

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.1.585>

JCCT 2024-1-73

레일표면결함과 레일내부균열의 상관관계 분석

Correlation Analysis of Rail Surface Defects and Rail Internal Cracks

최정열*, 한재민**, 김영기***

Jung-Youl Choi*, Jae-Min Han**, Young-Ki Kim***

요약 본 연구에서는 현재 도시철도 레일의 노후화로 인한 레일표면결함이 증가하고 있으나 국가에서 제정된 궤도성능평가에 관한 세부지침에서 레일표면손상을 기술자의 육안, 간단한 측정 도구로 점검을 수행하는 실정이다. 최근 궤도진단법 제정에 따라 대규모 예산이 투입되고 레일진단물량이 급증되고 있으나 노동집약적인 육안조사기법으로는 진단결과에 대한 신뢰성확보가 어려운 실정이다. 주기적인 선로순회작업 및 육안점검을 통해 레일표면의 결함을 발견하는 것은 매우 중요하다. 그러나 점검자의 주관적 판단에 의해 레일표면의 결함의 경중을 평가하는 것은 레일 내부의 손상을 예측하기에 상당한 제약이 따른다. 본 연구에서는 레일표면손상에 따른 레일내부 균열특성 관한 연구로서 현장측정에서는 레일표면 손상개소를 선정하여 다양한 손상유형의 시료를 채취하여 레일표면손상 상태를 평가하고 실내시험에서 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 레일표면결함 및 내부결함의 상관관계를 분석하고자 한다. 또한 실내시험의 결과와 수치해석 결과를 비교를 통하여 레일표면손상을 분석하였다. 현재 공용중인 도시철도 레일의 균열성장율을 파악하고자 가우시안 확률밀도 함수를 적용하여 분석하였다.

주요어 : 레일표면결함, SEM 시험, 균열성장율, 레일내부손상, 레일균열특성

Abstract In this study, rail surface defects are increasing due to the aging of urban railway rails, but in the detailed guidelines for track performance evaluation established by the country, rail surface damage is inspected with the naked eye of engineers and simple measuring tools. With the recent enactment of the Track Diagnosis Act, a large budget has been invested and the volume of rail diagnosis is rapidly increasing, but it is difficult to secure the reliability of diagnosis results using labor-intensive visual inspection techniques. It is very important to discover defects in the rail surface through periodic track tours and visual inspection. However, evaluating the severity of defects on the rail surface based on the subjective judgment of the inspector has significant limitations in predicting damage inside the rail. In this study, the rail internal crack characteristics due to rail surface damage were studied. In field measurements, rail surface damage locations were selected, samples of various damage types were collected, and the rail surface damage status was evaluated. In indoor testing, we intend to analyze the correlation between rail surface defects and internal defects using a electron scanning microscope (SEM). To determine the crack growth rate of urban railway rails currently in use, the Gaussian probability density function was applied and analyzed.

Key words : Rail Surface Defects, SEM Test, Crack Propagation Rate, Rail Internal damage, Rail Crack Characteristics

*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수(제1저자)
**정회원, 동양대학교 건설공학과 박사과정(교신저자)
***정회원, 공학철도(주) 기술본부장(참여저자)
접수일: 2023년 10월 20일, 수정완료일: 2023년 11월 16일
게재확정일: 2023년 12월 27일

Received: October 20, 2023 / Revised: November 16, 2023
Accepted: December 27, 2023
**Corresponding Author: woals255@dyu.ac.kr
Dept. of Construction Engineering, Dongyang University, Korea

I. 서 론

본 연구에서는 현재 도시철도 레일의 노후화로 인한 레일표면결합이 증가하고 있으나 국가에서 제정된 궤도 성능평가에 관한 세부지침에서 레일표면손상을 기술자의 육안, 간단한 측정 도구로 점검을 수행하는 실정이다 [1~3]. 최근 궤도진단법 제정에 따라 대규모 예산이 투입되고 레일진단물량이 급증되고 있으나 노동집약적인 육안조사기법으로는 진단결과에 대한 신뢰성확보가 어려운 실정이다. 주기적인 선로순회작업 및 육안점검을 통해 레일표면의 결함을 발견하는 것은 매우 중요하다. 그러나 점검자의 주관적 판단에 의해 레일표면의 결함의 경중을 평가하는 것은 레일 내부의 손상을 예측하기에 상당한 제약이 따른다.

