

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2021.7.4.801>

JCCT 2021-11-98

레일연마에 따른 레일 파상마모 저감 효과 분석을 위한 실험적 연구

Experimental Study to analyze Effect of Rail Corrugation Reduction according to Rail Grinding

최정열*, 정천만**, 정지승***

Jung-Youl Choi*, Cheon-Man Jeong**, Jee-Seung Chung***

요약 레일 파상마모는 레일표면 요철 관리기준의 부재로 인해 지속적으로 증가하는 추세에 있다. 레일파상마모는 승차감 저하와 궤도 유지관리 물량증대 등과 같은 다양한 문제점을 야기 시키고 있다. 본 논문에서는 레일 파상마모 발생구간을 대상으로 레일 연마 전, 후에 대한 레일요철 측정 및 궤도계측(동적 윤중, 변위, 가속도)을 수행하여 레일 파상마모가 궤도부담력에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 레일 파상마모 저감을 위해 실시한 레일연마는 레일 파상마모로 인해 발생하는 추가적인 궤도부담력 저감에 매우 효과적이었음을 실험적으로 입증하였다.

주요어 : 레일 파상마모, 궤도계측, 궤도부담력, 레일연마, 레일표면 요철

Abstract Rail corrugation is continuously increasing due to the lack of maintenance regulations for the amount of rail irregularities. Rail corrugation is causing various problems, such as a decrease in ride comfort and an increase in the amount of track maintenance. In this paper, the effect of rail corrugation on the track force was analyzed by measuring the rail irregularities before and after rail grinding and the track measurements (dynamic wheel load, displacement, and acceleration) for the section where the rail corrugation occurred. In addition, it was experimentally proven that the rail grinding performed to reduce the corrugation of the rail was very effective in reducing the additional forces on the track.

Key words : Rail corrugation, Track measurement, Track force, Rail grinding, Rail surface roughness

1. 서론

서울도시철도 운행선로에서 레일두부 표면에 발생하는 레일 파상마모는 레일 요철량 관리기준 부재 등으로 인해 증가하는 추세에 있으며, 열차의 소음 및 진동가중으로 승차감 저하와 궤도시설물의 유지관리 물량증대 등 문제점이 발생되고 있다[1-6]. 최근까지 레일 파상

마모와 관련된 다양한 연구가 수행된 바 있으며 관련연구는 대부분 레일 파상마모의 발생원인 및 저감 방안에 대한 이론적 고찰이었다[1-7]. 또한 선행연구에서는 도시철도 침목플로팅궤도에서 궤도지지강성에 직접적인 영향을 미치는 침목방진패드의 열화가 레일 파상마모에 영향을 미칠 수 있음을 실험 및 해석적으로 분석한 바 있다[1]. 그러나 레일 파상마모를 관리하기 위한 가장

*정희원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)

**정희원, 서울교통공사 궤도 2사업소 관리소장 (교신저자)

***정희원, 동양대학교 건설공학과 교수 (공동저자)

접수일: 2021년 10월 19일, 수정완료일: 2021년 10월 27일

게재확정일: 2021년 11월 2일

Received: October 19, 2021 / Revised: October 27, 2021

Accepted: November 2, 2021

*Corresponding Author: jcm1943@hanmail.net

Dept. of Track Engineering office 2, Seoul Metro, Korea

직접적인 조치에 해당하는 레일연마와의 상관관계에 대한 연구가 부족한 실정이다[2-7]. 또한 실제 궤도유지 관리과정에서 반복적으로 수행하고 있는 레일연마가 레일 파상마모가 발생한 궤도의 부담력 및 동적응답에 미치는 영향에 대한 실험적 연구가 전무하다.

