



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

리벳 締結 段差部の 缺陷 檢出에 관한 研究

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

崔 銀 鎬

리벳 締結 段差部の 缺陷 檢出에 관한 研究

A study of Flaw Detection of Stepped Rivet Fastener
Area

2017年 2月 24日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

崔 銀 鎬

리벳締結段差部の缺陷檢出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




2016年 10月

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

崔 銀 鎬

崔銀鎬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	趙昌弦 
委員	朝鮮大學校 教授	李鎮伊 

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 원리	8
제 1 절 전자기장을 이용한 비파괴검사	8
제 2 절 유한요소해석법에 의한 수치해석	12
제 3 장 시뮬레이션	13
제 1 절 연속면(평판)에서의 전자기장 해석	13
제 2 절 불연속면(단차)에서의 전자기장 해석	21
제 4 장 실험 및 고찰	34
제 1 절 시험편	34
1. 연속면(평판) 시험편	34
2. 불연속면(단차) 시험편	37
제 2 절 실험 장치	40
1. 자기카메라 시스템	40
2. 자동 스캔 시스템	46
제 3 절 결합 자동 판별 알고리즘	48
1. 리벳 중심위치 추정	48
2. 이면 부식 자동 판별	50
제 4 절 실험 및 고찰	54
제 5 장 결론	70
REFERENCE	72
Acknowledgements	74

표목차

Table 1-1 comparison of non-destructive inspection methods.....	4
Table 3-1 Physical characteristics and sizes of simulation models (Flat Area)	15
Table 3-2 Physical characteristics and sizes of simulation models (Stepped Area).....	21
Table 4 -1 Components name and description of the inspection system	47

도목차

Fig. 1 -1 Structure of jet engine	1
Fig. 1 -2 Intake of F-5E combat aircraft	2
Fig. 1 -3 Shape of Air inlet duct[1]	3
Fig. 1 -4 Stepped rivet fastener area in air inlet duct	6
Fig. 2 -1 Model for inducing current on a conductive specimen	8
Fig. 3 -1 Simulation model for inducing current on a conductive flat specimen;	14
Fig. 3 -2 Simulation result of vertical direction coil (No Crack);	16
Fig. 3 -3 Simulation result of vertical direction coil (Far-side corrosion);	17
Fig. 3 -4 Simulation result of yoke type electromagnet (No crack);	19
Fig. 3 -5 Simulation result of yoke type electromagnet (Far-side corrosion);	20
Fig. 3 -6 Simulation model for inducing current on a conductive Stepped specimen;	23
Fig. 3 -7 Simulation result of vertical direction coil (No crack);	25
Fig. 3 -8 Simulation result of vertical direction coil (Far-side corrosion);	26
Fig. 3 -9 Simulation result of vertical direction coil (No Crack);	27
Fig. 3 -10 Simulation result of vertical direction coil (Far-side corrosion);	28
Fig. 3 -11 Simulation result of yoke type electromagnet (No Crack);	30
Fig. 3 -12 Simulation result of yoke type electromagnet (Far-side corrosion);	31
Fig. 3 -13 Simulation result of yoke type electromagnet (No Crack);	32
Fig. 3 -14 Simulation result of yoke type electromagnet (Far-side corrosion);	33
Fig. 4 -1 Sizes of artificial corrosion around rivet fasteners on a specimen; (a) Top sheet (b) Bottom sheet	35
Fig. 4 -2 No corrosion specimen; (a) Top sheet (b) Bottom sheet	36
Fig. 4 -3 Sizes of artificial corrosion around stepped rivet fasteners on a specimen;	38
Fig. 4 -4 Combined stepped rivet fasteners on a specimen	39
Fig. 4 -5 Block diagram of the magnetic camera system	40
Fig. 4 -6 Sensor components; (a) Yoke-type core (b) Hall sensor array	42
Fig. 4 -7 3D design of sensor case	43
Fig. 4 -8 Completed sensor probe; (a) Real picture (b) 3D design	44
Fig. 4 -9 Block diagram of the signal processing	45
Fig. 4 -10 Auto scan system	46
Fig. 4 -11 Rivet center position estimation algorithm for (a) find Rx (b) find Ry	49
Fig. 4 -12 Estimation process of rivet center position: (a) V_{RMS} (b) V_B (c) ΔV_{RMS} (d) $ \Delta V_{RMS} $	49
Fig. 4 -13 Far-side backward and forward corrosion detection algorithm	51
Fig. 4 -14 Sample of scan image for: (a) no crack (b) backward corrosion (c) forward corrosion	51

Fig. 4-15 Far-side backward and forward corrosion detection algorithm..... 53
 Fig. 4-16 Sample of scan images for (a) no crack (b) left corrosion crack (c) right corrosion crack 53
 Fig. 4-17 Images of No corrosion..... 54
 Fig. 4-18 Images of a rivet with four direction corrosion (flat)..... 55
 Fig. 4-19 Application result of corrosion detection algorithm (flat specimen)..... 56
 Fig. 4-20 Images of a rivet with four direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm..... 59
 Fig. 4-21 Images of a rivet with four direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm..... 61
 Fig. 4-22 Images of a rivet with forward & backward direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm..... 63
 Fig. 4-23 Images of a rivet with left & right direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm..... 65
 Fig. 4-24 Images of a rivet with forward & backward direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm..... 67
 Fig. 4-25 Images of a rivet with left & right direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm..... 69

약어 설명

UT	Ultrasound testing
VT	Visual testing
RT	Radiographic testing
ECT	Eddy current testing
LIHaS	Linearly integrated Hall sensor array
GMR	Giant magnetic resistance
PEC	Pulsed eddy current
MOI	Magneto-optical eddy current imaging
RMS	Root-mean-square
MURX	Relative permeability in x -direction
RSVX	Electrical conductivity in x -direction ($\Omega \cdot m$)
AC	Alternating current
DC	Direct current
A/D	Analog to digital converter

기호 설명

\vec{B}_x	Magnetic flux density in x -direction
\vec{E}_1	Electrical field intensity
\vec{J}_y	Eddy current in y -direction
I	Input current to Hall sensor
T	Tesla
V_H	Hall sensor voltage output
\vec{B}_z	Magnetic flux density in z -direction
V_{RMS}	Root-mean-square of Hall voltage
ΔV_{RMS}	Differential of root-mean-square of Hall voltage in the scan direction
V_B	RMS Hall voltage with backdata
R _x	Rivet center in X-direction
R _y	Rivet center in Y-direction
P _x	Coordinate of max point P in X-direction
P _y	Coordinate of max point P in Y-direction
C _F	Number of maximum points in forward-side
C _B	Number of maximum points in backward-side
PR _F	Point rate in forward-side

PR_B	Point rate in forward-side
L_L	Average distance to rivet center from left-side corrosion
L_R	Average distance to rivet center from right-side corrosion
C_{th}	Cut-off threshold (% of maximum data)
L_{Lth}	Distance threshold for left-side corrosion
L_{Rth}	Distance threshold for right-side corrosion
L_{Fth}	Distance threshold for forward-side fatigue crack
L_{Bth}	Distance threshold for backward-side fatigue crack
L_F	Average distance to rivet center from forward-side fatigue crack
L_B	Average distance to rivet center from backward-side fatigue crack
L_C	Distance from rivet head surface to pitting corrosion crack in rivet
R_L	Rivet length

ABSTRACT

A Study of Flaw Detection of Stepped Rivet Fastener Area

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

In aging aircrafts, flaws can appear in the fastener sites of the air-intakes (intakes) due to degradation of material or adverse operating conditions such as high pressure, concentrated stress, extreme vibrations, salty moisture, etc. Stepped layers are usually added while repairing the intake's skin. Therefore, nondestructive testing is required for the early detection of flaws in the fastener sites, for both the normal layers and the stepped layers in the intakes.

This thesis presents a finite element analysis (FEA) of the electromagnetic field distributions around the fastener in the stepped layers of the aging aircrafts' intakes. The advantages and limitations of flaw detection are presented, based on the FEA simulation results. In addition, a nondestructive testing system designed based on the simulation results is developed.

ANSYS (ver.11.0, EMAG), a commercialized FEA software, is used for the simulation. Two magnetic sources—a rectangular coil and a yoke-type magnetic source—are simulated and compared. A Hall sensor array is placed at the center of each magnetic source to measure the vertical component of the electromagnetic field.

In case of using a rectangular coil, the magnetic flux distribution is not uniform at the Hall sensor position and is highly affected by the edge of the stepped layer; therefore, the flaw detection may be limited. However, when using a yoke-type magnetic source, the magnetic flux

is distributed uniformly at the Hall sensor array position and is not affected much by the edge. In addition, the eddy current density and magnetic flux density produced by the yoke-type magnetic source are higher than that of the rectangular coil. Thus, the yoke-type magnetic source can provide a better flaw-detection capability than the rectangular coil.

Based on the results of the simulation, the Hall sensor array (linearly integrated Hall sensor array, LIHaS) is fabricated and is integrated with a yoke-type magnetic source in a sensor probe. For a flat specimen, far-side corrosion with 5-mm diameter and 0.4-mm depth could be detected at the fastener site by the automatic flaw-detection algorithm.

At the top layer on the stepped specimen, far-side corrosion with 5 mm diameter, 0.4 mm depth, and with 8 mm and 12 mm distances from the rivet center to step boundary could be detected.

At the bottom layer on stepped specimen, the far-side corrosion at different locations (left, right, forward, backward) of fastener hole with 9 mm distance from the rivet center to step boundary could be detected. Right, forward, and backward corrosion with 5 mm distance from rivet center to step boundary could also be detected. However, the left side corrosion which is near to the stepped edge couldn't be detected because the LIHaS could not access to the smaller area close to the stepped edge.

제1장 서론

항공기의 제트 엔진이 추진력을 얻는 원리는 흡기-압축-연소-배기 4단계, 즉 공기흡입구(Air Inlet Duct, 이하 Intake)를 통하여 엔진 속으로 흡입된 공기는 압축기를 통하여 압축되며, 충분히 압축한 뒤 연소실에서 점화시키게 되면 고온, 고압의 고밀도 공기가 팽창하면서 터빈을 빠르게 회전시키게 된다. 이때 얻는 추진력과 날개에서 발생하는 양력이 더해져 비행이 가능해진다.

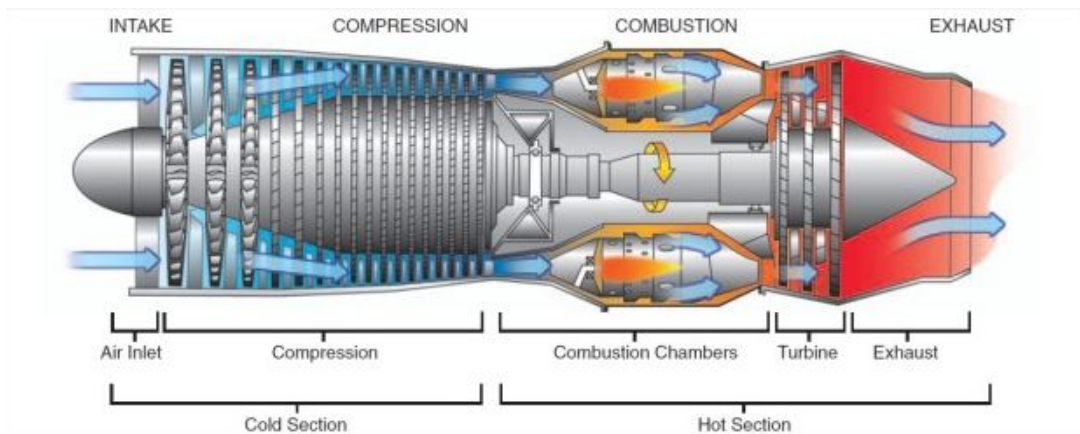


Fig. 1-1 Structure of jet engine

(자료출처: <http://www.lockheedmartin.com/us/aeronautics.html>)

항공기에 사용되는 제트엔진은 항공기 외부에 단독으로 장착되는 일은 거의 없다. 보통의 경우 제트엔진은 엔진을 감싸는 별도의 덮개 내부에 존재하거나, 동체 속에 위치하게 된다. 때문에, 엔진에 공기를 주입하기 위해서는 엔진 덮개 또는 동체의 외부에서부터 엔진까지 연결해주는 공기흡입구가 필요하며, Fig. 1-2에서 나타난 바와 같이 외부에 장착된 공기흡입구가 항공기 동체 뒤쪽에 장착된 제트엔진까지 공기를 주입한다. 이러한 공기흡입구는 공기의 속도와 압력을 조절해주는 역할을 한다. 항공기의 속도가 빨라질수록 압축기로 들어가는 공기의 속도도 빨라지

게 되며, 공기의 속도가 음속을 넘게 되면 제트엔진 내부 압축기의 로터깃(Rotor blade)에 실속(stall)이 걸리게 되며, 심한 경우 압축기의 로터깃이 부러지면서 엔진이 파손될 가능성이 있다. 따라서, 공기흡입구는 빠른 공기의 흐름을 압축에 적합한 속도(일반적으로 마하 0.5)로 낮춰주는 역할을 하게 되므로 비교적 복잡한 형상을 띄고 있다.



Fig. 1-2 Intake of F-5E combat aircraft

(자료출처: <http://www.airliners.net>)

Fig. 1-3은 실제 F-5, F-5E에 사용되는 공기흡입구의 형상을 나타내고 있다[1]. 상술한 공기 흐름 조절의 필요성에 의하여 인테이크 내부는 좌우, 상하로 트위스트된 형태를 띄고 있다. 항공기 후방쪽은 타원형이며, 제트엔진이 장착되는 부분이다. 전방은 D자형으로 공기가 들어오는 입구이다[1].

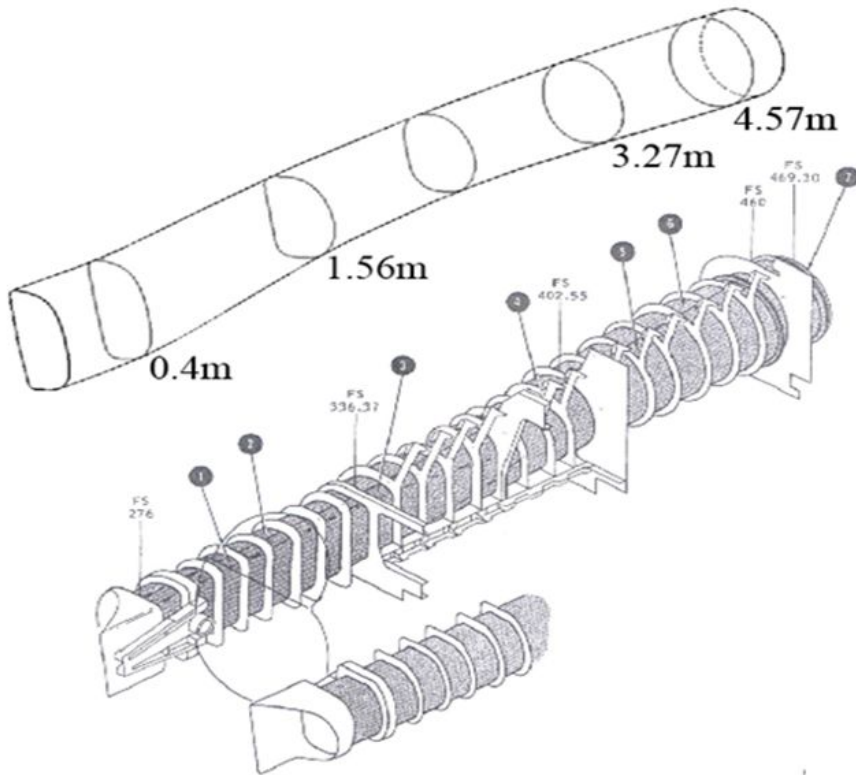


Fig. 1-3 Shape of Air inlet duct[1]

일반적으로 선박이나 자동차 등을 조립할 때에는 볼트, 너트 또는 용접을 이용한다. 하지만, 이러한 방법은 작업 시간이 길고 비용과 무게가 증가한다는 점에서 경량화를 지향하는 항공기 설계 개념과는 맞지 않다. 때문에 항공기에서는 벌크헤드와 뼈대 및 스킨을 연결하기 위하여 리벳 체결을 사용한다. 그러나 리벳 체결부 주위에는 초음속 비행이라는 특수한 운항 환경과 비행 중 발생하는 강한 진동 및 염수분 침투로 인하여 피로 및 부식결함이 발생하게 된다[2-4]. 이러한 피로 및 부식결함은 초기에 검출하지 않으면, 항공기 안전성에 큰 문제를 야기하게 된다.

Table 1-1은 현재 적용되고 있는 리벳 체결부 주위의 결함 검출을 위한 비파괴 검사법을 나타낸다. 육안검사(VT)는 검사 방법이 간단하고 특수한 장비나 교육을 받지 않더라도 검사가 가능하다는 장점이 있으나, 검사 결과가 검사자 개인의 주관적인 판단에 의해 이루어지므로, 정량적인 검사 결과를 얻기 어렵다는 단점이 존재한다. 방사선검사(RT)는 재질 및 결함의 깊이에 상관없이 검사가 가능하다는 장점이 있으나, 비분해 상태에서의 검사가 어렵다는 단점이 존재한다. 초음파검사(UT)는 내부 결함 검출에 유리하며, 결함의 크기 및 위치까지도 추정이 가능하다는 장점이 있으나, 반드시 지속적으로 음향 매질을 공급해야 하며, 그로 인한 설비가 복잡해진다는 단점이 존재한다. 와전류검사(ECT)는 비접촉 검사가 가능하며 표면 결함에 대한 검출능이 뛰어나지만, 표면 아래 결함은 검출이 어려우며, 신호 해석에 검사자의 상당한 숙련도가 요구된다는 단점이 존재한다. 이 외에도 리벳 체결부에 발생할 수 있는 결함을 조기에 발견하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.

Table 1-1 comparison of non-destructive inspection methods

검사 방법	장점	단점
육안검사(VT)	검사 방법이 간단하며, 특별한 교육 없이 검사가 가능하다.	정량적인 검사 결과를 얻기 어렵다.
방사선검사(RT)	재질에 상관없이 검사가 가능하며, 표면 및 내부결함의 측정이 가능하다.	측정체의 위치에 따라 비분해 상태의 검사가 제한적이다.
초음파검사(UT)	내부 결함 검출에 유리하며, 결함의 크기 및 위치 추정이 가능하다.	음향 매질의 지속적 공급이 필수적이며, 설비가 복잡함.
와전류검사(ECT)	비접촉식이며, 표면 결함에 대한 검출능이 뛰어나다.	표면 아래 깊은 곳의 결함은 검출이 곤란하며, 검사자의 상당한 숙련도가 요구된다.

Zeng[5] 등은 자기광학와전류탐상법(Magneto-Optical eddy current Imaging, 이하 MOI)을 이용하여, 두께 1mm인 알루미늄 합금재 다중구조물의 제3층에 있는 리벳 체결부 주변에 위치한 이면 부식 결함을 검출한 바 있다. MOI를 유한요소해석에 의하여 시뮬레이션함으로써 이면 부식 결함의 유무 및 위치를 추정할 수 있음을 제시하였다. Hurley[6] 등은 리벳을 제거하지 않더라도 항공기 스킨의 리벳 체결부 주위 결함을 검출할 수 있는 배열형 와전류 검사 프로브를 제안하였다. 환형으로 배열된 센서를 서로 마주 보게 하여, 신호의 차이를 측정하고 결함 유무를 판정하였다. 그러나, 센서를 리벳의 정중앙에 위치시킬 필요가 있다. Dolabdjian[7] 등은 거대자기저항(Giant Magnetic Resistance, 이하 GMR) 센서를 이용하여, 리벳 근처 피로 균열을 검출하기 위한 비파괴검사법을 제안하였다. 요크형 전자석을 이용하여, 리벳 주변 와전류의 변화를 측정하여 리벳 근처 길이 7mm의 인공균열을 6mm 이면에서 검출하였다. Kim[8] 등은 펄스와 전류(Pulsed Eddy Current, 이하 PEC)를 인가하고, 유도전류의 시간변화를 GMR 센서에 의하여 측정하였다. 그러나, 리벳의 중심을 정확하게 스캔하지 않으면, 큰 오차가 발생할 수 있다. 또한, 리벳 자체의 균열은 ECT에서 매우 작게 나타나므로, ECT에 의한 리벳 균열 검사는 한계를 가지고 있다. Cobb[9] 등은 리벳 홀의 균열을 확인하기 위하여 각도형 초음파 프로브를 이용하였으며 측정된 신호는 시간-주파수 분석에 의하여 해석되었다. Senyurek[10] 등은 Lamb파를 이용하여 항공기의 날개 슬랫을 검사하였고, 손상으로 인해 변화되는 신호를 Hilbert 변환을 이용하여 해석하였다. Ushakov[11] 등은 스테드에 있는 노치 및 드릴 파이프 나사부 밀면의 균열 검출을 위하여 이중 각도형 프로브를 사용하였으며, 신호의 진폭은 균열의 유무에 의하여 변화되는 A-Scan 모드로 해석하였다. 그러나, Fig. 1-4에서 나타낸 바와 같이 공기흡입구 내부 수리에 동반한 불연속면을 가지는 리벳 체결부에서의 결함 검출에 대한 연구는 보고된 바 없다.

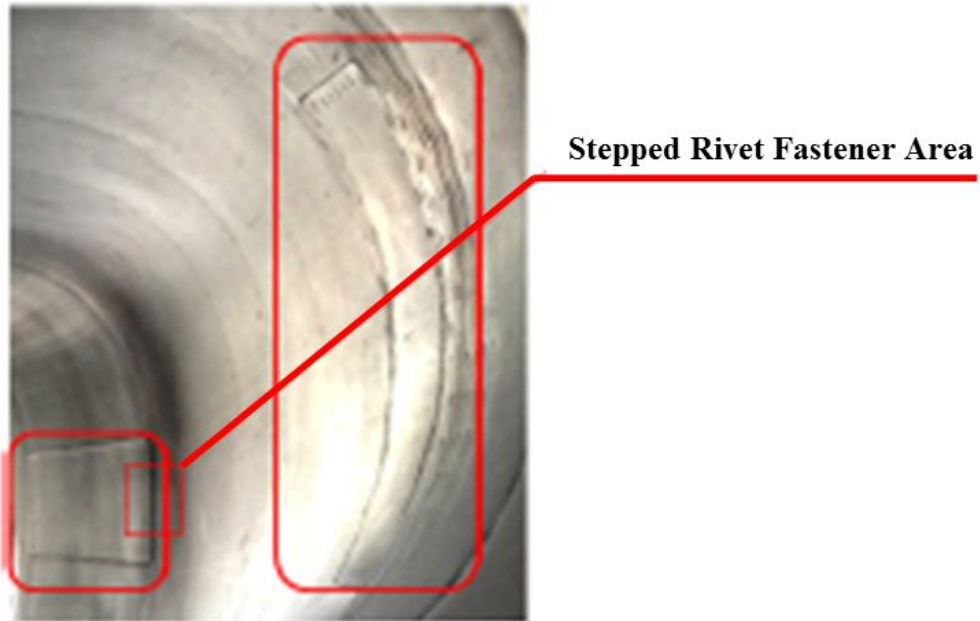


Fig. 1 -4 Stepped rivet fastener area in air inlet duct

본 연구는 장기 운영 항공기 공기흡입구 내부의 수리에 동반한 단차부에서 결함의 발생을 인지하기 위하여 유한요소해석법에 의한 시뮬레이션을 통하여 보다 유효한 전자기장 인가 및 측정 방법, 그리고 이를 이용한 비파괴검사법 도출 및 본 연구의 기술적 한계의 도출을 목적으로 한다. 먼저, 연속면(평판)과 불연속면(단차), 리벳 체결부에서의 전자기장 분포를 유한요소해석에 의하여 시뮬레이션한다. 이때 전자기장의 인가 방법 및 자화기 종류에 따라 각각의 경우에 대하여 시뮬레이션한다. 시뮬레이션 결과에 근거하여, 이면 부식 결함의 존재 유무를 판별하기 위한 주요 자기 벡터 성분을 이용하여 도출된 최적의 결함 검출 알고리즘을 바탕으로 전자기장 영상화 시스템을 제작한다. 또한 연속면(평판) 및 불연속면(단차)에 리벳 체결부와 인공 결함을 도입한 시험편을 제작하고, 실험을 통해 알고리즘의 유용성을 검증하였다.

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 1장은 서론이며, 제 2장은 전자기장을 이용한 비파괴 검사법의 원리 및 유한요소해석법에 의한 수치해석의 원리를 서술하였다. 제 3장은 유한요소해석법에 의한 수치해석 결과를 바탕으로 보다 유효한 전자기장 인가 및 측정 방법을 도출하였다. 제 4장은 도출된 알고리즘의 유용성을 검증하기 위한 실험 및 고찰에 관하여 서술하였다. 제 5장은 결론이다.

제 2 장 원리

제 1 절 전자기장을 이용한 비파괴검사

Fig. 2-1은 요크형 전자석을 이용하여 시험편에 유도전류를 인가하는 원리를 나타내는 모델이다. 코일에 교류전류를 인가하면 전류방향의 수직방향으로 1차 자기장이 발생하게 되며, 1차 자기장은 전도체인 시험편과 만나면 1차 자기장의 수직방향으로 와전류(Eddy Current)가 발생하게 된다. 이러한 와전류는 불연속면(단차 또는 결함)등으로 인하여 전류의 방향이 왜곡된다. 왜곡된 부분에서 2차 자기장이 발생하게 되며 요크형 코어의 양극 사이에 선형 배열된 홀(Hall)센서는 이를 감지하여 결함을 검출하게 된다.

