



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

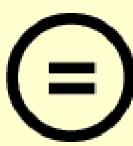
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 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 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



2010 年 2 月
博士學位 論文

高速鐵道 車輪의 健全性 評價를
위한 스캔형 磁氣카메라 開發 및
知能型 缺陷評價

朝鮮大學校 大學院

情報通信工學科

黃 至 成

高速鐵道 車輪의 健全性 評價를
위한 스캔형 磁氣카메라 開發 및
知能型 缺陷評價

Development of a Scan Type Magnetic Camera
and Intellectual Nondestructive Evaluation for
Health Monitoring of Express Train Wheels

2010 年 2 月 25 日

朝鮮大學校 大學院

情報通信工學科

黃 至 成

高速鐵道 車輪의 健全性 評價를
위한 스캔형 磁氣카메라 開發 및
知能型 缺陷評價

指導教授 李 鎮 伊

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함

2009 年 10 月

朝鮮大學校 大學院

情報通信工學科

黃 至 成

黃至成의 博士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校 教授	<u>高樂</u> (印) 
委 員	朝鮮大學校 教授	<u>朴鍾</u> (印) 
委 員	朝鮮大學校 教授	<u>牟相晚</u> (印) 
委 員	朝鮮大學校 教授	<u>趙昌錫</u> (印) 
委 員	朝鮮大學校 教授	<u>李鎮伊</u> (印) 

2009 年 12 月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT	x
제 1장 서 론.....	1
제 2장 구성 요소 및 원리	13
제 1절 자 원.....	14
제 2절 자기센서 배열 및 신호 처리 회로	23
1. 종래의 자기센서 배열 방법	25
2. 본 연구의 제안 방법.....	29
3. 저잡음 고속 차동 증폭 회로	32
4. 필터	34
가. 아날로그 필터.....	34
나. 디지털 필터	35
제 3절 A/D 변환기	38
제 4절 인터페이스	40
제 5절 결합 정보 평가.....	48
1. 다이폴 모델.....	48
2. 개선된 다이폴 모델.....	53
3. 결합 평가.....	59
제 3장 지능형 결합평가 알고리즘 및 3차원 표현.....	64
제 1절 1차 자기영상 취득 및 스펙트럼 분석	66
제 2절 2차 자기영상 취득 및 히스토그램 분석.....	68
제 3절 3차 자기영상 취득 및 평가.....	71
1. 결합의 좌표 추정	71

2. 결합의 길이, 형상, 방향 추정	72
3. 결합의 체적 추정.....	74
제 4절 3차원 실감형 소프트웨어	75
 제 4장 실험 및 고찰.....	78
제 1절 시험편	79
제 2절 곡면형 LIHaS.....	85
제 3절 실시간 신호 처리 및 실험 장치	89
제 4절 실험 결과 및 지능형 손상 평가 알고리즘 적용.....	92
1. 1차 자기영상 취득 및 스펙트럼 분석	92
2. 2차 자기영상 취득 및 히스토그램 분석.....	95
3. 3차 자기영상 취득 및 평가	97
가. 결합의 좌표, 길이, 형상, 방향 추정	102
나. 결합의 체적 추정.....	114
4. 3차원 실감형 소프트웨어	116
 제 5장 결 론.....	120
 REFERENCES	123
 Acknowledgments.....	129

표목차

Table 2-1	자원의 분류	18
Table 2-2	결합의 크기와 체적	24
Table 2-3	Main board의 사양.....	45
Table 2-4	Sub board의 사양	46
Table 4-1	인공 결합의 크기와 체적 [unit: mm]	84
Table 4-2	자연 결합의 크기와 체적 [unit: mm]	84
Table 4-3	결합의 좌표 평가 [unit: mm]	104
Table 4-4	결합의 형상 평가 [unit: mm]	107
Table 4-5	결합의 길이 평가 [unit: mm]	110
Table 4-6	결합의 방향 평가 [unit: mm]	113

도목차

Fig. 1-1 일본항공 소속 JAL 123편 추락사고	2
Fig. 1-2 ICE 고속철도 탈선사고	4
Fig. 1-3 하마오카 원자력 발전소의 배관 파단 사고	5
Fig. 1-4 고정도 손상계측기술의 필요성	6
Fig. 1-5 자분탐상법	7
Fig. 1-6 와전류 탐상법	8
Fig. 1-7 배관의 내외부의 누설자속 탐상법	9
Fig. 1-8 자기카메라의 개요도	10
Fig. 2-1 자원의 종류(1)	15
Fig. 2-2 자원의 종류(2)	17
Fig. 2-3 소형 요크형 자화기를 이용한 직류 자화법의 수치해석	20
Fig. 2-4 철도차륜 형태의 자원의 직류자화법 수치해석	22
Fig. 2-5 결합의 위치와 형태	25
Fig. 2-6 스캔형자기카메라의 구성	26
Fig. 2-7 PCB위에 배열된 자기센서를 이용한 자기영상	27
Fig. 2-8 $\partial V_H/\partial x$ 의 자기영상	28
Fig. 2-9 $\partial V_H/\partial y$ 의 자기영상	28
Fig. 2-10 3차원 레이저 미소변위 측정기에 의한 센서배열 스캔결과	28
Fig. 2-11 선형 배열된 자기센서와 소형 자원	29
Fig. 2-12 LIHaS의 $\partial V_H/\partial x$ 자기영상	31
Fig. 2-13 LIHaS의 $\partial V_H/\partial y$ 자기영상	31
Fig. 2-14 홀 효과의 원리	33
Fig. 2-15 홀센서와 증폭회로(INA128P)의 회로도	33
Fig. 2-16 3차 버터워즈 저대역 통과필터	34
Fig. 2-17 A/D 변환기 회로	39
Fig. 2-18 인터페이스 장치	40
Fig. 2-19 Main board의 회로도	42
Fig. 2-20 ALTERA EPM7128S (PLD)의 회로도	43
Fig. 2-21 Sub board의 회로도	47
Fig. 2-22 다이폴 모델	49
Fig. 2-23 실험 장치	50
Fig. 2-24 저탄소강 시험편의 누설자속 분포(V_H)	50
Fig. 2-25 저탄소강 시험편의 $\partial V_H/\partial x$ 자기영상	51
Fig. 2-26 개선된 다이폴 모델	53

Fig. 2-27	개선된 다이폴 모델 기본 원리.....	54
Fig. 2-28	구형결합의 다이폴 모델 원리.....	56
Fig. 2-29	삼각형결합의 다이폴 모델 원리.....	58
Fig. 2-30	타원형결합의 다이폴 모델 원리.....	58
Fig. 2-31	$\partial V_H/\partial x$ 의 자기영상.....	59
Fig. 2-32	$\partial V_H/\partial x$ 의 결합의 길이에 따른 해석결과.....	60
Fig. 2-33	$\partial V_H/\partial x$ 의 결합의 폭에 따른 해석결과.....	60
Fig. 2-34	$\partial V_H/\partial x$ 의 결합의 길이에 따른 해석결과.....	61
Fig. 2-35	정량평가 알고리즘.....	63
Fig. 3-1	지능형 손상 평가 알고리즘.....	65
Fig. 3-2	1차 자기영상과 스펙트럼 분석.....	66
Fig. 3-3	임의의 영역에서 각각의 차단 주파수에 따른 $V_H, \partial V_H/\partial x$	67
Fig. 3-4	2차 자기영상과 히스토그램 분석	68
Fig. 3-5	결합 정보 한계 지정	69
Fig. 3-6	데이터량의 감소.....	70
Fig. 3-7	3차 자기영상.....	71
Fig. 3-8	결합의 좌표 추정.....	72
Fig. 3-9	결합의 길이 추정.....	72
Fig. 3-10	결합의 형상 추정.....	73
Fig. 3-11	결합의 방향 추정	73
Fig. 3-12	텍스쳐 매핑	75
Fig. 3-13	철도 차륜의 텍스쳐 매핑	77
Fig. 4-1	철도 차륜의 결합의 형태	79
Fig. 4-2	철도 차륜의 결합의 형태와 위치	80
Fig. 4-3	인공 결합의 3차원 레이저 미소변위 측정결과	83
Fig. 4-4	곡면형 LIHaS	85
Fig. 4-5	철도 차륜용 소형 자화기	86
Fig. 4-6	FEM해석	87
Fig. 4-7	철도차륜의 수치해석 결과	88
Fig. 4-8	신호 처리 회로의 개요도	89
Fig. 4-9	증폭부와 인터페이스장치	90
Fig. 4-10	철도 차륜 회전 장치	91
Fig. 4-11	1차 자기영상의 주파수 분석	92
Fig. 4-12	1차자기영상	93
Fig. 4-13	필터링 된 1차 자기영상	94
Fig. 4-14	2차 자기영상의 히스토그램 분석	95
Fig. 4-15	2차 자기영상	96
Fig. 4-16	V_c 가 2인 3차 자기영상	99
Fig. 4-17	V_c 가 6인 3차 자기영상	100
Fig. 4-18	V_c 가 10인 3차 자기영상	101

Fig. 4-19	자연 결합의 방향 추정.....	111
Fig. 4-20	실제 결합 체적과 제안된 알고리즘에 의한 체적과의 관계	115
Fig. 4-21	실감형 소프트웨어.....	116
Fig. 4-22	결합의 텍스쳐 매핑 결과.....	117
Fig. 4-23	1차 자기영상의 텍스쳐 매핑 결과.....	117
Fig. 4-24	필터링된 1차 자기영상의 텍스쳐 매핑 결과	118
Fig. 4-25	2차 자기영상의 텍스쳐 매핑 결과.....	118
Fig. 4-26	3차 자기영상의 텍스쳐 매핑 결과.....	119

기호 설명

HPCI	High Pressure Coolant Injection
RHRS	Residual Heat Removal System
ECCS	Emergency Core Cooling System
RT	Radiation Testing
UT	Ultrasound Testing
MT	Magnetic Particle Testing
MFLT	Magnetic Flux Leakage Testing
PT	Penetration Testing
ECT	Eddy Current Testing
LT	Leakage Testing
VT	Visual Testing
AE	Acoustic Emission
IRT	Infrared Ray Testing
NDT	Nondestructive Testing
DMA	Direct Memory Access
S/N	Signal-to-Noise ratio
C-MFL	Cross-type Magnetic Flux Leakage
DC-MFL	Direct Current Magnetic Flux Leakage
P-MFL	Plate-type Magnetic Flux Leakage
IS-MFL	In-side Solenoid Magnetic Flux Leakage
V-MFL	Vertical-type Magnetic Flux Leakage
STIC	Sheet-Type Magnetic Induced Current
i-STIC	improved Sheet-Type Induced Current
CIC-MFL	Combined Induced Current-Magnetic Flux Leakage

MFPT	Magnetic Fluid Penetration Testing
B	Magnetic Flux Density
$\partial B / \partial x$	The Differential of B to Scanning Direction(x-direction)
LIHaS	Linearly Integrated Hall Sensor Array
V	Hall Voltage
$\partial V_H / \partial x$	The Differential of V_H to Scanning Direction(x-direction)
CMRR	Common Mode Rejection Ratio
FIR	Finite Impulse Response
IIR	Infinite Impulse Response
SMPS	Switched Mode Power Supply
PLD	Programmable Logic Device
FEM	Finite Elements Method
DPMA	Dipole Model Analysis
L	Length of Crack[mm]
W	Width of Crack[mm]
D	Depth of Crack[mm]
θ	Rotation angle of Crack[degree]
μ	Magnetic Permeability
u	Depth from Specimen Surface[mm]
S	Spatial Resolution[mm]
L	Minimum Detectable Length of Crack[mm]
LPF	Low Pass Filter
f	Cut off Frequency
T	Time
GUI	Graphical User Interface

아래 첨자

MAG	Magnetic Direction
H	Hall Sensor
C	Crack
R	Rotated Axis and Position
N	Noise Level
S	Sensor Output
M	Maximum
TOTAL	Total of Sensor Output

ABSTRACT

Development of a Scan Type Magnetic Camera and Intellectual Nondestructive Evaluation for Health Monitoring of Express Train Wheels

Jiseong Hwang

Advisor: Prof. Jinyi Lee, Ph.D.

Dept. of Information and Communications Eng.
Graduate School of Chosun University

As the global climate changes, green growth has emerged as a new value so that railroad is considered to be the technology that leads the green growth in the transportation sector. Railroad is an optimal and environmentally friendly means that consumes less energy and emits less carbon. However, railroad train that weighs in thousands tons has enormous kinetic energy when moving at the speed of hundreds kilometers per hour. In addition, some damages may have been caused to train axle, train wheel and rail due to many operating hours, quick braking and other problems. Unfortunately, railroad train can stay only for less than two hours in a maintenance depot for maintenance and management. Consequently, it is really necessary to adopt a technology for measuring damages in a high speed, a high precision and a real time. In the meantime, the existing nondestructive testing technology indicates that there can be some changes in capability of detecting defects due to internal factors such as operation mistake, involuntary action, misunderstanding, nervousness, and loss of motivation and to external factors such as work intensity, unsafe environment, natural disaster, defects in machinery equipment, and insufficient supervision. There is an error or risk when a worker determines whether or not damage has been caused due to internal and external causes.

The testing method by using electromagnetic phenomenon is useful to detect defects on

the surface of or in the vicinity of the surface of ferromagnetic structure such as train wheel. For this study, we developed the scan type magnetic camera to resolve issues on shortcomings and restrictions of the magnetic particle testing (MT), the magnetic flux leakage testing (MFLT) and the eddy current testing (ECT) among nondestructive examination methods for train wheel that utilize electromagnetic phenomenon. In addition, we suggested the algorithm to detect defects automatically, locate them and make an estimate to quantify their shape, size and volume with a view to reducing man-made error and risk.

First of all, we conducted the researches as below to examine express train wheel that rotated at the speed of approximately 30km/h, which was equivalent to the speed of railroad train entering into a maintenance depot.

(1) We explained magnetic source useful for ferromagnetic materials such as train wheel and verified the usefulness of magnetic source type and magnetizing method by making numerical analysis.

(2) We compared the existing magnetic sensor arrangement method and the improved arrangement method that is, sensors are arranged according to wheel profile and flange shape.

(3) We developed the amplification circuit with the high signal-to-noise ratio and the filter circuit for removing noise. And we also developed the high-speed signal process circuit that included parallel comparison type A/D converter.

(4) We analyzed magnetic images from the scan type magnetic camera by using the dipole model. And we compared the experiment results with the numerical analysis results to compare and analyze the effects of length, width and height of defects on magnetic field distribution.

In addition, we developed the intelligent damage evaluation algorithm as below to minimize man-made errors such as worker's misunderstanding and operation mistake due to inexperience.

(5) We analyzed the relation between signal and noise by making frequency spectrum

analysis. And we performed the histogram analysis to examine the relation between existence or non-existence of defects and size distribution of the defects. Based on such analysis of the relations, we suggested the algorithm that could readily and quickly acquire the coordinate, length, shape, direction, and volume of defects. In addition, we proposed the method to express location of defects in measured object in a three-dimensional way. The method can improve worker's understanding of damage analysis.

If the scan type magnetic camera technology developed in this study is used, it is possible to make an estimate to quantify in a high speed and a higher precision defects that existed on the surface or in the vicinity of the surface of ferromagnetic materials used for large equipment and various structures in petrochemical plant, iron and steel manufacturing plant, heavy industry, and vessel as well as nuclear and thermal power plant. In addition, the suggested algorithm and the three-dimension tangible software can help a worker make a more precise judgment.

제 1장 서 론

항공기, 고속 철도, 원자력·화력발전을 비롯하여, 석유 화학 플랜트, 제철 제강, 중공업, 선박 등의 대형기기 및 각종 구조물 등은 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 손실 뿐만 아니라 환경 오염 등 국가적으로 큰 문제를 일으킬 수 있으며, 다음과 같은 몇 가지 사례가 이를 잘 말해주고 있다.

[사고 사례1 : JAL 123편 추락사고] [52-56]

1985년 8월 12일 승객과 승무원 등 524명을 태우고 도쿄를 떠나 오사카로 향하던 일본 항공 소속 보잉 747여객기(Fig. 1-1(b))가 추락했다. 사고 여객기는 고장으로 비상 착륙을 시도하던 중 일본 중부 지역의 오스다까 산 중턱(Fig. 1-1(a))으로 떨어졌다. 생존자는 겨우 4명. 우리나라 사람 6명을 포함해 520명이 목숨을 잃었다. 사고의 원인을 조사한 일본 운수성은 압력 차단벽(bulk head), Fig. 1-1(c)의 균열로 인한 수직 꼬리날개의 파손이었다고 발표했다. 차단벽은 객실과 꼬리 부분 사이에 가로질러 있는 일종의 막이다. 이 부분은 Fig. 1-1(d)에서 보인 바와 같이 기내와 외부의 기압 차이로 인해 기내 압력이 바깥(수직 꼬리 날개 쪽 내부)으로 나가는 걸 막고, 압력에 의한 기체 변형에 대해 유동적으로 움직이며 그 충격을 완화 시켜 준다. 일종의 탄산음료 캔 밑부분의 오목한 부분과 같은 기능을 한다.

(발췌 및 자료출처:<http://blog.naver.com/sakuras122?Redirect=Log&logNo=110005875568>)

사고 7년 전인 1978년 이 비행기는 착륙 중 꼬리 부분이 활주로 바닥과 부딪치는(Tail strike) 사고가 있었고 이로 인해 압력 차단벽이 파손 되었다. 자체 정비

기술이 빈약했던 일본 항공은 보잉사에 위탁 수리를 의뢰하였다. 보잉사의 수리 절차는 손상된 차단벽을 두 줄의 리벳이 박힌 이중 철판을 덧붙이는 것이었지만 기술자는 오직 한 줄의 리벳만이 박힌 이중 철판을 사용했다. 그 때문에 나머지 한 줄의 리벳만을 사용한 이중 철판에 과중한 하중이 걸리며 압력 차단벽이 벌어지게 되었다. 더욱이 1978년 사고 후 7년간의 운행 중 6차례의 정기 검사가 실시 되었음에도 불구하고 결함을 검출하지 못했다. 결국, 기내의 높은 압력이 차단벽을 부수며 분출되면서 수직 꼬리 날개를 파괴하여 조정 불능 상태를 맞게 되었고, 수많은 인적 손실을 동반한 큰 사고로 이어진 것이다.



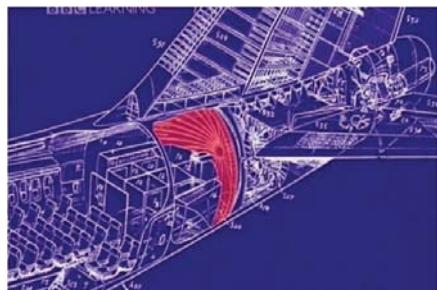
(a) 오스다까산 추락부근



(b) 보잉 747SR-46 (Japan Airlines Flight 123)



(c) 벌크헤드



(d) 꼬리 날개부분의 구조

자료출처:http://cafe.naver.com/aceshigh.cafe?iframe_url=/ArticleRead.nhn%3Farticleid=75

Fig. 1-1 일본항공 소속 JAL 123편 추락사고

[사고 사례2 : ICE 탈선사고] [57]

1998년 6월 3일 독일의 고속 전철인 ICE1(ICE884) 차량의 탈선 사고가 발생하였다. 사고는 뮌헨을 출발해 엘토나로 가던 ICE1열차가 에쉐드(Eschede)역 6km 전방에서 열차 중앙부의 이상 진동을 감지하면서 시작된다. 기관사는 에쉐드역 2km 전방에서 후방 열차의 사고를 확인하고 비상 제동 후 에쉐드역에 정상 정지하였다. 선두 동력차에 연결된 1, 2번 객차는 탈선 후 고가를 지나 정지 하였고, 3번 객차는 고가 기둥과 충돌하게 된다. 이로 인해 4번 객차는 선로 변 숲 속으로 튕겨져 나갔으며 5번 객차는 붕괴된 고가에 차량의 1/2이 파손되었고 나머지 6-11번 객차는 다른 객차 및 붕괴된 고가와 연쇄 충돌을 일으켰다. 이 사고로 사망자 101명, 중상자 108명의 인명 사고를 초래 하였다.

(발췌 및 자료출처:<http://www.railsafety.or.kr/>)

상기 사고의 원인은 차륜의 파괴에 의한 것이었다. 원래의 ICE1 차량편성은 모든 차량의 바퀴가 프랑스의 TGV나 일본의 신간선 차량처럼 일체형 차륜이었으나 진원이 아닌 차륜에 의해 발생하는 진동을 없애기 위해 1996년에 이를 개량하여 차륜을 외륜과 내륜으로 나누고 그 사이에 고무링을 삽입한 차륜(Fig. 1-2(b))을 객차 중 약 2/3정도의 차량에 사용하였던 것이다. 이 사고의 많은 요인들 중 파괴 역학적 측면에서 차륜의 사용 수명까지 차륜의 건전성과 신뢰성을 보장할 수 있는지를 검토할 검사 기술이 부족하였고, 매 3500km(2~3일)에는 육안으로 확인하는 작업만 실시하며, 매 24000km(약 6개월~1년)에는 추진축 및 대차의 전반에 관한 검수를 실시하고 있었으나 사고 직전까지도 추진축의 초음파 탐상만을 실시하고, 제한된 정비 시간에 기인하여 차륜의 검사는 실시 하지 않았다.



Fig. 1-2 ICE 고속철도 탈선사고

[사고 사례3: 하마오카 원자력 발전소 가스 누출사고] [58]

2001년 11월 7일 시즈오카현에 위치한 하마오카 원자력발전소 1호기(중부전력 소유 비등형 경수로 출력 540MWe)에서 정상출력운전 중에 고압 냉각 주입(HPCI, high pressure coolant injection) 계통의 터빈 구동 펌프 기동 시험을 수행하던 중 동 계통의 터빈 구동 펌프가 자동적으로 정지했다. 원인은 원자로 건물 2층의 잔열 제거 계통(RHRS, Residual heat removal system) 증기배관인 잔열 제거 열교환기에 열결된 배관 1개(Fig. 1-3(b))가 완전히 파단된 것이다. 파단된 배관은 내경이 15cm, 두께가 1.1cm인 탄소강 재료였으며, 이 사고로 원자로를 긴급히 냉각시킬 수 있는 비상 노심 냉각계통(ECCS, Emergency core cooling system)의 일부인 고압노심 냉각계통이 사용 불능이 되었다. 방사능을 포함한 증기가 원자로 건물로 누설되어 화재 경보기가 울렸지만, 다행히 건물 외부로의 방사능 누설은 없었다고 보고 되었다.

(발췌 및 자료출처:http://radar.ndsl.kr/tre_View.do?cn=GTB2001110389&ct=TREND&lp=SI)

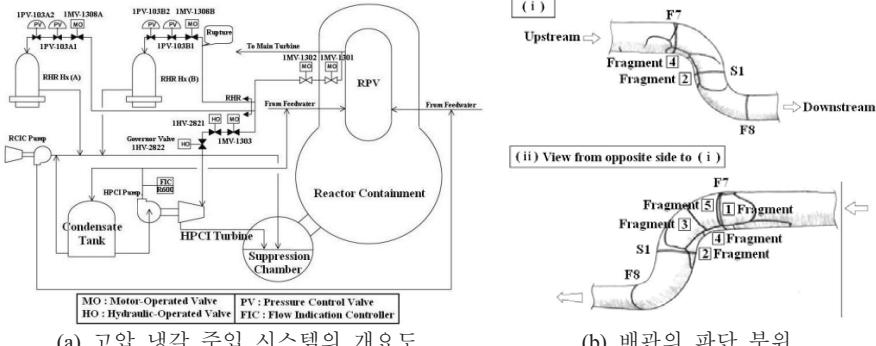


Fig. 1-3 하마오카 원자력 발전소의 배관 파단 사고

특히 이 사고는 배관의 용접부에 경시적인 피로 및 부식에 의한 균열의 진전과 순간 감압에 의한 증기 폭발 및 수격(Water hammer)이 인적 오류와 복합적으로 나타났다. 이러한 사고를 사전 점검할 수 있는 고정밀 손상계측기술의 부재와 안전 관리 부실이 지적 되었다.

이상의 세 건의 사고는 고속 고정도 손상계측기술 및 정량평가 방법, 그리고 숙련된 작업자의 성실한 판정에 의하여 미연에 방지 할 수 있었을 것이다. 이렇듯 대형 기기의 사고 방지 및 장기 운영 구조물의 안정적 가동을 위해서는 (1) 결함 및 손상의 원인을 파악하고, 미연에 방지하는 기술과 더불어 (2) 고속 고정도 손상 계측 기술 및 평가 기술이 매우 중요하다.

한편, 손상허용공학(Damage Tolerance) [1,2]에서는 구조물에 손상이 존재한다고 하더라도 그 크기가 손상허용치수(Tolerance size)보다 작은 결함이라면, 경제적인 측면에서 설계수명을 연장하여 사용이 허락된다. 손상이 허용되기 위해서는 (1) 손상 발생의 원인 분석 및 구체적인 손상 허용 치수의 제시와 함께 (2) 상술한 고정도 손상계측기술이 확립되어야 한다.

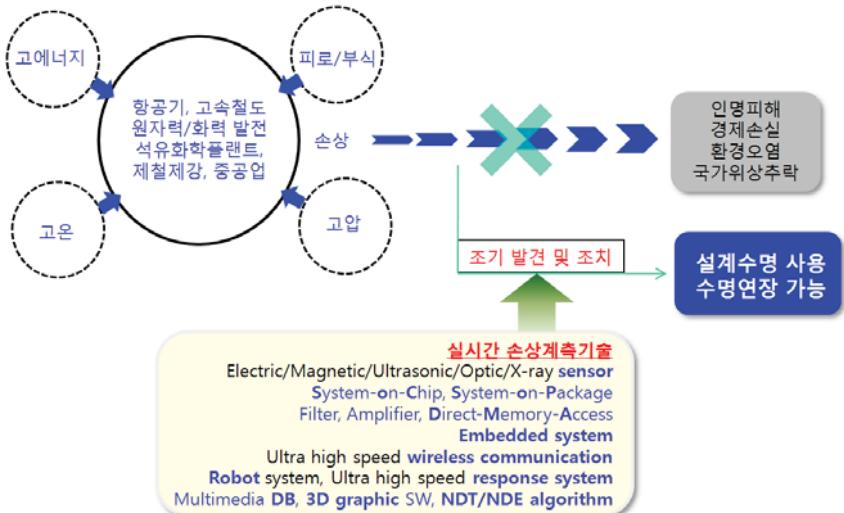


Fig. 1-4 고정도 손상계측기술의 필요성

한편 비파괴검사법(Non-Destructive Testing)으로 대변되는 종래의 손상 계측 기술에는 방사선 투과검사(RT, radiation testing), 초음파탐상법(UT, ultrasound testing), 자분탐상검사(MT, magnetic particle testing), 누설자속 탐상법(MFLT, Magnetic flux leakage testing), 침투탐상법(PT, penetration testing), 와전류탐상법(ECT, eddy current testing), 누설검사(LT, leakage testing), 육안검사(VT, visual testing), 음향방출검사(AE, acoustic emission), 적외선탐상법(IRT, infrared ray testing) 등 여러 가지가 있다.

방사선 투과검사[12]은 피검사체에 X-ray를 조사하였을 때, 손상 부위에서 감쇄가 발생하고, 방사선 센서 또는 감광 필름에 의하여 방사선의 세기 분포를 측정함으로써 결합의 유무를 판단한다. 초음파탐상검사[7-11]는 구조물에 초음파를 전파했을 때, 손상 부분에서 초음파가 반사되고, 이를 압전소자에 의하여 검출하여 손상의 유무를 검지한다. 누설자속탐상검사[11]는 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. 와전류탐상검사[7-10]는 교류 전류를 인가한 코일을 시험편에 근접시켰을 때, 전자 유도 법칙에 의하여 시험편에 유도되는 전류가 결함의 존재 및 그 크기에 의존하는 원리를 이용함으로써 결함을 탐상한다. 자분탐상검사[10]는 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. 침투탐상검사는 구조물에 분사한 형광액체가 삼투압 현상에 의하여 손상 부위에 스며드는 원리를 이용한다. 상기 형광액체를 닦아낸 후, 자외선을 조사하면 손상부위에 잔류한 형광체에 의하여 손상을 검출할 수 있다. 누설검사는 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.

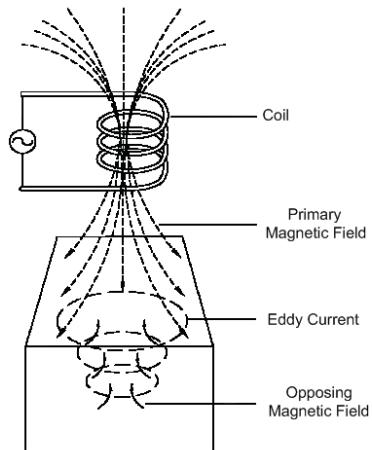
상술한 비파괴 검사법 중에서 자분탐상법과 와전류탐상법 그리고 누설자속탐상법과 같은 전자기적 현상을 이용한 비파괴 검사방법은 금속 구조물의 표면 결함 혹은 표면 근방에 존재하는 결함을 검출하는데 유용한 방법이다.



Fig. 1-5 자분탐상법



(a) 항공기표면 미소결합 검사

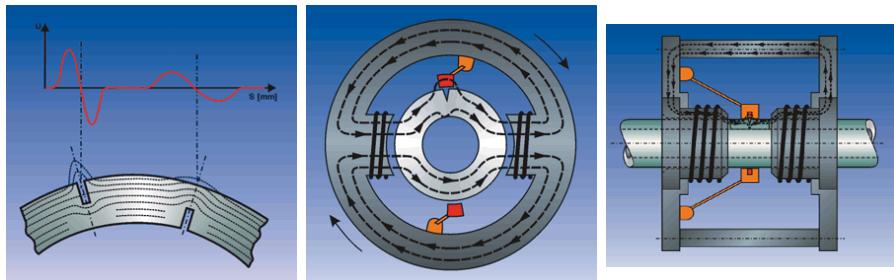


(b) 와전류 탐상법의 원리

자료출처 :http://www.qualitydigest.com/dec03/articles/01_article.shtml

Fig. 1-6 와전류 탐상법

그러나, 자분 탐상법은 검사 전후의 세정 처리 및 숙련된 자분 도포기술이 필요하고, 유사 결합 형태의 구분이 어려워 정량적인 평가가 어렵다. 한편, 누설자속 탐상법은 결합을 포함한 시험편 표면 근방의 자기장의 분포를 정량적으로 측정하여, 결합의 유무 및 위치뿐 아니라, 그 크기도 추정하는 정량 평가가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 결합의 누설자속이 공간적, 강도적으로 미소하기 때문에 자기센서를 시험편 표면에 접근시켜야 할 필요가 있다. 또한, 단일 센서의 스캔에 의한 측정 및 해석에 기인하여 많은 시간이 소요되는 것은 해결해야 할 문제중 하나이다. 와전류 탐상법은 상자성 재료의 표면 피로균열과, 얇은 곳에 존재하는 내부결합 및 부식결합을 검출하고 평가하는데 사용되고 있는 중요한 기술 중 하나이다. 그러나, 인접한 코일간 간섭의 영향으로 공간분해능을 높이는데 한계를 가지고 있다. 결과적으로 많은 수의 코일을 배열할 수 없어서 탐상 속도가 빠르지 못하다는 단점을 가지고 있다.



자료출처: <http://www.foerstersystems.com/eddycurrent.html>

Fig. 1-7 배관의 내외부의 누설자속 탐상법

뿐만 아니라, 지금까지의 비파괴 검사(NDT, Nondestructive testing)기술에 의하면, 작업자는 착오, 경험 미숙에서 오는 조작과정의 실수, 숙련된 상태에서 무의식적인 동작, 착각, 재해 경험으로 인한 신경과민, 의욕 저하와 같은 내적인 요인과 작업 강도, 불안전한 환경, 천재 지변, 기계 설비의 결함, 감독 불충분과 같은 외적인 요인을 항상 가지고 있다. 이러한 작업자의 내·외적인 원인에 의하여 작업 당일 컨디션 및 숙련도에 의하여 손상이 있고 없음이 판단되는 오류 혹은 위험성도 내재되어 있었다. 저자가 포함된 연구 그룹에서는 상술한 자분 탐상법, 누설 자속 탐상법, 와전류 탐상법등의 단점 및 제약을 해결하기 위하여 자기카메라를 제안해 왔다. 자기카메라는 자기장 분포를 가시화할 수 있으며, 이러한 원리를 이용하면 비접촉식으로 금속의 평가와 비파괴 검사에 사용할 수 있다.

Fig. 1-8에 표시한 바와 같이 자원, 피측정체, 자기렌즈, 1차원 또는 2차원으로 배열된 자기센서, A/D변환기, 인터페이스, 디스플레이 장치로 구성된다. 대상물이 강자성체 또는 상자성체인지에 따라, 전자석[13-15], 유도전류[29], 헬륨홀츠 코일[16-17] 또는 지자기[18]를 자원으로 활용할 수 있으며, 특히 강자성체 재료의 시험 편인 경우에는 극간식 자화코일이 많이 사용된다. 이러한 자원에 의하여 시험편을 자화할 때, 균열의 존재에 기인하는 시험편 근방에서 누설 자속이 발생하고, 3차원 형상의 자성유체(이하, 자기렌즈)를 자기센서 배열의 이면에 배치하여 미약한 자속 밀도분포를 접속하고, 증폭 한다. 이때 1차원 또는 2차원으로 배열된 자기센서에

의하여 시험편 표면의 자속밀도 분포를 측정한 후, A/D변환기를 이용하여 전기적 신호 배열의 분포로 변환하여 컴퓨터에 입력한다, 이러한 분포는 실시간으로 가시화 되고, 결합의 형태와 크기를 정량적으로 해석 및 저장할 수 있다.[19-23]

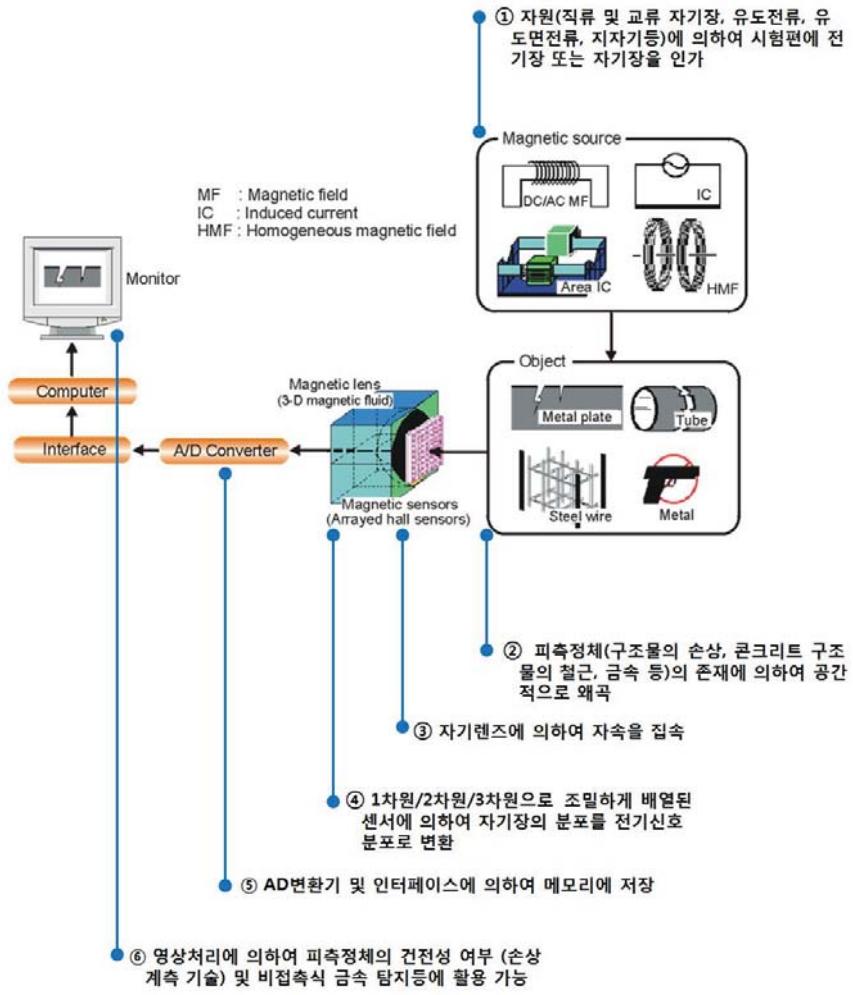


Fig. 1-8 자기카메라의 개요도

한편 저비용 고효율 교통수단으로 주목 받고 있는 철도는 여객 철도(승용차 대비 1/8) 및 화물 철도(화물차 대비 1/14) 모두 종래의 교통수단에 비하여 매우 적은 에너지 소비량을 보이고, 탄소배출에 있어서도 각각 1/6과 1/13 수준의 탄소를 배출하는 최적의 친환경 수단인 것이다. 또한 세계적으로 기후 변화에 따라 녹색성장이 새로운 가치로 대두되면서 교통 부문에서 녹색 성장을 주도할 기술로 손꼽히고 있다. 하지만, 수 천 톤 중량의 철도차량은 수백 km/h로 이동할 때 막대한 운동 에너지를 갖게 되며, 또한 많은 운행 시간과 급제동 등의 문제로 인해 차축, 차륜 및 레일에는 필연적으로 손상이 일어 나게 된다. 그럼에도 불구하고 철도차량을 정비 및 관리하는 정비창에 체류할 수 있는 시간은 2시간 이내로 한정 되어 있으므로, 고속 고정도 실시간 손상 계측기술의 도입이 절실하다.[3-6]

따라서, 본 연구에서는 철도차량이 정비공장에 진입하는 속도인 시속 약 30km/h에 상당하는 속도로 회전하는 고속철도 차륜의 검사법을 제시한다. 즉, (1) 차륜의 닦면 형상에 따라 조밀하게 배열된 고속용 센서 배열과 직류형 자속 발생 장치를 자원으로 하는 고속 결함 탐상을 위한 자기카메라 요소기술 개발과 (2) 신호대 잡음비(S/N, Signal-to-noise ratio)가 높은 증폭 및 A/D변환을 거쳐 직접메모리 접근방식(DMA, Direct Memory Access)의 대용량의 메모리에 저장하는 고속 신호 처리 회로의 개발을 보고한다. 또한, (3) 전술한 바와 같이 작업자의 착오, 경험 미숙에서 오는 조작 과정의 실수 등과 같은 인적 오류를 최소화하기 위하여 결함의 검출 및 위치 파악, 결함 크기의 정량 평가 알고리즘을 제시하고, (4) 3차원으로 피측 정체의 결함의 위치 및 손상의 정도를 표현하여 작업자의 손상 판정 이해도를 높이기 위한 3차원 실감형 그래픽스에 의한 표현기법을 제시하였다.

이러한 연구를 위해서 제 1장은 몇 가지 사고 사례를 통해 사고의 주요 요인을 파악하고, 종래의 사고 예방을 위한 검사 방법을 간단히 설명하며, 제안된 자기 카메라를 중심으로 이론적 배경을 기술 하였고, 제 2장부터는 본인이 박사과정 동

안 연구한 결과를 중심으로 기술 하였다. 먼저 제 2장에서는 자기카메라의 요소 기술인 자원, 자기센서 배열 및 신호 처리 회로, A/D변환 및 인터페이스, 결함 정보 평가의 원리를 중점적으로 논의하고, 제 3장은 제안한 지능형 결함평가 알고리즘의 원리를 설명하였으며, 제 4장은 실제 고속 철도 차륜의 인공 결함 및 자연 결함을 검출 및 평가함으로써 자기카메라와 지능형 결함 평가 알고리즘의 유용성을 고찰하였다. 마지막으로 제 5장에서는 본 연구의 결과를 토대로 결론을 기술 하였다.