차륜과 레일의 접촉면에서는 상시 레일 강의 소성변형(Plastic deformation)이 유발되며 이에 따라 레일표면에는 구름접촉피로손상(Rolling contact fatigue damage, RCF)이 발생될 수 있다. 상대적으로 레일보다 경도가 높은 차륜의 반복적인 구름접촉에 의해 자연적인 차륜의 연삭기능에 따른 마모가 유발되어 레일표면에 발생된 피로균열은 제거되는 것이 일반적이다[4,5].

대상선로의 경우 운행빈도가 상대적으로 높지 않아 차륜에 의한 자연 연삭효과가 미미하여 발생하중의 크기에 지배적인 접촉응력에 따른 피로균열이 지속적으로 성장할 수 있는 운영환경인 것으로 판단된다.

본 연구의 현장측정에서는 공용중인 도시철도에서 레일표면이 손상된 레일(3@15m)을 채취하여 30cm단위로 총 50개의 시편을 절단하였으며, 시편당 열차주행방향으로 발생된 표면결합(C: Cross Section)과 차륜의 횡방향 이동에 의한 표면결합(L: Lateral Section)으로 구분하여 실내시험의 제원으로 사용하였다. 실내시험의 경우 손상 레일 시편을 가공하여 레일표면 결함과 내부결합(균열)의 상관관계를 입증하고자 표면결합 별 시편을 가공하여 마운팅한 후 폴리싱하여 균열의 깊이와 균열의 길이 및 균열의 각도를 측정하였다. 균열각도는 일정길이방향으로 진행되는 균열의 성장율을 의미한다[6-8].

본 연구에서는 실내시험결과를 통해 가우시안 확률밀도함수를 적용하여 레일내부손상 깊이와 균열길이에 따른 균열성장속도를 파악하고 균열 깊이에 따른 균열성장을 범위를 제시하고자 한다. 또한 현재 운영중인 일반철도 레일 내부에 내재되어 있는 레일내부균열을 가우시안 확률밀도 기법을 이용하여 손상깊이를 분석하고 레일표

면손상 제거목표치를 제시하고자 한다.

표 1. 궤도시설의 성능평가에 관한 세부지침[1,2]
Table 1. Detailed guidelines on performance evaluation of track facilities

등급	표면손상		
	미세균열	압좌	변형
a	두부 측면 $D \leq 2\text{mm}$	$D \leq 1\text{mm}$ 또는 $L \leq 20\text{mm}$	○부분적 미세 변형 발생 ○레일 단부 변형깊이(end batter) 5mm 이하
b	두부 측면 $2\text{mm} < D \leq 5\text{mm}$	$1\text{mm} < D \leq 3\text{mm}$ 또는 $20\text{mm} < L \leq 50\text{mm}$	○ 레일 단부 변형깊이(end batter) 5mm 초과 10mm 이하 ○ 레일 두부 상면 으깨짐/평평화 (crushed/flattened) 깊이 10mm 이하, 길이 200mm 이하
c	두부 측면 $5\text{mm} < D \leq 20\text{mm}$	$3\text{mm} < D \leq 5\text{mm}$ 또는 $50\text{mm} < L \leq 100\text{mm}$	○ 레일 단부 변형깊이(end batter) 10mm 초과 15mm 이하 ○ 레일 두부 상면 으깨짐/평평화 (crushed/flattened) 깊이 10mm 초과, 길이 200mm 초과
d	두부 상면 $D > 5\text{mm}$ 또는 두부 측면 $D > 20\text{mm}$	$D > 5\text{mm}$ 또는 $L > 100\text{mm}$	○레일 단부 변형깊이(end batter) 15mm 초과

II. 현장조사

본 연구에서는 레일표면결합의 유형과 다양한 레일내부손상 특성을 파악하고자 공용중인 운행선에서 현장조사를 수행하였다. 또한 레일내부균열 특성을 분석하기 위한 실내시험용 시편제작에 활용하기 위하여 노반구조 및 궤도형식별로 손상이 발생한 현장으로 조사 구간을 설정하였다. 현장조사 결과를 바탕으로 레일을 발채하고 손상레일을 시편으로 가공하여 실내시험(SEM Test)의 제원으로 수행하고자 한다.

