP20070830, EMAG)를 이용하였으며, 배관 시험편과 결함, 코일, 센서, 공기 등의 요소에 도전을 및 투자율의 특성을 부여하고 해석하였다.

1절은 근접장 와전류 탐상법에 대한 원리를 설명하고, 2절은 FEM 해석 및 결과, 3절은 해석결과를 바탕으로 선택한 홀센서에 대하여 설명한다.

제 1절 근접장 와전류 탐상법

Fig. 2-1과 같이 패러데이 법칙(Faraday effect)에 의하여 시험 전도체 위에 교류전류가 흐르는 코일을 접근시키게 되면 시험 전도체 표면에 와전류가 발생한다[6]. 이때 시험 전도체에 결함이나 부식 등 특이점이 있는 부분이 존재하게 될 경우 와전류의 왜곡 현상이 발생하며 전류특성에 변화가 생긴다. 따라서 코일 주변의 자기장의 변화에 따라 임피던스도 함께 바뀌게 되는데 이와 같은 임피던스 변화를 이용하여 결함을 검출 하는 것을 와전류 탐상법이라고 한다[7].

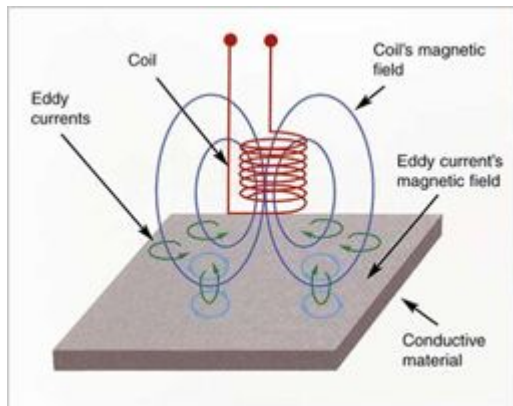


Fig. 2 -1 Principle of eddy current testing[8]

와전류 탐상법을 이용하여 배관 형태의 피검사체를 검사할 때에는 보빈형 와전류탐상법이 적용된다. 보빈형 와전류탐상법은 자기인덕턴스를 이용하는 방법과 상호인덕턴스를 이용하는 두 가지 방법이 있다. 상호인덕턴스의 경우에는 여자코일(exciting coil)과 측정코일(pick-up coil)로 구성된다. 한편, 여자코일과 측정코일의 축방향 거리에 따라서 근접장(NF, near field), 천이장(TF, transient field), 원격장(RF, remote field) 세가지 경우로 나뉘어지게 된다.

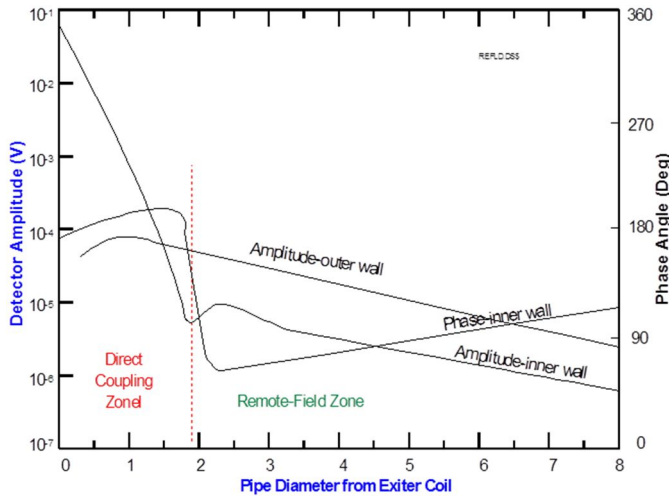


Fig. 2-2 Amplitude and phase according to the coil distance

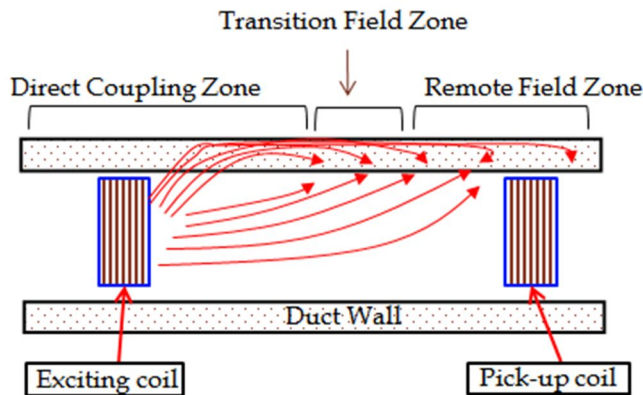


Fig. 2-3 Near field, transient field, and remote field

Fig. 2-2와 Fig. 2-3에서는 근접장, 천이장, 원격장에서의 진폭(amplitude) 및 위상차(phase angle)의 상대적인 크기와 원리를 나타낸다[9]. 근접장은 여자코일과 측정코일이 인접해 있으면 측정코일에 직접 전달되는 유도기전력의 영향으로 진폭이 최대가 되며, 위상차는 180° 의 지연이 발생하게 되는 구간이다. 이후 측정코일의 거리가 이격될수록 진폭은 점차 감소하게 되는데 여자코일과의 거리가 직경의 약 2배가 되는 영역에서 진폭이 약간 증가하면서 위상차가 급격히 변화하는 현상이 발

생하는 영역이 천이장이다. 여기에서 두 개의 코일간의 거리가 이격될수록 진폭은 서서히 감소되고, 위상차는 다시 증가하는 경향을 보이게 되는데 이 구간을 원격장이라고 한다. 원격장은 측정코일이 여자코일로부터 직접적인 영향을 받지 않고 간접경로를 통해 전달되는 에너지만을 감지할 수 있도록 원격장 영역에 위치하며, 여자코일과 측정코일이 결함부위를 지날 때 각각 결함 지시를 하여 하나의 결함에 대해 두 번의 결함 지시가 나타난다. 탐상 신호로는 센서코일에 유도되는 기전력이 사용되지만, 기전력의 크기가 매우 작은 값이기 때문에 위상신호를 사용한다. 즉, 여자코일과 측정코일 사이의 위상차가 결함을 지시하는 주요 수단이 되는 것이 원격장이다[10].

여기에서 감도는 충전율이 좌우하게 되는데 코일과 시험체의 간격, 즉 lift-off가 작을수록 감도가 높다. 한편 시험체인 배관 내부에 불연속면이 존재하게 되면 센서가 손상될 수 있으므로 코일의 크기가 줄어들게 된다. 결과적으로 lift-off가 증대되고 충분한 충전율을 확보하지 못하여 감도가 저하될 수 있다. 본 연구에서는 시험체 내부환경에 기인하여 최대한의 충전율을 확보하고 센서의 lift-off를 최소화하기 위하여 Fig. 2-4와 같이 측정코일(pick-up coil) 대신에 자기센서로 대체하여 사용하고 센서와 코일을 분리하여 최대한 근접하게 배치하였으며, 결과적으로 근접장을 활용하였다.

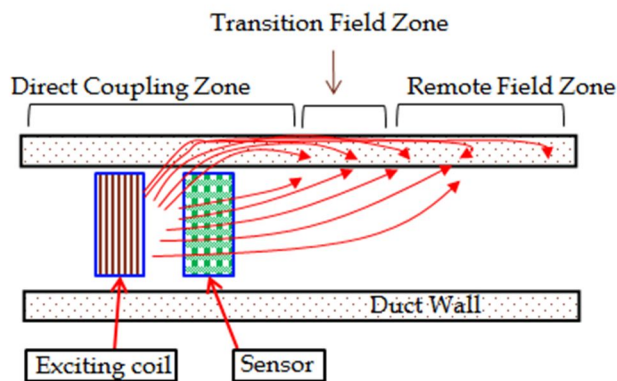


Fig. 2-4 Configuration of magnetic sensor array instead of pick-up coil in ECT

제 2절 유한요소해석에 의한 거리별 와전류 분포

본 절에서는 불연속면을 가지는 내경이 38mm인 티타늄재료의 배관에 유도전류를 인가하였을 때 결함의 존재에 기인한 유도전류의 왜곡 및 전자기장의 분포를 파악하기 위하여, 상용화된 수치해석 프로그램인 ANSYS(Ver.11.0 SP1 UP20070830, EMAG)를 이용하였다. Fig. 2-5, Table 2-1는 해석검사체의 수치해석을 위한 모델링 및 물질상수, 경계조건을 나타낸다.

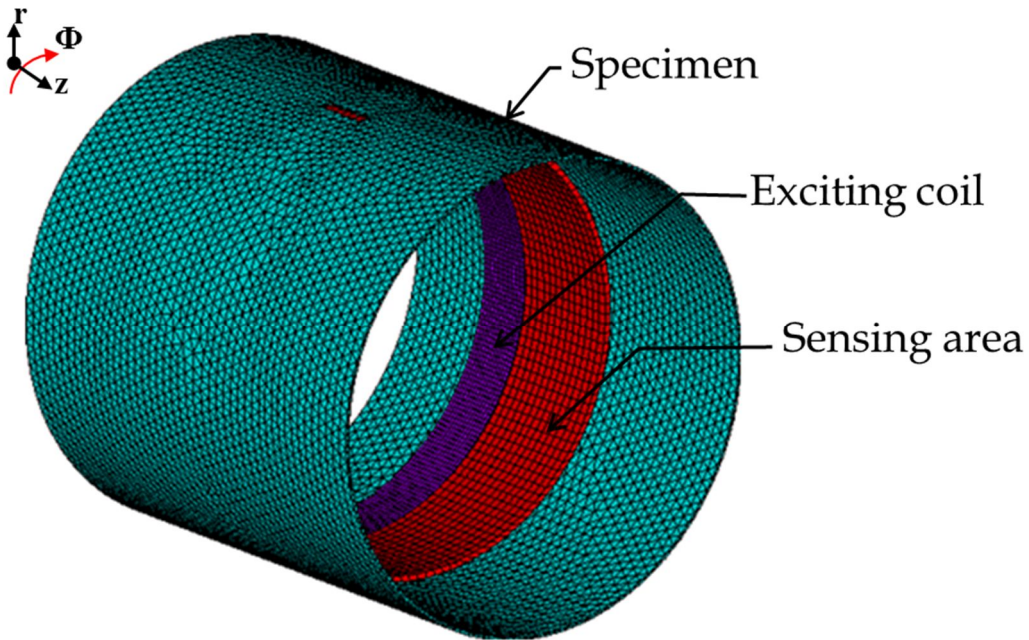


Fig. 2-5 3-D element modeling of the proposed inspection system in ANSYS software

Fig. 2-5에 나타난 바와 같이 여자코일(exciting coil)에 교류전류를 인가하여 시험편에 유도전류를 유도하였다. 결함의 존재에 기인하여 유도전류가 왜곡될 때 발생하는 교번자기장을 자기센서에 의하여 측정하는 것을 모사하기 위하여 측정영역(sensing area)을 별도로 모델링하였다. 근접장을 모사하기 위하여 여자코일과 센서 측정영역은 동축형으로 나란히 배치하였다.

Table 2 -1 Sizes and material properties of each component of the proposed inspection system in ANSYS software

Item	Material	Properties	Size [mm]	Mesh size [mm]	Ansys model
Specimen	Titanium	MURX 1.0005 RSVX 1.276E-6	$\Phi 38 \times t0.45 \times L40$	1	SOLID117,1
Coil	Copper	MURX 1	t0.2 1Coil 80 turns 200mA @ 15kHz	1	SOLID117
Sensing Area	Air	MURX 1	$\Phi 36 \times t1 \times L10$	1	SOLID117
Crack	Air	MURX 1	$L1 \times W5 \times D0.45$	1	SOLID117
Environment	Air	MURX 1	$W58 \times D60 \times H58$	1	SOLID117

MURX: Relative permeability
RSVX: Electrical resistivity

보다 구체적인 모사대상의 크기 및 전자기적 특성은 Table 2-1과 같다. 배관은 내경 38mm, 두께 0.45mm, 길이 40mm로 모델링하였으며, 코일은 폭 5mm의 원통형 기구물에 두께 0.2mm 코일을 80회 권선한 것을 모델링하였다. 측정영역은 외경 36mm, 두께 1mm, 폭은 10mm이며, 시험편과의 거리 즉, lift-off를 1mm로 모사하였다. 또한, 요소(element)의 크기를 1mm로 분할함으로써 센서의 공간분해능을 모사하였다. 여자코일의 선단으로부터 센서의 선단까지의 거리는 0.5mm 이격하였다. 결합은 길이 5mm, 폭 1mm, 깊이 0.45mm인 관통결합을 배관의 축방향(z-방향)으로 모사하였다. 유도전류는 배관 내부에 원주(Φ -방향)으로 인가하였다. 시험편, 여자코일, 측정영역은 전체적으로 가로 58mm, 세로 60mm, 높이 58mm인 육각형의 공기층 안에 위치하도록 하였다.

시험편은 비투자율 1.0005, 전기저항률 $1.276 \times 10^{-6} [\Omega \cdot m]$ 인 티타늄합금이고, 여자코일은 구리로 설정하였다. 또한 측정영역, 균열 및 공기는 비투자율을 1로 설정하였다.

Fig. 2-6은 여자 코일에 15kHz의 교류전류(200mA)를 인가 하였을 때, 시험편에 유도되는 전류밀도를 해석한 그림이다. 표시영역은 $0 \sim 2,595 A/m^2$ 이며, 최소값과 최대값을 각각 파란색과 붉은 색으로 표시하였다. 화살표의 길이는 각 요소에서의 전류밀도의 크기를 나타낸다. 결합 주변에서 전류밀도의 왜곡이 나타나며, 특히 결합의 선단에서 붉은 색의 가장 긴 벡터값이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2-7은 결합 영역의 전류밀도 벡터를 확대한 해석결과로서, 각 결합의 선단을 우회하는 전류밀도가 발생하고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 자기장은 상술한 전류밀도의 회전에 의하여 발생하므로, 결합의 양 선단에서 각각 반대 방향의 자기장 분포가 나타난다.

Fig. 2-8은 측정영역에서 자기센서가 원주(Φ -방향) 방향의 성분을 측정할 경우를 모사한 결과이다. 결합의 양 선단에서 왜곡되는 전류밀도에 의하여 발생하는 자기장의 Φ -방향 성분(V_Φ)이 결합이 없는 영역과 구분되어, V_Φ 에 의하여 결합의 존재 여부를 확인할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 2-9는 측정영역에서 자기 센서가 수직(r -방향) 방향의 성분을 측정할 경우를 모사한 결과이다. 결함의 양끝 모서리 부근에서 왜곡되는 전류밀도에 의하여 발생하는 자기장의 r -방향 성분(V_r)이 결함이 없는 영역과 명확하게 구분되며, V_r 에 의하여 결함의 존재 여부를 확인할 수 있음을 알 수 있다. 또한, V_Φ 에 비하여 결함 선단의 전자기장의 왜곡이 보다 명확하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2-10은 측정영역에서 자기 센서가 축(z -방향) 방향의 성분을 측정할 경우를 모사한 결과이다. 결함의 양 선단에서 자기장의 z -방향 성분(V_z)이 결함이 없는 영역과 구분되지 않으며, 결과적으로 V_z 에 의하면 결함의 존재 유무를 탐지하기 곤란하다.

Fig. 2-11은 r , Φ , z 방향의 벡터를 센서영역 전체에서 표현한 그림이다. 결함 근방에서 r 방향과 Φ 방향의 자기장이 변화하고 있음을 알 수 있다. 이상의 유한요소해석에 의하여 얻은 결과를 토대로 r -방향의 자기장에 반응하는 자기센서를 측정영역에서 환형으로 배열하고, 벡터의 크기 즉, 진폭을 측정하기 위한 평활화(RMS, root mean square) 신호처리회로와 연계한 보빈형 근접장 와전류검사 시스템을 개발하였다.

