



2011年 8月 碩士學位論文

레일 埋立형 磁氣센서를 利用한 車輪 踏面의 實時間 缺陷 檢出 및 評價

朝鮮大學校大學院

情報通信工學科

崔 明 基

레일 埋立형 磁氣센서를 利用한 車輪 踏面의 實時間 缺陷 檢出 및 評價 Real-time Crack Inspection and Evaluation of Wheel-tread by Using Rail-buried Magnetic Sensors Array

2011年 8月 25日

朝鮮大學校大學院

情報通信工學科

崔明基

레일 埋立형 磁氣센서를 利用한 車輪 踏面의 實時間 缺陷 檢出 및 評價

指導教授 李 鎭 伊

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2011年 4月

朝鮮大學校大學院

情報通信工學科

崔明基

崔明基의 碩士學位論文을 認准함.



2011年 5月

朝鮮大學校大學院

ABSTRACT i
제 1장 서 론
제 2장 원리
제 1절 방법론적 접근
1. 차륜설치형
2. 차량 저면설치형
3. 레일 매립형
제 2절 구성요소별 원리10
1. 자원1
가. 수평자화1
나. 수직자화12
2. 센서1
가. Single형 LIHaS1
다. Differential영 LIHaS
년. AIHas
9. Differential & Affias
가. 중폭1
나. 필터18
4. A/D 변환19
5. 소프트웨어
가. 디지털필터
나. 배경 제거 알고리즘2.
제 3장 매립형 시스템의 검증24
제 1절 구성
1. 자원24

가. 수평
나. 수직
가. 곡면형 LIHaS
나. Differential형 LIHaS
3. 신호처리회로
제 2절 실험 및 고찰
1. 시험편
2. 실험결과27
가. 수평자화 및 LIHaS의 경우
다. 수식자화 및 Differential영 LIHaS의 경우
제 1절 구성
1. 차량인식시스템
2. 센서기구물
3. 센서부
가. 자원
나. Differential형 AIHaS
4. 전오지너의도
가. Switching
다. Filtering
라. A/D converting 44
마. Interfacing
3. ㅗ_드케니
제 2일 2日 곳 고일
1. 걸내 도귀 걸임
2. 번장 식용 실업
세 5상 但돈
REFERENCES

표목차

Table 3-1	시험편에 도입된 인공결함정보(수평자화) [mm, mm ³]	
Table 3-2	시험편에 도입된 자연결함정보(수평자화)[mm, mm ³]	
Table 3-3	시험편에 도입된 자연결함정보(수직자화)[mm, mm ³]	
Table 3-4	시험편에 도입된 인공결함정보(수직자화)[mm, mm ³]	
Table 4-1	대차 시험편에 도입된 인공결함정보 [mm]	
Table 4-2	현존하는 차륜 답면 탐상 기술	

도목차

Fig.1-1 레일 단면부 헤드첵 크랙 전파 현상	1
Fig. 1-2 철도차량 주행장치의 손상현황-차축	2
Fig. 1-3 독일 ICE 고속철도 사고	3
Fig.2-1 차륜설치형 시스템의 구성	6
Fig. 2-2 차량 저면설치형 시스템의 설계 및 구성요소	7
Fig. 2-3 차량 저면설치형 시스템의 구성 및 현장 실험	7
Fig. 2-4 레일 매립형 시스템의 설계방향	9
Fig. 2-5 자기카메라의 개요도	. 10
Fig. 2-6 수평자화의 수치해석	. 12
Fig. 2-7 수직자화 방법의 개념도	. 13
Fig. 2-8 Single형 LIHaS	. 14
Fig. 2-9 Differential 형 LIHaS	. 15
Fig. 2-10 AIHaS	. 16
Fig. 2-11 Differential 형 AIHaS	. 16
Fig. 2-12 INA128U를 사용한 OP-Amp의 회로도	. 18
Fig. 2-13 버터워스(Butterworth) 저역통과 필터	. 19
Fig. 2-14 A/D 변환 회로도	. 20
Fig. 3-1 곡면형 자화기에 의한 수평자화시 수치해석	. 24
Fig. 3-2수직자화의 개념도	. 25
Fig. 3-3 곡면형 LIHaS	. 26
Fig. 3-4 신호처리회로	. 26
Fig. 3-5 실제 사용되었던 무궁화호 차륜	. 27
Fig. 3-6 수평자화와 Single형 LIHaS를 사용한 자기영상	. 30
Fig. 3-7 실제체적과 수평자화와 Single형 LIHaS를 사용한 계산된 체적값의 비교.	. 31
Fig. 3-8 수직자화와 Differential형 LIHaS를 사용한 자기영상	. 33
Fig. 3-9 계산된 체적값과 실제 체적 및 체면적의 비교	. 34
Fig. 3-10 Lift-off별 계산된 체적값과 실제 체적 및 체면적의 그래프	. 34
Fig. 4-1 차량인식 시스템의 구성	. 35
Fig. 4-2 레일 가공형태에 따른 구분	. 37
Fig. 4-3 센서기구물의 설계방향	. 37
Fig. 4-4 영구자석 및 센서기구물 도면	. 38
Fig. 4-5 제작된 센서기구불	. 38
Fig. 4-6 수직방향 자화의 수치해석	. 39
Fig. 4-7 영구자석(Nd-Fe-B)과 Differential형 AIHaS PCB	. 40
Fig. 4-8 Wiring method for obtaining the high spatial resolution with large number of sensor	s41

Fig. 4-9 스위칭 회로의 도면	42
Fig. 4-10 스위칭 회로	43
Fig. 4-11 병렬 증폭 회로	43
Fig. 4-12 Analog-to-digital converting circuits and photograph	44
Fig. 4-13 Interface circuits and photograph	45
Fig. 4-14 Software	47
Fig. 4-15 레일 매립형 차륜 답면 탐상 시스템의 구성	48
Fig. 4-16 차륜 답면부의 구분된 센서측정범위	49
Fig. 4-17 차륜 인식 시스템	49
Fig. 4-18 센서 기구부의 완충장치	50
Fig. 4-19 차륜 결함 및 완충장치에 의한 Lift-off 유지	50
Fig. 4-20 대차 시험편의 인공 결함 검출 결과	54
Fig. 4-21 철도차량기지에 설치된 센서기구물	55
Fig. 4-22 차륜 답면 탐상 시스템의 현장 설치	56
Fig. 4-23 디젤 철도 차량의 차륜 결함	56
Fig. 4-24 디젤 철도 차량에서 측정된 결함	57

기호 설명

NDT	Nondestructive Testing
RT	Radiation Testing
UT	Ultrasound Testing
MT	Magnetic Particle Testing
MFLT	Magnetic Flux Leakage Testing
РТ	Penetration Testing
ECT	Eddy Current Testing
LT	Leakage Testing
VT	Visual Testing
AE	Acoustic Emission
IRT	Infrared Ray 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
В	Magnetic Flux Density
$\partial B/\partial x$	The Differential of B to Scanning Direction(x-direction)

LIHaS	Linearly Integrated Hall Sensor Array	
$V_{\rm H}$	Hall Voltage	
$\partial V_{H}\!/\partial x$	The Differential of V_H to Scanning Direction(x-direction)	
FIR	Finite Impulse Response	
IIR	Infinite Impulse Response	
SMPS	Switched Mode Power Supply	
PLD	Programmable Logic Device	
L	Length of Crack[mm]	
W	Width of Crack[mm]	
D	Depth of Crack[mm]	
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	
Т	Time	

아래 첨자

MAG	Magnetic Direction
Н	Hall Sensor
С	Crack
R	Rotated Axis and Position
Ν	Noise Level
S	Sensor Output
М	Maximum
TOTAL	Total of Sensor Output

ABSTRACT

Real-time Crack Inspection and Evaluation of Wheel-tread by Using Rail-buried Magnetic Sensors Array

Myoungki Choi Advisor: Prof. Jinyi Lee, Ph.D. Dept. of Information and Communications Eng. Graduate School of Chosun University

As the icon of green technology, the express train with carbon neutrality consumes less energy than other transportation modes. On the other hand, its wheel treads are damaged by high kinetic energy and friction due to heavy weight and high speed. The damages can propagate to fracture the wheels. Therefore, crack damages need to be inspected and maintained under control. However, the time for crack damage inspection needs to be reduced to meet the time limitation in the maintenance factory.

The purpose of this paper is to develop a real time non-destructive testing method of express train wheels, which are tested when the express train enters the maintenance factory or garage. In the proposed method, the crack inspection system is buried in the rail. Therefore, every wheel can be tested when the train passes along the rail installed with the inspection system. The proposed method was verified by following experiments.

Three methods of inspection are carried out with the testing equipment installed on the wheels, installed at the bottom of the train, buried in the rail, respectively. Also the merits and demerits of these methods are compared and discussed.

A part of wheel tread was magnetized in the rotation direction, and the distorted magnetic field due to a crack was measured by using the linearly integrated Hall sensors array. The

results indicated the validity of the firstand the second method-testing with installation on the wheels and installation at the bottom of the train. A part of wheel tread was magnetized in the vertical direction, and the distorted magnetic field due to a crack was measured by using the linearly integrated differential type Hall sensors array. The results validated the third method the rail-buried-type.

The results validated the third method according to the abovementioned experiments results, permanent-type magnets and 2-dimensional differential-type Hall sensors array were buried in the rail. By this method, the wheels can be inspected as they pass the inspection zone. Laboratory simulation and on-the-spot inspection verified the practicality of the proposed method. A real-time nondestructive testing system for wheel treads was developed. The developed method offers reduced testing time with high accuracy of crack inspection in the wheel tread.

제1장 서론

고속 철도, 항공기, 원자력·화력발전을 비롯하여, 석유 화학 플랜트, 제철 제 강, 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 의 한 표면 혹은 내부 결함, 사용자 부주의 등의 복합적인 문제로 인하여 손상이 야기 되면, 급격히 진전되어 사고에 이르게 된다. 결과적으로 막대한 인적·경제적 손실 뿐만 아니라 환경 오염 등 국가적으로도 큰 문제를 일으킬 수 있다.

특히 고속철도차량의 경우, 수천 톤에 이르는 중량이 수 백km/h의 고속으로 이 동하기 때문에 막대한 운동에너지가 발생하며, 결과적으로 탈선시 막대한 인명피해 가 예상된다. 고속철도차량의 탈선은 여러 가지 원인이 있지만, 레일, 차축 및 차륜 의 이상에서 오는 사고가 많은 경우를 점한다.



(a) Head check sizing characterisation

(b) Broken rail caused by head checks.

자료출처:NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection[1] Fig. 1-1 레일 단면부 헤드첵 크랙 전파 현상

레일의 경우에는 Fig. 1-1에 나타낸 바와 같이 사용온도, 환경, 부하조건, 특히 차륜 답면에서의 피로 등에 의하여 헤드체크(Head checks)와 같은 경년적 열화가 발 생할 가능성이 있고, 더욱이 그 예측이 곤란한 일도 있다. 헤드체크는 레일의 게이 지코너(Gauge corner)에서 15~30도 경사지게 2~7mm 간격으로 발생하는 결함을 의미 한다. 이러한 헤드체크는 오래 방치할 경우 가열된 표면 부위가 떨어져 나가는 쉘 링현상(Sheling)이 얼어날 수 있다. 그리하여 고속철도 운행시 소음의 주요 원인이 자 레일의 단기적 사용으로 인한 경제적 손실, 레일 및 차륜의 파손, 탈선사고의 원인이 될 수 있다 [1].