구름접촉피로(Rolling contact fatigue, RCF)에 의한 레일표면에 발생하는 대표적인 손상유형(Headcheck, spalling, shelling, etc)은 대부분 주기적인 레일연마 또는 밀링 등으로 제거가 가능하여 사전에 RCF 손상을 사전에 예방할 수 있다. 그러나 레일표면에서 주기적인 파상 형태로 발생하는 유형인 파상마모(Corrugation)은 연마나 밀링으로 제거가 가능할 수 있으나 마모의 깊이가 깊을 경우 제거가 어려우며 이내 재발되어 일정주기로 형성된 표면 요철로 인해 승차감 저하, 소음, 진동 및 충격 등을 증폭시켜 궤도구성품의 손상 및 열화를 가중시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 레일 파상마모 발생현황과 관리수준을 검토하고 레일 파상마모 발생구간을 대상으로 레일연마 전, 후에 대한 레일요철 측정 및 궤도계측(동적 윤중, 변위, 가속도)을 수행하여 레일연마에 따른 레일 파상마모 저감 효과를 실험적으로 분석하였다.

II. 본 론

1. 레일 파상마모 발생 메커니즘

레일 파상마모의 발생원인은 현재까지 알려진 바에 의하면 파상마모의 발생 원인은 물리적인 접촉에 의한 마모가 아닌 차량-궤도시스템간의 동적인 공진현상인 것으로 나타났다[1,3,5-7]. 레일표면에 불규칙한 주기패턴을 갖고 요철이 고정된 형태를 파상마모라 부르며 이는 차량-궤도의 강성 및 질량과 궤도의 자유도 특성이 복합적으로 작용하여 열차의 주행속도 및 기타 가진요인에 의해 유발되어 발생하는 동적 레일마모의 대표적 현상을 의미한다[1].

대표적으로 차량-궤도시스템에서 공진유발 주파수 대역에 따라 크게 3가지로 구분될 수 있다[1,5-7]. P2 공진의 경우 P2 하중이 레일용접부 또는 표면요철 등의 가진요인에 의해 증폭되어 저주파대역인 약 50~100Hz 대역의 공진을 유발시키는 것을 의미한다[1,5]. 차량의 스프링하 질량에 해당하는 차축의 2차 비틀림 공진현상에 의해 발생하는 약 250~500Hz 대역의 공진

현상도 파상마모 주요 발생 메커니즘이다[1,5].

또한 레일지지점을 기준으로 발생하는 Pin-Pin공진이 고주파 대역의 공진유발 주파수이며, 일정간격으로 이산지지되어 있는 철도 레일의 수직방향 휨 1, 2차 모드에 해당하는 주파수와 일치하여 파상마모가 발생된다[1,5-6].

이와 같이 레일 파상마모는 차량-궤도시스템간의 공진현상으로 인해 레일표면에 주기 및 깊이를 갖는 마모를 유발하여 궤도충격력을 증가시킬 수 있는 마모현상이다. 따라서 본 연구에서는 파상마모가 궤도충격력에 미치는 영향과 레일 연마에 따른 궤도충격력 저감효과를 분석하고자 한다.

2. 레일 파상마모 발생 현황

본 연구에서는 도시철도 운영기관 침목플로팅궤도(STEDEF)를 대상으로 하였고 시간적 범위는 2015년부터 2018년까지 발생한 현황을 토대로 조사하였다.

레일 파상마모 조사는 궤도시설물 유지관리를 담당하고 있는 직원에 의한 육안점검으로 연 2회 레일표면의 상태를 조사하여 도시철도운영기관 시설물유지관리 시스템(Utims) 전산망에 등록된 결과를 토대로 하였다[1-6].

파상마모 발생연장은 연도별 신규로 발생한 연장을 의미하지 않으며 레일표면 상태 조사 시 레일파상마모가 있는 경우에 산술적으로 합산하여 산출한 결과이다.

도시철도 레일 파상마모 발생현황 분석결과 표 1과 같이 연도별로 지속적으로 증가하는 추세에 있다.

표 1. 도시철도 레일파상마모 발생현황
Table 1. Status of rail corrugation in urban transit

	2015		2016		2017	2018	
	1 st half	2 nd half	1 st half	2 nd half	total	1 st half	2 nd half
Track length (km)	348.0km						
Length of rail corrugation (km)	22.1	23.7	23.5	23.8	28.5	32.2	38.9
Ratio(%)	6.3%	6.8%	6.7%	6.8%	8.1%	9.2%	11%

서울도시철도 레일연마 기준은 사규 또는 규정으로 정하지 않고 별도의 방침으로 운용하고 있으며 표 2와 같다[1,7,8]. 이는 레일연마차 운용능력과 레일표면 상태,

선로환경과 현장여건 등을 고려하여 레일표면 관리의 효율성을 제고하기 위한 것으로 판단된다.

