

소형동평판재하시험기로 측정된 궤도 겉보기 강성의 자갈궤도 상태평가 지표로서의 적용성 고찰

Evaluation of Applicability of Apparent Track Stiffness Measured by Light-Weight Deflectometer as a Ballasted Track Condition Index

최영태¹⁾ · 황성호¹⁾ · 장승엽[†] · 박봉식¹⁾ · 심광섭²⁾

Yeong-Tae Choi · Sung Ho Hwang · Seung Yup Jang · Bongsik Park · Gwang Seop Shim

Received: December 24th, 2017; Revised: January 3rd, 2018; Accepted: January 12th, 2018

ABSTRACT : Ballasted track has been widely used due to its flexibility. However, the plastic deformation of ballasted track causes the evolution of track geometrical errors, and hence it requires continuous maintenance; increase in number of trains, weight, and speed expedites maintenance frequency and cost as well. Ballast stiffness is well-known as an indicator of design and maintenance. In this regard, this paper aims to suggest the method to measure ballast track stiffness using light-weight deflectometer (LWD) and thus verify its applicability as a maintenance measure. Preliminary field tests determined simple field testing protocol to measure track stiffness. The apparent ballast stiffness by LWD shows good correlation with TQI (Track Quality Index) and maintenance length. That is, as average of apparent stiffness increase, TQI and tamping length decrease exponentially. Therefore, apparent stiffness can be used as an index for ballast condition assessment.

Keywords : Ballasted track, Apparent stiffness, Light-weight deflectometer (LWD), Maintenance, Ballast track condition assessment

요 지 : 자갈궤도는 그 유연성으로 인해 전세계적으로 널리 쓰이고 있다. 그러나 소성 변형이 발생하여 궤도선형오차가 증가하므로 지속적인 유지관리가 필요하며, 최근 통과톤수, 열차중량, 속도 증가 등으로 유지보수 비용과 횡수가 증가하고 있다. 자갈궤도 강성이 거동의 중요 지표로 알려져, 소형동평판시험기(LWD)를 레일과 침목이 체결된 상태에서 실험을 하여 궤도 겉보기 강성을 측정하였다. 예비실험을 통하여 현장시험법을 결정하였고, 측정된 겉보기 강성과 TQI(Track Quality Index), 유지관리지표와의 상관성을 분석한 결과, 평균강성이 증가함에 따라 TQI와 탬핑연장이 지수함수적으로 감소함을 밝혔다. 이로부터 겉보기 강성을 궤도상태지표로써 사용가능함을 제시하였고, 향후 정량적인 유지관리지표를 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 자갈궤도, 겉보기 강성, 소형동평판재하시험기(LWD), 유지관리, 자갈궤도 상태평가

1. 서 론

자갈궤도는 초기건설비용이 저렴하고, 소음·진동 발생이 적고 지반침하에 유연하게 대처할 수 있다. 그러나 소성 변형이 발생하는 궤도로서 이로 인해 부등침하 발생이 불가피하고, 이는 궤도틀림으로 이어져 주기적인 유지관리를 필요로 한다. 경부고속철도 1단계(광명-동대구) 구간은 자갈궤도로 건설된 구간으로 KTX 개통 이후 10여 년 이상이 경과하였고, SRT 개통 등 열차용량이 증가함에 따라 자갈궤도의 유지보수 주기가 짧아지고 비용이 증가하고 있다.

우리나라 고속철도 자갈궤도는 궤도틀림의 크기에 따라 유지보수를 실시한다. 한국철도시설공단 선로유지관리지침

(2015)에 따르면 매월 선형 검측차를 이용해서 수평틀림, 궤간틀림, 고저틀림(면틀림), 방향틀림(줄틀림) 등 궤도틀림을 측정하도록 규정되어 있으며 이중 자갈침하 등에 따른 고저틀림이 가장 두드러지게 나타나므로 주로 고저틀림에 의해서 선형관리가 이루어지고 있다. 고저틀림은 일정 길이의 현에 대한 중거값(Versine)으로 측정한다. 고속철도에서는 10m와 30m 현에 대한 중거값을 측정하여 관리기준치를 설정하고 있다. 궤도틀림 피크값 외에도 전체적인 궤도선형의 품질을 관리하기 위한 방안으로 TQI(Track Quality Index)를 사용한다. TQI는 검측차로 측정된 궤도틀림값으로부터 200m 단위로 분할된 구간에서 산정된 표준편차로 선로의 부등침하에 대한 일정 구간(200m)의 통계적 표현이라고 할 수 있다.

1) High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

† Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation (Corresponding Author : syjang@ut.ac.kr)

2) High-Speed Railroad Facility Maintenance Office, Korea Railroad

고저틀림은 자갈궤도의 부등침하로 정의될 수 있기 때문에 자갈궤도의 침하를 예측할 수 있으면 고저틀림을 사전에 예측할 수 있고, 이에 따라서 유지관리 계획을 세울 수 있다. 자갈궤도의 침하에 영향을 미치는 인자로는 자갈궤도의 강성, 자갈도상의 상태(마모도, 토사혼입율(세립분함량), 수분함량), 열차의 속도와 통과톤수 등이 있는 것으로 알려져 있다(Leng & Al-Qadi, 2010; Zhang et al., 2014; Indraratna et al., 2006; Smekal et al., 2006; Hunt, 2000).

