

간선철도 고속화를 고려한 자갈도상궤도구조 개량방안에 대한 실험적 연구

Experimental study on the improvement measures of ballasted tracks considering the speed-up of conventional lines

김만철*†, 배영훈*, 박용걸**

Man-Cheol Kim*†, Young-Hoon Bae*, Yong-Gul Park**

Abstract With respect to mainline railway, the increase in speeds up to more than 200km/h is currently being promoted to secure the competitiveness of the railway, lead balanced regional development and enhance its status as a key means of transportation for eco-friendly and sustainable green growth. In this regard, as the maintenance costs are expected to increase due to higher burden of dynamic track forces on the ballasted track designed with 150km/h-class, there is a need to establish improvement measures for the ballasted track to reduce maintenance costs, considering the speed increase of the mainline railway. In this study, load characteristics (wheel load and excitation frequency) acting on the track when trains operate at the speed of 230km/h were investigated through a regression analysis and a speed increase test using the KTX-Sancheon, and the optimal improvement measures considering the speed increase of the mainline railway were established through the economic analysis considering the deduced track settlement characteristics as well as construction and maintenance costs by applying the load characteristics to full-scale specimens by type of ballasted track structures which combine components of the ballasted tracks applied in Korea.

Keywords: Conventional lines, Ballasted track, Speed up, Track settlement, LCC

초 록 철도의 경쟁력 확보 및 지역균형 발전을 선도하고, 친환경, 녹색성장의 핵심 교통수단인 철도의 위상 강화를 위해 현재 간선철도에 대해 200km/h 이상으로 고속화를 추진하고 있다. 이에 따라 150km/h급으로 설계되어 운영중인 간선철도 자갈도상궤도에서는 궤도 부담력 증가로 유지보수의 증가가 예상됨에 따라, 간선철도 고속화를 고려한 유지보수 저감을 위한 자갈도상궤도의 개량방안 정립이 요구된다. 본 연구에서는 KTX 산천을 이용한 속도 단계별 증속시험 및 회귀분석을 통해 230km/h 주행시 궤도에 작용하는 하중 특성(윤중 및 가진주파수)을 정립하였으며, 이를 국내에서 적용되고 있는 자갈도상궤도의 구성품을 조합한 자갈도상궤도구조 형식별 실험체 시뮬레이션에 재하하여 도출된 궤도침하 특성 및 건설비와 유지보수비를 고려한 경제성 분석을 통해 간선철도 고속화를 고려한 자갈도상궤도구조의 최적 개량방안을 정립하였다.

주요어 : 간선철도, 자갈도상궤도, 고속화, 궤도침하, LCC

† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도인프라연구단 TFT(kimmc@krrri.re.kr)

* 한국철도기술연구원, ** 서울과학기술대학교 철도전문대학원

1. 서론

현재 국내철도에서는 경부고속철도의 성공적인 운영과 함께 대국민에 대한 고품질의 철도서비스 제공 및 친환경, 녹색성장의 핵심 교통수단으로서의 위상강화를 위해서 최고속도 150km/h로 운행되어온 간선철도에 대해 200km/h 이상으로 고속화를 추진하고 있다. 현재 국내의 자갈도상 궤도는 설계속도 150km/h 이하와 300km/h 대역의 구조형식에 대해서만 운영경험을 가지고 있으나, 고속화 속도대역인 200km/h 이상에 대해서는 150km/h 또는 300km/h 궤도형식을 준용하고 있는 상황이다. 고속화 속도대역인 200km/h 이상에 대해 150km/h 대역의 궤도형식을 적용할 경우에는 유지보수의 증가가, 300km/h 궤도형식을 적용할 경우에는 초기공사비의 증가가 예상된다. 따라서, 향후 원활한 간선철도의 고속운영 기반 확보를 위해서는 간선철도의 고속화 초기에 간선철도 고속화를 고려한 최적의 자갈도상궤도의 개량방안 정립이 요구된다.

본 연구에서는 현장 증속시험을 통해 도출된 230km/h 대역의 궤도에 작용하는 하중을 국내에서 적용되고 있는 자갈도상궤도의 구성품을 조합한 실험체에 재하하여 분석된 궤도침하율 특성 및 건설비와 유지보수비를 고려한 간선철도 고속화에 대한 자갈도상궤도구조의 최적 개량방안을 정립하였다.

