

고속철도 콘크리트 궤도상 토공노반의 장기거동 특성 연구

최찬용¹, 정재현^{2*}

¹한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀, ²(주)지구환경전문가그룹 건설환경사업부

Study of the Long-Term Behavior Characteristics of Roadbed on Concrete Track of High-speed Railway

Chan-Yong Choi¹, Jae-Hyun Jung^{2*}

¹Advanced Infrastructure Research Team, Korea Railroad Research Institute

²Civil and Environment Department, Expert Group for Earth and Environment Co., Ltd

요약 본 논문의 목적은 고속철도 콘크리트 궤도 및 노반 측정 데이터(노반압력, 진동가속도, 탄성변위 등)를 이용하여 토공노반의 장기거동을 분석하고 궤도·노반의 장기성능을 평가하고자 하는데 있다. 최근 고속철도 궤도 형식이 콘크리트 슬래브로 채택되고 있다. 그러나 콘크리트 궤도는 노반 침하에 취약하다. 자갈궤도의 경우 노반이 침하되어도 유지보수로 원상복구가 용이하다. 반면에 콘크리트 궤도의 경우 노반의 과도한 침하가 발생하면 도상 및 침목에 균열이 지속적으로 발생되고 사용성이 크게 저하된다. 이와 같은 이유로 부분보수만으로 원상복구가 어렵다. 본 논문에서는 운영 중 콘크리트 궤도에 대하여 건설 초부터 매설된 센서의 측정 데이터를 개통 후 약 3년까지 모니터링하여 장기성능평가를 수행하였다. 성능평가 방법은 열차별 궤도·토공노반 및 장기 궤도·노반 성능평가, 장기침하에 따른 궤도·노반 성능 영향 분석 및 장기 침하 영향인자 분석 등이다. 열차별 궤도·노반 성능평가에서는 KTX-산천중련의 노반응답이 가장 컸다. 장기 궤도·노반 성능평가 결과는 측정항목이 기준치이내로 측정되었다. 장기침하에 따른 궤도·노반 성능영향 평가는 TCL처짐은 침하와 깊은 연관이 있는 것으로 분석되었다. 장기침하의 외부영향인자 분석을 통해 함수비와 지하수위의 영향성을 확인하였다. 이와같은 방법을 통해 궤도상 토공노반의 안정성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract This study examined the long-term behavior of a roadbed using high-speed railway concrete track and roadbed measurement data and evaluated the long-term performance of the track and roadbed. Recently, high-speed railway track type has been adopted as a concrete slab. On the other hand, the concrete track is vulnerable to roadbed settlement. In the case of gravel tracks, it is easy to restore the original state by maintenance even if the roadbed settles. On the other hand, in the case of the concrete track, if excessive settlement of the roadbed occurs, cracks are generated continuously on the slabs and sleepers, resulting in greatly reduced usability. For this reason, it is difficult to restore the original state only by partial maintenance. In this paper, a long-term performance evaluation was carried out on a concrete track during operation by monitoring the measurement data of sensors buried from the beginning of construction for approximately 3 years after the high-speed railway opened. Performance evaluation methods include a performance evaluation of track/roadbed when the train passes, long-term track and roadbed performance evaluation, analysis of the track/roadbed effect on long-term settlement and analysis of the factors influencing long-term settlement. The trail response of KTX-Sancheon was greatest in the track/roadbed performance evaluation by train. The results of the long-term track and roadbed performance evaluation were measured within the standard values. The track and roadbed performance impact assessment with long-term settlement was strongly related to TCL settlement. The influences of the water content and groundwater level were verified by analyzing the external factors of long-term settlement. Through such a method, the stability of a track/roadbed can be secured.

Keywords : Concrete slab, Concrete Track, High-speed Railway, Settlement, Roadbed

*Corresponding Author :Jae-Hyun Jung (Expert Group for Earth and Environment Co., Ltd)

Tel: +82-10-5669-9699 email:cagito@naver.com

Received February 9, 2018

Revised March 28, 2018

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

1. 서론

콘크리트 궤도 형식을 채택한 고속철도는 잔류침하에 대하여 허용기준이 30mm로 엄격하다[3]. 이러한 콘크리트 궤도의 노반 침하가 발생되면 콘크리트 궤도의 구조적 안정성 저하, 열차주행안정성 및 승차감 저하 등을 초래한다. 침하에 따른 구조적 안정성 저하는 슬래브의 균열 발생, TCL(Track Concrete Layer)층과 HSB(Hydraulic Stabilized Base)층의 분리이며 열차주행안정성 및 승차감 저하는 궤도 처짐으로 인한 레일상단의 고저 틀림과 HSB 하부와 토공노반의 공극으로 인한 궤도지지강성의 감소이다. 따라서 콘크리트 궤도는 충분한 궤도지지력을 확보하고 허용침하량 이내로 거동하여야 한다.

Choi, C.Y. et al.(2013)에 따르면 자갈궤도와 콘크리트궤도에서의 열차하중재하로 인한 노반거동은 실험시험에서 콘크리트궤도의 지중응력이 30kPa로써 자갈궤도에 비해 약 4배 정도 작게 발생하였다[1]. 따라서 콘크리트 궤도의 경우 열차하중에 대한 응력(노반압력)이 자갈궤도에 비해 4배 정도 작게 발생하기 때문에 궤도지지력이 부족하지 않을 것으로 사료된다. 다만 노반이 장기 침하되는 경우에는 콘크리트 슬래브 변형이 발생되어 궤도틀림과 궤도지지력 성능저하 등을 유발시킬 수 있다고 하였다.