이중 궤도 강성은 자갈궤도 설계의 주요 인자이다(한국철도시설공단, 2014). 궤도 강성을 정의하는 가장 대표적인 방법은 궤도에 수직으로 작용하는 하중을 수직 변위로 나누는 것이다(Puzavac et al., 2012). 이러한 궤도 강성은 충분한 다짐을 통해 적정값을 확보할 수 있다. 따라서 궤도 부설 시나 유지관리 시에는 MTT 등의 장비를 이용하여 자갈다짐을 수행한다. 그러나 현재 국내의 경우를 통틀어 궤도 강성에 대한 명확한 기준이 제시된 바가 없다. Lichtberger(2005)은 침하진진율이 궤도의 수직강성(Vertical track rigidity)의 제곱에 반비례하며, 궤도틀림 표준편차(Standard deviation of longitudinal level)는 궤도 강성에 반비례함을 제시하였다. Milosavljevic et al.(2012)는 궤도틀림 예측모델들을 비교·검토하여 수직 궤도 강성이 궤도틀림에 직접적인 영향을 준다고 결론지었다. Puzavac et al.(2012)은 문헌조사를 통하여 궤도 강성이 궤도거동에 지배적임을 밝혔으며, 궤도틀림에 대한 원인분석 없이 탬핑 등에 의한 유지관리는 단기처방일 뿐 장기적으로는 유지보수비용증가를 유발한다고 지적하였다.

자갈궤도의 설계, 시공, 유지관리 효율을 향상시키기 위한 EUROBALT 프로젝트(Meissonnier, 2000)에서는 궤도 강성과 궤도틀림 표준편차의 상관관계로부터 최적의 궤도 강성을 제안하였다. Berggren(2009)은 연속적인 자갈궤도 강성평가를 위한 측정장치를 개발하기도 하였으며, 일본에서는 침목에서 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용해서 강성을 측정하기도 하였다(Furukawa, 2016). Kim et al.(2008)은 자갈궤도 유지보수작업의 적정성을 평가하기 위하여 지중탐사레이더(GPR, Ground Penetrating Radar)와 PFWD(Portable Falling Weight Deflectometer)를 경부선에 적용하기도 하였다.

이와 같이 자갈궤도의 강성이 궤도의 거동과 직접적인 관계가 있으며 이에 대한 연구가 해외에서는 활발히 이루어지고 있다. 그러나 국내에서는 자갈궤도의 강성을 연속적으로 측정할 수 있는 장비가 없어, Kim et al.(2008)의 연구 외에는 궤도 강성에 대한 연구가 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 합리적인 궤도상태 평가 및 관리방안을 수립하기 위해 도로나 지반분야에서 도로포장체나 지반의 강성이나 다짐도 평가에 널리 사용되는 소형동평판재하시험기

(Light-Weight Deflectometer, LWD)를 적용하여 자갈궤도의 겉보기 강성을 평가하고 자갈궤도의 상태를 나타낼 수 있는 지표으로써 겉보기 강성의 적용성을 검토하였다.

2. 자갈궤도 강성평가 기법 개발

2.1 궤도 강성의 영향

서론에서 언급한 것과 같이 자갈궤도의 유지보수는 자갈궤도의 강성과 밀접한 관계를 갖는다. Hunt(2000)는 Fig. 1과 같이 자갈궤도 강성과 유지관리지표인 궤도틀림 표준편차와의 상관관계를 제시하였는데 궤도 강성이 클수록 궤도틀림은 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

자갈궤도의 궤도틀림은 도상침하로 인해 유발되므로 궤도틀림 진전 예측을 위해서는 자갈도상의 침하모델이 필요하다. Choi et al.(2016)은 실내 자갈박스 실험으로부터 하중에 따른 자갈도상의 침하모델을 제안하였다. 열차의 반복하중과 침목바닥면에서 자갈도상에 작용하는 하중이 증가함에 따라 자갈도상의 침하도 증가하는 예측식을 제시하였다. 하중 조건만을 변수로 적용하는 한계를 극복하기 위하여, 깨끗한 도상자갈과 세립분을 30%(깨끗한 자갈 중량비)를 추가하여 건조된 상태와 습윤(세립분 중량비의 15% 함수비 조건) 조건을 추가하여 자갈박스 실험을 수행하였다. Sine파 형태의 반복하중을 1백만 회 이상 재하하여 영구변형량과 매 사이클마다 탄성변형량(최고변형량과 최소변형량의 차)을 측정하였다. Choi et al.(2016)에서 제시한 모델형태와 같이 수정로그함수가 침하증가량을 잘 나타내었다. 주목할 점은 Fig. 2에서와같이 실험조건에 관계없이 반복재하 동안 탄성변형량이 비교적 일정하게 유지된다는 것이다. 그리고 침하량은 탄성변형량의 증가에 따라서 지수함수적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 특성으로부터 자갈도상의

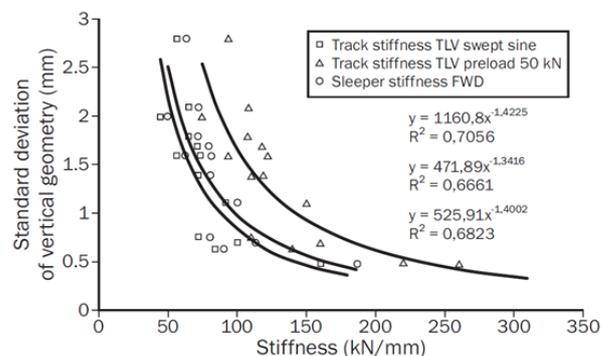


Fig. 1. Relationship between track irregularity and track stiffness (Hunt, 2000)

침하진전예측모델을 Eq. (1)과 같이 제안하였다. 여기에서 자갈도상의 침하량은 궤도의 탄성변형량의 함수($\epsilon_1 = \beta_1 \delta_e^{\beta_2}$)로 표현된다.

$$\epsilon_p = \epsilon_1(N + \alpha \log(N)) \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_1 = \beta_1 \delta_e^{\beta_2} = \beta_1 (P/k_{track})^{\beta_2}$

