틸팅열차 주행시 기존선 홉 노반의 응답특성

Tilting Train-induced Roadbed Response on the Conventional Line

고태훈[†] · 곽연석¹ · 황선근¹ · 사공명¹

Tae-Hoon Koh · Yeon-Suk Kwak · Seon-Keun Hwang · Myung Sagong

Abstract It is a fact that the straightening of track alignment is one of the undoubted ways to improve the train speed on conventional lines, while that requires huge investment resources. Therefore, the operation of a tilting train as well as the minimum improvement of track is suggested as an effective and economical alternative way for the speed-up of conventional lines. Since a driving mechanism of tilting train is different from those of existing trains, in order to make sure its operation safety and stability on conventional line, the performance of track and roadbed must be preferentially evaluated on the conventional line. Furthermore, it is necessary to estimate the tilting-train-induced roadbed response in detail since the roadbed settlement can lead to the track deformation and even derailment. In this research, the patterns of wheel load and lateral force were monitored and analyzed through the field tests, and the derailment coefficient and degree of wheel off-loading were calculated in order to evaluate the tilting train running safety depending on the running speeds (120km~180km) on the conventional line. Moreover, roadbed pressure, settlement and acceleration were also observed as tilting-train-induced roadbed responses in order to estimate the roadbed stability depending on the running speeds. Consequently, the measured derailment coefficient and degree of wheel off-loading were satisfied with their own required limits, and all of the roadbed responses were less than those of existing high-speed train (KTX) over an entire running speed range considered in this study. As a result of this study, the tilting train which will be operated in combination with existing trains is expected to give no adverse impact on the conventional line even with its improved running speed.

Keywords : TTX(Tilting Train Express), roadbed response, roadbed pressure, roadbed settlement, roadbed acceleration

초 록 한글초록은 기존선 고속화의 여러 대안 중 선로의 직·복선화 및 신선 건설에 의한 기존철도의 고속화는 시간단축 효과나 선로용량 증대의 폭은 크지만 막대한 투자 채원이 소요된다. 이에 비해 기존선을 그대로 사용하면서 속도를 향상하기 위해 선형개량 및 준고속 틸팅열차의 투입은 기존 인프라를 이용함으로써 보다 경제 적이며 실용적이라는 장점이 있다. 하지만, 틸팅열차의 경우 기존열차와는 주행 메카니즘이 다르기 때문에 주행 안전성을 확보하기 위해서는 기존에 부설되어 있는 궤도노반의 성능평가가 선행되어야 한다. 또한 열차주행에 따라 발생하는 노반의 침하하는 궤도틀림이나 열차의 탈선 등을 유발할 수 있으므로 틸팅열차 주행에 의해 발생하는 궤도 부담력에 따른 노반의 거동 특성을 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 현장계측을 통해 틸팅열차의 기존선 주행속도별(120~180km/h) 주행안전성과 노반성능을 평가하였다. 모든 주행속도에서 탈선계수와 윤증감 소를 허용한계치를 만족하였으며, 또한 노반성능 면에서는 기존 운행 고속열차(KTX)에 비하여 작은 노반응답(노 반압력, 노반침하, 노반진동가속도)을 보였다. 이러한 계측 결과를 기반으로, 기존열차와 혼용 투입될 틸팅열차는 본 연구의 계측대상 노선과 동일한 성능수준의 궤도노반에서는 최고운영속도(180km/h)에서 안전한 주행이 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 틸팅열차, 노반응답, 노반응력, 노반침하, 노반진동가속도

1. 서 론

철도는 정시성과 안전성, 신속성이 주요한 특성이면서 장 점이라 할 수 있는데 우리나라 지형 특성상 곡선이 많은 기존선에서 속도의 증가를 통한 신속성의 확보는 제한이 있다. 특히 곡선부에서 열차가 주행하는 경우 원심력이 증가하게

되므로 승객의 승차감 향상과 안전성 확보 차원에서 속도를 감소시킬 수밖에 없다. 그러나 한국형 틸팅열차(Tilting Train eXpress, TTX)의 경우, 곡선을 감지하게 되면 차체를 강제 적으로 곡선 내부로 경사지게 함으로써 원심력을 감소시키고 이를 통해 승객의 쏠림과 열차의 탈선 등을 방지할 수 있게 된다.

