

재하된 선로에서 궤도강성의 측정



서사범

(주)서현기술단 부사장
공학박사 · 철도기술사
suh7484@hanmail.net

I. 머리말

철도기술자들은 오랫동안 교통하중 하에서의 궤도구조 응답을 측정함에 있어 신뢰할 수 있는 방법을 개발하기를 원하여 왔다. 가장 중요한 방법의 하나는 궤도틀림의 최소화 와 보수주기의 최적화를 목적으로 궤도구조의 기계적 상태를 밝히기 위해 수직 궤도강성(軌道剛性, track stiffness)이나 궤도계수(track modulus)를 측정하는 것에 기반을 둔다. 궤도강성은 시간의 함수로서 궤도하중과 궤도 처짐 간의 비율로서 정의할 수 있다. 궤도강성은 차륜-레일 상호작용의 중요한 파라미터이며, 주파수, 동적 진폭 및 적용된 하중에 따라 달라진다.

궤도강성의 측정은 비교적 새로운 기술이다. 시험과 연구측정은 지난 20년 동안 유럽 일부의 국가에서 수행되어 왔다. 측정기술은 현재 원숙해지기 시작하였고 상업적으로 이용가능하다. 궤도강성의 측정은 궤도보수, 축중 및/또는 속도를 높이기 위한 궤도의 업그레이드, 새로 건설된 궤도의 검증 등의 분야에서 적용된다. 이 중에서 궤도보수의 분야에서는 문제의 현장에서 궤도틀림에 대한 근본원인의 지표, 천이접속구간의 평가, 연약지반 처짐, 뜬침목 처짐, 레일 휨/레일 균열 전파, 진동 등의 분야에 적용된다.

국제철도연맹(UIC)이 유럽연합(EU)을 위하여 수행한 RIVAS(Railway Induced Vibration Abatement Solution) 프로젝트는 이전에 철저히 연구되지 않았던 지반진동에 대한 궤도강성 변화의 영향에 초점을 맞추었다. 한편, 연약지반의 진동에 관해서는 철저히 연구되어왔다.

본고에서는 지반진동(ground-borne vibration)과 궤도 불규칙(track irregularity)의 관계 및 궤도에서의 강성변화의 영향에 관하여 간략히 기술한 후에 지반진동에 영향을 미치는 궤도 불규칙의 측정 중에서 '재하된 궤도에서의 강성의 측정방법'에 관하여 소개한다.

II. 지반진동과 궤도 불규칙

궤도선형(track geometry)의 불규칙(고저틀림, 고립된 레일결함, 용접, 레일 파상마모, 분기기와 크로싱 등)과 궤도강성(track stiffness)의 불규칙(천이접속 구간, 뜬 침목, 구교 등)으로 유발되는 수직 차륜-레일 접촉력의 동적 성분은 지반진동에서 중요한 근원이다.

따라서 진동레벨을 컨트롤하는 데에 있어 중요한 양상의 하나는 보수 관리를 용이하게 하기 위하여 궤도(와 레일)의 고저불규칙을 정밀하게 측정하고 모니터링하는 시스템의 유효성이다.

불행하게도, 지반진동과 지반소음에 관련된 전체의 파장대역을 측정하는 이용가능 시스템은 없다. 예를 들어, 80 km/h의 재래 화물열차 속도에서 관련 파장은 약 0.1 m로부터 약 10 m에 이르기까지이다. 궤도검측차(track recording coach, TRC)는 일반적인 관행에서 그리고 기존의 표준에 따라 3 m(때때로 1 m)에 이르기까지 아래의 파장을 가진 재하된 궤도선형(중방향 레벨 · 고저틀림)을 측정하는 데에 사용되는 반면에, 소형 가속도기반 트롤리와 기계적 변위 탐침(probe)은 약 0.5 m에 이르기까지의 재

〈표 1〉 EN 13848 표준 : 철도 적용-궤도-궤도선형품질

EN 13848-1:2004+A1:2008	파트 1: 궤도선형의 정의
EN 13848-2:2006	파트 2: 측정 시스템 - 궤도검측 차량
EN 13848-3:2009	파트 3: 측정 시스템 - 궤도 건설과 보수 장비
EN 13848-4:2012	파트 4: 측정 시스템 - 수동과 경량 장치
EN 13848-5:2008+A1:2010	파트 5: 선형의 품질레벨 - 일반 선로

하되지 않은 레일 불규칙을 측정한다. 전체의 파장대역을 커버하기 위해서는 측정방법의 조합이 필요하다.

