

교량 상 자갈궤도의 종저항력 측정을 위한 실험 연구

민경환¹*, 윤경민²

¹충청대학교 공학기술연구원, ²충남대학교 토목공학과

An Experimental Study for Longitudinal Resistance of Ballast Track on Bridge

Kyung-Hwan Min¹*, Kyung-Min Yun²

¹Research Institute for Engineering and Technology, Chungcheong University

²Department of Civil Engineering, Chungnam National University

요약 콘크리트 교량 상에 고속철도의 자갈 궤도가 시공될 경우 장대 레일의 종방향 변위가 고정된 반면 교량 바닥판 슬래브의 종방향 변위가 고정되지 않고, 온도 하중과 외부 하중에 의해 교량과 레일의 상대 변위가 발생한다. 현재 장대 레일 자갈 궤도에 대한 종방향 저항력(KR C-08080, UIC code 774-3)은 교량의 종방향 변위와 자갈 궤도와 콘크리트 슬래브 사이의 마찰력을 고려하고 있지 않다. 또한 종방향 저항력 값은 다소 보수적이어서 철도교의 장경간 및 연속화에 불리한 요소로 작용하고 있다. 따라서 실제의 거동을 보다 효과적으로 반영하기 위해 장대 레일의 종저항력은 콘크리트 슬래브와 궤도 사이의 추가적인 강성을 고려해야 한다. 본 연구에서는 콘크리트 바닥판과 도상 궤도를 모사한 실험체(mock-up test specimen)를 제작하여, 교량 상에 설치된 도상 궤도의 종저항력을 측정하였고, 또한 차륜 하중의 재하 유무에 대해서도 그 거동을 평가하였다. 실험 결과, 최대 종저항력은 현재의 코드와 유사한 경향을 보였으나, 한계 변위까지의 강성은 현재의 코드보다 실험 결과가 작게 측정되는 것으로 나타났다.

Abstract When a ballast track of a high-speed train is constructed on a bridge, the displacement of the bridge decks can occur because they are not fixed to the rails. Moreover, relative displacements occur between the bridge and rails caused by temperature changes and external loads. The current longitudinal resistance criteria (UIC Code 774-3, KR C-08080) on ballast tracks with continuous welded rails (CWRs) do not take into account the longitudinal movement of the bridge and the frictional force between the ballast and slabs. In addition, the magnitude of the longitudinal resistance, k , is calculated somewhat conservatively and, (therefore?) it acts as an unfavorable element in the design of long span and continuous railway bridges. Thus, in order to replicate the actual behavior more effectively, the longitudinal resistance of CWRs should take into account the additional rigidity between the slab and track. In this study, the longitudinal resistances of the ballasted track on the bridge were analyzed by carrying out an experimental study with a test setup designed to simulate the deck and bed track. In the test results, the maximum longitudinal resistances of the tests were similar to the resistances of the current codes, however, the measured longitudinal stiffness designed to limit the displacement of the tests were much smaller in comparison with the longitudinal stiffness on the codes.

keywords : Ballast track, Bridge deck, CWR track, Longitudinal resistance, Mock-up test

1. 서론

체결장치에 의해 Fig.1과 같이 양단에서 부동구간(immovable zone)이 발생한다. 이 부동구간이 교량 상

장대레일(continuous welded rail, CWR)은 이중탄성 궤도에 위치할 경우, 궤도와 교량 간의 상호작용이 발생하여, 본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(15RTRP-B071565-03)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Kyung-Hwan Min (Chungcheong Univ.)

Tel: +82-43-230-2678 email: alskh@ok.ac.kr

Received March 25, 2016

Revised April 15, 2016

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

레일의 길이 방향으로 변위 및 응력이 불균일하게 발생한다[1,3]. 이러한 상호작용의 해석 시에는 온도 하중과 차륜하중을 동시에 고려하여 도상의 비선형 해석을 수행해야 한다.

