

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.5.547

JCCT 2022-9-68

하중기반의 궤도틀림 분석기법 적용에 관한 연구

A Study on Application of Force-based Track Irregularity Analysis Method

황선권*, 최정열**

Seon-Kwon Hwang*, Jung-Youl Choi**

요약 본 연구에서는 궤도틀림이 차륜-레일 상호작용력에 미치는 영향을 분석하고 이를 바탕으로 궤도틀림을 관리할 수 있는 하중기반의 궤도틀림 분석기법을 제안하였다. 도시철도 침목플로팅궤도와 직결도상 접속구간에서 발생된 고저틀림 측정결과를 이용하여 고저틀림이 차륜-레일 상호작용력(동적윤중)과 레일의 진동가속도에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 직결궤도 중 4개소를 대상으로 부분적으로 직결궤도를 포함한 침목플로팅궤도 구간과 전, 후 인접 침목플로팅궤도 구간으로 구분하여 고저틀림을 비교, 분석하였다. 분석결과, 직결궤도를 포함한 구간이 침목플로팅궤도 보다 궤도틀림이 크게 나타났다. 고저틀림 데이터를 적용한 차륜-레일 상호작용력 분석결과, 거리에 비해 상대변위차가 큰 구간에서 차륜-레일 상호작용력과 레일가속도가 증가하는 것으로 분석되었다. 반면 고저틀림 데이터의 주기와 틀림량(변위)이 일정한 구간의 경우 차륜-레일 상호작용력과 레일가속도가 상대적으로 작게 나타났다. 따라서 고저틀림의 주기가 짧고 상대변위차가 클수록 차륜-레일 상호작용력 측면에서 불리한 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 궤도틀림 측정데이터를 이용한 차륜-레일 상호작용 해석을 통해 차륜-레일의 상호작용력을 바탕으로한 하중기반의 궤도틀림 분석기법 적용방안을 제시하였다.

주요어 : 궤도틀림, 현장측정, 차륜-레일 상호작용력, 수치해석, 유지관리

Abstract In this study, shape-based track management by analyzing track irregularity was studied in terms of force-based track irregularity analysis by numerical analysis of wheel-rail interaction force using by the measured vertical irregularity. The effect of the vertical irregularity of the track due to the difference in track types on the wheel-rail interaction force and the track acceleration in the connecting section of the sleeper floating track and the direct fixation track on concrete bed were analyzed. As the results of this study, the measured vertical irregularity was directly affect the vertical wheel load (the wheel-rail interaction force) and the rail acceleration, and it has been demonstrated to change consistently. In this study, the adequacy and necessity of the force-based track irregularity analysis method was verified based on the wheel-rail interaction analysis using the the measured vertical irregularity.

Key words : Track Irregularity, Field Measured, Wheel-rail Interaction Force, Numerical Analysis, Maintenance

*정희원, 서울교통공사 궤도2사업소 팀장 (제1저자)
**정희원, 동양대학교 건설공학과 교수 (교신저자)
접수일: 2022년 7월 22일, 수정완료일: 2022년 8월 18일
게재확정일: 2022년 9월 3일

Received: July 22, 2022 / Revised: August 18, 2022

Accepted: September 3, 2022

**Corresponding Author: jychoi@dyu.ac.kr

Dept. of Construction Engineering, Dongyang University

1. 서론

도시철도 열차의 안전운행을 위한 콘크리트궤도의 관리에서 가장 중요한 항목은 궤도틀림에 대한 관리이며 이는 궤도선형 변화와 열차의 주행로인 레일의 변형에 따른 열차주행안정성 확보 측면에서 매우 중요하다[1-4]. 특히 궤도틀림으로 인한 추가적인 동적하중의 증가는 궤도구성품의 손상을 야기하고 지하구조물 및 인접시설로의 충격 및 진동 전달을 가중시키는 요인이 될 수 있다[1-4]. 이에 도시철도 운영기관에서는 궤도틀림으로 인한 구조적 문제뿐만 아니라 승차감 저하를 예방하고자 주기적인 궤도검측차를 이용하여 궤도틀림상태를 모니터링 관리하고 있다[1, 5-6]. 궤도검측차의 측정데이터는 궤간, 방향, 고저, 수평틀림과 뒤틀림(평면성)에 대한 변위량으로 나타나며 궤도틀림관리 기준치를 두고 기준치 이내로 관리하고 있다[1, 7-10]. 그러나 현행 궤도틀림 관리는 궤도선형에 대한 형상기반의 유지관리이며 형상의 변화가 궤도에 미치는 영향에 대한 구체적인 연구는 부족한 실정이었다[1, 7-10]. 이에 본 연구에서는 궤도검측차를 이용하여 획득한 궤도틀림 데이터를 기반으로 종래의 형상기반의 궤도틀림 관리방법을 대신할 수 있는 새로운 분석기법으로서 하중기반의 궤도틀림 분석기법을 연구하였다[1].

