

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.6.1057>

JCCT 2023-11-126

궤도 진동기반의 침목플로팅궤도 침목방진패드 스프링강성 추정 기법 연구

Estimation Method of Resilience Pads Spring Stiffness for Sleeper Floating Tracks based on Track Vibration

최정열*, 박상욱**, 정지승***

Jung-Youl Choi*, Sang-Wook Park**, Jee-Seung Chung***

요약 본 연구대상인 도시철도 침목플로팅궤도(STEDEF)는 구조물로 전달되는 진동을 저감시키기 위한 방진궤도이다. 현재 침목플로팅궤도의 침목방진패드 교체주기(정적 스프링강성 변화율, $25\pm 2\%$)는 하중기반(궤도충격계수와 궤도 지지강성)으로 설정되어 운영중인 실정이다. 그러나 대부분의 선행연구는 침목방진패드의 피로수명평가와 스프링강성 증가에 따른 궤도충격계수 및 궤도지지강성의 증가 등 하중기반의 구조적 안전성 측면의 연구가 진행되었다. 따라서 본 연구에서는 분석 구간별 도상 진동가속도를 측정하고 700만회 피로시험결과를 이용하여 구간별 침목방진패드 스프링강성을 산출하고자 한다. 구간별 산출한 침목방진패드 스프링강성을 해석제원으로 설정하여 도상 진동가속도를 해석적으로 도출하였다. 구간별 해석 도상 진동가속도가 현장측정 도상 진동가속도 범위 이내로 나타나 해석모델링의 적정성이 검증되었다. 도출된 스프링강성 변화에 따른 진동가속도 선도($g-k$ curve)를 이용하여 측정 도상 진동가속도로 침목방진패드 스프링강성을 추정하고자 한다. 따라서 측정 도상 진동가속도를 이용한 운행선로의 침목방진패드 스프링강성을 추정할 수 있는 기법을 제시하고자 한다.

주요어 : 스프링강성, 침목방진패드, 가속도, 진동, 유한요소해석

Abstract The urban railway sleeper floating track, the subject of this study, is an anti-vibration track to reduce vibration transmitted to the structure. currently, the replacement cycle of resilience pad for sleeper floating tracks is set and operated based on load. however, most previous studies were conducted on load-based structural safety aspects, such as fatigue life evaluation of sleeper anti-vibration pads and increase in track impact coefficient and track support stiffness due to increase in spring stiffness. therefore, in this study, we measure the vibration acceleration of the ballast for each analysis section and use the results of 7 million fatigue tests to calculate the spring stiffness of the resilience pad for each section. the spring stiffness of the resilience pad calculated for each section was set as the analysis data and the concrete vibration acceleration was derived analytically. the adequacy of analysis modeling was verified as the analyzed concrete bed vibration acceleration for each section was within the field-measured concrete bed vibration acceleration range. using the vibration acceleration curve according to the derived spring stiffness change, the spring stiffness of the resilience pad is estimated from the measured vibration acceleration. therefore, we would like to present a technique that can estimate the spring stiffness of resilience pad of a running track using the vibration acceleration of the measured concrete bed.

Key words : Spring stiffness, Resilience pad, Acceleration, Vibration, Finite element analysis

*정희원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)
**정희원, (주)동해종합기술공사 부사장 (교신저자)
***정희원, 동양대학교 건설공학과 교수 (참여저자)
접수일: 2023년 10월 3일, 수정완료일: 2023년 10월 25일
게재확정일: 2023년 11월 10일