한편, 철도차량 주행장치의 손상의 원인으로는 제동완해 불량 및 차륜파손이 각각 4.8%, 차량부품 탈락 14.3%, 제동장치 파손이 19% 이지만 차축 파손의 경우 는 전체 원인의 절반인 48%에 이른다.



자료출처:철도차량의 주행시스템과 안전성 평가기술 세미나(2009.05.25) Fig. 1-2 철도차량 주행장치의 손상현황-차축

전술한 바와 같이 차륜에 의한 철도차량의 사고는 비록 전체 사고의 4.8% 이 지만 철도 차량의 중량을 지지하고, 레일과의 반복적인 구름접촉을 하며 이동하는 핵심 구조부품이다. 특히, (1) 레일과의 미소 접촉부에서 발생되는 높은 수직 응력, (2) 답면 제동시 제륜자가 접촉하여 발생하는 마찰열에 의한 열응력,(3) 제조과정에 서 필수적으로 발생되는 비금속 개재물등의 원인에 의하여 발생하는 차륜의 손상 은 고속열차의 주행 안전에 지대한 영향을 미친다. 따라서, 차륜이 파손된 사고의 경우 막대한 인명피해를 초래한다 [4]. 한 예로, 1976년에 공사를 시작하여 1991년 6월 2일에 완성, 상용 운행 중이던 독일의 고속 열차 ICE는 사상 최악의 열차사고 중 하나로 기록되는 탈선사고를 일으켰다. 1998년 6월 3일 뮌헨에서 출발하여 함부 르크로 가는 I.C.E-884는 약 400여명의 승객을 태우고 운행 중 Eschede에서 탈선사 고를 일으켰다. 이로 인해 사망 102명, 약 80명의 중상자를 포함하여 300여명의 인 명사고가 발생하였다. 이 사고의 원인은 약 200km/h의 고속 운행하는 차륜의 누적 된 금속피로로 인한 파괴로 밝혀졌다 [11]. 금속피로는 재료에 반복적인 힘이 가해 질 때 강도가 저하되는 현상으로 고속으로 회전하는 부분의 재료에 많이 일어난다.



자료출처: http://www.conservativesforamerica.com/big-government/ red-china%E2%80%99s-lessons-for-green-boondogglers Fig. 1-3 독일 ICE 고속철도 사고

한편, 상술한 레일, 차축 및 차륜을 검사하기 위한 비파괴검사방법으로 다음과 같은 연구가 수행된 바 있다 [1-6, 12-17].

Rainer 등은 차륜의 분해 없이 차륜 디스크와 답면부의 검사가 가능하고, 레일 표면결함을 운행속도 70km/h 속도로 측정하기 위하여, 초음파 검사 방법과 와전류 탐상법을 개발한 바 있다 [1]. 초음파 검사 방법은 차륜의 분해 없이 검사하는 방 법으로서, 휠 디스크의 검사를 위해 다수의 탐촉자를 배열하고, 모드변환과 방해를 회피하기 위해 디스크 평면에 수평인 편광된 전단파(Shear waves)를 적용하였다. 이 전단파는 휠에 원주방향(접선방향)과 같은 방향의 결함을 찾을 수 있다. 또한 탐촉 자(a pitch and catch arrangement)의 거리조정을 통해 검색 위치를 조정할 수 있다. 또 한 필스반사법(in pulse echo technique)을 통해 지름방향의 결함을 찾을 수 있다. 하지 만 평면에 수직인파, 세로파는 디스크에 상호작용에 의해 투사할 수 없고, 복잡한 형상과 두께변화로 인해 탐촉자의 접근이 어렵지만, 기하학적 특징에 따라 초음파 투사각을 25~55로 하고 원주방향으로 탐촉자를 배열하면 결함을 충분히 잡을수 있 다. 데이터 표시방법인 반사단층촬영(Echo-tomogram)을 설명하였다. 한편, 레일을 검사하기 위하여 와전류 탐상법을 이용하였으며, 수 밀리미터의 헤드첵을 고공간 분해능으로 검출할 수 있음을 보였다.

한편, Tsompanidis 등에 의하면, RCF크랙, 흠, 직경 1mm 이하의 제조상 결함으 로부터 시작되는 결함과 같은 타이어 차륜(Wheel tyres)의 일반적 결함은 UT, ECT, MPT로 측정할 수 있으며, 차축 seat의 접촉 표면이나 열린 홀로부터 결함이 시작 되는 Wheels centers 검사 또한 UT, ECT, MPT로 측정할 수 있음을 제시한 바 있다 [2]. 또한, 기하학적 변화와 직경 1mm이하의 내재 결함으로부터 시작되는 Axle's 검 사도 UT, ECT, MPT로 측정할 수 있음을 보고하였다. 알루미늄 재질인 Axlebox는 기 하학적 변화와 삭정의 표시나 단조로부터 내부에 포함된 결함으로부터 시작되며, ECT가 주된 검사방법으로 제시되었다.

한편, Fraunhofer Institute for Non-Destructive Testing (IZFP)에서 만든 AURA라 불리는 검사 시스템은 지름름이 780~1300mm이고 최대 하중 2000kg인 윤축(wheel-sets)의 적용이 가능하며, 검사 시간은 8분이 소요된다 [3]. 26개의 초음파 진동자 (Ultrasonic transducers) (2, 4MHz), 2개의 EMAT 진동자가 배열 장착되어 휠의 림과 디스크의 구름면(Rolling surface)를 검사한다. 검사 방법은 윤축을 테스트 장치에 물리고, 원주위치를 위한 참조표시를 하고, 탐침(Probe) 시스템이 놓여지고, 초음파 진동 자는 구름면과 림표면의 안쪽에 놓여진다. 처음 윤축이 회전하면서 휠 표면을 적시고, 4개의 UT가 데이터를 획득하며 동시에 TFT에 디스플레이 한다. 전단파(초음파) 진동자는 휠의 반지름 방향을 중심으로 한 결함을, EMAT 진동자는 휠의 원주방향을 중심으로 한 결함을, EMAT 진동자는 휠의 원주방향을 중심으로 한 결함을, EMAT 진동자는 휠의 원주방향

하지만, 이상의 몇가지 사례들은 고속열차의 차륜을 검사함에 있어서, 열차가

4

초저속으로 운행되거나, 멈춰있을 때 유효한 검사방법으로서, 정비창 체류시간이 1~2 시간임을 감안하면, 현장 적용에 많은 어려움이 있다. 실제로 상술한 ICE의 경 우에도 사고 하루 전에 차륜 답면 균열의 조기식별을 위한 3,600km 차륜검사를 뮌 헨에서 실시하였다. 그러나 ICE 차량을 약 1.5km/h로 이동시켜 레이저에 의한 차륜 의 윤곽 및 초음파를 이용한 균열검사를 수행하는 원리의 차륜 답면 균열검사는 실제로는 이루어지지 않았다. 그 이유는 주행수가 적은 차륜의 경우, 표면의 경화 에 의하여 초음파의 강도가 약해져 (1) 결함검출능력의 저하의 원인이 되며, 또한 점검 및 정비를 위한 차내 공장의 이용시간이 60분 이내인 경우도 있어 (2) 결함탐 상시간의 부족 때문이다. 더욱이 3,600km의 검사주기도 전술한 결함 탐상시간의 부 족 때문에 2,500km로부터 변경된 것이다 [11].

따라서 차륜 답면 균열의 조기식별을 위하여 (1) 결함 탐상시간의 고속화 및 (2) 재질에 관계없이 결함검출능력을 고도화할 수 있는 시스템의 개발이 강력히 요 구되고 있다. 뿐만 아니라, 철도차량이 (3) 정상속도(7~30km/h)로 정비공장에 진입 할 때, 일시 정지하지 않고 상기 검사가 이루어져야 함은 해당 기술의 적용에 필수 적인 요구 사항이다.

이러한 차륜의 검사속도 문제를 해결하기 위하여 본 연구는 레일에 설치한 면 적형 자기카메라에 의하여 고속철도차량이 정상속도(7~30km/h)로 정비창에 진입할 때, 일시 정지하지 않고 차륜 답면의 결함을 진단하고, 데이터베이스화하는 시스템 을 제안하였다. 이를 위하여, 먼저 본 연구실의 선임자가 개발한 차륜설치형 비파 괴검사법을 검토하고, 본 연구에서 제안한 레일 매립형 비파괴검사법의 타당성을 검증하였다. 최종적으로 한국철도공사 및 한국철도기술연구원의 도움으로 철도차량 정비단의 일부 구간에 개발한 시스템을 설치하여 현장실험을 실시하였다 [16,22].

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 제2장은 차륜을 검사하기 위한 비파괴검사 방 법 및 종래의 연구결과, 제3장은 본 연구에서 제안하는 레일 매립형 차륜 검사장치 의 개발 내용 및 실험결과, 제4장은 개발된 시스템을 실제 현장에서 적용한 결과를 서술하였다. 제5장은 결론이다.

5

제 2장 원리

제 1절 방법론적 접근

고속철도차량의 차륜을 검사하기 위해서는 Fig. 2-1 ~ Fig. 2-4에 나타낸 바와 같 은 세 가지 방법을 생각해 볼 수 있다. 즉, 차륜설치형, 차량 저면설치형 및 레일 매립형이 그것이다. 다음은 각각의 방법에 대하여 구체적인 방법을 서술하였다.

1. 차륜설치형



Fig. 2-1 차륜설치형 시스템의 구성

차륜 설치형은 Fig. 2-1에 나타낸 바와 같이 차륜의 위쪽에 자원 및 자기센서를 설치함으로써, 24시간 실시간 모니터링할 수 있는 시스템이다 [20-22]. 차륜의 외형 과 동일한 모양을 본따 제작된 PCB와 기구물에 0.78mm, 1.04mm 간격으로 배열된 181개의 홀 센서 배열(LIHaS)로 시제작된 차륜설치형 탐상시스템은 차륜의 평평한 부분인 플레이트 부분에 0.78mm 간격의 홀 센서를 배열하고, 플랜지 부분에는 1.04mm 간격의 센서가 배열된다. 탐상속도 및 공간분해능은 30km/h 에서 87µm이 며, 90km/h로 환산하면 0.25mm 정도의 최대 공간분해능을 획득할 수 있다. 이 시스 템은 고속철도의 운행시 실시간으로 차륜의 상태가 확인 가능하기 위해서는 각각 의 차류에 설치하여 운용해야 한다. 결과적으로 운행하는 모든 철도차량으로 차류 에 각각 철치해야 하는 번거로움 및 경제성의 저하를 해결해야 한다. 따라서, 이러 한 비효율적인 측면을 개선하기 위하여 다음과 같은 차량 저면설치형이 고안되었 다.