현재 장대레일 궤도의 종방향 저항성 해석에 사용하고 있는 물성치는 장대레일의 일부분을 모사하여 레일의 종방향 및 횡방향 저항력에 대한 실험을 통해 얻어진 연구 결과물을 수정 보완하여 사용하고 있다. 따라서 궤도-교량의 비선형 해석에 있어서 궤도와 교량간의 상대적인 거동에 따른 연성효과를 충분히 반영하지 못하고 있다.

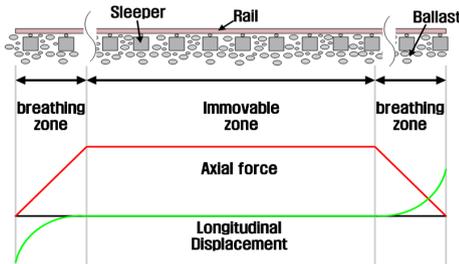


Fig. 1. Behaviors of CWR track

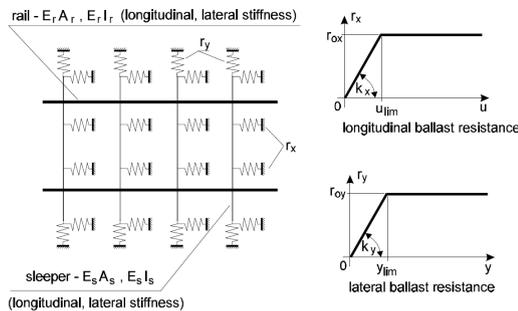


Fig. 2. 2-D model of track structure on TU Delft's study

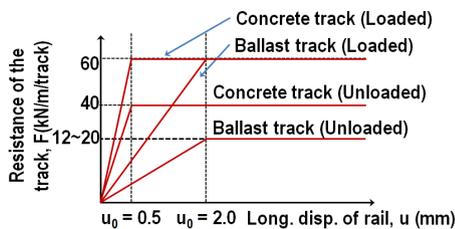


Fig. 3. Longitudinal track resistance of domestic criteria

ERRI D 202에서는 자갈 도상 장대레일의 횡저항력 특성 분석을 위해 실험체 제작하여 실험을 수행하였다[4]. 또한 일련의 연구에서 Fig. 2와 같이 해석

모델을 구성하여, $\Delta T = 50^{\circ}C$ 의 온도 하중이 가해질 경우 도상 궤도에서 발생하는 등가의 저항력(1m당)을 제시하였다.[5] 이러한 ERRI D 202의 연구는 장대레일 궤도의 해석에 필요한 특성치를 제시한 초기 모델이며, 이후에 각국의 환경을 고려하여 수정되어 사용하고 있고 [2], 국내 기준은 Fig. 3과 같다[1]. 본 연구에서는 교량 바닥판과 자갈 궤도를 모사한 실험체를 제작하여, 바닥판 상에 설치된 도상 궤도의 종저항력을 측정하였다. 또한 차륜 하중의 재하 유무에 대하여 종저항 거동을 평가하였다.

2. 실험 계획 및 실험체 제작

2.1 실험 계획

전술한 바와 같이 자갈 궤도의 종방향력에 대한 연구는 교량의 종방향 이동과, 자갈 도상과 교량 슬래브 간의 마찰력을 고려하지 못하고 있다. 따라서 교량상의 장대레일의 종방향력은 교량 바닥판과 궤도 사이에 추가의 강성을 고려해야 실제 거동을 보다 효과적으로 모사할 수 있다[6]. 또한 기존의 연구 결과를 토대로 할 때, 궤도 시스템의 실험을 위해서는 침목 수를 기준으로 할 때, 5개 이상의 UIC 60kg 침목이 설치된 규모의 실험체를 제작할 필요가 있을 것으로 판단된다[4,7].