2. 본론

2.1 실험을 위한 시험하중

간선철도 고속화에 따른 자갈도상궤도 유지보수 저감을 위한 최적의 자갈도상궤도 구조선정을 통한 개량방안 수립을 위해서는 고속화에 따른 궤도부담력 검토가 선행되어야 한다. 이를 위해서 전라선 구간에서 KTX산천에 대해 속도단계별 증속 시험을 수행하였다.

그림 1은 KTX산천을 이용하여 약 150km/h에서 20km/h 씩 약 210km/h까지 속도단계별 증속 시험을 통해 측정된 최대 동적윤중과 최대 143km/h로 영업운행 중인 무궁화 기관차에 대한 최대 동적윤중을 나타낸 것이다. 정적윤중 85kN인 KTX산천이 210km까지 증속했을 때 발생하는 동적윤중은 토공 구간에서 116kN으로, 교량 구간 및 터널 구간에 비해 가장 크게 나타났다. 이 값은 또한 정적윤중 110kN인 무궁화 기관차가 최대 143km/h 주행시 가장 크게 측정된 토공 구간에서의 동적윤중 108kN에 비해서도 큰 것으로 분석되었다. 이는 정적축중이 작더라도 고속운행시 충격에 의해 궤도에 작용하는 동적윤중이 크게 나타나는 것으로 이해할 수 있다.

따라서 KTX산천이 간선철도 구간을 230km/h 대역까지 고속운행 할 경우 현재 간선철도에서 최대 150km/h로 운행중인 기관차에 비해 정적윤중이 작더라도 궤도에 작용하는 동적윤중이 크게 작용하여 유지보수의 증가가 예상되므로 유지보수 저감을 위한 최적 자갈도상궤도 개량방안 수립이 필요한 것으로 검토되었다.

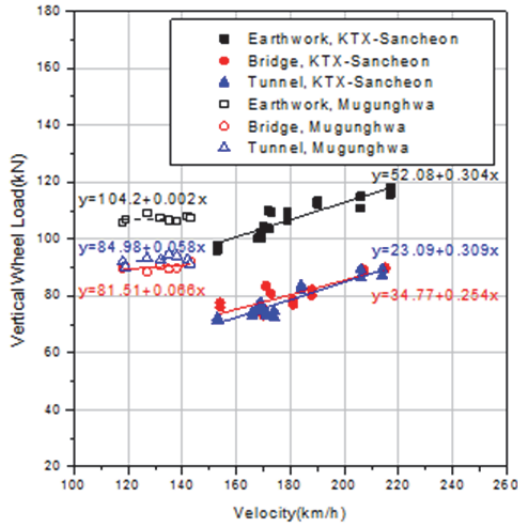


Fig. 1 Vertical loads measured on Field tests

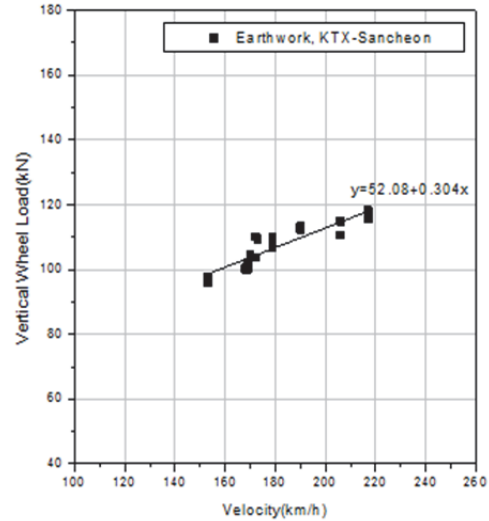


Fig. 2 Regression results of the Vertical loads

그림 2는 속도단계별 증속 시험에서 토공 구간, 교량 구간 및 터널 구간 중에서 동적 운중이 가장 크게 나온 토공구간에 대한 최대 운중에 대한 회귀분석식을 정리한 것이다. 상기의 회귀분석식을 이용하여 외압을 통해 다음과 같이 간선철도 230km/h 증속에 대한 궤도침하 특성 분석을 위한 실험하중 크기 및 주파수를 산정하였다.