2. 차량 저면설치형







(a) 차량 저면설치형 시스템의 설계도 (b) 센서부 및 기구부 Fig. 2-2 차량 저면설치형 시스템의 설계 및 구성요소





(b) 차량 저면설치형 시스템의 현장 실험

(a) 차량 저면설치형 시스템의 구성 Fig. 2-3 차량 저면설치형 시스템의 구성 및 현장 실험

차량 저면설치형은 Fig. 2-2와 2-3에 나타낸 바와 같이 차륜설치형 센서가 철도 차량 차륜의 차량 저면에 설치되고, 차륜이 공회전을 하는 동안 검사하는 시스템이 다. 따라서, 철도차량이 정비를 위해 정비창에 들어오고 차륜을 회전시키는 장치 위에서 공회전할 때 차륜의 직경에 따라 가변적인 차륜 중심축의 높이 및 곡률반 경에 맞추어 센서헤드부의 높이와 각도를 조정할 수 있어야 한다. 한편, 차륜의 경 우 운행시 삭정을 통한 관리가 이루어지는데 이로 인해 차륜이 각각 다른 직경을 가지게 되어 검사 조건이 달라지게 되므로 최적의 조건상에서 운용이 가능하도록 높이와 각도의 조절이 필요하다. 탐상속도는 차륜설치형과 동일하고 30km/h 에서 87~500µm의 공간분해능을 가지는 자기영상을 통한 결함 탐상이 가능하다. 그러나, 결함을 탐상하기 위해서는 별도의 차륜 공회전장치가 필요하며, 차륜의 직경에 따 른 센서기구물의 접근에 많은 시간이 소요된다.

3. 레일 매립형

레일 매립형은 위의 두가지 방법의 단점을 보완, 즉 결함 탐상 시간을 단축하 기 위하여 본 논문에서 제시한 방법으로 Fig. 2-4와 같이 레일의 일부분을 가공하여 센서를 설치하는 시스템이다. 철도차량은 기본적으로 운행 후 정비를 위해 차량정 비창으로 이동하게 되는데, 차량이 정비창에 들어오게 되는 구간의 레일을 가공을 하여 안쪽 공간에 측정을 위한 영구자석 및 면적형센서(AIHaS)를 설치한다. 위의 구간을 지나가는 모든 철도차량의 차륜 답면부 결함을 탐상하게 된다. 또한, 차량 인식 시스템과 차륜인식 시스템을 통해서 각각의 차량과 차륜에 대한 데이터베이 스가 용이하게 할 수 있다.

8



Fig.2-4 레일 매립형 시스템의 설계방향



앞 절에서 제시한 세가지 방법은 모두 자기카메라 기술에 근거한다. 자기카메 라는 Fig. 2-5에 표시한 바와 같이, 자원, 센서배열, 증폭 및 필터와 같은 신호처리 회로, A/D 변환 및 인터페이스, 컴퓨터 및 소프트웨어로 구성된다. 피측정체에 직류 및 교류자기장, 유도전류, 유도면전류, 지자기 등과 같은 자원(Magnetic source) [23-29]을 입력하면, 결함의 존재에 기인한 자기장의 왜곡이 발생하고, 이러한 왜곡 을 센서배열에 의하여 전기신호로 변환한 후, 증폭 및 필터에 의하여 해석할 수 있 는 아날로그신호로 증폭 및 충분한 잡음대비신호비(Singnal to noise)를 얻게 된다. 또한, 컴퓨터에 입력, 저장 및 표현하기 위하여 A/D 변환기 및 인터페이스를 적용 하고, 보다 쉽게 결함정보를 추출하기 위한 소프트웨어를 필요로 한다. 다음은 상 술한 각 요소에 대하여 구체적으로 설명한다.

1. 자원

본 논문에서 실제 사용된 자원인 수평방향 자화와 수직방향 자화에 대해서 구 체적으로 설명하면 다음과 같다.

가. 수평자화

수평자화는 일반적으로 많이 사용되는 자화방법으로 Fig. 2-6 (a)와 같이 요크 (Yoke)형 코어(Core)에 일정수 이상의 코일을 감고, DC 전류 또는 AC 전류를 입력 하여 자극 사이에 자기장을 발생시킨다. 강자성체 피측정체를 자극에 근접시키면 자기폐루프가 형성되어, 피측정체가 수평방향으로 자화된다. 홀 센서를 자기장과 수직으로 선형배열(LIHaS, Linearly Integrated Hall Sensor Array)하여 피측정체에서 자 화된 자기장이 결함이나 균열 등에 왜곡된 자기장의 변화를 측정하게 한다. 한편, 수평자화방법은 결함의 길이방향에 따라서 결함 탐상 능력이 변화한다. 즉, Fig. 2-6 의 (b)와 (c)에서 나타낸 수치해석 결과에서 보는 바와 같이 결함의 길이 방향과 자 화방향이 서로 수직일 경우 자기장의 왜곡이 더 크게 나타나며, 결과적으로 결함 탐상 능력이 가장 우수하다. 반면에 결함의 길이방향이 자화방향과 수평일 경우에 는 자기장의 왜곡이 최소화되며, 이를 자기센서에 의하여 측정할 경우, 결함 탐상 능력이 저하된다.

11



나. 수직자화

수평자화는 상술한 바와 같이 두 자극 사이의 특정영역에 자기장을 인가할 수 있는 방법이다. 따라서, 본 연구에서 최종적으로 목표로하고 있는 레일 매립형 자 기카메라의 자원으로 활용하기 위해서는 여러 가지 공간적인 제약조건 및 자화전 류의 인가에 많은 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 상술한 수평자화 와는 별도로 수직자화를 고안하였다. 즉, Fig. 2-7에 나타낸 바와 같이 피측정체에 수직방향의 자화를 인가하였을 경우, 결함의 존재에 기인하는 자기장의 왜곡을 측 정하여 결함의 위치 및 크기를 상정하고자 한다. 이러한 수직자화는 영구자석 또는 수직방향 자화기에 의하여 용이하게 구현될 수 있다. 그러나, 피측정체에 인가하는 수직자화는 홀 센서와 같은 자기이방성 센서를 사용할 경우, 포화자화에 이르게 되 어, 결함 유무에 따른 미소한 자기장의 변화를 측정하기 곤란하다. 이러한 한계점 은 뒷절에서 보다 구체적으로 설명할 예정인 Differential형 자기센서에 의하여 해결 할 수 있다.



2. 센서

결함의 존재 및 크기에 따른 특정영역의 자기장의 왜곡을 보다 빠른 시간에 검출하기 위하여 본 연구에서는 선형으로 배열한 홀 센서(LIHaS, Linearly Integrated Hall Sensor Array)를 이용하였다. 수평자화에 적합한 Single(단일)형 LIHaS 및 수직자 화에 적합한 Differentail(차동)형 LIHaS에 대하여 다음 절에 구체적으로 설명한다.

가. Single형 LIHaS

Fig. 2-8에 나타낸 바와 같이 Single형 LIHaS는 NiZn ferrite wafer에 InSb 홀 센서 를 520µm 간격으로 배열한 형태를 가진다. 두개의 입력단자는 공통으로 연결되어 직류 5mA에 의하여 구동되며, 각 센서의 출력은 병렬로 연결된 커넥터를 통하여 각각 필터, 증폭기, A/D 변환기 및 인터페이스를 통하여, 자기장의 분포를 측정, 저 장, 연산 및 표시할 수 있다. 한편, Single형 LIHaS는 시판중인 단일형 홀 센서를 인 쇄회로기판(PCB, Printed Circuit Board)에 1열로 배열한 경우에 비하여, 공간분해능을 획기적으로 개선할 수 있을 뿐 아니라, 리프트오프의 차이를 최소화하고, 센서의 감자면(感磁面)을 동일한 평면상에 위치할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 1개의 웨이퍼에서 동일한 조건하의 반도체 제작 공정을 거쳤음에도 불구하고, 자기 -전기 변환능력의 차이 및 신호처리회로의 차이에 기인하여 각각의 센서는 바이어 스오차 및 감도오차를 가지게 된다. 이를 보완하기 위하여 본 논문에서는 홀 센서 전압(V_H)의 분포를 스캔방향으로 미분한 값, $\partial V_{H}/\partial x$ 를 주로 활용한다 [9].



Fig. 2-8 Single형 LIHaS

나. Differential형 LIHaS

Fig. 2-9은 상기 single형 LIHaS를 2열로 배열하고, 평행한 각각의 센서를 차동 으로 연결한 Differential형 LIHaS를 나타낸다. 이러한 Differential형 LIHaS는 크게 두가지 목적으로 활용될 수 있다. 즉, 앞절에서 설명한 바 있는 스캔방향으로 미분 한 자기장의 분포 $\partial V_H/\partial x$ 연산처리없이 획득하고자 하는 경우에 활용될 수 있다. 또 한편으로는 앞절의 수직방향 자화기에 의한 시험편의 자화 및 결함 존재에 기 인한 자기장의 왜곡을 측정하고자 할 때 유효하게 활용될 수 있다. 즉, 앞절에서 설명한 Single형 LIHaS는 홀 센서의 특성상 센서면에 수직인 방향으로 감자면을 가 지며, 결과적으로 강력한 수직자화가 인가되면 포화에 이르게 된다. 하지만, 강력한 수직자화속에서 결함 존재에 기인한 자기장의 조그마한 왜곡을 검출하기 위해서 별도의 조치, 즉 Fig. 2-9에 나타낸 바와 같은 Differential형 LIHaS를 고안하였다. 한편, Differential형 LIHaS는 2줄의 Single형 LIHaS의 간격에 따라서 결함 탐상 능력이 좌우되나, 본 연구에서는 간격에 따른 결함 탐상능력을 별도로 확인하지 않 고, 1.56mm의 간격을 가지는 Differential형 LIHaS를 적용하였다.



Fig. 2-9 Differential형 LIHaS

다. AIHaS

앞 절에서 설명한 바와 같이 본 연구의 최종목표는 레일에 자기센서를 면적형 으로 배열하여 해당 영역에 열차가 통과할 때, 결함을 검출하는 것이다. 따라서, 자 기센서를 면적형으로 조밀하게 배열(AIHaS, Area-type Integrated Hall Sensor Array)할 수 있는 기술이 요구된다. 본 연구 그룹은 Fig. 2-10에 나타낸 바와 같이 32×32개의 홀 센서를 780μm 간격으로 2차원 배열한 기술을 개발한 바 있다. 결과적으로 25.6×25.6mm²의 영역의 자기장의 분포를 별도의 기계적인 스캔장치 없이 획득하고, 가시화할 수 있다.

한편, 이러한 AIHaS를 구동하기 위해서는 횡방향으로 공통된 전원입력선과 종 방향으로 공통된 신호출력선을 가지고 있다. 이때, 전원입력선을 1개씩 순차적으로 전원 공급하면, 해당 열의 자기장의 분포를 신호처리선에 의하여 병렬로 획득할 수 있다.



Fig. 2-10 AIHaS

라. Differential형 AIHaS



전술한 AIHaS는 LIHaS를 다수 배열한 것으로서, 결과적으로 수직자화속의 미 소한 자기장의 왜곡을 검출하기 곤란하다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구 에서는 레일 매립형 자기카메라의 수직자화법에 대처하기 위하여 Differential형 LIHaS를 Fig. 2-11에 나타낸 바와 같이 다수 배열한 Differential형 AIHaS를 개발하였 다. 그림에서 수직방향으로 520μm 간격으로 배열된 인접한 홀 센서는 Differential형 의 배선구조를 가지고, 이러한 Differential형 홀 센서는 그림의 수직방향으로 1.04mm 및 수평방향으로 780μm의 간격으로 배열된다. 본 연구에서는 총 106×48 개의 홀 센서가 53×48개의 Differential형으로 배열된 2개의 웨이퍼를 기본 모듈로 하여, 총 27개의 모듈이 차륜의 1회전에 해당하는 영역을 검사하기 위하여 배치되 었다. 결과적으로 각 차륜의 1/2을 검사하기 위해서 137,376개의 Differential형 홀 센서를 배열하였다. 한편, 차륜의 전 면적을 검사하기 위해서는 2회전이 필요하다.