지반진동과 소음에서 중요한 파장에 관련된 중방향 레벨(고저틀림, 면 틀림)의 모니터링을 개선하기 위해서는 0.5~3 m 대역의 파장을 포함하는 새로운 파장대역(여기서는 D0에 속하는 것으로 한다. EN 표준 13848 참조)을 도입할 필요가 있다. 이와 함께 D0과 D1(3~25 m) 대역은 80 km/h의 차량속도에서 0.9~44 Hz 범위의 가진(加振, excitation) 주파수에 상응한다(200 km/h에서 2~110 Hz). 많은 기존의 TRC는 0.5 m에 이르기까지 아래의 파장을 측정하기 위해 요구된 역량을 이미 가졌지만 데이터의 필터링은 일반적으로 기존의 기준(관심이 있는 파장은 3 m, 때때로 1 m에 이르기까지 아래)을 충족시키도록 적용되며, 이는 더 짧은 파장이 조사되지 않음을 의미한다. TRC의 주요 장점의 하나는 측정된 중방향 레벨(고저틀림, 면 틀림)이 궤도선형의 틀림과 궤도강성에서의 기여의 결합이라는 점이다. 더 짧은 파장의 레일 불규칙은 측정 트롤리로, 또는 가급적 네트워크의 보다 큰 부분을 커버하기 위해 TRC(또는 유사한)의 차체에 설치된 '레일 파상마모 검측기' 또는 레이저 시스템과 같은 장비로 측정할 필요가 여전히 있다.

TRC를 이용한 궤도선형의 측정은 광범위하고 본질적인 기술이며 기술과 경고한계 양쪽은 CEN EN 13848 시리즈에 표준화되어 있다. 본고에서는 지반진동과 소음의 가진(加振)에 관련된 파장대역의 재하되지 않은 궤도와 재하된 궤도의 불규칙(틀림)을 측정하는 방법을 커버하는 그러한 시스템의 상세를 지면관계상 생략하지만, CEN EN 13848 표준의 각종 파트들을 <표 1>에 나타낸다. EN 13848 표준은 궤도선형을 평가하기 위한 3개의

파장대역(D1 : 3~25 m, D2 : 25~70 m, D3 : 70~170 m)을 규정한다.

Ⅲ. 궤도에서 강성 변화의 영향

궤도를 따라서 침묵 밑에서의 도상강성(ballast stiffness)의 다름은 보다 큰 접촉력(contact force), 보다 큰 처짐(deflection) 및 보다 큰 진동을 초래할 것이다. 이것은 도상층 침하(settlement)의 증가를 유발하고 도상강성의 훨씬 큰 변화를 불러일으킨다. 그 때문에 균질한 궤도선형의 손실이 가속화된다. 더욱이, 궤도 구성요소의 파손위험이 증가된다.

궤도강성 및 침묵을 따라서의 궤도강성변화는 휨모멘트, 변위 및 침묵의 고유주파수에 대해 큰 영향을 미친다. 그러므로 궤도강성은 궤도의 내구성과 관련하여 중요한 파라미터이다.

최상의 강성을 선택하는 것은 복잡하며 단지 본고의 결과에만 근거를 둘 수 없다. 우선권은 궤도를 따라서 일정한 강성을 유지하는 것에 주어져야 한다. 만약에 궤도의 강성이 평가된다면, 예를 들어 궤도를 따른 국지적 결함과 든 침묵을 찾아냄으로써 유지보수를 최적화하기 위한 파라미터로서 사용할 수 있다.

선로 유지보수를 계획할 때는 궤도의 전체수명을 고려하여야 한다. 또한, 예를 들어 도상어깨 클리닝과 같은 예방보수가 정기적으로 수행되어야 한다.

유지보수를 계획할 때의 파라미터로서 궤도강성을 도구화하기 위해서는 주어진 환경이 처음에는 보다 많은 자원을 필요로 할 것이지만 장기적인 관점에서는 이것이 궤도의 보다 적은 열화에 기인하여 아마도 비용의 절감으로 이끌 것이다. 실행 전에 경제계산이 수행되어야 한다.

탬핑(tamping)과 궤도 라이닝(lining)의 니즈를 줄이고 궤도의 품질을 높이기 위해서는 도상과 도상어깨 클리닝과 같은 추가의 예방 조치를 수행하여야 한다.

Ⅳ. 궤도강성의 측정법

궤도강성(track stiffness)과 지반진동에 관련된 각종 양

<표 2> 궤도강성의 양상과 지반진동과의 관계

연약지반	낮은 궤도강성은 흔히 연약지반의 지표이다. 연약지반은 진동을 전파하기 쉽다.
궤도강성 변화	궤도를 따른 상부(도상, 보조도상) 또는 하부(재료 채움, 지반) 층에서 궤도강성의 변화는 열차통과 동안 동적 차륜-레일 접촉력을 발생시킬 것이며, 진동을 초래할 가능성이 있다.
천이접속 구간	예를 들어, 교량 어프로치 구간과 같은 천이접속 구간은 흔히 궤도강성의 변화가 수반된다. 이들은 흔히 동적 차륜-레일 접촉력의 가진(加振)을 증가시킬 것이다. 또한, 궤도강성의 변화는 힘을 더욱 증가시키는 것이 일반적이다.
튼 침목	만약 침목저부와 도상 간에 공극이 있다면 공극은 열차통과 동안 좁아질 것이며, 아마도 지반에 대해 하중 임펄스를 유발할 것이다. 이것은 진동에 대해 중요한 가진(加振) 메커니즘이라고 생각된다.