궤도틀림(Track irregularity)의 종류는 궤간틀림, 방향틀림, 수평틀림, 고저틀림, 뒤틀림(평면성)으로 구분된다[1, 7-10]. 궤도틀림은 인력과 궤도검측차로 측정 가능하며 대부분 궤도검측차를 이용하여 측정하여 평가한다[1]. 본 연구의 궤도틀림 검측결과는 EM-30 궤도검측차를 이용하여 획득하였다. 궤도검측차의 측정원리는 측정 차륜과 차체의 위치변화를 센서에서 측정하여 그 결과를 궤도틀림값으로 제시된다[1]. 그중 고저틀림은 검측차의 중앙과 후방에 설치된 측정 차축을 기준점으로 하여 0.25m 간격으로 후방의 주행차축 간의 위치 차이를 측정한다[1]. 열차의 주행안전성과 승차감에 큰 영향을 미치는 궤도틀림은 주기적인 궤도틀림 측정결과를 바탕으로 사용기간에 따른 궤도틀림 변화추이를 파악하여 관리기준에 따라 적기에 보수하는 것이 중요하다[1].

II. 궤도틀림 측정 및 분석

1. 검토대상 구간

본 연구의 대상 궤도구조는 방수문 궤도구조로서 그림 1과 같이 침목플로팅 궤도구조(STEDEF)로 부설된 구간 중 방수문 설치 및 운영을 위해 부분적으로 직결식 궤도가 혼용 부설된 궤도구조이다[1]. 대상구간은 현재 직결궤도 전, 후로 국부적인 고저틀림이 크게 발생되고, 콘크리트도상 및 레일체결장치의 손상이 빈번하게 발생하는 구간이다[1].