- 230km/h에 대한 실험하중(kN) : 150
 - 230km/h 주행시 동적운중(P) : $122 = 52.08 + 0.304 \times 230$
 - 부족켄트에 의한 동적운중 증가계수 : 1.2
 - 실험하중(kN) : $150 = 1.2P$
- 230km/h에 대한 실험 가진주파수(Hz) : 3.4
 - KTX 산천 대차중심거리(m) : 18.7
 - 속도(km/h) : 230
 - 실험 가진주파수(Hz) : $3.4 = (230/3.6)/18.7$

2.2 실험하중 Cases 정립 및 시험체 구축 방안

간선철도 고속화에 따른 자갈도상궤도 유지보수 저감을 위한 최적 자갈도상궤도 개량 방안을 정립하기 위하여 실시할 실험하중 시험에 대한 시험체로 본 연구성과의 실용화 및 현장 적용성 촉진을 위하여 현재 국내에서 사용중인 기존선 및 고속선의 궤도구성품을 조합하여 실험하중 Cases를 정립하였다(표 1).

Table 1. Types of full-scale specimens

Types	Rail	Fastening System ¹⁾	Sleeper	Ballast depth	Ballast type
Case 1	KR60(60K)	e-clip, TPU 5mm (≒400kN/mm)	PC Sleeper (50/60kg, 2.4m)	300mm	Conventional line
Case 2	UIC60	e-clip, Rubber 10mm (80~120kN/mm)	PC Sleeper (UIC60, 2.6m)	300mm	High speed line
Case 3	UIC60	e-clip, Rubber10mm (80~120kN/mm)	PC Sleeper (UIC60, 2.6m)	350mm	Conventional line
Case 5	KR60(60K)	W14K (80kN/mm)	Vossloh Sleeper (50/60kg, 2.4m)	300mm	High speed line

¹⁾ Loading range to test static stiffness: 20~95kN

각 실험형 시험 Cases에 대한 횡방향 도상 단면은 아래의 그림과 같다. 시험체 하중 재하시 궤도침하하는 도상자갈의 공극 감소 및 유동에 의해 유발되기 때문에 횡방향에 대해서 구속이 발생되지 않도록 시험체를 구축하였다.

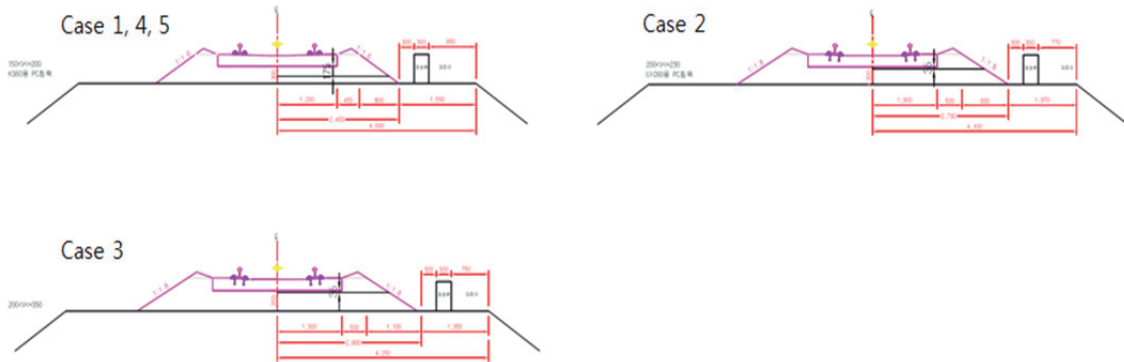


Fig. 3 Section profiles of full-scale specimens

시험체 구축시 상기에서 검토한 시험체의 폭과 더불어 길이 또한 중요하게 고려되어야 할 인자이다. 이와 관련해서 궤도의 특성길이를 통해 검토할 수 있다. 하중을 재하하는 지점에서 변위가 “0”이 되는 지점이 $3/4\pi L$ 이다. 실험형 시험의 경우 실제 궤도와 같은 하중분산 효과가 구현되기 위해서는 이 지점까지 시험체의 길이가 확보되어야 한다. 각 실험형 시험 Cases 중에서 경부고속철도 1단계 자갈도상궤도에 적용한 궤도구성품을 적용한 Case 2의 경우가 특성길이 L이 가장 큰 경우로, 이에 대해 보수적으로 $L=0.7m$ 적용시, 하중 재하지점으로부터 변위가 “0”이 되는 지점까지 요구되는 길이는 $3/4\pi L=1.65m$ 이다. 따라서 횡방향 도상 단면을 토조 벽체의 구속 없이 구축할 수 있는 횡방향으로 시험체를 구축할 경우 토조의 폭이 4.5m이기 때문에 하중 재하지점으로부터 변위가 “0”이 되는 지점 1.65m를 포함 하고 있어 실제 궤도와 같이 하중분산 효과를 적절히 구현할 수 있는 것으로 판단된다.