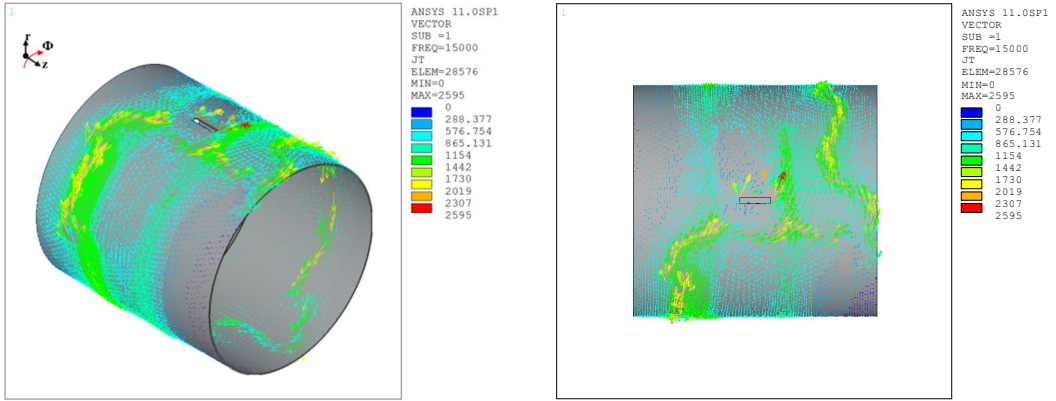


Fig. 2 -6 Distribution of eddy current on a pipe simulated in ANSYS software

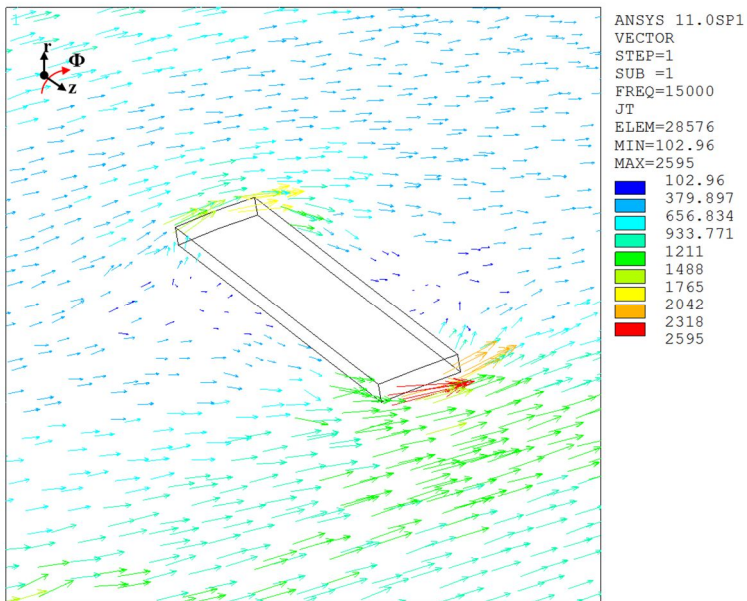


Fig. 2 -7 Distribution of eddy current around a crack on a pipe simulated by ANSYS software

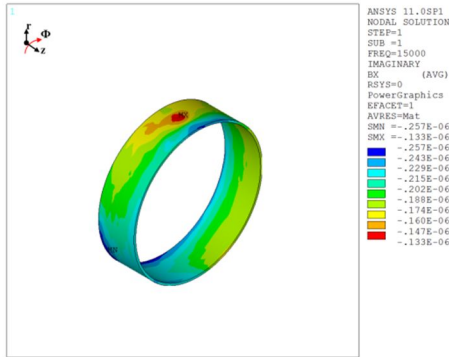


Fig. 2-8 Distribution of Φ -directional magnetic field on the sensing area simulated by ANSYS software

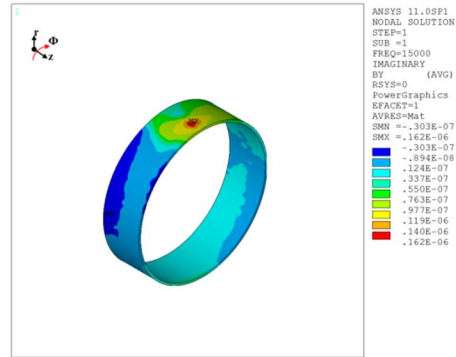


Fig. 2-9 Distribution of r-directional magnetic field on the sensing area simulated by ANSYS software

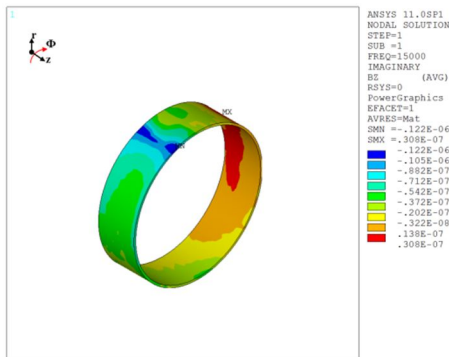


Fig. 2-10 Distribution of z-directional magnetic field on the sensing area simulated by ANSYS software

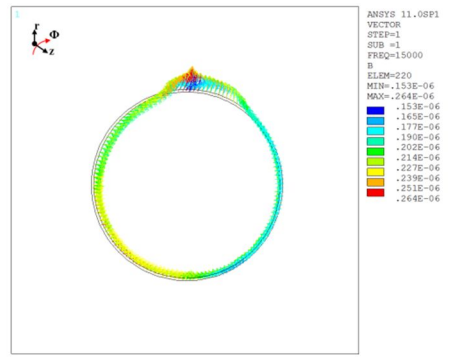


Fig. 2-11 Distribution of magnetic field vector on the sensing area simulated by ANSYS software

제 3절 근접장 와전류센서의 원리

전술한 바와 같이 본 연구에 의한 보빈형 근접장 와전류 검사시스템에 의하면, r-방향의 자기장에 반응하는 자기센서를 사용하는 것이 블리드에어덕트와 같은 복잡한 조건의 시험편을 검사하는데 적합하다.

홀센서는 Fig. 2-12에 나타난 바와 같이 센서에 수직인 방향의 자기장의 세기에 따라 출력전압이 변하는 자기센서 중 하나이다. 도체에 전류가 흐르는 상태에서 전류의 방향과 수직으로 자기장이 인가될 때, 전류가 흐르는 도체 내에서 전류와 수직방향으로 전위차가 발생한다. 이 때 발생하는 전위차를 홀전압(V_H)이라 한다.

$$V_H = kBI\cos\theta \quad (1)$$

여기에서 k , B , I , θ 는 각각 홀상수, 자기장의 세기, 입력전류 및 자기장과 센서면이 이루는 각도를 나타낸다. 한편, 여자기에 교류전류를 인가하여, 시험편에 2차 전류를 유도하여 결함 주변에서 시변자기장을 발생시키는 본 시스템에 의하면, 상술한 식 (1)은 다음 식으로 변형될 수 있다.

$$V_{H,AC} = kBI\cos\theta\cos(2\pi ft + \varphi) \quad (2)$$

여기에서 f 와 φ 는 각각 입력 교류전류의 주파수와 위상차를 나타낸다. 또한, 진폭을 측정하기 위하여 RMS 신호처리회로를 도입하면, 상술한 식 (2)는 다음 식으로 변형된다. 즉,

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{kBI\cos\theta\cos(2\pi ft + \varphi)\}^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} k|B|I\cos\theta \quad (3)$$

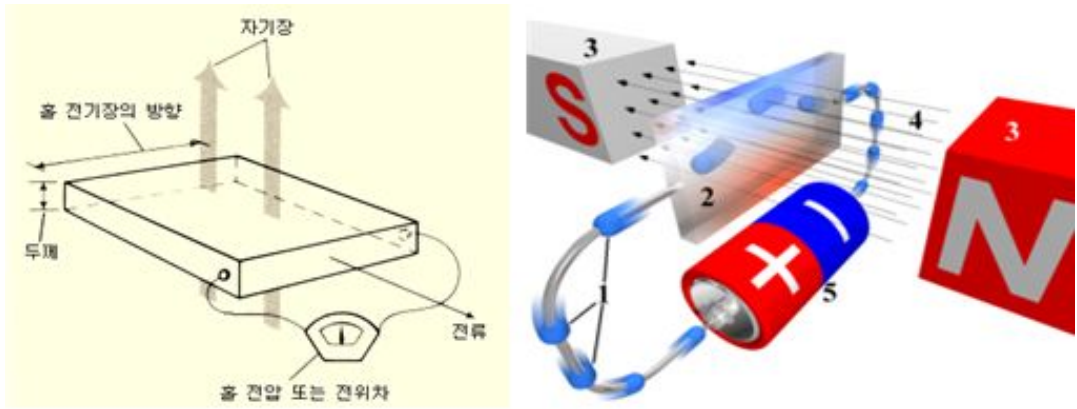


Fig. 2 -12 Principle of hall effect sensor[11]

제 3 장 시스템 개발

본 장에서는 블리드에어덕트 측정 시스템을 소개한다. 시스템은 보빈형 자기카메라, 자동이송장치, 소프트웨어부로 구성된다. 보빈형 자기카메라는 여자코일과 환형배열센서를 별도의 기구물로 제작 후 조립하여 적용성, 보수성, 확장성을 극대화하였다.

자동이송장치는 신호처리장치, 직류안정화전원, 시편고정부, 모터제어장치, 케이블이동 보조장치, 기구부 이송 벨트 텐션 조정장치, 컴퓨터로 구성된다.

소프트웨어부는 National instruments사의 LabVIEW(NI, 2012)를 이용하여 구동신호 입력 및 제어가 가능하도록 하고, 측정 신호 수집데이터를 실시간으로 취득 및 해석 기능을 수행할 수 있도록 하였다.

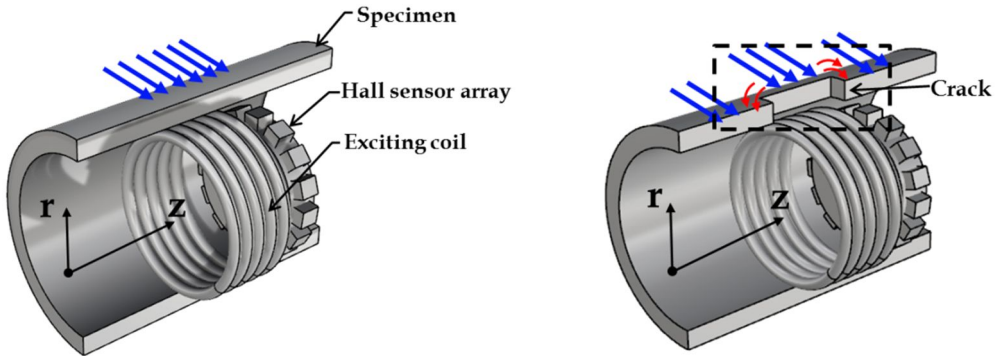
제 1 절 보빈형 자기카메라

자기카메라는 자원(magnetic source), 자기센서, 신호처리회로, 인터페이스, 컴퓨터로 구성된다. 자원의 경우 직류자원과 교류자원으로 구분되며, 고투자율의 강자성체 금속의 결합 탐상 시 직류자원을 인가한다[12]. 또한, 높은 도전율을 가진 상자성체 금속의 결합 탐상 시 교류자원을 인가한다[13]. 피측정체에 직류자원 또는 교류자원으로 인한 전자기장 발생시 이를 인가하면, 결합의 존재 및 크기에 따라 결합주변에서 전자기장의 분포가 왜곡되며, 이에 따른 인피턴스 값도 변화한다. 따라서, 전자기장의 분포를 자기센서로 측정하여 결합의 존재 유무를 판별할 수 있으며, 위치와 크기도 정량적으로 추정할 수 있다. 자기센서는 GMR센서, MR센서, Hall센서 및 코일이 사용되었다[14-16]. 또한, 전자기장 분포를 측정할 경우, 측정시간 단축 및 공간분해능 향상을 위하여 자기센서를 선형, 보빈형, 면적형 및 원통형으로 배열하는 방법이 개발되어 왔다[17-19]. 이러한 자원-센서 분리방식의 장점으로 인접한 센서끼리 상호 작용을 최소화 하며, 센서의 크기를 줄일 수 있고, 간격도 조밀하게 배열할 수 있어 높은 공간분해능을 가질 수 있다. 또한, 동시에 센서 구동이 가능하여 검사 속도를 향상시키고, 증폭 및 필터링과 같은 신호처리 방법도 용이하다. 한편 교류자원을 인가할 경우, 결합 주변에서 전기장의 왜곡에 기인한 교번자기장이 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 필요하다. 센서로 받아들인 신호는 RMS회로를 통과하여 평활화 한 후 진폭은 AD변환기를 통하여 컴퓨터에 입력된다. 이후 데이터 저장, 후처리, 영상화 및 해석에 활용된다. 본 연구를 통하여 개발한 내삽 보빈형 와전류센서는 Fig. 3-1과 같이 자원으로 내삽형 코일을 사용하였다. 내삽형 코일에 교류전원을 입력하면, 시험편인 티타늄 배관에 유도전류가 발생한다. 유도전류는 원주방향(θ -방향)으로 발생하며, 따라서 배관에 결합이 없을 때에는 축방향(z -방향)의 교번자기장을 발생시킨다.

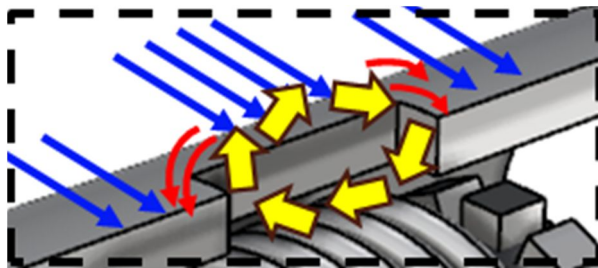
한편, 내삽형 코일과 시험편의 사이에는 와전류센서 중 하나인 홀(Hall)센서가

환형으로 배열된다. 홀센서는 센서 표면에 수직인 방향의 자기장의 세기에 비례한 전압을 출력하게 되므로, 내삽 보빈형 와전류센서는 반지름방향(r -방향)의 자기장을 검출하게 된다[20]. 따라서, 배관에 결함이 없을 때 발생하는 축방향(z -방향) 교번자기장은 자기센서에 큰 영향을 미치지 않게 된다[21]. 그러나, 배관에 결함이 존재할 때에는 유도전류가 배관의 표면을 따라 왜곡되며, 결과적으로 반지름방향의 교번자기장이 발생한다. 따라서, 보빈형으로 배열된 홀센서에 의하여 결함의 존재 및 크기에 기인한 교번 자기장의 분포를 정량적으로 측정할 수 있게 된다[22].

이하 자기카메라의 주요 구성요소인 센서기구물, 보빈형 여자기, 환형자기센서 배열 및 신호처리회로에 대하여 구체적으로 설명한다.



(a) induced current on a pipe without crack (b) distortion of induced current around a crack

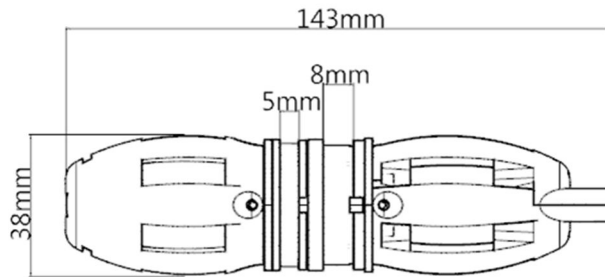


(c) electromagnetic field distribution around a crack

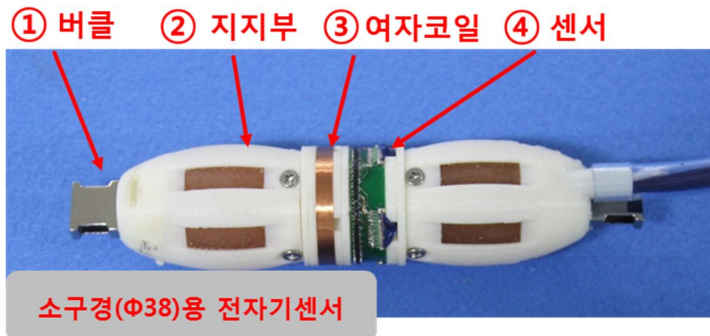
Fig. 3-1 Bobbin-type magnetic camera

1. 센서 기구물

Fig. 3-2는 내경 38mm의 배관을 검사하기 위해 제작된 보빈형 와전류 검사시스템의 도면과 구성을 나타낸다. 이하 내경이 38mm 배관은 E38Φ로 표기한다. 기구물의 크기는 지름 38mm, 길이 143mm, 플라스틱(ABS수지) 재질로 제작되었다. Fig. 3-2에서 ①은 기구물 이동시 체결되는 벨트와 연결하기 위한 버클이며, ②는 시험편의 내벽에 접촉하여 여자기 및 자기센서배열과 시험편 내벽과의 lift-off를 유지하기 위한 지지부이다. 지지부는 용접부를 회피하면서 스캔 중 센서의 회전을 방지하기 위하여 축방향의 홈을 가지도록 가공 하였다. 내부에는 우레탄을 삽입하여 신축성을 부여하였으며, 배관 내면의 단차로 인한 센서 손상을 방지한다. ③과 ④는 센서부와 코일부를 별도로 만들어 배치하였다. 이러한 구조에서 센서의 lift-off는 2mm이다.



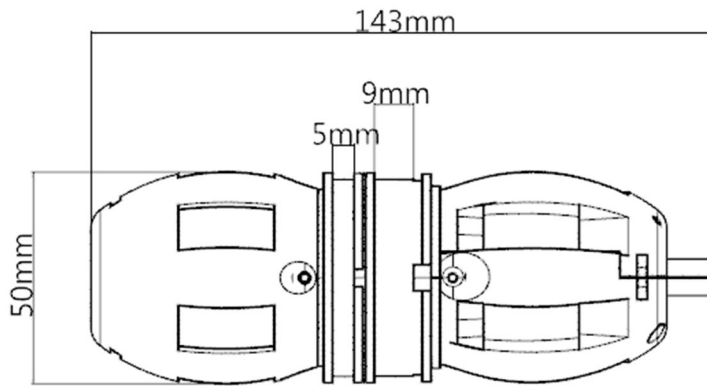
(a) Schematic of an E38Φ - bleed air duct sensor probe



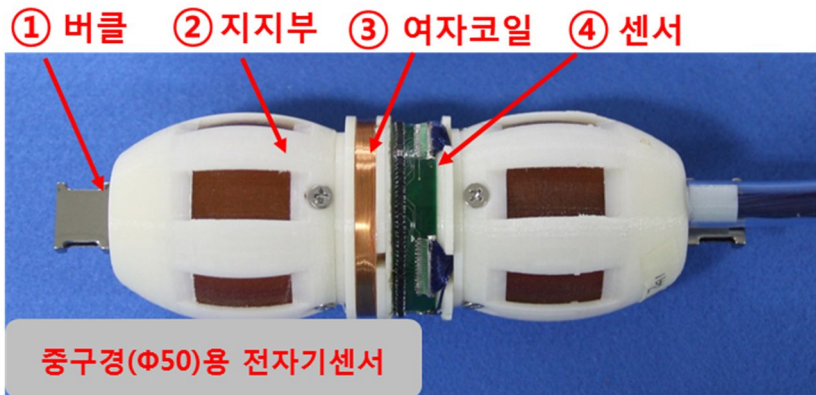
(b) Prototype of an E38Φ - bleed air duct sensor probe

Fig. 3-2 Schematic and prototype of an E38Φ - bleed air duct sensor probe

Fig. 3-3은 내경이 50mm의 배관을 검사하기 위하여 제작된 보빈형 와전류 검사 시스템의 도면과 구성을 나타낸다. 이하 내경이 50mm인 배관은 F50Φ으로 표기한다. 기구물의 크기는 지름 50mm, 길이 143mm로, 이러한 구조에서 센서의 lift-off는 1.6mm이다. 재질은 플라스틱(ABS) 소재로 버클부, 지지부, 여자코일, 센서로 구성되어 E38Φ 배관용 기구물의 구조와 같다.



