

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.4.537

JCCT 2023-7-64

모달시험기법을 이용한 자갈궤도의 침묵지지조건 평가

Evaluation of Sleeper Supporting Condition for Railway Ballasted Track using Modal Test Technique

최정열*, 윤태정**, 정지승***

Jung-Youl Choi*, Tae-Jung Yoon**, Jee-Seung Chung***

요약 최근 도심지 주변으로 집중되는 신축구조물 및 공동구 확장 등과 같은 인접굴착공사로 인해 운영중인 철도 구조물의 변형이 발생되고 있다. 그러나 대부분 구조물에 대한 구조검토 및 보수보강에 집중되고 있으며 궤도에 대한 검토는 부족한 실정이다. 특히 토공노반 상 자갈궤도의 경우 노반과 도상자갈이 강결된 구조가 아니므로, 미소한 수준의 변형으로도 도상자갈 이완현상이 발생할 수 있다. 이는 침묵 지지조건이 불안정한 조건으로 유도될 수 있으므로 충분한 안전성을 확보해야한다. 또한 불안정한 지지조건으로 열차탈선의 위험이 매우 높은 궤도형식이다. 따라서 본 연구에서는 노반 변형에 따른 자갈궤도의 변형특성과 궤도지지성능의 상관관계를 실험 및 해석적으로 입증하고, 자갈 궤도의 상태 및 궤도지지강성을 평가할 수 있는 평가기법을 제시하고자 한다.

주요어 : 인접굴착, 자갈궤도, 모달시험, 유지관리, 성능평가

Abstract Recently, deformation of operating railway structures has occurred due to adjacent excavation works such as new structures and utility tunnel expansion concentrated around downtown areas. However, most of them are focused on structural review, repair and reinforcement of structures. A review of the Track is insufficient. In particular, in the case of the gravel track on the earthwork subgrade, the subgrade and the ballast are not solidified. A slight level of deformation can cause ballast relaxation. Sleeper support conditions may lead to unstable conditions. Sufficient safety must be ensured. In addition, it is a track type with a high risk of train derailment due to unstable support conditions. In this study, the correlation between the deformation characteristics of gravel tracks and track support performance according to subgrade deformation is experimentally and analytically verified. In addition, an evaluation technique that can evaluate the condition of the gravel track and the track support stiffness is presented.

Key words : Adjacent Excavation, Ballast Track, Modal Test, Maintenance, Performance Evaluation

1. 서론

최근 도심지 주변으로 집중되는 신축건물 및 공동구 확장 등과 같은 인접굴착공사로 인해 운영중인 철도 구조물의 변형이 발생되고 이에 따른 보수, 및 보강공사가

빈번하게 시행되고 있는 실정이다[1-4]. 그러나 대부분 구조물에 대한 구조검토 및 보수보강에 집중되고 있으며, 철도궤도에 대한 검토는 매우 부족한 실정이다[1-4].

기존 철도시설 주변으로 다양한 유형의 인접굴착공사가 빈번하게 시행되고 있으며, 대부분 도심지 지하철

*정희원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)

**정희원, 국가철도공단 수도권본부 부장 (교신저자)

***정희원, 동양대학교 건설공학과 교수 (참여저자)

접수일: 2023년 5월 26일, 수정완료일: 2023년 6월 15일

게재확정일: 2023년 7월 3일

Received: May 26, 2023 / Revised: June 15, 2023

Accepted: July 3, 2023

**Corresponding Author: ytj29@kr.or.kr

Seoul Metropolitan Regional Office, KOREA NATIONAL RAILWAY

구조물 및 콘크리트 궤도에 대한 연구가 대부분이다 [1-4]. 콘크리트궤도는 자갈궤도보다 상대적으로 궤도의 강성이 크며, 외부요인에 대한 궤도변형이 미소한 편이다[5]. 토공노반 상 자갈궤도의 경우 노반과 도상자갈이 강결된 구조가 아니므로 미소한 수준의 노반 변형으로도 도상자갈 이완이 발생할 수 있다[6-11]. 이는 침목 지지조건이 불안정한 조건으로 유도될 수 있다. 또한 불안정한 지지조건으로 열차탈선의 위험이 매우 높은 궤도형식이다[5].