3. 증폭 및 필터

가. 증폭

수직자화속의 미소한 자기장의 왜곡을 검출하기 위하여 Differential형 LIHaS에 서 발생한 V_H(Hall Voltage) 증폭이 필수적이다. Fig. 2-12와 같이 홀 센서의 출력전압, 즉 전위차이를 차동식 연산증폭기(이하 OP-Amp) 회로를 통해 증폭하여 출력하였다. 고정밀 차동 증폭을 위해 높은 동상신호제거비(CMRR, Common Mode Rejection Ratio) 를 갖는 INA128U를 도입하였다. INA128U는 한 개의 외부 저항(R_G)을 연결하여 저 항값을 변화하는 것만으로도 쉽게 0~80dB의 이득값을 얻을 수 있다. 차동 증폭 회 로에 연결되는 두 개의 전압 플로어(A₁, A₂)들은 작은 오차를 갖으면서도 높은 입력 임피던스를 보인다. 또한, 구동 저항이 R_G이상으로 불균형 되는 것을 허용할 수 있 다. 한편, 차동 증폭회로의 이득은 Eq. (1)에 나타낸 바와 같이 R_G 에 의하여 결정 된다.

$$Gain = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \tag{1}$$

이러한 구조는 열전대의 증폭, 의료 계측용, 데이터 수집 등에 사용되며, 우수 한 동특성을 가지고 있다는 점에서 저잡음 고속 자기카메라의 증폭 회로로 도입하 였다.



Fig. 2-12 INA128U를 사용한 OP-Amp의 회로도

나. 필터

일반적으로 아날로그 필터는 수동 소자인 저항(R), 콘덴서(C), 인덕터(L)의 세 가지 기본 요소를 조합하여 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 매 우 중요한 역할을 하는 것은 명백하지만, 이러한 필터는 신호의 디지털화가 일어나 기 전에 신호 상태의 조절 단계에서 일반적으로 사용된다. 여기에서 신호상태의 조 절이란, 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 잡음성분으로 인한 데이터의 왜곡을 방지하기 위 하여 아날로그 필터를 도입하였다. 즉, 잡음 성분이 대체적으로 높은 주파수 대역 을 가진다는 점에서 버터워스(Butterworth) 저역통과 필터(이하 아날로그 LPF)를 도 입하였다. 즉, 전술한 차동 증폭 신호처리 후 Fig. 2-13에 나타낸 바와 같이 LPF를 통하여 잡음을 감소시킨 후 A/D 변환 하였다

18



Fig. 2-13 버터워스(Butterworth) 저역통과 필터

4. A/D 변환

결함으로부터 발생한 누설 자속 분포는 배열된 자기센서 및 차동 증폭회로, 아 날로그 LPF에 의하여 높은 S/N비를 가진 전기신호의 분포로 변환된다. 변환된 전 기신호의 분포는 A/D 변환기와 μ-processor에 의하여 저장, 연산 및 처리 된다. 본 연구에서는 Fig. 2-14에 나타낸 바와 같이 8채널 멀티플랙서와 1bit의 부호비트와 12bit의 변환 비트의 연속근사형(Sucessive Approximation) A/D 변환기인 Analog Devices사의 AD7329를 전용 A/D 변환기로 채택하였다.

AD7329는 주로 빠른 처리 속도가 요구되는 영상 신호 처리, 디지털 메모리 오 실로스코프, 레이더에 사용된다. AD7329와 같은 연속근사형 A/D 변화기는 순차비 교형 레지스터(SAR, Successive Approximation Register)를 사용하여 클럭 입력에 의해 최상위 bit(MSB)에서 최하위 bit(LSB)순으로 비교수정하는 방법으로 D/A 변환기의 출력전압값을 아날로그 전압에 근사시킨다. 또한 센서 입력에 대한 출력 신호의 정 밀도(accuracy)가 우수하며, 정밀도의 오차는 주로 소자 내부의 기준 전압, 전압 비 교기, Gain 저항 등에 의해 ±8.5 LSB 오차가 발생한다. 20MHz의 클럭일 때 최대 변 환 시간(Conversion time)은 1.9mS이며, 한 채널의 A/D 변환에 300ns 지연이 발생한 다.

한편, μ-processor는 A/D 변환 시간 보다 변환된 데이터를 읽어 들이는데 긴 시 간이 소요되므로 고속 신호 처리를 어렵게 하는 요인이 된다. 따라서 A/D 변환 펄 스 신호에 동기하여 Asynchronous First-In First-Out (FIFO) Buffer Memory(1k×9bit, CYPRESS, CY7C425)에 직접 저장되도록 하여, 샘플링 속도가 매우 빠른 경우 메모 리에 직접 저장하는 DMA방식을 도입 하였다. 이러한 A/D 변환기 및 메모리에 의 하여 -5~5V의 입력 범위에서 2.441mV의 분해능을 얻었다.



Fig. 2-14 A/D 변환 회로도

5. 소프트웨어

가. 디지털필터

디지털 필터는 결함 평가 부분의 전처리 과정으로, 자기카메라의 구성 요소 중 가장 마지막 단계로 측정하고자 하는 신호로부터 잡음을 제거하기 위하여 아날로 그 필터와 병행하여 디지털 필터를 사용한다. 디지털 필터는 크게 FIR(Finite Impulse Response) 과 IIR(Infinite 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, 필 터의 종류에 따라 샘플링 주파수와 다른 차단 주파수 입력은 일정하다. 즉, 표준화 된 샘플링 주파수를 사용하여 디지털 필터를 디자인할 수 있다. FIR 필터는 c_k는 필 터의 계수, xn는 입력 신호, yn가 출력 신호일 때 Eq. (2)로 표현된다.

$$y_{i} = \sum_{k=0}^{k-1} x_{i-k} \times c_{k}$$
(2)

FIR 필터의 요점은 c_k를 필터의 계수를 설정하는 것이다. FIR필터 함수는 실제 로 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 설 계할 수 있다. 다음은 일반적으로 사용되는 창함수(Window Function)들의 특성(감쇠 와 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 이룰 수 있으며, 또한 전 이 대역폭에 의해서도 결정된다. 전이 대역폭은 지정된 차단 주파수에서 디자인 된 감쇠값을 얻기위해 정의된다. 큰 전이 대역폭값은 보통 보다 나은 감쇠를 제공한 다.

다음으로 무한 임펄스 응답인 IIR필터는 수학적으로 Eq. (3)과 같이 가정할 수 있다.

$$y_{i} = \sum_{k=0}^{n-1} b_{k} \times x_{i-k} - \sum_{k=1}^{m} a_{k} \times y_{i-k}$$
(3)

여기서 a_k 와 b_k 는 필터의 계수이다. 현재 필터의 출력인 y_i 는 현재에 의존하 고, $x_{i,k}$ 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 4가 지의 주요한 형태의 필터로는 Butterworth filters, Chebyshev filters, Inverse Chebyshev filters, Elliptic filters가 있다. 각각의 Lowpass, highpass, bandpass, and bandstop filters 필 터의 형태로 설계된다.

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

한편, 체비세프 필터는 통과 대역에서 등리플 응답을 갖고, 저지대역에서 진폭 응답은 증가하지 않고 감소한다. 이 필터는 버터워즈 필터보다 더 예리한 Rolloffs 를 갖는다. 역 체비세프 필터는 체비세프 필터와 유사하며, 저지대역에서 리플생성 이 제외되며, 주파수 응답은 통과대역에서 평평하다.

만약 통과대역과 저지대역에서 등리플 응답을 허용하고 싶다면, Elliptic 필터를 사용해야 한다. Elliptic는 버터워즈 필터 혹은 체비세프 필터와 비교하여 같은 차수 를 위한 예리한 Rolloffs를 가지고 있다. 크기 제곱 응답에 있어서 최적의 기능을 나타낸다. 그러나 이 필터는 통과대역에서 매우 비 선형적인 위상 응답을 갖는다 이것은 여러 응용에서 바람직하지 않는 것이다 FIR필터에 의해 할 수 있는 것처럼 IIR필터 함수의 계수 지정을 할 수 없다. 왜냐하면 IIR필터는 필터링 수행과 동시 에 필터의 계수를 추정하기 때문이다.

본 연구에는 처리 속도와 구현의 복잡성에 영향을 미치는 필터의 차수와 데이 터의 왜곡을 결정하는 위상 특성을 고려하여 IIR필터를 선택하였다. FIR필터의 사 용할 경우, 대부분의 설계 기법들은 유한한 길이의 데이터에 대해 필터링 후 정확 히 선형 위상 응답을 나타내지만 자기카메라의 결함 평가 원리인 $\partial V_{H}/\partial x$ 영상 처리에 부정적인 영향을 미치는 리플 응답도 나타나게 된다. 반면에 IIR필터의 많 은 설계 기법 중 상당히 선형적인 위상응답을 제공할 뿐만 아니라 통과 대역에서 리플응답이 없고, 진폭의 선형성 유지가 필수적인 상황에 최적으로 사용할 수 있다. 따라서 결함정보 평가 부분의 전처리 과정의 디지털 필터로 버터워즈 필터를 사용 하였다.

22

나. 배경 제거 알고리즘

배경 제거 알고리즘은 홀 센서로부터 획득한 데이터에서 일정구간 이상의 데 이터만 출력하여 보여준다. 결함 정보의 한계(V_C)보다 큰 V_H만을 표시하여 결함의 좌표, 길이, 형상, 방향 체적 등의 추정이 가능하다. 본 논문에서는 결함정보 한계 (V_C)를 자동으로 지정하여 상기 결함신호 히스토그램의 횡축의 최대값(V_M)과 상기 1차 자기영상의 잡음의 세기(V_N)의 1/4, 1/8, 1/10에 해당하는 값을 기준으로 하였다. 상기 기준값 이상의 분포를 반복하여 표현함으로써, 큰 결함이 생성하여 진전하는 과정 및 주변의 작은 결함이 생성하는 과정을 표현할 수 있도록 하였다 [8, 20].

제 3장 매립형 시스템의 검증

본 연구에서는 레일 매립형 차륜검사시스템을 개발하기 위하여 수평 및 수직 방향의 자화를 이용한 선행연구를 통해 본 시스템의 가능성을 검증하였다.

제 1절 구성

본 실험데이터는 차륜설치형 시스템을 이용한 연구로 각각 수평 및 수직 방향 으로 차륜을 자화시켜서 연구하였다.

1. 자원





Fig. 3-1은 수평방향 자화를 수치해석으로 나타낸 것으로 차륜의 형상에 맞게 제작된 요크에 코일을 감아서 DC 전류를 흘려서 자기장을 발생시켰다. 자화의 방 향은 차륜의 곡선면을 따라 자화되어서 차륜이 회전방향과 수직일 경우에 결함검 출 능력이 더 크다.