또한 교량 바닥판을 모사한 구체에 30mm 이상의 변위에 대한 변위 제어 실험을 수행하여 교량상의 자갈 궤도의 종방향 저항력 특성에 대한 평가가 이루어져야 한다. 이에 따른 실험 계획은 Fig. 4와 같다. 즉 레일의 종방향 변위가 발생하지 않도록 레일의 단부를 고정하고 바닥판 슬래브에 종방향으로 하중을 가력하여 슬래브의 변위를 유도한다. 이때 고정된 레일 단부에 설치한 로드셀에서 하중을 측정한다. 또한 레일과 슬래브 간의 상대 변위를 측정하여, 하중-변위 관계를 도출하도록 하였다.

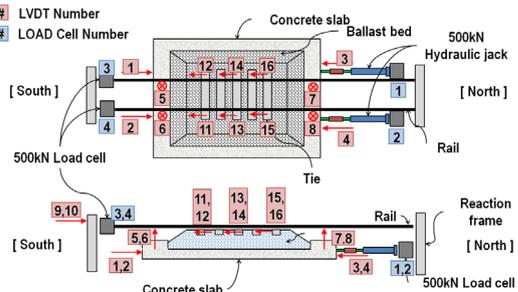


Fig. 4. Schematic draw of test program

2.2 바닥판 제작

기존의 연구 결과[3,4]를 토대로 하여 5개의 UIC 60kg 침목이 체결된 규모의 실험체를 제작하였다. 따라서 본 연구에서는 바닥판 슬래브를 길이 7m, 폭 5m, 두께 240mm의 철근콘크리트 구조로 제작하고, 바닥판의 철근은 D16 철근을 200mm 간격으로 종방향 및 횡방향에 각각 2단으로 배근하였다. 실험실의 여건 상 제작된 슬래브를 바닥에서 띄어서 설치할 수가 없으므로, 실험실 바닥과 슬래브 간의 마찰력 감소를 위해 Fig. 5와 같이 테프론(Polytetrafluoroethylene, PTFE, 마찰계수: 0.05~0.1) 플레이트 사용하였다. 400×400mm 크기의 테프론 플레이트 2장을 겹치고 플레이트 사이에 윤활 그리스를 도포하였고, 종방향으로 5개소씩 2열로 슬래브 하단에 설치하였다.

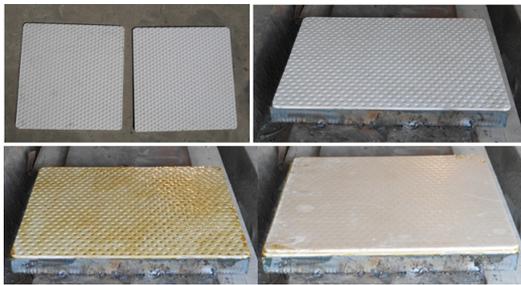


Fig. 5. PTFE sliding plate

2.3 궤광 제작 및 하중 재하 조건

자갈도상 및 궤광은 Fig. 6과 같이 고속철도용 궤광을 반영하여, UIC 60kg 침목 5본을 슬래브 상단에서 350mm 높이에 위치하고 침목 간 간격은 600mm로 설치하였다. Mock-up 시험체의 연속화 모사를 위해서 e-clip으로 체결한 5본의 침목 양 외단에 레일과 체결하지 않은 침목을 1개씩 더 설치하였고 하였다. Fig. 7은 자갈궤도가 설치된 모습이다.

레일의 길이는 바닥판 길이와 유압실린더 등을 고려하여 8.5m로 하였고, 실험 시 측정 항목은 Fig. 4 및 Table 1과 같다. 500kN 유압 실린더로 종방향 하중을 슬래브에 가력하고, 실린더 전면부에 로드셀을 설치하여 하중을 측정하였다. 반력프레임에 고정된 레일의 단부에도 각각 로드셀을 설치하여 반력을 측정하였다. 또한 슬래브의 종방향 변위, 레일 단부의 수직방향 변위, 레일과 침목간의 상대변위 등을 측정하였다. 차륜 하중은 Fig. 8과 같이 170kN을 액추에이터로 중앙 침목부의 레일에

재하하였다. 액추에이터로 재하된 하중에 의해서 궤광의 종방향 변형이 구속될 수 있으므로 원형 강봉을 삽입하여 이동이 가능하도록 하였다.