Chun, H.K. et al.(2015)에서는 독일철도 기준과 KR-CODE에 제시된 해석방법을 적용하여 열차의 축중 및 속도변화에 따른 고속철도 슬래브 궤도구조의 거동분석을 수행한 결과 열하중과 속도에 따라 콘크리트 궤도 슬래브의 응력은 증가하는 것으로 분석되었다[2]. 열차 증속에 따른 시험과 분석은 진행되고 있지만 추가적으로 노반 침하영향에 따른 지지강성 저하 조건을 고려한 분석도 필요하다.

Ministry of Land(2015)에 따르면 콘크리트슬래브궤도의 수요가 증가하고 중단면이 감소되면서 최적화가 이루어지고 있지만 콘크리트 궤도 관련 연구가 추가로 필요하다고 하였다[6].

Kim, Y.H. et al.(2015)은 허용잔류침하량 이내로 침하가 되어도 콘크리트 궤도 유지관리를 통해 보수 가능하지만 침하에 대한 근본적인 대책은 아니라고 하였다[4]. 따라서 침하에 대한 성능평가, 영향인자 분석을 통해 침하의 근본적인 대책마련이 필요하다.

본 논문에서는 운행중인 3개소 노반에 대하여 노반

매설센서 및 궤도 부착센서를 이용하여 측정데이터를 수집하고 성능평가를 실시하였다. 측정데이터의 수집기간은 노반 건설준공시부터 개통 후 약 3년이다. 다만 약 2년동안 측정이 중단되었으나 매설 센서의 경우 노반 준공 당시의 동일한 센서를 사용하여 초기치가 확보된 상태이기 때문에 상호 비교가 가능하였다. 성능평가 방법은 열차별 궤도·토공노반 성능평가, 장기 궤도·노반 성능평가, 장기침하에 따른 궤도·노반 성능 영향 분석, 장기 침하 영향인자 분석 등이다. 본 논문에서는 이러한 장기 성능평가를 통하여 콘크리트 궤도에의 궤도·노반 장기거동 특성 및 장기 침하에 따른 궤도 영향을 분석하였다.

2. 측정위치 및 센서

2.1 측정위치

측정위치는 Table 1과 같이 ○○고속선의 상선 3개소이다. 표준성토노반(109k231)은 고성토구간으로써 성토고가 8.7m, 연약지반노반(110k000)은 원지반이 연약한 점성토로써 노반 시공시 성토진 3m이상 원지반을 치환하였다. 접속부노반(120k650)은 교량-토공 접속부 구간으로써 교대 뒷채움제에 시멘트 3%를 첨가하여 강성을 강화한 노반이다. Fig. 1은 각 구간별 구축한 모니터링 시스템의 전경이다.

Table 1. Measurement location

Line Type	K.P	Trackbed Type	Remark
High-Speed Railway	109k231 Up-Line (T2)	Standard Embankment Roadbed	Height=8.7m
	110k000 Up-Line (T2)	Embankment Roadbed on Softground Foundation	
	120k650 Up-Line (T2)	Embankment Roadbed on Bridge-Earthwork Transition Zone	

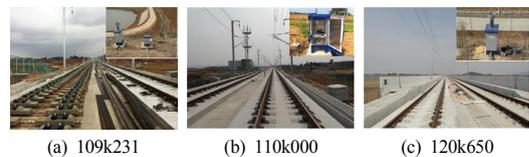


Fig. 1. Monitoring system view

2.2 센서 및 데이터로거

Table 2는 각 설치 위치와 설치 부재 및 층에 따른 센서를 나열한 표이다. 레일에는 운하중·횡압센서 등이다. 노반에는 토압계(노반압력), LVDT(침하 및 탄성연직변위), 가속도계(노반진동가속도), 함수비센서(함수량) 등이고 원지반에는 지중경사계(측방변위), 간극수압계(지하수위)이며 사면소단에는 강우량계 및 함수비센서(함수량) 센서 등이 매설되었다.

Table 2. Sensors on location and position

Position	Sensor	Metrics	109k231 (Qty)	110k000 (Qty)	120k650 (Qty)
Rail	Strain Gauge	Wheel load	4	4	4
	Strain Gauge	Lateral wheel load	4	4	4
Roadbed	Earth pressure	Stress, Pressure	5	1	2
	LVDT	Settlement	3	3	12
	LVDT	Verital Displacement		1	2
	Accelerometer	Acceleration	3	1	2
	Volumeric Water Content	Water Content	1		1
Foundation	Inclinometer	Lateral displacement		1	
	Pore pressure gauge	Water Level		1	
Slope	Rainfall meter	Rainfall	1		
	Volumeric Water Content	Water Content	1		1
Total			22	16	28

장기 측정에 사용한 측정기기는 CampbellSCI사의 CR9000X(ADC 24-bit) 데이터로거를 측정개소별로 3개 사용하였다. 열차 통과시 노반 응답측정데이터(레일 운하중·횡압, 노반압력, 노반탄성연직변위, 노반진동가속도)는 운하중 트리거를 이용하여 센서데이터를 열차 통과전후 15초 동안 수집하였고 장기측정데이터(함수비, 강우량, 지하수위, 측방변위, 침하 등)는 일일간격으로 측정하였다. 모든 측정 시스템은 인터넷망을 이용한 무인원격모니터링으로 구성하였다.