상은 <표 2>와 같다.

궤도강성을 측정하는 방법에는 몇 가지의 다른 방법이 있다. 만약, 동일한 궤도에 대하여 두 개 이상의 방법이 비교된다면, 기록된 수직 궤도강성은 아마도 정확히 일치되지 않을 것이다. 다른 결과로 이끌지도 모르는 상황을 아래에 리스트로 나타낸다.

- **정적 프리로드** : 측정 윤축에 대해 각각 다른 정적 프리로드(preload)는 대부분 아마도 각각 다른 강성 값으로 귀착될 것이다. 또한 일부의 방법은 참조 프리로드(가벼운 축중 또는 재하되지 않은 궤도)를 사용한다. 선택된 하중에 좌우되어(침목저부와 도상 간의 공극이 좁아질 것인) 힘/처짐 곡선의 첫 번째 부분을 찾아내는 것이 가능하거나 가능하지 않을지도 모른다.
- **가진 주파수와 차량속도** : Infranord¹⁾ RSMV(Rolling Stiffness Measurement Vehicle 제Ⅵ장 참조)에서 사용하는 측정원리는 규정된 동적 가진(加振, excitation)을 사용하지만, 또한 가진으로서 전동(轉動)의 윤축을 사용하는 방법은 궤도의 선형틀림과 강성에 따라 결정된 주파수로 궤도를 가진시킬 것이다.

만약에 측정차량의 속도가 증가된다면 주파수도 증가될 것이다. 동적 궤도강성이 주파수와 함께 일정하지 않으므로 결과가 다를 수도 있다.

- **공간 분해능** : 각각 다른 측정원리는 각각 다른 공간 분해능(spatial resolution)을 가질 수도 있다.
- **모델 종속성** : 측정원리의 일부는 가진 윤축에서 좀 떨어져 있는 레일의 처짐을 측정한다. 윤축 아래의 레일 처짐을 계산하기 위해서는 레일 휨에 대한 보 모델을 사용하여야 한다. 보 모델은 예를 들어 Winkler나 Zimmermann에 따르며, 불확실성을 가져올 수 있다.
- **궤도틀림으로부터 영향의 정도** : 대부분의 경우에 변위 트랜스듀서가 궤도 플렉시빌리티(flexibility)에 기인하는 처짐과 궤도틀림에 기인하는 변위의 조합을 측정할 것이므로 궤도틀림, 특히 종방향 레벨(면 틀림, 고저틀림)은 강성측정을 방해할 수도 있다. 차륜 진원도(眞圓度)와 차륜 플랫폼(flat)은 같은 종류의 지장을 가져올 것이다.

이용할 수 있는 방법들의 비교는 문헌 [9]에 주어져 있다. 방법들의 예를 이하의 장들에서 소개한다.

V. SBB 궤도 처짐 측정 웨건

SSB(Swiss Federal Railways)가 개발한 처짐 측정 웨건(deflection measurement wagon, <그림 1> 참조)을 이용하여 10~15 km/h대의 차량속도로 궤도 처짐(track deflection)의 연속 모니터링을 수행할 수 있다. 측정방법은 재하되지 않은 웨건(대단히 낮은 축중에 기인하여 이 웨건으로 발생된 궤도 처짐은 무시할 수 있다고 간주할 수 있다)과 재하된 차축(20 톤) 간의 상대적인 궤도 처짐을 측정하는 것으로 구성된다. 계기장치는 증분(incremental) 센서 Heidenhain LS 220과 PC 디지털 디스플레이 유닛 IK 121을 포함한다.

해석할 수 있는 처짐 곡선을 얻기 위하여 보통은 10 m ~ 20 m 간격의 차단(cut-off) 파장을 가진 저역통과 필터(low pass filter)가 적용된다. 측정 정밀도는 약 ±0.2 mm 이다. 보통은 정밀도를 개선하기 위하여 처짐 측정을 반복

1) 철도를 구축하고 유지하기 위해 엔지니어링 서비스를 제공하는 스웨덴 정부의 기업 및 철도 계약자



<그림 1> SBB 궤도 처짐 측정 웨건, 축중 20 톤



<그림 2> RSMV(왼쪽) 및 측정기구(측정 차축 위의 강제케이지(steel cages)에 들어있는 수직운동 질량)(오른쪽)

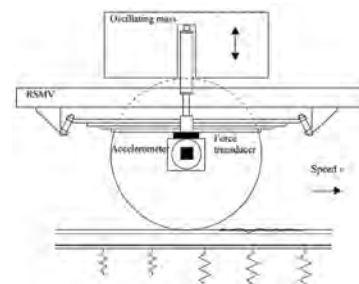
하지만 이때는 둘 다의 웨건으로 재하하지 않는다. 그때에, 재하되지 않은 처짐의 측정은 재하된 처짐의 측정에서 뺀다. 샘플링 거리는 약 5 cm이다.