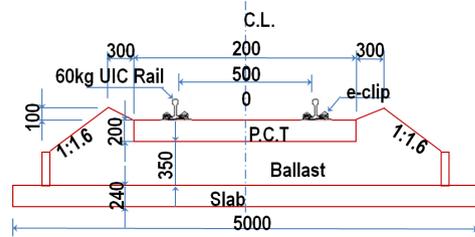


Fig. 6. Section details of track for high-speed train



Fig. 7. Fabrication of track

Table 1. Measurement of longitudinal resistance

Measurement item	Count	Marks
Cylinder loads	2 ea	LOAD 1, 2
Rail reaction forces	2 ea	LOAD 3, 4
Longitudinal displacements of slab	4 ea	LVDT 1~4
Vertical displacements of rail from slab	4 ea	LVDT 5~8
Reaction block displacements	2 ea	LVDT 9, 10
Rail-sleeper relative displacements	6 ea	LVDT 11~16

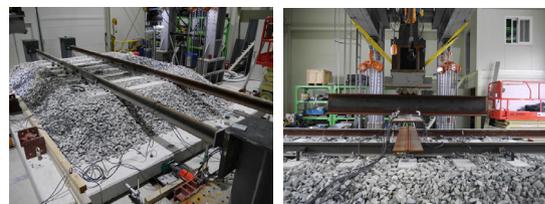


Fig. 8. Test setup for without and with wheel load

3. 실험 결과 및 분석

3.1 바닥판 하부 마찰저항력

자갈 도상과 바닥판 하중에 의한 테프론 플레이트의 마찰력 측정을 위해 자갈케도 설치 전에 슬래브 종방향 하중을 가하여 마찰력을 측정하였다. 또한 가설된 자갈 케도의 하중이 더해진 전체 궤도의 하중에 대한 슬래브 하단의 마찰력을 측정하였다. 측정된 하중과 변위 관계는 Fig. 9 및 10과 같고, 정지마찰력과 미끄럼 마찰력은 Table 2와 같다.

바닥판 하중에 의한 마찰저항력은 정지마찰력은 약 13kN, 운동마찰력은 약 8kN으로 측정되어 바닥판 자중에 비해 작은 마찰력(마찰계수: 약 0.05)이 발생하였다. 전체 하중에 대한 마찰력 측정 결과는 최대정지마찰력 약 23kN, 운동마찰력 약 15kN으로 측정되어, 궤도의 종방향력 측정에 합리적인 경계조건으로 판단된다.

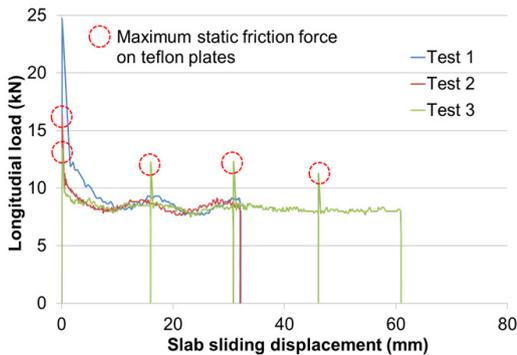


Fig. 9. Friction load measurements for slab weight only

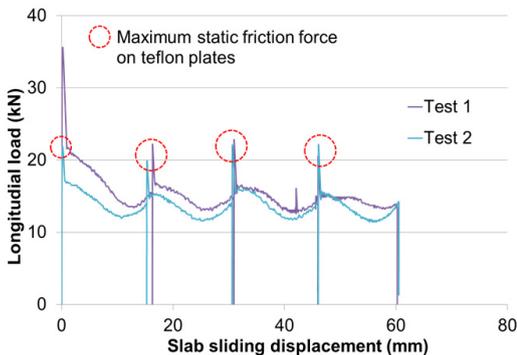


Fig. 10. Friction load measurement for ballast track and slab weight

Table 2. Friction of slab

Weight	Static friction (kN)	Sliding friction (kN)
Slab only	13	8
Ballast track and slab	23	15