아래의 그림은 실험형 시험체 구축을 위한 부설작업 공정을 나타낸 것이다. 노반침하에 의한 영향을 최소화하기 위하여 강화노반 및 진동다짐을 실시하였으며, 도상다짐 차이로 인한 오차를 최소화하기 위하여 10cm 두께로 도상 자갈을 살포한 후, 휴대용 다짐기를

이용하여 다짐을 실시하였다. 하중은 하중 재하지점으로부터 변위가 “0”이 되는 지점 1.65m를 포함하기 위하여 600mm 간격으로 총 침목 7장으로 구축된 시험체의 중간에 위치한 침목 상부에 액츄에이터를 위치하여 재하하였으며, 동일 위치의 레일 저부에 변위계를 설치하여 하중재하에 따른 궤도 침하를 측정하였다.



Fig. 4 Construction processes of full-scale specimens



Fig. 5 Dynamic tests of full-scale specimens

2.3 실대형 시험을 통한 궤도침하 특성 및 경제성 분석

실대형 시험을 통한 반복재하에 따른 궤도침하 특성은 Sato 박사의 궤도침하 모델을 참고하여 분석하였다. 반복재하에 따른 궤도침하 분석에서는 DTS(8만톤) 및 시운전차량(2만톤)에 해당하는 초기 10만톤은 궤도 안정화 단계로 고려하여 분석에서 제외하였다. 또한 Korail의 '12년 운행선 최대 열차 통과톤수(경부선 노량진-영등포) 4,265만톤에 해당

하는 반복횟수 150만회(통과톤수 4,500만톤=150만회*30톤) 침하율을 연 침하율로 적용하였다.

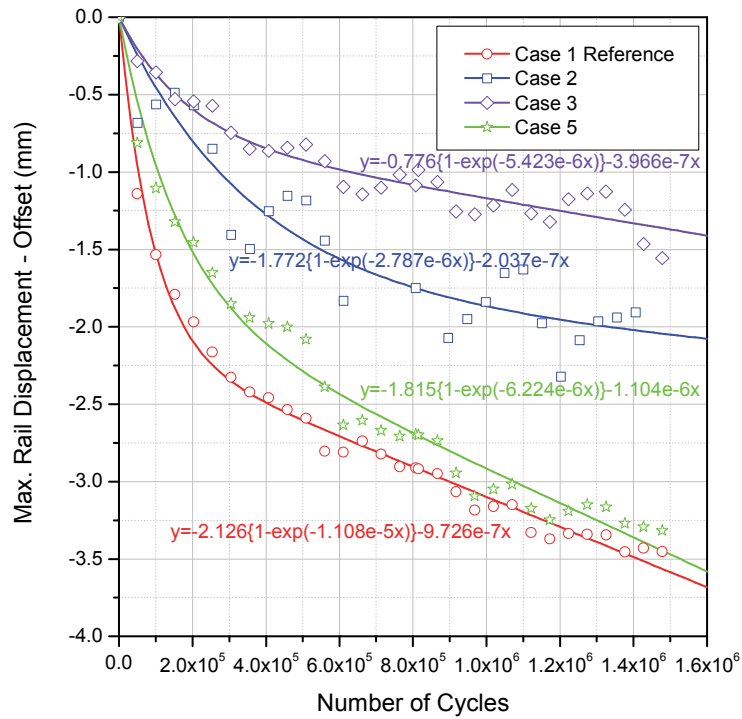


Fig. 6 Characteristics of track settlement due to repeated loading test for full-scale specimens

Table 2. Ratio of track settlement

Num. of repeated loading	300,000	600,000	900,000	1,200,000	1,500,000
Track settlement(mm)					
Case 1	-2.34	-2.71	-3.00	-3.29	-3.58
Case 2	-1.07	-1.56	-1.81	-1.95	-2.05
Case 3	-0.74	-0.98	-1.13	-1.25	-1.37
Case 5	-1.87	-2.43	-2.80	-3.14	-3.47
Ratio of track settlement to Case 1(%)					
Case 1	100	100	100	100	100
Case 2	45	58	60	59	57
Case 3	32	36	38	38	38
Case 5	80	90	93	95	97