철도구조물의 안전성을 확보하기 위해 인접굴착공사 과정에서 궤도변형 발생여부를 실시간으로 파악할 수 있는 자동화계측시스템 중 도상침하계를 적용하고 있다. 그러나 자갈궤도의 지지능에 직접적인 영향을 미치는 침목하부 도상자갈의 상태 및 궤도지지강성을 평가할 수 있는 기법은 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 노반 변형에 따른 자갈궤도의 변형특성과 궤도지지 성능의 상관관계를 실험 및 해석적으로 입증하고, 자갈궤도 하부 노반 변형에 따른 자갈궤도의 상태 및 궤도지지 강성을 평가할 수 있는 평가기법을 제시하고자 한다.

II. 현장조사

본 연구에서는 인접굴착공사에 따른 자갈궤도의 안전성을 분석하기 위해 인접굴착영역보다 큰 총 105m 구간에 대해 자동화계측시스템(도상침하계) 및 궤도선형검측 시스템을 이용하여 궤도변형을 측정하였다. 또한 현장측정 구간인 자갈궤도 침목을 대상으로 모달시험기법을 이용하여 주파수 응답 함수(Frequency response function, FRF)를 분석하였다. 현장측정 구간은 그림 1 과 같다.

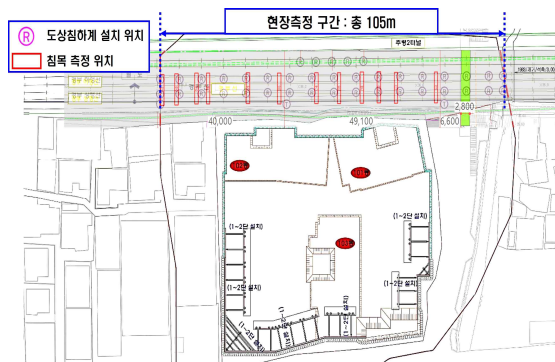


그림 1. 현장측정 구간 개요
Figure 1. Field measurement section overview

본 연구에서는 인접굴착시공에 따른 자갈궤도의 침목 지지조건 변화를 분석하기 위해 굴착시공 전 자갈궤도 침목의 손상이 발생한 구간 및 정상구간을 조사하였다. 자갈궤도의 경우 하부 노반 침하에 따라 자갈이완 현상, 분니현상 및 뜬 침목 현상들이 발생할 수 있다. 이에 모달시험기법을 이용하여 자갈궤도 침목 하부의 지지조건 변화에 따른 고유진동수와의 상관성을 분석하고자 한다. 현장측정 구간의 전경은 그림 2와 같다.

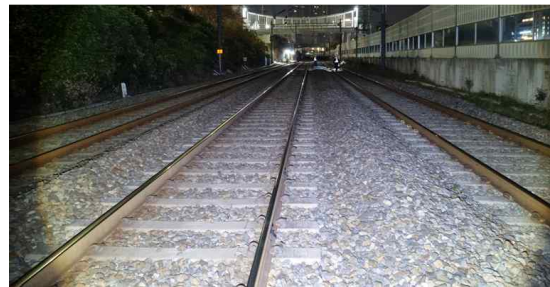


그림 2. 현장측정 구간 전경
Figure 2. Field measurement section view

모달시험기법의 경우 인접굴착공사 시공 전, 중, 후에 따른 중점 개소에 대하여 측정을 수행하였다. 모달 시험기법을 수행할 침목은 그림 3과 같이 자갈궤도 상, 하선 총 24개 침목을 선정하였다.