제 2장 구성 요소 및 원리

자기카메라는 Fig. 1-8에 보인 바와 같이 자원, 피측정체, 1차원 또는 2차원으로 배열된 자기센서, 3차원 형상의 자기렌즈, A/D변환기, 인터페이스, 컴퓨터 및 디스플레이 장치로 구성된다. 이러한 구성에 의하면, 결함의 존재에 기인하는 시험편 근방에 누설 자속이 자기렌즈에 접속되고, 배열된 자기센서에 의하여 전기신호로 변환 된다. 자기장의 분포는 실시간으로 가시화되고, 해석을 위한 정량적인 데이터를 제공한다.

피측정체가 강자성체, 상자성체 혹은 강자성체와 상자성체가 혼재 된 재료인지에 따라 자화 방법과 자원의 형태는 달라진다. 제 2장의 ‘제 1절. 자원’에서는 여러 가지 형태의 자화 방법 중 철도 차륜과 같이 강자성체 재료에 유용한 자원의 형태와 특징을 설명하고, 수치해석을 통하여 유용성을 확인한다. 또한, 앞서 언급된 자원에 의하여 결함의 존재에 기인한 누설 자속이 시험편 근방에 발생하게 되고, 이 누설된 자속의 분포는 1차원 혹은 2차원으로 배열된 자기센서에 의하여 전기신호의 분포로 변환된다. ‘제 2절. 자기센서 배열 및 신호 처리 회로’에서는 종래에 자기센서 배열 방법과 개선된 자기센서 배열 방법의 비교를 통해 제안된 방법의 유용성을 확인하였다. 또한 변환된 신호의 증폭에 사용된 회로와 S/N를 높이기 위한 필터에 대하여 설명한다. ‘제 3절. A/D변환기’에서는 배열된 센서와 증폭, 필터 회로에 의해 얻어진 전기신호(아날로그)를 디지털 신호로 변환하는데 사용된 회로와 특징을 설명한다. ‘제 4절. 인터페이스’에서는 A/D변환된 데이터의 저장, 처리 및 전송할 수 있는 신호처리 장치에 대하여 설명한다. ‘제 5절. 결함정보 평가’에서는 신호처리 장치에 의해 전송 받은 데이터와 다이폴 모델을 이용한 수치 해석 데이터를 비교하였다. 해석에 사용된 다이폴 모델의 개선 부분을 논의하고, 결함 정보 평가 알고리즘을 제시하였다. 본 연구에서는 자기카메라의 구성 요소 중 하나인 3차원 형상의 자기렌즈는 검토하지 않았다.

제 1절 자 원

시험편의 형태와 재료의 종류에 따라 교차 자화법(C-MFL, Cross-type magnetic source), 직류 자화법(DC-MFL, direct current magnetic flux leakage), 판형 자화법(P-MFL, plate-type magnetic flux leakage), 내부 솔레노이드 자화법(IS-MFL, in-side solenoid magnetic flux leakage), 수직 자화법(V-MFL, vertical-type magnetic flux leakage), 유도면 전류법(STIC, sheet-type magnetic induced current), 개선된 유도면 전류법(i-STIC, improved sheet-type induced current), 복합 유도전류 누설자속법(CIC-MFL, combined induced current-magnetic flux leakage), 자성유체 침투법(MFPT, magnetic fluid penetration testing)과 같은 여러 가지 자원이 개발 되었다. [28-35]

교차 자화법(C-MFL, Fig. 2-1(a))은 누설자속탐상법 또는 자분탐상법의 경우 결합 길이 방향이 자화방향과 수평일 때, 결함을 탐상하기 곤란한 점을 보완하기 위하여 제시된 방법이다. 마주보는 두 개의 자극을 가지는 두 쌍의 극간식 자화기를 설치하고 교변 전류를 입력하면, 자화기 위의 시험편은 서로 직각이 되는 방향으로 교차 자화된다. 이때, 결함의 길이 방향이 어느 쪽이라고 하더라도, 누설자속을 유도하여 탐상할 수 있게 되며, 정량적으로 결함을 평가할 수도 있다. 직류 자화법(DC-MFL, Fig. 2-1(b))은 나란한 두 개의 자극으로 구성되며, 이러한 소형자화기를 조밀하게 배열된 자기센서의 이면에 설치하여 센서배열 방향에 수직하게 자화한다. 주로 제철제강 공정의 결함 검출 및 고속 철도 차륜의 비파괴 검사에 적용된다. 판형 자화법과 내부 솔레노이드 자화법은 배관 내부의 결함 또는 선재에 존재하는 결함을 검출하기 위한 원통형 자기카메라의 자원으로 사용할 수 있다. 판형 자화법(P-MFL, Fig. 2-1(c))은 배관과 같은 원통형 시험편 외부에 결함이 위치할 때 판재 형태의 코어에 코일을 감고, 이를 원통형 시험편 내부에 위치 시켜 자화 하면서 결함을 검출하는 방법이다. 또한, 내부솔레노이드 자화법(IS-MFL, Fig. 2-1(d))은 직접 원통형 시험편에 코일을 감아 자화하고 원통형 시험편 내부의 결함을 검출하는 방법이다.

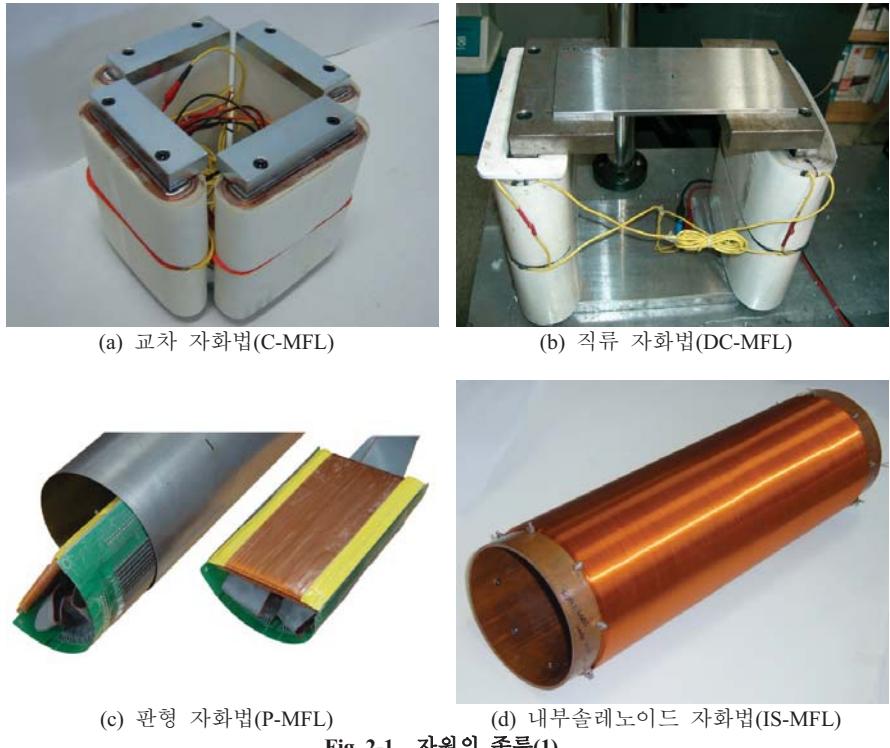


Fig. 2-1 자원의 종류(1)

수직 자화법(V-MFL, Fig. 2-2(a))은 매우 간단한 구조를 갖는다. 수십 회 감은 코일 안에 자기 센서를 위치 시킨다. 코일에 교류를 인가 하였을 때 시험편에 수직한 방향의 교변 자계가 유도 된다. 이때 결합에 의한 자기장의 변화와 유도전류의 흐트러짐을 측정하여 결함을 탐상할 수 있다. 유도면 전류법(STIC, Fig. 2-2(b))은 시험편의 표면에 면전류를 유도하고, 결합의 존재에 기인하는 면전류의 왜곡을 유발하는 방식이다. 즉, 코일(coil)에 교류전류를 입력하면, 강자성체 코어(core)에 교류자기장이 발생한다. 이때, 코어를 통과하는 동판(copper plate)에는 교류 면전류가 유도된다. 도전성 시험편(specimen)을 동판에 근접하면 시험편의 표면근방에 유도면전류가 유도되고, 결합의 존재에 의하여 결합의 양 선단에서 유도면전류의 왜곡이 발생하

여 자기장의 분포가 변화하게 된다. 이러한 자기장 분포의 변화를 검지함으로써, 강자성체, 상자성체 금속, 강자성체 및 상자성체가 혼재된 구조물의 결함을 검출할 수 있게 된다. 특히, 도전성이 좋은 재료에 유효하여, 알루미늄 합금 또는 마그네슘 합금에 존재하는 희로균열등을 검출할 수 있음을 보고한 바 있다. 또한, 넓은 면적에서 유도면전류를 발생시킬 수 있으므로, 면적형 자기카메라에 의한 실시간 비파괴검사가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 개선된 유도면 전류법(i-STIC, Fig. 2-2(c))은 양쪽 옆이 트여 있는 납작한 형태의 직육면체 류형 코어에 납작한 한쪽 면에 여자 코일을 수십 회 감고, 또한 반대쪽 면에는 sheet 타입의 동판이 감긴다. 여자 코일에 교류 전류를 입력하였을 때 sheet 타입의 동판에 교변 자계가 발생하고 시험편에 존재하는 결함에 의해 유도 전류의 흐트러짐이 발생한다. sheet 타입의 동판 아래 위치한 배열된 자기센서를 통해 이러한 자기장의 변화를 검출하게 된다. 복합 유도전류 누설자속법(CIC-MFL, Fig. 2-2(d))은 DC-MFL에서 적용한 소형 요크형 전자석에 교류전류를 입력하면, 자극(magnetic pole) 사이에 자기장이 발생하여, 결함의 존재에 의한 누설자속이 발생한다. 또한, 자기장과 직각인 방향으로 시험편에 유도전류가 발생하여, 결함의 존재에 의하여 전기장의 왜곡을 유도하게 된다. 이러한 유도전류와 누설자속이 복합적으로 나타나, 강자성체의 경우에는 단순한 구조에서도 결함의 길이방향에 관계없이 결함 탐상이 가능하게 된다. 또한, 상자성체 금속의 경우에는 유도전류에 의한 결함 검출이 가능하다. 특히 결함의 길이방향이 자기장의 방향과 평행할 때 보다 유효한 결함 탐상이 가능하게 된다. 자성유체 침투법(MFPT, Fig. 2-2(e))은 결함이 존재하는 시험편에 자성유체 도포하고 외부의 자기장인가 없이 시험편 근방에서 자기장의 분포를 측정하여 결함을 검출한다. 또한, 각각의 피측정체에 대한 자원의 선택 및 특징을 Table 2-1에 나타낸다.

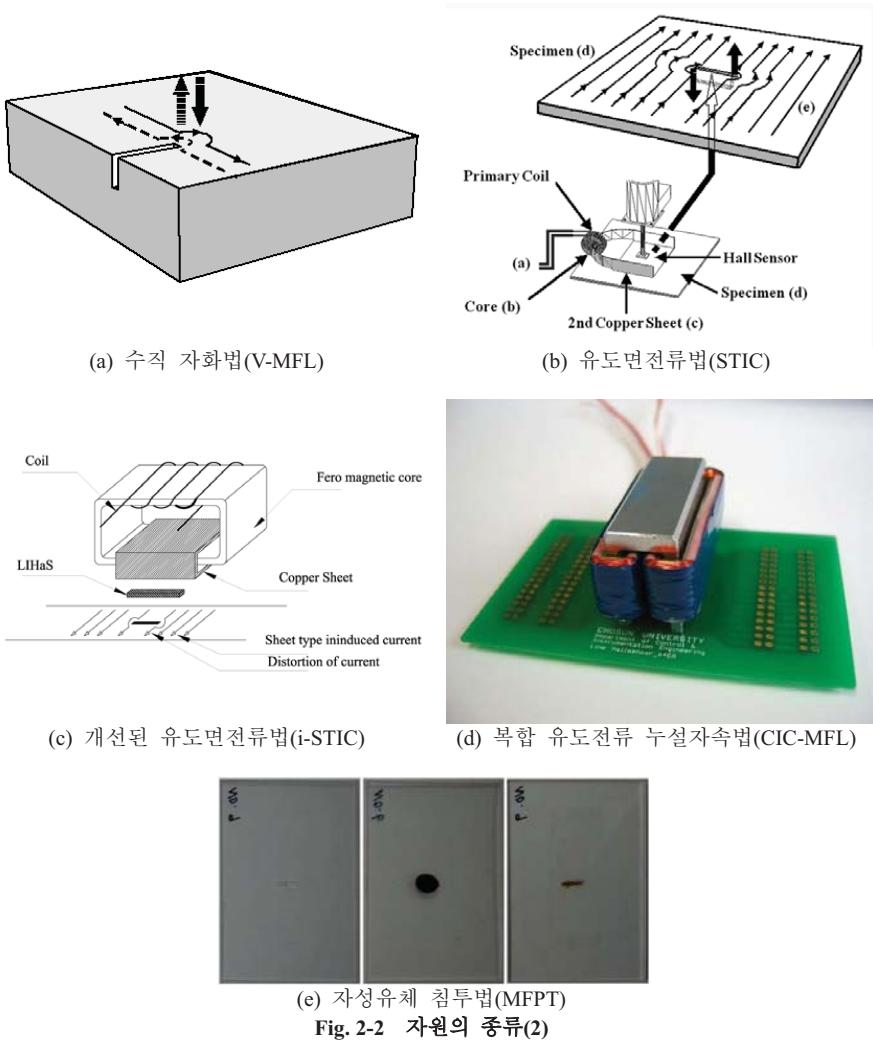


Fig. 2-2 자원의 종류(2)

본 연구의 목적인 고속으로 회전하는 철도 차륜의 담면 및 플랜지의 결함을 탐상하기 위해서는 자원의 선택이 중요하다. 차륜의 특징을 살펴 보면 주로 철도 차륜은 강자성체 재료로 만들어지며, 차축을 중심으로 차륜 담면과 플랜지의 형상

으로 회전시켜 만든 대칭 형태의 회전체의 특징을 갖는다. 뿐만 아니라 검사영역이 차륜 담면과 플랜지로 검사면이 평평하지 않은 것이 특징이다. 따라서 본 연구에서는 스캔 타입의 담면과 플랜지 형상의 자화기를 도입하고, 직류 자화법의 자화 방법을 선택하였다.

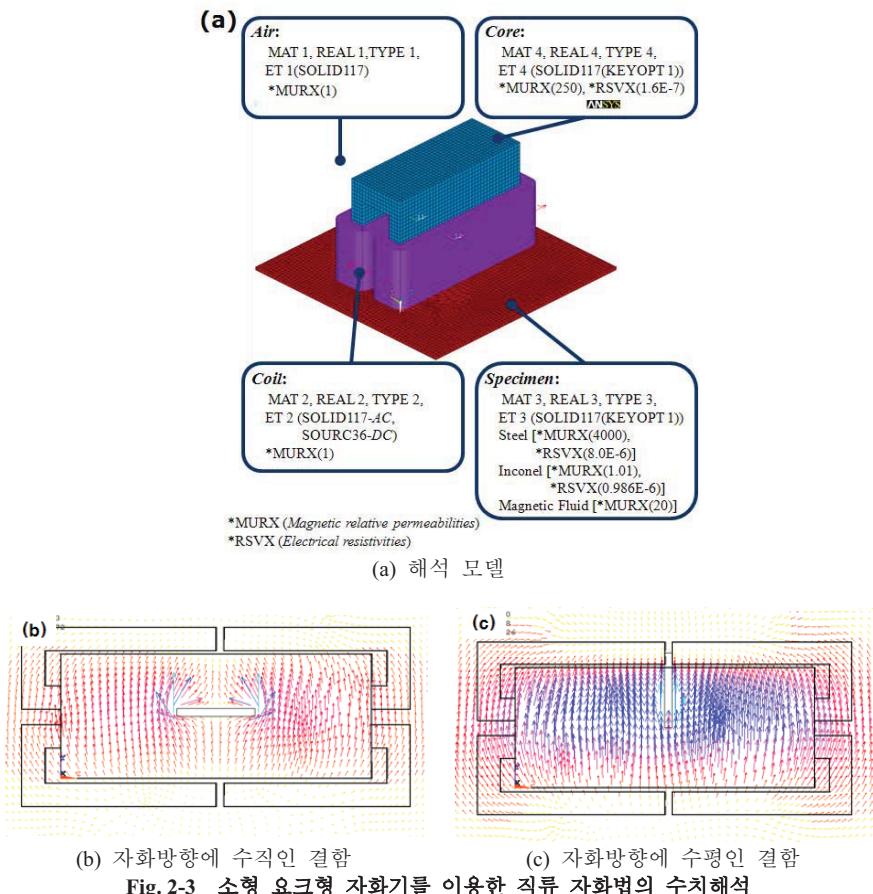
Table 2-1 자원의 분류

Magnetic Source Type	Abbreviation	Specimen Material	Character	Application
Cross type magnetic flux leakage	C-MFL	Ferromagnetic	Crack inspection regardless of crack direction	ISI of steel and iron structure
Direct current magnetic flux leakage	DC-MFL	Ferromagnetic	Small size NDT system. Suitable in scan type magnetic camera	PSI in the steel-iron production line. ISI in train wheel
Plate type magnetic flux leakage	P-MFL	Ferromagnetic	NDT of pipe. Suitable in area type magnetic camera	ISI of steel structure. ISI of wire production
In-side solenoid magnetic flux leakage	IS-MFL	Ferromagnetic		ISI of steel pipe
Vertical type magnetic flux leakage	V-MFL	Ferromagnetic, Paramagnetic and Mixed ferromagnetic & paramagnetic	NDT of metal. Suitable both of scan- and area-type magnetic camera.	ISI of aircraft and nuclear power plant
Sheet type induced current	STIC		Suitable in scan type magnetic camera	ISI of aircraft and nuclear power plant
Improved sheet type induced current	I-STIC		NDT of metal regardless of kinds. Suitable in scan-type magnetic camera	PSI in steel manufacturing line. ISI of aircraft and nuclear power plant
Combined induced current-magnetic flux leakage	CIC-MFL	All material	Opened surface crack	ISI of aircraft and nuclear power plant
Magnetic fluid penetration testing	MFPT			

첫번째로 제안된 직류 자화 방법에 유용성을 검증하기 위하여 시험편에 누설 자속을 유기하기 위한 자화기를 유한 요소 해석법에 의하여 해석하였다. Fig. 2-3(a)에서 자기센서의 스캔 방향(자화방향)과 센서 배열 방향은 각각 x, y방향이며, z방향은 시험편에 수직한 방향이다. 자화기의 y방향의 길이가 40mm, x방향의 폭은 16mm, z방향의 높이는 27mm이고 두께가 3.5mm로 모델링하고, 투자율은 250(S/m), 유전율은 1.6×10^{-7} (F/m)으로 가정하였다. 자화기는 배열된 자기센서의 뒤에 위치한다. 자화기의 양쪽 자극에는 3mm두께와 16mm높이로 2개의 코일이 감겨 있으며, 두 코일에는 직류 4.08A를 적용 하였다. 코일에 전류를 입력하였을 때 시험편에 x방향의 자기장이 인가된다. 또한, 시험편은 $60 \times 60 \times 0.8$ mm의 크기로 모델링하고, 시험편 중앙에 깊이가 0.8mm이고 폭이 0.1mm, 길이가 10mm인 결함을 도입하였다. 시험편의 투자율과 유전율은 각각 4000 (S/m)와 8×10^6 (F/m)의 강자성체 재료로 가정한다. 해석에서의 lift-off는 2mm이다.

자화된 시험편의 결함 주위에서는 누설 자속이 발생하는데 발생된 누설 자속 밀도를 살펴보면 자화기 자극의 영향으로 자화 방향인 x방향으로 경사진 형태를 보이게 된다. 이것의 수직 성분인 z성분만을 살펴 보면 결함 부근에서 구형파의 한 주기의 모습을 보이고, x방향으로 미분한 $\partial B / \partial x$ 처리하면 결함이 있는 위치에서 ±Peak를 갖는다. 또한 누설 자속의 수평 성분인 x성분만을 살펴 보면 결함의 양쪽 tip에서 급격하게 누설 자속이 변화하게 된다. 해석을 통해 얻어진 누설자속 분포를 자화 방향인 x방향으로 $\partial B / \partial x$ 처리하고, $\partial B / \partial x$ 의 수평 성분인 x방향의 성분만을 분석하였다. Fig. 2-3(b),(c)와 같은 결과 데이터를 얻을 수 있었다. 시험편 위에 존재하는 결함이 자화 방향에 서로 다른 방향으로 위치할 때 결함의 각 선단 부분의 영향으로 누설 자속의 분포는 달라 지게 된다. Fig. 2-3(b)에 보인 바와 같이 결함의 길이방향이 자화 방향과 수직일 때 결함의 양쪽 tip에서 급격하게 누설 자속이 발생하는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 누설 자속은 최대가 된다. 하지만 결함의 길이 방향이 자화방향과 수평일 때는 결함의 누설 자속은 Fig. 2-3(c)에서와 같이 최소가 된다. 이것은 결함이 자화방향에 수직인 경우에는 결함의 길이 방향의 단면에 영향

을 받아 큰 누설 자속을 발생하게 되지만, 결함이 자화방향에 수평일 경우에는 결함의 폭방향의 단면에 영향을 받아 작은 누설 자속이 발생하게 된다. 따라서 철도차륜과 같이 강자성체 재료의 시험편에서 직류 자화 방법은 자화방향과 이루는 각이 작을 경우 결함에 의한 누설 자속이 작아 지므로 주의 하여야 하지만, 결함의 길이 방향이 자화 방향과 이루는 각이 수직일 때 최대의 누설 자속이 발생되어 결함 검출에 매우 유용함을 알 수 있다.



또한 두번째로 차륜 담면과 플랜지 형상의 자화기를 이용하고 앞서 제안된 직류 자화방법에 의해 차륜을 자화할 때 상술한 소형 전자석을 유한요소 해석하였다. Fig. 2-4(a)는 소형전자석으로써, 자화기의 기본적 형상은 Yoke type으로 하고 자화기의 두 극은 차륜의 형태로 모델링하였다. 스캔 방향과 센서 배열 방향은 각각 x, y 방향이며 z방향은 시험편에 수직한 방향이다. 자화기의 길이(y방향)는 150mm이고, 폭(x방향)은 30mm, 높이(z방향)는 39mm의 크기로 모델링하였으며, 자화기의 전체적인 두께는 5mm이다. 코어의 투자율은 4×10^3 (S/m), 유전율은 8×10^6 (F/m)이며, 자화기는 배열된 센서의 배면에 위치시킨다. 코일은 4.8mm 두께와 19.8mm 높이로 코어의 두 극에 감긴다. 코일에 직류 1A를 적용 하였을 때 Fig. 2-4(a),(b)의 차륜에 x방향의 자기장이 인가된다. 차륜은 직경이 860mm의 크기이며, 차륜의 투자율과 유전율은 각각 4×10^3 (S/m)와 8×10^6 (F/m)의 강자성체 재료로 가정한다. 해석에서의 lift-off는 1mm이다. 결합의 깊이를 5mm, 폭 4mm, 길이는 20mm로 도입하여 해석하였다. 앞서 해석 결과와 같이 결합이 자화방향에 수직일 때, 수평일 때 유사한 결과를 얻었다. 해석을 통해 얻어진 데이터의 $\partial B / \partial x$ 치리 후 수평 성분인 x방향의 성분만을 분석하였다. 결합의 길이 방향과 자화 방향이 수직일 때는 Fig. 2-4(c)의 해석 결과와 같이 결합의 양쪽 tip에서 많은 흐트러짐이 발생함을 알 수 있으며, 자화 방향과 수평일 때는 (Fig. 2-4(d))와 같이 누설 자속이 최소화됨을 알 수 있다. 따라서 자화기의 형상이 차륜의 담면의 형상과 같이 다소 구부러지더라도 결합 겹출을 위한 자기장을 여기하는데 큰 영향을 주지 않으며, 기존의 요크형 자화기의 자기장 발생과 유사함을 알 수 있다.

상기 유한요소 해석을 통해 (1) 고속으로 회전하는 철도 차륜의 담면 및 플랜지의 결합을 탐상하기 위해서는 일정한 lift-off에 고정된 자화기와 센서를 이용하는 스캔형 자기카메라가 유리하며, (2) 검사 영역이 차륜 담면과 플랜지로 그 형상이 일정하지 않을 경우에 기존의 요크형 자화기의 두 자극을 피측정체의 단면 형상으로 하더라도 자기장은 기존의 요크형 자화기의 자기장 발생과 유사하다. 즉, 시험 편 형상에 따라 자원의 형태가 변하더라도 자기장의 왜곡을 최소화 하면서 자기장

을 인가할 수 있다. 또한 (3) 철도 차륜과 같이 피측정체의 재료가 강자성체이고, 검사 방법이 스캔형태를 갖으며, 소형의 비파괴 검사 시스템에는 직류 자화법이 유용함을 알 수 있었다.

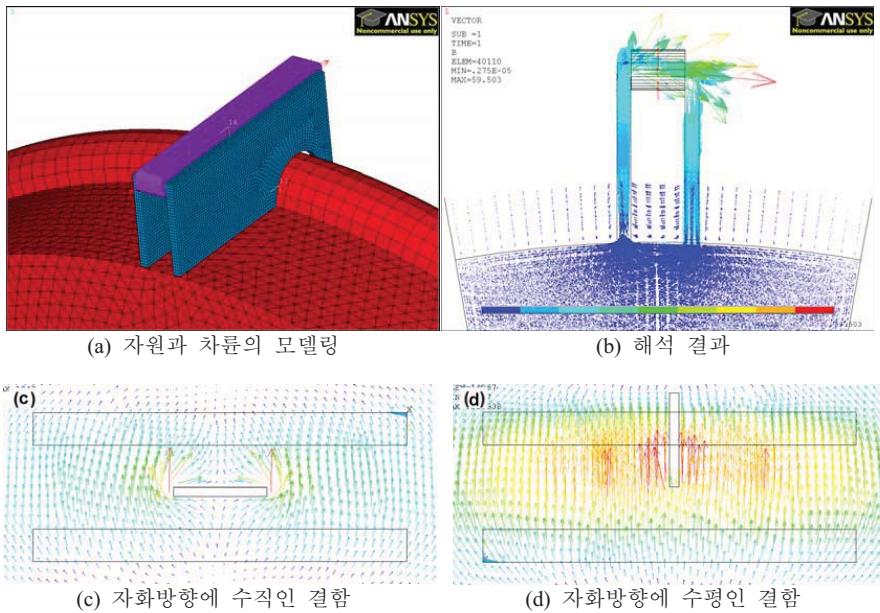


Fig. 2-4 철도차륜 형태의 자원의 직류자화법 수치해석

제 2절 자기센서 배열 및 신호 처리 회로

제철 제강 공정에서 연속 주조 및 압연 공정이나 일정한 선로를 따라 이동하는 철도 차량에서 레일 및 차륜의 결합 검출은 검사 영역의 상부 또는 하부에 일렬로 배열된 센서를 고정하고 피측정체를 이동 또는 회전하면서 스캔하는 검사 방법이 유효하다.

이러한 목적에서 개발된 스캔형 자기카메라는 종래에 상용으로 판매되는 패키지된 홀센서(삼성, HE12AF1U12)를 사용하였다. 하지만 홀센서 배열의 공간 분해능은 센서의 편 수와 패키지의 크기 때문에 필연적으로 낮아지며, PCB에 배열한 센서간의 높이 차이와 경사로 인해 바이어스 오차 및 감도 오차를 피할 수 없었다. 따라서 효율적 영상 처리와 고공간 분해능을 얻기 위해 Ni-Zn 페라이트 웨이퍼 위에 InSb 홀센서를 선형으로 조밀하게 배열(LIHs, linearly integrated Hall sensor array)하였다. 본 절에서는 빌렛 시험편에 도입된 다중 결합 검출을 통해 상기 두 가지의 배열 방법 즉, (1) 상용화된 패키지 홀센서의 배열과 (2) 반도체 공정에서 얻어진 LIHs를 비교하였다. 시험편은 고탄소강 빌렛 시험편(SCM435)으로써 $132 \times 125.5 \times 20\text{mm}$ 의 크기로 가공하여 표면 연마 처리후 Fig. 2-5와 같은 다양한 크기와 방향을 갖는 원형과 슬릿형 결합으로 방전 가공하였다. 각각의 형태, 크기, 자화 방향과의 관계를 Table 2-2에 나타낸다. 한편, 홀센서는 센서 면에 수직으로 입사하는 외부자장의 세기에 비례하여 출력 양단에 전위차이가 발생하며, 외부 자장의 세기와 출력 전압(V_H)은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$V_H = k \cdot I \cdot B \cdot \cos \theta \quad (1)$$

여기서 k 는 홀 상수이며, I 는 입력전류, B 는 외부 자장의 세기, θ 는 센서면에 입사되는 자기장의 각도를 나타낸다. k , I , θ 가 일정한 경우, 출력 전압(V_H)과 외부 자장의 세기(B)는 선형적 관계를 갖는다. 따라서, 본 논문에서는 B 와 V_H 를 혼용하

여 사용한다.

Table 2-2 결함의 크기와 체적

Shape	Crack size, [mm]			Volume, [mm ³]
	Radius	Depth	width	
Hole type	0.25	0.4		0.08
		1.0		0.19
		1.5		0.29
	0.5	0.4		0.31
		1.0		0.79
		1.5		1.17
	1	0.4		1.25
		1.0		3.14
		1.5		4.71
	1.5	0.4		2.83
		1.0		7.06
		1.5		10.60
	2.5	0.4		7.85
		1.0		19.63
		1.5		29.45
Shape	Crack size, [mm]			Volume, [mm ³]
	Length	Depth	width	
Slit type 0°, 45°, 90°	5	0.2	0.2	0.2
			0.4	0.4
			1.0	1.0
	10	0.4	0.2	0.8
			0.4	1.6
			1.0	4.0
	15	0.6	0.2	1.8
			0.4	6
			1.0	15

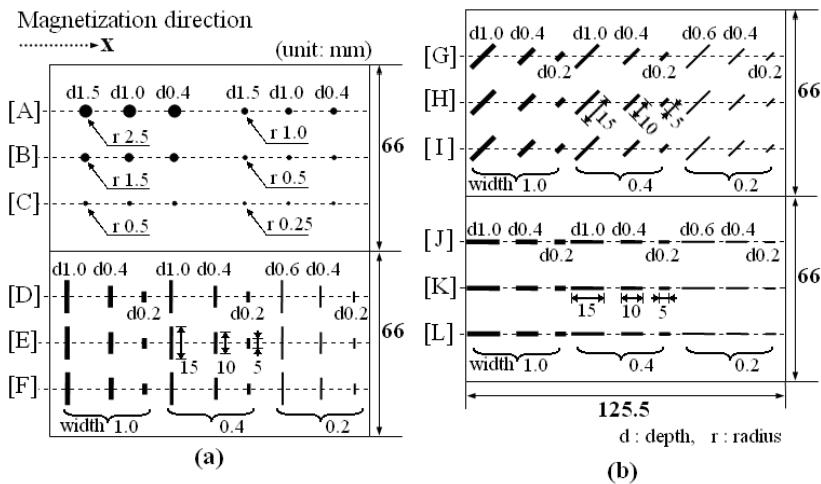


Fig. 2-5 결합의 위치와 형태

1. 종래의 자기센서 배열 방법

시험편은 직류 자화 방법으로 yoke-type 자화기에 의하여 자화되며, 극간 거리는 250mm이고, 4000턴의 코일에 0.7A의 직류 전류를 입력하였다. 고정된 시험편을 스캔하기 위해 배열된 홀센서를 Fig. 2-6(b)에서와 같은 고정밀 이송 장치를 사용하여 스캔하였다. 한편, Fig. 2-6(a)에서와 같이 시험편의 이동방향에 수직방향으로 4mm 간격으로 자기센서를 경사지게 배열하면, 일정 거리를 이송한 이후부터는 1mm의 고공간 분해능을 가지는 자기장 분포를 얻을 수 있다. 시험편과 센서의 거리(lift-off)는 1.2mm이다.

Fig. 2-7(a)는 홀센서의 출력전압 분포(V_H)이며, Fig. 2-7(b)는 V_H 영상을 스캔 방향(x방향)으로 미분한 분포를 $\partial V_H / \partial x$ 로 나타낸다. 또한, Fig. 2-7(c)는 스캔 방향에 수직한 방향인 y방향으로 미분한 V_H 영상 분포를 $\partial V_H / \partial y$ 으로 나타낸다.

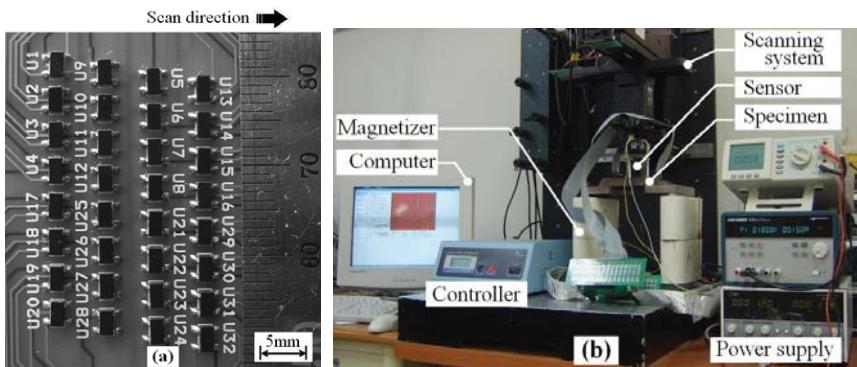


Fig. 2-6 스캔형 자기카메라의 구성

각각의 센서들은 바이어스 및 감도 오차 보정에도 불구하고 V_H 자기영상에서 y 방향으로 작은 물결 무늬가 보인다. 또한 자화기의 자극에 기인하여 자속밀도 분포 V_H 가 크게 기울어지게 되는데 비하여, 결함의 존재에 의한 누설 자속은 상대적으로 미약하여 결함의 가시화에 많은 제약이 따른다. 하지만 Fig. 2-7(b)에서 자화기의 자극에 의한 큰 기울어짐은 거의 선형적이므로 $\partial V_H / \partial x$ 를 통해 결함의 존재를 추출해 낼 수 있다. Fig. 2-8(a)의 [A][B][C]에서 직경 2~5mm의 깊이 0.4, 1.0, 1.5mm에서 그리고 직경 1.0mm에서는 깊이 1.0mm까지 확인 할 수 있다. 원형 결함의 데이터는 결함의 폭방향 및 길이방향이 따로 존재하지 않고, 자화 방향만이 존재하므로 $\partial V_H / \partial x$ 에서 유효한 영상을 제공하게 된다. 특히 자화 방향(x 방향)을 인자로 하는 해석방법인 $\partial V_H / \partial y$ 에서 결함의 유무, 위치 및 크기의 정보를 제공하게 된다. 또한 [D][E][F]의 깊이 10, 15mm의 폭 1.0, 0.4, 0.2mm 깊이 1.0, 0.4, 0.2mm 결함을 영상화 할 수 있음을 알 수 있다. 자화 방향과 결함의 길이 방향이 90° 인 경우로서 결함의 정보를 용이하게 가시화할 수 있다. 또한 [G][H][I]의 결함이 자화 방향과 45° 인 경우로 폭 0.4, 1.0mm, 깊이 15mm에서 영상을 확인 할 수 있다. 하지만 [J][K][L]에서 는 자화 방향과 결함의 길이 방향이 0° 인 경우로서 결함의 존재를 알 수 없다 한편, Fig. 2-9(a),(b)의 $\partial V_H / \partial y$ 에서는 결함을 가시화 할 수 없다. 이것은 앞서 설

명한 V_H 의 자기영상의 y방향으로 센서간의 offset 전압 차이 때문이다. 이것은 센서의 불충분한 바이어스 및 감도 오차 보정 ($B-V_H$)과, 각각의 센서가 PCB 면에 평행하지 않게 장착되었거나, Packaging 과정 중의 뒤틀림에 의하여 감자면과 package면이 평행하지 않게 되었기 때문에 발생한 것으로 추정된다. 실제로 PCB위에 배열된 홀센서의 자속 분포는 하나의 홀센서의 스캔으로 얻어진 분포와 확연히 다르게 된다. 이러한 변위 차이를 레이저 미소 변위 측정기를 이용하여 Fig. 2-10의 각각의 센서와 PCB면 사이의 상대 변위를 측정하였다. 센서 면이 최대 1.96° 기울어져 있었으며, 센서간의 높이 차이는 최대 0.192mm로 나타났다. 이러한 차이로 $\partial V_H / \partial y$ 의 데이터로부터는 결합의 형상 및 존재 등을 알 수 없게 된다.[24-25]

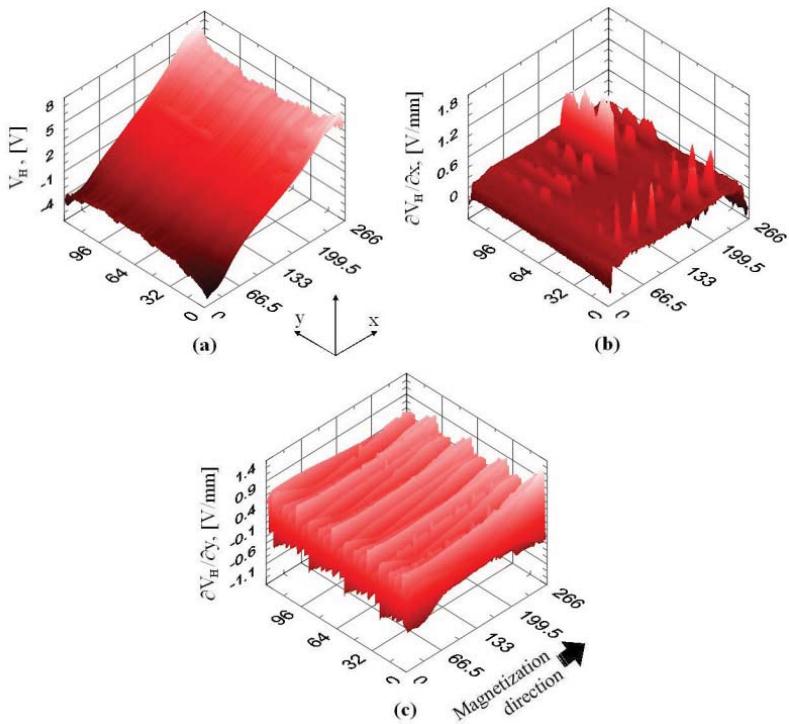


Fig. 2-7 PCB위에 배열된 자기센서를 이용한 자기영상

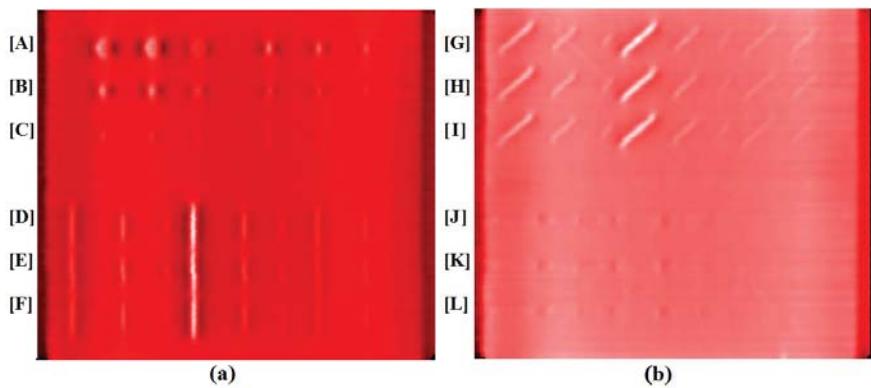


Fig. 2-8 $\partial V_H / \partial x$ 의 자기영상

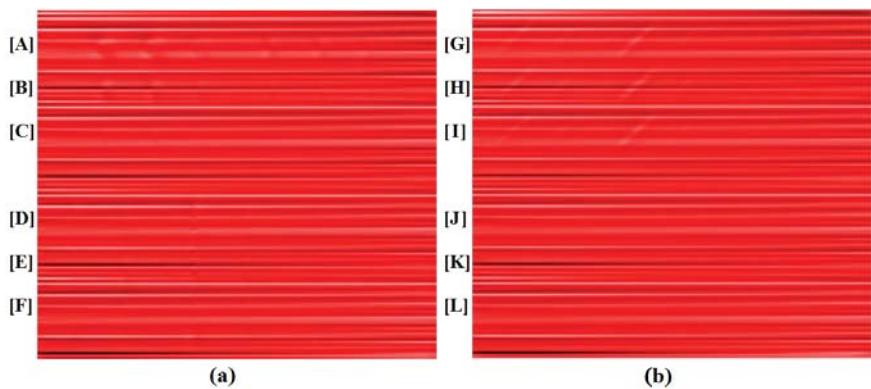


Fig. 2-9 $\partial V_H / \partial y$ 의 자기영상

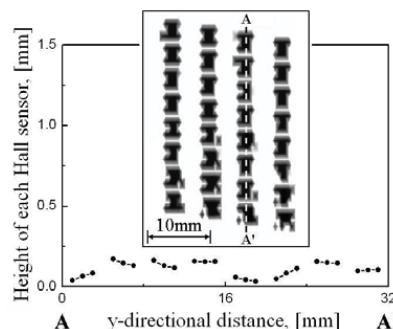


Fig. 2-10 3차원 레이저 미소변위 측정기에 의한 센서 배열 스캔결과

2. 본 연구의 제안 방법

본 연구에서는 Packaging 과정 중의 뒤틀림이나 PCB면에 홀센서 실장시의 기울어짐 및 높이 차이를 개선하기 위한 센서 배열 방법을 제안한다. 제안된 배열 방법은 NiZn 페라이트 웨이퍼 위에 선형적으로 배열한 InSb 홀센서를 PCB상에 배치하고 와이어 볼본딩(Wire ball bonding)에 의해 실장한다. 종래의 배열 방법과의 비교를 위하여 Fig. 2-11(a)에 보인 바와 같이 0.52mm 공간 분해능을 갖는 64개의 LIHaS를 이용하였다. Fig. 2-11(b)는 LIHaS의 뒤에 위치한 소형 오크 자화기이며 앞서 실험에서와 같은 시험편을 자화하게 된다. 자화기의 자극의 거리는 12mm이고, 1110turn의 코일에 250mA의 직류 전류를 입력하였다. lift-off는 0.5mm이다.