Received: October 3, 2023 / Revised: October 25, 2023

Accepted: November 10, 2023

**Corresponding Author: swjhee@naver.com

Donghae Engineering & Consultants Co.Ltd, Seoul, Korea

I. 서 론

도시철도 침목플로팅궤도(STEDEF궤도)는 구조물로 전달되는 진동을 저감시키기 위해 궤도에 침목방진패드를 적용하여 구조물과 구조적으로 분리시킨 방진궤도이다[1-4]. 침목플로팅궤도에서 침목방진패드는 방진(탄성)체로서 열차 주행에 따른 충격, 진동흡수 및 궤도에 탄성을 부여한다[1-4]. 침목방진패드의 구조적 특성은 도상콘크리트에 매입되는 침목상자와 RC침목 사이에 위치하고 있어 열차하중 분산과 진동을 저감시키고 궤도의 탄성변위를 유도하고 있다[5-8]. 주요기능은 열차주행으로 발생하는 하중과 진동이 궤도구조물과 지반으로 전달되어 인접건물까지 도달하는 것을 차단하는 역할을 한다[5-8]. 현재 침목플로팅궤도의 침목방진패드 교체주기(정적 스프링강성 변화율 $25\pm 2\%$)는 하중기반(궤도충격계수와 궤도지지강성)을 기준으로 설정되어 운영중인 실정이다[1-4]. 그러나 도시철도 운영선로에 부설된 침목플로팅궤도는 공용년수의 증가로 소음, 진동 관련 민원이 증가되고 승차감이 역시 저하되고 있다[1-4]. 그러나 대부분의 선행연구는 침목방진패드의 피로수명평가와 스프링강성 증가에 따른 궤도충격계수 및 궤도지지강성의 증가 등 하중기반의 구조적 안전성 측면의 연구가 진행되었다. 따라서 본 연구에서는 방진궤도의 기능과 목적에 부합할 수 있는 도상 진동가속도 측정결과를 이용한 침목방진패드 스프링강성 추정기법을 연구하고자 한다. 본 연구에서는 분석 구간별 도상 진동가속도를 측정하고 선행연구 결과인 700만회 피로시험결과를 이용하여 구간별 침목방진패드 스프링강성을 산출하였다. 검증된 모델을 이용하여 구간별 산출한 침목방진패드 스프링강성과 실제 열차하중조건을 해석제원으로 설정하여 도상 진동가속도를 산출하였다. 향후 현장에서 침목방진패드 채취 및 장시간의 피로시험 없이 도상 진동가속도 측정만으로 운행선로의 스프링강성을 추정하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다.

II. 현장측정

본 연구에서는 모달시험기법을 이용한 주파수 응답함수(FRF, Frequency response function)를 이용하여 침목플로팅궤도의 고유진동수를 분석하였다[9]. 또한 실 운영선을 대상으로 도상 진동가속도를 측정하고 대상선로

의 이력데이터를 이용하여 구간별 열차하중 반복횟수를 산출하였다.

1. 모달시험기법을 이용한 고유진동수 산출

본 연구에서는 모달시험을 통해 시간-가속도 그래프를 측정하고 주파수 응답 함수 분석결과, 1차 고유진동수는 약 87.65Hz로 측정되었다. 이를 수치해석 모델링 적정성 입증에 활용하였다. 모달시험 측정 전경과 시간-가속도 및 주파수 응답함수 측정결과는 그림 1과 같다.

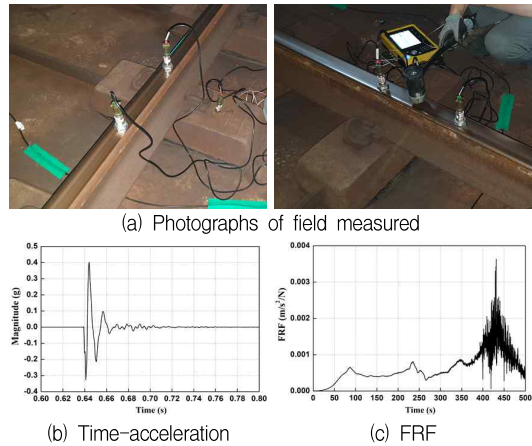


그림 1. 모달시험 전경 및 측정결과

Figure 1. Modal test view and measured result

본 연구에서는 그림 1과 같이 모달시험기법을 통해 주파수 응답함수를 측정하였으며, 주파수 응답 함수를 이용하여 고유진동수를 산출하였다. 침목플로팅궤도의 고유진동수 분석결과 약 87.65Hz 수준으로 분석되었다.