$\alpha = constant = 1,000,000$

$\beta_1 = 1.525 \times 10^{-8}$

$\beta_2 = 1.819$

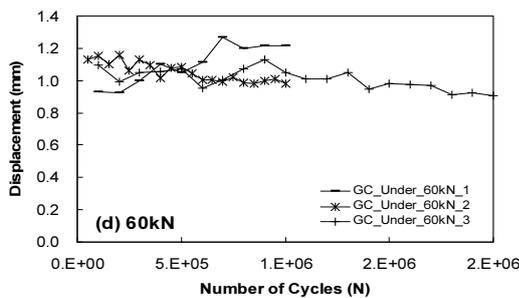
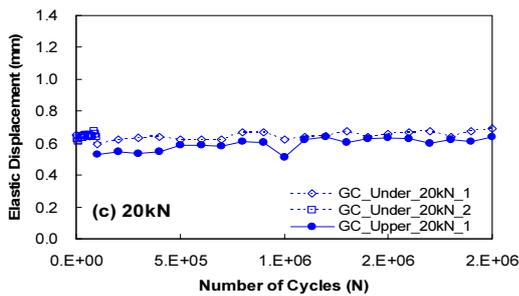
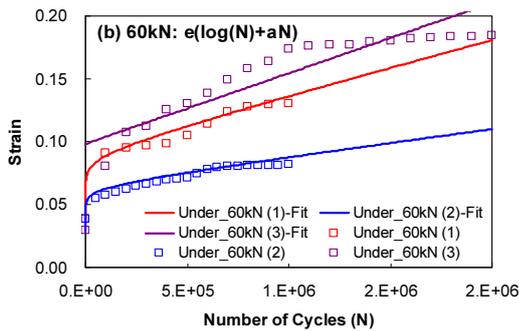
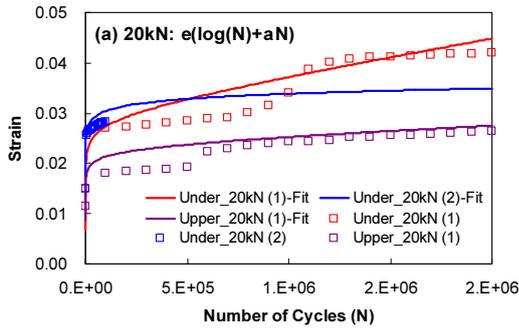


Fig. 2. Laboratory box test and development of ballast settlement model (Choi et al., 2016)

탄성변형량은 열차하중과 궤도 강성의 비로 표현된다 ($\delta_e = P/k_{track}$). 따라서 자갈궤도의 침하는 궤도 강성의 함수라고 할 수 있으며, 아래 Eq. (2)와 같이 표현된다.

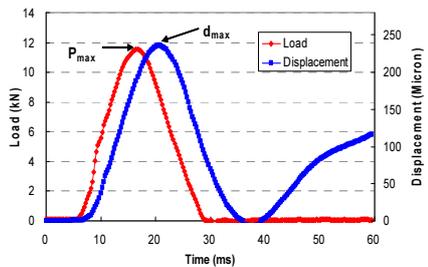
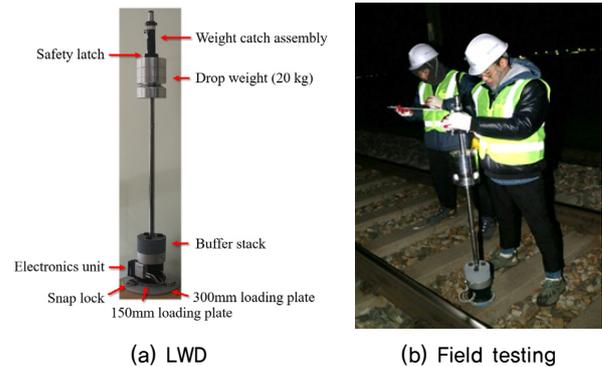
$$\epsilon_p = \beta_1 \left(\frac{P}{k_{track}} \right)^{\beta_2} (N + \alpha \log(N)) \quad (2)$$

Eq. (2)에 따르면 자갈도상 침하는 궤도 강성과 지수함수적인 관계가 있고, 이는 Fig. 1과 같이 궤도틀림 표준편차로 나타낸다고 할 수도 있다. 따라서 자갈궤도의 강성분포로부터 궤도틀림 정도를 예측할 수 있을 것으로 예상되며, 이를 활용하여 보다 과학적인 상태기반 유지관리도 가능할 것이다.

2.2 LWD를 이용한 자갈궤도 강성 평가

2.2.1 자갈궤도 강성평가 방법

자갈궤도의 강성을 평가하는 방법은 크게 연속적인 방법과 정적인 방법으로 나뉜다. Berggren(2009)는 검측차량을 이용하여 연속적으로 측정하는 방법과 차량의 종류를 소개하였으며, 동시에 특정위치에서 측정하는 방법으로 임팩트 해머나 FWD에 의한 측정, 운중과 레일 혹은 침목변위로부터 궤도 강성을 측정하는 기법, 궤도재하차량(Track Loading Vehicle)을 이용하는 방법을 소개하였다. 그러나 국내에는 강성측정용 검측차량이 없고, 도로에서 사용하는 FWD 적용을 위해서는 장비의 변경이 필요하다. 이에 Kim et al.(2008)



(c) Apparent stiffness calculation

Fig. 3. Apparent ballasted track stiffness calculation by LWD testing

이 LWD를 이용하여 궤도 강성을 평가하였다. 따라서 본 연구에서는 자갈궤도의 강성평가를 위하여 손쉽게 적용할 수 있는 LWD 장비를 이용하였다.

