

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.3.239

JCCT 2022-5-28

운행선 궤도형식별 궤도열화에 미치는 매개변수 연구

Parametric Study on Track Deterioration by Various Track Type of Serviced Line

최정열*, 박종윤**, 정지승*

Jung-Youl Choi*, Jong-Yoon Park**, Jee-Seung Chung*

요약 본 연구는 현장조사 및 실내시험을 바탕으로 궤도형식별 열화에 영향을 미치는 핵심매개변수를 도출하였다. 기존 궤도 열화모델은 자갈궤도에 국한된 모델로서 콘크리트궤도의 열화평가는 연구된 것이 없는 실정이다. 본 연구에서는 운행선 궤도형식별 다양한 궤도구조의 특성이 반영된 열화요인을 도출하고자 궤도구성품의 성능수준 및 상태평가를 위한 실내시험을 수행하였다. 또한 궤도유지관리 이력데이터에 대한 분석을 통해 궤도열화 및 유지관리에 영향을 미치는 매개변수를 도출하였다. 현장조사, 궤도유지관리 이력데이터 분석 및 현장시료를 이용한 궤도구성품의 성능시험을 통해 궤도성능기반의 궤도열화 매개변수는 궤도침하 및 궤도지지강성에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 도상자갈과 방진패드인 것으로 분석되었다.

주요어 : 궤도열화, 궤도지지강성, 궤도침하, 도상자갈, 방진패드

Abstract In this study, the key parameters affecting the deterioration of each track type were derived based on field inspections and laboratory tests. The existing track deterioration model was limited to the ballasted tracks, and the deterioration evaluation of concrete tracks was insufficient. In this study, the laboratory test was performed to evaluate the performance and condition of track components to derive the deterioration factors reflecting the characteristics of various track structures. In addition, through analysis of track maintenance history data, parameters affecting track deterioration and maintenance were derived. The key parameters for presenting a track deterioration model based on the track performance of ballasted and concrete tracks through field inspection, track maintenance history data analysis, and performance test of track components using on-site specimens were identified as track support stiffness, Ballast gravel, track settlement and Resilience pad were presented.

Key words : Track Deterioration, Track Support Stiffness, Track Settlement, Ballast Gravel

1. 서론

자갈궤도의 열화가 진행되면 궤도상태에 따라 보수 및 보강 등 신속한 조치를 통하여 열차안전운행을 확보

하기 위한 대응이 필요하다. 이 때, 보수를 위한 중요한 정보는 현재의 궤도상태와 향후 성능이 어떻게 변할 것인지 원인분석 및 대책마련을 하는 것이다. 일반적으로 궤도 유지보수는 열화 조사결과를 근거로 육안검사와

*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수

**정회원, 공항철도(주) 시설처 과장 (교신저자)

접수일: 2022년 4월 10일, 수정완료일: 2022년 4월 25일

게재확정일: 2022년 4월 28일

Received: April 10, 2022 / Revised: April 25, 2022

Accepted: April 28, 2022

**Corresponding Author: andawin@arex.or.kr

Technical Division, Airport Railroad Co.,Ltd., Korea

경험적인 판단에 의하여 결정되고 있다. 손상상태에 따라 경제성을 고려하여 보수방법과 재료 등을 선정하고 있는 실정이다. 현재까지 대부분의 궤도열화에 대한 연구는 자갈궤도에 국한되어있으며 다양한 형식의 콘크리트궤도의 궤도열화에 관한 연구는 부족한 실정이다 [1-5]. 궤도열화모델이란 열차의 통과톤수 또는 시간경과에 따라 탄성재료의 상태가 열악하게 변화하는 수준을 정량화 하여 궤도상태를 평가하기 위한 모델을 의미한다[1-3,7]. 기존 열화모델은 기본적으로 레일과 침목의 손상이 없는 상태에서 궤도 탄성재료(레일패드 또는 도상자갈 등)의 탄성이 저하 되어 궤도침하가 증가하는 것을 열화 또는 궤도파괴라고 정의하였다[1-4,7-10]. 그러나 콘크리트궤도의 경우는 침하가 많이 발생하더라도 구조적인 문제가 발생되지 않을 수 있다[6,11,12]. 따라서 콘크리트궤도와 자갈궤도의 구조 및 재료적 차이를 반영할 수 있는 궤도열화모델의 정립이 필요하다.

