

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2021.7.2.405>

JCCT 2021-5-48

레일체결장치용 방진패드의 피로거동에 관한 해석적 연구

Analytical Study on Fatigue Behavior of Resilient Pad for Rail Fastening System

최정열*

Jung-Youl Choi*

요약 본 연구에서는 레일체결장치용 방진패드의 사용수명 및 스프링강성을 평가하고자 비선형 재료모델 및 피로하중조건을 적용한 유한요소해석을 수행하였다. 피로해석 결과, 초기조건 대비 스프링강성의 변화율은 약 16%로 나타나 피로경화가 발생된 것으로 분석되었다. 방진패드의 길이방향으로 발생하는 응력은 중앙부와 외곽부(Edge)의 발생 응력의 차이가 약 10배 이상 발생되었다. 또한 중앙부 보다 외곽 경계부의 등가응력이 2배 이상 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 실제 사용조건에서 방진패드의 손상 및 변형 취약부는 방진패드의 모서리부분인 것으로 분석되었다. 피로해석을 통해 산출된 반복횟수에 따른 방진패드의 등가응력을 이용하여 방진패드의 피로수명선도를 도출하였다. 본 연구에서 도출한 방진패드의 피로수명선도를 이용하여 향후 다양한 하중조건에서 방진패드의 등가응력을 산출하여 해당조건에서의 피로수명을 예측하는 데에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 스프링강성, 등가응력, 방진패드, 피로, 피로수명선도, 유한요소해석

Abstract In this study, a finite element analysis was performed applying a nonlinear material model and fatigue load conditions to evaluate the service life and spring stiffness of the resilient pad for rail fastening system. As a result of the fatigue analysis, the rate of change in spring stiffness compared to the initial condition was about 16%, indicating that fatigue hardening occurred. As for the stress generated in the longitudinal direction of the resilient pad, the difference between the stress generated at the center and the edge was about 10 times or more. In addition, it was analyzed that the equivalent stress of the outer boundary was more than twice as large as that of the central part. Therefore, it was analyzed that the damage and deformation of the resilient pad are the corners of the resilient pad under actual service conditions. The fatigue life diagram of the resilient pad (S-N curve) was derived using the equivalent stress of the resilient pad according to the fatigue cycles. Using the fatigue life diagram of the resilient pad derived in this study, it is considered that it can be used to predict the fatigue life under the relevant conditions by calculating the equivalent stress of the resilient pad under various load conditions.

Key words : Spring stiffness, Equivalent stress, Resilient pad, fatigue, S-N curve, Finite element analysis

*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수

접수일: 2021년 4월 12일, 수정완료일: 2021년 4월 23일
게재확정일: 2021년 5월 3일

Received: April 12, 2021 / Revised: April 23, 2021

Accepted: May 3, 2021

*Corresponding Author: jychoi@dyu.ac.kr

Dept. of construction engineering, Dongyang University, Korea

I. 서론

기존 고무재료의 피로수명관련 연구들은 철도차량에 사용되는 Bearing spring(rubber)에 대한 피로시험 결과와 그것에 대한 수치해석결과를 비교하여 고무의 유효응력과 발생응력의 상관관계를 해석적으로 입증하는 연구가 다수 수행된 바 있다[1-4]. 그러나 철도 레일체결장치에 사용되는 방진패드에 대한 사용수명에 대한 해석적 연구는 부족하며 대부분 실험적 기법을 사용하고 있는 실정이다[5-7]. 레일체결장치에 사용되는 방진패드의 사용수명은 일반적인 피로역학적 개념에서의 피로균열에 의한 것이 아닌 피로경화에 따른 스프링강성 증가(스프링강성 변화율)수준으로 사용수명이 결정된다[7-8]. 종래에는 현장에서 방진패드 시료를 채취하여 스프링강성시험을 통해 현재 상태의 스프링강성 수준을 평가하는 것이 일반적이었다[7-9]. 따라서 실내시험을 통해 방진패드의 피로열화수준을 평가하는 프로세스가 일반적이어서 실험적 기법에 대한 의존도가 높은 실정이다[7-9]. 그러나 실험적 방법은 현장에서 사용 중인 다수의 방진패드의 피로수명을 평가하기에는 현실적으로 매우 어려운 실정이다. 피로시험을 대체할 수 있는 방진패드의 효율적인 수명평가 기법과 관련한 선행연구결과 복합가속열화시험을 통해 현장의 사용조건을 반영한 시험조건을 적용하여 노후 방진패드의 수명을 평가하고 잔존수명을 예측하는 연구가 수행된 바 있다[7]. 연구결과 탄성패드의 스프링강성은 피로뿐만 아니라 온도에 대해서도 영향을 받는 것으로 나타났다[7]. 선행연구결과, 방진패드의 비선형 재료 특성치를 수치해석을 통해 산출하였고 실내시험(피로시험)을 바탕으로 방진패드에 물성변화를 분석한 결과 300만회 이후에 급격한 물성변화가 발생하는 것으로 나타났다[5, 7].