나. 수직

Fig. 3-2은 시험편과 수직한 방향으로 자화되는 것을 개념화한 것으로 레일 매 립형 시스템에 적용한 방법이다. 전자석이 아닌 영구자석을 통해 자화를 시켜서 별 도의 추가적인 전원 및 시스템을 간소화시켰다. 또한 수직방향으로 할 경우 Single 형의 홀 센서는 쉽게 포화되어 탐상이 어렵기 때문에 Differntial형의 홀 센서를 사 용하여 결함부위의 왜곡의 차이를 측정하였다.



Fig. 3-2수직자화의 개념도

2. 센서

수평방향의 자화에는 Single형 LIHaS를 수직방향의 자화에는 Differntial형 LIHaS를 이용하여 연구하였다 [7, 10, 18-21].

가. 곡면형 LIHaS

Fig. 3-3은 차륜의 형상을 이용하여 제작된 센서로 후면에 동일한 형상으로 제 작된 자화기를 통해서 시험편과 수평방향으로 자화된다. Single형의 LIHaS를 사용하 였고, 플레이트 0.78mm와 플렌지 1.04mm의 간격으로 배열되어있다 [20].



Fig. 3-3 곡면형 LIHaS

나. Differential형 LIHaS

레일 매립형 차륜 답면 탐상 시스템에 탐상하는 곳은 답면부로서 현재 플렌지 부분의 결함 탐상 조건이 불필요하므로 Fig. 2-9와 같은 일반적인 Differential형 LIHaS를 사용하여 연구하였다. 시험편과 수직방향으로 자화시키기 위해서 센서의 측정범위와 비슷한 크기의 영구자석을 후면에 부착하였다. 그리고 0.52mm 크기의 홀 센서를 64개 배열한 센서의 측정범위보다 시험편의 탐상범위가 더 넓은 관계로 두개의 데이터를 통합하여 영상을 나타내었다 [21].

3. 신호처리회로

데이터의 획득에 따른 신호처리회로는 각각 홀 센서의 전위차를 통해 발생하 는 신호를 필터를 거쳐 OP-Amp를 통해 증폭한다. 증폭된 데이터는 분배기 (Distributor)를 통해 각각의 정적 기억장치(Static Memory)에 임시 저장된다. 저장된 데이터는 μ-Processor에 의해 통합되고 USB 인터페이스(Interface)를 거쳐서 컴퓨터 에 저장되어 모니터에 자기영상을 출력한다.



Fig. 3-4 신호처리회로

제 2절 실험 및 고찰

1. 시험편

사용된 시험편은 한국철도기술연구원에서 제공해준 실제 무궁화호 철도차량에 사용되었던 차륜으로 Fig. 3-5과 같다. 기존에 사용되면서 가지고 있던 자연결함 및 실험을 위해 인공적으로 제작한 인공결함이 도입되어있다.



Fig. 3-5 실제 사용되었던 무궁화호 차륜

차륜에 도입된 결함은 인공결함은 Table. 3-1에 자연결함은 Table. 3-2에 각각 형 태와 길이, 넓이, 깊이, 체적의 정보를 나타냈다.

2. 실험결과

가. 수평자화 및 LIHaS의 경우

수평자화 및 곡선형 LIHaS를 사용한 실험 결과의 경우 Fig. 3-6에서 보는 바와 같이 각각의 데이터를 Normal, Filtered, $\partial V/\partial x$ 를 적용하여 표현하였다. 각각의 결함 부위에서 발생한 자기장의 왜곡을 LIHaS 및 신호처리회로를 통해 수치화된 데이터 로 시각화하였다. Fig. 3-6에서 결함의 형상 및 길이 등이 표현되며 위치 추정이 가 능하다. 또한 깊은 결함일수록 왜곡되는 자기장의 크기가 큰 것을 통해서 깊이 추 정가능하며 최종적으로 결함 체적의 추정이 가능하다. 3차원 레이져변위장치를 통해서 측정된 실제 체적값과 홀 센서를 통해서 측정 된 데이터를 Eq. (4)에 의해 계산된 체적값과 비교 계산하였다. 다음의 결과를 Fig. 3-7과 같은 그래프로 나타내어 실제 체적값과 계산된 체적값과의 연관성을 확인하 였다. 위의 결과를 토대로 추정된 체적값을 가지고 Eq. (5)를 적용하여 실제 체적값 을 유추할 수 있다.

$$\frac{\partial V_{H}}{\partial x}\Big|_{Total} = \sum_{i=1}^{L_{C}/2S} \left[Max \left(\frac{\partial V_{H,i}}{\partial x} \right) + Abs \left(Min \left(\frac{\partial V_{H,i}}{\partial x} \right) \right) \right]$$

$$V_{C} = C_{1} \cdot \left(\frac{\partial V_{H}}{\partial x} \Big|_{total} \right)^{C_{2}}$$
(5)

또한 결함정보 한계(V_C)를 각각 1/2, 1/4, 1/6, 1/8, 1/10을 기준으로 한 영상을 통 해 발생된 결함이 진전하는 과정 및 육안으로 식별되지 않은 미세한 결함 등을 볼 수 있다 [8].

Table 3-1 시험편에 도입된 인공결함정보(수평자화) [mm, mm³]

Crack	Hole shape					
No.	Dept	h	Diameter	Volume	Estimated Volume	
a	1		1.8	2.8	12.1	
b	1.4		3.0	10.9	38.9	
c	1.7		4.9	27.0	90.0	
đ	1.3		3.9	16.0	51.8	
e	1.2		2.9	9.0	9.0	
ſ	1		2.0	2.6	22.1	
g	1.2		3.0	9.8	26.8	
h	1.5		4.0	17.8	42.7	
í	1.2		4.6	15.4	63.3	
Crack			Sli	t shape		
No.	Depth	Widt	h Length	Volume	Estimated Volume	
(j)	1	2.3	20.8	14.7	56.5	
k	0.7	2.0	17.0	13.0	42.1	
1	0.4	2.0	19.6	17.1	48.5	
m	1.1	2.1	19.8	19.4	49.6	
n	0.7	2.3	18.5	15.9	40.9	
0	0.5	2.5	17.3	10.8	27.0	
p	1	2.4	19.0	19.5	118.6	
Q	0.7	1.9	17.7	13.7	73.5	
r	0.5	1.9	16.3	11.7	68.9	

Crack No.	Shape	Width	Length	Depth	Volume	Estimated Volume
1	Scratch	2.9	3.6	0.2	0.6	3.9
2	Shelling	3.0	3.4	0.5	6.3	13.8
3	Shelling	3.3	3.2	0.6	7.4	45.7
4	Scratch	4.2	9.2	0.2	0.2	5.6
5	Thermal crack	4.0	3.9	0.4	1.6	20.7
6	Disintegration	12.6	8.5	0.7	75.9	80.8
7	Thermal crack	2.8	1.8	0.3	0.9	22.6
8	Thermal crack	5.8	2.8	0.3	3.9	28.9
9	Scratch	1.5	3.5	0.3	0.1	2.5
10	Shelling	3.3	5.3	0.6	21.4	45.4
11	Shelling	7.0	10.2	0.6	17.4	29.0
12	Scratch	7.9	14.4	0.3	2.6	12.0
13	Scratch	4.5	7.9	0.3	3.7	25.1
14	Scratch	1.3	4.8	0.2	0.2	4.3
15	Shelling	4.0	7.5	0.3.	2.8	30.5
16	Shelling	4.6	6.5	0.5	3.6	12.2
17	Chop	8.7	6.2	0.3	6.9	11.9
18	The early Shelling	5.6	2.1	0.1	0.7	16.6
19	The early Shelling	2.7	4.2	0.2	0.8	21.2
20	Chop	3.7	7.0	0.2	0.5	2.8
21	Scratch	5.3	25.3	0.3	1.8	102.0
22	Thermal crack	1.7	4.4	0.2	0.3	11.8
23	Protuberance	2.5	7.4	0.4	1.8	6.6
24	Shelling	2.8	5.5	0.3	8.0	32.7
25	Scratch	22.0	33.1	0.2	0.2	44.0

Table 3-2 시험편에 도입된 자연결함정보(수평자화) [mm, mm³]

Table 3-1과 Table 3-2에서 시험편으로 사용된 차륜의 결함정보를 형상과 길이 깊이 등으로 구분하여 표시하였고, 또한 3차원 레이져 미소변위 장치로 측정한 체 적량과 측정된 데이터로 계산된 체력량을 표시하였다.





Fig. 3-7 실제체적과 수평자화와 Single형 LIHaS를 사용한 계산된 체적값의 비교

나. 수직자화 및 Differential형 LIHaS의 경우

수직자화를 및 Differentialg형 LIHaS를 사용한 실험의 경우 Fig. 3-8에서 보는 바와 같이 Lift-off를 각각 3±0.35mm, 5±0.35mm, 7±0.35mm 로 하여 조건을 다르게 하여 실험하였다. 또한 0.52mm의 64ch Differential형 LIHaS의 측정범위는 약 33mm 로 답면부의 전체길이보다 짧은 관계로 측정범위를 나누어 탐상 후 통합하였다. 선 행실험의 결과와 마찬가지로 획득한 자기영상에서 결함의 형상, 길이, 위치, 깊이 등을 확인할 수 있다.

Table 3-3	시험한테 소법한 /	이 민결 팀	`8 ≖ (⊤^	ゴヘヨリ	,
Crack No.	shape	width	length	depth	volume
1	Thermal crack	4.0	3.9	0.35	1.60
2	Thermal crack	2.8	1.81	0.32	0.87
3	Thermal crack	5.8	2.84	0.33	3.95
4	Shelling	4.01	7.46	0.3	2.81
5	The early Shelling	5.57	2.1	0.14	0.72
6	The early Shelling	2.74	4.2	0.24	0.79
7	Flat	1.73	4.41	0.21	0.30
8	Scratch	21.98	33.12	0.22	0.15

Γable 3-3 시험편에 도입된 자연결함정보(수직자화)[mm, mm³]

Creat No.	Hole shape					
Crack INO.	depth	dian	diameter			
a	1	1.84		2.79		
b	1.39	2.97		10.86		
c	1.74	4.93		26.99		
d	1.34	3.	92	16.24		
e	1	1.97		2.64		
f	1.16	2.98		9.79		
g	1.45	3.96		17.80		
h	1.23	4.	15.35			
Creat No.	Slit shape					
Crack No.	depth	width	length	volume		
í	1	2.28	20.83	14.68		
ý	0.65	2.03	17.03	12.95		
k	0.4	2.01	19.6	17.08		
1	1.06	2.07	19.77	19.43		
Ŵ	0.74	2.26	18.5	15.92		
n	0.47	2.48	17.26	10.94		
0	1	2.35	19.04	19.45		
p	0.7	1.93	17.7	13.74		
Q	0.5	1.87	16.27	11.65		

Table 3-4 시험편에 도입된 인공결함정보(수직자화) [mm, mm³]

Table 3-3과 Table 3-4에서 답면부의 스캔범위에 해당하는 시험편의 결함 정보를 나타낸다. Lift-off 3±0.35mm에서 측정결과 No. 5와 No. 8 자연결함을 제외한 모든 결 함에 대해서 측정을 하여 자기영상으로 표현하였다. 또한, Lift-off 5±0.35mm에서도 거의 동일한 검출능력을 가지고 있으며, 인공결함의 경우 Lift-off 7±0.35에서도 충분 한 검출능력을 가졌다.

