creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000265674

2016年 8月
碩士學位 論文

레일 波狀摩耗 測定시스템의 開發에 관한 硏究

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

朴 主 鉉

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

레일 波狀摩耗 測定시스템의 開發에 관한 硏究

Development of Rail Corrugation Measurement System

2016年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

朴 主 鉉

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

레일 波狀摩耗 測定시스템 開發에 관한 硏究

指導敎授 李 鎭 伊

이 論文을 工學碩士 學位申請 論文으로 提出함

2016年 4月

朝鮮大學校 大學院

制御計測工學科

朴 主 鉉

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

朴主鉉의 碩士學位論文을 認准함

委員長　朝鮮大學校 敎 授　高樂濬 (印)

委　員　朝鮮大學校 敎 授　趙昌鉉 (印)

委　員　朝鮮大學校 敎 授　李鎭伊 (印)

2016年　5月

朝鮮大學校 大學院

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT viii

제 1 장 서 론 ..... - 1 -

제 2 장 이론적 배경 ..... - 9 -

제 1 절 파상마모 측정법 ..... - 9 -

1. 와전류식 미소변위 측정법 ..... - 10 -

2. 자기식 미소변위 측정법 ..... - 13 -

3. 전자유도식 미소변위 측정법 ..... - 15 -

제 2 절 파면 영상획득 ..... - 19 -

1. 광원 ..... - 19 -

2. 실시간 영상 획득 ..... - 21 -

3. 파노라마 영상획득 ..... - 23 -

제 3 절 국소 푸리에 변환 ..... - 26 -

제 3 장 시스템 개발 ..... - 29 -

제 1 절 수동 스캔 시스템 ..... - 29 -

제 2 절 센서시스템 ..... - 32 -

제 3 절 데이터수집시스템 ..... - 37 -

제 4 절 해석 소프트웨어 ..... - 40 -

제 4 장 실험 및 고찰 ..... - 43 -

제 1 절 인공 시험편 실험 ..... - 43 -

1. 시험편 ..... - 43 -

2. 실험 및 고찰 ..... - 45 -

제 2 절 현장 적용 실험 ..... - 52 -

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결 론 .....- 62 -

REFERENCE .....- 64 -

Ackowledgements .....- 67 -

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표목차

Table 1-1 Comparison of each transport system .....- 1 -
Table 1-2 Research and development purpose .....- 7 -
Table 2-1 Measurement file sizes according to recording time and imaging speed .....- 22 -
Table 3-1 Specification of displacement sensors.....- 33 -
Table 3-2 Function keys of the operation software .....- 39 -
Table 3-3 Function keys of the analysis software .....- 41 -

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

도목차

Fig. 1-1 Configuration of the railroad system ..... - 2 -
Fig. 1-2 Domestic accidents of railroad system [6] ..... - 3 -
Fig. 1-3 Propagation of rail corrugation ..... - 4 -
Fig. 1-4 The rail corrugation measuring system developed in the overseas ..... - 5 -
Fig. 1-5 Status of aging railroads ..... - 6 -
Fig. 2-1 Principle of rail corrugation measurement [15] ..... - 9 -
Fig. 2-2 Principle of displacement sensing system with eddy current [22] ..... - 12 -
Fig. 2-3 Equivalent circuits of eddy current type displacement measuring system ..... - 12 -
Fig. 2-4 Principle of magnetic type displacement measuring system with digitizing; (a) magnetic sensor arrays and magnetic pattern, (b) recognition of displacement ..... - 13 -
Fig. 2-5 Principle of the magnetic type displacement measuring system with analog signal processing; (a) MR sensor arrays, and (b) relative location with magnetic pattern ..... - 14 -
Fig. 2-6 Principle of linear variable differential transformer (LVDT) ..... - 16 -
Fig. 2-7 Equivalent circuit of LVDT ..... - 16 -
Fig. 2-8 Phase change due to displacement of core ..... - 18 -
Fig. 2-9 Two optical incident methods; (a) direct type, (b) gradient type ..... - 19 -
Fig. 2-10 Comparison of image processing result using each optical incident method ..... - 20 -
Fig. 2-11 Comparison of image quality with different imaging speed ..... - 22 -
Fig. 2-12 Image processing methods for panorama image ..... - 23 -
Fig. 2-13 Panorama image using trigger control method ..... - 24 -
Fig. 2-14 Panorama image using distance control method ..... - 24 -
Fig. 2-15 Panorama image using image modified method ..... - 25 -
Fig. 2-16 Principle of Short-Time Fourier Transform (STFT) ..... - 27 -
Fig. 3-1 Scanning system ..... - 30 -
Fig. 3-2 Operation of scanning system ..... - 31 -
Fig. 3-3 Supporting wheels on the skate ..... - 31 -
Fig. 3-4 Configuration of encoder ..... - 32 -
Fig. 3-5 Contacting roller with 3 points ..... - 34 -
Fig. 3-6 Contacting roller with 2 points ..... - 34 -
Fig. 3-7 Contacting roller with 1 point ..... - 35 -
Fig. 3-8 Linear movement guide for supporting LVDT sensor ..... - 35 -
Fig. 3-9 CCD camera system with gradient type optical source ..... - 36 -
Fig. 3-10 Block diagram of the developed measurment system ..... - 37 -
Fig. 3-11 Operation software ..... - 38 -
Fig. 3-12 Analysis software ..... - 41 -

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4-1 Rail corrugation specimen; (a) Specimen A (30 mm wavelength), (b) Specimen B (100 mm wavelength), ...- 43 -
Fig. 4-2 Serial number of each corrugation....- 44 -
Fig. 4-3 Measurement range on the rail specimen ....- 45 -
Fig. 4-4 Experimental results on the 1st range with 30mm specimen A ....- 47 -
Fig. 4-5 Experimental results on the 2nd range with 30mm specimen A ....- 47 -
Fig. 4-6 Experimental results on the 1st range with 100mm specimen B ....- 48 -
Fig. 4-7 Experimental results on the 2nd range with 100mm specimen B ....- 48 -
Fig. 4-8 Evaluation of rail corrugation for artificial specimen A (30 mm wavelength); (a) LVDT signal, (b) FFT analysis, (c) STFT analysis and (d) digitizing result of STFT....- 50 -
Fig. 4-9 Evaluation of rail corrugation for artificial specimen A (30 mm wavelength); (a) LVDT signal, (e) Peak detection of LVDT signal....- 50 -
Fig. 4-10 Evaluation of rail corrugation for artificial specimen A (100 mm wavelength); (a) LVDT signal, (b) FFT analysis, (c) STFT analysis and (d) digitizing result of STFT....- 51 -
Fig. 4-11 Evaluation of rail corrugation for artificial specimen A (100 mm wavelength); (a) LVDT signal, (e) Peak detection of LVDT signal....- 51 -
Fig. 4-12 Field test in the Gwangju subway rail road ....- 52 -
Fig. 4-13 Samples of rail corrugation; (a) 30mm and (b) 70mm length of wavelength....- 53 -
Fig. 4-14 Experiment and analysis results of rail corrugation....- 54 -
Fig. 4-15 Experiment and analysis results of rail corrugation on the range 1 ....- 54 -
Fig. 4-16 Experiment and analysis results of rail corrugation on the range 2 ....- 55 -
Fig. 4-17 Experiment and analysis results of rail corrugation on the range 3 ....- 55 -
Fig. 4-18 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #1, #2 ....- 56 -
Fig. 4-19 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #3, #4 ....- 57 -
Fig. 4-20 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #5, #6 ....- 58 -
Fig. 4-21 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #7, #8 ....- 59 -
Fig. 4-22 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #9, #10 ....- 60 -
Fig. 4-23 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #11, #12 ....- 61 -

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

약어 설명

CCD	Change Charge Device
FFT	Fast Fourier Transform
HHR	Head Hardened
LVDT	Linear variable Differential Transformer
STFT	Short Time Fourier Transform
TCP/IP	Tansmission Control Protocol/ Internet Protocol
RATP	Rapid and Mass Transport Authority in Paris
RS-232C	Recommended Standard-232C

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기호 설명

I_p	Input Current Primary Coil in LVDT Sensor
L_1, L_2	Equivalent Inductance
M	Mutal Induction Factor
N	Bins of Frequecy
R_1, R_2	Equivalent Resistance
V_o	Differential Out Voltage of a Coil
Z	Equivalent Impedence
Q	Quality Factor
σ	Standard Deviation of Gauss Window Fuction
ρ	Electrical Resistance of Measurement Material
ω	Exciting Frequecy
x	Distance of Sensor Coil and Measurement Object
τ	STFT Window Length
Δx	Measurement Step of System
ΔM	Sampling Step

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Development of Rail corrugation Measurement System

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

This study presents the development of a rail corrugation measurement system. The manual scan system, sensor, signal acquisition and evaluation software will be presented. The rail corrugation is measured by a linear variable differential transformer (LVDT) sensor and an optical camera for visualization of the rail surface conditions. The LVDT measurement base is on a skate which has length of 300 mm, triple times of the measurable maximum wavelength of the corrugation (100 mm). The LVDT signal is analyzed by fast Fourier transform (FFT) and short-time Fourier transform (STFT) to find the corrugation and distribution of wavelength. To observe the area of rail corrugation, optical camera is synchronized with the LVDT signal and stored optical images in data base. The scan speed and scan interval are 1.4 km/h and 1.317 mm, respectively. The system can operate during 2 hours and 20 minute by using a built-in battery without external power supply.

In order to evaluate the effectiveness of the rail corrugation measurement system, rail specimens (50kgN type) with artificial rail corrugations and on-site test in the subway stations (Geumnamro 5-ga Station to Munhwajeondang Station, Gwangju, Korea) have been tested. On the artificial rail corrugation having 30 mm and 100 mm of wavelengths and 3 mm depth were measured with average wavelengths of 29.97 mm and 90.15 mm and average depth of 2.55 mm.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

respectively. As such the results, the error of measurements are 0.1 ~ 9.8% for the wavelength and 15% for the depth. Through data acquisition of the on-site test, rail corrugations was detected with wavelengths of 20~21 mm, 36~37 mm and 69~70 mm which is suitable with the results observed by optical camera in panorama images.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

수송시스템이란 자동차, 철도, 선박 및 항공기와 같이 승객 또는 화물을 이송하는 시스템이다. 특히, 철도시스템은 수송능력 측면에서 항공기의 4.5배, 승용차의 335배에 달하며, 에너지 효율성 측면에서는 에너지 소모량이 승용차의 1/8 및 화물차의 1/14에 불과하여 효율적인 수송시스템 중 하나로 꼽힌다[1]. 뿐만 아니라, 수송 효율 및 수송 원가가 도로교통에 비하여 각각 2.3배 및 1,344원에 불과하다. 또한, 항공기를 비롯한 타 교통수단에 비해 기후변동에도 불구하고 예정된 시간에 목적지에 도착하는 정시율이 90%이상을 유지하여 신뢰성이 확보되고 있다[2]. 따라서, 철도시스템은 Table 1-1에 나타낸 바와 같이 다른 운송수단에 비하여 운행시간이 비교적 정확하고, 안정성이 높으며, 대량 · 고속수송이 가능하다는 특징을 가지고 있다[3].

Table 1-1 Comparison of each transport system

구분	자동차	철도	선박	항공기
수송능력	소/중량	중/대량	중/대량	소량/중량
운송거리	단/중거리	중/원거리	중/원거리	중/원거리
운송비용	중간	저렴	저렴	고가
운송속도	보통	약간 느림	매우 느림	빠름
안정성	보통	높음	낮음	높음
기후영향	보통	작음	큼	아주 큼
편의성	높음	보통	낮음	낮음
중량제한	있음	없음	없음	있음
사고 안전도	비교적 낮음	높음	좌동	좌동

한편, 철도시스템은 철도차량, 레일, 건널목 및 역사로 구성된다. 특히 철도차량은 Fig. 1-1과 같이 (1) 운전실, (2) 엔진동력장치, (3) 대차 및 주행장치, (4) 제동장치, (5) 운동 및 연결장치, (6) 차체, (7) 주전동기 및 제어, (8) 전기 · 전자기기, (9) 궤

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

도구조로 구분할 수 있다. 그 중 엔진동력장치는 철도차량이 움직이는 힘 즉 동력을 발생시키는 장치로서 크게 자체적으로 엔진을 가동하여 동력을 발생시키는 디젤동력장치와 전차선으로부터 전기를 공급받아 동력을 발생시키는 전기동력장치로 구분할 수 있다. 대차 및 연결장치는 차체를 지지하는 대차와 차량과 차량을 연결하는 연결장치를 칭한다. 한편, 대차는 철도차량이 선로 궤도를 안전하게 달릴 수 있도록 하는 역할을 하며 차륜, 차축, 대차 프레임, 스프링 등 여러가지 구성요소로 되어 있다[4]. 또한, 이러한 대차를 지지하기 위한 궤도구조는 열차에 대하여 안전하고 평활한 주행로를 만드는데 있어서 가장 중요한 부분이다. 궤도 구조는 철도차륜으로부터 부하되는 하중을 분산시키면서 주행로를 정확하게 유지시켜 주기 위한 레일과 함께 침목, 도상(道床) 및 이들의 부속품으로 구성된다[5].

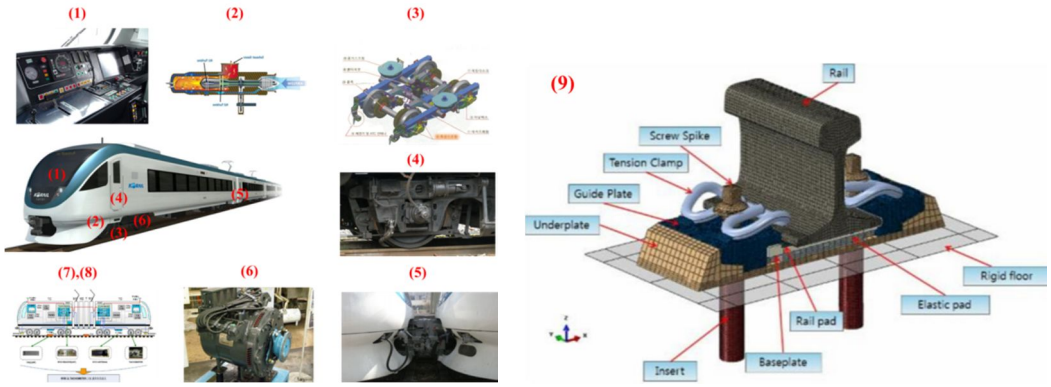


Fig. 1-1 Configuration of the railroad system

한편, Fig. 1-2는 2008~2012년 동안 우리나라에서 발생한 철도사고의 통계 를 나타낸다[6]. 통계에 의하면 열차충돌, 열차탈선, 건널목 사고발생율이 각각 2.8%, 16.8%, 79.4%이었다. 열차탈선사고는 철도차량 및 선로 궤도의 이상에 기인한 사고가 각각 2건 및 3 건으로서 인적, 경제적 손실과 함께 복구 기간 중 열차 운행의 제약을 포함한 사회적 손실을 동반한 바 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

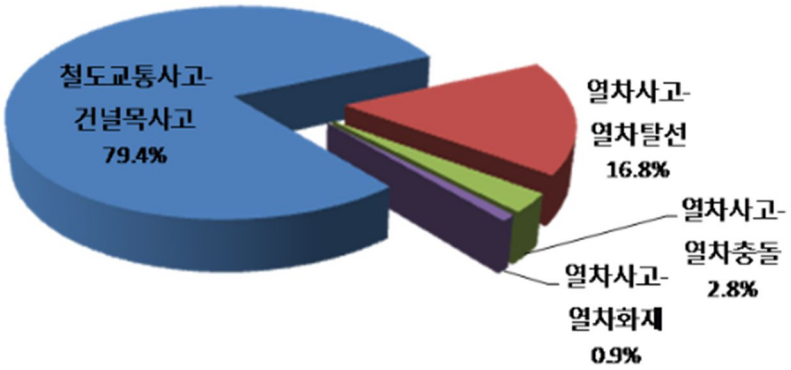


Fig. 1-2 Domestic accidents of railroad system [6]

한편, 레일 두부에 발생하는 파상마모는 레일축을 따라 물결모양의 마모가 연속적으로 나타내는 현상을 말한다. 파상마모는 상술한 차륜과 레일의 직접적인 접촉 과정에서 열차의 진동, 충격, 표면경도 증가, 차륜의 균열, 양 차륜의 하중 불균형 등이 주요 원인으로 알려져 있다. 종류로는 40~300mm의 단파장 파상마모, 60mm~2,300mm 장파장 파상마모가 있다[7]. Fig. 1-3은 파상마모가 진전되는 단계로 A등급은 초기단계, B등급은 진행된 상태, C등급은 미세균열로 발전되어 가는 단계를 나타낸다[8]. 파상마모가 A등급에서 C등급으로 진전하는 과정에서 레일과 직접 접촉하는 차륜을 통하여 철도차량에 진동, 소음 및 동적하중이 전파되어 승차감을 저하시키는 한편, 차륜의 수명단축과 궤도구성품의 열화를 촉진시킨다. 또한, 어느 임계점에 도달하면 레일 두부(頭部)의 윗면에 소성변형을 일으키며, 결과적으로 레일 자체에 균열이 발생하여 최종적으로 철도차량 탈선사고의 원인이 될 수 있다. 따라서, 파상마모는 철도산업에서 가장 심각하고, 고가의 비용을 지불해야하는 문제로 대두되고 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

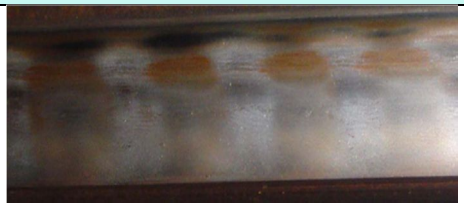
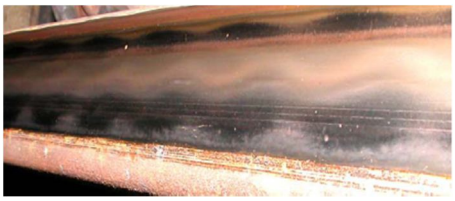
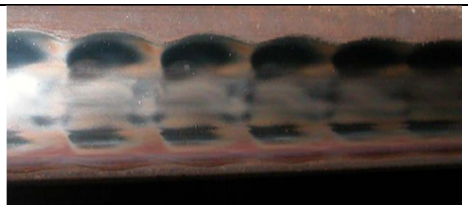
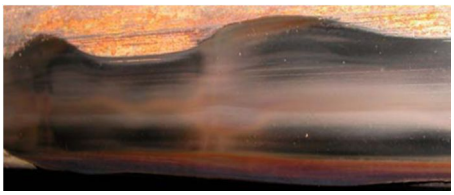
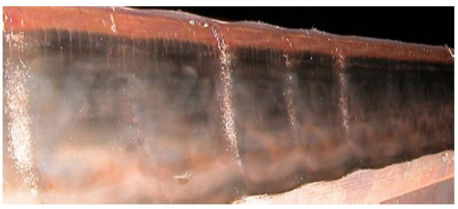
등급	단파장	장파장
A		
B		
C		

Fig. 1-3 Propagation of rail corrugation

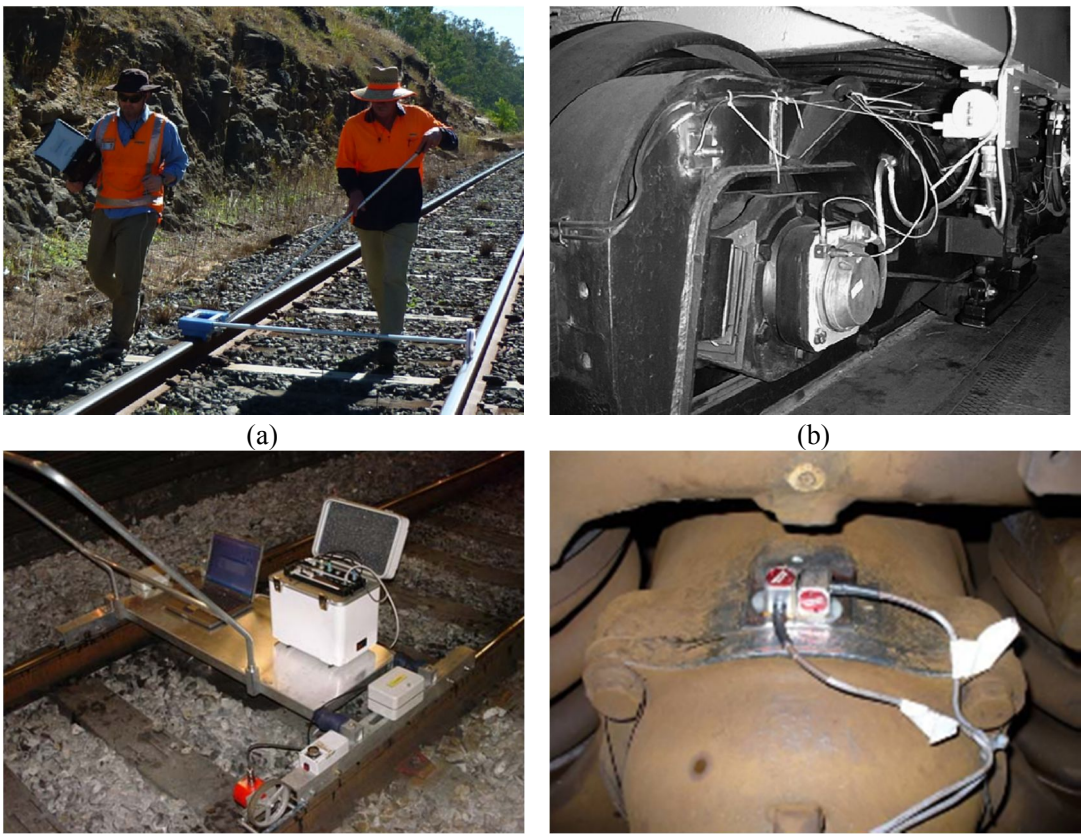
레일 파상마모를 감소시킬 수 있는 방법으로서, (1) HHR (head hardened rail)의 사용, (2) 수직 동적 체결 강성이 10kN/mm 이하인 고탄성 레일 체결부의 사용, (3) 수직방향으로 연성을 가진 장대 레일의 사용, (4) 공진주파수를 회피할 수 있는 고탄성 바퀴의 사용, (5) 윤활, (6) 하중인자의 감소 및 차륜 직경의 공차 축소, (7) 파상마모의 주기적인 모니터링 및 정량적인 평가가 제시되고 있다[9]. 특히 파상마모의 주기적인 모니터링과 정량적인 측정이 파상마모를 감소시킬 수 있는 방법 중 하나인 것은 파상마모 자체가 파상마모의 주요 원인이며, 결과적으로 일정 크기 이상에 도달하면 급격히 성장하기 때문이다.

