

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.3.839

JCCT 2024-5-94

지하구조물 변위거동에 따른 콘크리트궤도의 손상영향 분석

Evaluation on Damage Effect of Concrete Track induced by Underground Structure Displacement Behavior

최정열*

Jung-Youl Choi*

요약 본 연구는 인접굴착공사, 지반열화 및 지하수위의 변화에 따른 지하구조물 변위거동이 궤도 손상에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 연구대상인 콘크리트궤도는 침목플로팅궤도(STEDEF)와 사전제작형궤도(B2S)를 대상으로 분석하였다. 침목플로팅궤도는 콘크리트 도상과 침목이 분리된 궤도구조이다. 사전제작형궤도는 프리캐스트 슬래브를 이용하여 레일 및 체결장치를 조립하여 레일의 탄성거동을 유도하는 궤도구조이다. 수치해석을 위해 콘크리트 궤도별로 레일부터 콘크리트 도상까지 모두 3차원 요소로 모델링하였다. 또한 지하구조물 변위거동을 변수로 설정하여 콘크리트 도상의 손상영향을 분석하였다. 수치해석을 이용하여 융기 및 침하에 따른 콘크리트 도상 응력을 분석하였으며, 인장강도 및 전단강도와 비교하여 균열 발생 수준을 분석하였다. 분석결과, 동일한 융기 및 침하발생 시 사전제작형궤도보다 침목플로팅궤도가 취약한 것으로 분석되었다. 또한 최대 융기 및 침하부 기준으로 침목플로팅궤도의 균열발생 영향범위가 큰 것으로 분석되었다.

주요어 : 콘크리트궤도, 궤도변형, 궤도구성품, 손상, 수치해석

Abstract This study analytically analyzed the impact of underground structure displacement behavior on track damage due to adjacent excavation work, ground deterioration, and changes in groundwater level. The concrete track that was the subject of the study was analyzed for sleeper floating track(STEDEF) and precast concrete slab track(B2S). Sleeper floating track is a track structure in which the concrete bed and sleepers are voided. precast concrete slab track is a track structure that induces the elastic behavior of the rail by assembling rails and fasteners using slabs. For numerical analysis, each concrete track, from rail to concrete bed, was modeled as three-dimensional elements. In addition, the displacement behavior of the underground structure was set as a variable to analyze the damage effect on the concrete bed. Using numerical analysis, the concrete bed stress due to uplift and subsidence was analyzed, and the level of crack effect was analyzed by comparing it to the tensile strength and shear strength. As a result of the analysis, it was found that the sleeper floating track was more vulnerable than the precast concrete slab track when the same uplift and subsidence occurred. In addition, uplift and subsidence, it was analyzed that the cracks range in the sleeper floating track was large.

Key words : Concrete track, Track deformation, Track components, Damage, Finite element analysis

1. 서론

최근 도시철도를 중심으로 신축건물과 공동구 확장

등으로 인해 인접굴착공사가 다수 발생하는 실정이다 [1-6]. 인접굴착공사는 지하에 건설된 도시철도 지하박스 구조물 및 터널구조물의 변형을 유발시킬 수 있다[1-6].

*정희원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)
접수일: 2024년 3월 14일, 수정완료일: 2024년 4월 10일
게재확정일: 2024년 4월 20일

Received: March 14, 2024 / Revised: April 10, 2024

Accepted: April 20, 2024

*Corresponding Author: jychoi@dyu.ac.kr

Dept. of Construction Engineering, Dongyang University, Korea

이에 변형으로 인한 보수 및 보강 공사도 같이 시행되고 있는 실정이다[7,8]. 그러나 대부분 지하철 구조물에 대한 구조검토 및 보수, 보강에 집중되어 궤도구조에 대한 검토 및 보수, 보강에는 매우 부족한 실정이다[1]. 특히 침목 플로팅 궤도(STEDEF)는 콘크리트 침목과 콘크리트 도상 사이에 침목방진패드를 삽입시켜 인접 구조물로 전달되는 열차하중 및 진동을 저감시키는 궤도구조이다 [1,9]. 침목 플로팅 궤도의 구성은 그림 1과 같다.