2.3 측정기간 및 대상열차

Table 3은 측정기간을 나타내는 표이다. 1단계와 2단계로 구성된다. '15년 04월부터 '16년 10월까지의 현장 측정이 이루어지지 못하였다. 2단계 측정에 사용한 노반 매설 센서는 1단계 센서와 동일하다. 대상 열차는 KTX,

KTX-산천, KTX-산천(중련), HEMU-430X이다. 일 운행회수는 42~44대이다.

Table 3. Sensors on location and position

Phase	Period	Measuring	Remark
1	2014.05 ~2015.03	Gathering	Before railway opening
-	2015.04 ~2016.09	None-Gathering	2015.04.01 Open
2	2016.10 ~2018.02	Gathering	After railway opening

3. 측정결과 및 성능평가

3.1 열차별 궤도·노반 성능평가

열차별 궤도·노반의 성능평가는 철도종합시험운행(시행지침)에서 정하는 노반 측정 항목과 기준치를 준용하여 분석하였다[5]. 이 시험은 철도시설 및 열차운행체계의 안전성 여부 확인을 목적으로 한다.

Table 4. Evaluation perfomance of track&roadbed by train

Train Type	Wheel Load	Lateral Load	Vertical Displacement	Acceleration	Settlement
Unit	kN	kN	mm	m/s^2	mm
Criteria	200	68	1	9.8	30
109k 231	KTX	72.8	3.6	0.006	1.2
	KTX-Sanchun	74.7	6.9	0.003	1.2
	KTX-Sanchun×2	78.3	5.1	0.010	1.6
	HUMU-430X	78.0	6.6	0.002	1.3
110k 000	KTX	94.9	10.1	0.052	0.5
	KTX-Sanchun	93.1	6.2	0.028	0.5
	KTX-Sanchun×2	99.0	7.6	0.054	0.4
	HUMU-430X	82.0	8.8	0.080	0.4
120k 650	KTX	100.6	7.2	0.106	0.3
	KTX-Sanchun	113.9	5.4	0.100	0.3
	KTX-Sanchun×2	111.3	4.1	0.087	0.3
	HUMU-430X	88.0	4.7	0.075	0.3

Table 4는 위치에 따른 열차별 궤도·노반의 응답을 비교한 표이다. 동일한 열차에 대하여 위치별로 측정값이 다른 이유는 궤도 선형조건과 레일 평탄성이 서로 다르기 때문이다. Fig. 2와 같이 운하중의 경우 HEMU-430X가 가장 적게 측정되었으며 KT-산천중련이 근소한 차이로 가장 큰 것으로 측정되었다. 탄성계수

는 율하중에 반비례하여 KT-산천중련이 가장 크고 HEMU-430X가 가장 작게 측정되었다. 횡압의 경우 열차별로 큰 차이가 없다. 이와 같은 이유는 모니터링 측정개소가 직선구간 또는 완화곡선 끝구간이기 때문인 것으로 보인다. 모든 측정치가 기준치 이내로 측정되었다.

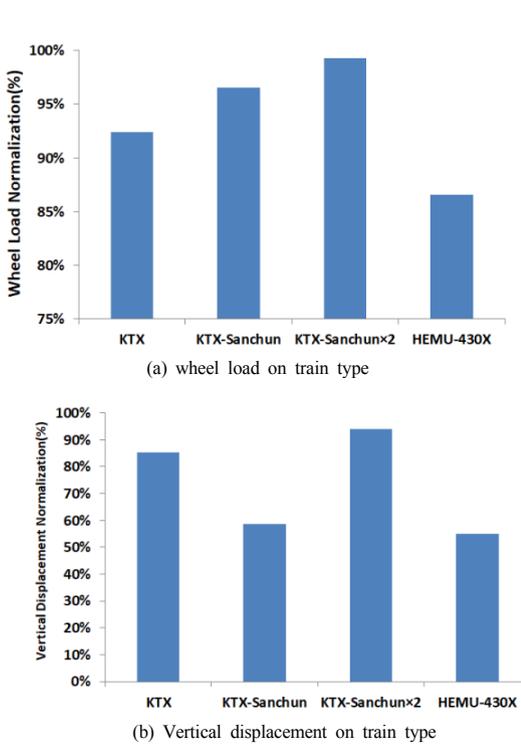


Fig. 2. Comparison of wheel load and roadbed vertical displacement

3.2 장기 궤도노반 성능평가

3.2.1 분석데이터의 시계열 및 통계분석

측정기간동안 통과한 열차대수는 총22,818대로써 궤도·노반 응답 트리거의 로우 데이터가 약 5TB에 달한다. 따라서 모든 응답 데이터를 도시할 수 없기 때문에 일자별로 유효한 최댓값을 추출한 대푯값으로 도시하였다. 이와 같은 이유는 측정값에 대한 기준치가 모두 허용치로 설정되어 있기 때문이다. 성능평가는 3개소의 측정센서별로 종합하여 분석하였다.