측정은 일반적으로 뜬 침목을 찾아내는 데에 사용되지 않지만, 토질특성의 변화, 교량에서 및 USP(Under Sleeper Pads)의 영향 등등에 기인하는 장파장 교란이 조사된다. 그럼에도 불구하고 만약에 측정된 처짐이 저역통과 필터가 적용된 때에도 크다면 심하게 뜬 침목을 찾아낼 수 있다. 모든 측정에 저역통과 필터를 적용하는 이유는 낮은 수준의 차륜 진원도가 측정에 상당히 영향을 미치기 때문이며, 측정된 곡선을 해석하기 위해서는 이들의 영향을 제거해야 한다.

VI. Infranord 전동 강성측정 차량, RSMV

RSMV(Rolling Stiffness Measurement Vehicle)는 재조립한 2축 화차이다. 궤도는 <그림 2>와 <그림 3>에 나타난 것처럼 통상적인 윤축의 하나 위에서 2개의 진동 질량에 의하여 동적으로 가진(加振)된다. 궤도강성은 측정된 힘과 가속도에 의거하여 계산된다.

정적 축중은 180 kN(또는 그 이상)이며 미리 정해진 최대 동적 축중 진폭은 60 kN이다. RSMV는 50 Hz에 이르기까지의 주파수에서 동적 궤도강성을 측정할 수 있다. 공간 분해능은 측정 속도와 가진 주파수의 조합에 좌우된다.



<그림 3> RSMV의 측정원리

궤도강성을 정밀하게 평가하기 위해서는 약 3개의 가진 기간이 필요하다.

RSMV는 사인곡선의 가진 주파수를 가진 (60 km/h에 이르기까지) 보다 높은 속도에서의 측정과 사인곡선이나 노이즈 가진을 가진 (10 km/h 이하의) 보다 낮은 속도에서의 상세 조사 양쪽을 수행할 수 있다. RSMV는 보다 높은 축중과 증가된 속도의 영향을 조사하는 프로젝트뿐만 아니라 보수 니즈의 평가에도 이용되어 왔다.

지반진동의 조사에서 RSMV를 이용함의 주된 장점은 연약지반 궤도구간의 공진 주파수를 찾아내는 능력이다.

VII. EBER²⁾ 수직 강성, EVS

EVS(EBER Vertical Stiffness)-방법은 재하된 차축을 지

2) EBER Dynamics : 철도궤도 측정분야에서 제품 개발과 서비스를 하는 스웨덴의 전문회사

지하는 궤도의 종방향 레벨(고저, 면)이 두 개의 파트로 구성된다는 사실에 기초한다. 두 개의 파트는 <그림 4>의 A 그래프에 도해되어 있다. 첫 번째 파트는 재하되지 않은 궤도에서 나타나는 틀림에 기인하는 레벨(고저틀림) 변화(비재하 궤도선형, 청색 실선)에 관련되며, 두 번째 파트는 재하된 차축에 기인하는 추가의 변형(혹색 1점 쇄선)에 관련된다. 표준과 일반적 관습에 따라 위치 x 에서 레벨(고저) $s_m(x)$ 의 측정은 항상 (그림에서 적색 점선으로 도해된) 재하 궤도 $s_L(x)$ 를 구하기 위한 것이어야 한다. 따라서 궤도검측차로부터의 측정 레벨(고저)은 재하되지 않은 궤도 선형 $s_U(x)$ 와 재하에 기인하는 처짐 $w(x, x_1)$ 의 두 파트로 구성된다. 이것은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{In}(x) = s_L(x) = s_U(x) + w(x, x_1) \quad (1)$$

$w(x, x_1)$ 의 이중 지표는 위치 x 에서의 처짐이 x_1 에서 가해진 하중에 기인한다는 것을 의미한다. s_U 도 또한 완성도를 위하여 이중 지표로 쓸 수 있지만, 이것은 $x_1 = x$ 라는 의미가 따르므로 생략된다는 점에 주목하라.

레벨(고저틀림)은 또한 현(弦, chord)/중앙중거(中央縱距, versine) 방법을 사용하여 측정할 수도 있다. <그림 4>의 B 그래프는 궤도 처짐의 예를 나타내며, 여기서 재하된 측정차륜(C2)은 중앙에 위치하고 외부의 (아마도 가볍게 재하된) 측정차륜(C1, C3)은 중앙 차륜으로부터 $-b$ 와 $+a$ 의 거리에 위치한다. 현 시스템으로부터 읽은 레벨(고저틀림, 면 틀림)은 그림에서 도해된 것처럼 C1—C3 현과

C2 간의 차이로서 취해진다.

