

도시철도 건설선 B2S궤도구조 적용사례 및 성능검토

Performance Evaluation and Application of B2S System, in Constructing Urban Railway

장태경*[†], 김광은*, 이연근*, 민병협*Tae-gyeong Jang*[†], Kwang-eun Kim*, Yeon-guen Lee*, Byeong-hyeop Min*

Abstract B2S system has been applied to improve existing ballasted tracks to slab tracks. This study tried to examine the track stability and the running stability by evaluating track performance after constructing a portion of the line number 9 of the urban railway with B2S system. In order to achieve the study objective, track support stiffness, the stress of rail, wheel load variations, derailment coefficient, and the lateral displacement of rail head were analyzed.

Results indicated that the performance of B2S system satisfied the quality standard and it was stable enough if B2S system was applied with considering the field applicability and the construct ability during constructing the urban railway.

Keywords : Urban railway, B2S, Running stability, Track support stiffness, Derailment coefficient

초 록 본 논문은 기존의 자갈도상 궤도를 콘크리트도상 궤도로 개량시 적용하던 B2S궤도구조를 서울 도시철도 9호선 2단계 일부 건설구간에 대하여 B2S궤도로 부설하고 이에 대한 궤도성능 시험을 통하여 궤도의 안정성 및 열차 운행시 주행 안정성을 평가하고자 하였으며, 이를 위하여 궤도 지지강성, 레일의 응력, 윤중 변동률, 탈선계수, 레일두부의 횡변위량에 대하여 분석하였다. 그 결과 B2S궤도구조의 성능은 허용기준을 만족하는 것으로 확인되었으며, 도시철도 건설현장에 적용성 및 시공성 등을 검토하여 B2S궤도구조 적용시 충분한 구조적 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

주요어 : 도시철도, B2S궤도, 주행안정성, 궤도지지강성, 탈선계수

1. 서 론

도시철도 자갈도상구간의 장기사용에 따른 도상기능저하로 이를 개량하고자, 운행선상에서 열차가 운행하지 않는 심야 시간대를 이용하여 콘크리트도상으로 개량하기 위한 방법으로 B2S시스템을 활용하고 있으며, 이에 대한 궤도성능 및 공사품질은 이전의 성능검증을 통하여 그 안정성을 확인하였다. 이러한 B2S시공법을 서울 도시철도 9호선 2단계 건설구간에 활용하여 부설하고, 신설된 B2S궤도구조에 대한 궤도성능시험을 통해 실제 열차하중에 따른 B2S궤도구조에 대한 안전성 및 열차 주행안정성을 평가하고, 건설선의 B2S시스템 적용 적정성을 궤도구조의 성능 측면에서 확인하고자 한다.

† 교신저자: 서울메트로 시설처(tkjang@seoulmetro.co.kr)

* 서울메트로 시설처 궤도관리팀

2. 본 론

2.1 B2S 궤도구조 현장측정 시험

현장측정은 9호선 2단계 구간 중 B2S궤도구조의 거동특성을 측정하기 위해 철도안전법 및 도시철도법(도시철도시설 성능시험 기준,2009)에 의거 6개소에 대한 현장측정을 시행하였다. 열차의 운행속도를 단계별로 증속하여(10, 20, 40, 60, 70km/h) 속도변화에 따른 B2S궤도의 궤도부담력 및 열차주행안정성을 분석하였다.

Table 1 현장측정구간 궤도현황

구분	측정구간 제원
선형조건	직선구간, 캔트=0mm, 스톱=mm
레 일	60kgK
침목간격(레일지지점 간격)	625mm
레일체결시스템	System 300-1
측정위치	하선 21k200

