The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)
Vol. 6, No. 3, pp.347-352, August 31, 2020. pISSN 2384-0358, eISSN 2384-0366

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.3.347
JCCT 2020-8-42

도시철도 침목플로팅궤도(STEDEF)의 침목방진패드 피로거동 분석

Evaluation on Fatigue Behavior of Resilience pad for Sleeper Floating Track System in Urban Transit

최정열*, 이정숙**, 봉재근***, 김수진*, 정지승*

Jung-Youl Choi*, Jeong-Sug Lee,Jae-Geun Bong***, Su-Jin Kim*, Jee-Seung Chung***

요 약 본 연구는 현장측정결과를 바탕으로 도시철도 침목플로팅궤도 (STEDEF)에 사용되는 침목방진패드의 스프링 강성 변화율에 따른 궤도충격계수 변화수준의 경향성을 분석하고, 현장측정결과와 실내 700만회 피로시험결과의 상관관계를 입증하였다. 또한 도시철도 STEDEF 궤도구조에 사용되는 침목방진패드의 비선형 피로거동특성이 고려된 침목방진패드의 피로영향선도를 제시하였다.

현장측정결과를 바탕으로 분석한 궤도충격계수-궤도지지강성 선도의 침목방진패드 스프링강성 변화율 30% 이상에 대한 궤도충격계수의 비선형 특성이 피로시험결과와 일치하는 것으로 분석되었다. 대부분의 침목방진패드 시료에서 침목방진패드 규격서에서 명시한 정, 동적 스프링강성 기준치를 상회하는 수준으로 나타났으며, 작은 하중범위에서의 변위가 큰 침목방진패드의 소재적인 특성을 감안할 때 열차하중을 부담하는 침목방진패드의 전체적인 탄성변위량이 클수록 연행집중하중으로 작용하는 열차 하중에 의한 탄성변위의 회복속도가 늦어지고 탄성변위향은 작아지게 되므로 정적 대비 동적 스프링 강성의 비가 커지게 된는 것으로 분석되었다.

주요어 : 침목플로팅궤도, 궤도지지강성, 궤도충격계수, 방진패드, 스프링강성, 피로거동

Abstract In this study, the variation of track impact factor according to the spring stiffness change rate of sleeper resilience pad was analyzed based on field measurements. In addition, the correlation between field measurement results and 7 million fatigue test results was verified. The fatigue effect diagram of the sleeper resilience pads was presented considering the nonlinear deterioration characteristics of the sleeper resilience pads used for the STEDEF track. Based on the field measurement results, the nonlinear characteristics of the track impact factor for the spring stiffness change rate over 30% of sleeper resilience pad on the track impact factor-track support stiffness diagram were analyzed to be consistent with the fatigue test results.

Key words : Sleeper Floating Track, Track Support Stiffness, Track Impact Factor, Resilience Pad, Fatigue Behavior

Ⅰ. 서 론

사용년수의 증가에 따라 궤도재료의 노후도 증대 및 재료적 열화 등에 따른 궤도재료의 손상에 의하여 최근

*정회원, 동양대학교 철도건설안전공학과
**정회원, 서울교통공사 토목처
***정회원, 서울교통공사 궤도2사업소
접수일: 2020년 03월 04일, 수정완료일: 2020년 03월 30일
게재확정일: 2020년 04월 20일
Received: March 04, 2020 / Revised: March 30, 2020
Accepted: April 20, 2020
**Corresponding Author: smrtlh@naver.com
Civil Engineering Dept, Seoul Metro, Korea