현(弦) 레벨(고저) 시스템의 수치적 표현은 다음과 같다.

$$s_{C2}(x) = s(x) - \{bs(x+a) + as(x-b)\}/l \quad (2)$$

여기서, 중앙중거 측정시스템의 세 가지 참조 점은 $x - b, x$ 및 $x + a$ 지점에 있으며, 그리고 $l = a + b$ 이다.

관성(慣性)과 현(弦)에 기초한 시스템들은 여러 해 동안 함께 현존하여 왔다. 일부는 측정을 비교할 만하게 만들기 위하여 좋은 전달함수를 만들어내는 데에 초점을 맞추었다. 이 방법의 진보성은 <그림 4>의 A 그래프에서처럼 재하되지 않은 궤도선형과 재하된 궤도선형으로 분리할 목적으로 두 시스템을 비교하는 것이다. 이 접근법에 기초하여 궤도 처짐(track deflection)과 궤도강성(track stiffness)을 결정할 수가 있다.

식 (2)에 따는 현(弦, chord) 함수는 외부의 점들이 중앙 점과 같은 재하조건을 가졌다고 가정한다. 만일 식 (1)과 같은 기호로 적절한 추정치 행하여지면, 현 측정 결과는 다음과 같이 주어진다.

$$s_{C2}(x) = s_U(x) - \{b[s_U(x+a) + w(x+a, x)] + a[s_U(x-b) + w(x-b, x)]\}/l \\ = s_U(x) + w(x, x) - \{b[s_U(x+a) + w(x+a, x)] + a[s_U(x-b) + w(x-b, x)]\}/l \quad (3)$$

이것은 <그림 4>의 B 그래프에 도해되어 있으며 여기서 C1과 C3은 거의 재하되지 않은 궤도상에서 주행한다.

관성에 기초한 시스템과 현 시스템으로부터의 측정을 비교하기 위하여 관성에 기초한 시스템의 레벨(고저틀림) 측정은 다음과 같이 식 (1)을 식 (2)에 대입함으로써 현 시스템과 같은 참조 시스템으로 전환된다.

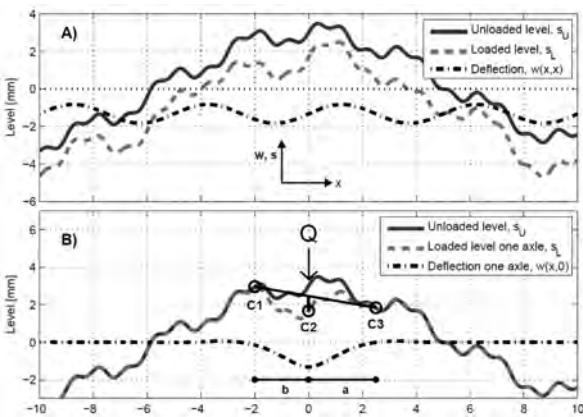
$$s_{C2}(x) = s_U(x) - \{bs_U(x+a) + as_U(x-b)\}/l \\ + w(x, x) - \{bw(x+a, x+a) + [aw(x-b, x-b)]\}/l \quad (4)$$

C2와 C1, C3 모두가 충분히 재하되고 있을 때 만약 재하된 레벨(적색 점선)에 대해 B 그래프에서와 같은 현(弦) 그림이 그려졌다면 식 (4)는 그림 4의 A 그래프에서 설명될 수 있다.

현 측정, 식 (3)과 필터된 관성 측정, 식 (4) 간의 차이를 고려함으로써 재하되지 않은 레벨(고저틀림)에서 분명한 결과는 다음과 같이 얻어진다.

$$s_{C2}(x) - s_C(x) \\ = \{b[w(x+a, x) - w(x+a, x+a)] + a[w(x-b, x) - w(x-b, x-b)]\}/l \quad (5)$$

재하되지 않은 궤도의 틀림에 의해 생기는 측정 레벨



<그림 4> 재하되지 않은 궤도와 재하된 궤도에 대한 궤도 처짐의 예(A), 현 측정과 결합된 단일 윤하중의 영향(B)



〈그림 5〉 EVS 방법으로 궤도강성도 측정할 수 있는 궤도선형검측차 IMV100

(고저틀림)에 대한 기여는 그렇게 함으로써 제거된다. 또한, 차륜-레일 접촉력을 측정하거나 시뮬레이팅함으로써 재하된 궤도강성을 사정할 수 있다.

이 접근법은 <그림 5>에 나타난 Infranord 차량 IMV100으로 시행되어 왔다. 각 측정 차륜의 축중은 100 kg이다.