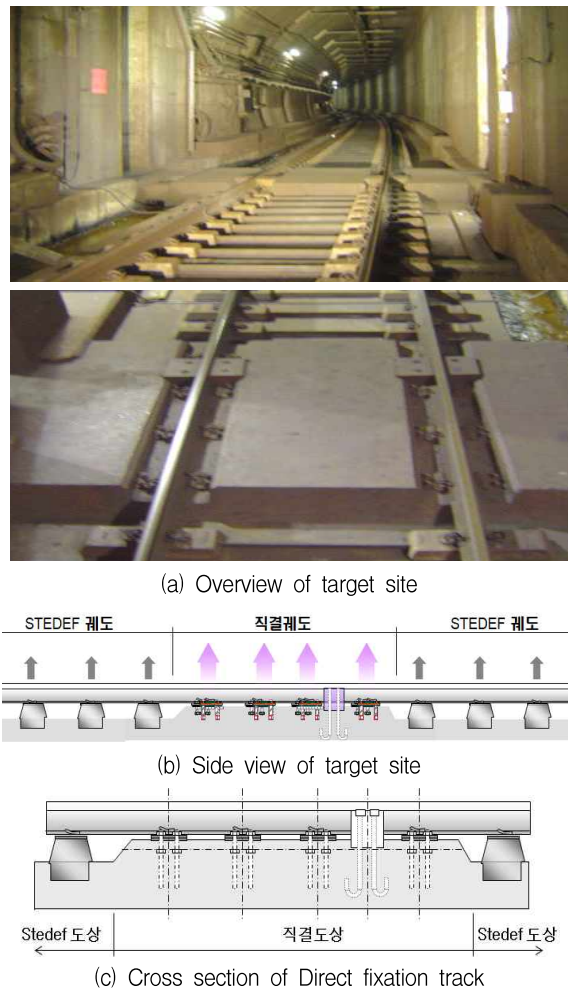


그림 1. 검토대상 궤도시스템
Figure 1. Track system of target site

침목플로팅궤도는 콘크리트침목 하부에 설치된 침목방진패드로 진동을 감소시키는 구조로서 궤도의 탄성 변위량이 상대적으로 큰 방진 궤도구조이다. 반면 부분적으로 부설된 직결궤도는 그림 1(b) 및 그림 1(c)와 같이 레일과 베이스플레이트 사이에 레일패드를 삽입하고 베이스플레이트 하부에는 탄성스프링으로서 기능을

할 수 없는 나일론 계열의 패드를 삽입하여 레일에 전달되는 열차하중이 별도의 방진재 없이 콘크리트 도상으로 직접 전달되는 직결레도구조이다[1]. 본 연구에서는 그림 1과 같이 도시철도 침목플로팅레도와 직결레도 접속구간에서의 레도지지강성 차이로 인해 발생한 고저틀림이 차륜-레일 상호작용력(동적 윤증)과 레일의 가속도에 미치는 영향을 분석하였다. 대상구간은 표 1과 같이 총 4개소로서 직결레도의 부설연장은 3m로 동일하나 레도선형조건과 열차속도는 일부 상이하대[1].

표 1. 구간별 직결레도의 제원
 Table 1. Properties of direct fixation tracks

Section	Distance	Gradient	Radius of curvature	Velocity
A	3m	↓ 3%	600	70km/h
B	3m	↓ 6%	Straight	60km/h
C	3m	↑ 32%	Straight	60km/h
D	3m	↓ 10%	850	75km/h

방수문 레도 구간은 그림 1과 같이 짧은 레도연장에서 레도구조의 형식이 변화되어 레도지지강성의 차이가 발생되고 이로 인한 레도침하량의 차이가 발생하는 구간이다[1]. 선행 연구결과, 콘크리트레도와 플로팅 레도의 접속부에서는 일반 콘크리트레도 구간과의 레도 지지강성 차이로 인해 레도침하량의 차이가 발생되어 레도틀림 및 레도부담력의 증가에 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다[1].

2. 레도틀림 측정결과

레도검측차에서는 검측지점을 중심으로 전, 후 총 40m에 대한 측정치의 평균값에 검측지점의 고저값을 차인하여 고저틀림을 산출한다[1]. 따라서 특정위치의 고저틀림을 산출하기 위하여서는 최소 40m 이상 측정해야 한다[1]. 본 연구에서는 직결레도를 포함한 침목플로팅레도 구간을 Track B로 설정하고, 인접한 전, 후 구간의 침목플로팅레도 구간을 Track A와 Track A'로 구분하고 구간별 레도연장은 40m로 설정하여 총 160m를 분석하였다[1]. 대상구간(Section A~D)의 고저틀림 검측결과를 표 2와 그림 2에 나타내었다. 측정구간에서 모두 좌, 우 레일의 고저틀림의 발생경향은 유사하게 나타났으며, 그림 2와 같이 최대 고저틀림 발생위치는 직결레도가 포함된 Track B에서 발생한 것으로 나타났다.

표 2. 구간별 고저틀림 측정결과
 Table 2. Measured result of vertical irregularity by section

Section	Rail	Track		
		A	B	A'
A	Left(mm)	-1.8~2.1	-4.9~6.1	-2.2~1.0
	Right(mm)	-2.4~0.6	-5.8~5.0	-2.2~1.2
	Max amplitude : 11.0mm			
B	Left(mm)	0.0~3.1	-3.3~6.4	-0.3~2.1
	Right(mm)	-2.2~1.5	-5.8~5.8	-1.3~0.8
	Max amplitude : 11.6mm			
C	Left(mm)	-1.1~1.9	-6.9~8.7	-1.6~2.4
	Right(mm)	-0.6~3.2	-4.2~5.2	-3.2~0.6
	Max amplitude : 15.6mm			
D	Left(mm)	-1.4~2.6	-4.1~5.1	-2.5~2.9
	Right(mm)	-2.2~0.1	-6.0~4.8	-2.2~1.6
	Max amplitude : 10.8mm			