LWD는 FWD를 간편하게 만든 휴대용 실험장비(Fig. 3(a))로써, 하중을 지반에 가하여 지반의 변위와 하중을 측정하는 장비이다. 하중과 변위로부터 지반의 탄성계수나 강성을 측정할 수 있어 노반의 지지력, 다짐도 평가나 포장체의 강성평가에 주로 사용된다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 침목과 레일이 체결된 상태에서 하중을 침목에 가하여 측정하였다. 측정된 하중과 변위력(Fig. 3(c))에서 최대하중(P_{max})과 최대변위(d_{max})를 이용하여 Eq. (3)과 같이 자갈궤도의 겉보기 강성(Apparent stiffness)을 평가하였다.

$$k_{ap} = \frac{P_{max}}{d_{max}} \quad (3)$$

2.2.2 궤도 겉보기 강성의 정의

자갈궤도 강성은 연속지지 Winkler foundation 이론에 의해 아래와 같이 표현될 수 있다(Lichtberger, 2005).

$$k_{track} = \sqrt[4]{64 EI k_s^3} \quad (4)$$

여기서 EI 는 레일의 휨강성, k_s 는 자갈도상과 하부지반의 강성이다. 운영 중인 자갈궤도에서 침목은 Fig. 4(a)와 같이 자갈도상이 충분히 지지하는 지지침목, 도상과 침목 사이에 빈공간이 존재하는 뜬침목, 그리고 중간 위치의 중간침목의 형태로 존재한다고 알려져 있다. 이중 지지침목 위치에서 LWD로 측정된 겉보기 강성은 레일의 휨강성(EI)과 자갈도상과 하부지반의 강성(k_s)을 모두 포함한다. 따라서 겉보기

강성(k_{ap})과 이론적인 궤도 강성(k_{track})과 같다. 그러나 중간 침목이나 뜬침목과 같이 침목과 도상 사이의 빈공간이 존재할 경우, LWD로 측정된 변위는 빈공간의 변위를 포함하게 된다. 즉, 빈공간에 해당하는 변위(δ_{void})만큼은 레일의 휨강성에 의해 지배를 받고 이후 도상과 하부지반 강성(k_s)을 포함하게 된다. 따라서 도상과 하부지반의 강성이 같다고 하더라도 겉보기 강성은 이론식에 의한 궤도 강성(k_{track})보다 작게 측정된다. 빈공간이 클수록(즉, 뜬침목 정도가 심할수록) 겉보기 강성은 작게 측정될 것이다. 뜬침목의 존재로 말미암아 LWD로 침목 위치에서 측정된 강성은 일반적으로 통용되는 궤도 강성과 다른 값을 나타낼 수 있다. 이와 같은 이유로 LWD로 측정된 자갈궤도의 강성을 겉보기 궤도 강성(k_{ap})이라고 이름지었다. 지지침목은 Fig. 4(b)의 하중-변위곡선에서 알 수 있듯이 탄성거동을 나타내는 반면, 뜬침목은 점탄성적인 거동을 나타낸다. 하중-변위 곡선의 궤적은 에너지 손실을 나타내므로 에너지 손실량이나 하중-변위 곡선의 형태로부터 뜬침목을 구분할 수 있을 것이다.

그러나 본 논문의 목적은 정량적인 유지관리지표로서 LWD로 측정된 겉보기 강성의 적용성을 평가하는 것이므로 개별 침목의 상태와 강성평가보다는 일정구간에서 겉보기 강성과 유지관리지표인 TQI와 다짐작업과의 상관성분석에 중점을 두었다.

2.2.3 예비 현장 적용성 평가

고속철도 자갈궤도구간에 직접 평가를 하기 전에 대전남연결선 폐선구간(경부선 옥천역부근)에서 사전 실험을 수행하였다. 폐선구간은 교량, 토공, 통로박스구간으로 이루어져 있다. 고속철도 현장시험은 제한된 차단시간(2-3시간의 차단시간) 동안 현장실험을 수행해야 하므로 신뢰도 높은 데이터를 확보하기 위해 사전 검증을 통해서 현장실험법을 결정하고자 하였다.

반복재현성(Repeatability) 평가

대전남연결선 폐선구간의 242개 침목에 대해서 반복재현성 평가를 수행하였다. 침목의 같은 위치에서 3회씩 추를 낙하시켜 겉보기 강성을 측정된 결과 반복재현성이 높게 나타났다. 가해지는 최대하중의 평균은 11.6kN, 표준편차는 0.6kN으로 일정한 하중이 가해지는 것으로 평가되었다. 반복재현성 평가 결과 일부를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에 따르면 3회 반복 실험에서 각 침목 위치의 겉보기 강성이 큰 편차 없이 측정되고 있음을 알 수 있다. 총 242개 침목의 평균 강성은 85.7kN/mm, 3회 측정 시 표준편차의 평균은 2.5kN/mm로 나타났다. 이는 평균 강성의 약 2.9%로, 표준 정규분포를 가정하면 강성의 2.9% 이내의 오차가 발생할

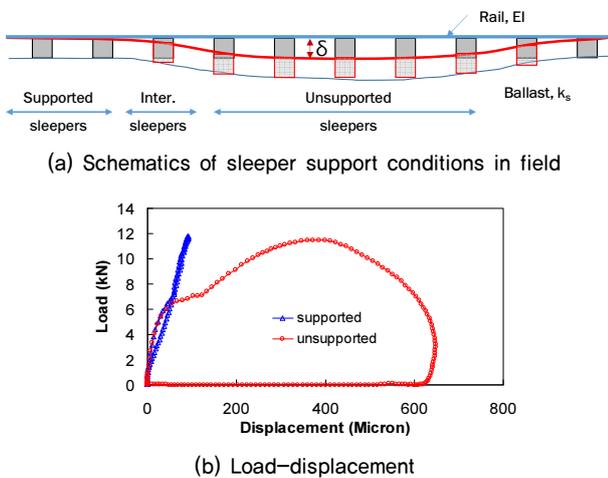
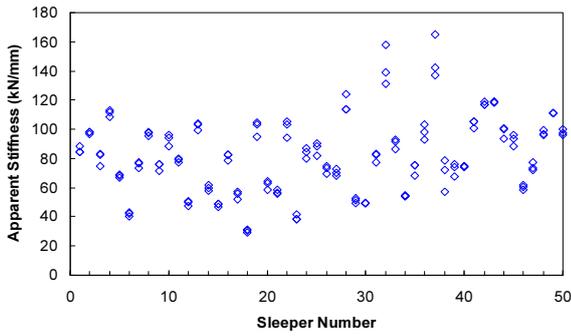
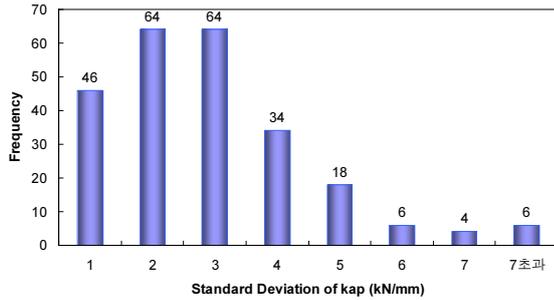


