

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.4.625

JCCT 2023-7-76

레일플로팅궤도의 거동특성을 반영한 해석모델

Analysis Model Considering Behavior Characteristics of Rail Floating Tracks

최정열*, 김진일**, 정지승***

Jung-Youl Choi*, Jin-Il Kim**, Jee-Seung Chung***

요약 본 연구는 레일플로팅궤도의 실제거동을 반영할 수 있는 해석모델을 제안하는 연구로써 현장측정과 수치해석을 통해 가장 합리적인 모델을 분석 하였다. 레일플로팅궤도의 현 설계이론 해석결과는 현장측정 결과와 상이하게 나타나서 실제거동을 반영하기에 적합하지 않은 것으로 분석 되었다. 레일플로팅궤도는 레일의 휨에 의한 변위 보다는 지점의 침하가 전체 변위량에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석 되었다. 수치해석 결과 레일직하부에 지지점을 갖지 않는 병렬배치 스프링모델인 제안모델의 해석결과가 실제거동을 반영하는 것으로 분석 되었다. 본 연구에서 제시된 해석모델은 향후 레일플로팅궤도에 대한 설계 및 유지관리시 궤도거동 예측에 활용이 가능하다.

주요어 : 레일플로팅궤도, 탄성재, 병렬배치 스프링, 수치해석 모델

Abstract This study proposes an analysis model that can reflect the actual behavior of the rail floating track, and the most reasonable model was analyzed through field measurement and numerical analysis. It was analyzed that the current design theory analysis results of rail floating tracks were different from the field measurement results and were not suitable to reflect the actual behavior. In the rail floating track, it was analyzed that the subsidence of the point directly affects the total displacement rather than the displacement due to the bending of the rail. As a result of numerical analysis, it was analyzed that the analysis result of the proposed model, which is a parallel arrangement spring model that does not have a support point directly below the rail, reflects the actual behavior. The analysis model presented in this study can be used to predict track behavior when designing and maintaining rail floating tracks in the future.

Key words : Rail floating track, Elastic material, Parallel arrangement spring, Numerical analysis model

1. 서론

열차운행에 따른 소음 및 진동 발생 문제는 민감한 사회 문제이며 이에 대한 방지 대책으로 노선의 특성에 적합한 방진궤도가 적용되고 있다. 주요 적용 궤도는 레일플로팅궤도, 침목플로팅궤도, 슬래브플로팅궤도 등이

있다. 침목플로팅궤도는 레일, 침목, 방진재 등의 열화에 따른 거동 및 손상원인 등에 관한 연구가 진행되었다[1-3].

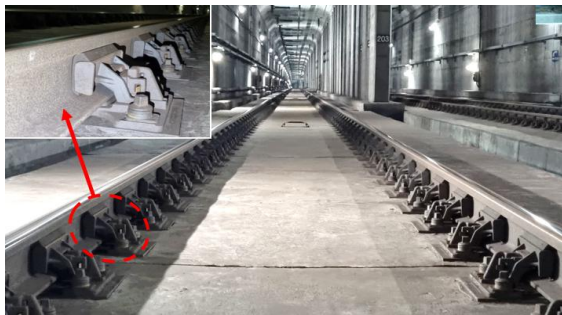
슬래브플로팅궤도는 소음, 진동 특성 및 거동에 대한 연구가 진행되었다[4,5]. 본 연구의 대상 궤도인 레일 플로팅궤도는 그림 1(a)와 같은 형상이며 레일복부에

*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)
**정회원, 네오트랜스(주) 시설팀 차장 (교신저자)
***정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (참여저자)
접수일: 2023년 6월 19일, 수정완료일: 2023년 6월 30일
게재확정일: 2023년 7월 5일

Received: June 19, 2023 / Revised: June 30, 2023
Accepted: July 5, 2023
**Corresponding Author: rail1435@hanmail.net
Facilities Team, Deputy Manager of Neotrans Co., Ltd.,
Korea

위치한 2개의 탄성재가 레일두부를 병렬로 지지하는 방식이며, 레일저부는 베이스플레이트와 이격되어 있다. 본 연구에서는 레일플로팅케도와의 거동을 비교하기 위해 그림 1(b)와 같이 직렬배치 레일지지점을 갖는 ERS(Elastic rail support) 케도를 비교 케도구조로 선정하였다.