Fig. 2-12과 Fig. 2-13은 각각 $\partial V_H/\partial x$ 와 $\partial V_H/\partial y$ 의 자기영상이며 Fig. 2-6(b)의 고정밀 이송장치를 이용하여 0.5mm 공간분해능의 자기영상을 획득하고 영상 처리 하였다. Fig. 2-12(a)의 위쪽의 [A][B][C]에서 나타낸 바와 같이 $\partial V_H/\partial x$ 의 자기영상에서 원형 결함을 탐상할 수 있다. 반지름 0.25mm, 깊이 0.4mm의 작은 결함도 LIHaS를 이용하여 검출할 수 있다.

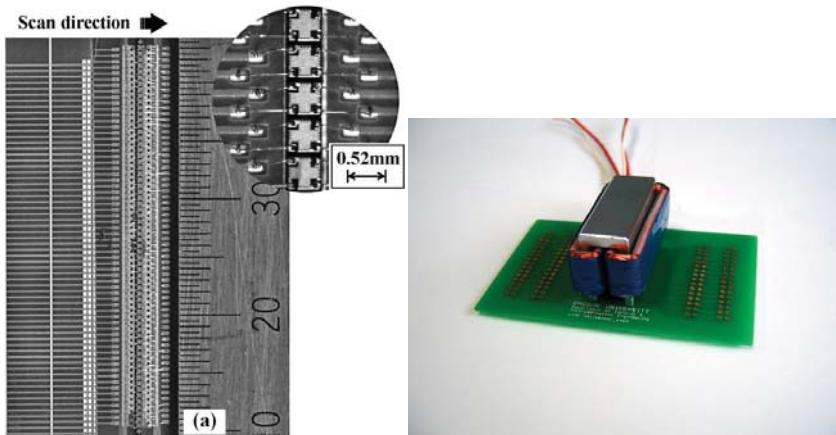


Fig. 2-11 선형 배열된 자기센서와 소형 자원

$\partial V_H/\partial x$ 의 자기영상에서 결합의 길이 방향과 자화 방향 사이의 각이 90도(Fig. 2-12(a)), 아래쪽[D][E][F])와 45도(Fig. 2-12(b))의 위쪽, [G][H][I])일 때의 슬릿형 결합을 탐상할 수 있다. 더욱이 Fig. 2-12(b)의 아래쪽의 [J][K][L]는 결합의 길이 방향과 자화 방향 사이의 각이 0° ($\theta_{MAG} = 0$)일 때로 결합의 길이 방향쪽 양쪽 선단부에서 흑과 백으로 $\partial V_H/\partial x$ 의 자기영상이 변화한다. 이것은 Fig. 2-12(a)의 원형 결합과 θ_{MAG} of 0° 인 슬릿형 결합은 비슷하고 구분하기 어렵지만 Fig. 2-6(a)의 종래 배열방법에서 는 탐상 할 수 없었던 것으로써, LIHaS를 사용함으로써 결합 검출 능력을 향상 시켰다.

한편, Fig. 2-13(a)의 위쪽, Fig. 2-13(b)의 아래쪽에서 보인 바와 같이 원형 결합과 슬릿형 결합을 $\partial V_H/\partial y$ 자기영상을 이용하여 검출할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 2-6(a)의 종래의 배열 방법에서는 검출 할 수 없는데 반하여 LIHaS에서는 $\partial V_H/\partial y$ 영상에서도 결합을 검출할 수 있었다. 한편 Fig. 2-13(a)의 위쪽의 $\partial V_H/\partial y$ 자기영상의 원형결합은 슬릿형 결합과 구분된다. 즉, Fig. 2-12(a), [A][B][C]의 $\partial V_H/\partial x$ 의 원형결합은 Fig. 2-12(b), [J][K][L]의 θ_{MAG} of 0° 인 $\partial V_H/\partial x$ 자기영상의 슬릿형 결합과 유사하지만 $\partial V_H/\partial y$ 자기영상을 통해 형태와 길이를 구분해 낼 수 있다. 따라서 LIHaS의 $\partial V_H/\partial x$ 와 $\partial V_H/\partial y$ 의 자기영상으로부터 결합의 형태, 길이 방향(θ_{MAG})과 결합의 길이를 추정할 수 있다.[26-27]

위 두 실험을 통해 LIHaS를 이용하면 센서 각각의 변위 차이와 기울기는 최소화 되는 것은 물론, 종래의 배열방법보다 더 높은 공간 분해능으로 센서를 배열할 수 있으며, 결합 검출능도 향상 됨을 알 수 있다. 또한 결합을 정량적으로 평가하기 위한 중요한 수단인 $\partial V_H/\partial x$ 와 $\partial V_H/\partial y$ 정보를 취득하기가 용이하므로, 본 연구에서는 고속 철도 차륜검사를 위한 센서부로써 LIHaS를 적용하였다.

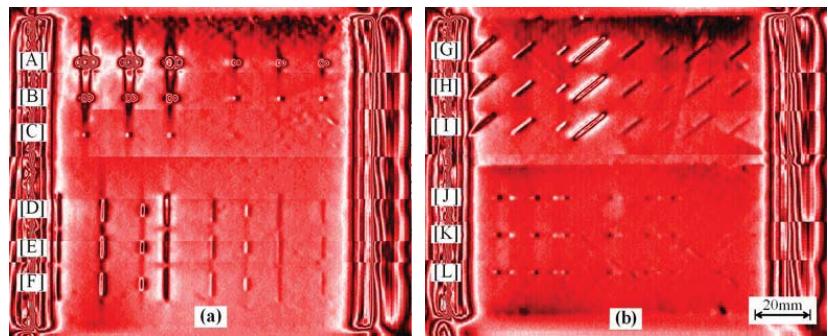


Fig. 2-12 LIHaS의 $\partial V_H / \partial x$ 자기영상

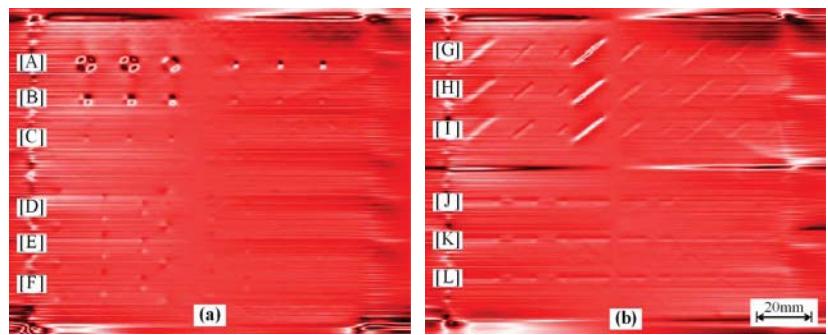


Fig. 2-13 LIHaS의 $\partial V_H / \partial y$ 자기영상

3. 저잡음 고속 차동 증폭 회로

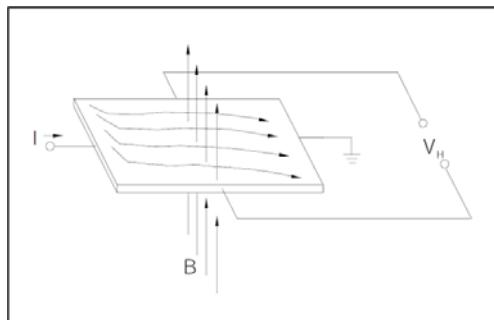
홀 효과 현상을 이용한 홀 센서는 전류가 흐를 수 있는 반도체 물질에 정전류 I 를 흐르게 하고 전류에 직각인 방향으로 B 를 인가하면 Lorentz Force가 전자의 흐름에 작용하게 되어 전자 분포의 왜곡이 발생하게 된다. 이로 인해 출력 양단에는 전위차가 발생하고 이러한 차이는 센서 면에 수직으로 입사하는 외부자장의 세기에 비례하게 된다. 이러한 홀 전압(V_H)은 전술한 바와 같이 Eq. (1)으로 나타낸다. 여기서 k 는 홀 상수이며, θ 는 감자면(減磁面)에 입사되는 자기장의 각도이다.

$$V_H = k \cdot I \cdot B \cdot \cos \theta \quad (1)$$

자기카메라는 이러한 누설 자속 분포에 따른 홀센서의 출력전압 즉, 전위 차이를 차동식 연산증폭기 (이하 OP-Amp)를 이용하여 측정한다. 고정밀 차동 증폭을 위하여 높은 동상신호제거비(CMRR, Common Mode Rejection Ratio)를 갖는 INA128P를 도입하여 Fig. 2-15와 같은 회로를 구성하였다. INA128P는 한 개의 외부 저항(R_G)을 연결하는 것만으로도 쉽게 0~80dB의 이득값을 얻을 수 있다. 차동 증폭 회로에 연결되는 두 개의 전압 플로어(A_1, A_2)들은 작은 오차를 갖으면서도 높은 입력 임피던스를 보인다. 또한, 구동 저항이 R_G 이상으로 불균형 되는 것을 허용할 수 있다. 한편, 차동 증폭회로의 이득은 Eq. (2)에 나타낸 바와 같이 $R_5 = R_7, R_8 = R_9$ 일 때 R_5 과 R_8 에 의하여 결정된다.

이러한 구조는 열전대의 증폭, 의료 계측용, 데이터 수집 등에 사용되며, 우수한 동특성을 가지고 있다는 점에서 저잡음 고속 자기카메라의 증폭 회로로 도입하였다.

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



자료출처: <http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/solidstate/technical/hallbook.pdf>

Fig. 2-14 헬 효과의 원리

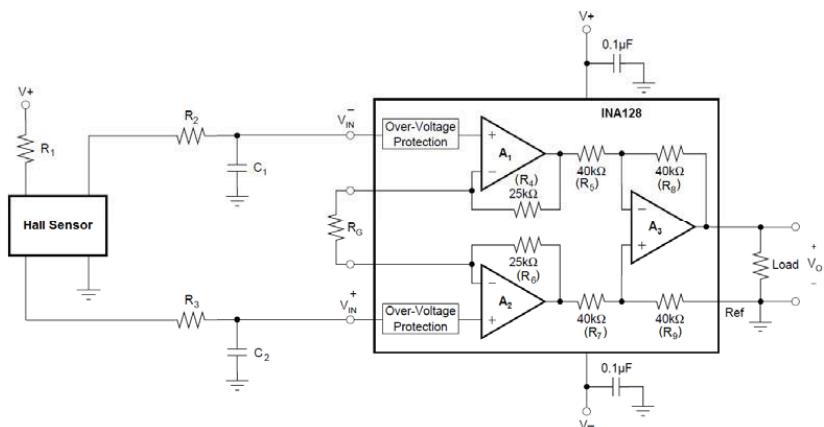


Fig. 2-15 헬센서와 증폭회로(INA128P)의 회로도

4. 필터

가. 아날로그 필터

일반적으로 아날로그 필터는 수동 소자인 저항R, 콘덴서C, 인덕터L의 세가지 기본 요소를 결합하여 설계한다. 이러한 소자를 여러 가지의 형태로 배열하여 특정한 용도의 필터를 만들 수 있다. 일반적으로 이러한 필터의 능력을 증가시키기 위해 연산 증폭기를 추가하여 사용한다. 아날로그 필터는 아날로그 회로 안에서 매우 중요한 역할을 하는 것은 명백하지만, 이러한 필터는 신호의 디지털화가 일어나기 전에 신호 상태의 조절 단계에서 일반적으로 사용되어 진다. 여기에서 신호상태의 조절이란, 신호와 소자, 회로 및 시스템과의 상호작용성을 용이하기 위한 목적으로 신호를 변경시키는 것을 의미한다. 즉, 광대역의 주파수 범위에서 유효하며, 높은 입력 임피던스와 낮은 출력 임피던스를 갖도록 구성하는 것을 말한다.

자기카메라에서는 원치 않는 잡음성분의 제거를 위하여 아날로그 필터를 도입하였다. 즉, 잡음 성분이 대체적으로 높은 주파수 대역을 가진다는 점에서 버터워스(Butterworth) 저역통과 필터(이하 아날로그 LPF)를 도입하여 불규칙적인 파형으로 나타나는 결합의 신호를 필터링 하였다. 즉, 전술한 차동 증폭 신호처리 후 Fig. 2-16에 나타낸 바와 같이 LPF를 통하여 잡음을 감소 시킨 후 A/D변환 하였다.

[36-37]

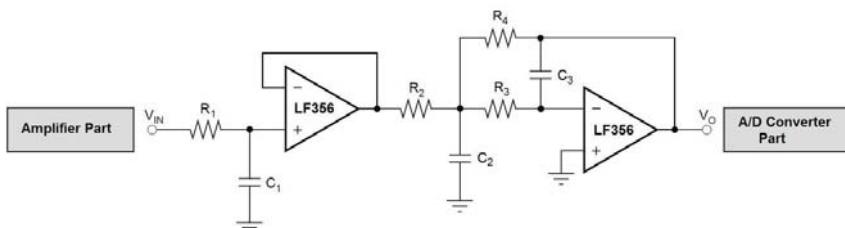


Fig. 2-16 3차 버터워즈 저대역 통과필터

나. 디지털 필터

디지털 필터는 결합 평가 부분의 전처리 과정으로, 자기카메라의 구성 요소 중 가장 마지막 단계인 소프트웨어에서 설명 되어야 하지만 주요 기능이 아날로그 필터와 유사한 잡음을 제거이므로 본 절에서 설명한다. 본 연구에서는 측정하고자 하는 신호로부터 잡음을 제거하기 위하여 아날로그 필터와 병행하여 디지털 필터를 사용한다. 디지털 필터는 크게 FIR(Finite Impulse Response) 과 IIR(Infinit Impulse Response)가 있다.

FIR 필터는 선형 위상 응답을 갖는다. 반면에 IIR 필터는 일반적으로 비선형 위상 응답을 갖지만, 보다 좋은 진폭 응답을 제공한다. FIR 필터를 디자인할 때, 필터의 종류에 따라 샘플링 주파수와 다른 차단 주파수 입력은 일정하다. 즉, 표준화된 샘플링 주파수를 사용하여 디지털 필터를 디자인할 수 있다. FIR 필터는 c_k 는 필터의 계수, x_n 는 입력 신호, y_n 가 출력 신호일 때 다음과 같은 수식으로 표현 된다.

$$y_i = \sum_{k=0}^{k-1} x_{i-k} \times c_k \quad \text{for } i=0,1,\dots,n-1 \quad (3)$$

FIR 필터의 요점은 c_k 를 필터의 계수를 설정하는 것이다. FIR필터 함수는 실제로 필터링을 수행하지 않으며, 필터링 수행을 위해 Convolve함수를 호출한다. 처음 한번 필터의 계수가 얻어지면, 필터의 재설계 없이 반복적으로 그것들을 사용할 수 있다. FIR 필터의 설계 방법 중 대표적인 창 설계 기법을 이용하여 쉽게 필터를 설계할 수 있다. 다음은 일반적으로 사용되는 창함수(Window Function)들의 특성(감쇠와 전이 대역폭)을 나타낸다. (Attenuation (dB) Transition Bandwidth (fs/n); (1) Rectangular 21, 0.9, (2) Triangular 25, 1.18, (3) Hanning 44, 2.5, (4) Hamming 53, 3.13,(5) Blackman 74, 4.6). 창함수 필터는 감쇠 값의 결정을 통해 이를 수 있으며, 또한 전이 대역폭에 의해서도 결정된다. 전이 대역폭은 지정된 차단 주파수에서 디자인 된 감쇠값을 얻기 위해 정의 된다. 큰 전이 대역폭값은 보통 보다 나은 감쇠를 제공한다.

다음으로 무한 임펄스 응답인 IIR필터는 수학적으로 다음의 수식의 형태로 가정할 수 있다.

$$y_i = \sum_{k=0}^{n-1} b_k \times x_{i-k} - \sum_{k=1}^m a_k \times y_{i-k} \quad (4)$$

여기서 a_k 와 b_k 는 필터의 계수이다. 현재 필터의 출력인 y_i 는 현재에 의존하고, x_{i-k} 는 이전의 값이고, y_{i-k} 는 이전의 출력값이다. 만약 y_i 가 0이 아니라면, 그것은 명확하지 않게 지속된 다음의 절점의 결과이며 때문에 이러한 필터를 무한 임펄스 응답 필터라 부른다.

IIR필터는 잘 알려진 아날로그 필터로부터 파생되었으며, 널리 사용 되는 4가지의 주요한 형태의 필터로는 Butterworth filters, Chebyshev filters, Inverse Chebyshev filters, Elliptic filters가 있다. 각각의 Lowpass, highpass, bandpass, and bandstop filters 필터의 형태로 설계된다.

버터워즈 필터의 주파수응답은 모든 주파수들에서 매끄러운 응답성과 지정된 차단 주파수로부터 단조로운 감소의 특징을 나타낸다. 또한 크기 응답이 통과대역에서 최대로 평평하고, 저지대역(沮止帶域)에서는 0이다. 하지만, 통과대역과 저지대역사이의 rolloffs는 완만하여, 낮은 차수의 버터워즈 필터는 이상적 필터의 좋은 근사값을 제공하지 못한다.

한편, 체비세프 필터는 통과 대역에서 등리풀 응답을 갖고, 저지대역에서 진폭 응답은 증가하지 않고 감소한다. 이 필터는 버터워즈 필터보다 더 예리한 rolloffs를 갖는다.

역 체비세프 필터는 체비세프 필터와 유사하며, 저지대역에서 리플생성이 제외되며, 주파수 응답은 통과대역에서 평평하다.

만약 통과대역과 저지대역에서 등리풀 응답을 허용하고 싶다면, Elliptic 필터를 사용해야 한다. Elliptic는 버터워즈 필터 혹은 체비세프 필터와 비교하여 같은 차수를 위한 예리한 rolloffs를 가지고 있다. 크기 제곱 응답에 있어서 최적의 기능을 나

타낸다. 그러나 이 필터는 통과대역에서 매우 비 선형적인 위상 응답을 갖는다 이 것은 여러 응용에서 바람직하지 않는 것이다 FIR필터에 의해 할 수 있는 것처럼 IIR필터 함수의 계수 지정을 할 수 없다. 왜냐하면 IIR필터는 필터링 수행과 동시에 필터의 계수를 추정하기 때문이다.

본 연구에는 처리 속도와 구현의 복잡성에 영향을 미치는 필터의 차수와 데이터의 왜곡을 결정하는 위상 특성을 고려하여 IIR필터를 선택하였다. FIR필터의 사용할 경우, 대부분의 설계 기법들은 유한한 길이의 데이터에 대해 필터링 후 정확히 선형 위상 응답을 나타내지만 자기카메라의 결함 평가 원리인 $\partial V_H/\partial x$ 영상 처리에 부정적인 영향을 미치는 리플 응답도 나타나게 된다. 반면에 IIR필터의 많은 설계 기법 중 상당히 선형적인 위상응답을 제공할 뿐만 아니라 통과 대역에서 리플응답이 없고, 진폭의 선형성 유지가 필수적인 상황에 최적으로 사용할 수 있다. 따라서 결합정보 평가 부분의 전처리 과정의 디지털 필터로 버터워즈 필터를 사용하였으며, 필터 설계에는 한국 내쇼날 인스트루먼트 사(National Instrument Co. Inc.)의 Measurement Studio Analysis Library의 무한 임펄스 응답 필터(IIR) 중 Butterworth filters의 Lowpass Filter를 사용하여 필터를 소프트웨어적으로 실현 하였다.

제 3절 A/D 변환기

결함으로부터 발생한 누설 자속 분포는 배열된 자기센서 및 차동 증폭회로, 아날로그 LPF에 의하여 높은 S/N비를 가진 전기신호의 분포로 변환된다. 변환된 전기신호의 배열은 A/D 변환기와 μ -processor에 의하여 저장, 연산 및 처리 된다. 본 연구에서는 Fig. 2-17에 나타낸 바와 같이 8bit 병렬 비교형(Semiflash) A/D변환기인 SONY사의 CXD1175AM를 전용 A/D변환기로 채택하였다. CXD1175AM는 주로 빠른 처리 속도가 요구되는 영상 신호 처리, 디지털 메모리 오실로스코프, 레이더에 사용된다. 아날로그 입력 신호를 3개의 저항 래더로 분압한 기준전압과 각각의 비교기로 비교하는 방식을 사용한다. 때문에 한 단계로 비교가 완료되어 매우 빠른 변환 시간을 갖는다. 또한 센서 입력에 대한 출력 신호의 정밀도(accuracy)가 우수하며, 정밀도의 오차는 주로 소자 내부의 기준 전압, 전압 비교기, Gain 저항등에 의해 ± 0.5 LSB 오차가 발생한다. 최대 변환 시간(Conversion time)은 35MS/S이며, 한번의 A/D변환에 18ns 지연이 발생한다.

한편, μ -processor는 A/D변환 시간 보다 변환된 데이터를 읽어 들이는데 긴 시간이 소요되므로 고속 신호 처리를 어렵게 하는 요인이 된다. 따라서 A/D변환 필스 신호에 동기하여 SRAM(32k \times 8bit, SAMSUNG, K6T0808C1D)에 직접 저장되도록 하여, 샘플링 속도가 매우 빠른 경우 메모리에 직접 저장하는 DMA방식을 도입 하였다.

이러한 A/D변환기 및 메모리에 의하여 1 ~ 4V의 입력 범위에서 11.7mV의 분해능을 얻었다.

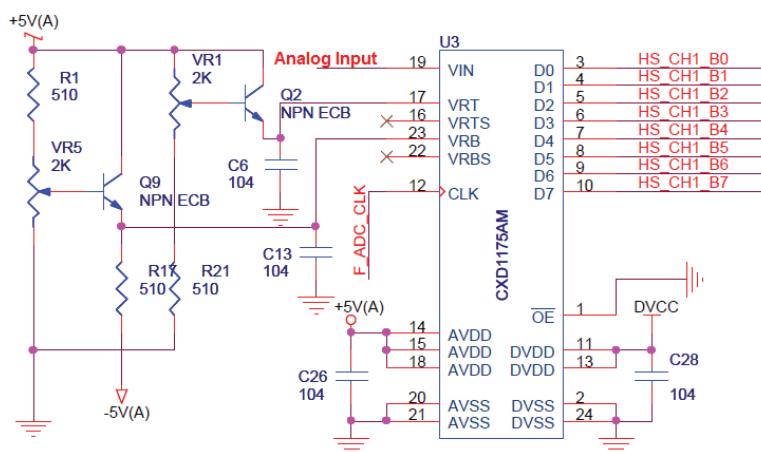


Fig. 2-17 A/D 변환기 회로

제 4절 인터페이스

자기카메라의 A/D 변환기와 μ -processor에 의하여 변환된 전기신호는 USB인터페이스에 의하여 컴퓨터에 저장된다. 인터페이스는 Fig. 2-18에 보인 바와 같이 $710 \times 450 \times 1.6\text{mm}$ 크기의 1개의 Main 보드와 $295 \times 180 \times 1.6\text{mm}$ 크기의 12개의 Sub 보드로 구성하였다. Main board는 최대 16개의 확장 슬롯을 가지고 있어 총 256채널의 전압 신호를 동시에 A/D변환 및 저장할 수 있으며, 전원부, μ -processor, PLD(Programmable Logic Device), 데이터 전송부, Display부로 구성된다.

회로의 모든 부분의 전원은 SMPS(Switched Mode Power Supply)를 사용하였다. SMPS는 아날로그 방식의 파워 씨플라이에 대응하는 방식으로, 교류(220V)를 직류(약 290~300V)로 바꾼 다음 높은 주파수(20~50kHz)로 발진을 시킨 후 원하는 전압으로 강압한 다음 정류 및 필터링을 통해서 직류 전원을 만드는 방식이다.

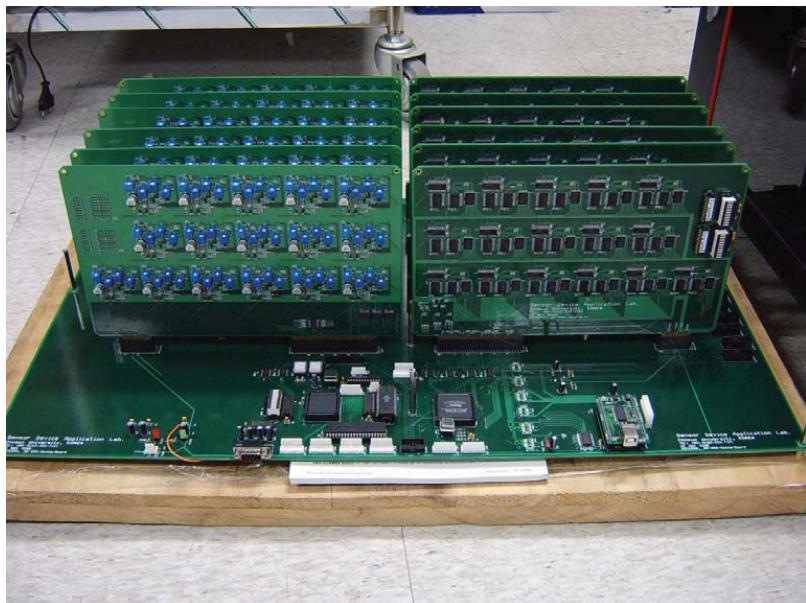


Fig. 2-18 인터페이스 장치

효율이 좋고, 열 발생이 적기 때문에 소형/경량화가 가능하며, 대용량의 정전압, 정전류 구동이 가능하다는 장점이 있으나 고주파의 스위칭에 의해 필연적으로 노이즈가 발생한다. 따라서 저리를 노이즈 필터($1\% V_{pp}$), EMI필터 내장된 제품(Power plaza 社)을 사용하였고, 각각의 μ -processor 구동 전원으로 쓰이기 전에 노이즈 저감 회로를 통과시켰다. 또한 USB의 구동 전원은 저전압강하 선형 레귤레이터인 LP3871(National Semiconductor社)를 사용하였다.

μ -processor (80C196KC)는 칩 내에 488바이트의 RAM은 내장 되어 있으나 내부 메모리는 사용하지 않고, 각각 독립시켜 256k바이트의 EEPROM, 256k바이트의 RAM을 외부에 연결하였다. 프로그래머를 입출력 디바이스를 추가하여 부족한 IO 포트를 확장하였다. 또한 효율적 제어신호를 위한 PLD와 LCD DISPLAY장치, 다목적 장치를 추가 연결하여 구성하였다.

복잡한 디코딩을 위해서 전용 디코더 칩인 ALTERA EPM7128S를 사용하였다. ALTERA EPM7128S는 PLD의 하나로써, 칩 내부에 로직을 프로그램 해 넣을 수 있는 소자이다. 일반적으로 TTL이나 CMOS 소자들은 동일한 기능을 수행하는데 게이트들을 하나의 패키지에 담은 소자인데 반하여 PLD는 자신이 원하는 다양한 로직을 하나의 패키지로 구현할 수 있는 장점이 있다. 최대 68핀까지 IO포트를 사용할 수 있는 ALTERA에 Sub board의 SRAM 어드레스 제어 신호, A/D변환의 제어 신호, A/D변환의 상태 표시 신호를 위한 pin을 할당하고, 데이터 전송을 위해 USB 어드레스 신호와 다목적 신호를 위한 pin을 할당하여 구성하였다.

데이터 전송은 EZ-USB FX2를 사용하였다. 칩의 코어는 24MHz에서 구동하는 8051 코어를 사용하고, USB 2.0/1.1을 지원하며, 펌웨어는 USB를 통해 다운받아 구동하였다. Sub board의 SRAM과 연결된 어드레스 신호, USB 컨트롤 신호 연결로 구성하였다.

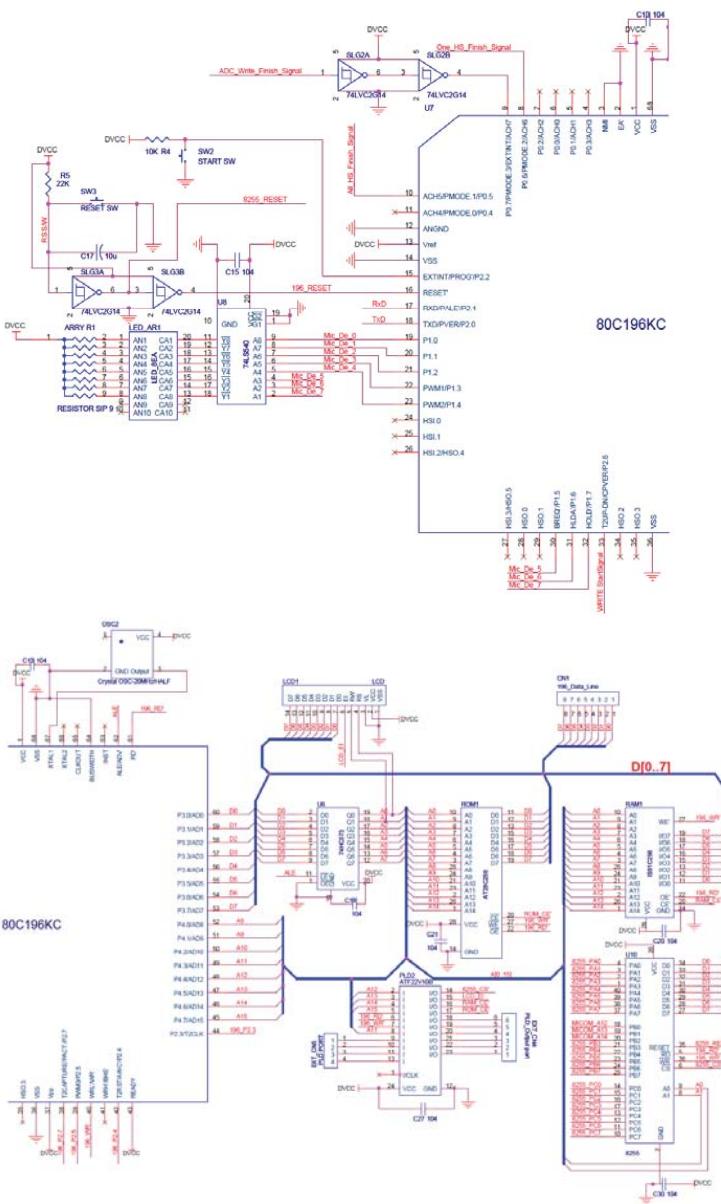


Fig. 2-19 Main board의 회로도

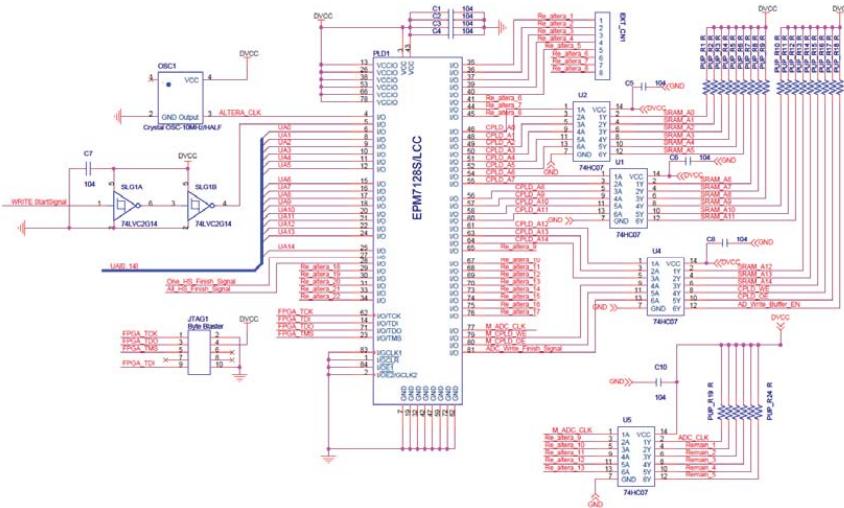


Fig. 2-20 ALTERA EPM7128S (PLD)의 회로도

μ -processor의 Port 2.2에 연결된 A/D변환의 시작 버튼을 Main board (Fig. 2-19, 20)의 외부 설치하였다. 이 시작 버튼의 Rising edge trigger를 μ -processor 자체가 하드웨어적으로 그 변화를 체크하여 Port 2.6을 통해 PLD(ALTERA) 5번 I/O포트에 A/D변환 시작을 알린다. I/O포트의 변화를 감지한 ALTERA는 16개의 슬롯에 4개의 신호를 동시에 발생 시킨다. 발생되는 신호는 각각 A/D변환을 위한 Clock 신호, 입력용 래치 Enable신호, A/D변환된 데이터가 저장될 SRAM의 Address 신호와 Write Enable 신호이다. 이 신호들에 의해 Sub board들의 모든 채널(Max. 256channel)에서 A/D변환이 동시에 일어나고 저장된다. 이와 동시에 ALTERA는 A/D변환을 위한 Clock 신호를 카운팅하기 시작한다. Sub board의 SRAM의 저장 한계나 사용자가 지정한 저장 용량에 따라 ALTERA는 입력용 래치를 Disable 시킨다. A/D변환은 계속 일어나지만 저장되지는 않는다. 또한 PLD(ALTERA) 81번 I/O포트에 연결된 μ -processor의 Port 0.7를 통해 저장이 완료되었음을 알린다.

Main board와 USB로 연결된 철도 차륜탐상 프로그램을 통해 A/D변환 여부를 확인 할 수 있다. 프로그램은 1채널만 얻거나 혹은 모든 채널을 얻는 두가지 방법

으로 데이터를 읽어 올 수 있다.

1채널의 데이터를 읽어 올 경우에는 데이터 송신 요구에 따라 USB는 μ -processor의 확장 I/O포트인 82C55AC의 Port PC.0를 통해 데이터 요구를 알리며, ALTERA에게는 SRAM의 Address 신호를 알린다. 신호에 따라 ALTERA는 Read Enable 신호와 요구 받은 어드레스 값을 Sub board의 모든 SRAM에 매핑시킨다. 이와 동시에 μ -processor는 USB의 요구에 맞는 채널을 Port 1.0~7을 이용하여 디코딩하고, Port 1.0~7의 디코딩 값에 따라 Sub board의 GAL은 해당 채널의 출력용 래치 Enable 시킨다. 즉 1 채널의 SRAM의 데이터만 읽을 수 있게 된다. 이렇게 선택 채널의 데이터를 읽을 수 있는 준비가 되면 USB는 자동으로 SRAM의 Address를 증가시켜 가며 SRAM에 저장된 모든 데이터를 차례로 받고, 송신이 완료 되면 ALTERA는 27번 I/O포트와 연결된 Port 0.6를 통해 μ -processor에게 해당 채널의 모든 데이터 송신이 완료 되었음을 알린다.

모든 채널의 데이터를 읽어 올 경우에는 데이터 송신 요구에 따라 USB는 μ -processor의 확장 I/O포트인 82C55AC의 Port PC.0를 통해 데이터 요구를 알리며, ALTERA에게는 SRAM의 Address 신호를 알린다. 신호에 따라 ALTERA는 Read Enable 신호와 요구 받은 어드레스 값을 Sub board의 모든 SRAM에 매핑시킨다. 이와 동시에 μ -processor는 USB의 요구에 맞는 첫번째 채널을 Port 1.0~7을 이용하여 디코딩하고, Port 1.0~7의 디코딩 값에 따라 Sub board의 GAL은 해당 채널의 출력용 래치 Enable 시킨다. 이렇게 선택 채널의 데이터를 읽을 수 있는 준비가 되면 USB는 자동으로 SRAM의 Address를 증가시켜 가며 SRAM에 저장된 모든 데이터를 차례로 받고, 송신이 완료 되면 ALTERA는 27번 I/O포트와 연결된 Port 0.5를 통해 μ -processor에게 첫번째 채널의 모든 데이터 송신이 완료 되었음을 알린다. 다시 μ -processor는 다음 채널을 Port 1.0~7을 이용하여 디코딩하고, Port 1.0~7의 디코딩 값에 따라 Sub board의 GAL은 해당 채널의 출력용 래치 Enable 시킨다. USB는 자동으로 SRAM의 Address를 증가시켜 가며 SRAM에 저장된 모든 데이터를 차례로 받게 된다. 이러한 순서로 모든 채널의 데이터를 획득이 완료 되면 ALTERA는 27번

I/O포트와 연결된 Port 0.5를 통해 μ -processor에게 모든 채널의 모든 데이터 송신이 완료 되었음을 알린다.