레일 파상마모를 주기적으로 모니터링하고 정량적으로 평가하기 위하여, Fig. 1-4에 나타낸 바와 같이 다수의 연구자들에 의하여 파상마모를 정량적으로 측정하고 평가하기 위한 방법이 제안된 바 있다[10~13]. Bocciolone[10] 등은 표준 대차에 장착한 가속도계 측정에 의하여 파상마모를 측정하는 방법을 제안하였다. 횡축과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

종축의 진동을 측정하기 위한 두 개의 압전형 가속도계를 이용하여 13m/s의 속도로 이동하는 차량에서 파장 30~60mm의 파상마모를 측정하였다. Gullers[11] 등은 각각 16개 및 12개의 스트레인게이지를 휠에 부착하여 휠에 부하되는 수직방향 접촉력(Q-force)과 측면방향 접촉력(Y-force)을 측정하였다. 한편, C.Hory[12] 등은 RATP를 이용하여 거리에 따른 파상마모를 측정하여 비교하였으며, 스펙트로그램에 의하여 거리에 따른 파장을 해석한 바 있다. 그러나, Q-force를 해석하여 파상마모와의 연관성을 고찰하였을 뿐 파상마모 자체의 파장 및 깊이에 관한 연구는 보고되지 않았다. Tanaka[13] 등은 동력차 대차의 차륜 양측에서 차축함의 가속도를 측정 및 해석하여 파상마모의 깊이를 정량적으로 평가한 바 있다.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 1-4 The rail corrugation measuring system developed in the overseas

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 1-5은 우리나라 레일 노후화 현황을 나타낸 것으로서, 2008년 대비 20년 이상 경과된 장기 운영 노선이 30% 증가되어, 레일이 급속하게 노후화되고 있음을 알 수 있다. 실제로 최근 3년간 국철구간에서 발생한 레일 손상 및 훼손은 약 800건에 이르며, 이는 월평균 22건에 해당된다[14]. 따라서, 우리나라도 파상마모 측정 및 해석에 관한 해외 연구사례를 참고하여, 파상마모의 주기적인 모니터링과 정량적인 측정을 수행할 필요가 있다.

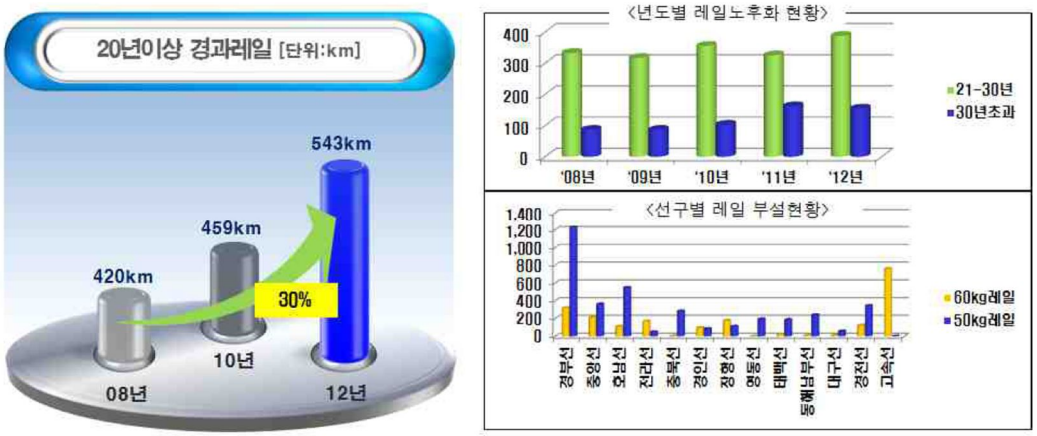


Fig. 1-5 Status of aging railroads

따라서, 본 연구에서는 국산 기술의 확보를 전제로 레일 파상마모 측정 시스템 및 해석 소프트웨어의 개발에 대한 연구를 수행하였다. 해외에서 활용되고 있는 레일 파상마모 측정시스템의 사양을 검토하여 운반중량, 크기, 측정속도, 측정범위, 분해능 등을 바탕으로 연구목표를 선정하였다. 구체적인 연구목표를 Table 1-2에 나타낸다. 해외연구와 차별성을 부여하기 위하여 파면영상을 비교 분석할 수 있는 영상카메라 시스템을 추가 하였다. 이러한 목표를 달성하기 위하여, 수동스캔시스템, 센서시스템, 데이터수집시스템, 해석소프트웨어로 구성되는 휴대형 파상마모 측정 시스템을 개발하였으며, 각 연구개발 내용 및 범위를 표의 오른쪽에 나타낸다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1-2 Research and development purpose

연구개발목표	연구개발내용 및 범위			
	수동스캔시스템	센서시스템	데이터수집시스템	해석소프트웨어
운반중량 20kg이내	·경량재질 ·견고한 구조 ·분해조립용이성 ·운반용이성	·센서전원설계	·노트북 PC급 소형 경량 컴퓨터 ·USB형 DAQ 보드 ·PC 배터리 활용	
크기 900×120×180 mm 이내	·견고한 구조	·모듈화	·PC 거치대	
측정레일 단측	·T형 구조	·측정레일측 매립		
측정간격 1~2mm		·엔코더장착 ·디지털 Output	·DAQ 보드 디지털 Input 확보	
측정거리 1 km			·1km×10^6mm/km×1CH DAQ & PC	· (PC 내장 GPS 및 지도앱 연계 방안 강구)
측정범위 ±2 mm	· 피측정레일과 기준면과의 거리 유지방안 도출	· 검사법(레이저 삼각법, LVDT, 와전류)에 따른 사양, 크기 검토, 실험, 선정, 설계, 제작	·400kS/s (16 bit) ·고속 DAQ보드	
분해능 및 정밀도 0.1/2 ㎛	· 검증용 파상마모 시험편	· 평균값 기능		
측정속도 1~2 km/h			· 1200 mm/sec · 최소 1.2 kHz · 최대 300kHz/Ch (256 샘플링 기준)	·등시간Trigger 배제 ·Encoder 기반 Triggering
측정파장 30~100 mm	· 스케이트 길이 300mm 이상			·거리별 높이표현 ·필터링 ·파형분석
데이터수집 USB 및 노트북			· USB형 DAQ ·노트북 PC 연계	·노트북 PC 소프트웨어 확인 및 대책
표준시험편 설계	· 3~5m에 최대깊이 3mm, 30~100mm 파장 도입			
배터리구동	·양측 레일 측정	· 엔코더/센서/		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2시간 20분	시 왕복 · 시작점에 케이스 및 예비 배터리	컨트롤러 소모전력 설계 및 배터리 선정		

본 논문은 총 5장으로 구성된다. 제1장은 서론이며, 제 2장은 파상마모 측정법, 파면 영상획득, 파상마모를 자동으로 판별하기 위한 알고리즘을 포함한 이론적 배경을 서술하였다. 제 3장은 본 연구를 통하여 개발한 수동스캔시스템, 센서시스템, 데이터수집시스템, 해석 소프트웨어에 관하여 서술하였다. 제 4장은 개발한 휴대형 파상마모 측정시스템의 유용성을 검증하기 위한 실험결과 및 고찰에 관하여 서술하였다. 제 5장은 결론이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 파상마모 측정법

파상마모는 Fig. 2-1에 나타낸 바와 같이 레일의 표면으로부터 파상마모가 발생한 지점까지의 변위로 측정된다. 즉, 레일상에 스케이트를 장착하고, 스케이트의 중심에 미소변위 측정기를 설치하여, 기준면으로부터 레일까지의 거리를 연속적으로 측정하여 정량화할 수 있다. 여기에서 스케이트의 길이는 측정하고자 하는 파상마모의 파장(예를 들면, 30, 100, 1000, 3000mm)의 2~3배이어야 스케이트의 밑면을 기준면으로 활용할 수 있다. 따라서, 측정하고자 하는 파장이 길면 길수록, 스케이트의 길이도 동반하여 길어지며, 중량 및 부피가 증대한다.

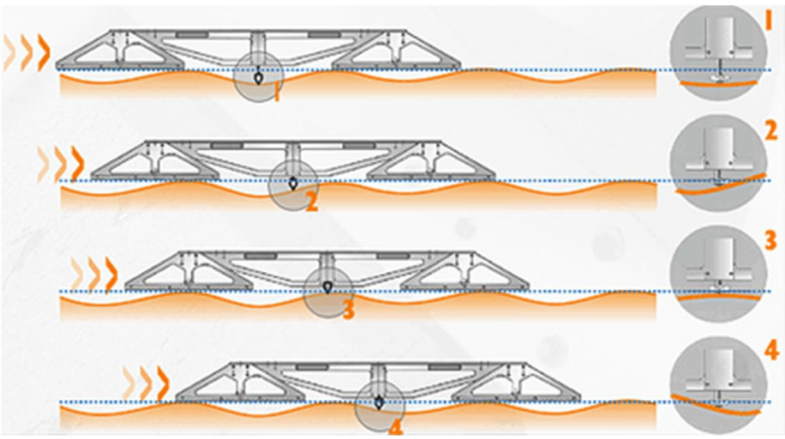


Fig. 2-1 Principle of rail corrugation measurement [15]

비교적 넓은 측정범위에서, 보다 높은 정밀도로, 보다 신속하게 측정이 이루어져야 하는 바, 본 절에서는 와전류식 미소변위 측정법, 자기식 미소변위 측정법 및 전자유도식 미소변위 측정법을 검토하였다. 한편, 일반적으로 차륜과 레일의 접촉면에서 발생하는 파상마모의 경우, 금속면으로부터의 반사가 예상되는 바, 광학식 미소변위측정법은 고려하지 않았다. 이하, 각 미소변위 측정법의 원리를 설명한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 와전류식 미소변위 측정법

와전류식 미소변위측정법은 감지코일의 임피던스 변화에 따라 기준점으로부터 피측정체까지의 거리, 즉 변위를 측정한다[16~18]. 즉, Fig. 2-2에 나타낸 바와 같이 교류 전압 또는 전류가 나선형 코일에 인가될 때, 피측정체인 전도성 물체에 와전류가 유도되어 와전류 코일의 자속을 감소시키는 방향으로 교류 자기장이 발생한다. 이러한 와전류는 코일의 교류 저항, 즉 임피던스가 증가한다. 이때 센서코일의 임피던스는 Fig. 2-3과 같이 LR 회로로 표현될 수 있는 있으며, 인덕턴스 L 및 저항 R 모두 변위에 의존한다. 일반적으로 변위가 감소하면 인덕턴스는 감소하고, 저항은 증가한다. 키르히호프의 법칙에 의하여 변압기의 회로 모델은 식 (1)로 표현된다. 따라서 전류는 식 (2)와 같이 정리되며, 변위에 기인한 L과 R에 의하여 가변된다.

$$\begin{aligned} \text{Loop1} \ &: \ R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2 = U \\ \text{Loop2} \ &: \ -j\omega M I_2 + R_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\mathrm{I} = \frac{U}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{{R_2}^2 + \omega^2 {L_2}^2} + j\omega\left(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{{R_2}^2 + \omega^2 {L_2}^2}\right)} \tag{2}$$

한편, Fig. 2-3에서 등가 임피던스 Z, 저항 R, 인덕턴스 L, 품질계수 Q는 각각 식 (3)~(6)으로 표현된다.

$$\mathrm{Z} = \mathrm{R} + \mathrm{j}\omega\mathrm{L} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{{R_2}^2 + \omega^2 {L_2}^2} + j\omega\left(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{{R_2}^2 + \omega^2 {L_2}^2}\right) \tag{3}$$

$$\mathrm{R} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{{R_2}^2 + \omega^2 {L_2}^2} \tag{4}$$

$$L = L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{{R_2}^2 + \omega^2 {L_2}^2} \tag{5}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{\omega(L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{{R_2}^2 + \omega^2 {L_2}^2})}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{{R_2}^2 + \omega^2 {L_2}^2}} \tag{6}$$

여기에서, R_1 및 L_1은 코일 재료와 구조에 따른 센서 코일의 저항 및 자기 인덕턴스이고, R_2 및 L_2는 피측정체의 와전류 경로, 비저항 ρ, 투자율 μ에 의존하는 등가 저항 및 등가 인덕턴스이다. 또한, ω는 여자 주파수, M은 센서 코일과 피측정체 사이의 상대 위치 x에 따른 상호 인덕턴스이다.

피측정체와 센서코일과의 상대적인 거리 x의 변화에 따른 Z, L, R, Q는 식 (7)에 의하여 표현될 수 있다. 여기에서 ρ, μ, ω를 변수로 가정하였다. 즉,

$$Z, L, R \text{ or } Q = f\,(x, \rho, \mu, \omega) \tag{7}$$

한편, 센서코일과 피측정체의 비저항 ρ, 투자율 μ와 함께 여자 주파수 ω가 상수로 주어진다면, 단 하나의 변수 x만이 변위 측정에 활용될 수 있다. 즉,

$$Z, L, R \text{ or } Q = f\,(x) \tag{8}$$

와전류식 변위측정법은 본질적으로 견고하며, 광학, 음향 및 정전용량형 센서에 비하여, 외부 잡음 및 오염 환경에서도 폭 넓게 활용할 수 있다[19~20]. 또한, 고속 측정이 가능하여 진동을 측정하는데 활용되기도 한다. 그러나, 피측정체인 금속면의 흠집 또는 표면 조도에 따라 오차가 발생하고, 표피효과에 따라 사용 주파수 영역에 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서 측정하고자 하는 파상마모뿐 아니라 헤드체크, 균열 등이 있으면 큰 오차가 발생한다. 또한, 와전류 센서를 인접하여 배열하면 간섭에 의하여 오차가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 와전류에 의한 변위 측정을 배제하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

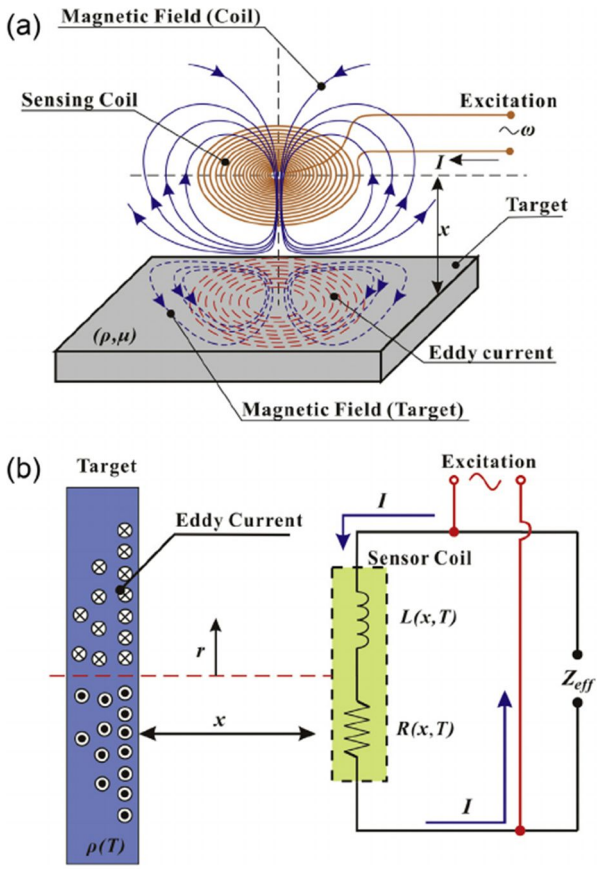


Fig. 2-2 Principle of displacement sensing system with eddy current [22]
(a) principle of eddy current, (b) equivalent model of eddy current sensing system

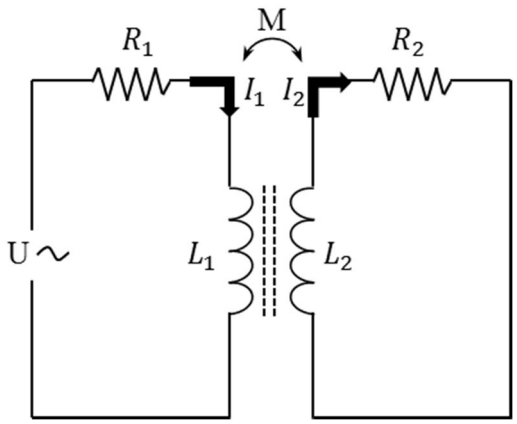


Fig. 2-3 Equivalent circuits of eddy current type displacement measuring system

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 자기식 미소변위 측정법

자기식 미소변위 측정법은 일정한 간격으로 자기 패턴이 기록된 자기 매체와 자기센서와의 상대적인 위치 변화에 따라 출력되는 신호를 분석하여 미소 변위를 측정한다[21~22]. 한 예로 Fig. 2-4 (a)는 홀센서를 이용한 미소변위 측정 방식의 원리를 나타낸다. 일정한 자기패턴과 함께 일정한 간격을 가지는 자기센서 배열을 상호 인접하게 배치하여, 자기센서가 자기패턴을 읽을 수 있도록 한다. 이때, 자기패턴과 자기센서 배열의 간격은 동일하지 않고 서로 다른 간격을 가지도록 한다. 이러한 구조에서는 Fig. 2-4 (b)에 나타낸 바와 같이 이동하는 거리에 따라 각 센서의 최대값의 위치(그림에서는 “1”로 표현)가 변화한다. 따라서, 이러한 패턴을 해석하여 Fig. 2-4(b)의 종축에 나타낸 바와 같이 미소변위를 측정한다.

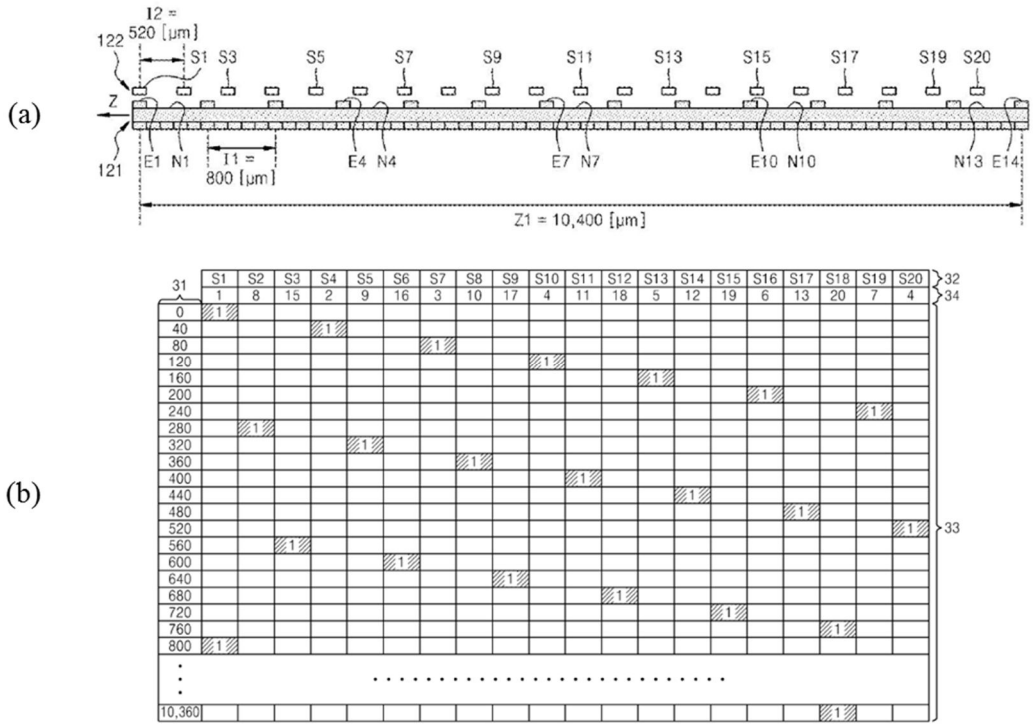
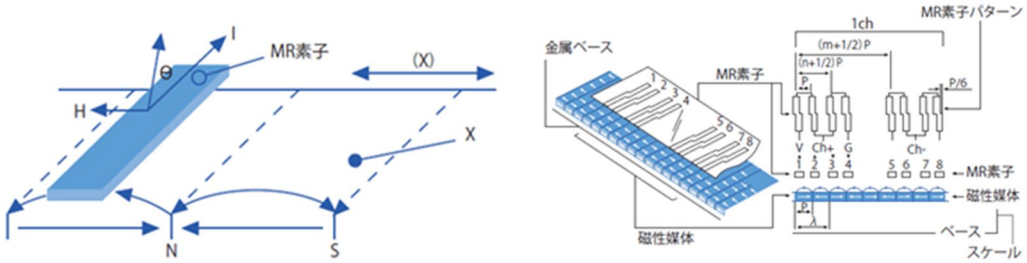


Fig. 2-4 Principle of magnetic type displacement measuring system with digitizing; (a) magnetic sensor arrays and magnetic pattern, (b) recognition of displacement

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

유사한 방식으로 Fig. 2-5에 나타낸 바와 같이 자기센서 배열에 의하여 자기패턴에 의한 전자기장의 분포를 아날로그식으로 해석하여 고정밀로 상대적인 변위를 측정하는 시스템이 상용화(Magnescale, DK805SBFR)된 바 있다[23].



(a) (b)

Fig. 2-5 Principle of the magnetic type displacement measuring system with analog signal processing; (a) MR sensor arrays, and (b) relative location with magnetic pattern

본 연구에서는 측정범위 ±5 mm, 분해능 0.1㎛, 반복정밀도 1㎛인 Magnescale사의 DK805SBFR을 이용하여 파상마모의 높이를 측정하였다. 이때, 측정 시스템과 컴퓨터의 통신은 해당 제품에서 제공하는 TCP/IP와 RS-232C의 통신 방식을 검토하였다. TCP-IP의 경우, 전송속도가 매우 빠르다는 장점이 있는 반면에, 데이터를 패킷으로 묶어 전송하기 때문에 레일의 이송에 따른 데이터 획득 속도가 저하되어, 1.3mm 분해능으로 측정시 1분에 약 6m 정도의 저속으로 측정해야 하는 한계가 있었다. 또한, RS-232C 방식의 전송에서도 1.3mm의 공간분해능으로 파상 마모를 측정할 때, 1분당 약 8~16m 정도의 속도로 스캔할 수 있다. 따라서, 충분한 속도를 구현하기 곤란하여 최종적으로 본 연구에서는 사용하지 않았다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 전자유도식 미소변위 측정법

선형 가변 차동 변압기(LVDT, Linear variable differential transformer)[24~26]는 Fig. 2-6에 나타낸 바와 같이 코어, 1차 코일 및 2차 코일로 구성된다. 중공형의 1차 코일과 2차 코일은 기준점에서 고정되고, 피측정체에 접촉하는 코어는 중공축을 따라 축방향으로 선형 이동한다. 한편, 1차 코일에 사인파를 입력하면, 코어에 자속이 유도되며, 결과적으로 2차 코일에 유도전류가 인가된다. 2차 코일은 차동으로 연결된 2개의 코일이 1차 코일의 양단에 위치하며, 코어를 포함하는 면적비(거리비)에 따라 차동 유도전류가 변화한다. 즉, 코어가 Fig. 2-6의 좌측으로 이동하면, 2차 코일의 A에 유도되는 전압이 B에 유도되는 전압에 비하여 큰 값을 지시한다. 반대로 코어가 Fig. 2-6의 우측으로 이동하면, 2차 코일의 B에 유도되는 전압이 A에 유도되는 전압에 비하여 큰 값을 지시하므로 기준점과 피측정체의 상대적인 변위를 선형으로 지시할 수 있다.