3.2 차륜하중 비재하 시의 종저항력 특성

궤광 하중만이 재하되었을 때의 종저항력에 대해서는 바닥판의 북단과 남단에서 각각 2회씩 하중을 재하하여 실험을 수행하였다. 슬래브의 변위가 약 50mm가 발생할 때까지 측정하였고, 그 결과는 Fig. 11과 같다. 유압 실린더 전면에 설치된 로드셀에서 측정된 하중은 약 70~80kN으로 측정되었다. 각 실험 종료 후에 자갈을 재다짐을 하고 다음 실험을 실시하였기 때문에 각 실험 간에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 11(a) 그래프에서 하중 재하 초기에 발생하는 굴절은 테프론 바닥판의 정지마찰력에서 기인한 것으로 판단된다. 즉 실린더 하중(a)과 레일의 단부에서 측정하 하중(b)의 차이는 바닥판 하부의 마찰 저항력 측정치와 유사하고, 이에 따라 레일의 축방향 하중 측정치(약 55kN)가 교량 상의 자갈케도의 종방향 저항력으로 가정할 수 있다.

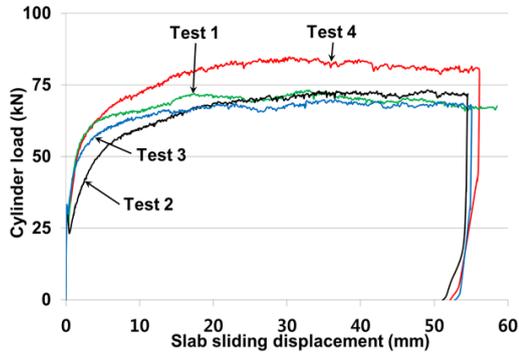
단위 길이(1m)당 궤도의 종방향 저항력은 Fig. 11(c)와 같고, 해당 그래프에서 bilinear로 표시한 것은 현재 코드에서 제시하고 있는 값이다. 실제 실험 결과에서는 코드와 달리 초기부터 하중-변위 관계가 계속적으로 곡선으로 나타났고, 이는 ERRI D202의 실험 결과와 동일한 경향을 보였다. 따라서 초기 강성이 작게 측정된 Test 2의 결과를 제외하면 차륜 하중이 없는 경우 현재 코드에서 제시하는 종방향 특성치와 유사하였다. 향후 실험 횟수를 증가하여 데이터의 신뢰도 향상을 유도해야 할 것으로 판단된다.

3.3 차륜하중 재하 시의 종저항력 특성

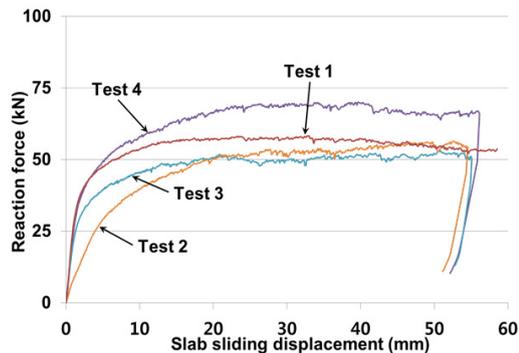
차륜하중은 170kN의 하중을 액추에이터로 중앙 침목의 위치의 레일에 가력 하였고, 슬래브 북단에서 2회, 남단에서 1회 하중을 가하여 총 3회의 실험을 실시하였다. 차륜 하중 재하에 따른 실험도 슬래브의 변위가 약 50mm가 발생할 때까지 측정하였고, 실험 결과는 Fig. 12와 같다. 유압 실린더에서 측정하 하중은 Fig. 12(a)와 같이 약 200kN으로 측정되었다. 또한 종방향 하중 재하 초기의 굴절은 앞선 비재하 실험과 같이 테프론