Fig. 4. Apparent ballasted track stiffness and feature of a supported and an unsupported sleeper



(a) Apparent stiffness at sleeper locations



(b) Apparent stiffness variation

Fig. 5. Repeatability of LWD on sleepers

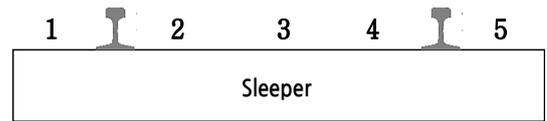
확률이 69.1% 라고 할 수 있다.

또한 Fig. 5(b)에서 3회 측정 시 각 침목에서 표준편차 3 kN/mm 이하가 72%(172/242), 4kN/mm 이하가 86%(208/242)로 나타났다. 1회 측정한다고 가정하면 3kN/mm 나 4kN/mm 이내의 오차가 발생할 가능성이 각각 72%, 86%라고도 할 수 있다. 평균 강성인 85.7kN/mm를 기준으로 판단하면 3~4 kN/mm의 오차는 3.5~4.7%이다. 따라서 현장 탐사의 속도 향상을 위해 침목에서 1회의 실험을 수행하여도 겉보기 강성 평가 정확도가 높은 것으로 판단되어, 침목당 1회 실험을 원칙으로 하였다.

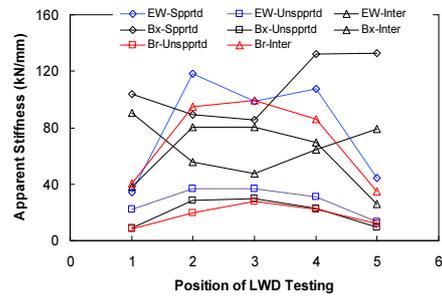
침목 내 강성 측정 위치 선정

궤도 강성 측정을 위한 최적 측정위치를 결정하기 위하여 Fig. 6(a)과 같이 1-5번 위치에서 LWD 강성을 측정하였다. 반복재현성 평가 결과로부터 강성이 크게 측정된 침목을 지지 침목(Supported), 강성이 작은 침목을 뜬침목(Unsupported), 중간 정도의 강성을 나타내는 침목을 중간침목(Intermediate)으로 구분하였다. 토공구간(Earthwork), 통로박스구간(Box), 교량구간(Bridge)에서 지지침목, 중간침목, 뜬침목을 선정하여 본 예비실험을 수행하였다. 하중(추 무게와 낙하고)을 증가시키면서 침목 내 위치변화에 따른 겉보기 강성변화를 평가하였다.

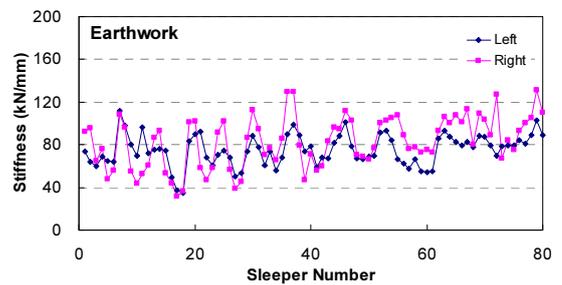
Fig. 6(b)는 측정위치와 최대하중에서의 강성변화를 나타낸다. 각 측정구간별로 강성 크기 분포가 다르게 나타났다.



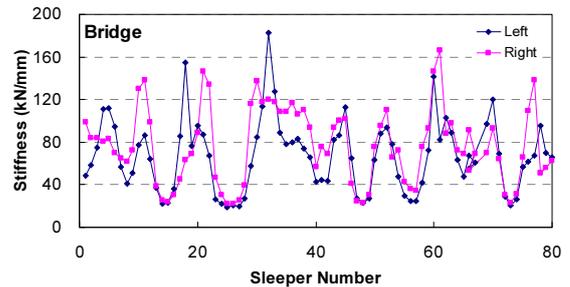
(a) Schematic diagram of testing location



(b) Apparent stiffness variation



(c) Stiffness of left and right rail location: Earthwork



(d) Stiffness of left and right rail location: Bridge

Fig. 6. Determination of testing location on a sleeper

특히 1번과 5번 위치에서는 상대적인 강성 크기가 구간마다 많은 차이를 보였다. 이는 레일 직하부에서 주로 자갈의 텀핑이 이루어지기 때문에 레일 직하부를 제외한 위치에서는 자갈의 지지 상태의 차이가 크기 때문이라고 판단된다. 따라서 레일 직하부에 가장 근접한 2번이나 4번 위치에서 겉보기 강성을 측정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

좌우측레일위치에서 겉보기 강성을 측정된 결과를 Fig. 6(c)와 (d)에 나타내었다. 80개 침목에 대한 평균과 표준편차가 좌우측레일에서 유사하게 나타났으며 좌우측레일의 변화 양상이 비교적 유사하게 측정되었다. 즉, 경향과 값이 유사하게 측정되었기 때문에 좌우측 모두 측정하는 것보다 한쪽에서 연속적으로 긴 구간을 측정하는 것이 효율적으로 자갈궤도의 강성을 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 현장 적용성 평가

3.1 현장조사 개요

경부고속철도 자갈궤도구간 TQI 분석 결과와 한국철도공사 유지보수 관계자의 의견을 바탕으로 불량, 양호구간에 대해서 현장조사를 수행하였다(Table 1). 예비실험을 통하여 결정된 것과 같이 매 침목마다 열차진행방향의 우측레일 부근에서 겐보기 강성을 LWD를 이용하여 측정하였다.