3.2.1 레일 율하중

Fig. 3은 측정 3개소의 율하중 센서 8개에 대한 일일 최댓값의 시계열 및 통계 통계분석 그래프이다. 기준치

(200kN) 대비하여 평균값은 48.0%이내이며 6σ (1/5백만 확률)에 해당되는 값도 기준치(200kN)의 67.9% 이내로 분석되었다. 따라서 측정개소에 대한 모니터링 결과 레일에 재하되는 열차하중은 설계기준치 이내로 분석된다.

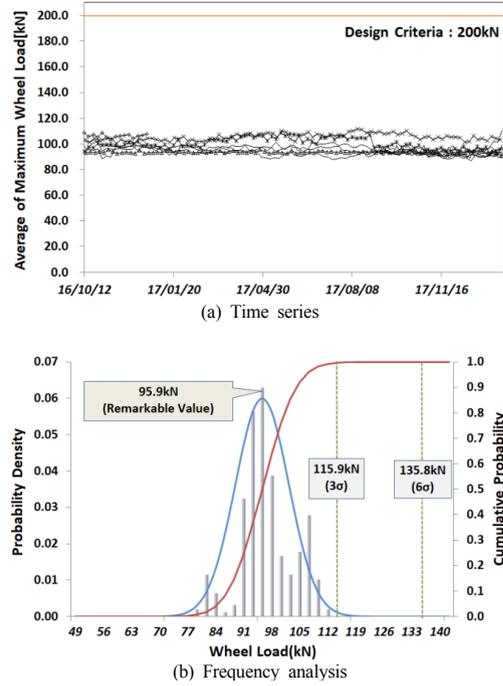


Fig. 3. Time series and Frequency analysis of wheel load

3.2.3 레일 횡압

Fig. 4는 측정 3개소의 횡하중 센서 12개에 대한 일일 최댓값의 시계열 및 통계 분석 그래프이다. 횡하중의 평균값은 7.06kN으로 기준치인 68kN의 9.6%수준이다. 통계분석 결과 6σ 값은 기준치대비 41% 이내로 분석되었다. 측정개소가 직선구간, 완화곡선구간이기 때문에 횡압변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

3.2.4 노반 압력

Fig. 5는 측정 3개소의 토압계 8개에 대한 일일 최댓값의 시계열 및 통계분석 그래프이다. 노반압력의 평균값은 4.56kPa로 관리기준치인 66.5kPa의 약 14%이고 통계분석결과 6σ 에 해당되는 값도 기준치의 약 21% 이내로 분석되었다. 노반압력은 안정성이 확보 되는 것으로 평가된다.