2.2 궤도성능평가 항목 및 측정

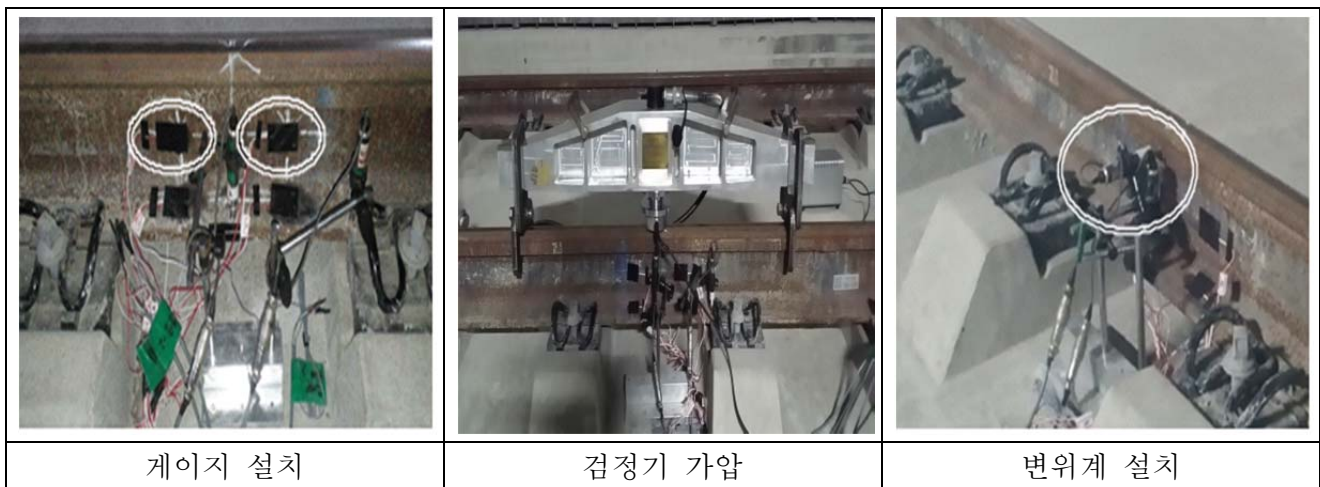


Fig. 1 현장측정 전경

2.2.1 윤중측정

윤중은 침목 간 중심에서 각각 100mm 떨어진 위치에 레일복부의 중립축에 8방향으로 결선된 윤중 게이지로 측정하였다. 설치위치는 측정 구간의 동적 윤중 특성을 알아보기 위해 좌.우 레일(6측점)에 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 현장계측 시 실제 발생한 윤중의 왜곡이나 데이터 손실이 발생되지 않도록 충분한 Sampling Rate(1kHz)을 설정하였으며, 또한 윤중

이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석(FFT : Fast fourier transform analysis)을 통해 디지털 필터로 데이터의 신뢰성을 높였다.

레일에 부착한 변형률 게이지를 통하여 직접 측정된 값은 변형률 데이터로써 전단변형과 비례하며, 전단변형 역시 윤중과 비례하여 발생하므로 데이터 수집 장비(Data Acquisition System)를 통하여 얻은 변형률을 실제 작용하는 윤중의 절대량으로 환산하기 위하여 윤중 검정(Calibration)을 수행하고 이때 얻어진 정적 윤중 데이터를 이용하여 선형회귀분석(Linear Regression)을 통해 환산 윤중을 도출함으로써 동적 윤중값(kN)을 산출하였다.

2.2.2 횡압측정

레일에 발생하는 횡압을 측정하기 위한 횡압게이지 설치하였으며, 부착위치는 윤중 측정위치와 동일한 개소에서 동적 횡압을 파악하기 위해 좌,우측 레일(6측점)의 플랜지 상면 우각부에 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 침목 간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 레일 플랜지 좌,우측에 변형률 게이지를 부착하고 결선면 레일 종방향 휨의 영향을 배제시켜 전단변형률로써 측정할 수 있다. 또한, 횡압의 경우도 윤중 검정과 동일한 방법으로 횡압 검정(Calibration)을 수행하고 이때 얻어진 정적 횡압데이터(변형률)를 이용하여 선형회귀분석(Linear Regression)을 통해 환산 횡압을 도출함으로써 동적 횡압값(kN)을 산출하였다.