표 2. 도시철도 레일연마 기준
 Table 2. Rail grinding regulation of urban transit

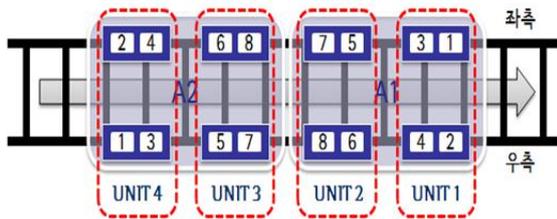
Priority	Before revision	Recent revision(2017.12.)
1	Basic grinding	Basic grinding
2	Repair grinding	Prevention grinding
3	Prevention grinding	Repair grinding

본 연구에서 수행한 레일연마에 사용 된 레일연마차는 그림 1(a)와 같이 2량 1편성으로 구성된 연마차량으로서, 그림 1(b)와 같이 1량에 2개의 유닛(Unit)이 설치되어 있어 총 8개의 연마석으로 구성되어 있다.

레일연마차 1편성에 총 4개 유닛, 16석으로된 차량의 전경은 그림 1과 같다. 따라서 레일당 1Pass 주행 시 총 8개의 연마석에 의해 레일은 연마되는 구조이다. 본 연마차는 연마석별 15°(-)70°까지 연마각도를 조정하여 레일형상(Profile) 복원이 가능하다.



(a) Rail grinding car



(b) Grinding unit arrangement

그림 1. 레일연마차 전경 및 연마석 구성도
 Figure 1. Photograph of rail grinding car and unit arrangement

3. 현장측정

1) 측정구간 선로의 제원

본 연구에서는 공용중인 서울도시철도 본선구간을

대상으로 하였으며 레일연마가 계획되어 있는 구간 중 육안조사 결과 레일 파상마모 발생이 뚜렷한 구간과 그렇지 않은 구간으로 구분하여 현장측정을 수행하였다 [1]. 측정개소는 측정 데이터의 상호 비교 및 신뢰성 확보를 위하여 2개소를 측정하였으며 선로구간 및 운행열차 제원은 표 3과 같다.

표 3. 현장 측정구간 선로의 제원
 Table 3. Properties of field test site

	Properties
Layout	Straight
Test sections	Section A, B
Established	2004.4.30.
Track type	STEDEF
Sleeper spacing(mm)	625
Rail type(kg/m)	60
Operation condition	Near by station
Vehicle speed	68~70km/h
Annual tonnage	about 1,800MGT/year
Date of last grinding	2009.11.07.

2) 레일연마 전, 후 레일 요철량 측정

레일연마 전, 후에 따른 레일표면 요철량 변화를 분석하기 위해 휴대가 용이한 레일직진도 검사기(Railprof)를 이용하여 레일파상마모 구간에서의 레일 연마 전, 후에 대한 레일 요철량을 그림 2와 같이 측정하였다[1]. 레일요철 측정의 범위는 각 측정지점을 중심으로 좌우 1.5m씩 지점별 3.0m를 측정하였고, 측정 장비의 1회 측정 길이는 1.0m 측정가능하며 0.5m를 중복하여 측정하여 측정 지점별 5회 측정하였다.



(a) Rail corrugation



(b) Railprof

(c) Instrumentation device

그림 2. 레일표면 요철측정 전경
 Figure 2. Photographs of field test (rail surface roughness)

3) 레일연마효과 분석을 위한 궤도부담력 측정

측정위치는 레일 요철량 측정개소와 동일한 구간 및

위치에서 측정하였다. 운행열차(8량 1편성)를 대상으로 동일시간대 연속 10회를 측정하였으며 계측항목은 동적 윤중, 변위, 가속도 3개 항목을 측정하였으며 설치전경은 그림 3과 같다[1,9-11].