Fig. 2-7은 유기된 전압 V_1과 V_2를 설명하기 위한 개요도로서, 상호유도계수 M_1과 M_2를 이용하여 나타내면 다음 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

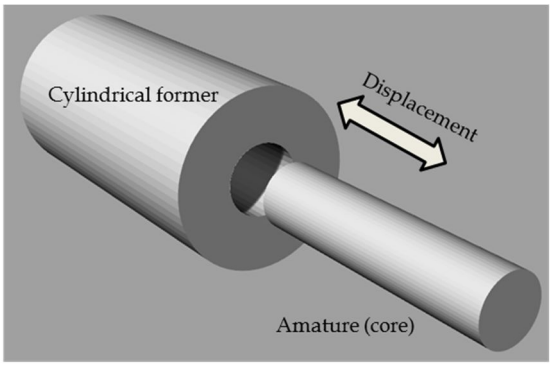
$$V_1 = M_1 \frac{di_p}{dt}$$
$$V_2 = M_2 \frac{di_p}{dt} \tag{11}$$

여기에서 M_1, M_2는 코어의 이동에 의하여 1차 코일에서 2개의 2차 코일로 각각 인가되는 상호유도계수이고, i_p는 사인파가 인가될 때 1차 코일에 흐르는 전류를 나타낸다. 한편, 2차 코일에서 출력되는 차등 전압은 식 (12)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_o = V_1 - V_2 = M_1 \frac{di_p}{dt} - M_2 \frac{di_p}{dt} = (M_{1-} M_2) \frac{di_p}{dt} \tag{12}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



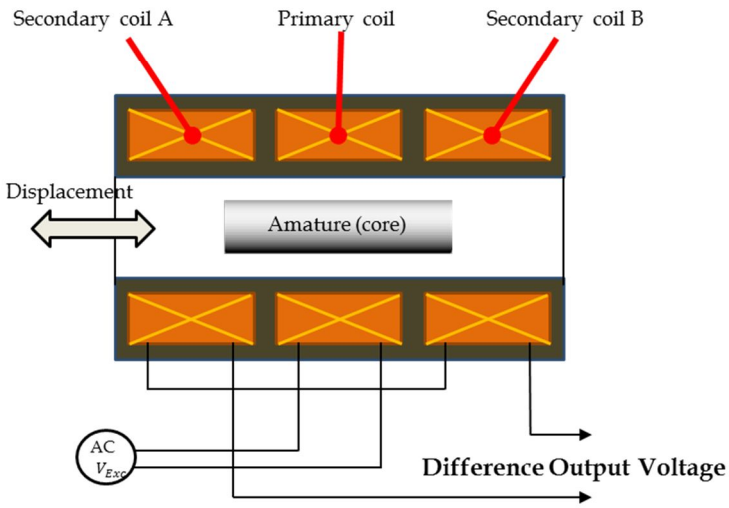


Fig. 2-6 Principle of linear variable differential transformer (LVDT)

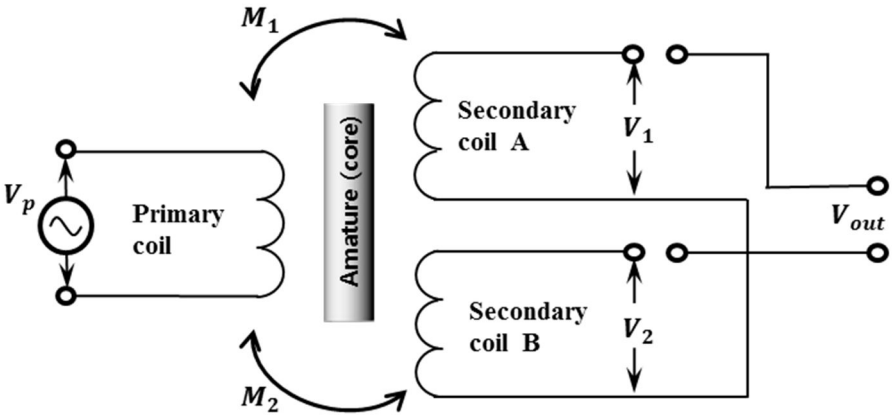


Fig. 2-7 Equivalent circuit of LVDT

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한편, 식 (12)을 사용하여 취득되는 출력전압은 Fig. 2-8과 같이 코어의 이동방향에 따라 출력위상이 변하게 된다. 예를 들면, 코어가 중심위치에 있으면 Fig. 2-8 (a)와 같이 출력전압은 0이 된다. 즉,

$$M_1 = M_2 \tag{13}$$

$$V_o = (M_1 - M_2)\frac{di_p}{dt} = 0 \tag{14}$$

또한, Fig. 2-8(b)와 같이 코어가 A의 위치로 이동하면 M_2에 비하여 M_1이 커지므로 유기되는 전압도 V_2 보다 V_1이 커진다. 즉,

$$M_1 > M_2 \tag{15}$$

$$\therefore V_o = V_1 - V_2 = (M_1 - M_2)\frac{di_p}{dt} > 0 \tag{16}$$

반대로 Fig. 2-8(c)와 같이 코어가 B의 위치로 이동하게 되면 M_1에 비하여 M_2이 커지므로 유기되는 전압도 V_1 보다 V_2이 커지게 되고 결과적으로 (b)의 경우에 비하여 위상이 180° 다른 정현파가 출력된다. 즉,

$$M_1 < M_2 \tag{17}$$

$$\therefore V_o = V_1 - V_2 = (M_1 - M_2)\frac{di_p}{dt} < 0 \tag{18}$$

즉, 전자유도식 미소변위측정법은 코어의 이동방향에 의하여 2차 코일에 유도되는 전압차와 위상차로 변위를 측정할 수 있다. 또한, 코어의 종류와 피측정체의 표면 상태, 센서의 탐촉자 형상에 따라 오차는 있지만, 일반적으로 수㎛에서 1㎛까지 고정밀도 측정이 가능하다. 그리고, 다수의 센서를 배열하여 여러 개의 측정값을 동시에 측정할 때, 전자기적인 간섭이 최소화될 수 있다는 특징을 이용하여 터빈 베인과 같은 복잡한 형상의 피측정체의 형상을 인식하는 등 다양한 응용분야를 가지고 있다[27~28]. 본 연구에서도 ±6.25 mm, 분해능, 0.8㎛, 반복정밀도 1㎛인 measurement specialties사의 HCA250를 이용하여 파상마모의 높이를 측정하였다. 특히, 복잡한 신호처리과정을 거친 별도의 신호해석부를 구비하는 자기식 미소변위

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

측정법에 비하여, LVDT는 고속 AD 변환기를 이용하여 신속한 변위 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 예를 들면, 1.3mm의 공간분해능으로 측정할 때, 1분에 약 23m를 측정할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 전자유도식 미소변위 측정법을 이용하여 레일의 파상마모를 측정하였다.

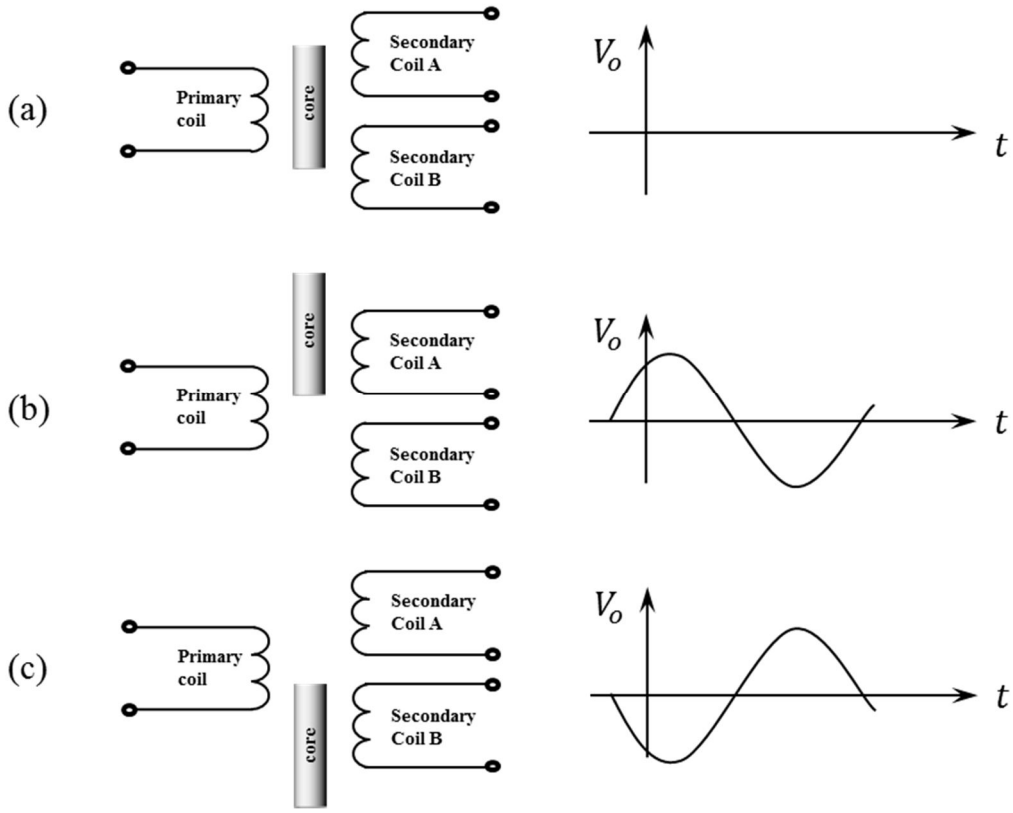


Fig. 2-8 Phase change due to displacement of core

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 파면 영상획득

레일의 파상마모는 거리에 따른 마모의 깊이가 중요한 정보이다. 따라서, 엔코더에 의하여 거리를 측정하고, 각 거리에서의 마모의 깊이를 측정한 미소변위값을 저장할 필요가 있다. 그러나, 전술한 바와 같이 정량적인 미소변위를 측정할 때, 진동, 커브, 전기적인 잡음, 이물질과 같이 불특정 요인에 의하여 측정오차가 발생할 수 있다. 따라서, 거리에 따른 파면의 영상을 동시에 측정하여, 이상 신호가 발생하였을 때 파면 영상을 비교 분석할 필요가 있다. 파상마모 측정과 파면영상의 측정오차를 비교 분석하기 위하여, 본 연구에서는 CCD(Change Charge Device) 카메라를 사용하였다. 본 절에서는 파면 영상을 취득하기 위한 광원 및 실시간 영상 획득 방안, 그리고 파노라마 영상 변환에 대하여 서술한다.

1. 광원

본 연구에서는 레일에 빛을 조사하기 위한 광원으로서, Fig. 2-9에 나타낸 바와 같이 직사방식과 경사방식의 두가지 조사 방법을 검토하였다.

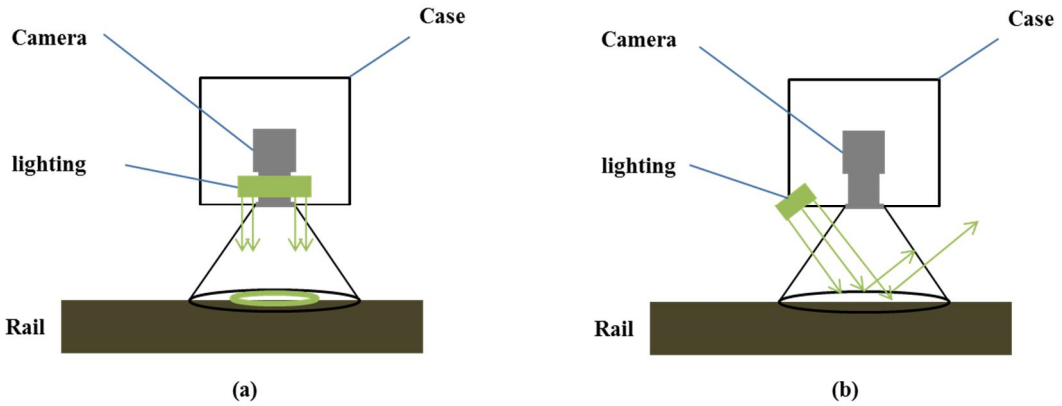


Fig. 2-9 Two optical incident methods; (a) direct type, (b) gradient type

직사방식의 경우, 카메라 및 렌즈를 둘러싸는 원형이며, 충분한 광량을 제공한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다는 장점을 가진다. 그러나, Fig. 2-10에 나타낸 바와 같이 금속성 반사체인 레일 표면으로부터 반사광이 직접 카메라에 입사되어 영상데이터의 해석이 곤란하게 된다. 즉, 레일의 표면의 상태 뿐 아니라, 원형인 광원도 동시에 입사되어 영상 처리가 곤란하다. 한편, 경사방식의 경우, 카메라 및 렌즈의 한쪽면에 위치하여, 레일에 경사지게 빛을 입사함으로서, 레일 표면으로부터 직접 반사되는 광이 카메라에 입사되지 않아서, 영상 처리가 상대적으로 용이하다는 장점을 가진다.

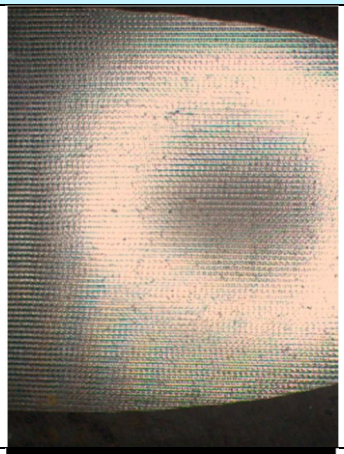
구분	직사방식	경사방식
Original Image		
Binary techniques		

Fig. 2-10 Comparison of image processing result using each optical incident method

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 실시간 영상 획득

경사방식의 광원으로서 선형 LED 광원(LFINE사, LDB60-W12)을 채용하고, 레일 표면의 영상을 USB 3.0 방식의 CCD 카메라(BASLER사, acA640-90uc)에 의하여 획득하였다. 렌즈의 광각은 레일을 기준으로 40도이고, 피사체까지의 거리는 55mm로 설정하였다. 따라서, 측정면적은 49×36.5 mm^2이며, 300,000 화소에서 최대 공간분해능 0.07mm를 실현 가능하다. 그러나, 실제 공간분해능은 영상속도, 화질, 메모리 용량 및 해석소프트웨어에 따라 더 낮게 나타난다.

Table 2-1은 동영상의 프레임속도에 따른 메모리 소모량을 비교한 실험 결과이다. 모든 영상은 658×492 화소를 기준으로 하였다. 1분 동안 동영상을 저장한 경우, 10 f/s와 30f/s의 각각의 경우 52.363 MB와 76.471 MB의 메모리가 소모된다. 또한, 30 f/s의 영상 속도에서는 1분과 10분의 경우를 비교하면, 메모리가 약 7배 정도 차이가 나서 502.4MB를 소모하였다. 한편, 엔코더에 의하여 발생한 pulse를 트리거로 활용하여 사진을 촬영할 수 있도록 프로그래밍한 결과, 1분간 296매를 촬영한 경우 약 116.14MB, 10분간 3,042매의 촬영을 한 경우 약 1189.15MB의 메모리가 할당되어, 동영상에 비하여 많은 메모리를 소진하게 된다.

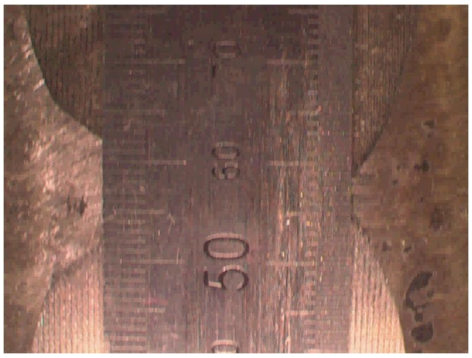
Fig. 2-11은 레일 표면에 점착한 눈금 위를 1.38km/h(383mm/s)의 속도로 스캔하였을 때, 10 f/s (a)와 30 f/s (b)로 촬영한 동영상과 매 1.317mm 이동하였을 때 트리거 신호를 입력받아 촬영한 사진(c)을 나타낸다. 각각의 동영상은 1개 화면을 캡쳐한 결과이다. 10 f/s에 비하여 30 f/s의 경우, 해상도가 현저히 저하되며, 사진의 경우가 해상도가 가장 우수함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 비록 메모리의 소모가 크기는 하나, 엔코더로부터 취득되는 펄스를 이용하여 트리거한 사진을 데이터베이스화하였다.

Collection @ chosun

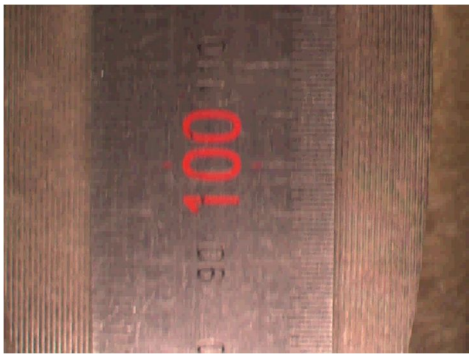
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2-1 Measurement file sizes according to recording time and imaging speed

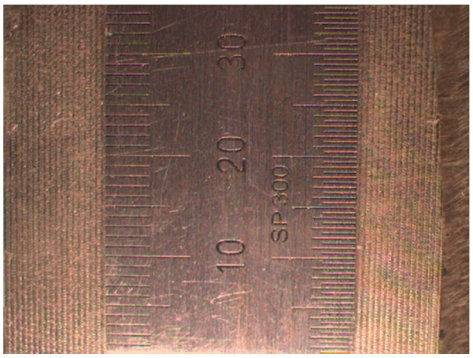
시간 \ 영상속도	동영상			사진
	10 f/s	20 f/s	30 f/s	
1분	52.363 MB	58.0 MB	76.471 MB	116.14 MB (296매)
10분	364MB	418MB	502.4 MB	1189.15 MB (3,042매)



(a) 10 f/s (38% 축소)



(b) 30 f/s (150% 확대)



(c) 사진 (45% 축소)

Fig. 2-11 Comparison of image quality with different imaging speed

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 파노라마 영상획득

본 연구에서는 레일의 거리에 따라 파상마모의 깊이와 함께 측정되는 광학 영상을 보다 용이하게 비교 분석하기 위하여 파노라마 영상을 제공한다.

파노라마 영상은 Fig. 2-12에 나타낸 바와 같이 세가지 방식, 즉 트리거 제어, 거리제어 및 영상 수정 방식을 검토하였다. 트리거 제어 방식(Fig. 2-12(a))은 영상취득 시 미리 계산된 이동 거리마다 영상 취득용 트리거를 발생시킴으로서, 연속적으로 취득한 사진을 연결하여 파노라마 영상을 구현하는 방식이다. 거리 제어 방식(Fig. 2-12(b))은 일부 겹쳐진 상태에서 영상이 취득되더라도 별다른 영상처리를 수행하지 않고 연속적으로 취득한 사진을 연결하여 파노라마 영상을 구현한다. 마지막으로 영상 수정 방식(Fig. 2-12(c))은 상기 거리 제어 방식의 겹쳐진 영역을 제거한 후 연결하여 파노라마 영상을 구현하는 방식이다.

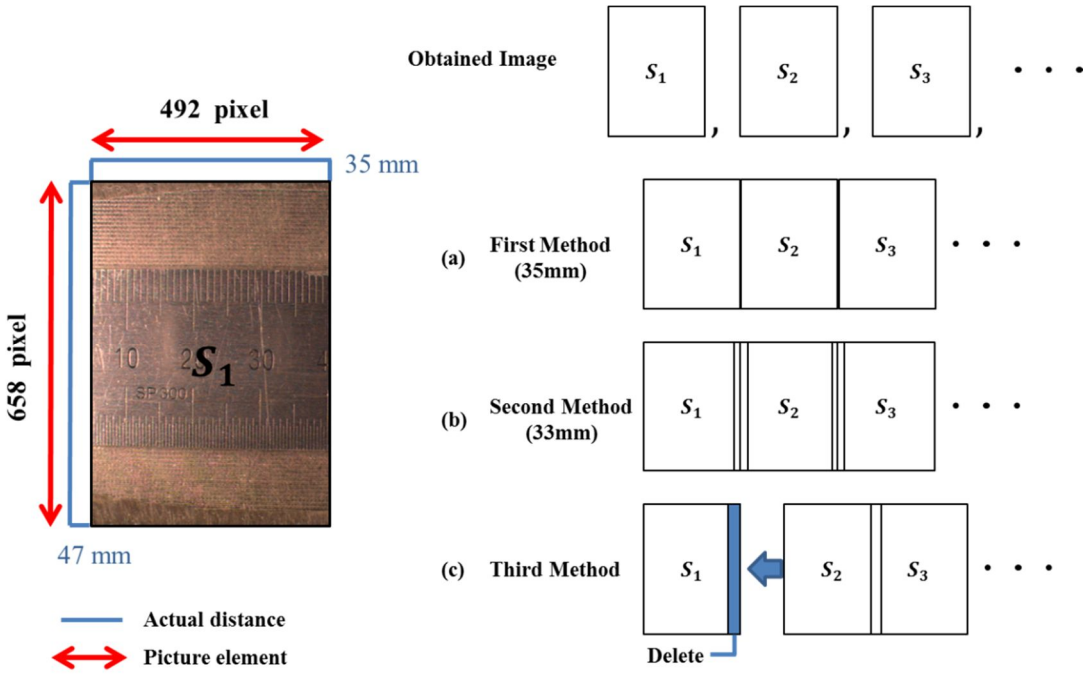


Fig. 2-12 Image processing methods for panorama image

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

트리거 제어 방식의 경우에는 엔코더에 의하여 펄스당 0.439mm가 이동되는 본 시스템에 의하면 80 펄스를 이동하여 0.439mm×80pulse = 35.12mm, 즉 레일 축방향으로 약 35mm 간격의 연속된 영상을 획득함으로서 파노라마 영상을 구현(Fig. 2-13) 할 수 있다.

