

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.3.845>

JCCT 2024-5-95

열차주행특성을 고려한 레일표면결합 분석

Evaluation of Rail Surface Defects Considering Vehicle Running Characteristics

최정열*

Jung-Youl Choi*

요약 현재 도시철도 레일의 노후화로 인한 레일표면결합이 증가하고 있으나 국가에서 제정된 궤도성능평가에 관한 세부 지침에서 레일표면손상을 기술자의 육안, 간단한 측정 도구로 점검을 수행하는 실정이다. 주기적인 선로순회작업 및 육안 점검을 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 균열특성에 관한 연구로서 현장측정에서는 레일표면 손상개소를 선정하여 가속구간 및 제동구간의 노후레일 시료를 채취하여 레일표면손상 상태를 평가하고자 전자주사현미경(SEM)을 이용하여 균열특성을 분석하였다. 분석결과, 주행 중인 열차로 인해 발생하는 균열 메커니즘과 레일표면방향으로 올라오는 각도로 균열이 발생하는 가속구간의 균열특성을 실험적으로 입증하였다.

주요어 : 레일표면결합, SEM 시험, 레일내부균열, 가속구간, 제동구간

Abstract Currently, 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 an engineer and with simple measuring tools. 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 characteristics of cracks inside the rail due to rail surface damage were studied. In field measurements, rail surface damage was selected, old rail samples were collected in the acceleration and braking sections, and a scanning electron microscope (SEM) was used to evaluate the rail surface damage was used to analyze the crack characteristics. As a result of the analysis, the crack mechanism caused by the running train and the crack characteristics of the acceleration section where cracks occur at an angle rising toward the rail surface were experimentally proven.

Key words : Rail surface defects, SEM Test, Rail internal crack, Acceleration section, Braking section

1. 서 론

주기적인 선로순회작업 및 육안점검을 통해 레일표면의 결함을 발견하는 것은 매우 중요하다[1,2]. 그러나 점검자의 주관적 판단에 의해 레일표면의 결함의 경중을

평가하는 것은 레일 내부의 손상을 예측하기에 상당한 제약이 따른다. 차륜과 레일의 접촉면에서는 소성변형(Plastic deformation)이 유발되며 이에 따라 레일표면에는 구름접촉피로손상(Rolling contact fatigue damage,

*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수(제1저자)
접수일: 2024년 3월 15일, 수정완료일: 2024년 4월 10일
게재확정일: 2024년 4월 20일

Received: March 15, 2024 / Revised: April 10, 2024

Accepted: April 20, 2024

**Corresponding Author: jychoi@dyu.ac.kr

Dept. of Construction Engineering, Dongyang University, Korea

RCF)이 발생될 수 있다[3]. 상대적으로 레일보다 경도가 높은 차륜의 반복적인 구름접촉에 의해 자연적인 차륜의 연삭기능에 따른 마모가 유발되어 레일표면에 발생된 피로균열은 제거되는 것이 일반적이다[4-6]. 열차가 브레이크를 사용할 때 레일과 차륜 사이의 마찰이 증가하며, 이로 인해 레일 표면에 마모가 발생할 수 있다. 주행 방향에 따라 레일의 국부적인 표면부분이 더 많은 마찰을 받을 수 있으며, 이로 인해 마모 및 마찰 손상이 발생한다. 또한 열차 제동 시 레일 표면은 급격한 온도 변화에 노출될 수 있다. 이로 인해 레일 표면의 열화 현상이 발생할 수 있으며, 이 열화는 주행 방향에 따라 손상 패턴이 달라질 수 있다. 열차의 제동에 따른 응력 변화로 인해 레일 표면에 피로 손상이 발생할 수 있다.

그림 1과 같이 열차 제동에 따른 레일 표면 손상은 레일의 품질, 열차의 무게 및 속도, 브레이크 시스템의 설계 등 다양한 요인에 영향을 받는다[7]. 접선하중의 방향(열차주행 방향)에 따라 균열이 레일표면 아래쪽으로 분기된다[7]. 균열의 전진은 차륜과 레일 사이의 마찰계수가 높을수록 분기가 더 빨라지는 것으로 알려져 있다[7].