본 논문에서 언급되는 일반케도는 ERS케도로서 일반적인 모든 케도를 지칭하지는 않는다. 현 케도설계 이론(이산지지 연속보 이론, Zimmermann's theory)은 레일의 휨곡률을 기반으로 한 변위와 응력에 대한 해석 이론이다. 선행 연구결과, 설계이론 적용 시 레일플로팅케도의 레일휨응력은 실제거동 보다 크게 해석되는 것으로 나타났다. 본 연구는 레일플로팅케도의 실제거동을 반영할 수 있는 해석모델을 제안하는 연구로서 현장 측정과 수치해석을 통해 가장 합리적인 해석모델을 제시하였다.



(a) Rail floating track



(b) General track

그림 1. 대상 케도 전경
Figure 1. Photographs of target track

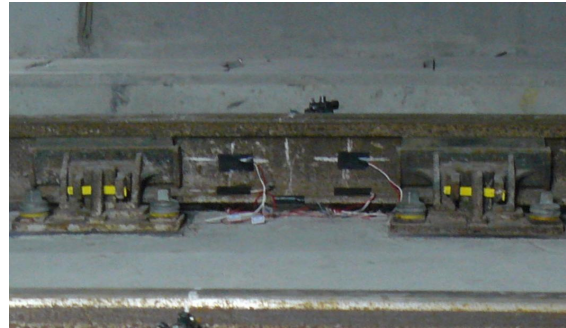
II. 현장측정

본 연구에서 현장측정은 레일플로팅케도와 일반케도 구간으로 구분하여 운중, 횡압, 레일수직변위, 레일휨응력을 도시철도 운행선의 직선구간에서 그림 2와 같이

측정 하였다. 또한, 이를 이용해 작성된 하중 및 변위선도의 기울기를 측정위치에서의 케도지지강성으로 산출 하였다[6].



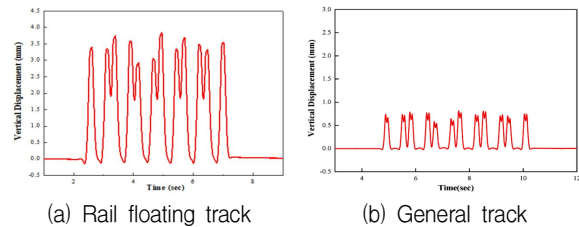
(a) Rail vertical displacement measured



(b) Rail bending stress measured

그림 2. 현장측정 전경
Figure 2. Photographs of field measured

측정구간의 열차주행에 따른 레일플로팅케도 및 일반케도의 레일수직변위 측정 파형은 그림 3과 같다. 레일수직변위 측정결과, 레일플로팅케도는 3.91mm이고 일반케도는 0.81mm로 레일플로팅케도가 일반케도와 비교해서 4.8배 큰 것으로 분석 되었다.



(a) Rail floating track

(b) General track

그림 3. 레일수직변위 측정 파형 예시
Figure 3. Examples of vertical rail displacement

측정구간의 열차주행에 따른 레일플로팅케도 및 일반케도의 레일휨응력 측정 파형은 그림 4와 같다[6]. 레일휨응력 측정결과, 레일플로팅케도는 27.28MPa이고

일반궤도는 29.0MPa로 레일플로팅궤도가 일반궤도 보다 6.3% 작은 것으로 분석 되었다.

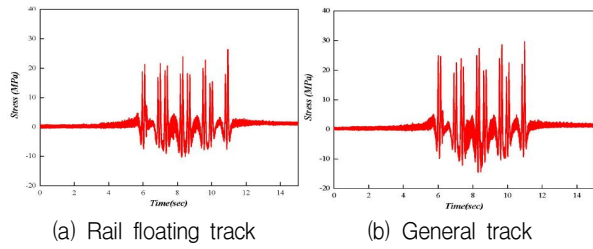


그림 4. 레일휨응력 측정 파형 예시
 Figure 4. Examples of rail bending stress

본 연구에서 차량하중을 고려한 현장측정을 통해 산출된 궤도구조별 궤도지지강성은 표 1과 같다[6].