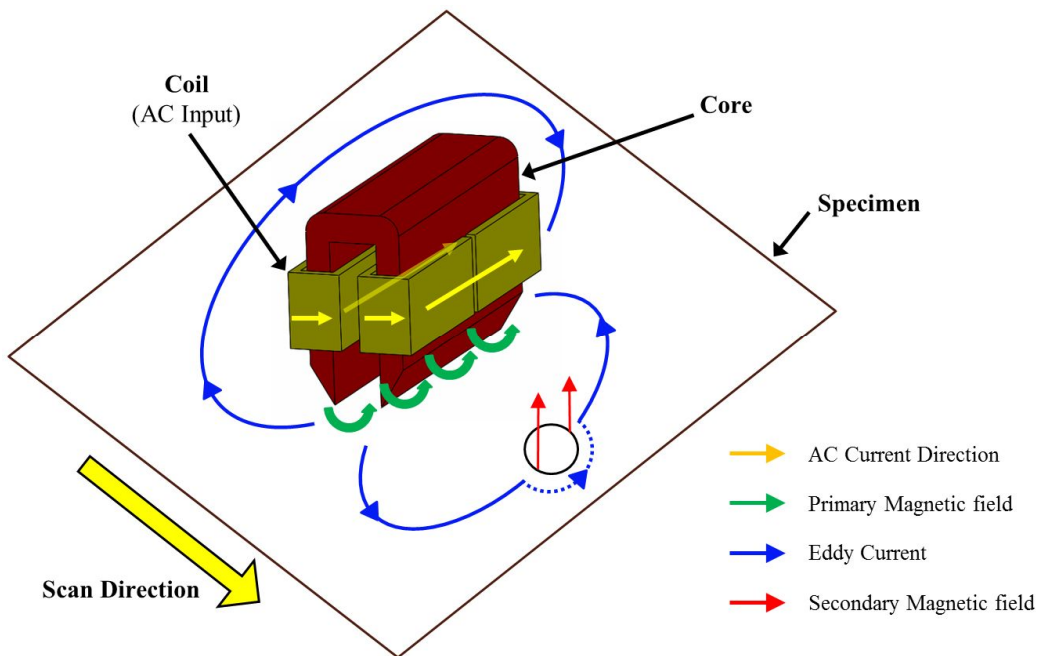


Fig. 2-1 Model for inducing current on a conductive specimen

식 (1)은 Ampere의 법칙을 Maxwell 방정식의 미분형으로 나타낸 것이다. 식 (2)는 시험편에 인가되는 자기장에 따라 자속밀도가 변화하게 되며, 이때 매개상수가 투자율임을 나타내고 있다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (1)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (2)$$

식 (3)은 자속밀도와 자위(Magnetic Vector Potential)의 관계식을 나타낸다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3)$$

식 (4)는 전기장에 따라 전류밀도가 변화할 때 매개상수가 전도율임을 나타내고 있다.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

최종적으로 Ampere의 법칙을 자위와 전기장의 관계로 표현할 수 있으며, 식 (5)에 나타내고 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

식 (6)은 Faraday의 법칙을 나타낸 것이며, 기전력은 자속의 시간미분과 코일의 권수에 비례하여 기전력이 발생함을 표현한다. 이때 식 (7)에서 나타낸 바와 같이 자속은 자속밀도의 적분이다.

$$V_{emf} = -N \frac{d\phi_m}{dt} \quad (6)$$

$$\Phi_m = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (7)$$

전위(Electric Scalar Potential)는 식 (8)에 나타난 바와 같이 전기장의 선적분으로 정의된다. 식 (9)에서 나타난 Stoke's의 정리를 활용하여, Faraday 법칙을 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{emf} = \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (8)$$

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_s (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{s} \quad (9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{A}) = \nabla \times \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (10)$$

이때, 전기장과 전위의 항등식 또는 관계식을 활용하면, 시변 전기장은 식 (11)과 같이 표현되며, 식 (11)은 식 (5)의 전기장 항목에 대입 가능하다.

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (11)$$

상술한 유도과정을 거치면, 식 (12)와 같은 시변자계상태에서의 자위와 전위의 편미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = -\sigma \nabla V - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (12)$$

식 (13)과 식 (14)에 나타난 바와 같은 페이저(Phasor), 식 (15)에서 나타내는 2차원 문제 또는 축대칭 문제에서 자위의 발산이 0임을 표현한 Coulomb Gauge 및 식 (16) 벡터의 항등식을 이용하면 최종적으로 식 (12)를 식 (17)과 같은 와전류 탐상의 지배방정식으로 표현할 수 있다.

$$\vec{A}(x, y, z, t) = e^{j\omega t} \vec{A}(x, y, z) \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{A}(x, y, z, t) = j\omega \cdot e^{j\omega t} \vec{A}(x, y, z) = j\omega \vec{A}(x, y, z, t) \quad (14)$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (15)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) \equiv \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (16)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = j\omega \sigma \vec{A} + \sigma \nabla V \quad (17)$$

제 2 절 유한요소해석법에 의한 수치해석

전자기장 인가장치로서 코일형 프로브를 가정하여 식 (18)과 같이 전류밀도를 나타내고, 시험편에 유도되는 와전류에 기인한 자기벡터 포텐셜을 식 (19)에 의하여 표현하였다.

$$\sigma \nabla V = -\sigma \vec{E} = -\vec{j} = -J_s \hat{\phi} \quad (18)$$

$$\vec{A} = A \hat{\phi} \quad (19)$$

결과적으로 코일형 프로브에 교류전류가 입력되어 상자성체 금속에 전자기장이 인가되었을 때, 식 (20)과 같은 편미분방정식에 의하여 공간상의 자기벡터포텐셜을 계산하는 것이 가능하며, 최종적으로 자속밀도 및 자기장을 계산할 수 있다.

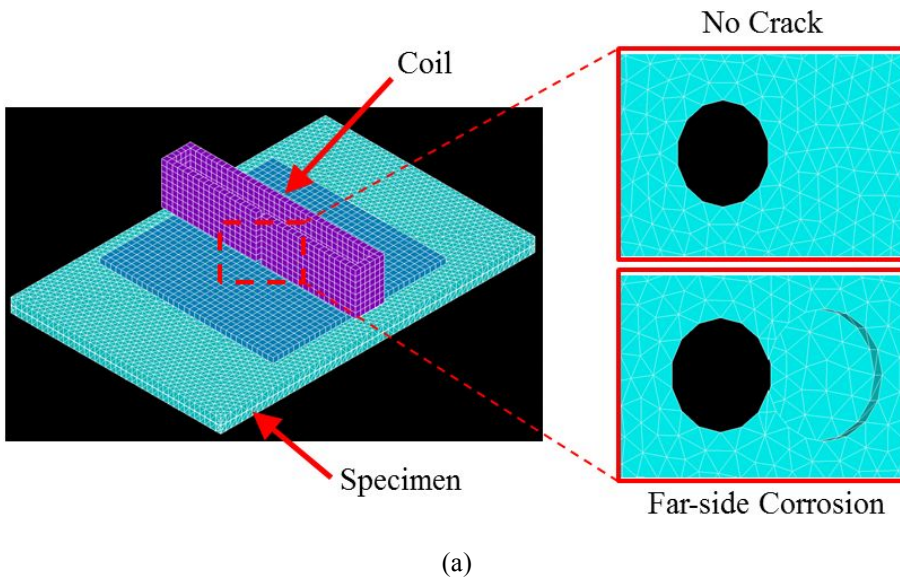
$$\frac{1}{\mu} \left\{ \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{A}{\rho} + \frac{\partial A}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A}{\partial z} \right) \right\} = j\omega \sigma A + \sigma \nabla V \quad (20)$$

상술한 식 (20)은 유한요소해석에 의해 해석이 가능하나, 본 연구에서는 상용화된 유한요소해석 프로그램인 ANSYS(Ver.11.0, EMAG)를 사용하여 해석하였다.

제 3 장 시뮬레이션

제 1절 연속면(평판)에서의 전자기장 해석

Fig. 3-1은 연속면(평판) 시험편에 유도전류를 인가하는 시뮬레이션을 실행하기 위한 모델을 나타낸다. 시험편 중심에 직경 6mm의 리벳 홀을 삽입하였고, 상판(Top Sheet)과 하판(Bottom Sheet)사이의 간격은 0.2mm로 설정하였으며, 리프트 오프(Lift-off)는 0.5mm로 설정하였다. 시험편의 재질은 알루미늄(Al2024 T4)이며, 불연속면(단차)가 없는 평판 시험편이다. (a)는 수직방향 코일을 사용하여 시험편에 유도전류를 인가하기 위한 모델이다. (b)는 요크형 전자석을 사용하여 시험편에 유도전류를 인가하기 위한 모델을 나타내며, 코어와 코일 사이의 간격은 0.5mm이다.



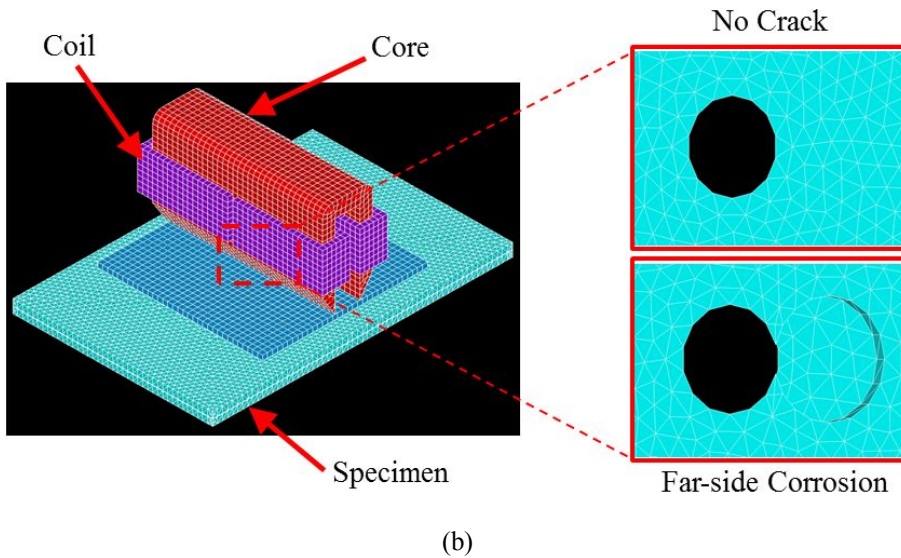


Fig. 3-1 Simulation model for inducing current on a conductive flat specimen; (a) Vertical Direction Coil (b) Yoke Type Electromagnet

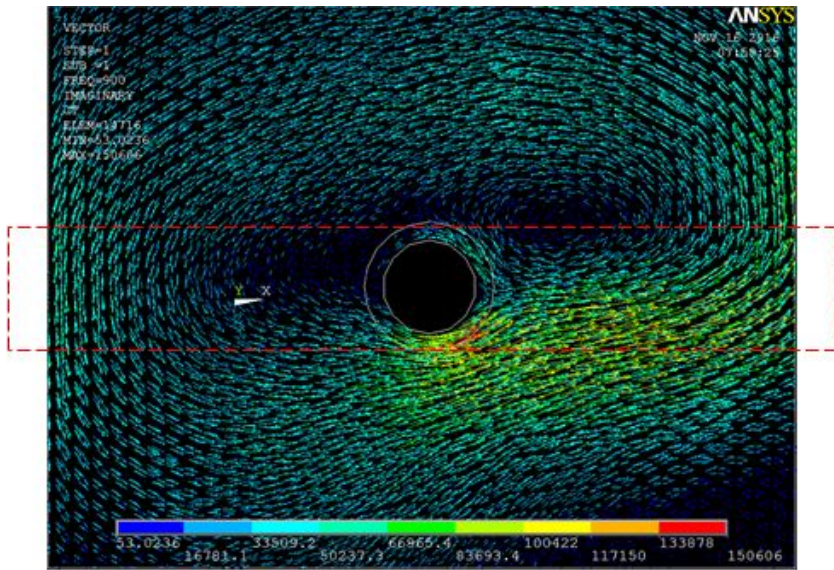
Table 3-1은 시뮬레이션 모델의 각 부품의 재질, 자기적 특성, ANSYS 모델 타입, 부품의 크기 및 요소의 크기를 나타낸다. 표에서 RSVX는 전기 저항률(electrical resistivity)이며, 알루미늄(Al2024 T4)인 시험편은 $5.766 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 으로 가정하였다. 실리콘스틸(Silicon Steel)인 코어는 $4.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 으로 가정하였다. MURX는 비투자율(μ_r , relative permeability)로서, 물질의 투자율(μ , magnetic permeability)과 진공의 투자율(μ_0 , space permeability)과의 비($\mu_r = \mu/\mu_0$)를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 센서, 코일, 시험편은 상자성체 이므로 MURX를 1로 가정하였으며, 강자성체인 실리콘스틸(Silicon Steel) 재질의 코어는 MURX를 4000으로 가정하였다.

Table 3-1 Physical characteristics and sizes of simulation models (Flat Area)

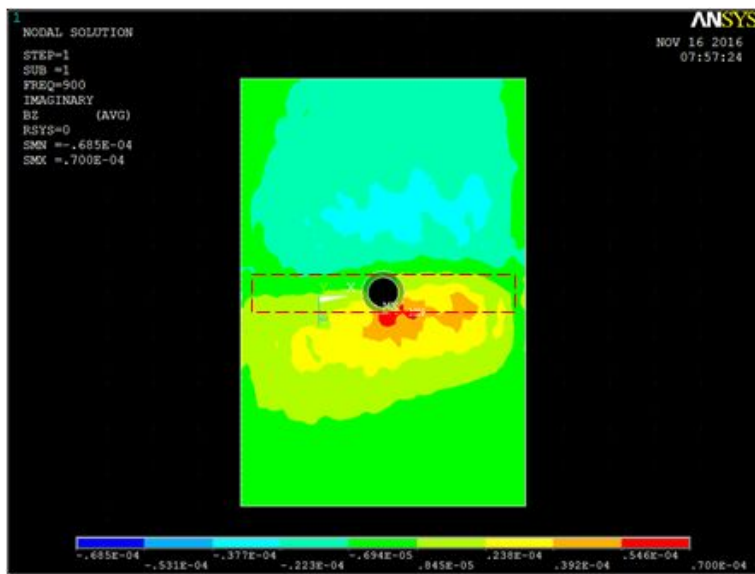
Components	Material	Magnetic properties	ANSYS model type	Size (mm)	Element size
Air	Air	MURX 1	117	60× 80 × 60	10
Coil-1	Copper	MURX 1	117	5.5× 37 × 8 0.2A, 900Hz	1
Coil-2	Copper	MURX 1	117	5.5× 37 × 8 0.2A, 900Hz	1
Core	Silicon Steel	MURX 4000 RSVX 4.72E-8	117, 1	10 × 34 × 20	1
Specimen (Top)	Aluminum Al2024 T4	MURX 1.000022 RSVX 5.766E-8	117, 1	40 × 60 × 1.27 Crack : 5Ø, Dp 0.6mm	1
Specimen (Bottom)	Aluminum Al2024 T4	MURX 1.000022 RSVX 5.766E-8	117, 1	40 × 60 × 1.27	1
Sensor	Air	MURX 1	117	20 × 20 × 1	1
MURX: Relative permeability in <i>x</i> -direction RSVX: Electrical conductivity in <i>x</i> -direction ($\Omega \cdot m$) Modeling type: 117 – no eddy current Modeling type: 117,1 – With eddy current					

Fig. 3-2 ~5는 평판 시험편에서의 시뮬레이션 결과이며, 쉽게 이해할 수 있도록 수치를 색깔별로 나타내었다. 청색에 가까울수록 낮은 전류밀도 및 자속밀도이며, 적색에 가까울수록 높은 전류밀도 및 자속밀도를 나타낸다. 결과 영상에 표시된 적색의 네모는 시뮬레이션 영상 내의 수직방향 코일 및 요크형 전자석에 포함된 코일의 위치를 지시한다. Fig 3-2는 이면부식 결함이 존재하지 않는 평판 시험편에서 수직방향 코일의 시뮬레이션 결과이며, 리벳 홀 주변에서 전류밀도 및 자속밀도가 높게 나타난다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 53.0236 A/m², 최대값 150606 A/m²이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 -0.685E-04T, 최대값 0.7E-04T 이다. Fig. 3-3 은 이면부식 결함이 존재하는 평판 시험편에서 수직방향 코일의 시뮬레이션 결과이며, 리벳 홀 주변뿐만 아니라, 이면부식 결함 주변에서도 전류밀도 및 자속밀도가 높게 나타난다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 54.0038 A/m², 최대값

130505 A/ m² 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 -0.605E-04T, 최대값 0.541E-04T 이다.

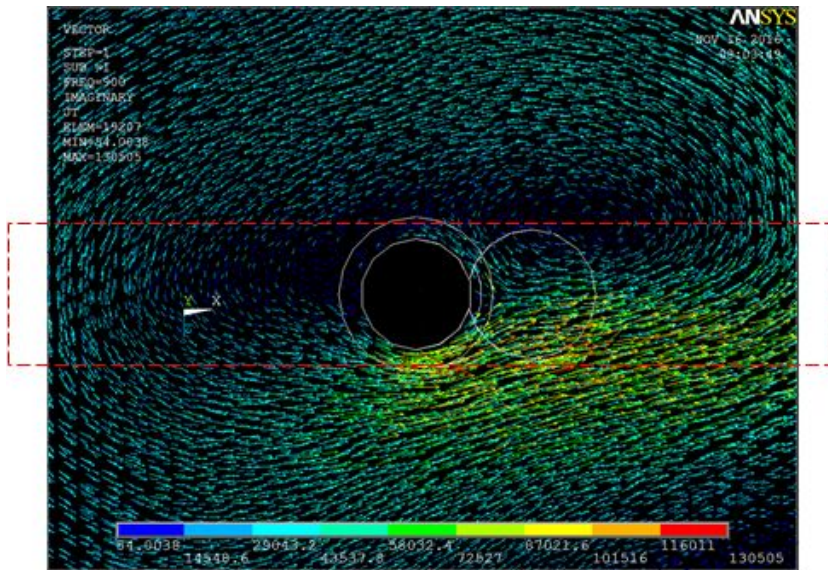


(a)

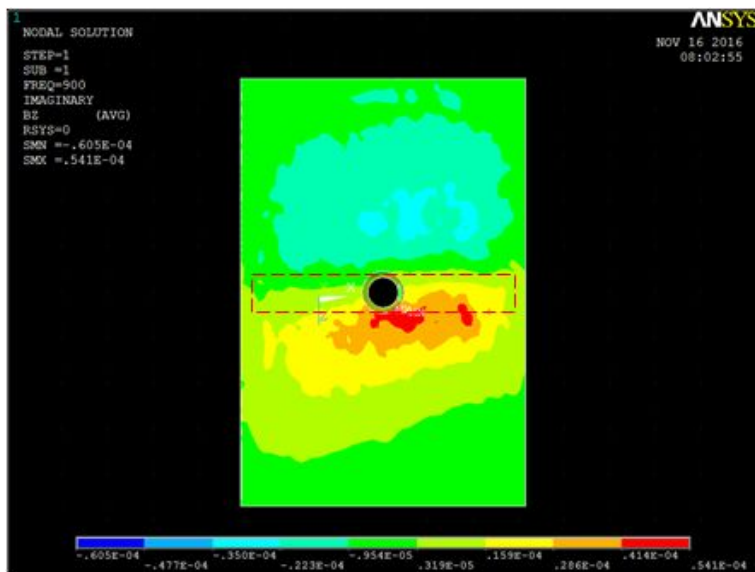


(b)

Fig. 3-2 Simulation result of vertical direction coil (No Crack);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density



(a)



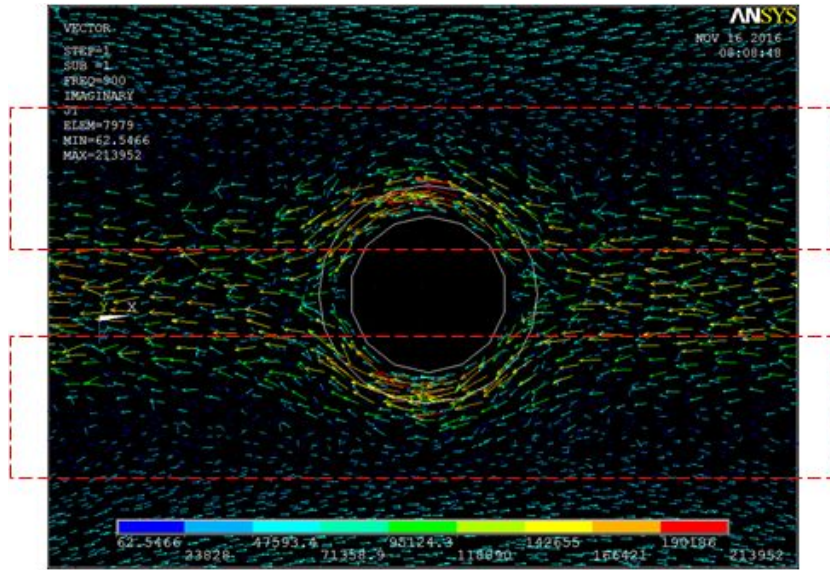
(b)

Fig. 3-3 Simulation result of vertical direction coil (Far-side corrosion);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density

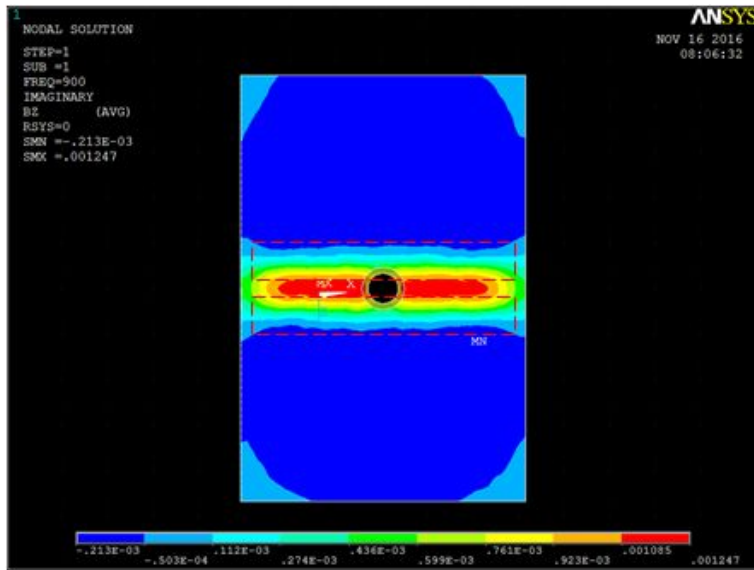
Fig. 3-4 는 이면부식 결함이 존재하지 않는 평판 시험편에서 요크형 전자석의 시뮬레이션 결과이다. 전류밀도가 리벳 홀 주변 하단에만 집중되던 수직방향 코일과는 달리 상,하 양단으로 전류밀도가 높게 나타나며, 자기장 또한 균일하게 집중되고 있다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 62.5466 A/m^2 , 최대값 213952 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.21\text{E-}03\text{T}$, 최대값 $0.1247\text{E-}02\text{T}$ 이다.

Fig. 3-5 는 이면부식 결함이 존재하는 평판 시험편에서 요크형 전자석의 시뮬레이션 결과이다. 전류밀도가 리벳 홀 주변, 하단에만 집중되던 수직방향 코일과는 달리 상,하 양단으로 전류밀도가 높게 나타나며, 자기장 또한 균일하게 집중되고 있다. 또한, 이면부식 결함 주변에서도 수직방향 코일보다 균일하게 집중되고 있다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 176.124 A/m^2 , 최대값 215221 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.226\text{E-}03\text{T}$, 최대값 $0.1386\text{E-}02\text{T}$ 이다.

연속면(평판)에서의 시뮬레이션 결과로 볼 때, 수직방향 코일과 요크형 전자석 모두 리벳 홀 주변과 이면부식 결함 주변에서 전류밀도 및 자속밀도의 변화가 나타나며, 결함을 검출할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 수직방향 코일은 자속밀도 분포를 보았을 때, 결함의 위치에 따라 균일한 결과가 나오지 않을 것으로 판단된다. 그에 비해 요크형 전자석의 경우 전류밀도의 분포가 수직방향 코일에 비하여 리벳 홀과 이면부식에서 더 많은 면적에 걸쳐 변화한다. 또한, 자속밀도의 분포로부터 배열된 홀(hall)센서가 위치하는 영역에서 아주 균일하게 자기장이 집중되며, 전류밀도와 자속밀도의 값 또한 수직방향 코일에 비하여 크다는 것을 알 수 있다. 따라서, 평판 시험편 시뮬레이션 결과, 수직방향 코일보다 요크형 전자석을 사용하는 것이 결함의 위치에 상관없이 검출이 가능하며, 더 좋은 검출능을 가질 것으로 예상된다.