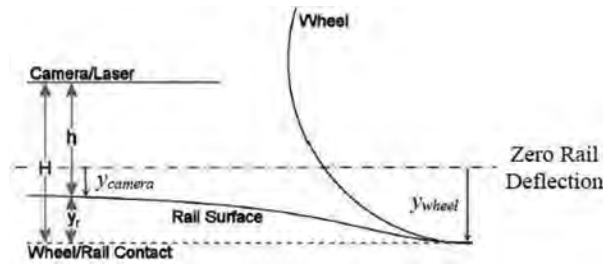
VIII. TTCI

TTCI(Transportation Technology Center in Pueblo, CO) 방법은 종방향 레벨(고저틀림, 면 틀림)과 궤도 처짐(track deflection)을 구별하기 위하여 SSB 방법에서처럼 다르게 재하된 2 개의 차축을 사용한다.

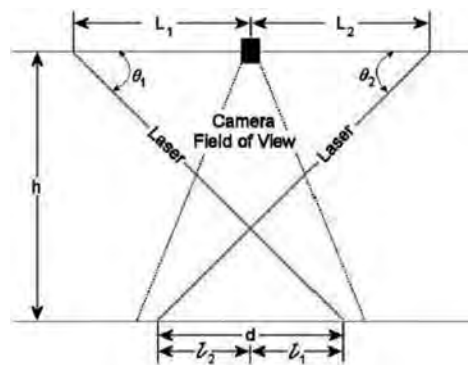
TTCI의 궤도 재하 차량(track loading vehicle, TLV)은 정지 상태에서와 16 km/h에 이르기까지의 속도로 이동하면서 횡과 수직의 강성을 측정하기 위하여 개발되었다. TLV는 이동하면서 강성을 측정하기 위하여 참조 측정이 행하여지는 빈 탱크차가 연결된다. 다른 축중을 가진 2 현(弦)이 측정된다.

IX. M-Rail

M-Rail은 Lincoln의 Nebraska대학교(UNL)가 개발한 방법을 상업화한 회사이다. 미국의 연방철도청(FRA)은 강성측정의 기술을 검토하기 위하여 Lincoln의 Nebraska 대학교를 후원하였다. 이 방법(문헌 [10] 참조)은 보기와 레일 간의 상대적인 레일 처짐을 측정하기 위하여 <그림



〈그림 6〉 UNL 강성측정장비의 레일 처짐/센서 측정



〈그림 7〉 UNL 강성측정장비의 센서 기하구조



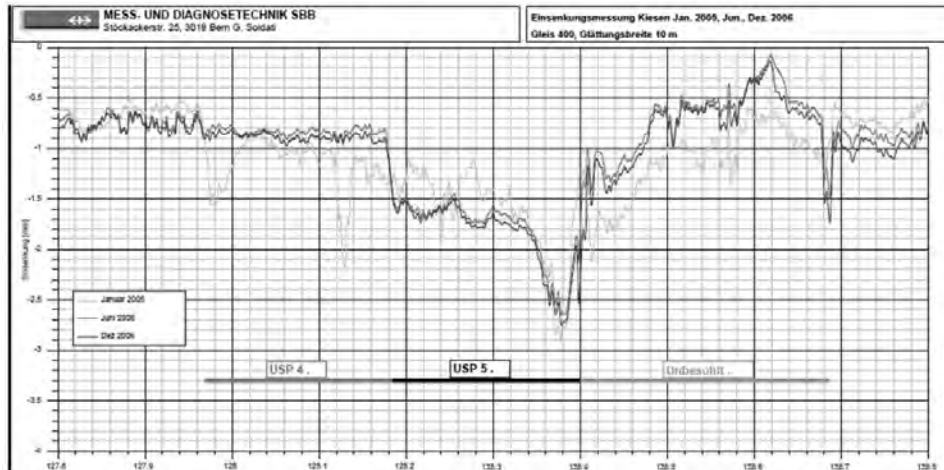
〈그림 8〉 M-Rail이 개발한 측정 차량

6>처럼 라인 레이저를 사용한다.

상대적인 처짐은 <그림 7>처럼 두 개의 라인 레이저와 두 라인 레이저 간의 거리 d 를 측정하는 카메라를 사용하여 측정한다. 센서가 레일표면에 더 가깝거나 더 멀게 이동함에 따라서 레이저 라인들 간의 거리가 변화된다.

처짐을 궤도계수(track modulus)/강성(stiffness)에 결부시키기 위해서는 Winkler 모델을 사용한다. 측정 차량을 <그림 8>에 나타낸다.

Vertical deflection monitoring car → track 418



<그림 9> Kiesen에서의 궤도 418의 수직 처짐 측정결과

X. 분석

궤도강성(track stiffness)과 궤도 처짐(track deflection)을 측정하는 방법은 서로 다르며, 그러므로 상기에 부분적으로 기술한 프로세싱을 행한다. 정밀한 조사에 모든 방법을 이용할 수는 없다. RSMV는 3.3 kN/mm(1 표준편차)의 반복정밀도가 보고되어 있다.