궤도구성품의 교체 및 보수물량이 증가하는 추세이다 [1]. 따라서 침목플로팅궤도 (STEDEF)에 적용되어 사용중인 핵심 궤도재료에 대한 적정 유지관리방안을 수립하고 이에 대한 적정 교체기준 정립이 필요한 실정이다 [1]. 선행연구결과, 침목플로팅궤도 (LVT)의 방진패드에 대한 비선형 재료 특성치를 수치해석을 통해 산출하였고 피로시험결과 300만회 이후에 급격한 물성변화가 발생되는 것으로 나타났다 [2]. 또한 침목플로팅궤도 (STEDEF)에서 침목방진패드의 노후화로 인하여 스프링강성 증가와 두께의 감소의 변화량을 확인하였으며 침목방진패드의 스프링강성 그리고 두께 감소량을 이용한 선형회귀분석결과를 통하여 침목방진패드의 체계적인 궤도재료 교환기준이 필요함을 제시하였다 [3]. 그러나 침목플로팅 궤도에 사용되는 궤도구성품의 적정 교체주기와 관련된 연구는 부족한 실정이다. 침목플로팅 궤도에서는 침목 직하부의 침목상자 내부에 설치되어 있는 침목방진패드에 의해서 궤도지지강성이 결정된다 [3,5,6]. 본 연구에서는 공용중인 침목플로팅궤도 (STEDEF)를 대상으로 운행선 궤도 현장측정을 수행하여 궤도지지강성 및 궤도충격계수를 분석하였다. 측정 궤도지지강성을 바탕으로 침목저부에 설치된 침목방진패드의 스프링강성을 산출하고 이를 바탕으로 침목방진패드 스프링강성 변화에 따른 궤도충격계수의 변화를 실험적으로 입증하였다. 또한 침목방진패드의 700만회 피로시험을 수행하여 측정결과와의 비교분석을 통해 침목방진패드의 피로수명을 평가하였다.

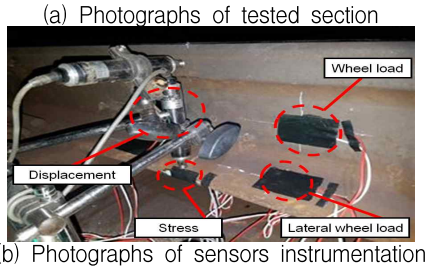
II. 궤도지지강성 및 궤도충격계수 분석

본 연구에서는 공용중인 침목플로팅궤도를 대상으로 현장측정을 수행하여 동적 윤중 및 궤도변위를 측정하고 이를 바탕으로 누적통과톤수가 약 4~5억톤 수준인 상태에서의 궤도충격계수 및 궤도지지강성을 산출하였다. 현장측정구간의 제원과 전경은 각각 표 1 및 그림 1과 같다.

표 1. 측정구간 제원
Table 1. Properties of tested sections

Section	Curvature, R(m)	Cant(mm)	Accumulated tonnage (MGT)
Section A	400	144	5.74
Section B	600	85	4.10
Section C	Straight line	-	5.74

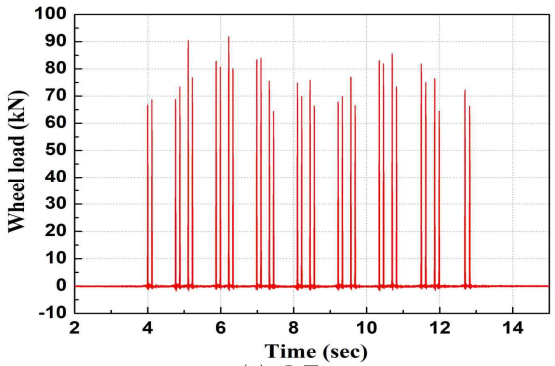
(a) Photographs of tested section



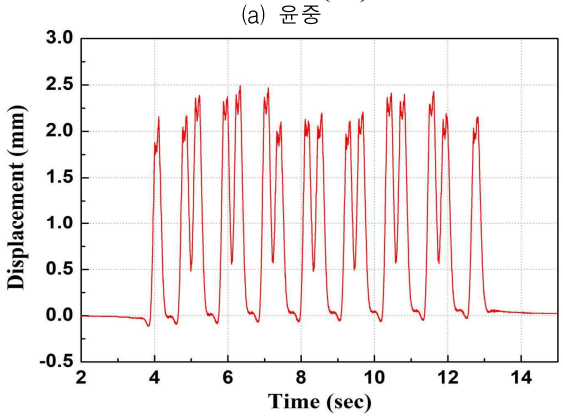
(b) Photographs of sensors instrumentation

그림 1. 측정구간 및 센서설치 전경
Figure 1. Photographs of instrumentation

윤중을 비롯한 레일 및 레일지지점 (침목)의 변위를 측정하였으며 측정파형의 예는 그림 2와 같다.