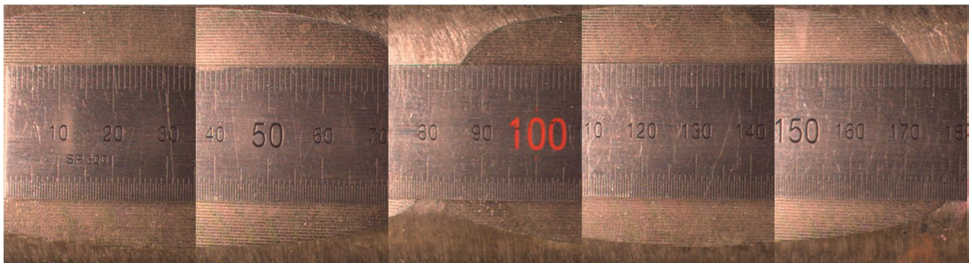


Fig. 2-13 Panorama image using trigger control method

거리 제어 방식의 경우에는 상술한 트리거 제어 방식과 동일한 방법이지만, 한 예로 75 펄스를 이동하였을 때마다 영상을 획득할 때, 0.439mm×75pulse = 32.92mm 마다 연속된 영상이 획득되고, 결과적으로 2mm 간격의 중첩된 파노라마 영상을 구현(Fig. 2-14)할 수 있다.

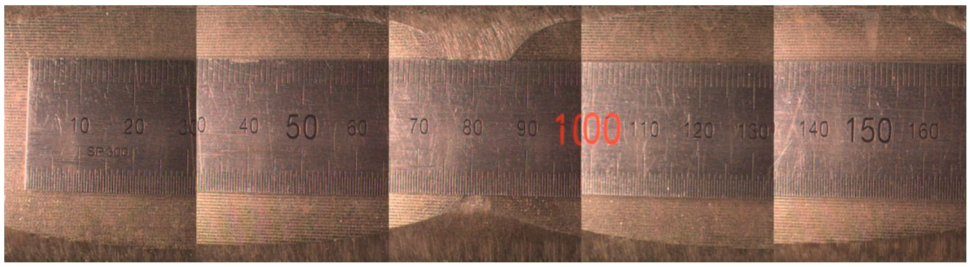


Fig. 2-14 Panorama image using distance control method

한편, 영상 수정 방식의 경우에는 상술한 거리 제어 방식과 동일한 방법이지만, 한 예로 69 펄스를 이동하였을 때마다 영상을 획득하여, 0.439mm × 69pulse = 30.29mm 마다 연속된 영상을 획득한다. 하지만, 중첩된 5mm를 삭제한 후, 연결하

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여 파노라마 영상으로 재구성(Fig. 2-15)하게 된다.

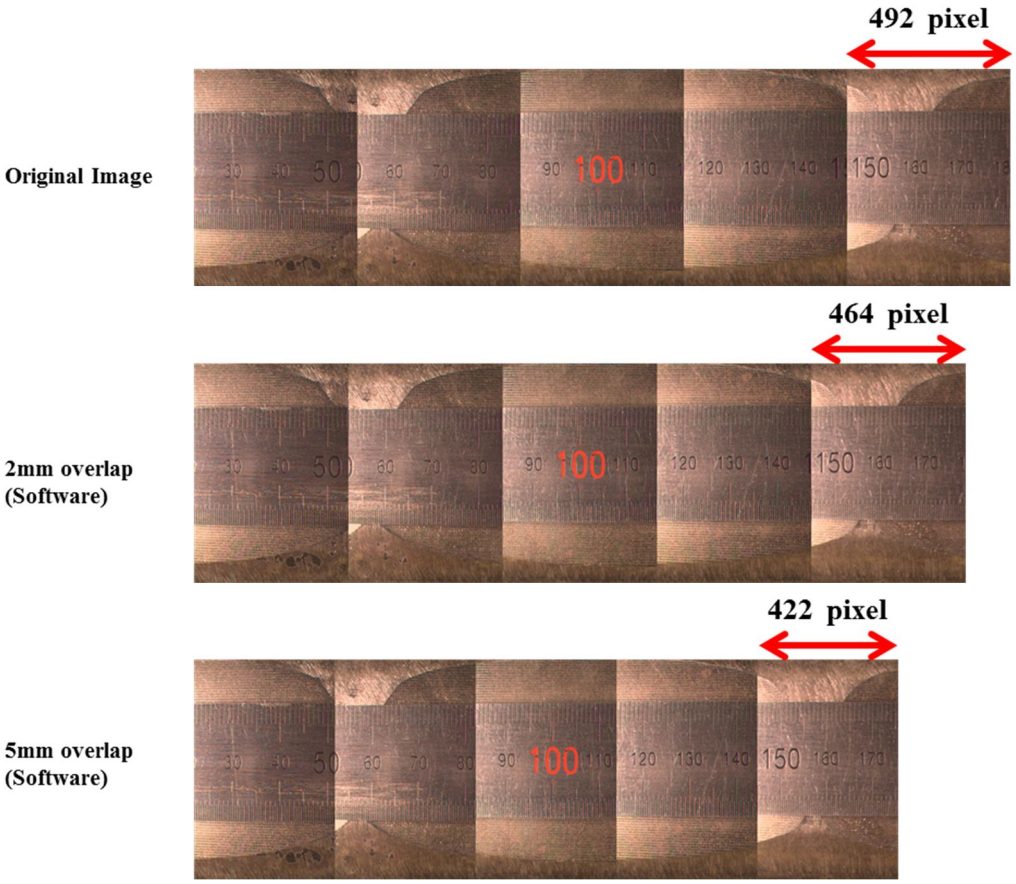


Fig. 2-15 Panorama image using image modified method

본 연구에서는 상술한 트리거 제어, 거리 제어 및 영상 수정 방식을 소프트웨어적으로 모두 구현하였으나, 별도의 영상 처리를 필요로 하지 않는 트리거 제어 방식으로 파노라마 영상을 구현하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 국소 푸리에 변환

휴대형 파상마모 측정시스템에 의하면 1~2mm의 공간 분해능으로 약 1km를 연속으로 측정한다. 따라서, 연속 측정 구간마다 약 5×10^5~10^6개 정도의 데이터가 생성되며, 파상마모의 경향성을 육안으로 평가하는 것은 비효율적이다. 따라서, 거리에 따른 파상마모를 자동으로 평가하기 위한 해석법이 요구된다. 본 절에서는 거리에 따른 파상마모의 정도를 자동으로 평가하기 위하여 도입한 국소 푸리에 변환 해석법(STFT, Short Time Fourier Transform)을 사용하였다.

STFT는 1946년 D. Gabor에 의하여 제안되었으며, 연속된 신호를 프레임 단위로 나누어 일정한 크기의 창을 움직이면서 푸리에 변환(Fourier Transform)을 수행하는 해석법이다[29]. FFT(Fast Fourier Transform)에 의하면, 주파수에 따른 진폭의 크기를 나열하므로 시간의 경과에 따른 주파수의 변화를 알 수 없다. 그러나, Fig. 2-16에 나타낸 바와 같이 STFT는 특정 프레임내에서 FFT분석과 함께, 해당 프레임이 시간축을 따라 이동하게 되므로, 시간에 따른 주파수의 특성 변화를 이해하기 쉽다. 뿐만 아니라, 해당 주파수에서의 진폭을 색의 농도로 표시함으로서, 시간에 따른 주파수 변화 및 진폭을 이해하기 용이하다. 본 연구에서는 STFT의 시간축(횡축)과 주파수축(종축)이 각각 거리 및 파장으로 변환된다. 따라서, STFT를 이용하면 일괄적으로 측정하였던 거리에 따른 변위의 결과로부터 측정 거리에서 발생한 파장을 용이하게 파악할 수 있다.

STFT의 일반적인 이론식은 식 (16)과 같이 정의된다[30-31]. 즉, 시간 τ에 프레임 함수 g(t)에 의해 분할된 입력신호 x(t)를 푸리에 변환한 것과 같다. 따라서, 데이터수집장치에 의해 샘플링된 이산(Discrete) STFT는 식 (17)과 같이 정의될 수 있다.

$$STFT(\tau,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t-\tau)e^{-j\omega t}dt \tag{16}$$

$$x_{STFT}(m\Delta M, n) = \sum_{i=0} x(i)g(i-m\Delta M)e^{-j2\pi ni/N} \tag{17}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기에서 m, n은 각각 시간과 주파수 영역의 Index, N은 주파수의 빈도수, ΔM은 샘플링 간격을 나타내고, 프레임은 가우스(Gaussian) 윈도우 함수로 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다[32].

$$g(i) = x_i^{-(i-(\frac{n-1}{2}))^2/2(\sigma n)^2} \tag{18}$$

여기에서 N 은 샘플링된 데이터 개수, σ 는 가우스 창의 표준편차를 나타낸다.

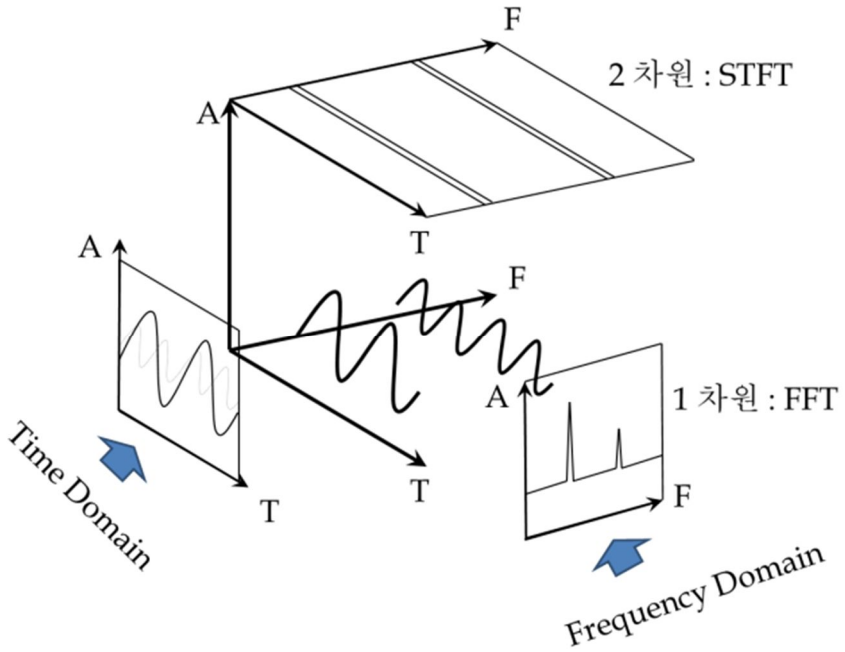


Fig. 2-16 Principle of Short-Time Fourier Transform (STFT)

한편, 파상마모 측정 시스템에 의하면, 상기 식 (16)~(18)의 시간은 거리로, 주파수는 파상마모의 파장으로 표현된다. STFT의 시간축을 거리로 환산하기 위해서는 시스템의 측정간격을 적용한다. 파상마모 측정시스템에서 레일과 접촉하는 엔코더에 의하여 일정 간격으로 펄스신호를 발생하고, 이러한 신호를 바탕으로 등간격

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(Δx=1.317mm)으로 데이터의 취득을 한다. 따라서, 등간격으로 취득한 Δx를 펄스 수로 곱하면, 레일 축으로의 이동 거리로 환산할 수 있다. 한편, STFT의 종축으로 표현된 주파수는 식 (19)에 의하여 파장으로 표현 가능하다.

$$\lambda = \frac{\Delta x}{f} \times 1000 \tag{19}$$

여기서, x는 상술한 1개의 트리거 펄스에 의하여 취득되는 측정간격(1.317mm)이고, x축의 시간이 ms로 표현되는 바 1000[1/sec]을 곱한다. 또한, 관심영역대의 주파수(f)를 식 (19)에 대입을 하게 되면 해당 영역에서의 파장을 구할 수 있다. STFT에서는 가장 높은 주파수가 적색으로 표현된다.

한편, 가우스 윈도우 함수의 폭은 휴대형 레일 파상마모 측정시스템의 기준점, 즉 스케이트의 길이인 310mm를 고려하여 310mm/(1.317mm/pulse), 즉 235 pixel로 설정하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 시스템 개발

제2장에서 설명한 전자유도식 미소변위 측정법, 영상획득 및 국소 푸리에 해석의 원리를 이용하여 수동스캔시스템, 센서시스템, 데이터수집시스템, 해석소프트웨어로 구성되는 휴대형 파상마모 측정시스템을 개발하였다. 이하 각 구성 요소별로 자세히 설명한다.

제 1 절 수동 스캔 시스템

수동 스캔 시스템은 파상마모의 기준점을 제공하기 위한 스케이트와 함께 배터리, 센서시스템 및 데이터수집시스템을 내장하고, 컴퓨터를 지지한다.

본 연구에서는 최대 100mm의 파장을 측정하기 위하여 스케이트의 길이를 파장의 약 3배에 해당하는 310mm로 설계하였다. 또한, 스케이트 폭은 시스템 적용시 좌우 진동을 최소화하기 위하여 실제 폭보다 약간 작은 크기가 필요하다. 따라서, 우리나라에서 주로 사용되는 50kg (67.87mm), 50kgN (65mm) 및 60kg (65mm) 레일 폭을 고려하여, 63.9mm로 설계하였다. 또한, 스케이트의 이탈을 방지하기 위한 가이드를 별도로 구비하였다.

Fig. 3-1은 본 연구에 개발한 수동스캔시스템의 3D 개념도와 실물사진을 나타낸다. 수동스캔시스템의 구성요소 중 스케이트는 내마모성 및 부식을 방지하기 위하여 스테인레스강을 사용하였으며, 변형을 최소화하면서도 중량을 줄이기 위하여 두께를 5mm로 제한하였다. 측정 작업 중 레일에 흠을 내지 않고, 이물질의 발생 및 혼입을 최대한 억제하기 위하여 모서리를 라운드 가공 처리하였다. 또한, 수동스캔시스템에는 충전기, 배터리, 변위센서, 컨트롤러, 데이터수집장치, 엔코더를 내장하였다. 또한, CCD 카메라(BASLER사, acA640-90uc)와 광원(LFINE사, LDB60-W12)은 별도로 설치 및 분리할 수 있도록 하였다. 연속적으로 데이터를 수집 및 저장하며, 작업이 종료된 후 데이터를 해석하기 위한 수단인 노트북(LG, 14U530-KT50K)은 수동스캔시스템 상부에 올려놓을 수 있도록 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

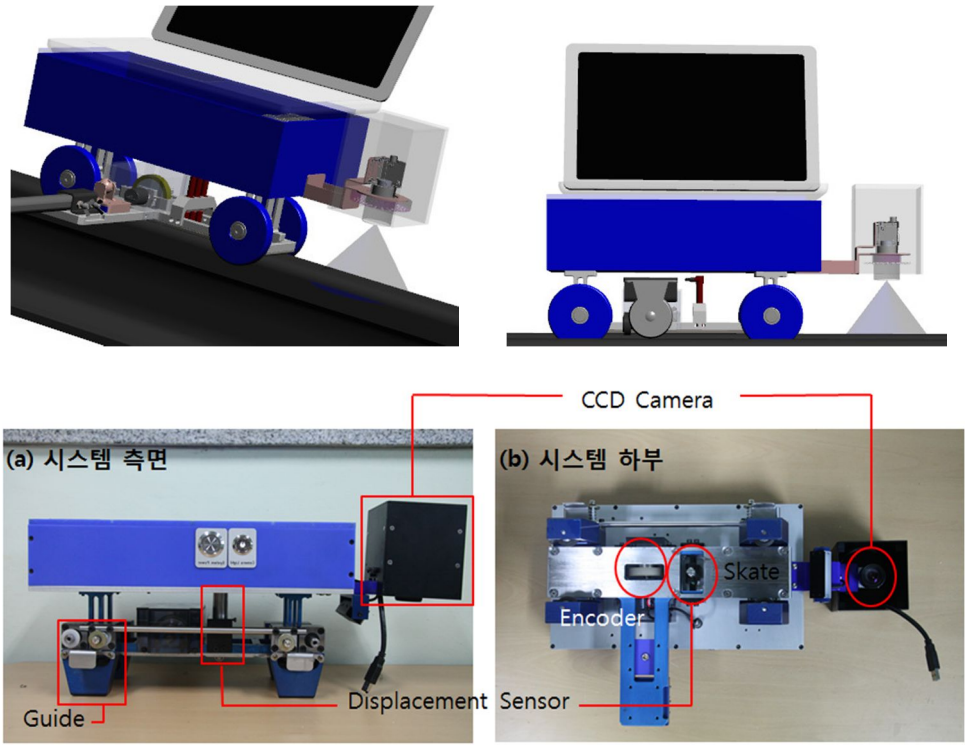


Fig. 3-1 Scanning system

Fig. 3-2는 수동스캔시스템을 레일위에 설치 및 구동하는 일례를 나타낸다. 작업자가 직립한 상태에서 레일의 안쪽에서 밀면서 이동하면, 자동으로 일정간격의 변위 및 영상을 획득할 수 있게 설계하였다. 레일 파상마모를 정량적으로 측정하기 위한 변위센서는 감도가 높아서 외부로부터의 가벼운 충격에도 영향을 받게 된다. 따라서, 충격에 의한 외란을 최소화하고, 레일과 측정시스템을 상호 고정하기 위한 지지바퀴를 Fig. 3-3과 같이 설계 및 제작하였다. 지지바퀴는 외경 30mm의 베어링이 레일을 중심으로 좌우 한 쌍씩(총 4개) 위치한다. 이러한 구조에 의하면 레일 두부의 상축으로부터 3/4 지점을 보지(保持)하여, 파상마모측정 시 가벼운 진동이나 뒤틀림 현상을 최소화할 수 있다. 한편, 진행방향을 기준으로 우측의 지지바퀴는 수동 스캔 시스템에 고정되어 있고, 좌측의 지지바퀴는 탄성체(스프링) 및 가이드(LMK8LUU, Aribaba)에 의하여 지지 및 레일 접촉한다. 이러한 구조에 의하여, 곡률

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 있는 레일 및 부식 등에 의한 레일 변형 구간에서도 정상적으로 작동할 수 있도록 하였다.

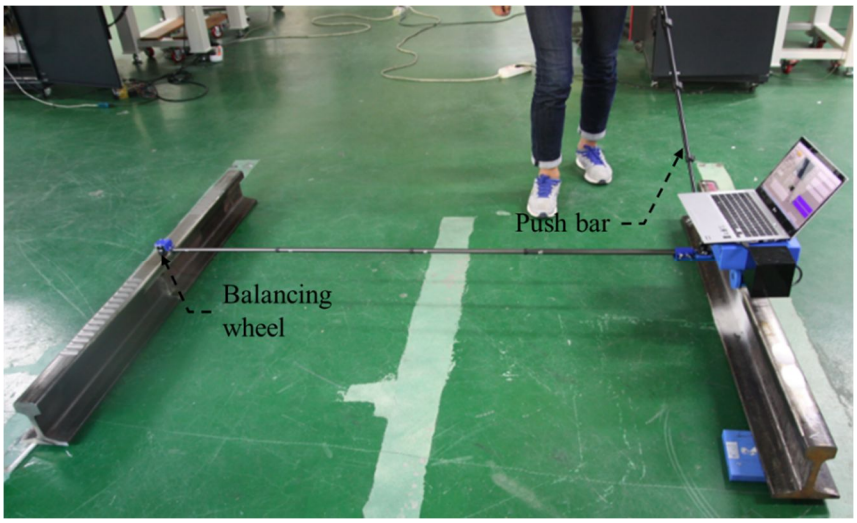


Fig. 3-2 Operation of scanning system

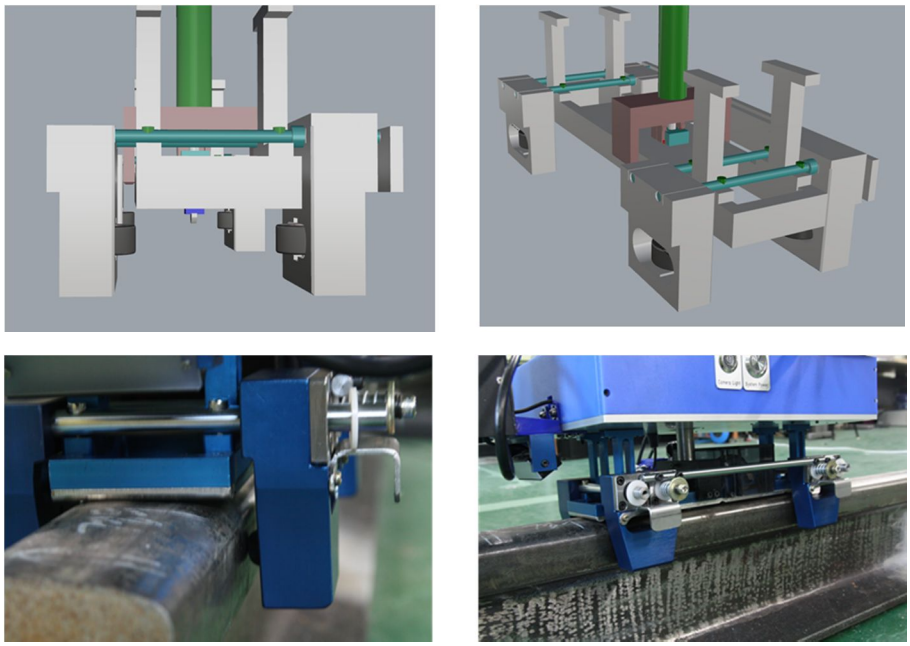


Fig. 3-3 Supporting wheels on the skate

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 센서시스템

상술한 스캔시스템은 작업자가 수동으로 밀면서 측정한다. 따라서, 작업환경 및 작업자에 따라 일정한 스캔속도를 도출할 수 없다. 결과적으로 일정시간 간격으로 측정할 경우, 레일 길이방향으로 등간격의 측정이 이루어질 수 없으며, 파상마모의 파장 해석의 결과를 신뢰할 수 없게 된다. 따라서, 본 연구에서는 레일과 접촉하는 엔코더에 의하여 일정 간격으로 펄스신호를 발생하고, 이러한 신호를 바탕으로 등간격으로 데이터를 취득할 수 있도록 하였다. Fig. 3-4에 나타낸 바와 같이 엔코더(Autonics, E20HB3-360-6-L-5-R)에 직경이 43.5mm인 레일 접촉휠을 부착하여, 레일 축을 따라 1.317mm 이동할 때마다 파상마모 측정용 변위 센서를 구동하였다.