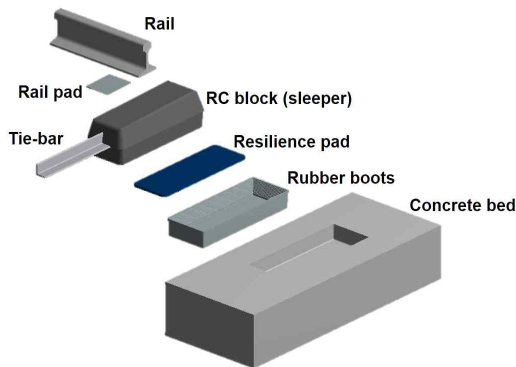


그림 1. 침목 플로팅 궤도(STEDEF)의 구성도
Figure 1. Schematic of floating track system(STEDEF)

지하철 구조물에 다수 부설된 사전제작형 궤도(B2S)는 프리캐스트 콘크리트 슬래브를 이용하여 기존 자갈 궤도를 철거한 후 설치하는 공법으로 부설된다[10]. 사전제작형 궤도는 레일패드, 베이스플레이트, 탄성패드 등이 조립된 궤도구조로서 탄성패드가 레일의 탄성거동을 유도하는 궤도구조 형식이다[10]. 또한 탄성패드와 레일패드 사이에 베이스플레이트를 삽입하여 탄성패드에 전달되는 하중을 적절하게 분배할 수 있도록 설계된 궤도구조이며, 그림 2와 같다.

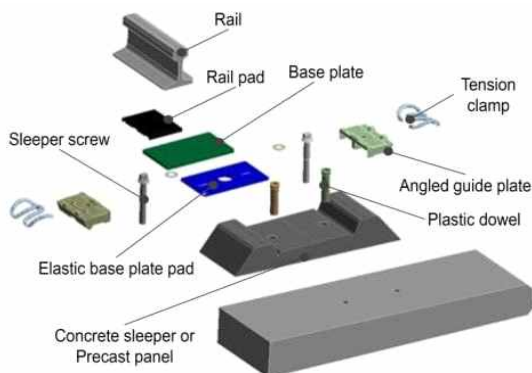


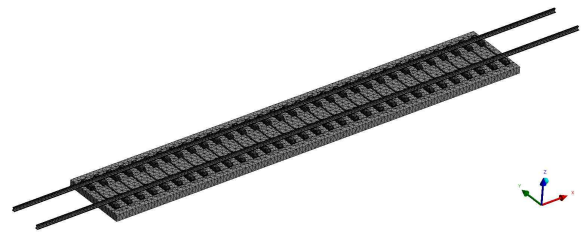
그림 2. 사전제작형 궤도(B2S)의 구성도
Figure 2. Schematic of precast concrete slab track(B2S)

현재까지 지하구조물 내에 부설된 콘크리트 궤도의 경우 별도의 궤도 변형 한계 기준이 없는 실정이며, 지하 토목 구조물에 대한 변형 한계 기준치를 준용하고 있다. 따라서 본 연구결과를 이용하여 침목 플로팅 궤도 및 사전제작형 궤도의 손상 영향을 기준으로 한 궤도 변형 한계치를 분석하고자 한다.

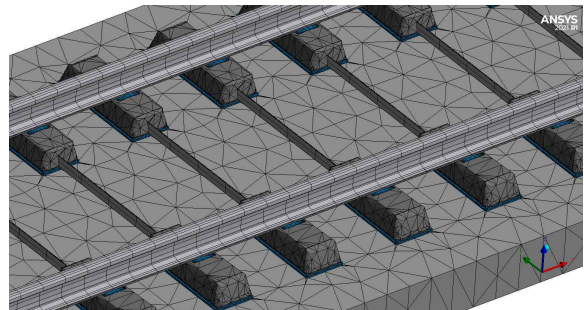
II. 수치 해석

1. 침목 플로팅 궤도 모델링

본 연구에서는 해석적으로 구조물 변위 거동에 따른 침목 플로팅 궤도 손상 영향 분석을 위해 레일부터 콘크리트 도상까지 3D Solid 요소로 모델링하였다[1].



(a) 3D view (All)



(b) 3D View (Detail)

그림 3. 침목 플로팅 궤도 해석 모델링
Figure 3. FE model of sleeper floating track system

본 연구에서는 지하철 구조물 변위 거동에 따른 침목 플로팅 궤도의 거동과 손상 영향을 분석하기 위해 그림 3과 같이 모델링하였다. 전체 콘크리트 도상의 길이는 20m로 설정하였으며, 레일은 시중점부에 레일 Uplift 효과를 고려하여 26.8m로 해석영역을 설정하였다[1].