본 연구에서는 방진패드에 대한 일반적인 일축 압축 피로시험결과를 반영할 수 있는 방진패드의 등가응력을 해석적으로 제시하고 이를 바탕으로 피로효과가 반영된 방진패드의 스프링강성 변화 및 사용수명을 평가할 수 있는 해석적 방법을 제시하였다. 또한 본 연구에서는 일반적인 재료의 피로해석 및 수명예측 시 사용되는 피로수명선도(S-N curve)를 이용한 피로수명예측기법을 방진패드에 적용할 수 있도록 방진패드의 피로효과가 반영된 발생응력을 해석적으로 예측하고, 이를 바탕으로 방진패드의 S-N curve를 도출하였다.

II. 이론적 배경

콘크리트궤도의 궤도재료 중 방진기능을 갖는 탄성재료는 시간의 경과에 따라 열화 및 노후, 구조적, 환경적 영향으로 성능 및 상태(탄성수준)가 저하될 수 있다[5-8]. 현재 노후화에 따른 탄성재료의 성능평가는 현장 측정과 탄성패드를 채취해서 외부의 실험실에서 수직 스프링강성 시험을 하는 현장시료채취를 통한 실내시험방법이 있다[5-8]. 방진패드에 발생하는 응력 및 응력집중부의 위치는 방진패드의 피로 거동을 추정하는 데 매우 중요한 요인이다. 또한 방진패드의 기하학적 특성은 방진패드에 발생하는 응력분포 및 응력집중부의 영역에 영향을 줄 수 있다. 또한 하중을 부담하는 단면에서의 두께 대비 발생 변위량이 상대적으로 큰 방진패드의 특성상 패드의 깊이 방향의 내부 응력 및 변형은 패드의 피로손상을 결정하기 위한 유효응력에 영향을 미칠 수 있다[4]. 일반적인 재료의 피로수명 예측방법은 부재의 발생 응력범위(stress range)를 실험이나 해석적 기법을 이용하여 파악하고, 재료의 피로수명선도를 이용하여 발생응력범위에 해당하는 피로수명을 평가하는 것이 일반적이다. 이러한 방법은 특히 공용상태에서의 사용수명(잔류수명)을 평가하는 데에 효과적이다. 일반적인 방진패드의 피로수명은 직사각형을 갖는 하중지 지면에 대하여 4-points 변위측정을 기반으로 한 스프링강성 변화에만 국한된 것이 아니라 패드가 사용되고 있는 환경 및 패드의 기하학적 형상 등에 영향을 받는 패드의 유효응력에 직접적인 영향을 받는다.

III. 방진패드 피로거동 분석

방진패드에 대한 피로손상(피로경화)을 유발하는 방진패드의 응력특성을 분석하고자 방진패드의 비선형 재료특성 및 500만회 반복하중 재하조건을 모사한 하중조건을 적용하여 수치해석모형을 구성하였다. 방진패드의 경우 피로경화로 인한 스프링강성의 증가가 발생하는 시점을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 피로경화시점에서의 방진패드의 스프링강성이 현행 국내 방진패드 피로성능 기준치(스프링강성 변화율 20% 고려)를 만족하는지 여부를 판단하여 방진패드의 피로수명을 평가하였다[5]. 본 연구에서 수행한 수치해석은 범용구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하였으

며 수치모델은 실제 방진패드의 형상과 비선형 재료모델을 적용하여 3차원 Solid요소로 구성하였다[10]. 하중 조건은 도시철도 차량의 정적 운중 80kN을 피크값으로 하는 사인파형을 피로하중조건으로 적용하였다. 방진패드의 수치해석 모델과 재료적 특성치는 각각 그림 1~그림 2 및 표 1과 같다[10, 11].