2.2.3 레일변위 및 저부응력측정

열차주행 시 발생하는 레일 수직변위 및 레일 두부 횡변위, 레일 지지점변위를 측정함으로써 측정구간을 통과하는 열차에 따른 동적하중의 영향을 평가할 수 있다. 레일 수직변위 및 레일 두부 횡변위, 레일 지지점변위 측정을 위한 센서(변위계)를 설치하였으며, 레일 저부응력의 측정은 침목간 중앙의 좌,우측 레일 하부플랜지에 종방향으로 1축 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다.

2.3 궤도지지성능 평가

2.3.1 궤도충격계수

현장측정으로 획득한 윤중은 열차주행에 따른 동적하중이며, 열차의 정적하중과 비교하여 열차속도에 따른 궤도의 충격계수를 산출할 수 있다. 충격계수의 산정에 있어서 윤중변동률 표준편차에서 2σ 의 값을 고려하였으며, 윤중변동률은 $(P_{dyn}-P_{sta})/P_{sta}$ 로 나타낸다.

동적 윤중변동률을 바탕으로 평가되는 궤도충격계수는 열차의 주행에 따라 변동되는 차륜-레일 상호작용력의 수준을 평가할 수 있으며 궤도구조에 작용하는 동적하중의 변동수준을 평가할 수 있다

Fig.2는 미국 AREA의 궤도충격계수(국내설계기준)와 9호선 2단계 구간에 부설된 B2S궤도구조에서 측정하여 산출한 충격계수와와의 비교를 위한 그래프를 나타낸다. Fig.2의 실선은 설계 궤도충격계수를 나타내며 점선으로 표시된 충격계수는 해당구간에서 현장측정결과를 바탕으로 산출된 B2S 궤도구조의 충격계수 예측식을 나타낸다.

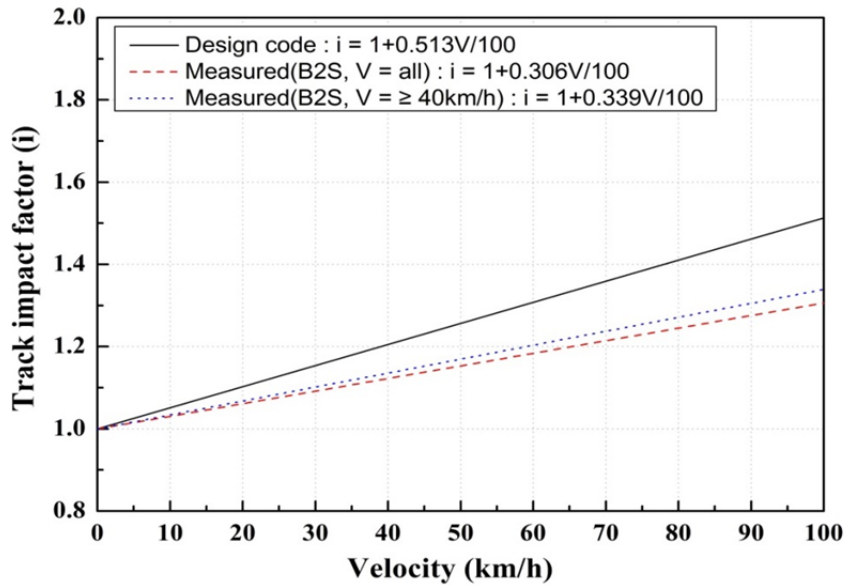


Fig. 2 설계 궤도충격계수와 측정 궤도충격계수 비교 결과

현장측정결과를 이용한 현 궤도 상태에서의 궤도충격계수 검토 결과, Fig. 2와 같이 전체 측정속도를 반영할 경우 $0.306(V/100)$ 이며, 40km/h 이상의 열차를 고려할 경우 $0.339(V/100)$ 로 궤도충격계수가 산출되었다. 이는 AREA에서 제시되어 현재 국내 설계충격계수로 사용하고 있는 $0.513(V/100)$ 를 만족하는 수준으로 해당구간의 궤도 충격수준은 큰 문제가 없을 것으로 분석되었다.

2.3.2 B2S 궤도구조의 궤도지지강성

B2S궤도의 레일패드 및 방진패드의 스프링계수를 관련 규격데이터를 참조한 이론 궤도지지강성을 산출하여 Table 2와 같이 제시하였다. 이를 측정 궤도지지강성과 비교함으로써 현시점에서 궤도지지강성의 수준을 분석하여 현재 궤도상태의 적정성을 평가하였다.