표 1. 궤도구조별 측정 궤도지지강성
 Table 1. Measured track support stiffness of each track

Track structure	Measured track support stiffness(kN/mm)
Rail floating track	10.65
General track	41.65

III. 유한요소해석

현재 국내 궤도설계 시 적용하는 짐머만이론은 레일 지지점 간격으로 이산지지 되고, 레일지지점에 대한 탄성을 직렬스프링으로 적용한다. 식 (1)은 레일수직변위를, 식 (2)는 레일휨모멘트에 대한 수식으로 레일휨응력을 산출할 수 있다. 식 (3)은 레일지지점 반력을 산출한다. 여기서 L 은 궤도지지강성에 직접적인 영향을 받는 레일특성길이를 의미한다[7].

$$W(x) = \frac{QL^3}{8EI} \eta(x) = \frac{QL^3}{8EI} e^{-(x/L)} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \quad (1)$$

$$M(x) = \frac{QL}{4} \mu(x) = \frac{QL}{4} e^{-(x/L)} \left(\cos \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L} \right) \quad (2)$$

$$F(x) = \frac{Qa}{2L} \eta(x) = \frac{Qa}{2L} e^{-(x/L)} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right) \quad (3)$$

일반궤도의 직렬배치스프링모델은 그림 5(a)와 같이 레일저부를 지지하며 일반적으로 직렬로 배치된 탄성재의 조합스프링강성을 레일지지점 스프링강성이라 한다. 병렬배치 스프링모델은 그림 5(b)와 같이 레일두부

의 좌우 직하부에 등분포 배치된 스프링의 병렬배치 형태를 가지며 레일직하부에는 지지점이 없는 모델이다.

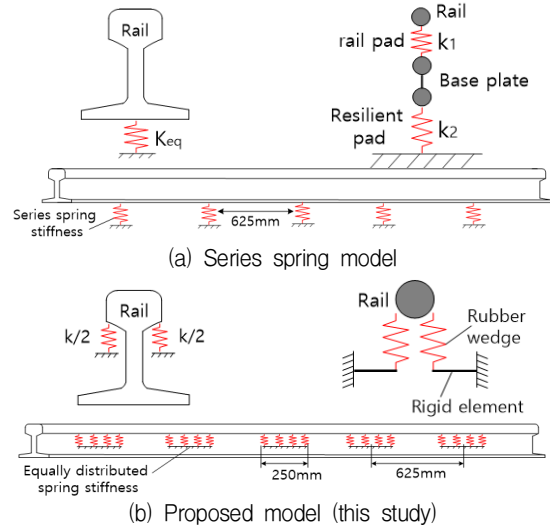


그림 5. 궤도구조별 스프링모델
 Figure 5. Spring model for each track structure

레일플로팅궤도의 수치해석 조건별 모델은 그림 6과 같이 이산지지 연속보 모델, 연속탄성 기초보 모델, 제안모델로 구분하여 모델링을 수행 하였다.