Table 3. LCC analysis

Types	Construction cost			Annual maintenance cost	LCC			
	Embankment	Track	Total		0 year	5 years	10 years	15 years
Case 1	12,421	1,532	13,953	59.7	13,953	14,219	14,437	14,617
Case 2	12,421	1,646	14,067	34.4	14,067	14,220	14,346	14,449
Case 3	12,700	1,800	14,500	23.2	14,500	14,603	14,688	14,758
Case 5	12,421	1,648	14,069	57.9	14,069	14,327	14,539	14,713

기존 간선철도에 적용되고 있는 궤도구성품을 적용한 Case 1을 기준으로 연 궤도침하율을 분석한 결과 고탄성 패드, 침목중량화 및 도상두께를 350mm 적용한 Case 3가 연 침하율이 가장 적은 것으로 나타났으며, 고탄성 패드만을 적용한 Case 5는 Case 1과 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 고탄성 패드, 침목중량화 및 도상두께 300mm를 적용한 Case 2의 경우에는 Case 1을 기준으로 57%로, Case 3에 비해 크게 나타났으나 LCC 분석결과 가장 경제성이 좋은 것으로 분석되었다(표 3). LCC 분석에서 초기사업비는 침목 및 궤도단면을 고려하여 Case 1, 2 및 5에 대해서는 시공기면폭 4.0m, Case 3에 대해서는 4.25m를 적용하여 산정하였다. 또한 유지보수 비는 2013년 궤도공사비와 “자갈도상과 콘크리트도상 궤도구조의 경제성 비교(백재욱 외 2인, 유신기술회보 제13호, pp10~34, 2006. 12)” 결과를 참조하여 Case 1에 대해 적용하고, Case 2, 3 및 5의 경우에는 Case 1의 유지보수비를 기준으로 실험결과에 따른 연간 침하율을 궤도침하와 관련된 항목에 적용하여 산정하였다. 생애주기 비용(PVLCC) 산정시에는 현재가치 기준(할인율 $r=4%$)을 적용하였다.

3. 결론

본 연구에서는 KTX 산천을 이용한 속도 단계별 증속시험 및 회귀분석을 통해 230km/h 주행시 궤도에 작용하는 하중 특성(윤중 및 가진주파수)을 정립하였으며, 이를 국내에서 적용되고 있는 자갈도상궤도의 구성품을 조합한 자갈도상궤도구조 형식별 실험체에 재하하여 도출된 궤도침하율 특성 및 건설비와 유지보수비를 고려한 경제성 분석을 통해 간선철도 고속화를 고려한 자갈도상궤도구조의 최적 개량방안을 정립하였다. 궤도침하율 및 경제성을 분석한 결과 230km/h 대역에 대해서는 고탄성 패드, 침목중량화 및 도상두께 300mm를 적용한 자갈도상궤도 구성품이 최적인 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2013 년 철도기술연구사업으로 추진중인 “고속철도용 분기기 국산화 및 성능개량 기술개발” 과제로 진행되었습니다.

참고문헌

- [1] Arnold D. Kerr (2003) Fundamental of Track Dynamics
- [2] J.H. Um, Y.H. You, K.I. Um (2003) Evaluation of Track Impact Factor in the Conventional Line, Journal of the Korean Society for Railway, 6(4), pp. 88-104.
- [3] J.Y. Choi, K.D. Kang, Y.G. Park (2006) Evaluation of Track Impact Factor on Ballast Track in Subway using field Test, Journal of the Korean Society for Railway, 9(6), pp. 784-791.
- [4] Graduate School of Railway (2009) A Study on the Maintenance and Estimate of Fatigue Life for Used Rail, Seoul Metro.
- [5] Track Design Technical Report (2005) Structural Technical Report(Track division), Shinbundang Line.
- [6] Track Design Technical Report (2006) Structural Technical Report(Track division), Seoul city Metro Line 9.
- [7] Sato, New railway Track engineering Mechanics.
- [8] S.J. Lee, J.T. Oh, O.J. Park (2003) Parametric study about Measuring Train Loads.
- [9] RTRI (1997) Design Standard and manual for Railway Structure(Ballasted Track), Japan.
- [10] Buddhima Indraratha, Wadud Salim (2005) Mechanics of Ballasted Rail Tracks: A Geotechnical Perspective, Taylor & Francis.