이에 본 연구에서는 운행선에서 발생하고 있는 궤도 열화 및 손상상태에 대하여 콘크리트궤도와 자갈궤도의 궤도구조 형식별 차이점을 도출하고자 궤도유지관리 이력데이터 분석 및 현장시료를 이용한 실내시험을 바탕으로 궤도열화의 매개변수를 검토하였다.

본 연구는 콘크리트궤도와 자갈궤도의 구조적 특성이 반영된 궤도열화모델을 제시하기 위한 기초연구로서 다양한 궤도구성품을 대상으로 실험을 수행하였다.

II. 운행선 궤도 현장조사

1. 궤도유지관리 이력 검토

본 연구에서는 전체노선을 대상으로 수행한 유지관리 이력조사결과를 바탕으로 Multiple tie tamper(MTT)를 이용한 도상다짐, 레일연마, 궤도틀림관리 이력을 검토하였다. MTT작업의 고빈도 영향개소를 도출하였다. MTT 투입은 노반구간의 교량 시중점부에서 곡선반경의 크기와 무관하게 상대적으로 가장 높은 빈도의 MTT 투입이 이루어진 것을 나타냈다. 또한 그림 1과 같이 분기기 주변으로 MTT 투입빈도가 높은 것으로 분석되어 분기기 및 교량 시중점부와 같은 가동구간의 경우 궤도틀림 측면에서 취약하며 이에 따른 MTT 투입빈도가 높은 것으로 분석되었다. 레일연마작업 분석결과, 그림 2와 같이 교량 시중점부에서 곡선반경의 크기와 무관하게 상대적으로 가장 높은 빈도의 레일연마

작업이 투입되었으며 이는 MTT 작업 투입빈도 경향과 일치하는 것으로 분석되었다.

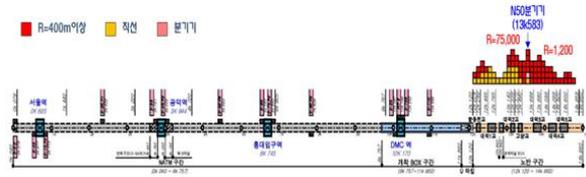


그림 1. MTT투입 이력 분석결과
Figure 1. Analysed results of MTT working history

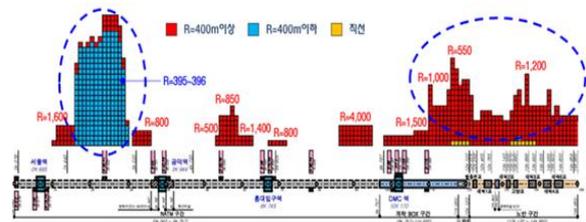


그림 2. 레일연마 이력 검토결과
Figure 2. Analysed results of rail grinding history

그림 2와 같이 지하 구간 콘크리트궤도의 경우 곡선 반경 R=400m 이하에서 레일연마작업 빈도가 매우 높은 것으로 분석되었다. 지하 콘크리트궤도 구간의 경우 현장조사 결과 레일표면의 구름접촉피로(Rolling contact fatigue) 손상이 발생된 것으로 조사되었으며 곡선부임에도 불구하고 외측레일의 편마모 보다 내측레일의 두부 정면의 광범위한 구름접촉피로손상이 발생된 구간으로 조사되었다. 분기기 궤도품질지수 평균값은 그림 3과 같이 선로유지관리지침의 일반철도 궤도틀림 관리기준인 주위기준(고저틀림 표준편차 2.1)에는 만족하나 시간경과에 따른 자갈궤도의 도상자갈의 열화에서 기인한 궤도지지강성 변화를 고려하여 취약개소에 대한 유지관리가 필요할 것으로 판단된다.

