



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

2012年 2月
碩士學位 論文

航空機 多衆構造物の
腐蝕 檢出 및 評價

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

崔 昊 允

航空機 多層構造物の
腐蝕 検出 및 評價

Inspection and Evaluation of Corrosion in the
Multi-Layered Structure of Aging Aircraft

2012 年 2 月 24 日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

崔 昊 允

航空機 多衆構造物の 腐蝕 檢出 및 評價

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


2011 年 10 月


朝鮮大學校 大學院


制御計測工學科

崔 昊 允

崔昊允의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 高樂沅 

委員 朝鮮大學校 教授 趙昌鎡 (印) 

委員 朝鮮大學校 教授 李鎮伊 (印) 

2011年 11月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT	ix
제 1장 서론.....	1
제 2장 이론적 배경	9
제 1절 다이폴 모델법에 의한 이면부식 결함 수치해석	10
제 2절 유한요소해석에 의한 다중구조물의 이면부식 결함 수치해석	14
제 3장 기초 실험.....	22
제 1절 자원	23
제 2절 센서배열	26
제 3절 신호처리회로.....	28
제 4절 이면부식 결함 시험편	32
제 5절 실험 및 고찰.....	34
제 4장 F-5 인테이크 다중구조물 이면부식 탐상	40
제 1절 프로브 이송장치.....	40
제 2절 인테이크 모형 시험편	51
제 3절 실험 및 고찰.....	54
제 5장 결론.....	60
Acknowledgments.....	65

표목차

Table1-1	비파괴검사법의 장단점	6
Table 2-1	M형 자화기의 각 요소 물리적 특성 및 크기	15
Table 2-2	M _S 형 자화기의 각 요소 물리적 특성 및 크기.....	16
Table 2-3	O형 자화기의 각 요소 물리적 특성 및 크기.....	17
Table 2-4	O+ α 형 자화기의 각 요소 물리적 특성 및 크기.....	18
Table 3-1	원형 인공결함의 크기	33
Table 3-2	각 자화기의 특징 및 실험조건	34
Table 4-1	측정모드의 각 기능	48
Table 4-2	분석모드의 각 기능	50

도목차

Fig. 1-1	F-15C 전투기 추락사고 캡처화면	2
Fig. 1-2	실시간 비파괴검사 기술의 필요성	2
Fig. 1-3	항공기 표면결함 방사선 투과검사.....	4
Fig. 1-4	항공기의 초음파검사	4
Fig. 1-5	항공기의 침투탐상 및 자분탐상검사.....	5
Fig. 1-6	기존의 Intake 육안검사	7
Fig. 1-7	자기카메라에 의한 자기장의 가시화.....	7
Fig. 2-1	복잡한 형태의 결함	10
Fig. 2-2	원주형 결함의 Dipol 모델과 자하 요소의 분포	11
Fig. 2-3	원주형 결함에 대한 Dipol 모델 해석결과 영상	12
Fig. 2-4	Dipole 모델 해석에 이용된 시험편 및 자화기.....	13
Fig. 2-5	M형 자화기의 수치해석 모델링.....	15
Fig. 2-6	M _S 형 자화기의 수치해석 모델링	16
Fig. 2-7	O형 자화기의 수치해석 모델링.....	17
Fig. 2-8	O+α형 자화기의 수치해석 모델링	18
Fig. 2-9	이면부식 시험편의 단면도.....	19
Fig. 2-10	각 자원들의 자기장 해석.....	19
Fig. 2-11	각 자원들의 전기장 해석.....	20
Fig. 2-12	각 자원들의 침투깊이 수치해석	21
Fig. 3-1	자기카메라.....	22
Fig. 3-2	다양한 자원형태의 실물사진.....	24
Fig. 3-3	다양한 자원형태의 원리	24
Fig. 3-4	선형 배열된 홀센서.....	26
Fig. 3-5	Differential- \angle x형 LIHaS.....	26

Fig. 3-6	자화기 및 LIHaS의 일체화.....	27
Fig. 3-7	INA128을 이용한 홀센서 신호의 교류증폭회로도.....	29
Fig. 3-8	교류-직류신호 변환회로.....	30
Fig. 3-9	A/D 변환기 회로.....	31
Fig. 3-10	이면부식 결함 시험편.....	32
Fig. 3-11	$\partial V/\partial x$ 영상에 의한 이면부식의 판별.....	35
Fig. 3-12	각 결함영역에서의 $\partial V/\partial x$ 의 분포.....	35
Fig. 3-13	M형 자화기 및 Differential 형 LIHaS에 의한 결함탐상능력.....	37
Fig. 3-14	M _S 형 자화기 및 Differential 형 LIHaS에 의한 결함탐상능력.....	37
Fig. 3-15	M _S 형 자화기 및 Differential- $\angle x$ 형 LIHaS에 의한 결함탐상능력.....	38
Fig. 3-16	O형 자화기 및 Single형 LIHaS에 의한 결함탐상능력.....	38
Fig. 3-17	O+ α 형 자화기 및 Single형 LIHaS에 의한 결함탐상능력.....	39
Fig. 4-1	프로브 이송장치.....	40
Fig. 4-2	센서기구부.....	41
Fig. 4-3	카메라부의 구성.....	41
Fig. 4-4	이송부의 구성.....	42
Fig. 4-5	곡선대응기구부의 구성.....	43
Fig. 4-6	벽면지지기구부의 구성.....	44
Fig. 4-7	비원형 대응기구부의 구성.....	45
Fig. 4-8	컨트롤 박스.....	46
Fig. 4-9	측정모드 소프트웨어.....	47
Fig. 4-10	분석모드 소프트웨어.....	49
Fig. 4-11	인테이크 모형 시험편.....	51
Fig. 4-12	Angle부 결함가공 그림 및 사진.....	52
Fig. 4-13	조립 완료한 인테이크 모형 시험편.....	52
Fig. 4-14	Angle부에 도입한 결함 위치 및 깊이.....	53
Fig. 4-15	Angle부 실험결과.....	56
Fig. 4-16	각도센서와 변위센서에 의한 Angle부 단면형상 측정화면.....	57
Fig. 4-17	각도센서와 변위센서에 의한 Angle부 단면형상 측정결과.....	57

Fig. 4-18 일정한 스캔간격으로 재해석한 Angle부 실험결과..... 59

기호 설명

IC	Integrated Circuit
VLSI	Very Large Scale Integration
DT	Damage Tolerance
PSI	Pre-Service Inspection
ISI	In-Service Inspection
RT	Radiation Testing
UT	Ultrasound Testing
ECT	Eddy Current Testing
MFLT	Magnetic Flux Leakage Testing
PT	Penetration Testing
LT	Leakage Testing
VT	Visual Testing
MPT	Magnetic Particle Testing
AE	Acoustic Emission
NRT	Neutron Radiographic Testing
IRT	Infrared Thermography Testing
FEM	Finite elements method
DMM	Dipole Model Method
STIC	Sheet-Type Magnetic Induced Current
RMS	Root-Mean-Square
AC	Alternating current
DC	Direct current
A/D	Analog/Digital
HPF	High Pass Filter

LPF	Low Pass Filter
LIHaS	Linearly Integrated Hall Sensors Array
CIC-MFL	Combined Induced Current-Magnetic Flux Leakage
CMRR	Common Mode Rejection Ratio
SAR	Successive Approximation Register
D/A	Digital/Analog
LSB	Least Significant Bit
S/N	Signal to Noise ratio
CCD	Charge Coupled Device
USB	Universal Serial Bus
B	Magnetic Flux Density [Wb/m^2]
L	Length [mm]
W	Width [mm]
H	Height [mm]
δ	Skin depth [mm]
F	Frequency [Hz]
μ	magnetic permeability
σ	conductivity
MURX	Relative Permeability
RSVX	Electrical Conductivity
Q	Quiescent point

아래 첨자

S	Silicon Steel
RMS	Root-Mean-Square
G	Gain
C	Cut off Frequency

ABSTRACT

Inspection and Evaluation of Corrosion in the Multi-Layered Structure of Aging Aircraft

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

From the large equipment-structure including the aircraft, thermal power, nuclear power generation, oil refining, induction space station, and etc to the micro type member including the IC package, VLSI, and etc, the direct cause for the damage is caused by the generation of the defect and growth. In particular, aircraft experiences high load and vibration, differences in temperature and pressure between inside and outside of it while in operation, transformation at the speed of hundreds km/h, and residuals of salt and moisture while in operation. Therefore, aircraft can be vulnerabled by fatigues and corrosions. These damages would bring serious problems for passengers and economic loss if they well not detected on time.

The aircraft is assembled by rivet and multi-layered structures in aluminum alloy, which aims at making the aircraft stronger and lighter. The rivet connection part of such multi-layered structure is easy to develop multi-site crack and corrosion due to concentration of stress or owing to remaining salt or moister. These cracks and corrosions on skin of aircraft could be inspected by using the visual testing, ultrasonic testing, penetration testing and magnetic particle testing. However, far-side cracks and corrosions in multi-layered structure are difficult to inspect by using these methods.

In this paper, an NDT method that can inspect far-side corrosion in the multilayered structure with riveting is proposed. The magnetic source for inducing the electrical field in a specimen, Hall sensors array for measuring the distorted magnetic field, and scanning equipment are used in this method. Far-side corrosion on an elliptical pipeline, which modified intake of aircraft are examined to verify the effectiveness of the proposed method. In addition, the position and size of corrosion are evaluated quantitatively by comparing the 3-dimensional numerical analysis with the measured data.

제1장 서론

항공기를 비롯하여 화력, 원자력 발전, 석유정제, 유인 우주스테이션, 로켓 엔진 등의 대형 기기 구조물로부터, IC 패키지, VLSI 등의 초소형부재에 이르기까지 손상의 직접적인 원인중 하나는 재료열화/부식/피로(이하, 결함)의 발생, 성장에 의한 것이 많다. 특히 항공기의 경우 높은 하중 및 진동, 운항 중 내외부의 온도 및 기압차, 시속 수백 km/h의 속도에서 항공기의 변형, 航海중의 염분 및 수분의 잔여에 놓이게 되므로, 피로 및 부식에 취약하다. 이러한 결함을 조기에 검출하지 못하면 결함이 급격히 진전되어 사고에 이르게 된다. 결과적으로 막대한 인적·경제적 손실뿐만 아니라 항공분야에서도 큰 문제를 일으킬 수 있다.

한 예로, 2007년 11월 2일, 미국의 미주리 주(州) 방위 공군 소속 F-15C 이글(Eagle) 전투기 한대가 추락한 사고를 들 수 있다. 사고 기체는 공중전 훈련 중, 공중에서 조종석 바로 뒷부분부터 시작하여 전방 동체 부분이 공중에서 분리되는 사고를 겪었으며, 조종사는 무사히 탈출하였고, 사고기체는 지상에 추락하였다. 사고가 지난지 3개월 후인 2008년 1월 10일, 미국 공군은 사고 원인이 Longeron이라 부르는, 조종석이 있는 전방 동체와 중앙 동체를 잇는 구조물의 결함에 기인한다는 최종 결론을 내렸다[1]. 사고가 난 F-15C 전투기는 약 20년동안 운용된 전투기로서, 다방면으로 조사한 결과 사고기체는 원래의 설계 규격에 맞지 않는 부품을 사용하였고, 그동안 이 부분에 대한 정기검사를 해오지 않았다. 따라서, 예상수명이 다하지 않았는데도 장시간 운용에 걸쳐 균열이 생기고 훈련중 균열이 확산되어 파괴되었다. 이는 실시간 손상계측기술의 부재를 원인으로 꼽을 수 있다.

(발췌 및 자료출처: <http://www.af.mil/news/story.asp?id=123074547>)



자료출처: <http://blog.daum.net/jon75/5>

Fig. 1-1 F-15C 전투기 추락사고 캡처화면

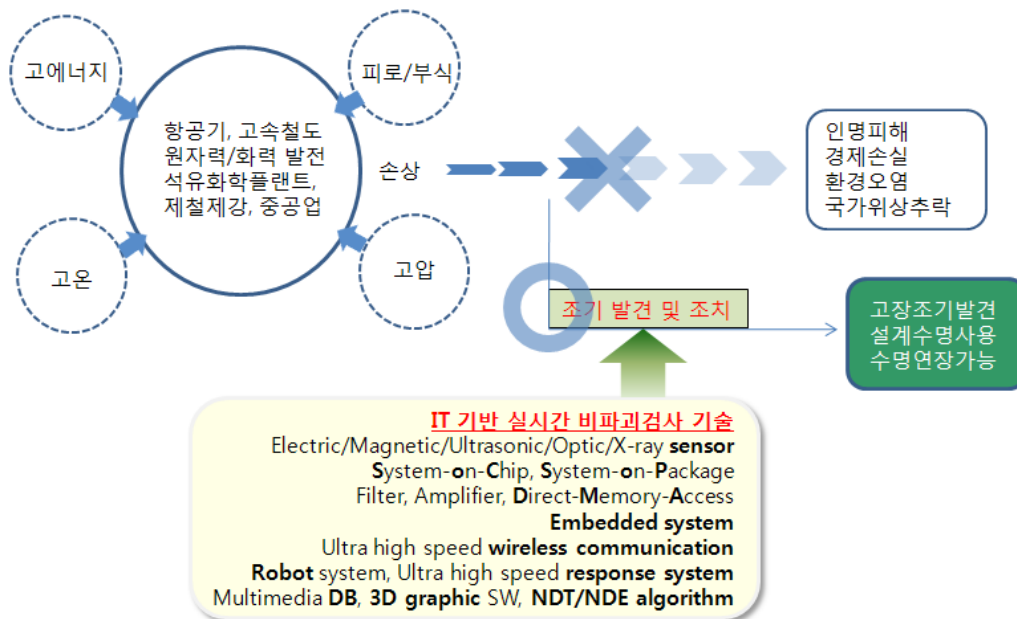


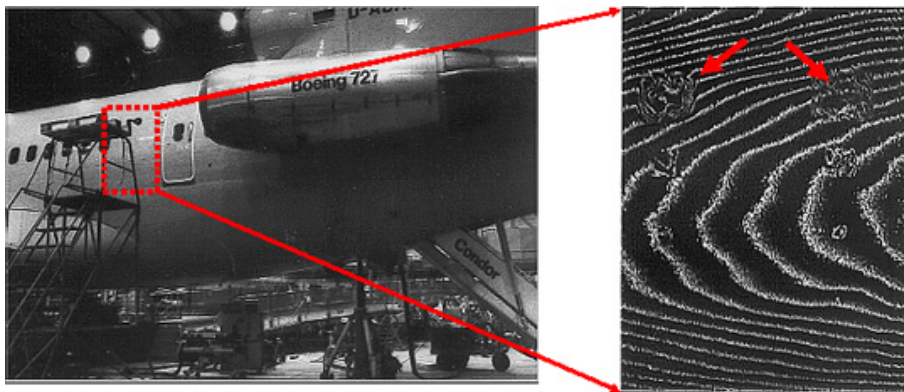
Fig. 1-2 실시간 비파괴검사 기술의 필요성

이러한 손상을 조기에 발견하여 정비 및 교체등과 같은 조치를 취하면, 설계수명까지 안정적 사용은 물론 손상허용공학(Damage Tolerance)적 관점[2,3]에서 수명을 연장하여 사용할 수도 있다. 한편, 결함의 발생과 성장은 (1) 제조과정에 있어서 도입된 결함이 성장하는 경우와, (2) 가동후에 임의의 원인에 의하여 발생하고 성장하는 경우로 나누어 질 수 있으며, 각각에 대하여 사용전 검사(Pre-Service Inspection, PSI)와 사용기간중 검사(In-Service Inspection, ISI)에 의하여 적절하게 유해한 결함을 검출하고 보수하도록 하고 있다. 한편, 항공기는 지상 운송수단과 달리, 운항중 공중에서 정지하여 정비할 수 없다는 취약점을 가지고 있다. 따라서 항공기가 착륙하여 다음 이륙 및 운항시까지 기체를 포함한 구성품의 사용기간중 검사(ISI, In-Service Inspection)를 마쳐야 함은 매우 중요한 과제중의 하나이다.

한편, 군용 항공기는 민간 항공기에 비할 수 없을 정도의 온도차, 악천후 운용, 피로, 압력, 부식 및 적재 하중의 변동등 가혹한 조건에서의 운용이 필수적이므로, ISI에 있어서 보다 정확하고 신속한 손상의 비접촉식 검출 및 적절한 대응은 조종사의 보호, 군비절감 및 군 전력 활용성의 극대화를 위하여 반드시 필요하다. 특히, (1) 검사 대상의 재질, 형상 및 구조에 따라 적절한 ISI 시스템을 제작하기 위한 적용성, (2) 검사 시스템의 유지보수가 빠르고 저렴하기 위한 보수성, (3) 해외의존도를 줄이고 개조가 용이한 확장성은 자주적 항공기술지원을 위한 능력 구축에 필수 항목이다. 적용성, 보수성, 확장성을 만족하기 위해서는 국내외 특허기술을 포함한 순수 국산 원천기술에 의한 비파괴검사기술의 확보 및 양육이 필수 불가결하다[4].

기존의 비파괴 검사에는 결함검출에 활용하는 에너지원의 종류에 의하여 방사선검사(RT, Radiographic Testing), 초음파검사(UT, Ultrasonic Testing), 와전류검사(ECT, Eddy Current Testing), 누설자속검사(MFLT, Magnetic Flux Leakage Testing), 침투탐상(PT, Penetrant Testing), 누설탐상(LT, Leak Testing), 육안검사(VT, Visual Testing), 자분탐상(MPT, Magnetic Particle Testing), 음향방출(AE, Acoustic Emission), 중성자검사(Neutron Radiographic Testing), 열화상검사(IRT, Infrared Thermography Testing)등으로 분류된다 [5].

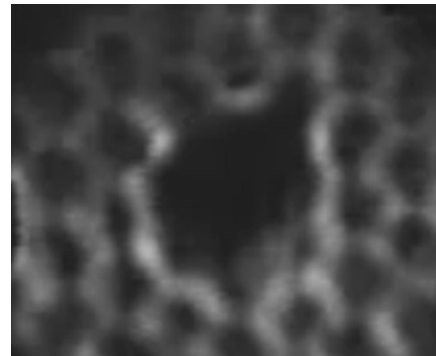
먼저, 방사선투과검사는 피검사체에 X-ray를 조사하였을 때, 손상 부위에서 감쇄가 발생하고, 방사선 센서 또는 감광 필름에 의하여 방사선의 세기 분포를 측정함으로써 결함의 유무를 판단한다[6]. 초음파탐상검사는 구조물에 초음파를 전파했을 때, 손상 부분에서 초음파가 반사되고, 이를 압전소자에 의하여 검출하여 손상의 유무를 검지한다[7].



자료출처: <http://blog.paran.com/blog/detail/postBoard.kth?pmcl>
Fig. 1-3 항공기 표면결함 방사선 투과검사



(a) Imperium Inc.DAV(Digital Acoustic Video)



(b) 허니컴 구조물

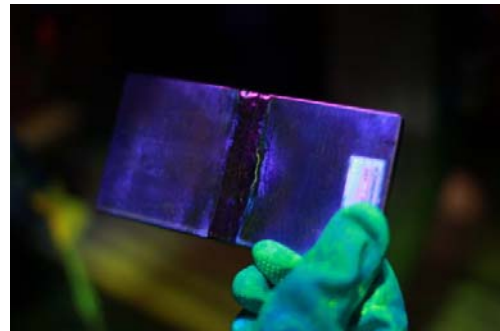
자료출처: <http://www.imperiuminc.com/industrial.htm>
Fig. 1-4 항공기의 초음파검사

와전류탐상검사는 교류 전류를 인가한 코일을 시험편에 근접시켰을 때, 전자 유도 법칙에 의하여 시험편에 유도되는 전류가 결함의 존재 및 그 크기에 의존하

는 원리를 이용함으로써 결함을 탐상한다 [8]. 누설자속탐상은 구조물에 전기장 또는 자기장을 인가하였을 때, 손상의 존재 및 크기에 기인하여 손상 주변에서 자기장의 분포가 변화하는 원리를 이용한다. 이때, 자기장의 분포를 자기센서에 의하여 측정하여 손상을 검출한다[9]. 자분탐상은 표면 및 표면에 가까운 내부 결함을 쉽게 탐상할 수 있는 방법 중 하나이다. 즉, 금속 구조물에 자분(magnetic particle)을 산포하고 전기장 또는 자기장을 인가하면, 구조물의 손상 부위에서 자분이 모이게 되고, 이를 관찰하여 구조물의 손상을 검출한다.



(a) 항공기 Turbine Blade의 형광침투검사



(b) 항공기 부품의 자분탐상검사
자료출처: <http://afplay.tistory.com/257>

Fig. 1-5 항공기의 침투탐상 및 자분탐상검사

침투탐상은 구조물에 분사한 형광액체가 삼투압 현상에 의하여 손상 부위에 스며드는 원리를 이용한다. 상기 형광액체를 닦아낸 후, 자외선을 조사하면 손상 부위에 잔류한 형광체에 의하여 손상을 검출할 수 있다. 누설탐상은 시험체 내부 및 외부의 압력차 등에 의해서 기체나 액체를 담고 있는 기밀용기, 저장시설 및 배관 등에서 유체의 누출, 유입 여부를 검사하거나, 유출량을 검출하는 방법이다. 육안검사는 구조물의 손상을 육안 또는 CCD 카메라로 관찰하여 손상 여부를 판단하는 방법이다.

상술한 비파괴 검사법은 각각의 장단점을 가지고 있다. 각 검사법의 장단점은 Table 1-1에 정리하였다.