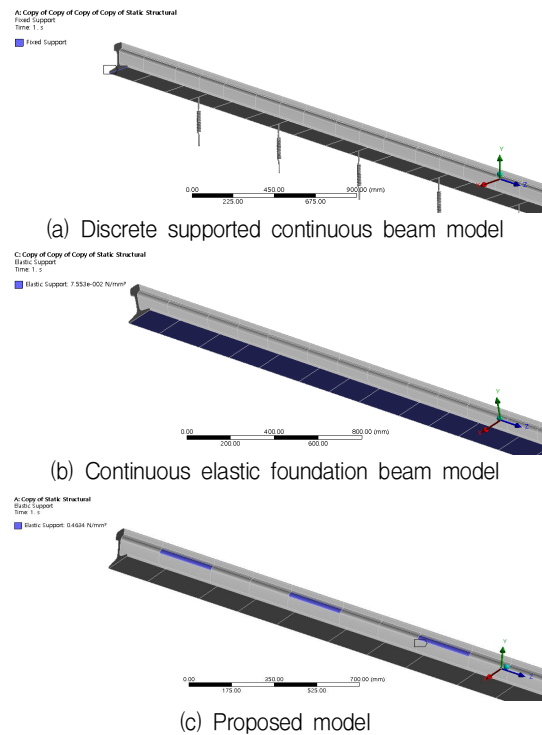


그림 6. 수치해석 모델링
 Figure 6. FE modeling by each case

하중조건은 모델별로 측정 율하중 및 횡하중의 조합 하중을 적용하였다. 경계조건은 이산지지 연속보 모델 및 연속탄성 기초보 모델은 레일양단을 고정 조건으로 했으며 제안모델의 경우는 지점화 방지를 위해서 상하 좌우 방향으로 자유도를 부여 하였다. 지지조건은 이산 지지 연속보 모델은 측정 궤도지지강성 10.65kN/mm를 레일지지점 스프링강성 6.65kN/mm로 환산하여 레일직 하부의 지지점에 부여 하였다. 연속탄성 기초보 모델은 측정 궤도지지강성 10.65kN/mm를 레일을 지지하는 저부의 면적에 등분포스프링강성으로 부여 하였다. 제안모델은 측정 궤도지지강성 10.65kN/mm를 레일두부의 좌우 직하부에 병렬로 배치된 탄성재와 접촉하는 면적에 등분포스프링강성으로 부여 하였다. 해석 모델별 결과는 표 2와 같이 제안모델의 레일수직변위 및 레일휨응력이 현장측정 결과에 가장 근접하게 해석되었다.

표 2. 현장측정 및 수치해석 결과

Table 2. Field Measured and numerical analysis results

Division	Displacement (mm)	Bending stress (MPa)
Measured(±SD)	3.69 (3.47-3.91)	27.08 (26.89-27.28)
Discrete supported continuous beam model	2.32	42.4
Continuous elastic foundation beam model	2.33	40.8
Proposed model	3.79	28.0

제안모델의 정확성 확보 및 레일특성길이를 분석하고자 그림 7과 같이 레일단위길이 및 차륜배치 조건을 매개변수로 수치해석을 수행 하였다.

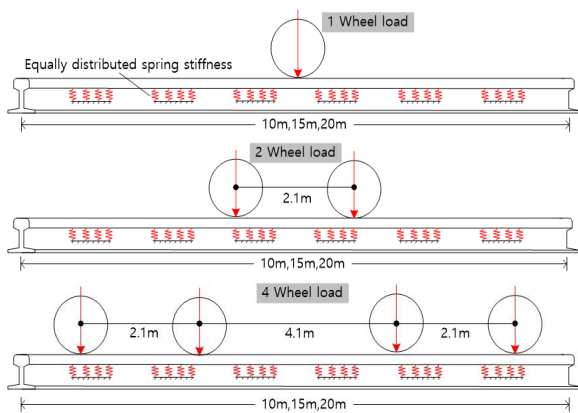


그림 7. 레일길이별 차륜배치

Figure 7. Arrangement of wheels by rail length

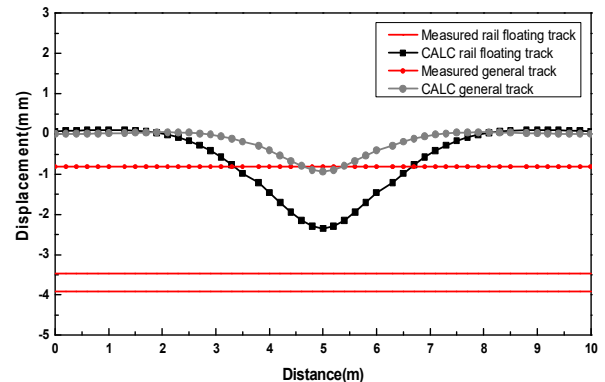
제안모델의 매개변수별 수치해석 결과를 현장측정 결과와 비교하면 표 3과 같다. 레일단위길이별로 레일수직 변위 및 레일휨응력은 1개 차륜 재하조건에서 15m 제안 모델이 측정결과에 가장 근접하게 해석 되었다.

표 3. 제안모델 해석결과

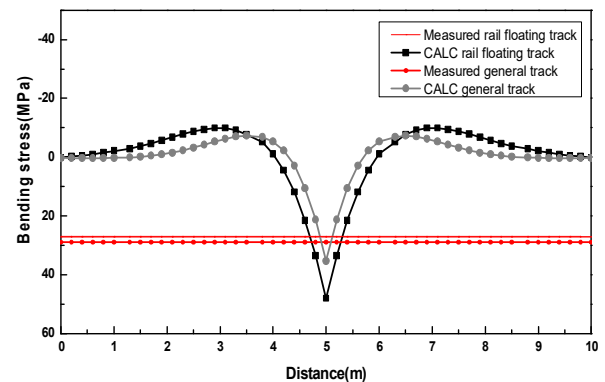
Table 3. Analysis result by proposed model