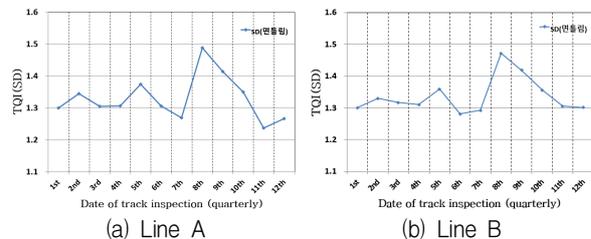


그림 3. 궤도틀림 분석결과
Figure 3. Analysed results of track irregularity

2. 레일손상 상태 검토

대상선로의 경우 운행빈도가 상대적으로 높지 않아 차륜에 의한 자연 연삭효과가 미미하여 발생하중의 크기에 지배적인 접촉응력에 따른 피로균열이 지속적으로 성장할 수 있는 운영환경인 것으로 판단된다. 대상선로에서 조사된 레일손상 유형은 그림 4와 같다.

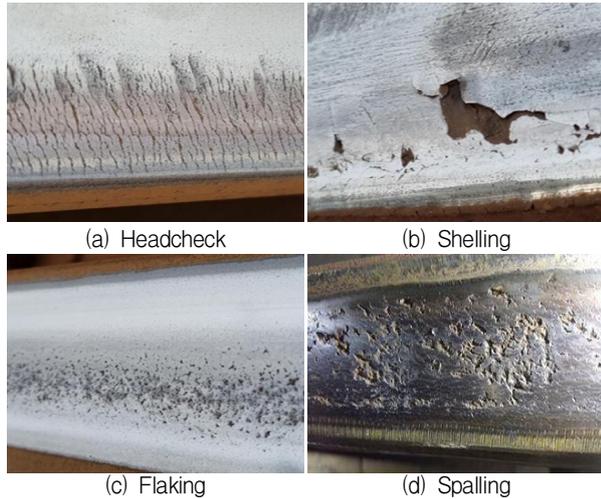


그림 4. 레일손상 유형
 Figure 4. Patterns of damaged rails

III. 궤도구성품 성능시험

1. 개요

실내시험을 통한 궤도재료의 성능평가를 위해서 운행선 궤도현장에서 그림 5와 같이 시료를 채취하였다.



그림 5. 시료 채취구간 전경
 Figure 5. Photographs of specimens in field

궤도구성품 시료를 채취한 대상선로의 누적통과톤수는 약 1.06~1.49억톤 정도로서 구간별 통과톤수의 차이가 크지 않았다. 자갈궤도에서는 레일패드(4개)와 도상자갈을 채취하였고, 콘크리트궤도(침목플로팅궤도)는 침목방진패드(11개) 및 코일스프링클립(e-clip, 32개)을 채취하였다.

또한 콘크리트궤도 중 직결식 레일체결장치를 사용하는 궤도에서는 손상 및 정상조건인 레일체결장치를 동시에 채취하여 시험을 수행하였다.

도상자갈에 대한 상태평가를 위한 시험은 KRCS A015 08에 따라 입도분포시험을 수행하였다. 침목방진 패드는 KRCS A01004를 준용하여 시험을 수행하였으며, 코일스프링클립(e-clip)의 체결력 시험, 레일패드 및 직결식 레일체결장치는 KRS TR 0014-15R을 준용하여 시험을 수행하였다.

2. 궤도재료 실내시험 결과

자갈궤도 및 콘크리트궤도에서 사용되는 레일패드의 스프링강성 설계치는 300~450kN/mm이며 현장에서 채취한 시료를 이용한 정적 스프링강성 시험결과 대부분 설계치를 만족하는 것으로 나타났다.