Table 1-1 비파괴검사법의 장단점

종 류	장 점	단 점
방사선투과검사	결함의 종류와 형상을 알 수 있다.	방사선 안전관리 요구
초음파탐상검사	내부 불연속의 위치, 크기, 방향 및 모양 측정가능	접촉매질 필요 표면아래 얇은 결함검출 어렵다
외전류탐상검사	비접촉식 고온검사 가능	공간분해능 제한 탐상속도가 빠르지 못함
누설자속탐상검사	결함의 정량평가 가능	공간적, 강도적 제한
침투탐상검사	시험방법 간단 국부적 시험 가능 미세한 균열검사 가능	침투제가 오염되기 쉽다 후처리가 종종 필요 내부결함 검출 어려움.
자분탐상검사	검사방법 간단 검사비 저렴	전처리 및 후처리 필요

이러한 단점을 극복하기 위하여, 전세계적으로도 비파괴검사 방법은 다음과 같은 추세로 발전하고 있다. 즉, 기존의 검사에 사용되는 물리적 수단을 이용한 검사방법의 종합화, 전기 전자분야의 기술발전으로 첨단기술을 이용한 초정밀화(감도 및 분해능), 초고속화, 검사공정의 자동화, 검사결과의 화상화 및 검사결과의 보존 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

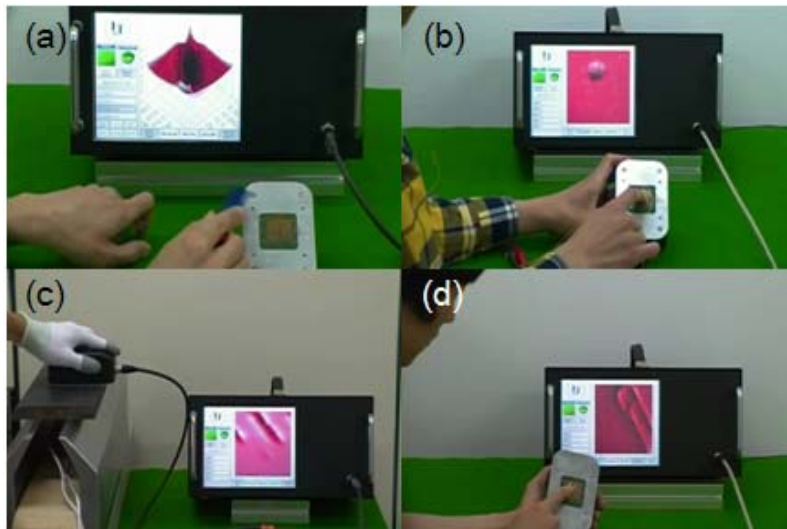
한편, 항공기는 장기운영에 따라 구조건전성 저하에 영향을 미치는 피로균열, 응력부식균열 및 부식 등의 발생 가능성이 높다. 특히 다중구조물 내부에서 발생하는 부식 결함의 경우 현 비파괴검사방법으로는 결함을 탐지하는데 애로사항이 있으며, 다중구조물을 대상으로 현재 사용 중인 비파괴검사방법인 육안검사(Fig.

1-6)는 검사자의 주관적인 판단에 의존하므로 탐지확률이 떨어진다. 현재 연구 동향에 맞춰 상술한 비파괴 검사 기법 중 자분 탐상법, 누설 자속 탐상법, 와전류 탐상법, 침투 탐상법 등의 단점 및 제약을 해결하기 위하여 순수 국산 원천기술인 자기카메라를 개발해 왔다[25]. 자기카메라(Fig. 1-7)는 자기장 분포를 가시화할 수 있으며, 이러한 원리를 이용하여 로터 중심공 배관 내부의 결함을 탐상한 예가 있다[26]. 하지만, 로터 중심공의 경우 좁고 긴 형태의 배관이지만, 항공기 Intake(공기 흡입구)내부는 단면형상이 불규칙적이며, 다중구조로 이루어져 있다.



자료출처: EBS 극한직업 “전투기정비장”, 2009년 2월 17일 방영

Fig. 1-6 기존의 Intake 육안검사



(a) 영구자석주변의 자기장 분포, (b) 교류전류에 의한 교류자기장,
(c) 빌렛 표면탐상, (d) 클립의 잔류자화

Fig. 1-7 자기카메라에 의한 자기장의 가시화

따라서, 본 연구에서는 F-5 항공기 Intake(공기흡입구) 내부와 같이 검사부위가 협소하고 단면형상이 변하는 원통형 다중구조물의 이면부식 결함을 탐상하고자 해당 기술을 개발하였다. 이면에 존재하는 결함을 탐상하기 위해 시뮬레이션(유한요소해석 및 다이폴 모델법) 결과를 토대로 다양한 형태의 자원 및 센서, 신호처리회로를 개발하였고, 실증실험을 통해 시뮬레이션 결과에 비교하여 유용성을 검증하고, 자원 및 센서를 선택하였다. 선택된 자원 및 센서를 자동 스캔 장치를 개발하여 원격으로 스캔할 수 있도록 하였다. 또한, 상자성체(알루미늄 합금) 시험편 및 원통형 배관 시험편에 인공결함을 도입하여 이를 검사 및 평가함으로써 그 유용성을 확인하였다.

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 제1장은 서론이며, 제2장은 이론적 배경을 소개한다. 제3장은 제2장에 서술한 이론을 배경으로 한 부식결함탐지기법 원리와 기초실험을 소개하고, 제4장은 시제품을 소개하고 이를 이용한 부식결함 탐상 결과를 보고한다. 제5장은 결론이다.

제 2장 이론적 배경

비파괴검사는 결함을 조사하고 찾아내는데 사용될 뿐만 아니라, 결함의 크기와 형상과 같은 결함의 양적 정보를 획득하는데 필요하다. 결함의 정량 평가를 위해서 결함의 존재에 의해 발생하는 누설자속 또는 와전류에 기인한 자기장 분포를 해석할 필요가 있다. 자기장 분포의 시뮬레이션을 위하여 많이 사용하는 방법이 유한요소해석(FEM, Finite elements method)과 자기쌍극자 모델법(DMM, Dipole Model Method)이다[10,11,12,13,14].

FEM은 시험편, 자원, 결함, 공기 등을 작은 요소 및 절점으로 나눈 후 각각의 요소에 대해 전자계의 연립방정식을 해석하는 방법이다. 비교적 정확한 해를 제공하긴 하지만, 모델링 및 요소의 생성과 연립방정식의 계산 등에 많은 시간이 소요된다는 문제를 가지고 있다. 또한, 일반적으로 결함은 폭이 좁고, 길이가 긴 형태를 갖기 때문에 요소의 크기를 작게 표현해야 하며, 결과적으로는 3차원 FEM의 요소 및 계산 시간이 많이 증가한다. 이에 반해 DMM은 결함의 양단면에 자하(magnetic charge)가 존재하고, 이들 자하의 분포가 생성하는 3차원 공간상의 자계가 누설자계에 근사하다고 가정함으로써, 실제 결함주변에 발생하는 자계를 계산해 낼 수 있다. FEM에 비해 계산시간이 짧고, 정성적인 결과를 제공한다.

본 연구에서는 다중으로 이루어진 항공기 Intake(공기흡입구)내부 리벳주위의 이면부식을 탐상하기 위하여, 교번자계에 의한 복잡한 형상의 자원 및 누설 자속을 해석하고자 각각 DMM과 FEM에 의해 검토해본다.

제 1절 다이폴 모델법(Dipole Model Method)에 의한 이면 부식결함의 수치해석

다이폴모델법을 적용하면 보다 빠른 시간내에 결함 주변에 발생하는 와전류 및 이에 기인한 자기장의 변화 분포를 손쉽게 가시화할 수 있다. 이전 연구로 다이폴모델법(DMM)에 의하여 유도면전류(STIC)를 채용한 교류고밀도 면적형 자기카메라를 모델링하는 방법을 제안한 바 있다[15].

Fig. 2-1(a)는 시험편에 유도된 면전류가 결함과 만났을 때의 전류의 흐름을 나타낸다. 결함의 양 선단에서 유도전류가 왜곡되고, 결과적으로 와전류가 발생한다. 다이폴모델에서는 유도전류에 기인한 자기장의 발생이 유도전류가 왜곡하는 지점, 즉 Fig. 2-1(b)에 나타낸 바와 같은 결함의 선단에 발생하는 것으로 가정한다. 결과적으로 결함의 형상 및 깊이에 따라 와전류의 방향은 달라지며, 결함의 양단에서 각각 (+) 및 (-)의 자하(magnetic charges)가 분포하게 된다. 자하는 결함의 형상에 따라 복잡하게 되지만, 본 연구에서는 구형(rectangle type), 삼각형(triangular), 타원형(elliptical type)등과 같이 단순화하여 고려한다. 균열의 형상을 Fig. 2-1(b)에 표현한 바와 같이 $z' = F(y')$ 이라 하자. 이때, (y', z') 에서의 자하의 평균, 즉 RMS(Root-Mean-Square) 값은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

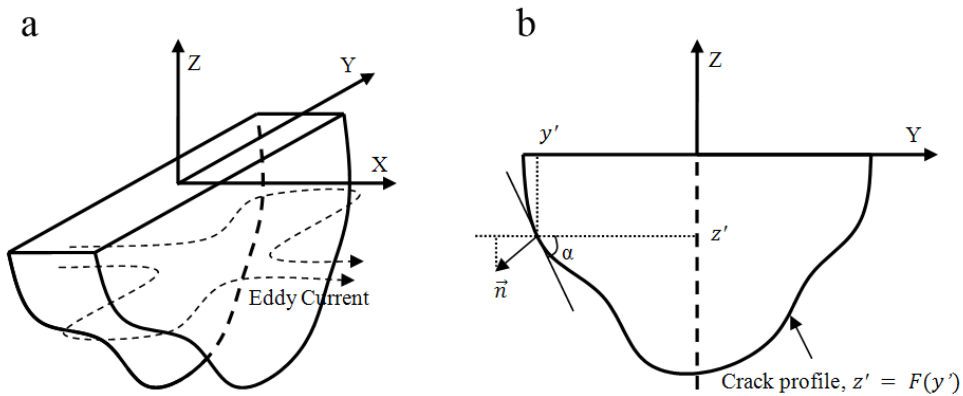


Fig. 2-1 복잡한 형태의 결함. (a) 3차원 영상, (b) Section view

$$m_{RMS} = \xi \cdot e^{\frac{z'}{\delta}} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta \quad (z' < 0) \quad (1)$$

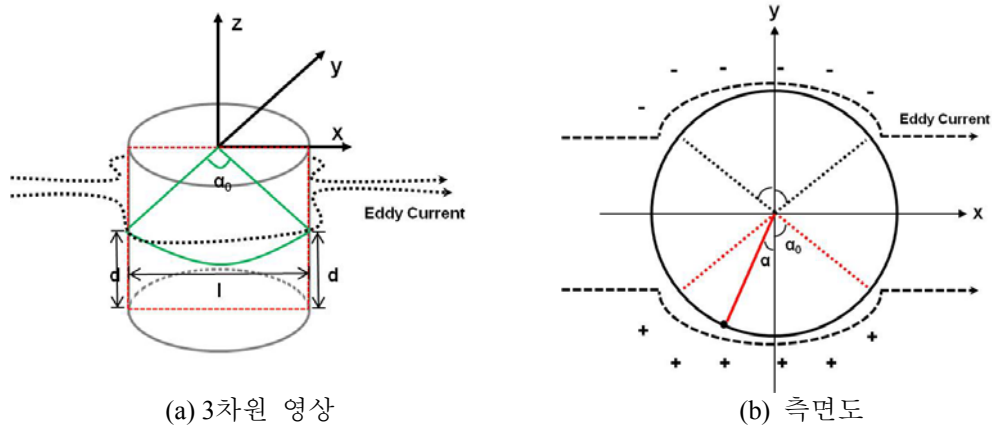
$$\sin\alpha = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{1 + \tan^2\alpha}}$$

$$\tan\alpha = -F'(y')$$

$$\cos\beta = \angle(\text{eddy current}, X \text{ axis})$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

여기에서 δ , F , μ , σ 는 각각 시험편의 skin depth, 교류전류 주파수, 투자율 및 전도율을 나타낸다. 또한, α 는 (y', z') 점에서 법선과 Y축이 이루는 각도이다. β 는 와전류와 x축이 이루는 각도이다. F 는 지점에서 함수 F 의 미분값을 나타내며, 결과적으로는 법선의 각도를 나타내는 상수가 된다. 또한, ξ 는 와전류 흐름의 오른쪽 또는 왼쪽에 위치한 국부 영역에서의 양수 또는 음수의 값을 가지는 자하 인자이다[14].



(a) 3차원 영상
Fig. 2-2 원주형 결함의 Dipole 모델과 자하 요소의 분포
 (b) 측면도

Fig. 2-2(a)는 원주형 형태를 가지는 결함의 Dipole 모델이다. α_0 는 원주형 결함의 표면에 나타나는 자하이다. 와전류는 Fig. 2-2(b)처럼 원형결함 주변을 따라 흐른

다. 이 때, 결함의 양 선단에서 발생하는 자하인자는 Eq(2)와 같다. 이 식은 Newton Raphson 수치해석법을 이용하여 α_0 를 얻을 수 있다. α 에서의 자하는 Eq(3)으로 표현할 수 있다. 따라서, 임의의 공간에서는 Eq(4)에 의하여 계산되는 자기장 분포를 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{R} + \sin\alpha_0 - \alpha_0 = 0 \quad (2)$$

$$m = \varepsilon_0 e^{\frac{z'}{\delta}} \sin(-\alpha) \quad (3)$$

$$B_{RMS} = \int_{-\frac{(\frac{\pi}{2} + \alpha_0)}{2}}^{-\frac{(\frac{\pi}{2} - \alpha_0)}{2}} \int_{-d_c}^0 \frac{e^{\frac{z'}{\delta}} (z-z') \sin(-\alpha)}{\{(x-R \sin \alpha)^2 + (y-R \cos \alpha)^2 + (z-z')^2\}^{3/2}} dz' d\alpha \quad (4)$$

$$+ \int_{\frac{(\frac{\pi}{2} - \alpha_0)}{2}}^{\frac{(\frac{\pi}{2} + \alpha_0)}{2}} \int_{-d_c}^0 \frac{e^{\frac{z'}{\delta}} (z-z') \sin(-\alpha)}{\{(x-R \sin \alpha)^2 + (y-R \cos \alpha)^2 + (z-z')^2\}^{3/2}} dz' d\alpha$$

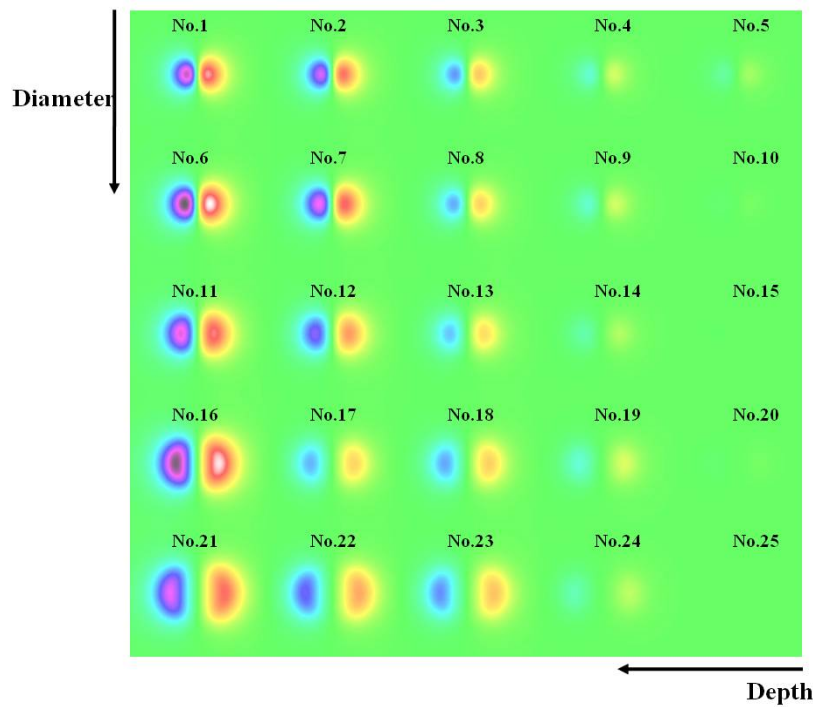
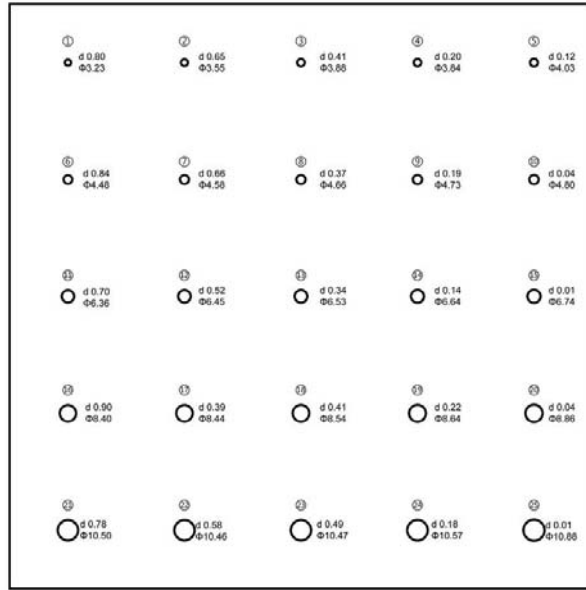


Fig. 2-3 원주형 결함에 대한 Dipole 모델 해석결과 영상



(a) Dipole 모델 해석에 이용된 이면부식 시험편



(b) O형 자화기



(c) O+α형 자화기

Fig. 2-4 Dipole 모델 해석에 이용된 시험편 및 자화기

Fig. 2-3은 Eq(4)에 의하여 계산되는 다이폴 모델식에 실제 이면부식 시험편(Fig. 2-4(a))과 O형 자화기(Fig. 2-4(b,c))를 도입하여 시뮬레이션한 결과이다. 영상에서도 보여지듯이 결함의 양선단에 와전류가 집중하여 최대 및 최소값이 나타난다. 또한, 직경이 커질수록 깊이가 깊어질수록 자하의 최대값과 최소값의 분포 또한 커지는 것을 알 수 있다. 한편, 다이폴 모델법은 유도면전류(STIC)의 경우에만 가능하다. 항공기의 경우 알루미늄 합금(상자성체)의 다중구조로 이루어졌으며, 유도전류에 의해 결함을 탐상해야 하므로 O형 및 O+α형 자화기가 유도면전류와 유사하다고 판단하여 이상의 다이폴 모델법을 적용하였다.

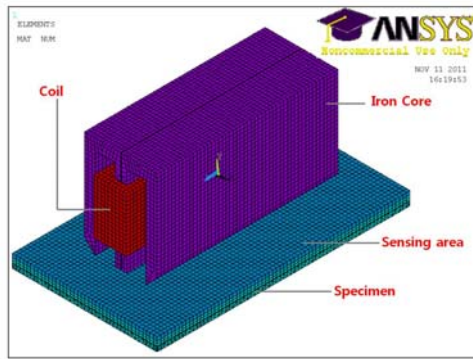
제 2절 유한요소해석(Finite Element Method)에 의한 다중 구조물의 이면부식 결함 수치해석

항공기 다중구조물의 이면부식 결함을 검출하기 위해서는 보다 많은 양의 유도전류를 피측정체에 인가해야 한다. 본 연구에서는 많은 양의 유도전류를 인가해 주기 위해서 다음과 같이 다양한 형태의 자원을 개발하였다.

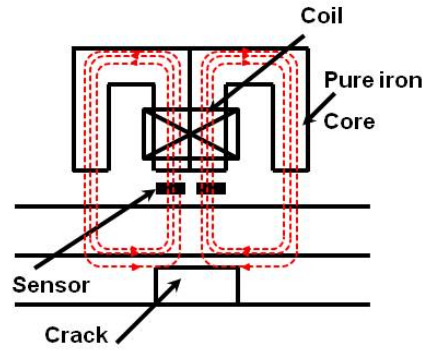
M형 자화기는 Fig. 2-5에 나타난 바와 같이 순철(pure iron)을 가공한 2개의 n형 코어를 맞대고, 그 부분에 코일을 약 1,200회 권선하였다. M_s형 자화기(Fig. 2-6)는 0.35mm 두께의 실리콘 강판을 와이어가공으로 n형상을 만들어 에폭시수지로 연결하여 제작하였다. M형과 마찬가지로, 맞대는 부분에 코일이 감겨있다. O형 자화기 Fig. 2-7의 O형 자화기는 O형 형상으로 M_s형 자화기와 마찬가지로 실리콘 강으로 제작되었으며, 구리선에 의해 약 1,220회 권선하였다.

Fig. 2-8은 O+ α 형 자화기로서, O형 자화기와 더불어 수직방향으로 전자기장을 인가할 수 있는 제2코일을 도입하였다. 제2코일은 약 350회 권선하였다. 각 자화기의 코일에 교류전류를 인가하면, 코어에 자기장(Magnetic flux)이 발생되며, 이에 기인하여 시험편에 유도전류(Induced current)가 발생된다. 결함의 존재에 의한 유도전류의 왜곡 및 자기장의 분포가 변화하게 된다. 자기장의 분포를 측정함으로써, 결함의 유무, 위치 및 크기를 추정할 수 있게 된다[16,17].

한편, 각 자원들의 형태에 따른 다중구조물의 이면부식 해석을 위하여 ANSYS Program(Ver. 11.0 SPI UP20070830, EMGA)에 의한 유한요소해석을 수행하였다. 각 자화기의 물리적 특성 및 요소의 크기는 Table 2-1~Table 2-4에 정리하였다.