현재 국내에서는 기존선 복선전철화 사업으로 경부선/중앙선/장항선/경전선/전라선 등의 복선전철화 및 개량사업이 추진 중 및 계획 하에 있다. 그러나 현재까지도 국내 기존 선 개량계획이 없는 구간이 있으며, 개량계획구간도 완공시

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 고속철도연구본부
E-mail : thkoh@krii.re.kr

¹한국철도기술연구원 신교통연구본부

점까지는 상당한 기간이 소요될 예정이다.

따라서 개량계획이 상당기간 소요되는 구간 및 비개량구간에 틸팅열차를 투입함으로써 기존 노선을 최대한 활용하여 중·단기적으로 속도향상을 도모할 수 있다.

하지만 주행속도 향상에 따른 주행안전성 및 노반에 미치는 궤도부담력의 검토가 선행 되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 기존선에 투입 예정인 틸팅열차의 주행속도에 따른 기존 궤도노반에 미치는 부담력에 대한 비교·분석을 통해 주행 안전성 및 노반 성능평가를 수행하였다.

국내·외적으로 선로구축물에 대한 성능평가 및 안전성 평가는 지속적으로 이루어지고 있는 반면, 흙노반에 대한 성능평가 연구는 미미한 실정이다. 특히 고속선이 아닌 기존 영업선에서의 노반응답을 통한 노반 성능평가 연구는 활발히 이루어지지 않은 상황이며, 대부분의 연구는 실내시험 및 시험시공을 통해 얻어진 노반응답(노반압력, 노반침하, 노반가속도)과 수치해석을 비교·검토함으로써 노반의 직접적인 성능평가 보다는 흙노반 구조의 최적 설계두께를 결정하는데 이용되고 있는 실정이다.

시험 계측을 통한 연구로 이진욱 등[1]은 열차의 운중과 주행속도를 고려하여 모사 열차하중을 재하하는 모형토조 실험을 통하여 반복하중에 따른 분니발생 유무를 파악하고, 자갈도상의 관입과 침하량 및 토압 등의 거동을 계측 및 분석함으로써 연약화에 미치는 영향을 연구하였으며, 권순섭[2]은 LFWD시험을 이용한 현장시험과 모형토조를 이용한 실내시험 및 수치해석을 수행하여 궤도의 동특성과 궤도지지시스템 상태와의 상관성에 대해 연구하였다. 또한 전상수 등[3]은 주행안전성이 확보되는 틸팅열차의 허용주행속도내에서의 노반의 거동(침하, 지지력)을 유한차분해석을 통해 검토하였다. Momoya 등[4]은 열차하중과 같은 이동하중에 의한 노반내 응력상태는 단순재하와는 달리 주응력 방향이 회전하기 때문에 이에 대한 영향을 반영하여야 적절한 변형거동을 예측할 수 있다고 제안하였다.

본 연구에서는 향후 기존선 속도향상을 목적으로 투입되는 틸팅열차의 주행속도별 노반응답을 측정하여, 기존선 투입에 앞서 요구되는 노반의 성능데이터를 확보하고자 하였으며, 이를 위해 틸팅열차의 최고 주행속도(180km/h)가 가능한 호남선 R2000지점에서 현장계측을 실시하여 주행안전성 및 노반의 성능평가를 수행하였다.

2. 계측대상 차량 및 현장 개요

2.1 틸팅열차

틸팅열차는 곡선부 주행 시 차체를 곡선의 내측으로 기울이게 하는 기술로서, 곡선부 주행 시 발생하는 원심가속도의 횡방향 성분을 중력가속도의 횡방향 성분으로 감쇄시킴으로써 승객이 느끼는 횡가속도를 저감시키는 기술이다. 열차에 이와 같은 틸팅기술을 적용하면 승차감 향상뿐만 아니라 곡선부 통과속도를 증가시킬 수 있게 되므로 운행시간이 단축되며, 곡선부 통과시의 가감속 빈도도 줄어들어 그만큼의 에너지소비도 줄일 수 있게 된다. 일반적으로 곡선부의 속도제한은 궤도여건이나 열차의 성능에 따른 제한보다는 승차감의 저하를 방지하기 위해 규정지어지는데, 곡선부 주행시 승객이 느끼는 횡가속도가 일정 값을 초과하지 않도록 제한된다. 이와 같은 틸팅 원리에 따라, 틸팅열차는 노선에 곡선부가 많을수록 그 효과가 크게 나타나며, 또한 한국형 틸팅열차의 경우 곡선뿐만 아니라 직선부에서도 그 유용성이 높다[5].