Fig. 3-9의 (a)와 (b)는 획득한 데이터를 Eq. (6)을 적용하여 계산된 측정값과 실 제 체적값 및 체면적값을 비교한 그래프다. 각각의 형상에 따라 실제 체적 및 체면 적이 증가함으로 계산된 측정값 역시 비슷한 비율로 증가하여 실제 결함값의 추정 이 가능하다. 또한, 체적 및 체면적 그래프를 비교한 결과 Differential형의 경우 실 제 체적값보다 체면적값이 계산된 측정값과 더 관련성이 있다.

$$\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left(\Delta V(i,j) \right)^{2} \Big|_{>100}$$
(6)



Fig. 3-8 수직자화와 Differential형 LIHaS를 사용한 자기영상



Fig. 3-10은 Lift-off에 따른 측정값을 원의 크기로 나타내고 면적과 체면적을 비 교 표현한 것이며, Lift-off 5±0.35mm((b))에서도 충분한 결함 검출 능력을 가지는 것 을 알 수 있다.



(a) 3±0.35mm, (b) 5±0.35mm, (c) 7±0.35mm

제 4장 현장 적용 실험

제3장에서 제안한 수직자화 및 Differential형 자기센서 배열을 이용하여 차륜에 존재하는 결함을 차량 이동시에 검출할 수 있는지 확인하기 위하여 Differential형 AIHaS를 수직방향으로 1.04mm 및 수평방향으로 780µm의 간격으로 배열하였다. 본 연구에서는 총 106×48개의 홀 센서가 53×48개의 Differential형으로 배열된 2개의 웨이퍼를 기본 모듈로 하여, 총 27개의 모듈이 차륜의 1회전에 해당하는 약 3m 구 간을 검사하기 위하여 배치되었다. 결과적으로 각 차륜의 1/2을 검사하기 위해서 137,376개의 Differential형 홀 센서를 배열하였다.

제 1절 구성

1. 차량인식시스템

차량이 정비창에 진입하고 이를 검측 및 분석하고자 하는 탐상 시스템은 작업 자에 의하여 실시될 수 있다. 그러나 차량이 센서 영역 또는 계측시스템 영역에 진 입하는 것에 대해 작업자에 의하여 일일이 수동 제어 및 확인할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 작업자가 시스템을 ON한 후에 시스템의 탐상 영역에 들어가는 차 량의 인식을 통한 자동제어를 위한 차량인식 시스템을 도입하였다. 참고로, 본 절 에서 설명하는 차량인식은 무인탐상시스템에 차량이 진입하여, 모든 시스템이 즉각 적인 측정이 가능한 측정대기상태로 진입하기 위한 것이다.





Fig. 4-1 차량인식 시스템의 구성

차량인식시템의 원리는 Eye-safe 영역의 적외선광을 조사하고, 차량이 통과할 때 차단된 빛으로 트리거 신호를 발생하도록 하였다. 발생된 신호를 이용하여 탐상 시스템을 측정대기상태로 변경 후 차륜인식스템의 제어를 통해 탐상되게 한다.

2. 센서기구물

전술한 바와 같이 본 시스템은 센서 및 자원이 레일에 매립되는 구성이다. 차 량의 하중을 충분히 견디면서 차륜의 탈선을 방지하기 위하여, 레일의 일부분을 가 공하여 플랜지부분과 차륜 답면의 절반을 항상 지지할 수 있도록 설계하였다. 또한, 센서가 삽입된 부분은 차륜이 1회전했을 때 진전한 거리(2903~2670mm)보다 약간 긴 3000mm가 되도록 하였다. Fig. 4-2의 (a)는 전체 차륜답면부의 안쪽 절반에 해당 하는 부분을, (b)는 바깥쪽에 해당하는 부분으로 구분하여 제작하였으며, (c) D-type은 현장 적용 실험에서 사용할 목적으로 설계되었다. 안정성을 고려하여 검증되지 않 은 레일 기구물(Fig.4-2 (a), (b))을 사용하지 않고 차륜 답면의 바깥쪽 부분을 탐상 할 수 있도록 최소한의 가공만을 하였다. 또한, 센서기구물 설치를 위하여 레일에 가공 및 용접을 도입함으로써 초래할 수 있는 레일의 변형이나 파손을 방지하고자, Fig.4-3과 같이 별도의 기구물을 설계 및 제작하여 설치하였다.

또한 차륜의 답면을 측정하는데 있어서 동일한 Lift-off를 유지하고, 센서의 파 손을 방지하기 위하여 센서기구물에 완충장치를 설치하였다. 이를 통해서 차륜이 센서영역을 지나갈 떼, 중량에 의한 센서의 파손을 방지할 뿐만 아니라 차륜 답면 에 최대한 근접하게 측정을 하여 안정적인 데이터의 획득이 가능하다. Fig. 4-4와 Fig. 4-5는 각각 센서기구물의 설계도면 및 제작된 센서기구물을 보여준다.

36









Fig. 4-5 제작된 센서기구물

3. 센서부

본 시스템에서는 차륜 답면을 검사하기 위해 레일의 일정구간을 가공을 하여 센서와 레일상의 위치가 평행하게 하여 측정하는 시스템이다. 그리고 피측정체를 자화시키 방법으로 수직자화 방법을 이용하여 Differential형 AIHaS를 사용하였다.

가. 자원

본 연구에서는 보다 작은 전력으로 센서 및 자원을 운용하기 위하여, 영구자석 (N35, Nd-Fe-B)을 자원(磁源, magnetic source)으로 하였다. 즉, Fig. 4-7에 나타낸 바와 같이 수직방향의 자화방향을 가지는 영구자석(125*40*5mm)의 상판에 PCB에 실장 한 자기센서배열을 2차원으로 배열(AIHaS)하였다.



Fig. 4-6 수직방향 자화의 수치해석



Fig. 4-7 영구자석(Nd-Fe-B)과 Differential형 AIHaS PCB

나. Differential형 AIHaS

사용된 센서는 홀 센서로 반도체에 전류를 입력하고, 그 표면에 수직인 방향으 로 자기장이 인가되면 전자의 왜곡 및 이에 기인한 전압차가 발생하는 원리를 이 용한다. 따라서, 수직방향의 고강도의 자기장이 인가되면 홀 센서의 출력은 포화에 이르게 된다. 따라서, 본 연구에서는 두 개의 홀 센서를 차동식으로 배열하고, 그 차이를 측정함으로써 포화를 방지하고 결함의 존재에 기인하는 국부적인 자기장의 분포를 측정하였다.

홀 센서는 Single형과 Differential형에 상관없이 2개의 입력과 2개의 출력으로 구성되며, 이를 2차원으로 배열하면 센서의 개수에 비례하여 배선수가 기하급수적 으로 증대한다. 이는 신호처리는 물론 한정된 공간에서의 배선에 매우 곤란한 결과 를 초래하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 4-8 (a)에 나타낸 바와 같이 전원입력 부를 스위칭하고, 출력부를 하나로 결선하는 병렬식 신호처리로 이러한 문제를 해 결하였다.







4. 신호처리회로

가. Switching

스위칭 부는 ADG732(ANALOG DEVICES CO., LTD.) 1개와 US6K2(ROHM CO., LTD.) 157개로 구성하였다. 32채널 아날로그 멀티플랙서인 ADG732(ANALOG DEVICES CO., LTD.)는 주로 DAQ시스템이나 통신 시스템, 의학 계측, 오디오나 비 디오 스위칭에 사용되며, 적은 소모 전류와 고속 스위칭이 가능 하고, 또한 n채널 MOFET인 US6K2도 고속 스위칭에 주로 사용 되므로 면적형 자기카메라의 스위칭 부로 채택하였다. US6K2는 2개의 스위치를 포함하며, 입력 신호에 대한 출력 신호 의 정밀도가 우수하며, 약 12ns의 지연시간(Turn-on delay time)을 갖는다.

한편, 스위칭시 면적형 자기카메라의 국소영역의 전원만을 인가하게 되는데, 이때 VCC 만 스위칭하게 되면 근접한 자기 센서들 간에 간섭으로 인해 많은 잡음 이 발생하게 된다. 본 연구에 사용된 스위칭부는 VCC뿐만 아니라 GND를 동시에 스위칭 함으로써 이를 최소화 하였다. 이러한 스위칭부에 의하여 면적형 자기카메 라의 센서의 개수에 상관없이 최소100us 마다 스위칭이 가능하도록 하였다.





Fig. 4-10 스위칭 회로

나. Amplifying

홀 센서를 이용한 자기장의 변화량을 측정한 데이터를 OP-Amp를 사용하여 증 폭하였다. INA128U의 특성인 높은 동상신호제거비를 통해 고정밀 차동증폭회로를 구성하여 저항(R_G)를 33Ω을 사용하여 63.6dB의 증폭비를 가지는 데이터를 취득하 였다.



Fig. 4-11 병렬 증폭 회로

다. Filtering

철도 차량 같은 대형 구조물의 경우 이동시 많은 잡음을 가지고 있어 데이터 취득에 있어서 많은 애로사항을 가지고 있다. 또한, 높은 증폭비를 가지고 데이터 를 증폭함으로 많은 잡음을 포함하여 Filtering이 필요하다. 본 연구에는 처리 속도 와 구현의 복잡성에 영향을 미치는 필터의 차수와 데이터의 왜곡을 결정하는 위상 특성을 고려하여 IIR필터와 버터워스(Butterworth) 저역통과 필터(이하 아날로그 LPF)를 선택하였다. 또한, 결함정보 평가 부분의 전처리 과정의 디지털 필터로 한 국 내쇼날 인스트루먼트 사(National Instrument Co. Inc.)의 Measurement Studio Analysis Library의 무한 임펄스 응답 필터(IIR) 중 Butterworth filters의 Lowpass Filter를 사용 하여 필터를 소프트웨어적으로 실현하였다.

라. A/D converting

8채널 멀티플랙서와 1bit의 부호비트와 12bit의 변환 비트의 연속 근사형 (Sucessive Approximation) A/D 변환기인 AD7329를 전용 A/D 변환기로 채택하여 -5~ 5V의 입력 범위에서 2.441mV의 분해능을 가진다.



Fig. 4-12 Analog-to-digital converting circuits and photograph

마. Interfacing

A/D 변환기와 μ-processor에 의하여 변환된 전기신호는 USB인터페이스에 의하 여 컴퓨터에 저장된다. Fig. 4-13에 보인 바와 같이 160×100×1.6mm 크기의 1개의 Sub board와 Power board, 8개까지 확장 가능한 Main board의 슬롯 타입 형태로 구성 하였다.

Main board는 μ-processor, CPLD(Complex Programmable Logic Device), 데이터 전송 부, Display부로 구성되며, 최대 8개까지 확장 가능하게 하며 총 256채널의 전압 신 호를 동시에 A/D 변환 및 저장을 실행시키고, 순차적으로 컴퓨터에 전송할 수 있 다.

Power board는 시스템 외부에서 정전류 장치를 이용하여 제공 받으며, 입력된

전원은 정류 및 노이즈 저감 회로를 통과하여 각각 센서, 코일(자원), 시스템 컨트 롤 전원으로 분배 된다. 효율이 좋고, 열 발생이 적기 때문에 소형/경량화가 가능하 며, 대용량의 정전압, 정전류 구동이 가능하다는 장점이 있다.