(a) General condition (#1)



(b) Damage of concrete sleeper (#2)



(c) Damage of concrete sleeper (#3)

그림 3. 콘크리트 침목 손상개소 조사결과
Figure 3. Investigation result of concrete sleeper damage

III. 현장측정

본 연구에서는 자갈궤도의 침목지지조건을 평가하기 위해 모달시험(Impact hammer test)기법을 이용하여 주파수 응답함수(Frequency response function, FRF)를 분석하였다. 모달시험기법은 해머 타격 시 발생하는 가진 하중 대비 동적 응답(가속도)을 측정하는 기법이다. 측정시스템 센서별 감도는 표 1과 같다.

표 1. 현장측정 센서 감도
 Table 1. Field measurement sensor sensitivity

Components	Impact hammer	Acceleromete	
	Point 1	Point 2	Point 3
Sensitivity	0.2449 mV/N	101.8 mV/g	100.0 mV/g

현장측정을 위한 측정시스템 설치 전경은 그림 4와 같다. 콘크리트침목 상면 및 레일에 가속도계를 설치하여 임팩트해머 타격 시 발생하는 동적 응답(가속도)을 측정하였다. 가속도계 부착 및 임팩트해머 타격 위치는 콘크리트 침목 좌, 우 외측부를 대상으로 측정을 수행하였다.

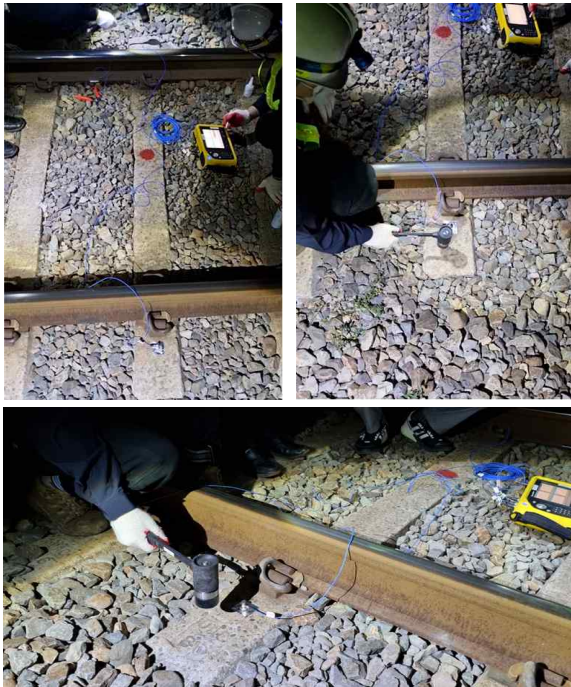


그림 4. 모달시험 측정전경
 Figure 4. Modal test measurement view

본 연구에서는 자갈궤도를 대상으로 모달시험기법을 이용하여 가진 하중 대비 동적 응답(가속도)을 측정하였

으며, 그림 5와 같이 침목별 주파수 응답 함수 및 고유진동수를 산출하였다.

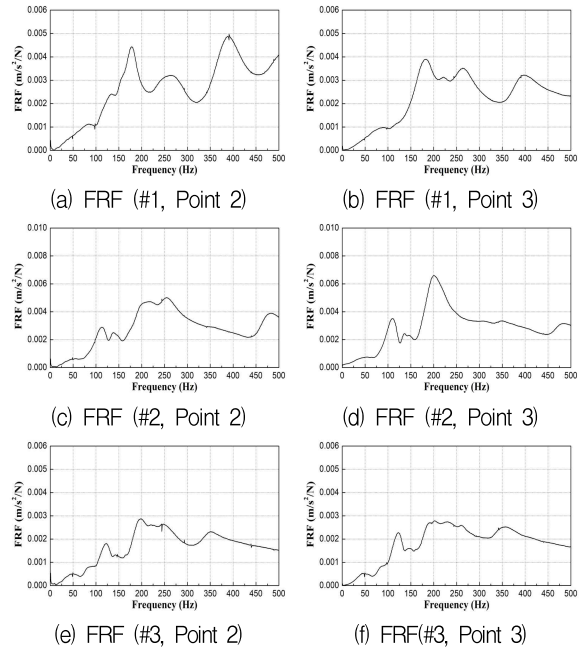


그림 5. 주파수 응답 함수 측정결과
 Figure 5. Measurement result of frequency response function

본 연구에서는 모달시험기법을 이용하여 주파수 응답 함수를 산출하여 표 2와 같이 1차 고유진동수를 분석하였다.