Table 2-3 Main board의 사양

항목	내용
PCB SIZE	710×450×1.6mm, FR4, 금도금
Power	5V (for Logic), 3.3V 0.8A(for USB)
CPU	80C196KC
PLD	ALTERA EPM7128S, ATF22V10B
CLOCK	100kHz(00MHz 사용 가능)
RAM	IS61C256(32k×8)
EEPROM	AT28C256(32k×8)
DISPLAY	LCD(16ch×2line), Array LED
KEY	Start SW, Reset SW
シリ얼 포트	RS232C
화장포트	82C55AC
USB	CY7C68013

Sub board는 어드레스 디코더(GAL16V8, Generic Array Logic), reference 전압 조정, A/D변환기(CXD1175AM), Latch(74HC541), SRAM 부분으로 구성된다. 16개 채널의 A/D변환이 동시에 이루어지며, 1개 채널은 Fig. 2-21과 같은 회로로 구성된다.

센서에서 획득된 신호는 저잡음 고속 차동 증폭 회로에 의해 증폭된다. Sub board에 전송 된 증폭된 신호는 reference 전압 조정 회로에 의해 A/D변환기의 변환 범위의 중간값이 되도록 바이어스 전압을 더하여 신호의 reference가 조정된다. 조정된 신호는 Main board의 PLD(ALTERA EPM7128S)에 의하여 공급되는 펄스 신호(F_ADC_CLK)에 동기한 A/D변환기에 의해 디지털 전기 신호로 변환된다. A/D변환기의 출력단에는 두 개의 입력용, 출력용 래치가 연결되어 있고, 두 개의 래치 사이에는 SRAM을 위치하였다. Main board의 PLD는 입력용 래치 Enable 신호(F_AD_Write_Buffer_EN)와 SRAM의 쓰기 신호(F_CPLD_WE) 및 메모리 어드레스 신호(F_A0~F_A14)를 출력한다. 변환된 8bit의 데이터는 입력용 래치 Enable 신호, 메모리 어드레스와 쓰기 신호에 따라 각각의 A/D변환기에 연결된 SRAM의 데이터 메모리에 0000H번지부터 차례로 저장된다.

한편 SRAM에 저장된 데이터를 가져 올 때는 먼저 Main board의 80C196k(μ -processor)는 읽어 오고자 하는 채널의 어드레스값을 매핑하면 이 신호에 따라 프로그래밍된 GAL16V8에 의해 출력용 래치 Enable 신호(HS_Channel_00)가 출력되어 원하는 순서로 출력용 래치를 활성화 시킬 수 있다. 여기서, GAL16V8의 출력들은 각기 다른 순서의 어드레스 디코딩이 가능하다. 따라서 Main board의 어떤 슬롯에 접속하더라도 선택 신호에 따라 해당 Sub board의 메모리를 액세스 할 수 있게 된다.

한편, Main board의 PLD는 SRAM의 읽기 신호(F_CPLD_OE)와 메모리 어드레스 신호(F_A0~F_A14)에 따라 활성화된 SRAM의 저장된 데이터를 액세스 할 수 있다. 한편, 종래 연구에서는 RS-232 직렬 통신 방법을 사용하였기 때문에 μ -processor로부터 컴퓨터에 전송하는 인터페이싱 속도는 55.2ms로서 저속이었다. 하지만 전용 USB포트를 사용함으로써 최대 12Mbps의 고속으로 컴퓨터와 송수신 할 수 있게 되었다. 또한 각 채널을 각각의 회로와 1:1로 대응 되므로 높은 S/N비 얻을 수 있다. 신호 배선들의 간략화를 통해 외부 잡음 유입을 최소화 하였다. 더욱이, μ -processor가 외부 확장 메모리를 통해 SRAM의 변환된 디지털 데이터를 조정, 저장될 수 있다.

Table 2-4 Sub board의 사양

항목	내용
PCB size	295 × 180 × 1.6mm, FR4, 금도금
Power	5V (for Logic)
Current	Max. 750mA
Decoder	GAL16V8
A/D Converter	CXD1175AM (8bit, Max. Conversion speed of 35MS/S)
SRAM	32k × 8bit, SAMSUNG, K6T0808C1D
Latch	74HC541
Buffer	74HC07
ETC	Array LED, 2Test Point per Channel,

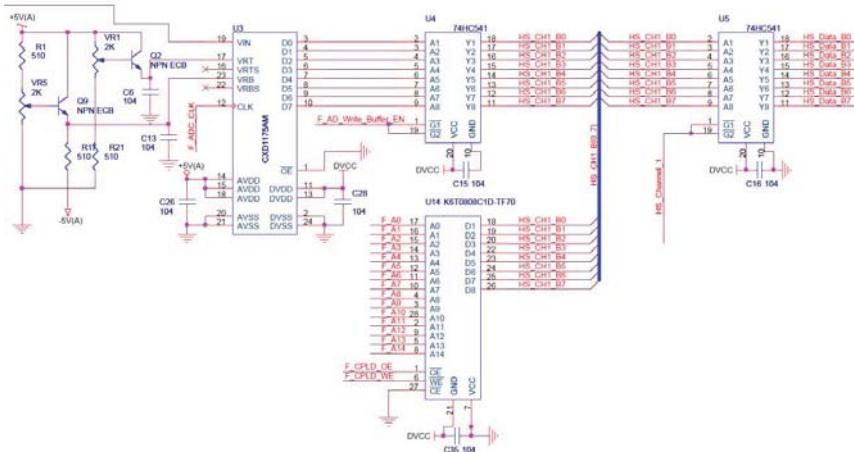


Fig. 2-21 Sub board의 회로도

제 5절 결합 정보 평가

누설자속탐상법(MFLT)을 이용한 결합의 정량 평가를 위해서는 결합의 존재에 의해 발생하는 누설자속밀도 분포를 해석할 필요가 있다. 누설자속 분포의 시뮬레이션을 위하여 유한요소해석(FEM, Finite elements method)과 자기쌍극자 모델해석법(DPMA, Dipole Model Analysis)을 이용하였다.[38-41] FEM은 시험편, 자원, 결합, 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 계산등에 많은 시간이 소요된다는 문제를 가지고 있다. 또한 일반적으로 결합은 폭이 좁고, 길이가 긴 형태를 갖기 때문에 요소의 크기를 작게 표현해야하며, 결과적으로는 3차원 FEM의 요소 및 계산 시간이 많이 증가한다.

DPMA는 결합의 양단면에 자하(magnetic charge)가 존재하고, 이들 자하의 분포가 생성하는 3차원 공간상의 자계가 누설자계에 근사하다고 가정함으로써, 실제 결합주변에 발생하는 누설자속밀도의 분포에 근접한 자계를 계산해 낼 수 있다. FEM에 비해 계산시간이 짧고, 정성적인 결과를 제공한다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 형상의 자원 및 누설 자속을 해석할 때는 FEM을 이용하고, 결합에 의한 정성적인 누설 자속의 크기 변화를 검토할 때는 DPMA에 의한 해석을 수행하였다.

1. 다이폴 모델

본 절은 자기쌍극자 모델해석법을 이용하여 실험결과와 해석결과를 정량적으로 비교할 수 있도록 하는 것을 그 목적으로 한다. 결합의 실험결과와 자기쌍극자 모델해석법에 의한 해석결과를 통하여 제시한 해석법과 비교하여 그 유용성을 검증한다.

DPMA는 결합의 양쪽 단면에 자하가 존재한다고 가정한다. 결합의 단면의 자하의 분포에 의해 생성되는 3차원 공간상의 자기장이 누설자계와 근사하다고 가정

함으로써 결합 주변에 발생하는 누설자속분포를 계산할 수 있다.

시험편의 표면에 길이가 l_c , 폭이 w_c , 깊이가 d_c 인 결합이 있다고 가정한다. Fig. 2-22에 보는 바와 같이 x축은 자화 방향으로 정의하고, xy평면은 시험편의 표면, 그리고 z축은 시험편의 표면에 수직인 방향으로 한다. 결합의 길이방향은 y축으로부터 θ_c 만큼 회전되었다고 가정한다. 즉 $\theta_c = 0$ 일 때는 y축과 결합의 길이방향은 평행하다.

누설 자속 밀도의 z방향 성분인 B_z 는 $\theta_c = 0$ 일 때, 단위 면적당 자기량을 m , 자기 투자율을 μ , 그리고 시험편 표면으로부터의 깊이를 u 라 하고, 다이폴 모델에 의해 Eq. (5)로 표현할 수 있다. 여기에서 u 는 $0 \sim d_c$ 사이의 값을 갖는다.

$$B_z|_{\theta_c=0} = \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x+w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy - \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x-w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy \quad (5)$$

한편, x_R 과 y_R 는 XY평면으로부터 θ_c 만큼 회전하였을 때 X_R-Y_R 축의 회전된 세로운 좌표는 Eq. (6)으로 표현할 수 있다.

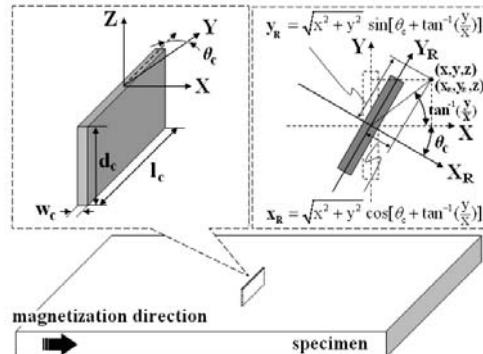


Fig. 2-22 다이폴 모델

$$x_R = \sqrt{x^2 + y^2} \cos[\theta_c + \tan^{-1}(\frac{y}{x})] \quad (6)$$

$$y_R = \sqrt{x^2 + y^2} \sin[\theta_c + \tan^{-1}(\frac{y}{x})]$$

$\theta_c = \pi/2$ 인 경우, B_z 는 Eq. (5)에 의해 w_c 와 l_c 를 바꿔 계산할 수 있다. 또한 $0 < \theta_c < \pi/2$ 경우 Eq. (7)에 의해 계산할 수 있다.

$$B_z \Big|_{0 < \theta_c < \frac{\pi}{2}} = \frac{m \cos \theta_c}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y_R}^{l_c/2-y_R} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x_R + w_c/2)^2 + y_R^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy_R$$

$$- \frac{m \cos \theta_c}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y_R}^{l_c/2-y_R} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x_R - w_c/2)^2 + y_R^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy_R \quad (7)$$

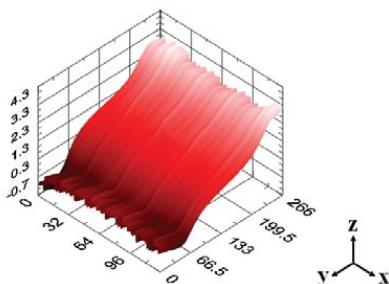


(a) 저탄소강 시험편 (SS41, $10 \times 0.7 \times 3$ mm)

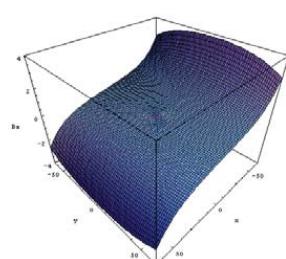


(b) 요크형 자원

Fig. 2-23 실험 장치



(a) 실험 결과



(b) 해석 결과

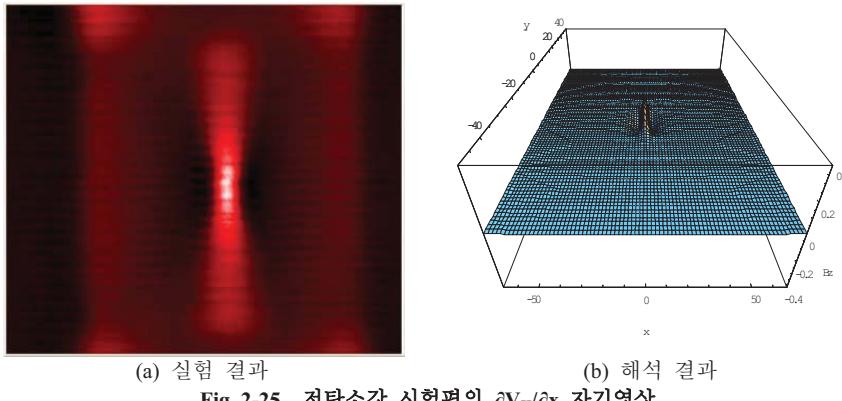
Fig. 2-24 저탄소강 시험편의 누설자속 분포(V_H)

Fig. 2-24는 $m/4\pi\mu$ 를 10으로 가정 하였을 때 Fig. 2-23(a) 시험편 표면(lift-off 3mm)에서의 Eqs. (5)~(7)를 통해 얻어진 누설자속분포의 해석결과이다. Fig. 2-24(a)는 실제 길이가 180mm, 폭이 150mm, 깊이가 200mm인 자화기를 통해 시험편을 자화하여 얻은 실험결과이다.

실험결과와 해석결과에 의하면, 누설자속 분포는 자화기의 자극 때문에 현저히 기울어져 있고, 결함에 의한 누설자속분포는 매우 미약하기 때문에 가시화 할 수 없다. 해석결과와 실험결과 모두 누설자속 분포(V_H)에서는 결함을 구분할 수 없었다. 그러나 결함 주위의 누설자속 분포 변화는 일정하기 때문에 Fig. 2-25에서 보는 바와 같이 자화방향으로 미분한 $\partial V_H / \partial x$ 로 용하여 결함 정보를 추출할 수 있다.

즉, 자화기의 자극으로 인한 누설 자속은 Eq. (8)로 표현할 수 있으며, 결함을 포함하는 시험편에 의한 누설 자속은 Eq. (9)로 표현할 수 있다.

$$B_{yoke} \Big|_{\theta_c=0} = \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x + w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy \\ - \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x - w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy \quad (8)$$



$$B_{spec}|_{\theta_c=0} = \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x+w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy \\ - \frac{m}{4\pi\mu} \int_{-l_c/2-y}^{l_c/2-y} \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\{(x-w_c/2)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} du dy \quad (9)$$

$$[B_{yoke} + B_{spec}]_{i+1} - [B_{yoke} + B_{spec}]_i = [B_{yoke_{i+1}} - B_{yoke_i}] + [B_{spec_{i+1}} - B_{spec_i}] \\ \approx Const + \frac{\partial V_H}{\partial x} \quad (10)$$

이것을 자화 방향으로 미분한 결과는 Eq. (10)으로 표현할 수 있다. 자화기의 자극에 의한 누설 자속은 변화가 일정하여 Constant에 가깝고, 만약 Constant에 ‘0’ 값을 부여하면 결함에 의한 $\partial V_H / \partial x$ 의 데이터만 표현할 수 있어 검사 데이터양을 획기적으로 줄일 수 있을 것이다. 즉, 누설자속 분포의 Back ground data 빼주는 것과 같은 기능을 한다 결과적으로 $\partial V_H / \partial x$ 는 결함에 의한 누설 자속의 변화량만 얻을 수 있다.

DPMA를 사용하므로써 자화방향이 이루는 각도, 결함의 단면, 형상 및 다중결합의 실험결과와 비슷한 해석 결과를 얻었다. 따라서 정성적인 평가가 가능하며, $\partial V_H / \partial x$ 는 결함 정보 추출에 결정적 인자이다.

2. 개선된 다이폴 모델

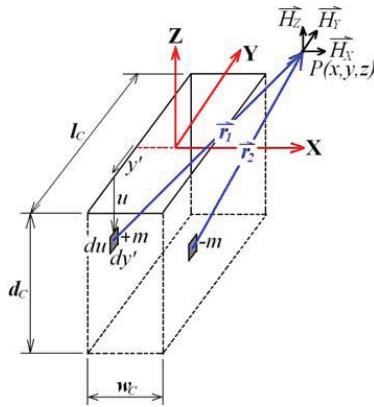


Fig. 2-26 개선된 다이폴 모델

한편, 자기쌍극자 모델해석법을 보완하여, 결합의 단면에만 존재한다고 가정하였던 자하의 분포 이외에 단면과 단면의 경계에 가중되어 분포한다고 가정하였다. 여러 가지 크기와 단면형상을 가지는 결합의 해석법을 제시하였다.

시험편에 Fig. 2-22에서와 같은 길이, 깊이, 폭이 각각 l_c , d_c , w_c 인 구형 결합을 도입한다. 자화 방향을 x축, 시험편 표면을 xy평면으로 정의한다. z축은 xy평면에 수직인 방향을 나타낸다. 시험편상의 임의의 위치 $P(x, y, z)$ 에서의 자기장(\overline{H}_{p1})은 자기쌍극자모델 해석법의 Eq. (11)에 의해 표현할 수 있다. 여기에서 m, μ_0, u 는 각각 단위면적당 자기량, 자기 투자율, 시험편 표면으로부터의 깊이로 정의한다.

$$\begin{aligned}\overline{H}_{p1} &= \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \int_0^{d_c} \frac{m}{|\vec{r}_1|^2} \cdot \frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|} du dy' + \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \int_0^{d_c} \frac{-m}{|\vec{r}_2|^2} \cdot \frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|} du dy' \\ \vec{r}_1 &= \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + (y + y') \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\ \vec{r}_2 &= \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + (y + y') \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k}\end{aligned}$$

$$\overline{H_{p_1}} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \sum_{p=1}^2 \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \int_0^{d_c} \frac{(-1)^{p-1} \cdot m}{|\vec{r}_p|^2} \cdot \frac{\vec{r}_p}{|\vec{r}_p|} dudy' \quad (11)$$

특히 $\overline{H_{p_1}}$ 의 수직성분 H_{Z1} 은 Eq. (12)를 이용해 계산할 수 있다.

$$H_{Z1} = \frac{m}{4\pi\mu_0} \times \sum_{p=1}^2 (-1)^{p-1} \cdot \int_{-l_c/2+y}^{l_c/2+y} \int_0^{d_c} \frac{(z+u)}{\left\{ \left(x + (-1)^{p-1} \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + y^2 + (z+u)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} dudy \quad (12)$$

한편, Fig. 2-27은 결합의 단면과 단면이 만나는 경계에서의 선을 단위 선분당 자기량 m' 으로 가정하고 결합의 모서리의 점을 단위 절점당 자기량 m'' 으로 가정한다. 이러한 가정은 일반적으로 결합의 애지 부분에서 자기장의 세기가 크기 때문이다. 일반적으로 결합의 폭보다 결합의 길이가 크게 되므로 m', m'' 은 결합의 길이 방향의 선분에서만 존재한다고 가정하였다. 어떠한 임의의 점 $P(x,y,z)$ 에서의 시험편의 m', m'' 에 의한 자기장 세기 $\overline{H_{p_2}}$ 는 Eq. (13)으로 표현할 수 있고, 벡터 $\vec{r}_3 \sim \vec{r}_{10}$ 과 $\vec{r}_{11} \sim \vec{r}_{18}$ 은 m', m'' 에 영향을 받는다.

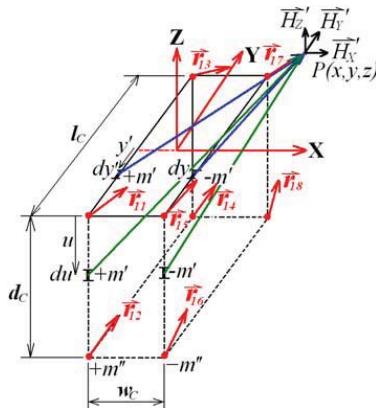


Fig. 2-27 개선된 다이폴 모델 기본 원리

$$\begin{aligned}
\vec{r}_3 &= \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + (y + y') \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k} & \vec{r}_7 &= \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y + \frac{l_c}{2} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_4 &= \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + (y + y') \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k} & \vec{r}_8 &= \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y + \frac{l_c}{2} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_5 &= \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + (y + y') \cdot \vec{j} + (z + d) \cdot \vec{k} & \vec{r}_9 &= \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y - \frac{l_c}{2} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_6 &= \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + (y + y') \cdot \vec{j} + (z + d) \cdot \vec{k} & \vec{r}_{10} &= \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y - \frac{l_c}{2} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_{11} &= \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y + \frac{l_c}{2d_c} \cdot u + \frac{l_c}{2} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_{12} &= \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y + \frac{l_c}{2d_c} \cdot u + \frac{l_c}{2} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_{13} &= \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y - \frac{l_c}{2d_c} \cdot u - \frac{l_c}{2} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_{14} &= \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y - \frac{l_c}{2d_c} \cdot u - \frac{l_c}{2} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_{15} &= \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y + \frac{l_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_c}{d_c}} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_{16} &= \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y + \frac{l_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_c}{d_c}} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_{17} &= \left(x + \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y - \frac{l_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_c}{d_c}} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k} \\
\vec{r}_{18} &= \left(x - \frac{w_c}{2} \right) \cdot \vec{i} + \left(y - \frac{l_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_c}{d_c}} \right) \cdot \vec{j} + (z + u) \cdot \vec{k}
\end{aligned}$$

$$\overline{H_{p_2}} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \left[\sum_{p=3}^6 (-1)^{p-1} \cdot \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \frac{\vec{r}_p}{|\vec{r}_p|^3} dy' + \sum_{p=7}^{10} (-1)^{p-1} \cdot \int_0^{d_c} \frac{\vec{r}_p}{|\vec{r}_p|^3} du \right] + \frac{m''}{4\pi\mu_0} \left[\sum_{p=11}^{14} \frac{\vec{r}_p}{|\vec{r}_p|} - \sum_{p=15}^{18} \frac{\vec{r}_p}{|\vec{r}_p|} \right] \quad (13)$$

여기서 $\overline{H_{p_2}}$ 의 수직성분인 H_{Z2} 는 Eq. (14)을 이용해 계산할 수 있다.

$$H_{Z2} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_{-l_c/2+y}^{l_c/2+y} \frac{z + q \cdot d_c}{\left\{ \left(x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + y^2 + (z + q \cdot d_c)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} dy \right. \\ \left. + \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_0^{d_c} \frac{z + u}{\left\{ \left(x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \frac{l_c}{2} \right)^2 + (z + u)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} du \right] \quad (14)$$

$$+ \frac{m''}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{r=0}^1 \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^r \cdot \frac{z + p \cdot d_c}{\left\{ \left(x + (-1)^r \cdot \frac{w_c}{2} \right)^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \frac{l_c}{2} \right)^2 + (z + p \cdot d_c)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \right]$$

추가적으로 결합의 단면형상이 깊이가 d_c 이고, 단면 형상이 삼각형과 타원형일 때 $\overline{H_{p2}}$ 의 수직성분은 각각 Eq. (15)와 Eq. (16)으로 표현할 수 있다. 자체 H_Z 는 Eq. (17)과 같이 중첩의 원리에 의해 H_{Z1} 과 H_{Z2} 를 더해서 계산할 수 있다.

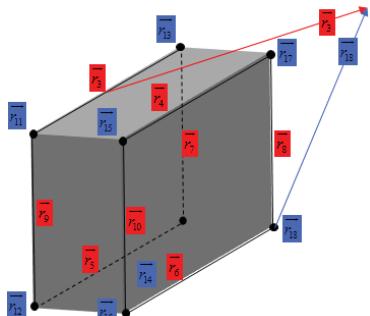


Fig. 2-28 구형결합의 다이폴 모델 원리

$$\overline{H_{p2}} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \left[\sum_{p=3}^6 (-1)^{p-1} \cdot \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \frac{\vec{r}_p}{|\vec{r}_p|^3} dy' \right] \\ + \sum_{p=7}^{10} (-1)^{p-1} \cdot \int_0^{d_c} \frac{\vec{r}_p \cdot \alpha}{|\vec{r}_p|^3} du \right] \\ + \frac{m''}{4\pi\mu_0} \left[\sum_{p=11}^{14} \frac{\vec{r}_p}{|\vec{r}_p|} - \sum_{p=15}^{18} \frac{\vec{r}_p}{|\vec{r}_p|} \right]$$

$$H_{Z2} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_{-l_c/2+y}^{l_c/2+y} \frac{z}{\left\{ x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right\}^2 + y^2 + z^2} \frac{dy}{\sqrt{\frac{3}{2}}} + \right. \\ \left. \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\left\{ x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right\}^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \left(\frac{l_c}{2d_c} \cdot u - \frac{l_c}{2} \right) \right)^2 + (z+u)^2} \frac{du}{\sin\left(\tan^{-1}\frac{2d_c}{l_c}\right)} \right] \quad (15)$$

$$H_{Z2} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_{-l_c/2+y}^{l_c/2+y} \frac{z}{\left\{ x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right\}^2 + y^2 + z^2} \frac{dy}{\sqrt{\frac{3}{2}}} + \right. \\ \left. + \sum_{q=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^p \cdot \int_0^{d_c} \frac{z+u}{\left\{ x + (-1)^p \cdot \frac{w_c}{2} \right\}^2 + \left(y + (-1)^q \cdot \frac{l_c}{2} \cdot \sqrt{\frac{u+d_c}{d_c}} \right)^2 + (z+u)^2} \frac{du}{\sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{2d_c}{l_c}\right)\right)} \right] \quad (16)$$

$$H_Z = H_{Z1} + H_{Z2} \\ = \frac{m}{4\pi\mu_0} \cdot \sum \iint \frac{\overrightarrow{|r_{i,Z}|} \cdot \alpha}{\overrightarrow{|r_i|^3}} du dy + \frac{m'}{4\pi\mu_0} \cdot \sum \int \frac{\overrightarrow{|r_{j,Z}|} \cdot \alpha}{\overrightarrow{|r_j|^3}} du(dy) + \frac{m''}{4\pi\mu_0} \cdot \sum \frac{\overrightarrow{|r_{l,Z}|}}{\overrightarrow{|r_l|^3}} \quad (17)$$

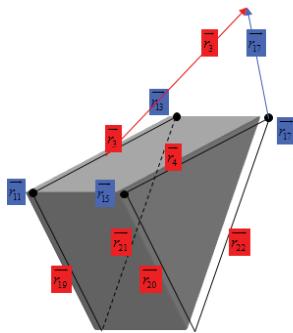


Fig. 2-29 삼각형결합의 다이폴 모델 원리

$$\overline{H_{P2}} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{p=3}^4 (-1)^{p-1} \cdot \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \frac{\overrightarrow{r_p}}{|\overrightarrow{r_p}|^3} dy' + \sum_{p=19}^{22} (-1)^{p-1} \cdot \int_0^{d_c} \frac{\overrightarrow{r_p} \cdot \alpha}{|\overrightarrow{r_p}|^3} \cdot \frac{du}{\sin(\tan^{-1}(2d_c/l_c))} \right] + \frac{m''}{4\pi\mu_0} \left[\frac{\overrightarrow{r_{11}}}{|\overrightarrow{r_{11}}|^3} + \frac{\overrightarrow{r_{13}}}{|\overrightarrow{r_{13}}|^3} - \frac{\overrightarrow{r_{15}}}{|\overrightarrow{r_{15}}|^3} - \frac{\overrightarrow{r_{17}}}{|\overrightarrow{r_{17}}|^3} \right]$$

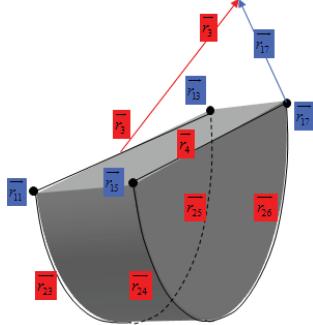


Fig. 2-30 타원형결합의 다이폴 모델 원리

$$\overline{H_{P2}} = \frac{m'}{4\pi\mu_0} \times \left[\sum_{p=3}^4 (-1)^{p-1} \cdot \int_{-l_c/2}^{l_c/2} \frac{\overrightarrow{r_p}}{|\overrightarrow{r_p}|^3} dy' + \sum_{p=23}^{26} (-1)^{p-1} \cdot \int_0^{d_c} \frac{\overrightarrow{r_p} \cdot \alpha}{|\overrightarrow{r_p}|^3} \cdot \frac{du}{\sin(\tan^{-1}(2d_c/l_c))} \right] + \frac{m''}{4\pi\mu_0} \left[\frac{\overrightarrow{r_{11}}}{|\overrightarrow{r_{11}}|^3} + \frac{\overrightarrow{r_{13}}}{|\overrightarrow{r_{13}}|^3} - \frac{\overrightarrow{r_{15}}}{|\overrightarrow{r_{15}}|^3} - \frac{\overrightarrow{r_{17}}}{|\overrightarrow{r_{17}}|^3} \right]$$

3. 결합 평가

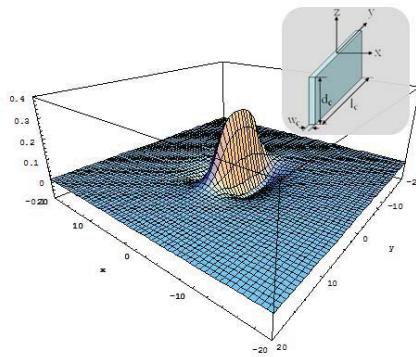


Fig. 2-31 $\partial V_H / \partial x$ 의 자기영상

개선된 다이폴 모델은 단위 면적당 자기량 m이 결합의 단면뿐만 아니라 단면과 단면의 경계에 가중되어 분포한다고 가정하여 보다 정확한 해석 결과를 제공한다. 반면에 종래의 다이폴 모델은 개선된 다이폴 모델에 비하여 정확성은 떨어지거나 결합의 형태 및 크기에 따른 누설자속 분포의 경향을 보다 빠른 시간내에 파악 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 개선된 다이폴 모델이 아닌 종래의 다이폴 모델을 이용하였다. 다음은 결합을 평가하기 위해 시험편의 결합에 의한 누설 자속의 분포를 자화 방향으로 미분한 $\partial V_H / \partial x$ 의 해석결과를 결합의 중심에서 자화방향(x방향) 단면으로 표시하여 평가하였다. 각각 결합의 깊이, 폭, 길이에 따른 $\partial V_H / \partial x$ 의 최대값과 최소값의 관계를 살펴본다.

Fig. 2-32(a),(b),(c)는 결합의 폭과 길이가 7, 10mm일 때 결합의 깊이 변화에 따른 해석결과의 Section view이다. 결합의 깊이가 1, 2, 3mm로 증가함에 따라 해석결과의 ①값은 결합의 깊이에 따라 증가하지만, ②값은 모든 결합에서 일정하다.

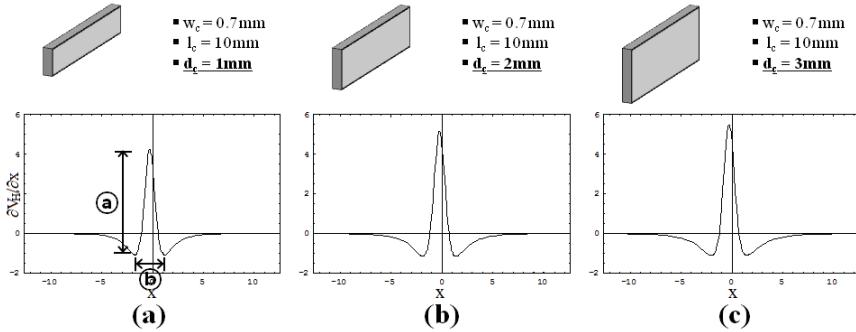


Fig. 2-32 $\partial V_H / \partial x$ 의 결함의 깊이에 따른 해석결과

또한, Fig. 2-33(a),(b),(c)의 경우, 결함의 길이와 깊이가 10mm, 3mm로 각각 일정한 때, 결함의 폭이 0.3, 0.5, 0.7mm로 넓어짐에 따라 ④값이 모두 결함의 폭이 증가함에 따라 증가한다.

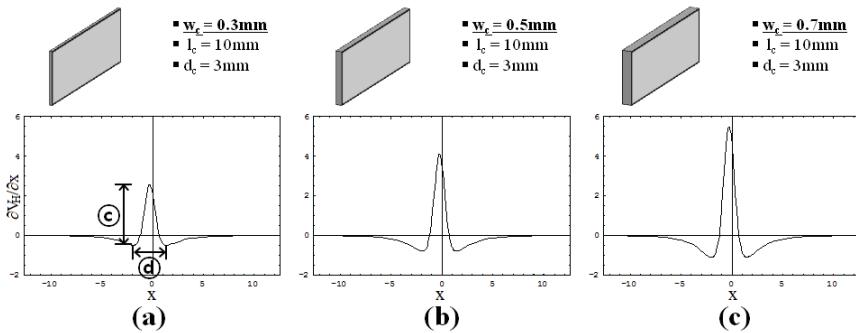


Fig. 2-33 $\partial V_H / \partial x$ 의 결함의 폭에 따른 해석결과

Fig. 2-34(a),(b),(c),(d),(e),(f)는 결함의 폭과 깊이가 0.7, 3mm로 일정하고, 결함의 길이가 6mm (Fig. 2-34(a),(d)), 8mm (Fig. 2-34(b),(e)), 10mm (Fig. 2-34(c),(f))일 때의 해석 결과이다. 결함의 길이가 늘어남에 따라 Fig. 2-34(a),(b),(c)에서와 같이 $\partial V_H / \partial x$ 는 x방향 단면의 값은 길이에 상관없이 일정하였다. 한편, Fig. 2-34(d),(e),(f)는 결함의 길이방향인 y방향의 단면 해석 결과에서는 ④값이 결함의 길이에 비례하여 증가하였다.

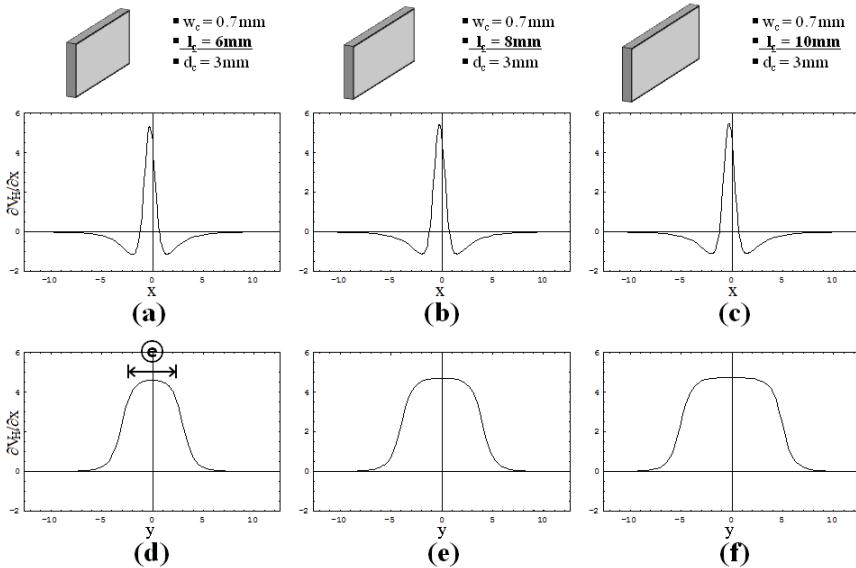


Fig. 2-34 $\partial V_H / \partial x$ 의 결합의 길이에 따른 해석결과

결과적으로 각 결합에서 누설 자속을 자화 방향으로 미분한 $\partial V_H / \partial x$ 의 최대값은 결합의 깊이와 최소값은 결합의 폭과 밀접한 관계가 있고, 뿐만 아니라 결합의 길이는 결합의 길이방향의 $\partial V_H / \partial x$ 값의 분포와 밀접한 관계가 있다.

$$\left. \frac{\partial V_H}{\partial x} \right|_{total} = \sum_{i=1}^{L_c/S} \left[\text{Max} \left(\frac{\partial V_{H,i}}{\partial x} \right) + \text{Abs} \left(\text{Min} \left(\frac{\partial V_{H,i}}{\partial x} \right) \right) \right] \quad (18)$$

또한 Eq. (18)과 같이 결합의 길이방향으로 $\partial V_H / \partial x$ 를 결합평가 알고리즘에 의한 개수만큼 더해 얻어진 결과인 $\partial V_H / \partial x|_{total}$ 은 결합의 체적과 깊은 관계가 있다. 이를 이용하여 Fig. 2-35와 같은 정량 평가 알고리즘을 도출하였다. 스캔형 자기카메라에 의한 자기영상의 공간분해능(S), S는 스캔장치의 성능에 의존하며 기지(既知)의 값을 가진다. 즉, 검사자는 LIHaS에 의하여 검출할 수 있는 결합의 최소 길이(L)를 알고 있다. 또한, 스캔결과, V_H , $\partial V_H / \partial x$, $\partial V_H / \partial y$ 분포를 얻을 수 있다. 특히, $\partial V_H / \partial x$, $\partial V_H / \partial y$ 분포로부터, 결합의 위치, 결합의 길이(L_c), 결합과 자화방향이 이루는 각도

(θ_{MAG}) 및 균열의 형태를 알 수 있다. 제안된 정량평가 알고리즘에 의하면, $\partial V_H / \partial x$, $\partial V_H / \partial y$ 분포로부터 취득한 결합의 길이(L_C)가 검출 가능한 최소 결합 길이 L 보다 클 때는 $\partial V_H / \partial x$ 의 최대값과 최소값을 각각 L_C/S 개 만큼 선택하여 다음 식에 의하여 구한 값을 정량평가에 이용한다. 즉, 한편, L_C 가 L 보다 작거나 같을 때에는 L_C/S 를 1로 하여 상기 Eq. (18)의 값을 구할 수 있다. 구해진 값을 다음 식에 의하여 결합의 체적을 구하는데 활용된다. 즉,

$$V_C = C_1 \cdot \left(\frac{\partial V_H}{\partial x} \Big|_{total} \right)^{C_2} \quad (19)$$

여기에서 C_1 , C_2 는 상수로서, 시험편의 재질, lift-off, Hall 계수, Hall 입력 전류 및 증폭비, 자화기의 특성 및 입력 전류등에 의하여 정해진다. 따라서 $\partial V_H / \partial x|_{total}$ 은 결합 평가의 결정적 인자이다.[42-46]

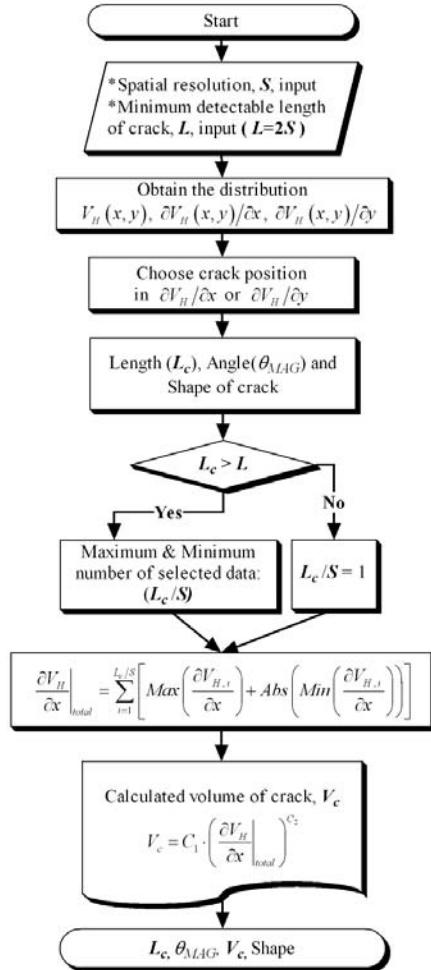


Fig. 2-35 정량평가 알고리즘

제 3장 지능형 결함평가 알고리즘 및 3차원 표현

지금까지의 NDT 기술에 의하면, 작업자의 숙련도 및 작업 당일 컨디션에 의하여 손상이 있고 없음이 판단되는 오류 혹은 위험성도 내재되어 있었다. 따라서, 결함을 자동으로 검출하고, 그 위치를 파악하며, 크기를 정량적으로 추정할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 스캔형 자기카메라를 통해 획득된 자기영상(V_H)에 대하여 ‘제 1절. 1차 자기영상 취득 및 스펙트럼 분석’에서는 취득된 1차 자기영상(V_H)의 센서 출력의 스펙트럼 분석을 통하여 신호와 잡음의 관계에 대해 설명하고, ‘제 2절. 2차 자기영상 취득 및 히스토그램 분석’에서는 1차 자기영상에 의해 얻어진 2차 자기영상을 히스토그램 분석을 통하여 센서 출력과 결함의 존재여부 및 크기 분포에 관계에 대해 논의하였다. 또한 불필요한 데이터를 제거 할 수 있는 원리에 대해 기술하였다. ‘제 3절. 3차 자기영상 취득 및 평가’에서는 3차 자기영상은 1차와 2차 자기영상에 대하여 제안한 알고리즘을 적용하여 획득된다. 보다 쉽고 빠르게 결함의 좌표, 길이, 형상, 방향 및 체적을 획득 할수 있는 알고리즘을 제시한다. 마지막으로 ‘제 4절. 3차원 실감형 소프트웨어’에서는 컴퓨터 그래픽스 분야에서 널리 쓰이는 기술인 텍스쳐 매핑과 스캔형 자기카메라의 자기영상의 결합 원리에 대하여 기술하였다. 간단히 설명한 내용을 토대로 본 장의 각 절에서는 상술한 단계의 이론적 근거와 함께 자세한 설명을 제시하였다.