Fig. 4-13 Interface circuits and photograph

Sub board는 μ-processor, CPLD, A/D 변환을 위한 신호 입력부로 구성하였다. μ-processor (ATMEGA 128)는 효율적 제어신호를 위한 CPLD와 데이터 저장 및 전송등의 다목적 장치를 추가 연결하여 구성하였다. 칩 내에 128k바이트의 FLASH 메모리를 이용하고, 512k바이트의 SRAM(K6X4008C1F)을 외부에 연결하여 A/D 변 환되어 FIFO 버퍼메모리에 임시 저장된 변환 데이터를 저장하였다. 복잡한 디코딩 을 위해서 전용 디코더 칩인 ALTERA (EPM3128A)를 사용하였다. ALTERA EPM3128A는 CPLD의 하나로써, 칩 내부에 로직을 프로그램 해 넣을 수 있는 소자 이다. 일반적으로 TTL이나 CMOS 소자들은 동일한 기능을 수행하는데 게이트들을 하나의 패키지에 담은 소자인데 반하여 PLD는 자신이 원하는 다양한 로직을 하나 의 패키지로 구현할 수 있는 장점이 있다. 최대 96편까지 I/O포트를 사용할 수 있 는 ALTERA에 Sub board의 SRAM 어드레스 제어 신호, A/D 변환의 제어 신호, A/D 변환의 상태 표시 신호를 위한 pin을 할당하고, 데이터 전송을 위해 USB 어드레스 신호와 다목적 신호를 위한 pin을 할당하여 구성하였다. 데이터 전송은 FT2232HL 를 사용하였다. USB 2.0 (480Mbits/second)을 지원하며, 특정한 펌웨어를 필요로 하지 않는다. FT245 비동기식 FIFO모드를 사용하였으며 데이터 전송방식은 USB 대량 데 이터 전송모드(Bulk data transfer mode)로써 512 byte의 데이터를 패키지 형태로 컴퓨 터에 전송한다. Sub board의 SRAM과 연결된 어드레스 신호, USB 컨트롤 신호 연결 로 구성하였다.

5. 소프트웨어

전체적인 프로그램의 운용방법에 대해서 설명한다. 차륜답면탐상시스템의 측정 프로그램은 크게 Measurement와 Analysis를 구분된다.

Measurement는 시스템을 구동하여 차륜답면의 정보를 획득하는 부분으로 Project Name에 File Name을 입력 한 후 START 버튼을 누름으로서 데이터를 실시간 으로 관측하면서 저장된다. 센서부에서 취득한 데이터는 Display 부분에 자기영상 을 나타내어 실시간으로 관측이 가능하다. 얻어진 데이터를 표현하는데 있어서 Normal과 $\partial B/\partial y$ 등을 Backdata로 영상처리하여 표현가능하다. 또한, 모든 데이터는 즉각적으로 새로운 폴더를 생성을 하여 동일한 파일명의 데이터를 순차적으로 저 장하여 각각의 차량 및 차륜에 대한 데이터베이스(Database)가 용이하다.

Analysis는 프로그램상에서 저장된 데이터를 불러와서 분석하는 프로그램으로 전환된다. 저장된 데이터를 불러오기 위해 FILE OPEN 버튼을 눌러서 분석하고자 하는 파일을 불러온다. 각각의 Project Name으로 생성된 폴더에서 한 개의 파일을

46

선택하여 불러오면 자동적으로 해당 폴더의 전 데이터를 불러온다. 실시간으로 관 즉시 관측자가 놓친 부분이나 불명확부분의 재확인이 가능하다. 또한 데이터의 다 양한 알고리즘 적용을 통한 해석이 가능하다.



Fig. 4-14 Software

제 2절 실험 및 고찰

1. 실내 모의 실험

앞 절에서 설명한 바와 같이 레일 매립형 시스템을 위한 센서부, 센서기구물, 신호처리회로, 소프트웨어 등으로 구성하여 Fig. 4-15와 같이 설치하였다.



Fig. 4-15 레일 매립형 차륜 답면 탐상 시스템의 구성

실제 규격의 레일의 일부분에 특수하게 가공된 I-type과 O-type의 레일을 설치 하여 차륜 결함 탐상 시스템의 센서부가 설치 가능하게 하였다. 센서부 위를 지나 가는 차륜은 수직방향으로 발생하는 자기장에 의해 자화되고 결함이 있을시 발생 하는 왜곡된 자기장을 측정하게 된다. 측정된 데이터는 신호처러회로에 의해 증폭, A/D 변환, Switching 등을 통해서 전환되고 이를 인터페이스(Interface)를 통해서 컴 퓨터에 저장하여 데이터베이스(Database)를 구축한다.

상기 센서와 자원사이의 간격을 일정하게 유지하고, 센서기구물과의 마찰에 의 한 손상을 최소화하기 위하여 Fig. 4-16에 나타낸 바와 같은 별도의 센서고정용 기 구물을 제작하였다. 이 기구물은 센서와 자원사이의 간격을 일정하게 하는 한편, 향후 전자회로를 내장할 수 있도록 하였다.



Fig. 4-16 차륜 답면부의 구분된 센서측정범위

Fig. 4-17에서 보이는 차륜 인식 시스템은 광학센서를 사용하여 차륜이 센서부 의 시작점을 지나가는 것을 인식하여 자동적으로 시스템이 구동되도록 제작하였다. 차량 인식 센서를 지나가는 차량으로 차륜 탐상 시스템을 대기상태로 변경되고 차 륜 인식을 통해서 실시간 결함 검출 및 데이터의 저장을 시작한다.



Fig. 4-17 차륜 인식 시스템

차량이 지나갈 시 중량에 의한 센서 기구부 및 센서의 파손을 방지하기 위하 여 스프링을 이용하여 완충장치를 구성하였다. 고·하중의 차륜이 접근하면 자석의 힘에 의하여 인력이 발생하기도 하지만, Fig. 4-18에 나타낸 바와 같이 하부에 스프 링으로 고정하여 원상복귀 및 파손을 방지하도록 설계, 제작하였다. 또한, 이 장치 를 통해서 Fig. 4-19와 같이 측정범위의 차륜 답면과 Lift-off를 일정하게 유지하여 결함 탐상시 Lift-off로 인한 측정 데이터의 변질 가능성을 줄였다.



Fig. 4-18 센서 기구부의 완충장치



Fig. 4-19 차륜 결함 및 완충장치에 의한 Lift-off 유지

데이터를 획득하는 과정에서 일정한 부분의 한 데이터를 Backdata로 하여 현재 획득하고 있는 데이터와의 차이를 나타내도록 적용하였다. 또 일반적으로 두 데어 터의 차에 의해서 확인가능한 영상에 추가로 $\partial V/\partial t$ 를 적용하여 Normal 데이터 상에 서 확인할 수 없었던 결함데이터의 확인이 가능하도록 하였다.

차륜 답면 탐상 프로그램으로 획득한 데이터는 Normal 상태에서 확인할 경우 각각의 V_H 및 배선에 의해서 격차가 발생한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 이전 데이터와 현재에 해당하는 데이터의 차를 비교 분석하는 Backdata 방법을 사용하였 다.

 Table 4-1은 모의 실험에 사용된 대차의 차륜의 답면부에서 도입된 결함의 정보

 로 각각 원형(hole), 사선(diagonal), 수직결함(slit)으로 형상을 구분지어서 길이, 넓이,

 깊이 등을 표시하였다. Fig. 4-20은 측정된 데이터를 각각 ∂V_H/∂x, ∂(∂V_H/∂x)/∂t,

 X-Section view로 구분하여 자기영상을 표현하였다.

Crack No.	shape	depth	dian	neter	
1		1	,	2	
2	hole	1.5	3		
3-1		1.5	3		
3-2		2	4		
3-3		2.5	5		
4		1	2		
5		1.5	3		
6		2	4		
7		2.5	5		
Crack No.	shape	depth	width	length	
Crack No. 8	shape	depth	width 2	length 20	
Crack No. 8 9	shape	depth 1 1	width 2 2 2	length 20 25	
Crack No. 8 9 10	shape	depth 1 1 1 1	width 2 2 2 2	length 20 25 22	
Crack No. 8 9 10 11-1	shape diagonal	depth 1 1 1 1 1 1 1	width 2 2 2 2 2 2	length 20 25 22 20	
Crack No. 8 9 10 11-1 11-2	shape diagonal	depth 1 1 1 1 1 1 1 1	width 2 2 2 2 2 2 2 2 2	length 20 25 22 20 20	
Crack No. 8 9 10 11-1 11-2 11-3	shape diagonal	depth 1 1 1 1 1 1 1 1.5	width 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	length 20 25 22 20 20 20 20	
Crack No. 8 9 10 11-1 11-2 11-3 12	shape diagonal	depth 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	width 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	length 20 25 22 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	
Crack No. 8 9 10 11-1 11-2 11-3 12 13	shape diagonal slit	depth 1	width 2	length 20 25 22 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	

Table 4-1 대차 시험편에 도입된 인공결함정보 [mm]







Fig. 4-20 대차 시험편의 인공 결함 검출 결과

Fig. 4-20의 자기영상 결과에서 알 수 있듯이 직경 2mm, 깊이 1mm 이상의 원 형 및 길이 20mm, 폭 2mm, 깊이 1mm의 이상의 사선 및 사선결함을 검출하는 능 력을 가지는 것을 검증하였다.

2. 현장 적용 실험

철도기술연구원과 공동으로 철도 차량 정비단의 동의를 얻어서 현장 설치를 통해 적용 실험을 하였다. 현장 적용 실험시 발생 가능한 사고에 대비하여 비교적 안전한 차륜의 바깥쪽에 해당하는 부분의 탐상실험을 하였다. 이를 위해서 코레일 에서 실제 사용하는 50KgN 규격의 레일의 일부분을 가공하여 실제 적용 규격에 맞추었다. 또한 추가적인 레일의 손상 및 충격으로 인한 사고 예방을 위해서 레일 고정부와 H빔에 추가적인 기구물을 설치하였다. Fig. 4-21과 Fig. 4-22에서 보는 바와 같이 실제 현장에 장비를 설치하여 현장 적용 실험하여 실용성 검증을 하였다.



Fig. 4-21 철도차량기지에 설치된 센서기구물

Fig. 4-22와 같이 레일에 흐르는 대전류 및 오일 등과 같은 오염물질로부터 신 호처리회로를 보호하기 위해 플라스틱 케이스를 제작하였다. 센서부에서 획득한 데 이터는 신호처리회로(Amp, A/D 변환기, Switching 등) 및 인터페이스를 거쳐 컴퓨터 에 전송되고 전용 소프트웨어에서 실시간으로 자기영상을 표현된다.



Fig. 4-22 차륜 답면 탐상 시스템의 현장 설치



Fig. 4-23 디젤 철도 차량의 차륜 결함



Fig. 4-24 디젤 철도 차량에서 측정된 결함

현장 적용 실험시 고속 열차는 9~10km/h 속도에서 측정을 하였고, 디젤기관차 를 1.44km/h ~ 2.16km/h 속도로 이동시키면서 측정을 하였다. 고속 열차의 경우 결 함이 없는 깨끗한 차륜으로 별도의 결함을 찾아내지 못하였다. 하지만 디젤기관차 의 경우 Fig.4-23과 같은 결함을 가지고 있어서 이를 탐상하여 검출하였다. 결함의 크기는 약 3mm와 5mm의 직경을 가지고 깊이는 약 0.5mm 이상으로 Fig. 4-24와 같 이 결함을 검출하여 검증하였다.