(a) 3차원 모델링



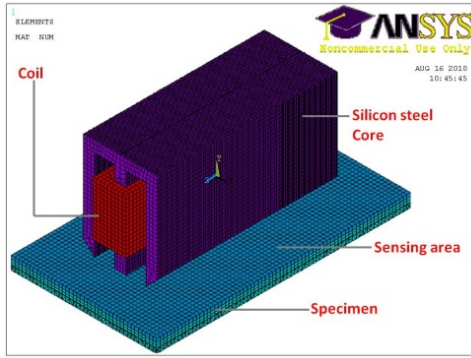
(b) 자화기 단면

Fig. 2-5 M형 자화기의 수치해석 모델링

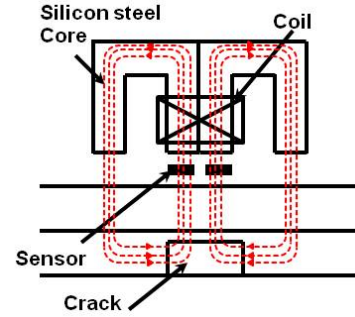
Table 2-1 M형 자화기의 각 요소 물리적 특성 및 크기

Item	Material	Magnetic Properties	Size [mm]	Meshing size[mm]	ANSYS model type
Specimen (Top)	Aluminum	MURX1.000022 RSVX 2.82e-8	40 × 70 × 1.3	1	SOLID117
Specimen (Under)	Aluminum	MURX1.000022 RSVX 2.82e-8	40 × 70 × 1.2	1	SOLID117
Core	Pure Iron	MURX 5000 RSVX 1e-7	10 × 0.5 × 25 Two cores	1	SOLID117
Coil AC	Copper	MURX 1	21 × 28 × 11 1200 turns × 0.07A	1	SOLID117
Gap between two specimen	Air	MURX 1	40 × 70 × 0.1	1	SOLID117
Sensing area	Air	MURX 1	40 × 70 × 1	1	SOLID117
Crack	Air	MURX 1	φ5 × 1	1	SOLID117
Environment	Air	MURX 1	50 × 80 × 45	3	SOLID117

MURX : 상대투자율(Relative Permeability), RSVX는 전기전도율(Electrical Conductivity)



(a) 3차원 모델링

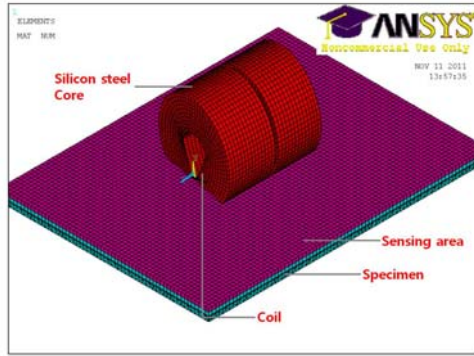


(b) 자화기 단면

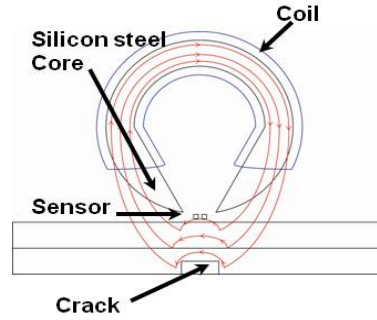
Fig. 2-6 M_S형 자화기의 수치해석 모델링

Table 2-2 M_S형 자화기의 각 요소 물리적 특성 및 크기

Item	Material	Magnetic Properties	Size [mm]	Meshing size[mm]	ANSYS model type
Specimen (Top)	Aluminum	MURX1.000022 RSVX 2.82e-8	40 × 70 × 1.3	1	SOLID117
Specimen (Under)	Aluminum	MURX1.000022 RSVX 2.82e-8	40 × 70 × 1.2	1	SOLID117
Core	Silicon Steel	MURX 4000 RSVX 4.72e-8	10 × 0.5 × 25 Two core with 100 sides of each	1	SOLID117
Coil AC	Copper	MURX 1	21 × 28 × 11 1200 turns × 0.07A	1	SOLID117
Gap between two specimen	Air	MURX 1	40 × 70 × 0.1	1	SOLID117
Sensing area	Air	MURX 1	40 × 70 × 1	1	SOLID117
Crack	Air	MURX 1	φ5 × 1	1	SOLID117
Environment	Air	MURX 1	50 × 80 × 45	3	SOLID117



(a) 3차원 모델링

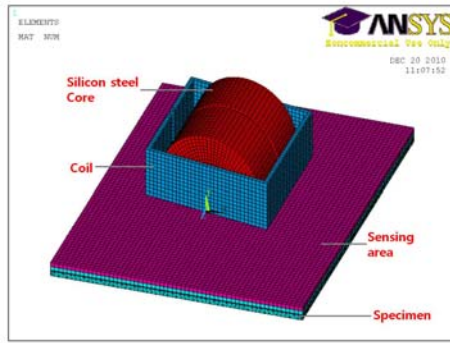


(b) 자화기 단면

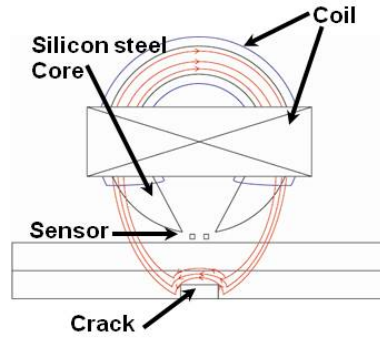
Fig. 2-7 O형 자화기의 수치해석 모델링

Table 2-3 O형 자화기의 각 요소 물리적 특성 및 크기

Item	Material	Magnetic Properties	Size [mm]	Meshing size[mm]	ANSYS model type
Specimen (Top)	Aluminum	MURX1.000022 RSVX 2.82e-8	40 × 70 × 1.3	1	SOLID117
Specimen (Under)	Aluminum	MURX1.000022 RSVX 2.82e-8	40 × 70 × 1.2	1	SOLID117
Core	Silicon Steel	MURX 4000 RSVX 4.72e-8	φ10 × 0.35 40 slides of each	1	SOLID117
Coil AC	Copper	MURX 1	25 × 30 × 20 1220 turns × 0.06A	1	SOLID117
Gap between two specimen	Air	MURX 1	40 × 70 × 0.1	1	SOLID117
Sensing area	Air	MURX 1	40 × 70 × 1	1	SOLID117
Crack	Air	MURX 1	φ5 × 1	1	SOLID117
Environment	Air	MURX 1	80 × 90 × 60	5	SOLID117



(a) 3차원 모델링



(b) 자화기 단면

Fig. 2-8 O+α형 자화기의 수치해석 모델링

Table 2-4 O+α형 자화기의 각 요소 물리적 특성 및 크기

Item	Material	Magnetic Properties	Size [mm]	Meshing size[mm]	ANSYS model type
Specimen (Top)	Aluminum	MURX1.000022 RSVX 2.82e-8	40 × 70 × 1.3	1	SOLID117
Specimen (Under)	Aluminum	MURX1.000022 RSVX 2.82e-8	40 × 70 × 1.2	1	SOLID117
Core	Pure Iron	MURX 4000 RSVX 4.72e-8	φ10 × 0.35 40 slides of each	1	SOLID117
Coil AC	Copper	MURX 1	25 × 30 × 20 1220 turns × 0.06A	1	SOLID117
Coil DC	Copper	MURX 1	33 × 38 × 12 350 turns × 0.15A		
Gap between two specimen	Air	MURX 1	40 × 70 × 0.1	1	SOLID117
Sensing area	Air	MURX 1	40 × 70 × 1	1	SOLID117
Crack	Air	MURX 1	φ5 × 1	1	SOLID117
Environment	Air	MURX 1	80 × 90 × 60	8	SOLID117

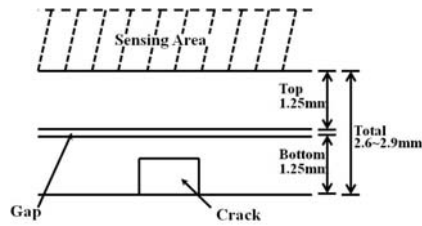


Fig. 2-9 이면부식 시험편의 단면도

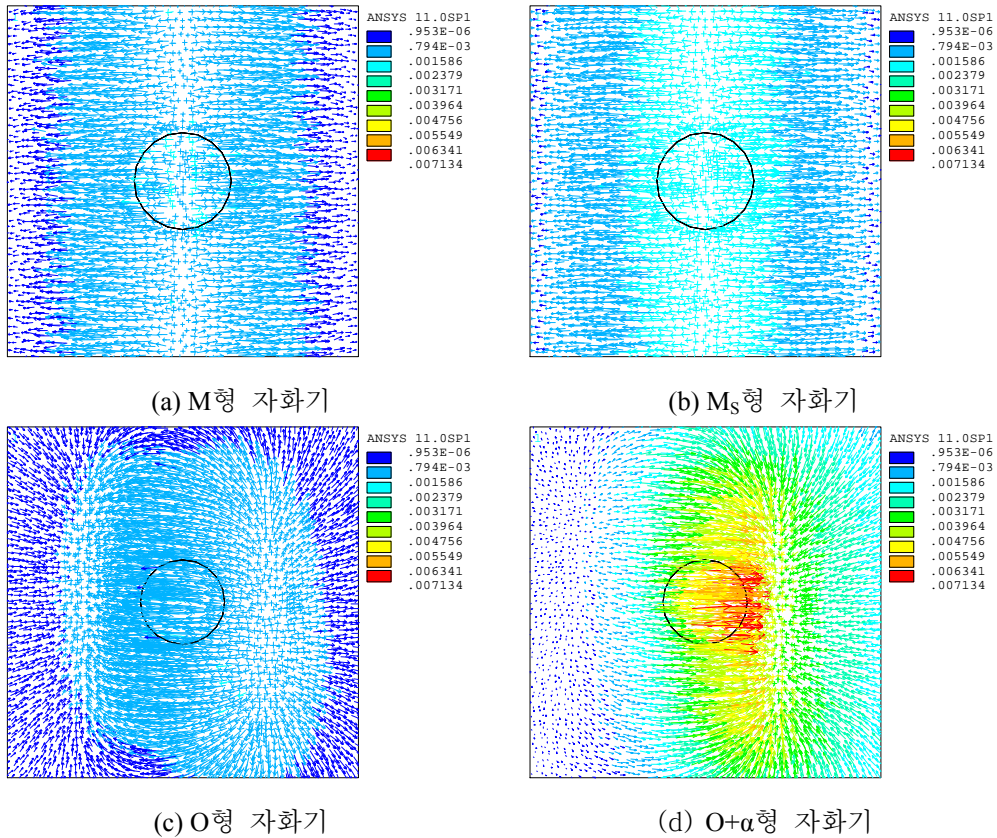


Fig. 2-10 각 자원들의 자기장 해석

Fig. 2-10은 각 자원들의 자기장 해석 및 수치에 따른 범위를 나타낸다. 이는 코일에 교류전류 인가시 생성된 자기장을 시험편과 1mm의 Lift-off를 가지는 센서 면에서 바라본 자기장의 모습이다. 시험편(Fig. 2-9)은 두께 1.25mm의 알루미늄 합금 2장으로 이루어졌으며, 그 이면에 직경 5mm, 깊이 1mm의 인공결함이 도입되었

다. 자기장의 해석결과는 보다 이해를 용이하게 하기 위하여 색깔별로 고정하였다. 즉, 오른쪽의 상단에 청색은 낮은 자기장, 황색 또는 적색은 높은 자기장을 나타낸다. M, Ms, O형 자화기 보다는 O+ α 형 자화기의 결함 주변에 적색의 분포가 많은 것으로 보아, 이는 곧 시험편에 많은 양의 자기장이 유입되는걸 알 수 있다.

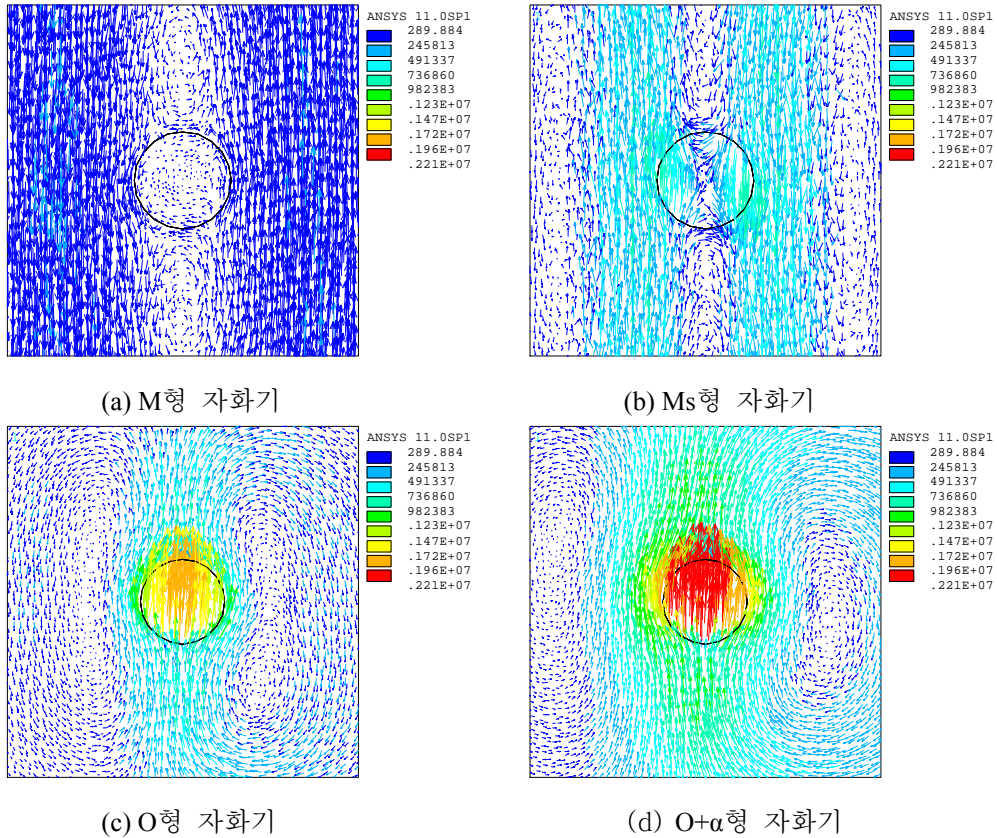


Fig. 2-11 각 자원들의 전기장 해석

Fig. 2-11은 시험편에 유입된 자기장에 의해 유도된 각 자원들의 전기장 해석 및 수치에 따른 범위를 나타낸다. 자기장 수치해석과 마찬가지로 상단에 청색은 낮은 전기장을 적색은 높은 전기장으로 고정하였다. M, Ms형 자화기 보다는 O, O+ α 형 자화기의 결함주변에 유도전류의 흐트러짐과 적색의 분포가 많은 것으로 보아, 자기장이 이면에 존재하는 결함까지 침투했음을 알 수 있다.

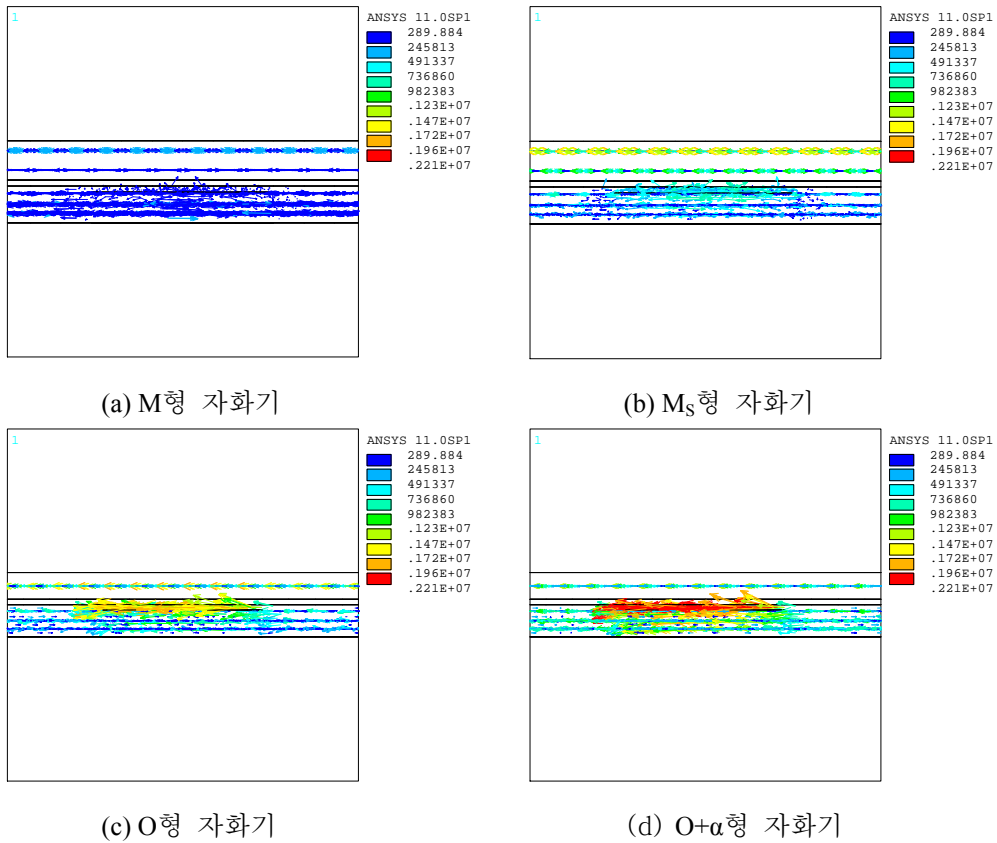


Fig. 2-12 각 자원들의 침투깊이 수치해석

자화기 형태에 따른 자기장의 침투깊이 수치해석을 위해 Fig. 2-12에 나타낸 바와 같이 시험편의 단면방향으로 전기장 분포를 해석하였다. M, M_S 형 자화기 보다 O, $O+\alpha$ 형 자화기의 시험편 이면에 전기장이 높은 황색 및 적색 분포가 많다. 이는 곧 자기장이 멀리 침투하여 유도되어 이면에 존재하는 결합주위에 유도전류가 흐트러졌음을 증명한다. 결과적으로 이면부식 결함을 탐상하는데 O형, $O+\alpha$ 형 자화기가 유리함을 알 수 있다. 한편, $O+\alpha$ 형 자화기의 경우 DC 자기장에 의한 바이어스 자장으로 인해 전기장의 적색 분포가 많다.

제 3장 기초 실험

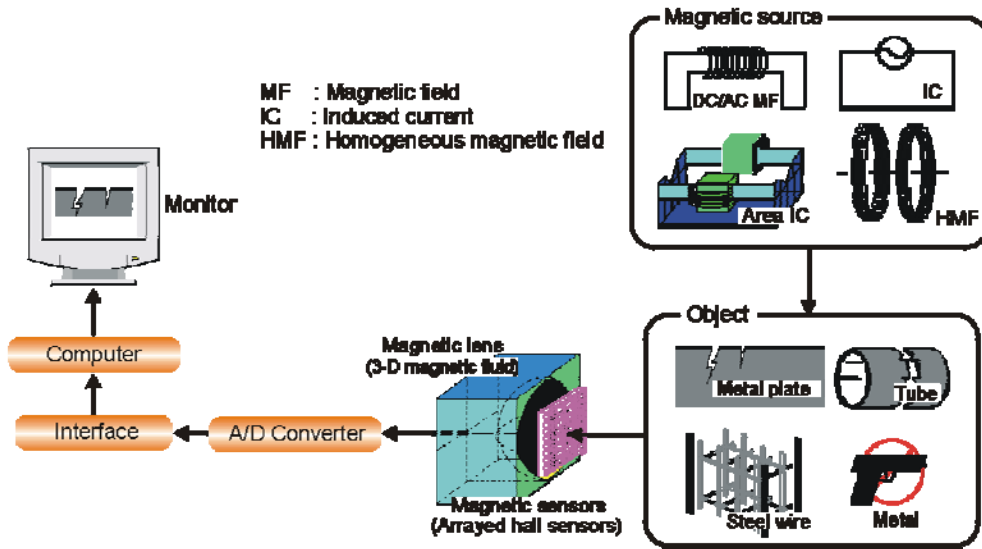


Fig. 3-1 자기카메라

자기카메라는 Fig. 3-1에 나타난 바와 같이 자원, 자기렌즈, 자기센서배열, 신호처리 회로 및 AD변환기, 인터페이스, 소프트웨어 및 디스플레이로 구성된다.

자원(magnetic source)으로부터 피측정체에 전자기장을 인가하고, 피측정체에 형상, 크기, 투자율, 도전을 또는 결함의 유무에 의하여 발생하는 전자기장의 왜곡을 자기렌즈(magnetic lens)[18]에 집속 또는 전송한다. 집속된 전자기장은 자기센서배열을 통해 측정되고, 측정된 전기신호를 신호처리회로에 의하여 증폭, 필터링, 추출을 한다. 아날로그 신호를 A/D변환기를 통해 디지털 신호로 변환하여 인터페이스를 통해 컴퓨터에 입력된다. 입력된 전자기장의 분포는 소프트웨어를 통해 저장, 연산되어 표현된다. 본 장에서는 장기운영 항공기 다중구조물의 결함을 검출하기 위하여 자체적으로 개발한 자원, 자기센서배열, 신호처리회로 등을 설명하고 부식결함 탐지기법을 소개한다.

제 1절 자원

본 연구의 목적인 다중구조물의 이면부식을 검출하기 위해서 자원의 선택이 중요하다. 항공기의 특성상 알루미늄 합금에 의한 상자성체 재료로 만들어지므로 유도전류를 이용하였다. 또한 이면부식 결함을 검출하기 위해 보다 많은 양의 유도전류를 피측정체에 인가해야 하므로, 앞장에서 상술한 바와같이 FEM에 의한 수치 해석 결과를 토대로 다양한 형태의 자원(Magnetic Source)을 제작하였다.