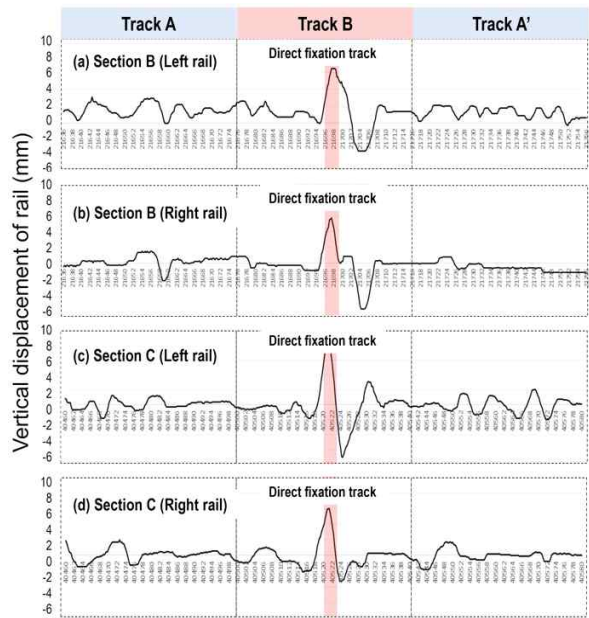


그림 2. 구간별 고저틀림 측정결과
 Figure 2. Measured result of vertical irregularity by section

III. 레도틀림을 고려한 차륜-레일 상호작용력 해석

선행연구결과, 차륜과 접촉되는 레일표면의 수직방향 불규칙성은 차륜-레일 상호작용력을 증폭시켜 충격력이 증가될 수 있는 것으로 분석되었다[1,2]. 이에 본 연구에서는 측정 레도틀림 데이터를 입력재원으로 한 차륜-레일 상호작용력 해석을 수행하여 방수문 레도 주변에 발생한 고저틀림이 차륜-레일 상호작용력인 동적 윤증의 증가 및 레일의 연직가속도에 미치는 영향을 분석하였다.

차륜과 레일의 접촉면의 불규칙성을 고려할 수 있는 동역학 모델은 그림 3과 같으며, 식 (1)을 이용하여 동적

차륜-레일 상호작용력을 산정하였다[1,2].

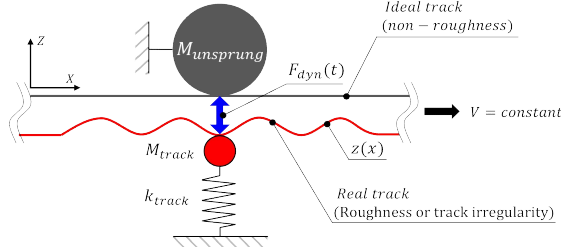


그림 3. 궤도틀림을 고려한 차륜-레일 상호작용력 모델
Figure 3. Wheel-rail interaction force considering rail surface roughness

$$F_{dyn,max} = \beta \frac{Mv^2}{L_o} / \frac{dz(x)}{dx} /_{max,actual} \quad (1)$$

여기서, m_e = equivalence mass(wheel-rail system)
 L_o = reference wavelength, $z=z_o \sin(2\pi vt/L)$
 β = dimensionless calibration factor

궤도검측차에서 측정된 궤도틀림 데이터는 임의의 위치에서의 차륜과 레일 사이의 접촉점 위치변화(변위)를 의미하며 이를 거리에 따른 변위함수로 변환하여 식 (1)에 대입함으로써 동적 차륜-레일 상호작용력을 산출하였다. 현장측정 궤도틀림 데이터는 연직방향 하중특성에 상관성이 높은 고저틀림 데이터를 기반으로 차륜-레일 상호작용력 산정을 수행하였다.

또한 거리에 따른 변위함수인 궤도틀림 측정데이터를 대상구간을 주행하는 열차의 주행속도를 고려한 시계열함수로 치환하여 시간에 대한 2차 적분을 통해 레일에 발생하는 연직방향 진동가속도를 산정하였다.