Division	Measured (±SD)	Numerical analysis of the proposed model			
		Rail length	Wheel quantity		
			1Wheel	2Wheel	4Wheel
Displacement (mm)	3.69 (3.47-3.91)	10m	3.79	4.76	6.27
		15m	3.96	5.02	5.10
		20m	3.83	4.78	4.72
Bending stress (MPa)	27.08 (26.89-27.28)	10m	28.0	21.49	14.17
		15m	27.41	20.59	21.21
		20m	26.57	22.18	21.18

IV. 분석 및 고찰



(a) Vertical rail displacement



(b) Rail bending stress

그림 8. 설계이론 해석 및 현장측정 결과

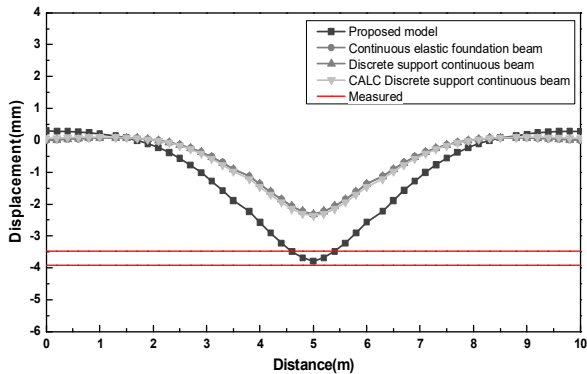
Figure 8. Design theory and field measured results

레일플로팅케도 및 일반케도의 설계이론 결과와 측정결과를 그림 8과 같다. 레일플로팅케도의 설계이론 결과는 측정결과와 비교해서 레일수직변위는 작지만 레일휨응력은 커서 실제거동과는 상이하게 나타난다.

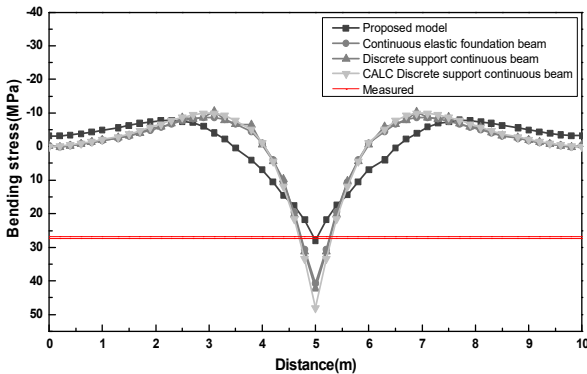
따라서 설계이론은 실제거동을 반영하기에는 적합하지 않은 것으로 분석되었다. 일반케도의 경우는 설계이론 적용이 현장의 거동상태를 충분히 반영하는 것으로 분석되었다.

수치해석모델을 이산지지 연속보 모델, 연속탄성 기초보 모델, 제안모델로 구분하여 해석한 결과는 그림 9와 같다.

제안모델과 측정결과와의 레일수직변위 및 레일휨응력 비교결과, 약 3% 수준으로 유사하게 나타났으나 나머지 모델은 다소 큰 차이를 나타내었다.



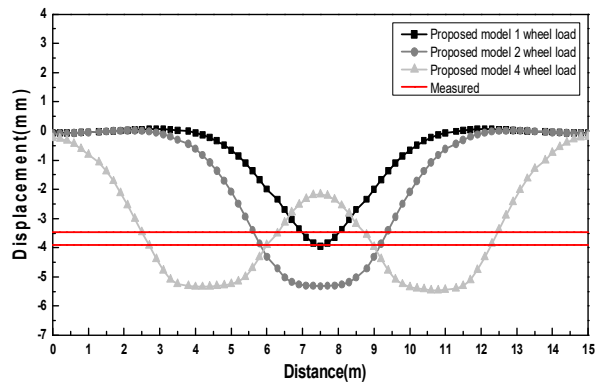
(a) Vertical rail displacement



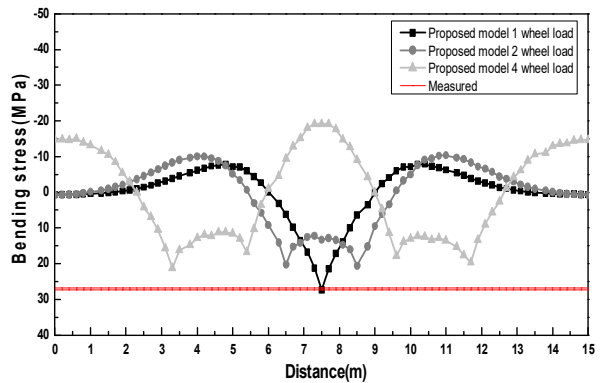
(b) Rail bending stress

그림 9. 수치해석 및 현장측정 결과
 Figure 9. Numerical analysis and field measured results

제안모델을 레일단위길이 10m, 15m, 20m 및 차륜수량 1개, 2개, 4개를 매개변수로 하여 해석한 결과는 그림 10과 같이 15m 모델이 측정결과에 가장 근접하게 나타났다. 1개 차륜 재하시 측정결과와 비교해서 레일