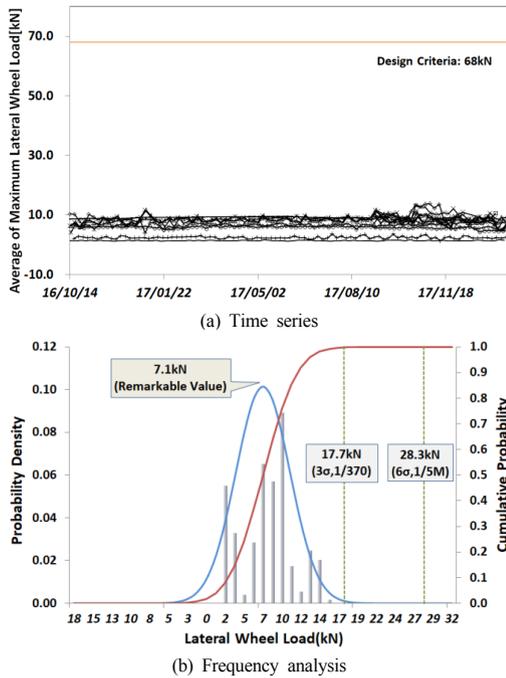


Fig. 4. Time series and Frequency analysis of Lateral Wheel Load

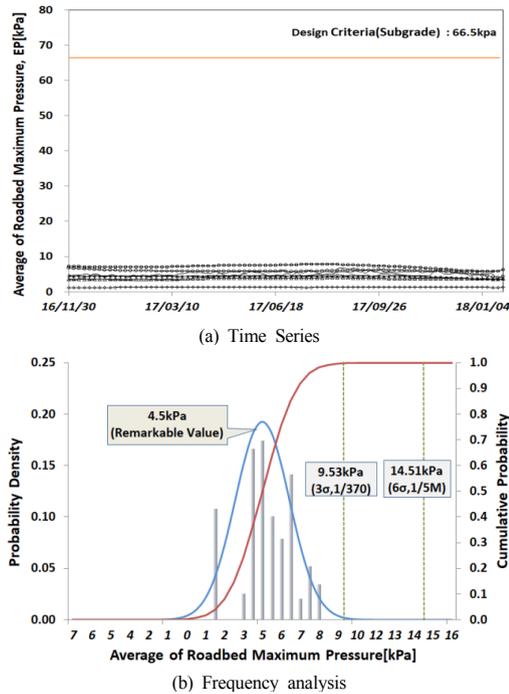


Fig. 5. Time series and frequency analysis of roadbed pressure

3.2.5 노반 진동가속도

Fig. 6은 측정 3개소의 진동가속도 센서 6개에 대한 일일 최댓값의 시계열 및 통계 분석 그래프이다. 진동가속도의 허용 진동치는 철도설계기준과 KR-CODE에서 제시하고 있지 않아 교량의 연직 가속도 허용 기준인 $0.5g(4.9m/s^2)$ 를 참고로 $9.8m/s^2$ 를 기준치로 설정하였다. 측정 3개소의 진동가속도 평균값은 $0.89m/s^2$ 로 설정기준치 $9.8m/s^2$ 의 약 10.9%에 해당된다. 통계분석의 6σ 값이 $4.3m/s^2$ 로 약 43%에 해당하나 안정성 문제는 없는 것으로 판단된다. 열차의 진동은 접속부 구간의 강화노반이 가장 크게 측정 되었다.

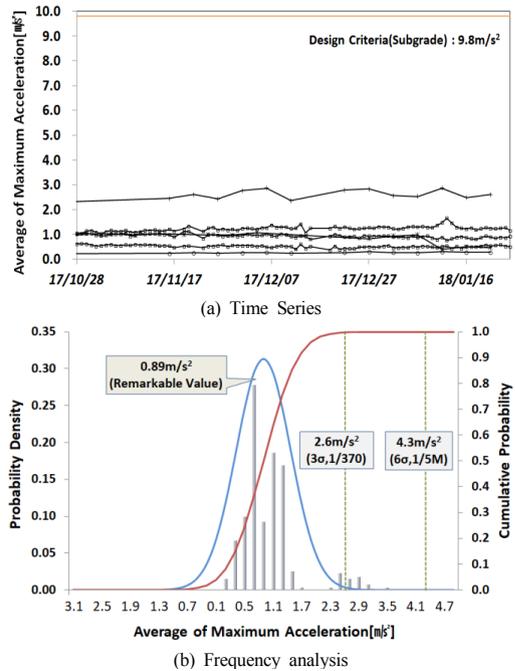
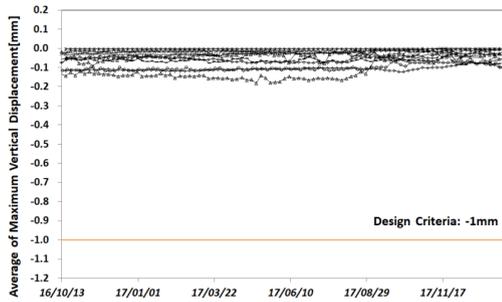


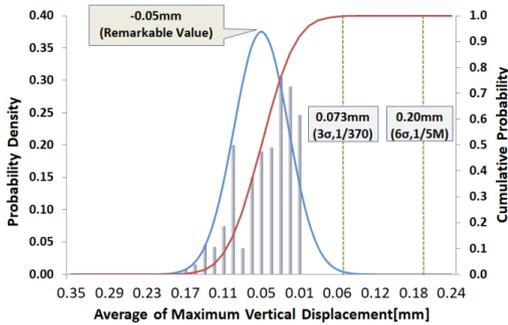
Fig. 6. Time series and frequency analysis of acceleration

3.2.6 노반 탄성변위

Fig. 7은 측정 2개소의 탄성변위 센서 12개에 대한 일일 최댓값의 시계열 및 통계분석 그래프이다. 평균 $0.05mm$ 로 탄성변위의 참고기준치는 $1.0mm$ 이므로 모두 안정성 확보가 되는 것으로 나타났다. 통계분석 결과 6σ 의 값은 $0.2mm$ 로 기준치대비 약 20%에 해당한다.



(a) Time Series



(b) Frequency analysis

Fig. 7. Time series and frequency analysis of vertical displacement

3.2.7 노반 침하

Fig. 8은 측정 3개소의 침하량(시계열) 그래프이다. 1-Phase는 노반 건설준공시부터 1년의 데이터를 2-Phase는 측정 재개 후부터 현재까지의 데이터이다. 1-Phase는 초기에 침하량이 컸으나 개통 후에는 침하 진행이 수렴되는 것을 알 수 있다. 2-Phase는 2년 후의 데이터로써 대부분은 침하가 수렴되었는데 표준성토노반의 상부노반, 하부노반의 침하는 특히 더 발생되었다. 층별침하 분석결과 성토체(침하량=5.6mm, 성토고=11.8m)와 치환체(침하량=2.0mm, 두께=11.2m)도 기준치의 약 25%이내로 침하가 발생하는 것으로 측정되었다. 따라서 설계시에도 성토체와 치환체의 침하를 고려하여야 할 것이다. 현행 고속철도 침하설계에서는 성토체와 치환체의 잔류침하 계산을 무시하는 경우가 많다.

3.2.8 원지반 측방변위

Fig. 9는 연약지반노반의 심도별 측방변위 그래프이다. 원지반의 측방변위는 초기치 대비 8.9mm가 발생하였는데 원지반 침하와 함께 발생한 것으로 판단된다.