3.2 결과 및 분석

겐보기 강성과 궤도검측차의 10m 현에 의한 좌우측 레일에서 고저틀림과 함께 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 일정한 주기를 가지고 겐보기 강성이 커졌다가 작아지는 경향을 보인다. 여기에서 강성이 크

Table 1. Statistics of apparent track stiffness and track irregularity at survey locations

Stiffness & Irregularity		Yongwa Tunnel - Sandong 1st Bridge (T1) (89k200 ~ 89k576)			
		Tunnel (89k200~256)	Earthwork (89k256~547)	Bridge (89k547~576)	
Apparent track stiffness	Average	197.8	75.0	117.0	
	Std. Dev.	42.8	48.0	49.8	
Track irregularity	Avg	Left	0.14	0.21	0.43
		Right	0.17	0.19	0.45
		All	0.15	0.20	0.44
	SD	Left	0.69	2.20	1.54
		Right	0.84	2.46	2.31
		All	0.76	2.33	1.92
Tamping length (m)	Manpower	0	1571	275	
	Machine	512	3329	554	
Stiffness & Irregularity		Sandong 3rd Bridge (T1) (92k050 ~ 92k340)			
		Bridge (92k050~115)	Earthwork (92k115~340)		
Apparent track stiffness	Average	149.3	104.1		
	Std. Dev.	22.0	52.2		
Track irregularity	Avg	Left	0.07	0.04	
		Right	-0.03	0.04	
		All	0.02	0.04	
	SD	Left	1.19	1.26	
		Right	1.06	1.30	
		All	1.12	1.28	
Tamping length (m)	Manpower	79	17		
	Machine	0	0		

게 측정되는 침목을 지지침목으로, 낮은 강성을 나타내는 침목을 뜯침목으로 구분할 수 있으며, 지지침목과 뜯침목에서 Fig. 4(b)와 같은 하중-변위 그래프를 나타낸다. 매 침목마다 측정된 강성의 주기를 FFT를 적용하여 분석한 결과, 4~7m의 주기로 뜯침목과 지지침목이 반복적으로 나타났다. 이는 300km/h의 속도를 적용하면 10~20Hz의 주파수에 해당하며 열차의 고유진동수 등과도 관계가 있을 것이다. 향후 열차궤도와 상호작용을 고려한 추가 검토가 필요하다.

주목할만한 점은, 궤도의 고저틀림 경향과 겐보기 강성의 분포가 유사하다는 것이다. 고저틀림이 작은 용와터널 내에서는 강성값이 크고 편차도 작았으며, 고저틀림값이 크게 측정된 토공구간에서는 강성값이 작고 편차도 크게 나타났다. 이러한 경향은 산동3교 구간에서도 유사하게 나타났다. 정량적인 분석을 위하여, 구조물 위치와 고저틀림, 강성값의 분포를 고려하여 Table 1과 같이 구간을 나누어 강성의 평균, 표준편차를 계산하였으며, 고저틀림의 평균과 표준편차를 산정하였다. 여기에서 고저틀림의 표준편차는 TQI와 같은 의미를 갖는다. 겐보기 강성과 유지관리 이력인 인력 탬핑(Manpower tamping) 연장(Length)과 장비 탬핑(Machine tamping) 연장과의 관계를 분석하였다.

Table 1은 각 구간에 해당하는 2011년에서 2016년 9월까지의 누적 탬핑 연장을 나타낸다. 겐보기 강성의 평균, 표준편차와 고저틀림의 표준편차(TQI), 누적 탬핑 연장과 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

구간의 평균 겐보기 강성이 증가함에 따라 기하급수적으로 고저틀림의 표준편차(TQI)가 감소함을 알 수 있다. 이러한 관계는 Hunt(2000)가 제시한 관계와 같은 경향을 나타낸다. 따라서 자갈궤도의 강성을 일정수준 이상으로 유지할 수 있다면 궤도틀림을 현저하게 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 강성분포의 편차가 클수록 TQI도 증가하는 것으로 관측되어 자갈궤도 전반적으로 강성을 고르고 크게 관리하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 그러나 강성의 표준편차와는 상관관계가 평균 강성보다는 낮게 나타났다. 누적 탬핑 연장과 관계에서도 TQI와 유사한 경향은 나타났다. 평균 강성이 증가할수록 탬핑 연장이 지수함수적으로 감소하였다. 이에 지수함수적인 관계 산정을 위해서 평균 강성과 탬핑 연장 사이의 관계식 산정에서 탬핑 연장이 '0'인 구간을 제외하였다. 인력 탬핑보다 장비 탬핑 연장과 상관성이 더 높게 측정되었다. 일정구간에 대해서 전체적으로 적용하는 장비작업이 TQI에 기반하여 적용되기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 자갈궤도의 평균 강성이 증가하면 침하량이 감소하고(Eq. (1)) 이는 궤도틀림의 감소로 이어지기 때문에 결국 유지보수도 적어지는 것이라고 할 수 있다. 강