2.2 계측대상 현장

2.2.1 선로현황

틸팅열차의 주행속도별 궤도노반 성능평가를 위해 호남선 나주-다시구간(kp208.415 ~ kp208.425)을 시험구간으로 선정하였다. Fig. 2와 Table 1은 계측 대상선로의 전경 및 현황을 보인다.

2.2.2 노반 특성

일반적으로 열차하중의 40%정도는 레일과 침목에 의해 지지되며 나머지는 자갈도상을 통해 노반으로 전달된다. 철도 노반에 사용되는 흙 노반 재료의 조건은 지지력이 크고, 압축성이 작으며, 분니가 발생하지 않는 양질의 단일층으로 구성된다. 또한 진동 또는 강우에 안전하여야 하며 열차하중을 충분히 지지할 수 있는 강도를 가져야 한다.

계측대상 노반재료의 기본물성을 평가한 결과(Table 2, Fig. 3 참조), 흙의 종류는 통일분류법(USCS)상 SM계열이며, 최적함수비 8.2%, 최대건조밀도(γ_{dmax})는 20.4kN/m³이다.

영업선 궤도노반의 현장특성상 노반의 지지력을 평가하기 위하여 DCP(Dynamic Cone Penetration)방법을 활용하였으

Fig. 1 Typical TTX Arrangement

Fig. 2 Overview of Targeted Track

Table 1 Material Properties of Targeted Track

구분	현황
선구명 / 구간	호남선 / 나주-다시구간
곡선반경(m)	2000m
레일	50kgN(장대레일)
침목종류/부설간격	PC침목/625mm
체결구	Pandrol e-clip
캔트(C)	60mm

며, 그 결과는 Konard 등[6]이 제안한 DCP지수(PR)와 E_{PLT} 의 상관관계식 (1) 의해 계측대상 노반의 지지력을 추정하였다.

$$\text{Log}(E_{PLT}) = (-0.88405)\text{Log}(PR) + 2.90625 \quad (1)$$

여기서,

PR: DCP 1회 타격시 관입 깊이(mm/blow)

또한 추정한 E_{PLT} 을 활용하여 상부노반 다짐기준($k_{30}=11 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$) 만족여부를 판단하고자 철도총합기술연구소[7]에서 제안한 식 (2)를 활용하였다. Fig. 4는 DCP를 활용한 노반지지력 평가 흐름도이다.

$$k_{30} = E_{PLT}/48.73 \quad (2)$$

여기서,

E_{PLT} : 변형계수(MPa),

k_{30} : 평판직경 0.3m에서의 재하시험 값(kN/m^3)

Fig. 4와 같은 절차를 통해 k_{30} 을 추정한 결과, 상부노반 다짐기준($k_{30}=11 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$)에 비해 매우 양호한 지지력이 확보된 노반으로 평가되었다.

또한 DCP지수와 CBR간의 경험적인 관계식을 통해 노반 지지력을 평가하였는데, Table 3[8,9]과 Fig. 5는 기존 연구 결과를 토대로 제시된 상관식을 이용하여 DCP결과를 CBR

Table 2 Material Properties of Targeted Roadbed material

통과중량백분율 (%)	No.10	93.9	$\gamma_{d_{max}}(\text{kN/m}^3)$	20.4
	No.40	19.4	$\omega_{OMC}(\%)$	8.2
	No.200	5.8	비중	27.4
USCS		SM	PI(%)	NP

Fig. 3 Grain Size Distribution of Targeted Roadbed Material

Fig. 4 Flow chart of Roadbed Bering Capacity Estimation

값으로 변환하여 도식화한 것이다.

기존 상관식을 활용하여 CBR을 추정한 결과, 24~33%의 범위로 나타났으며, 이는 이일화 등[10]에 의한 상대다짐도 95%의 실대형 구축 노반에서 CBR이 8~9%정도인 결과와 비교 했을 때 계측대상 현장노반의 지지력은 매우 양호한 것으로 판단된다.