2. 사전제작형 궤도 모델링

본 연구에서는 해석적으로 구조물 변위 거동에 따른 사전제작형 궤도 손상 영향 분석을 위해 레일부터 콘크리트 도상까지 3D Solid 요소로 모델링하였다.

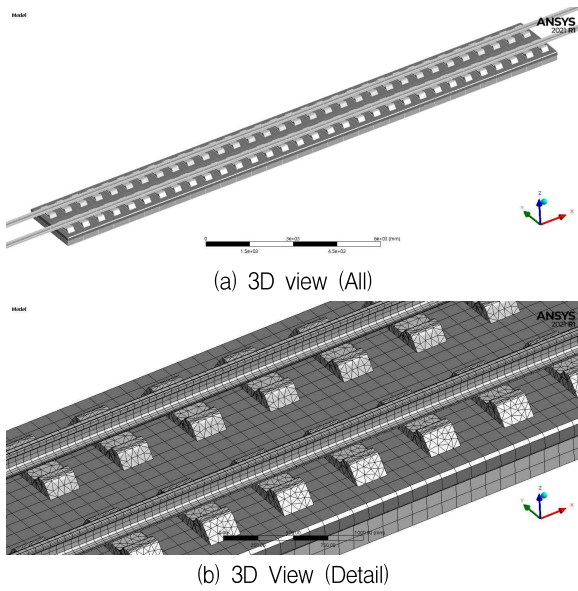


그림 4. 사전제작형궤도 해석 모델링
 Figure 4. FE model of precast concrete slab track

사전제작형궤도의 손상영향 분석을 위해 그림 4와 같이 전체 모델(콘크리트 도상)의 길이는 20m로 설정하였으며 레일의 경우 시중점부에서의 레일 Uplift 효과 등을 고려하여 콘크리트 도상보다 긴 26.8m로 해석영역을 설정하였다. 또한 사전제작형궤도 레일체결장치를 스프링 요소로 모델링하였으며, 강성값은 탄성패드의 스프링강성 17.5kN/mm와 레일패드 스프링강성 450kN/mm의 조합 스프링강성값인 16.8kN/mm으로 적용하였다.

3. 경계조건 및 하중조건

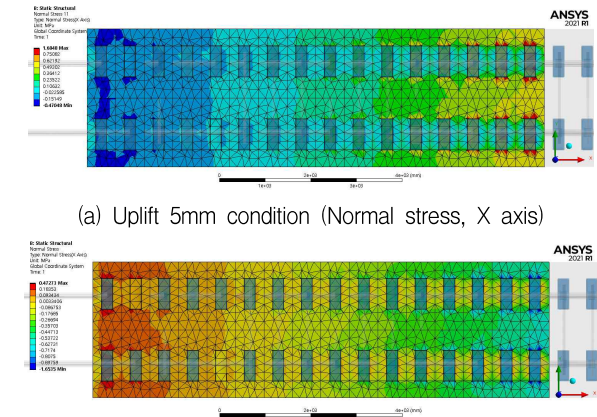
본 연구에서는 전체 콘크리트 도상의 길이를 20m로 설정하였으며, 레일은 시중점부에 레일 Uplift 효과를 고려하여 26.8m로 해석영역을 설정하였다[1]. 또한 변위 제어 조건은 구조물 부등침하량 기준인 L/500을 최대 임계값(L=20m 시, 최대 부등침하량 ±40mm)으로 설정하였다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 구조물 융기 및 침하에 따른 콘크리트궤도의 콘크리트 도상 발생 응력을 분석하였다. 또한 해석결과를 이용하여 인장강도 및 전단강도와 비교하여 콘크리트 손상영향을 분석하였다.