본 연구에서는 고저틀림 측정데이터를 입력제원으로 적용한 차륜-레일 상호작용력 및 레일가속도 분석을 수행하였다. 구간별 측정거리는 40m이나 측정구간 시종점에서의 위치 차이에 따른 측정오차를 최소화하고자 시종점부인 Track A와 Track A'에 20m씩을 추가로 분석에 포함하여 총 160m의 측정범위에서의 데이터를 분석하였다. 총 160m에서의 고저틀림 측정데이터를 기반으로 Track A, B, A'에서 발생하는 차륜-레일 상호작용력과 레일 가속도를 산출하였다. 측정구간 중 상대적으로 고저틀림이 크게 평가된 Section B와 Section C의 우측 레일에서의 분석결과의 예시는 각각 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

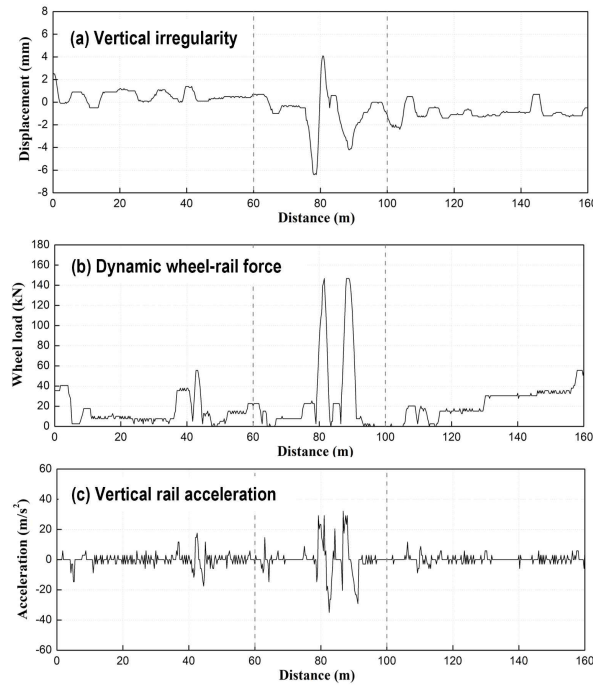


그림 4. Section B 우측레일 분석결과
Figure 4. Analyzed result of section B right rail

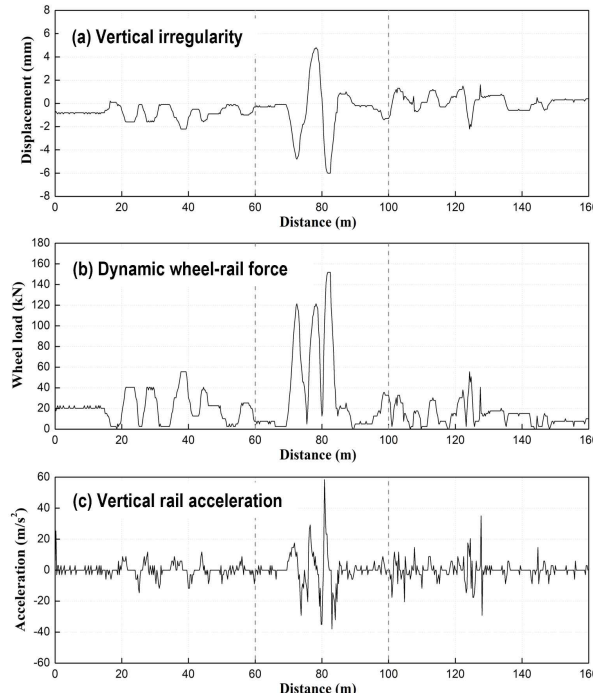


그림 5. Section C 우측레일 분석결과
Figure 5. Analyzed result of section B right rail

Section B의 경우 그림 4와 같이 Track B와 Track A 및 Track A'와의 상대 변위차는 약 8.0mm 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 Track B의 차륜-레일 상호작용

력과 레일 가속도는 Track A 및 Track A'보다 각각 약 2.6배와 약 2.8배 증가하는 것으로 나타났다.

Section C의 경우 그림 5와 같이 Track B와 Track A 및 Track A'와의 상대 변위차는 약 7.0mm 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 Track B의 차륜-레일 상호작용력은 Track A 및 Track A'보다 약 2.7배 크게 나타났다. 레일 가속도의 경우 Track A와 Track A'에서 각각 약 5배와 약 1.7배 증가하는 것으로 나타났다.