2.3 계측 항목 및 센서

주행 열차의 실제 발생 응답을 왜곡하거나 데이터의 손실이 발생하지 않도록 수집율(Sampling Rate)을 5kHz로 충분히 설정하였다. 또한 발생한 윤중 이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석을 통해 디지털 필터로 Low-Pass filtering과 Hi-

Table 3 DCP-CBR Relationships (Modified after [9])

연구자	상관식	CBR(%)	Tested Material	비고
Livenh(1991)	$\log(\text{CBR})=2.56-1.16\log(\text{DCP})$	24.5	Unknown	실내
Ishai and Livenh(1993)	$\log(\text{CBR})=2.45-1.12\log(\text{DCP})$	20.9	Granular and Cohesive	현장, 실내
Harison(1987)	$\log(\text{CBR})=2.55-1.14\log(\text{DCP})$	25.1	Cohesive	실내
Smith and Pratt(1983)	$\log(\text{CBR})=2.56-1.16\log(\text{DCP})$	24.5	Unknown	현장
Kleyn(1975)	$\log(\text{CBR})=2.62-1.27\log(\text{DCP})$	21.8	Unknown	실내
NCDOT(1998)	$\log(\text{CBR})=2.60-1.07\log(\text{DCP})$	33.1	Cohesive	현장, 실내
Norwegian Road Research(1995)	$\log(\text{CBR})=2.44-1.07\log(\text{DCP})$	22.9	Unknown	현장, 실내
안지환(2003)	$\log(\text{CBR})=2.50-1.01\log(\text{DCP})$	30.9	SW-SM	현장

Fig. 5 Estimated CBR Values by Previous Relationships

Table 4 Summary of Measurement Devices

계측항목	계측센서	비고
윤중	2축 변형률 게이지	5mm
횡압	2축 변형률 게이지	5mm
노반압력	토압계	200kPa
노반침하	변위계	± 50mm
노반가속도	가속도계	± 0.5g

Fig. 6 Schematic Drawing for Measurement of Track and Roadbed

Pass filtering 처리를 함으로써 데이터의 신뢰성을 높였다. 또한 궤도 주행안전성 및 노반 성능평가를 위한 계측항목과 이를 위해 설치한 계측센서는 Table 4와 같다.

토압계와 변위계는 주행 차량에 의해 발생한 노반에서의 동적압력(Dynamic Pressure)과 동적변위(Dynamic Displacement)를 계측하기 위해 사용되었다.

Fig. 7 Measurement Devices installed at Rail and Roadbed Surface

현장계측시스템의 개략적인 구성은 Fig. 6과 같으며, 노반 계측센서는 열차주행시험 전에 계측위치에 해당하는 궤도를 일부 철거한 후 Fig. 7과 같이 상부노반면에 설치하였다.

3. 궤도응답 특성

틸팅열차 주행시 궤도에서 측정된 동적윤중과 횡압을 기반으로 차량의 주행안전성 평가지수인 주행속도별 탈선계수와 윤중감소율을 산정하였다. 계측 대상구간에서 주행속도에 따라 계측된 틸팅열차의 윤중과 횡압은 각각 58~66kN, 4~7kN의 수준이었으며, 또한 150km/h속도로 주행하는 기존의 KTX차량과 비교하여도 작은 수준의 응답으로 나타났다.

3.1 탈선계수

Fig. 9는 내·외측 레일에서 계측된 윤중과 횡압 측정치를 이용하여 산정된 틸팅열차(150km/h)의 차측별 탈선계수이다. 틸팅열차의 주행속도에 따른 틸팅열차의 탈선계수는 주행안전성 판단 기준인 허용한계치(0.8) 이내로 평가되어, 틸팅열차의 최고운영속도 내에서 탈선에 의한 주행안전성은 문제가 없는 것으로 판단된다.

3.2 윤중감소율

Fig. 10은 틸팅열차 주행시 내·외측 레일에 발생하는 동적윤중 측정데이터를 이용하여, 차체 진동을 고려한 차량전복에 대한 안전성 판단기준인 윤중감소율($\Delta P/P$) 결과를 보인다. 이때 윤중(P)은 설계윤중 75kN을 사용하였다.