Table 2 B2S 궤도구조의 이론 궤도지지강성

구분	산출식	레일지지점 K	궤도지지강성
B2S	$K_s = \text{레일 지지점의 총 스프링계수(정적)}$ $K_s = \left(\frac{1}{K_{rp}} + \frac{1}{K_{mp}} \right)^{-1}$	17.00kN/mm	27.21kN/mm
	$K_d = \text{레일 지지점의 총 스프링계수(동적)}$ $K_d = \left(\frac{1}{K_{rp}} + \frac{1}{K_{mp} \times 1.5} \right)^{-1}$	25.15kN/mm	40.24kN/mm

$K_{rp}=600\text{kN/mm}$ 레일패드, $K_{mp}=17.5\text{kN/mm}$ 방진패드, 레일지지점 간격=625mm

측정결과를 바탕으로 B2S 궤도구조의 측정 궤도지지강성을 산출하여 Fig. 3에 나타내었다. 궤도지지강성은 측정 최대윤중과 최대 레일 수직변위의 비로써 측정 대상 궤도구조의 현재 궤도상태에서의 궤도지지강성(최대윤중/최대변위)을 산출할 수 있다.

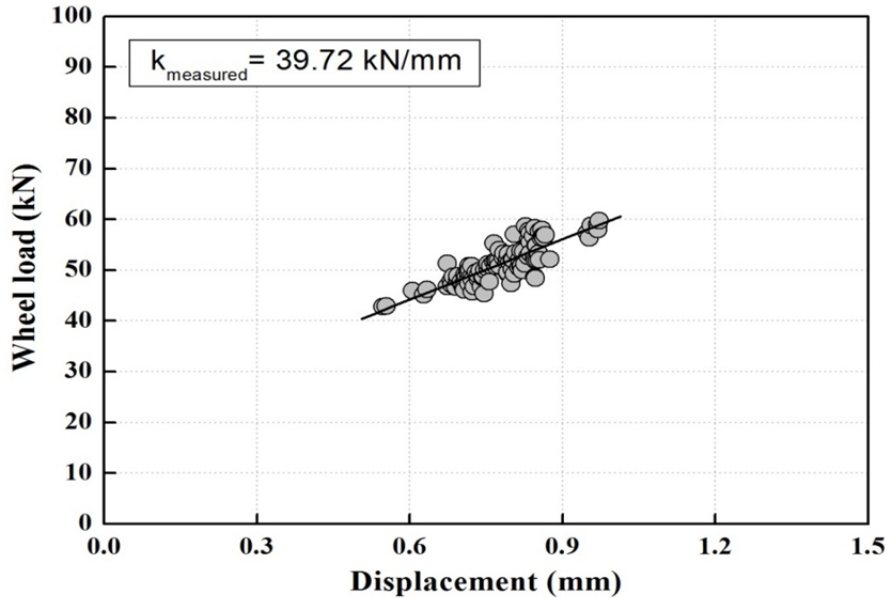


Fig. 3 측정 궤도지지강성

실 주행 차량하중을 고려한 현장측정을 통해 B2S 궤도구조의 궤도지지강성을 산출하였으며 이를 설계 시 적용한 이론 궤도지지강성과 비교하여 Table3에 나타내었다.

Table 3 B2S 궤도구조의 궤도지지강성 검토 결과

궤도지지강성(kN/mm)		
이론치(설계치)	측정치	Ratio (%)
40.24	39.72	(-)1.29

현장측정결과 측정치와 이론치의 편차가 약 1.3% 수준으로 측정결과의 신뢰성을 확인하였으며 해당구간의 궤도상태는 설계조건과 유사한 것으로 분석되어 현재의 궤도상태 역시 양호한 것으로 판단되며, 현재 운행열차 하중조건하에서 적절한 수준의 탄성거동을 보이며 궤도지지강성은 구조적으로 문제가 없는 것으로 판단된다.