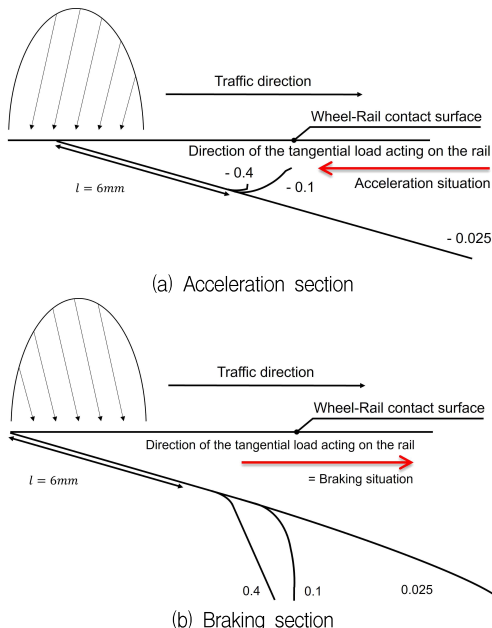


그림 1. 하중방향에 따른 레일내부 손상 유형[7]
Figure 1. Rail damage characteristics according to traffic direction

본 연구에서는 가속구간과 제동구간에서 발생하는 레

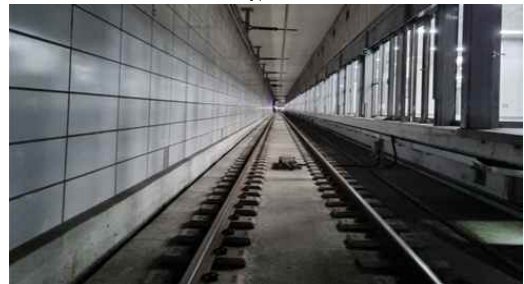
일표면손상이 발생한 현장을 대상으로 현장조사를 수행하였다. 또한 가속구간과 제동구간에 발생한 노후레일을 채취하여 실내시험을 위한 시편으로 가공하였다. 레일내부손상 깊이와 균열길이에 따른 균열각도를 측정하여 레일내부균열특성을 하였다.

II. 현장조사

본 연구에서는 가속 및 제동구간의 레일내부손상 특성을 파악하고자 운행선 현장조사를 수행하였다. 레일내부손상 특성을 분석하기 위한 시편제작을 위하여 손상이 발생한 레일을 발취하여 실내시험을 수행하였다.



(a) U-Type section



(b) Station

그림 2. 손상레일 현장전경
Figure 2. Photographs of damaged rail

지상구간과 지하구간의 접속구간(U-Type)과 정거장 부근의 레일표면손상이 많이 발생한 현장을 대상으로 조사를 수행하였으며, 현장조사를 바탕으로 레일을 발취 후 가공하여 실내시험을 위한 시편으로 사용하였다.

표 1. 현장조사 구간
Table 1. Field investigation section

Section	Roadbed type	Track type	Curve radius(m)
1	Station	Concrete(ALT-2)	-
2	U-Type	Concrete(ALT-2)	-

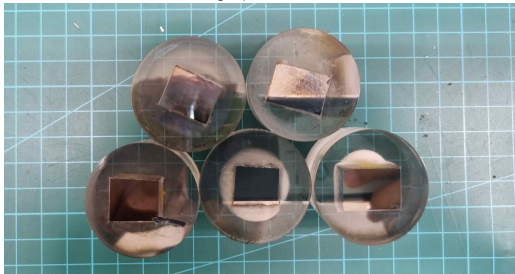
현장조사결과, 정거장 및 U-Type 구간에서 레일표면에 발생한 손상을 육안으로 확인할 수 있었으며, 대표적인 레일표면손상인 Headcheck와 Spalling 손상이 발생한 것으로 나타났다.

III. 실험결과 및 분석

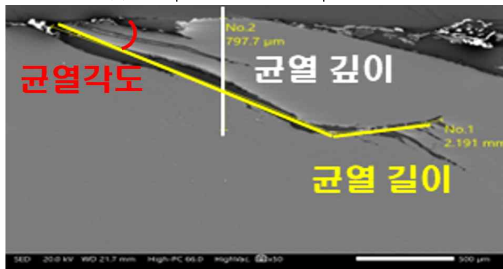
본 연구에서는 각 시료를 절단하여 단면을 마운팅 하였으며, 마운팅 후 1 μm의 Diamond Suspension으로 Polishing을 실시하였다. 이후 전자주사현미경(JEOL JSM-IT500)으로 관찰하여 균열길이, 깊이 및 각도를 측정하였다. 그림 3과 같이 전자주사현미경을 이용한 시험 전경은 그림 3과 같다.



(a) Photographs of SEM test



(b) Sample of mounted specimens



(c) Result of SEM test

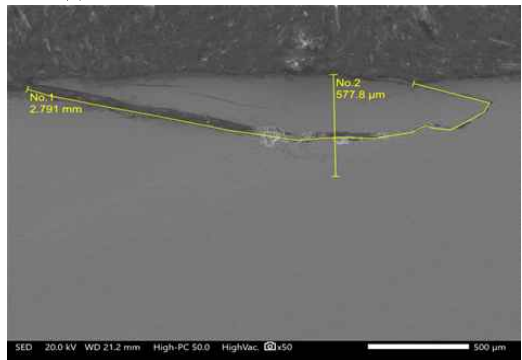
그림 3. 실내시험(SEM Test) 전경
 Figure 3. Photographs of Lab test(SEM Test)