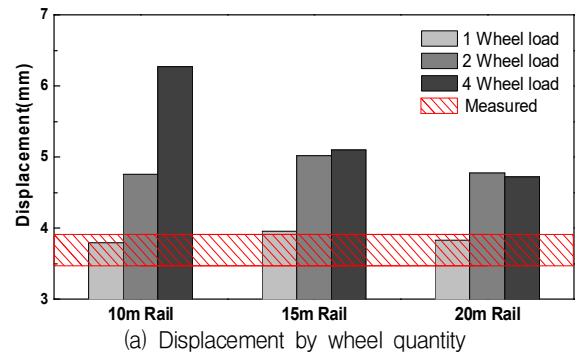


(a) Rail vertical displacement

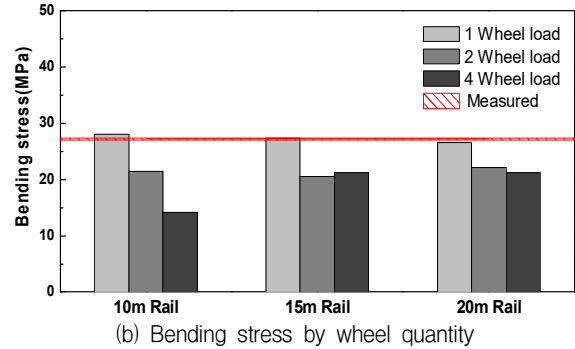


(b) Rail bending stress

그림 10. 15m 제안모델 해석결과
 Figure 10. Analysis result of 15m proposed model



(a) Displacement by wheel quantity

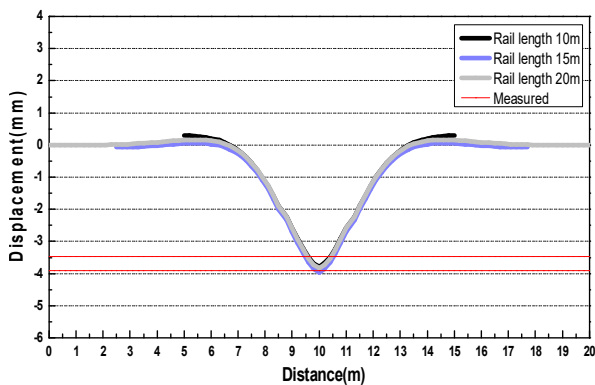


(b) Bending stress by wheel quantity

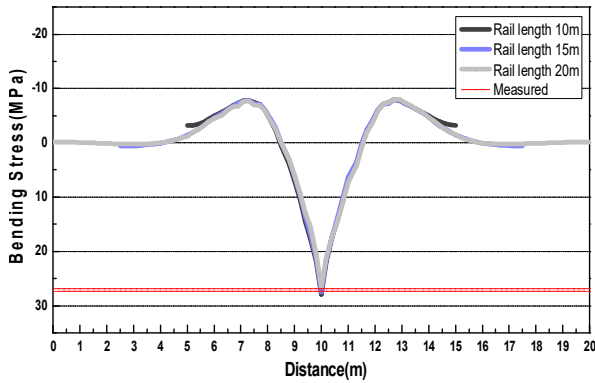
그림 11. 차륜수량별 해석결과
 Figure 11. Analysis result by wheel quantity

수직변위는 1.3% 크고, 레일휨응력은 0.5% 크게 나타났습니다. 2개 차륜 재하시 측정결과와 비교해서 레일수직변위는 28.4% 크고, 레일휨응력은 32.5% 작게 나타났습니다. 4개 차륜 재하시 측정결과와 비교해서 레일수직변위는 30.4% 크고, 레일휨응력은 28.6% 작게 나타났습니다.