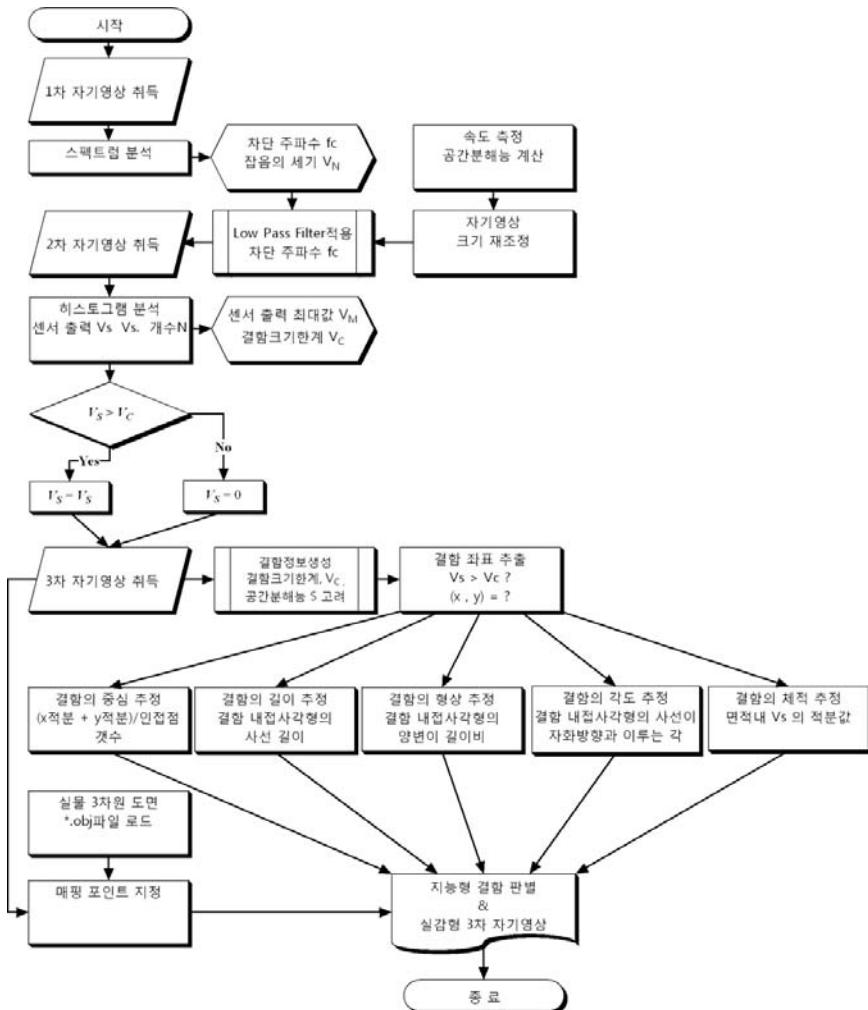
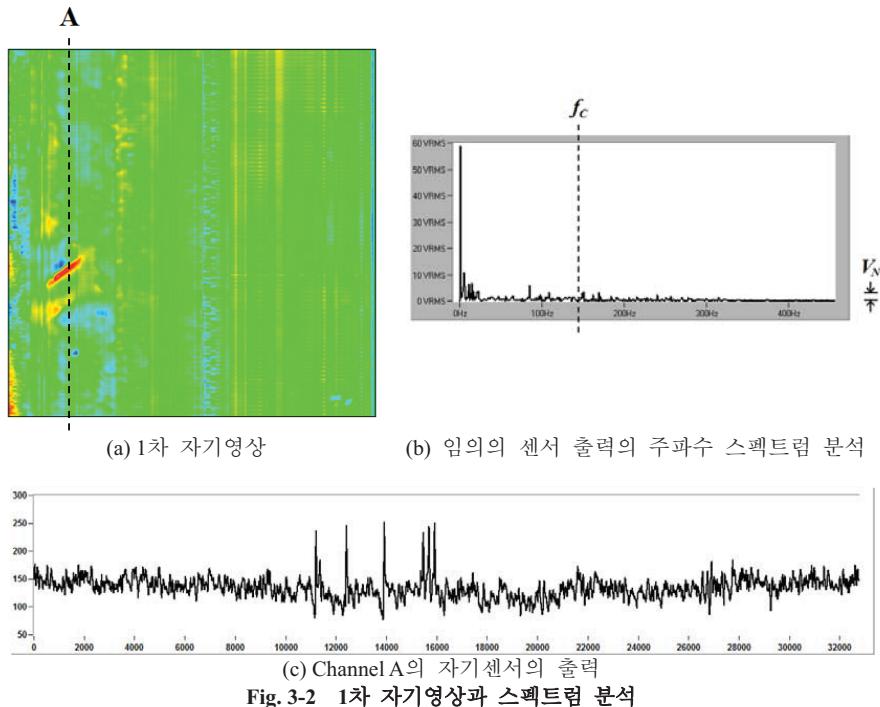


Fig. 3-1 지능형 손상 평가 알고리즘

제 1절 1차 자기영상 취득 및 스펙트럼 분석

Fig. 3-2(a)는 스캔형 자기카메라에 의하여 취득한 1차 자기영상(V_H)으로 센서 배열 방향(y방향)과 피측정체와 센서와의 상대적인 이동 방향(x방향)에서의 자기센서의 출력에 의하여 구해진다. 여기에서 자기센서를 훌센서와 같이 외부 자기장의 세기에 선형적으로 비례한 전기 신호를 출력하는 센서를 사용하면, 자기센서의 출력은 자기장의 세기를 의미하게 된다.

예를 들어 1차 자기영상(Fig. 3-2(a))의 임의의 채널 “A”는 Fig. 3-2(c)에서 표시한 바와 같이 자기센서, 증폭기, 전원 및 불특정 주변 환경의 영향으로 많은 잡음이 혼재된다. 따라서, Fig. 3-2(b)에 나타낸 바와 같이 임의의 영역에서 취득한 센서 출력의 주파수 분석을 통하여, 신호와 잡음을 구분해야 한다.



일반적으로 결합 신호는 결합의 위치 및 크기가 일정하지 않으므로 저주파수 대역에서 나타난다. 반면에 잡음은 고주파 대역에서 나타나므로, 차단주파수, f_c 에 의한 저대역 통과 필터(LPF, low pass filter)에 의하여 S/N비를 높일 수 있다. 한편, Fig. 3-2(b)에서 차단주파수 (f_c)보다 높은 주파수 대역 신호들의 평균 크기는 잡음의 세기(V_N)로 판정한다.

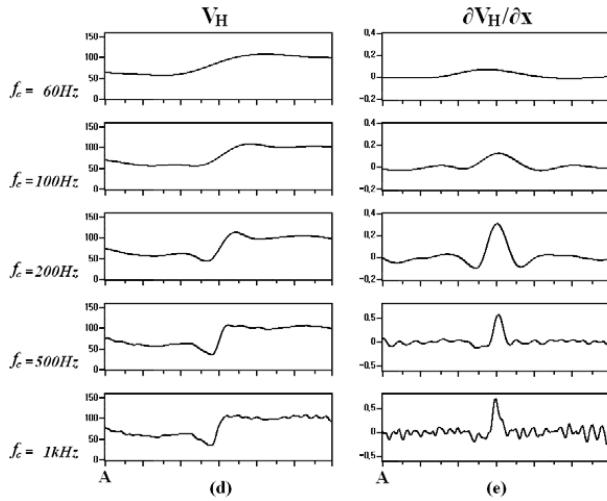


Fig. 3-3 임의의 영역에서 각각의 차단 주파수에 따른 V_H , $\partial V_H / \partial x$

Fig. 3-3(d)는 자기영상에서 결함을 지나는 1개 센서의 출력에서 60~1kHz의 차단 주파수(f_c) 이하의 신호를 재구성한 그림이다. 또한, Fig. 3-3(e)는 Fig. 3-3(d)를 미분 처리한 결과를 나타낸다. 차단 주파수가 낮을 경우에는 잡음이 거의 나타나지는 않지만, 결합 정보또한 추출되기 곤란하다. 반면에 차단 주파수가 높을 경우에는 잡음이 흔재된다. 따라서, 최적화된 차단 주파수를 지정하는 것이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 수동 방식으로 자기영상의 특정 영역에서 Fig. 3-2(a), (b), (c) 및 Fig. 3-3(e)의 결과를 보여 주면서 작업자가 차단 주파수를 설정하도록 지정하였다. 이때, 잡음의 세기(V_N)는 차단 주파수로부터 자동으로 계산되며 저장된다.

제 2절 2차 자기영상 취득 및 히스토그램 분석

상기 1차 자기영상에서는 결함 정보가 비교적 확연하게 표현될 수 있다. 그러나, 작업자에 의한 판정이 이루어지므로 작업자의 숙련도에 따라 결함의 존재 여부가 판별 되는 오류 및 위험성이 있다. 따라서 소프트웨어상에서 보다 쉽게 결함을 판별하기 위한 2차 자기영상을 출력한다. 2차 자기영상(Fig. 3-4(a))은 결함신호 스펙트럼에서 얻어진 차단주파수(f_C)를 이용하여 지역통과 필터를 통해 잡음이 저감된 자기영상을 얻고, 이를 자화방향(센서의 스캔방향, x방향)으로 미분하여 구할 수 있다.

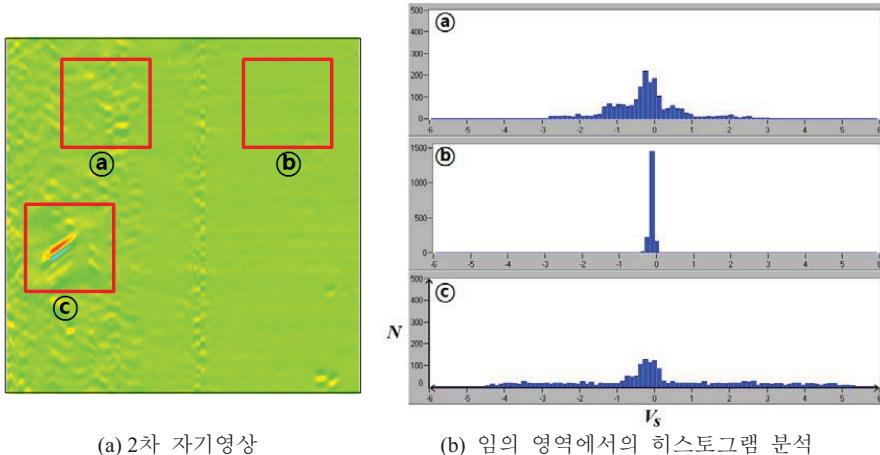


Fig. 3-4 2차 자기영상과 히스토그램 분석

1차 자기영상에서 결함의 방향이 자화방향과 수직이거나, 결함의 깊이가 깊거나, 체적이 크면, 높은 센서출력(V_s)이 나타난다. 또한, 결함 길이가 길거나 측정 영역에서 결함이 넓게 분포되어 있으면, 해당크기의 센서출력이 다수 발생하게 된다. 따라서, 횡축을 센서출력(V_s)으로 하고, 종축을 해당 센서출력의 개수(N)로 하는 히

스토그램을 이용하면 결함의 존재여부 및 크기의 분포를 추정할 수 있다. 즉, 결함 신호 히스토그램에 의하면, Fig. 3-4(b)의 ④와 같이 센서출력이 큰 영역에서 N 이 크면, 해당 구조물에 위험한 결함이 많이 내재되어 있음을 의미하며, Fig. 3-4(b)의 ⑤와 같이 센서출력이 낮은 영역에서 N 이 크면, 해당 구조물에 작은 결함이 많이 내재되어 있음을 의미한다. 또한, Fig. 3-4(b)의 ⑥와 같이 센서출력 전반에 걸쳐 N 이 분포하면, 큰 결함과 작은 결함이 섞여 있어, 향후 다중결함(Multisite cracks)으로 발전할 확률이 높음을 의미한다. 한편, 센서출력이 낮은 영역에서 N 이 클 경우에는 결함의 길이방향이 센서 스캔 방향과 좁은 각도를 가지고 분포하고 있음을 의미할 수 있으므로 주의해야 한다.

1차 자기영상에는 차단주파수(f_C)에 의하여 잡음 신호를 약화시켰다고는 하나, 결함 정보만을 추출하기에는 작업자의 숙련도에 따른 판정의 오류가 나타날 수 있다. 또한, 스캔형 자기카메라의 A/D변환기 분해능(본 연구에서는 8비트)에 상당하는 신호가 2차원으로 배열되어 있으므로, 데이터의 양이 다대하다. 따라서, Fig. 3-5 상기 결함신호 히스토그램의 횡축의 센서 출력의 최대값을 V_M 으로 지정하고, 또한 1차 자기영상의 스펙트럼 분석에서의 잡음의 세기(V_N)와의 $1/4$, $1/8$, $1/10$ 에 해당하는 값을 결함 정보의 한계 (V_C)로 지정한다.

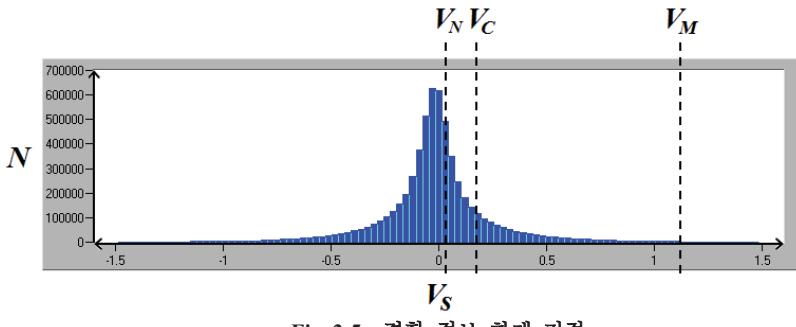


Fig. 3-5 결함 정보 한계 지정

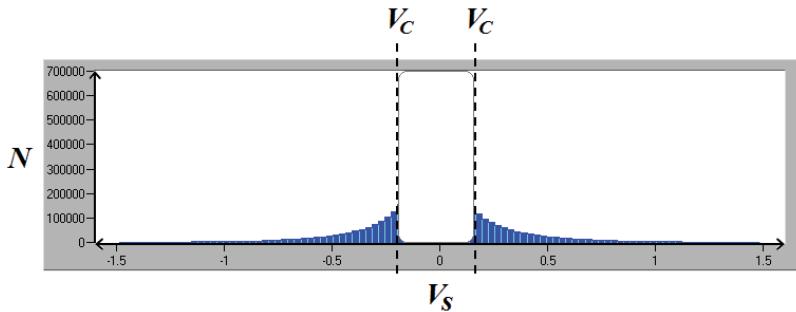


Fig. 3-6 데이터량의 감소

본 연구에서는 Fig. 3-6에서와 같이 1차 자기영상에서 구한 잡음레벨, V_N 을 이용하여 결함이 없다고 판단되는 영역에서 결함신호를 “0”으로 처리함으로써, 결함 정보만을 표현하였다. 즉, 임의로 지정하는 결함 정보의 한계(V_c)보다 큰 신호출력(V_s)은 수정없이 표현하나, V_c 보다 작은 신호출력은 “0”으로 표현하였으며, 현저히 데이터의 양을 줄일 수 있다. 다시 말해 결함정보의 한계 V_c 는 작업자가 검출하고자 하는 결함의 최소 크기를 말한다.

제 3절 3차 자기영상 취득 및 평가

3차 자기영상(Fig. 3-7)은 2차 자기영상에서 결합 정보의 한계(V_C)보다 큰 센서 출력만을 출력하여 구할 수 있다. 2차 자기영상에서 결합정보 한계 V_C 를 자동으로 지정하는 경우에는 상기 결합신호 히스토그램의 횡축의 최대값(V_M)과 상기 1차 자기영상의 잡음의 세기(V_N)의 $1/4, 1/8, 1/10$ 에 해당하는 값을 기준으로 하였다. 또한, 수동으로 지정하는 경우에는 상기 결합신호 히스토그램 분석결과를 표시하면서, 결합정보한계(V_C)를 작업자가 선택할 수 있도록 하였다. 동영상에서는 $V_M \sim V_N$ 의 $1/4, 1/8, 1/10, 1/12$ 이상의 분포를 반복하여 표현함으로써, 큰 결함이 생성하여 진전하는 과정 및 주변의 작은 결함이 생성하는 과정을 표현할 수 있도록 하였다.

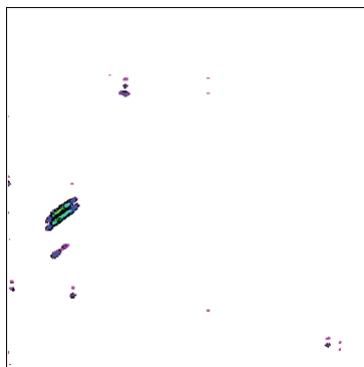
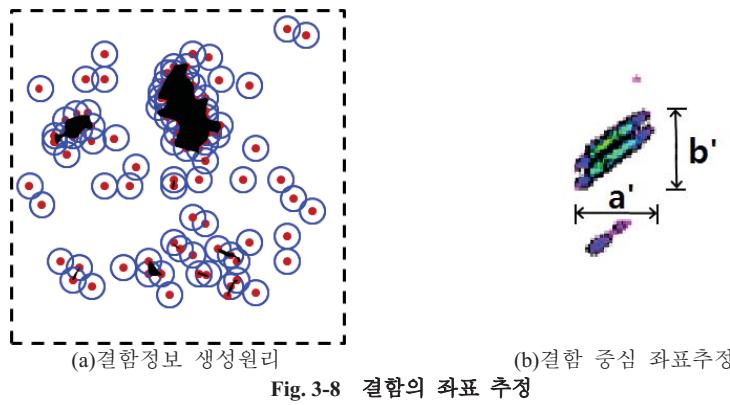


Fig. 3-7 3차 자기영상

1. 결합의 좌표 추정

상기 3차 자기영상에서 V_C 이상인 V_S 가 나타나는 좌표 (x, y)를 추출한다. Fig. 3-8(a)에서 보인 바와 같이 결합 좌표군에서 공간분해능의 n 배에 해당하는 거리 내에서 결합신호가 발생하면 동일한 결함으로 인정하여 연결한다. 이때, n 은 작업자가 구하고자 하는 결합 크기 한계(V_C)로부터 지정할 수 있다. 즉, 1mm 이상의 결함을

자동으로 검출하고자 하면, 현 시스템의 공간 분해능인 0.52mm를 고려하여, $n=2$ 를 선택할 수 있다. 이러한 작업에 의하여 연결된 결함 신호군에 의하여 각각의 결함이 추출된다. 이때, Fig. 3-8(b)는 각 결함의 x좌표의 평균(a')과 y좌표의 평균(b')은 결함의 중심으로 추정될 수 있다.



2. 결함의 길이, 형상, 방향 추정

결함의 길이는 Fig. 3-8(a)의 결함 생성 원리에 의해 도출한 동일 결함 신호군 내에서 결함의 중심으로부터 가장 먼 좌표 2곳의 결함에 내접하는 직사각형의 사선 방향 꼭지점($(x_P, y_P), (x_Q, y_Q)$)으로 추정할 수 있다. 따라서, Fig. 3-9와 같이 결함에 내접하는 직사각형의 사선방향 꼭지점간의 거리를 결함의 길이로 추정한다.

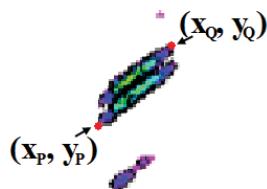


Fig. 3-9 결함의 길이 추정

한편, Fig. 3-10는 직사각형 변 길이는 다음과 같이 Eq. (20)으로 나타낸다.

$$\begin{aligned}\Delta x &= ABS(x_p - x_q) \\ \Delta y &= ABS(y_p - y_q)\end{aligned}\quad (20)$$

길이비 $\Delta x/\Delta y$ 가 1에 근접하고, 결합의 중심을 지나는 임의의 선(B')을 기준으로 센서 출력 (V_s)를 비교하여 그 차이가 일정값 이하 이면 원형 결합으로 추정하고, 그 반대의 경우에는 슬릿형 결합으로 추정할 수 있다. 또한, Fig. 3-11과 같이 $\tan^{-1}(\Delta x/\Delta y)$ 는 자화방향과 결합 길이 방향이 이루는 각도로 결합의 방향을 추정한다.



Fig. 3-10 결합의 형상 추정

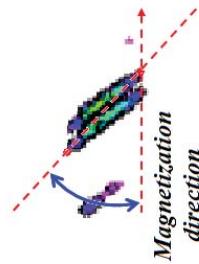


Fig. 3-11 결합의 방향 추정

3. 결함의 체적 추정

각 결함에서 누설 자속을 자화 방향으로 미분한 $\partial V_H / \partial x$ 의 최대값은 결함의 깊이와 최소값은 결함의 폭과 밀접한 관계가 있고, 뿐만 아니라 결함의 길이는 결함의 길이방향의 $\partial V_H / \partial x$ 값의 분포와 밀접한 관계가 있다.

Eq. (18)과 같이 결함의 길이방향으로 $\partial V_H / \partial x$ 를 결함평가 알고리즘에 의한 개수만큼 더해 얻어진 결과인 $\partial V_H / \partial x|_{\text{total}}$ 은 각각의 결함 신호군의 위치를 의미하는 직사각형의 영역안에 위치하는 센서 출력의 합(V_{TOTAL})을 나타내며, 이것은 결함의 체적(V_{CRACK})과 밀접한 연관을 가지고 있다. 즉,

$$V_{\text{TOTAL}} = \sum_{i=P}^{\varrho} \sum_{j=P}^{\varrho} V_s(x_i, y_j) \quad (21)$$
$$V_{\text{CRACK}} = C_1 \cdot (V_{\text{TOTAL}})^{C_2}$$

로 표현된다. 여기에서 상수 C_1 및 C_2 는 센서와 시험편과의 거리(lift-off), 센서의 종류 및 구동전압, 증폭율, 자화기 형상 및 성능, 이동속도, 시험편의 종류등에 의하여 결정된다.

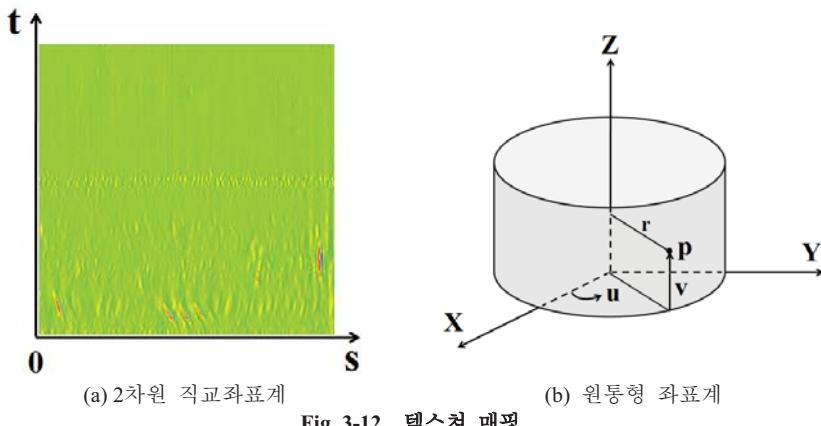
제 4절 3차원 실감형 소프트웨어

보통 3차원 게임이나 가상환경분야에 쓰이는 물체들은 수 많은 다각형으로 표현되며 렌더링이란 작업을 통해 3차원 장면이 2차원 이미지로 바뀌게 된다. 이 작업을 통해 마치 실제 물체를 보는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 이미지의 사실성을 높이기 위해서는 모델을 렌더링 할 때 미리 생성해 놓은 이미지 데이터를 적절하게 적용하는 것 이러한 방법이 텍스쳐 매핑이다.

텍스쳐 매핑은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 널리 쓰이는 기술로 (s, t) 좌표로 표현된 텍스쳐 영상을 (x, y, z) 좌표로 표현된 물체면으로 사상하는 것이다. 보통의 평면 다각형의 텍스쳐 매핑은 단순히 2차원의 텍스쳐를 사상될 평면 다각형의 정점에 할당하고 평면 다각형의 크기에 맞도록 비례하여 사상하여 표현한다.

철도 차륜과 같이 텍스쳐 매핑의 대상이 곡면일 경우는 조금 복잡하다. 평면의 이미지를 곡면에 입히는 과정에서 서로간의 표면적 차이나 모양 차이를 어떻게 처리해야 하는지가 문제가 된다. 차륜의 경우는 차축을 중심축으로 차륜 담면과 플랜지의 단면 형태를 차륜의 회전 방향으로 회전 시켜 얻은 원통형과 같은 형태이다.

평면좌표계와 원통좌표계는 다음과 같은 수식 관계를 갖는다.



$$x = r \cos u, y = r \sin u, z = v \quad (22)$$

철도 차륜의 담면에 해당하는 원기둥 표면상의 점 $p(x, y, z)$ 은 위 수식을 통해 표현할 수 있다. 여기서 u 는 점 p 를 $x-y$ 평면에 투영했을 때 x 축과 이루는 각이다. 또한 v 는 점 p 의 높이인 z , r 은 원기둥의 반지름에 해당한다. 철도 차륜의 결합 영상인 (s, t) 에서 차륜의 3차원 모델링 된 (u, v) 로 매핑하기 위해서는 s 가 결합영상의 시작점에서 끝점으로 갈 때, u 는 0도에서 2π 각도와 대응 되어야 하며, 차륜의 폭에 해당하는 원기둥의 높이를 1로 가정하면 t 가 0에서 1로 갈 때, v 역시 0에서 1로 대응 된다.

$$u = 2\pi s, v = t \quad (23)$$

$$x = r \cos 2\pi s, y = r \sin 2\pi s, z = t \quad (24)$$

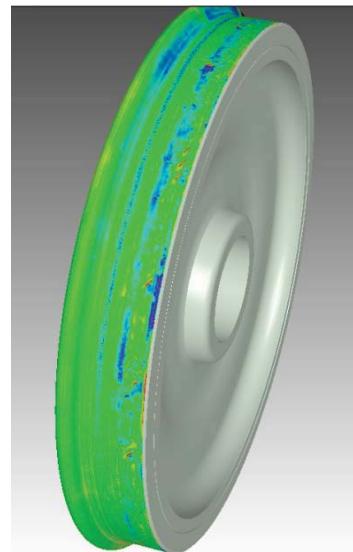
매개변수 사이의 관계는 위의 Eq. (23)과 같으며, Eq. (22)는 Eq. (24)으로 표현 할 수 있다. 따라서 결합 정보를 포함한 상기 2차 자기영상의 시작점과 끝점을 포함한 특징점을 시험편의 3차원 형상의 특징점과 매핑하면, 결합 정보를 실제 시험편 형상에 맞추어 표현할 수 있다. 이러한 원리에 의하면 Fig. 3-13(a)에 표시한 바와 같은 차륜 담면의 결합 정보를 Fig. 3-13(b)과 같은 철도 차륜 형상의 3차원 모델링 물체에 매핑하여 Fig. 3-13(c)과 같이 표현할 수 있다.



(a) 차륜 담면의 자기영상



(b) 철도차륜 3차원 모델링



(c) 텍스쳐 매핑결과
Fig. 3-13 철도 차륜의 텍스쳐 매핑

제 4장 실험 및 고찰

철도 차량이 정비공장에 진입하는 속도인 시속 약 30km/h에 상당하는 속도로 회전하는 고속철도 차륜을 스캔형 자기카메라에 의해 검사하였다. 즉, (1) 차륜의 딥면 형상에 따라 곡면으로 배열된 고공간 분해능의 센서 배열과 (2) 차륜 딥면 형상의 직류 자화법을 이용한 Yoke type의 소형 자원, (3) S/N가 높은 계측용 차동 종 폭 및 (4) 전용 A/D변환을 거쳐 (5) 대용량 DMA에 저장 및 컴퓨터에 전송하는 고속 신호 처리 회로 등의 장치를 이용하여 철도 차륜을 검사하였다. 또한, 작업자의 착오, 경험 미숙에서 오는 조작 과정의 실수 등과 같은 인적 오류를 최소화하기 위하여 (6) 결함의 검출 및 위치 파악, 결함 크기를 정량적으로 평가하는 알고리즘을 적용하고, 작업자의 손상 판정 이해도를 높이기 위해 피측정체의 결함의 위치 및 손상의 정도를 (7) 3차원 실감형 그래픽스에 의해 표현하였다. 이러한 일련의 연구 결과를 고속 철도 차륜의 인공 결함 및 자연 결함의 검출 및 평가에 적용함으로써 스캔형 자기카메라와 지능형 결함 평가 알고리즘의 유용성을 고찰하였다.[47-51] 본 절에서는 실험에 사용된 스캔형 자기카메라의 각각의 요소들을 설명하고, 팀상 결과를 논의한다.

제 1절 시험편

실험에 사용된 시험편은 고속 철도 차륜으로 일정 기간 현장에서 운용 되던 직경이 850mm인 차륜이다. 시험편에 드릴 및 소잉머신에 의하여 Fig. 4-1의 형태로 Fig. 4-2의 위치에 인공결함을 도입하였다. Fig. 4-2에서 ①~⑯는 인공결함이며, ①~⑯는 고속 철도 차륜에 존재하는 실제 결함을 나타낸다. Table 4-1은 차륜 시험편에 도입한 인공 결함의 종류 및 크기를 나타내며, 실제균열의 크기 및 형상은 Table 4-2와 같다. Table 4-1, 2의 모든 결함에 대하여 3차원 레이저 미소변위 측정기의 측정을 통해 Fig. 4-3과 같이 결함의 정량적인 크기와 체적 및 결함의 형상을 취득하였다.

한편, 시험편을 등속 회전시키면서 일정시간 간격으로 데이터를 취득한 후, 직전 데이터로부터 차감함으로써 $\partial V_H/\partial x$ 데이터를 취득하였다. 이때, 회전 속도를 일정하게 하면 ∂x 는 ∂t 로 대체할 수 있다. 따라서, 고속 신호처리 장치의 경우에는 $\partial V_H/\partial x$ 는 정확하게 표현하면 $\partial V_H/\partial t$ 가 된다.

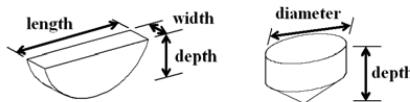


Fig. 4-1 철도 차륜의 결함의 형태

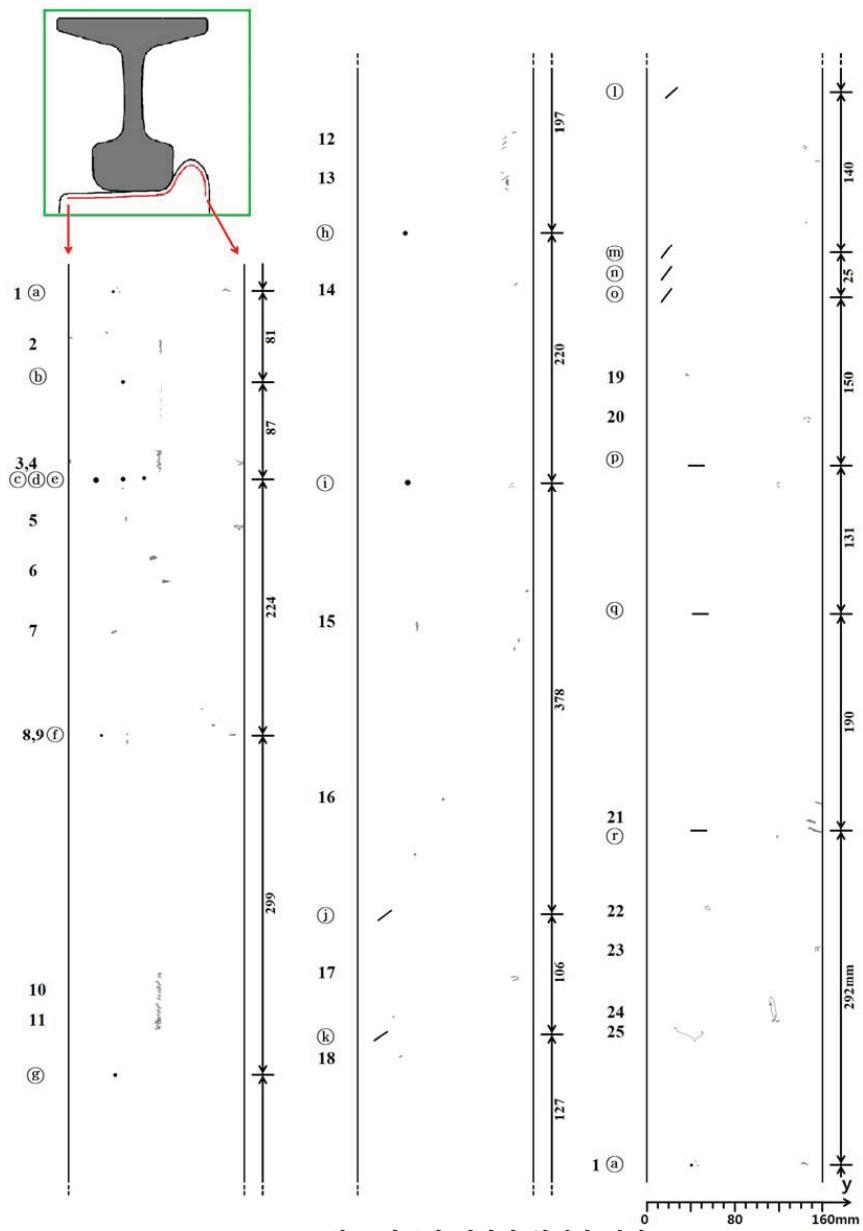
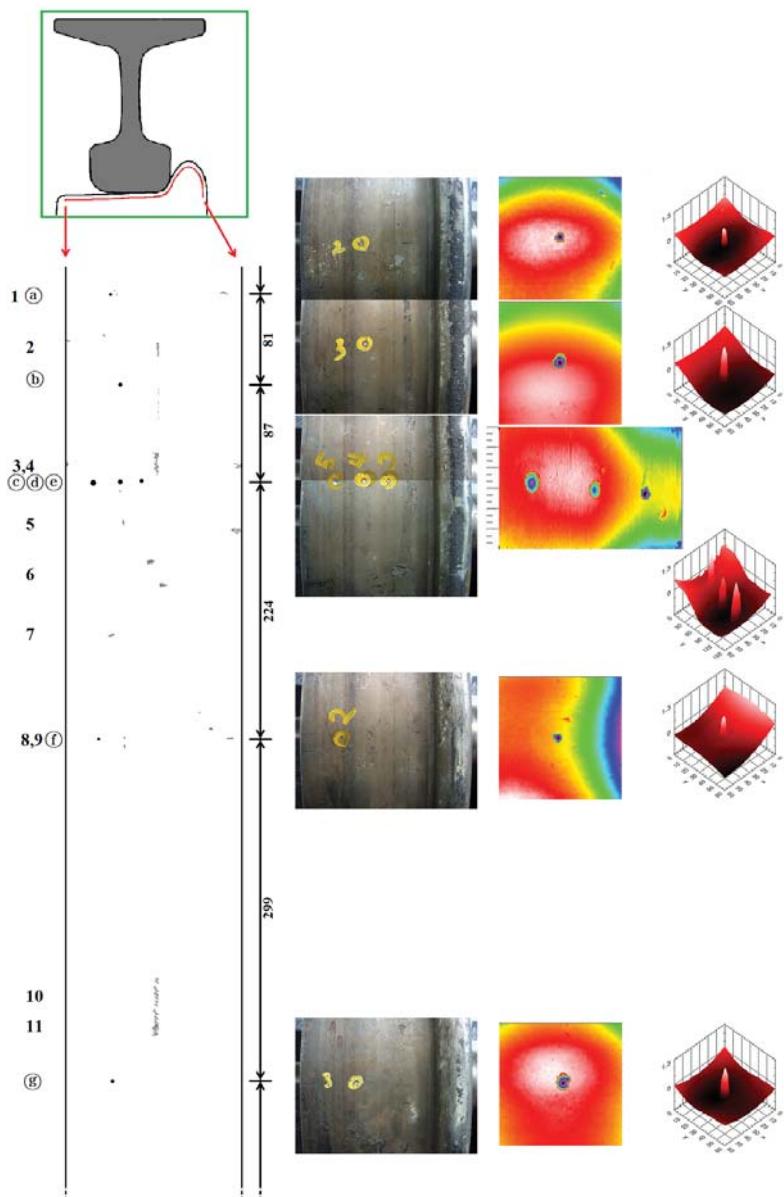
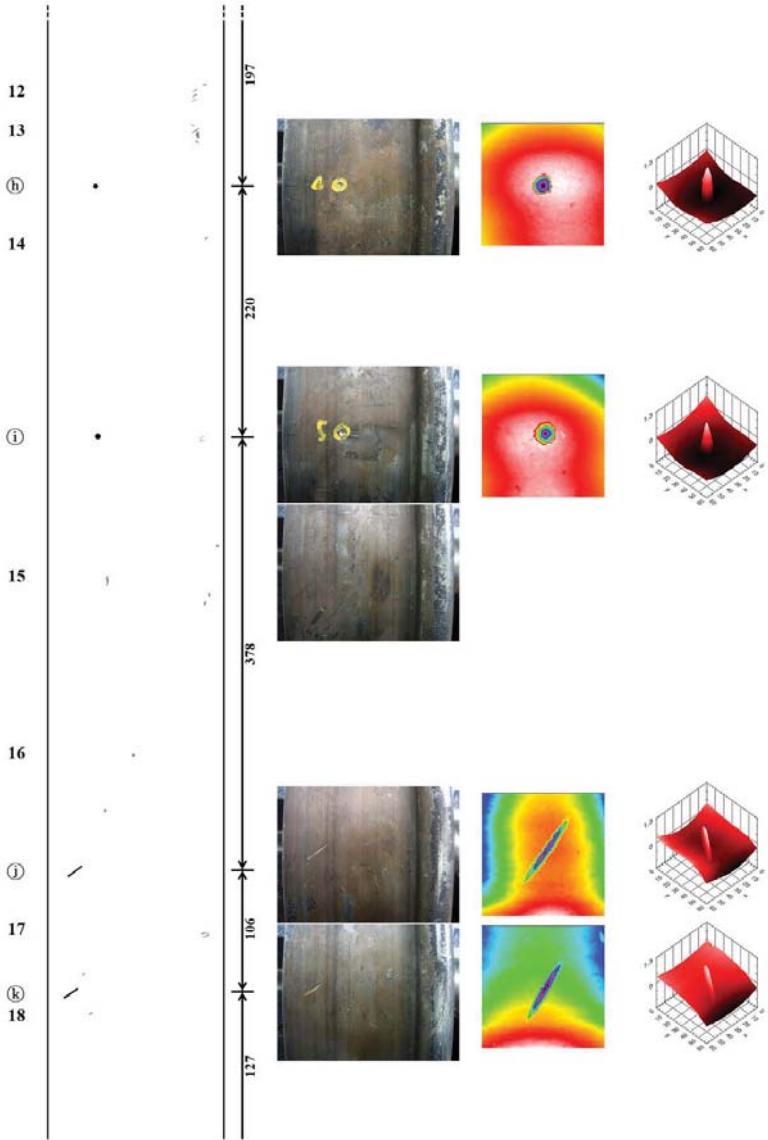