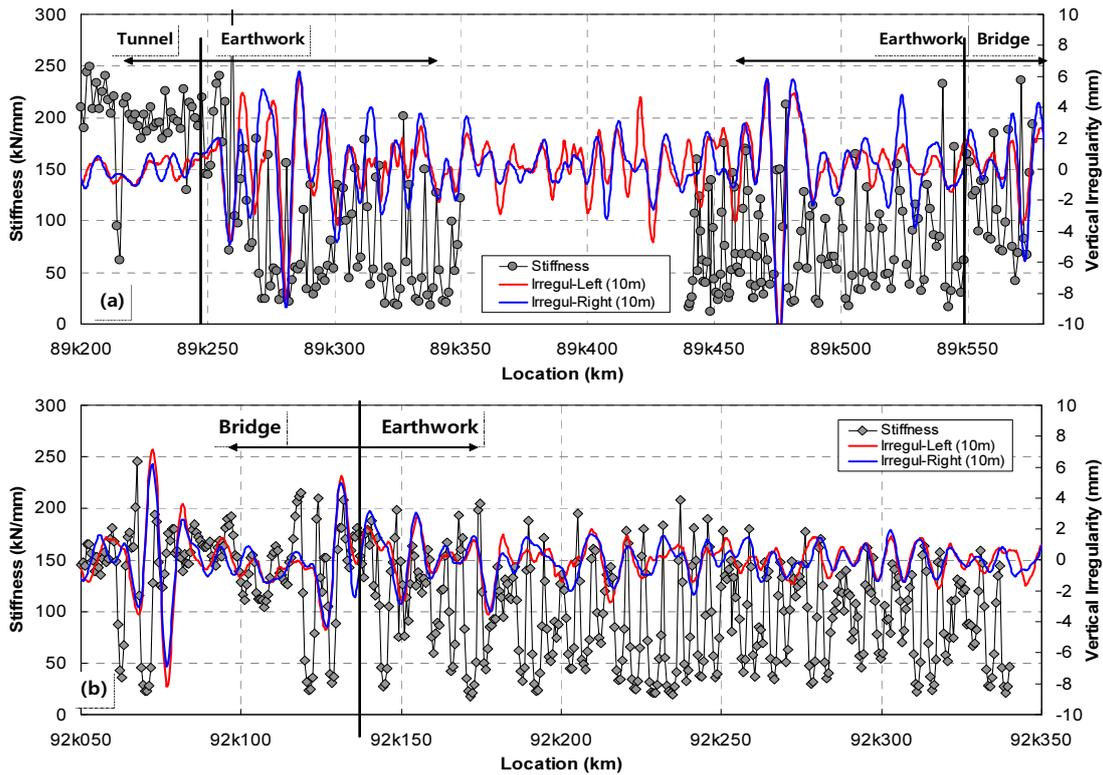


Fig. 7. Apparent track stiffness measured by LWD and vertical track irregularity

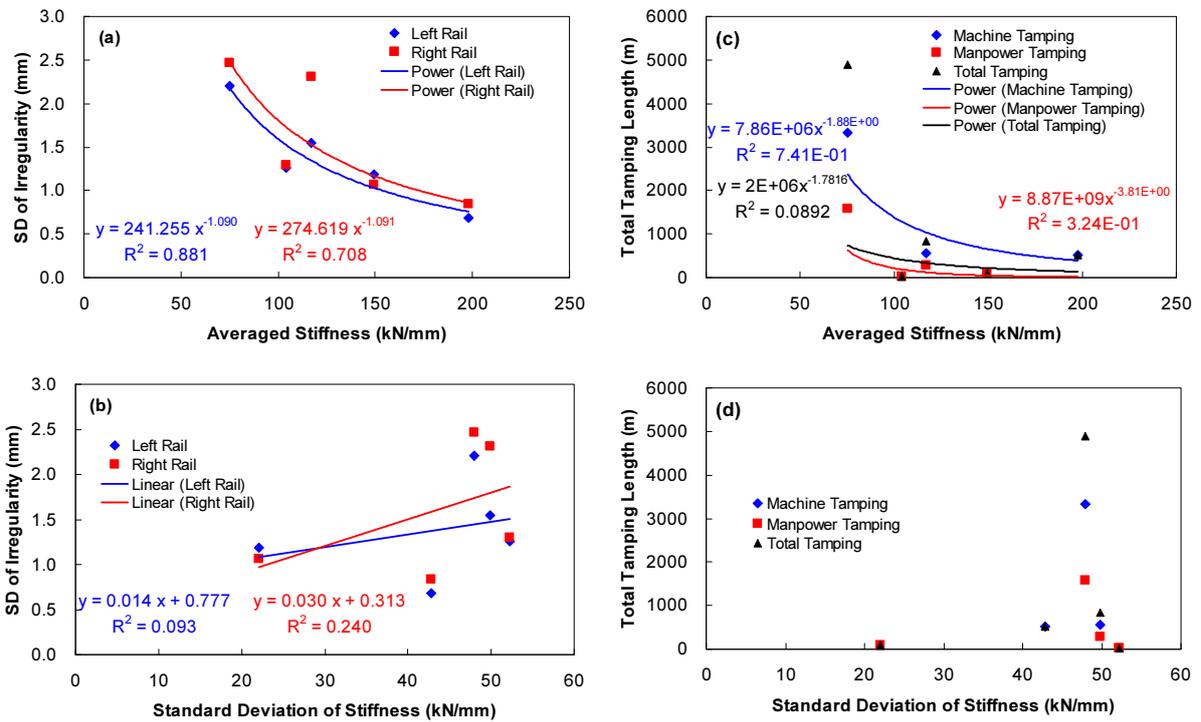


Fig. 8. Relationship between apparent track stiffness and maintenance-related index

성의 표준편차와 누적 탬핑 연장 간에는 선형적인 관계가 관측되었으나, 상관관계가 높지 않았다.