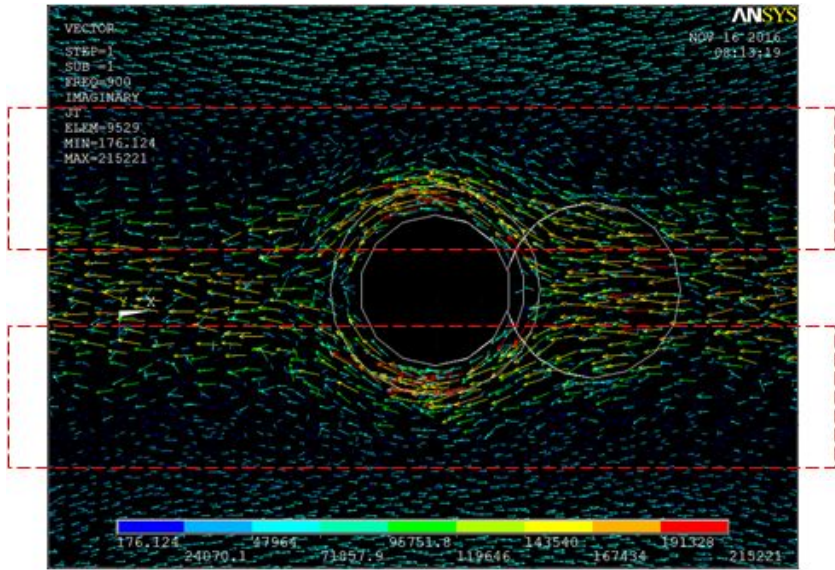


(a)

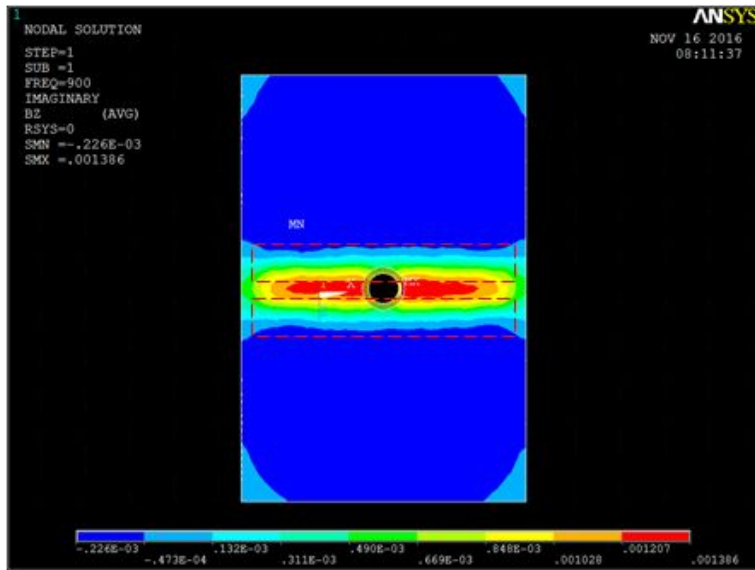


(b)

Fig. 3-4 Simulation result of yoke type electromagnet (No crack);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density



(a)



(b)

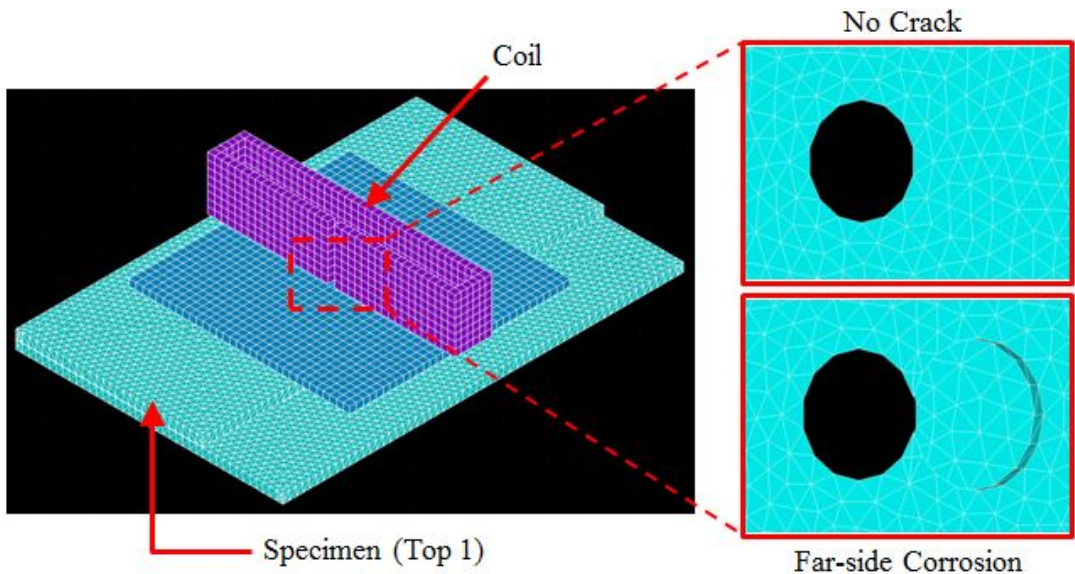
Fig. 3-5 Simulation result of yoke type electromagnet (Far-side corrosion);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density

제 2절 불연속면(단차)에서의 전자기장 해석

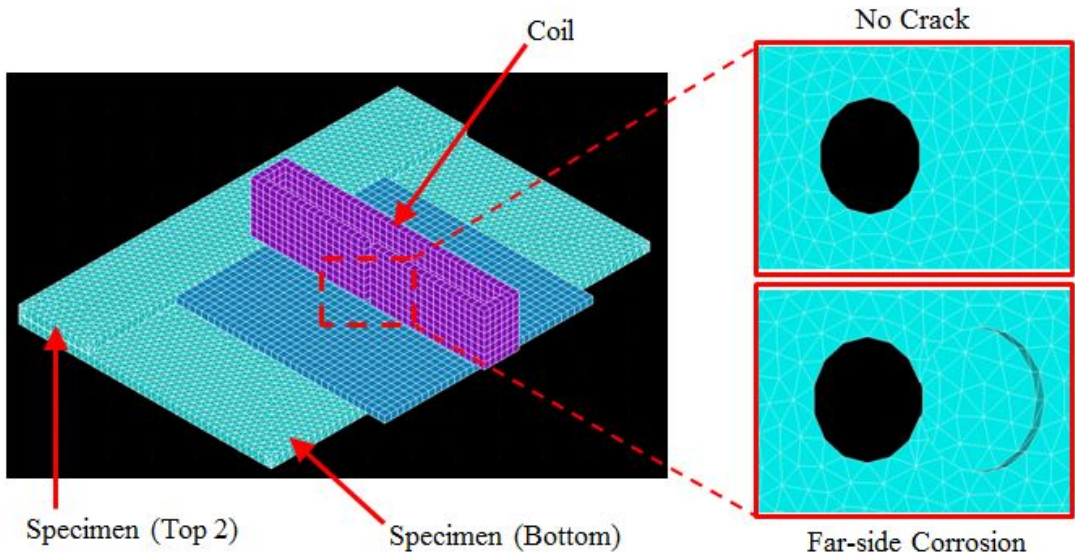
Fig. 3-6 은 불연속면(단차) 시험편에 유도전류를 인가하는 시뮬레이션을 실행하기 위한 모델을 나타낸다. (a),(c)는 상판에서의 모델이며, (b),(d)는 하판에서의 모델을 나타낸다. 수치해석에 적용된 각 부품에 대한 조건은 Table 3-2에 나타낸 바와 같다.

Table 3-2 Physical characteristics and sizes of simulation models (Stepped Area)

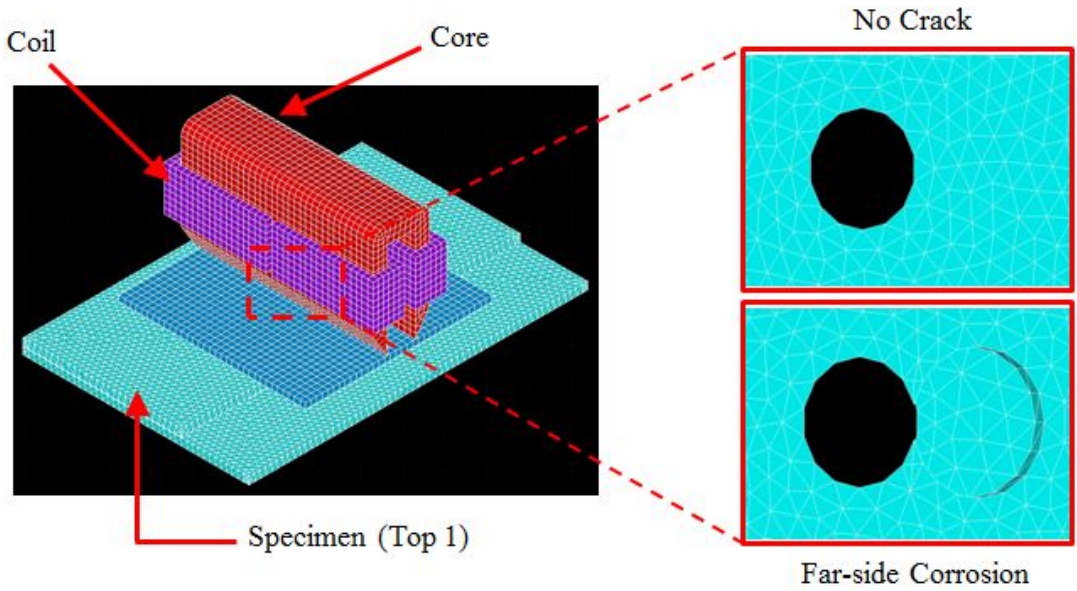
Components	Material	Magnetic properties	ANSYS model type	Size (mm)	Element size
Air	Air	MURX 1	117	60× 80 × 60	10
Coil-1	Copper	MURX 1	117	5.5× 37 × 8 0.2A, 900Hz	1
Coil-2	Copper	MURX 1	117	5.5× 37 × 8 0.2A, 900Hz	1
Core	Silicon Steel	MURX 4000 RSVX 4.72E-8	117, 1	10 × 34 × 20	1
Specimen (Top1)	Aluminum Al2024 T4	MURX 1.000022 RSVX 5.766E-8	117, 1	28 × 60 × 1.27 Crack : 5Ø, Dp 0.6mm	1
Specimen (Top2)	Aluminum Al2024 T4	MURX 1.000022 RSVX 5.766E-8	117, 1	11 × 60 × 1.27 Crack : 5Ø, Dp 0.6mm	1
Specimen (Bottom)	Aluminum Al2024 T4	MURX 1.000022 RSVX 5.766E-8	117, 1	40 × 60 × 1.27 5Ø, Dp 0.6mm	1
Sensor	Air	MURX 1	117	20 × 20 × 1	1
MURX: Relative permeability in x-direction RSVX: Electrical conductivity in x-direction ($\Omega \cdot m$) Modeling type: 117 – no eddy current Modeling type: 117,1 – With eddy current					



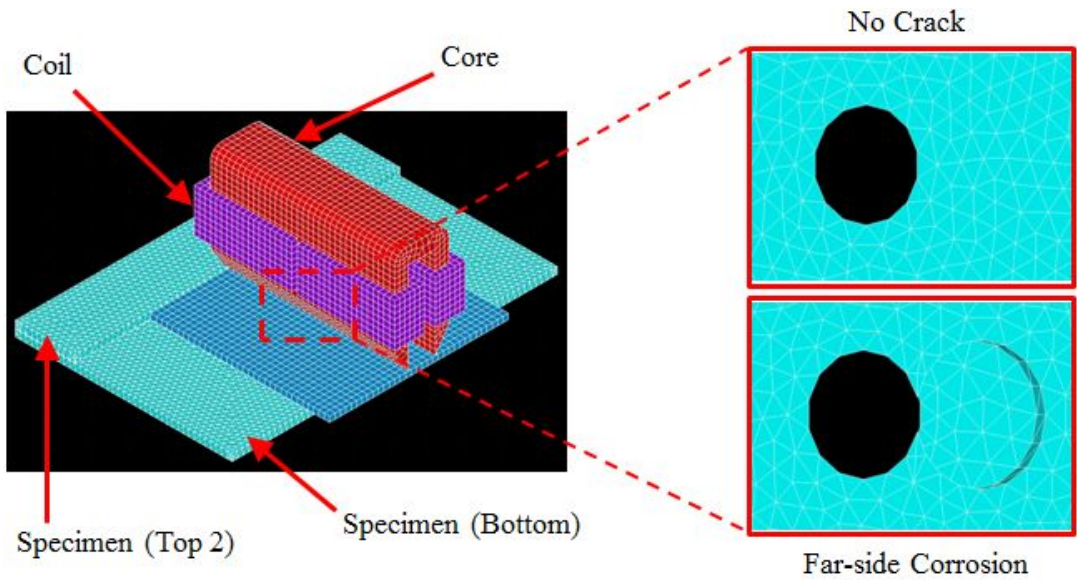
(a)



(b)



(c)



(d)

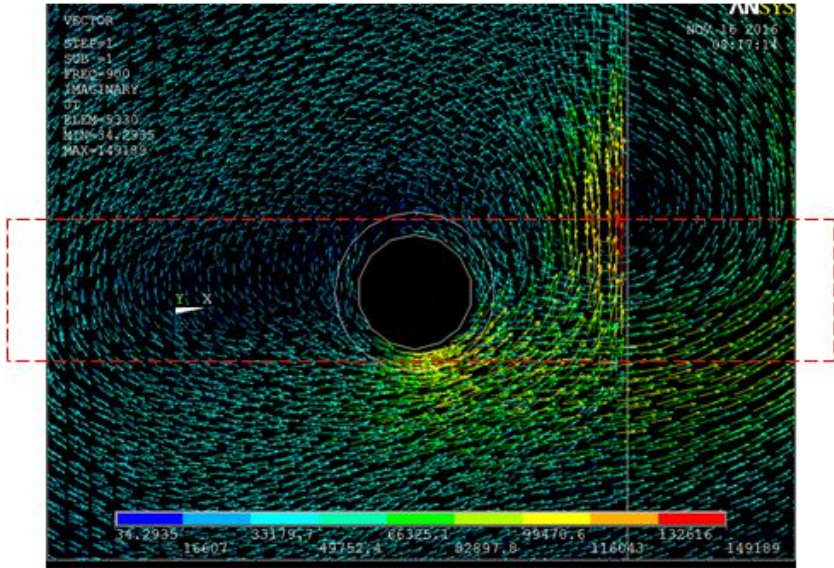
Fig. 3-6 Simulation model for inducing current on a conductive Stepped specimen;
(a)Vertical Direction Coil of top sheet (b)Vertical Direction Coil of bottom sheet (c) Yoke
Type Electromagnet of top sheet (d) Yoke Type Electromagnet of bottom sheet

Fig. 3-7 ~14 는 단차 시험편에서의 시뮬레이션 결과이다. 결과를 쉽게 이해할 수 있도록 수치를 색깔별로 나타내었다. 청색에 가까울수록 낮은 전류밀도 및 자속 밀도이며, 적색에 가까울수록 높은 전류밀도 및 자속밀도를 나타낸다. 결과 영상에 표시된 적색의 네모는 시뮬레이션 영상 내의 수직방향 코일 및 요크형 전자석에 포함된 코일의 위치를 지시한다. Fig. 3-7은 이면부식 결함이 존재하지 않는 단차 시험편 상판에서 수직방향 코일의 시뮬레이션 결과이며, 리벳 홀 하단부와 단차 경계면에서 전류밀도 및 자속밀도가 높게 나타난다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 34.2935 A/m^2 , 최대값 149189 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.59\text{E-}04\text{T}$, 최대값 $0.647\text{E-}04\text{T}$ 이다.

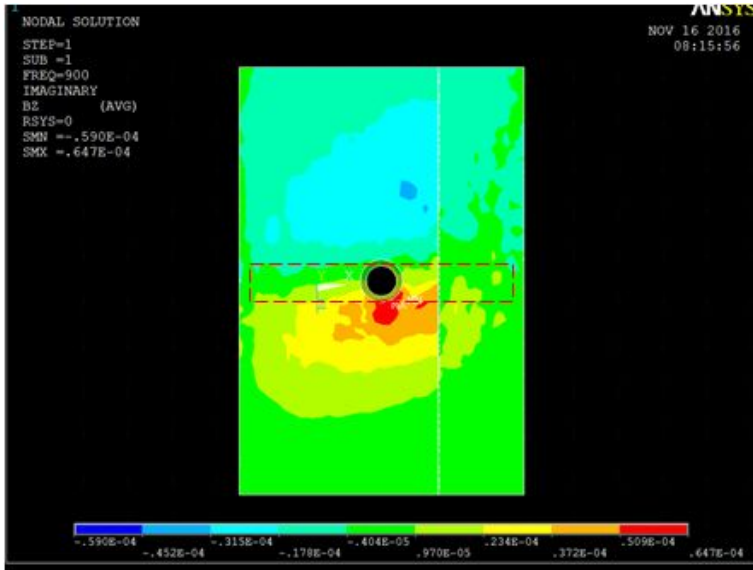
Fig. 3-8은 이면부식 결함이 존재하는 단차 시험편 상판에서 수직방향 코일의 시뮬레이션 결과이며, 리벳 홀 하단부와 이면부식 및 단차 경계면에서 전류밀도 및 자속밀도가 높게 나타난다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 37.0867 A/m^2 , 최대값 168364 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.539\text{E-}04\text{T}$, 최대값 $0.591\text{E-}04\text{T}$ 이다.

Fig. 3-9는 이면부식 결함이 존재하지 않는 단차 시험편 하판에서 수직방향 코일의 시뮬레이션 결과이며, 리벳 홀 상단부와 하단부에서 전류밀도 및 자속밀도가 높게 나타난다. 상판에서와는 달리 단차 경계면에서는 변화가 미약하다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 22.649 A/m^2 , 최대값 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.478\text{E-}04\text{T}$, 최대값 $0.45\text{E-}04\text{T}$ 이다.

Fig. 3-10은 이면부식 결함이 존재하는 단차 시험편 하판에서 수직방향 코일의 시뮬레이션 결과이며, 리벳 홀 상단부, 하단부와 이면부식에서 전류밀도 및 자속밀도가 높게 나타난다. 상판에서와는 달리 단차 경계면에서는 변화가 미약하다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 16.7113 A/m^2 , 최대값 259617 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.522\text{E-}04\text{T}$, 최대값 $0.564\text{E-}04\text{T}$ 이다.

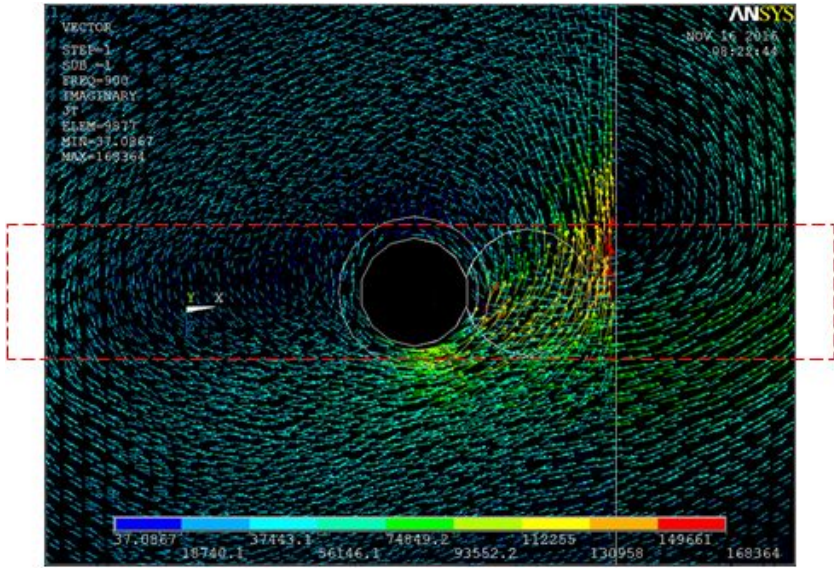


(a)

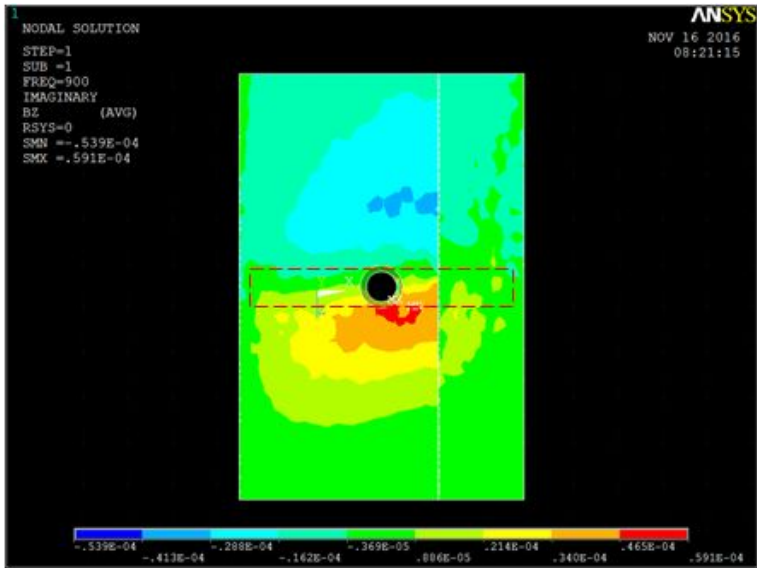


(b)

Fig. 3-7 Simulation result of vertical direction coil (No crack);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density

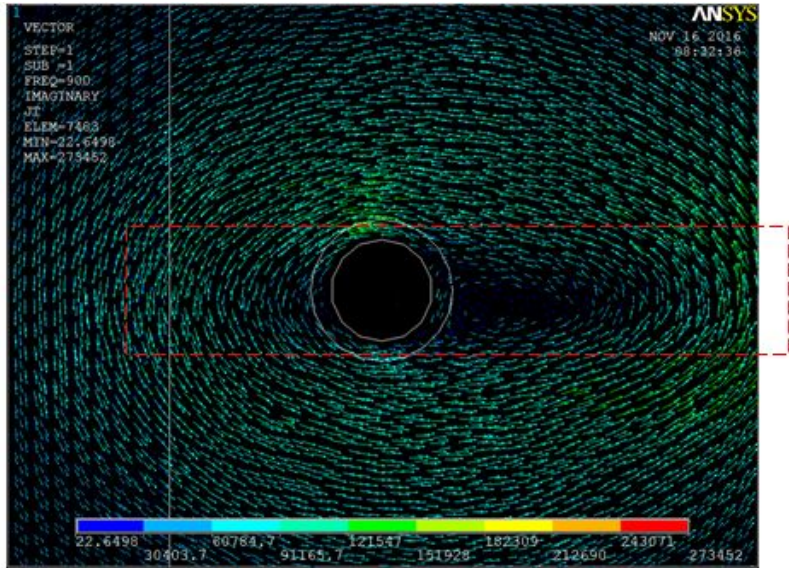


(a)

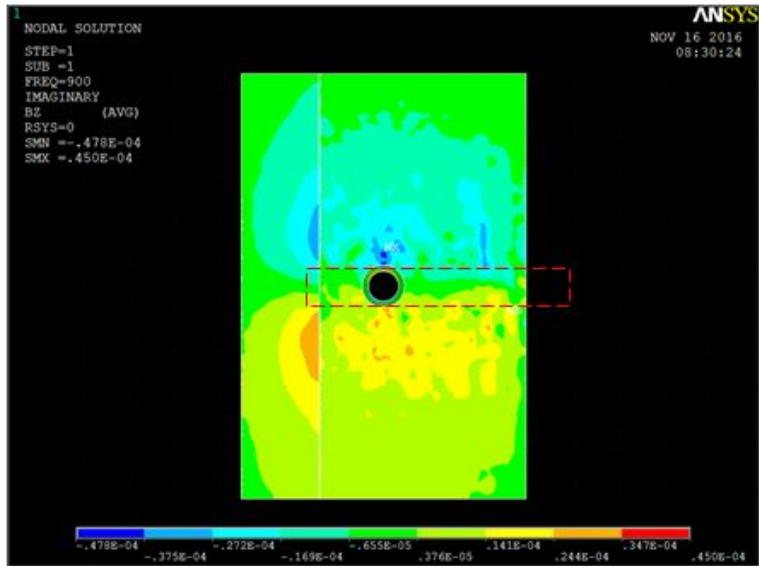


(b)

Fig. 3-8 Simulation result of vertical direction coil (Far-side corrosion);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density

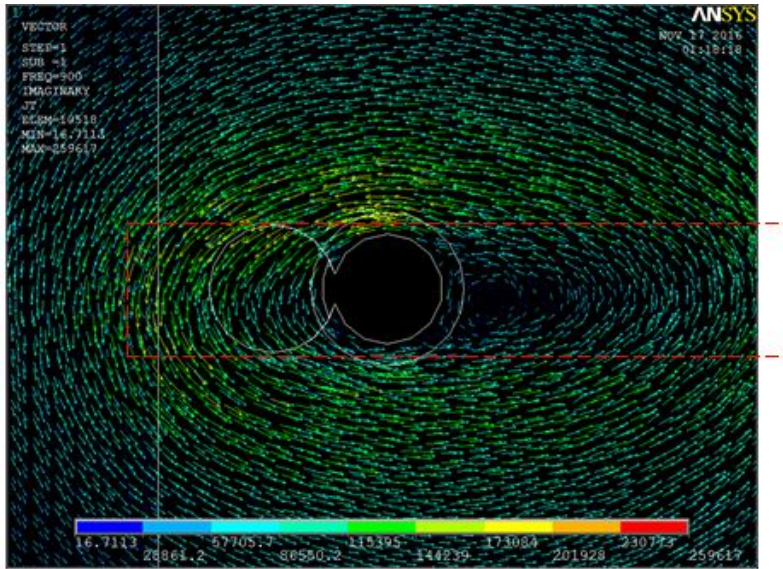


(a)

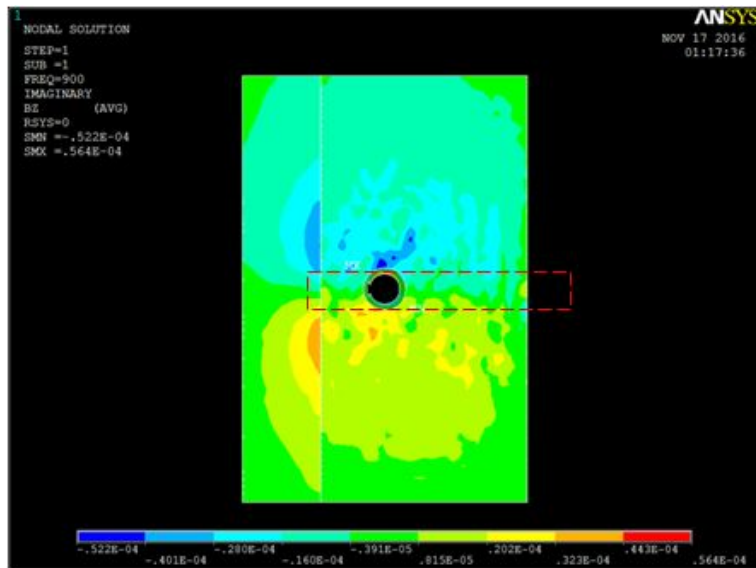


(b)

Fig. 3-9 Simulation result of vertical direction coil (No Crack);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density



(a)



(b)

Fig. 3-10 Simulation result of vertical direction coil (Far-side corrosion);
 (a) distribution of magnetic field (b) induced current density

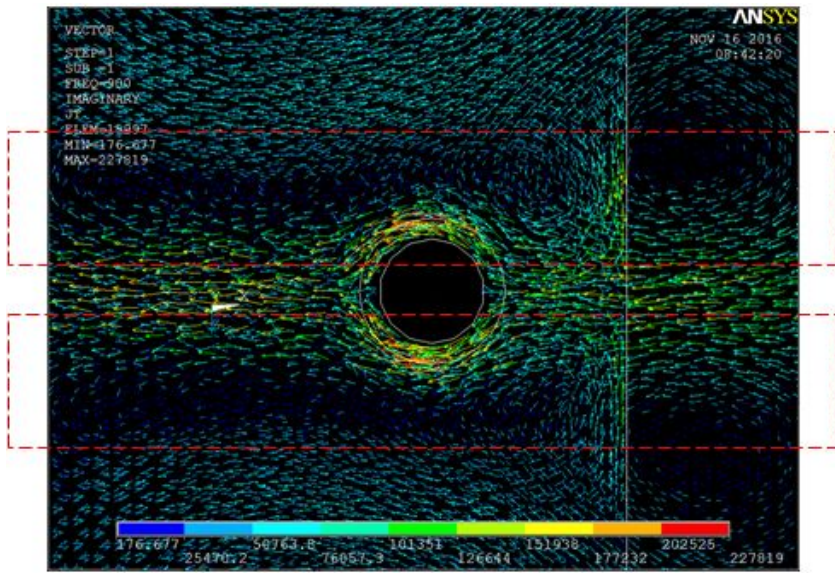
Fig. 3-11 은 이면부식 결함이 존재하지 않는 단차 시험편 상판에서 요크형 전자석의 시뮬레이션 결과이며, 수직방향 코일보다 리벳 홀의 상,하 양단으로 전류밀도가 높게 나타난다. 자기장 또한 단차 경계면까지 균일하게 집중되고 있다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 176.5466 A/m^2 , 최대값 227819 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.233\text{E-}03\text{T}$, 최대값 $0.1245\text{E-}02\text{T}$ 이다.