플레이트의 정지마찰력에 의한 것으로 판단된다. 변곡점 이후에 나타나는 굴절은 도상 궤도의 이동으로 인해 변위 제어를 하는 액추에이터에서의 하중이 변동하여 발생하였다. 차륜 하중 재하 시에는 하중이 수렴하지 않고 실험 종료 시까지 계속해서 하중이 증가하는 것으로 나타났다.

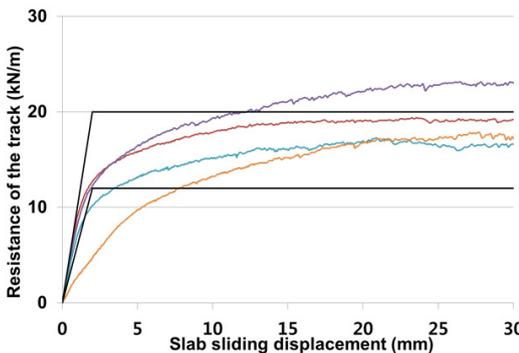
에서 발생한 마찰력에서 기인한 것이다. 이에 따라 레일 단부에서 측정된 하중(약 175kN)을 종방향 저항력으로 가정할 수 있고, 단위 길이당 궤도의 종저항력은 Fig. 12(c)의 그래프와 같다. 종방향 저항력의 크기는 코드에서 제시한 값에 근접하게 나타났으나 초기의 강성은 코드보다 작게 나타났다.



(a) Cylinder load of slab



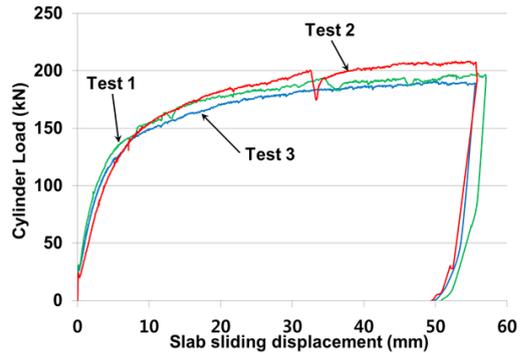
(b) Reaction force of rails



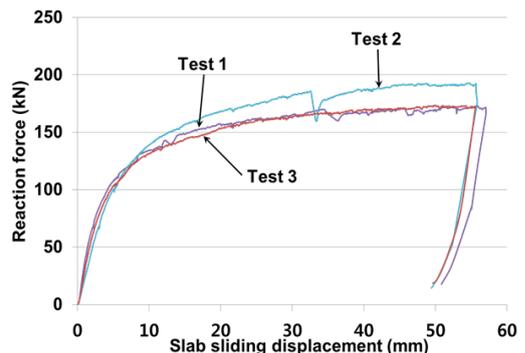
(c) Resistance of the track

Fig. 11. Without vertical load: ballast track weight only

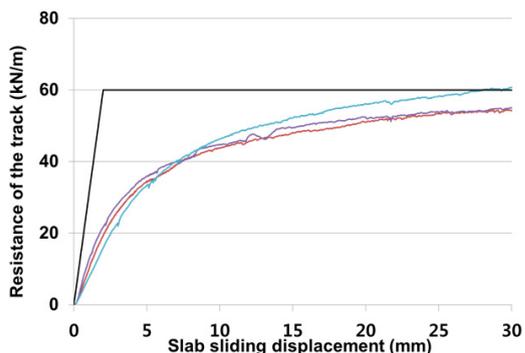
실린더에서 측정된 하중(a)와 레일 단부에서 측정된 하중(b)의 차이는 앞선 실험과 마찬가지로 슬래브 하단