표 1. 현장조사 구간
Table 1. Field investigation section

Section	Roadbed type	Track type	Curve radius(m)	Cant(mm)
1	Earthworks	Ballast	-	-
2	Earthworks	Concrete (ALT-2)	1200	95
3	Tunnel	Concrete (LVT)	-	-
4	Tunnel	Concrete (LVT)	400	125



(a) Tunnel section concrete track



(b) Concrete track for earthwork section

그림 1. 도시철도 레일표면손상 현장전경
 Figure 1. Photographs of railway rail surface defects

토공구간 자갈궤도, 교량구간 자갈궤도, 터널구간 콘크리트궤도, 정거장 부근으로 손상이 많이 발생한 현장을 바탕으로 조사를 수행하였으며, 현장조사를 바탕으로 레일을 발취 후 발취된 레일을 가공하여 실내시험의 재원으로 사용하고자 한다.

III. SEM Test

1. 실내시험 개요

현재 공용중인 선로에는 다양한 손상의 유형과 규모의 차이를 두고 레일표면손상이 발생한다. 점검자가 먼 거리에서 육안으로 레일표면을 점검 시 레일표면손상을 파악하기 어려움이 있다. 손상 부위를 확대하여 점검한 결과, 레일표면손상은 점검자의 시각에 따라서 다른 결과를 도출할 수도 있는 것으로 분석되었다. 이러한 표면손상에서 레일내부손상은 다양한 깊이와 길이를 가진 손상이 발생하는 것으로 실내시험을 통해 분석하고자 한다.

본 연구에서는 각 시료에 대해 수행한 단면부 관찰 방법은 적절한 방향으로 절단하여 단면을 마운팅 하였으며, 마운팅 후 1 μm 의 Diamond Suspension으로 Polishing을 실시하였다. 이후 전자주사현미경(JEOL JSM-IT500 with OXFORD ULTIM MAX)으로 관찰하여 균열길이,

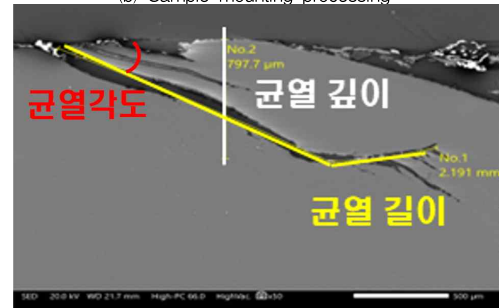
깊이 및 각도를 각각 측정하였다. 그림 2와 같이 전자주사현미경, SEM을 이용한 레일 조직검사 및 장비 시험전경이다.



(a) Photographs of rail sample



(b) Sample mounting processing



(c) SEM 결과를 통한 내부손상 측정 예
 그림 2. 실내시험(SEM Test)을 위한 시료 가공 전경
 Figure 2. Photographs of Lab test(SEM Test)

2. 실내시험 결과

레일하부균열은 비파괴 검사 측정의 어려움이 있다. 레일표면손상 수준을 정량화하여 표면결함과 내부결함의 상관관계를 검토하고자 한다. 또한 본 연구에서는 공인시험기관(한국화학융합시험연구원, KTR)에서 그림 2(a)의 레일시료를 그림 2(b)와 같이 SEM 시험을 위한 노후 레일시편으로 가공한다. 레일표면 결함과 내부결함(균열)의 상관관계를 입증하기 위하여 균열길이, 길이 및 균열각도 측정을 위한 실내시험을 수행하였다. 손상된

레일 관찰은 그림 2(b)와 같이 가공된 시료를 주사전자현미경(SEM) 장비를 이용하여 그림 2(c)와 같이 시험결과를 이미지 형태로 도출한다. 또한 도출된 SEM 시험 결과는 균열 길이, 균열 깊이, 균열 각도(균열성장율)를 측정하였다. 총 50개의 레일 시료를 Case 1 ~ Case 50으로 구분하였으며, Case 별 손상 시료를 측정위치별로 나타내어 값을 정리하였으며, 대표적인 손상 이미지는 그림 3과 같다.

실내시험결과에 제시된 레일표면손상의 규모(균열깊이, 길이)를 수치화하고, 해당정보를 이용하여 균열각도(균열성장율)를 산출하여 그림 3에 나타내었다. 총 내부손상의 개수는 약 430개를 실험함으로써 그림 3과 같이 나타내었다.