(a) 윤중



(b) 레일수직변위

그림 2. 측정파형 예(Section A)
Figure 2. Examples of measured results of dynamic response (Section A)

궤도지지강성 (track support stiffness)은 열차하중에 대한 궤도구조의 지지성능 (supporting and bearing capacity)을 나타내는 궤도성능 및 품질평가의 지표로써 궤도시스템별 구조적 특성 및 탄성범위에 직접적인 영향

을 받으며 궤도와 차량 모두에게 직접적인 영향을 미치는 요소이다 [3,8-10]. 따라서 궤도지지강성은 도상형식 및 궤도구조형식별로 다양한 특성치를 갖게 되므로 특정 궤도시스템의 고유특성이라고 볼 수 있다 [4,7-9].

콘크리트궤도의 궤도지지강성은 레일지지점 스프링 강성에 의해 결정되며 레일지지점 스프링강성은 직렬배치 스프링구조에서 가장 소프트한 소재의 스프링강성에 의해 결정된다. 또한 레일지지점의 스프링강성의 크기에 따라 차륜-레일 상호작용력의 동적 증폭수준이 결정되므로 탄성재료 (탄성패드)가 열화되어 제 기능을 수행하지 못한다면 동적인 하중이 증가되고 이에 따라 궤도구조를 구성하는 궤도재료의 전반적인 성능 저하 및 다양한 손상의 기저요인이 될 수 있다.

측정 궤도지지강성은 측정 최대 윤중과 최대 레일 수직변위의 비로써 측정대상 궤도구조의 현재 궤도상태에서의 궤도지지강성을 산출할 수 있다 [4-6]. 측정 윤중과 레일수직변위를 바탕으로 산출한 측정개소별 궤도지지강성 분포는 그림 3과 같다.

그림 3과 같이 모든 측정개소에서 측정 궤도지지강성이 설계 궤도지지강성을 크게 상회하는 것으로 나타나 현재 사용중인 침목방진패드는 설계 시 고려했던 탄성수준을 확보하지 못하는 것으로 분석되었다. 또한 측정개소별 열차속도의 차이가 다소 발생하였으나 열차속도와 무관하게 전반적인 궤도지지강성은 일정한 범위대역에 분포하는 것으로 분석되었다.

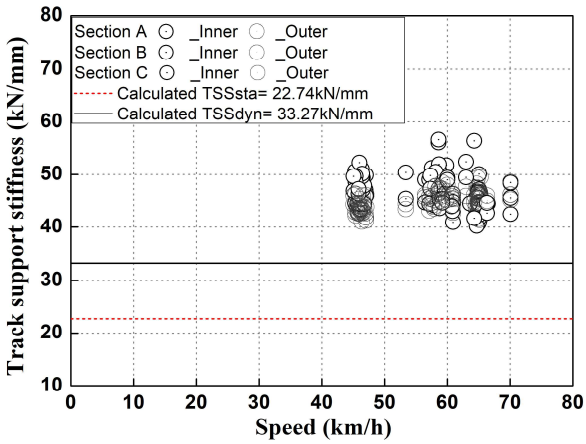


그림 3. 궤도지지강성 산출결과
Figure 3. Measured track support stiffness

궤도충격계수 (track impact factor)는 궤도지지강성과 레일표면요철에 직접적인 영향을 받으며 동적 윤중변동율 (rate of wheel load fluctuation)의 표준편차 (standard deviation, σ)를 이용하여 산출된다 [4,6-7].