Fig. 3-12 은 이면부식 결함이 존재하는 단차 시험편 상판에서 요크형 전자석의 시뮬레이션 결과이며, 수직방향 코일보다 리벳 홀의 상,하 양단과 이면 부식 결함에서 전류밀도가 높게 나타난다. 자기장 또한 단차 경계면 까지 균일하게 집중되고 있다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 210.002 A/m^2 , 최대값 257948 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.239\text{E-}03\text{T}$, 최대값 $0.1438\text{E-}02\text{T}$ 이다.

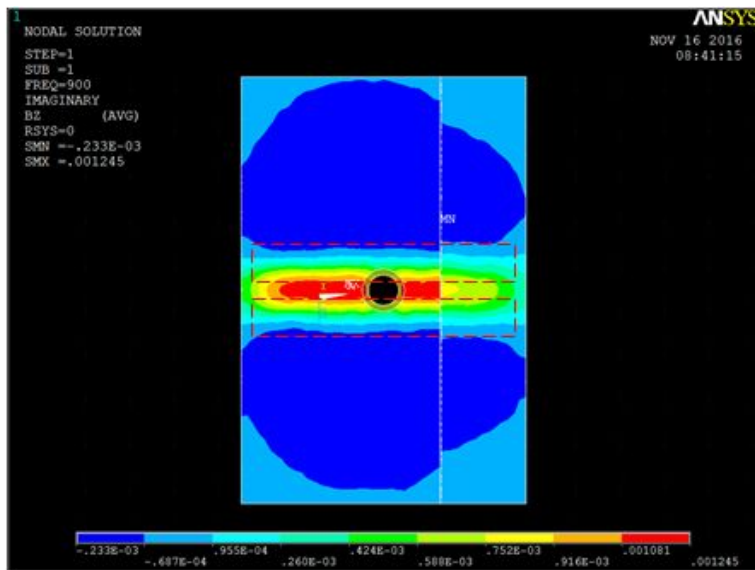
Fig. 3-13 은 이면부식 결함이 존재하지 않는 단차 시험편 하판에서 요크형 전자석의 시뮬레이션 결과이며, 수직방향 코일보다 리벳 홀의 상,하 양단으로 전류밀도가 높게 나타난다. 자기장 또한 균일하게 집중되고 있다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 72.6717 A/m^2 , 최대값 369441 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.276\text{E-}03\text{T}$, 최대값 $0.1247\text{E-}02\text{T}$ 이다.

Fig. 3-14 은 이면부식 결함이 존재하는 단차 시험편 하판에서 요크형 전자석의 시뮬레이션 결과이며, 수직방향 코일보다 리벳 홀의 상,하 양단과 이면 부식 결함에서 전류밀도가 높게 나타난다. 자기장 또한 균일하게 집중되고 있다. (a)는 전류밀도를 나타내며, 최소값 63.9454 A/m^2 , 최대값 370975 A/m^2 이다. (b)는 자속밀도를 나타내며, 최소값 $-0.266\text{E-}03\text{T}$, 최대값 $0.1152\text{E-}02\text{T}$ 이다.

결과적으로, 평판 시험편에서와 마찬가지로 요크형 전자석이 수직방향 코일보다 센서 영역에서 더 균일하고 강한 자기장을 인가할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, 4장 실험 및 고찰에서는 요크형 전자석을 이용한 실험 및 검증을 진행한다.

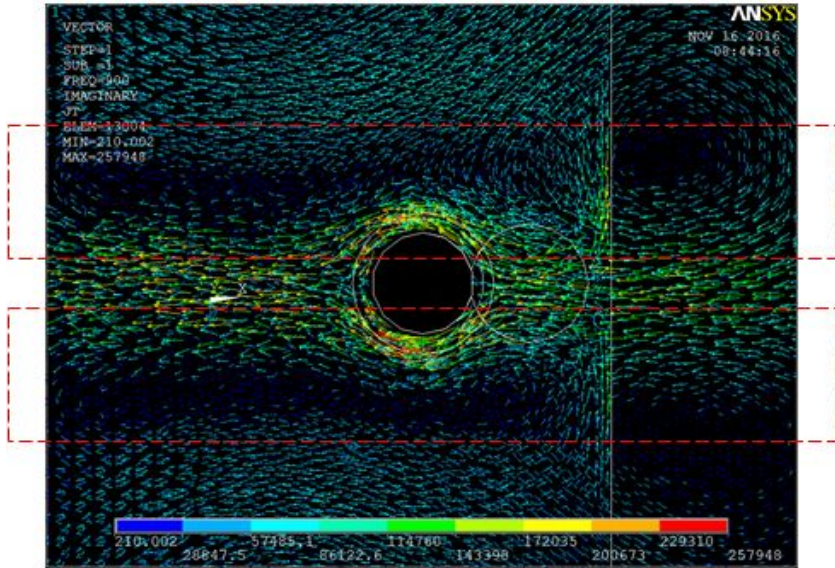


(a)

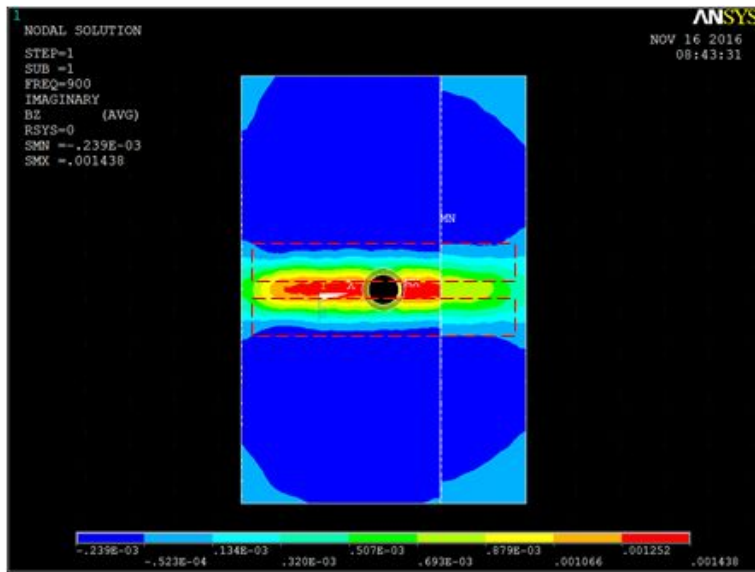


(b)

Fig. 3-11 Simulation result of yoke type electromagnet (No Crack);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density

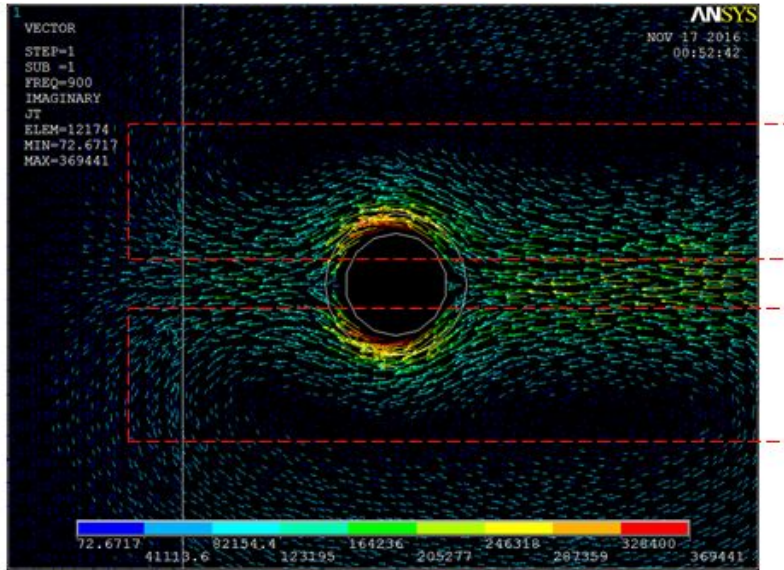


(a)

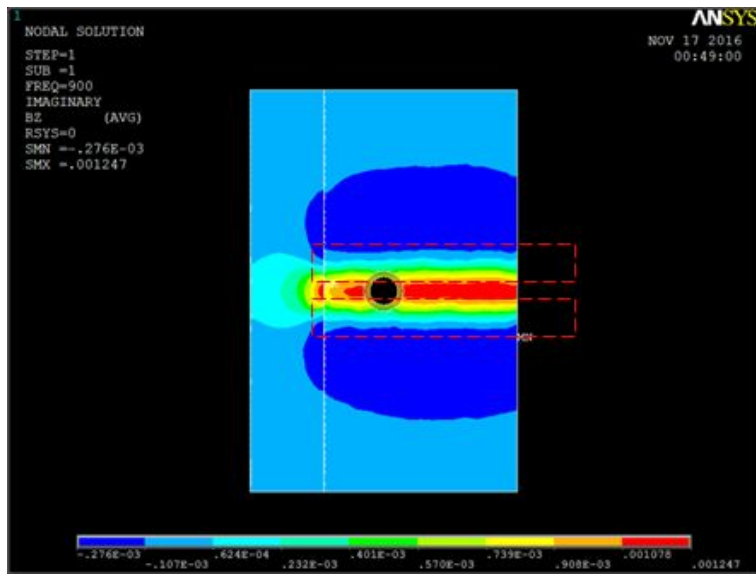


(b)

Fig. 3-12 Simulation result of yoke type electromagnet (Far-side corrosion);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density

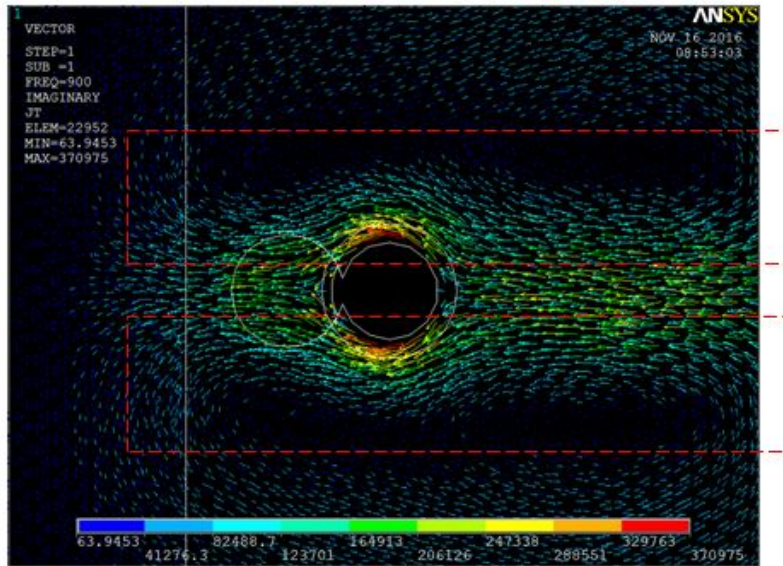


(a)

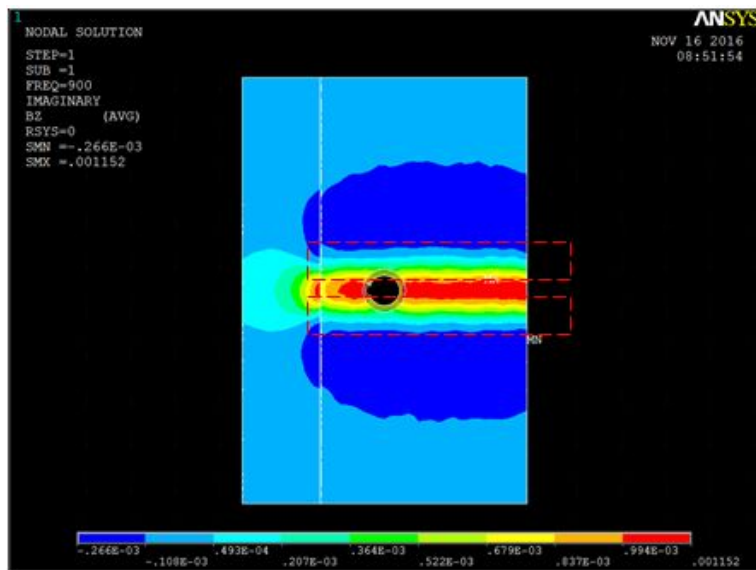


(b)

Fig. 3-13 Simulation result of yoke type electromagnet (No Crack);
 (a) distribution of magnetic field (b) induced current density



(a)



(b)

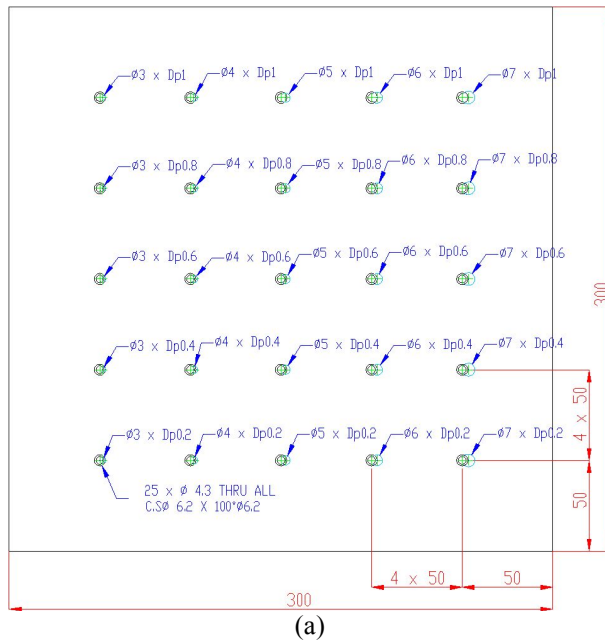
Fig. 3-14 Simulation result of yoke type electromagnet (Far-side corrosion);
(a) distribution of magnetic field (b) induced current density

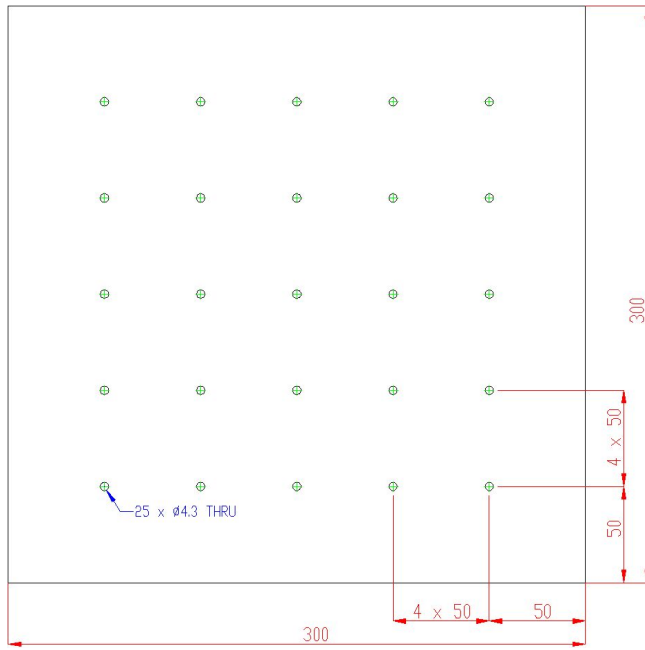
제 4 장 실험 및 고찰

제 1 절 시험편

1. 연속면(평판) 시험편

Fig. 4-1은 연속면(평판)에서의 이면부식을 검사하기 위한 모사 시험편을 나타낸다. 상판(Top sheet), 하판(Bottom sheet) 두 개의 층을 겹친 형태로 구성되어 있으며, 두께는 상판, 하판 각각 1.27mm 이며, 소재는 알루미늄(Al2024, T4)이다. 실제 항공기 다중구조물의 접합에 사용되는 리벳(머리직경 $\varnothing 6\text{mm}$, 몸통직경 $\varnothing 4.3\text{mm}$)과 같은 머리모양의 홀이 상판의 전면에 위치하며, 상판의 이면에는 총 25개의 부식결함을 가공하였다. 부식 결함은 직경 3, 4, 5, 6, 7mm, 결함 깊이 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1mm로 구성되어 있으나, 단차 시험편과의 비교를 위하여 직경 5mm, 깊이 0.4mm, 0.6mm의 이면부식에 대해서만 실험을 진행하였다. 하판에는 상술한 리벳의 몸통과 동일한 직경의 홀을 삽입하였다. 또한 실제 항공기의 다중구조물과 유사한 환경을 만들기 위하여, 현장에서 사용되고 있는 리벳(AN426AD)을 모사 시험편에 체결하였다.

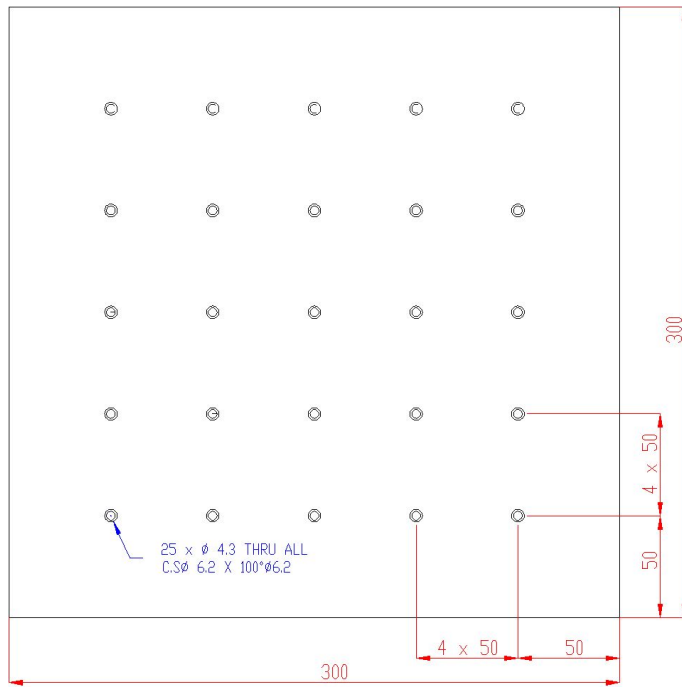




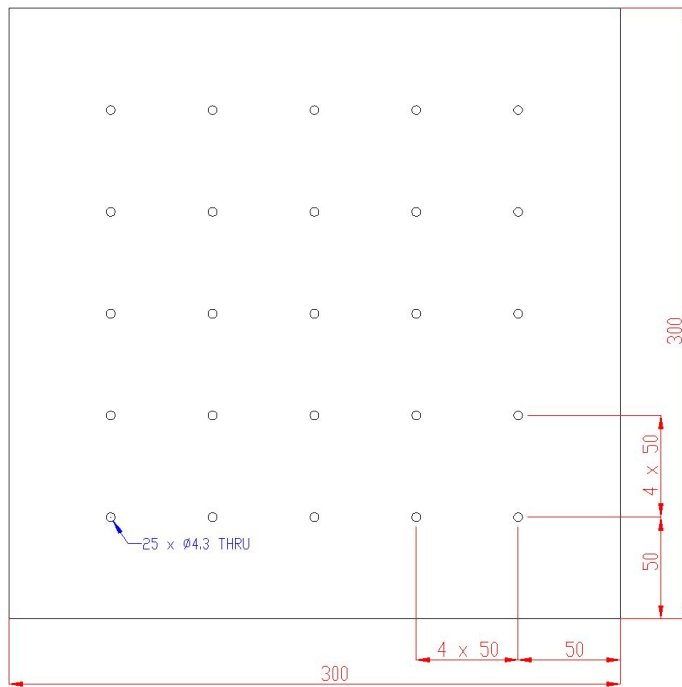
(b)

Fig. 4-1 Sizes of artificial corrosion around rivet fasteners on a specimen; (a) Top sheet (b) Bottom sheet

Fig. 4-2는 연속면(평판)에서의 무결함 시험편을 나타낸다. 전면에는 리벳 머리 모양의 홀이 위치하며, 이면에는 부식 결함이 없게 설계되었다. 이면부식 결함 모사 시험편과 마찬가지로 두개의 층(Top sheet, Bottom sheet)으로 구성되어 있으며, 시험편의 재질, 두께 및 홀 크기 등은 모두 동일하다.



(a)



(b)

Fig. 4-2 No corrosion specimen; (a) Top sheet (b) Bottom sheet

2. 불연속면(단차) 시험편

Fig. 4-3은 불연속면(단차)에서의 이면부식을 검사하기 위한 모사 시험편을 나타낸다. (a)그룹은 상판(Top sheet)에 해당되는 시험편이며, 실제 F-5, F-5E 항공기에서 발생하는 단차부의 상판은 단차의 경계에서 인접한 리벳 중심까지의 최소 거리가 8mm이며, 최대 거리는 12mm이다. 이를 모사하여 단차 경계와 인접한 리벳의 중심까지의 거리를 8mm, 12mm 두 가지의 경우로 제작하였다. 또한, 각각의 거리마다 리벳을 중심으로 단차부에 인접한 방향의 결합, 단차부 반대편의 결합 및 리벳 전방 결합이 존재한다. (b)그룹은 하판(Bottom sheet)에 해당하는 시험편이며, 실제 F-5, F-5E 항공기에서 발생하는 단차부의 하판은 단차의 경계에서 인접한 리벳 중심까지의 최소 거리가 5mm이며, 최대 거리는 9mm이다. 이를 모사하여 상판 시험편과 하판 시험편을 결합 시, 단차 경계와 하판의 인접한 리벳의 중심까지의 거리를 5mm, 9mm 두 가지의 경우로 제작하였다. 각각의 거리마다 가공된 결합의 방향은 상판과 동일하다. 최종적으로 Fig. 4-4에 나타낸 바와 같이 (a)그룹의 시편과 (b)그룹의 시편을 조합함으로써, 리벳 중심과 단차부까지의 다양한 거리에 대한 실험이 가능하다. 시험편 두께는 상판, 하판 각각 1.27mm 이며, 소재는 알루미늄(Aluminium)이다. 실제 항공기 다중구조물의 접합에 사용되는 리벳(AN426AD 머리직경 $\varnothing 6\text{mm}$, 몸통직경 $\varnothing 4.3\text{mm}$)과 같은 머리 모양의 홀이 상판의 전면에 위치하며, 상판의 이면에 존재하는 부식 결합은 Fig 4-3에 나타낸 바와 같이 가운데 세 개의 홀 주변에만 가공하였으며, 나머지 2개의 홀 주변에는 부식 결합이 존재하지 않는다. 부식 결합의 직경은 5mm로 모두 동일하며, 결합 깊이는 0.4, 0.5, 0.6mm로 구성되어있다. 하판에는 상술한 리벳의 몸통과 동일한 직경의 홀을 삽입하였다. 또한, 실제 항공기의 다중구조물과 유사한 환경을 만들기 위해 현재 사용되고 있는 리벳을 모사 시험편에 체결하였다.