M형 자화기는 Fig. 3-2(a)에 나타낸 바와 같이 투자율이 높은 순철(pure iron)을 가공한 2개의 n형 코어를 맞대고 코일에 의하여 전자기장을 인가하면, 수직 전자기장에 의한 원형 전기장이 시험편표면에 발생한다. 순철의 경우, 지속적인 교류자화에 의한 발열이 센서 결함 탐상능력에 영향을 미친다. 따라서, 보다 낮은 구동전류에서도 보다 높은 전자기장의 유도가 가능한 실리콘강(Silicon Steel)에 의한 M_S형 자화기(Fig. 3-2(b))를 구현하였다. M_S형 자화기는 M형 자화기보다 강력한 자기장을 인가할 수 있을 것으로 기대하여 제작하였으나, M형 또는 M_S형 자화기는 모서리부가 많은 관계로 자속의 누설이 많다. 따라서, 결과적으로 비교적 적은 전자기장이 유도될 수 있으므로, 이를 개선하기 위하여 모서리부가 없는 O형 자화기(Fig. 3-2(c))를 도입하였다. O형 자화기는 M형과는 달리 전자기장을 시험편의 표면방향으로 인가하며, 특히 센서배열방향과 평행하게 유도전류를 인가할 수 있다. 또한, 결함의 방향에 관계없이 검출할 수 있도록 경사형($\theta_s=10^\circ$)으로 배열하였다. O+ α 형 자화기(Fig. 3-2(d))는 종래의 O형 자화기와 더불어 수직방향 전자기장을 인가할 수 있는 제2코일을 도입, 결과적으로 전자기장을 보다 멀리 보낼 수 있어, 이면부식 탐상에 유리하다.



(a) M형 자화기



(b) Ms형 자화기

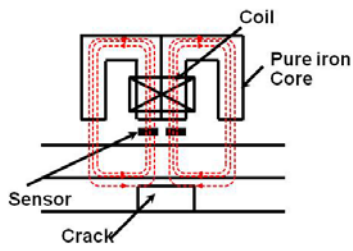


(c) O형 자화기

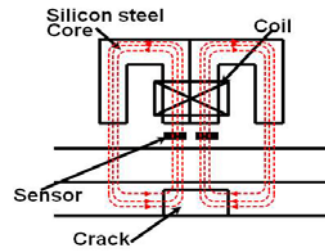


(d) O+α형 자화기

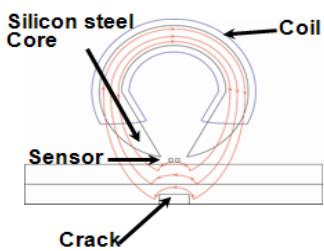
Fig. 3-2 다양한 자원형태의 실물사진



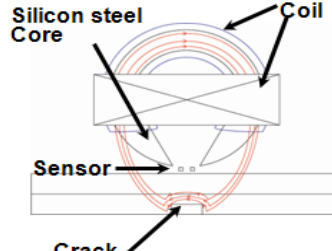
(a) M형 자화기



(b) Ms형 자화기



(c) O형 자화기



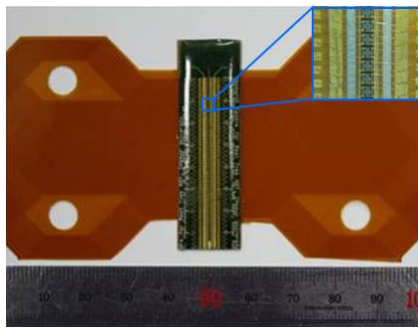
(d) O+α형 자화기

Fig. 3-3 다양한 자원형태의 원리

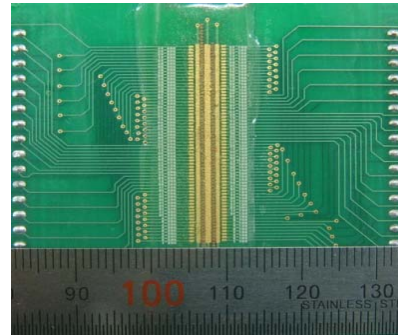
한편, 각 자화기의 코일에 인가하는 교류전원의 주파수는 (1) 센서의 주파수 특성, (2) High Pass Filter의 cut-off 주파수와 Q값 특성, (3) 증폭회로 및 RMS회로의 주파수 특성, (4) 결합탐상능력, (5) 발열, (6) 표면침투깊이, (7) 교류전원의 성능대비 가격을 종합적으로 고려하였다. 결합탐상능력은 얼마나 높은 유도전류를 피측정체에 인가할 수 있는가에 의하여 결정된다. 높은 주파수의 교류전류를 자화기의 코일, 즉 인덕터에 인가할 때 전압상승의 원인이 되며, 결과적으로 같은 전력을 사용할 때 전류의 세기가 약화된다. 높은 주파수에서 동일한 결합탐상능력을 획득하기 위해서는 보다 높은 전력을 인가해야 하며, 결과적으로 코일 및 코어의 온도상승의 원인이 된다. 본 연구에서 활용하고 있는 홀센서는 온도변화에 민감하므로, 높은 주파수는 사용하기 곤란하다. 교류전류의 표면침투깊이(Skin Effect)는 주파수에 영향을 받으며, 높은 주파수일수록 침투깊이가 얕아진다. 상기와 같이 교류 전원의 주파수에 영향을 미치는 다양한 요인들을 종합적으로 고려하여, 본 연구에서는 1KHz 이하의 주파수를 적용하여 실험을 하였다.

제 2절 센서배열

상술한 바와 같이 각 자원의 특성상, Single형 센서(Fig. 3-4(a))와 Differential형 센서(Fig. 3-4(b))를 선택적으로 도입하였다. Single형은 NiZn ferrite 웨이퍼에 64개의 InSb 홀센서를 $520\mu\text{m}$ 간격으로 선형배열 (LIHaS, Linearly Integrated Hall Sensors Array)하였다[19]. 스캔방향은 LIHaS의 배열방향과 수직이며, 자기감도는 시험편 표면의 법선방향으로 가장 우수하다. Differential형 LIHaS[20]는 상기 Single형 LIHaS를 2열로 배열한 것으로서, 그 간격은 1.2mm이다. 이러한 배열에 의하여, 간격이 1.2mm인 인접한 영역의 자기세기 차이를 검출 가능하다. 또한, M형 또는 M_s 형 자화기에서 중앙부분 자극의 직하부(直下部)에 각 센서가 배열된다.

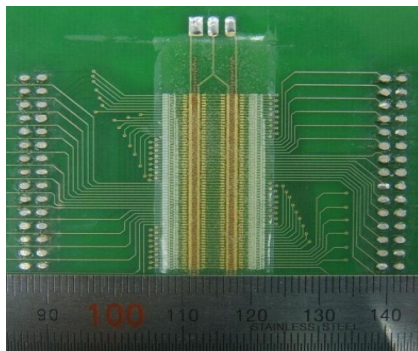


(a) Single형 센서(S-LIHaS)

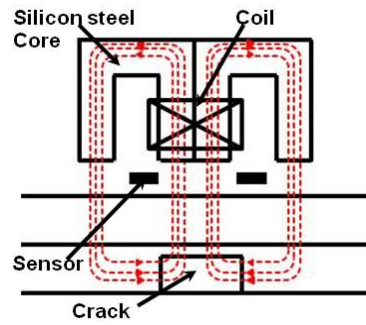


(b) Differential형(D-LIHaS)

Fig. 3-4 선형 배열된 홀센서



(a) Differential- Δx 형 센서

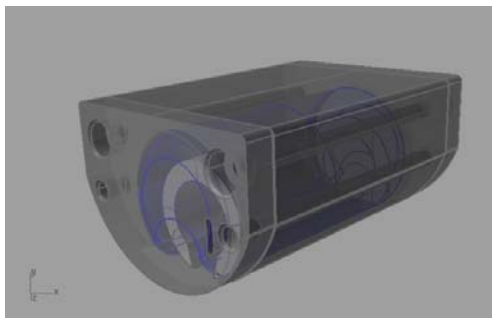


(b) Differential- Δx 형 센서 원리도

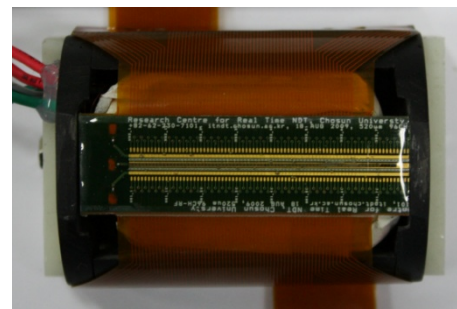
Fig. 3-5 Differential- Δx 형 LIHaS

Differential- Δx 형 LIHaS(Fig. 3-5)는 상기 Differential형 LIHaS의 2열의 간격을 5mm로 늘려 제작한 것이다. 따라서, Differential형과는 차별화되어, 각 자화기의 자극의 직하부에 위치하지 않으므로 자화기의 발열에 의한 센서감도의 저하를 피할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

한편, 인테이크 형상(즉, 배관내부)에 따른 국부적인 lift-off의 차이를 최소화하고, 자화기 및 LIHaS의 상대적인 위치 변화를 최소화하기 위하여, 최종실험에는 Fig. 3-6에 나타낸 바와 같이 자화기 및 LIHaS를 일체화하였다.



(a) 자화기 패키지모델



(b) 일체화한 센서부 실물사진

Fig. 3-6 자화기 및 LIHaS의 일체화

제 3절 신호처리회로

홀센서의 경우에는 2개의 입력단자와 2개의 출력단자로 구성된다. 입력단자에 정전압 또는 정전류 구동에 의하여 전기장을 인가하고, 센서면의 법선방향으로 자기장을 인가하면, 출력단자간의 전압차가 자기장의 세기에 비례하여 증가한다. 따라서, 자기장의 세기를 정량적으로 측정하기 위해서는 차동증폭회로가 필요하게 된다. 그리고 필요한 주파수대역대의 신호를 추출하거나 잡음을 제거하기 위해서는 고대역통과필터(HPF, high pass filter)와 저대역통과필터(LPF, low pass filter)를 적절히 이용해야 한다. 또한, 자원이 교류전류에 의하여 구동되는 CIC-MFL[21-22]에서는 센서에 출력되는 신호가 교류전류의 주파수와 동일하게 되므로 위상차, 진폭변화, 최대치변화 등이 결함의 존재 및 크기와 관련있는 유효한 정보가 된다.

정자기장을 가시화하는 자기카메라는 이러한 누설 자속 분포에 따른 홀센서의 출력전압 즉, 전위 차이를 차동식 연산증폭기(OP-Amp)를 이용하여 측정한다. 고정밀 차동 증폭을 위하여 높은 동상신호제거비(CMRR, Common Mode Rejection Ratio)를 갖는 INA128를 도입한 회로를 이용하고 있다. INA128는 한 개의 외부 저항(R_G)을 연결하는 것만으로도 쉽게 0~80dB의 이득값을 얻을 수 있으며, 차동 증폭회로에 연결되는 두 개의 전압 플로어(A_1, A_2)들은 높은 입력 임피던스를 갖는다. 한편, 차동 증폭회로의 이득은 Eq. (2)와 Fig. 3-7에 나타낸 바와 같이 $R_5 = R_7, R_8 = R_9$ 일 때 R_5 과 R_8 에 의하여 결정된다.

$$\begin{aligned}
 Gain &= \frac{R_8}{R_5} \left(1 + \frac{2R_4}{R_G} \right) = \frac{40k\Omega}{40k\Omega} \left(1 + \frac{2 \cdot 25k\Omega}{R_G} \right) \\
 &= 1 + \frac{50k\Omega}{R_G}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

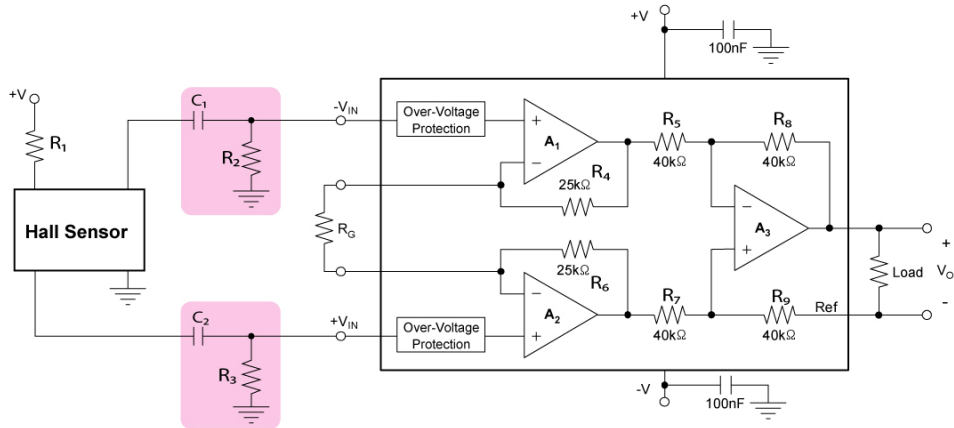


Fig. 3-7 INA128을 이용한 홀센서 신호의 교류증폭회로도

Fig. 3-7은 본 연구에서 활용한 교류증폭 회로도를 나타낸다. 교류증폭은 교류 경사형 자화기와 같은 교류자원을 시험편에 인가하고, 결함주변에서 발생하는 교류 누설자속 및 전기장의 왜곡에 의하여 발생하는 교류형 자기장의 세기를 검출할 때 유효하게 사용될 수 있다. 본 연구에서는 홀센서 양 선단에 각각 수동소자에 의하여 구성되는 고대역통과필터(HPF, High-Pass-Filter, Fig. 3-7의 붉은 색 부분)를 도입하여 교류형 자화기 및 결함의 존재에 기인한 교류 신호만을 추출하였다.

이러한 교류 증폭은 Eq. (2)에 나타난 식으로 표현할 수 있으며, R_G 의 수치에 의하여 그 증폭비를 조절할 수 있다. 또한, C_1 , C_2 , R_2 , R_3 에 의하여 조절되는 차단주파수(f_c)는 Eq. (3)에 의하여 표현될 수 있다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3)$$

한편, 상술한 방법에 의하여 증폭한 교류신호의 진폭은 결함의 크기와 밀접한 관계를 가진다. 따라서, 진폭을 정량적으로 측정하는 것은 결함의 위치 및 크기를 추정하기 위한 매우 중요한 기술 중 하나이다. 특히, A/D 변환을 하여 마이크로프로세서 또는 컴퓨터에 입력하려면 이러한 진폭을 직류신호로 변환해야 한다. 본 연

구에서는 교류 자기장의 진폭을 직류신호로 변환시키기 위하여 Fig. 3-8에 나타낸 바와 같은 교류-직류변환회로를 도입하였다.

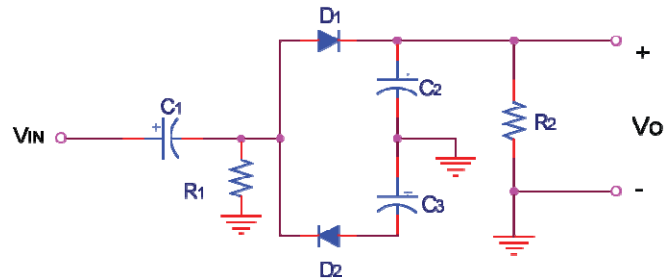


Fig. 3-8 교류-직류신호 변환 회로

결함으로부터 발생한 누설 자속 분포는 배열된 자기센서 및 차동 증폭회로, 아날로그 HPF에 의하여 높은 신호대 잡음비(Signal to Noise Ratio, S/N)를 가진 전기신호의 분포로 변환된다. 변환된 전기신호의 배열은 A/D 변환기와 마이크로프로세서에 의하여 저장, 연산 및 처리 된다. 본 연구에서는 Fig. 3-9에 나타낸 바와 같이 13bit 연속 근사 레지스터(Successive Approximation Register, 이하 SAR) A/D변환기인 Analog Devices사의 AD7329를 전용 A/D변환기로 채택하였다. AD7329는 SAR를 사용하여, 값을 순차적으로 증가시키는 것이 아니라 최상위 bit부터 순서대로 하위 bit 방향으로 D/A변환기를 통해 비교기에서 값을 비교, 수정하여 아날로그 입력 전압에 근사시키는 방식이다. 다른 A/D 변환기에 비해 구성회로가 간단하고, 비교적 빠른 변환 시간과, 입력 신호에 가장 가까운 디지털 신호를 생성시킬 수 있다는 장점이 있다. 또한, 최대 $\pm 10V$ 바이폴라 입력에 8:1 입력 멀티플레서를 갖춰 8채널을 디지털화할 수 있고, 고속 시리얼 인터페이스를 갖추고 있어 전반적인 시스템 공간을 최소화하고 채널 밀도를 증가시킬 수 있다. 본 연구에서 구성한 A/D변환기는 ± 1 LSB 오차와 1MS/S의 변환시간을 가지며, $\pm 10V$ 입력에 2.441mV의 분해능을 가진다.

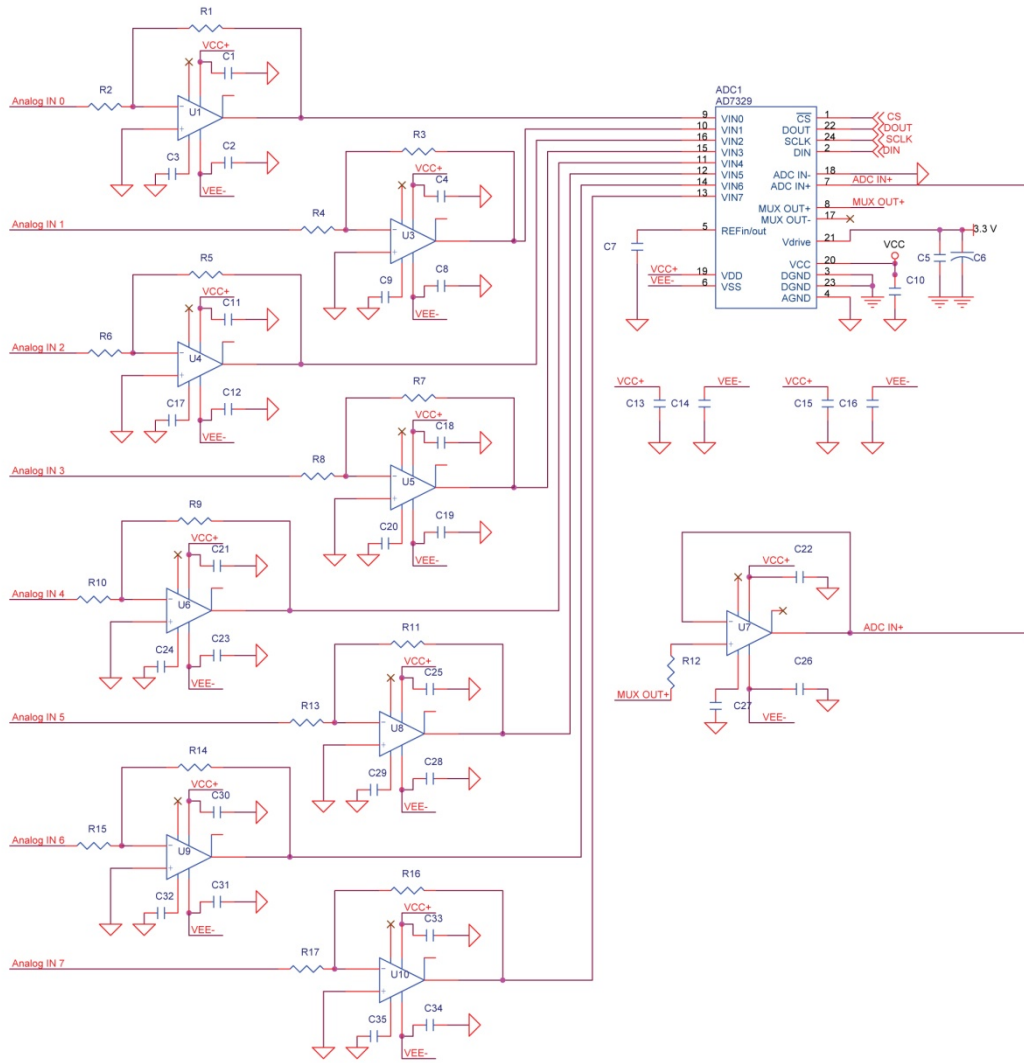


Fig. 3-9 A/D 변환기 회로

제 4절 이면부식 결함 시험편

앞절에서 상술한 바와 같이 자화기 및 각 LIHaS에 의한 결함 탐상 능력을 확인하기 위하여, 다음과 같은 다중 구조물의 이면에 여러 가지 직경 및 깊이를 가지는 인공결함을 도입하여 실험하였다. 재료는 알루미늄합금(Al7075)이며, 두께 1.25mm의 두 판재를 겹쳐서 다중 구조물을 모사하였고, 전체 두께는 2.6~2.9mm로서, 이면에 직경 3.23~10.88mm, 깊이 0.01~0.90mm인 부식을 모사한 인공결함을 밀링가공하여 도입하였다. 실험은 부식결함이 이면에 위치하도록 하고, 결함이 없는 부분(표면)에서 자화기 및 LIHaS에 의하여 스캔하여 자기장의 분포 및 영상을 획득하였다. 25개의 이면결함에는 Fig. 3-10에 표기한 바와 같이 번호를 지정하였다. 각각의 결함 정보를 Table 3-1에 정리하였다.