(a) Schematic and of an F50Φ – bleed air duct sensor probe



(b) Prototype of an F50Φ – bleed air duct sensor probe

Fig. 3-3 Schematic and prototype of an F50Φ – bleed air duct sensor probe

Table 3-1은 보빈형 와전류 검사시스템의 각 부분을 ①~④까지 연번 순으로 나열하여 부품의 요소명과 기능을 표기하였다.

Table 3 -1 Components name and description of the bleed air duct sensor probe

연번	상세 요소명	상세 설명
①	버클	• 전자기센서를 구동용 벨트에 고정하기 위한 기구
②	지지부	• 전자기센서의 몸체로서 벽면지지 기능을 하며, 내부에 우레탄 폼을 삽입하여 내구성을 향상 하였음 • 두 개의 벽면지지부 사이에 여자 코일과 전자기센서 배열을 위치시켜 고정함
③	여자코일	• Duct 내부에 와전류 발생시키는 여자 코일
④	센서	• 전자기센서를 Duct의 원주방향으로 배열

2. 보빈형 여자기

Fig. 3-4는 보빈형 와전류 검사시스템의 여자기이다. 여자기는 교류전류를 인가하여 Duct 내부에 와전류를 발생시키는 장치이다. (b)는 E38Φ 배관용 여자기이며, 지름 34mm, 코일의 권선 폭은 5mm로 구성되어 있다. (c)는 F50Φ 배관에 사용되는 여자기로 지름 48mm, 코일의 권선 폭은 5mm로 되어 있다. 각 여자기에 쓰이는 코일은 두께 0.2mm, 권선 수는 80회로 동일하다.

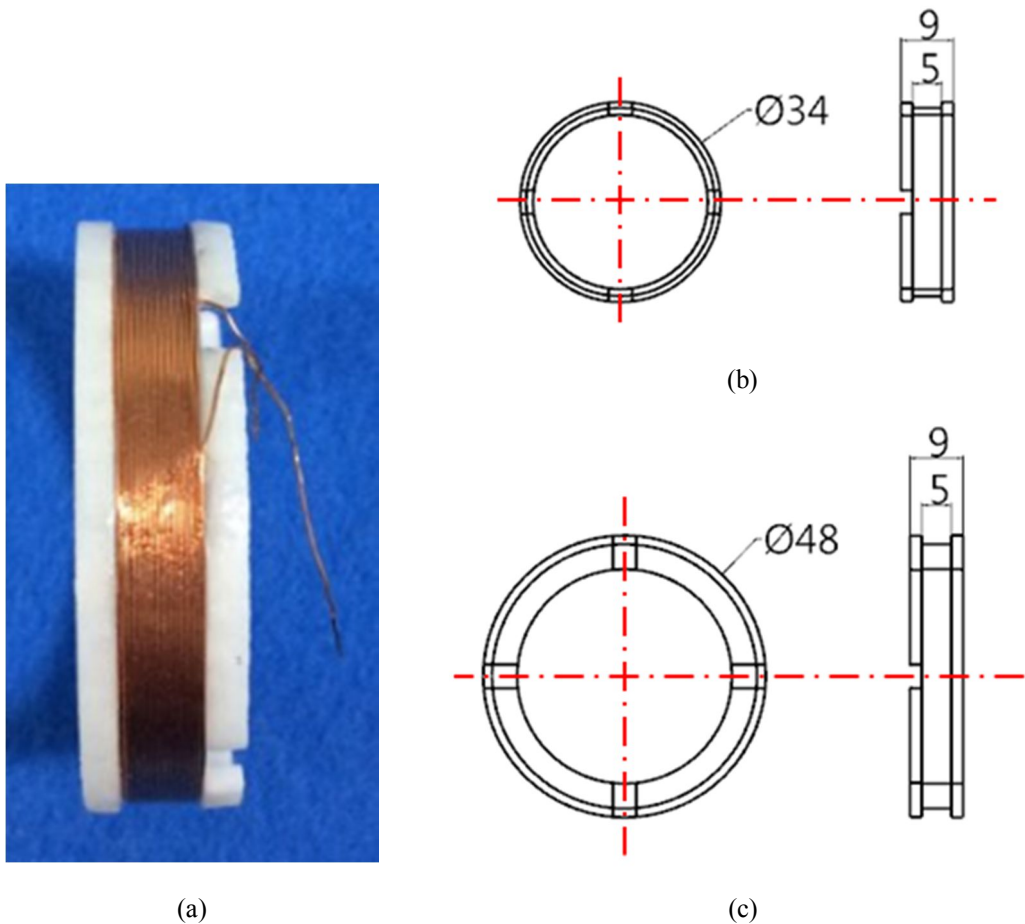


Fig. 3-4 Bobbin – type exciting coil of a bleed air duct sensor probe

3. 환형 자기센서 배열

Fig. 3-5는 보빈형 와전류 검사시스템의 센서부이다. 환형 자기센서는 홀(Hall)센서를 이용하여 균열부에서 발생하는 와전류 왜곡의 변화를 정량적으로 측정한다. (b)는 E38Φ 배관용으로 지름 34mm, 총 45개의 센서를 8°간격으로 배열하여 공간분해능은 채널당 2.65mm를 가진다. (c)는 F50Φ 배관에 사용되며 지름 48mm, 총 63개의 센서를 5.71°의 간격으로 배열하였으며, 결과적으로 공간분해능은 채널당 2.49mm를 가진다.

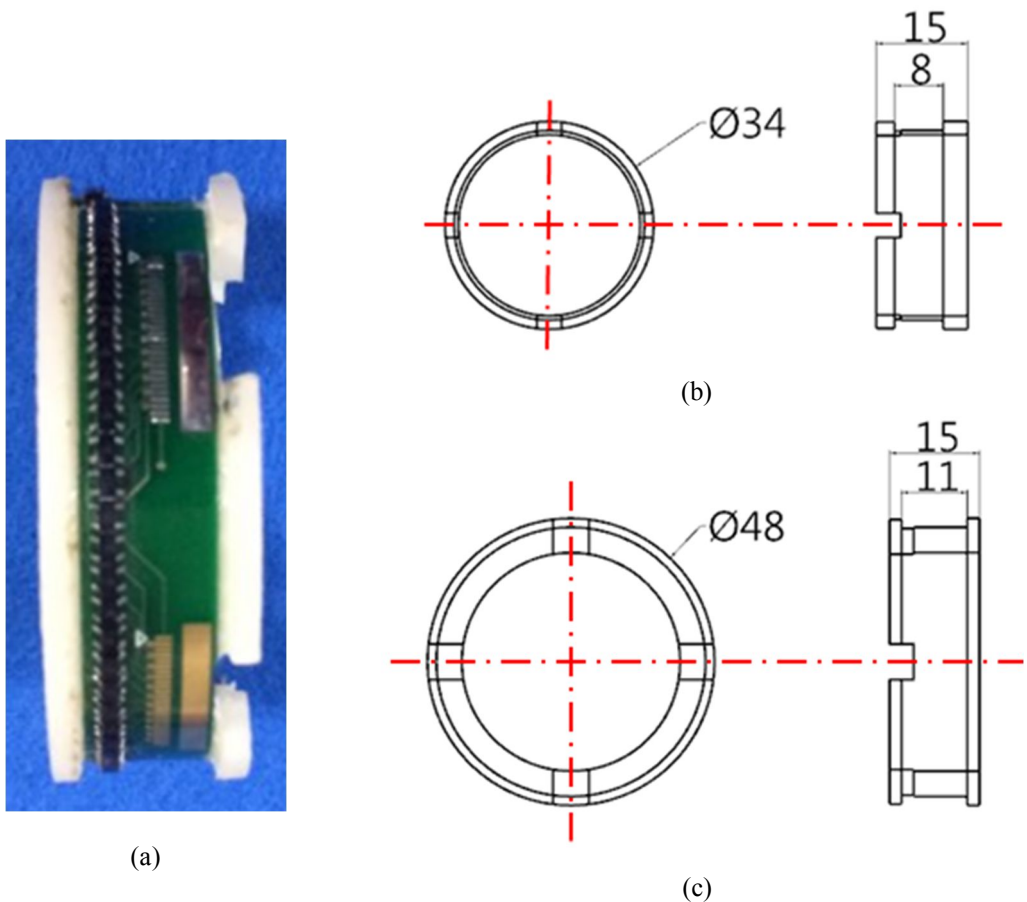


Fig. 3-5 Bobbin-type integrated Hall sensor array of a bleed air duct sensor probe

4. 신호처리회로

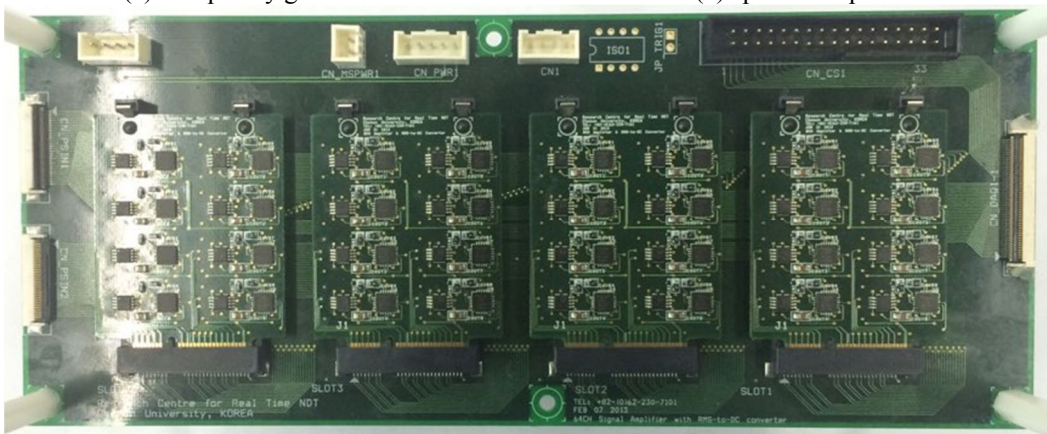
Fig. 3-6은 와전류 검사시스템의 신호처리부이다. (a)는 함수발생기로써 0.001Hz에서 300kHz까지 주파수 조절이 가능한 칩(ICL 8038CCPD)을 사용하였다. (b)는 전력증폭기(LM 3886)로써 여자코일에 인가되는 교류전류의 크기를 증폭시킨다. (c)는 신호처리 메인보드로써 결함에서 발생한 교변자기장, 즉 교류신호를 증폭하고, 직류신호로 변환 후 RMS 회로에 의하여 교류신호의 진폭을 평활화 한다.



(a) frequency generator unit



(b) power amplifier unit



(c) mainboard signal processing

Fig. 3-6 Power supply circuits of the bobbin-type exciting coil (a, b) and signal processing circuits of the BIHaS(c)

Fig. 3-7은 신호처리 블록다이어그램이다. 컴퓨터와 연결된 NI-DAQ를 통하여 직류전원장치와 교류전원장치를 제어한다. 직류전원은 홀(Hall)센서에 인가하고 교류전원은 코일에 인가한다. 홀센서에 의하여 취득한 신호는 고대역 통과필터(HPF, High-pass filter)를 통하여 바이어스 자기장을 제거한다. HPF를 통과한 후 증폭기에서 신호를 증폭시킨다. 이후에는 RMS 회로에 의하여 교류신호의 진폭을 평활화한다. 이후, 데이터수집장치(NI-DAQ)에 의하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한 후 컴퓨터에 전송한다.

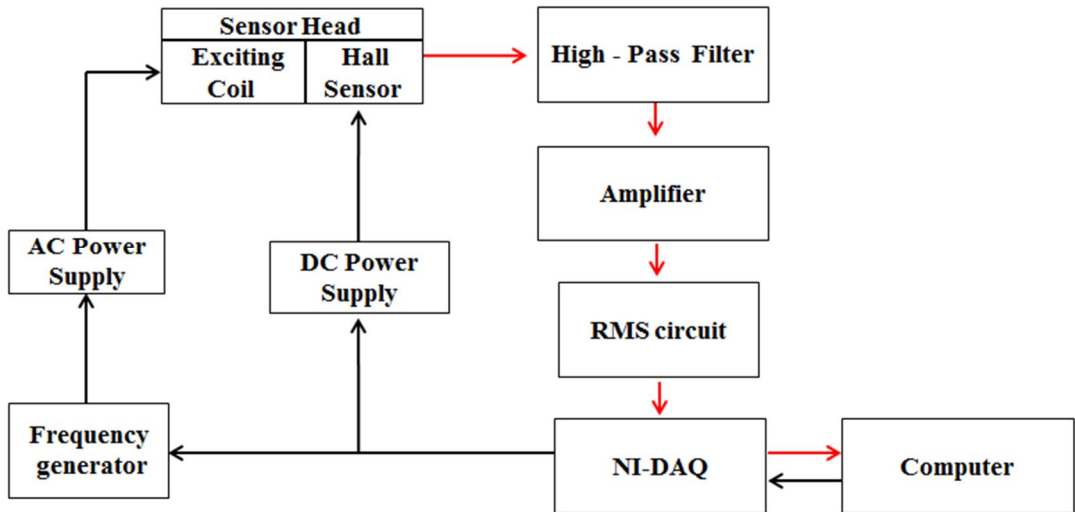


Fig. 3 -7 Block diagram of signal processing of BIHaS

제 2 절 자동이송장치

본 절에서는 블리드에어덕트 검사를 위한 자동이송장치의 구성과 기능을 서술한다. Fig. 3-8은 블리드에어덕트 검사장치이다. 시험편이 고정된 상태에서 센서부가 자동으로 이송하는 구조이다. 센서부는 정방향 및 역방향 구동이 각각 가능하다. 실제 검사시에는 정방향 이동하는 과정에서 배관 내부 전체의 전자기장 왜곡 및 결함 탐상을 실시한다. 검사가 종료되면 자동으로 역방향 구동하여 원점 복귀한다.

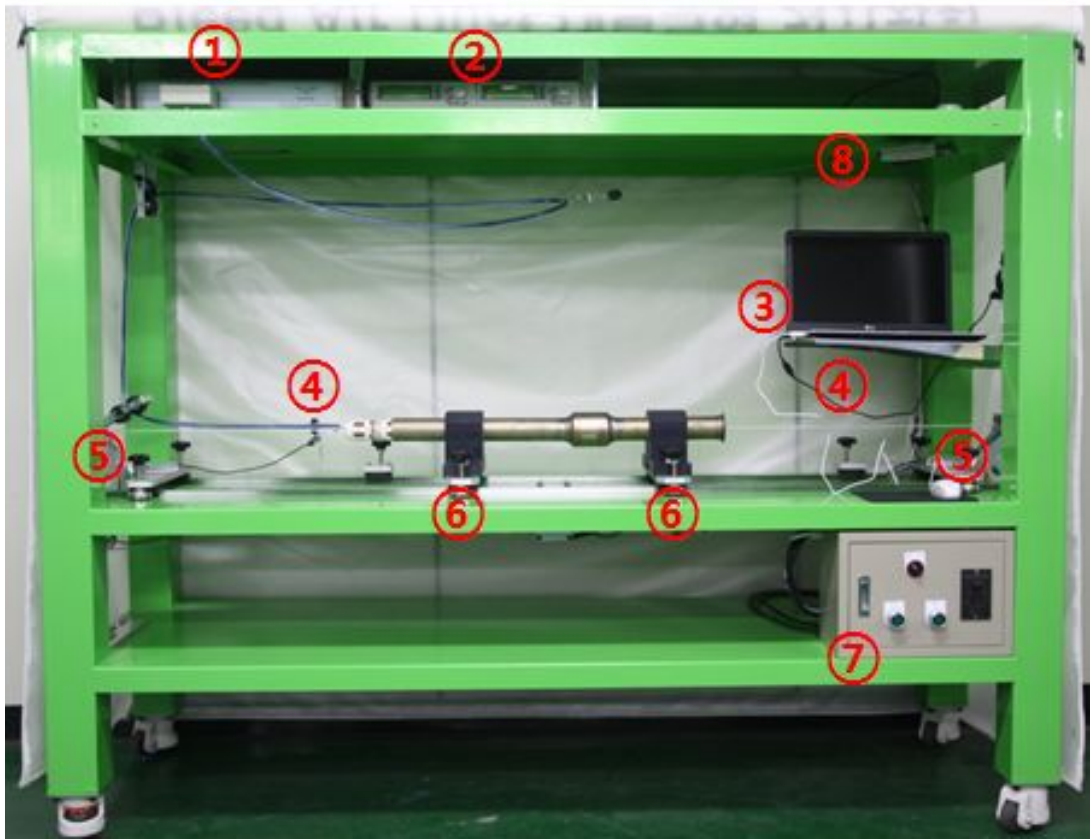


Fig. 3-8 Full inspection system of bleed air ducts

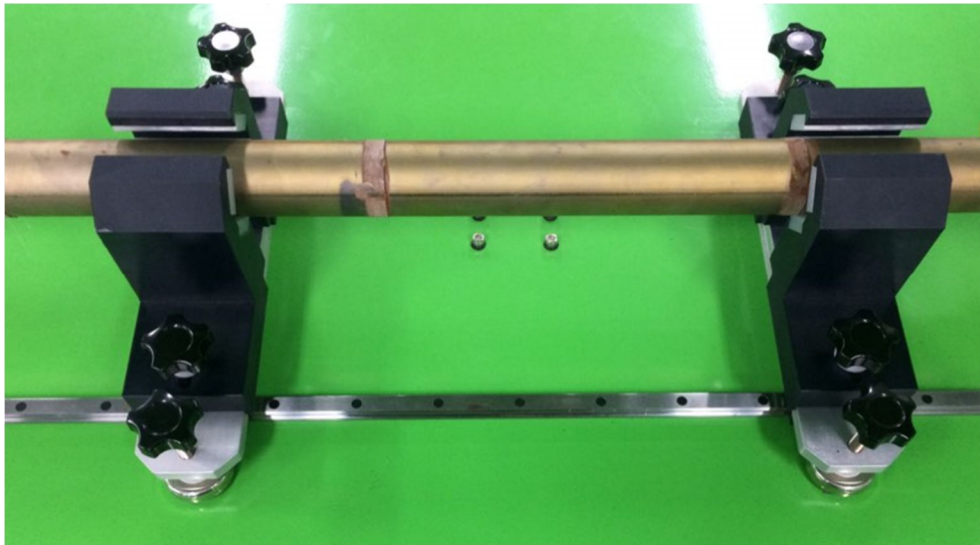
Table 3-2는 Fig. 3-8의 신호처리장치(①), 직류안정화전원(②), 노트북 거치대(③), 구동 제한 센서(④), 벨트 텐션 조정장치(⑤), Duct고정부(⑥), 모터 제어 장치(⑦), 케이블 이동보조장치(⑧)의 요소를 설명한 것이다.