고저틀림과 차륜-레일 상호작용의 상관관계 분석결과, 그림 4와 그림 5와 같이 고저틀림 중 측정거리에 비해 상대변위차가 큰 구간에서 차륜-레일 상호작용력과 레일가속도가 증가하는 것으로 분석되었다.

반면 고저틀림의 주기와 틀림량(변위)이 일정한 경우, 차륜-레일 상호작용력과 레일가속도는 상대적으로 작게 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 고저틀림의 주기가 짧고 상대변위차가 클수록 차륜-레일 상호작용력 및 레일 가속도가 증가하는 것으로 분석되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 도시철도 본선구간 중 침목플로팅케도(STEDEF)와 직결식 케도가 혼용된 방수문 케도구간을 대상으로 고저틀림 측정데이터를 분석하고 이를 입력제원으로 적용한 차륜-레일 상호작용 해석을 바탕으로 고저틀림과 차륜-레일 상호작용력의 상관관계를 입증하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 케도검측차를 이용한 고저틀림 측정결과, 직결케도가 포함된 침목플로팅케도구간에서 인접한 전, 후 구간보다 약 3.7배 이상 크게 나타나 케도지지강성이 국부적으로 변화되는 방수문 케도구간에서 케도침하량에 직접적인 영향을 받는 고저틀림이 크게 나타난 것으로 분석되었다.

(2) 고저틀림과 차륜-레일 상호작용력의 상관관계 분석결과, 고저틀림 중 측정거리에 비해 상대변위차가 큰 구간에서 차륜-레일 상호작용력과 레일가속도가 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 고저틀림의 주기가 짧고 상대변위차가 클수록 차륜-레일 상호작용력 및 레일 가속도가 증가하는 것으로 분석되었다.

(3) 케도틀림을 허용기준치 범위 내로 조정하기 위한 종래의 형상기반의 케도틀림 분석기법은 케도틀림으로 인해 발생하는 추가적인 상호작용력에 대해 평가할 수

없었다. 그러나 본 연구를 통해 제시한 하중기반의 케도틀림 분석기법을 통해 케도틀림이 케도구성품에 작용하는 하중의 크기를 비롯하여 승차감에 영향을 미칠 수 있는 레일 가속도를 정량적으로 분석하였다.

(4) 케도틀림 관리기준을 만족하더라도 본 연구결과와 같이 짧은 구간에 상대변위차가 크게 발생한 케도틀림 발생개소의 경우 케도에 작용하는 차륜-레일상호작용력이 증폭될 수 있으므로 별도의 추가적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] S.K. Hwang, "A Study on Application of Force-based Track Irregularity Analysis Method", Master thesis, DongYang University, 2021.
- [2] J.Y. Choi, "Qualitative Analysis for Dynamic Behavior of Railway Ballasted Track", Ph.D. dissertation, Technical University of Berlin, 2014.
- [3] J.Y. Choi, D.R. Park, J.S. Chung, S.H. Kim, "Dynamic Wheel-Rail Force-Based Track-Irregularity Evaluation for Ballasted Track on Serviced Railway by Adjacent Excavation", Applied Sciences, Vol. 12, No. 1, pp. 1-21, 2021. <https://doi.org/10.3390/app12010375>
- [4] J.Y. Choi, C.M. Jeong, J.S. Chung, "Experimental Study to analyze Effect of Rail Corrugation Reduction according to Rail Grinding", Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), Vol. 7, No. 4, pp. 801-806, 2021. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2021.7.4.801>
- [5] 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. 파상마모, <https://doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.4.413>
- [6] 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>
- [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] J.Y. Choi, S.I. Cho, J.S. Chung, “Parameter Study of Track Deformation Analysis by Adjacent Excavation Work on Urban Transit”, Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No. 4, pp. 669-675, 2021. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.4.669>
- [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] J.Y. Choi, H.H. Lee, Y.S. Kang, 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. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.2.481>
- [10] J.S. Chung, D.R. Park, 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. 궤도틀림, <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.2.481>