위의 결과를 토대로 현재 레일 매립형 차륜 탐상 시스템은 Table 4-2의 사용되 고 있는 타 시스템과 비교시 다양한 종류의 결함과 높은 분해능의 탐상능력을 가 지고 있다. 또한, 현 시스템의 보완을 통해서 목표치인 30km/h의 탐상속도를 가질 경우 현존하는 시스템 이상의 능력을 가질 수 있다.
National	Company	Product	Principle	Kind of defects	Resolution	Detect speed
Korea	Ecomaister	Wheel defect test module	EMAT	Crack, spalling	Transversal 10mm over, shell defect 10mm over, suface crack 10mm over	Max 5.4km/h
Korea	Shalom Engineering	ITIS / Wheel Abrasion	HSVA	Surface, wheel imbalance, wear, abrasion	Crack length 20mm over, width 10mm over	Max 60km/h
Korea	Woojin Industrial Systems	Ultrasonic Flaw Detector	UT	Axle measuring internal defects	Crack depth 3mm	Detachable (1 st measured 3min used)
Korea	KRRI /Chosun Univ.	Magnetic Camera	MFL	transversal, pits, gouges, cuts, spalling	Crack diameter 2mm, depth 1mm over	30km/h
Germany	Hegensheidt	Wheel Diagnostic System (ARGUS)	UT	Transversal crack, surface crack, material spintering	Crack, splintering width 10mm over, depth 5mm over	Max12km/h
USA	International Electronic Machines Corporation	Wheel Inspection Station Environment (WISE)	EMAT	Crack, gouges, pits, cuts, spalling	Crack depth 6.5mm over	Estimation 12km/h
USA	Johns Hopkins Univ., TTCI, Techno Gamma	Cracked Wheel Detection System (CWDS)	Laser Air Hybrid UT	Thermal crack, shattered rim crack, spalling	Crack depth 6.5mm over	Max 12km/h

Table 4-2 현존하는 차륜 답면 탐상 기술

제 5장 결론

고속철도는 미래의 녹색 성장 시대를 이끌어갈 저에너지 고효율, 저탄소 배출 로 운영되는 수송방법으로 항공기 및 차량에 비해 높은 수송능력으로 각광받고 있 다. 그러나 고중량 및 고속으로 이동하는 고속철도는 차체에서 발생하는 높은 운동 에너지 및 마찰에너지 레일과 차륜에 지속적인 손상을 누적시킨다. 이렇게 누적된 손상은 미세한 결함으로 전진하고, 이를 방치하여 운행하면 반복적으로 가해지는 힘에 의해 재료의 강도가 저하되어 파손에 이를 수 있다. 특히, 고속으로 주행중인 철도 차량의 차륜이 파손될 경우 차량의 탈선으로 이어질 수 있어 완벽한 정비를 통해 검출해야한다. 그러나 차륜은 검사시 많은 시간을 소모하며, 차량당 정비시간 이 매우 짧아 신속하며 정확한 전수검사 체계가 요구되고 있다.

본 연구에서는 고속철도차량이 정비창 또는 차고에 입고될 때 건전성을 검출 하는 실시간 비파괴 검사장비를 개발하고자 새로운 검사방법을 제시하였다. 자기장 을 이용한 이 방법은 피측정체를 자화시키고 비건전성이 있는 부위에서 발생하는 자기장의 왜곡을 측정하는 장치로 자기카메라를 이용하였다. 레일에 자원과 센서를 매립하여 수직방향으로 발생하는 자기장에 의해 자화된 차륜을 탐상하기 위해서 Differential형 센서를 사용을 위한 선행연구를 하였다.

차륜을 30km/h의 속도로 공회전을 시키고 각각 수평자화와 Single형 LIHaS, 수 직자화와 Differential형 AIHaS를 사용하여 결함을 검출한 결과 직경 1.84mm, 깊이 1mm 이상의 인공결함을 검출하였다. 또한, 자연결함의 경우 하여 4.5mm³ 이상의 결함을 검출하여 레일 매립형 차륜 탐상 시스템의 선행조건을 만족하였다.

위의 결과를 바탕으로 실내 모의 실험의 경우 레일과 대차를 연구실에 설치하 여 실제 레일을 가공하여 매립을 가능한 시스템을 구성하여 실험을 하였다. 대차의 차륜에 도입한 14개의 인공 결함을 모두 검출하여 직경 2mm, 깊이 1mm의 원형결 함과 길이 20mm, 폭 2mm, 깊이 1mm의 사선 및 수직결함을 검출하였다.

실내 모의 실험에서 적용된 기술을 한국철도기술연구원과 철도 차량 정비단의

59

동의 하에 검사장비를 설치하여 현장 적용 실험을 하였다. 실험시 1.44km/h ~ 2.16km/h의 속도로 이동하는 디젤 기관차에서 각각 3mm와 5mm의 직경을 가지고 깊이 0.5mm이상인 결함을 검출하였다.

신속하고 정확한 차륜 답면부의 결함 탐상을 위해 개발된 레일 매립형 차륜 답면 탐상용 무인 자동화 시스템은 선행연구 및 모의 실험, 현장 적용 실험의 결과 를 토대로 유용성 및 실용성을 검증하였다.

REFERENCES

[1] Rainer P, Erhard A, Montag HJ, Thomas HM, Wüstenberg H, NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection. NDT&E Inter 2004;37:89-94.

[2] I. Tsompanidis and V. Tsiakas, "Ultrasonic and Eddy current Examination of Railway Rolling Stock," Hellenic Society for NDT 2007, Crete-Greece, Chania, 2007.

[3] W. Kappes, M. Kröning, B. Rockstroh, H. J. Salzburger, F. Walte and H. Hintze, "Non-Destructive Testing of Wheel-Sets as a Contribution to Safety of Rail Traffic," Corende2000, Mar del. Plata, Argentina, 2000.

[4] Kwon SJ, Lee DH, Seo JW, Kwon ST. Damage Evaluation of Wheel Tread for High Speed Train Using Replication and Fracture Mechanics Characteristics. Trans. of KSME(A) 2007; 31(7): 756-763

[5] Kappes W, Rockstroh B, Bähr W, Kröning M, Rodner C, Goetz J, Nemec D. Application of new front-end electronics for non-destructive testing of railroad wheel sets. ECNDT 2006; Th.1.4.1: 1-12

[6] Kenderian S, Djordjevic BB, Cerniglia D, Garcia G. Dynamic railroad inspection using the laser-air hybrid ultrasonic technique. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring 2006; 48: 336-341

[7] J. Hwang, J. Lee and S. Kwon, "The application of a differential-type Hall sensors array to the nondestructive testing of express train wheels," NDT & E International, vol. 42(1), pp. 34-41. 2009.

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

[9] J. Hwang, J. Lee, J. Jun, R. Wang, S. Choi and S. Hong, "Scan type magnetic camera images with a high spatial resolution for NDT obtained by using a linearly integrated hall

sensors array," Proceedings of IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, pp. 1-6, 2007.

[10] J. Lee, J. Hwang, J. Jun and S. Choi, "Nondestructive testing and crack evaluation of ferromagnetic material by using the linearly integrated hall sensor array," J. Mech. Sci. Tech., vol. 22(12), pp. 2310-2317, 2008.

[11] Miyamoto, "Investigation of the derailment accident of the express train," Ken-yusha Inc Press, pp. 5, 1999.

[12] J. Seo, B. Goo, J. Choi and Y. Kim, "A Study on the Contact Fatigue Life Evaluation for Railway Wheels Considering Residual Stress Variation," Trans. of KSME (A), vol. 28(9), pp. 1391-1398, 2004.

[13] B. Park, K. Kim and H. Kim, "An Evaluation Method of Fatigue Strength and Reliability in a Railway Wheel with an Application of Strength-Stress Interference Model," Korean Society for Railway, vol. 5(2), pp. 131-137, 2002.

[14] H. M. Thomas, M. Junger, H. Hintze, R. Krull and S. Ru⁻he, "Pioneering inspection of railroad rails with eddy currents," Proceedings of the 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Italy, 2000.

[15] Z. H. Żurek, K. Bizoń and B. Rockstroh, "Supplementary Magnetic Tests for Railway Wheel Sets," Problemy Transportu, Tom.2 Zeszyt.1, pp. 5-10, 2008.

[16] J. Lee, J. Jun and M. Choi, "Automatic operation system for wheel Tread Inspection of Rail Installation Type," KR patents 10-2010-0089145, 2010.

[17] J. Lee, S. Kwon, "Non-Destructive Testing of a Train Wheel using a Linearly Integrated Hall Sensor Array," Proceedings of Sensors Applications Symposium, Febuary 2011, pp. 268-271.

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

[19] J. Jun, J. Lee and D. Park, "NDT of a Nickel Coated Inconel Specimen Using by the Complex Induced Current - Magnetic Flux Leakage Method and Linearly Integrated Hall Sensor Array," J. Kor. Soc. Nondestructive Testing, vol. 27(5), pp. 375-382, 2007.

[20] J. Jun, M. Choi, J. Lee, J. Seo, K. Shin, "Nondestructive testing of express train wheel using the linearly integrated Hall sensors array on a curved surface," NDT&E International, vol(44), pp. 449-455, 2011.

[21] J. Lee, S. Kwon, "Non-Destructive Testing of a Train Wheel using a Linearly Integrated Hall Sensor Array," Proceeding of SAS2011, San Antonio, TX, 2011.

[22] J. Hwang, "Development of a Scan Type Magnetic Camera and Intellectual Nondestructive Evaluation for Health Monitoring of Express Train Wheels," ,Chosun univ.

[23] Dogaru, T. and Smith, S. T., "Giant magnetoresistance-based eddy-current sensor," IEEE Trans Magn, Vol. 37, No. 5, pp.3831-3838, 2001.

[24] Smith, C. H., Schneider, R. W., Dogaru, T. and Smith, S. T., "Eddy-current testing with GMR magnetic sensor arrays," AIP Conf Proc, Vol. 657, No.1, pp.419-426, 2003.

[25] Sasada, I. and Watanabe, N., "Eddy current probe for nondestructive testing using cross-coupled figure-eight coils," IEEE Trans Magn, Vol. 31, No. 6, pp.3149-3151, 1995.

[26] Lee, J., Kim, M., Kang, M., Kim, D. and Choe, W., Shoji, T., Kato, H. and Kageyama,K., "Development of magnetic camera using 2-D arrayed hall elements," Proc. APCFS &

ATEM'01, pp. 222-227, 2004.

[27] Schott, C., Popovic, R. S., Alberti, S. and Tran, M. Q., "High accuracy magnetic field measurements with a Hall probe," Rev Sci Instrum, Vol. 70, No. 6, pp.2703-2707, 1999.

[28] Kim, D. H., Shin, S. C. and Hur, J., "Design and Fabrication of Improved Null - Type Torque Magnetometer," Journal of the Korean Magnetics Society, Vol. 8, No. 6, pp. 388-394, 1998.

[29] Im, D. Y., Jung, Y. Y. and Ryoo, Y. J., "Ground Detection Method for Removement of

Earth Field for Magnetic Guidance System," International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, Vol. 16, No. 5, pp. 581-586, 2006.