Fig. 4-2 철도 차륜의 결합의 형태와 위치





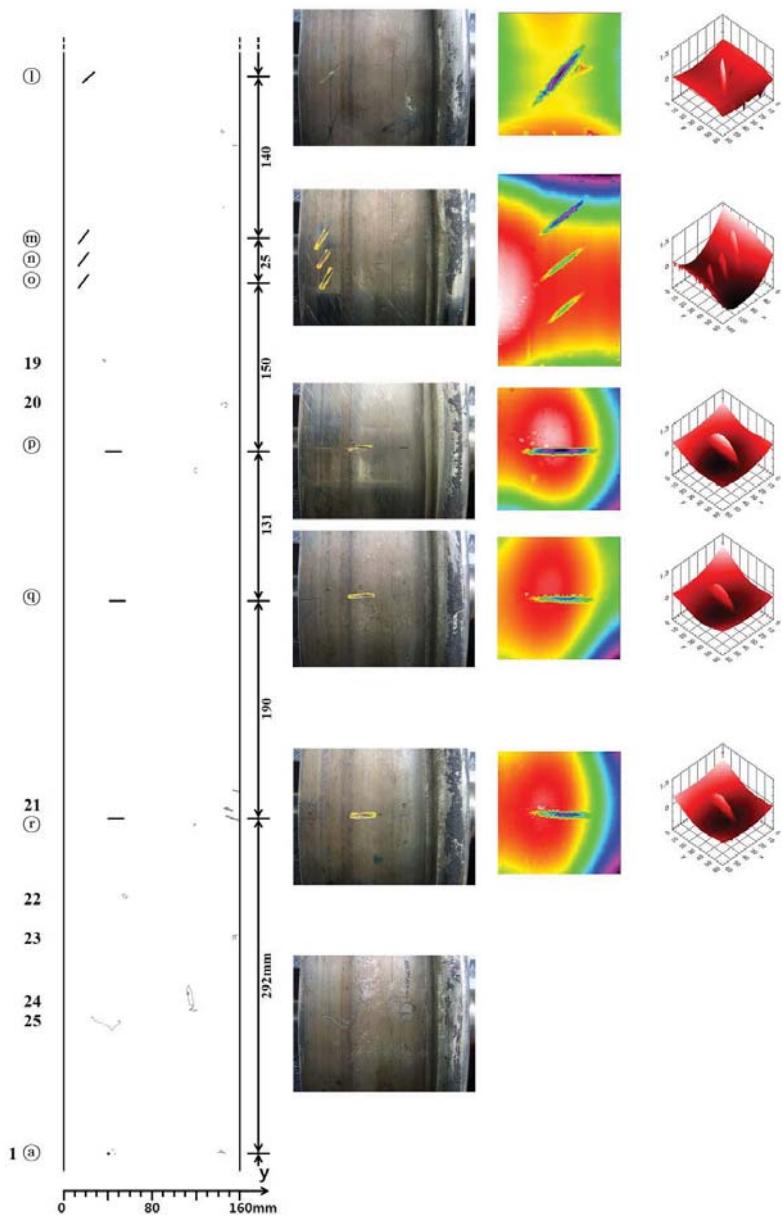


Fig. 4-3 인공 결합의 3차원 레이저 미소변위 측정결과

Table 4-1 인공 결합의 크기와 체적 [unit: mm]

Hole shape				Slit shape				
No.	depth	diameter	volume	No.	depth	width	length	volume
(a)	1	1.84	2.7927	(j)	1	2.28	20.83	14.6756
(b)	1.39	2.97	10.8603	(k)	0.65	2.03	17.03	12.9521
(c)	1.74	4.93	26.9878	(l)	0.4	2.01	19.6	17.0803
(d)	1.34	3.92	16.2416	(m)	1.06	2.07	19.77	19.4298
(e)	1.2	2.86	9.0370	(n)	0.74	2.26	18.5	15.9182
(f)	1	1.97	2.6424	(o)	0.47	2.48	17.26	10.8371
(g)	1.16	2.98	9.7858	(p)	1	2.35	19.04	19.4484
(h)	1.45	3.96	17.8009	(q)	0.7	1.93	17.7	13.7351
(i)	1.23	4.56	15.3518	(r)	0.5	1.87	16.27	11.6455

Table 4-2 자연 결합의 크기와 체적 [unit: mm]

No.	shape	width	length	depth	Volume
1	Scratch	2.85	3.6	0.23	0.6067
2	Shelling	2.96	3.36	0.49	6.2657
3	Shelling	3.34	3.18	0.55	7.3579
4	Scratch	4.2	9.15	0.23	0.2236
5	Thermal crack	4.0	3.9	0.35	1.6045
6	Disintegration	12.63	8.52	0.74	75.8766
7	Thermal crack	2.8	1.81	0.32	0.8716
8	Thermal crack	5.8	2.84	0.33	3.9449
9	Scratch	1.54	3.54	0.27	0.1273
10	Shelling	3.31	5.3	0.62	21.4397
11	Shelling	7.02	10.18	0.63	17.0656
12	Scratch	7.89	14.35	0.34	2.6417
13	Scratch	4.5	7.86	0.26	3.7284
14	Scratch	1.25	4.83	0.18	0.1465
15	Shelling	4.01	7.46	0.3	2.8142
16	Shelling	4.6	6.5	0.47	3.5885
17	Chop	8.7	6.2	0.26	6.8589
18	The early Shelling	5.57	2.1	0.14	0.7181
19	The early Shelling	2.74	4.2	0.24	0.7873
20	Chop	3.73	6.98	0.22	0.4679
21	Scratch	5.3	25.31	0.31	1.7543
22	Thermal crack	1.73	4.41	0.21	0.2986
23	Protuberance	2.5	7.43	0.39	1.7675
24	Shelling	2.75	5.47	0.3	7.9978
25	Scratch	21.98	33.12	0.22	0.1537

제 2절 곡면형 LIHaS

Fig. 4-4(a)는 웨이퍼상에서 0.78mm(답면부분) 및 1.04mm(플렌지부분) 간격으로 차륜의 답면 형상에 따라 배열된 181개의 홀센서(LIHaS)를 나타낸다. LIHaS를 이용하면 보다 고공간 분해능의 자기영상상을, 센서간 리프트 오프의 차이가 없이, 보다 빠른 속도로 취득할 수 있다. 각각의 홀센서에 입력한 전류는 4.53mA이고, 64.43dB 차동 증폭하고, lift-off $1.4 \pm 0.35\text{mm}$ 에서 측정하였다. 또한, LIHaS를 이용하여 취득한 자기영상 데이터(V_H) 및 영상 처리 데이터($\partial V_H / \partial x$, $\partial V_H / \partial y$)를 비교하였다.

Fig. 4-4(b)는 곡률 반경에 맞추어 센서 헤드부의 높이와 각도를 조정할 수 있는 접근 기구물이다. 자기센서의 감도가 최고로 되기 위해서는 전자석의 자극간 거리와 차륜 답면과의 거리가 일정해야 하고, 특히 자기센서의 표면이 답면과 평행이 되도록 배치되어야 한다. 그러나 차륜은 차량의 높은 하중을 지지하고, 레일과의 반복적인 구름 접촉등에 의해 차륜 답면의 표면 상태가 달라지기 때문에 차륜 내 외측의 높이 및 차륜 회전 방향의 각도가 조정되어야 한다. 정밀 차륜 회전 장치에 설치되어 차륜 답면의 자기영상을 취득하였다.

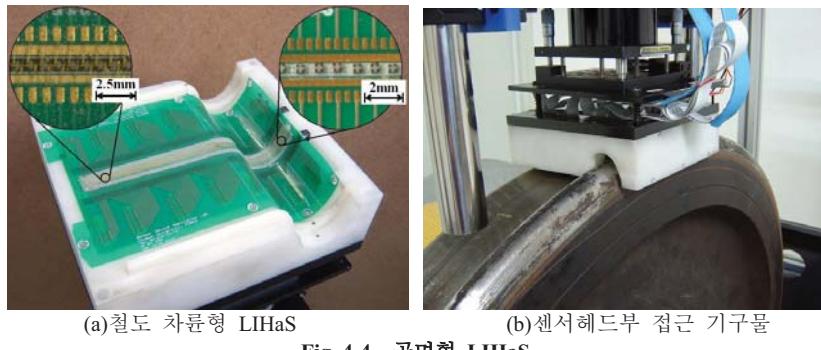


Fig. 4-4 곡면형 LIHaS

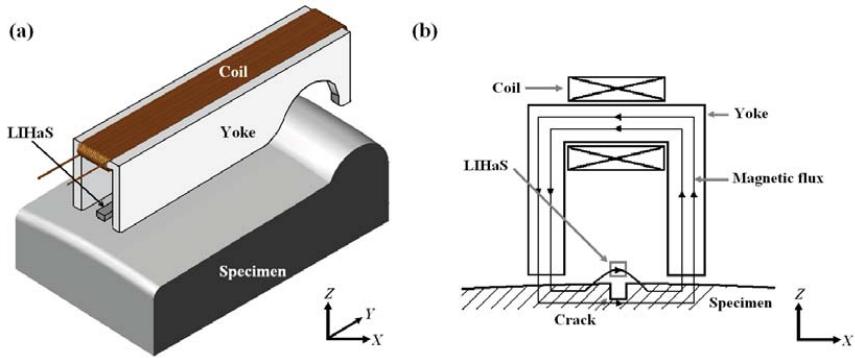


Fig. 4-5 철도 차륜용 소형 자화기

Fig. 4-5(a)는 LIHaS의 배면에 설치된 차륜 담면 형태의 소형 전자석의 개요도이다. 배열된 센서의 방향을 y축, 스캔 방향을 x축, 차륜 평면의 수직 방향을 z축이라 하였다. Fig. 4-5(b)와 같이 xy-평면상의 차륜과 같은 강자성체 시험편이 전자석에 접근하면 시험편 표면 방향(x방향)으로 자속이 접속된다. 이 때, 결함의 존재에 의하여 누설자속이 발생하며, 결함의 길이방향이 자화방향(x방향)과 수직일 때 누설자속은 최대가 된다. 따라서 이러한 구조에서 시험편이 강자성체일 때에는 결함 방향이 LIHaS의 배열방향(y방향)과 근접할수록 결함탐상 능력이 우월하다. 실제 실험에 사용된 코어 중앙에는 직경 1.2mm의 에나멜 선이 100turn 감겨 있으며, 0.2A를 입력하였을 때 자극의 중앙에서 약 14mT정도의 자기장이 발생한다.

한편, 상술한 소형 전자석을 결함의 방향에 따라 유한요소 해석하였다. LIHaS의 스캔 방향과 센서 배열 방향은 각각 x, y방향이다. z방향은 시험편에 수직한 방향이다. y방향의 길이가 150mm, x방향의 폭은 30mm, z방향의 높이는 39mm이고 두께가 5mm인 차륜 형태의 코어를 가정하고, 코어의 투자율은 4×10^3 (S/m), 유전율은 8×10^6 (F/m)이며, 자화기를 LIHaS의 뒤에 위치시킨다. 코일에 직류 1A를 적용하였을 때 Fig. 4-7(a),(b),(c) 차륜에 x방향의 자기장이 인가된다. 코일은 4.8mm 두께와 19.8mm 높이로 코어의 두 극에 감긴다. 차륜은 직경이 860 mm의 크기이며, 차륜의 투자율과 유전율은 각각 4×10^3 (S/m)와 8×10^6 (F/m)의 강자성체 재료로 가정한다. 해

석에서의 lift-off는 1mm이다. 결합의 깊이가 5mm이고 폭이 4mm, 길이는 20mm인 차륜에 도입된 인공 결합에 대해, 결합의 길이 방향과 자화 방향이 수직일 때(Fig. 4-7(a))와 자화 방향과 45°일 때(Fig. 4-7(b)) 그리고 결합이 직경 5mm 일때 원형 결합을 해석하였다.

각각의 해석을 통해 얻어진 데이터는 $\delta V_H / \delta x$ 처리 후 차륜의 회전방향인 x방향의 성분만을 분석하였다. 결합의 길이 방향과 자화 방향이 수직일 때는 Fig. 4-7(a)의 해석 결과와 같이 결합의 양쪽 tip에서 흐트러짐이 최대가 됨을 알 수 있으며, 자화 방향과 45°일 때 또는 원형결합의 경우는 Fig. 4-7(b)(c)와 같이 누설 자속이 발생된다. 자화기의 형상이 차륜의 디자인의 형상과 같이 다소 구부러지더라도 결합검출을 위한 자기장을 여기하는데 큰 영향을 주지 않으며, 기준의 요크형 자화기의 자기장 발생과 유사함을 알 수 있다.

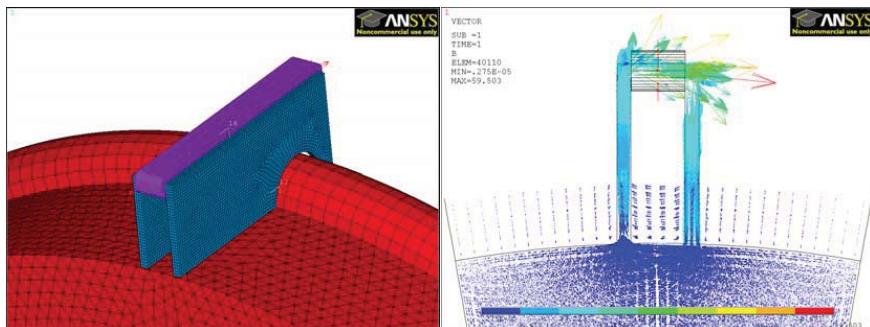
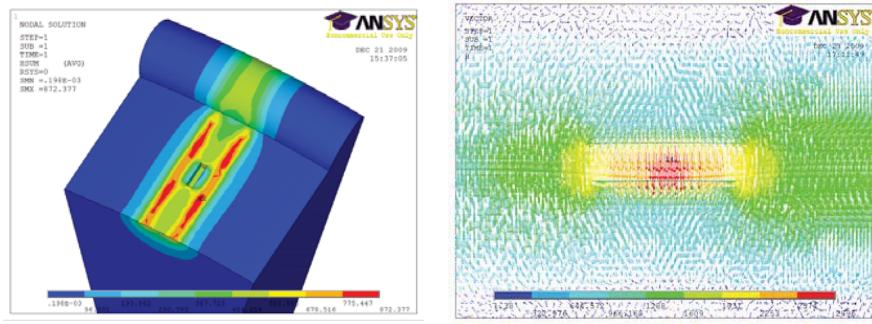
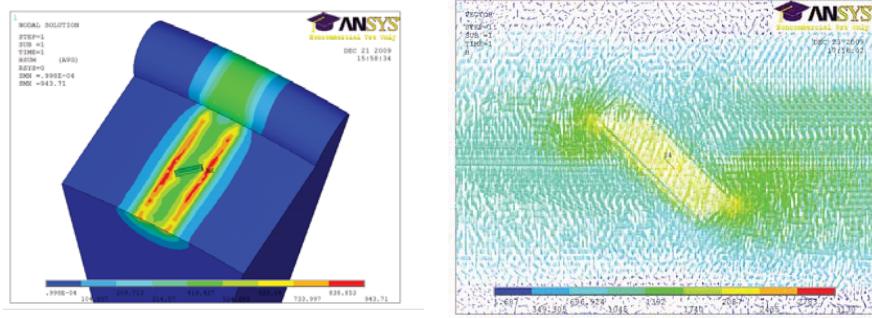


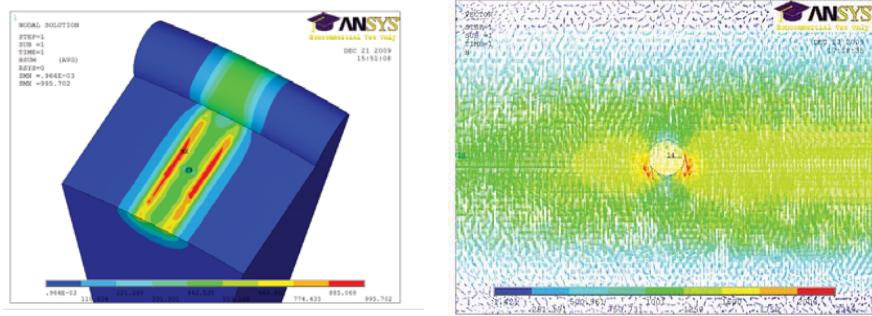
Fig. 4-6 FEM 해석



(a) 자화방향에 수직인 결함



(b) 45° 결함



(c) 원형결함

Fig. 4-7 철도차륜의 수치해석 결과

제 3절 실시간 신호 처리 및 실험 장치

Fig. 4-8은 LIHaS, 증폭부, A/D변환부 및 결합정보 저장 및 지시의 실시간 신호 처리 부분을 설명한 개요도이다. 지금까지는 시판되는 A/D변환기를 이용하여 결합을 탐상하였으나, 신호변환속도 및 스위칭속도, 검출범위 및 분해능, 직접 데이터 액세스, 임시 저장속도 및 저장량에 있어서 한계점을 가지고 있었다. 따라서 Fig. 4-9과 같이 (1) 앞서 설명한 기개발된 OP-Amp, 신호 증폭배율의 조정 회로, LPF를 표준 장착하여 S/N를 높이고, (2) 이들 차동 증폭 회로들이 각각의 자기센서와 1:1 대응할 수 있도록 하여 각 센서의 데이터 취득 속도를 높이고, (3) 신호 배선을 간략화하여 외부 잡음의 유입을 최소화하고, (4) 8bit의 분해능으로 자기장의 신호를 디지털 변환하여 저장하는 장치를 개발하였다. A/D변환 속도는 10usec이며, 시속 33km/h의 속도로 회전하는 직경 851mm의 차륜 표면의 자기장 영상을 0.2918sec의 시간에 0.0867mm 간격으로 취득할 수 있었다.

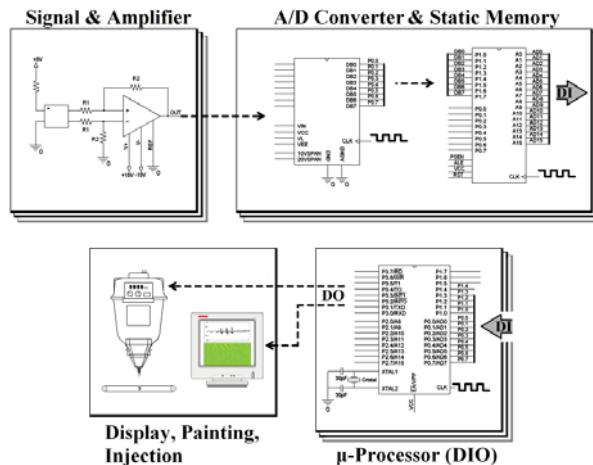


Fig. 4-8 신호 처리 회로의 개요도

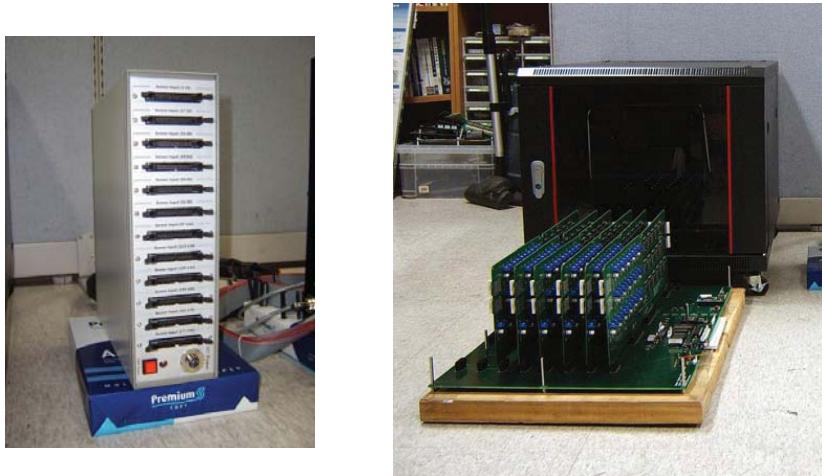


Fig. 4-9 중폭부와 인터페이스장치

차륜 고속 회전 장치는 Fig. 4-10에 보인 바와 같이 차륜 시험편을 마운트 할 수 있는 양쪽 고정부와 차축 · 림 탈피 방지 장치 및 속도 제어 장치로 구성되어 있으며, 차륜 시험편을 장착 회전시켜 rpm에 따라 속도를 측정하고, 차축의 균열 등 다양한 요소를 검사할 수 있는 범용 시험기다. 이 장치에 의해 고속 철도 차륜을 시속 약 33km/h의 속도로 회전한다. 차륜 고속 회전 장치의 상부에 설치된 콜럼 반경에 맞추어 높이와 각도를 조정할 수 있는 접근 기구물에 자원 및 웨이퍼상에 0.78mm 및 1.04mm 간격으로 181개의 배열된 홀센서(LIHaS)를 위치 시킨다. 이 접근 기구물에 의해 차륜 내 외측의 높이 및 차륜 회전 방향의 각도가 조정 된다. 또한 자원의 자기장은 차륜에 접근하여 차륜의 회전 방향(x방향)으로 자속이 접속된다. 이때, 고속 철도 차륜에 존재하는 인공 혹은 자연 균열에 의해 누설 자속이 발생하며, 등속 회전 운동하는 차륜 시험편에서 일정시간 간격으로 데이터를 상술한 신호 처리 장치에 의해 취득한 후, μ -processor에 의하여 직전 데이터로부터 차감 함으로써 $\partial V_H/\partial X$ 데이터를 취득하였다. 181센서가 한번의 주기에 소요되는 전체 시간은 A/D 변환속도인 0.035ms와 각각의 홀센서로부터 출력되는 8비트 512개의 데

이터가 SRAM 레지스터에 저장될 때 소요되는 처리속도 및 인터페이싱 시간을 포함하여 약 180ms이다. 여기에서 8비트 512개의 데이터란 12비트 256개의 데이터를 의미한다. 이와 같은 실험 장치에 의해 철도 차륜을 탐상 하였다.

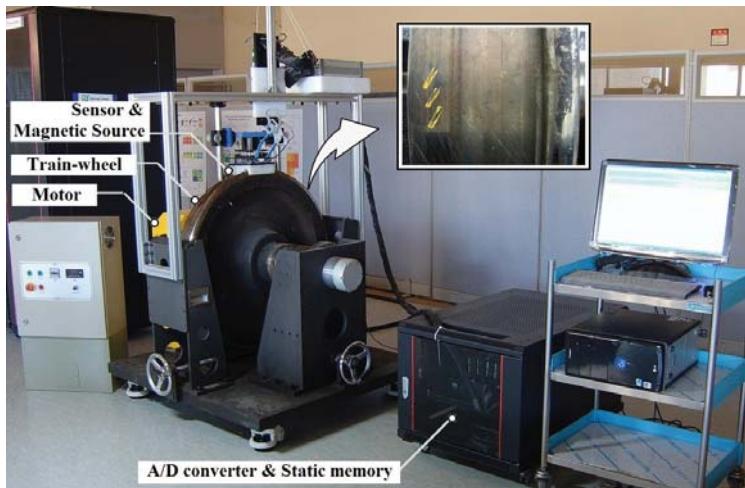


Fig. 4-10 철도 차륜 회전 장치

제 4절 실험 결과 및 지능형 손상 평가 알고리즘 적용

1. 1차 자기영상 측득 및 스펙트럼 분석

Fig. 4-12는 시속 약 33km/h의 속도로 회전하는 차륜을 스캔형 자기카메라에 의하여 측득한 1차 자기영상(V_H)이다. 자기장의 특징적 분포나 비교적 큰 결함의 자기장 분포는 대략적으로 구분이 가능하지만, 실제 육안으로 식별 가능한 인공 및 자연 결함들 중 크기가 작은 결함은 자기센서, 증폭기, 회로의 전원 및 불특정 주변 환경에 의한 잡음과 차륜의 회전을 위한 고출력 모터, 부설 장비 등을 운용할 때 발생하는 잡음의 영향으로 그 존재를 쉽게 파악하기 어렵다. 따라서 아날로그 필터링을 통과한 후 얻어진 자기영상의 임의의 영역에서 측득한 센서 출력을 주파수 분석(Fig. 4-11)을 통해 디지털 필터링으로 신호와 잡음을 구분하였다. 주로 저주파 영역인 150Hz 이하의 주파수 대역 성분과 고주파 영역인 1.6k, 4k, 8kHz 주파수 대역 성분을 많이 포함하고 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 차단 주파수(f_c)를 1.8kHz로 설정하고, 차단 주파수 보다 높은 주파수 대역 신호들의 평균 크기를 잡음의 세기(V_N)로 자동 설정하였다. Fig. 4-13는 설정된 차단 주파수에서 디지털 저대역 통과 버터워스 필터(Butterworth filter)를 이용하여 얻어진 자기영상 (V_H)이다. 필터링 된 신호는 비교적 선형적인 위상 응답을 제공하며, 통과 대역의 데이터의 진폭의 선형성이 유지되었으며, 또한 리플 응답은 없이 적어 결함 탐상에 유용하다. 자기영상 처리에 있어서 결함 판정의 오류 원인이 되는 이러한 잡음을 이러한 디저털 필터링을 통해 효과적으로 제거 할 수 있었다.

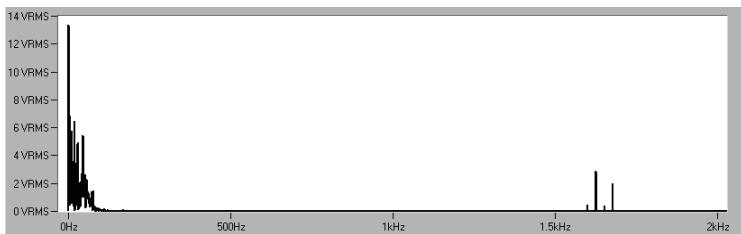


Fig. 4-11 1차 자기영상의 주파수 분석

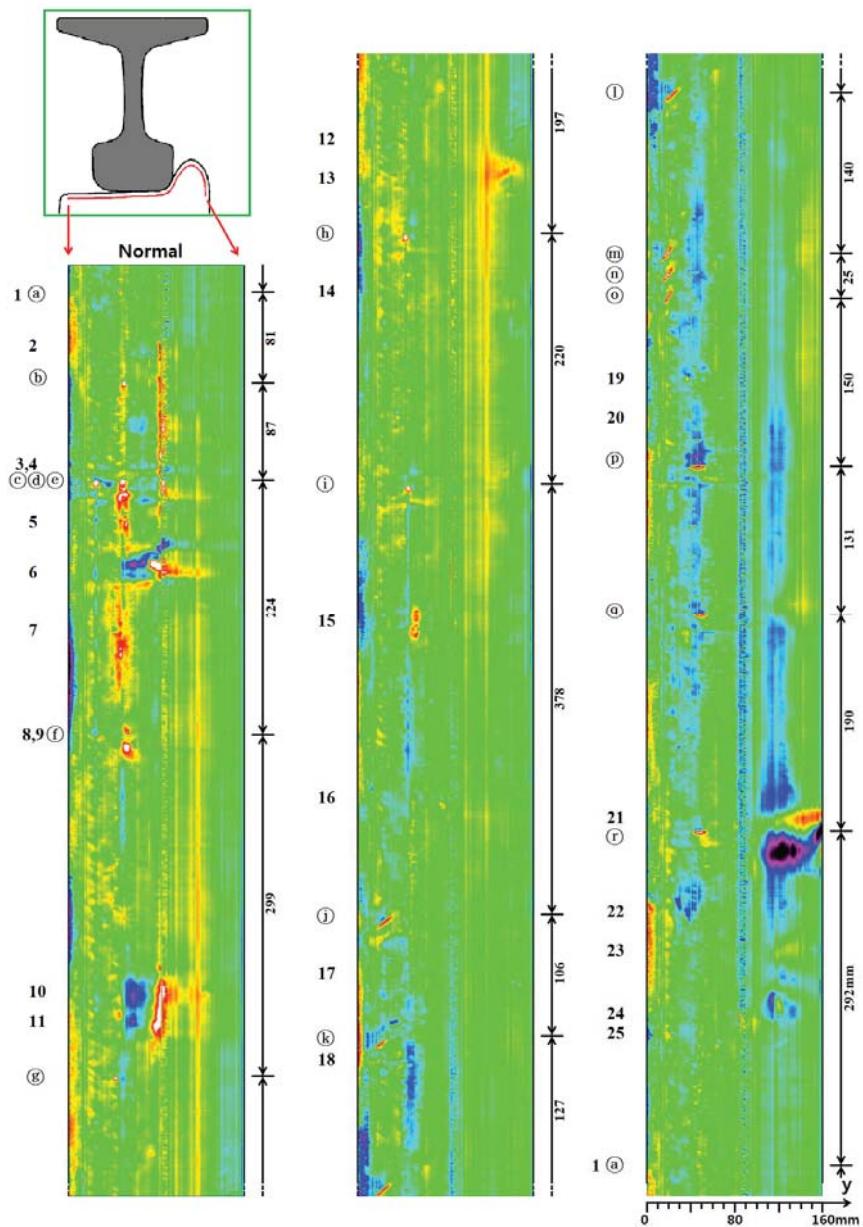


Fig. 4-12 1차자기영상

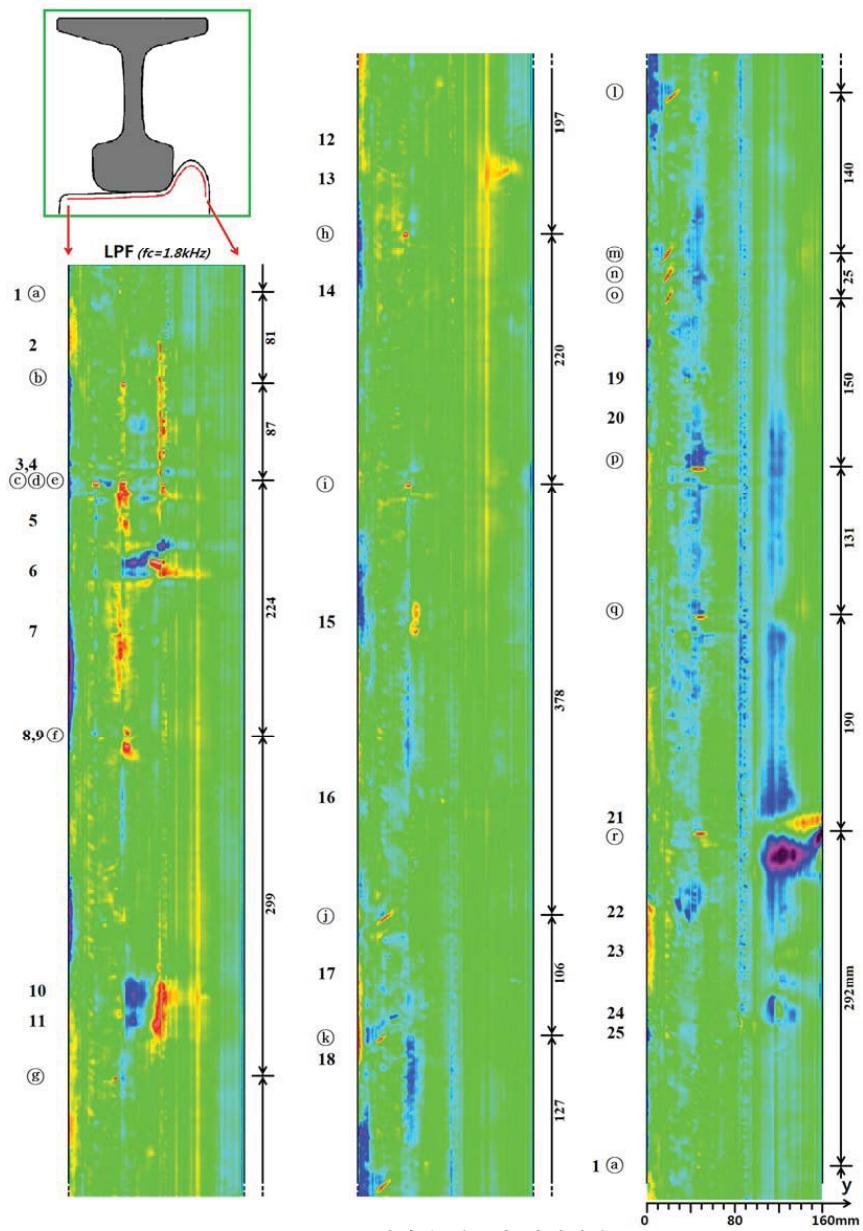


Fig. 4-13 필터링 된 1차 자기영상

2. 2차 자기영상 취득 및 히스토그램 분석

1차 자기영상에서는 결함 정보가 비교적 확연하게 표현될 수 있지만, 작업자에 의한 판정이 이루어지므로 작업자의 숙련도에 따라 결함의 존재 여부가 판정 되는 오류 및 위험성이 있다. 따라서 이러한 판정 오류를 최소화하기 위해 소프트웨어 상에서 보다 쉽게 결함을 판별하기 위한 2차 자기영상을 출력한다. 2차 자기영상 (Fig. 4-15)은 앞서 결함신호 스펙트럼에서 얻어진 차단주파수($f_c = 1.8\text{kHz}$)를 이용하여 저역통과 필터를 통해 잡음이 저감된 자기영상을 얻고, 이를 자화방향(차률의 회전 방향, x방향)으로 미분하여 구할 수 있다.

Fig. 4-14는 횡축을 센서출력(V_s)으로 하고, 종축을 해당 센서 출력의 개수(N)로 하는 히스토그램을 나타낸다. 전체적으로 종형의 일반적인 히스토그램의 분포를 가지며, 센서 출력이 큰 영역에서 N 이 일정값 이상 분포하므로 해당 시험편에 비교적 큰 결함이 소수 내재되어 있음을 알 수 있다.

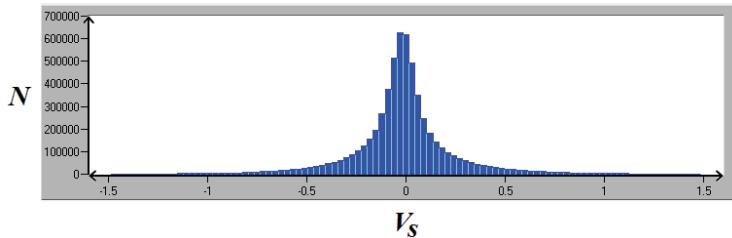


Fig. 4-14 2차 자기영상의 히스토그램 분석

한편, 센서 출력이 낮은 영역에서 N 이 클 경우에는 결함의 길이 방향이 센서 스캔 방향과 좁은 각도를 가지고 분포하고 있음을 의미할 수도 있으므로 주의해야 한다. 또한 결함신호 히스토그램의 횡축의 센서 출력의 최대값을 V_M 으로 지정하고, 1차 자기영상의 스펙트럼 분석에서의 잡음의 세기(V_N)와의 $1/2$, $1/6$, $1/10$ 에 해당하는 값을 결함 정보의 한계 (V_C)로 지정하였다.

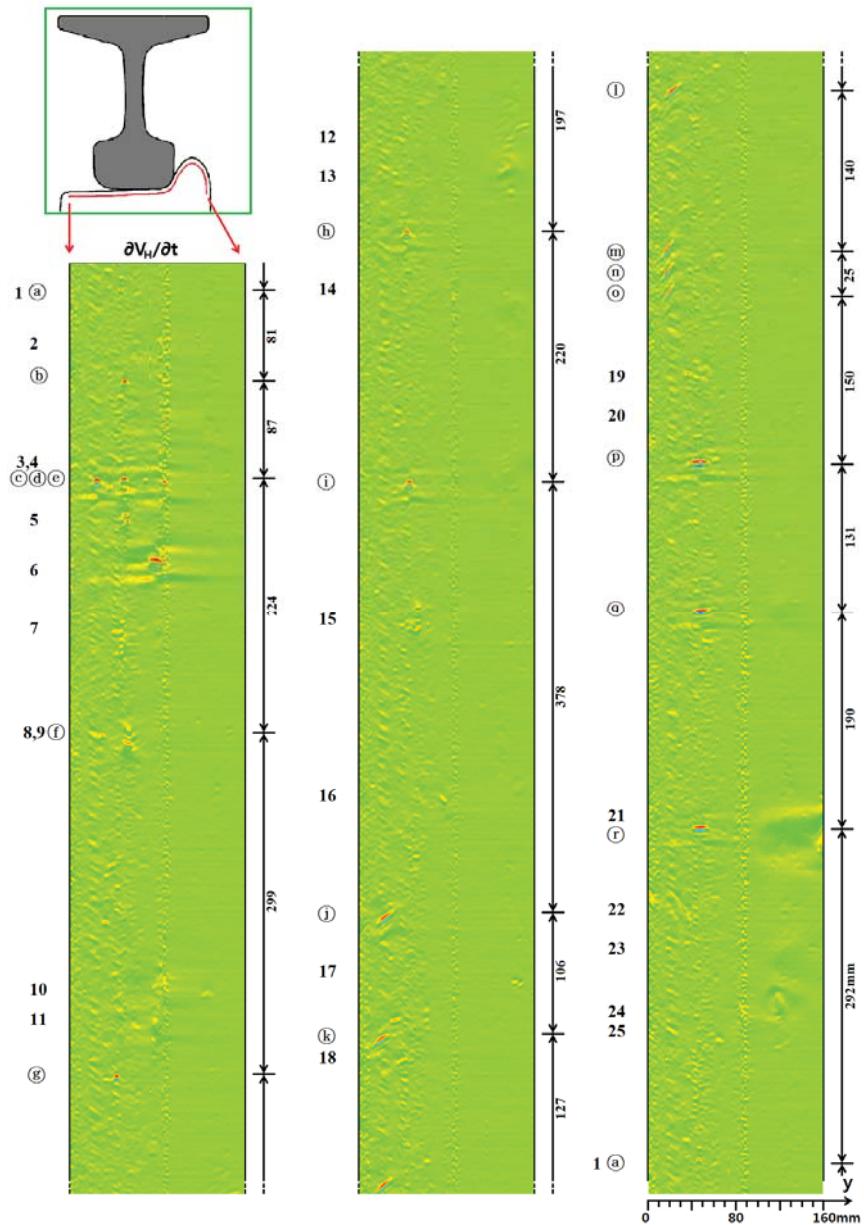


Fig. 4-15 2차 자기영상

3. 3차 자기영상 취득 및 평가

3차 자기영상은 2차 자기영상에서 결함 정보의 한계(V_C)보다 큰 센서 출력만을 출력하게 된다. 상기 결합신호 히스토그램의 횡축의 최대값(V_M)과 1차 자기영상의 잡음의 세기(V_N)의 $1/2$, $1/6$, $1/10$ 에 해당하는 값을 자동으로 2차 자기영상의 결합정보 한계 V_C 로 지정하여 각각 Fig. 4-16, 17, 18에 출력 하였다. 결함의 평가는 V_C 가 V_M 과 V_N 의 $1/6$ 해당하는 값으로 설정된 3차 자기영상을 이용하였다.