2. 실 운영열차 하중에 의한 도상 진동가속도 측정

현장측정 구간별 개통일자, 일일 열차통과횟수 및 연간 반복횟수 산출결과는 표 1과 같다.

표 1. 현장측정 구간별 제원

Table 1. Properties of measured section

Component	Section A	Section B	Section C
Period of use(year)	23	23	27
Number of trains passing(max/day)	174	196	152
Number of cycle(year)	260,000	296,000	170,000

* Number of cycle(year)=number of trains passing(day)×wheel count×30day×12month/Area conversion ratio(7.64)

- wheel count=Section A, B= 32ea, Section C= 24ea

본 연구에서는 운행선로 콘크리트 도상 중앙부에 가속도계를 설치하여 실 열차하중에 의한 도상 진동가속도를 측정하였다. 도상 진동가속도 측정 전경은 그림 2와 같다.

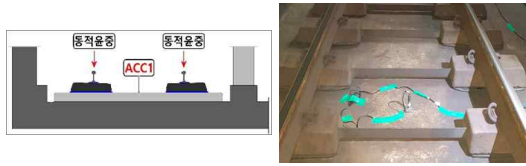


그림 2. 도상 진동가속도 측정 전경
 Figure 2. Photographs of concrete bed vibration acceleration

현장측정 구간별 실 열차운행조건에서 도상 진동가속도를 측정하였으며, 측정결과는 그림 3과 같다.

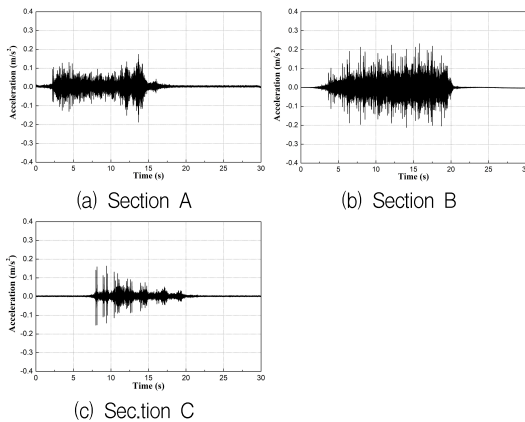


그림 3. 도상 진동가속도 측정결과
 Figure 3. Measured result of concrete bed vibration acceleration

실 열차운행조건에서 도상 진동가속도를 측정한 결과, Section A의 경우 $0.160\text{m/s}^2 \sim 0.187\text{m/s}^2$ 로 측정되었다. 연간 통과횟수 및 공용년수 등에 따른 총 반복회수가 가장 큰 Section B의 경우 $0.212\text{m/s}^2 \sim 0.254\text{m/s}^2$ 로 측정되었다. 반면 총 반복회수가 가장 작은 Section C의 경우 $0.152\text{m/s}^2 \sim 0.167\text{m/s}^2$ 로 측정되었다. 측정구간별 도상 진동가속도는 Section B가 가장 큰 것으로 분석되었다.

III. 수치해석

본 연구에서는 침목방진패드 스프링강성 변화에 따른 진동영향해석을 수행하였다. 수치해석과 현장측정결과

를 비교하여 해석모델링의 적정성을 입증하였다. 검증된 모델링을 이용하여 침목방진패드 스프링강성 변화가 도상 진동가속도에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다.

1. 수치해석 모델링 적정성 검증

본 연구에서는 레일, 침목 및 도상과 같이 질량을 갖는 구성품을 3차원 Solid 요소로 설정하였다. 또한 레일패드 (k_1) 및 침목방진패드(k_2)는 스프링요소로 설정하였다. 수치해석 모델링은 그림 4와 같다.