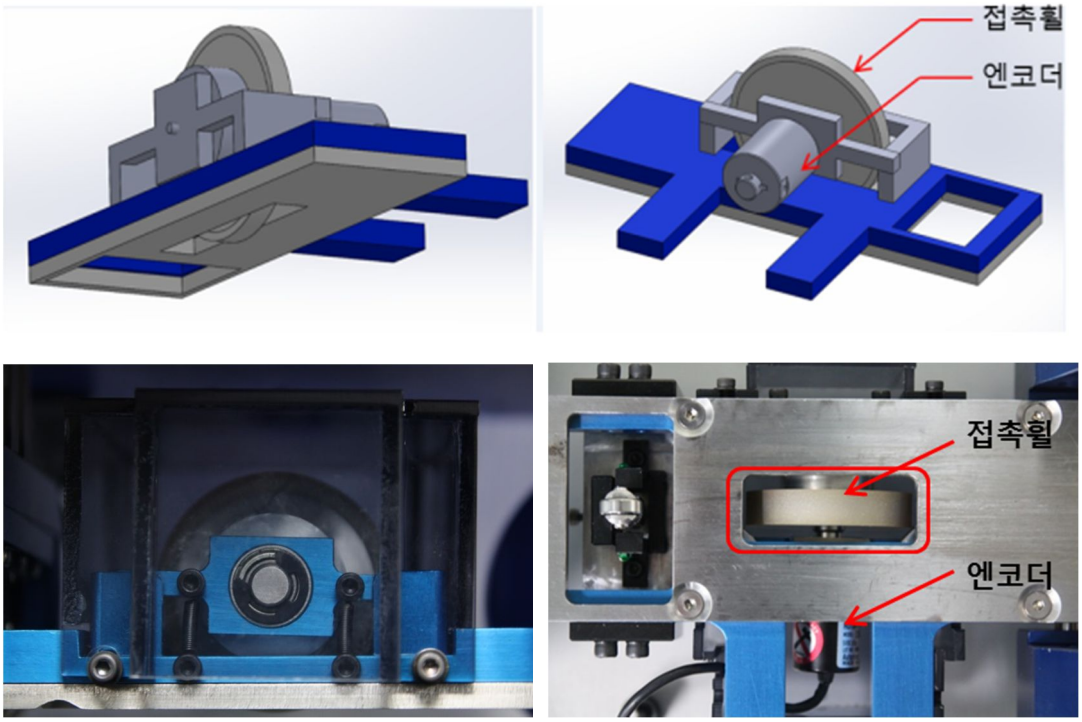


Fig. 3-4 Configuration of encoder

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

파상마모를 정량적으로 측정하기 위한 변위센서는 Table 3-1에 나타낸 바와 같이 센서 및 데이터전송방식을 조합하여 총 3가지 조합을 검토하였다. 자기식 미소변위 측정방식을 구현한 Magnescale사의 DK805SBR은 TCP-IP 통신방식과 RS-232C 통신방식을 이용하여 측정된 변위신호를 컴퓨터에 전송한다. 측정범위는 ±5mm이고, 분해능은 0.1㎛로서 매우 높은 감도를 가진다. 한편, Measurement specialties사의 HCA250은 전자유도식 미소변위 측정방식을 구현한 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)이다. 측정범위는 ±6.35mm이며, 분해능은 0.8㎛로서 자기식 미소변위 측정방식에 비하여 감도가 낮다. HCA250은 아날로그 센서출력이 가능하기 때문에 AD변환기를 통하여 컴퓨터에 변위신호를 전송한다.

Table 3-1 Specification of displacement sensors

번호	센서명	측정방식	회사명	컨트롤러	데이터 전송 방식	측정 범위	분해능
1	DK805SBR	자기식 미소변위측정	Magnescale	MG41-NE	TCP-IP	±5mm	0.1㎛
2				LT30-2GC	RS-232C		
3	HCA250	전자유도식 미소변위측정	measurement specialties	LDM1000	NI-DAQ	±6.35mm	0.8㎛

DK805SBR의 변위 신호를 TCP-IP에 의하여 전송할 경우, 데이터를 패킷으로 묶어 전송하기 때문에 레일의 이송에 따른 데이터 획득 속도가 저하되어, 1.3mm 분해능으로 측정시 1분에 약 6m 정도의 저속으로 측정해야 하는 한계가 있었다. 또한, 동일 센서를 RS-232C 방식으로 전송하면 1.3mm의 공간분해능으로 파상 마모를 측정할 때, 1분당 약 8~16m 정도의 속도로 스캔할 수 있다.

반면에 HCA250의 변위 신호를 NI-DAQ USB-6216에 의하여 16비트의 분해능과 388Hz의 샘플링 속도를 적용하였을 때 1분에 23m, 즉 시속 1.4km/h의 고속 측정이 가능하였다. 따라서, 본 연구에서는 미소변위 측정센서로 LVDT인 HCA250과 AD변환기에 의하여 파상마모를 측정하였다.

한편, 파상마모 측정 시스템은 접촉식이면서도 스캔에 의한 마모를 회피할 수

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

있도록 전용 롤러를 센서 선단에 장착할 필요가 있다. Fig. 3-5 ~ 3-7은 3점 접촉, 2점 접촉 및 1점 접촉 방식의 전용 롤러를 배치한 예를 나타낸다. DK805SBR의 신호를 TCP-IP로 전송하는 MG41-NE는 최대 3개 채널을 동시에 제어할 수 있으므로 3점 접촉 방식이 가능하다. 또한, 동일 센서를 RS-232C 방식으로 전송하는 LT30-2GC는 최대 2개 채널을 동시에 제어할 수 있으므로 Fig. 3-6과 같은 2점 접촉 방식이 가능하다. 또한, LVDT 방식인 HCA250은 레일의 폭방향으로 19mm로서 스케이트 폭이 약 64mm인 점을 고려하면 최대 2점 접촉 방식이 가능하다. 한편 각각의 LVDT는 Fig. 3-8에 나타낸 바와 같이 초소형 선형가이드(dreamtec, LWL1C1R8YTO)에 고정되어 상하로만 이동할 수 있도록 하였다. 최종적으로는 LVDT의 주요 측정축 이외의 변형이 최소화되는 1점 측정방식으로 시스템을 개발하였다.

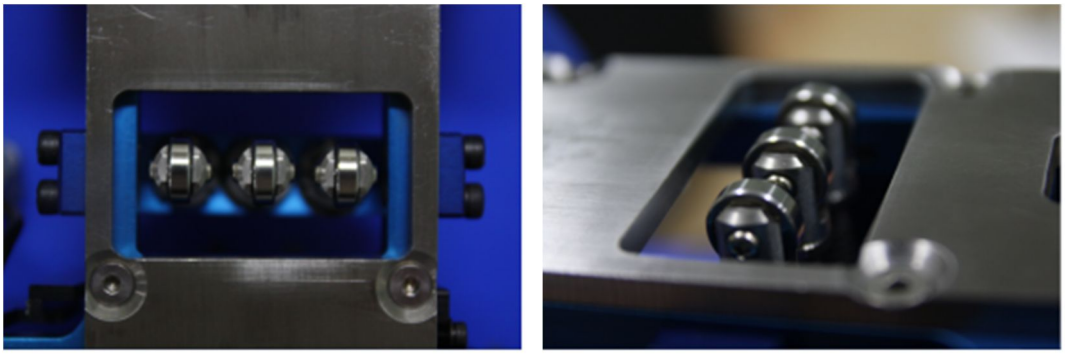


Fig. 3-5 Contacting roller with 3 points

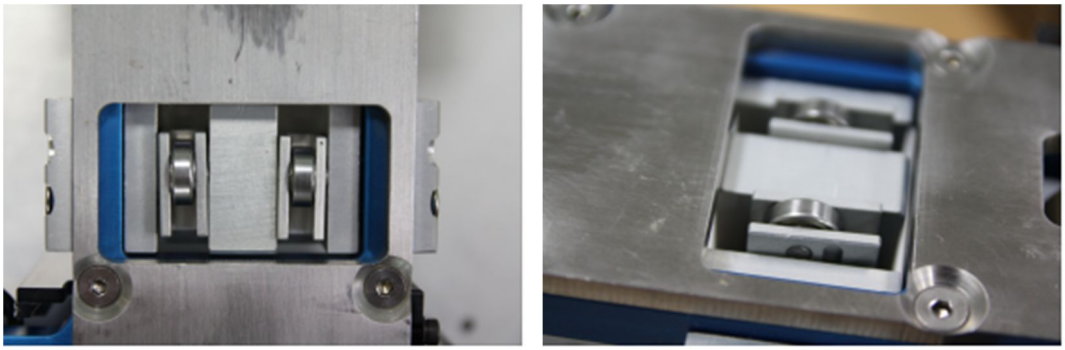


Fig. 3-6 Contacting roller with 2 points

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

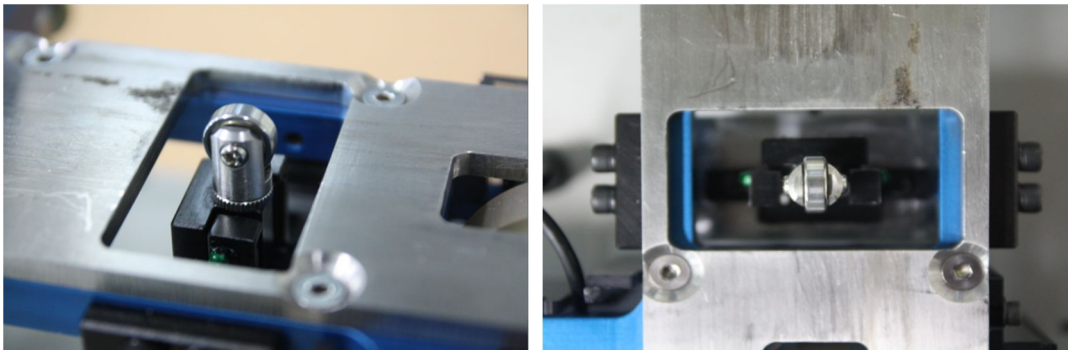


Fig. 3-7 Contacting roller with 1 point

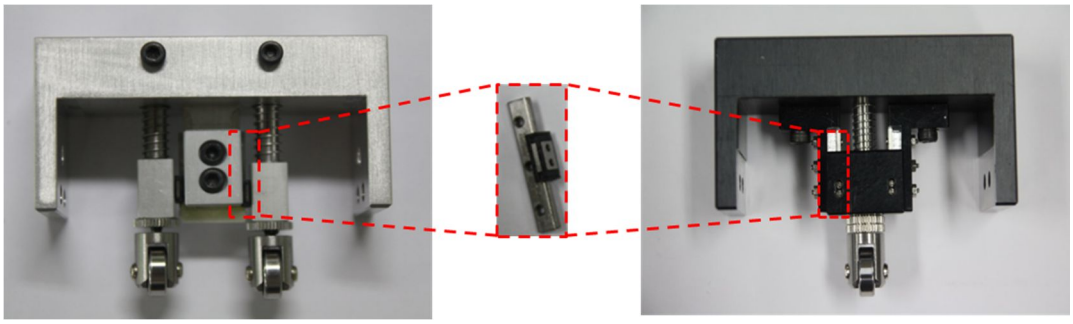


Fig. 3-8 Linear movement guide for supporting LVDT sensor

Fig. 3-9는 선형 LED 광원(LFINE사, LDB60-W12)을 이용하여 레일에 경사방식으로 빛을 입사시키고, 흑체로 된 보호구에 내장된 CCD 카메라(BASLER사, acA640-90uc)에 의하여 레일 파면 영상을 획득하는 파면 영상획득 시스템을 나타낸다. 경사식 광원은 내장된 배터리에 의하여 구동되며, CCD 카메라는 USB3.0으로 노트북에 연결하여 연속적으로 촬영하였다. 측정면적은 47×35 mm^2로서, 300,000 화소인 CCD 카메라에 의하면 최대 0.07mm의 공간분해능을 획득할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

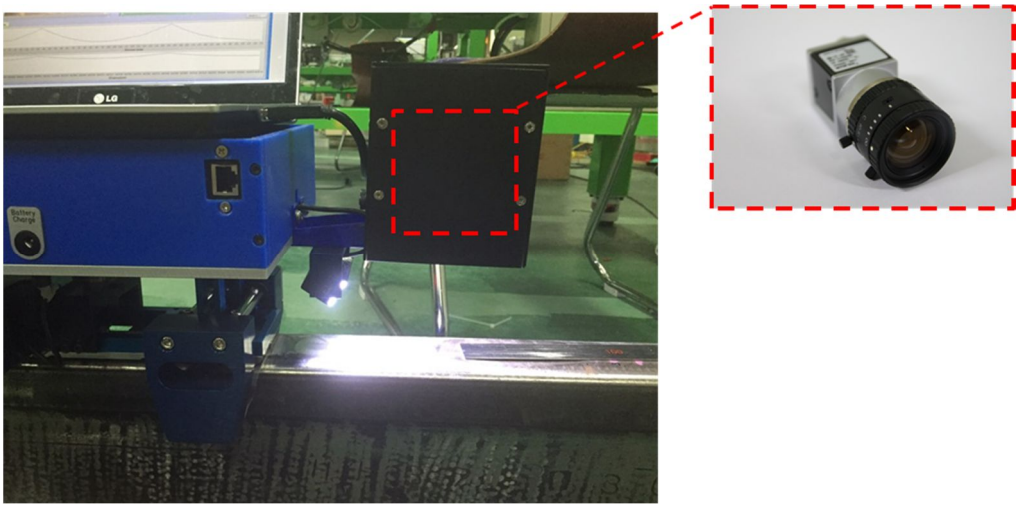


Fig. 3-9 CCD camera system with gradient type optical source

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 데이터수집시스템

Fig. 3-10은 파상마모를 측정하기 위한 전체 시스템의 블록다이어그램을 나타낸다. 배터리(Mobicube MP-24000)는 LVDT 및 컨트롤러, 광원에 전원을 공급한다. 엔코더는 수동스캔시스템의 이동거리를 측정하기 위한 것으로서, 데이터수집시스템(NI-DAQ USB-6216)을 통하여 1.317mm에 해당하는 트리거 신호를 연속적으로 발생한다. 이러한 트리거 신호를 이용하여 LDVT의 측정 주기 및 CCD 카메라에 의한 영상 획득 간격을 계산한다. 따라서, 엔코더 및 LVDT에 의한 거리에 따른 파상마모의 측정은 USB 2.0 방식의 데이터수집시스템에 의하여 노트북에 연결된다. 카메라 영상은 USB 3.0 방식으로 노트북에 연결된다.

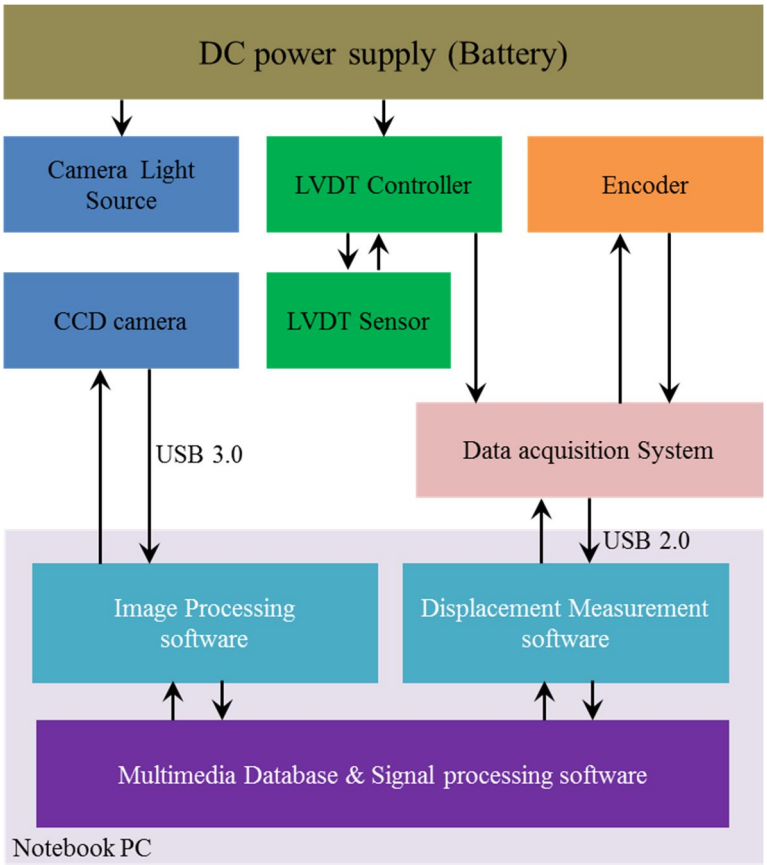


Fig. 3-10 Block diagram of the developed measurment system

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3-11는 변위 및 영상측정용 운용소프트웨어를 나타낸다. “사진/동영상 선택”은 파면의 영상을 취득하는 방식을 선택하기 위한 것으로서, 기본적으로는 고화질을 얻기 위하여 사진 촬영 방식이 지정되었다. 그러나 필요에 따라서 연속적으로 동영상을 촬영할 수 있도록 하였다. “저장경로” 및 “파일명”은 자동으로 저장되는 거리에 따른 파상마모 및 촬영한 영상이 저장되는 폴더 및 이름을 지정할 수 있도록 하였다. 한편, 약 1.3mm 간격으로 수 백 미터 이상을 측정하면 막대한 데이터가 생성되어 소프트웨어의 구동속도가 저하되거나, 컴퓨터 메모리 포화에 따른 블루스크린 오류가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 미리 지정한 폴더 안에 일정한 거리에 따라 별도의 파일명으로 자동 저장할 수 있도록 하였다. 예를 들면, 100m로 지정하면, 1~100m, 100~200m 등의 이름으로 자동으로 파일명이 생성되면서 해당 데이터가 저장된다. 측정이 완료되면 “전체저장” 명령을 통하여, 순차적으로 저장된 각각의 데이터를 통합할 수 있도록 하였다. 이상의 각 기능을 Table 3-2에 정리하였다.

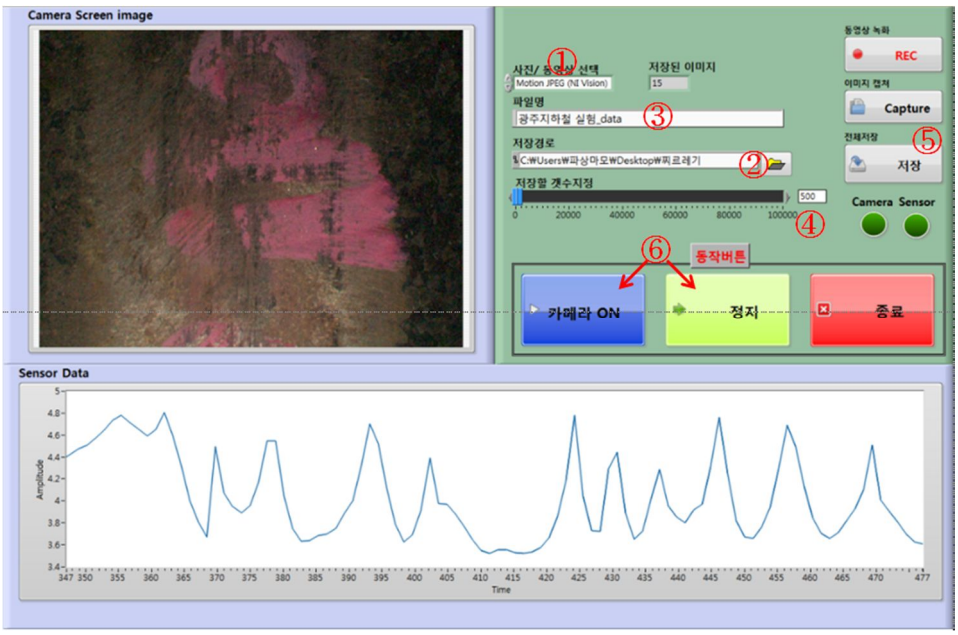


Fig. 3-11 Operation software

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3-2 Function keys of the operation software

	사용기능	설명		비고
①	사진/동영상 선택	저장 방식 택함		
			동영상 저장 방식	Microsoft Video 1
			사진 저장 방식 (기본)	Motion JPEG
②	저장 경로	트리거에 의해 취득한 변위와 영상 저장경로		폴더선택
③	폴더명	지정된 경로에서 저장되는 폴더명		'실험_data'
④	저장할 거리 지정	원하는 거리만큼 분배하여 저장 (mm)		자동저장
⑤	전체저장	측정시작 후 전체 데이터 저장		
⑥	동작버튼	두 가지 동작방식 기능		
			영상영점조절을 위한 영상확인방식	카메라 ON
			트리거에 의하여 취득된 변위와 영상 측정방식	측정/정지

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 절 해석 소프트웨어

Fig. 3-12는 레일 파상마모를 해석하기 위한 소프트웨어를 나타낸다. 변위 및 영상측정용 운용 소프트웨어에 의하여 획득한 거리에 따른 변위측정 데이터의 파일명을 선택하면, 거리에 따른 변위가 “Original Data”에 표시된다. 이때, 특정구간을 마우스에 의하여 클릭 및 드래그하면 좌측 상단에 해당영역에의 변위 정보와 우측 상단에 저장된 이미지를 불러들여 자동적으로 계산된 파노라마 영상이미지를 동시에 볼 수 있다. 한편, 측정시스템으로 획득한 변위신호는 측정 횟수 및 측정 거리에 따라 다르고 거리가 수백~수천일 경우 측정된 변위신호가 압축하여 표시되므로 특정영역 부분에 따라 해석될 필요가 있다. 따라서, “영역선택”을 통하여 측정된 변위신호의 전체 영역 또는 특정구간을 마우스에 의하여 클릭 및 드래그를 통한 해당영역을 선택함으로써 전체 영역 뿐만 아니라 부분적으로 “Spectrogram/ 평가 해석”이 가능하다. 또한, “Peak Detection”은 해당영역의 최고점 신호검출에 의하여 평균 깊이를 계산할 수 있고, “STFT spectrogram”은 해당영역에 대한 거리에 따른 변위정보를 시간-주파수 기법으로 표현함으로 주파수대역의 평균 주파수를 평균 파장으로 환산할 수 있다. 또한, “FFT Analysis”를 통하여 해당영역의 주파수 성분변화에 의한 파상마모의 유무를 판정할 수 있다. 상술한 “Peak Detection”, “STFT spectrogram”, “FFT Analysis”를 통한 해당영역의 정량 평가 결과는 소프트웨어 화면 오른쪽 하단에 지시한다. 이상의 각 기능을 Table 3-3에 정리하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

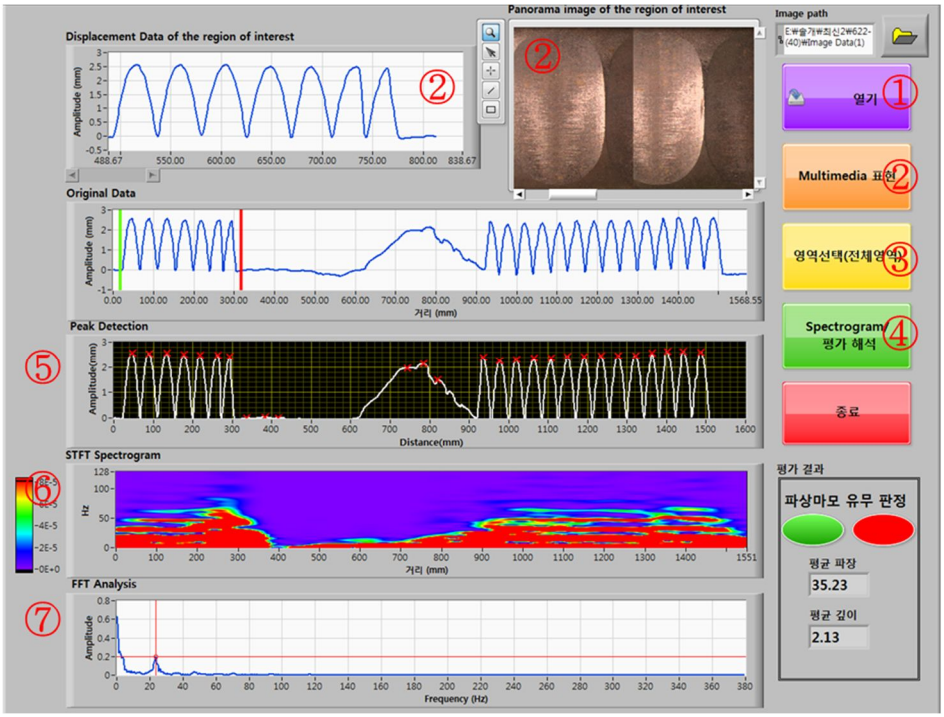


Fig. 3-12 Analysis software

Table 3-3 Function keys of the analysis software

	사용기능	설명	비고
①	파일열기	획득한 변위정보 불러오기	
②	Multimedia 표현	커서 두개(Start point, End point)를 지정하여 관심영역에 대한 변위정보 및 관심영역에 해당하는 파노라마 영상 표시 기능	Start point End point
③	영역선택	정량평가 해석를 위한 전체영역과 관심영역 선택 가능	전체영역/ 관심영역
④	Spectrogram/ 평가해석	해당영역에 대한 Peak Detection(⑤), Spectrogram(⑥) 및 FFT analysis(⑦) 표현	
⑤	Peak Detection	해당영역의 최고점 신호검출 표현	평균 깊이 판정
⑥	STFT spectrogram	해당영역에 대한 거리에 따른 변위정보를 시간-주파수 분석으로 표현	Window Type : Gaussian, length: 235

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

⑦	FFT analysis	해당영역에 대한 주파수에 따른 진폭 그래프	유무 판정
⑧	평가결과	⑤, ⑥, ⑦에 의해 평가된 결과를 자동적으로 지시	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 실험 및 고찰

개발한 레일 파상마모 측정 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 50kgN 레일에 인공 파상마모를 도입한 인공시험편과 광주 지하철(금남로5가역~문화전당역)에서의 현장 적용 실험을 하였다. 이하 각 실험 결과를 보고한다.