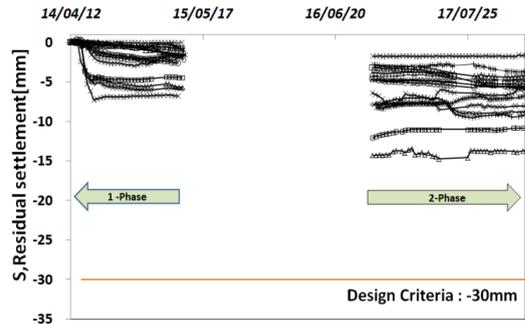


Fig. 8. Time series of s, residual settlement

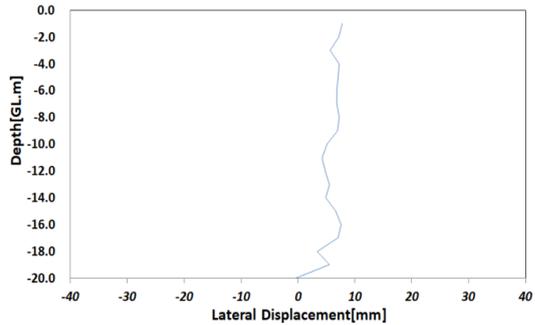


Fig. 9. Lateral displacement on foundation

3.3 장기침하에 따른 궤도노반 성능영향평가

3.3.1 장기침하에 따른 율하중 변화량

Fig. 10은 장기침하에 따른 율하중 변화량을 정규화한 그래프이다. 노반침하에 따른 율하중의 변화량은 볼 수 없었는데 변화량의 차이가 없는 이유는 콘크리트슬래브의 강성이 높아 침하로 인한 TCL처짐이 낮고 체결장치를 이용하여 고저틀림이 보정되기 때문에 변화량이 적은 것으로 판단된다.

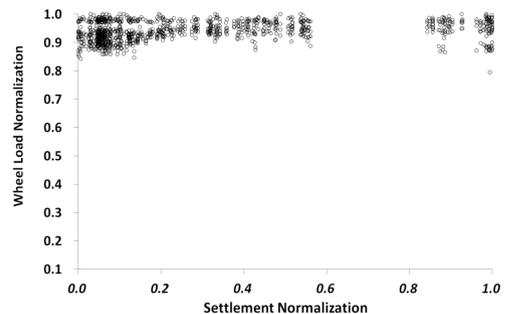


Fig. 10. Wheel load normalization & settlement normalization

3.3.2 장기침하에 따른 TCL처짐 변화량

Fig. 11은 장기침하에 따른 TCL 처짐 변화량을 정규화한 그래프이다. 침하가 진행됨에 따라 TCL층의 처짐도 증가하는 것으로 나타나는데 침하대비 TCL 처짐은 89%로 연관성이 매우 높은 것으로 판단된다. 노반침하가 100% 반영되지 않는 이유는 콘크리트 궤도층은 HSB 층으로 일체거동하고 TCL에 경우 철근이 보강되어 중단방향으로 강성이 높은 이유로 보인다. TCL처짐은 침하 진행에 따라 노반침하량에 수렴할 것으로 보인다.

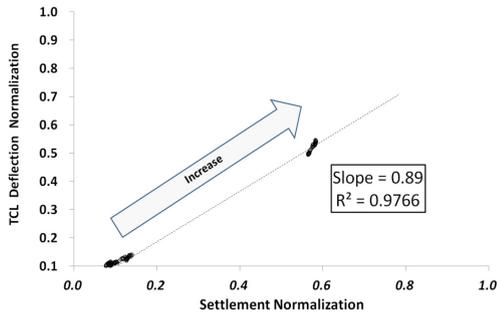


Fig. 11. TCL deflection normalization & settlement normalization

3.3.3 장기침하에 따른 노반탄성변위

Fig. 12는 장기침하에 따른 노반 탄성 변위량을 정규화하여 도시한 그래프이다. 1-Phase는 건설준공시부터 개통후 1년간 측정된 값으로 탄성변위의 변화는 크지 않았다. 측정을 재개한 2-Phase에선 침하 진행에 따라 탄성변위가 감소하는 것으로 측정되었다. 측정된 탄성변위는 침하수렴시까지 최대 57.7%가 감소하였는데 이와 같은 이유는 노반침하가 진행됨에 따라 지반강성이 상승하여 열차하중에 대한 지반 응답 변위가 감소해 탄성변위의 값도 감소되는 것으로 판단된다.

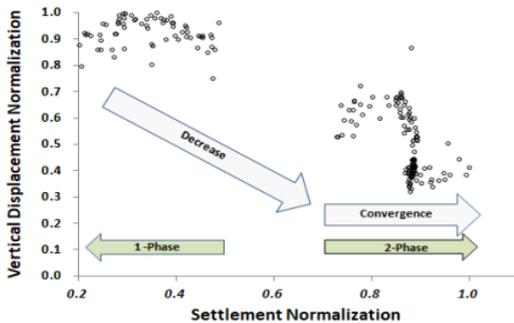


Fig. 12. Vertical displacement normalization & settlement normalization

3.3.4 장기침하에 따른 노반진동가속도 변화

Fig. 13은 장기침하에 따른 진동가속도의 값을 정규화한 그래프이다. 침하의 진행에 따른 진동가속도 값은 변동이 거의 없는 것으로 보이는데 이와 같은 이유는 열차진동이 강성이 강한 TCL 및 HSB 층을 통과중에 진동이 감쇄되기 때문이다.