TTCI, SBB 및 RSMV의 차량은 저속(50 km/h 이하)으로 운영된다. M-Rail과 EVS 방법은 공칭의 궤도속도로 측정할 수 있다.

TTCI, SBB 및 RSMV는 운영의 용이성을 위하여 특별 측정차량을 필요로 한다. M-Rail은 어떤 차량도 연결할 수 있다. EVS는 중방향 레벨(고저틀림, 면 틀림)을 측정하는 데에 이미 존재하는 시스템들을 사용하기 위하여 가급적이면 궤도검측차에 연결되지만, 또한 어떤 차량에도 연결할 수 있다.

RSMV는 진동하는 질량을 이용하는 동적 측정이므로 50 Hz에 이르기까지의 각종 주파수로 강성을 분석할 수 있다. 그 외의 모든 방법들은 통상적인 차축의 변위를 모니터링하며 각종 주파수로 강성을 분석할 수 없다.

동결/용해나 변화하는 배수가 있는 위치를 제외하고는 지질공학적인 모니터링을 위해 빈번하게 모니터링 할 필요가 없다. 소프트한/딱딱한 지반의 조건을 결정하기 위해

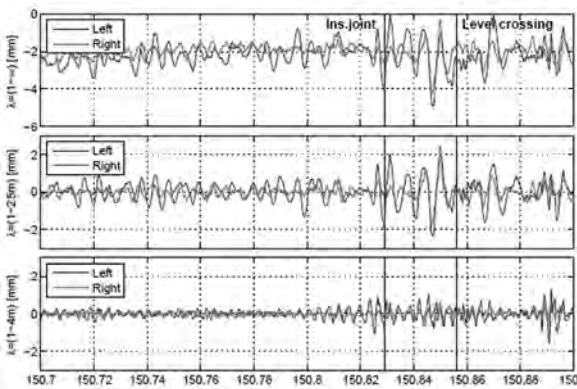
서는 한 번의 측정으로 충분하다. 시간이 지남에 따라 보다 변화되는 보다 짧은 파장에서 강성과 변위 변화에 대해서는 보다 빈번한 측정을 필요로 한다.

강성측정에 가장 적절한 방법의 선정은 사용자 요구조건에 강하게 좌우된다. 요구조건 일부는 다음과 같을 수도 있다.

- 특정 현장, 보다 짧은 거리 또는 네트워크의 큰 부분 등 어느 곳의 강성을 측정하는가?
- 열차운행중지를 얼마만큼 허용하는가?
- 전체 강성과 국지적 강성 중에 어느 쪽에 관심이 있는가?
- 보통의 열차교통, 또는 특정의 하중과 빈도 등, 어떤 종류의 재하가 필요한가?
- 측정으로부터 예상된 결과는 무엇인가?

XI. 적용의 예

<그림 9>는 과거에 SBB 궤도 처짐 모니터링 차량을 사용하여 궤도 418의 수직 처짐을 측정한 결과를 예시한다. 궤도 418은 USP(Under Sleeper Pads)를 가진 2개의 시험 구간과 USP가 없는 하나의 참조구간을 포함한다. 열은 회색 선은 궤도를 갱신하기 전의 측정에서 취한 것이다. 2



<그림 10> Furet(2013.4.9.)에서의 궤도 처짐, 상부 그래프 $\lambda = [1 \sim \infty]$ m, 중간 그래프 $\lambda = [1 \sim 25]$ m, 하부 그래프 $\lambda = [0.5 \sim 4]$ m

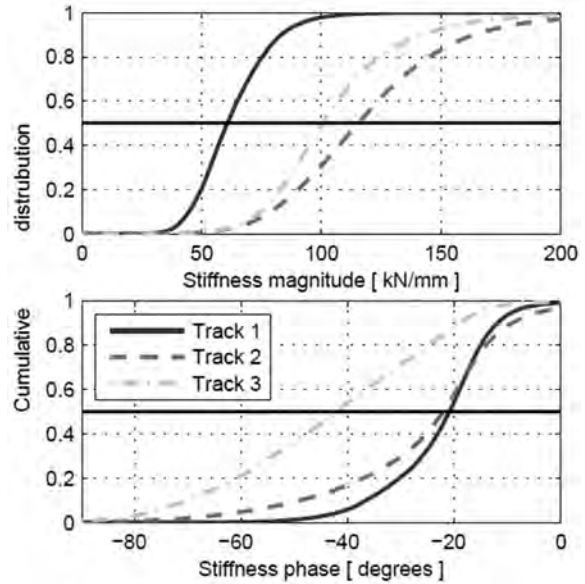
개의 다른 선은 갱신 후의 측정에서 취한 것이며, 먼저 측정한 것은 적색 선, 나중에 측정한 것은 청색 선으로 나타낸다.