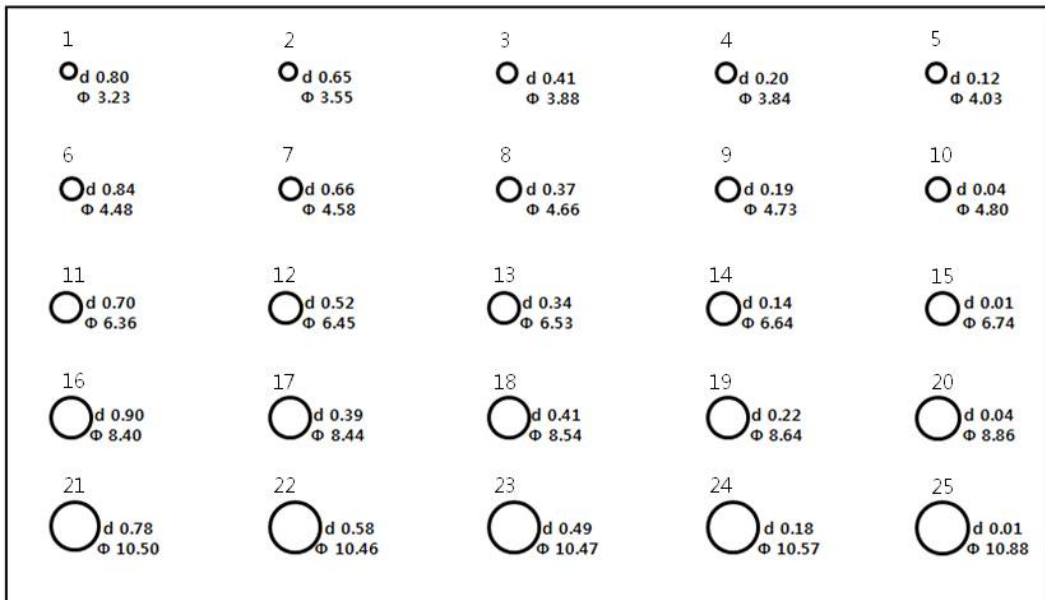


Fig. 3-10 이면부식 결함 시험편

Table 3-1 원형 인공결함의 크기

Crack No.	Diameter [mm]	Depth [mm]	Crack No.	Diameter [mm]	Depth [mm]
1	3.23	0.80	14	6.64	0.14
2	3.55	0.65	15	6.74	0.01
3	3.88	0.41	16	8.40	0.90
4	3.84	0.20	17	8.44	0.39
5	4.03	0.12	18	8.54	0.41
6	4.48	0.84	19	8.64	0.22
7	4.58	0.66	20	8.86	0.04
8	4.66	0.37	21	10.50	0.78
9	4.73	0.19	22	10.46	0.58
10	4.80	0.04	23	10.47	0.49
11	6.36	0.70	24	10.57	0.18
12	6.45	0.52	25	10.88	0.01
13	6.53	0.34			

제 5절 실험 및 고찰

Table 3-2와 같은 실험조건에 의하여 각 자화기와 센서배열의 이면부식 탐상능력을 검토하였다. 300Hz의 차단주파수를 가지는 고대역 통과필터를 거쳐 고정밀 차동증폭에 의하여 증폭된 신호는 정량적 평가를 위하여 직류신호로 변환하여 취득하였다. LIHaS의 각 홀센서간 바이어스오차를 소거하기 위하여 스캔방향으로의 미분값, 즉 $\partial V/\partial x$ 를 획득 및 표현하였다.

Table 3-2 각 자화기의 특징 및 실험조건

Magnetic Source	Size[mm] L×W×H	Core	Frequency [Hz]	Coil Input Current [mA]	Sensor Input Current [mA]	Coil Turns
M type	40 × 27 × 16	Pure Iron Two cores	700Hz	AC 200 mA	DC 200 ~300 mA	1200
M _S type	40 × 27 × 16	Silicon steel 101 slides of each	900Hz	AC 70 mA	DC 200 ~300 mA	1200
O type	40 × ϕ 20	Silicon steel 101 slides of each	900Hz	AC 200 mA	DC 200 ~300 mA	1220
O+ α type	40 × ϕ 20	Silicon steel 101 slides of each	900Hz	AC 60 mA DC 150 mA	DC 200 ~300 mA	1220 350

Fig. 3-11은 한 예로서, O형 자화기와 Single형 LIHaS에 의하여 획득한 이면부식 자기영상을 나타낸다. 대부분의 결함이 검출되었으나, 깊이가 0.01mm인 결함은 판별하기 곤란하였다. 판별여부를 비교하기 위하여, 결함의 중심을 지나는 가상선(이하 Section View)에서의 $\partial V/\partial x$ 분포 및 신호대 잡음비(S/N비)를 지표로 활용, 도입하였다.

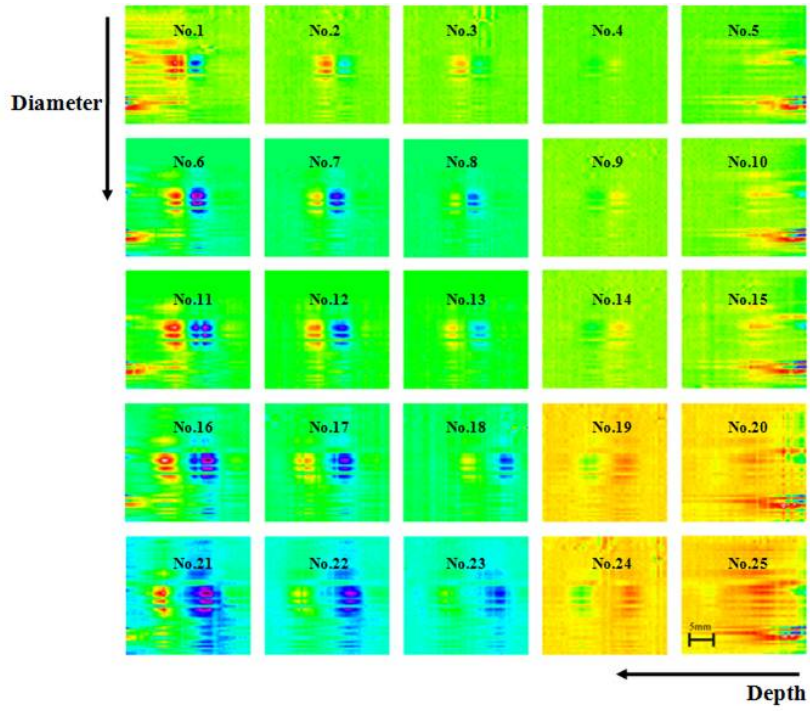


Fig. 3-11 $\partial V/\partial x$ 영상에 의한 이면부식의 판별

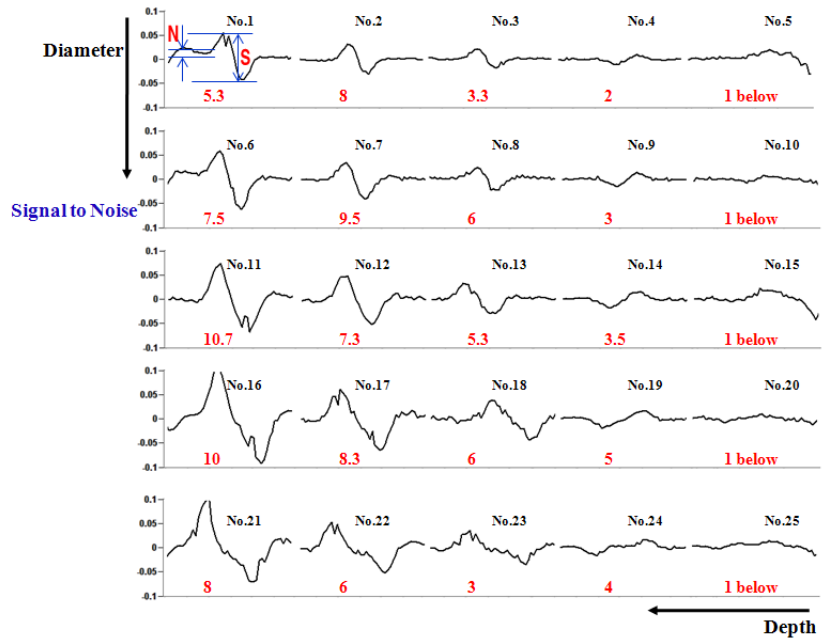


Fig. 3-12 각 결함영역에서 $\partial V/\partial x$ 의 분포

Fig. 3-12는 상기 자기영상에서 $\partial V/\partial x$ 의 분포를 정량적으로 평가하기 위하여 나타낸 Section View 영상이다. 결함의 존재를 나타내는 최대값과 최소값의 차이를 Signal로 하였으며, 잡음으로 판단되는 분포를 Noise로 상정하였다. 신호대 잡음비가 3이상인 것은 검출 가능, 2~3인 것은 모호, 2미만인 것은 탐지불가로 판별하였다. S/N비를 기호의 크기로 표현하고, 가능한 녹색, 모호는 황색, 불가능 적색으로 표현하였다. Fig. 3-13~Fig. 3-17은 각각 M형, M_S형, O형, O+ α 형 자화기와 Single형, Differential형 및 Differential- $\angle x$ 형 LIHaS에 의한 결함탐상능력, 즉 S/N비를 부식결함의 깊이 및 직경에 따라 도시한 결과이다. M형 자화기와 Differential형 LIHaS에 의한 결함탐상능력 결과는 Fig. 3-13에 나타낸 바와 같이 직경이 4mm 이상이면서 깊이가 0.35mm 이상인 다중구조물의 이면부식결함을 명확하게 검출할 수 있다. M_S형 자화기와 Differential형 LIHaS에 의한 결함탐상능력 결과는 Fig. 3-14에 나타낸 바와 같이 결함탐상능력이 개선되어 직경에 관계없이 깊이가 0.35mm 이상인 다중구조물의 이면부식결함을 보다 명확하게 검출할 수 있다. 결함의 직경을 고려하여, M_S형 자화기에 Differential- $\angle x$ 형 LIHaS(Fig. 3-5)를 도입한 결과는 Fig. 3-15에 나타낸 바와 같이 M_S형 자화기와 Differential형 LIHaS에 비하여 적색의 개수가 적어져 결함탐상능력이 향상된 것으로 판단할 수도 있으나, 전체적으로 S/N비의 크기가 작아져서 명확하게 검출할 수 있는 결함의 개수는 상대적으로 적어진다. 반면에 O형 자화기는 Fig. 3-16에 나타낸 바와 같이 결함탐상능력이 개선되어 직경에 관계없이 깊이가 0.15mm 이상인 다중구조물의 이면부식결함을 보다 명확하게 검출할 수 있다. O+ α 형 자화기와 Single형 LIHaS의 도입은 Fig. 3-17에 나타낸 바와 같이 황색으로 표현된 결함탐상여부가 모호한 이면부식의 개수는 적어지고, 녹색의 개수가 증가하여, 결함탐상능력이 개선된 것으로 판단할 수 있으나, S/N비의 절대적인 크기는 오히려 감소하고 있음을 알 수 있다.

이상의 실험결과와 FEM을 비교한 결과를 바탕으로 시제작은 O형 자화기와 Single형 LIHaS에 의한 일체형 센서부를 활용하여, 항공기 다중구조물의 이면결함 탐상을 실시하였다.

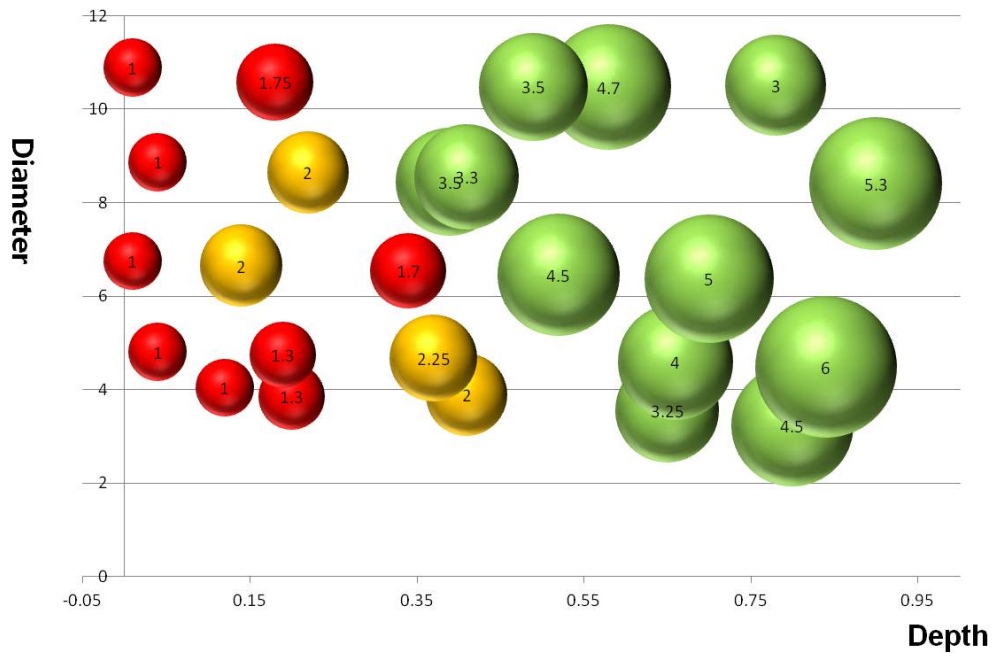


Fig. 3-13 M형 자화기 및 Differential형 LIHaS에 의한 결합탐상능력

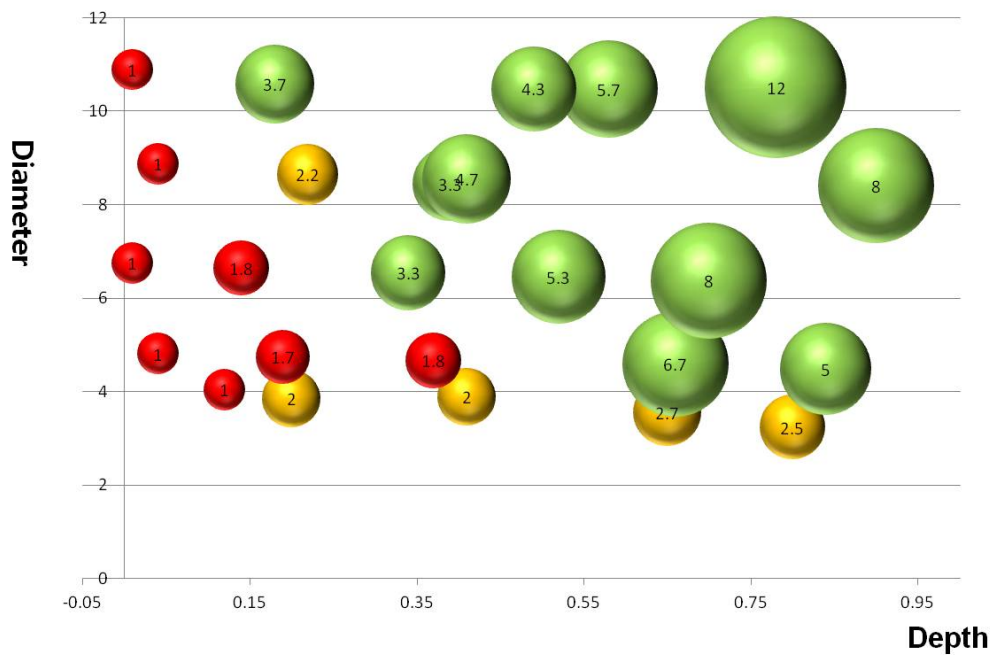


Fig. 3-14 Ms형 자화기 및 Differential형 LIHaS에 의한 결합탐상능력

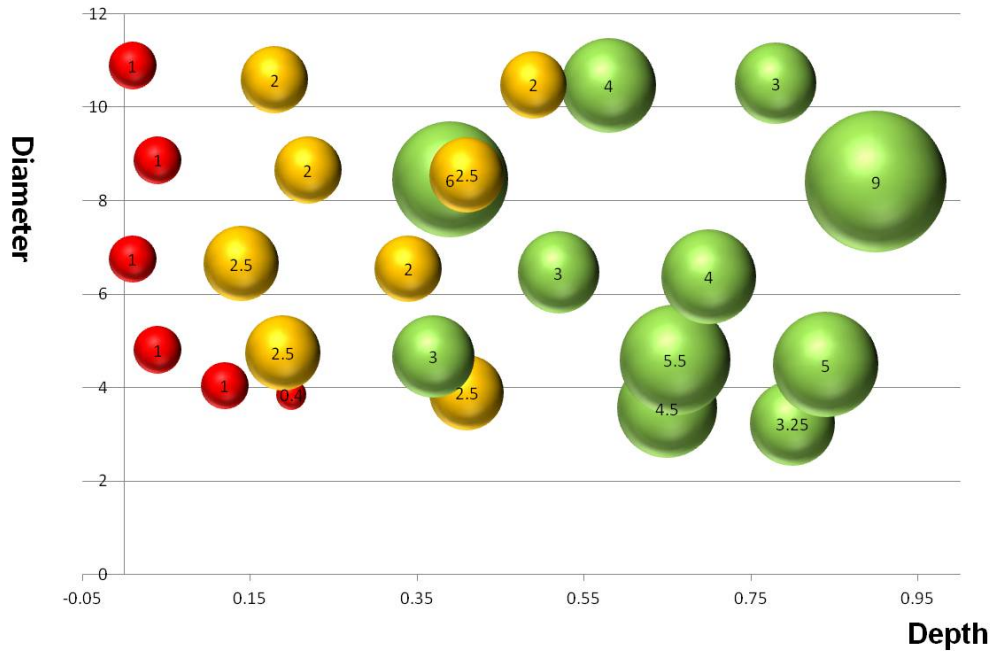


Fig. 3-15 Ms형 자화기 및 Differential-∠x형 LIHaS에 의한 결함탐상능력

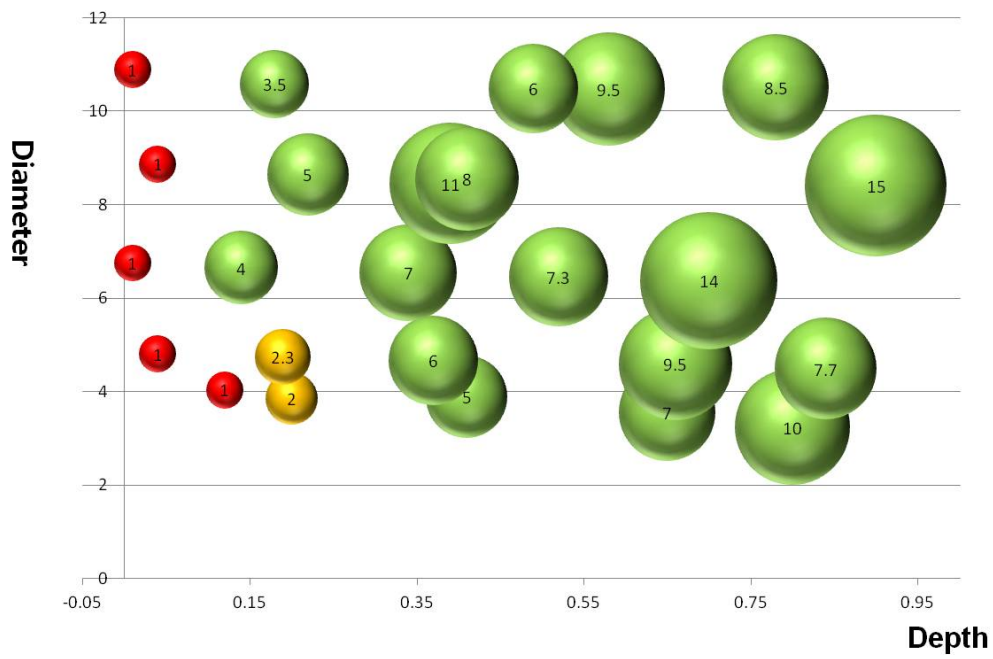


Fig. 3-16 O형 자화기 및 Single형 LIHaS에 의한 결함탐상능력

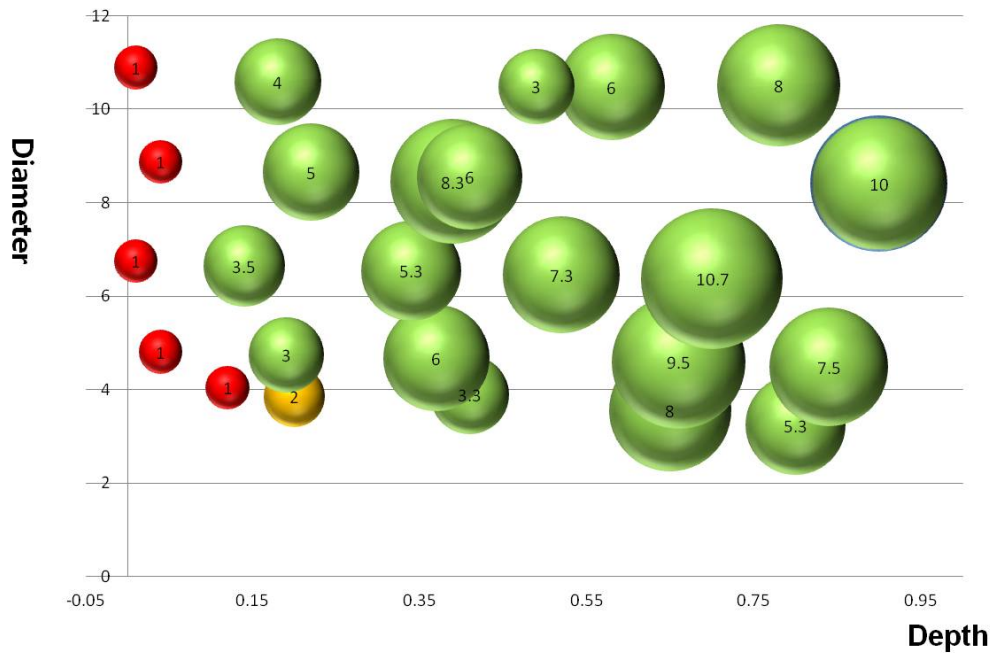


Fig. 3-17 O+ α 형 자화기 및 Single형 LIHaS에 의한 결합탐상능력

제 4장 F-5 인테이크 다중구조물 이면부식 탐상

제 1절 프로브 이송장치

상술한 원리에 의하여 항공기 공기흡입구내부와 같이 검사 부위가 협소하고 단면형상이 변하는 원통 구조물 내벽을 효율적으로 Scan할 수 있는 Probe 이송장치 (Fig. 4-1)를 개발하였다[23-24]. 이 시스템은 인테이크 모형 시험편의 이면부식 결함을 탐상하기 위하여, 다음과 같은 요소 및 소프트웨어로 구성된다.