본 연구에서는 그림 3(a)의 레일시료를 그림 2(b)와 같

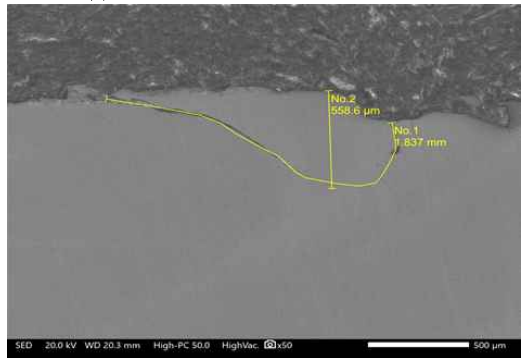
이 SEM 시험을 위한 노후 레일시편으로 가공하였다. 레일표면 결함과 내부결함(균열)의 상관관계를 입증하기 위하여 균열깊이, 길이 및 균열각도 측정을 위한 실내시험을 수행하였다. 손상된 그림 3(b)와 같이 가공된 시료를 전자주사현미경(SEM) 장비를 이용하여 그림 3(c)와 같이 시험결과를 이미지 형태로 도출하였다. 또한 SEM 시험 결과를 이용하여 균열 길이, 균열 깊이 및 균열 각도를 측정하였다.



(a) Rail surface defects in acceleration section



(b) Cracks rail in the acceleration section



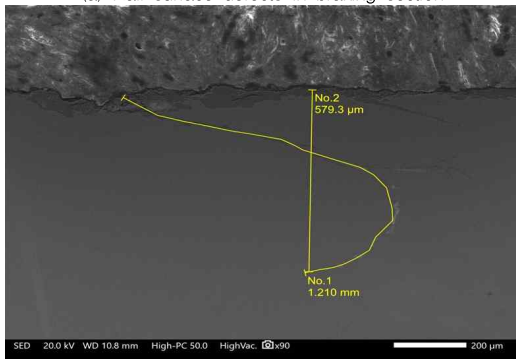
(c) Cracks in the acceleration section

그림 4. 가속구간 레일 시험결과
 Figure 4. Test results of rail in acceleration section

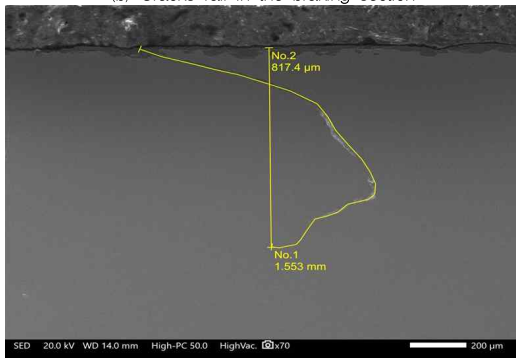
가속구간의 레일내부균열 시험결과, 그림 4와 같이 주행 중인 열차의 차륜의 구름접촉하중으로 인해 발생하는 표면의 전단균열로서 레일표면에서 심부방향으로 일정한 기울기로 진전되는 특성이 나타났다. 또한 심부로 진전되던 균열이 일정깊이 이상에서부터는 레일표면방향으로 올라오는 특성이 나타났다.



(a) Rail surface defects in braking section



(b) Cracks rail in the braking section



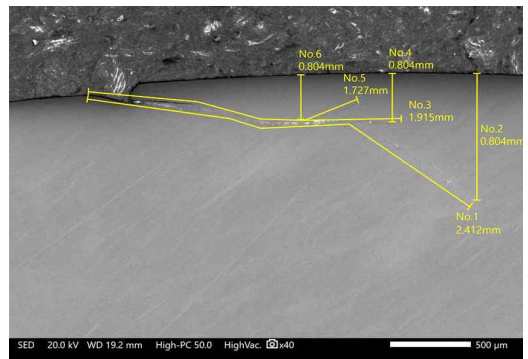
(c) Cracks rail in the braking section

그림 5. 제동구간 레일 시험결과
Figure 5. Test results of aged rail in braking section

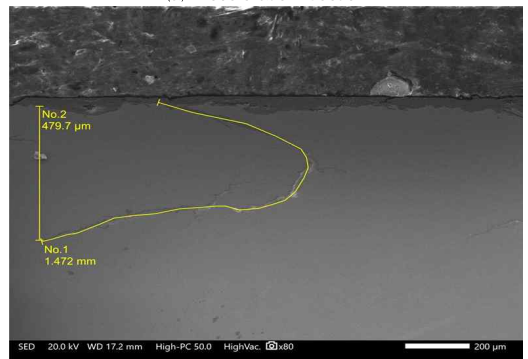
제동구간의 레일내부균열 시험결과, 그림 5와 같이 균

열이 레일심부방향으로 급격한 기울기의 균열이 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 열차의 제동하중에 지배적인 영향을 받아 형성되는 손상으로서 균열깊이가 깊고 각도가 크게 형성되는 특성에 따라 심부로 진전되는 균열성장에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 제동구간의 경우 차륜과 레일의 마찰력이 증가하여 마모로 인해 표면의 균열 또는 결함이 일부 제거되거나 눌러서 표면결함이 다소 완화(개선)된 것으로 오인될 수 있다.