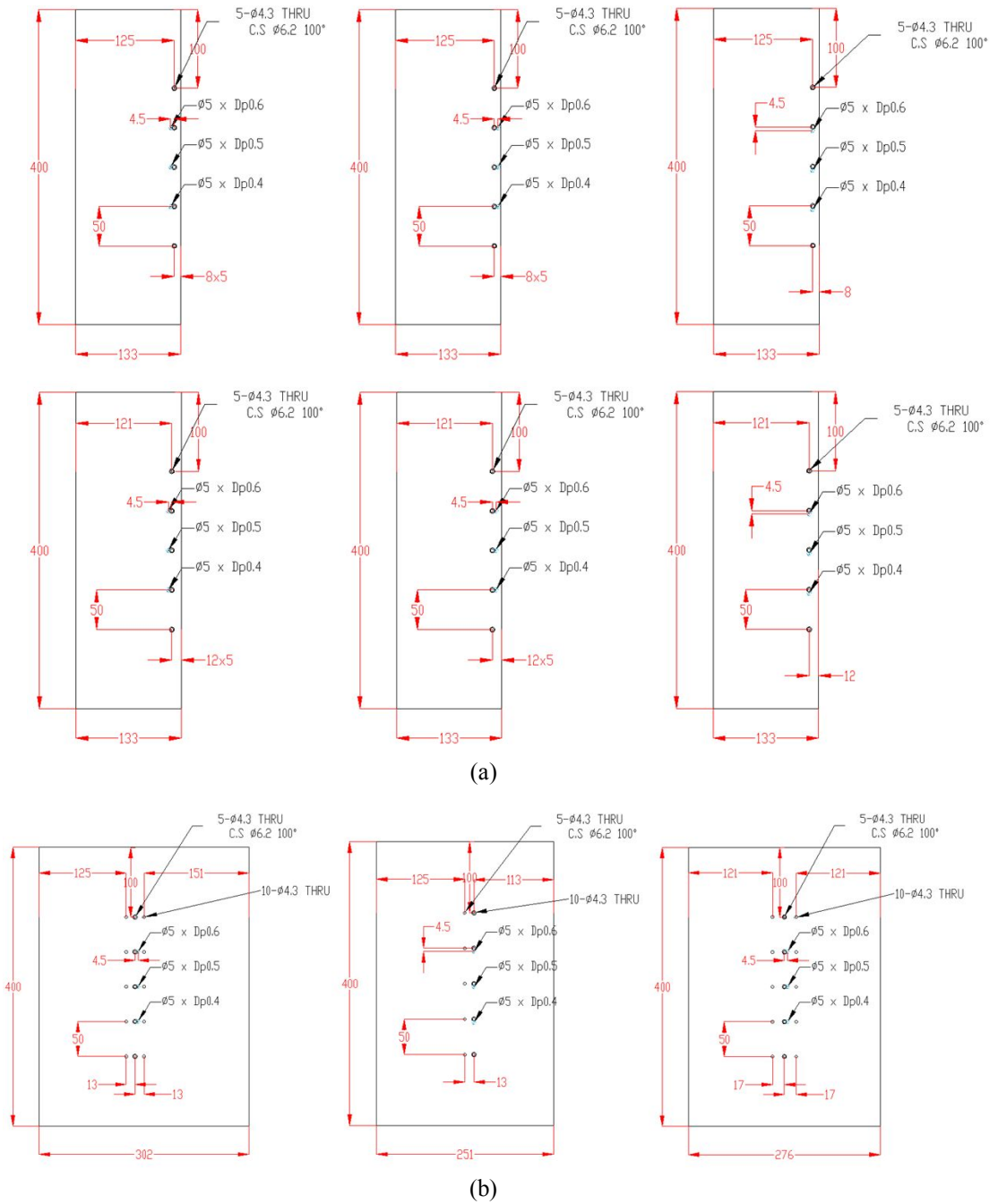
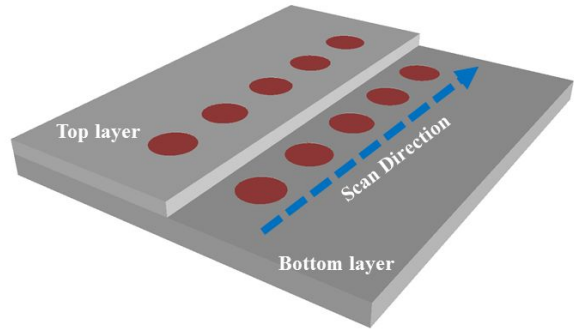
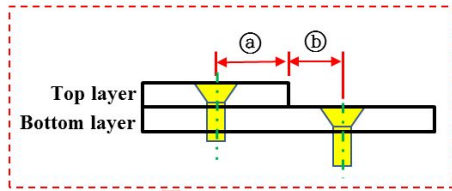


Fig. 4-3 Sizes of artificial corrosion around stepped rivet fasteners on a specimen;
(a) top layer (b) bottom layer



Case	a - b Distance (mm)		Corrosion Depth (mm)											
	a	b	L - side			R - side			F - side			B - side		
Case 1	8	5	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
Case 2	8	9	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
Case 3	12	5	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6



 Rivet
  Corrosion
  Scan Direction

Fig. 4-4 Combined stepped rivet fasteners on a specimen

제 2절 실험 장치

1. 자기카메라 시스템

Fig. 4-5는 자기카메라 시스템의 블록다이어그램을 나타낸다. 전원 공급은 센서 및 신호처리 회로에 직류 안정화 전원을 각각 인가하고, 코일에는 교류 안정화 전원을 인가하였다. RS232C 통신을 이용하여 XYZ stage scanner를 제어하였으며 센서에서 측정된 신호는 필터, 증폭기, A/D변환기를 통하여 컴퓨터에 수집된다.

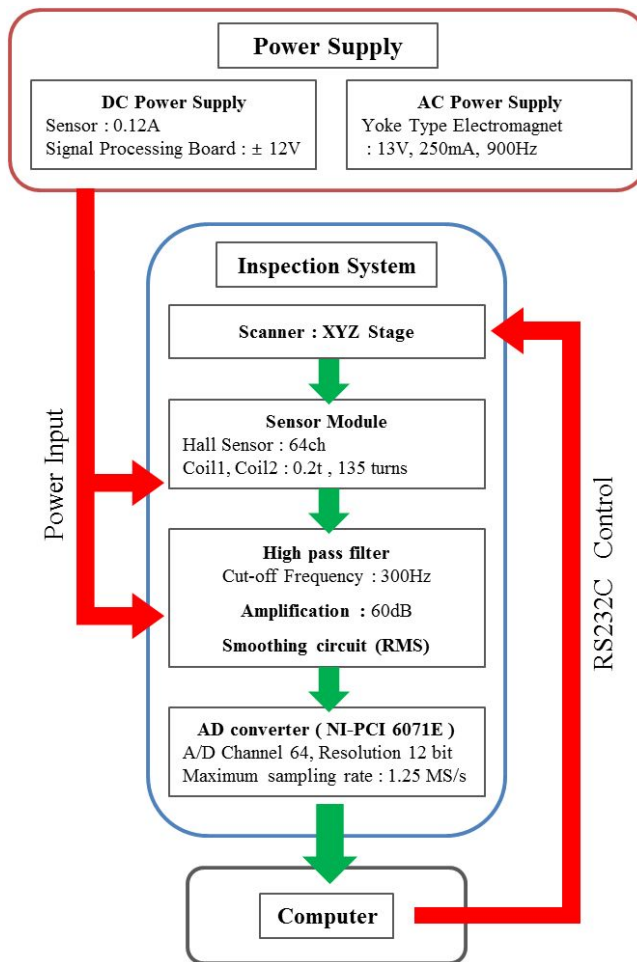
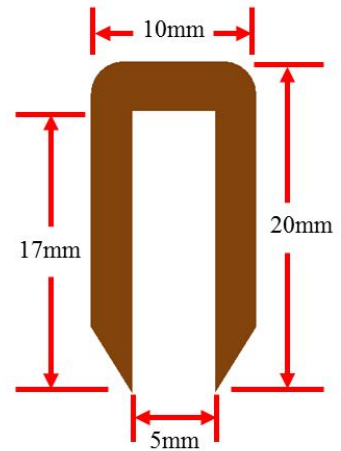
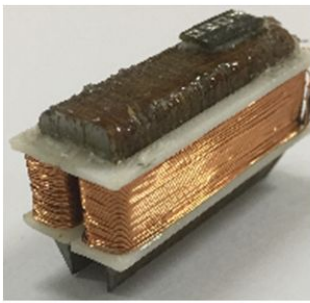
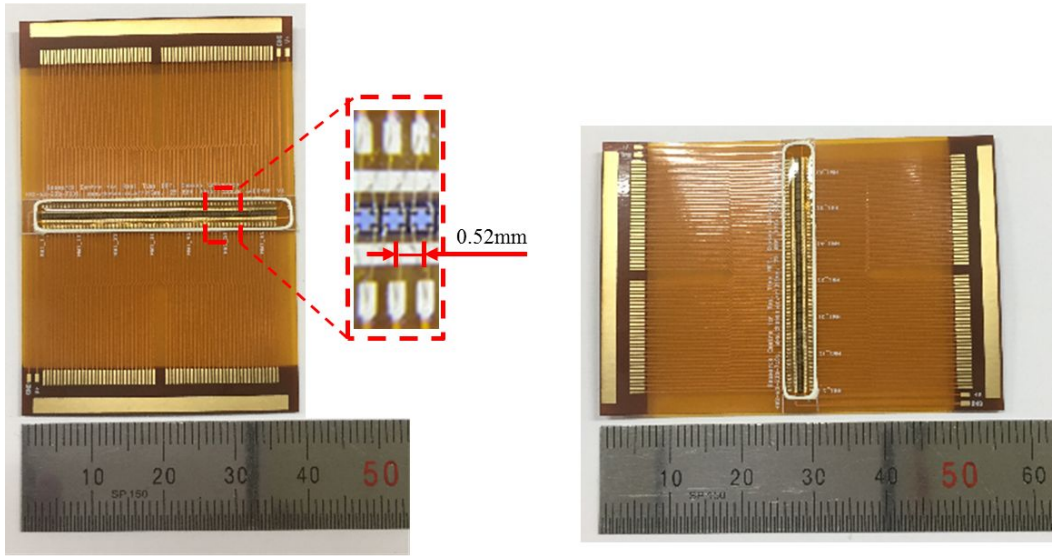


Fig. 4 -5 Block diagram of the magnetic camera system

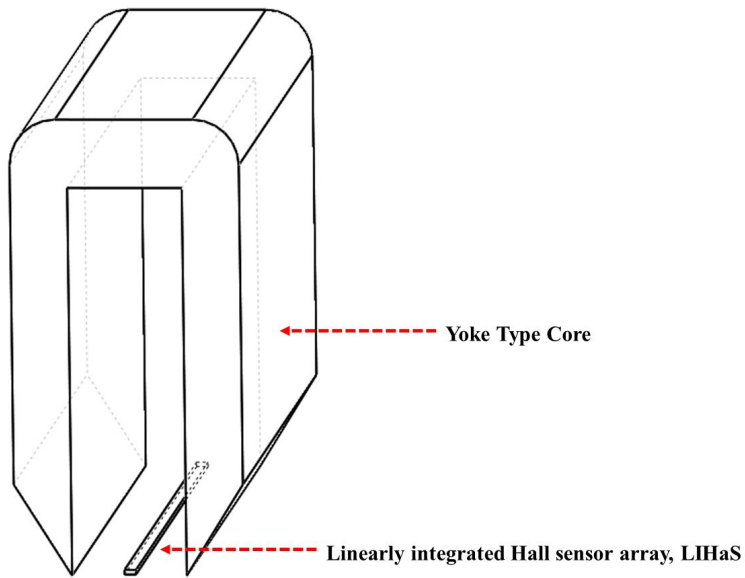
Fig. 4-6은 선형 배열 자기카메라(Linearly integrated Hall sensor array, 이하 LIHaS)의 구성을 나타낸다. (a)는 요크형 전자석을 나타낸다. 시험편에 결함 검출을 위한 유도전류를 인가하기 위하여 두께 0.35mm의 규소강(Silicon steel) 97개를 겹쳐 총 길이 33.95mm, 극간 거리 5mm의 코어를 제작하였다. Fig. 4-6 (a)에 나타낸 바와 같이 코어 양쪽으로 직경 0.2mm의 코일을 각각 135회 권선하였으며 교류안정화전원을 이용하여 900Hz, 13V, 250mA의 교류자원을 인가하였다. Fig. 4-6 (b)는 결함 등의 이유로 왜곡된 자기장을 측정하기 위한 자기센서이다. FPCB(Flexible Print circuit board)에 홀센서를 부착하고 와이어 본딩(wire bonding)으로 신호선을 연결한 후 센서 보호를 위하여 에폭시(Epoxy)로 몰딩(Molding)하였다. 배열 부착된 센서의 간격은 0.52mm이며, 총 64개의 홀센서를 배열하였다[12-14]. 센서 위치는 Fig. 4-6 (c)에 나타낸 바와 같이 코어 양극 사이인 중앙에 위치하였다. 배열된 홀센서의 전원은 직류안정화전원을 사용하여 정전류 방식으로 120mA를 인가하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4-6 Sensor components; (a) Yoke-type core (b) Hall sensor array (c) Display sensor position

Fig. 4-7은 센서 케이스를 3D로 나타내었다. 실제 F-5, F-5E 항공기 공기흡입구에서 발생하는 단차부를 실측하여, 센서부가 최대한 단차면에 밀착하여 검사가 가능하도록 폭 9mm, 높이 4mm의 단차를 센서 케이스 양끝단에 삽입하였다.

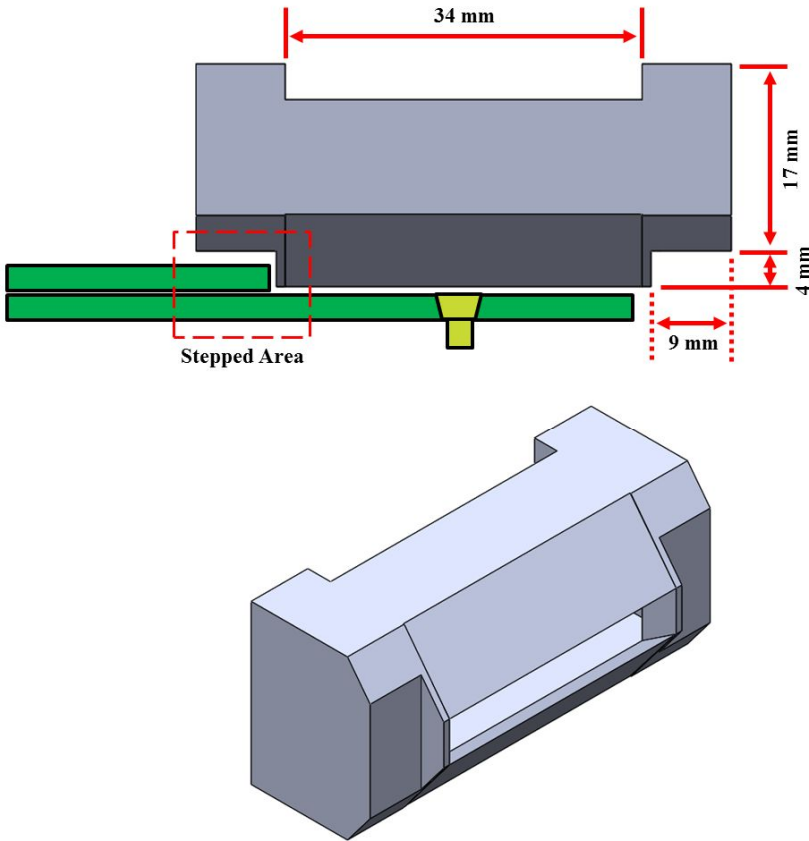
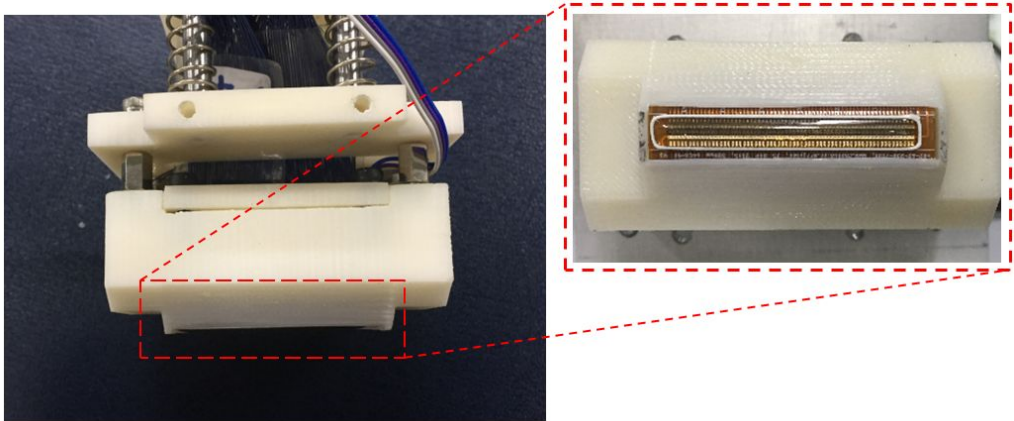
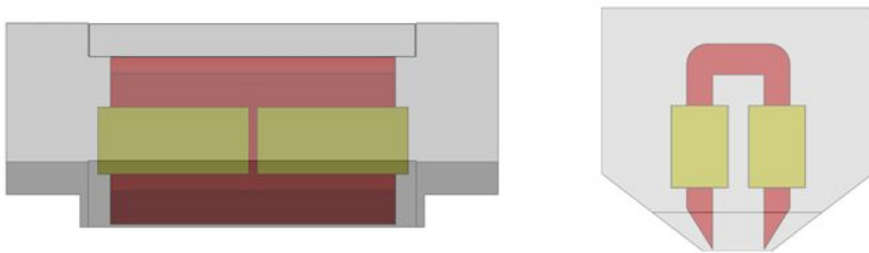


Fig. 4 -7 3D design of sensor case

Fig. 4-8은 최종 결합된 센서 모듈을 나타낸다[14]. (a)는 센서 케이스 안에 코어, 코일, LIHaS를 결합하여 실제 제작된 센서의 사진이다. (b)는 최종 결합된 센서부의 케이스 내부를 3D로 나타내었다. 센서 케이스 내부 중앙에 요크형 전자석이 위치하게 된다. 또한, 케이스 내부를 실리콘으로 몰딩하여, 요크형 전자석과 센서를 케이스 내부에 고정시킬 뿐만 아니라 방수 및 방오와 같은 센서 보호의 역할을 한다.



(a)



(b)

Fig. 4-8 Completed sensor probe; (a) Real picture (b) 3D design

Fig. 4-9는 신호처리 블록다이어그램을 나타낸다. 홀 센서에서 측정된 신호는 바이어스 제거를 위하여 고대역 통과 필터(High Pass Filter, Cut-off Frequency: 300Hz)를 통과하고, 60dB의 증폭을 한 후 평활화 회로를 통하여 직류 신호로 변환하였으며, AD 변환기(PCI-6071, National Instrument)를 사용하여 디지털 신호로 변환하여 PC에 입력하였다[14].

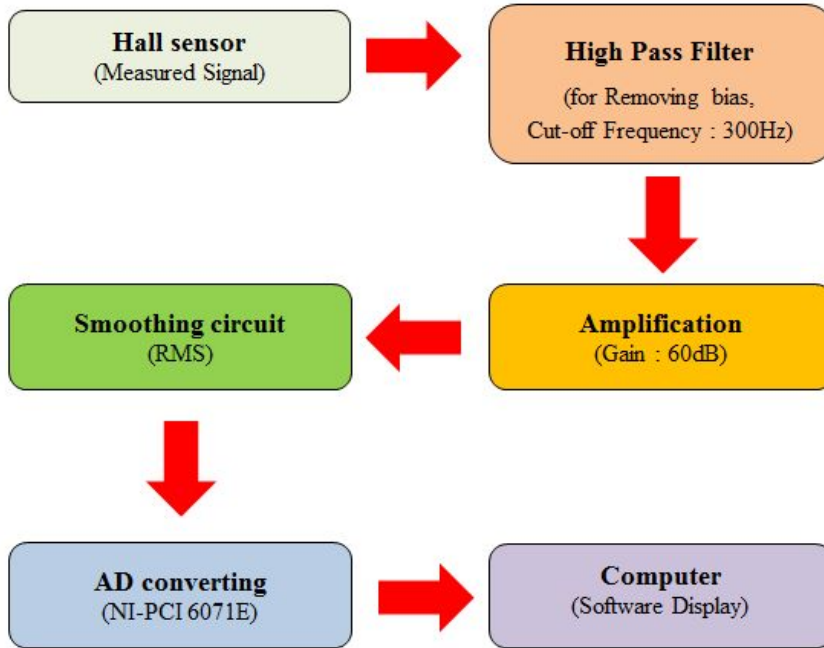


Fig. 4 -9 Block diagram of the signal processing

2. 자동 스캔 시스템

Fig. 4-10은 자동 스캔 시스템을 나타낸다. (1)은 스캐너로 사용된 XYZ 모터라이즈 스테이지(SGSP26-150(XYZ), SIGMAKOKI)이다. (2) 자기카메라 센서 모듈을 나타낸다. (3)은 실험에 사용된 PC와 모니터이다. (4)는 XYZ 모터라이즈 스테이지 스캐너를 제어할 수 있는 컨트롤러를 나타낸다.

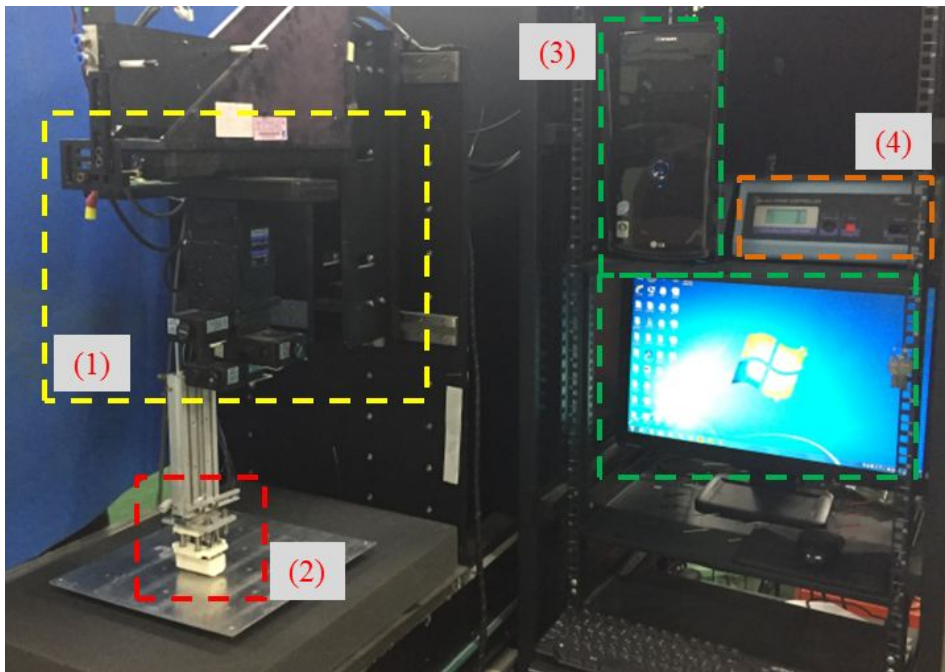


Fig. 4 -10 Auto scan system

Table 4-1 은 상술한 검사 시스템 구성요소에 대한 이름 및 설명을 나타낸다. XY 스테이지 스캐너는 최대 스캔 길이 150mm를 가지며, 최고 속도는 30mm/s 분해능은 2 μ m/pulse를 가지며, 이를 이용하여 정밀한 측정이 가능하다. 자기카메라 센서 모듈은 앞서 설명한 바와 같이 0.52mm 간격으로 선형배열된 64개의 홀(hall)센서, 요크형 전자석 및 케이스를 결합한 모듈이다. PC는 데이터를 저장하고 소프트웨어를 이용한 결과를 출력한다. 스테이지 컨트롤러는 PC와 RS232C 통신을 이용하여 연결되었으며, 사용자가 소프트웨어를 통하여 스테이지를 제어할 수 있다.