Table 3 -2 Components name and description of the inspection system

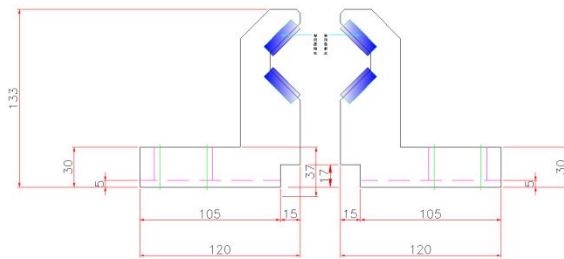
연번	구성 요소명	설명
①	신호처리장치	<ul style="list-style-type: none"> 전자기센서를 이용하여 측정된 신호를 컴퓨터로 전송 모터구동 제어를 위한 디지털 제어 신호를 전송
②	직류안정화전원	<ul style="list-style-type: none"> 신호처리장치와 전자기센서부에 직류 전원을 공급
③	노트북 거치대	<ul style="list-style-type: none"> 노트북을 거치할 수 있도록 고안된 거치대로서 사용하지 않을 시에는 접어 올려 고정
④	구동 제한 센서	<ul style="list-style-type: none"> 검사장치 좌우 양단에 위치하여 한계치 이상으로 구동되지 않도록 제한
⑤	벨트 텐션 조정장치	<ul style="list-style-type: none"> 전자기 센서부에 연결된 벨트의 텐션을 조정 적절한 텐션을 유지할 때 전자기센서부가 Duct 내부에서 쉽게 이동가능
⑥	Duct 고정부	<ul style="list-style-type: none"> 검사대상체를 고정하는 치구
⑦	모터 제어 장치	<ul style="list-style-type: none"> 모터 구동을 제어하며 비상시 스위치를 이용하여 수동으로 제어
⑧	케이블 이동 보조장치	<ul style="list-style-type: none"> 전자기센서부의 이동에 따라 적절하게 케이블을 이동시켜 주는 장치

1. 시험편 고정

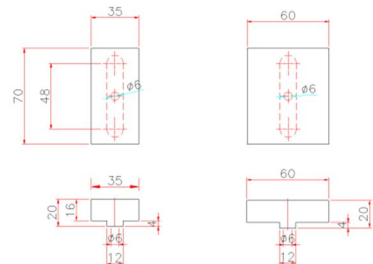
Fig. 3-9는 E38Φ 배관과 F50Φ 배관을 고정하기 위한 시험편 고정장치를 나타낸다. (b)의 고정 틀 안쪽에는 실리콘 패드를 설치하여 배관의 GFRP가 파손되지 않게 고정 가능하다. 또한, 배관의 외경이 변화하더라도 센서부가 항상 시험편의 중심을 통과할 수 있게 하기 위하여 센터링 기구인 (c)를 설치하였다. 그리고, 다양한 길이의 시험편에 대응하기 위하여 고정틀이 리니어 가이드를 따라 평행이동 할 수 있도록 하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3-9 Fixture for bleed air duct pipe during inspection

2. 센서자동이송

Fig. 3-10은 와전류 검사시스템이 배관내부를 이동할 수 있게 하는 센서자동이송 장치이다. ①과 ③은 와전류탐상기에 타이밍 벨트를 체결하여 이동시에 와이어의 텐션을 유지시켜주는 도르래 장치이다. ②는 모터장치로 토크를 낮게 설정하여 기구물이 배관을 이탈하거나, 배관의 불연속면의 존재로 이동이 곤란할 때 파손을 방지 하였다. ④는 ①, ②, ③에 사용된 도르래의 정면도를 나타낸다.

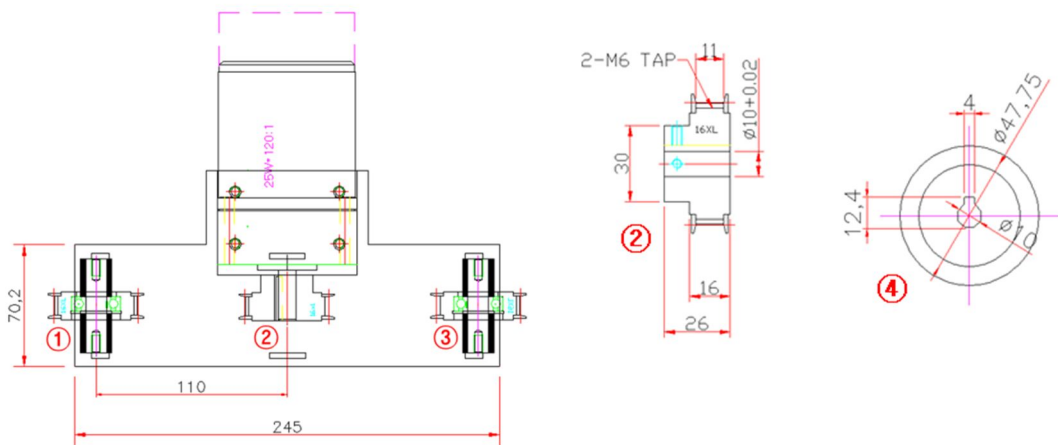
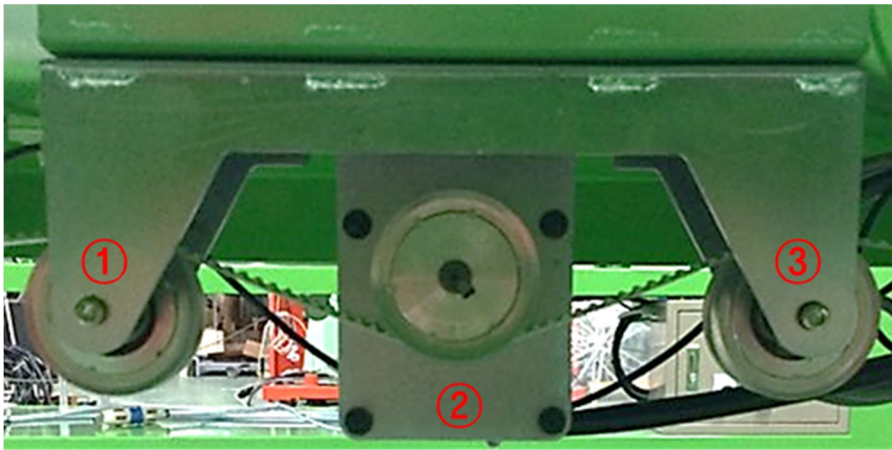


Fig. 3-10 Motor and rollers system for movement of the bleed air duct sensor probe

Fig. 3-11은 센서자동이송 장치의 컨트롤 박스이다. 모터의 전원을 제어하며, 이 동속도를 조절할 수 있다. 기본적으로 소프트웨어에 의하여 원격으로 제어하지만, 강제중단, 위치조정등과 같이 수동으로 조절 할 때 사용한다. 본 연구에서는 특히 시험편의 초기위치 설정을 위하여 사용하였다.



Fig. 3 -11 Motor controller component of the inspection system

3. 스톱퍼

Fig. 3-12는 포토커플러 인터럽트를 사용한 스톱퍼이다. 투광기와 수광기가 하나의 케이스에 내장되어 있다. 투광기로부터 나온 빛이 피측정체의 존재 유무에 따라 반사하고, 이를 수광기에 의하여 검출되어 신호를 발생시킨다. 이 원리를 이용하여 센서가 스캔 범위를 초과하여 스톱퍼에 도달하면 구동을 제한하며, 결과적으로 시험편에서 이탈을 방지하여 기구물의 파손을 예방할 수 있다. 또한 리니어 가이드 위에 설치하여 시험편 고정장치와 같이 위치 조절이 가능하다.



Fig. 3-12 Stopper component for stopping of sensor movement

제 3 절 소프트웨어

본 절에서는 블리드에어덕트 내부 균열 검사장치에 사용된 소프트웨어를 서술한다. 검사 장비에 사용되는 소프트웨어는 LabVIEW(NI, 2012)로 개발하였으며, 구동신호 입력, 측정 신호 수집 및 해석 기능을 수행할 수 있다. 측정을 위한 초기 설정이 선행되어야 하고, 오류 발생시 프로그램 리부팅 및 에러피드백으로 문제를 해결할 수 있다.

1. 데이터 취득 소프트웨어

Fig. 3-13은 데이터 취득 소프트웨어 부분이다. ①은 파일명을 지정하여 데이터 저장이 가능하게 한다. ②는 모터를 제어하기 위한 버튼이며 전, 후진 및 일시 정지동작이 가능하다. ③은 측정버튼 부로 폴더생성과 데이터 측정지시 및 정지동작이 가능하다. ④는 waterfall 그래프로 데이터의 위상변화를 실시간으로 측정한다. ⑤는 3D surface로 전자기장의 분포를 색분포로 표현한다.

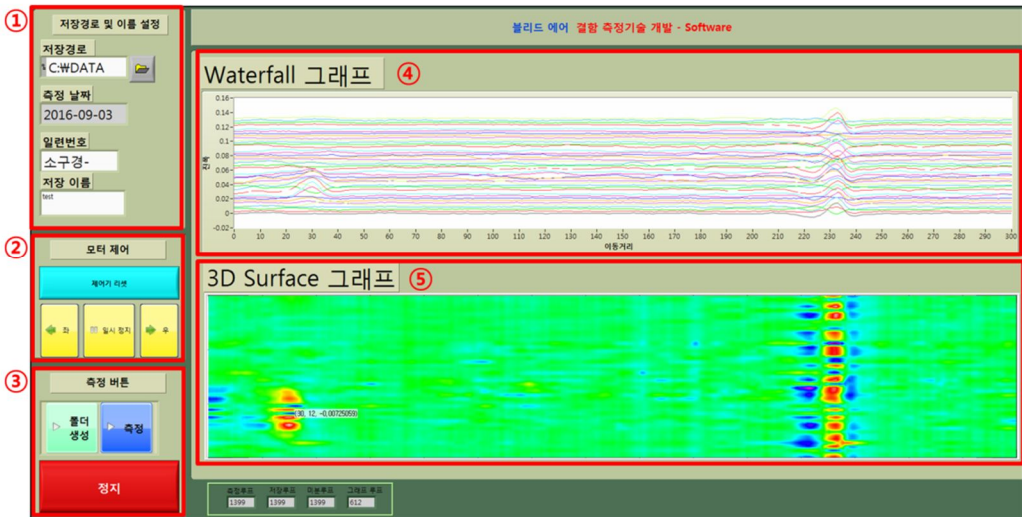


Fig. 3 -13 Bleed air duct software: Measurement mode

Table 3-3은 Fig. 3-13에 표시된 연번 순으로 표기하였다. 저장경로 및 이름 설정(①), 모터제어(②), 측정버튼(③), waterfall 그래프(④), 3D surface 그래프(⑤)로 구성되며, 각 기능에 대한 상세 설명을 표기하였다.

Table 3-3 Components name and function of the measurement software

연번	구성 요소명	상세 설명
①	저장경로 및 이름설정	· 전자기 센서로 측정한 신호를 저장할 경로와 파일명 설정
②	모터제어	· 모터 구동을 제어하는 기능 버튼
③	측정 버튼	· ‘폴더생성’버튼으로 저장경로 및 이름 설정대로 측정 신호를 저장할 폴더 생성 · ‘측정’버튼으로 시작, 측정 완료 후 전자기센서는 원점 복귀
④	Waterfall 그래프	· 측정 신호를 실시간으로 Waterfall 그래프 형태로 표현
⑤	3D Surface 그래프	· 측정 신호를 실시간으로 3D Surface 그래프 형태로 표현

2. 데이터 해석 소프트웨어

Fig. 3-14는 데이터 해석 소프트웨어 부분이다. ①은 저장된 파일의 경로를 설정한다. ②는 필요에 의하여 이상신호가 출력되는 개별 센서신호를 보간하는 기능을 한다. 또한 소프트웨어적으로 고대역 통과필터 또는 저대역 통과필터를 일괄 적용할 수 있다. ③은 불러온 데이터를 waterfall 그래프 및 3D surface로 표현하는 부분이다. 스크롤 바의 역할은 취득된 데이터의 특정위치를 선택하기 위한 기능을 한다. 즉, 이상신호가 발생한 특정 행 또는 열의 위치를 파악하거나, 드레그에 의하여 특정영역을 선택(그래프 확대)하여 영상화한다. ④는 데이터의 특이사항을 메모로 저장하거나, 그래프를 이미지 파일로 저장하는 기능을 한다.

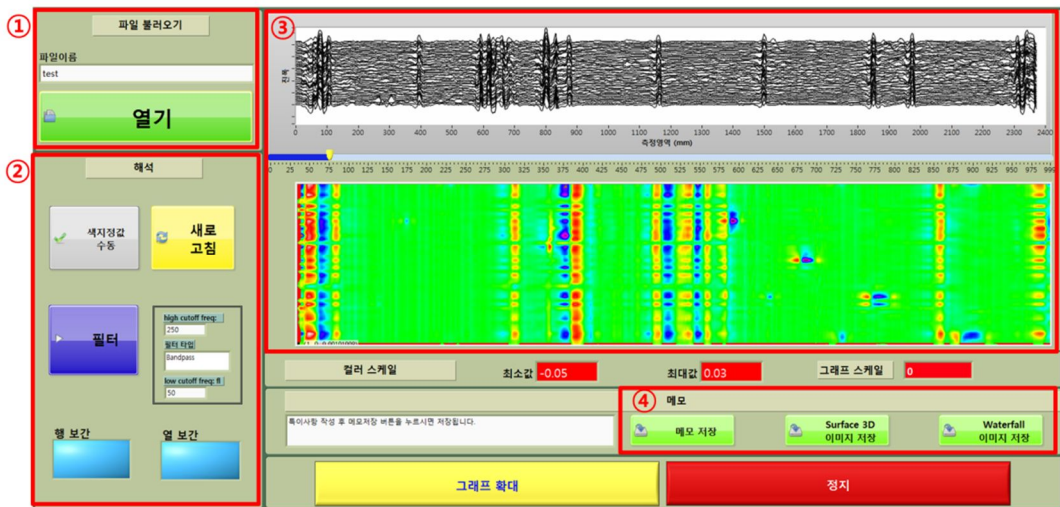


Fig. 3 -14 Bleed air duct software: Analysis mode

Table 3-4는 Fig. 3-14에 표시된 연번 순으로 파일 불러오기(①), 기능 버튼(②), 그래프 표현(③), 데이터 저장(④)으로 구성되며, 각 기능에 따른 상세 설명을 표기하였다.