따라서 레일패드와 같이 초기 스프링강성이 커서 운행열차 하중에 의해 변형이 발생되지 않는 탄성재료는 공용중 열화가 가능성이 매우 낮아 궤도열화에 미치는 매개변수가 아닌 것으로 분석되었다.

침목방진패드 정적 스프링강성 및 두께측정결과, 설계치 대비 변화율이 신품의 경우에 8~46%로 나타났으며, 그 외에는 대부분 설계치 대비 100% 이상 증가된 것으로 분석되었다.

따라서 침목방진패드와 같이 소프트한 방진재료는 공용하중에 의해 열화가 발생되어 궤도전체의 열화수준에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되었다.

도상자갈 시험결과, 체가름 통과율에서 잔골재율이 기준치보다 높게 나타났다.

따라서 도상자갈의 경우 콘크리트궤도에서의 침목방진패드와 같이 공용하중에 의해 반복피로변형 및 이에 따른 열화가 발생할 수 있는 궤도구성품인 것으로 분석되었다. 침목방진패드와 도상자갈의 상태평가를 위한 시험결과는 그림 6과 같다.

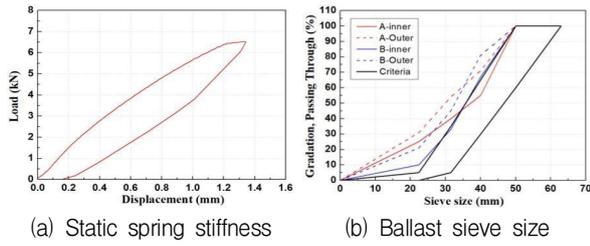


그림 6. 방진패드 및 도상자갈 시험결과
Figure 6. Test results of resilience pad and ballast gravel

코일스프링클립의 체결력 시험을 위한 시험전경은 그림 7과 같다. 코일스프링클립 경우 표 1과 같이 누적 통과톤수에 따른 체결력의 저하 경향이 뚜렷하지 않은 것으로 분석되었으며, 대부분의 시료가 제작기준치 (1,100~1,400kgf)와 교환기준치(500kg이하)를 만족하는 것으로 분석되었다.

따라서 코일스프링클립의 체결력 또한 열화를 직접적으로 받는 부재가 아닌 것으로 판단하여 궤도열화의 핵심매개변수는 아닌 것으로 분석되었다.

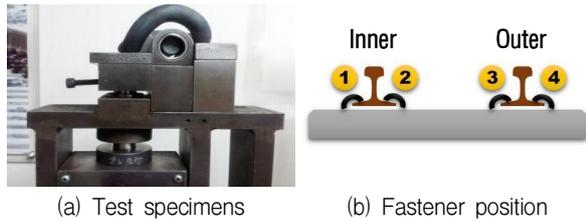


그림 7. 레일 체결구 체결력 시험전경
Figure 7. Photographs of fastening force test of rail fastener

표 1. 체결력 시험결과
Table 1. Test results of fastening force

Accumulated tonnage(MGT)	Layout	Test results(Fastening force, toe load)			
		Inner	kg	Outer	kg
1.49	R=400	1	1017	3	1,078
		2	869	4	1,042
1.06	R=496	1	1,225	3	1,224
		2	1,158	4	1,241
1.15	R=799	1	1,146	3	1,222
		2	1,159	4	1,157
1.11	R=658	1	966	3	1,069
		2	993	4	1,044
1.17	R=1200	1	1,287	3	928
		2	1,291	4	1,258
		1	913	3	1,299
		2	1,050	4	940

직결식 레일체결장치는 그림 8과 같이 침목 없이 도상콘크리트에 직결로 매립되는 레일체결장치를 의미한다.