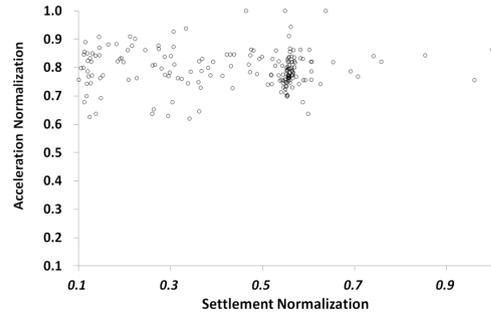


Fig. 13. Acceleration normalization & settlement normalization

3.4 장기침하의 외부영향인자 분석

3.4.1 함수비영향

Fig. 14는 장기침하 추세에 따른 함수비 변화 그래프이다. 그래프를 보면 함수비 변화와 침하의 진행은 연관성이 적어보이나 최대 침하량 대비 55~80%에서 함수비가 급감함에 따라 침하가 발생하는 것으로 나타났지만 침하의 수렴이후에는 함수비에 따른 추가 침하는 영향이 없는 것으로 판단된다.

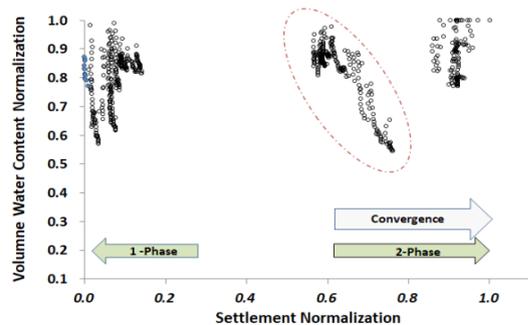


Fig. 14. Effect of long-term settlement due to water content change

Fig. 15는 표준성토노반의 강우-함수비 그래프이다. 설치위치는 노반과 사면이다. 노반부의 함수비 최솟값은 1.9%, 최댓값은 3.1%로 변화량은 약 1.2%이다. 사면부

의 함수비 최솟값은 4.9%, 최댓값은 12.1%로 변화량은 약 7.2%이다. 분석결과 함수비가 1%저하되면 최종 침하량 대비 최대 1.6%의 추가침하가 발생할 수 있을 것으로 예측된다. 사면부의 함수비는 강우에 따라 변화폭이 큰 반면에 노반부는 강우에 따른 함수비 변화는 매우 적어 노반의 콘크리트 슬래브의 배수배제 효과가 유효하다고 판단된다.

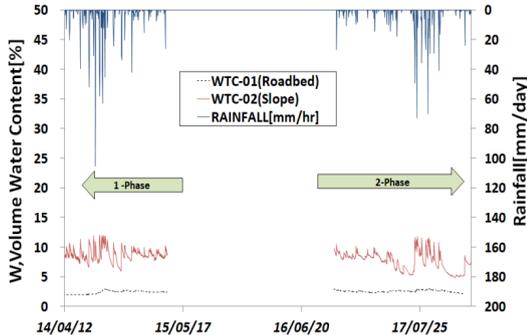


Fig. 15. Rainfall-water content(Time series)

Fig. 16은 접속부노반의 강우-함수비 그래프이다. 설치위치는 상부노반과 사면표면이다. 사면표면의 함수비 최솟값은 3.0%, 최댓값은 20.4%로 변화량은 약 17.4%이고 상부노반의 함수비 최솟값은 4.1%, 최댓값은 13.9%로 변화량은 9.8%이다. 상부노반은 표준성토노반과 달리 함수비변화량이 강우에 영향을 크게 받았는데 이같은 이유는 위치특성상 교대가 있어 배수가 제대로 되지 않는 것으로 판단된다. 따라서 접속부의 경우 함수비 변화로 인한 침하 발생이 상대적으로 크게 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

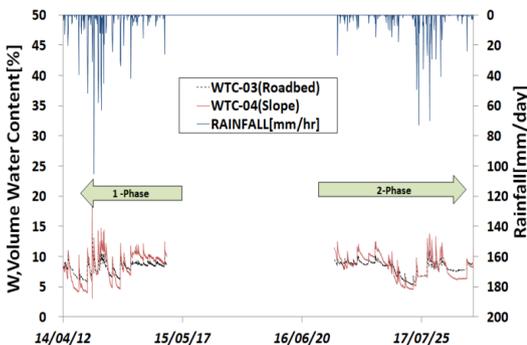


Fig. 16. Rainfall-water content(Time series)

3.4.2 지하수위영향

Fig. 17은 지하수위 저하에 따른 침하 그래프이다. 그래프를 보면 지하수위가 약 2.1m 저하됨에 따라 침하가 약 2mm 진행되는 것으로 나타났는데 이와같은 이유는 지하수위 저하에 따라 하단에서 받는 상재하중이 증가되기 때문에 침하가 발생하는 것으로 판단된다. 이렇게 반복적인 지하수위 상승 및 저하에 따라 침하는 결국 수렴하는 것으로 판단된다.