- (1) 센서기구부
- (2) 이송부
- (3) 곡선배관대응기구부
- (4) 벽면지지기구부
- (5) 비원형대응기구부
- (6) 컨트롤 박스
- (7) 소프트웨어

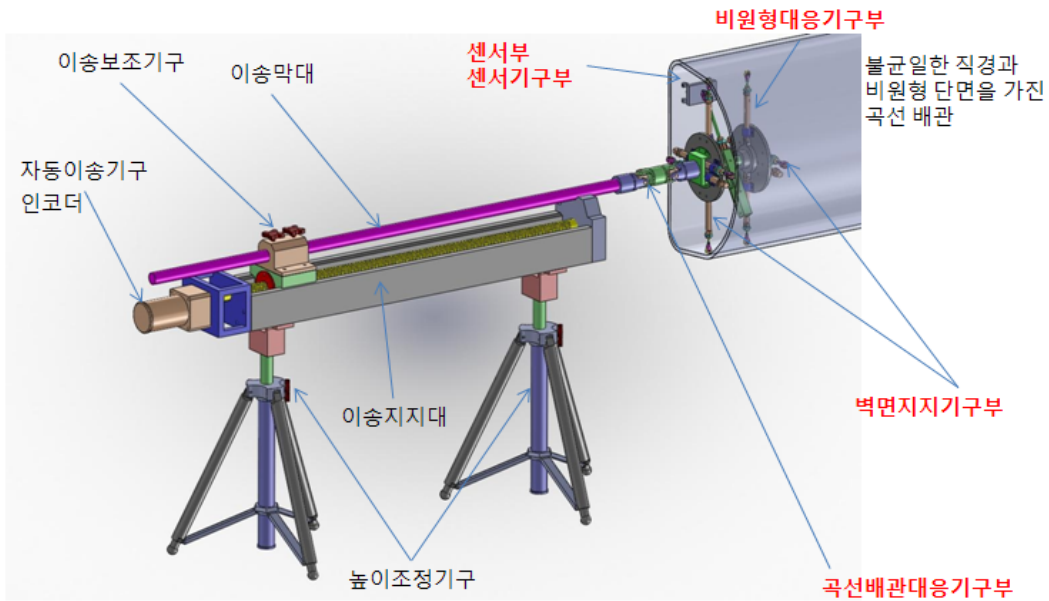


Fig. 4-1 프로브 이송장치

Fig. 4-2의 센서기구부는 일체화 된 O형 자화기와 Single형 LIHaS(이하 센서부, Fig. 3-6)를 비원형대응기구부의 선단에 설치하여, 센서부를 배관의 내벽에 밀착할 수 있다. $\pm 20^\circ$ 의 회전각도를 가지며, 고정기구와 바퀴에 의하여 구성되며, 센서부를 고정한다. 바퀴는 센서부를 배관 내벽과 일정한 높이로 유지하고, 피측정체 및 센서부를 보호하는 역할을 한다.

센서부는 센서기구부에 고정시켜, 불균일한 직경과 비원형 단면을 가지는 인테이크 내벽에 발생하는 결함을 탐상한다. Fig. 4-3의 카메라부는 광원과 함께 무선 CCD카메라를 설치하여, 현재 측정하고 있는 영역의 광학 영상을 자기카메라의 스캔영상과 함께 모니터로 실시간으로 볼 수 있다.

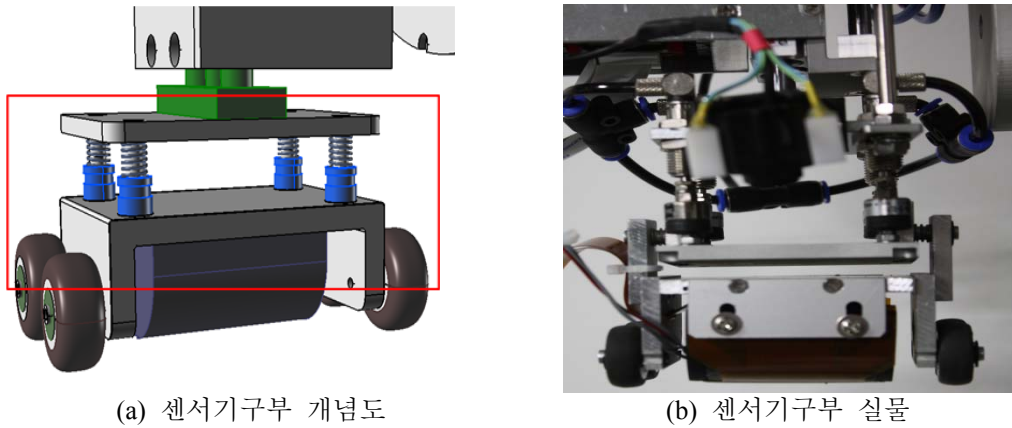


Fig. 4-2 센서기구부

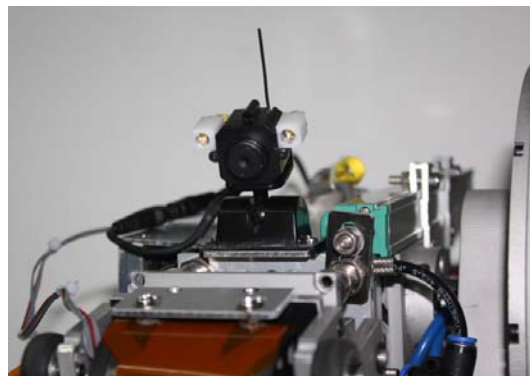


Fig. 4-3 카메라부의 구성

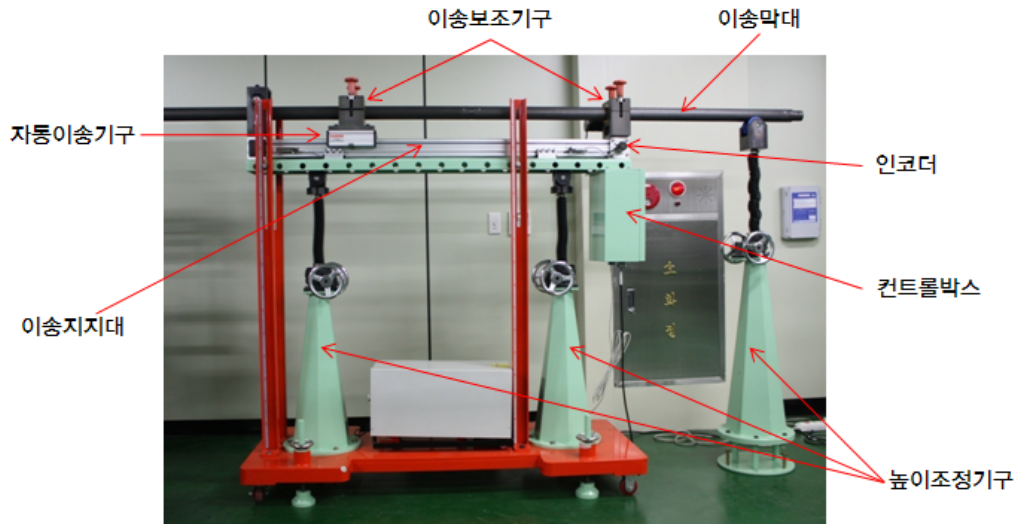


Fig. 4-4 이송부의 구성

Fig. 4-4의 이송부는 곡선배관대응기구부, 벽면지지기구부, 비원형대응기구부, 센서기구부 및 센서부를 인테이크 내부로 이송하는 역할을 한다. 높이조정기구, 이송지지대, 자동이송기구, 인코더, 이송보조기구, 이송막대로 구성되어 있다.

높이조정기구는 이송막대가 인테이크와 평행이 될 수 있도록 높이 및 경사도를 유지하며, 지면으로부터 높이 1400~1900mm까지 대응할 수 있다. 이송지지대는 높이조정기구의 위에서 이송보조기구가 배관 주축 방향으로 이송할 수 있는 가이드 역할을 하며, 최대 스트로크는 1200mm이다. 자동이송기구는 이송지지대의 가이드를 따라 이송보조기구를 이송한다. 모터에 연결된 긴 볼트 형태를 가지며, 이송보조기구와 너트로 연결, 모터를 구동할 때 볼트가 회전하고, 이송보조기구에 연결된 너트가 상기 볼트를 따라서 이송지지대 위를 병진 운동한다. 컨트롤 박스는 컴퓨터의 원격조정신호를 입력받은 후, 펄스신호를 발생하여 모터를 구동한다. 자동이송속도는 6mm/sec, 정밀도는 0.3mm이다. 인코더는 자동이송기구에 의하여 이송보조기구가 움직인 거리를 측정하여, 피측정체인 인테이크의 주축방향 이동거리를 알 수 있다. 정밀도는 0.3mm이다. 이송보조기구는 이송막대를 일시 고정시키고, 자동이송기구에 의하여 배관의 주축방향으로 상기 이송막대를 병진 운동한다. 일정

구간을 이송시킨 후에는 상기 이송막대를 일시 해제시키고, 다시 초기점으로 되돌아와서 이송막대를 일시 고정해야 한다. 이러한 원리, 즉 이송보조기구의 일시 고정 및 일시 해제의 반복에 의하여 한정된 상기 이송지지대의 길이만으로도 매우 긴 이송막대를 병진 운동이 가능하다. 이송보조기구의 또 다른 역할은 이송막대를 배관의 주축방향으로 병진운동만을 시키며, 회전이나 처짐을 방지한다. 마지막으로 이송막대는 곡선배관대응기구부에 연결되어, 센서부를 배관의 주축방향으로 이송시키는 역할을 담당한다.

Fig. 4-5의 곡선배관대응기구부는 유니버설 조인트와 스프링으로 구성되어 있다. 인테이크의 불연속적인 곡면에서도 이송부와 벽면지지기구부를 연결, 내벽을 지지한다. 경사각도는 18도 이내이다.

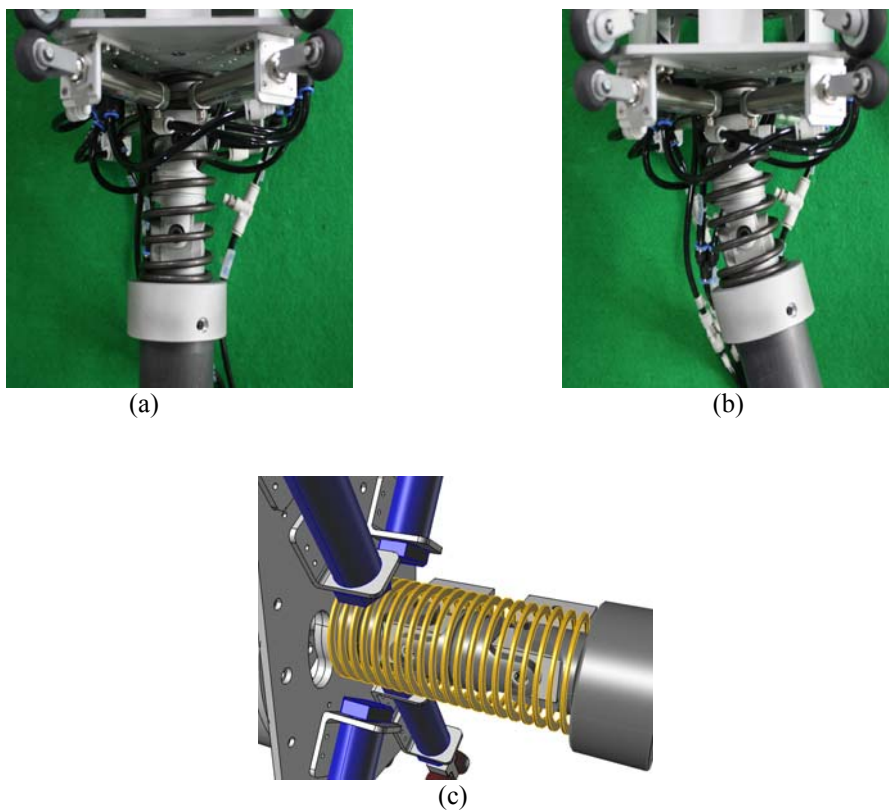


Fig. 4-5 곡선대응기구부의 구성; (a) 정상상태 사진, (b) 최대변형 사진, (c) 개념도

Fig. 4-6의 벽면지지기구부는 단면형태가 비원형인 경우와 불균일한 직경을 가질 때에도 비원형대응기구부 및 센서기구부를 배관 벽면으로부터 지지하면서, 센서부의 회전축이 배관내부의 중심에 위치하도록 기계적으로 조정해준다. 최소반경 180mm에서 최대반경 250mm를 가변하여 2개의 공압 실린더를 이용한 4쌍의 지레 구조 기구물과 축방향 롤러로 구성된 주 벽면지지기구부와 4개의 공압 실린더와 축방향 롤러로 구성된 보조 벽면지지기구부(Fig. 4-6(a))로 구성되어 있다. 각각의 실린더는 공압의 공급으로 그 길이가 가변하므로, 하나의 공급기에 의하여 공압을 공급하면 각각 서로 다른 길이로 신장 및 동일한 힘으로 인테이크의 내벽을 지지한다. 또한, 주 벽면지지기구부의 지레 구조 기구물 선단과 보조 벽면지지기구부 공압실린더의 선단에는 인테이크의 주축방향으로 굴러갈 수 있는 롤러가 설치되어 있고, 축방향 롤러 상기 이송부에 의한 이송막대의 병진운동을 보다 용이하게 해주는 역할 및 비원형대응기구부가 배관의 내벽을 따라 회전할 때, 고정판이나 유공압 실린더가 회전방향으로 미끄러지지 않도록 고정해주는 역할을 한다.

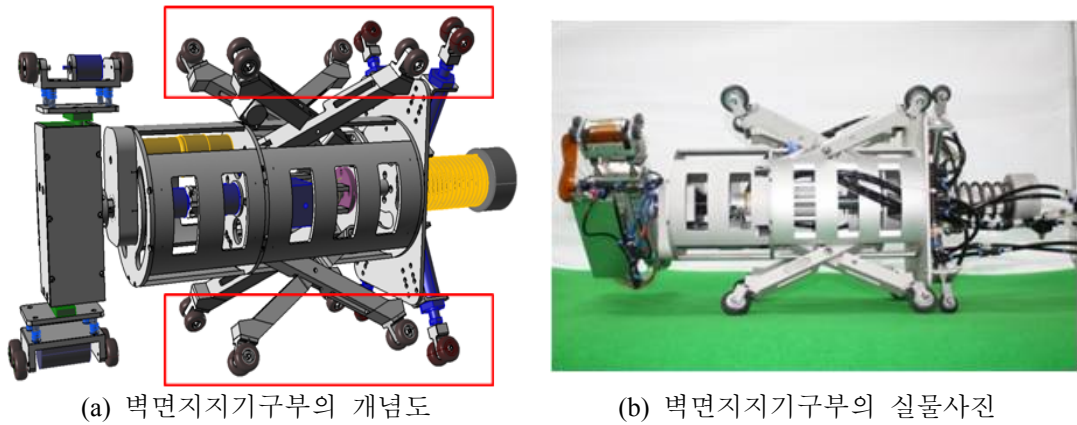


Fig. 4-6 벽면지지기구부의 구성

Fig.4-7의 비원형 대응기구부는 벽면지지기구부 선단에서 인테이크의 단면 방향으로 회전운동을 하며, 유공압 실린더의 신축운동으로 센서기구부를 비원형 단면을 가지는 인테이크의 내벽에 접근한다. 최소거리 180mm에서 최대반경 250mm를

가변한다. 비원형대응기구부는 슬립링, 공압전달밸브(로터리 조인트), 공압실린더, 이음새에 의하여 구성되어 있다. 슬립링은 축의 단면방향으로 비원형대응기구부가 회전할 때, 비파괴검사를 위한 센서부의 신호선 및 전원공급선이 꼬이지 않도록 하는 역할이다. 공압전달밸브(로터리 조인트)는 축의 단면방향으로 상기 비원형대응기구부가 회전할 때, 상기 비원형대응기구부의 실린더에 공급하는 공압 공급선이 꼬이지 않도록 한다. 공압실린더는 배관 단면이 일정하지 않을 때, 신축 운동을 하여 센서기구부 및 센서부가 배관의 내벽에 일정한 높이로 접근 또는 밀착한다. 이음새는 공압실린더의 선단에 설치되어 센서기구부와 연결되며, 공압실린더가 회전할 때, 센서기구부가 배관 내벽과 수직방향으로 밀착되도록 하는 역할을 한다.

비원형대응기구부에는 변위측정센서 및 엔코더를 구비하여, 엔코더에 의하여 원점으로부터의 회전각도를 측정하고, 변위측정센서에 의하여 회전중심축으로부터 센서까지의 거리를 측정한다. 또한, 각도 및 거리 데이터로부터 인테이크 내부의 형상을 기록하면서, 전자기장의 분포를 측정한다.

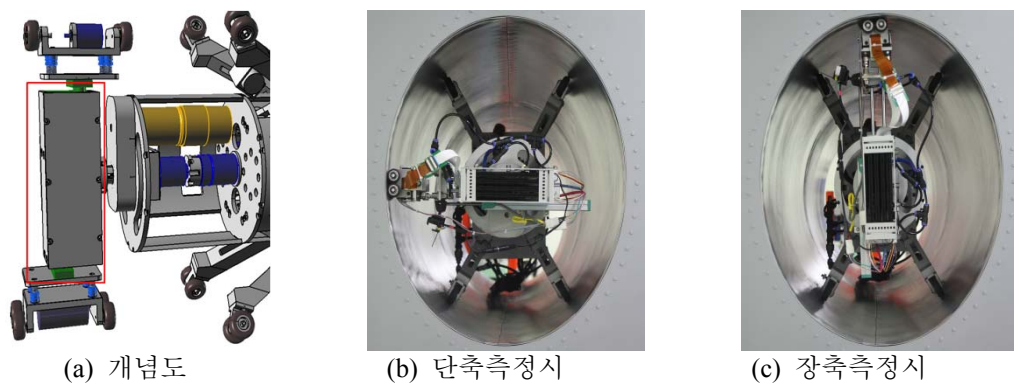


Fig. 4-7 비원형 대응기구부의 구성

Fig. 4-8은 각 구성부의 전원 및 공압 공급장치와 제어장치가 설치되어 있으며, 컴퓨터 및 모니터가 일체화 되어 있다. 각 구성부를 제어하고, 결함 탐상 데이터를 실시간으로 확인 및 저장하여 분석할 수 있다. 한편, 컴퓨터는 슬롯형으로 보관 및 이송 시에는 수납되도록 하였다.

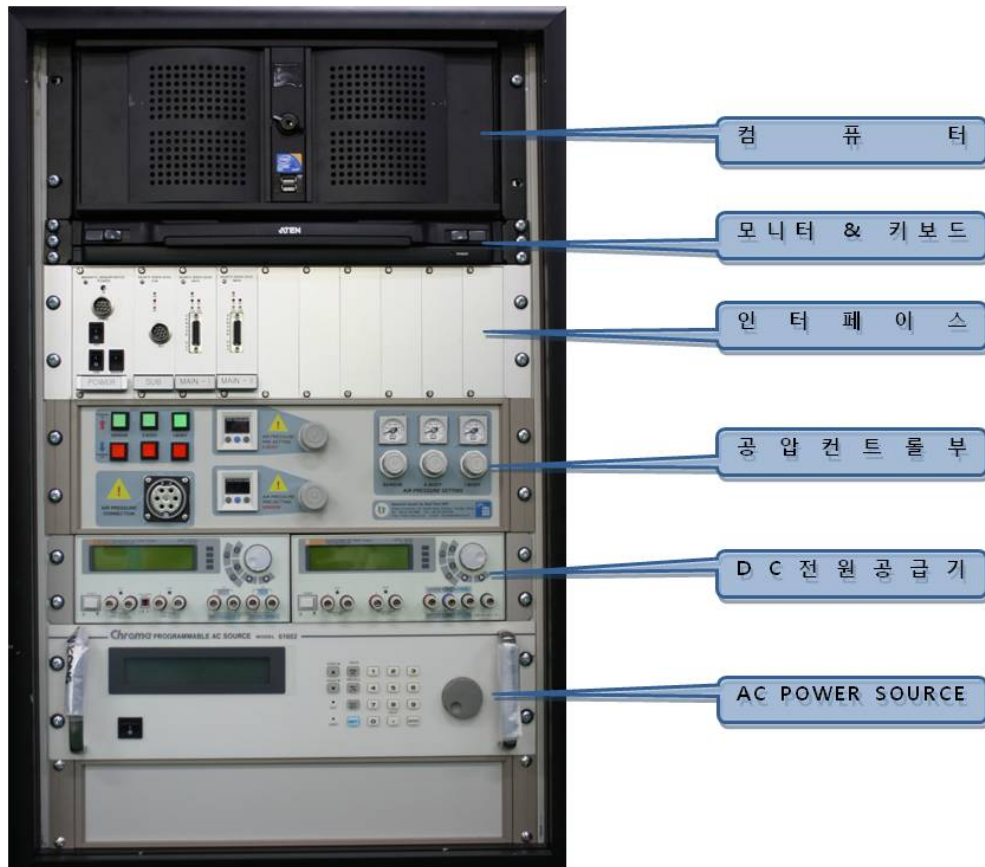


Fig. 4-8 컨트롤 박스

프로브 이송장치 시스템의 운용 소프트웨어는 측정모드와 분석모드로 구분된다. Fig. 4-9는 측정모드 소프트웨어의 모습이다. Fig. 4-9(a)는 운용 소프트웨어의 상태창(info)을 나타낸다. 소프트웨어를 시작하면 기본적으로 ‘측정’ 모드(mode)가 활성화된다. 이때, Fig. 4-9(g)의 프로젝트명 입력창에 적당한 측정명을 입력하고, 하드웨어와 연결에 이상이 없을 경우 Fig. 4-9(e)의 상태바(status bar)에 녹색램프가 점등되어 start버튼을 누르면 스캔진행과 동시에 소프트웨어가 시작된다. 반대로 stop버튼을 누르면 스캔이 정지되며, 적색램프가 점등된다.