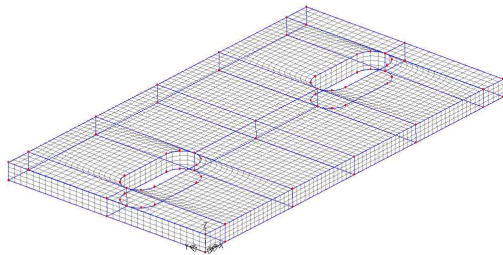
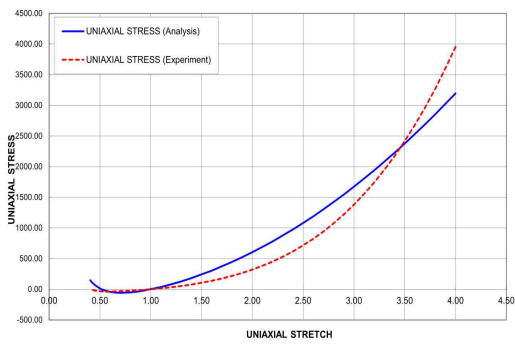


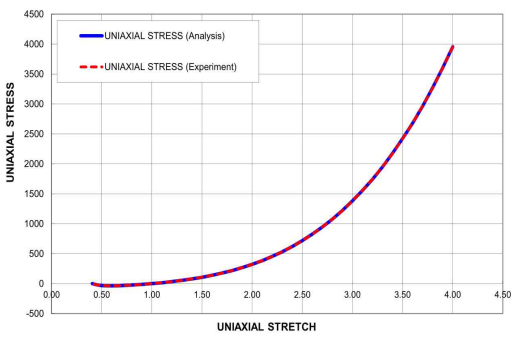
그림 1. 방진패드의 유한요소 모델
 Figure 1. FE model for PUR pad

표 1. 방진패드 해석모델의 재료적 특성치
 Table 1. Material properties of PUR pad in FE model

Properties	Value
Density(kN/m ³)	6.87
Elastic modulus(MPa)	0.9778
Poisson's ratio(ν)	0.49



(a) Mooney-Rivlin model

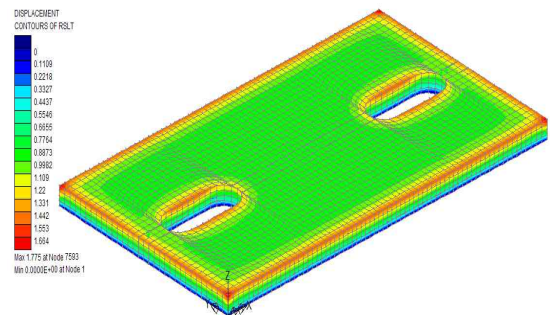


(b) Ogden model

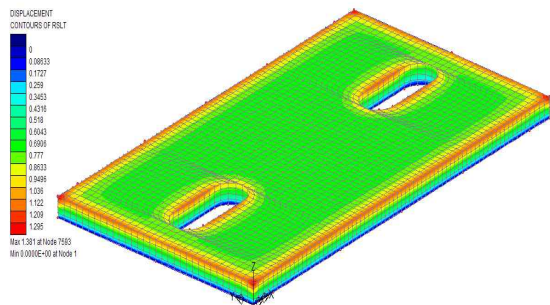
그림 2. 방진패드의 비선형 재료 모델(Uniaxial test)
 Figure 2. Non-linear material model for PUR pad(Uniaxial test)

방진패드의 피로조건을 반영한 스프링강성의 변화를 분석하고자 수행한 피로하중 적용에 따른 방진패드의 변위 해석결과는 그림 3과 같다.