겉보기 강성은 특정시점에서 측정되는 자갈궤도의 상태라고 할 수 있다. 고저틀림의 표준편차(TQI) 또한 특정 시점

에서 측정되는 지표이다. 따라서 겉보기 강성과 TQI는 현재의 궤도 상태를 나타낸다고 할 수 있다. 그러나 누적탬핑 연장은 자갈궤도 해당구간의 상태 이력을 나타내는 지표라고 할 수 있다. 특정시점에서 측정된 겉보기 강성과 상태이

력을 나타내는 누적 탬핑 연장(특히, 장비작업이력)과 높은 상관성을 보였다는 것은 궤도 강성이 궤도의 현재 상태뿐만 아니라 과거이력도 포함하는 지표라고 할 수 있다.

궤도 강성분포와 평균값이 오랜 기간 유사하게 유지되기 때문에 현 상태뿐만 아니라 과거의 이력도 함께 나타낼 수 있을 것으로 생각되지만 이는 향후 추가적인 연구를 통해서 검증해야 할 것이다. 궤도 강성으로 궤도의 현장상태뿐만 아니라 과거의 이력도 나타낼 수 있어, LWD를 활용한 자갈궤도 강성평가로 상태를 평가할 수 있으며 향후 유지관리 지표로도 활용이 가능함을 보여줬다. 그러나 이는 고속철도 2개소에 대한 현장계측자료로부터 파생된 결론이므로 추가적인 현장조사와 분석을 통하여 보다 정량적이고 정밀한 분석이 필요하다.

4. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 합리적인 자갈궤도 상태평가 및 관리 방안을 수립하기 위하여 궤도 궤도 강성을 유지보수지표로 적용하기 위한 기초 연구로서 그 적용성을 평가하였다. 연속적으로 자갈궤도의 강성을 평가하기 위하여 LWD를 이용하여 침묵과 레일이 체결된 상태에서 궤도 궤도 강성을 측정하였다. 본 연구로부터 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 예비 현장 실험 결과 궤도 강성 측정의 반복재현성이 높아서 1지점(1침묵)에서 1회 측정으로도 합리적인 오차 범위 내에서 궤도 강성의 측정이 가능한 것으로 나타났다.
- (2) LWD를 이용하여 측정한 궤도 강성과 궤도틀림(고저틀림) 표준편차 및 탬핑 연장과 높은 상관관계를 나타냈다. 평균 궤도 강성이 증가함에 따라 고저틀림의 표준편차(TQI)와 탬핑 연장이 지수함수적으로 감소하였다. 반면 궤도 강성 표준편차와 TQI 및 탬핑 연장과 상관성은 상대적으로 낮았다.
- (3) 특정 시점에서 측정한 궤도 강성이 궤도의 현재 상태뿐만 아니라 과거 탬핑 이력과의 상관성이 높다는 것은 한 위치에서 자갈궤도의 강성 변화가 크지 않음을 시사한다.

따라서 LWD로 측정한 궤도 강성은 자갈궤도의 상태를 나타내는 지표로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 향후 추가적인 현장실험과 분석을 통하여 정량적인 기준을 수립한다면 과학적인 자갈궤도의 유지관리지표를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구개발사업의 연구비 지원(17RTRP-B065581-05)에 의해 수행되었습니다.

References

1. 한국철도시설공단 (2014), KR C-14030 자갈궤도 구조.
2. 한국철도시설공단 (2015), 선로유지관리지침.
3. Berggren, E. (2009), Railway track stiffness: dynamic measurement and evaluation for efficient maintenance, Doctoral thesis, KTH, School of engineering science.
4. Choi, Y. T., Lee, S. J., Hwang, S. H. and Jang, S. Y. (2016), Development of a ballast settlement model using laboratory ballast box tests and field measurements, Proceeding of Civil Engineering Conference in the ASIAN Region CECAR7, Honolulu, Hawaii.
5. Furukawa, A. (2016), Recent tendencies in ballasted track maintenance, Quarterly report of Railway Technical Research Institute, Vol. 57, No. 2, pp. 80~84.
6. Hunt, G. A. (2000), EUROBALLT optimises ballasted track, Railway Gazette International, pp. 813~816.
7. Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W. and Christie D. (2006), Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation, Ground Improvement, Vol. 10, No. 3, pp. 91~102.
8. Kim, D. S., Kwon, S. S., Lee, S. H., Hwang, S. K. and Park, T. S. (2008), Study on the appropriateness of track maintenance works through the evaluation of trackbed conditions, Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 3, pp. 334~341.
9. Leng, Z. and Al-Qadi, I. L. (2010), Railroad ballast evaluation using ground-penetrating radar, Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2159, No. 1, pp. 110~117.
10. Lichtberger, B. (2005), Track Compendium Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics, Eurail Press, Hamburg Germany, pp. 48~54.
11. Meissonnier, F. (2000), European research for an optimised ballasted track: Final Report-Synthesis Part, European union.
12. Milosavljevic, L., Popovic, Z. and Lazarevic, L. (2012), Track stiffness and the vertical track geometry deterioration modeling, Mechanical Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 157~162.
13. Puzavac, L., Popovic, Z. and Lazarevic, L. (2012), Influence of track stiffness on track behaviour under vertical load, Traffic & Transportation, Vol. 24, No. 5, pp. 405~412.
14. Smekal, A., Berggren, E. G. and Silvast, M. (2006), Monitoring and substructure condition assessment of existing railway lines for upgrading to higher axle loads and speeds, 7th World Congress on Railway Research, Montreal, QC.
15. Zhang, Y., Venkatachalam, S. A., Xie, Y., Wang, G. and Xia T. (2014), Data analysis technique to leverage ground penetrating radar ballast inspection performance, 2014 IEEE Radar Conference, Cincinnati, OH, pp. 463~468.