Table 4 -1 Components name and description of the inspection system

No.	Components Name	Description
(1)	XYZ Motorized Stage Scanner	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum scan distance : 150mm , • Maximum speed : 30mm/s • Resolution : 2μm/pulse
(2)	Magnetic camera Sensor module	<ul style="list-style-type: none"> • Linear array of 64ch Hall sensor (resolution : 0.52mm) • Youke type electromagnet • Sensor case
(3)	PC and Monitor	<ul style="list-style-type: none"> • Data storage and display of result
(4)	Stage controller	<ul style="list-style-type: none"> • Control the stage with RS232C communication

제 3 절 결합 자동 판별 알고리즘

1. 리벳 중심위치 추정

Fig 4-11은 리벳의 중심위치 추정 알고리즘을 나타내고 있다[15]. 알고리즘을 보면 리벳의 중심좌표를 먼저 검출한다. Fig. 4-12 (a)는 식 (21)과 같이 Y 방향으로 적분한 결과이며, 중심좌표의 추정을 위해 식 (22)와 같이 64개의 센서에서 각각 처음 측정된 데이터를 기준으로, X축 방향으로 미분한 데이터를 이용한다. 미분된 데이터를 Y 방향으로 적분하면 (b)의 그래프와 같이 두 개의 피크(Peak1, Peak2)가 나타나며, Peak1, Peak2를 평균하면 X 방향의 리벳 중심위치(Rx)를 추정할 수 있다 [15]. Y 방향의 중심위치 추정을 위하여, 식 (23) 및 식 (24)과 ΔV_{RMS} , $|\Delta V_{RMS}|$ 을 취득한다. (3)의 Surface 영상은 $|\Delta V_{RMS}|$ 을 나타내며, 식 (25)에 나타낸 바와 같이 최고점(Px,Py)를 추출한다. 추출된 Px, Py중 Y 성분만 선택하여 평균값을 구하면 Y 방향의 중심위치 Ry를 알 수 있다[15]. 이상의 원리를 이용하여 이면 부식 결합의 유무 및 방향을 판별하기 위한 리벳 중심 위치 추정이 가능하다.

$$f(i) = \sum_{j=0}^{63} V_{RMS}(i, j) \quad i = 0 \sim 2N + 1 \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 V_B = f^b(i) &= f(i) - f(0) \\
 &= \sum_{j=0}^{63} (V_{RMS}(i, j) - V_{RMS}(0, j))
 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta V_{RMS} &= V_{RMS}(i + 1, j) - V_{RMS}(i, j) \quad i = 0 \sim 2N + 1 \\
 &\quad j = 0 \sim 63
 \end{aligned} \quad (23)$$

$$h(i, j) = |\Delta V_{RMS}| \quad (24)$$

$$P(Px, Py) = \text{Max}(h)|_{P \text{ max points}} \quad (25)$$

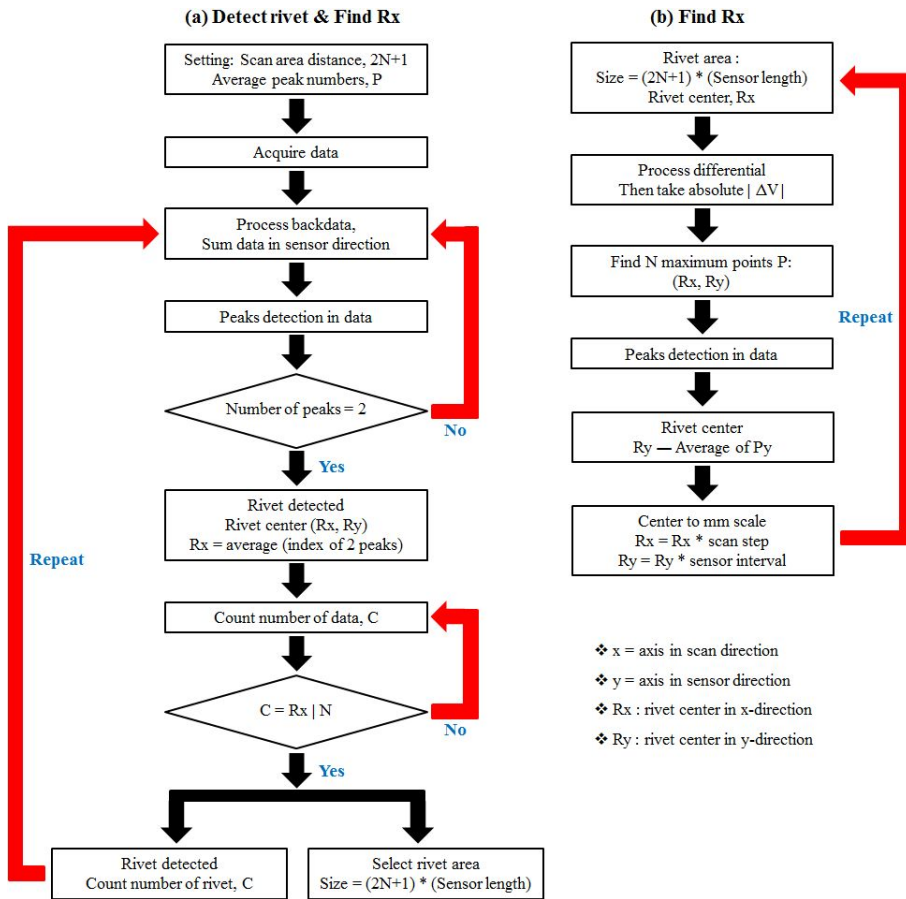


Fig. 4-11 Rivet center position estimation algorithm for (a) find Rx (b) find Ry

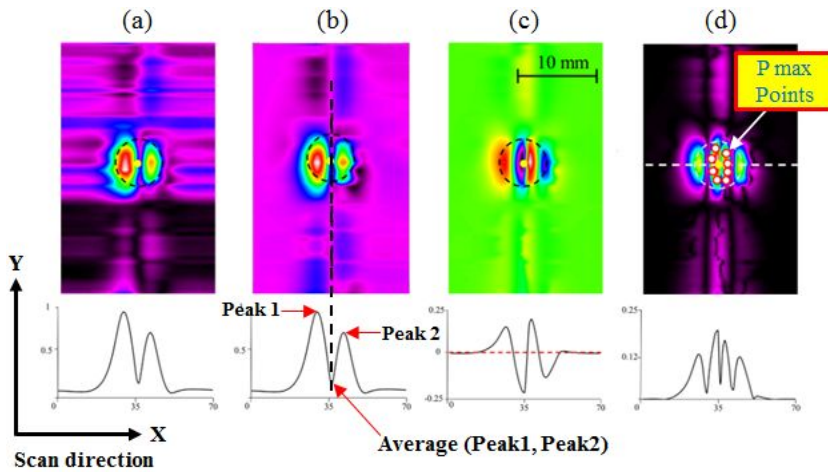


Fig. 4-12 Estimation process of rivet center position: (a) V_{RMS} (b) V_B (c) ΔV_{RMS} (d) $|\Delta V_{RMS}|$

2. 이면 부식 자동 판별

Fig. 4-13은 스캔 방향에서 리벳의 중심을 기준으로 전방(Forward) 및 후방(Backward)에 대한 이면 부식 결함의 유무 및 위치를 판별하는 알고리즘을 나타낸다[15]. 먼저, 리벳 영역에서 최고점(P)를 순차적으로 선택한다. 선택된 P(P_x, P_y)의 X 성분 값이 R_x (리벳 중심 위치 추정값)보다 큰 경우 Forward 그룹으로 작은 경우에는 Backward 그룹으로 분류한다. 분류하여 얻어진 Forward 그룹의 개수를 C_F , Backward 그룹의 개수를 C_B 라 한다. P를 $2C_B, 2C_F$ 로 나누어 개수비 PR_F, PR_B 를 구한다. 후방 및 전방을 구분하기 위해 개수비 PR_B 에 '-' 를 삽입하였다. 개수비가 설정한 임계값보다 클 경우 결함으로 판단, 임계값보다 작을 경우 무결함으로 판단한다. 본 연구에서는 P의 개수를 120개로 설정하였다. Fig. 4-14의 (a)는 무결함, (b)는 Backward 방향 부식 결함, (c)는 Forward 방향 부식 결함을 나타낸다. 부식 결함이 있는 영역에서는 부식 결함이 없는 영역보다 신호의 강도가 작게 측정된다[15]. 따라서, 부식 결함이 있는 영역에서의 최고점의 개수는 부식결함이 없는 영역보다 더 적게 측정되므로, 서술한 알고리즘에 의하여 결함 판별이 가능하다.

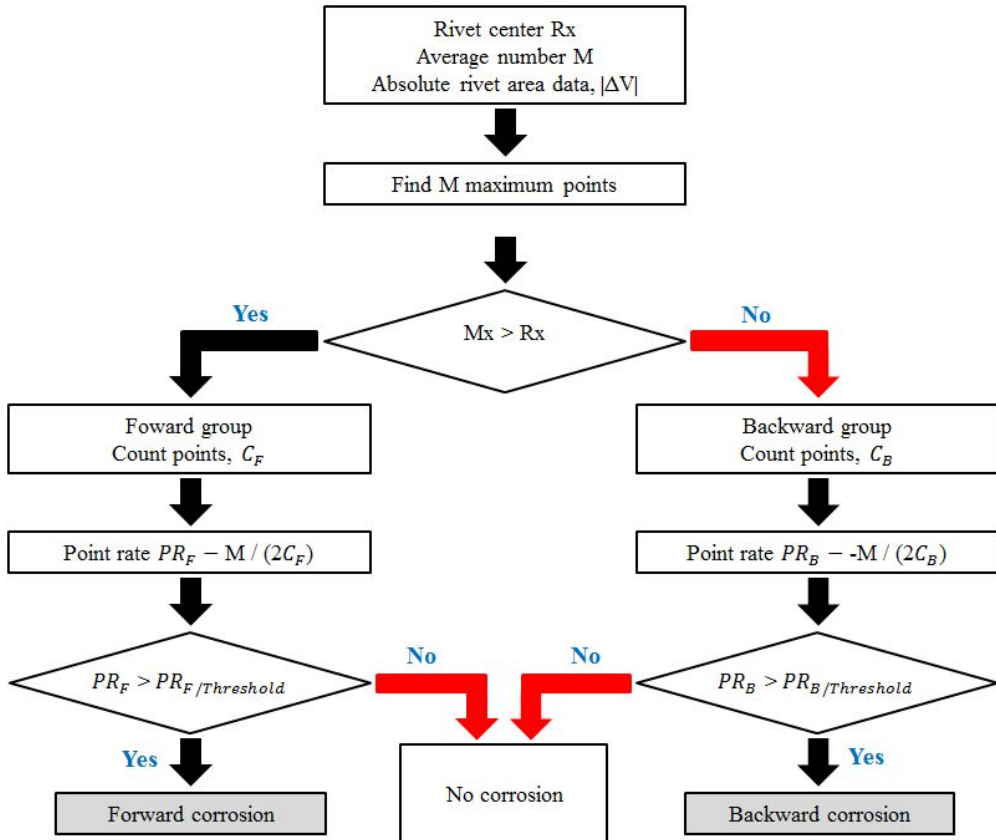


Fig. 4 -13 Far-side backward and forward corrosion detection algorithm

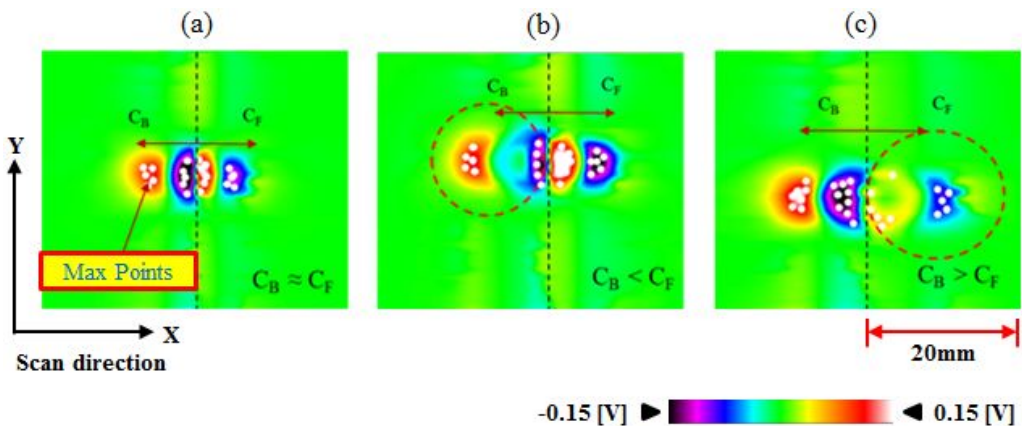


Fig. 4 -14 Sample of scan image for: (a) no crack (b) backward corrosion (c) forward corrosion

Fig. 4-15는 스캔 방향에서 리벳을 중심을 기준으로 우측(Right) 및 좌측(Left)에 대한 이면 부식 결함의 유무 및 위치를 판별하는 알고리즘을 나타낸다[15]. 먼저, 리벳 영역에서 최대값(Max)을 선출하고 임계 값(C_{th})을 곱하여 선택된 리벳 영역 내에서의 기준으로 정한다. 본 연구에서 설정한 임계 값은 25%이다. 선택된 영역 내에서 기준으로 정한 값 이상의 $|\Delta V_{RMS}(i, j)|$ 를 추출하고, 카운트(C)한다. 다음으로 R_y (리벳 중심위치 추정값)와 j 를 비교하여 j 가 R_y 보다 크면 Left 그룹, 작으면 Right 그룹으로 분류한다. Left 그룹 영역 및 Right 그룹 영역에서 선택된 인덱스의 Y 성분의 j 와 R_y 의 차를 합한 후, 카운트된 값으로 나눈다. 값은 길이의 평균이 되며 각각 L_L, L_R 이다. L_L 과 L_R 의 절대값을 취하고 서로 비교한다. $|L_L|$ 이 $|L_R|$ 보다 큰 경우는 $|L_L|$ 과 $|L_R|$ 을 더하여 L_L 에 대입한다. $|L_R|$ 이 $|L_L|$ 보다 큰 경우는 $|L_L|$ 과 $|L_R|$ 을 더하여 L_R 에 대입한 후, 방향을 나타내기 위한 '-' 부호를 삽입하였다. 최종 선택된 영역에서의 임계 값($L_L / threshold, L_R / threshold$)과 비교를 하여 부식 결함의 유무 및 위치를 판별한다. Fig. 4-16의 (a)는 무결함, (b)는 Left 방향 부식 결함, (c)는 Right 방향 부식 결함을 나타낸다[15]. 무결함인 경우에는 길이의 평균 L_L 과 L_R 이 유사하게 나타난다. Fig. 4-16 (b), (c)는 결함이 존재하는 경우이며, 결함 방향으로 신호가 넓게 퍼지는 현상이 관찰되므로 결함 방향으로 길이의 평균이 더 크게 나타난다[15]. 따라서, 서술한 판정 알고리즘에 의하여 결함 판별이 가능하다.

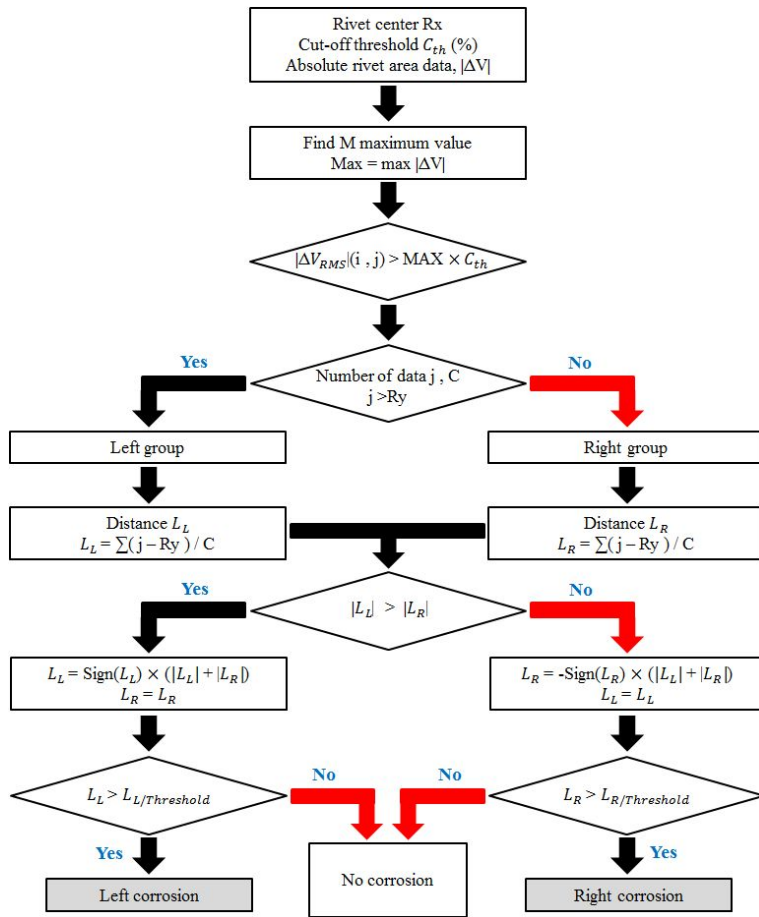


Fig. 4-15 Far-side backward and forward corrosion detection algorithm

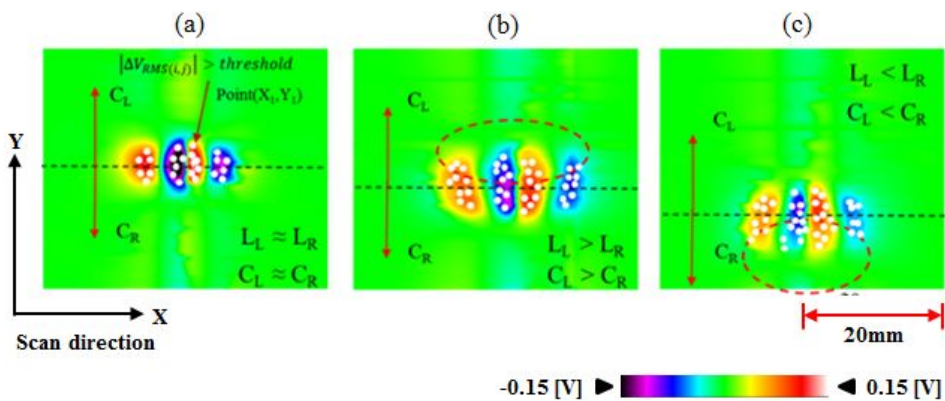


Fig. 4-16 Sample of scan images for (a) no crack (b) left corrosion crack (c) right corrosion crack

제 4절 실험 및 고찰

Fig. 17 ~18은 연속면(평판) 시험편에서의 실험결과를 나타내며, 스캔 방향으로 홀 전압의 ΔV_{RMS} 분포를 나타낸다. 스캔 간격은 0.56mm, 리프트 오프(Lift-off)는 0.5mm이며, Color scale의 최소값은 -0.1V, 최대값은 0.1V로 표현하였다. Fig. 4-17은 결함이 존재할 경우의 데이터와의 차이를 구분하기 위한 무결함 데이터이다. Fig. 4-18은 이면 부식 결함이 존재하는 경우의 실험 결과이다. (a)는 스캔 방향을 기준으로 리벳 후방(Backward)에 이면 부식 결함을 모사한 실험 결과이다. (b)는 스캔 방향을 기준으로 리벳 전방(Forward)에 이면 부식 결함을 모사한 실험 결과이다. (c)는 스캔 방향을 기준으로 리벳 좌측(Left)에 이면 부식 결함을 모사한 실험 결과이다. (d)는 스캔 방향을 기준으로 리벳 우측(Right)에 이면 부식 결함을 모사한 실험 결과이다. 리벳 주변에 발생한 ΔV_{RMS} 분포의 네 개 그룹의 상대적인 위치가 변화가 관찰된다. 부식결함이 스캔 방향의 좌측 및 우측에 위치할 때에는 해당 그룹이 동일한 방향으로 연장 또는 이동한다. 또한, 스캔 방향의 전방 또는 후방에 존재할 때에는 신호가 전후방으로 약해지는 것을 볼 수 있으며, Fig. 4-19에 나타낸 이면 부식 자동 판별 알고리즘에 의한 결과 영상을 통하여 결함 판별이 가능하다.

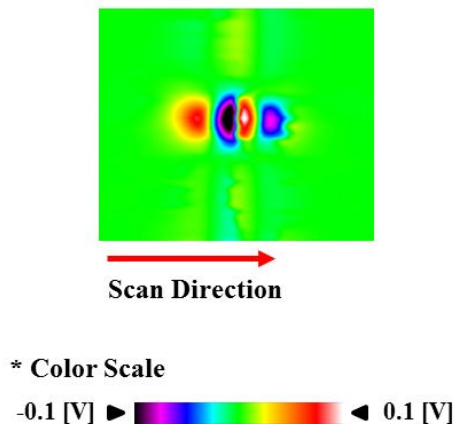


Fig. 4-17 Images of No corrosion

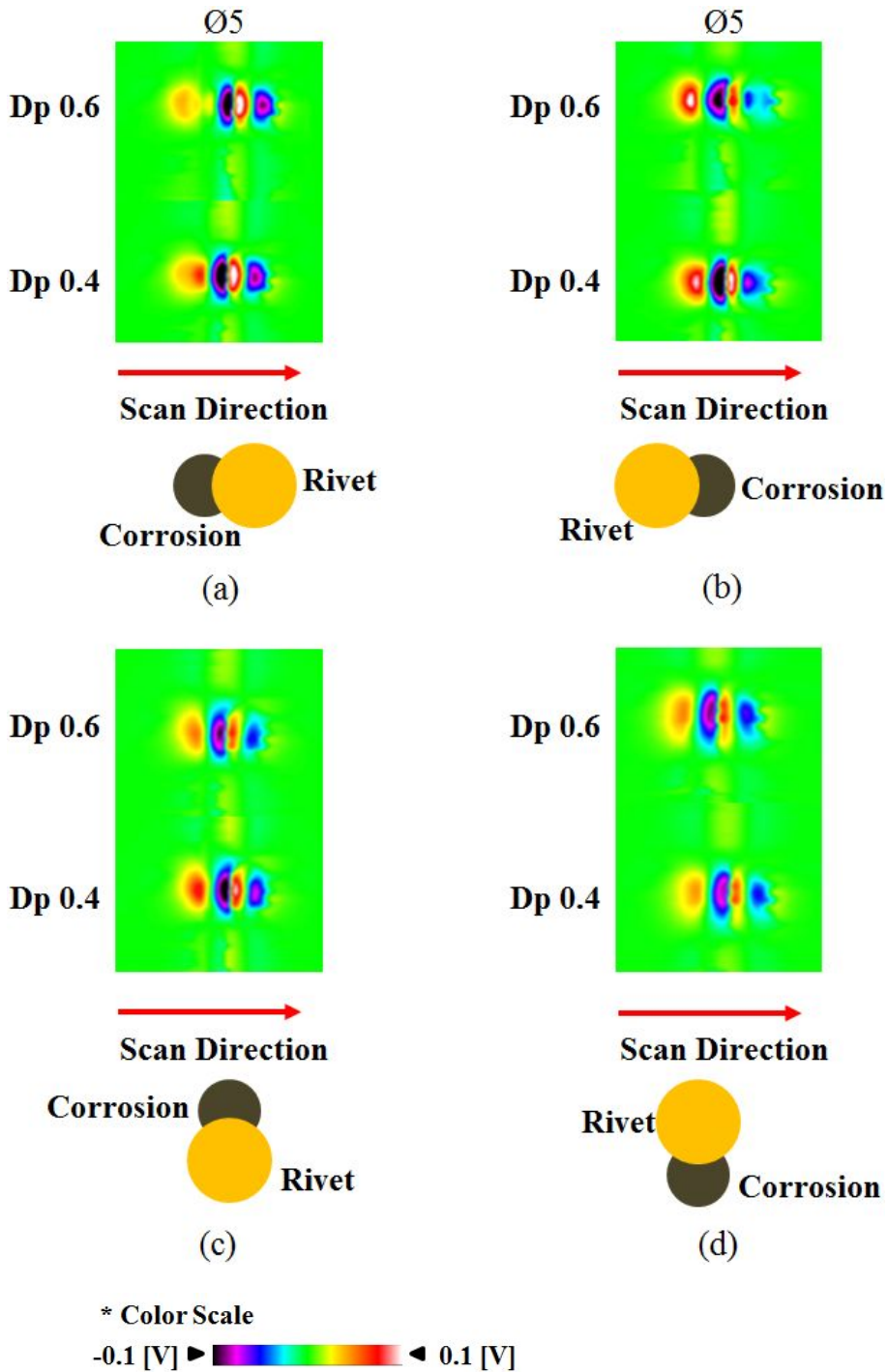


Fig. 4 -18 Images of a rivet with four direction corrosion (flat)