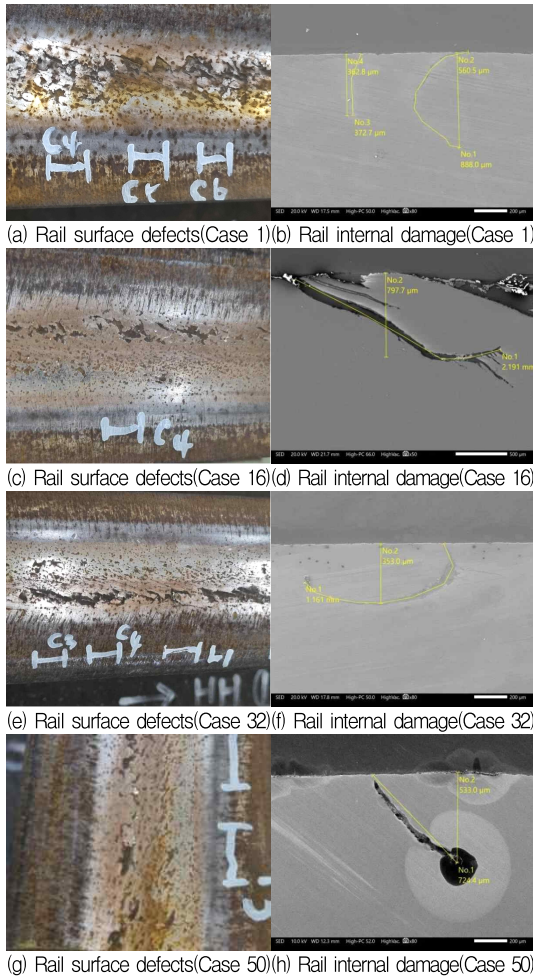
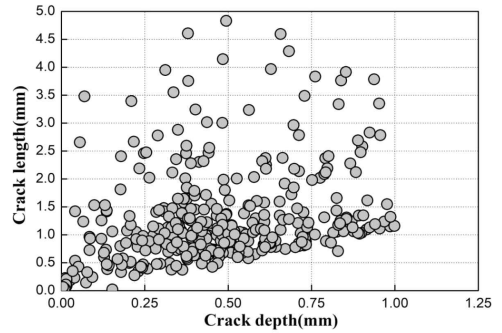
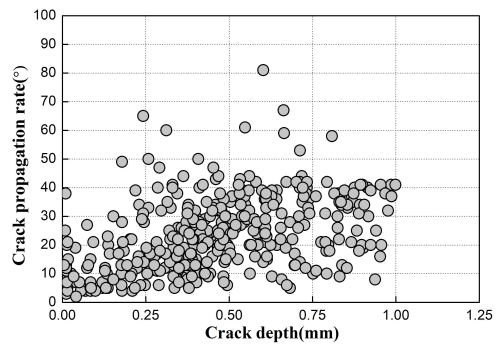


그림 3. 시료구분

Figure 3. Sample classification



(a) Depth-Length (All)



(b) Depth-Angle (All)

그림 4. 실내시험 결과

Figure 4. Result of lab test

실내시험(SEM Test)을 통한 레일내부손상 균열특성 상관관계 분석결과, C 방향과 L 방향 손상을 모두 고려한 균열깊이에 따른 균열길이와 균열성장율의 상관관계는 그림 4와 같이 서로간의 상관성을 분석하기 어려운 수준으로 분산이 크게 분석되었다. 이에 본 연구에서는 가우시안 확률밀도 기법으로 레일 내부손상의 상관성을 분석하고자 한다.

IV. 분석 및 고찰

본 연구에서는 실내시험 결과를 바탕으로 가우시안 확률밀도 함수를 적용하여 레일내부 손상깊이와 균열길이에 따른 균열성장율을 분석하였다. 또한 균열깊이에 따른 균열성장율과의 상관관계를 분석하고자 한다. 레일 손상 특성을 확률밀도 함수를 사용하여 레일내부손상의 평균과 분산을 분석하여 레일손상 규모 특성을 분석하고자 한다.

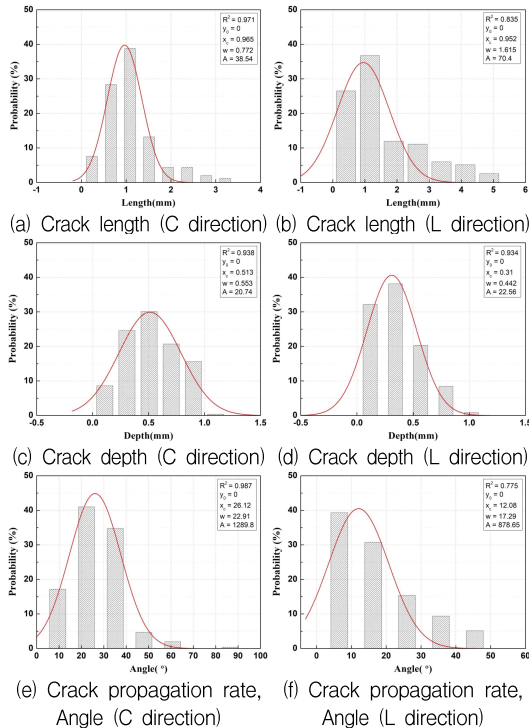


그림 5. 가우시안 확률밀도 함수 분석결과(레일결함특성치)
 Figure 5. Analysis results of gaussian probability density function(Rail defects Characteristics)