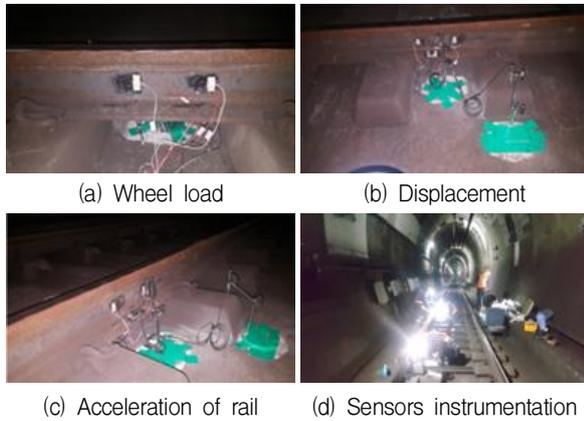


그림 3. 현장측정 전경 (궤도부담력 측정)
Figure 3. Photographs of field test (track force)

4. 현장측정 결과

1) 레일 요철량 측정 결과

레일 연마 전, 후 요철량은 그림 4와 같으며 레일 연마 전 요철은 크고 주기적인 사인(Sine) 형상을 나타내고 있으며 레일 연마 후 요철은 레일연마 시행에 따른 요철량이 현저하게 감소된 것으로 분석되었다.

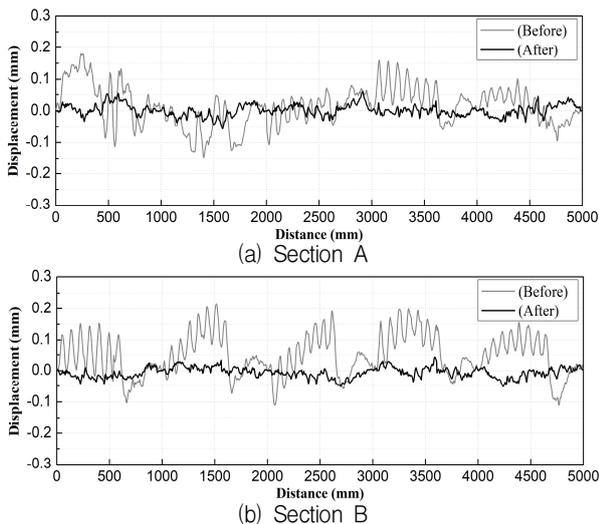


그림 4. 레일표면 요철측정 결과
Figure 4. Measurement result of rail surface roughness

2) 레일연마 전, 후 궤도부담력 측정 결과

레일 파상마모가 발생한 구간에서 운행중인 열차를 대상으로 레일연마 전, 후 궤도부담력 (동적 윤중, 레일 가속도, 침목 수직변위) 측정결과를 그림 5와 같다.

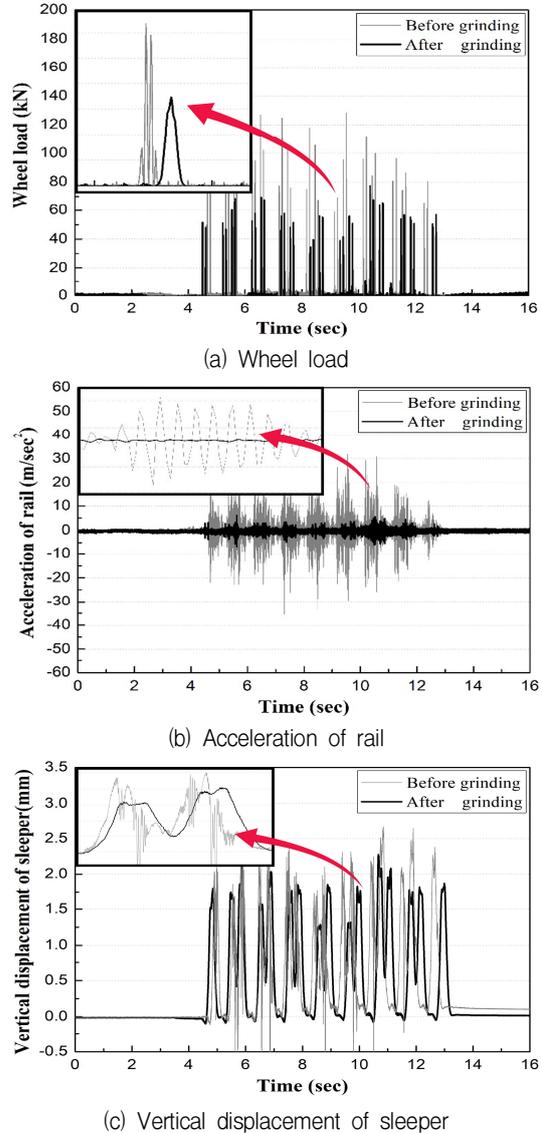


그림 5. 궤도부담력 측정결과 (track force)
Figure 5. Measurement results (track force)