여기서 동적 윤중변동률은 $(P_{dyn}-P_{sta})/P_{sta}$로 나타내며 이는 열차주행에 따른 동적 윤중의 변동량을 정적 윤중으로 나눈 값을 의미한다 [8-10]. 현장측정으로 획득한 동적 윤중은 열차주행에 따른 동적하중이며, 열차의 정적하중과 비교하여 궤도의 충격계수를 산출할 수 있다 [6,9]. 일반적으로 궤도충격계수는 윤중변동률 표준편차에서 2σ의 값을 고려한다 [8-10].

궤도충격계수 분석을 위한 동적 윤중변동률의 확률분포는 정규분포로 가정할 수 있다. 동적 윤중변동률 측정결과를 이용한 가우시안 확률밀도함수 분석을 통해 산정한 측정개소별 궤도충격계수는 그림 4와 같다.

그림 4와 같이 곡선부인 Section A와 B의 경우의 경우 내측 궤도충격계수가 외측보다 각각 약 11% 및 8% 큰 것으로 나타났다. 이는 내측 궤도충격계수가 크게 나타난 것은 그림 3과 같이 곡선부 내측 궤도지지강성이 상대적으로 외측보다 높게 평가된 것에서 기인한 현상으로 판단된다. 반면 직선부인 Section C는 외측이 내측보다 약 12% 큰 것으로 분석되었다. 이는 그림 3과 같이 대상개소에서 외측 궤도지지강성이 내측보다 큰 데에서 기인한 현상으로 판단된다.

그림 4와 같이 측정개소별 궤도충격계수는 현재 국내 궤도 설계충격계수로 사용하고 있는 1.410V/80을 모두 상회하는 수준으로 분석되어 대상선로에서의 궤도충격의 수준은 설계 시 고려된 수준을 초과하는 것으로 분석되었다.

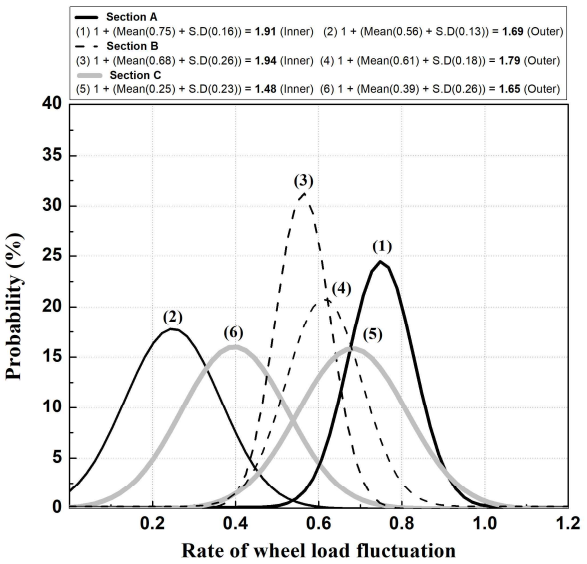


그림 4. 측정 동적 윤중변동율의 가우시안 확률밀도함수 산출결과
Figure 4. Measured results of gaussian probability density function of dynamic wheel load fluctuation

III. 침목방진패드의 피로영향 평가

본 연구에서는 침목플로팅궤도용 침목방진패드의 피로영향평가를 위해 700만회 반복피로시험을 수행하였으며 실험전경은 그림 5와 같다.