본 연구에서는 실내시험 결과를 이용하여가속구간과 제동구간의 레일내부 손상 특성을 분석하였다.



(a) Acceleration section



(b) Braking section

그림 6. 열차주행방향에 따른 레일내부손상특성
Figure 6. Comparison of rail damage characteristics according to traffic direction

열차주행 방향에 따라 레일의 국부적인 표면에 더 많은 압력과 마찰을 받을 수 있으며, 이로 인해 표면이 마모되고 균열이 생길 수 있다. 레일표면의 손상은 유사하나 내부의 균열 특성은 열차의 가속 및 제동에 따라 상이한 것으로 분석되었다.

가속구간의 경우 그림 6(a)와 같이 레일표면에서 발생하는 균열이 일정한 각도로 진전되다가 다양한 방향성을

갖는 균열들로 확대되는 것으로 나타났다. 또한 연속적인 표면균열과 내부로 진전된 균열의 중첩으로 인해 레일표면의 국부적인 박리현상인 Spalling현상을 야기할 수 있는 것으로 분석되었다.

제동구간의 경우 그림 6(b)와 같이 레일표면에서부터 균열이 일정한 깊이로 진전되다 심부깊이 방향으로 확장하는 특성을 보이며, 본 연구의 시편의 경우, 약 1mm 이상의 깊이까지 균열이 진전된 것으로 나타났다. 따라서 예상하기 힘든 레일 내부균열의 특성을 감안하여 보다 보수적인 레일표면 균열제거를 위한 연마 및 밀링을 시행하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 도시철도가 운행중인 노선에서 가속구간과 제동구간의 레일표면결합과 레일 내부균열과의 상관관계를 분석하기 위하여 레일시료를 채취하여 SEM 시험을 수행하였다. 연구결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 수행한 열차주행특성을 고려한 레일 표면과 내부균열특성 분석결과, 주행 중인 열차의 가속으로 인해 발생하는 균열은 일정깊이 이상의 균열 진전 이후 레일표면방향으로 올라오는 특성이 나타났다. 따라서 레일표면의 상태를 바탕으로 손상의 규모를 파악할 수 있을 것으로 분석되었다. 반면 제동구간의 경우 표면의 결합은 크지 않으나 오히려 레일심부방향으로 급격한 각도로 균열이 진전되는 것으로 나타났다. 따라서 열차의 고속주행이 이루어지지 않는 제동구간의 경우에도 레일손상은 크게 발생할 수 있을 것으로 분석되었다.

(2) 레일표면에는 상시 차륜과의 접촉응력에 의한 소성변형이 발생되어 구름접촉피로균열이 발생할 수 있다. 따라서 열차주행특성을 고려하여 심부방향으로 진전되는 레일표면 결합을 적정시기에 제거함으로써 사용수명을 연장할 수 있을 것으로 판단된다.

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>

- [4] J.Y. Choi, J.M. Han, Y.K. Kim, “Correlation Analysis of Rail Surface Defects and Rail Internal Cracks”, The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), Vol. 10, No. 1, pp.585-591, 2024. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.1.585>
- [5] J.Y. Choi, C.M. Jung, J.S. Chung. “Experimental Study to analyze Effect of Rail Corrugation Reduction according to Rail Grinding”, The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), Vol. 7, No. 4, pp. 413-418, 2021. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2021.7.4.801>
- [6] Kapoor, A, Schmidt, F, and Fletcher, D, “Managing the critical wheel-rail interface”, Railway Gazette International, 2002
- [7] B. Trolle, S. H. Mai, A. Gravouil, M.-C. Baietto, B. Prabel, M.-L. Nguyen-Tajan, Crack propagation under RCF accounting for actual residual stresses in the rail, World Congress of Rail Research (WCRR), 2013
- [8] 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
- [9] Track Inspector Rail Defect Reference Manual, FRA, 2011
- [10] S.L. Grassie, “Rail Corrugation: Characteristics, Cause and Treatments”, P roceeding I MechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 223, pp. 1-17, 2009. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1993_207_227_0

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] J.Y. Choi, H.S. Gong, J.H. Kim, H.S. Kim and J.S. Chung. “An Experimental Study on Causes

※ 이 논문은 2023년도 동양대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었음