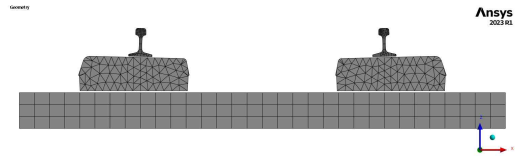


그림 4. 수치해석 모델링(단면도)
 Figure 4. Finite element model

본 연구에서는 모달시험 측정조건과 동일한 조건을 해석모델링에 적용하여 수치해석을 수행하였으며, 해석 주파수 응답 함수 해석결과는 그림 5와 같다.

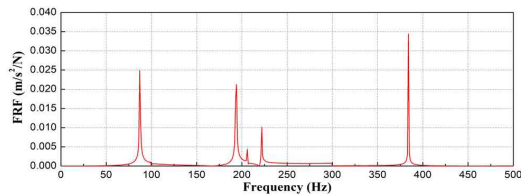


그림 5. 주파수 응답 함수 해석결과
 Figure 5. Analyzed result of frequency response function

해석 1차 고유진동수 분석결과, 수치해석 1차 고유진동수는 89Hz로 나타났으며, 현장측정 대비 수치해석의 고유진동수는 약 1.54%로 차이로 나타나 해석 모델링은 현장조건을 충분히 반영한 것으로 판단된다.

2. 도상 진동가속도 해석결과

본 연구에서는 구간별 이력데이터를 바탕으로 구간별 열차하중 반복횟수를 산출하였다. 구간별 산출된 반복횟수를 이용하여 침목방진패드 700만회 피로시험결과로 구간별 스프링강성을 산출하고자 한다[1]. 침목방진패드 스프링강성 환산을 위한 피로시험결과는 그림 6과 같다[1].

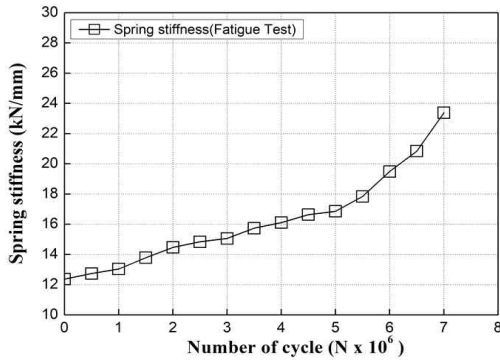


그림 6. 피로시험결과
Figure 6. Result of fatigue test

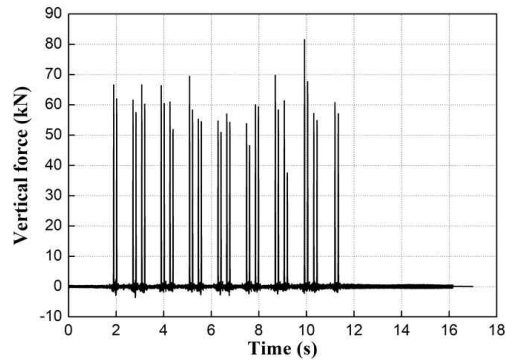


그림 8. 하중조건
Figure 8. Load condition

본 연구에서는 침목방진패드 피로시험결과를 이용하여 현장측정 구간별 침목방진패드 스프링강성을 산출하였다. 현장측정 구간별 방진재 스프링강성 산출결과를 표 2와 같다.

표 2. 침목방진패드 스프링강성 환산결과
Table 2. Conversion result of resilience pad spring stiffness

Section	Number of cycle(year)	Period of use(year)	Number of cycle(all)	Resilience pad spring stiffness(kN/mm)
A	260,000	23	5,980,000	19.42
B	296,000	23	6,808,000	22.41
C	170,000	27	4,590,000	16.68

본 연구에서는 표 2와 같이 산출된 방진재 스프링강성을 변수로 설정하여 해석을 수행하였다.

경계조건의 경우 그림 7과 같이 콘크리트 도상 하부는 고정단, 레일 양 끝단을 고정단으로 설정하였다. 또한 그림 8과 같이 실제 열차하중 측정결과를 하중조건으로 적용하였다.