III. 콘크리트 도상 인장균열 검토

본 연구에서는 지하철 구조물 침하 및 융기에 따른 콘크리트 도상 인장균열 발생 가능성을 분석하였다[1]. 콘크리트 도상 인장균열 발생 검토를 위해 콘크리트 휨 강

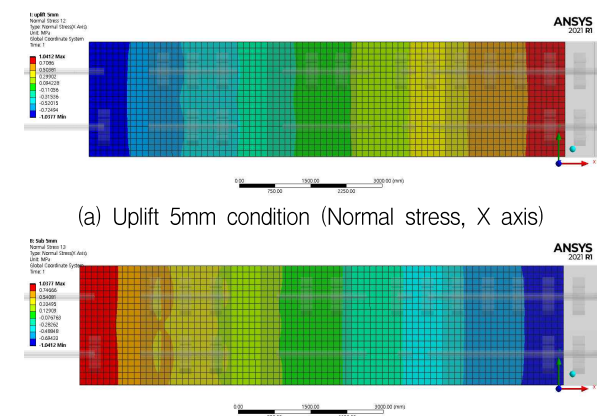
도 [콘크리트구조설계기준, 2012(ACI기준과 동일)] 기준과 해석결과를 비교 분석하였다[1]. 침목플로팅궤도 해석 결과는 그림 5와 같다.

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$



(a) Uplift 5mm condition (Normal stress, X axis)
 (b) Subsidence 5mm condition (Normal stress, X axis)
 그림 5. 침목플로팅궤도 인장응력 해석결과 예시
 Figure 5. Tensile stress analysis result of sleeper floating track

지하구조물 융기 및 침하에 따른 분리형궤도의 콘크리트도상 인장응력 해석결과, 지하구조물 융기조건(상향변위)의 경우 콘크리트도상 중앙부 상면에서 인장응력이 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 지하구조물 침하조건(하향변위)의 경우 콘크리트도상 중앙부 하면에서 인장응력이 크게 발생하는 것으로 분석되었다. 사전제작형궤도 해석결과는 그림 6과 같다.



(a) Uplift 5mm condition (Normal stress, X axis)
 (b) Subsidence 5mm condition (Normal stress, X axis)
 그림 6. 사전제작형궤도 인장응력 해석결과 예시
 Figure 6. Tensile stress analysis result of precast concrete slab track

사전제작형궤도의 응력해석결과 용기조건의 경우 최대 용기부 콘크리트도상 상부, 침하조건의 경우 최대 침하부 콘크리트도상 하부에서 최대 인장응력이 나타나는 것으로 분석되었다. 전단응력의 경우 최대 용기 및 침하부와 지점부에서 최대 전단응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 침목플로팅궤도 및 사전제작형궤도의 용기 및 침하에 따른 인장응력 및 인장강도 비교 분석결과는 그림 7과 같다.