Table 3-4 Components name and function of the analysis software

연번	구성 요소명	상세 설명
①	파일 불러오기	· 저장된 파일을 불러올 경로를 설정
②	기능버튼	· ‘필터’버튼으로 디지털 필터 구현 · ‘새로고침’버튼으로 필터 및 변조등으로 구현된 후처리 효과 이전으로 되돌림 · ‘변조’버튼으로 결함으로 의심되는 센서 채널 라인을 강조함
③	그래프 표현	· ‘폴더생성’버튼으로 저장경로 및 이름 설정대로 측정 신호를 저장할 폴더 생성 · ‘측정’버튼으로 시작, 측정 완료후 전자기센서는 원점 복귀
④	데이터 저장	· 측정 신호를 실시간으로 Waterfall 그래프 형태로 표현

제 4 장 실험 및 고찰

제 1 절 시험편

E38Φ 배관은 길이가 각각 680mm, 685mm, 680mm인 세가지 종류의 시험편을 준비하였다. F50Φ 배관은 길이가 각각 720mm, 900mm, 1160mm 세가지 종류의 시험편을 준비하였다. E38Φ 배관 인공균열의 크기는 축방향으로 길이 3~30mm, 폭 0.1mm이며, 관통형으로 방전 가공하였다. F50Φ 배관 인공균열의 크기는 축방향으로 길이 3~25mm, 폭 0.1mm 이며 구성되며, 관통형이다.

1. E38Φ 배관

Fig. 4-1은 길이 680mm인 E38Φ-A 배관의 사진 및 결함의 위치를 나타낸다. 관통형인 인공균열은 축방향으로 길이 5~30mm, 폭 0.1mm이며, 각기 다른 각도로 가공하였다. E38Φ-A에 형성된 총 8개의 균열은 A1~A8로 표시하였다. 배관의 특징으로 A1 균열 앞 부분, A4와 A5 사이에 각각 용접부가 존재하며, A8 뒤에는 용접부와 서스펜션이 존재한다.

Table 4-1은 배관에 가공된 총 8개의 인공균열의 길이, 폭, 깊이, 각도를 상세히 표기하였다.

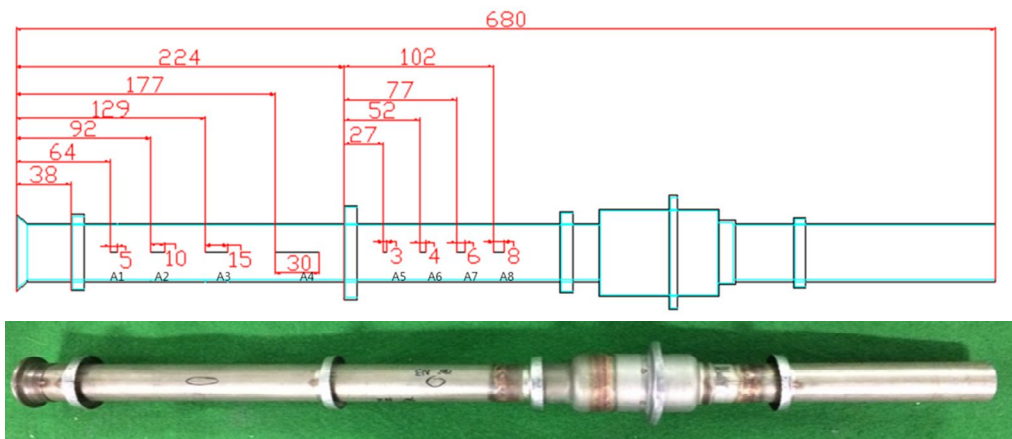


Fig. 4-1 A bleed air duct pipe: E38Φ-A

Table 4 -1 Cracks sizes on the E38Φ-A bleed air duct

No.	Length[mm]	Width[mm]	Depth[mm]	Angle[°]
A1	5	0.1	THRU	0
A2	10	0.1	THRU	90
A3	15	0.1	THRU	180
A4	30	0.1	THRU	270
A5	3	0.1	THRU	0
A6	4	0.1	THRU	90
A7	6	0.1	THRU	180
A8	8	0.1	THRU	270

Fig. 4-2는 길이 685mm인 E38Φ-B 배관의 사진 및 결함의 위치를 나타낸다. 관
통형인 인공균열은 축방향으로 길이 3~25mm, 폭 0.1mm이며, 각기 다른 각도로 가
공하였다. E38Φ-B에 형성된 총 9개의 균열은 B1~B9로 표시하였다. 배관의 특징으
로는 B1 균열 앞부분, B3과 B4 사이에는 각각 용접부가 존재하며, 끝 단에 위치한
B8과 B9 사이에도 용접부가 존재한다.

Table 4-2는 배관에 가공된 총 9개의 인공균열의 길이, 폭, 깊이, 각도를 상세히
표기하였다.

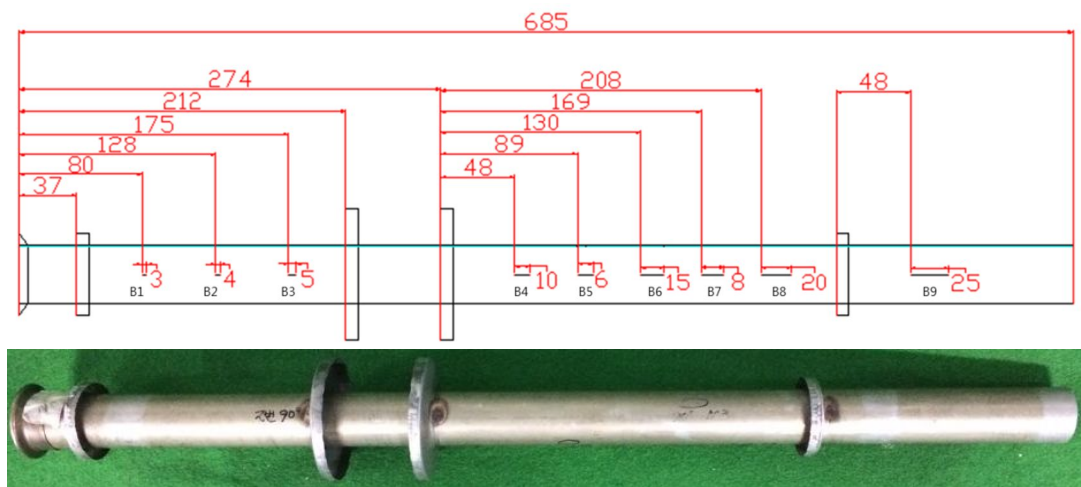


Fig. 4 -2 A bleed air duct pipe: E38Φ-B

Table 4 -2 Cracks sizes on the E38Φ-B bleed air duct

No.	Length[mm]	Width[mm]	Depth[mm]	Angle[°]
B1	3	0.1	THRU	0
B2	4	0.1	THRU	180
B3	5	0.1	THRU	90
B4	10	0.1	THRU	180
B5	6	0.1	THRU	0
B6	15	0.1	THRU	270
B7	8	0.1	THRU	90
B8	20	0.1	THRU	0
B9	25	0.1	THRU	90

Fig. 4-3은 길이 680mm인 E38Φ-C 배관의 사진 및 결함의 위치를 나타낸다. 관
통형인 인공균열은 축방향으로 길이 3~25mm, 폭 0.1mm이며, 각기 다른 각도로 가
공하였다. E38Φ-C에 형성된 총 9개의 균열은 C1~C9로 표시하였다. 배관의 특징으
로 C1균열 앞 부분에는 용접부가 존재하며, C3과 C4 사이에는 두 개의 용접부와
서스펜션으로 인한 단차가 존재한다. 또한 끝 단의 C8과 C9사이에도 용접부가 존
재한다.

Table 4-3은 배관에 가공된 총 9개의 인공균열의 길이, 폭, 깊이, 각도를 상세히
표기하였다.

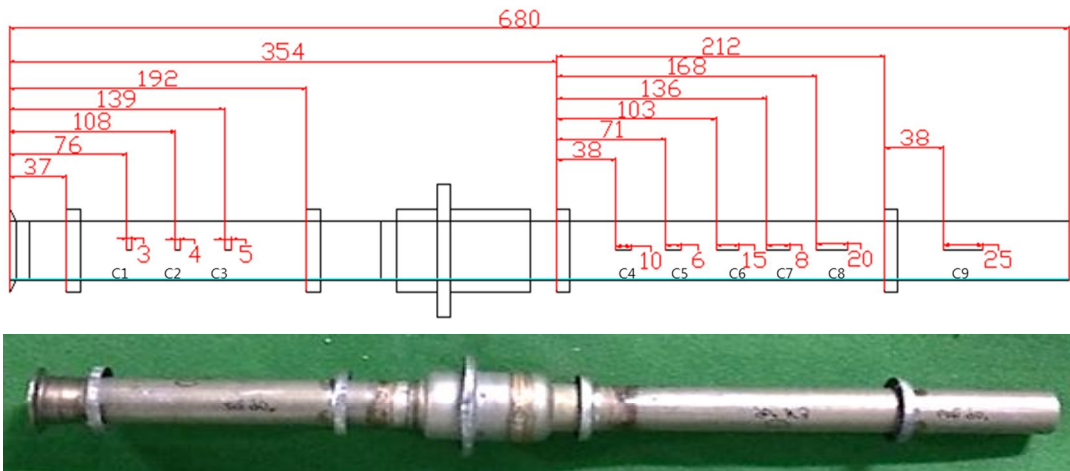


Fig. 4 -3 A bleed air duct pipe: E38Φ-C

Table 4 -3 Cracks sizes on the E38Φ-C bleed air duct

No.	Length[mm]	Width[mm]	Depth[mm]	Angle[°]
C1	3	0.1	THRU	0
C2	4	0.1	THRU	180
C3	5	0.1	THRU	90
C4	10	0.1	THRU	180
C5	6	0.1	THRU	0
C6	15	0.1	THRU	270
C7	8	0.1	THRU	90
C8	20	0.1	THRU	0
C9	25	0.1	THRU	90

2. F50Φ 배관

Fig. 4-4는 길이 1160mm인 F50Φ-D 배관의 사진 및 결함의 위치를 나타낸다. 관 통형인 인공균열은 축방향으로 길이 3~25mm, 폭 0.1mm이며, 각기 다른 각도로 가공하였다. F50Φ-D에 형성된 총 10개의 균열은 D1~D10으로 표시하였다. 배관의 특징으로 D5는 용접부에 위치한 균열이며, D5와 D6 사이에는 용접부와 서스펜션에 의한 단차가 존재한다.

Table 4-4는 배관에 가공된 총 10개의 인공균열의 길이, 폭, 깊이, 각도를 상세히 표기하였다..

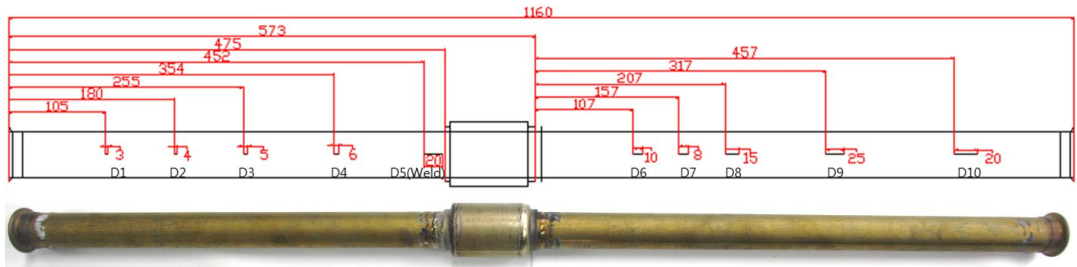


Fig. 4 -4 A bleed air duct pipe: F50Φ-D

Table 4 -4 Cracks sizes on the F50Φ-D bleed air duct

No.	Length[mm]	Width[mm]	Depth[mm]	Angle[°]
D1	3	0.1	THRU	0
D2	4	0.1	THRU	180
D3	5	0.1	THRU	90
D4	6	0.1	THRU	0
D5	20	0.1	THRU	180
D6	10	0.1	THRU	270
D7	8	0.1	THRU	90
D8	15	0.1	THRU	0
D9	25	0.1	THRU	90
D10	20	0.1	THRU	180

Fig. 4-5는 길이 900mm인 F50Φ-E 배관의 사진 및 결함의 위치를 나타낸다. 관
 통형인 인공균열은 축방향으로 길이3~25mm, 폭 0.1mm이며, 각기 다른 각도로 가
 공하였다. F50Φ-E에 형성된 총 10개의 균열은 E1~E10로 표시하였다. 배관의 특징
 으로 E3은 용접부에 위치한 균열을 나타내며, E3과 E4 사이에는 용접부와 서스펜
 션에 의한 단차가 존재한다.

Table 4-5는 배관에 가공된 총 10개의 인공균열의 길이, 폭, 깊이, 각도를 상세
 히 표기하였다

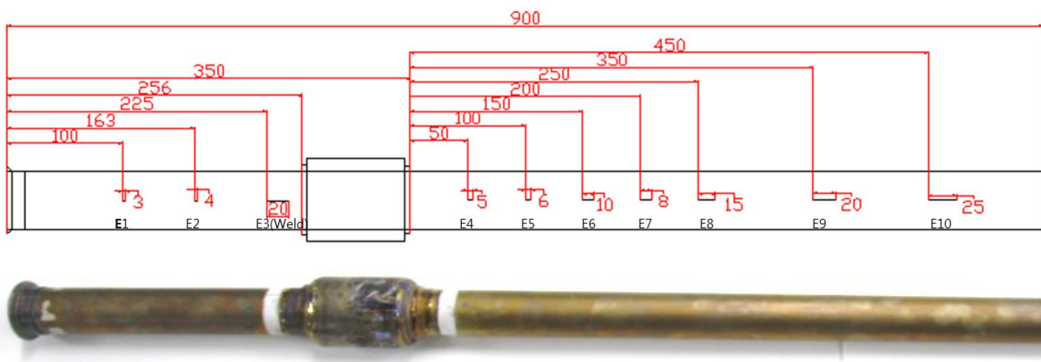


Fig. 4 -5 A bleed air duct pipe: F50Φ-E

Table 4 -5 Cracks sizes on the F50Φ-E bleed air duct

No.	Length[mm]	Width[mm]	Depth[mm]	Angle[°]
E1	3	0.1	THRU	0
E2	4	0.1	THRU	180
E3	20	0.1	THRU	90
E4	5	0.1	THRU	180
E5	6	0.1	THRU	0
E6	10	0.1	THRU	270
E7	8	0.1	THRU	90
E8	15	0.1	THRU	0
E9	20	0.1	THRU	90
E10	25	0.1	THRU	180

Fig. 4-6은 길이 720mm인 F50Φ-F 배관의 사진 및 결함의 위치를 나타낸다. 관
통형인 인공균열은 축방향으로 길이 3~25mm, 폭 0.1mm이며, 각기 다른 각도로 가
공하였다. F50Φ-F에 형성된 총 10개의 균열은 F1~F10으로 표시하였다. 배관의 특징
으로 F3은 용접부에 위치한 균열이며, F3과 F4 사이에는 용접부와 서스펜션에 의한
단차가 존재한다.

Table 4-6은 배관에 가공된 총 10개의 인공균열의 길이, 폭, 깊이, 각도를 상세
히 표기하였다.

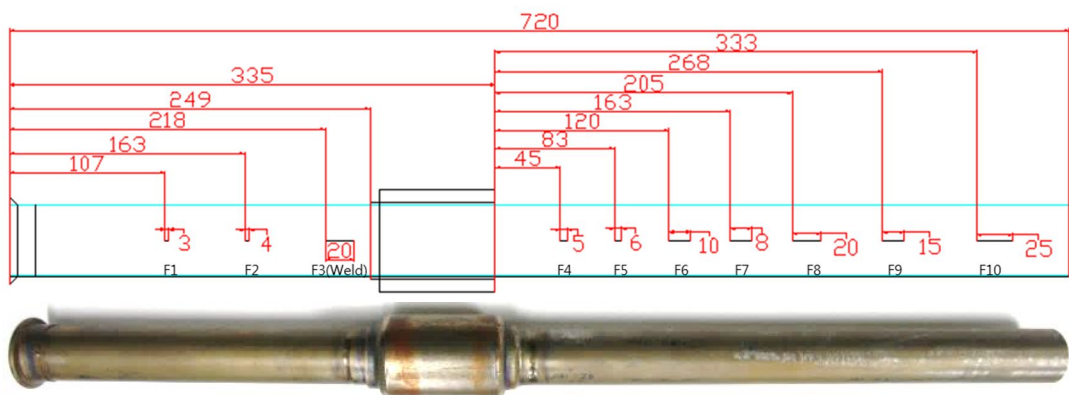


Fig. 4 -6 A bleed air duct pipe: F50Φ-F

Table 4 -6 Cracks sizes on the F50Φ-F bleed air duct

No.	Length[mm]	Width[mm]	Depth[mm]	Angle[°]
F1	3	0.1	THRU	0
F2	4	0.1	THRU	180
F3	20	0.1	THRU	90
F4	5	0.1	THRU	180
F5	6	0.1	THRU	0
F6	10	0.1	THRU	270
F7	8	0.1	THRU	90
F8	20	0.1	THRU	0
F9	15	0.1	THRU	180
F10	25	0.1	THRU	90

제2절 실험 결과

제3 장에서 개발한 검사기법을 이용하여 상술한 시험편을 측정하였다. 측정 결과를 LabVIEW(NI, 2012)를 이용하여 waterfall과 3D surface 그래프 표현하였다. 측정 시에는 15kHz의 같은 주파수를 사용하였으며, E38Φ배관용 센서는 200mA, F50Φ배관용은 180mA의 교류 전류를 인가하여 균열에 의한 전자기장의 변화를 측정하였다.