레일연마 전, 후 궤도부담력 측정결과 레일 연마 전 동적 윤중, 레일 가속도 및 침목 변위는 레일표면에 발생된 요철의 영향으로 최대응답의 피크값이 크게 증가하는 것으로 나타났으며 레일연마 후 요철량이 감소하여 레일 연마 전에 비해 궤도응답의 피크값이 현저하게 감소하는 것으로 분석되었다. 침목 수직변위에서 (-)변위가 발생한 것은 레일은 일정한 간격의 침목으로 지지된 연속된 보로 침목지지점에서 큰 하중에 의한 부분력의

영향으로 판단되며 그림 5(c)와 같다.

3) 레일연마에 따른 궤도부담력 변화

레일 파상마모가 궤도에 미치는 영향력을 평가하기 위하여 레일 파상마모가 발생한 위치에 궤도계측을 수행하였으며 레일연마에 따른 궤도부담력 변화(동적 윤중, 레일가속도 및 침목 수직변위)는 그림 6과 같다.

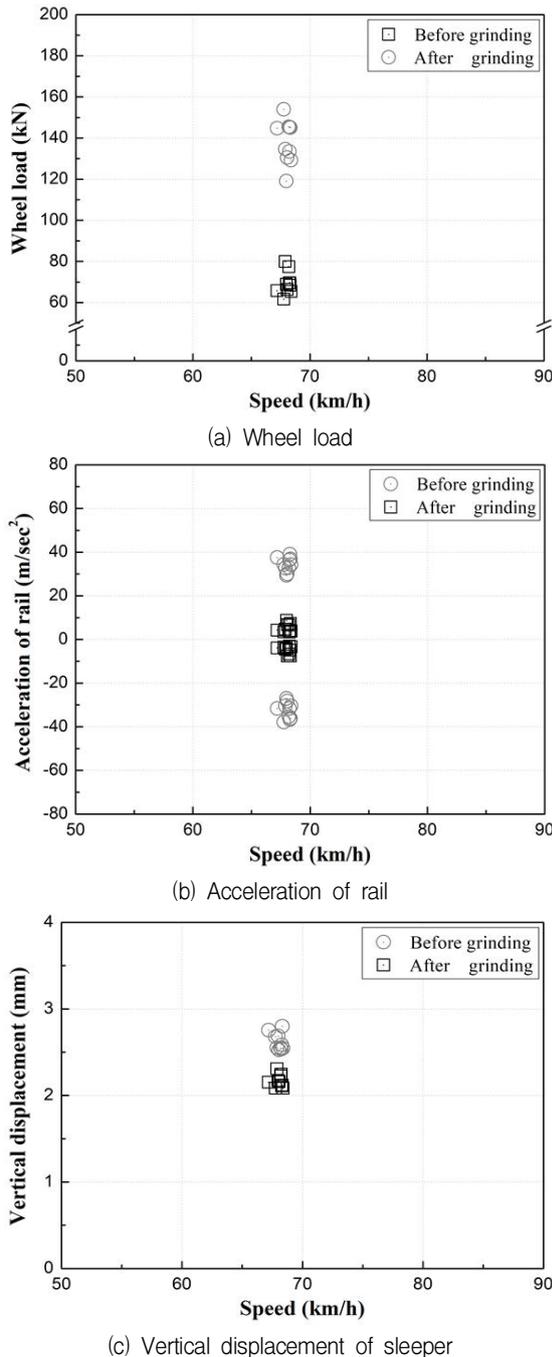


그림 6. 레일연마에 따른 궤도응답 영향분석
 Figure 6. Effect of track response by rail grinding

그림 6과 같이 동적 윤중은 약 49%가 저감, 침목 수직변위는 약 18%, 레일가속도는 약 76%가 저감되었으며 레일 연마 전에 비해 레일 연마 후 궤도부담력이 현저하게 감소되었을 뿐만 아니라 동적 윤중의 발생범위가 비교적 일정한 범위에 분포하는 것으로 나타나 레일 표면 요철 제거를 통한 동적 윤중의 변동수준이 감소된 것으로 분석되었다.