제 1 절 인공 시험편 실험

1. 시험편

Fig. 4-1은 경부본선 및 고속철도에 사용되는 50kgN 레일 시험편을 나타낸다. 50kgN 레일에 의하면 계산 무게 50.4kg/m 인장강도는 710N/mm^2, 연신율은 8% 이상으로 일반 철도 주요 본선에 사용된다. Fig. 4-1(a)는 길이가 1,500mm인 시험편에 파장 30mm, 깊이 3mm인 인공 파상마모를 좌측에 14개, 우측에 7개씩 밀링가공하였다. Fig. 4-1(b)는 길이 1,479mm인 시험편에 파장 100mm, 깊이 3mm인 인공 파상마모를 좌측에 4개, 우측에 2개씩 가공하였다. Fig. 4-2 및 Table 4-1는 각각의 파상마모의 번호 및 크기를 나타낸다. A1과 B1의 중심위치는 각 시험편의 끝단으로부터 각각 215mm와 250mm에 위치한다.

(a)

(b)

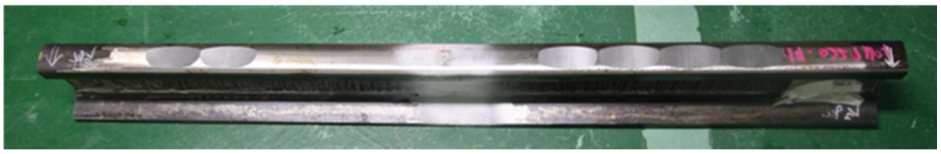


Fig. 4-1 Rail corrugation specimen; (a) Specimen A (30 mm wavelength), (b) Specimen B (100 mm wavelength),

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

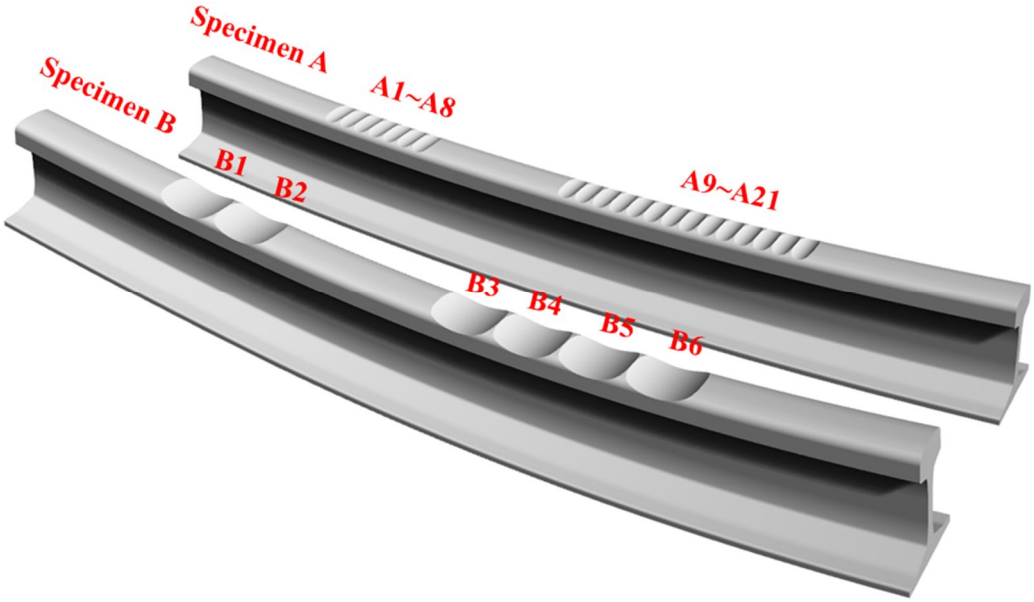


Fig. 4-2 Serial number of each corrugation

Table 4-1 Size of corrugations

Number	Length	Width	Relative Depth	Number	Length	Width	Relatve Depth
A1	30	47	3.03	A15	29	47	3.05
A2	29.5	47.2	3.07	A16	29.9	46.5	3.03
A3	29.6	47	3.01	A17	29.5	47	2.93
A4	30	47	3.06	A18	30.4	46..9	2.98
A5	30	46.8	3.07	A19	30	47.2	2.93
A6	29.8	47	3.08	A20	30.1	47.5	2.96
A7	29.5	46.9	3.02	A21	29.7	47.5	3.02
A8	30	46	3.01	B1	100	45	2.97
A9	30	46	3.01	B2	100	45.5	3.03
A10	30	45.8	3.02	B3	96	44.5	2.86
A11	29.8	46.1	2.96	B4	98	45	2.93
A12	30	46.3	2.99	B5	98	46	3.01
A13	29.8	46.1	2.86	B6	98	47	2.99
A14	30	45.8	3.01				

(Unit : mm)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 실험 및 고찰

Fig. 4-3은 각각의 시험편에 레일 파상마모 측정시스템을 설치하였을 때, 변위 측정센서 및 광학 카메라의 위치에 따른 유효 데이터 취득 구간을 나타낸다. 변위 센서의 중심은 시험편의 끝단으로부터 180mm에 위치한다. 또한, 영상 카메라의 중심위치는 변위측정센서의 끝단으로부터 248mm 이격된 위치에 있다. 따라서, 변위 분포는 A1~A21과 B1~B6의 파상마모를 측정하며, 영상분포는 A9~A21과 B3~B6의 영상을 획득할 수 있다.

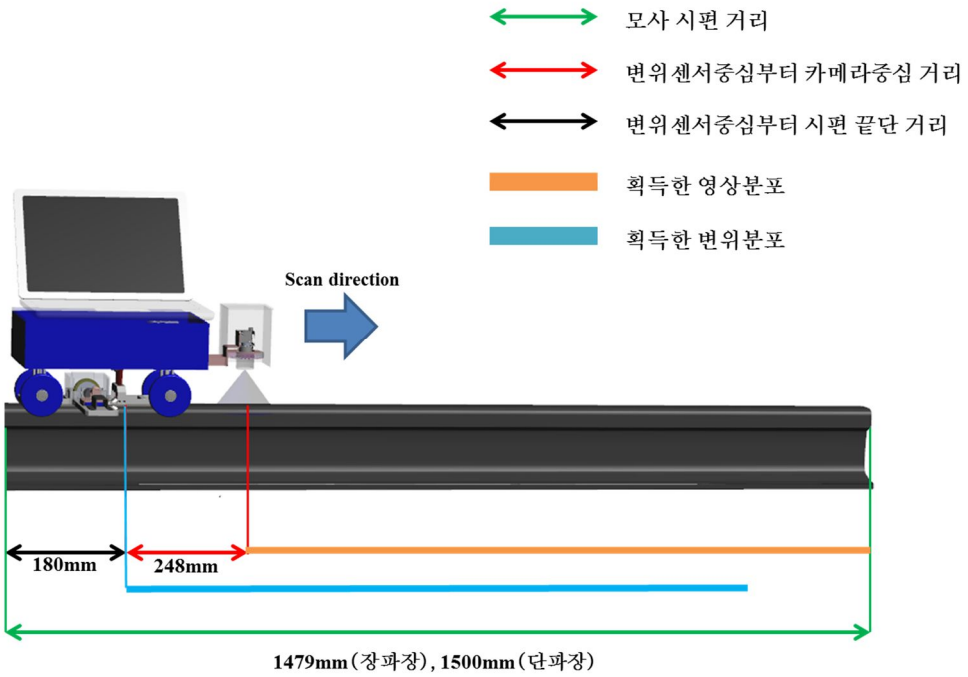


Fig. 4-3 Measurement range on the rail specimen

Fig. 4-4는 Specimen A의 끝단으로부터 428~893mm까지의 영역을 측정한 변위 분포 및 파노라마 영상을 나타낸다. 855mm에서 깊이 3.01mm의 파상마모(A9)가 시작되어 연이어 2개의 파장이 나타나고 있으며, A9과 A10의 거리를 측정하면 파장이 약 30mm임을 알 수 있다. 또한, 동일한 위치에서 취득한 파노라마 영상으로부터 해당 영역의 파

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

면을 확인할 수 있다.

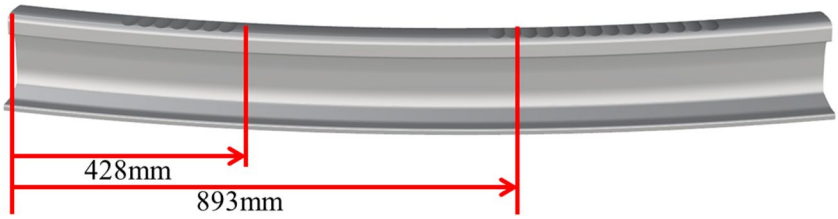
Fig. 4-5는 Specimen A의 끝단으로부터 893~1348mm까지의 영역을 측정한 변위 분포 및 파노라마 영상을 나타낸다. 911mm에서 깊이 2.96mm의 단파장 파상마모(A11)가 시작되어 연이어 12개의 파장이 나타나고 있으며, A11과 A21의 거리를 측정하면 파장이 약 30mm임을 알 수 있다. 또한, 동일한 위치에서 취득한 파노라마 영상으로부터 해당 영역의 파면을 확인할 수 있다.

Fig. 4-6은 Specimen B의 끝단으로부터 428~893mm까지의 영역을 측정한 변위 분포 및 파노라마 영상을 나타낸다. 760mm에서 깊이 2.86mm의 장파장 파상마모(B3)가 시작되어 연이어 2개의 파장이 나타나고 있으며, B3과 B4의 거리를 측정하면 파장이 약 100mm임을 알 수 있다. 또한, 동일한 위치에서 취득한 파노라마 영상으로부터 해당 영역의 파면을 확인할 수 있다.

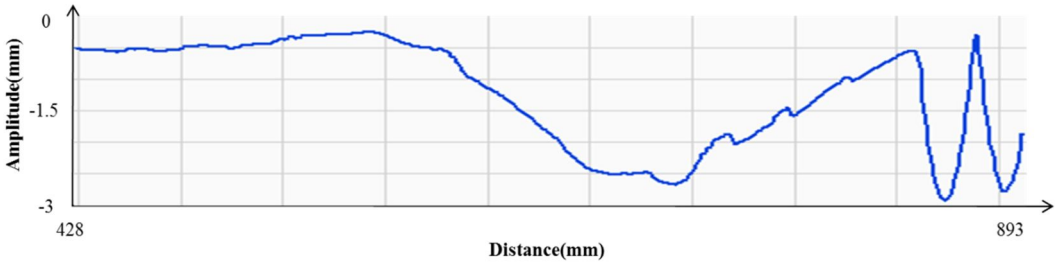
Fig. 4-7은 Specimen B의 끝단으로부터 893~1348mm까지의 영역을 측정한 변위 분포 및 파노라마 영상을 나타낸다. 933mm에서 깊이 3.01mm의 장파장 파상마모(B5)가 시작되어 연이어 2개의 파장이 나타나고 있으며, B5과 B6의 거리를 측정하면 파장이 약 100mm임을 알 수 있다. 또한, 동일한 위치에서 취득한 파노라마 영상으로부터 해당 영역의 파면을 확인할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



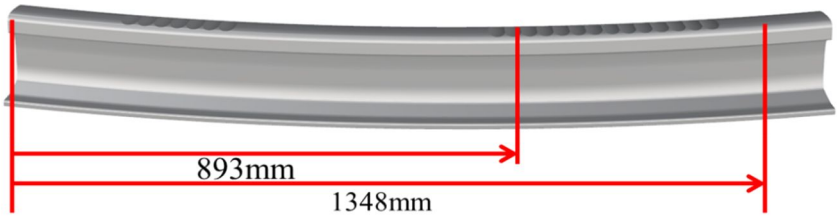
(a) measurement range



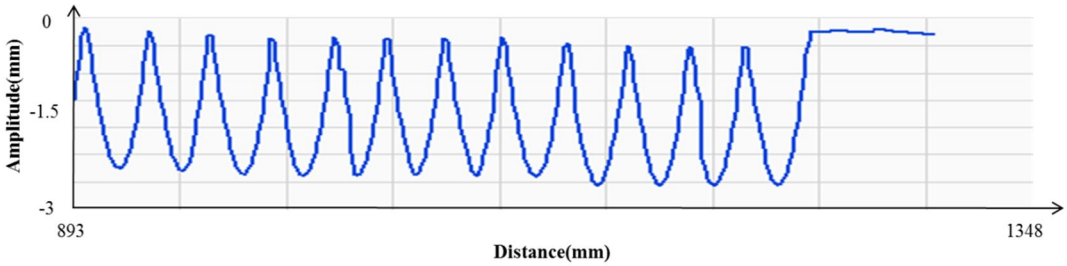
(b) LVDT signal on #1

(c) panorama image on #1

Fig. 4-4 Experimental results on the 1st range with 30mm specimen A



(a) measurement range



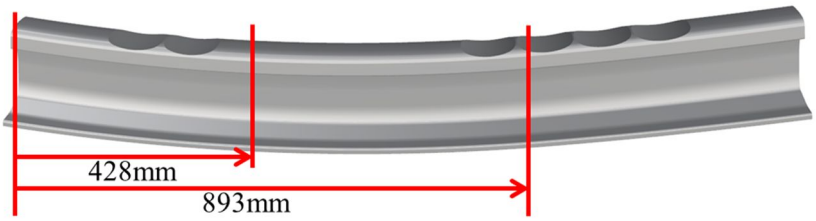
(b) LVDT signal #2

(c) panorama image on #2

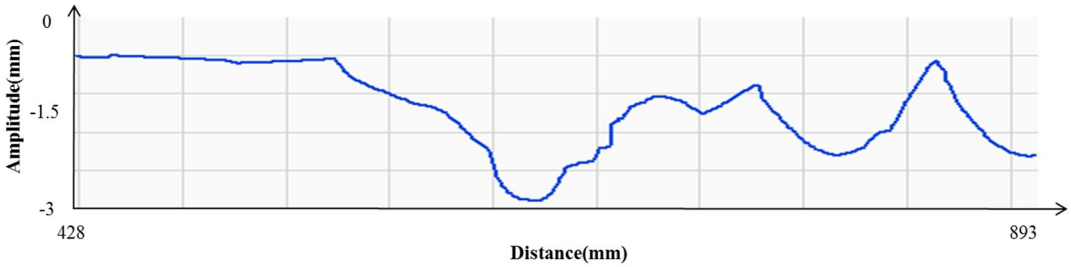
Fig. 4-5 Experimental results on the 2nd range with 30mm specimen A

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



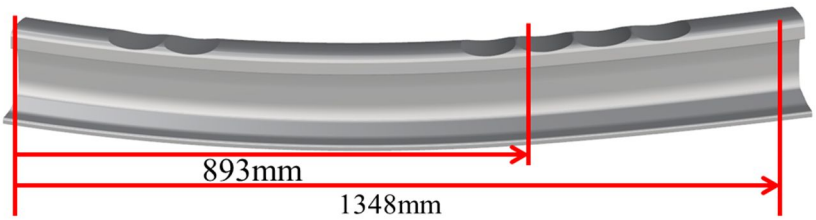
(a) measurement range



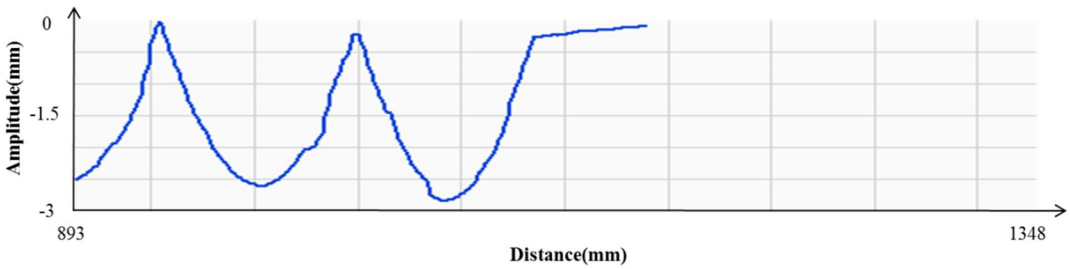
(b) LVDT signal on #1

(c) panorama image on #1

Fig. 4-6 Experimental results on the 1st range with 100mm specimen B



(a) measurement range



(b) LVDT signal on #2

(c) panorama image on #2

Fig. 4-7 Experimental results on the 2nd range with 100mm specimen B

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 4-8은 Specimen A의 전체 영역에서 측정한 미소변위의 분포(a), 해당 영역에서의 FFT 해석결과(b) 및 STFT 해석결과(c)를 나타낸다. FFT 해석에 의하면, 전체적으로 36.02Hz의 주파수에서 강도가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 다음 식(19)에 의하여 계산한 결과, 36.5mm의 파장으로 분포하고 있음을 지시한다.

$$\lambda = \frac{\Delta x}{f} \times 1000 \tag{19}$$

한편, STFT 해석에서는 가우스 윈도우 함수가 310mm가 되도록 설정한 결과이며, Fig. 4-8(c),(d)에 나타낸 바와 같이, 각 거리에서의 모든 값을 합산하면, 해당 위치에서의 최대 파장을 자동으로 계산할 수 있다 따라서, A1~A8까지의 제1파상마모 영역과 A9~A21까지의 제2 파상마모 영역에서 각각 27.70mm, 32.23mm 의 파장을 지시하고 있음을 알 수 있다. 이때 각 거리에서의 모든 값을 합산하면, 해당 위치에서의 최대 파장을 자동으로 계산할 수 있다. 또한, Fig. 4-9(e)에 의하여 최대신호검출에 의한 평균을 평균 깊이 2.41mm로 계산할 수 있다.

Fig. 4-10은 Specimen B의 전체 영역에서 측정한 미소변위의 분포(a), 해당 영역에서의 FFT 해석결과(b) 및 STFT 해석결과(c)를 나타낸다. FFT 해석에 의하면, 전체적으로 14.14Hz의 주파수에서 강도가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이를 파장으로 환산하면, 93.14mm의 파장으로 분포하고 있음을 지시한다.

한편, STFT 해석에 의한 Fig. 4-11(c),(d)에 나타낸 바와 같이 B1~B2까지의 제1파상마모 영역과 B3~B6까지의 제2 파상마모 영역에서 각각 91.26mm, 89.04mm의 파장을 지시하고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 4-11(e)에 의하여 최대신호검출에 의한 평균을 평균 깊이 2.69mm로 계산할 수 있다.