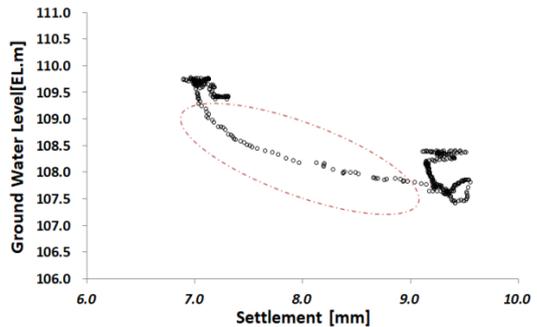


Fig. 17. Effect of long-term settlement due to lower ground water level

4. 결론

본 논문에서는 고속철도 콘크리트 궤도·노반 측정 데이터를 이용하여 토공노반의 장기거동을 분석하고 궤도·노반의 장기 성능평가를 수행하였다.

- (1) 열차별 궤도·토공노반 성능평가결과는 모두 기준치 이내로 측정되었다. 열차하중에 대한 궤도·노반 응답크기가 가장 큰 차량은 KTX-산천중련이며 가장 작은 차량은 HEMU-430X로 측정되었다.
- (2) 장기 궤도·노반 성능평가는 측정데이터를 일자별로 유효한 대푯값을 이용하여 평가하였다. 모니터링 3개소에 대하여 레일 운하중은 평균값이 기준치대비 약 48% 이내, 레일 운하중은 평균값이 기준치대비 약 9.6%, 노반 압력은 평균값이 기준치 대비 약 14%, 노반 진동가속도는 평균값이 기준치 대비 약 10.9%, 노반 탄성변위는 평균값이 기준치 대비 약 5%, 노반침하는 기준치 이내로 측정되었다.

- (3) 장기침하에 따른 케도·노반 성능영향 평가를 하였다. 윤하중은 기준 침하량이 기준치 이내인 경우 영향이 거의 없는 것으로 측정되었다. 노반진동가 속도는 차량 종류 및 속도, 케도에 따른 영향은 있으나 장기침하에 따른 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다. TCL처짐량은 노반 침하대비 89%로 측정되어 영향이 큰 것으로 판단된다. 탄성변위는 침하가 수렴될 때까지 최대 57.7% 감소하는 것으로 측정되었다. TCL처짐은 노반 침하와의 연관성이 매우 높아 설계시 고려할 필요가 있는 것으로 사료된다.
- (4) 장기침하의 외부영향인자를 분석하였다. 함수비 변화에 따른 장기침하는 함수비가 1% 저하되면 최종 침하량 대비 최대 1.5%가 추가 침하가 발생할 수 있는 것으로 측정되었다. 지하수위변화에 따른 장기침하는 지하수위가 2.1m 저하되는 경우 침하가 약 2mm 발생하였고 다시 수위가 상승한 경우 0.5mm 융기가 발생하는 것으로 측정되었다. 분석결과 잔류침하 계산에서 현재 고려하지 않는 지하수위는 고려할 필요가 있는 것으로 사료된다.
- (5) 표준성토노반의 노반부는 외부강우에 따른 함수비 변화량이 약 1.2%로 측정되었다. 표준성토노반의 콘크리트 배수배제효과가 유효한 것으로 판단된다. 반면 교량-접속부구간의 노반의 함수비는 표준성토노반에 비해 상대적으로 영향을 크게 받았으며 최대 변화량은 약 9.8%로 측정되었다. 이와 같은 이유는 교대 및 날개벽으로 인하여 배수가 제대로 되지 않아 발생된 문제로 사료된다. 따라서 표준성토노반에 비해 접속부 노반이 함수비 변화폭이 크기 때문에 함수비 변화로 인한 침하 발생이 상대적으로 크게 발생할 수 있을 것으로 보인다.

Reference

[1] C.Y. Choi, W.I. Choi, S.J. Han, and J.H. Jung, "Development of Design Method for Reinforced Roadbed Considering Plastic Settlement for High-speed Railway", *J. Korean Geotechnical Society*, vol. 29, no. 9, pp. 55-69, 2013.

[2] H.K. Chun, Y.S. Kang, Y.G. Park, "Study of the

Behavior of Concrete Slab Track on Earthwork According to the Variation of Train Axle Load and Speed", *J. Korean Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 16, no. 10, pp. 6788-6798, 2015.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.10.6788>

- [3] Korea rail network authority, "KR CODE 2012", 2012.
- [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Study on design standards of track systems for the high-speed railway at 400km/h", *KALIA*, 2015.
- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Implementation Guidelines for Railway Comprehensive Tests", 2015.
- [6] Y.H. Kim, K.Y. Eum, S.J. Han, Y.G. Park, and J.H. Jung, "A Study on Settlement Characteristics of Earthwork Subgrade with Lowering the Groundwater in High-speed Railway", *J. Korean Geotechnical Society*, vol. 31, no. 5, pp. 67-74, 2015.
- DOI: <https://doi.org/10.7843/kgs.2015.31.5.67>

최 찬 용(Chan-Yong Choi)

[정회원]



- 1998년 2월 : 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과(공학석사)
- 2008년 2월 : 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과(공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

고속철도인프라 설계, 연약지반

정 재 현(Jae-Hyun Jung)

[정회원]



- 2000년 2월 : 중앙대학교 토목공학과
- 2000년 3월 ~ 2001년 2월 : 흥익기술단
- 2001년 3월 ~ 현재 : ㈜지구환경전문가그룹 상무

<관심분야>

토목계측, 자동화 모니터링