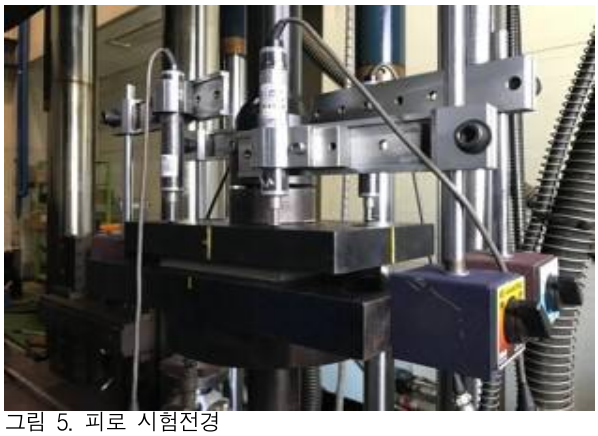


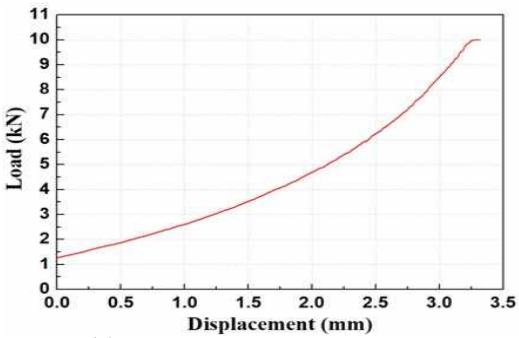
그림 5. 피로 시험전경
Figure 5. Photographs of fatigue test

침목플로팅궤도용 침목방진패드는 매우 소프트한 소재 (EPDM)로서 반복 피로하중 작용 시 열 변형이 일어나면 정상적인 하중-변위선도를 산출할 수 없다.

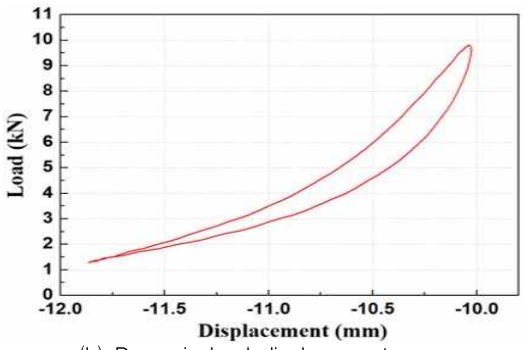
이에 본 연구에서는 피로시험 중간에 실시하는 반복횟수별 스프링강성 시험의 주기를 반복횟수 50만회로 설정하여 50만회 마다 상온에서 방냉 후 다시 피로하중을 가력하는 방식으로 총 700만회까지 피로시험을 수행하였다 [2].

피로시험의 하중조건은 130kgf~1,000kgf, 시험주파수는 3Hz로 설정하여 시험을 수행하였으며 정, 동적스프링강성 시험결과(예)는 그림 6과 같다 [2].

피로시험의 경우 141mm×141mm인 시료로 시험한 결과로써 현장에 있는 실제크기의 패드로 면적환산 (원판 660mm×230mm×12mm)을 통해 현장에서 침목방진패드가 부담하는 년간 반복횟수를 산정하였다 [2].



(a) Static load-displacement curve



(b) Dynamic load-displacement curve

그림 6. 침목방진패드 정, 동적 스프링강성 시험결과
Figure 6. Test result of spring stiffness of resilience pad

700만회까지의 피로시험결과 및 반복횟수에 따른 침목방진패드의 스프링강성 변화는 그림 7에 나타내었다.

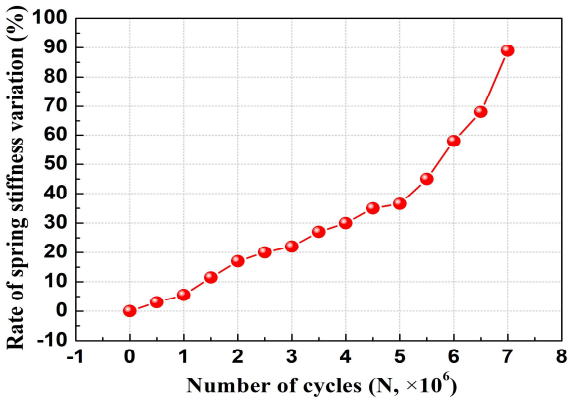


그림 7. 반복횟수에 따른 침목방진패드 스프링강성 변화율
Figure 7. Resilience pad spring stiffness variations by repetition

피로시험결과, 침목플로팅궤도의 침목방진패드는 반복횟수 증가에 따른 스프링강성 변화율의 증가가 비교적 가파른 추세를 나타내며, 정적 스프링강성 변화율이 약 30% 이상이 되면 비선형 특성이 발현되어 스프링강성 변화율 그래프의 기울기가 약 2배 가까이 더 급격하게 증가하는 것으로 분석되었다.