Fig. 4-2의 ⑧~⑪은 인공 결합으로, 원형결합은 오목마모(concave wear)와 박리(Disintegration)를, 자화방향에 45° 기울어진 사선형 결합은 Head check와 Shelling결합을, 자화방향에 수직인 축방향 결합은 열(thermal crack)결합을 각각 모사하였다.

3차 자기영상으로부터 인공 결합인 Fig. 4-17의 원형 결합 (⑧~⑪), 사선형 결합 (⑫~⑯), 축방향 결합 (⑰~⑲)을 모두 검출할 수 있었다. 원형 결합은 최소 직경 2mm, 깊이 1mm의 결합까지 검출할 수 있었으며, 자연 균열의 경우에는 이보다 작은 결합도 검출할 수 있다. 또한, 사선형 결합도 모두 검출 할 수 있었으며, 특히 ⑮~⑯는 다중 결합의 형태를 보이며, 센서간 간격은 19mm 정도이다. 축방향 결합은 전체적인 자기영상으로부터 결합의 폭 및 길이를 추정할 수 있었다.

한편, 자연결합의 경우에는 육안으로 관찰할 수 있었던 2~8, 10, 15~19, 21, 22, 24 결합뿐 아니라, 육안으로 관찰할 수 없었던 전 구간의 결합이 탐상 가능하였다. 또한, 마모가 심하여 레일과의 주 담면으로 추정되는 훨의 선단으로부터 60~80mm 근방에는 Shelling 직전의 결합으로 추정되는 작은 결합 정보가 많이 나타나고 있음을 알 수 있다.

자연 결합의 18, 19번 결합은 접촉진동 피로에 의해 피로 균열(열균열, 열경화균열)이 주행 중의 응력에 따라 진전하여 인접한 균열에 겹쳐진 부분이 조개껍질 모양으로 탈락 또는 분리되는 쉘링(Shelling) 결합으로 그 길이가 길고 가늘다. 때문에 결합의 길이 방향과 자화 방향이 평행하게 되어 누설 자속은 작아지고 $\partial V_H / \partial x$ 값이 작아 결합위치가 확인하지 않다.

22번 결합은 과다한 제동력이 작용하면서 차륜이 레일 위를 활주한 결과 발생

하는 쟈상(Flat)으로 결함면이 넓고 깊이가 깊지 않다. 이것 또한 누설 자속량이 작아 결합위치가 확인하지 않다.

7, 10, 11, 25번 결함은 구름 접촉과 운행하중에 의한 피로에 의해 담면 일부에서 발생된 박편이 탈락되는 박리결함의 초기 단계로 판단되며, 크기가 크지 않아 결합의 위치가 확인히 나타나지 않는다.

2, 3, 6, 16, 24번 결함은 차륜 담면 중앙부가 오목한 형상으로 마치 불규칙하게 뜯겨진 듯한 모양으로 크게 마모되는 오목마모의 결합형태를 띠고, 결합의 깊이가 1.2mm 정도로 깊어 누설자속이 크게 발생하여 결합의 위치를 확인히 알 수 있다.

5, 8, 15번 결함은 셀링결함이 성장한 형태로, 누설자속의 발생이 커 결합의 위치를 알 수 있었다. 4, 17, 21번 결함은 플랜지 부분의 결함으로 차륜 시험편 제작 중 부주의로 인해 발생 된 결함이다.

또한 플랜지 부분의 1, 9, 12, 13, 14, 20, 23번 결함은 결합의 크기가 매우 작거나, 플랜지에 부착된 불순물을 오인하여 자연결함으로 판단한 경우로 결합 데이터를 검출 할 수 없다. 결과적으로 모든 결함에서 결합의 단면형상이 일정하지 않아 lift-off가 $\pm 0.35\text{mm}$ 로 균일하지 않았음에도 불구하고 결합의 위치뿐만 아니라 대략적인 결합의 형태도 추정해 낼 수 있다. 육안으로 확인 가능하나 그 길이와 형태를 결정짓지 못한 결함과 육안으로 확인 불가능한 결함도 탐상 하였다. 예를 들어 자연 결함 14번과 인공 결함① 사이의 작은 두개의 결함은 육안 탐상이 불가능 하다. 하지만, 결합의 체적과 크기가 ①결합보다 작고, 또한 그 위치가 14번과 ①번 사이에 있음을 유추해 낼 수 있다.

따라서, 본 연구에서 제시하는 방법에 의하여, 결합이 발생하기 전단계에서 훨의 전전성을 모니터링할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 숙련된 검사자 뿐만 아니라 초급 검사자들도 결합의 위치 및 형태를 쉽게 알 수 있으며, 인공 결합뿐만 아니라 자연결함을 대부분 탐상 할 수 있다. 또한, 결합정보 한계 V_c 값을 변화 시켜 가며 작은 결합이 생성하여 전전하는 과정 및 주변의 작은 결합이 생성하는 과정을 알 수 있다.

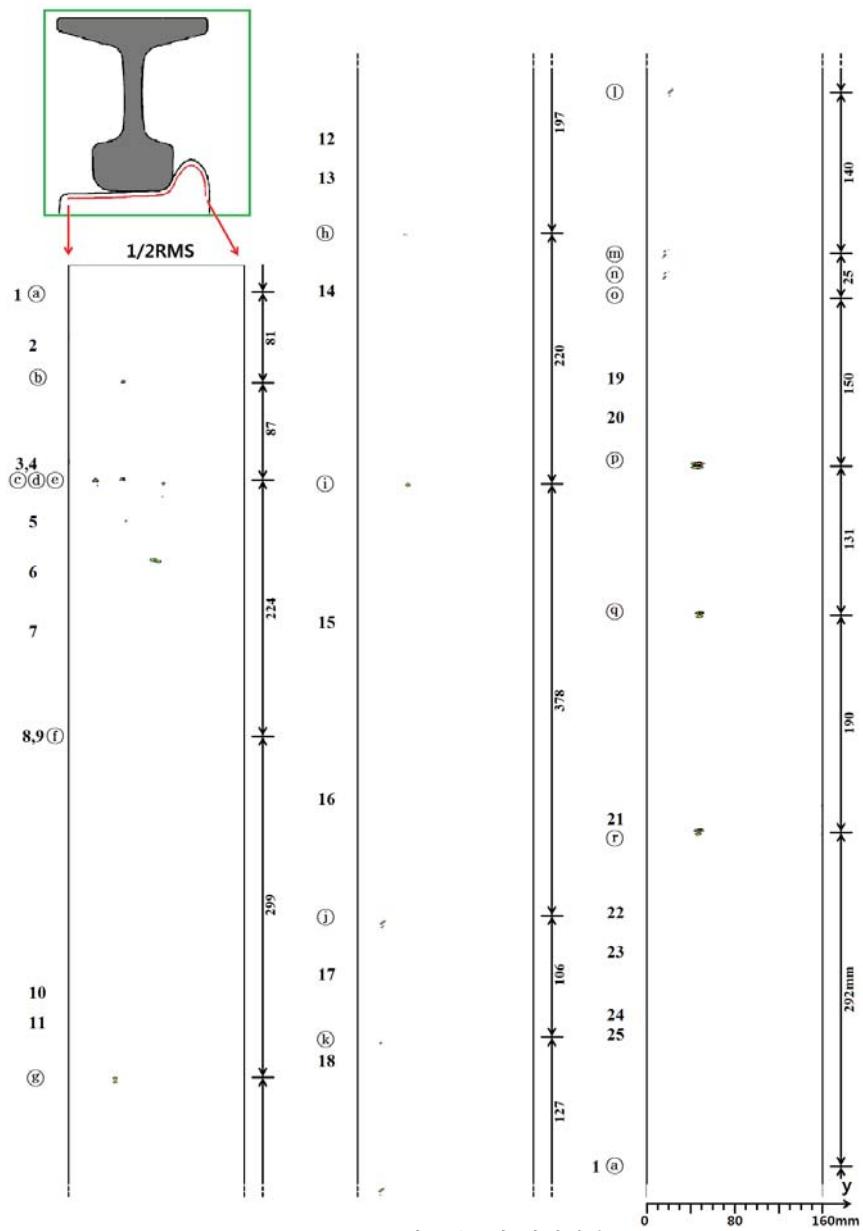


Fig. 4-16 Vc가 2인 3차 자기영상

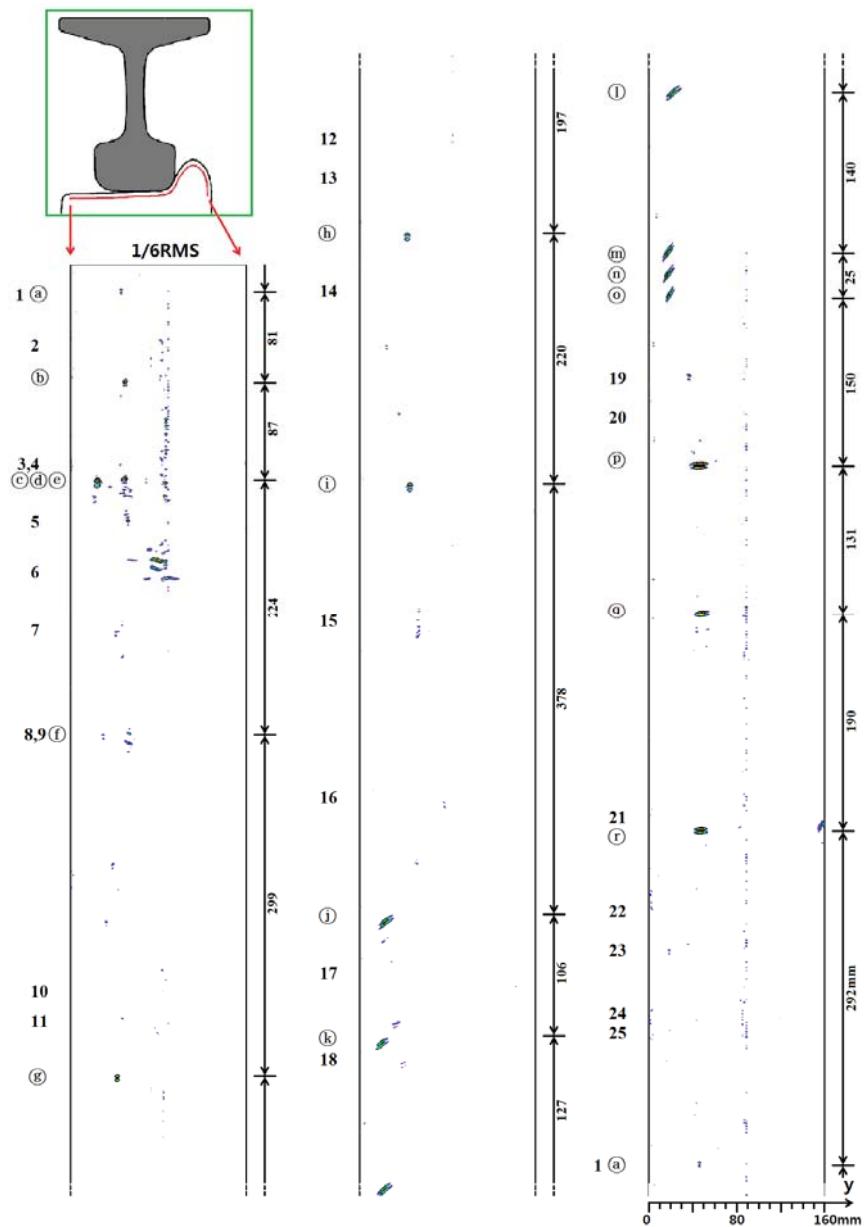


Fig. 4-17 Vc가 6인 3차 자기영상

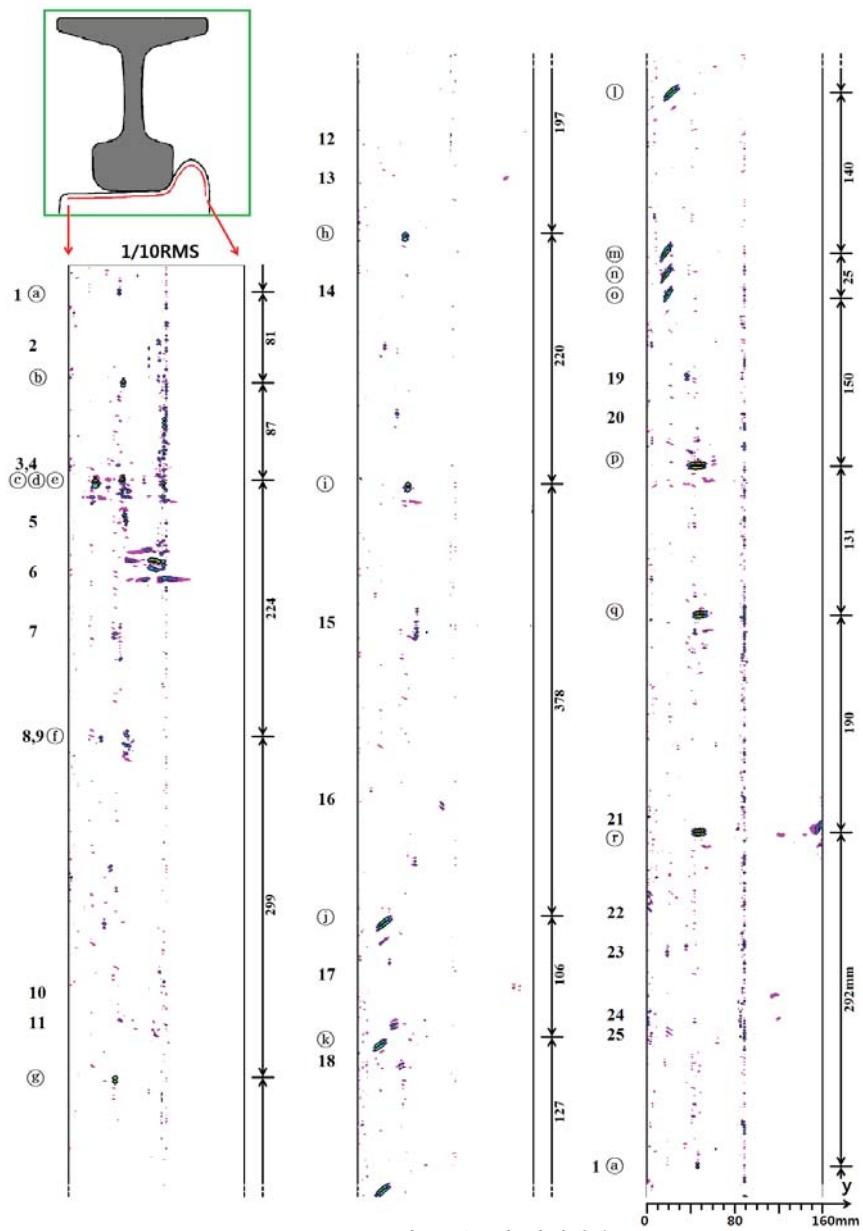


Fig. 4-18 Vc가 10인 3차 자기영상

가. 결합의 좌표, 길이, 형상, 방향 추정

스캔형 자기카메라의 자기영상의 결합 크기 한계(V_C)를 4, 6, 8, 10으로 설정하여 지능형 결합 평가 알고리즘에 의해 3차 자기영상을 얻었다. 알고리즘은 먼저 3차 자기영상의 결합 좌표군에서 검사자가 탐상하고자 하는 결합의 크기 1.56mm(센서의 공간 분해능의 2배)에 해당하는 거리 내에서 결합신호가 존재하면 동일한 결합으로 인정하고 연결한다. 이러한 작업에 의하여 연결된 결합 신호군에 의하여 각각의 결합이 추출된다.

본 연구의 평가에서는 이러한 과정으로 얻어진 3차 자기영상의 차륜의 회전방향(스캔방향)을 x방향, 차륜의 차축방향을 y방향으로 가정하여, 인공결합과 자연결합의 탐상실험 결과를 실제 측정데이터와 비교하여 결합의 좌표, 길이, 형상, 각도를 각각 Table 4-3, 4, 5, 6에 나타냈다. 실제 측정 데이터와 비교에서 자연결합 1, 4, 9, 12, 13, 14, 20, 23번의 결합 데이터를 얻지 못하였다. 이 결합들은 모두 철도 차륜의 플랜지부분의 위치한다. 센서헤드 근접 기구물에 의해 철도 차륜의 플랜지와 담면부에 최대한 근접시켰으나 사용된 차륜 시험편의 동심도가 일정하지 않아 플랜지부분이 담면부 보다 약 +2mm정도의 lift-off를 더 갖는다. 때문에 플랜지부분의 결합에 의한 누설자속이 약화되어 결합의 자기영상 데이터를 얻을 수 없었다. 따라서 해당 결합은 본 연구의 좌표, 길이, 형상, 방향, 체적의 추정에서 제외 하였다.

(1) 결합의 좌표 추정

결합의 좌표는 결합 생성 원리에 의해 도출한 동일 결합 신호군의 각 결합의 x좌표의 평균과 y좌표의 평균을 결합의 중심으로 추정하였다. Fig. 4-2에 따라 x좌표는 인공결합 ②를 기준으로 y방향은 차륜 담면의 가장자리를 기준으로 하였다. Table 4-3의 결합의 각각의 좌표를 살펴 보면 자연결합 2, 7, 10, 15, 22, 25번에서 실제 측정데이터와 실험데이터는 오차를 보였다. 2, 10, 15번 결합은 결합의 형태가 Shelling 결합으로 결합의 x축방향인 차륜의 회전방향으로의 길이가 길다. 이 결합들은 작은 Shelling 결합이 연속적으로 연결된 형태로써 결합에 의해 누설 되는 자속이 이러한 작은 Shelling 결합의 사이에서 서로 상쇄작용을 일으킨다. 이러한 영향으로 결합의 연속성을 저해하게 되고 자기 영상에 분리된 결함으로 추정되었을 것으로 판단된다. 결과적으로 2번 결합은 6mm, 10번 결합은 24mm, 15번 결합은 y축 방향으로 3.86mm의 오차가 발생하였다. 7, 22번 결합은 Thermal crack으로 차축방향인 y축 방향으로 길이가 긴 형태이다. 차축 방향의 결합의 깊이가 일정하지 않게 연결되어 결합에 의해 누설 되는 자속이 결합의 깊이에 따라 차이를 갖게 되었을 것으로 판단된다. 결합은 각각 6.66mm, 4.96mm의 오차가 발생 하였다. 25번 결합은 Scratch로써 그 형태와 좌표 추출시 인적 오류가 포함되어 y축방향으로 9.33mm의 오차가 발생한 것으로 판단된다. 결과적으로 V_C 와 관계없이 오차를 보인 자연결함을 포함하여 x좌표는 99.01%, y좌표는 96.74%의 유사성을 보였다. 비교적 실제위치와 유사한 결과를 얻을 수 있어 결합의 위치 판정에 매우 유용할 것으로 판단된다.

Table 4-3 결합의 좌표 평가 [unit: mm]

No.	X 좌 표			Y 좌 표		
	실체	추정		실체	추정	
		V _C = 6	V _C = 8	V _C = 10	V _C = 6	V _C = 8
(a)	0	0.00	0.00	0.00	45	45.24
1	6	*	*	*	133	*
2	50	43.81	43.90	43.81	80	80.73
(b)	81	80.12	80.16	80.16	49	48.36
3	145	146.12	145.52	146.08	80	82.68
4	146	*	*	*	136	*
(c)	168	167.19	167.19	167.28	25	24.57
(d)	168	165.09	165.13	165.13	48	47.58
(e)	168	165.43	165.43	165.39	67	67.47
5	198	195.99	195.60	195.86	49	49.53
6	243	238.00	237.96	238.34	76	78.39
7	307	299.97	299.92	299.79	48	41.34
(f)	392	389.70	389.70	389.70	29	29.25
8	396	394.85	394.76	394.85	52	51.87
9	394	*	*	*	143	*
10	617	592.94	592.64	592.77	83	81.90
11	646	645.46	645.51	645.55	77	77.22
(g)	691	686.45	686.40	686.45	41	41.34
12	706	*	*	*	143	*
13	861	*	*	*	133	*
(h)	888	882.05	882.00	882.00	43	42.51
14	943	*	*	*	135	*
(i)	1108	1100.13	1100.13	1100.13	44	44.07
15	1226	1227.33	1227.37	1226.17	53	49.14
16	1388	1377.74	1377.36	1377.14	73	75.27
(j)	1486	1480.05	1480.05	1479.83	24	23.40
17	1538	1535.28	1536.01	1536.35	138	137.25
(k)	1592	1586.26	1586.30	1586.22	21	19.89
18	1604	1604.20	1604.24	1604.16	38	39.00
(l)	1719	1713.59	1713.41	1713.16	22	22.62
(m)	1859	1852.02	1852.07	1851.90	18	17.16
(n)	1871	1870.82	1870.69	1870.65	18	17.55
(o)	1884	1888.93	1888.80	1888.76	19	19.11
19	1947	1960.60	1960.60	1960.60	35	35.88
20	1987	*	*	*	133	*
(p)	2034	2037.84	2037.88	2037.84	45	44.85
(q)	2165	2167.78	2167.74	2167.70	48	47.58
21	2360	2354.20	2354.33	2354.16	136	147.48
(r)	2355	2357.29	2357.25	2357.25	47	46.80
22	2453	*	*	2456.94	58	*
23	2465	*	*	*	119	*
24	2520	2521.82	2521.56	2521.43	83	84.63
25	2555	*	2545.04	2545.29	30	*

* 검출 실폐를 나타냄

(2) 결합의 형상 추정

결합의 형상은 지능형 결합 평가 알고리즘에 의해 결합에 내접하는 가상의 직사각형의 양변의 길이비를 비교한다. 결합의 중심을 지나는 임의의 선을 기준으로 대칭인 위치의 상하 좌우의 자기영상 값을 비교하였을 때, 그 차이가 일정값 이상 혹은 이하에 따라 결합의 형상을 추정한다. 이러한 인공 결합과 자연결합 탐색 실험결과를 실제 측정 데이터와 비교하여 Table 4-4에 나타낸다.

알고리즘에 의한 데이터 중 길이의 비가 0.3 미만인 경우 자화방향에 평행한 결합으로 추정되며, 길이의 비가 0.3 이상이고 1.8 미만인 경우 원형, 사선형, 자화방향에 평행이나 수직인 결합으로 추정되고, 길이의 비가 1.8 이상인 경우는 자화방향에 수직인 결합으로 추정된다. 이렇게 길이의 비에 따라 예비 형상이 추정되며, 추정된 자기영상의 상하 대칭 위치의 절대값을 비교하고, 좌우의 자기영상값을 비교하여 결합을 확정한다. 비교에 사용된 값은 1.7로 설정하였다. 예를 들어 길이의 비가 2.16인 ⑨의 결합 경우는 먼저 길이의 비에 따라 자화방향에 수직인 결합으로 예비 추정되고, 다음으로 상하와 좌우 비교 값이 각각 1.52, 0.23으로 설정된 1.7보다 작으므로 결과적으로 자화방향에 수직인 결합으로 판정된다. 반면에 길이의 비가 2.51인 24번의 결합은 길이의 비에 따라 자화방향에 수직인 결합으로 예비 추정되지만, 상하 좌우의 비교 값이 1.7보다 커 자화방향에 수직하고 슬릿한 결합으로 판정된다. 이와 같이 결합의 예비 형상 추정 후 상하 좌우의 값을 비교하여 결합의 형상이 판정되었다.

$V_C=8$ 인 경우 ⑩, ⑪, ⑫, 24번은 자화방향에 수직한 결합으로 예비 추정되고, 나머지 모든 결합은 원형이나 사선형이나 자화방향에 평행 혹은 수직한 결합으로 예비 추정된다. 자기영상의 상하 좌우의 비교를 통해 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, 16, 18번은 사선형 결합으로 ⑩, ⑪, ⑫는 자화방향에 수평한 결합으로 2, 5, 11, 15, 21번은 자화방향에 평행하고 슬릿한 결합으로 3, 6, 8, 10, 17, 24, 25번은 자화방향에

수직하고 슬릿한 결함으로 추정되었다. 인공결함 ⑥의 경우는 인접한 자연결함에 의해 누설자속이 상호 간섭을 일으킨 것으로 원형결함으로 추정하지 못하였다. 결과적으로 인공결함은 ⑥번 결함을 제외하고 모든 결함을 정확히 추정하였고, 자연결함에 대해서는 자화 방향에 대한 결함의 형태를 추정하여 결함의 형태 평가에 알고리즘이 매우 유용함을 알 수 있다. 비교값과 길이의 비의 설정에 따라 결함의 형상의 판정에 많은 차이를 보인다. 알고리즘의 보완을 통해 더욱 향상된 결함의 형상을 추정할 수 있을 것이다.

Table 4-4 결합의 형상 평가 [unit: mm]

No.	실체	형상				
		추정				
		$V_C = 4$	$V_C = 6$	$V_C = 8$	$V_C = 10$	$V_C = 8$ 의 추정
(a)	Hole	0.32	0.29	0.55	0.55	원형
(b)	Hole	0.39	0.47	0.44	0.66	원형
(c)	Hole	0.72	0.76	0.83	0.83	원형
(d)	Hole	0.78	0.70	0.66	1.00	원형
(e)	Hole	4.54	0.52	0.62	0.45	평행한 결합
(f)	Hole	0.17	0.44	0.54	0.68	원형
(g)	Hole	0.52	0.48	0.47	0.70	원형
(h)	Hole	0.52	0.66	0.63	0.63	원형
(i)	Hole	0.58	0.63	0.79	1.14	원형
(j)	Slit	1.01	1.02	0.96	1.07	사선형
(k)	Slit	0.96	1.06	1.08	1.08	사선형
(l)	Slit	1.00	1.00	0.96	0.92	사선형
(m)	Slit	0.61	0.64	0.66	0.65	사선형
(n)	Slit	0.54	0.62	0.64	0.68	사선형
(o)	Slit	0.55	0.50	0.53	0.53	사선형
(p)	Slit	2.33	2.27	2.22	2.45	수직한 결합
(q)	Slit	2.11	2.15	2.16	2.02	수직한 결합
(r)	Slit	2.00	1.96	2.03	2.03	수직한 결합
1	Scratch	*	*	*	*	*
2	Shelling	0.79	0.81	0.70	0.72	평행 슬릿한결합
3	Shelling	0.99	1.35	1.02	1.41	수직 슬릿한결합
4	Scratch	*	*	*	*	*
5	Thermal crack	0.53	0.33	0.53	0.45	평행 슬릿한결합
6	Disintegration	1.25	1.19	1.34	1.27	수직 슬릿한결합
7	Thermal crack	1.14	0.87	1.45	1.39	원형
8	Thermal crack	1.82	1.78	1.60	1.65	수직 슬릿한결합
9	Scratch	*	*	*	*	*
10	Shelling	2.02	1.01	1.09	0.81	수직 슬릿한결합
11	Shelling	*	0.63	0.73	0.86	평행 슬릿한결합
12	Scratch	*	*	*	*	*
13	Scratch	*	*	*	*	*
14	Scratch	*	*	*	*	*
15	Shelling	0.22	0.82	0.80	0.72	평행 슬릿한결합
16	Shelling	1.01	0.60	0.61	0.57	사선형
17	Chop	*	1.51	1.01	1.16	수직 슬릿한결합
18	The early Shelling	*	0.81	1.37	1.37	사선형
19	The early Shelling	0.43	0.50	0.71	0.71	원형
20	Chop	*	*	*	*	*
21	Scratch	0.49	0.58	1.08	0.74	평행 슬릿한결합
22	Thermal crack	*	*	*	1.40	원형
23	Protuberance	*	*	*	*	*
24	Shelling	*	3.18	2.51	2.84	수직 슬릿한결합
25	Scratch	*	*	1.51	1.67	수직 슬릿한결합

* 검출 실패를 나타냄

(3) 결합의 길이 추정

결합의 길이는 추정된 결합의 형상을 기준으로 도출된 결합 신호군 내에서 결합의 중심으로부터 가장 먼 2곳의 결합 좌표에 내접하는 가상의 직사각형의 사선 방향 꼭지점으로부터 추정하였다. 알고리즘에 의해 획득된 각각의 길이를 Table 4-5에 나타낸다.

인공결합의 사선형 결합(①~⑥)과 자화방향에 수직한 결합(⑨~⑩)의 경우는 상당히 유사한 결과를 나타냈다. 반면에 원형 결합(ⓐ~ⓘ)의 경우 실제 결합의 길이 보다 최대 2.8배 큰 값을 나타냈다. 지능형 알고리즘은 $\partial V_H / \partial x$ 의 데이터를 처리하여 적용된다. 사선형 결합이나 비대칭인 자화방향에 수평·수직하고 슬릿한 결합의 경우에는 결합의 중심으로부터 가장 먼 2곳의 결합 좌표에 내접하는 가상의 직사각형의 사선 방향 꼭지점으로부터 추정된다. 하지만 원형 결합의 경우, 결합의 중심을 기준으로 자화방향과 가장 가까운 쪽과 가장 먼쪽의 결합의 가장자리에서 누설 자속이 발생한다. 누설 자속은 x방향으로 사인곡선의 한 주기처럼 양의 값과 음의 값을 갖게 된다. 이때 양의 값과 음의 값은 각각 결합의 길이와 깊이에 선형적으로 따라 분포하게 된다. 또한 y방향의 누설자속 분포는 결합의 직경과 거의 유사하게 된다. 이와 마찬가지로 자화방향에 수평·수직한 결합의 경우도 나타나지만 수직한 결합은 폭이 매우 좁기 때문에 양의 값과 음의 값의 변화가 매우 급격하게 나타나게 되고, 수평한 결합은 결합의 폭이 매우 넓게 되어 원형 결합과 같이 넓게 분포하게 되며, y방향의 누설자속 분포는 결합의 길이와 유사하게 된다. 다시 말해 원형 결합으로 추정된 Ⓩ결합의 경우 결합에 내접하는 가상의 직사각형의 한변은 1.56mm이며, 다른 한변은 5.41mm로써 결합의 직경은 1.56mm로 추정되며, 자화방향에 수직한 결합인 ⓐ결합은 가상의 직사각형의 각변이 14.04mm, 6.52mm이며 결합의 직경은 14.04mm로 추정된다. 따라서 원형 결합과 자화방향에 수직한 결합에 대해서는 y방향의 누설자속 분포를 결합의 길이로 추정하였다.

Table 4-5의 결합의 추정 길이부분의 괄호 부분에 수정 환산된 길이를 포함하였

다. 이를 포함한 추정데이터를 실제 길이와 비교 하였을때 $V_C=4$ 일 때 원형 결함의 경우 81.04%, 사선형 결함의 경우 91.85%, 구형 결함의 경우에는 $V_C=10$ 일 때 87.09%의 유사성을 보였다. 자연 결함의 경우 $V_C=6$ 일 때 61.67%, $V_C=8$ 일 때 62.04%의 유사성을 보였다.

Table 4-5 결합의 길이 평가 [unit: mm]

No.	실제	길이			
		추정			
		$V_C = 4$	$V_C = 6$	$V_C = 8$	$V_C = 10$
(a)	1.84	5.13 (1.56)	5.63 (1.56)	6.47 (3.12)	6.47 (3.12)
(b)	2.97	6.45 (2.34)	7.39 (3.12)	7.70 (3.12)	8.45 (4.68)
(c)	4.93	10.68 (6.24)	11.56 (7.02)	12.25 (7.80)	12.25 (7.80)
(d)	3.92	7.62 (4.68)	8.17 (4.68)	8.45 (4.68)	9.94 (7.02)
(e)	2.86	1.60 (1.56)	5.04 (2.34)	5.95 (3.12)	5.66 (2.34)
(f)	1.97	4.62 (0.78)	5.81 (2.34)	6.54 (3.12)	6.95 (3.90)
(g)	2.98	6.77 (3.12)	7.15 (3.12)	7.31 (3.12)	8.17 (4.68)
(h)	3.96	8.50 (3.90)	9.96 (5.46)	10.24 (5.46)	10.24 (5.46)
(i)	4.56	9.33 (4.68)	10.24 (5.46)	11.36 (7.02)	13.51 (10.14)
(j)	20.83	16.47	19.64	20.31	21.36
(k)	17.03	13.54	16.11	17.03	17.03
(l)	19.60	17.69	19.88	20.31	20.69
(m)	19.77	17.99	20.20	21.20	21.49
(n)	18.50	16.32	19.35	20.34	20.84
(o)	17.26	14.66	15.73	16.54	16.62
(p)	19.04	16.98 (15.60)	17.90 (16.38)	17.97 (16.38)	20.22 (18.72)
(q)	17.70	13.81 (12.48)	15.48 (14.04)	16.33 (14.82)	15.67 (14.04)
(r)	16.27	13.07 (11.70)	14.00 (12.48)	14.78 (13.26)	14.78 (13.26)
1	11.20	*	*	*	*
2	4.48	5.03	6.19	6.81	6.67
3	4.61	5.55	7.77	8.72	8.61
4	4.00	*	*	*	*
5	8.74	8.27	17.36	20.01	18.85
6	15.24	18.97	19.35	21.40	21.87
7	3.33	1.04 (0.78)	7.15 (4.68)	10.43 (8.58)	10.57 (8.58)
8	6.46	6.23	8.05	8.27	9.12
9	5.90	*	*	*	*
10	6.25	1.74	4.39	6.35	4.96
11	12.37	*	8.74	10.61	10.76
12	10.40	*	*	*	*
13	8.30	*	*	*	*
14	1.40	*	*	*	*
15	8.47	10.81	14.76	15.03	17.42
16	7.96	1.10	7.60	9.03	9.40
17	10.68	*	6.69	9.16	9.84
18	5.95	*	7.41	10.62	10.62
19	5.01	5.89 (2.34)	6.92 (3.12)	8.10 (4.68)	8.10 (4.68)
20	3.40	*	*	*	*
21	25.86	10.60	14.87	22.78	17.12
22	4.74	*	*	*	1.92 (1.56)
23	27.30	*	*	*	*
24	6.12	*	5.72	6.72	8.27
25	46.40	*	*	2.80	6.36

*: 검출 실패를 나타냄
 (): 수정 환산된 길이를 나타냄

(4) 결합의 방향 추정

결합의 방향은 추정된 결합의 형상을 기준으로 도출된 결합의 길이 방향과 자화방향이 이루는 각도로 결합의 방향을 추정한다. 알고리즘에 의해 획득된 각각의 방향을 Table 4-6에 나타낸다. 상술한 길이 추정에서와 같이 사선형 결함이나 비대칭인 자화방향에 수평·수직하고 슬릿한 결함의 경우에는 결합의 길이 방향과 자화방향이 이루는 각도로 결합의 방향을 추정하며, 원형 결함과 자화방향에 수직한 결함의 경우에는 y방향의 결합의 길이, 자화방향에 수평한 결함의 경우에는 x방향의 결합의 길이가 자화방향과 이루는 각도로 방향을 추정하였다. 결합 형상 추정에서와 같이 상하 좌우의 값을 비교하여 자화 방향에 시계방향으로 기울어진 결함은 양의 각도, 반시계방향으로 기울어진 결함은 음의 각도로 표현하였다. 원형 결함인 ①, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, 7, 19, 22번의 경우에는 방향을 표시하지 않으며, 수평 결함으로 추출된 ⑩는 0° 로 추정되었다. 수직인 결함인 ⑪, ⑫, ⑬의 경우에는 90° 로 추정되었으며, 나머지 결함은 기울어진 결함에 대해서는 비교적 유사한 결과를 나타낸다. 하지만 자화 방향과 이루는 각이 다른 경우인 15, 17, 24번의 결함은 결함에 내접하는 가상의 직사각형의 양변의 길이비에 차이와 상하 좌우의 값의 비교에서 발생하는 것으로 판단된다.



(a) 자연결함 15번

(b) 자연결함 17번

(c) 자연결함 24번

Fig. 4-19 자연 결합의 방향 추정

Fig. 4-19에 나타낸 바와같이 15번 자연 결함은 실제 측정에서는 -28° 로 자화 방향에 대해 반시계방향으로 기울어진 결함이나 추정데이터에서는 왼쪽 하단의 큰

데이터의 분포에 의해 자화방향에 대해 시계방향으로 기울어진 각도를 추정하였다. 17번은 이와 반대의 경향을 보인다. 24번 측정데이터는 27° 로 자화방향에 대해 시계방향으로 기울어진 형태이나 추출데이터는 70° 로 이것은 검사자가 육안으로 검사한 각도의 오류로 판단된다.

Table 4-6 결합의 방향 평가 [unit: mm]

No.	실체	방향			
		추정			
		$V_C = 4$	$V_C = 6$	$V_C = 8$	$V_C = 10$
(a)	.	.	.	.	.
(b)	.	.	.	.	.
(c)	.	.	.	.	.
(d)	.	.	.	.	.
(e)	.	0°	0°	0°	0°
(f)	.	.	.	.	.
(g)	.	.	.	.	.
(h)	.	.	.	.	.
(i)	.	.	.	.	.
(j)	52°	45.28°	45.63°	43.73°	46.91°
(k)	55°	43.73°	46.58°	47.13°	47.13°
(l)	50°	44.88°	44.93°	43.73°	42.74°
(m)	35°	31.35°	32.72°	33.49°	32.99°
(n)	35°	28.55°	31.61°	32.46°	34.15°
(o)	30°	28.60°	26.51°	28.13°	27.99°
(p)	90°	90°	90°	90°	90°
(q)	90°	90°	90°	90°	90°
(r)	90°	90°	90°	90°	90°
1	-42°	※	※	※	※
2	-41°	-38.32°	-39.06°	-34.96°	-35.80°
3	-46°	-44.65°	-53.40°	-45.68°	-54.66°
4	-55°	※	※	※	※
5	31°	28.13°	18.33°	27.90°	24.44°
6	-56°	-51.37°	-49.98°	-53.31°	-51.68°
7	57°	.	.	.	.
8	-64°	-61.18°	-60.65°	-58.06°	-58.82°
9	90°	※	※	※	※
10	32°	63.66°	45.28°	47.48°	38.93°
11	-34°	※	-32.38°	-36.02°	-40.73°
12	62°	※	※	※	※
13	.	※	※	※	※
14	-56°	※	※	※	※
15	-28°	12.50°	39.35°	38.52°	35.60°
16	-35°	-45.28°	-30.88°	-31.21°	-29.85°
17	54°	※	-56.52°	-45.32°	-49.13°
18	69°	※	39.14°	53.86°	53.86°
19	-33°	.	.	.	.
20	-45°	※	※	※	※
21	12°	26.02°	30.02°	47.30°	36.68°
22	21°	※	※	※	.
23	90°	※	※	※	※
24	27°	※	72.55°	68.25°	70.60°
25	-56°	※	※	-56.57°	-59.15°

※ 검출 실패를 나타냄

나. 결합의 체적 추정

각 결합에서 누설 자속을 자화 방향으로 미분한 $\partial V_H / \partial x$ 의 최대값은 결합의 깊이와 최소값은 결합의 폭과 밀접한 관계가 있고, 뿐만 아니라 결합의 길이는 결합의 길이방향의 $\partial V_H / \partial x$ 값의 분포와 밀접한 관계가 있다. 결합의 길이방향으로 $\partial V_H / \partial x$ 를 결합평가 알고리즘에 의한 개수만큼 더해 얻어진 결과인 $\partial V_H / \partial x|_{total}$ 은 각각의 결합 신호군의 위치를 의미하는 직사각형의 영역안에 위치하는 센서 출력의 합(V_{TOTAL})을 나타내며, 이것은 결합의 체적(V_{CRACK})과 밀접한 연관을 가지고 있다. 레이저 미소변위 측정기를 이용하여 얻은 실제 결합의 체적(V_{Real} , Real Volume)과 제안된 지능형 손상평가 알고리즘을 이용한 스캔형 자기카메라의 탐상 결과에서 얻은 체적(V_{Calc} , Calculated Volume)을 도시 하였다. 인공 결합과 자연결합의 관계는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$V_{Calc} = C_1 \cdot \left(\frac{\partial V_H}{\partial x} \Big|_{total} \right)^{C_2} \quad (25)$$

여기에서 C_1 , C_2 는 상수로서, 시험편의 재질, lift-off, Hall 계수, Hall 입력전류 및 중폭비, 자화기의 특성 및 입력 전류등에 의하여 정해지며, 각각 1.48×10^{-12} , 2.91 으로 설정하였다.