2.4 열차 주행안정성 평가

현장측정을 통해 획득한 동적 윤중과 횡압을 이용하여 주행안정성 평가의 기준이 되는 탈선계수와 윤중감소율을 산정하여 기준치와 비교, 검토함으로써 대상선로의 주행안정성을 평가하였다. 또한, 열차주행 시 궤간의 확대에 의한 열차의 탈선영향을 평가하기 위해 레일 두부 횡변위 측정결과를 이용하여 주행열차하중에 의한 직선부 레일(좌·우측)의 동적 궤간확대수준을 평가하였다.

2.4.1 탈선영향평가

(1) 탈선계수에 의한 탈선영향평가 결과

측정구간을 통과하는 차량의 좌·우측 윤중과 횡압 측정 데이터를 이용하여 열차종별 탈선계수를 산정하였다. 최고속도 주행차량에 대한 탈선계수 산정 결과는 Table 5.1과 같다.

Table 4 측정 위치별 탈선계수 비교 (V=70km/h)

구분	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6
윤중(kN)	53	52	49	46	50	50
횡압(kN)	5.0	4.1	4.4	3.9	2.6	3.7
탈선계수	0.09	0.08	0.09	0.08	0.05	0.07

B2S 궤도구조의 측정 탈선계수는 좌·우측 레일 모두 임계탈선계수 0.8을 크게 하회하는 수준으로 나타나 과대 횡압 및 윤중감소로 인한 차량의 올라탐 탈선에 대한 안전성을 확인하였으며, 속도변화에 따른 B2S궤도구조의 탈선계수를 측정한 결과 열차의 속도변화에 따른 탈선계수 증가 경향이 뚜렷하지 않았다. 최대 탈선계수는 좌측레일에서 0.09, 우측레일에서 0.07로 분석되었다. 이는 임계탈선계수 0.8 보다 매우 작은 값이므로 대상 구간에서의 열차증속에 따른 열차 주행안정성 확보에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

(2) 윤중 감소량에 의한 주행안정성 평가 결과

B2S 궤도구조에 차량주행에 의해 발생하는 좌·우측 레일의 윤중 측정데이터를 이용하여, 차량주행에 대한 안정성 판단기준인 동적 윤중감소량을 분석한 결과 측정된 모든 열차에서 최소 윤중기준을 모두 만족하는 것으로 나타났으며 열차 속도변화에 따른 편차 역시 미소한 것으로 분석되었다.

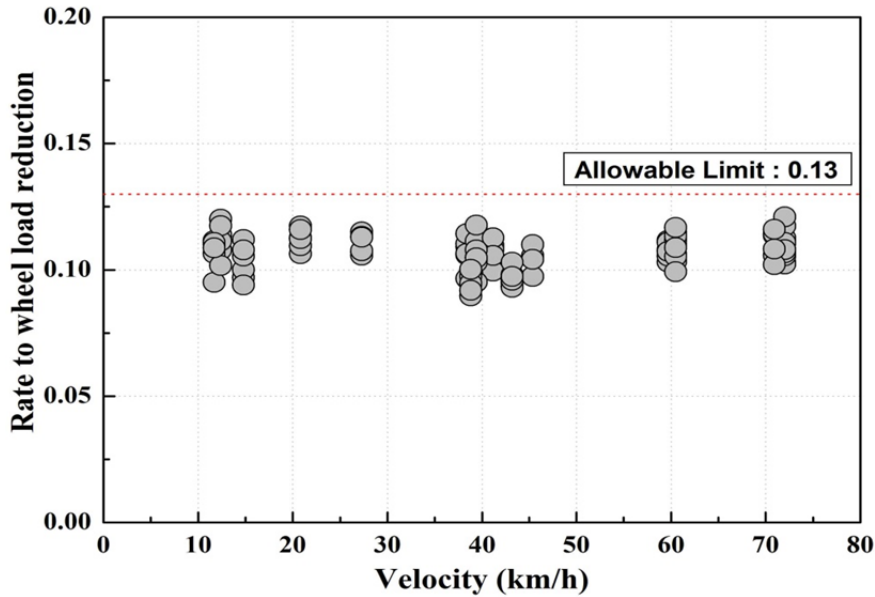


Fig. 4 윤중 감소율 산정결과

또한, Fig.4와 같이 동적 윤중 감소율을 산정한 결과, 도시철도시설 성능시험기준에 고시된 0.13의 값을 모두 만족하는 것으로 나타나 대상구간에서의 윤중 감소에 따른 열차탈선의 위험은 없을 것으로 분석되었다.