1. E38Φ 배관

Fig. 4-7은 길이 680mm의 E38Φ-A 배관의 내부 전체를 검사하여 waterfall과 3D surface로 나타낸 그래프이다. ①은 Waterfall 그래프로 E38Φ-A 배관검사에 사용된 45개의 센서 신호를 나타낸다. 붉은색 영역은 배관의 용접부에서 나타난 이상신호이다. ②는 시험편에 형성된 인공균열의 위치를 표시한 3D surface 그래프이다. 0°의 위치에는 5mm(A1), 3mm(A5)의 인공균열이 가공되어 있으며, 90°는 10mm(A2), 8mm(A8), 180°는 15mm(A3), 6mm(A7), 270°는 30mm(A4), 4mm(A6) 균열이 위치한다. 또한, 0~40mm 구간과 640~680mm 구간에서 나타난 바와 같이 센서가 배관에 삽입되거나 배출될 때 에지효과(Edge effect)에 의하여 높은 전자기장의 왜곡이 발생한다. A4와 A5의 균열 사이에 존재하는 원호방향의 연속된 이상신호는 용접부에서의 전자기장의 왜곡 신호이다. A8 이후에 나타나는 340mm~550mm 구간의 데이터는 용접부와 서스펜션의 존재에 의하여 높은 전자기장의 왜곡이 발생한다. ③은 수동으로 색분포를 조절하여 나타낸 그래프이다. 높은 전자기장의 신호가 존재할 때 A5와 같이 작은 균열신호는 확인이 곤란하기에 임의로 색분포를 지정하여 보이지 않는 균열의 신호를 확인할 수 있다. ④는 이상신호를 배제하고 결합영역만을 선택하여 나타낸 그래프이다. 따라서 용접부위에 인접하여 작은 균열신호로 나타난 A8을 판별할 수 있다.

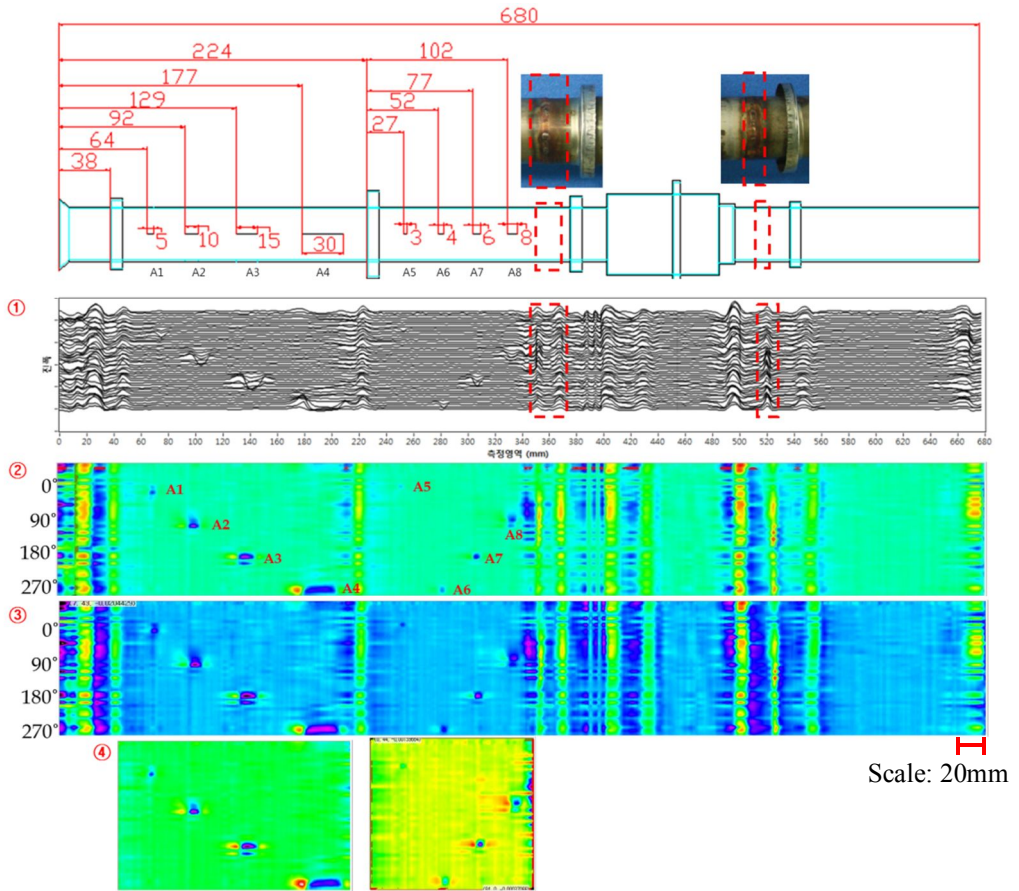


Fig. 4-7 Experimental results in of the E38Φ-A bleed air duct

Fig. 4-8은 길이 685mm의 E38Φ-B 배관의 내부 전체를 검사하여 waterfall과 3D surface로 나타낸 그래프이다. ①은 Waterfall 그래프로 E38Φ-B 배관검사에 사용된 45개의 센서 신호를 나타낸다. 붉은색 영역은 배관의 용접부와 B3균열이 근접하게 위치하여 나타난 부분이다. ②는 시험편에 형성된 인공균열의 위치를 표시한 3D surface 그래프이다. 0°의 위치에는 3mm(B1), 6mm(B5), 20mm(B8)의 인공균열이 가공되어 있으며, 90°는 5mm(B3), 8mm(B7), 25mm(B9), 180°는 4mm(B2), 10mm(B4), 270°는 15mm(B6) 균열이 위치한다. 또한 0~40mm 구간과 640~685mm 구간에서 나타난 바와 같이 센서가 배관에 삽입되거나 배출될 때 에지효과(Edge effect)에 의하여 높은 전자기장의 왜곡이 발생한다. B3과 B4 균열 사이와 B8과 B9사이에 존재하는 원호 방향의 연속된 이상신호는 용접부에서의 전자기장의 왜곡 신호이다. ③은 수동으로 색분포를 조절하여 나타낸 그래프이다. ②의 그래프에서 용접부에 의하여 높은 전자기장의 왜곡 신호가 발생하여 확인이 곤란한 B1, B2의 작은 균열신호를 확인할 수 있다. ④는 이상신호를 배제하고 결함영역만을 선택하여 나타낸 그래프이다. 따라서 에지효과(Edge effect)로 인하여 식별이 제한적인 균열신호 B1을 판별할 수 있다.

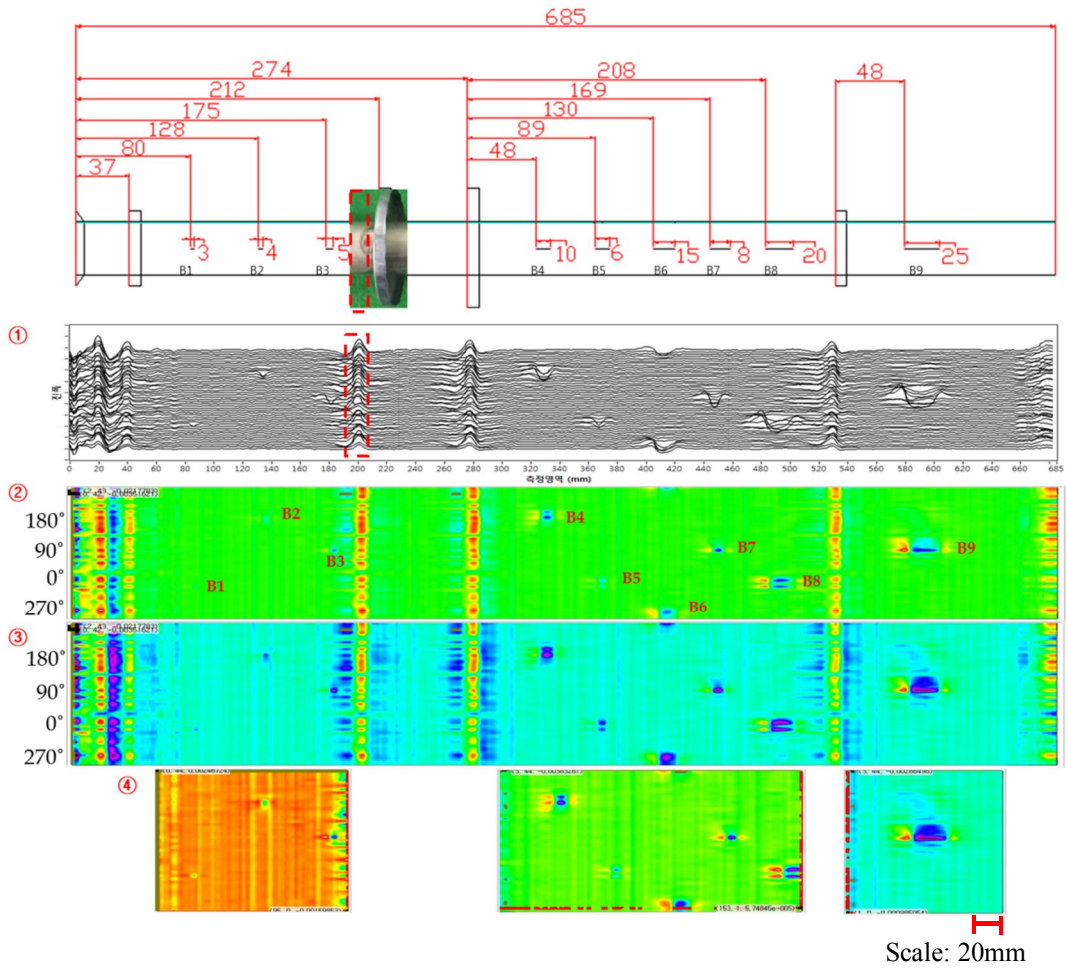


Fig. 4 -8 Experimental results in of the E38Φ-B bleed air duct

Fig. 4-9는 길이 680mm의 E38Φ-C 배관의 내부 전체를 검사하여 waterfall과 3D surface로 나타낸 그래프이다. ①은 Waterfall 그래프로 E38Φ-C 배관검사에 사용된 45개의 센서 신호를 나타낸다. 붉은색 영역은 배관의 용접부와 C4균열이 근접하게 위치하여 나타난 부분이다. ②는 시험편에 형성된 인공균열의 위치를 표시한 3D surface 그래프이다. 0°의 위치에는 3mm(C1), 6mm(C5), 20mm(C8)의 인공균열이 가공되어 있으며, 90°는 5mm(C3), 8mm(C7), 25mm(C9), 180°는 4mm(C2), 10mm(C4), 270°는 15mm(C6) 균열이 위치한다. 또한 0~40mm 구간과 640~680mm 구간에서 나타난 바와 같이 센서가 배관에 삽입되거나 배출될 때 에지효과(Edge effect)에 의하여 높은 전자기장의 왜곡이 발생한다. C3과 C4 사이인 180mm~380mm 구간의 원호방향의 연속된 이상신호는 용접부와 서스펜션에 의한 전자기장의 왜곡 신호이다. 또한 C8과 C9 사이는 용접부에서의 전자기장의 왜곡 신호이다. ③은 수동으로 색분포를 조절하여 나타낸 그래프이다. ②의 그래프에서 용접부와 서스펜션에 의하여 발생하는 높은 전자기장의 왜곡으로 확인이 곤란한 C1, C2의 작은 균열신호를 확인할 수 있다. ④는 이상신호를 배제하고 결합영역만을 선택하여 나타낸 그래프이다. 따라서 에지효과(Edge effect)로 인하여 식별이 제한적인 균열신호 C1, C3을 판별할 수 있다.

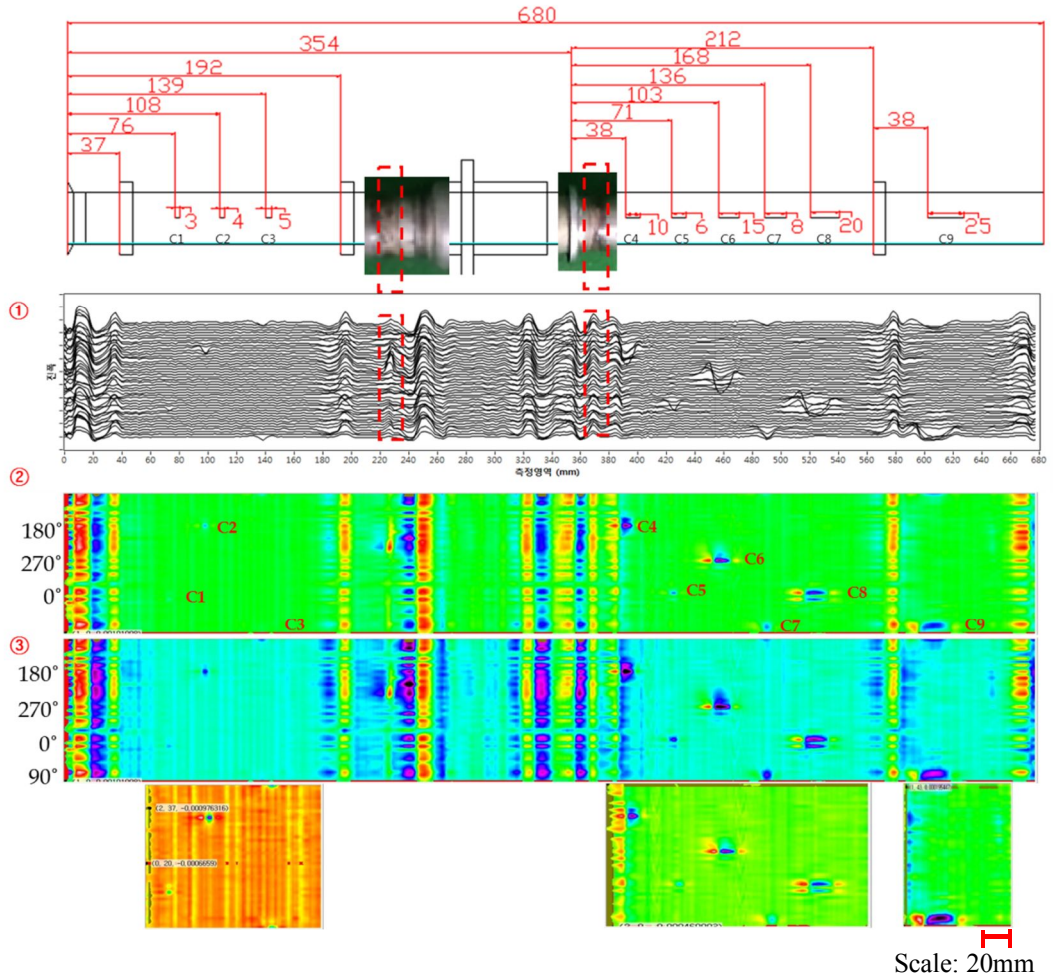


Fig. 4 -9 Experimental results in of the E38Φ-C bleed air duct

2. F50Φ 배관

Fig. 4-10은 길이 1160mm의 F50Φ-D 배관 내부 전체를 검사하여 waterfall과 3D surface로 나타낸 그래프이다. ①은 Waterfall 그래프로 F50Φ-D 배관검사에 사용된 45개의 센서신호를 각각 나타낸다. 붉은색 영역은 배관의 용접부로 인하여 나타난 원호방향의 이상신호를 나타내며, D5균열이 용접부에 위치하여 나타난 부분이다. ②는 시험편에 형성된 인공균열의 위치를 표시한 3D surface 그래프이다. 0°의 위치에는 3mm(D1), 6mm(D4), 15mm(D8)의 인공균열이 가공되어 있으며, 90°는 5mm(D3), 8mm(D7), 25mm(D9), 180°는 4mm(D2), 20mm(D5 weld), 20mm(D10), 270°는 10mm(D6) 균열이 위치한다. 또한 0~40mm 구간과 1120~1160mm 구간에서 나타난 바와 같이 센서가 배관에 삽입되거나 배출될 때 에지효과(Edge effect)에 의하여 높은 전자기장의 왜곡이 발생한다. D5과 D6 사이인 450mm~600mm 구간의 원호방향의 연속된 이상신호는 용접부와 서스펜션에 의한 전자기장의 왜곡 신호이다. 용접부에 형성된 D5의 경우, 균열신호가 나타났지만 용접부와 균열부 신호를 각각 판별이 가능할 때 확인할 수 있다. ③은 수동으로 색분포를 조절하여 나타낸 그래프이다. ②의 그래프에서 용접부와 서스펜션에 의하여 발생하는 높은 전자기장의 왜곡으로 확인이 곤란한 D1의 작은 균열신호를 확인할 수 있다. ④는 이상신호를 배제하고 결함 영역만을 선택하여 나타낸 그래프이다. 따라서 에지효과(Edge effect)와 용접부위 및 서스펜션으로 인하여 작은 신호로 나타난 균열신호 D1~D4를 명확히 구분할 수 있다.