초기조건에서의 스프링강성은 16.70kN/mm로 산출되었으며 이때 발생변위는 1.0mm로 나타났다. 반복횟수 500만회 고려 시 스프링강성의 변화는 약 19.88kN/mm로 산출되었으며 발생 변위량은 약 0.84mm로 나타났다. 방진패드의 비선형 특성 및 500만회 피로하중을 고려한 해석결과 스프링강성의 변화율은 약 16%로 나타났으며 발생 변위량의 감소가 나타나 방진패드는 피로효과로 인한 스프링강성의 증가와 피로경화가 발생된 것으로 분석되었다.



(a) Displacement of 1.00mm at initial condition
 ($k_{sta}=16.70\text{kN/mm}$)

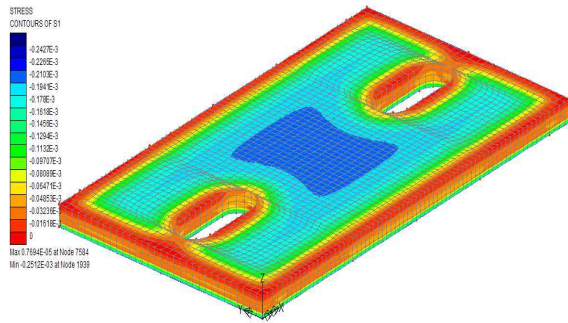


(b) Displacement of 0.84mm at 5.0E6 cycles ($k_{fat}=19.88\text{kN/mm}$)

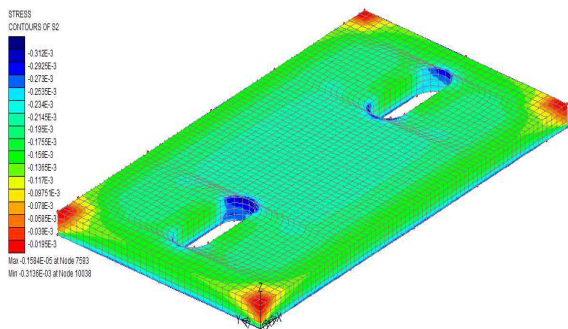
그림 3. 피로하중 적용에 따른 방진패드의 변위 해석결과
 Figure 3. Analytical results of displacement of PUR pad by fatigue loading

반복횟수 500만회 피로하중 적용에 따른 방진패드의 응력해석결과는 그림 4와 같다. 방진패드와 같이 두께 대비 폭과 길이가 넓은 고무재료가 압축하중을 부담하는 경우 발생하는 축방향 응력성분을 파악하고 등가응력을 산출하여 실제 사용조건에서의 취약부를 도출하고 피로효과 적용시 최대 주응력 및 등가응력의 증가수

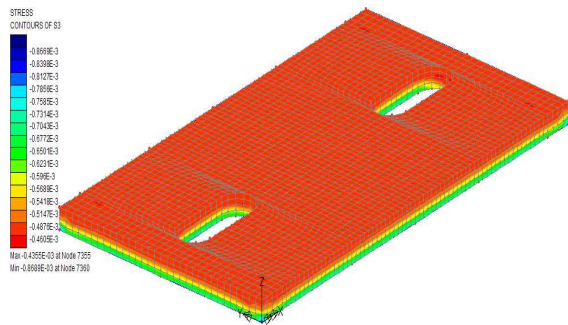
준을 분석하였다.



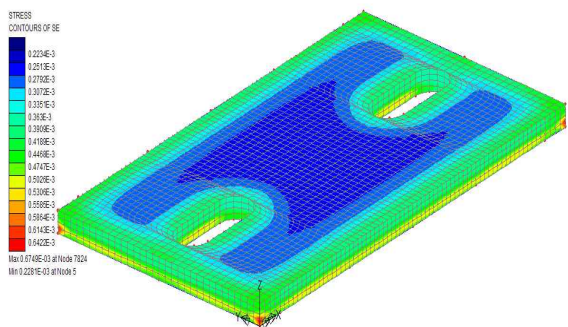
(a) Principal stress of global 1 axis



(b) Principal stress of global 2 axis



(c) Principal stress of global 3 axis



(d) Equivalent stress at 5.00E6 cycles

그림 4. 피로하중 적용에 따른 방진패드의 응력 해석결과
Figure 4. Analytical results of principal and equivalent stresses of PUR pad by fatigue loading ($K_{fat}=19.88\text{kN/mm}$)

축방향 주응력 해석결과, 그림 4(a)와 같이 방진패드의 길이방향으로 발생하는 응력의 특성은 부재의 중앙부와 외곽부(Edge)의 발생응력의 차이가 약 10배 이상 발생하는 것으로 나타났다. 또한 그림 4(b)와 같이 방진패드의 모서리에서의 변형이 주요한 변형특성으로 분석되었다.