III. 결 론

본 논문에서는 레일연마 전, 후에 대한 현장 궤도계측을 수행하여 레일 파상마모가 궤도에 미치는 영향력을 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 레일 파상마모는 동적 윤중 등 궤도부담력에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 레일연마에 따른 궤도부담력 분석결과, 레일 연마 전 요철은 크고 주기적인 사인(Sine) 형상을 나타내고 있으며 레일 연마 후 요철은 레일 연마 시행에 따른 요철량이 현저하게 감소되어 완만한 직선형상의 그래프를 나타내고 있었다.

2) 레일 연마를 통한 레일 파상마모 저감 및 이에 따른 궤도부담력과 궤도의 동적응답 변화를 분석한 결과 동적 윤중은 약 49%가 저감, 침목 수직변위는 약 18%, 레일가속도는 약 76%가 저감 되었으며 레일 연마 전에 비해 레일 연마 후 궤도부담력이 현저하게 감소되어 레일 요철을 감소시키기 위한 레일연마는 매우 효과적임을 실험적으로 입증하였다.

3) 연구결과, 레일 파상마모에 따른 열차의 소음 및 진동가중으로 승차감 저하와 궤도시설물의 유지관리 물량증대 등 문제점이 발생할 수 있으므로 레일 파상마모를 제거하는 것이 필요하며 이를 위한 레일표면 요철 관리 기준 및 적정 레일연마 방안 등에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

References

[1] J.Y. Choi, H.S. Gong, J.H. Kim, H.S. Kim, J.S. Chung, "An Experimental Study on Causes Evaluation of Rail Corrugation for Concrete track(STEDEF) in Urban Transit", *Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 4, No. 4, pp. 413–418, 2018. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.4.413>

- [2] M.C. Kim, W.H. You, “Rail Corrugation Effects on the Dynamic Behavior of Clips of Rail Fastening System in Operation Environment of Urban Railway”, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 19, No. 4, pp. 489–497, 2016. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.4.489>
- [3] S.L. Grassie, “Rail Corrugation: Characteristics, Cause and Treatments”, *Proceeding IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 223, pp. 1–17, 2009. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1993_207_227_02
- [4] P.A. Meehan, W.J.T. Daniel, T. Campey, “Prediction of the Growth of Wear-Type Rail Corrugation”, *Wear (ELSEVIER)*, Vol. 258, pp. 1001–1013, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.049>
- [5] C. Colletta, P. Vanhonacker, R. Bastais, D. Levy, “Comparison between Time and Frequency Studies of a Corrugated Curve of RER Paris Network”, *Wear (ELSEVIER)*, Vol. 265, pp. 1249–1258, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.030>
- [6] I. Gómez, E.G. Vadillo, “A Linear Model to Explain Short Pitch Corrugation on Rails”, *Wear (ELSEVIER)*, Vol. 255, pp. 1127–1142, 2003.
- [7] S.C. Yang, S.Y. Jang, “Investigation of the Maintenance Criteria for the Rail Surface Defects in High-Speed Railways”, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 14, No. 6, pp. 535–544, 2011. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2011.14.6.535>
- [8] Y.T. Hwang, J.Y. Choi, T.G. Lee, “Study on Force-based Rail Surface Quality Maintenance Method”, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 23, No. 5, pp. 451–459, 2020. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2020.23.5.451>
- [9] Choi. J., Qualitative Analysis for Dynamic Behavior of Railway Ballasted track, *Ph.D. thesis. Technical University of Berlin*, GER, 2014.
- [10] K.Y. Ha, H.S. Kim. “A Study of Rail Wear by Change of Acceleration and Deceleration”, *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 10, No. 5, pp. 607–612, 2007. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00282-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00282-5)
- [11] 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. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.4.387>