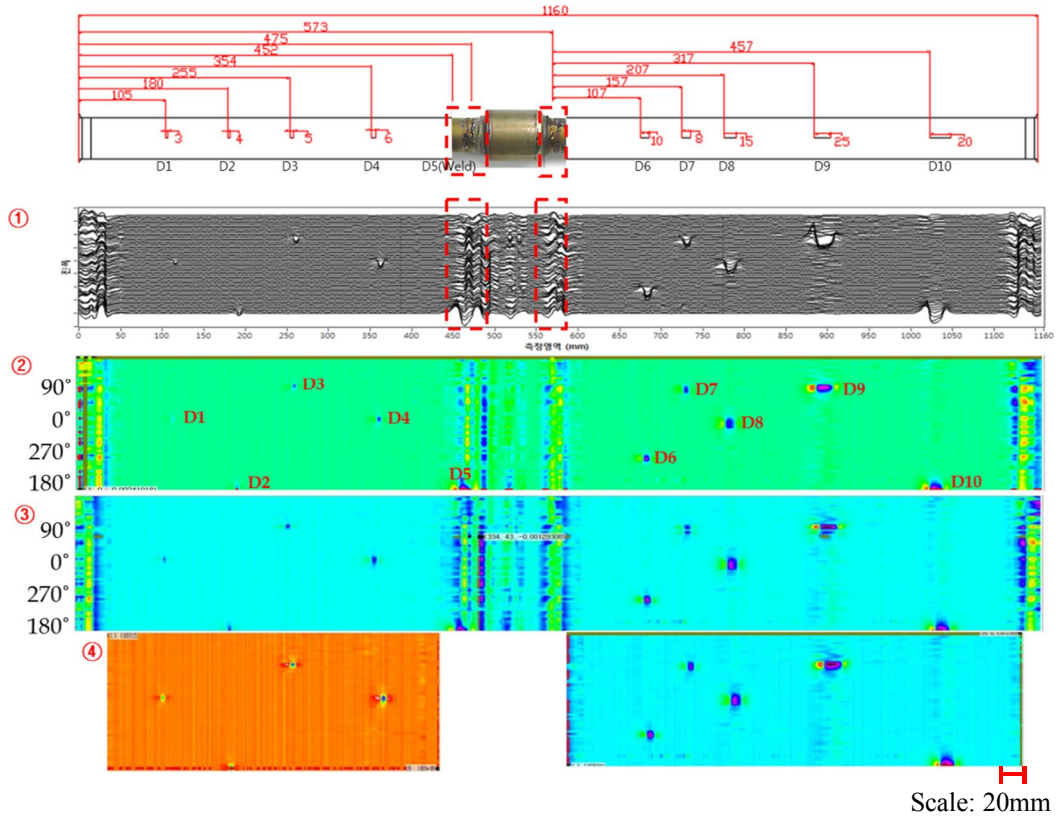


Fig. 4 -10 Experimental results in of the F50Φ-D bleed air duct

Fig. 4-11은 길이 900mm의 F50Φ-E 배관 내부 전체를 검사하여 waterfall과 3D surface로 나타낸 그래프이다. ①은 Waterfall 그래프로 F50Φ-E 배관검사에 사용된 45개의 센서신호를 각각 나타낸다. 붉은색 영역은 배관의 용접부로 인하여 나타난 원호방향의 이상신호를 나타내며, E3균열이 용접부에 위치하여 나타난 부분이다. ②는 시험편에 형성된 인공균열의 위치를 표시한 3D surface 그래프이다. 0°의 위치에는 3mm(E1), 6mm(E5), 15mm(E8)의 인공균열이 가공되어 있으며, 90°는 20mm(E3), 8mm(E7), 20mm(E9), 180°는 4mm(E2), 5mm(E4), 25mm(E10), 270°는 10mm(E6) 균열이 위치한다. 또한 0~40mm 구간과 860~900mm 구간에서 나타난 바와 같이 센서가 배관에 삽입되거나 배출될 때 에지효과(Edge effect)에 의하여 높은 전자기장의 왜곡이 발생한다. E3과 E4 사이인 240mm~370mm 구간의 원호방향의 연속된 이상신호는 용접부와 서스펜션에 의한 전자기장의 왜곡 신호이다. 용접부에 형성된 E3의 경우, 균열신호가 나타났지만 용접부와 균열부 신호를 각각 판별이 가능할 때 확인 할 수 있다. ③은 수동으로 색분포를 조절하여 나타낸 그래프이다. ②의 그래프에서 용접부와 서스펜션에 의하여 발생하는 높은 전자기장의 왜곡으로 확인이 곤란한 E1, E2, E4의 작은 균열신호를 확인할 수 있다. ④는 이상신호를 배제하고 결함영역만을 선택하여 나타낸 그래프이다. 따라서 에지효과(Edge effect)와 용접부위 및 서스펜션으로 인하여 작은 신호로 나타난 균열신호 E1~E3을 명확히 구분할 수 있다.

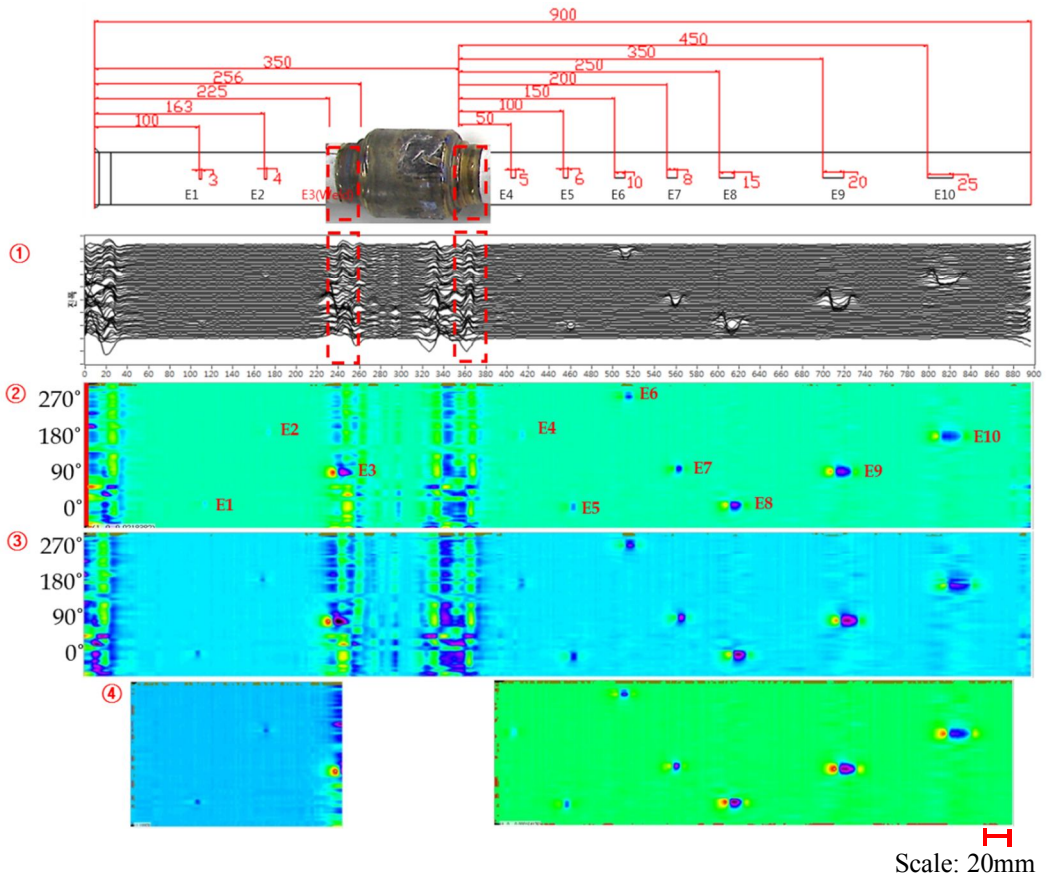


Fig. 4 -11 Experimental results in of the F50Φ-E bleed air duct

Fig. 4-12는 길이 720mm의 E50Φ-F 배관 내부 전체를 검사하여 waterfall과 3D surface로 나타낸 그래프이다. ①은 Waterfall 그래프로 F50Φ-F 배관검사에 사용된 45개의 센서신호를 각각 나타낸다. 붉은색 영역은 배관의 용접부로 인하여 나타난 원호방향의 이상신호를 나타내며, F3균열이 용접부에 위치하여 나타난 부분이다. ②는 시험편에 형성된 인공균열의 위치를 표시한 3D surface 그래프이다. 0°의 위치에는 3mm(F1), 6mm(F5), 20mm(F8)의 인공균열이 가공되어 있으며, 90°는 20mm(F3 weld), 8mm(F7), 25mm(F10), 180°는 4mm(F2), 5mm(F4), 15mm(F9), 270°는 10mm(F6) 균열이 위치한다. 또한 0~50mm 구간과 680~720mm 구간에서 나타난 바와 같이 센서가 배관에 삽입되거나 배출될 때 에지효과(Edge effect)에 의하여 높은 전자기장의 왜곡이 발생한다. F3과 F4 사이인 220mm~360mm 구간의 원호방향의 연속된 이상신호는 용접부와 서스펜션에 의한 전자기장의 왜곡 신호이다. 용접부에 형성된 F3의 경우, 균열신호가 나타났지만 용접부와 균열부 신호를 각각 판별이 가능할 때 확인할 수 있다. ③은 수동으로 색분포를 조절하여 나타낸 그래프이다. ②의 그래프에서 용접부와 서스펜션에 의하여 발생하는 높은 전자기장의 왜곡으로 확인이 곤란한 F1, F2, F4, F5의 작은 균열신호를 확인할 수 있다. ④는 이상신호를 배제하고 결함영역만을 선택하여 나타낸 그래프이다. 따라서 에지효과(Edge effect)와 용접부위 및 서스펜션으로 인하여 작은 신호로 나타난 균열신호 F1, F2를 명확히 구분할 수 있다.

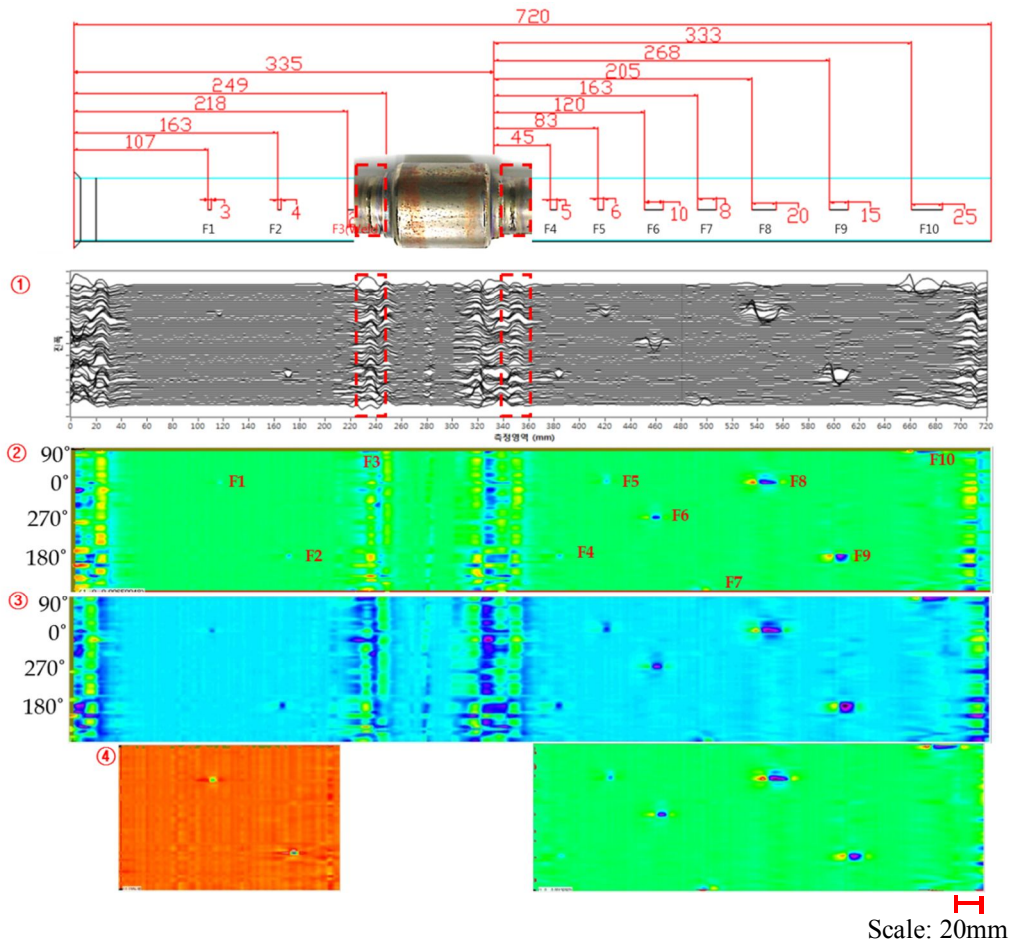


Fig. 4-12 Experimental results in of the F50Φ-F bleed air duct

제 3 절 정량평가 알고리즘

Fig. 4-13은 정량평가 알고리즘 블록다이어그램이다. 알고리즘의 시작은 센서로 받아들인 노말 값의 V_{RMS} 를 미분 데이터로 변환하여 3D surface 그래프로 나타낸다. 3D surface 그래프를 이용하여 균열데이터로 추정되는 곳을 중심으로 세로 20센서 가로 30mm 면적을 선택한다. 선택한 위치 값을 면적분하여 균열이 존재하는 곳과 무균열의 Threshold 값과 비교한다. Threshold 값보다 작을 경우 균열이 아닌 것으로 판정하고 Threshold 값보다 클 경우 균열인 것으로 판정한다. 균열 데이터를 분산형 그래프로 표현한 뒤 추세선을 그린다. 이후 기울기와 절편을 구하고 V_{Int} 공식에 기울기와 절편을 대입하여 균열크기를 추정한다.

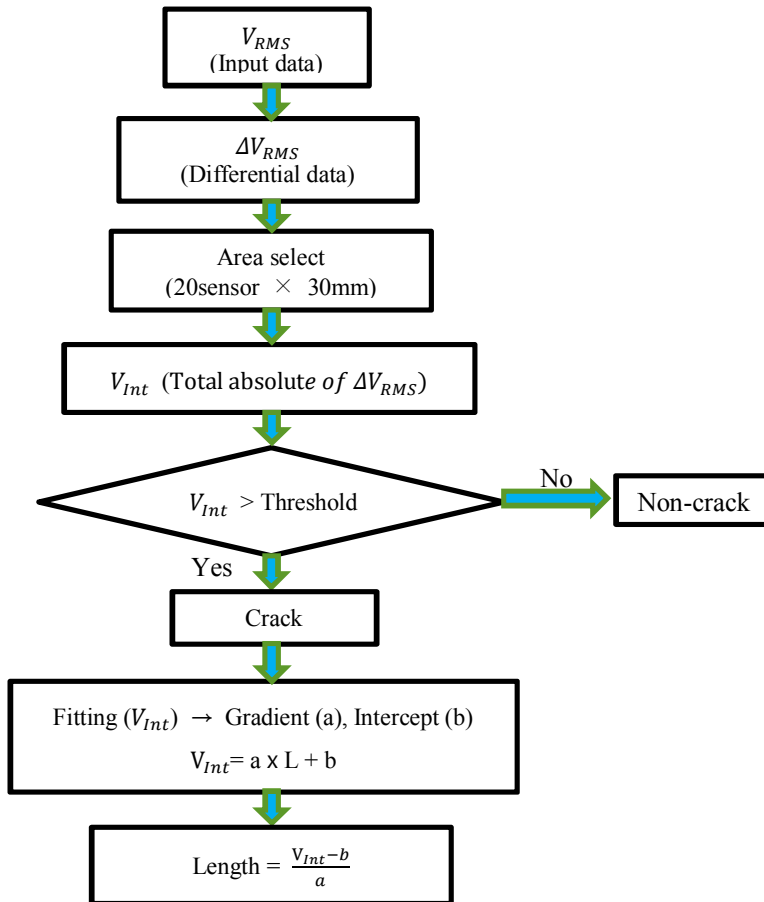


Fig. 4-13 Crack detection and crack length evaluation algorithm

1. 균열 유무 판정

균열 유무 판정을 위하여 근접장 와전류센서 원리에서 서술한 식 (3)과 같이 V_{RMS} 에 a(센서 개수)는 20, b(길이)는 30mm를 적용한 미분 절대값을 취하여 면적분 값인 V_{Int} 을 도출하였다.

$$V_{Int} = \sum_{a=1}^{20} \sum_{b=1}^{30} |\Delta V_{RMS}(a, b)| \quad (4)$$

Fig. 4-14은 waterfall과 3D surface 그래프를 이용하여 균열 의심부와 무균열부의 위치를 선택한다. 식 (4)와 같이 20sensor x 30mm의 범위를 지정하여 면적분한 값을 토대로 균열데이터를 확인 할 수 있다.