하중작용방향의 주응력 발생특성은 그림 4(c)와 같이 방진패드의 전체면적에서 균일하게 일정한 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 방진패드의 두께방향으로 하중재하면과 바닥면 간의 응력차이는 약 2배 이상으로 나타났으며 방진패드의 두께에 걸쳐 일정한 응력변화를 나타내었다. 반복횟수 500만회 적용시 방진패드의 등가응력 해석결과, 그림 4(d)와 같이 축방향 주응력의 영향으로 중앙부와 경계부의 응력차이가 크게 나타났다.

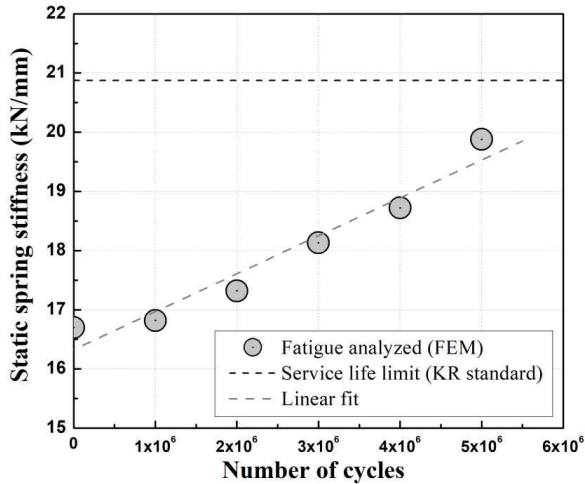
또한 방진패드의 중앙부 보다 외곽 경계부의 등가응력이 2배 이상 크게 발생하는 것으로 분석되어 실제 사용조건에서 방진패드의 손상 및 변형 취약부는 방진패드의 모서리부분인 것으로 분석되었다. 따라서 4개 모서리에서의 발생변위를 기반으로 산출되는 실험적인 방진패드의 스프링강성은 방진패드의 외곽 경계부 변형으로 인해 전체적인 스프링강성이 영향을 받을 수 있으며 방진패드의 스프링강성 변화에 직접적인 영향을 미치는 부위는 방진패드의 외곽 경계부임을 해석적으로 도출하였다. 또한 하중작용 면으로부터 약 9mm 깊이에서 방진패드의 등가응력이 크게 발생하여 전체 두께가 12mm인 방진패드의 피로효과의 영향범위 및 변형취약부를 파악하였다.

본 연구에서 수행한 방진패드의 비선형 재료모델 및 반복횟수 500만회를 고려한 피로해석 결과는 그림 5와 같다. 그림 5(a)와 같이 반복횟수 증가에 따른 방진패드의 정적 스프링강성은 선형비례관계를 갖는 것으로 나타났으며 반복횟수 500만회에서 스프링강성 변화율 20%를 초과하지 않는 것으로 분석되었다. 피로해석결과를 바탕으로 산출된 회귀식을 이용한 방진패드의 스프링강성 변화율 20%에 도달하는 반복횟수는 약 600만회로 예측되었다.

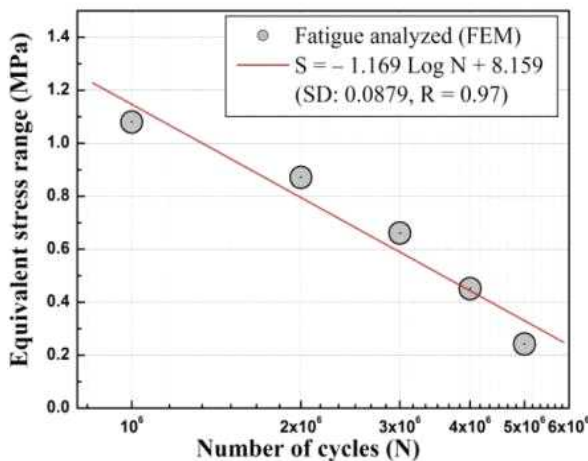
피로해석을 통해 산출된 반복횟수에 따른 방진패드의 등가응력을 이용하여 그림 5(b)와 같이 방진패드의 피로수명선도를 도출하였다.