(3) 궤간확대 안정성 평가 결과

주행차량에 의한 레일 두부 횡변위 측정결과를 종합하여 표준궤간을 기준으로 열차속도별 동적 궤간확대 수준을 평가하여 Fig. 5.7에 나타내었다.

Table 5 궤간확대 안정성 검토결과(레일 두부 횡변위 측정결과)

열차속도 (km/h)	침목간격 (mm)	좌측레일 (mm)	우측레일 (mm)	표준궤간 (mm)	궤간합계 (mm)	허용기준 (<4mm)
10	625	0.25	0.19	1,435	1435.44	0.K
20	625	0.22	0.17	1,435	1435.39	0.K
40	625	0.25	0.20	1,435	1435.45	0.K
60	625	0.24	0.19	1,435	1435.43	0.K
70	625	0.22	0.19	1,435	1435.41	0.K

레일 두부 횡변위 측정결과를 이용한 궤간확대 안정성 검토결과, Table 5와 같이 주행 열차 하중에 의한 동적 궤간확대 수준이 허용기준치인 4mm를 크게 하회하는 것으로 나타나 대상구간에서의 동적 궤간확대에 따른 열차 주행안정성은 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

3. 결론

본 논문은 도시철도 건설선에 부설된 B2S궤도구조에 대한 궤도구조 성능을 평가하기 위하여 구조적 안전성 및 열차주행안정성에 대하여 검토한 결과 열차운행에 따른 궤도구조 안정성이 충분히 안정적인 것으로 나타났으며, 그 결과는 아래와 같다.

Table 6 B2S 궤도구조 성능평가 결과

시험종류		평가항목	단위	분석결과	허용기준	판정
궤도 성 능 검 증	궤도지지 성능시험	궤도지지강성(이론치/측정치)	kN/mm	40.24/39.72	-	적정
		레일응력	MPa	34	≤ 92	O.K.
	주행안정성 시험	윤중 변동률	-	0.10	≤ 0.13	O.K.
		탈선계수	-	0.09	≤ 0.8	O.K.
		레일 두부 횡변위	mm	0.45	≤ 4	O.K.

1. 실제 차량을 이용하여 궤도작용력 및 충격계수 검토결과 평가기준을 만족하며, 충분한 안전율을 확보하는 것으로 나타났으며, 측정값에 근거한 궤도충격계수 검토결과 설계기준범위 내에 있으며, 열차하중의 동적 증폭효과에 따른 궤도구조 안전성에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

2. 열차하중에 대한 레일의 수직변위, 지지점 변위, 휨응력 검토 결과 모두 국내외 관련기준의 응력 및 변위 조건을 만족하며 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

3. 측정 궤도지지강성 검토 결과, 이론 동적 궤도지지강성의 약 98.7% 수준으로 나타났으며, 이는 부설된 레일체결장치의 스프링강성이 운행열차 하중조건하에서 적정한 수준의 탄성거동을 보이는 것으로 검토되어 궤도지지강성은 구조적으로 문제가 없는 것으로 판단된다.

4. 탈선계수 및 윤중 감소율 검토 결과, 탈선계수는 임계치(0.8)보다 모두 작게 나타났으며, 윤중 감소율 또한 도시철도시설 성능시험기준(0.13)을 만족하는 것으로 나타나 탈선계수 및 윤중 감소에 따른 B2S궤도구조의 열차 주행안정성을 확보되는 것으로 판단된다. 궤간확대 안정성 검토결과, 열차하중에 의한 동적 궤간확대 수준이 허용기준치(4mm)를 만족하는 것으로 나타나 궤간확대에 따른 열차 주행안정성에 문제가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Institute for Railway Infra(2015), SeoulMetro, Structural performance evaluation of slab track, in constructing urban railway