Fig. 8 Measured Vertical and Lateral Wheel Loads

Fig. 9 Coefficient of Derailment estimated with TTX Running Speed

본 계측에서 대상으로한 속도대역에서의 틸팅열차 윤증감 소용은 대체적으로 열차속도에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이는 주행속도 증가에 따른 윤증 감소가 원인으로 판단된다. 또한 틸팅열차 차축별 윤증감소율 산정결과, 내측부는 동력객차부(M)에서 외측부는 객차부(T)에서 최대 윤증감소율이 나타났다. 그러나 현장계측에 의한 차축별 윤증감소율은 모두 허용한계치(0.8)이내로 나타나 주행안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 10 Vertical Wheel Load Reduction Ratio Estimated with TTX Running Speed

4. 노반응답 특성

4.1 노반압력

틸팅열차의 주행속도에 따라 노반에 전달되는 동적하중의 영향을 상부노반에서 계측된 노반압력의 변화를 통해 평가하였다. Fig. 11은 틸팅열차 주행속도에 따른 노반압력 측정 결과를 보인다.

실대형 시험을 통해 국내 열차하중 조건에서 강화노반에 작용하는 노반압력 특성을 파악하고자 현장시험을 수행하였

(d) Roadbed Pressure with Running Speed

Fig. 11 Measured Roadbed Pressure

으며, 그 결과 강화노반의 상부에서 동적운중(재하주파수 5Hz) 140kN 재하시 26~33kPa 정도의 토압이 발생하였다[11]. 또한 열차(4200호대 기관차, 화차)주행속도에 따른 강화노반과 원지반면에 전달되는 하중을 측정한 결과, 강화노반층 상부에서 주행속도 14~45km/h에서 최대 토압의 크기는 약 12kPa의 수준을 보였다[12].

본 계측에 있어서, 틸팅열차의 경우 주행속도대역(180km/h 이하)에서 9~11kPa의 토압이 발생하였는데, 경부선 자갈도상궤도의 경우 KTX차량에 의해 상부노반면에 작용하는 압력이 약 20~60kPa의 범위[12]인 것과 비교해볼 때, 이는 틸팅열차가 경량차체로 이루어져 KTX에 비해 측당하중이 작아 노반압력 역시 작게 나온 것으로 판단된다. 또한 측정 대상 노반은 고속열차(KTX)와 기존열차(무궁화, 새마을호, 화물)가 혼용 운영되고 있는 영업노선(호남선)으로 수년간의 유지보수를 통해 자갈도상층 두께가 표준단면(27cm)에 비해

약 10cm 정도 두꺼워져 있는 상태이다. 이로 인해 상부노반에 전달되는 열차하중이 표준단면보다 하중분산 효과가 높아 실내시험 및 선행연구결과 보다 토압이 작게 평가되었다.

참고로, 실험형 반복재하시험결과 Muramoto 등[13]에 의하면, 안정화된 노반에서의 노반압력은 노반을 이루고 있는 재료의 다짐도와 노반에 작용한 반복하중의 재하횟수에 민감하게 반응하지 않는, 일정한 수준의 변화를 보이는 것으로 보고되었는데, 본 연구에서도 계측된 노반압력은 틸팅열차 주행속도에 민감하게 반응하지 않는 일정한 수준을 보였다.

4.2. 노반 침하

틸팅열차 주행에 의한 노반침하를 측정한 결과(Fig. 12), 탄성침하량은 노반관리를 위해 제시된 허용탄성침하량(2.5mm)에 크게 미치지 못하는 일정한 수준(0.1mm 이하)을

(d) Roadbed Settlement with Running Speed

Fig. 12 Measured Roadbed Settlement

보였으며, 또한 열차 주행속도에 따라 민감한 응답을 보이지는 않았다. 이처럼 상대적으로 작은 변위응답을 보이는 것은 계측대상 구간이 2001년 복선화작업 완료 후, 현재까지 열차의 반복하중으로 인한 노반의 압축 및 유지보수의 영향으로 노반의 다짐상태가 충분히 안정화된 상태를 유지하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

김중호[14]는 노반지지력이 노반침하에 많은 영향을 미치며, 이일화 등[15]은 모조토조를 이용한 반복재하시험을 통해 노반의 침하량을 감소시키기 위해서는 상부노반의 지지력을 높이는 것이 가장 효과적이라고 보고한바 있다.

4.3 노반 가속도

틸팅열차의 주행속도에 따라 노반에 발생한 진동가속도는 Fig. 13과 같다. 틸팅열차 주행속도별 노반에 발생한 진동가속도는 0.2~0.6g(Peak-to-Peak Amplitude)범위의 수준으로, 주행속도에 따라 선형적으로 증가하는 뚜렷한 경향을 보였다. 또한 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 통해 탁월주파수성분이 40~60Hz대역으로 나타나 일반적으로 보고되고 있는 다짐된 노반의 주파수특성과 일치하였다.