박리결합의 초기 단계인 11, 10번은 결합 레이저 미소변위 측정영역을 넓게 선택되어 실제 체적이 크게 나타났으며, 6번의 오목결합은 차륜의 동심도의 영향으로 lift-off가 커져 누설되는 자기장이 작아져 계산된 체적이 작게 나타났다. 상술하였던 바와 같이 인접 결합에 의해 상쇄가 발생한 인공 결합인 ⑥번과 박편이 탈락되는 박리결합의 초기 단계인 7, 25번 자연 결합, 그리고 차륜이 레일 위를 활주한 결과 발생하는 찰상(Flat)결합인 22번 결합, 차륜의 회전방향으로 발생하는 쉘링(Shelling) 결합인 18번 결합은 결합에 의해 누설하는 자속량이 작아 체적 추정에서 작은 값을 나타냈으며, 차륜 담면 중앙부의 뜯겨진 모양의 오목마모 결합인 16, 24

번 결합, 플랜지 부분의 결합으로 차륜 시험편 제작 중 부주의로 인해 발생 된 결합인 17 결합은 알고리즘의 길이 평가의 오류로 인해 그 체적에 오류가 발생하였다.

인공결합의 Slit형 결합 중 자화방향에 45° 기울어진 결합은 인공 결합과 자연결합의 관계에 수렴되나 자화방향에 90° 인 결합은 실제 체적보다 계산된 체적이 더 크게 나타났다. 원형결합은 실제 체적에 수렴한 형태를 보인다. 결과적으로 알고리즘을 통한 계산된 체적은 실제 체적과 선형적인 관계를 갖고 있으며 정량 평가할 수 있다.

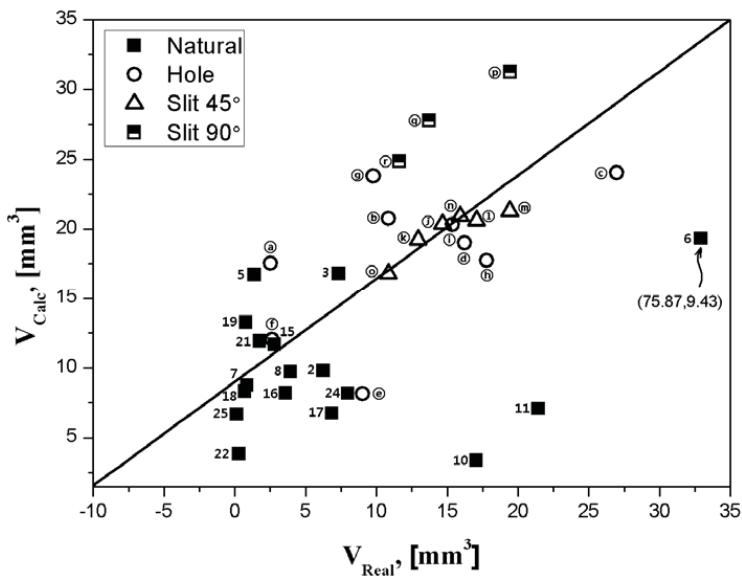


Fig. 4-20 실제 결합 체적과 제안된 알고리즘에 의한 체적과의 관계

4. 3차원 실감형 소프트웨어

3차원 형상으로 모델링 된 철도차륜 형상에 시작점과 끝점 및 특징점을 스캔 형 자기카메라에 의해 획득된 자기영상과 매핑하면 결합 정보를 실제 차륜 시험편 형상에 나타낼 수 있다.

Fig. 4-21은 3차원 실감형 소프트웨어의 실행 화면이며 다음과 같은 순서에 의해 매핑 작업이 이루어 진다. 먼저 Autocad, 3Dmax, catia와 같은 3차원 모델링 툴에 의해 피측정체를 모델링 한 *.obj 파일을 로드한다. 이후 일정한 스캔형 자기카메라에 의해 획득된 자기영상을 제안한 알고리즘에 의해 처리하고 *.bmp 파일로 각각 저장한다. 프로그램의 GUI(graphical user interface)를 이용하여 시작점과 끝점 및 특징점을 로드된 피측정체에 지정한다.

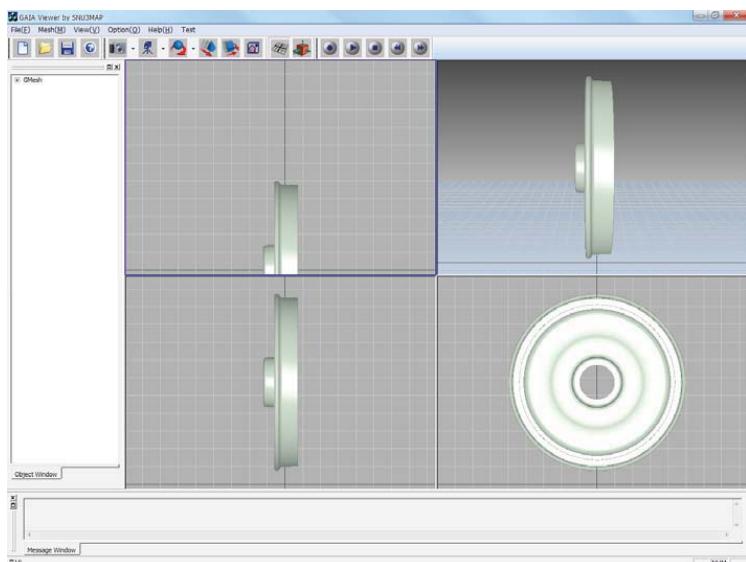


Fig. 4-21 실감형 소프트웨어

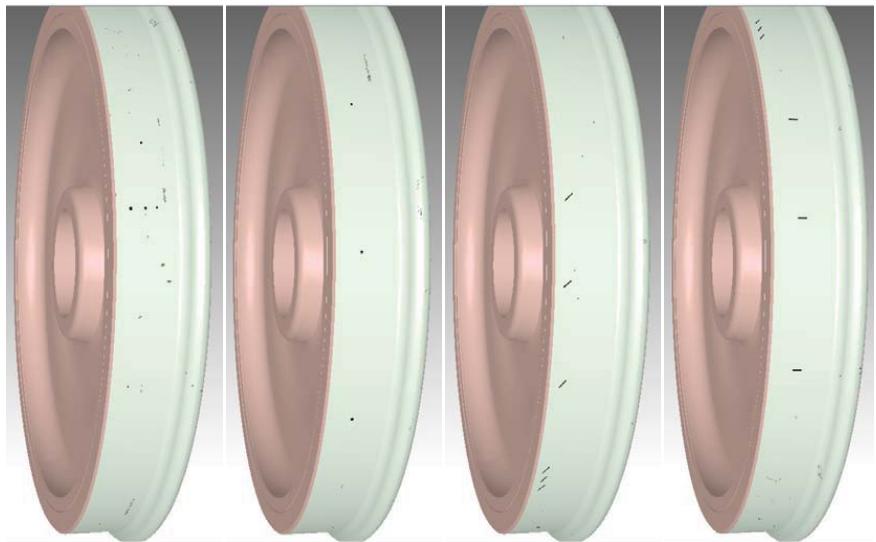


Fig. 4-22 결합의 텍스쳐 매핑 결과

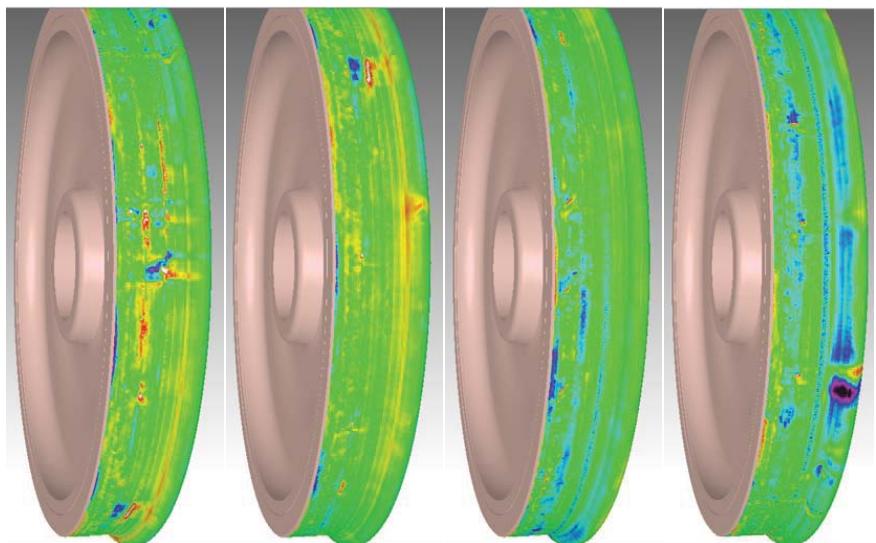


Fig. 4-23 1차 자기영상의 텍스쳐 매핑 결과

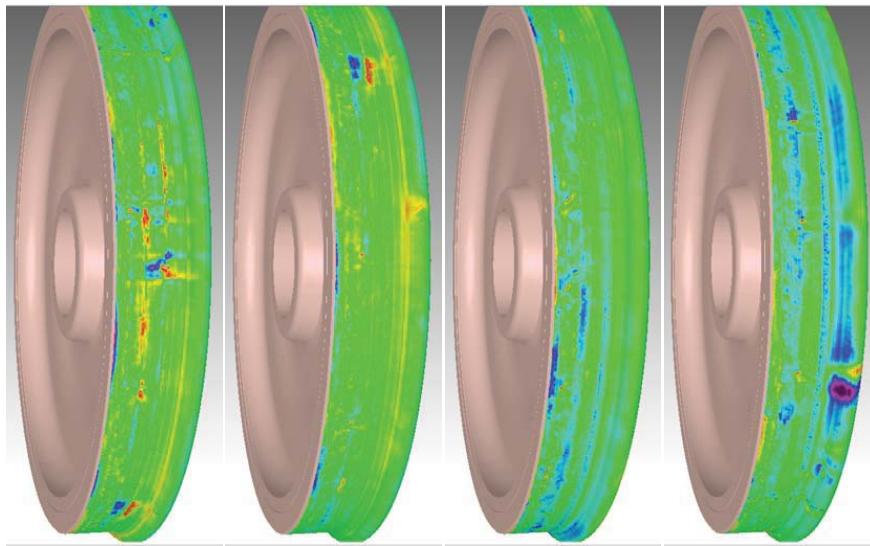


Fig. 4-24 필터링된 1차 자기영상의 텍스쳐 매핑 결과

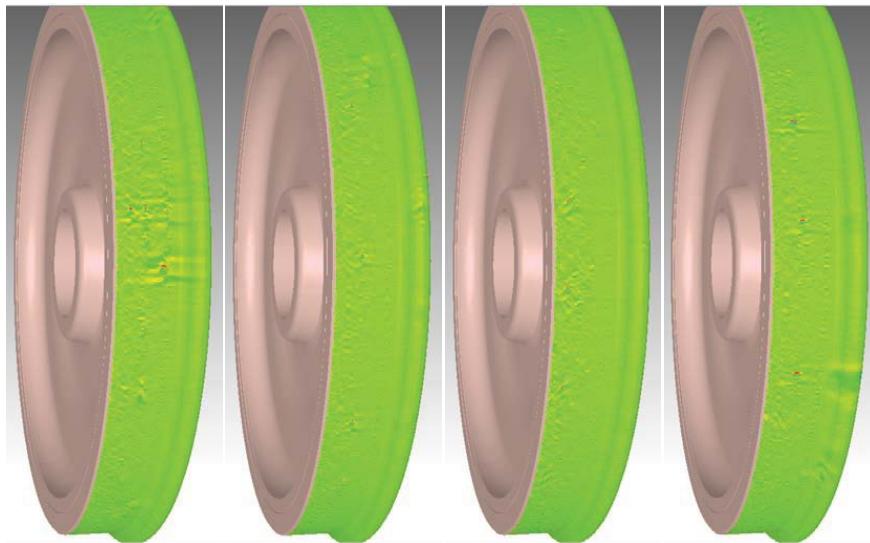


Fig. 4-25 2차 자기영상의 텍스쳐 매핑 결과

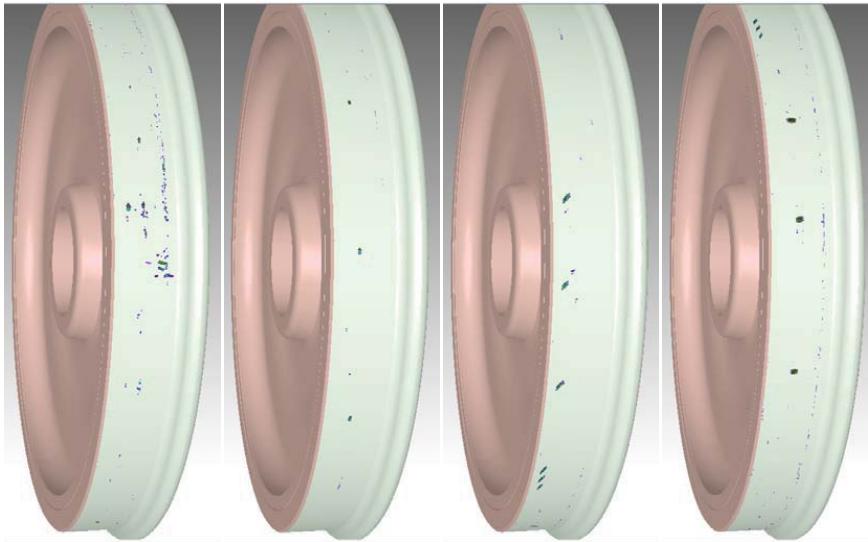


Fig. 4-26 3차 자기영상의 텍스쳐 매핑 결과

또한 매핑할 자기영상을 선택한 후 자기영상에도 동일하게 각각 점들을 지정한다. 프로그램은 자동으로 이러한 점들을 상술한 수식에 의한 선형적 비율로 연결지어 텍스쳐 매핑이 이루어 진다. 각각의 결과는 매핑된 결과를 90도씩 회전하면서 차륜의 전 구간에 대해 캡쳐하였다.

Fig. 4-22은 결함의 위치와 형상을 매핑한 결과이다. Fig. 4-23은 스캔형 자카메라의 1차 자기영상 (V_H)을 매핑한 결과이다. Fig. 4-24은 1차 자기영상(V_H)을 저대역 통과 필터링 한 결과를 매핑한 것이며, Fig. 4-25은 2차 자기영상 매핑 결과이다. Fig. 4-26은 결함정보한계를 6으로 하여 얻어진 3차 자기영상의 매핑결과이다. 결과적으로, 모든 매핑 결과는 3차원 실감형 그래픽스에 의해 철도 차륜의 결함의 위치 및 손상의 정도를 검사자가 쉽게 판정할 수 있게 해준다. 뿐만 아니라 현재의 3차원으로 모델링 된 철도 차륜에 2차원 자카메라 자기영상을 매핑하였지만 향후 매핑될 2차원 자기영상의 영상값(센서의 출력)을 3차원 모델링 하게 되면 보다 더욱 현실적인 표현이 가능할 것이다.

제 5장 결 론

저비용 고효율 교통수단으로 주목 받고 있는 철도는 여객 철도(승용차 대비 1/8) 및 화물 철도(화물차 대비 1/14) 모두 종래의 교통수단에 비하여 매우 적은 에너지 소비량을 보이고, 탄소배출에 있어서도 각각 1/6과 1/13 수준의 탄소를 배출하는 최적의 친환경 수단인 것이다. 또한 세계적으로 기후 변화에 따라 녹색성장이 새로운 가치로 대두되면서 교통 부문에서 녹색 성장을 주도할 기술로 손꼽히고 있다. 하지만, 수 천 톤 중량의 철도차량은 수백 km/h로 이동할 때 막대한 운동 에너지를 갖게 되며, 또한 많은 운행 시간과 급제동 등의 문제로 인해 차축, 차륜 및 레일에는 필연적으로 손상이 일어 나게 된다. 그럼에도 불구하고 철도차량을 정비 및 관리하는 정비창에 체류할 수 있는 시간은 2시간 이내로 한정 되어 있으므로, 고속 고정도 실시간 손상 계측기술의 도입이 절실하다.

본 연구에서는 이러한 많은 양의 높은 에너지와 고압 가스 및 연료등의 위험물을 보유하며, 운행 및 가동 조건이 열악하여 항상 안전 사고의 위험성에 노출되어 있으며, 미소한 결함 혹은 사용자 부주의 등의 문제로 손상을 입을 경우 막대한 인적·경제적 손실뿐만 아니라 환경 오염 등 국가적으로도 큰 문제를 일으킬 수 있는 철도를 포함한 항공기, 원자력·화력발전 등과 같은 대형기기 및 각종 구조물 등의 손상 계측 기술인 비파괴검사법(NDT) 중 금속 구조물의 표면 결함 혹은 표면 근방에 존재하는 결함을 검출하는데 유용한 자기카메라를 제안하였다. 특히, 철도 차량이 정비공장에 진입하는 속도인 시속 약 30km/h에 상당하는 속도로 회전하는 고속철도 차륜을 스캔형 자기카메라에 의해 검사하였다. 스캔형 자기카메라의 차륜 딥면 형상에 따라 조밀하게 배열된 고속용 센서 배열과 DC형 자속 발생장치를 자원으로 하는 고속 결함 탐상을 위한 자기카메라 요소 개발 하였으며, S/N가 높은 증폭 및 A/D변환을 거쳐 대용량 DMA에 저장하는 고속 신호 처리 회로의 개발 하였다. 또한, 작업자의 착오, 경험 미숙에서 오는 조작 과정의 실수 등과 같은 인적

오류를 최소화하기 위하여 결합의 검출 및 위치 파악, 결합 크기의 정량 평가 알고리즘을 제시하였고, 3차원으로 피측정체의 결합의 위치 및 손상의 정도를 표현하여 작업자의 손상 판정 이해도를 높이기 위한 3차원 실감형 그래픽스를 표현 하였다. 스캔형 자기카메라를 이용하여 철도 차륜 담면과 플랜지 부분의 결합 검출 및 정량 평가를 위한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 비파괴 검사법 중 전자기적 현상을 이용한 비파괴 검사법인 자분 탐상법, 누설 자속 탐상법, 와전류 탐상법등의 단점 및 제약을 해결하기 위하여 자기카메라를 제안했다. 자기카메라는 비접촉식으로 강자성체 구조물의 표면 혹은 표면 근방에 존재하는 결함을 검출하는데 유용한 방법이다.

자기카메라의 요소 기술인

(2) 자원은 시험편의 형상에 따라 자원의 형태가 변하더라도 자기장의 왜곡을 최소화하면서 자기장을 인가할 수 있으며, 철도 차륜과 같은 강자성체 구조물의 자화는 직류 자화법(DC-MFL)이 유용하였다.

(3) 센서는 Ni-Zn 페라이트 웨이퍼 위에 선형적으로 배열한 InSb 홀센서(LIHaS)를 PCB상에 배치하고 일반적인 Soldering이 아닌 볼본딩에 의해 실장함으로써 센서의 제조 발생하는 Packaging 과정 중의 뒤틀림이나 센서 응용시 발생하는 PCB면에 홀센서 실장시 기울어짐이나 높이 차이를 개선하기 할 수 있다. 또한 0.52mm의 공간 분해능을 실현 하였다.

(4) 중폭 및 신호처리부는 각각의 센서와 회로를 1:1로 대응하여 높은 S/N비 얻을 수 있으며, 신호 배선들의 간략화를 통해 외부 잡음 유입을 최소화 할 수 있었다.

(5) 자기카메라에 의해 획득된 결합 주위의 누설자속 분포를 자화방향으로 미분한 $\partial V_H / \partial x$ 를 이용하여 결합 정보를 추출 할 수 있었다. 또한 $\partial V_H / \partial x$ 의 최대값은 결합의 깊이와 최소값은 결합의 폭과 밀접한 관계가 있고, 뿐만 아니라 결합의 길이는 결합의 길이방향의 $\partial V_H / \partial x$ 값의 분포와 밀접한 관계가 있었다. 결합의 길이방

향으로 $\partial V_H / \partial x$ 결함평가 알고리즘에 의한 개수만큼 더해 얻어진 결과인 $\partial V_H / \partial x|_{\text{total}}$ 은 결함의 체적과 깊은 관계가 있었다.

(6) 작업자가 검출하고자 하는 결함의 최소 크기인 결함 정보의 한계(V_C)보다 큰 신호출력(V_S)은 수정없이 표현하나, V_C 보다 작은 신호출력은 ‘0’으로 표현하여, 현저히 데이터의 양을 줄일 수 있었다.

(7) 지능형 손상 평가 알고리즘을 통해 결함의 좌표, 길이, 형상, 방향 및 체적을 추정할 수 있었다.

(8) 자기영상의 시작점과 끝점을 포함한 특징점을 시험편의 3차원 형상의 특징점과 매핑하면, 결함 정보를 실제 시험편 형상에 맞추어 표현할 수 있었다.

(9) 스캔형 자기카메라를 통해 원형결함은 오목마모(concave wear)과 박리(Disintegration)를, 자화방향에 45°기울어진 사선형 결함은 Head check와 Shelling결함을, 자화방향에 수직인 축방향 결함은 열(thermal crack)결함을 묘사한 인공 결함을 모두 검출 하였다.

(10) 마모가 심한 레일과의 주 닦면으로 추정되는 훨의 선단으로부터 60~80mm 근방에는 Shelling 직전의 결함으로 추정되는 작은 결함 정보가 많이 나타났다.

(11) 자연 결함인 접촉진동 피로에 의해 발생하는 피로 균열(열균열, 열경화균열), 쉘링(Shelling) 결함, 찰상(Flat) 결함, 박리(Disintegration)결함의 초기 단계, 오목마모(Concave wear)의 결함, 쉘링(Shelling) 결함이 성장한 형태, 차륜 시험편 제작 중 부주의로 인해 발생 된 결함, 결함의 크기가 매우 작거나, 플랜지에 부착된 불순물을 오인하여 자연결함으로 판단한 경우로 결함 데이터를 검출 할 수 없었다. 결과적으로 모든 결함에서 결함의 단면형상이 일정하지 않아 lift-off가 $\pm 0.35\text{mm}$ 로 균일하지 않았음에도 불구하고 결함의 위치뿐만 아니라 대략적인 결함의 형태도 추정해 낼 수 있었다. 또한 육안으로 확인 가능하나 그 길이와 형태를 결정짓지 못한 결함과 육안으로 확인 불가능한 결함도 탐상 하였다.

(12) 결함이 발생하기 전단계에서 훨의 건전성을 모니터링할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] U. G. Goranson, 1993, "Damage tolerance-facts and fictions," Proc. 17th Int. Conf. in Aeronautical Fatigue Sweden: Stockholm, Vol. 1, pp. 3-105.
- [2] Hwang, D. Y., 1995, "Damage tolerance design and prediction of fatigue life in aircraft structure," KSME Int. Journal, Vol. 35, pp. 468-480.
- [3] Miyamoto., 1995, "Investigation of the derailment accident of the express train," Ken-yusha Inc. Annual Review. 1, pp. 5.
- [4] Kwon, S. J., Lee, D. H., Seo, J. W. and Kwon, S. T., 2007, "Damage Evaluation of Wheel Tread for High Speed Train Using Replication and Fracture Mechanics Characteristics," Trans. of KSME(A), Vol. 31, No. 7, pp. 756-763.
- [5] Seo, J. W., Goo, B. C., Choi, J. B. and Kim, Y. J., 2004, "A Study on the Contact Fatigue Life Evaluation for Railway Wheels Considering Residual Stress Variation," Trans. of KSME(A), Vol. 28, No. 9, pp. 1391-1398.
- [6] Park, B. N., Kim, K. H. and Kim, H. K., 2002, "An Evaluation Method of Fatigue Strength and Reliability in a Railway Wheel with an Application of Strength-Stress Interference Model," J. Kor. Soc. Rail., Vol. 5, No. 2, pp. 131-137.
- [7] Rainer P., Erhard A., Montag H. J., Thomas H. M. and Wüstenberg H., 2004, "NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection," NDT&E Inter., Vol. 37, pp. 89-94.
- [8] Kappes W., Rockstroh B., Bähr W., Kröning M., Rodner C., Goetz J. and Nemec D., 2006, "Application of New Front-end Electronics for Non-destructive Testing of Railroad Wheel Sets," ECNDT, Th.1.4.1, pp. 1-12.
- [9] Thomas, H. M., Junger, M., Hintze, H., Krull, R., Ruhe, S., 2000, "Pioneering inspection of railroad rails with eddy currents," Proceedings of the 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, Italy.

- [10] Tsompanidis, I. and Tsiakas, V., 2007, "Ultrasonic and Eddy current Examination of Railway Rolling Stock," Hellenic Society for NDT, Crete-Greece, Chania.
- [11] Kappes, W., Kröning, M., Rockstroh, B., Salzburger, H. J., Walte, F. and Hintze, H., 2000, "Non-Destructive Testing of Wheel-Sets as a Contribution to Safety of Rail Traffic," Corende, Mar del. Plata, Argentina.
- [12] Żurek, ZH., Bizoń, K. and Rockstroh, B., 2008, "Supplementary Magnetic Tests for Railway Wheel Sets," Problemy Transportu, Tom.2 Zeszyt.1, pp.5-10.
- [13] Dogaru, T. and Smith, S. T., 2001, "Giant magnetoresistance-based eddy-current sensor," IEEE Trans Magn, Vol. 37, No. 5, pp.3831-3838.
- [14] Smith, C. H., Schneider, R. W., Dogaru, T. and Smith, S. T., 2003 "Eddy-current testing with GMR magnetic sensor arrays," AIP Conf Proc, Vol. 657, No.1, pp.419-426.
- [15] Sasada, I. and Watanabe, N., 1995, "Eddy current probe for nondestructive testing using cross-coupled figure-eight coils," IEEE Trans Magn, Vol. 31, No. 6, pp.3149-3151.
- [16] Schott, C., Popovic, R. S., Alberti, S. and Tran, M. Q., 1999, "High accuracy magnetic field measurements with a Hall probe," Rev Sci Instrum, Vol. 70, No. 6, pp.2703-2707.
- [17] Kim, D. H., Shin, S. C. and Hur, J., 1998, "Design and Fabrication of Improved Null - Type Torque Magnetometer," Journal of the Korean Magnetics Society, Vol. 8, No. 6, pp. 388-394.
- [18] Im, D. Y., Jung, Y. Y. and Ryoo, Y. J., 2006, "Ground Detection Method for Removal of Earth Field for Magnetic Guidance System," International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Vol. 16, No. 5, pp. 581-586.
- [19] Lee, J. Y., Choe, W. H., Kim, M. S., Kim, D. J. and Kang, M. P., 2004, "Magnetic flux density apparatus for, E.G., Detecting an internal crack of a metal or a shape of the metal," US patents 6,683,452 B2.
- [20] Lee, J., Choe, W., Kim, M., Kim, D. and Kang, M., 2002, "A Display Apparatus of

- Magnetic Flux Density Using 2-D Array Magnetic Sensor and 3-D Magnetic Fluic," International Application Published Under the Patent Cooperation Treaty, WO 02/08745.
- [21] Lee, J. Y., Jun. J. W. and Hwang. J. S., 2007, "Magnetic Sensor Array and Apparatus for Detecting Defect Using the Magnetic Sensor Array," Patent Cooperation Treaty, PCT/KR2007/003801.
- [22] R. S. Kamiyama, 1999, "Introduction to Magnetic Fluid," Sangyo-tosyo, Tokyo.
- [23] 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.
- [24] Lee, J., Hwang, J., Lee, K. and Choi, S., 2006, "A Study of Leakage Magnetic Flux Detector Using Hall Sensors Array", Key Engineering Materials, Vol. 306-308, pp. 235-240
- [25] Lee, J., Kim, M., Kang, M., Kim, D. and Choe, W., Shoji, T., Kato, H. and Kageyama, K., 2004, "Development of magnetic camera using 2-D arrayed hall elements," Proc. APCFS & ATEM'01, pp. 222-227.
- [26] Hwang, J. S., Lee, J. Y., Jun, J. W., Wang, R., Choi, S. H. and Hong, S. P., 2007, "Scan type magnetic camera images with a high spatial resolution for NDT obtained by using a linea interated hall senosr array," Proceedings of IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, pp. 1-6.
- [27] Lee, J. Y., Hwang, J. S., Jun, J. W. and Choi, S. H., 2008, "Nondestructive testing and crack evaluation of ferromagnetic material by using the linearly integrated hall sensor array," J. Mech Sci Tech, Vol. 22, pp. 2310-2317.
- [28] Lee, J. and Hwang, J., 2006, "A Study of the Quantitative Nondestructive Evaluation Using the Cross Type Magnetic Source and the Magnetic Camera," Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 1447-1450.
- [29] Jun, J. W., Lee, J. Y. and Park, D. K., 2007, "NDT of a Nickel Coated Inconel

- Specimen Using by the Complex Induced Current Magnetic Flux Leakage Method and Linearly Integrated Hall Sensor Array," Journal of The Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 27, No. 5, pp. 375-382.
- [30] Lee, J., Shoji, T., 1998, "Nondestructive Inspection for the Paramagnetic Materials Using the Magneto-Optical NDI System," Journal of the Japan Society of Applied Electro-magnetics and Mechanics, Vol. 6, No. 4, pp. 337-342.
- [31] Lee, J., Shoji, T. and Seo, D., 2004, "Theoretical Consideration of Nondestructive Testing by Use of Vertical Magnetization and Magneto-Optical Sensor," KSME International Journal, Vol. 18, No. 4, pp.640-648.
- [32] Lee, J., Hwang, J., Shoji, T. and Lim, J., 2005, "Modeling of Characteristics of Magneto-Optical Sensor Using FEM and Dipole Model for Nondestructive Evaluation," Key Engineering Materials, Vols.297-300, pp.2022-2027.
- [33] K. Yamada, et. al., 2001, "Magnetic and optical nondestructive evaluations for iron-based materials," Nondestructive Characterization of Materials X, Elsevier, pp.330-340.
- [34] Lee, J., Shoji, T., Minkov, D. and Ishihara, M., 1998, "Novel NDI by Use of Magneto-Optical Film," Transactions of the JSME, Vol. 64, No. 619, pp. 825-830.
- [35] Lee, J., Hwang, J., Shoji, T., 2006, "Numerical Analysis of Magneto-Optical Eddy Current Imaging Using FEM," Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 1451-1456.
- [36] Lee, J. Y., Hwang, J. S. and Song, H. Y., 2006, "A Study of the Exclusive Embedded A/D Converter Using the Microprocessor and the Noise Decrease for the Magnetic Camera," J. of KSNT, Vol. 26, No. 2, pp. 99-107.
- [37] Lee, J., Lee, K. and Choi, S., 2005, "A study of the S/N ratio improvement for the magnetic camera," The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 1511-1516.
- [38] Hwang, J. S. and Lee, J. Y., 2006, "Modeling of a Scan Type Magnetic Camera Image Using the Improved Dipole Model," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.

20, No. 10, pp. 1691-1701.

[39] D. Minkov, T. Shoji and J. Lee, 2000, "Study of the Dipole Model of a Crack," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, pp.521-528.

[40] Lee, J., Lyu, S. and Nam, Y., 2000, "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, pp.1072-1080.

[41] Hwang, J. S., Jun, J. W., Choi, S. H., Kim, C. W., Ogawa, K. H. and Lee, J. Y., 2007, "A Study of Magnetic Charge per Unit Area of Dipole Model for the NDE," Key Engineering Materials, 353-358, pp.2371-2374.

[42] Lee, J. Y. and Hwang, J. S., 2006, "The QNDE Using Image Processing of the Magnetic Camera," International Journal of Modern Physics B, Vol. 20, Nos. 25, 26, & 27, pp. 4625-4630.

[43] Lee, J. Y. and Hwang, J. S., 2006, "The Detection Probability Improvement of the Far-side Crack on the High Lift-off Using the magnetic Camera," International Journal of Modern Physics B, Vol. 20, Nos. 25, 26, & 27, pp. 4631-4636.

[44] Lee, J. Y., Hwang, J. S., Choi, S. H. and Lim, J. K., 2006, "Detection Probability Improvement for Nondestructive Evaluation Using a Magnetic Camera," Key Engineering Materials, Vols. 306-308, pp.241-246.

[45] Choi, S. H., Hwang, J. S., Jun, J. W., Lee, J. Y. and Kim, C. W., 2007, "Improvement of crack detection probability by using magnetic camera and image processing," Key Engineering Materials, Vols. 353-358, pp. 2375-2378.

[46] Jun, J. W., Hwang, J. S., Kim, K. J., Ogawa, K. and Lee, J. Y., 2007, "Development of signal processing circuit of a magnetic camera for the NDT of a paramagnetic material," Key Engineering Materials, Vols. 353-358, pp. 2379-2382.

[47] Park, B. N., Kim, K. H. and Kim, H. K., 2002, "An Evaluation Method of Fatigue Strength and Reliability in a Railway Wheel with an Application of Strength-Stress

Interference Model,” J Kor Soc Rail, Vol. 5, No. 2, pp. 118.

[48] Lee, J. Y., Hwang, J. S., Kwon, S. J. and Seo, J. W., 2008, “Inspection of Cracks on the Express Train Wheel Using a High Speed Scan Type Magnetic Camera,” Trans. of the KSME(A), Vol. 32, No. 11, pp. 943-950.

[49] Hwang, J. S., Lee, J. Y. and Kwon, S. J., 2009, “The application of a differential-type Hall sensors array to the nondestructive testing of express train wheels,” NDT & E International, Vol. 42, Issue. 1, pp. 34-41.

[50] Lee, J. Y., Hwang, J. S. and Song, H. Y. and Jun, J. W., 2007, Korea Software Copyright Committee, 2007-01-121-004016.

[51] Jun, J. W., Lee, J. Y., Hwang, J. S. and Lee, S. h., 2007, “Development of Numerical Analysis Software for the NDE by using Dipole Model,” Key Engineering Materials, Vols. 353-358, pp.2383-2386.

[52] http://cafe.naver.com/aceshigh.cafe?iframe_url=/ArticleRead.nhn%3Farticleid=75

[53] <http://blog.daum.net/kelriyoon/13121878>

[54] <http://blog.naver.com/sakuras122?Redirect=Log&logNo=110005875568>

[55]<http://mynury.com/entry/%BB%E7%BB%F3-%C3%D6%BE%C7%C0%C7-%C7%D7%B0%F8%C2%FC%BB%E7-JAL-123%C6%ED-%C3%DF%B6%F4%BB%E7%B0%ED>

[56]<http://japan.web-bi.net/home/board.php?board=jpnbunka01&command=body&no=14>

[57] <http://www.railsafety.or.kr/>

[58] http://radar.ndsl.kr/tre_View.do?cn=GTB2001110389&ct=TREND&lp=SI

Acknowledgments

열정과 욕심으로 지나온 모든 시간이 돌이켜보면 만족스러운 기억보다 아쉬운 기억이 더 많은 나날이었지만 언제나 부족한 저를 믿어 주셨던 많은 분들이 있었기에 조그마한 결실을 맺게 되었다고 생각합니다.

많은 아쉬움이 남지만 7년이라는 대학원 생활 가운데 부족한 저를 이끌어 주시고 꾸준히 가르침과 배려로 격려 해주신 이진이 교수님과 저의 부족한 논문을 검토해주시고 심사해주신 고낙용 교수님, 박종안 교수님, 모상만 교수님, 조창현 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 학부과정과 대학원과정 동안 여러모로 관심과 가르침을 주신 김영동 교수님, 최한수 교수님, 장순석 교수님, 반성범 교수님, 곽근창 교수님, 이지은 교수님을 비롯하여 많은 교수님들께 감사 드립니다.

또한 저의 논문 주제가 된 철도 차륜 시험편을 제공하여 주시고, 실험 여건을 마련해 주신 한국철도 기술연구원에 권석진 박사님께 깊은 감사를 드리며, 대학원 과정 동안 항상 격려를 아끼지 않으시고, 물심 양면으로 도움 주신 (주)POSCO 최세호 박사님과 (주)네드텍 이주섭 사장님 그리고 한국철도 기술연구원에 이동형 박사님, 서정원 박사님 그리고 저의 논문의 센서를 제작하는데 도움 주신 삼성전기 김성우 과장님, 장기훈 대리님과 앰코테크놀러지코리아(주) 최호민 부장님, 김희철 과장님, 중국에 김정훈 사장님께 감사 드립니다. 아울러 연구비를 지원해주신 한국과학재단, 철도기술연구원, (주)POSCO 에도 감사 드립니다.

모든 일에 있어서 역시 혼자 하는 것보다는 함께 하는 일이 더욱 재미 있었고 배우는 부분도 많았으며, 결과도 좋았던 것들은 정말 좋은 경험이 되었습니다. 많은 부분에서 큰 힘이 되어 주신 서동진 박사님, 양해정 박사님, 박경석 박사님, 이제형 박사님, 홍성표 박사님께 감사 드리고, 나의 학창시절의 대부분을 함께 보냈던 연구실에 전종우 박사님, 이경철, 김정민, 조현종, 박영민, 최호윤 그리고 김광진 선배님, 김성준 선배님, 김태균, 채승훈을 비롯한 선배님들께 관심과 격려에 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 제가 살아가는데 큰 힘이 될 윤종민, 김익선, 최성기,

김민용, 정결, 주홍주, 이재원 너무 고맙고 미안하다.

마지막으로 대학원 생활을 무사히 마칠 수 있도록 언제나 묵묵히 격려해 주신 아버지, 어머니, 형, 동생께 감사드립니다. 그리고 사랑합니다.

그동안 받은 세상의 빚을 이제는 세상에 나아가 빚으로 갚고자 합니다. 아직은 부족하지만, 여러분들의 응원과 격려 속에 사회로 나아갑니다. 그동안 많은 도움을 주셨던 모든 분들께 다시 한번 감사의 말씀을 전합니다.

2010년 1월
황지성

저작물 이용 허락서

학 과	정보통신공학과	학 번	20067609	과 정	박 사
성 명	한글: 황 지 성 한문 : 黃 至 成 영문 : Hwang Jiseong				
주 소	전라남도 담양군 금성면 봉황리 366번지				
연락처	E-MAIL : atithi1004@nate.com				
논문제목	한글 : 고속철도 차륜의 건전성 평가를 위한 스캔형 자기카메라 개발 및 지능형 결합평가 영어 : Development of a Scan Type Magnetic Camera and Intellectual Nondestructive Evaluation for Health Monitoring of Express Train Wheels				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2010년 2월

저작자:

황 지 성  서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하