가우시안 확률밀도 분석은 평균(X_c)을 중심으로 종모양의 곡선을 형성하며, 곡선 아래 특정 구간의 면적은 해당 구간에 속하는 균열이 발생할 확률(A)을 나타낸다.

균열 길이 가우시안 확률밀도 분석결과, X_c 는 평균값을 나타내며, C 방향은 0.965mm, L 방향은 0.952mm로 나타났다. 또한 w 는 표준편차의 범위를 나타내며, C 방향은 ± 0.386 , L 방향은 ± 0.808 으로 분석되었다.

균열 깊이 가우시안 확률밀도 분석결과, X_c 의 경우 C 방향은 0.513mm, L 방향은 0.310mm로 나타났다. 또한 w 의 경우 C 방향은 ± 0.276 , L 방향은 ± 0.221 으로 분석되었다. 균열 각도 가우시안 확률밀도 분석결과, X_c 의 경우, C 방향은 26.12°, L 방향은 12.08°로 나타났다. 또한 w 의 경우 C 방향은 $\pm 11.46^\circ$, L 방향은 $\pm 8.65^\circ$ 로 분석되었다. 손상 방향에 따라 평균(X_c)의 값은 차이가 없으나 표준편차의 값에 따라서 평균값을 중심으로 표준편차의 범위가 크게 분포된 것은 현재 레일내부결함이 평균값보다 크게 진전된 손상들이 많이 발생한 것으로 분석되며, 특히 L 방향 손상은 초기 균열이 더 큰 결함으로 진전되기 전에 유지관리를 수행해야 할 것으로 분석되었다.

본 연구에서 수행한 가우시안 확률밀도함수를 이용한 레일표면결함 제거치 분석결과, 균열성장이 상대적으로 높게 평가된 C 방향 손상 특성을 고려하여 실내시험을 통해 약 0.5mm 이상의 내부균열깊이에 도달하기 전에 레일표면손상을 제거해야 하는 것으로 분석하였다.

표 2. 레일내부 균열특성 분석결과

Table 2. Analysis results of rail internal crack characteristics

Division (direction)	Crack depth(mm)	Crack length(mm)	Crack propagation Angle(°)
C	0.513mm(± 0.28 mm)	0.965mm(± 0.39 mm)	26.12($\pm 11.46^\circ$)
	0.233mm~0.793mm	0.575mm~1.355mm	14.66°~37.58°
L	0.310mm(± 0.22 mm)	0.952mm(± 0.81 mm)	12.08($\pm 8.65^\circ$)
	0.09mm~0.53mm	0.142mm~1.762mm	3.43°~20.73°

레일내부손상 특성은 표준편차 크기 내에서 다양한 길이의 손상이 나타났다. 또한 L 방향의 균열 길이는 C 방향의 균열길이에 비해 평균은 비슷하나 상대적으로 큰 표준편차를 나타내는 것으로 분석되었다. L 방향 표면손상의 경우 곡선부의 주행상태일 때 주로 발생하므로 레일표면관리가 직선 주행로의 손상보다 L 방향의 손상이 발생한 레일표면을 주기적으로 관리를 해야 할 것으로 분석되었다. 이러한 확률 분포를 통해 손상길이, 깊이 및 균열성장속도의 특성을 파악하였다. 또한 도시철도에서 발생하는 균열의 임계값으로 설정하여 레일표면 유지보수관리에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3. 레일균열 깊이에 따른 균열성장을 분석결과

Table 3. Crack propagation rate analysis results according to rail crack depth

Crack depth	Crack propagation Probability average value (X_c)	Standard Deviation (SD)	Crack propagation range
0.00~0.25mm	12.05	± 5.24	6.81 ~ 17.29
0.25~0.50mm	20.05	± 10.19	9.86 ~ 30.24
0.50~0.75mm	29.97	± 12.42	18.24 ~ 43.08
0.75mm~	30.33	± 11.90	19.43 ~ 41.23