그림 8. 직결식 레일체결장치 손상전경
Figure 8. Photographs of direct fixation concrete track

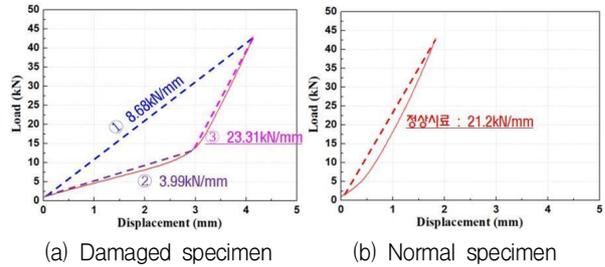


그림 9. 직결식 레일체결장치 스프링강성 시험결과
Figure 9. Spring stiffness test results of direct fixation rail fastening system

손상여부에 따른 직결식 레일체결장치의 하중-변위 선도 분석결과, 그림 9(a)의 ②(3.99kN/mm)와 같이 이미 찢어져있는 고무로 인하여 스프링강성이 과소평가 되고 일정부분하중을 받고나서는 ③(23.31kN/mm)과 같이 찢김부분 아래에 있는 고무가 탄성역할을 하면서 하중-변위 정도를 정상시료와 비슷한 기울기로 나타남을 확인하였다.

따라서 그림 9(a)의 ①(8.68kN/mm)과 같이 0에서부터 45kN까지에 대한 기울기를 이용하여 해당 레일체결 장치의 스프링강성을 평가하면 손상된 레일체결장치의 찢어진 부분에 대한 평가가 되지 않는 것으로 분석되었다.

즉, 고무의 찢김에 의한 공극으로 인해서 변위에 영향을 주어 작은 하중이 작용할 경우 다소 큰 변위량이 발생하면서 기울기가 크게 감소된 것으로 판단된다.

IV. 궤도열화 매개변수 분석

본 연구에서는 궤도열화모델의 핵심매개변수 도출을 위하여 현재까지 약 1.49억톤의 누적통과톤수를 갖는 도시철도 운행선 궤도구조를 대상으로 총 12년간의 궤도유지관리이력데이터(레일연마, 궤도틀림 및 자갈궤도 유지보수이력 등)를 분석하고, 현장조사 및 현장시료를 이용한 궤도구성품의 성능수준을 실험적으로 평가하였다.

궤도유지관리이력데이터 분석결과, 자갈궤도의 경우 분기기 주변에서의 도상다짐작업 빈도가 높으며 지하구간의 콘크리트궤도의 경우 레일연마 작업빈도가 높은 것으로 분석되었다. 또한 자갈궤도의 궤도틀림을 바탕으로 궤도품질지수 분석결과 궤도품질지수는 관련기준을 만족하였으나 시간의 경과에 따라 궤도품질의 저하가 예상되어 자갈궤도의 경우 반복적인 도상자갈에 대한 관리가 필요한 궤도구조형식임을 확인하였다.

궤도구성품별 성능평가 시험결과, 자갈궤도와 콘크리트궤도에서 모두 사용되는 레일패드의 경우 초기 스프링강성이 상대적으로 강하여 운행선 열차하중에 의한 탄성변위가 발생되지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 공용하중에 의한 변형이 발생되지 않는 조건이므로 사용기간 변화에 따라 열화가 발생하는 궤도구성품이 아닌 것으로 분석되었다.

자갈궤도의 도상자갈과 콘크리트궤도용 침목방진패드의 경우 공용년수 증가에 따라 스프링강성 및 두께 감소를 비롯한 도상자갈의 입도 변화가 발생하는 것으로 나타나 시간경과에 따라 열화가 발생될 수 있는 궤도구성품인 것으로 분석되었다. 따라서 침목방진패드는 콘크리트궤도(침목플로팅궤도)의 궤도열화에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 궤도구성품인 것으로 분석되었다.