본 연구에서 검증된 해석모델링을 이용하여 침목방진패드 스프링강성 변화에 따른 도상 진동가속도를 분석하였다. 현장측정 구간별 산출된 침목방진패드 스프링강성 변화에 따른 도상 진동가속도 해석결과는 그림 9와 같다.

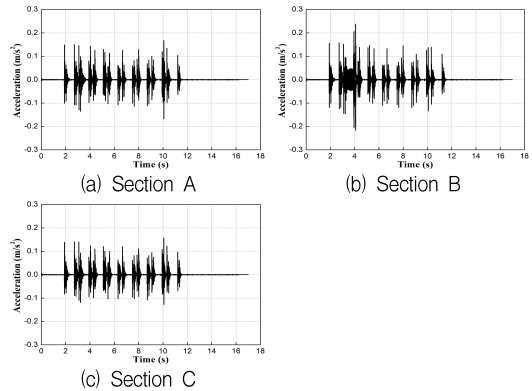


그림 9. 도상 진동가속도 해석결과
Figure 9. Analyzed result of concrete bed vibration acceleration

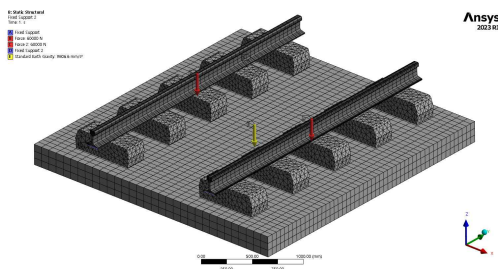


그림 7. 하중위치 및 경계조건
Figure 7. Load location and boundary condition

표 3. 구간별 해석결과
Table 3. Analyzed result of each section

Section	Resilience pad spring stiffness (kN/mm)	FEA vibration acceleration(m/s ²)
A	19.42	0.172
B	22.41	0.238
C	16.68	0.156

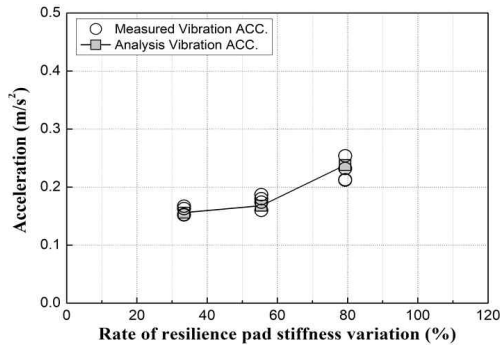


그림 10. 수치해석과 현장측정의 도상 진동가속도 비교
 Figure 10. Comparison result of Analysis and measured

수치해석과 현장측정의 도상 진동가속도 비교결과, 그림 10과 같이 수치해석의 도상 진동가속도는 현장측정결과 범위안에 나타나는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 검증된 해석 모델링을 이용하여 침목방진패드 신품의 스프링강성 변화에 따른 도상 진동가속도를 해석적으로 분석하였다.

IV. 분석 및 고찰

본 연구에서는 침목방진패드 스프링강성 변화에 따른 도상 진동가속도를 해석적으로 분석하였다. 또한 해석적으로 도출된 도상 진동가속도를 구간별 현장측정결과와 비교하여 결과에 대한 적정성을 분석하였다. 따라서 검증된 해석 모델링을 이용하여 침목방진패드 정적 스프링강성 변화에 따른 해석 도상 진동가속도를 분석하였다. 스프링강성 변화에 따른 도상 진동가속도 해석결과는 그림 11과 같다.