표 2. 고유진동수 분석결과
 Table 2. Analysis result of natural frequency

Components	#1		#2		#3	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right
1 st Natural Frequency	184	179	112	115	123	123

주파수 응답함수 및 고유진동수 분석결과, 그림 5 및 표 2와 같이 #1번 침목의 경우 외관상태 및 자갈채움부족 등의 현상이 나타나지 않았으며 좌, 우측 고유진동수의 차이가 미소한 것으로 나타났다. 반면, #2번 및 #3번 침목의 경우 #1번 침목에 비해 고유진동수가 약 50~60Hz 작게 나타났다. 이는 외관조사결과 침목균열, 자갈채움부족 및 분니현상이 조사된 #2번 및 #3번 침목의 경우 침목하부 지지조건 변화 및 침목의 강성 저하로 인해 상대적으로 고유진동수가 낮게 평가된 것으로 분석되었다. 따라서 자갈궤도의 경우 침목의 손상을 비

못하여 뜬 침목 및 자갈채움 부족 등과 같이 침목지지 조건의 변화는 고유진동수의 변화에 직접적인 영향을 미칠수 있는 것으로 분석되었다.

IV. 분석 및 고찰

자갈케도의 경우 침목 직하부 자갈의 상태를 정량적으로 평가할 수 없는 실정이다. 본 연구에서는 모달시험기법을 이용하여 간편하게 고유진동수의 변화를 바탕으로 침목 직하부 자갈의 건전성 여부를 평가할 수 있는 기법을 제시하고자 한다. 또한 침목지지조건에 따른 고유진동수 대역을 제시함으로써 자갈케도의 침목 지지상태를 간편하게 파악할 수 있는 기법을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 모달시험기법을 이용하여 현장에서 측정된 주파수 응답 함수를 통해 침목 지지조건에 따른 고유진동수를 분석하였다. 침목지지조건 예시는 그림 6과 같다.

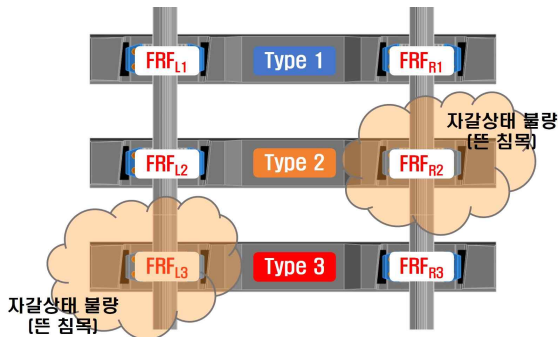


그림 6. 침목지지조건 예시
Figure 6. Example of sleeper support condition

자갈케도의 경우 콘크리트 침목 좌, 우측 지지조건이 상이할 수 있으며, 뜬 침목 또는 분니현상, 자갈채움 부족 및 도상 고결화 등의 다양한 조건들이 발생할 수 있다. 본 연구의 대상선로는 인접굴착공사 현장과 인접한 자갈케도로서 인접굴착공사에 따른 노반의 변형으로 인해 케도의 침하가 발생할 수 있는 조건이다. 이에 그림 6과 같이 뜬 침목과 자갈이완 등으로 인한 콘크리트 침목 좌, 우측 지지조건 유사 및 불량조건으로 유형을 분석하였다.

Type 1(좌, 우측 지지조건 유사)의 주파수 응답 함수 측정결과를 그림 7과 같다.