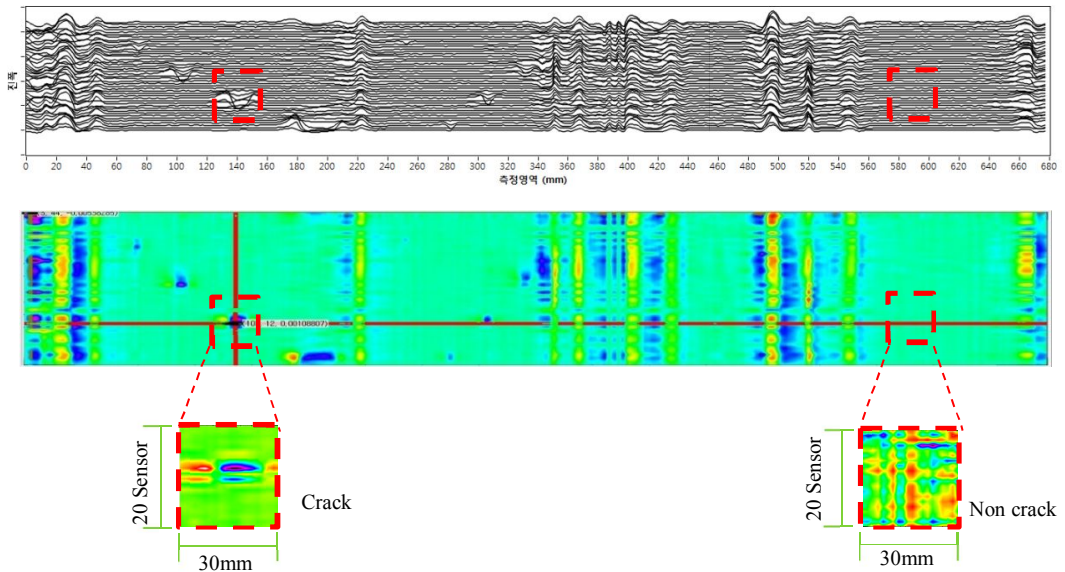


Fig. 4-14 Crack area data selection for detection and quantitative evaluation

Fig. 4-15의 그래프는 E38Φ 배관의 3~25mm 균열을 반복실험을 통하여 얻은 분포 데이터이다. X축은 결함 길이, Y축은 면적분 값을 나타낸다. 그래프의 선형 값은 무균열 데이터값을 나타내며, 각 도형으로 표시된 분포는 E38Φ A, B, C 배관의 각 데이터를 나타낸다. 그래프에 나타난 바와 같이 균열 데이터 값이 무균열 데이터 값보다 높게 형성 되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이후 길이 추정을 위하여 결함 데이터 분포에 추세선을 그린 후 기울기와 절편 값을 확인하였다. 추세선을 그렸을 때 값이 높게 형성 되는 것은 배관 검사시 센서의 미세한 진동으로 인한 노이즈 값의 유입이나 용접부위에 균열이 인접하게 위치하여 데이터 값이 높게 형성 되기 때문이다. 또한, 배관의 단차 혹은 면이 고르지 못한 구간을 지날 때 센서와 lift-off의 급격한 변화로 인하여 작은 값이 나타난다.

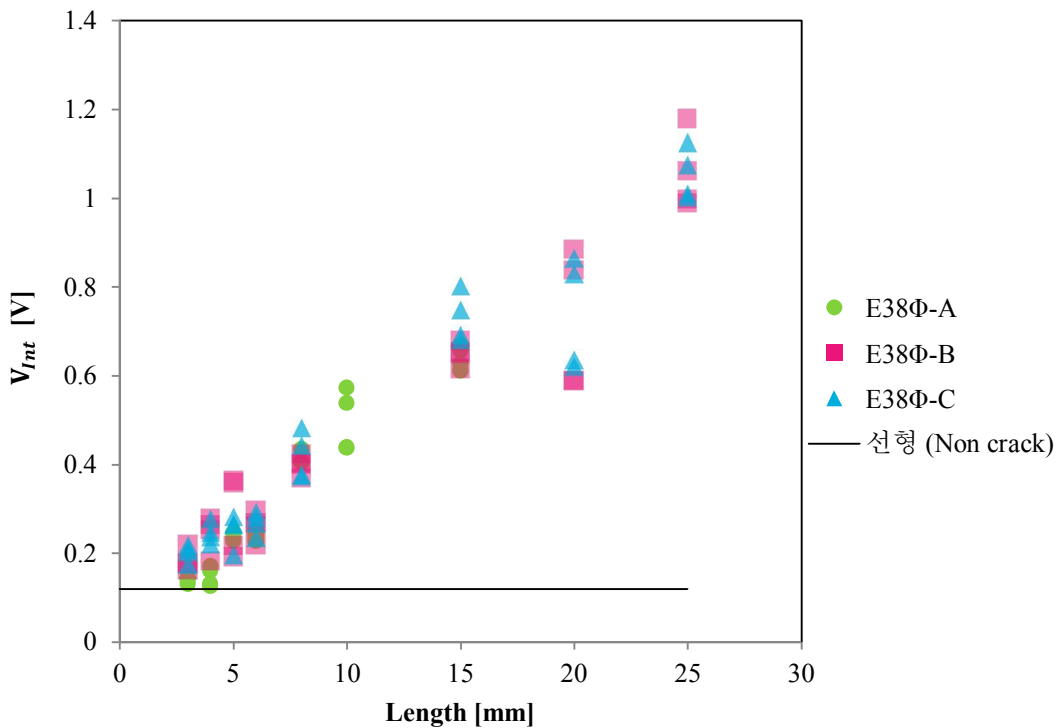


Fig. 4-15 Crack detection data graph of for cracks on E38Φ bleed air ducts

Fig. 4-16는 F50Φ 배관의 3~25mm 균열을 반복실험을 통하여 얻은 분포 데이터이다. X축은 결함 길이, Y축은 면적분 값을 나타낸다. 선형은 무균열 데이터값을 나타내며, 각 도형으로 표시된 분포는 F50Φ D, E, F 배관의 균열 데이터를 나타낸다. 그래프와 같이 균열 데이터 값이 무균열 데이터 값보다 높게 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 이후 길이 추정을 위하여 균열 데이터 분포에 추세선을 그린 후 기울기와 절편 값을 확인하였다. 추세선을 그렸을 때 값이 높게 형성 되어있는 경우, 센서의 미세한 진동으로 인한 노이즈 값의 유입이나, 용접부위에 균열이 인접하게 위치하여 이와 같은 현상이 나타났다. 또한, 배관의 단차 혹은 면이 고르지 못한 구간을 지날 때 센서와 lift-off의 급격한 변화로 인하여 작은 값이 나타난다.

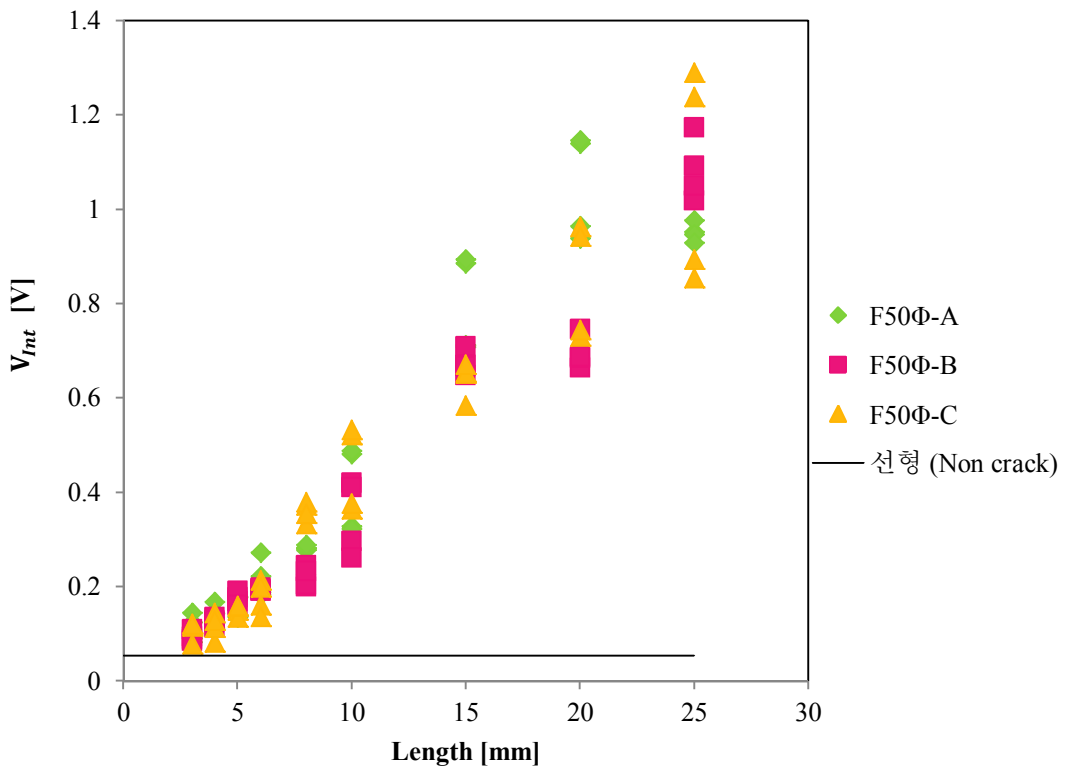


Fig. 4-16 Crack detection data graph of for cracks on F50Φ bleed air ducts

2. 균열 길이 판정

균열의 길이를 추정하기 위하여 a(기울기), L(길이), b(절편)가 적용된 면적분의 식을 사용할 수 있다.

$$V_{Int} = a \times Length + b \quad (5)$$

면적분 식 (5)에 길이의 역수를 취하여 추정길이를 구하는 식 (6)으로 변형될 수 있다.

$$Estimated\ Length = \frac{V_{Int} - b}{a} \quad (6)$$

또한 실제길이와 추정길이의 차를 백분율을 적용하여 오차율(E_R)을 구하는 식 (7)을 도출하였다.

$$E_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Real\ length - Estimated\ length}{Real\ length} \right| \times 100 \quad (7)$$

Fig. 4-17은 각 배관의 균열 유무 판정 그래프의 추세선에서 확인한 기울기와 절편 값을 식 (6)에 대입하여 추정길이 값과 실제 균열 길이를 비교한 그래프이다. 용접부 인근의 데이터를 포함하지 않는 경우 E38Φ는 30.8%의 평균오차율과 93.4%의 최대 오차율을 가진다. 또한 F50Φ는 14.1%의 평균오차율과 38.4%의 최대오차율을 가진다. 여기에서 최대오차율은 길이가 3~4mm 작은 결함에서 발생하였으며, 결과적으로 전체적인 평균 오차율에 영향을 미친다. 한편, 용접부 부근에서는 최대 260% 이상의 오차를 가진다. 이는 용접부에서 발생하는 잡음 신호가 면적분식에 영향을 미쳐서 결과적으로 결함의 크기가 상대적으로 크게 계산되기 때문이다.

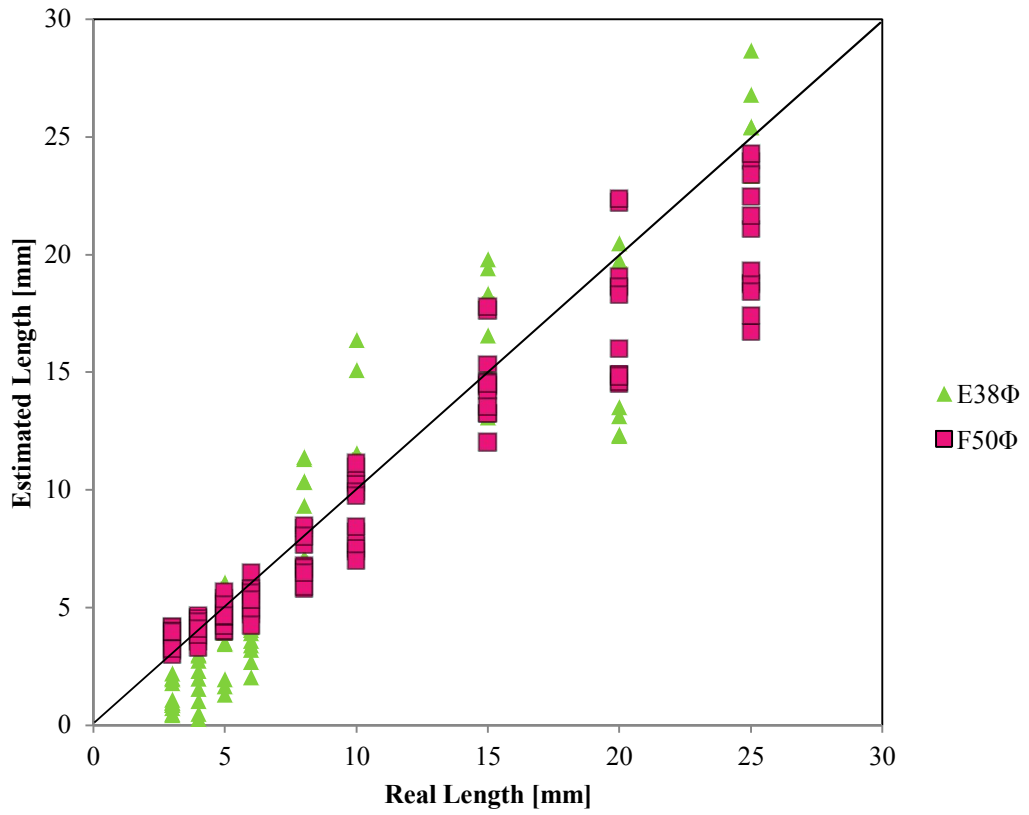


Fig. 4-17 Estimated length of cracks on E38Φ and F50Φ bleed air ducts

제 5장 결 론

본 연구에서는 티타늄 재질의 박막구조에서 결합검출능이 우수한 와전류 탐상법의 장점을 활용하면서, 용접부 및 서스펜션과 같은 불연속면을 가지는 블리드에 어덕트의 비파괴검사 시스템을 개발 하였다. 균열의 측정원리는 용접부와 같은 불연속면에서 센서를 보호하면서도 lift-off의 감소를 최소화하기 위하여 근접장 와전류 탐상법을 활용하였다. 근접장 와전류에 의한 효율적인 유도전류의 인가 및 결합의 존재에 기인한 와전류의 변화, 전자기장 분포의 왜곡을 유한요소법에 의하여 해석하였다. 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 여자코일, 센서배열, 센서기구물 및 신호처리회로를 설계 제작하였다. 또한, 검사 정밀도를 향상시키기 위하여 자동이송기구를 제작하였으며, 상술한 센서부와 일체화하여 블리드에어덕트 내부의 와전류 분포를 측정, 영상화 및 해석할 수 있도록 하였다. 이들 하드웨어를 운용할 수 있는 측정 및 해석용 소프트웨어도 함께 개발하였다.

E38Φ 배관을 검사하기 위하여 45개의 센서를 8°간격으로 배열하여 채널당 2.65mm의 공간분해능을 가지는 센서를 사용 하였다. F50Φ 배관의 경우, 63개의 센서를 5.71°의 간격으로 센서를 배열하여 채널당 2.49mm의 분해능을 가지는 센서를 사용 하였다. 실험시 와전류센서를 축방향(z-방향) 으로 30mm/sec 속도로 이송하면서 배관을 검사하였다. 각각의 센서에 의하여 측정된 전자기장의 왜곡을 측정, 영상화 하여 검사자가 보기 쉽게 결합을 확인할 수 있도록 하였으며, 개발된 시스템에 의하여 본 연구의 목표를 달성하였는지 검증하기 위하여, 길이 3~30mm의 길이를 가지는 인공균열을 두께가 0.45mm이고 각 내경이 38mm 및 50mm의 티타늄재질 블리드에어덕트에 도입하여, 개발된 시스템의 유용성을 확인하였다.

근접장을 이용한 보빈형 자기카메라의 여자코일에 교류전류(200mA, 15kHz)를 인가하고, 58dB의 증폭이득을 가지는 BIHaS에 의하여 전자기장의 분포를 측정한 결과, 길이 3mm 이상의 축방향 관통형 균열을 탐지할 수 있었다.

이후 균열의 크기를 평가하기 위해 균열 길이 판정 알고리즘을 적용하였다.

E38Φ 배관은 실제 균열의 길이와 추정 균열의 길이를 비교하여 30.8%의 평균오차를 가지며, 93.4%의 최대 오차를 가진다. 또한 F50Φ 배관은 14.1%의 평균오차율과 38.4%의 최대오차율을 가진다.

REFERENCE

- [1] <http://www.finetubes.de/produkte/anwendungen/hydraulikrohre>
- [2] <http://aviation.stackexchange.com/questions/15520>
- [3] https://www.crmeng.com/projects/bleed_air_duct
- [4] <http://www.mkckorea.com/catalog/iris>
- [5] http://www.zetec.co.kr/product/pro_view.php?idx=52
- [6] Donald J, Hangemaier, 1990, "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, pp. 43.
- [7] 이용, "와전류에 영향을 미치는 인자," 와전류탐상검사, 도서출판 골드, 2000, pp. 15-16.
- [8] http://www.klensp.co.kr/html/product/01_05_01.asp
- [9] 한전KPS 위탁연구계획서
- [10] http://premium.britannica.co.kr/bol/topic.asp?article_id=b25h1860a
- [11] 이희중, 남민우, 조찬희, 유현주, 김인철. (2011.10). 다중채널 와전류탐상검사 장치 개발(Ⅱ). 비파괴검사학회지, 31(5), 552-559.
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 이진이, 이재선, 신기수, “강선 구조물 결함 탐상 및 평가”, 군사과학연구, 제4권 제1호, pp.61-70 (2010)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] J. C. Scully, "The theory of stress corrosion cracking in alloys," *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 19, pp. 5-10, 1972.
- [21] J. Galvele, "A stress corrosion cracking mechanism based on surface mobility," *Corrosion Science*, vol. 27, pp. 1-33, 1987.
- [22] K. Sieradzki and R. C. Newman, "Stress-corrosion cracking," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 48, pp. 1101-1113, 1987.

Acknowledgements

석사 학위 졸업 논문을 쓰면서 많은 도움을 주신 이진이 교수님께 진심으로 감사드립니다. 논문 심사를 봐주신 고낙용 교수님, 조창현 교수님께 감사 드립니다. 또한 석사 논문을 쓰는데 있어 도움을 주신 김정민 박사님, Minhhyu Le 감사합니다. 개발에 도움을 주신 공군 관계자 분들께도 감사에 말씀을 전합니다. 마지막으로 항상 한결 같은 마음으로 지켜봐 주시고 아낌없는 지원과 응원을 보내주신 부모님 사랑하고 감사합니다.

2016년 11월
김현종 올림