측정모드에서는 제어, 지시, 데이터베이스 구축을 실행한다. 센서기구부의 이송, 비원형대응기구부의 회전을 제어하고, 이송거리 및 센서부의 회전각도, 회전각도에

따른 중심축과 센서부의 거리, LIHaS에 의한 자기영상 취득, CCD 카메라에 의한 광학영상 획득 및 데이터베이스 구축한다. 또한, 광학영상 및 자기영상을 동일 화면에 표시하면서 측정 및 데이터베이스를 구축한다.

해석모드에서는 데이터베이스에 저장된 광학영상 및 자기영상을 재현 및 가시화하고 해석한다. 자기영상을 C-Scan 및 B-Scan 영상으로 표시하며, 특정영역을 확대하여 표현한다.

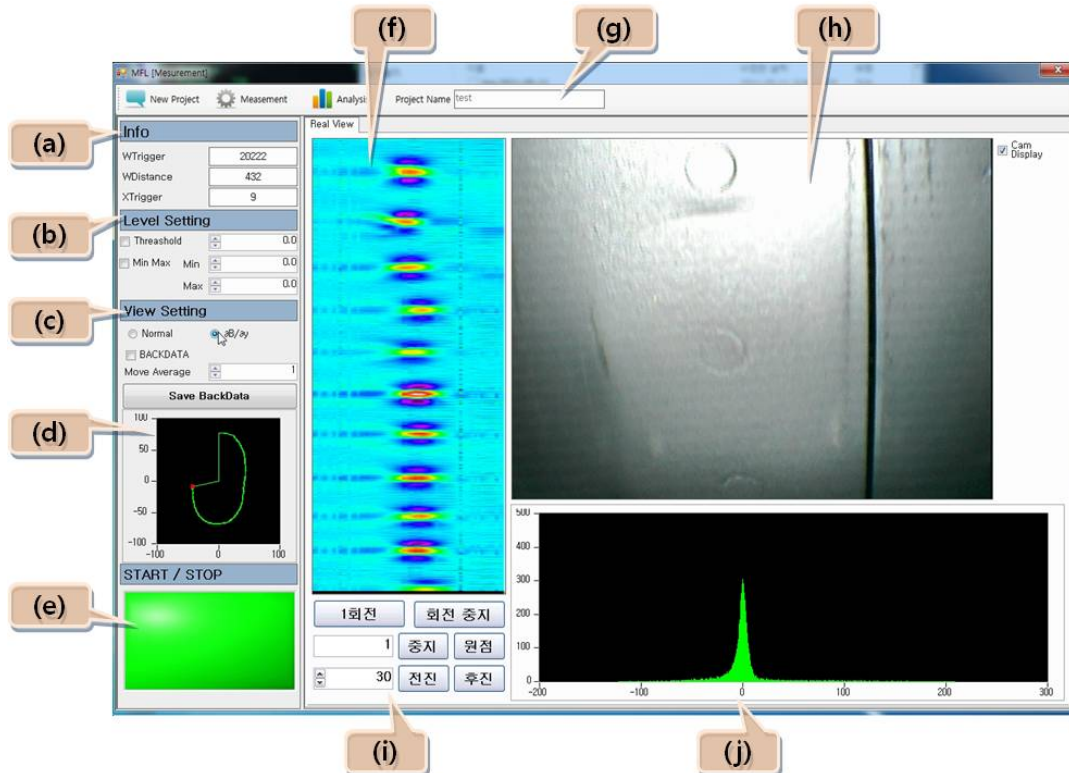


Fig. 4-9 측정모드 소프트웨어

Table 4-1은 ‘측정’ 모드의 세부적인 설명 및 기능을 나타낸다. 측정된 데이터는 1회전마다 지정된 경로의 폴더에 자동으로 저장되며, Fig. 4-9의 ‘STOP’버튼을 누르면 측정이 끝나고 1회전을 마치지 않아도 측정된 데이터만큼 저장을 한다. 저장 경로는 소프트웨어 제작 시에 정해져 있으며, 폴더명은 자동으로 측정시작 전 입력한 측정명으로 된 폴더가 생성된다. 이때, 저장된 측정데이터파일은 검사대상의 직경, 오프셋값, 회전수, 1회전이 끝났을 때의 X Trigger Count 순으로 파일명이 자동으로 생성된다. 저장된 측정데이터는 ‘분석’모드에서 분석할 수 있다. ‘분석’모드는 Fig. 4-9(g)의 ‘analysis’ 버튼을 누르면 전환된다.

Table 4-1 측정모드의 각 기능

번호	표기	용도	비고
(a)	WTriger	회전방향 트리거 카운트	자동
	WDistance	회전방향거리	선택
	XTriger	축방향 이동 트리거 카운트	선택
(b)	Threshold	안정된 신호 영역 셋팅	입력
	Min/Max		
(c)	Normal	실시간 자기영상 분포 그대로를 화면에 표시	입력
	$\partial B / \partial y$	측정된 자기영상을 회전방향으로 미분한값을 영상으로 표현	입력
	Back Data	Back Data 저장 및 적용	
(d)	View Graph	피측정체의 단면 형상을 표시	선택
(e)	START/STOP	소프트웨어 시작/정지버튼	선택
(f)	Real View	실시간 자기영상을 분포	자동
(g)	Main Menubar	새로운 프로젝트 시작, 측정모드 또는 해석모드 선택하며, 프로젝트명을 입력	자동
(h)	Scan Display	광학 카메라 영상	자동
(i)		검사로봇의 센서부를 1회전 동작 또는 정지, 이송부의 자동이송장치를 제어	자동
(j)		측정된 데이터의 값을 히스토그램으로 표시	자동

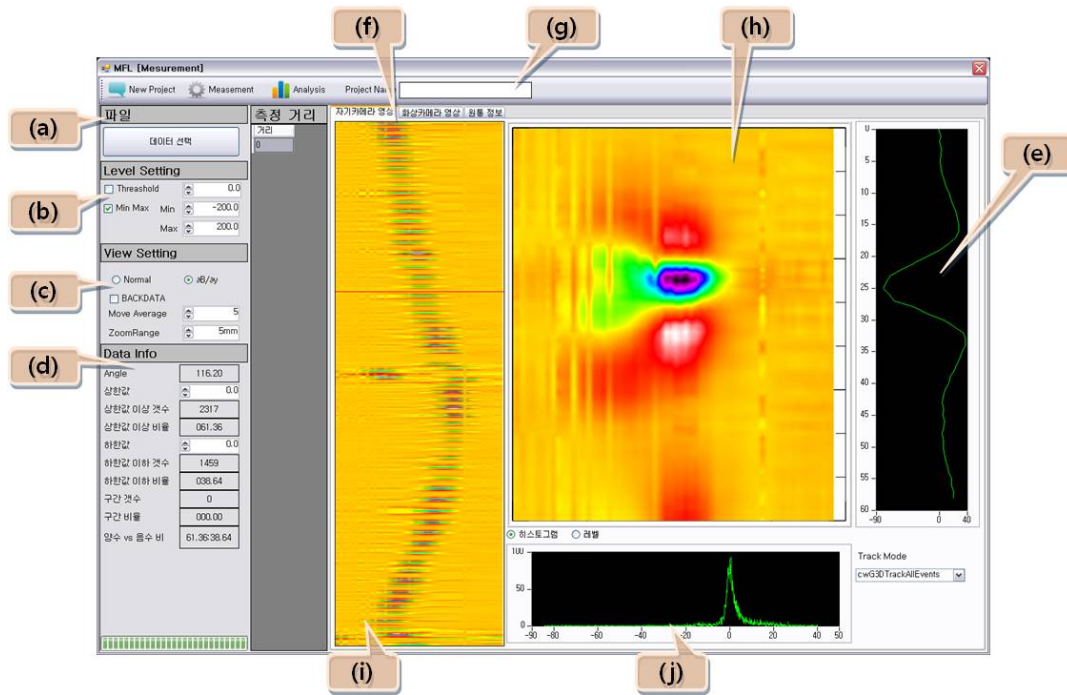


Fig. 4-10 분석모드 소프트웨어

Fig. 4-10은 분석모드 화면을 나타낸다. Fig. 4-10(b)의 ‘데이터 선택’ 버튼을 누른 후 분석하고자 하는 측정데이터의 저장파일을 불러오면 된다. 이때, 같은 폴더에 저장된 파일들 중 어떠한 것을 선택하더라도 소프트웨어는 불러올려는 파일이 있는 폴더안의 모든 파일을 저장된 순서로 불러온다.

Fig. 4-10(f)는 1회전한 데이터를 측정한 자기장 분포 영상을 나타내며, Fig. 4-11(h)는 측정된 자기장 분포영상을 확대한 영상이다. 원하는 크기대로 확대할 수 있어 보다 용이하게 결함분석을 할 수 있다. ‘분석’ 모드의 세부적인 설명 및 기능은 Table 4-2에 표기하였다.

Table 4-2 분석모드의 각 기능

번호	표기	용도	비고
(a)	파일	데이터선택 버튼을 눌러 저장된 측정데이터를 불러온다.	선택
(b)	Threshold	Threshold, Min/Max 값을 설정할 수 있고, 실시간 자기영상 분포(f)의 표시레벨을 변경	선택
	Min/Max		
(c)	Normal	실시간 자기영상 분포 그대로를 화면에 표시	선택
	$\partial B / \partial y$	측정된 자기영상을 회전방향으로 미분한값을 영상으로 표현	선택
	Move Average	이동평균 값을 설정	선택
	Zoom Range	확대한 자기영상 분포(h)의 확대영역 크기를 변경	선택
(d)	Data Info	확대한 자기영상 분포(h)의 히스토그램 수치를 데이터로 표시	자동
(e)		확대한 자기영상 분포(h)의 회전방향 단면 그래프	자동
(f)	자기카메라 영상	측정한 영역에 해당하는 자기영상	자동
	화상카메라 영상	측정한 영역에 해당하는 광학 카메라 이미지	
	원통 정보	피측정체의 단면정보	
(g)	Main Menubar	새로운 프로젝트 시작, 측정모드 또는 해석모드 선택하며, 프로젝트명을 입력	자동
(h)		확대한 자기영상 분포	자동
(i)		저장된 자기영상 데이터를 읽어들이어 표시한 자기영상을 분포	자동
(j)		측정된 데이터의 값을 히스토그램으로 표시	자동

제 2절 인테이크 모형 시험편

개발한 프로브이송장치 및 부식결함탐지법의 타당성을 검토하기 위하여 Fig. 4-11에 나타낸 바와 같이 인테이크모형 시험편을 가공하여 활용하였다. 인테이크모형 시험편은 항공기 공기흡입구를 모사한 타원형 배관으로서, 내외경의 지름이 각각 495mm, 450mm이며, 두께는 1.3mm, 길이 1840mm로 알루미늄 합금으로 이루어져 있다. 결함의 직경은 10mm이며, 0.12~1.11mm의 깊이로 Angle부 리벳홀의 상하좌우에 각각 가공하여, 인테이크 모형 시험편으로 조립하였다. Fig. 4-12는 Angle부의 결함가공사진을 나타내며, Fig. 4-13은 조립 완료한 시험편, Fig. 4-14는 Angle부에 도입한 결함의 위치 및 크기를 나타낸다.

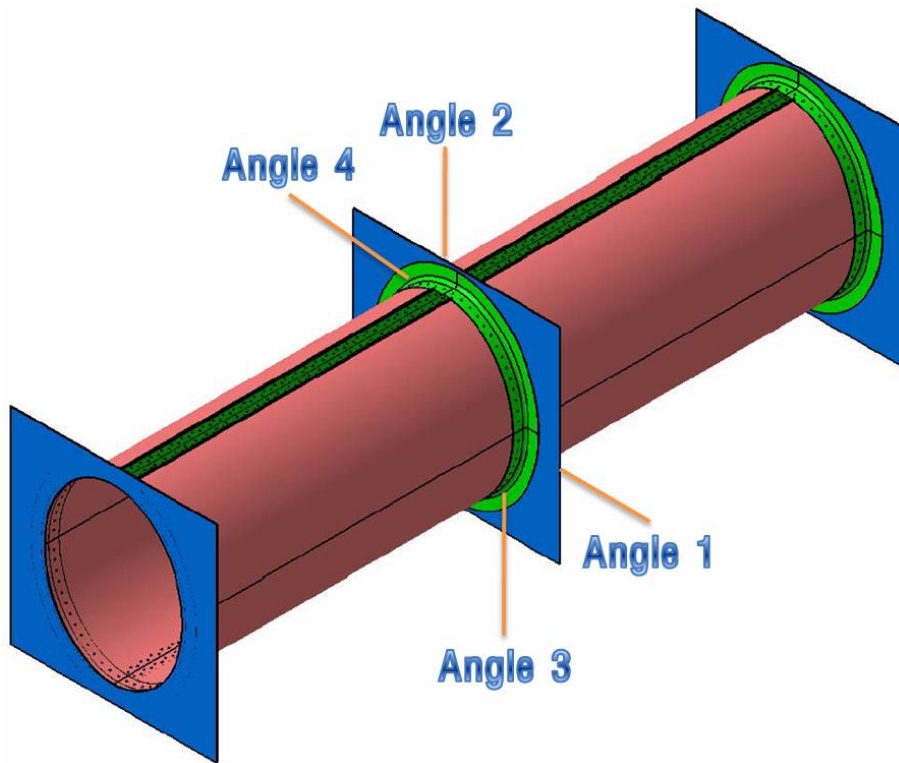


Fig. 4-11 인테이크 모형 시험편



(a) Angle부 개념도



(b) Angle부 실물사진

Fig. 4-12 Angle부 결합가공 그림 및 사진



Fig. 4-13 조립 완료한 인테이크 모형 시험편

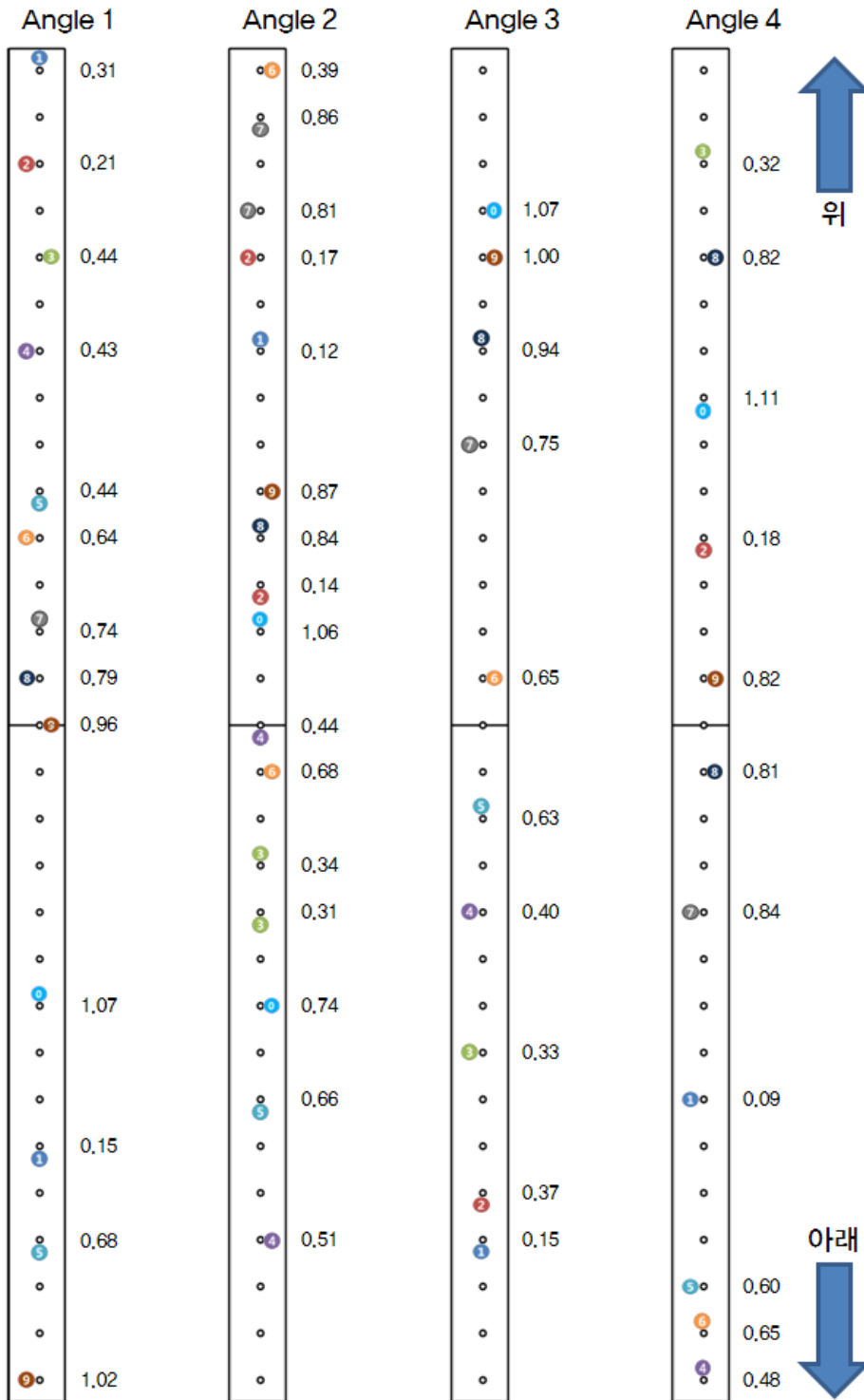


Fig. 4-14 Angle부에 도입한 결함 위치 및 깊이

제 3절 실험 및 고찰

다양한 형태의 자원 및 센서 배열을 이용하여 실험결과를 바탕으로 O형 자화기를 도입한 스캔용 로봇에 의하여 실증실험을 하였다. O형 자화기와 일체화된 고공간 분해능의 센서 배열과 공간활용도가 높고 비교적 높은 S/N비를 가진 계측용 차동 증폭 및 13bit SAR A/D변환기를 통해 획득된 데이터신호는 USB 인터페이스에 전송되어 컴퓨터에서 전용 소프트웨어를 이용하여 실시간 측정 및 저장, 분석된다.

이러한 일련의 연구결과를 프로브 이송장치 시스템에 적용함으로써 항공기의 다중구조로 이루어진 공기흡입구 내벽의 이면부식 결함을 탐상하고, 탐상시 스캔형 자기카메라와 지능형 알고리즘의 유용성을 고찰하였다. 본 장에서는 기초실험을 통해 제안한 자화기 및 센서배열, 신호처리회로를 적용하고, 실증실험을 통해 항공기 공기흡입구 내 이면부식결함 탐상결과를 논의한다.

Fig. 4-15은 O형 자화기에 140mA RMS, 900Hz의 교류전류를 입력하고, LIHaS의 각 센서를 200~300mA로 구동하면서, 300Hz의 cut-off 주파수를 가지는 HPF, 60dB의 증폭, 12비트의 AD변환기를 활용하여 획득한 자기영상을 나타낸다.

전체적으로 “위”와 “아래”로 표현된 영역에서는 리벳지시의 간격이 좁으며, 중간영역에서는 상대적으로 넓다. “위”와 “아래”로 표현된 영역은 타원의 장축에 해당되며, 중간영역은 단축에 해당한다. 결과적으로 등속으로 회전하는 비원형대응기 구부임에도 불구하고, 회전축과 피측정면과의 간격이 상이하게 되어 구간별 이송속도 및 측정간격이 변화한다.

한편, 적색점선으로 표현된 부분은 이면부식결함에 해당하며, 우측의 수치는 결함의 깊이를 나타낸다. 리벳의 상, 하, 좌, 우의 이면부식은 각각 0.65mm, 0.44mm, 0.40mm, 0.65mm의 깊이 검출가능하다. 그러나, 소프트웨어에 포함되어 있는 영역 확대 옵션을 활용하면, 0.44mm까지 검출가능하다. 리벳의 상부 및 하부에 위치한 이면부식은 비교적 판별이 용이하나, 좌측 또는 우측에 위치한 이면부식은 판별이 곤란하다. 이면부식이 지시되지 않았음에도 불구하고, 결함으로 판별되는 경우가 있다. Angle 1의 아래에서 2, 3번째 리벳, Angle 2의 위에서 6번째, Angle 3의 위에서 16번째 리벳은 좌측상부 방향으로 결함이 있는 것으로 판별되는 자기영상이 획득되었다. 이는 가공시 변형이 원인으로 추정된다.