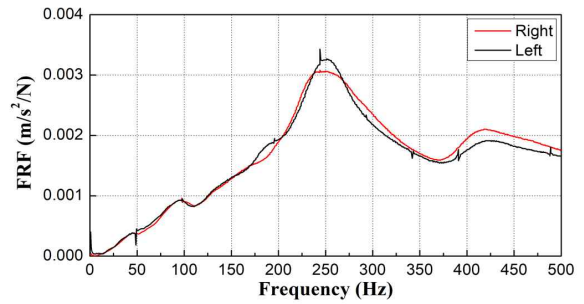


그림 7. 정상 콘크리트 침목 하부 지지조건 유사(Type 1)
Figure 7. Concrete sleeper bottom support similar condition (Type 1)

좌, 우측 침목 지지조건이 유사한 경우, 그림 7과 같이 좌, 우측 FRF(1차 고유진동수)가 매우 잘 일치하여 침목 양측의 지지조건은 유사한 것으로 분석되었다.

Type 2와 같이 우측 침목 지지조건이 불량한 경우, 그림 8과 같이 침목 우측의 주파수가 좌측 보다 작게 나타났다. 따라서 Type 2와 같이 외관조사를 통해 정성적으로 평가된 침목지지조건을 모달시험을 통해 주파수의 차이로서 정량적으로 평가가 가능한 것으로 분석되었다.

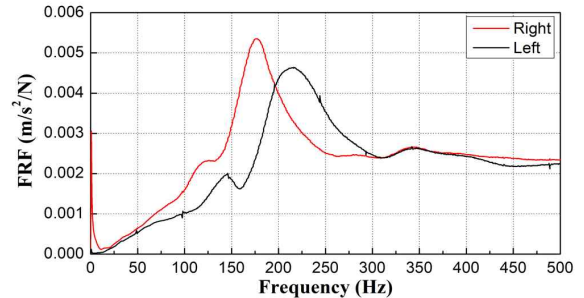


그림 8. 콘크리트 침목 우측하부 지지조건 불량(Type 2)
Figure 8. Bad condition of concrete sleeper right bottom support (Type 2)

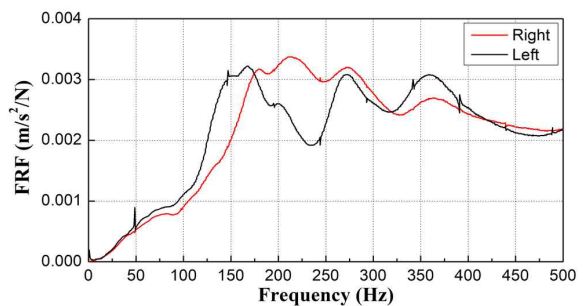


그림 9. 콘크리트 침목 좌측하부 지지조건 불량(Type 3)
Figure 9. Bad condition of concrete sleeper left bottom support (Type 3)

Type 3과 같이 좌측 침묵 지지조건이 불량한 경우, 그림 9와 같이 좌측 대비 우측의 주파수가 높게 나타났다. 이는 Type 2와 같이 침묵 지지조건에 따라 고유진동수의 차이가 나타난 것을 의미한다.

IV. 결 론

토공 노반의 자갈케도는 일반적인 강화 노반의 콘크리트케도와는 달리 노반의 미세한 변형에도 도상 자갈의 변형이 증가할 소지가 있으며, 그 상태를 추정하는 것은 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 자갈케도의 침하(변형)에 따른 도상자갈의 이완 및 뜬 침묵 등을 평가할 수 있는 새로운 계측 및 평가기법으로서 모달시험기법을 제시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 인접굴착공사 현장에 근접한 자갈케도의 외관조사를 통해 정상구간과 손상구간을 선정하였으며, 침묵하부 지지조건에 영향을 미칠 수 있는 분니현상 및 자갈채움 부족 등이 나타난 개소를 조사하였다.