IV. 분석 및 고찰

본 연구에서 수행한 현장측정결과를 바탕으로 침목플로팅궤도의 궤도충격계수와 궤도지지강성의 상관관계를 분석하여 그림 8에 나타내었다.

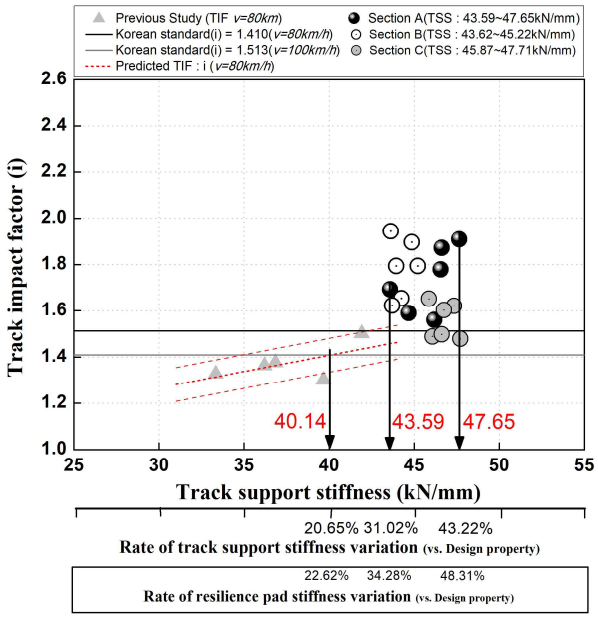


그림 8. 궤도지지강성과 궤도충격계수의 상관관계
Figure 8. Relationship between track support stiffness and track impact factor

궤도충격계수와 궤도지지강성의 상관관계 분석결과, 그림 8과 같이 궤도지지강성이 증가할수록 침목방진패드 변화율도 증가하는 것으로 나타났으며, 침목방진패드의 스프링강성이 증가될수록 궤도의 충격계수도 증가되어 침목방진패드 스프링강성 변화율이 약 23%가 되면 설계 충격계수 1.410 (V=80km/h)를 초과하는 것으로 분석되었다.

또한 침목방진패드의 스프링강성 변화율이 약 23% 이내에서는 침목방진패드 스프링강성 변화에 따른 궤도충격계수의 증가경향이 완만한 선형비례관계로 나타났으며 설계 궤도충격계수 역시 만족하는 것으로 분석되었다.

그러나 침목방진패드의 스프링강성 변화율이 약 23% 이상이 되는 시점부터 설계 궤도충격계수를 초과하며 약 30% 이상부터는 궤도충격계수의 비선형 특성이 발현되는 변곡점이 발생되는 것으로 분석되었다.

스프링강성 변화율 30% 이상에서 궤도충격효과가 증폭되는 현상은 그림 7의 피로시험결과와 같이 침목방진패드의 스프링강성 변화곡선의 비선형 특성에서 기인된 현상으로 분석되었다.

따라서 침목방진패드의 스프링강성 변화(열화)가 비선형 특성을 나타내므로 궤도에 작용하는 동적하중(윤중의 증폭에 따른 궤도충격효과 증폭) 역시 스프링강성의 변화 곡선에 따라 비선형적으로 증가하게 된 것으로 분석되었다.

그림 8에서 궤도충격계수가 침목방진패드 스프링강성 변화에 따라 일정하게 선형 비례하여 증가하다가 침목방진패드 스프링강성 변화율이 약 30% 이상부터 궤도충격계수의 변곡점이 생기는 구간이 나타났다.