레일수직변위 및 레일휨응력의 경우, 그림 11과 같이 레일단위길이별로 1개 차륜에 의한 수치해석이 측정결과를 반영 가능한 것으로 분석되었다. 운중센서를 이용한 궤도계측법의 결과는 1개의 차륜에 의한 결과를 나타내므로, 해석시 2개 이상의 차륜 조건은 레일플로팅궤도의 레일수직변위 및 레일휨응력이 현장측정 결과와 비교해서 과대 또는 과소하게 평가될 수 있는 것으로 분석되었다.



(a) Rail vertical displacement



(b) Rail bending stress

그림 12. 제안모델 길이별 해석결과
Figure 12. Analysis result by proposed model length

본 연구에서는 제안모델에 대한 레일단위길이별 레일수직변위 및 레일휨응력의 수치해석 데이터를 분석하여 레일특성길이를 약 12m로 도출하였다. 해석모델의 길이는 레일특성길이를 포함해야 하며 측정결과에 근접해야 하므로 레일특성길이 12-15m 범위의 해석모

델은 레일플로팅궤도의 실제거동을 충분히 반영 가능한 것으로 판단된다. 제안모델의 단위길이별 레일수직변위 및 레일휨응력의 해석결과는 그림 12와 같이 15m 제안모델에서 1개 차륜 재하시 현장측정 결과에 가장 근접한 것으로 분석되었다.

V. 결 론

본 연구는 레일플로팅궤도의 실제거동을 반영할 수 있는 해석모델을 제안하는 연구로서 현장측정과 수치해석을 통해서 가장 합리적인 모델을 분석 하였다. 주요연구 결과는 다음과 같다.

1) 현장측정 결과 레일플로팅궤도의 레일수직변위는 일반궤도(ERS)와 비교해서 크지만, 레일휨응력은 작게 측정 되었다. 따라서 레일플로팅궤도는 레일의 휨에 의해서 수직변위가 발생되기 보다는 지점의 침하가 전체 변위량에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석 되었다.

2) 레일플로팅궤도를 이산지지 연속보 이론으로 해석한 결과, 레일수직변위 및 레일휨응력이 현장측정 결과와 상이하게 나타났다. 따라서 설계이론은 레일플로팅궤도의 실제거동을 반영하기에는 적합하지 않은 것으로 분석 되었다.

3) 레일플로팅궤도의 해석모델 검토 결과, 레일직하부를 직렬배치 스프링으로 지지하는 모델은 실제거동 반영이 어려웠으며, 레일직하부에 지지점을 갖지 않는 레일두부 병렬지지 스프링모델인 제안모델의 해석결과가 실제거동을 반영하는 것으로 분석 되었다.

4) 제안모델에 대해 레일단위길이별, 차륜 배치별로 수치해석을 수행한 결과, 레일단위길이별로 1개 차륜재하 해석이 실제거동을 반영하며 2개 이상의 차륜 재하 해석은 실제거동을 반영하지 못했다. 향후 노후화에 따른 궤도거동을 평가하기 위해서는 레일특성길이 12m를 포함하는 15m 제안모델이 가장 합리적인 것으로 분석 되었다.

5) 본 연구에서 제시된 해석모델은 향후 레일플로팅궤도에 대한 설계에 활용이 가능하며, 유지관리 시 노후화된 궤도의 거동 예측에 활용이 가능하다.

References

[1] 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.2021.7.3.517>
- [2] J.Y. Choi, J.G. Bong, J.S. Lee, 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>
- [3] 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. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.4.413>
- [4] S.H. Hwang, S.Y. Jang, E. Kim, J.C. Park, “Static and Dynamic Behavior at Low Frequency Range of Floating Slab Track Discretely Supported by Rubber Mounts in Real-Scale Laboratory Test” Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 15, No. 5, pp. 485–497, 2012. <https://doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.5.485>
- [5] I.G. Park, H. R. Kim, S. G. Kwon, J.W. Kim, C. Y. Lee “Analysis of Noise and Vibration Reduction Characteristic within Railway station by Precast Floating Slab Track”, Journal of The Society for Noise and Vibration Engineering Vol. 2018, No. 4, pp. 236–236, 2018. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.2.97>
- [6] Neotrans Co., Ltd. “Track Impact Assessment Research Service Report for Vehicle Operation of Shinbundang Line”, 2010
- [7] J.Y. Choi, “Qualitative Analysis for Dynamic Behavior of Railway Ballasted track”, Ph.D. dissertation, Technical University of Berlin, 2014