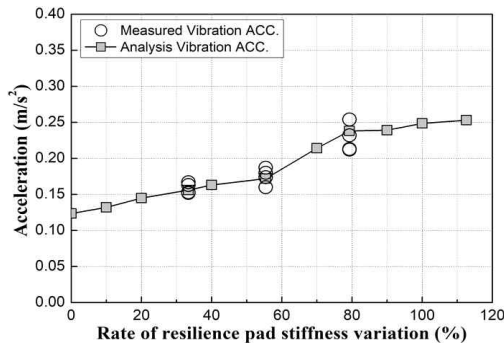


그림 11. 스프링강성 변화에 따른 도상 진동가속도 분석결과
 Figure 11. Analyzed result of according to spring stiffness variation

실 운영열차 하중에 의해 측정된 도상 진동가속도가 진동영향해석 결과로 나타난 스프링강성 변화에 따른 진동가속도 선도(g-k curve)에 근접하게 표시되어 해석결과가 적정함을 입증하였다. 침목방진패드 스프링강성 변화에 따른 도상 진동가속도 해석결과에 대한 회귀분석은 그림 12와 같다.

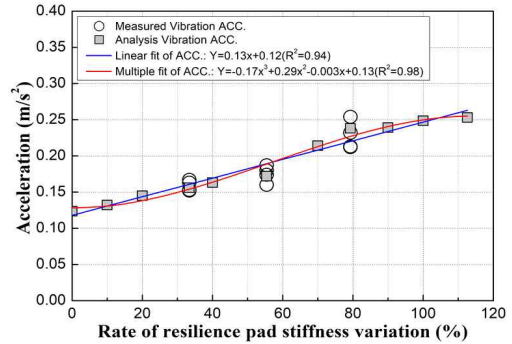


그림 12. 스프링강성과 도상 진동가속도의 추세 분석
 Figure 12. Regression analysis of spring stiffness and vibration acceleration

침목방진패드 스프링강성과 도상 진동가속도 회귀분석결과, 선형회귀 분석과 다항(3차)회귀 분석의 R²(결정계수)가 0.94, 0.98로 유사하여 선형회귀식으로도 신뢰성이 확보되는 것으로 분석되었다. 따라서 도상 진동가속도를 바탕으로 침목방진패드의 스프링강성 변화수준을 추정할 수 있는 g-k 선도를 도출하였다.

$$\text{선형회귀식} : y = 0.13x + 0.12 \quad \text{식 (1)}$$

여기서, x는 침목방진패드 스프링강성 변화율(%), y는 도상 진동가속도(m/s²)이다. 따라서 도상 진동가속도를 통해 침목방진패드 스프링강성을 추정하는 방법으로 도상 진동가속도-스프링강성 선도(g-k curve)를 제시하였다. 본 연구에서는 침목방진패드의 반복횟수에 따른 스프링강성의 변화를 나타낸 피로선도(k-N curve)를 이용하여 운행선의 구간별 총 반복횟수를 고려한 스프링강성을 산출하였다. 피로효과가 고려된 스프링강성을 진동영향해석을 통해 진동가속도를 산출하고 실 운행선에서 측정된 도상 진동가속도 비교 결과는 표 4와 같다.

표 4. 구간별 수치해석과 현장측정 비교결과

Table 4. Comparison result of each section analysis and measured

Section	Resilience pad			Vibration acceleration (m/s ²)	
	Number of cycle (N)	Spring stiffness (kN/mm)	Rate of spring stiffness variation (%)	FEA	Measured
A	5,980,000	19.42	55.4	0.172	0.160~0.187
B	6,808,000	22.41	79.3	0.238	0.212~0.254
C	4,590,000	16.68	33.4	0.156	0.152~0.167
General		12.50	0	0.124	-

분석결과 구간별 공용년수를 고려하여 추정된 스프링강성 변화율은 초기치(12.5kN/mm) 대비 33.4~79.3%로 현 하중기반 침목방진패드 교체기준(정적 스프링강성 변화율 25%, 0.153m/s²)를 초과한 상태로 교체가 시급하다. 도상 진동가속도 측면에서 볼 때 진동영향해석과 운행선 현장측정 결과도 침목방진패드 신품기준(0.124m/s²) 대비 25% 이상 도상 진동가속도가 증가하여 상호 유사한 증가 경향을 나타내고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 현장에 계측기(가속도계)를 설치하여 상시 도상 진동가속도 자동화계측을 통해 스프링강성 변화에 따른 진동가속도 선도(g-k curve)를 이용한 침목방진패드의 스프링강성 추정기법을 제시하고자 한다.