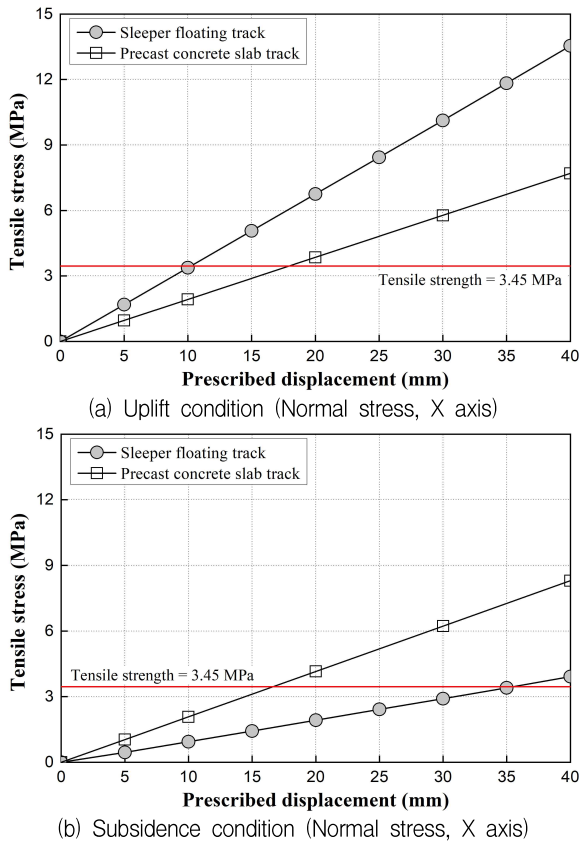


그림 7. 인장응력 분석결과
Figure 7. Analysis result of tensile stress

침목플로팅궤도의 지하구조물 용기 및 침하 조건에 따른 콘크리트도상 인장응력 분석결과, 그림 7(a)와 같이 용기 조건의 경우 약 10mm 용기 발생 시 인장강도를 초과하는 것으로 분석되었다. 침하 조건의 경우 그림 7(b)와 같이 약 35mm 침하 발생 시 인장강도를 초과하는 것으로 분석되었다. 사전제작형궤도의 지하구조물 용기 및 침하 조건에 따른 콘크리트도상 인장응력 분석결과, 그림 7(a)와 같이 용기 조건의 경우 약 18mm 용기 발생 시 인장강도를 초과하는 것으로 분석되었다. 침하 조건의 경우 그림 7(b)와 같이 약 16mm 침하 발생 시 인장강도

를 초과하는 것으로 분석되었다.

IV. 콘크리트 도상 인장균열 영향 범위 분석

본 연구에서는 지하구조물 용기 및 침하에 따른 콘크리트 도상의 응력을 해석적으로 도출하였다. 해석적으로 도출한 콘크리트 도상 응력을 인장강도(휨강도)와 비교하여 인장균열 발생 영향범위를 분석하였다. 침목플로팅궤도 및 사전제작형궤도의 인장균열 발생범위 분석결과는 그림 8과 같다.

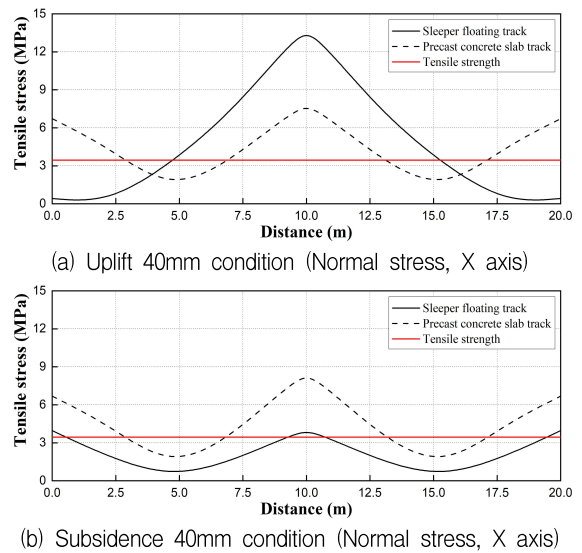


그림 8. 인장균열 발생 범위 분석결과
Figure 8. Analysis results of tensile crack range

침목플로팅궤도의 지하구조물 용기 및 침하 조건에 따른 콘크리트도상 인장균열 발생 영향범위 검토결과, 그림 8(a)와 같이 용기 40mm 발생 시 최대 용기부 기준으로 총 10.5m 연장에서 인장균열이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 반면 침하조건의 경우 그림 8(b)와 같이 침하량 40mm 발생 시 최대 침하부 기준으로 전, 후 약 1m 구간에서 인장강도를 초과하여 총 2m 연장으로 인장균열이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 용기조건 보다 침하조건의 인장강도를 초과하는 인장응력 범위는 84.8% 작은 것으로 분석되었다. 사전제작형궤도의 지하구조물 용기 및 침하 조건에 따른 콘크리트도상 인장균열 발생 영향범위 검토결과, 그림 8(a)와 같이 용기 40mm 발생 시 최대 용기부 기준으로 전, 후 약 3m 구간에서 인장강도를 초과하므로 총 6m 연장으로 인장

균열이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 침하조건인 경우 그림 8(b)와 같이 침하량 40mm 발생 시 최대 침하부 기준으로 전, 후 약 3m 구간에서 인장강도를 초과하므로 6m 연장으로 인장균열이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다.

따라서 본 연구결과, 지하구조물의 용기 거동이 발생하였을 때는 사전제작형궤도보다 침목플로팅궤도가 인장균열 발생에 보다 취약한 것으로 분석되었다. 반면 침하조건에서는 침목플로팅궤도보다 사전제작형궤도의 인장균열 발생 위험이 보다 높은 것으로 분석되었다.