코일스프링클립 경우 누적통과톤수에 따른 체결력의 저하 경향이 뚜렷하지 않은 것으로 분석되어 자갈궤도 궤도열화의 핵심매개변수는 아닌 것으로 분석되었다.

직결식 레일체결장치의 경우 탄성고무의 손상이 레일체결장치 전반의 스프링강성에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 따라서 별도의 탄성패드를 사용하지 않고 베이스플레이트와 일체식으로 가황처리된 직결식 레일체결장치의 경우 고무 찢김 등과 같은 손상은 레일체결장치의 성능저하를 초래할 수 있는 것으로 분석되었다.

V. 결 론

본 연구에서는 궤도구조 특성을 고려한 궤도열화모델 정립을 위한 기초연구로서 궤도열화에 영향을 미치는 핵심 매개변수를 구분하기 위한 현장조사 및 실내시험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 궤도형식별 구조적 특성인 궤도지지강성을 감안한 궤도성능기반의 궤도열화모델 정립을 위한 핵심 매개변수는 자갈궤도의 경우 도상자갈의 상태였으며 콘크리트궤도(침목플로팅궤도)의 경우 침목방진패드의 스프링강성으로 분석되었다. 또한 콘크리트궤도 중 직결식 레일체결장치를 사용하는 궤도구조의 경우 레일체결장치의 손상여부가 궤도성능에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

2) 자갈궤도와 콘크리트궤도 모두 사용하는 레일패드는 궤도열화에 직접적인 영향을 미치기에 상대적으로 스프링강성이 크며, 코일스프링클립도 사용년수 증가에 따라 직접적인 체결력 감소경향이 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

3) 코일스프링클립의 경우 레일의 위치고정을 위한 핵심 궤도구성품이므로 본 연구에서 검토하고자 하는 궤도지지강성 측면에서의 열화요인은 아니나 궤도구조의 성능유지를 위해서는 중요한 궤도구성품인 것으로 분석되었다.

Reference

- [1] Sato, Y.(1955), "Japanese on deterioration of ballasted track", Vehicle System Dynamics, Vol.24, pp. 197-208.
- [2] Hettler, A.(1984), "Permanent settlements of ballasted railway tracks". Railway Technical Review(RTR), Vol. 33, No.11, p.847-853.
- [3] Demharter, K.(1982), "Settlement behavior of railway track bed under vertical load", Technical University of Munich, Technical report No.36.
- [4] Shenton(1985), "Ballast deformation and track deterioration", Proceedings of a Conference on Track Technology, University of Nottingham, pp. 253-265, Thomas Telford, London.
- [5] J. Oeberg, "Track deterioration of ballasted tracks- Margical cost models for different railway vehicles", Master thesis, Royal Institute of Technology, 2006.
- [6] J.Y. Choi, "Influence of Track Support Stiffness

- of Ballasted Track on Dynamic Wheel-rail Forces”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 139, No. 7, pp. 709-718, 2013.
- [7] M.C. Kim, Y.H. Bae, S.Y. Lee, Y.G. Park “Experimental Study on Characteristics of Track Settlement Depending on Components of Ballast Track”, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 19, No. 4, pp. 498-505, 2016.
- [8] D.W. Lee, “Fatigue Effect Evaluation Method of Resilience Pad for Sleeper Floating Track”, Ph.D. thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2015.
- [9] J.Y. Choi, “Influence of Track Support Stiffness of Railway Tracks on Track Impact Factor”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 140, No. 8, pp. 1-12, 2014.
- [10] Korea Rail Network Authority (2014) Structure of ballast track, KR C-14030.
- [11] G.M. Gu, J.Y. Choi, “The Dynamic Response of Rail Support”, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 51, No. 6, pp. 798-820, 2013.
- [12] D.W. Lee, Y.G. Park, J.Y. Choi, “A Study in the Evaluation of Track Support Stiffness on the Various Track Type in Urban Transit”, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 14, No. 3, pp. 262-270, 2011.