V. 결론

본 연구는 궤도 진동기반의 도시철도 침목플로팅궤도의 침목방진패드 교체주기 산정을 위해 침목방진패드의 피로효과와 방진효과 분석을 위해 현장측정 및 인공하중 비선형 재료 특성과 선행연구 결과를 이용한 수치해석을 통해 스프링강성 변화에 따른 진동가속도 선도(g-k curve)를 도출하였다. 이에 침목방진패드의 스프링강성 추정기법을 제시하고자 한다.

1) 반복횟수에 따른 침목방진패드의 스프링강성을 산출하기 위해 선행연구결과를 이용하여 진동영향해석의 입력재원으로 실 운행선의 측정구간별 총 반복횟수에 따른 피로효과가 고려된 스프링강성을 산출하였다.

2) 반복횟수에 따른 스프링강성 변화가 도상 진동가속도에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 도상 진동가속도만 측정하면 실 운행선에서의 침목방진패드 스프링강성을 찾을 수 있는 스프링강성-진동가속도 선도

(g-k curve)를 제시하였다.

3) 대부분 선행연구들은 침목방진패드 스프링강성 변화율(%)이었다. 스프링강성을 파악하기 위해서 운행선의 침목방진패드를 채취하여 실내시험(피로시험)을 하였다. 그러나 침목방진패드를 채취하는 것에 대한 기술적 제약과 데이터 확보의 제한성으로 결과에 대한 신뢰성 확보가 부족했다. 따라서 본 연구에서는 사용성 기반에서의 진동평가를 통해 침목방진패드 스프링강성 변화를 판단할 수 있는 새로운 평가기법을 제시하였다.

향후 운영중인 침목플로팅궤도에서 도상 진동가속도를 측정하고 침목방진패드 추출을 통한 스프링강성 분석 결과와 비교하여 평가기법의 현장적용성 검증이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] J.G. Bong, "A Study on Replacement Period of Resilience Sleeper Pads for Sleeper Floating Track in Urban Transit", Ph.D. thesis, DongYang University, 2022.
- [2] J.Y. Choi, "Analysis Study on Fatigue Behavior of Resilient Pad for Rail Fastening System", The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 7, No. 2, pp. 405-410, 2021.
- [3] 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.
- [4] H.S. Kim, "Damage Effect Analysis for Track Components of Sleeper Floating Track in Urban Transit", Ph.D. thesis, DongYang University, 2020.
- [5] J.Y. Choi, J.S Lee, J.G. Bong, S.J Kim, J.S. Chung, "Evaluation on Fatigue Behavior of Resilience pad for Sleeper Floating Track System in Urban Transit", The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No. 3, pp. 347-352, 2020. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.3.347>
- [6] J.Y. Choi, J.G. Bong, J.S Lee, J.M Han, J.S. Chung, "Dynamic Behavior of Sleeper Floating Track System(STEDEF) on Urban Rapid Transit According to Replacement of Resilience Pad", The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No. 3, pp. 335-340, 2020.

- <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.3.335>
- [7] J.Y. Choi, H.S. Shin, “Cause Analysis for Sleeper Damage of Sleeper Floating Track in Urban Transit”, The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 8, No. 6, pp. 667–674, 2022.
<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.6.667>
- [8] J.Y. Choi, H.S. Kim, K.S. Han, C.J. Jang, J.S. Chung, “Damage Evaluation of Track Components for Sleeper Floating Track system in Urban Transit”, The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 5, No. 4, pp. 387–394, 2019.
<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.4.387>
- [9] J.Y. Choi, T.J. Yoon, J.S. Chung, “Evaluation of Sleeper Supporting Condition for Railway Ballasted Track using Modal Test Technique”, The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 9, No. 4, pp. 537–542, 2023. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.4.537>
- [10]ISO 10137:2007(2007), Bases for design of structures – serviceability of buildings and walkways against vibrations.