V. 결론

본 연구에서는 수치해석을 이용하여 지하구조물의 변위거동에 따른 콘크리트궤도의 콘크리트 도상 손상영향을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 지하구조물 변위거동에 따른 침목플로팅궤도 콘크리트 도상 인장균열 유발 가능성 검토결과, 용기거동이 콘크리트 도상 손상에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 인장균열 발생 측면에서 손상 영향범위는 침하 조건보다 용기 조건이 보다 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

2) 지하구조물 변위거동에 따른 사전제작형궤도 콘크리트 도상 인장균열 유발 가능성 검토결과, 인장응력 기반에서 침하거동 및 용기거동에 따른 콘크리트 도상의 응력수준은 유사한 것으로 분석되었다. 또한 콘크리트 도상의 인장균열 측면에서 손상 영향범위도 침하 및 용기조건 모두 유사한 것으로 분석되었다.

3) 지하구조물 용기조건에서 인장응력 기반 균열발생 범위는 침목플로팅궤도가 사전제작형궤도 보다 도상 균열 발생 영향범위가 큰 것으로 분석되었다. 반면 지하구조물 침하조건에서는 사전제작형궤도가 침목플로팅궤도보다 콘크리트 도상 균열발생 영향범위가 큰 것으로 분석되었다. 따라서 지하구조물내에 부설된 콘크리트궤도의 경우 궤도구성품에 의해 균열발생 유무를 현장에서 조사하기에는 어려운 실정이다. 본 연구결과를 이용하여 콘크리트궤도의 침하 및 용기가 발생할 경우 최대 침하 및 용기부뿐만 아니라 열차진행방향 전, 후에 대한 균열 발생 유/무를 조사하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

References

- [1] J.Y. Choi, D.H. Ahn and S.H. Kim, "Behavior Characteristics of a Booted Sleeper Track System According to Substructure Deformation", *Applied Sciences*, Vol. 11, No.10, pp. 1-16, 2021.
- [2] D.H. Ahn, "Evaluation on Damage Effect of Sleeper Floating Track System induced by Displacement Behavior of Underground Structure", Master thesis, Dongyang University, 2022.
- [3] H. Wang, M. Silvast, V. Markine, B. Wiljanen, "Analysis of the Dynamic Wheel loads in Railway Transition Zones Considering the Moisture Condition of the Ballast and Subballast", *Applied Sciences*, Vol. 7, No. 12, pp. 1208, 2017.
- [4] P. Hu, C. Zhang, W. Guo, Y. Wang, "Dynamic Response of a Bridge-Embankment Transition with Emphasis on the Coupled Train-Track-Subgrade System", *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 17, pp. 5982, 2020.
- [5] P.J. Jia, W. Zhao, Y. Chen, S.G. Li, J.Y. Han, J.C. Dong, "A Case Study on the Application of the Steel Tube Slab Structure in Construction of a Subway Station", *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 9, pp. 1437, 2018.
- [6] X. Cai, Q. Zhang, Y. Zhang, Q. Wang, B. Luo, G. Yang, A. Lau, "Deformation Law and Control Limit of CRTSIII Slab Track under Subgrade Frost Heave", *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 8, pp. 3520, 2021.
- [7] J.S. Chung, D.R. Park, J.Y. Choi, "Evaluation of Track Irregularity Effect due to Adjacent Excavation on Serviced Railway Line", *The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 5, No. 4, pp. 401-406, 2019.
- [8] J.Y. Choi, G.N. Yang, T.J. Kim, J.S. Chung, "Analysis of Ground Subsidence according to Tunnel Passage in Geological Vulnerable Zone", *The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 6, No. 3, pp. 393-399, 2020.
- [9] J.Y. Choi, S.H. Kim, H.S. Park, J.S. Chung, "A Study on Development of New Type Rubber Boot for Sleeper Floating Track System (STEDEF):Materials and Shapes", *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 5, pp. 3068, 2023
- [10] J.Y. Choi, S.H. Kim, S.J. Kim, J.S. Chung, "Failure Analysis of Tension Clamps(SKL15) Used in Serviced Urban Railway Tracks:

Numerical Analyses and Experiments”,
Materials, Vol. 15, No. 18, pp. 6354, 2022

[11] Korean Concrete Institute, Korean Design
Standard, Korean Concrete Institute, 2012.

[12] Ansys Inc. ANSYS® 2023, ANSYS
Workbench 2023 R1, ANSYS Inc, 2023.

※ 이 논문은 2023년도 동양대학교 학술연구
비의 지원으로 수행되었음