(2) 외관조사결과 자갈케도 침묵 지지조건의 변화가 발생된 것으로 추정되는 개소에서 모달시험기법을 이용하여 주파수 응답 함수를 측정하였다. 측정결과 뜬 침묵개소(#2 침묵, #3 침묵)의 1차 고유진동수는 양호한 상태로 조사된 #1 침묵 보다 약 50Hz 이상 작은 것으로 분석되었다. 또한 자갈채움 부족으로 조사된 개소에서 측정결과도 정상조건의 비해 작은 것으로 분석되었다.

(3) 외관조사를 통해 정성적으로 평가된 좌우측 침묵 지지조건을 모달시험을 통해 주파수의 차이로서 정량적으로 평가가 가능한 것으로 분석되었다. 자갈케도에 사용되는 콘크리트침묵과 같이 2개의 레일이 하나의 침묵에 고정되는 조건에서 좌우측 레일 근처의 침묵하부의 지지조건의 차이를 모달시험기법으로 분석할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 따라서 모달시험기법을 통한 주파수 응답 함수 결과를 이용하여 자갈케도의 좌, 우측 침묵지지조건의 차이 및 케도지지강성의 차이를 평가 할 수 있을 것으로 분석되었다.

(4) 본 연구결과를 바탕으로 향후 추가적인 연구를 통해 모달시험 결과와 유사한 레일지지점 스프링강성을 해석적으로 산출하여, 실제 침묵 하부 스프링강성을 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] J.Y. Choi, G.N. Yang, T.J. Kim and J.S. Chung, "Analysis of Ground Subsidence according to Tunnel Passage in Geological Vulnerable Zone", Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No. 3, pp. 393-399, 2020. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.3.393>
- [2] J.Y. Choi, G.N. Yang, T.J. Kim and J.S. Chung, "Analysis of Changes in Groundwater Level according to Tunnel Passage in Geological Vulnerable Zone", Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No. 3, pp. 369-375, 2020. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.3.369>
- [3] J.S. Chung, D.R. Park and J.Y. Choi, "Evaluation of Track Irregularity Effect due to Adjacent Excavation on Serviced Railway Line", Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), Vol. 5, No. 4, pp. 401-406, 2019. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2018.5.4.401>
- [4] J.Y. Choi, H.H. Lee, Y.S. Kang and J.S. Chung, "Evaluation of Track Irregularity due to Adjacent Excavation Work on Serviced Urban Transit", Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No. 2, pp. 481-487, 2020. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.2.481>
- [5] J.Y. Choi, "Qualitative Analysis for Dynamic Behavior of Railway Ballasted track", Technical University of Berlin, Ph.D. thesis, 2020.
- [6] S. Kaewunruen, A. Remennikov, "Sensitivity Analysis of Free Vibration Characteristics of an Insitu Railway Concrete Sleeper to Variations of Rail pad Parameters, Journal of Sound and Vibration, Vol. 298, pp. 453-461, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.05.034>
- [7] J.W. Kim, H.Y. Jung, "Vibrational Characteristics of the Deteriorated Railway Plate Girder Bridge by Full-Scale Experimental Modal Analysis", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 24, No. 1, pp. 119-128, 2012. <https://doi.org/10.7781/kjoss.2012.24.1.119>
- [8] S. Kaewunruen, A. Remennikov, "Non-destructive Evaluation for Dynamic Integrity of Railway Track Structure", University of Wollongong, Faculty of Engineering and Information Sciences, 2006.
- [9] W. Ferdous, A. Manalo, T. Aravinthan, A. Remennikov, "Review of Failures of Railway Sleepers and its Consequences", University of Southern Consequences, 1st International Conference on Infrastructure Failures and Consequences, 2014.

- [10]S. Kaewunruen, “Experimental and Numerical Studies for Evaluating Dynamic Behaviour of Prestressed Concrete Sleepers Subject to Severe Impact Loading”, University of Wollongong, Ph.D. thesis, 2007.
- [11]R. Silva, W.V. Silva, J.Y. Farias, M.A. Santos, L.O. Neiva, “Experimental and Numerical Analyses of the Failure of Prestressed Concrete Railway Sleepers”, *Materials*, Vol. 13, No. 7, pp. 1-20, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13071704>