따라서, FFT 해석에 의하여 레일 파상마모의 유무 및 파장의 분포, STFT 해석에 의하여 거리에 따른 합산에 의하여 거리별 평균 파상마모에 관한 정보, Peak Detection에 의하여 평균 깊이에 관한 정보를 해석할 수 있다. 또한, 해당 영역에서의 보다 정확한 변위 및 파면 영상은 상술한 미소변위 데이터 및 파노라마 영상을 통하여 보다 정확하게 평가할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

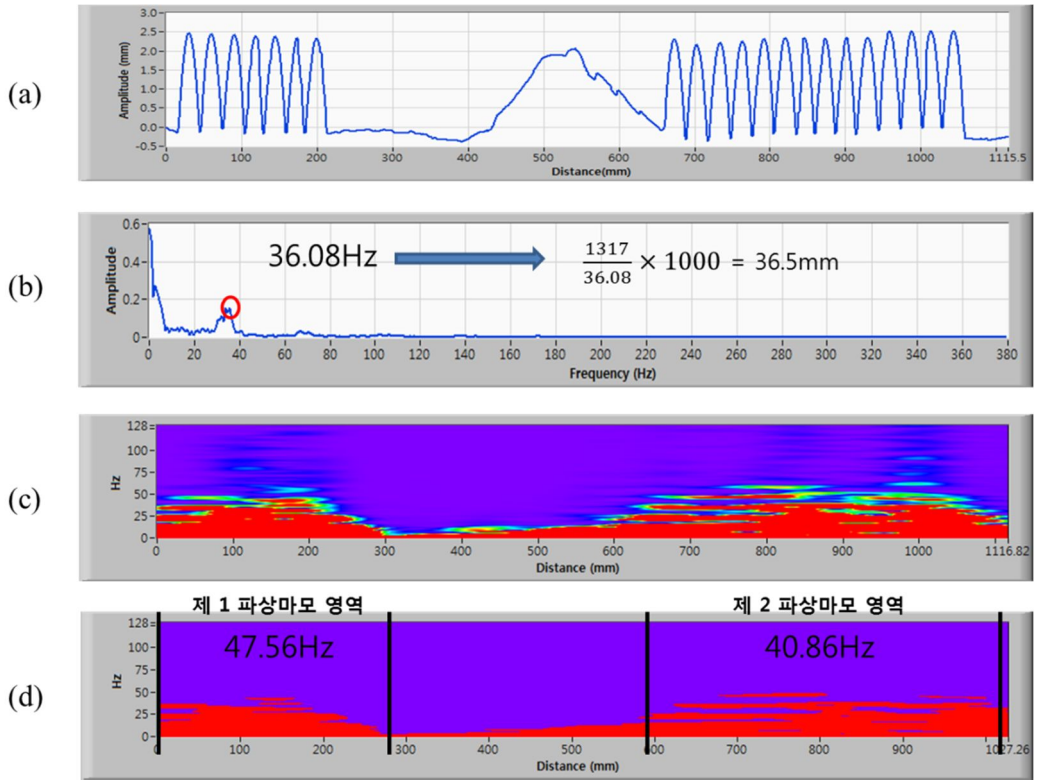


Fig. 4-8 Evaluation of rail corrugation for artificial specimen A (30 mm wavelength); (a) LVDT signal, (b) FFT analysis, (c) STFT analysis and (d) digitizing result of STFT

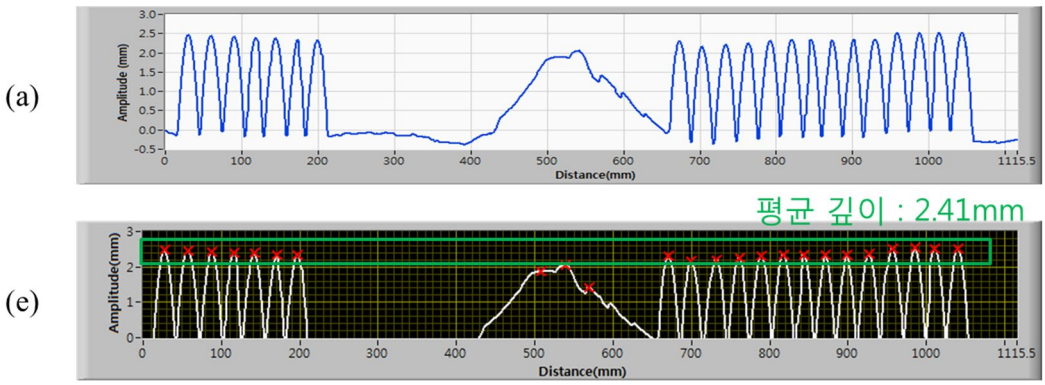


Fig. 4-9 Evaluation of rail corrugation for artificial specimen A (30 mm wavelength); (a) LVDT signal, (e) Peak detection of LVDT signal

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

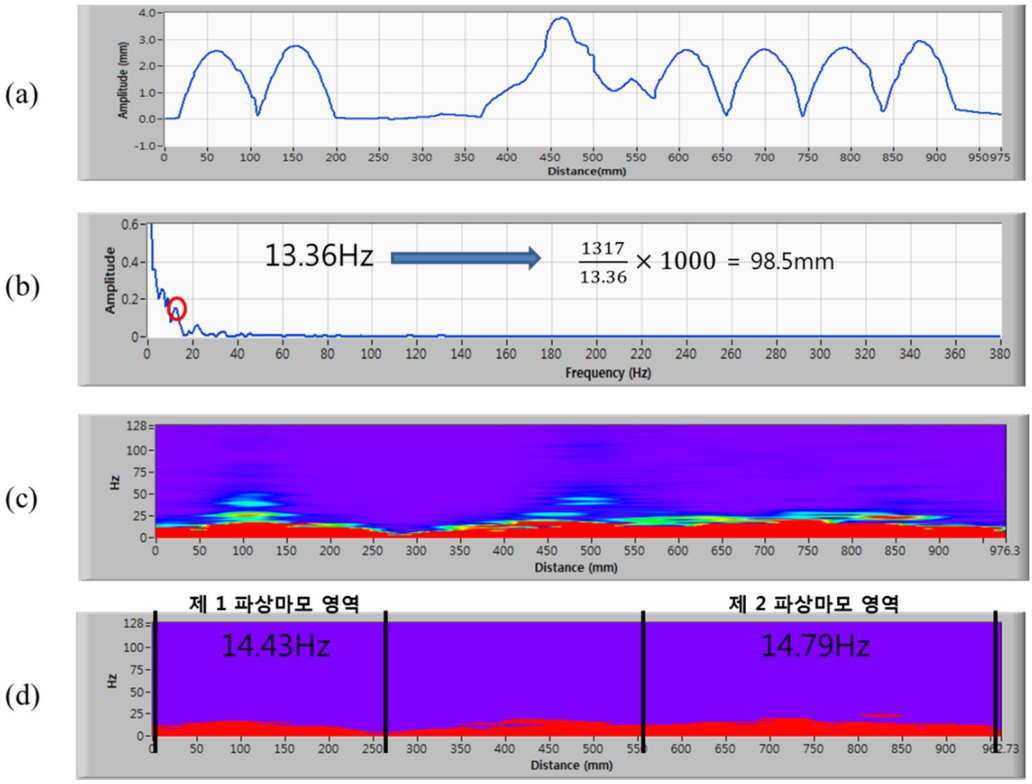


Fig. 4-10 Evaluation of rail corrugation for artificial specimen A (100 mm wavelength); (a) LVDT signal, (b) FFT analysis, (c) STFT analysis and (d) digitizing result of STFT

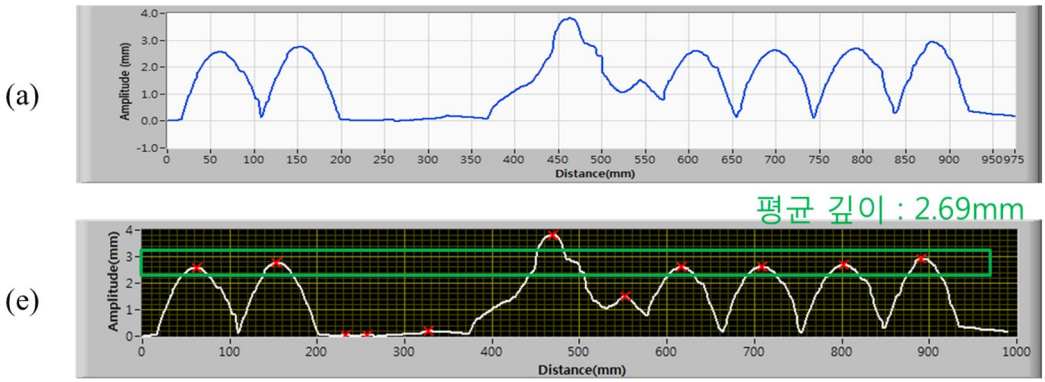


Fig. 4-11 Evaluation of rail corrugation for artificial specimen A (100 mm wavelength); (a) LVDT signal, (e) Peak detection of LVDT signal

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 현장 적용 실험

개발된 레일 파상마모 측정시스템을 이용하여 현장 적용성을 파악하기 위하여 Fig. 4-12에 나타낸 바와 같이 광주 지하철의 금남로 4가역에서 문화전당역 구간에서 약 720m의 거리를 2시간에 걸쳐 측정하였다. Fig. 4-13은 실제 레일에 존재하는 파상마모를 나타낸다. (a)는 장파장(길이 70mm, 깊이 0.1mm), (b)는 단파장(길이 30mm, 깊이 0.1mm)의 경우이다.

Fig. 4-12 Field test in the Gwangju subway rail road

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

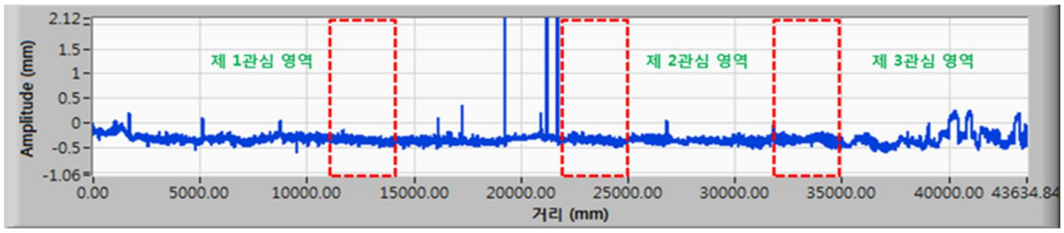
(a) (b)

Fig. 4-13 Samples of rail corrugation; (a) 30mm and (b) 70mm length of wavelength

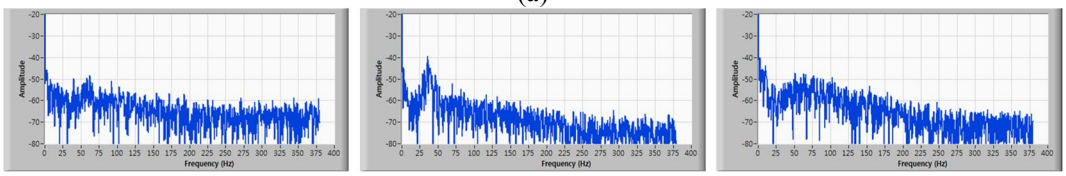
Fig. 4-14는 약 40m의 거리를 측정한 변위데이터(a), FFT 해석 결과(b) 및 STFT 해석 결과(c)를 나타낸다. 20m 전후에서 큰 변위의 변화가 발생한 것은 시스템을 수동으로 들어올리면서 발생한 왜곡 신호이다. 제1, 제2 및 제3 관심영역을 임의로 선정하여 FFT 해석(Fig. 4-14 (b))을 수행한 결과, 각각 62~63Hz, 35~36Hz, 19~20Hz의 주파수 대역이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이를 식 (19)를 이용하여 환산하면 20~21mm, 36~37mm, 69~70mm의 파장을 가지는 파상마모가 분포하고 있음을 의미한다. 보다 자세한 해석을 위하여, 해당 영역을 Fig. 4-15, Fig. 4-16, Fig. 4-17에 각각 나타낸 바와 같이 확대하여 분석하였다. 제1 관심영역의 11.7m 부근에서 가장 깊은 파상마모가 발생하며, 전체적으로 20mm 정도의 파상 마모가 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한, 제2 관심영역에서는 전체적으로 36mm 정도의 파장을 가지는 파상마모가 분포하며, 제3 관심영역에서는 69mm 정도의 파장을 가지는 파상마모가 분포하였다. Fig. 4-18 ~ Fig. 4-24는 제2 관심영역에서 얻은 파노라마 영상과 함께 변위 분포를 나타낸다. 특히 높은 강도를 보이는 22.5m, 22.9m, 23.4m, 23.7m 영역에서는 Fig. 4-19 ~ Fig. 4-21에 나타낸 바와 같이 급격한 변위 분포가 나타나고 있음을 알 수 있다.

Collection @ chosun

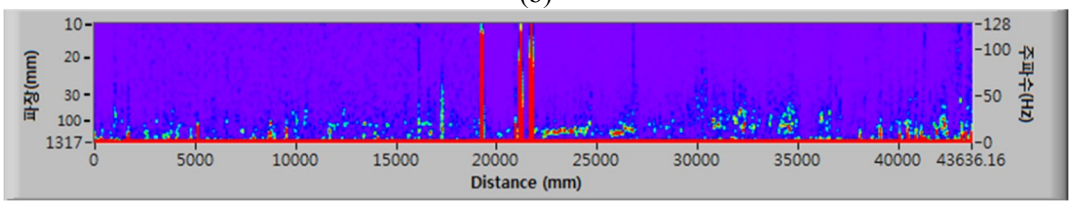
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)



(b)



(c)

Fig. 4-14 Experiment and analysis results of rail corrugation

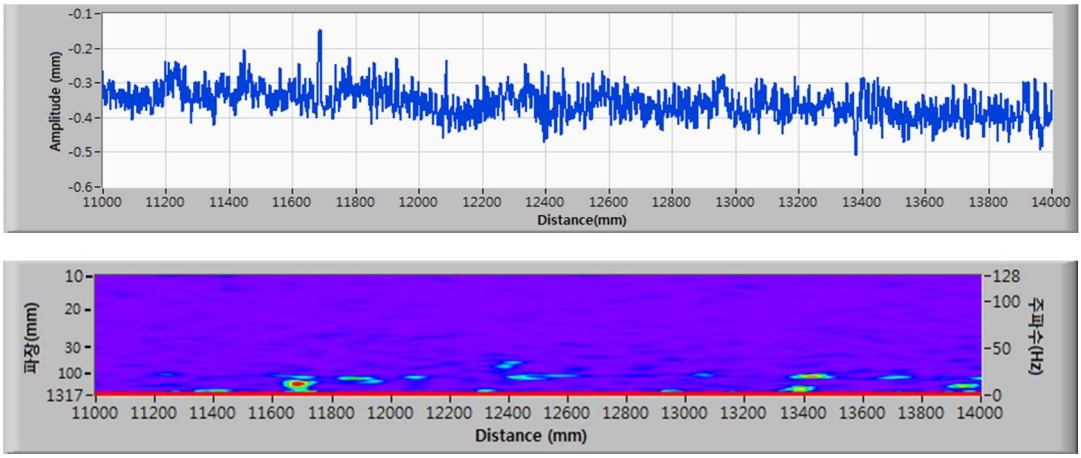


Fig. 4-15 Experiment and analysis results of rail corrugation on the range 1

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

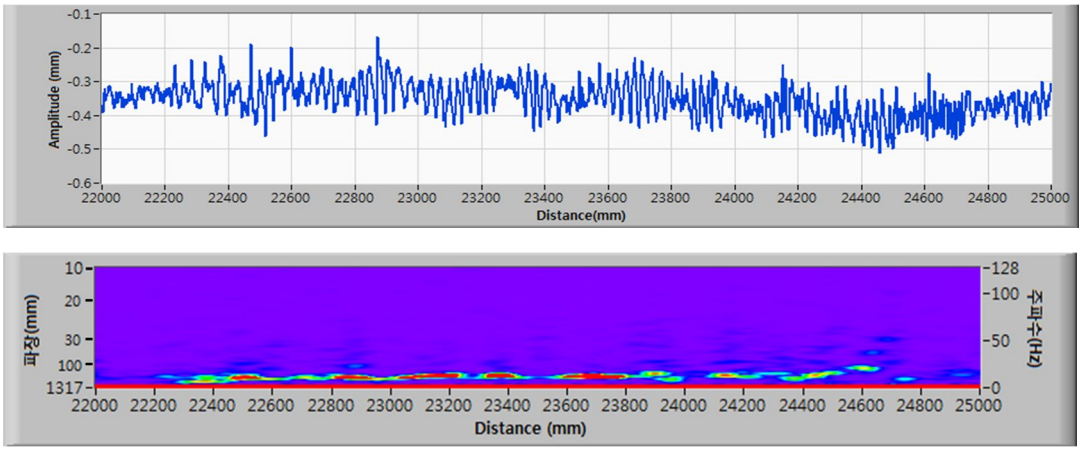


Fig. 4-16 Experiment and analysis results of rail corrugation on the range 2

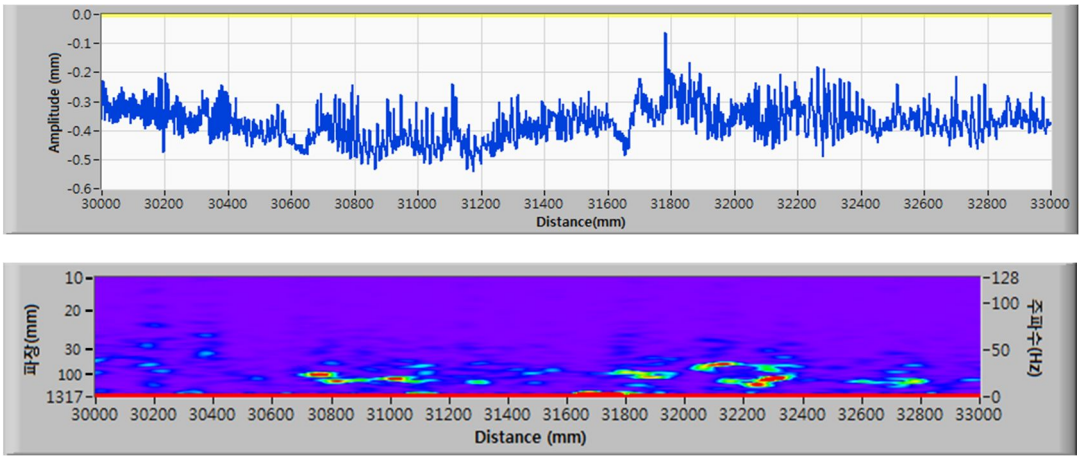


Fig. 4-17 Experiment and analysis results of rail corrugation on the range 3

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

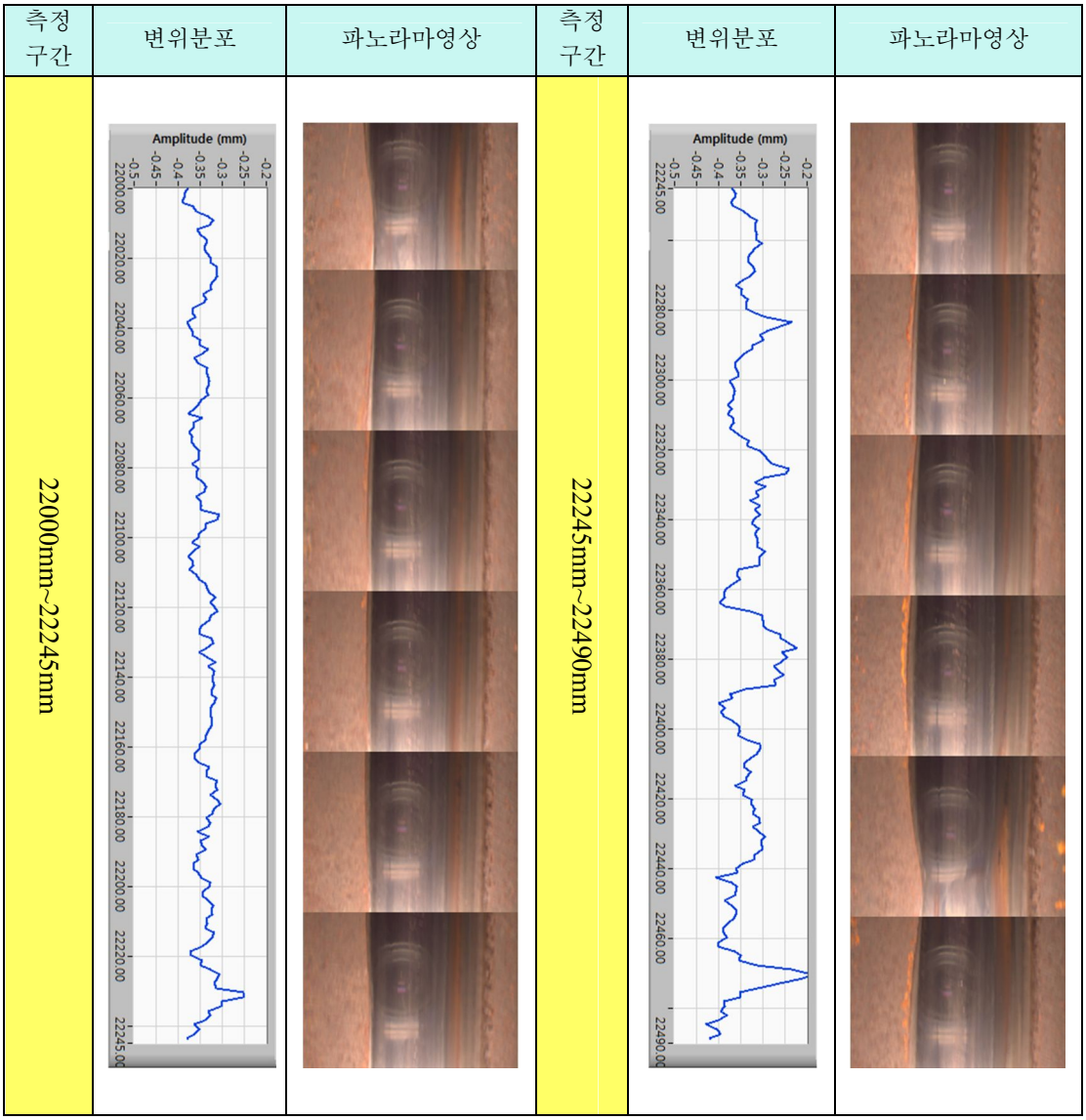


Fig. 4-18 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #1, #2

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

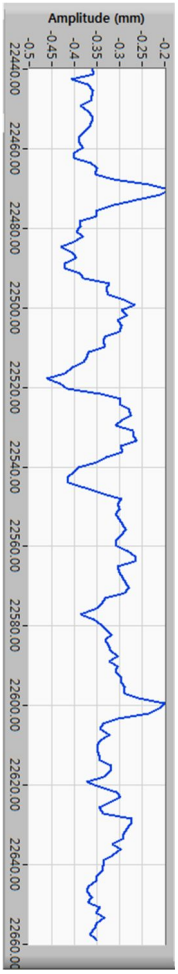
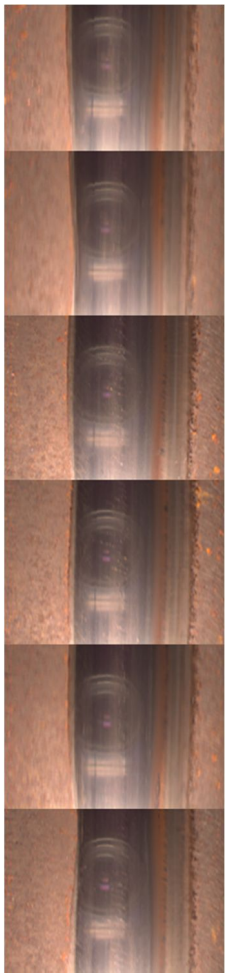
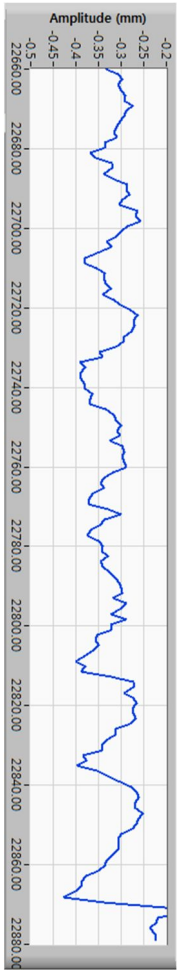
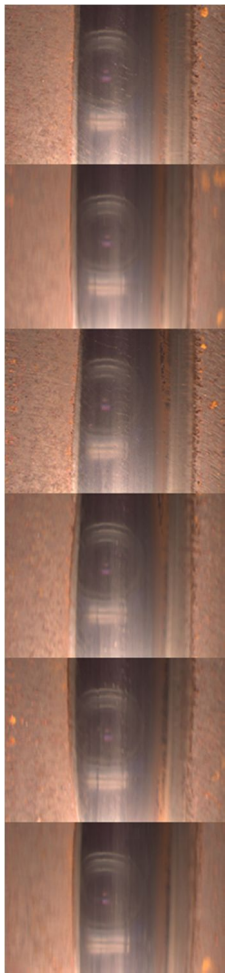
측정 구간	변위분포	파노라마영상	측정 구간	변위분포	파노라마영상
22490mm~22735mm			22735mm~22980mm		