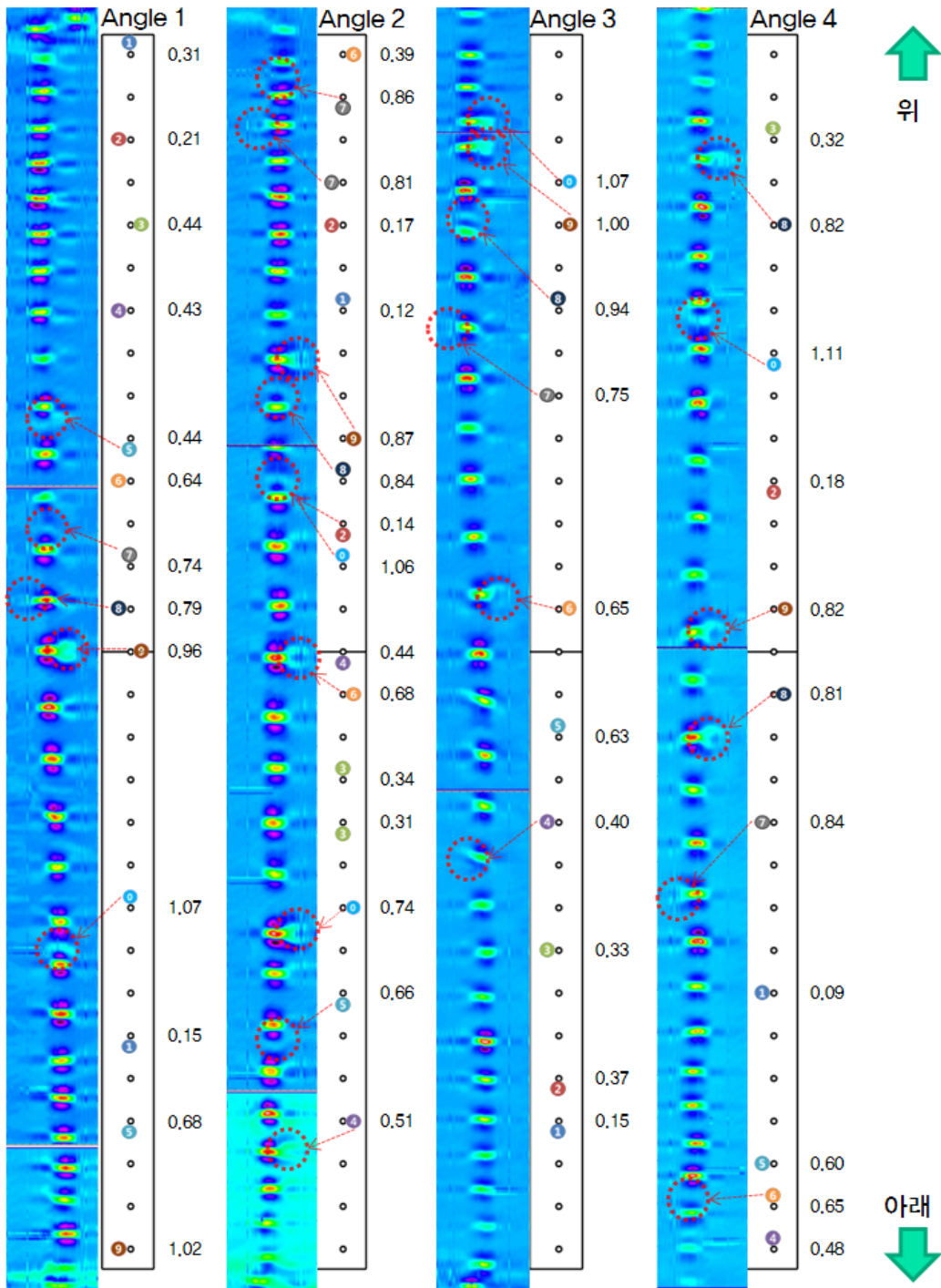


Fig. 4-15 Angle부 실험결과

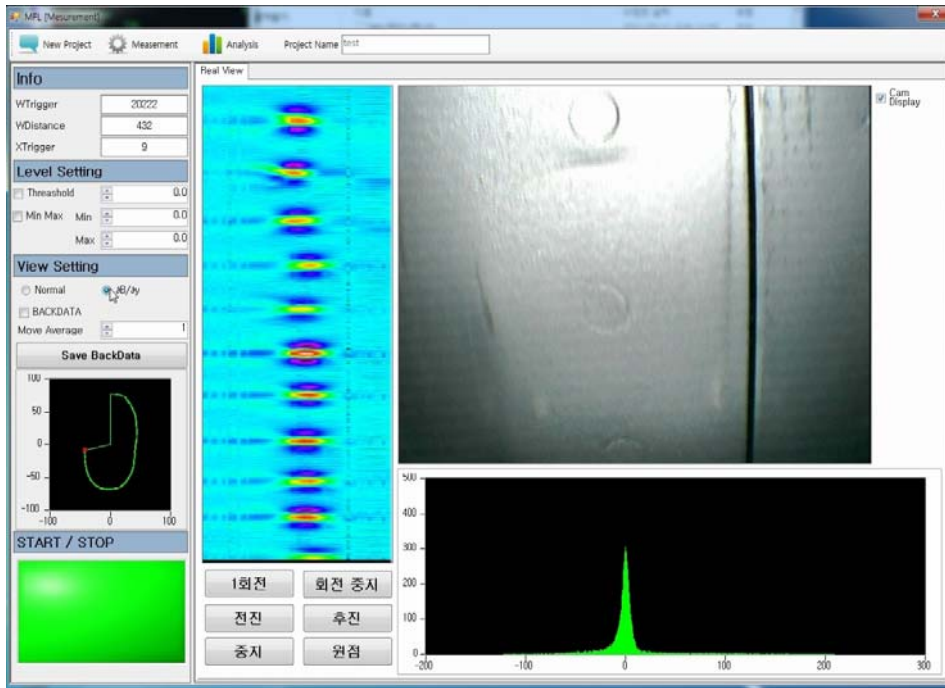


Fig. 4-16 각도센서와 변위센서에 의한 Angle부 단면형상 측정화면

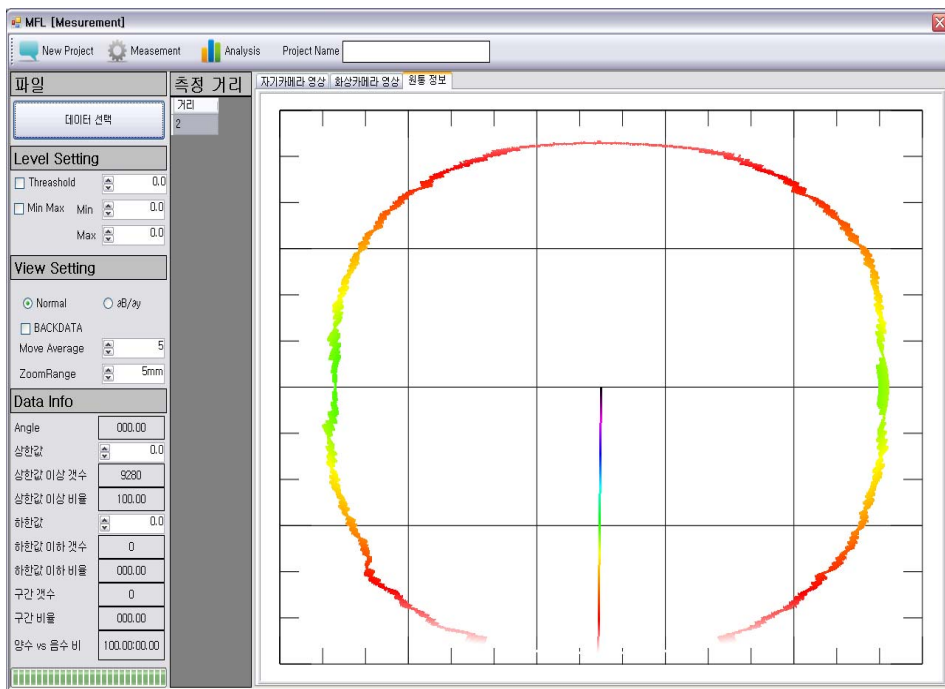


Fig. 4-17 각도센서와 변위센서에 의한 Angle부 단면형상 측정결과

Fig. 4-16은 Fig. 4-15의 자기영상이 “위”와 “아래”에서 좁은 간격, 중간부분에서 넓은 영역으로 나타나는 것을 보정하기 위하여, 비원형대응기구부의 회전각도 및 회전축에서 센서부까지의 거리를 환산하여, 측정영역의 단면형상을 도시한 것이다. 회전각도는 엔코더 정보로부터 획득하였으며, 등속 회전시에는 일정한 간격으로 해당 데이터가 획득되어야 하나, 일부 구간(곡률이 급변하는 장축과 단축의 경계)에서는 간격이 넓어져 일부 구간에서 약간의 회전속도의 차이가 있다. 전체적으로 타원형인 인테이크의 단면형상을 측정하고 있다.

Fig. 4-18은 Fig. 4-17의 변위정보를 적용하여 “위”, “아래” 및 중간영역에서 균일한 간격으로 Fig. 4-15의 자기영상을 재측정한 결과를 나타낸다.

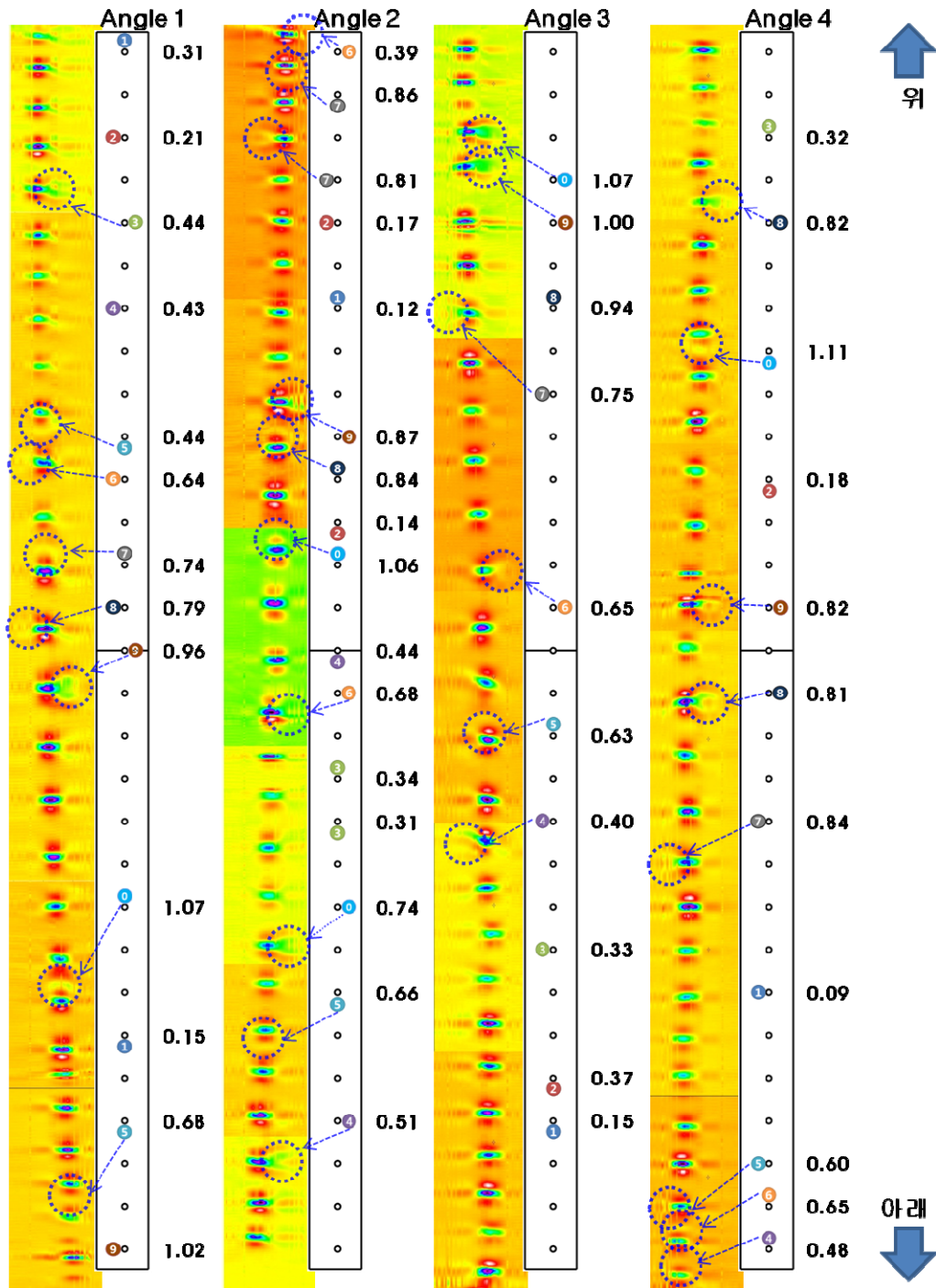


Fig. 4-18 일정한 스캔간격으로 재해석한 Angle부 실험결과

제 5장 결 론

항공기, 유인 우주스테이션, 로켓 엔진등의 대형기기 및 각종 구조물은 상자성체 및 강자성체와 상자성체가 혼재된 재질에 의하여 구성되어 있다. 이들은 높은 에너지 및 위험물, 고압 가스 등을 보유하고, 부식, 고온 고압과 같은 열악한 환경에 노출되어 있다. 따라서, 핵심 부품 및 소재의 제조 공정 중에 발생한 결함이나 진동, 피로 및 부식 등에 의한 표면 혹은 내부 결함, 사용자 부주의 등의 복합적인 문제로 인하여 손상이 야기되면, 급격히 진전되어 사고에 이르게 된다. 결과적으로 막대한 인적·경제적 손실뿐만 아니라 항공분야에서도 큰 문제를 일으킬 수 있다.

이러한 결함의 발생과 성장은 (1) 제조과정에 발생한 결함이 성장하는 경우와, (2) 가동후에 임의의 원인에 의하여 발생하고 성장하는 경우로 나누어 질 수 있다. 각 경우에 있어서 사용전 검사(PSI, Pre-Service Inspection)와 사용기간중 검사(ISI, In-Service Inspection)에 의하여 적절하게 유해한 결함을 검출하고 보수하도록 되어 있다. 한편 항공기는 지상 운송수단과 달리, 운항중 공중에서 정지하여 정비할 수 없다는 취약점을 가지고 있다. 따라서 항공기가 착륙하여 다음 이륙 및 운항시까지 기체를 포함한 구성품의 사용기간중 검사(ISI, In-Service Inspection)를 마쳐야 함은 매우 중요한 과제중의 하나이다.

한편, 항공기는 장기운영에 따라 구조건전성 저하에 영향을 미치는 피로균열, 응력부식균열 및 부식 등의 발생 가능성이 높아지고 있다. 특히, 다중구조물 내부에서 발생하는 부식 결함의 경우 현 비파괴검사방법인 육안검사로는 탐지에 애로가 있다. 뿐만 아니라, 결함(손상) 탐지확률이 떨어져 미처 검지하지 못하는 부식 결함이 발생할 수 있으며, 특히 이면부식의 경우에는 육안검사가 불가능한 실정이다.

본 연구에서는 항공기 다중구조물의 부식 결함을 전자기적인 수법으로 자동 탐지할 수 있는 실시간 비파괴 검사 기법 개발하였다. 개발된 기법에 의하면, 결함

의 직경이 4mm 이상일 경우, 깊이가 0.15mm 이상이라면 결함의 유무, 위치를 명확하게 측정할 수 있다. 본 기술을 최종목표인 F-5E 항공기 Intake(공기흡입구) 내부의 이면부식결함 검출에 적용하기 위하여 모사시험편을 제작하여, Angle부의 리벳체결부 주변에 있는 직경 10mm의 이면부식결함에 대하여 결함검출능을 평가하였다. 리벳체결부는 그 자체가 전자기장의 왜곡을 유발하는 바, 단순한 이면부식결함에 비하여 결함탐상능력이 저하되기는 하나, 상/하/좌/우에 위치한 깊이 0.65mm 이상의 이면부식결함을 검출할 수 있었다. 한편, 시제작한 다중구조물 결함탐지 시스템은 측정과 동시에 자기영상 및 광학영상을 동시에 가시화하며, 데이터베이스를 구축할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구를 통한 기대효과로는 피로균열, 응력부식균열 및 부식 등을 정확하게 검출할 수 있는 기술이 개발됨으로써, 항공기 장기운영에 따른 구조건전성 저하의 영향을 최소화할 수 있다. 또한, 자주적 항공기술지원을 위한 능력 구축에 필수 항목인, (1) 검사 대상의 재질, 형상 및 구조에 따라 적절한 ISI (In-Service Inspection, 사용기간 중 검사) 시스템을 제작하기 위한 적용성, (2) 검사 시스템의 유지보수가 빠르고 저렴하기 위한 보수성, (3) 해외의존도를 줄이고 개조가 용이한 확장성을 만족하게 되었다.

REFERENCE

- [1] <http://www.af.mil/news/story.asp?id=123074547>
- [2] Hwang DY. "Damage Tolerance Design and Prediction of Fatigue Life in Aircraft Structure", *KSME Int J* 1995;35(6), pp.468-480.
- [3] U. G. Goranson, 1993, "Damage tolerance-facts and fictions," *Proc. 17th Int. Conf. in Aeronautical Fatigue Sweden: Stockholm, Vol. 1*, pp. 3-105.
- [4] 이진이, 김정민, "경년항공기 수명관리를 위한 자기카메라 기술의 적용", 2008년도 항공기술 심포지엄, (2008), pp.1-22.
- [5] "비파괴검사 국제시장 동향 및 경쟁력 분석", 원자력국제협력재단, (2009.1)
- [6] <http://blog.paran.com/blog/detail/postBoard.kth?pmcl>
- [7] Lasser R., Lasser M., Gurney J., Kula J., Rich D., "Multi-angle low cost ultrasound camera for NDT field applications", Imperium, Inc.
- [8] Shejuan Xie, Toshihiro Yamamoto, Toshiyuki Takagi, Tetsuya Uchimoto, "Pulsed ECT Method for Evaluation of Pipe Wall-thinning of Nuclear Power Plants using Magnetic Sensor", *ENDE '2010*, (2010.6), pp.7-8.
- [9] J. Jun, J. Lee, and D. Park, "NDT of a nickel Inconel specimen using by the complex induced current - magnetic flux leakage method and linearly integrated hall sensor array", *Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing, Korea*, 27(2007.10), pp. 375-382.
- [10] Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Jiseong Hwang and Sehoon Lee, "Development of Numerical Analysis Software for the NDE by using Dipole Model", *Key Engineering Materials*, 353-358 (2007.9), pp.2383-2386.
- [11] Jiseong Hwang, Jinyi Lee, "Modeling of a Scan Type Magnetic Camera Image Using the Improved Dipole Model", *JMST*, 20(10), (2006), pp.1691-1701.
- [12] Jinyi Lee, Dowon Seo, Tetsuo Shoji, "Numerical Consideration of Magnetic Camera for Quantitative Nondestructive Evaluation", *Key Eng. Mat.*, 270(1) (2004.10), pp.630-635.

- [13] Lee, J., Lyu, S. and Nam, Y., “An Algorithm for the Characterization of Surface Crack by Use of Dipole Model and Magneto-Optical Non-Destructive Inspection System,” *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 10, (2000), pp.1072-1080.
- [14] Jun J, Park J, Lee J. Real time visualization of alternating magnetic fields using 2-dimensional integrated hall sensor array. *Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis* 2010;61(7):32-35.
- [15] Minhhuy Le, Jinyi Lee, Jongwoo Jun, Jungmin Kim, Joo-Hyung Kim, “Quantitative Nondestructive Evaluation Using an AC-type Magnetic Camera and Dipole Model”, *NDT&E Int.*, (2008), contribute.
- [16] Fitzpatrick GL, Thome DK, Skaugset RL, Shih WCL, Shih EYC. “Magneto-Optic/Eddy Current Imaging of Aging Aircraft: A New NDI Technique”, *Materials Evaluation*, 51(12)(1993), pp.1402-1407.
- [17] Jinyi Lee, Jongwoo Jun, “NDT of the crack on the austenite stainless steel using the improved sheet type induced current and the linearly integrated Hall Sensor Array”, *Abstracts of 13th ENDE*, (2008.5), p.48.
- [18] 이진이, 전종우, “자성유체 침투에 의한 상자성체 비파괴검사”, 2008년도 한국비파괴검사학회 춘계학술대회 논문집, (2008), pp.223-228.
- [19] 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(12)(2008.12), pp.2310- 2317.
- [20] Jiseong Hwang, Jinyi Lee and Sukjin Kwon, “The Application of a Differential Type Hall Sensors Array to the Nondestructive Testing of Express Train Wheels”, *NDT & E International*, 42(1)(2009.1), pp.34-41.
- [21] Jinyi Lee, Jongwoo Jun, "Nondestructive Evaluation of the Rivet Connection Parts in Aging Aircraft Using a CIC-MFL and LIHaS", *NDT&E Int.*, (2008), contribute.
- [22] Jongwoo Jun, Myungki Choi and Jinyi Lee, “Nondestructive Evaluation of Austenitic

Stainless Steel using CIC-MFL and LIHaS”

- [23] 유승우, 장희준, 박현근, "로터 중심공 자동 초음파검사 시스템 개발", 2006년도 한국비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, (2006), pp.180-185.
- [24] C. Lee Friant, Mark A. Richter, and Sanford Buxbaum, “Concurrent Ultrasonic/Eddy Current Examination of Turbine/Generator Rotor Bores”, Baltimore Gas and Electric Company.
- [25] Lee, J., Seo, D. and Shoji, T., 2004, “Numerical consideration of lens of magnetic camera for quantitative nondestructive evaluation,” Key Engineering Materials, Vol. 207-273, pp. 630-635.
- [26] 김정민, “로터 중심공 비파괴검사 및 정량평가”, 2010년도 석사학위논문, (2010. 8),pp66-70.