레일표면 균열깊이에 따른 균열성장을 분석결과, 표 3과 같이 균열깊이의 증가에 따라 균열성장율과 표준편차가 증가하는 것으로 나타났다. 표 3과 같이 균열깊이 0.50mm~0.75mm의 경우 균열성장율의 표준편차와 범위가 가장 높게 분석되었다. 또한 0.75mm이상의 균열 깊이에서는 균열성장율의 표준편차와 범위가 다소 감소하

는 것으로 분석되었다. 따라서 균열깊이 0.50mm~0.75mm 범위가 균열성장률 측면에서 임계수준인 것으로 분석되어 레일표면손상 제거목표치의 설정기준으로 활용하였다.

V. 결론

본 연구에서는 도시철도가 운행중인 노선에서 레일표면결합과 레일 내부균열과의 상관관계를 분석하기 위하여 운행중인 노선의 레일시료를 채취하여 SEM 시험을 수행하였다. 또한 가우시안 확률밀도함수 분석을 통해 레일표면결합과 레일내부균열의 상관관계를 분석하였다. 연구결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 수행한 레일표면 균열깊이와 균열성장률의 상관관계 분석결과, 레일내부손상 특성은 표준편차 크기 내에서 다양한 길이의 손상이 나타났다. 또한 L 방향의 균열 길이는 C 방향의 균열길이에 비해 평균은 비슷하나 상대적으로 큰 표준편차를 나타내는 것으로 분석되었다. 레일표면손상이 진전되는 균열이 방향별로 차이가 있는 것으로 나타나 C 방향으로 생기는 균열은 성장 속도가 좀 더 빠르고 구조적으로 위험한 손상으로 분석되었다.

(2) 본 연구에서 수행한 가우시안 확률밀도함수를 이용한 레일표면결합 제거 목표치 분석결과, 실내시험을 통해 약 0.5mm 이상의 내부균열깊이에 도달하기 전에 레일표면손상을 제거해야 하는 것으로 분석하였다. 또한 균열성장률(균열각도)이 상대적으로 높게 평가된 레일표면 균열특성을 감안할 때, 적정 시기를 놓치면 균열깊이가 급격하게 증가하여 레일연마 효과가 반감되고 많은 시간과 비용이 투입되어야 할 것으로 예상된다.

(3) 본 연구대상 구간 레일의 손상수준은 균열깊이 증가에 따라 균열성장률이 증가하는 단계에 해당하는 것으로 분석되었다. 따라서 균열성장률이 큰 폭으로 진행되기 전에 레일표면의 손상을 제거하기 위한 레일표면품질관리(레일 연마 또는 밀링)가 필요할 것으로 판단된다.

(4) 레일표면에는 상시 차륜과의 접촉응력에 의한 소성변형이 발생되어 구름접촉피로균열이 발생될 수 있다. 따라서 레일표면에 발생하는 피로균열을 적정시기에 제거해야만 균열의 성장(심부방향으로의 균열깊이 증가)을 방지하여 레일의 품질 확보 및 사용수명을 연장할 수 있다.

References

- [1] Guidelines for regular inspection of railway facilities, etc., Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021
- [2] Detailed guidelines on performance evaluation of track facilities, Korea National Railway, 2021
- [3] Track maintenance guidelines, Korea National Railway, 2020
- [4] J.M, Seo, Crack Propagation Prediction of Rail Surface caused by Rolling Contact Fatigue based on Linear Elastic Fracture Mechanics, Seoul National University of Science and Technology Graduate School of Railway, Ph.D. dissertation, 2020
- [5] J.Y. Choi, H.S. Gong, J.H. Kim, H.S. Kim and J.S Chung. "An Experimental Study on Causes Evaluation of Rail Corrugation for Concrete track(STEDEF) in Urban Transit", The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), Vol. 4, No. 4, pp. 413-418, 2018. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.4.413>
- [6] Kapoor, A, Schmidt, F, and Fletcher, D, "Managing the critical wheel-rail interface", Railway Gazette International, 2002
- [7] B. NDAO, Generation et Detection sans Contact des ondes depayleigh par methodes ultrasons-Laser et EMAT Mode Statique et Dynamic Application to the detection of surface defects in the rail head, University of Valenciennes and Hainaut-Cambresis, Ph.D dissertation, 2016
- [8] Track Inspector Rail Defect Reference Manual, FRA, 2011

※ 이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00233470, 인공지능경망 이미지 분석을 이용한 레일표면손상 진단시스템 개발)