계측된 진동가속도 수준은 선행연구결과[16]에서 보고된 기존선 노반면에서의 진동가속도 범위(0.1~1.0g)에 해당됨을 알 수 있다(Fig. 15참조).

Fig. 14 Roadbed Acceleration with TTX Speed

Fig. 15 Previously Measured Roadbed Accelerations by depth (Modified after [16])

(a) TTX(120km/h)

(b) TTX(150km/h)

(c) TTX(180km/h)

Fig. 13 Measured Roadbed Acceleration

4.4 단위하중당 노반응답

노반에 가해지는 열차하중은 열차 종별 및 속도에 따라서 변화하기 때문에 노반응답 측정치를 각 열차의 운종으로 나누어 단위하중당 노반응답(노반압력, 노반침하, 노반진동가 속도)으로 도시하였다(Fig. 16 참조).

Fig. 16에서 보는 바와 같이, 노반압력과 노반침하는 열차 속도에 민감한 응답을 보이지 않았으나, 상대적으로 노반진동가 속도는 열차주행속도에 비례하여 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다.

또한 Sunaga 등[17]에 따르면 단위하중당 노반침하가

$20 \times 10^{-4} \text{mm/kN}$ 이하 일 때 노반은 충분한 강성을 가지는 것을 확인하였는데, 본 연구의 측정대상 구간에서 $10.7 \sim 13.2 \times 10^{-4} \text{mm/kN}$ 범위의 노반침하가 측정되어 측정대상구간 노반 역시 충분한 강성을 확보하고 있는 것을 알 수 있다.

5. 기존 운행 고속열차(KTX)와의 비교

Fig 17은 계측 대상구간에서 틸팅열차와 동일한 속도 (150km/h)로 주행한 KTX차량과의 비교 결과이다. 경량차체로 이루어진 열차특성 때문에 모든 노반응답(노반압력, 노

Fig. 16 Roadbed Response per unit Vertical Wheel Load

Fig. 17 Comparison of Roadbed Response for TTX and KTX (V=150km/h)

반침하, 노반진동가속도)에서 틸팅열차가 KTX차량에 비해 작은 수준의 응답을 보였다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존선 투입예정도로 개발되어 시험운행중인 틸팅열차를 대상으로 주행안전성을 평가하고자 궤도에서 측정한 윤종과 횡압을 근거로 탈선계수와 윤종감소율을 산정하였으며, 또한 노반의 성능을 평가하고자 노반압력, 노반침하, 노반진동가속도를 측정한 결과는 다음과 같다.

(1) 틸팅열차 주행속도 대역(120~180km/h)에서 주행열차에 의한 동적노반압력은 약 10kPa 정도로 측정되었다. 이는 측정대상구간의 자갈도상층 두께가 유지보수과정을 통해 표준단면보다 약 10cm정도 더 포설되어 상부노반에 전달되는 하중분산효과가 커, 선행연구결과와 비교했을 때 작은 수준의 응답을 보인 것으로 판단된다. 또한 주행속도가 노반압력에 미치는 영향은 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다.

(2) 틸팅열차 주행속도 대역(120~180km/h)에서 노반침하량은 약 0.1mm정도의 작은 수준의 응답을 보였는데, 이는 2001년 측정대상구간의 복선화 작업 완료 후, 현재까지 열차의 반복하중 영향으로 노반의 다짐상태가 충분히 안정화된 상태를 유지하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 노반침하량은 노반의 지지력에 상당한 영향을 받게 되는데, 측정대상 구간에서의 단위하중(윤종)당 발생 노반침하량($10.7 \sim 13.2 \times 10^{-4} \text{mm/kN}$)은 선행연구결과($20 \times 10^{-4} \text{mm/kN}$)와 비교했을 때, 대상노반의 지지력 수준을 평가할 수 있는 지표로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 틸팅열차 주행속도 대역(120~180km/h)에서 노반진동가속도의 탁월주파수성분은 40~60Hz대역 내에서 주행속도에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 더욱이 노반진동가속도 크기 역시 주행속도에 따라 뚜렷한 선형적 증가를 보이는 것을 알 수 있다.