(a) Cylinder load of slab



(b) Reaction force of rails



(c) Resistance of the track

Fig. 12. Track weight and 170 kN vertical load

KR code와 UIC code에서는 하중 재하 시 자갈궤도에서는 레일 변위가 2mm일 때 60kN/m로 하고 있으나,

실험 결과에서는 해당 변위에서 종방향 저항력이 약 20kN/m로 측정되었다. 즉 토공부의 자갈케도의 실험 결과를 토대로 구성된 현재 코드는 교량 상에 가설된 자갈케도의 차륜 하중 재하 시의 종저항력의 강성을 과대평가하는 것으로 사료되며, 실험 결과에서는 코드에서 제시하는 그래프보다 훨씬 완만하고 지속적으로 하중이 증가하는 것으로 나타났다. 향후 재하 하중을 달리 하고 실험 횟수를 증가하여 데이터의 축적이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 바닥판과 도상 궤도를 모사한 실험대형 실험체를 제작하여, 교량 상에 설치된 도상 궤도의 종저항력을 측정하였고, 또한 차륜 하중의 재하 유무에 대해서도 그 거동을 평가하였고 결론은 다음과 같다.

- 1) 고속철도용 자갈도상을 모사한 궤광에 5개의 UIC 60kg 침목을 설치한 실험대형 실험체를 제작하였고, 170kN의 차륜하중 재하 유무에 따른 레일의 종저항력을 측정하였다.
- 2) 차륜하중 비재하 시 궤도의 종저항력은 약 55kN으로 측정되었고, KR code 및 UIC code에서 제시하는 범위와 유사한 것으로 나타났다.
- 3) 차륜하중(170kN) 재하 시에는 궤도의 단위 길이당 종저항력은 약 58kN으로 측정되어 현재의 코드와 유사하게 나타났다. 하지만 한계 변위까지의 강성은 실험 결과가 현재 코드의 하중 재하 시의 강성의 절반 정도로 작게 나타났다.
- 4) 향후 데이터의 신뢰도를 높이기 위한 추가 실험과 다양한 재하하중에 따른 종저항력 특성을 평가해야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] KR (2013) Ballast Track Structures, KR C-14030, Korea Rail Network Authority.
- [2] KR (2012) Track-Bridge Longitudinal Interaction Analysis, KR C-08080, Korea Rail Network Authority.
- [3] UIC (2001) Track/bridge Interaction Recommendations for Calculations, UIC Code 774-3, International Union of Railways, pp.2-8

- [4] R. J. van't Zand and ing. J. Moraal (1997) Ballast Resistance under Three-Dimensional Loading, ERRI D 202/DT 362, European Rail Research Institute.
- [5] C. Esveld (1997) Improved knowledge of CWR track, Delft University Press.
- [6] K.-C. Lee (2014) Feasibility Analysis of Sliding Slab Track for Reducing Track-Bridge Interaction, Proceedings of 2014 Spring Conference of the Korean Society for Railway, pp.916-920.
- [7] M.-C. Kim, Y.-H. Bae, and Y.-G. Park (2014) Experimental Study on the Improvement Measures of Ballasted Tracks Considering the Speed-up of Conventional Lines, Proceedings of 2014 Spring Conference of the Korean Society for Railway, pp.1669-1676.

민 경 환(Kyung-Hwan Min)

[정회원]



- 2007년 2월 : 고려대학교 일반대학원 구조공학 (공학석사)
- 2012년 8월 : 고려대학교 일반대학원 구조공학 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 2013년 6월 : 고려대학교 부설 공학기술연구소
- 2013년 7월 ~ 현재 : 충청대학교 공학기술연구원 선임연구원

<관심분야>
콘크리트공학, 구조공학

윤 경 민(Kyung-Min Yun)

[정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>
구조공학, 강구조, 궤도공학