궤도에 작용하는 동적인 하중의 크기는 운동방정식 (F=k·d)에 따라 스프링강성의 증가에 따라 증가하게 되며 스프링강성이 비선형 특성을 나타내면 동적하중 역시 비선형 특성을 나타낼 수 있다.

즉, 침목방진패드의 스프링강성변화율이 30% 이상이 되면 궤도에 작용하는 동적인 하중증폭 수준이 비선형적으로 발생되며 그로 인해 궤도의 충격 수준도 크게 증가하게 된다. 따라서 침목방진패드의 교체 시기는 스프링강성 변화율이 비선형 특성을 발현하기 이전인 약 30% 이상이 되기 전에 교체를 하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

Ⅵ. 결 론

본 연구는 침목플로팅궤도 (STEDEF)의 현장측정결과를 바탕으로 침목방진패드의 스프링강성 변화율에 따른 궤도충격계수 변화수준의 경향성을 분석하였으며, 700만회 피로시험결과와의 비교, 분석을 통해 궤도지지강성과 궤도충격계수의 상관관계를 입증하고 침목방진패드의 비선형 거동특성을 실험적으로 입증하였다.

1) 연구결과, 침목방진패드는 특정 반복횟수 이후에서 급격한 물성변화를 일으키는 비선형 거동특성을 나타내고 이에 따른 궤도부담력 (궤도충격)의 급격한 증가가 발생될 수 있음을 피로시험 및 현장측정결과를 바탕으로 입증하였다.

2) 침목방진패드의 스프링강성변화율이 30% 이상이 되면 궤도에 작용하는 동적 하중의 증폭 수준 (궤도충격계수)이 비선형적으로 증가하게 된다. 따라서 침목방진패드의 교체 시기는 스프링강성 변화율이 비선형 특성을 발현하기 이전인 약 30% 이전에 교체를 하는 것이 적정한 것으로 판단된다.

3) 따라서 급격한 궤도부담력의 증가를 사전에 방지하고 설계 시 고려한 궤도충격수준을 초과하지 않는 수준으로 궤도의 성능을 유지하기 위해서는 침목방진패드의 스프링강성 변화율 한계치 (30% 이하)를 유지관리지침에 보완하는 것이 적정할 것으로 판단되었다.

References

[1] 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.

[2] 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.

[3] E.S. Lim, "A Study of correlation between spring constant of anti-vibration sleeper pad and thickness variation on floating track," *Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology,* 2017.

[4] S.Y. Lee, I.C. Jeong, J.Y. Choi and Y.G. Park. "Experimental Study on the Evaluation of Behavior for Floating Track System Using a Resilient Rubber Mat", *Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 17, No. 4, pp. 281-288,* 2014.

[5] D.W. Joe "The Estimation of Fatigue Life for CWR on Concrete Track with Resilience pad in Urban Railway", *Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology,* 2016.

[6] Kim, mh., "A study on the dynamic behavior of sleeper floating track according to various track support stiffness on serviced urban transit," *Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology,* 2015.

[7] H.S. Y and Y.T. Kim, "Parametric study on Structural Integrity Evaluation for Concrete Track of Urban Transit," *Journal of the Korean Society for City Railway, Vol. 5, No. 3, pp. 905-917,* 2017.

[8] S.Y. Lee, I.C. Jeong, J.Y. Choi and Y.G. Park. "Experimental Study on the Evaluation of Behavior for Floating Track System Using a Resilient Rubber Mat", *Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 17, No. 4, pp. 281-288,* 2014.

[9] J.Y. Choi, Y.G. Park and S.M. Lee, "The Evaluation of Track Impact Factor on the Various Track Type in Urban Transit," *Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 14, No. 3, pp. 248-255,* 2011.

[10] G.T. Noh, H.J. Lim, J.Y. Lee and Y.G. Park. " Evaluation of Track Support Stiffness and Track Impact factor for Ballast and Concrete Type Tracks", *Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 21, No. 4, pp. 389-395,* 2018.