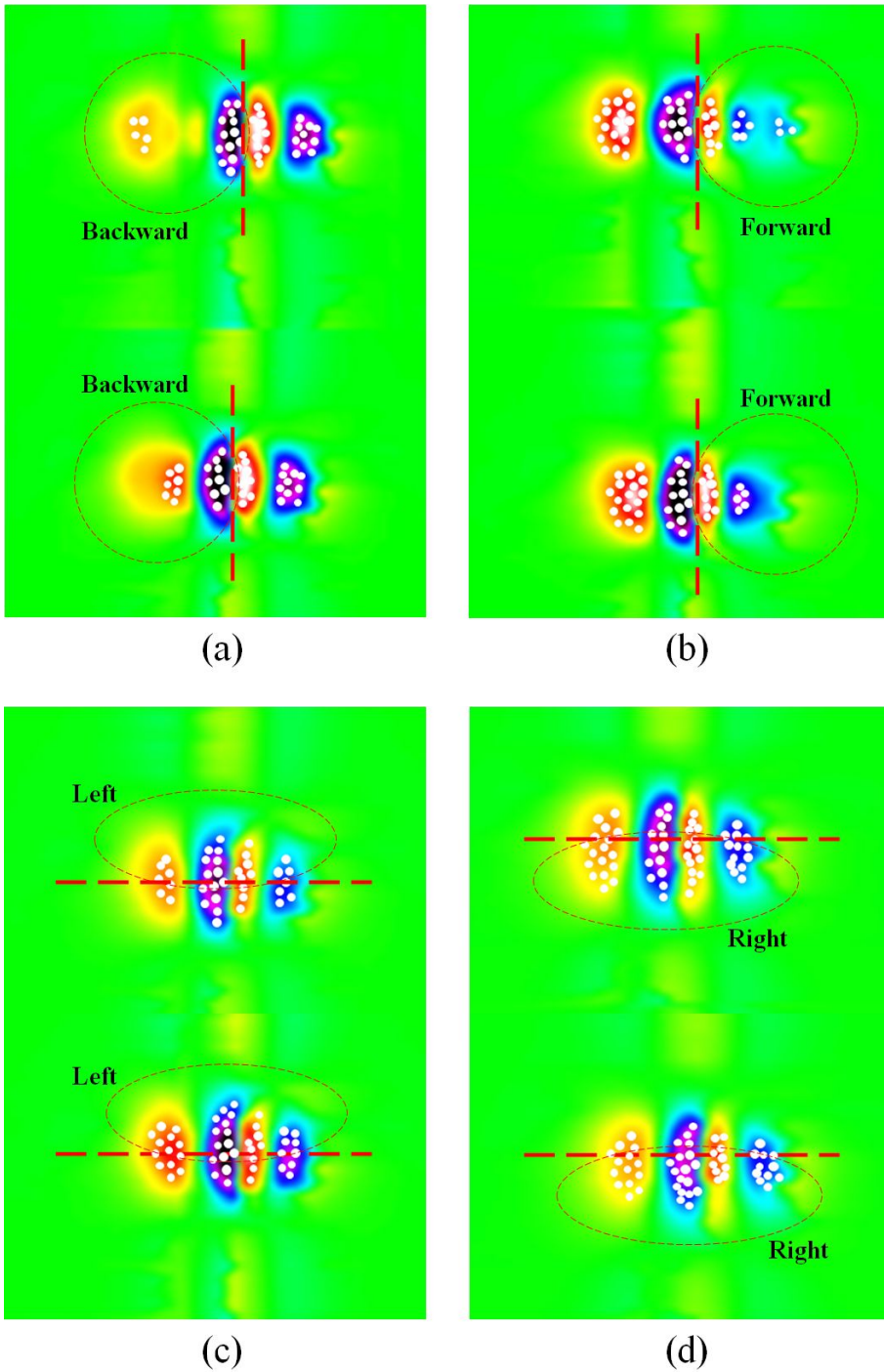
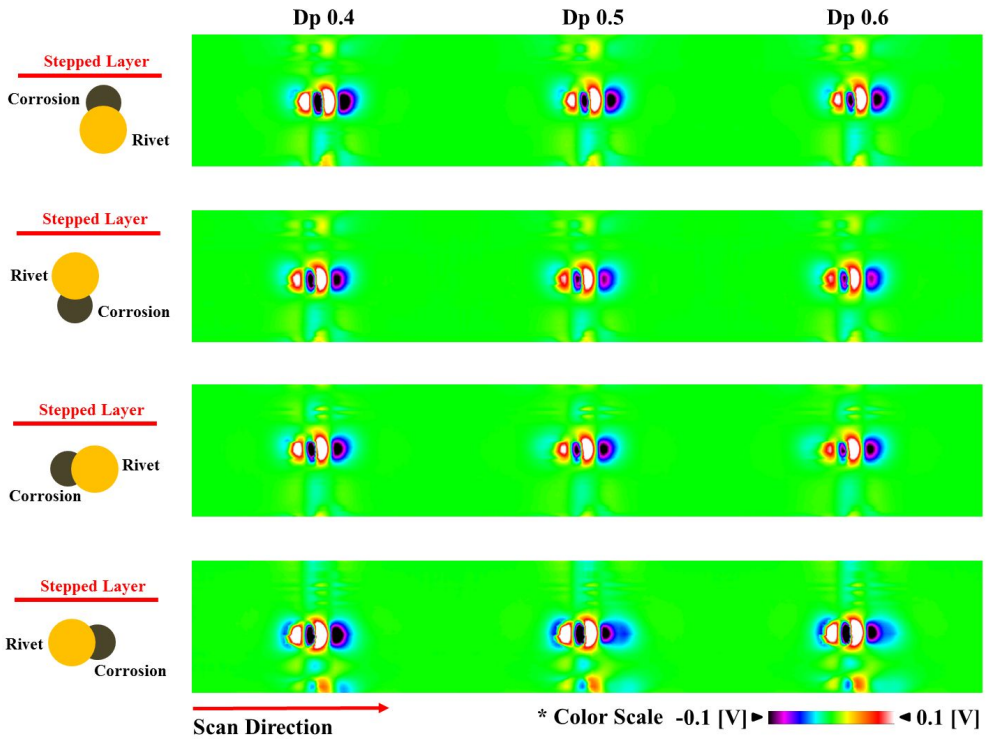
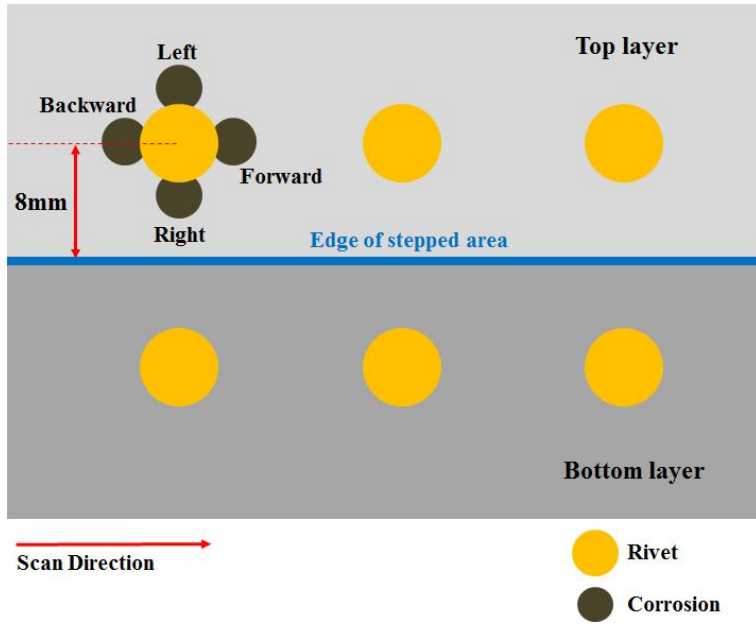
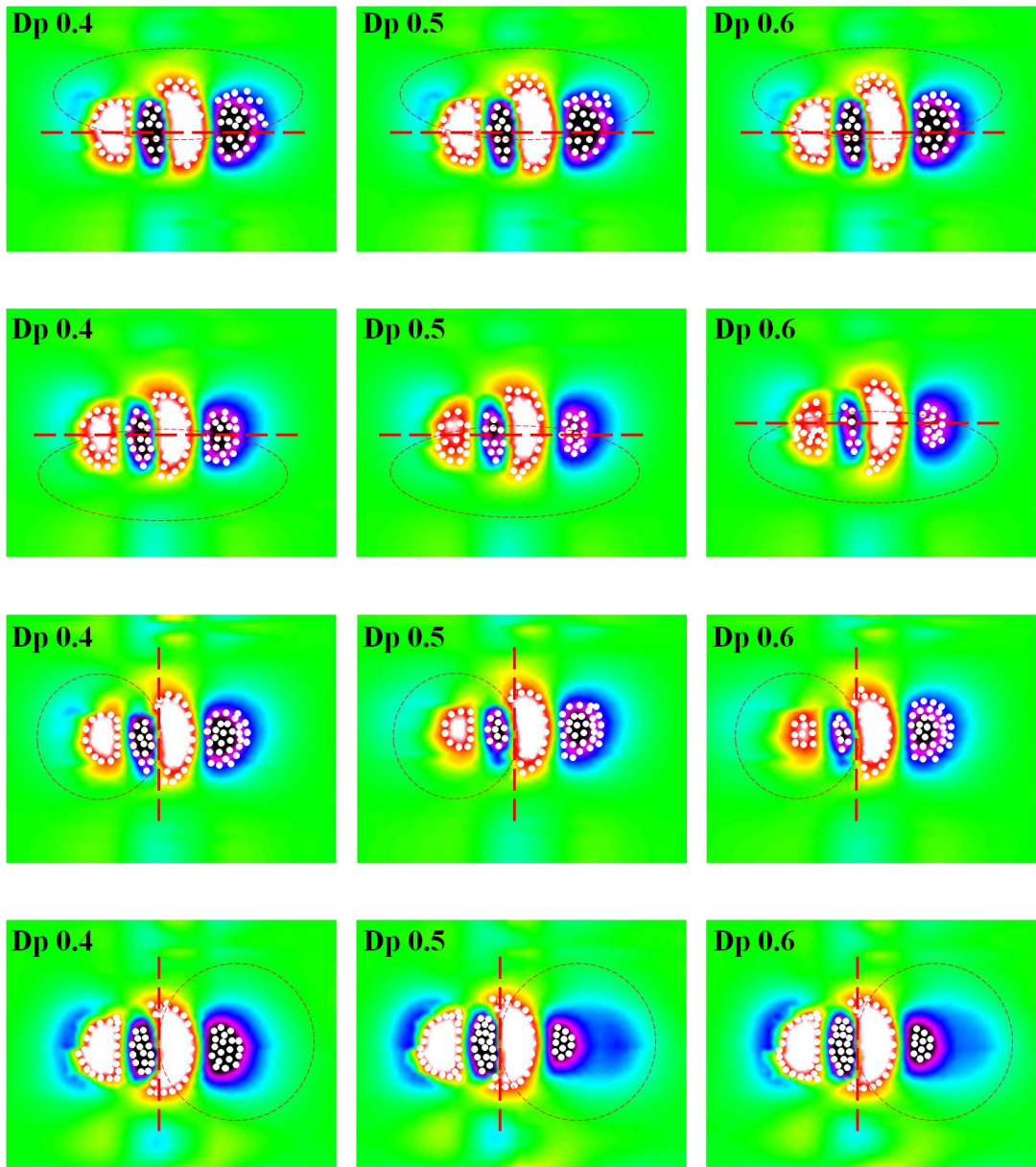


Fig. 4 -19 Application result of corrosion detection algorithm (flat specimen)

Fig. 18 ~23는 불면속면(단차) 시험편에서의 실험결과를 나타내며, 스캔 방향으로 홀 전압의 ΔV_{RMS} 분포를 나타낸다. 1절에서 설명한 바와 같이, 실제 F-5, F-5E 항공기에서 발생하는 단차부는 상판은 단차의 경계에서 인접한 리벳 중심까지의 최소 거리가 8mm이며, 최대 거리는 12mm이다. 하판의 경우 최소 거리가 5mm이며, 최대 거리는 9mm이다. Fig. 4-20은 단차 상판에 대한 실험 결과이며, 단차 경계면과 인접한 리벳의 중심까지의 거리는 최소 거리인 8mm이다. Fig. 4-21은 단차 상판에 대한 실험 결과이며, 단차 경계면과 인접한 리벳의 중심까지의 거리는 최대 거리인 12mm이다. 하판 시험편의 좌, 우측 결함을 모사한 경우 하판의 가운데 리벳 홀을 기준으로 상판이 좌측 또는 우측으로 결합될 수 있게 제작하였으므로, 실험 결과 영상에서 결합하지 않은 반대쪽 리벳 홀이 같이 출력되므로, 이해를 용이하게 하기 위하여, 하판 실험 결과의 경우 전, 후방 결합과 좌, 우측 결합에 대한 결과를 따로 표시하였다. Fig. 4-22 ~23은 단차 하판에 대한 실험 결과이며, 단차 경계면과 인접한 리벳의 중심까지의 거리는 최소 거리인 5mm이다. Fig. 4-22는 리벳의 전, 후방에 이면 부식 결합이 존재하며, Fig. 4-23은 리벳의 좌, 우측에 이면 부식 결합이 존재한다. Fig. 4-24 ~25는 단차 경계면과 인접한 리벳의 중심까지의 최대 거리인 9mm이며, 다른 조건은 이전 하판데이터의 조건과 동일하다. 단차영역에 대한 모든 데이터의 공통적인 실험 조건으로는 스캔 거리 150mm, 스캔 간격 0.56mm, 리프트 오프 (Lift-off)는 0.5mm이다. Color scale은 동일하다. 결합의 직경은 5mm로 모두 동일하며, 결합의 깊이는 스캔 방향을 기준으로 0.4, 0.5, 0.6mm 순서이다. 검사결과 단차 상단부 검사의 경우 모든 경우의 결합 검출이 가능하다. 하단부 검사의 경우 단차 경계부에서 리벳 중심까지의 거리가 9mm인 경우 결합 위치에 상관없이 검출이 가능하였으나, 단차 경계부에서 리벳 중심까지의 거리가 5mm인 경우 Fig 4-23 스캔 가능 영역 표시에 나타난 바와 같이 Left 방향의 결합은 센서 스캔 가능 영역에서 벗어나 있으므로 검출이 곤란하였다. 그 외 Right, Forward, Backward 방향의 경우 직경 5mm, 깊이 0.4 ~ 0.6mm인 이면 부식 결합을 검출할 수 있으며, 단차부 모든 실험 결과 영상의 (a)는 자동 판별 알고리즘 적용 전, (b)는 적용 후를 나타낸다.

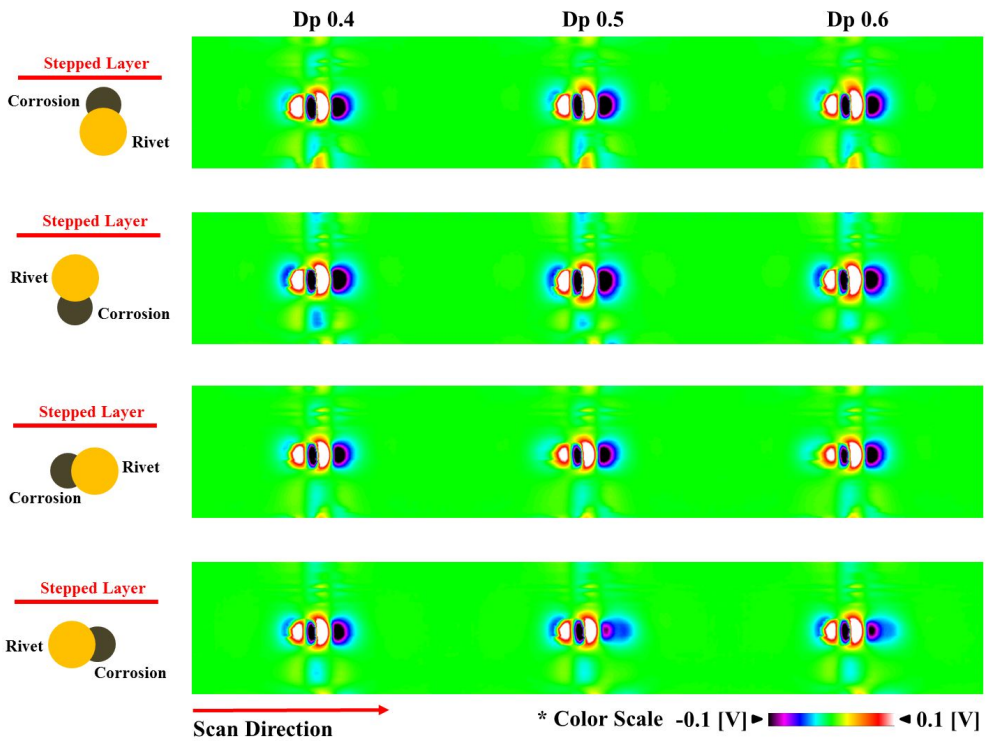
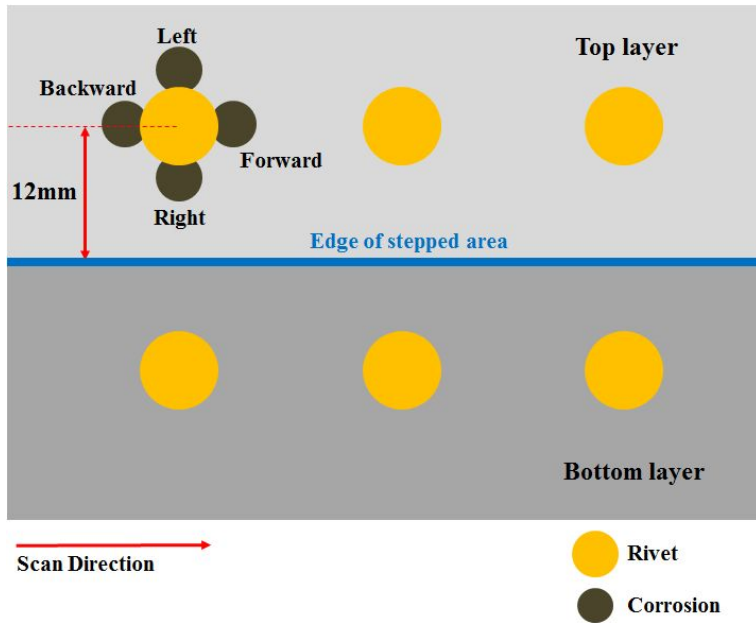


(a)

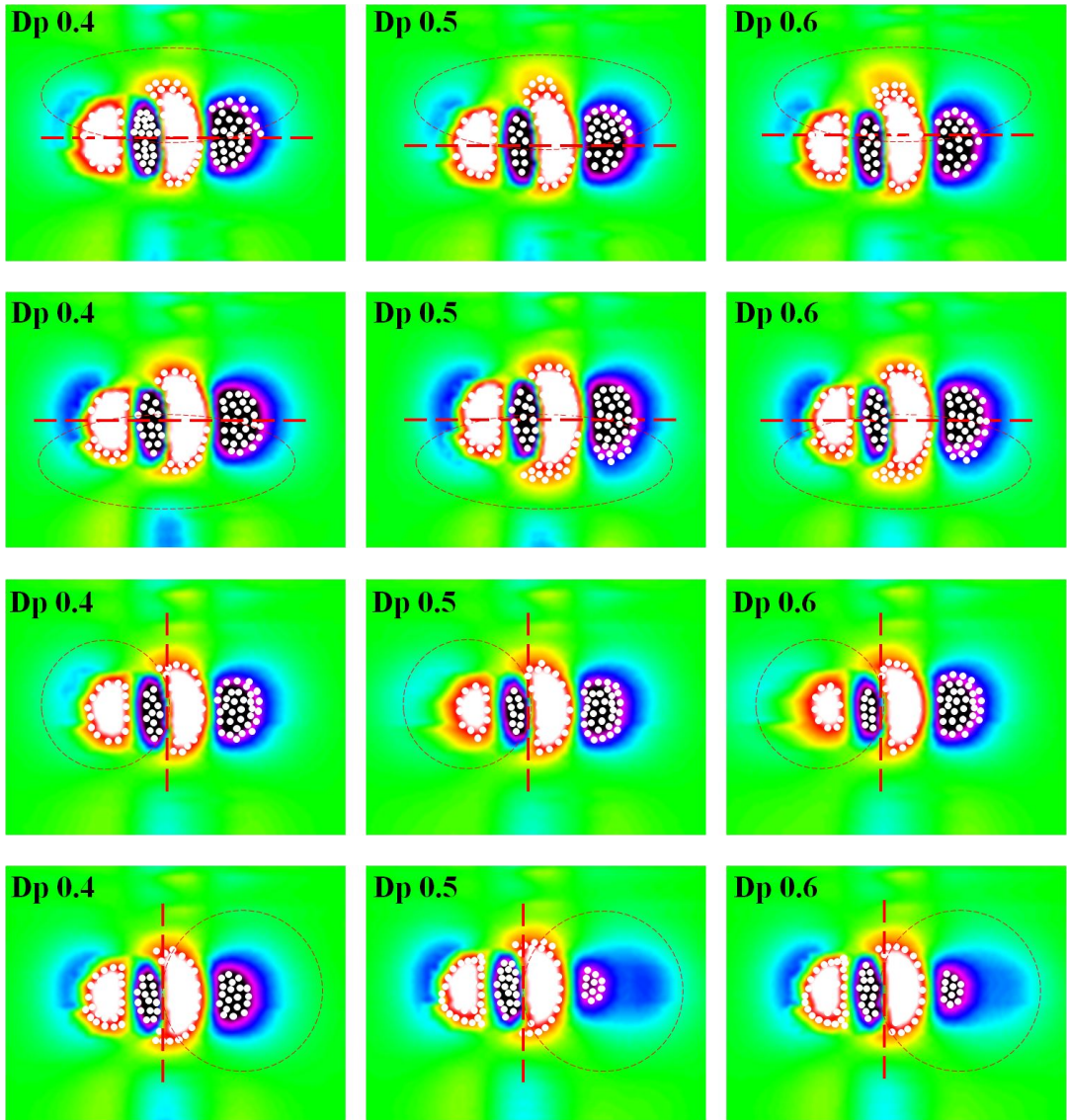


(b)

Fig. 4 -20 Images of a rivet with four direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm

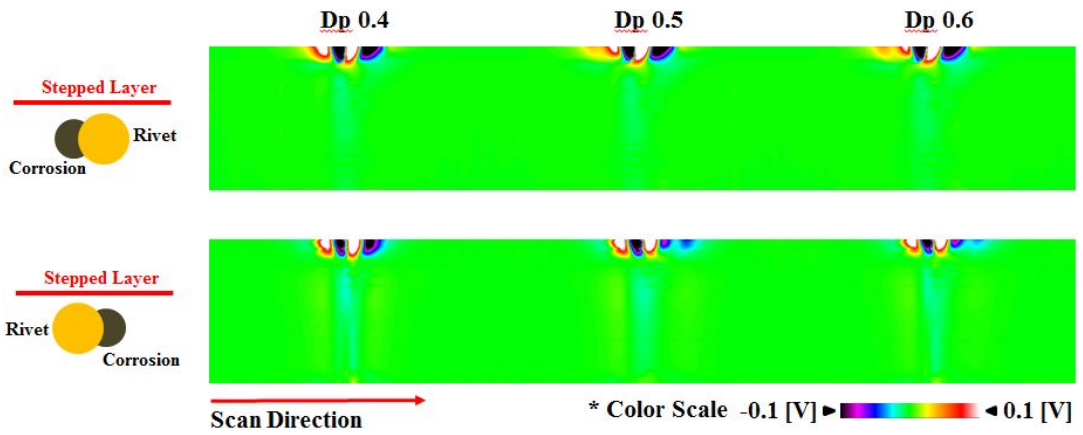
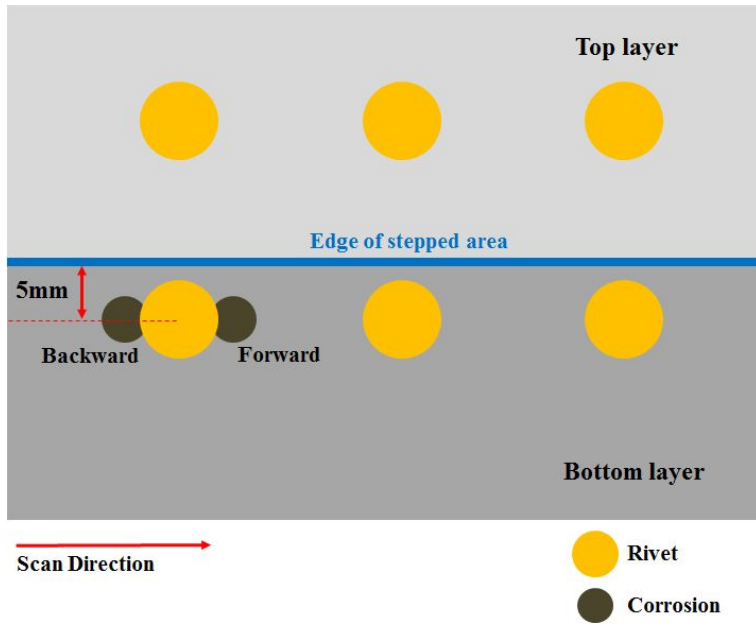


(a)

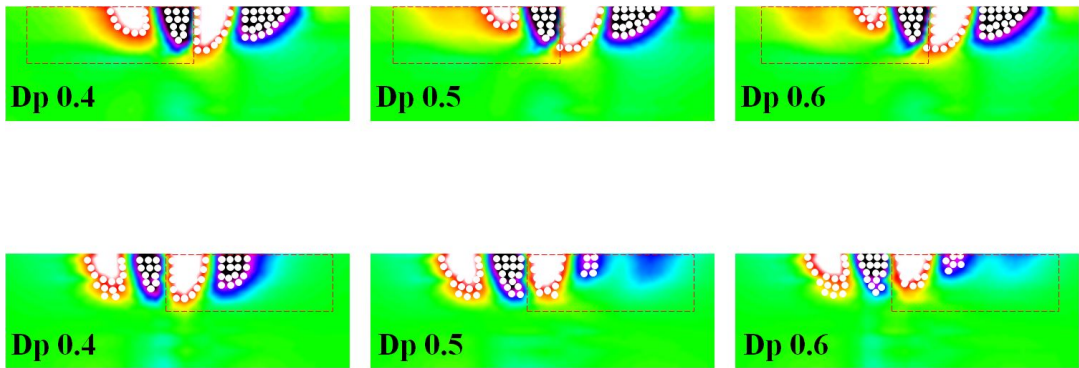
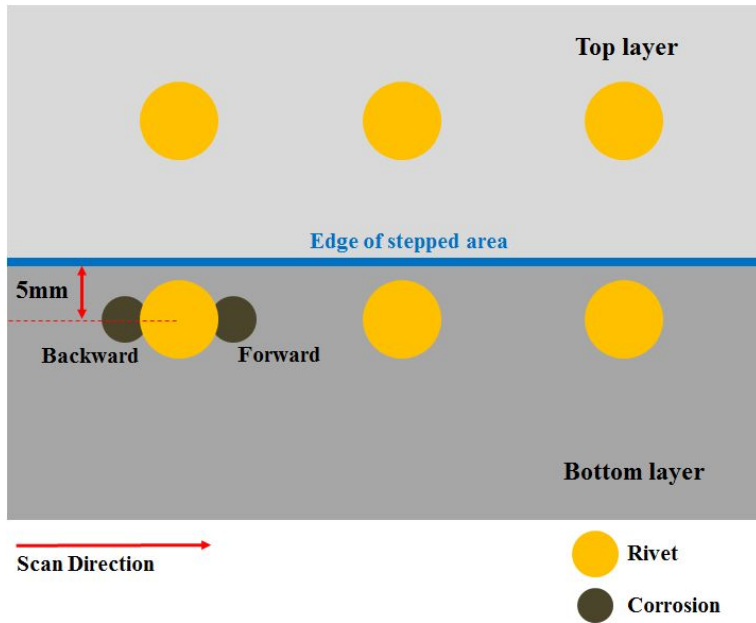


(b)

Fig. 4 -21 Images of a rivet with four direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm

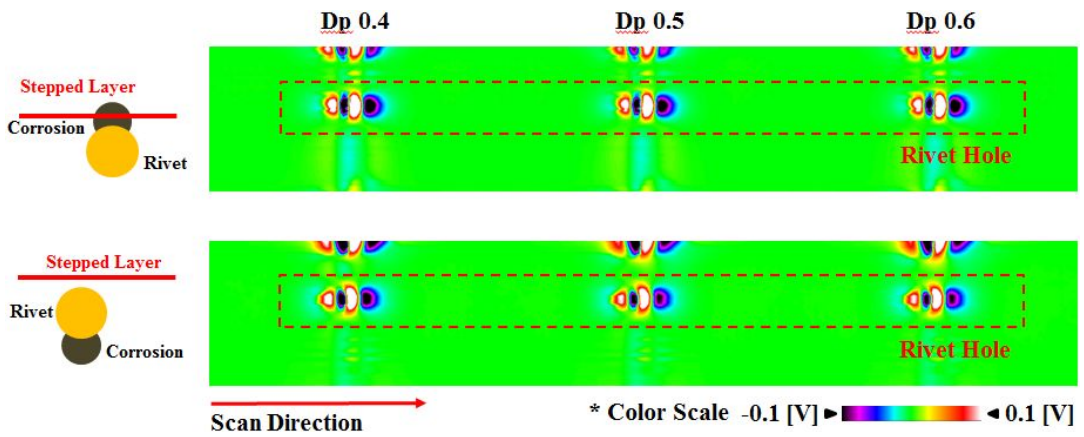
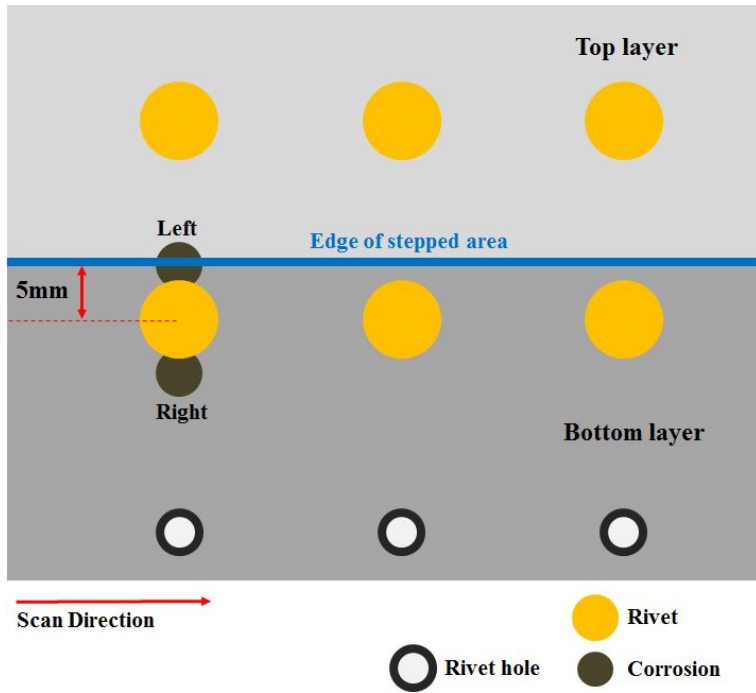


(a)

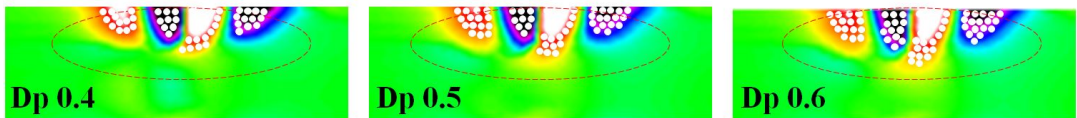
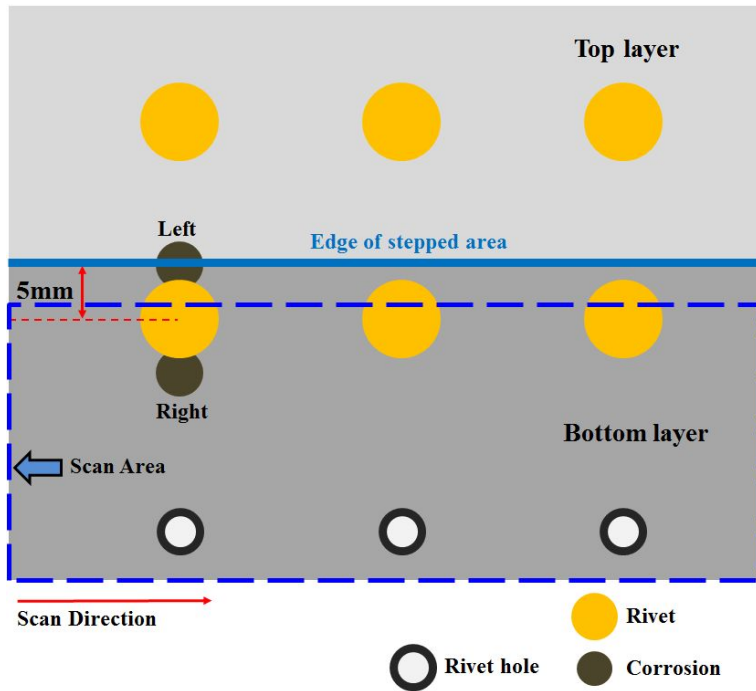


(b)

Fig. 4 -22 Images of a rivet with forward & backward direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm

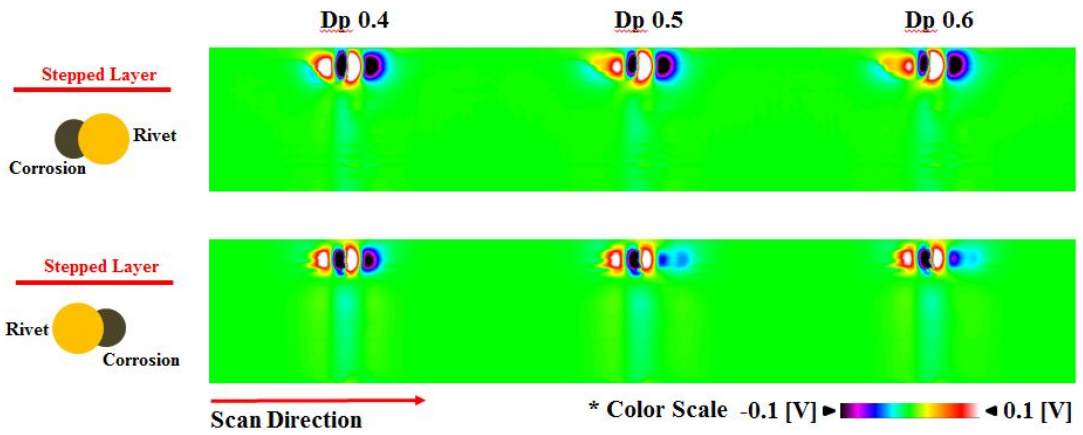
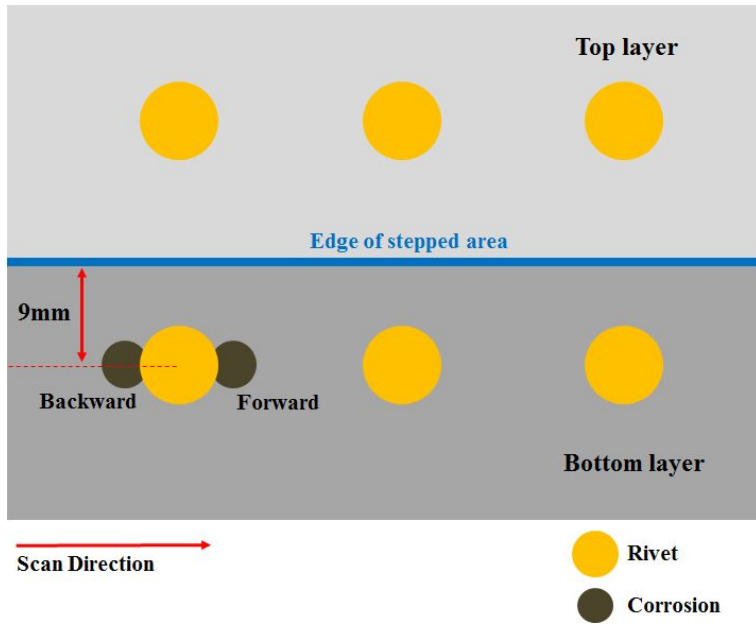


(a)

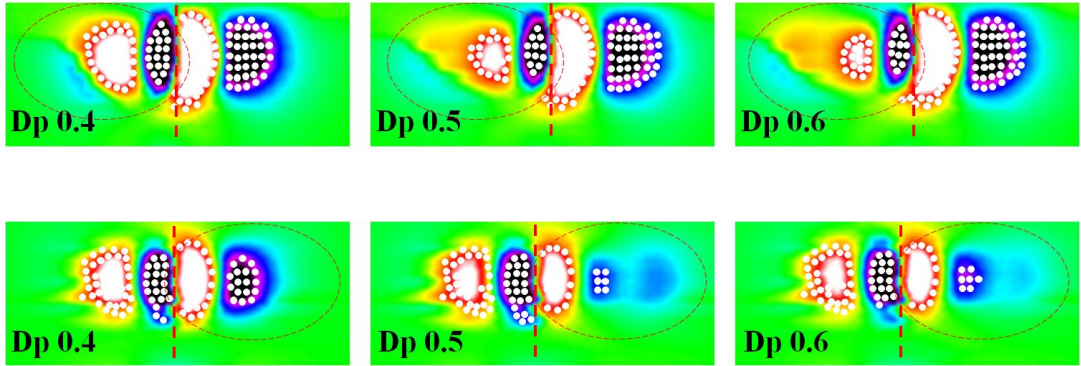
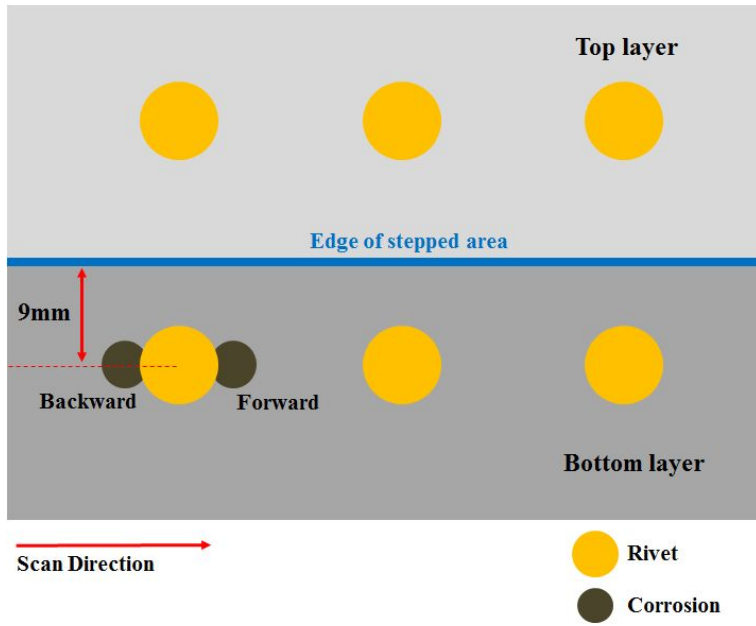


(b)

Fig. 4-23 Images of a rivet with left & right direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm

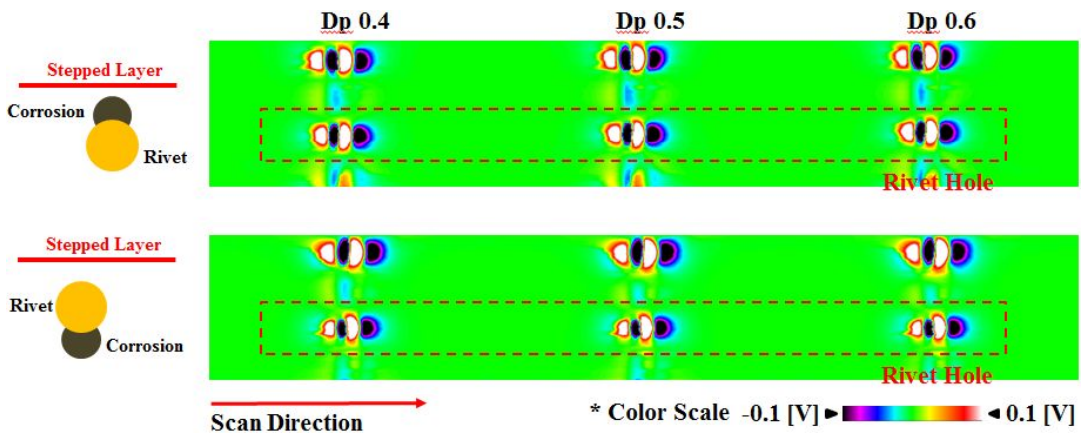
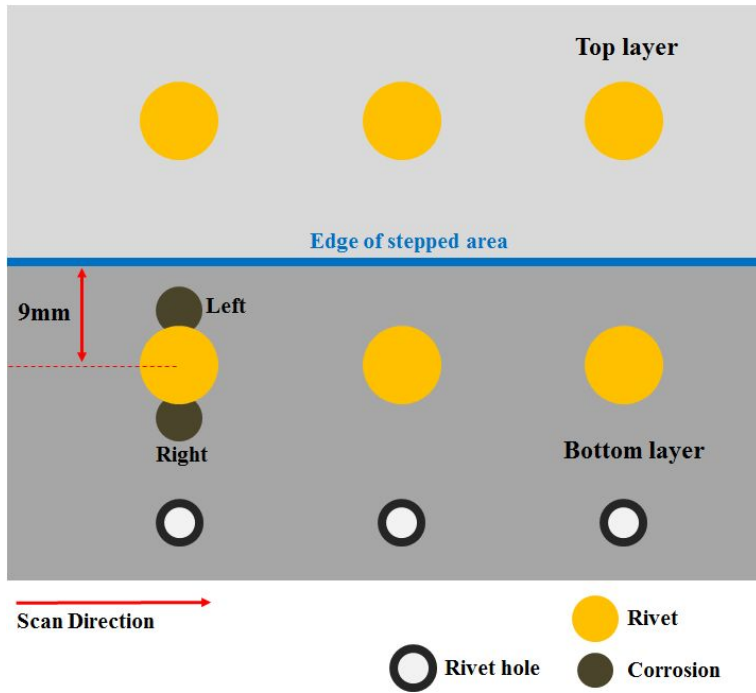


(a)

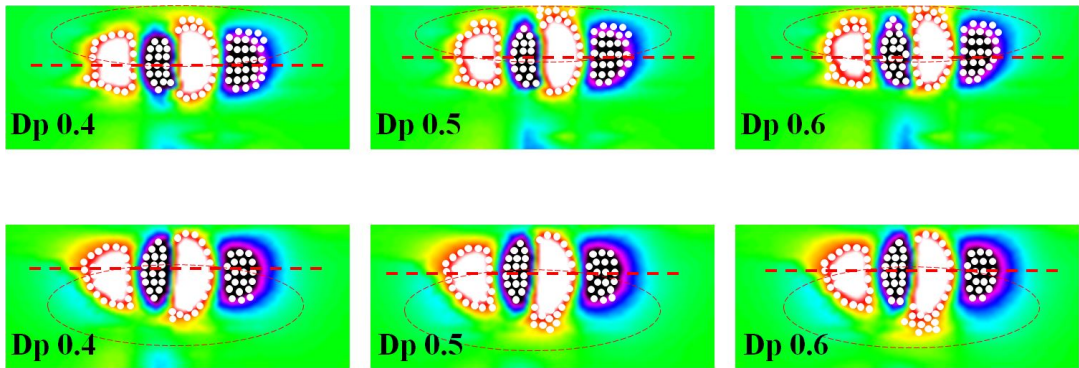
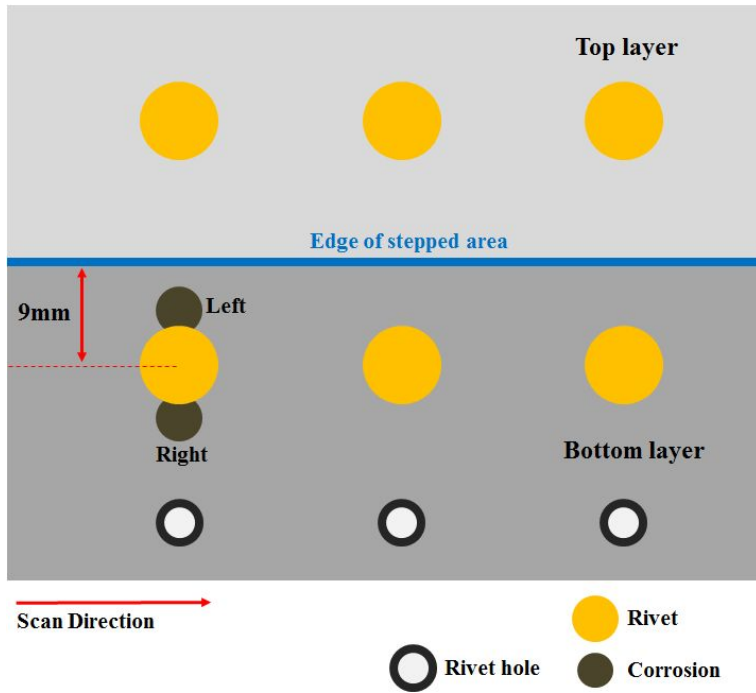


(b)

Fig. 4 -24 Images of a rivet with forward & backward direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm



(a)



(b)

Fig. 4 -25 Images of a rivet with left & right direction corrosion (Stepped Area); (a) Before applying the algorithm (b) After applying the algorithm

제 5 장 결론

본 논문은 장기 운영 항공기 공기흡입구의 수리에 의해 형성된 단차부에서 결함의 발생을 인지하기 위하여, 유한요소해석에 의한 시뮬레이션을 통하여 보다 유효한 전자기장 인가 및 측정 방법을 도출하였다. 도출된 결과를 바탕으로 전자기장 영상화 시스템을 제작하고, 실험을 통하여 검증하는 것을 목적으로 하였다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 실제 운용 중인 항공기 공기흡입구에서 발생하는 단차부와 동일한 조건의 시험편 제작 및 시뮬레이션을 위한 3D 모델링을 하였다. 먼저 수치해석적 접근을 위하여, 상용화된 유한요소해석 프로그램인 ANSYS(Ver.11.0 , EMAG)를 이용하여 해석하였다. 시뮬레이션에 사용된 전자기장 인가 장치는 수직방향 코일과 요크형 전자석을 사용하였으며, 평판 시험편과 단차 시험편을 각각 시뮬레이션하여 그 차이를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

수직방향 코일과 요크형 전자석 모두 리벳 홀 주변과 이면부식 결함 주변에서 전류밀도의 변화가 확인되며, 결함을 검출할 수 있을 것으로 판단하였다. 하지만 수직방향 코일은 자속밀도 분포를 보았을 때, 결함의 위치에 따라 균일한 결과가 나오지 않을 것으로 판단하였다. 그에 비해 요크형 전자석의 경우 전류밀도의 분포가 수직방향 코일에 비하여 리벳 홀과 이면부식에서 더 많은 면적에 걸쳐 변화하였다. 자속밀도의 분포를 보았을 때, 배열된 홀(hall)센서가 위치하는 영역에서 아주 균일하게 자기장이 집속되며, 전류밀도와 자속밀도의 값 또한 수직방향 코일에 비하여 크게 나타났다. 따라서, 평판 시험편 시뮬레이션 결과, 수직방향 코일보다 요크형 전자석을 사용하는 것이 결함의 위치에 상관없이 검출이 가능하며, 더 좋은 검출능을 가질 것으로 예상하였다.

상술한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 요크형 전자석을 포함한 선형 배열 자기 카메라(Linearly integrated Hall sensor array, 이하 LIHaS)를 제작하여, 모사 시험편을 대상으로 실험을 진행하였으며, 자동 결함 판별 알고리즘을 적용한 결과는 다음과 같다.

(1) 평판 시험편에서 직경 5mm, 깊이 0.4mm, 0.6mm의 이면 부식 결함을 검출할 수 있다.

(2) 단차 시험편 상단부의 경우 단차 경계부에서 리벳 중심까지의 거리가 8mm인 경우와 12mm인 경우 모두 결함 위치에 상관없이 직경 5mm, 깊이 0.4 ~ 0.6mm인 이면 부식 결함을 검출할 수 있다.

(3) 단차 시험편 하단부의 경우 단차 경계부에서 리벳 중심까지의 거리가 9mm인 경우 결함 위치에 상관없이 검출이 가능하였으나, 단차 경계부에서 리벳 중심까지의 거리가 5mm인 경우 Left 방향의 결함은 센서 스캔 가능 영역에서 벗어나 있으므로 검출이 곤란하였다. 그 외 Right, Forward, Backward 방향의 경우 직경 5mm, 깊이 0.4~0.6mm인 이면 부식 결함을 검출할 수 있다.

REFERENCE

- [1] I. H. Ibrahim, E.Y.K. Ng, K.W.L. Wong, "Applying Taguchi's off-line quality control method and ANOVA on the maneuverability of the F-5E intake," *Mathenatical and computer modelling*, Vol. 49 No. 7-8, pp. 1359-1371, 2009.
- [2] W. R. Hendricks, "The Aloha Airlines accident—a new era for aging aircraft," in *Structural integrity of aging airplanes*, ed: Springer, 1991, pp. 153-165.
- [3] S. Pitt and R. Jones, "Multiple-site and widespread fatigue damage in aging aircraft," *Engineering Failure Analysis*, vol. 4, pp. 237-257, 1997.
- [4] A. Baker, N. Rajic, and C. Davis, "Towards a practical structural health monitoring technology for patched cracks in aircraft structure," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, pp. 1340-1352, 2009.
- [5] Z. Zeng, X. Liu, Y. Deng, L. Udpa, L. Xuan, W. C. Shih, *et al.*, "A parametric study of magneto-optic imaging using finite-element analysis applied to aircraft rivet site inspection," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 3737-3744, 2006.
- [6] D. C. Hurley, R. S. Gilmore, and J. D. Young, "Eddy current surface inspection probe for aircraft fastener inspection, and inspection method," ed: Google Patents, 1996.
- [7] S. T. Revankar, B. Wolf, and J. R. Roznic, "Metal Fatigue Crack Growth Models," *International Journal of Advanced Engineering Applications*, vol. 1, pp. 85-91, 2012.
- [8] J. Kim, G. Yang, L. Udpa, and S. Udpa, "Classification of pulsed eddy current GMR data on aircraft structures," *NDT & E International*, vol. 43, pp. 141-144, 2010.
- [9] A. C. Cobb, J. E. Michaels, and T. E. Michaels, "An automated time–frequency approach for ultrasonic monitoring of fastener hole cracks," *NDT & E International*, vol. 40, pp. 525-536, 2007.

- [10] V. Senyurek, "Detection of cuts and impact damage at the aircraft wing slat by using lamb wave method," *Measurement*, vol. 67, pp. 10-23, 2015.
- [11] V. Ushakov, V. Mikhalev, D. Davydov, and V. Davydova, "Detection of cracks under threads of studs of power equipment and drill pipes during ultrasonic testing," *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 45, pp. 627-630, 2009.
- [12] J. Jongwoo, C. Myungki, and L. Jinyi, "Nondestructive Evaluation of Austenitic Stainless Steel Using CIC-MFL and LIHaS," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 3959-3962, 2011.
- [13] 전종우 and 이진이, "요크형 교류 전자기장과 선형배열 홀 센서에 의한 결함 탐상 및 평가," presented at the 대한기계학회 춘추학술대회, 2009.
- [14] J. Hwang, J. Lee, and S. Kwon, "The application of a differential-type Hall sensors array to the nondestructive testing of express train wheels," *NDT & E International*, vol. 42, pp. 34-41, 2009.
- [15] 김세진, "장기운영 항공기의 리벳구조물 비파괴검사 시스템 개발에 관한 연구", 학위논문(석사), 조선대학교 대학원 제어계측공학과, 2016. 8.

Acknowledgements

처음 연구실에 들어왔을 때가 엇그제 같은데 벌써 많은 시간이 지나 석사 학위 논문을 쓰게 되었습니다. 부족한 저를 여기까지 올 수 있게 해주신 분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저, 언제나 아낌없는 지원과 많은 가르침을 주시는 이진이 교수님께 진심으로 존경과 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 매우 바쁘신 와중에도 저의 논문을 심사해 주신 고낙용 교수님, 조창현 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 제어계측공학과 모든 교수님께도 감사드립니다. 교수님들의 올바른 가르침 덕분에 석사 학위라는 좋은 결실을 얻게 되었습니다.

항상 같이 고생하는 우리 실시간 IT-NDT² 연구센터 식구들에게도 감사의 말씀 전합니다. 늘 밤낮없이 고생하시는 우리 김정민 박사님, 언제나 저희를 친동생처럼 아껴주시고 챙겨주셔서 감사합니다. 한 학기 먼저 박사과정을 시작한 우리 순보, 주현이 이번 학기에 같이 석사 학위 논문을 쓴 현종이, 부균이, 석사 과정을 마치고 먼저 사회로 나간 세진이, 종현이 그리고, 우리를 뒤따라올 명철이, 지수, 다빈이, 윤관이, 동철이, 희준이 모두 감사합니다. 언제나 많은 가르침과 도움을 주시는 이희중 교수님, 홍완표 교수님, 레민후이 박사님에게도 감사의 말씀을 전합니다.

멀리 떨어져 있지만 못난 아들을 위해 항상 기도해주시고, 응원해주시는 우리 부모님, 이번에 공무원시험에 합격한 내 동생 희정이 진심으로 축하하고, 우리 가족 모두 언제나 고맙고 사랑합니다. 저를 생각해주신 모든 분께 보답하는 마음으로 항상 열심히 하겠습니다. 감사합니다.

2016년 12월
최 은호 올림