(4) 종합적으로, 최고운영속도(180km/h) 내에서 틸팅열차가 기존선 궤도노반에 미치는 부담력은 경량차체로 이루어진 열차특성과 자갈도상궤도로 이루어진 선로특성으로 인해 궤도노반 안전성에 제한적인 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 또한 이러한 측정 결과를 기반으로, 기존열차와 혼용 투입될 틸팅열차는 본 연구의 측정대상 노선과 동일한 성능 수준의 궤도노반에서는 최고운영속도(180km/h)내에서 안전한 주행이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J.W. Lee, S.H. Lee, D.S. Kim, B.S. Kwon (2003) A Study on the Characteristics of Behavior of Railway Roadbed due to Softening, *Proceedings of The Korean Society for Railway*, pp. 182-187.
- [2] S.S. Kwon (2008) Evaluation of the Dynamic Characteristic and Condition for the Railway Track using LFWD(Light Falling Weight Deflectometer), *M.S. Thesis*, Seoul National University of Technology.
- [3] S.S. Jeon, G.Y. Eum, J.M. Kim (2007) Estimation of the Roadbed Settlement and Bearing Capacity According to Radius of Curve and Cant in Railroad, *Journal of Korean Society of Hazard mitigation*, 7(1), pp. 29-38.
- [4] S. Momoya, E. Sekine, F. Tatsuoka (2005) Deformation characteristics of railway Roadbed and Subgrade under Moving Wheel Load, *Japanese Geotechnical Society(JGS), Soil and Foundation* 45(4), pp. 99-118.
- [5] Korea Railroad Research Institute (2005) Development of Track System Innovation Technology for Speed-Up of Conventional Line, Minister of Land, Transport and Maritime Affairs, pp. 51-54.
- [6] J.M. Konard, D. Lachance (2000) Mechanical Properties of Unbound Aggregates from DCP and plate Load Test, *Proceedings of the fifth International Conference on Unbound Aggregate in Roads*, Nottingham, United Kingdom.
- [7] 鐵道總合技術研究所 (1992) 鐵道構造物等設計標準, 同解説: 土構造物, 丸善株式會社.
- [8] J.H. An, S.L. Yang, H.M. Park, S.A. Kwon (2004) Application of The Dynamic Cone Penetrometer for Strength Estimation of Pavement Foundation, *Journal of Korean Society of Road Engineers*, 6(3), pp. 17-26.
- [9] R. Salgado, S. Yoon (2003) Dynamic Cone Penetration Test (DCPT) for Subgrade Assessment, Joint Transportation Research Program. Proj. No. FHWA/IN/JTRP-2002/30, SPR-2362 Published by Purdue University, pp. 14-16.
- [10] J.W. Lee, C.Y. Choi, S.H. Lee, C.Y. Lee (2004) Characteristics of Behavior of the Soft Roadbed through Long-Term Instrumentation on the Field Test, *Proceedings of the Korean Society for Railway*, pp. 191-197.
- [11] C.Y. Choi, S.H. Lee, S.K. Hwang (2007) Characteristics of Earth Pressure with Variable Roadbed Thickness by Railroad Loading, *Journal of Korean Society of Civil Engineers D*, 27(2), pp. 217-224.
- [12] I.W. Lee, S.H. Lee, Y.S. Kang (2006) Characteristics of Roadbed Behaviors of Concrete Track for High-Speed Railway, *Journal of the Korean Society for Railway*, 9(3), pp. 298-304.
- [13] K. Muramoto, E. Sekine (1998) A Study on the Compaction Control of Embankments to Receive Train Loads, *RTRI REPORT*, 12(4), pp. 31-36.
- [14] J.H. Kim (2002) A Study on the Characteristic of Settlement with Thickness variation of Railway Roadbed, *M.S. Thesis*, Seoul National University of Technology.
- [15] I.W. Lee, H.K. Kim, S.K. Hwang, Y.K. Cho (2000) The Characteristic of Reinforced Roadbed Settlement on High-Speed Railroad, *Journal of Korean Society of Civil Engineers D*, 20(6), pp. 681-690.
- [16] E. Sekine, K. Muramoto (1995) Bearing Capacity of Actual Existing Roadbed. *RTRI REPORT*, pp. 31-36.
- [17] M. Sunaga, E. Sekine (1991) Study on the Development of Economical Reinforced Roadbed, *RTRI REPORT*, 5(10), pp. 25-33.

접수일(2011년 9월 16일), 게재확정일(2011년 10월 10일)