Fig. 4-19 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #3, #4

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

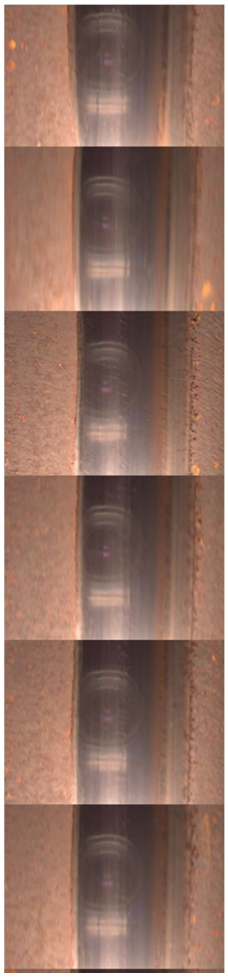
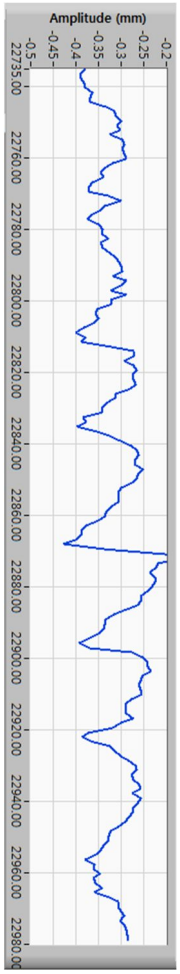
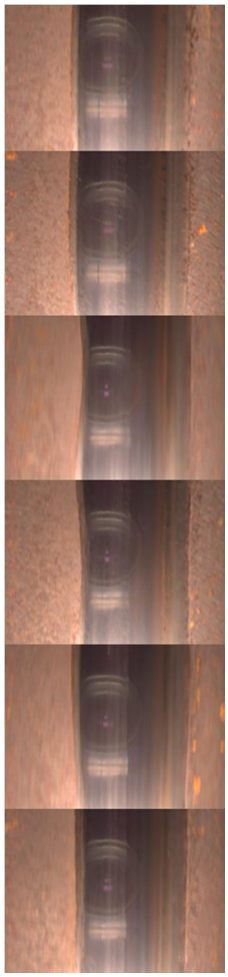
측정 구간	변위분포	파노라마영상	측정 구간	변위분포	파노라마영상
22980mm~23225mm			23225mm~23470mm		

Fig. 4-20 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #5, #6

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

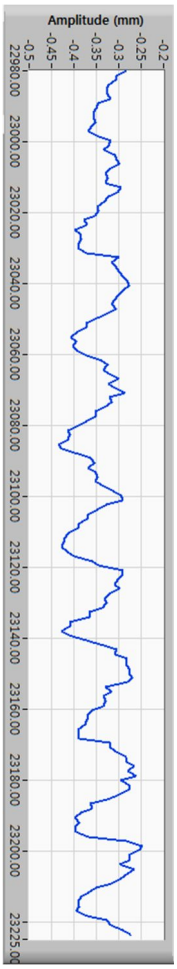
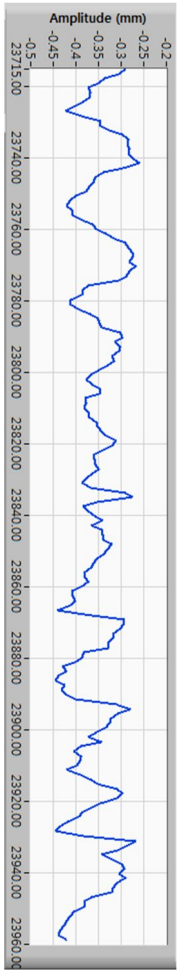
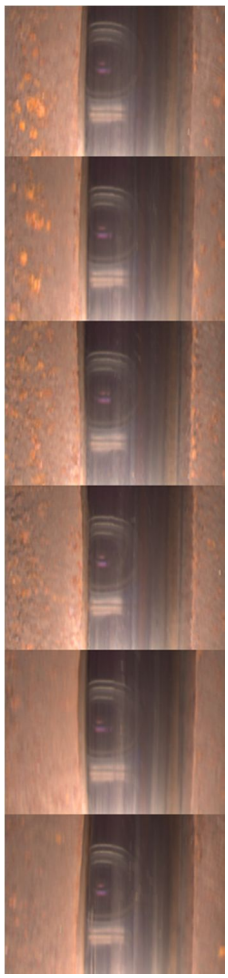
측정 구간	변위분포	파노라마영상	측정 구간	변위분포	파노라마영상
23470mm~ 23715mm			23715~23960mm		

Fig. 4-21 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #7, #8

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

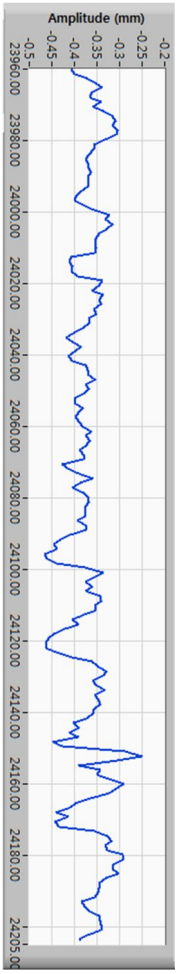
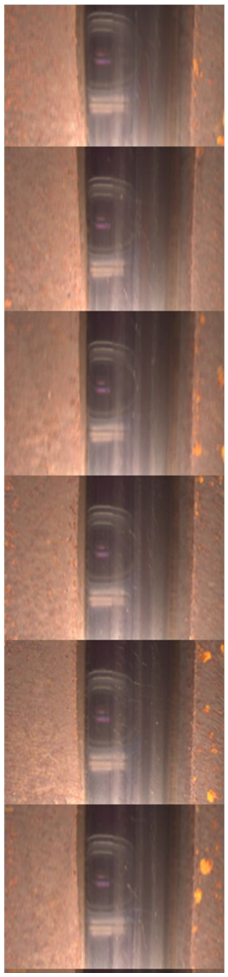
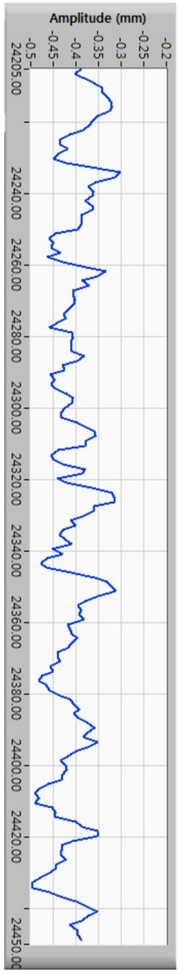
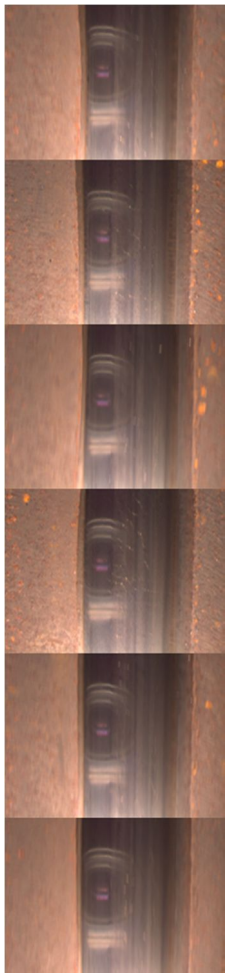
측정 구간	변위분포	파노라마영상	측정 구간	변위분포	파노라마영상
23960mm~ 24205mm			24205~24450mm		

Fig. 4-22 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #9, #10

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

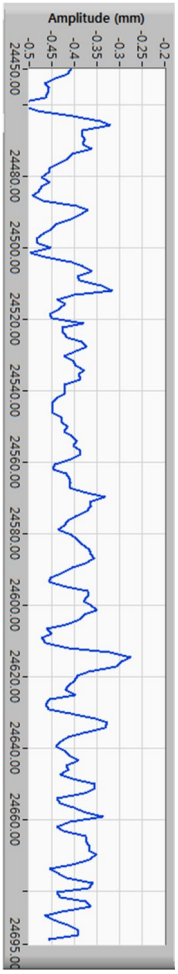
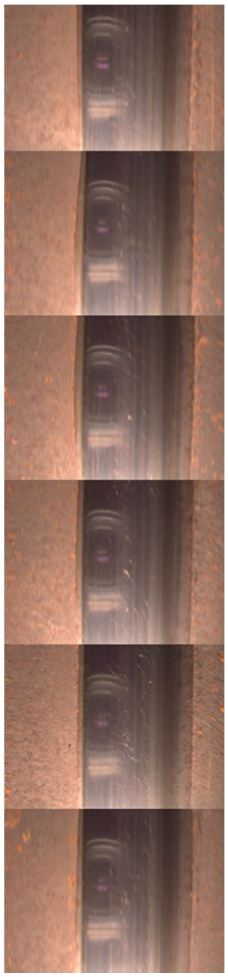
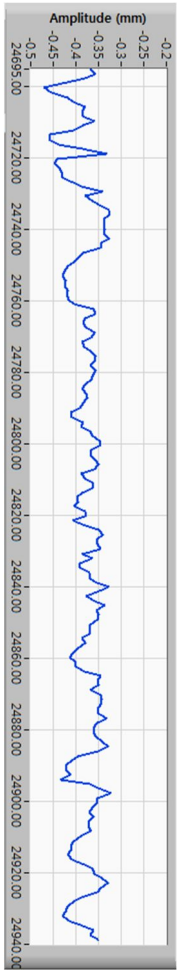
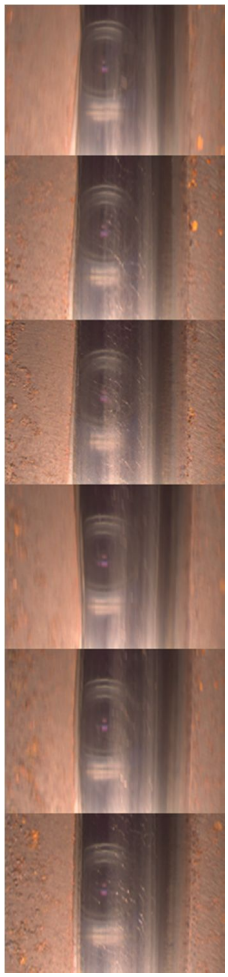
측정 구간	변위분포	파노라마영상	측정 구간	변위분포	파노라마영상
24450mm~24695mm			24695~24940mm		

Fig. 4-23 Multimedia presentation of the region of interest 2 points #11, #12

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결 론

파상마모는 레일과 철도차량의 차륜이 직접 접촉하여 반복 주행하는 것에 의하여 레일 두부에 일정한 간격으로 형성되는 연속적인 요철을 뜻한다. 파상마모는 진동 및 소음 발생의 원인이 되어 철도차량의 승차감을 저하시키고, 차륜의 수명단축 및 궤도구성품의 열화를 촉진한다. 또한, 미세한 파상마모라도 일정크기 이상에 도달하면 급격히 성장하여 철도차량의 탈선과 같은 사고를 유발할 수 있다. 이와 같이 파상마모는 인적, 경제적으로 큰 손실을 초래하므로, 적절한 방법을 통하여 파상마모를 감소시키거나 파상마모의 발생을 미연에 방지할 필요가 있다.

본 연구에서는 파상마모를 감소시키는 방법 중 시스템 개발을 통한 주기적인 모니터링 및 정량적인 측정을 제시하였다. 파상마모 측정 및 평가에 관한 해외 연구사례를 참고하여, 국산 기술의 확보를 전제로 레일 파상마모 측정 시스템을 개발하였다. 시스템은 전자유도식 변위측정법, 영상획득 및 국소 푸리에 변환의 원리를 이용하여 수동스캔시스템, 센서시스템, 데이터수집시스템, 해석소프트웨어로 구성된다. 파상마모 측정 시스템은 레일의 안쪽에서 밀면서 측정하는 수동스캔 방식으로 측정속도는 시속 약 1.4km로, 1.317mm의 간격으로 내재된 배터리를 이용하여 약 2시간 20분동안 측정할 수 있다.

시스템 구성으로는 변위 측정의 기준면이 되는 스케이트의 중심에 LVDT를 설치하여 기준면으로부터 레일까지의 거리를 연속적으로 측정하였고, 변위측정과 동시에 파면 영상을 비교 분석하기 위해 CCD 카메라가 시스템의 선단에 설치되었다. 또한, 휴대성 및 현장 적용성을 강화하기 위하여 모든 시스템은 배터리 및 노트북 기반의 데이터 취득 시스템을 채용하였다. 또한, 개발한 레일 파상마모 측정 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 인공 파상마모를 도입한 50kgN 레일 시험편 실험과 광주 지하철(금남로5가역~문화전당역)에서의 현장 적용 실험을 하였다.

인공 시험편을 통하여 취득한 파상마모 신호를 해석하기 위하여 푸리에 변환을 이용한 FFT 및 STFT 해석법을 활용하였다. FFT 해석에 의하여 레일 파상마모의

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

유무 및 파장의 분포를 알 수 있으며, STFT 해석에 의하여 거리별 파장의 평균 주파수대역을 알 수 있다. 평균 주파수를 통한 제 1 시험편과 제 2시험편에서 각각 29.97mm, 90.15mm의 평균파장을 지시하였고, 해당영역의 최고 신호검출(peak detection)에 의해 2.55mm의 평균 깊이로 파상마모가 분포하고 있음을 확인하였다. 따라서, 파장은 0.1~9.8%의 오차, 깊이는 15%의 오차를 가진다. 또한, 현장실험을 통하여 40m의 거리에 해당하는 변위데이터를 취득하였고, 파상마모로 추정되는 이상신호가 존재하는 영역을 제 1, 제2 및 제 3 관심영역으로 선정하여 해석하였다. FFT 해석을 통하여 20~21mm, 36~37mm, 69~70mm의 파장을 가지는 파상마모를 검출할 수 있었으며, 미소변위 데이터 및 파노라마 영상을 통하여 해당 영역에서의 보다 정확한 변위 및 파면 영상을 보다 정확하게 평가할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

REFERENCE

[1] 육상교통수단의 환경성 비교분석보고서, 환경정책평가연구원, 2002

[2] 미래형 철도물류체계 구축방안 연구보고서, 건설교통부, 2007

[3] 정수영, 안성진, 김표종, "신교통시스템 도입을 위한 차량시스템에 관한 고찰," 한국철도학회, pp. 284-290, 2009

[4] 김재훈, 이제윤, "철도차량 모니터링 시스템 개발을 위한 자가발전 기술 연구," 대한기계학회 논문집 B 권 35.9, pp. 955-960, 2011

[5] 이병훈, 서병일, "고속 궤도차량의 동역학적 모델링 및 해석," 대한기계학회, pp. 1486-1493, 2006

[6] 13년도 1사분기 철도사고 분석 보고서(2008~2013), TS교통안전공단, 2013

[7] 이찬우, 허현무, "파상 마모 구간에서의 KTX 차량 승차감 분석," 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 128-129, 2012

[8] 권석진, 김재철."곡선부 레일의 파상마모 발생 특성." 한국정밀공학회, 2015

[9] S. L. Graszsie, "Rail corrugation: advances in measurement, understanding and treatment," *Wear*, vol. 258, pp. 1224-1234, 2005.

[10] M. Bocciolone, A. Caprioli, A. Cigada, and A. Collina, "A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, pp. 1242-1254, 2007

[11] P. Gullers, L. Andersson, and R. Lundén, "High-frequency vertical wheel–rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities," *Wear*, vol. 265, pp. 1472-1478, 2008.

[12] P. Torstensson and J. C. Nielsen, "Monitoring of rail corrugation growth due to irregular wear on a railway metro curve," *Wear*, vol. 267, pp. 556-561, 2009.

[13] H.Tanaka, Yuzo Saruki, Akihiro Haga and Motoyasu Fukuyama, "Detection method for rail corrugation adopting on-board monitoring," *WCRR*, pp.1-12, 2011

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[14] 미래철도기술개발사업 기획보고서 “궤도평가 및 유지보수 장비개발 기획”, 국토교통부, 2013

[15] http://bance.com/mobilecontinuouscorrugationmeasuringsystem.

[16] Y. Le Bihan, “Study on the transformer equivalent circuit of eddy current nondestructive evaluation,” *NDT & E International*, vol. 36, pp. 297-302, 2003

[17] A. J. Fleming, “A review of nanometer resolution position sensors: operation and performance,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 190, pp. 106-126, 2013.

[18] Lai, Yuqing. "Eddy current displacement sensor with LTCC technology." Diss, Universitätsbibliothek Freiburg, 2005

[19] M. R. Nabavi and S. N. Nihtianov, “Design strategies for eddy-current displacement sensor systems: review and recommendations,” *Sensors Journal, IEEE*, vol. 12, pp. 3346-3355, 2012

[20] H. Wang and Z. Feng, “Ultrastable and highly sensitive eddy current displacement sensor using self-temperature compensation,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 203, pp. 362-368, 2013.

[21] Lienau, Jeffrey A. “Magnet position sensing system.” U.S Patent, 1983.

[22] 이진이, 김정민, 전종우 “절대 변위 측정 장치,” 대한민국 Patent , 2011

[23] http://www.magnescale.com/mgs/product/catalog/DigitalGauge_en.pdf

[24] J. G. Webster and H. Eren, Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement vol. 1: CRC press, 2014.

[25] Mishra, R. "LVDT: Basic Principle, Theory, Working, Explanation & Diagram-Linear Variable Differential Transformer.", 2012

[26] Saxena, Suresh C, and SB Lal Seksena, “A self-compensated smart LVDT transducer,” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions* ,pp.748-75, 1989

[27] 유종선, 류시형, 유형태, “LVDT를 이용한 터빈 베인 측정시스템 개발,” 한국정밀공학회 2008 년도 추계학술대회 논문집, pp. 421-422, 2008.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[28] Weissbach. Robert, S. David R Loker, and Ralph M. Ford. "Test and comparison of LVDT signal conditioner performance." *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE*. Vol. 2. IEEE, 2000.

[29] S. Tomažič and S. Žnidar, "A fast recursive STFT algorithm," *in Electrotechnical Conference, 1996. MELECON'96., 8th Mediterranean*, pp. 1025-1028, 1996

[30] M. K. Kiymik, I. Guler, A. Dizibuyuk, and M. Akin, "Comparison of STFT and wavelet transform methods in determining epileptic seizure activity in EEG signals for real-time application," *Comput Biol Med*, vol. 35, pp. 603-16, 2005.

[31] Kıymık, M. Kemal, et al, "Comparison of STFT and wavelet transform methods in determining epileptic seizure activity in EEG signals for real-time application." *Computers in biology and medicine* , pp. 603-616, 2005

[32] Nawab, S. Hamid, Thomas F. Quatieri, and Jae S. Lim, "Signal reconstruction from short-time Fourier transform magnitude," *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions* pp.986-998, 1983

[33] N.Kehtarnavaz, N.J Kim, "Digital Signal Processing System-Level Design Using LabVIEW", University of Texas at Dallas, 2005

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ackowledgements

후기를 적으려고 하니, 지난 3년 전 연구실에 처음 들어와서 한일들이 문득 떠오릅니다. 대학교 3학년 학부생 때 처음 들어와 연구실일을 시작하게 되었습니다. 처음에는 너무 낯설고 때론 재미있었고, 때론 힘이 벅차서 힘들기도 했지만, 연구실 동기들과 고생하면서 희노애락 함께 했던 지난 추억들이 생각납니다. 학부생때의 미숙한 지식을 쌓아가면서 석사과정를 하게 되었고 어느 덧 2년이라는 시간이 더 흘러 한층 더 성장한 '석사학위' 라는 좋은 결실을 맺게 된거 같습니다. 많이 부족한 저를 지금까지 이끌어주신 분들께 감사의 말씀 드립니다.

저의 논문이 완성하기까지 이론적 지식 및 학문적으로 아낌없이 지도하여 주신 이진이 교수님, 부족한 저의 논문을 심사해주시고 평가 및 조언해주신 고낙용 교수님, 조창현교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 학문적으로 지식의 폭을 넓혀주신 최한수 교수님, 장순석 교수님, 반성범 교수님, 곽근창 교수님께 감사의 말씀드립니다. 연구실 생활에 어려운 점이나 부족했던 점을 아낌없이 이끌어 주신 김정민 박사님, 레민 후이 박사님 감사드리고, 시스템 제작을 위해 도움주신 ㈜에이스이엔지 정진철 사장님, 시스템 적용을 위해 광주지하철에서 실험을 하게 도움주신 한국철도기술연구원 권석진 박사님, 김재철 박사님, 광주 지하철 관계자 분들께 감사의 말씀드립니다.

연구실 생활을 하면서 우여곡절도 많았는데 함께 의지하며 헤쳐나간 우리동기 세진이형, 현종이형, 은호형, 종현이, 순보, 부균이 너무너무 수고많았고 이번에 같이 졸업하는 세진이형, 종현이, 순보 축하합니다 또한, 지치고 힘들때 언제든지 부르면 나와서 따뜻한 말해주는 홍지환, 김병수, 김승원, 전승준 고맙다.

끝으로 제가 대학원 공부를 시작할 수 있도록 용기를 주시고 힘든 과정중에서도 아낌없는 격려와 응원을 해주신 우리가족 아버지, 어머니, 형 너무너무 감사드리고 사랑합니다.

2016년 6월
박주현 올림

Collection @ chosun