본 연구에서 도출한 방진패드의 피로수명선도를 이

용하여 향후 다양한 하중조건에서 방진패드의 증가응력을 산출하여 해당조건에서의 피로수명을 예측하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다.



(a) Analyzed spring stiffness of PUR Pad



(b) Derived S-N curve for PUR pad based on analyzed equivalent stress

그림 5. 방진패드의 피로해석 결과

Figure 5. Fatigue analysis results of PUR pad

V. 결론

본 연구에서는 철도 레일체결장치용 방진패드의 사용수명 및 스프링강성을 평가하고자 비선형 재료모델 및 피로하중조건을 적용한 수치해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 방진패드의 비선형 재료모델 및 반복횟수 500만회를 적용한 피로해석 결과, 초기조건 대비 스프링강성의 변화율은 약 16%로 나타났으며 발생변위량의 감소

가 나타나 방진패드는 피로효과로 인한 스프링강성의 증가와 피로경화가 발생된 것으로 분석되었다.

2) 주응력 해석결과, 방진패드의 길이방향으로 발생하는 응력의 특성은 부재의 중앙부와 외곽부(Edge)의 발생응력의 차이가 약 10배 이상 발생되었다. 또한 증가응력 해석결과, 축방향 주응력의 영향으로 중앙부 보다 외곽 경계부의 증가응력이 2배 이상 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 실제 사용조건에서 방진패드의 손상 및 변형 취약부는 방진패드의 모서리부분인 것으로 분석되었다.

실험적인 방진패드의 스프링강성은 4개 모서리에서의 발생변위를 기반으로 산출되므로 방진패드의 스프링강성에 직접적인 영향을 미치는 부위는 방진패드의 외곽 경계부임을 해석적으로 도출하였다.

3) 피로해석을 통해 산출된 반복횟수에 따른 방진패드의 증가응력을 이용하여 방진패드의 피로수명선도를 도출하였다. 본 연구에서 도출한 방진패드의 피로수명선도를 이용하여 향후 다양한 하중조건에서 방진패드의 증가응력을 산출하여 해당조건에서의 피로수명을 예측하는 데에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

References

- [1] B. Lichtberger, Track compendium, Eurail press, 2011
- [2] C. Esveld, Modern Railway Track, 2nd edition, MRT-Productions, Zaltbommel, The Netherlands, 2001
- [3] R.K. Luo, W.X. Wu, P.W. Cook, W.J. Mortel, "An approach to evaluate the service life of rubber springs used in rail vehicle suspensions", The Journal of the Rail and Rapid Transit, Vol. 218, No. 2, pp. 173-177, 2004
<https://doi.org/10.1243/0954409041319597>
- [4] W.V. Mars, A. Fatemi, "A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber", The Journal of the International Journal of Fatigue, Vol. 24, No. 9 pp. 949-961, 2002
[https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(02\)00008-7](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(02)00008-7)
- [5] 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
- [6] 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
- [7] K.H. Park, D.Y. Sung, S.Y. Kong, H.S. Kim, Y.G. Park, “A Study on the Analysis Method for the Variation of Stiffness of Polyurethane Resilient Pad in the Fastening System”, The Journal of the Autumn Conference of the Korean Society for Railway, pp. 1884-1893, 2010
- [8] 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>
- [9] 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>
- [10] LUSAS, LUSAS finite element analysis system user manual, version 13.8, FEA Ltd., Kingston upon Thames, Surrey, UK, 2005
- [11] S. Kaewunruen, A.M. Remennikov, “State dependent properties of rail pads”, The Journal of the Transport Engineering in Australia, Vol. 12, No. 1, pp. 17-24, 2009

※ 본 연구는 2019년도 동양대학교 학술연구비의
지원으로 수행되었음.