수직 처짐의 측정은 하중 하에서의 궤도 처짐의 상세한 정보를 마련한다. 또한, 궤도의 결함(나쁜 하층도, 지하도 등)을 분명하게 확인할 수 있다. 일반적으로 USP를 가진 구간은 USP가 없는 참조구간보다 더 균질한 거동을 보여주었다. USP4와 USP5 간의 천이접속 구간에서는 USP 재료의 다른 강성에 기인하여 약 0.8 mm에서 1.6 mm로의 수직 궤도 처짐의 변화(shift)를 관찰할 수 있었다.

<그림 10>은 스웨덴의 Furet에서 EVS-방법으로 측정된 궤도 처짐을 예시한다. 상부 그래프는 2 mm의 정적 평균 처짐을 포함하는 모든 (필터하지 않은) 궤도 처짐을 나타낸다. 중간 그래프는 종방향 레벨(고저틀림, 면틀림)에 사용된 파장 간격 D1(3~25 m)에 해당하는 1~25 m 간에서 필터된 것을 나타낸다. 상부 그래프에 제시한 평균 정적 처짐을 제외하면 상부와 중간 그래프는 같다. <그림 10>의 하부 그래프는 대단히 짧은 파장의 변화를 나타낸다.

절연이음매에서와 철길건널목 주위에서의 큰 변화도 또한 나쁜 도상지지/튼 침목의 결과이며, 그것은 이 방법으로 쉽게 발견된다.

RSMV를 이용한 더 긴 궤도구간에 걸친 궤도강성의 통계례를 <그림 11>에 도해한다. Falun과 Borlänge 간(24 km)의 궤도 1(50 kg 레일과 목침목)은 25톤까지에 이르는 축중의 혼합교통을 수송한다. Alvesta와 Hässleholm 간(93



<그림 11> 세 개의 다른 궤도에 대한 동적 궤도강성(11.4 Hz에서의 누적분포

km)의 궤도 2는 22.5톤에 이르기까지의 축중을 가진 화물 교통과 200 km/h에 이르기까지의 최고속도의 여객교통을 수송하는 남부 본선의 일부이다. 이 궤도는 유사한 목의 목침목도 또한 존재할지라도 부드러운 패드와 딱딱한 패드가 혼합되고 50/60 kg 레일과 함께 주로 콘크리트 침목으로 건설되어 있다. 서부 본선 상의 Varberg와 Gothenburg 간(48 km)의 궤도 3(콘크리트 침목, 소프트한 패드 및 60 kg 레일)은 궤도 2와 같은 유형의 교통을 수송한다.

<그림 11>의 상부 그래프에서 볼 수 있는 것처럼 강성 규모는 여러 궤도 간에서 상당히 달라질 수 있다. 목침목과 50 kg 레일로 건설된 궤도 1은 다른 두 궤도와 비교하여 뚜렷이 다르게 낮은 값을 분명히 나타내고 있다. 궤도 1의 하부구조는 일반적으로 좋은 조건(주로 빙퇴석·氷堆石)에 있다. 강성 위상(stiffness phase)을 고려할 때 궤도 3은 <그림 11>의 하부 그래프에 나타난 것처럼 타 궤도들과 다르다. 이 궤도에는 궤도를 따라서 소프트한 클레이(clay)의 부분이 있으며, 그것은 대부분의 경우에 석회-시멘트 기둥(lime-cement column)으로 보강된다. 동적으로 가진(加振)되었을 때는 클레이 하부구조가 저주파수에서 큰 강성 위상 지연을 나타낸다.

XII. 맺음말

궤도지지의 양호성과 궤도지지의 균질성은 궤도선형의 장기 안정성과 궤도의 좋은 수명주기 비용에서 매우 중요한 파라미터이다. 열차주행으로 경험하는 궤도강성은 궤도를 따라서 변화될 것이다. 뜬 침목이 있을 때는 짧은 궤도거리 내에서도 강성의 변화가 상당히 크다.

궤도선형(track geometry)의 불규칙과 궤도강성(track stiffness)의 불규칙으로 유발되는 수직 차륜-레일 접촉력(contact force)의 동적 성분(dynamic component)은 지반 진동과 지반소음에서 중요한 근원이다. 진동레벨을 컨트롤함에 있어서 중요한 양상의 하나는 궤도(와 레일)의 고저 불규칙을 정밀하게 측정하고 모니터링하는 시스템의 유효성이다. 이러한 측정과 모니터링의 기술 중에서 특히 궤도강성의 측정은 비교적 새로운 기술이다.

우리나라도 이러한 신기술을 이용하여 궤도강성의 측정을 정기적으로 수행함과 동시에 궤도의 유지보수·갱신이나 축중 및/또는 속도를 높이기 위한 궤도 업그레이드의 계획을 수립할 때나 신설선로의 궤도를 검증할 때의 틀로서 활용할 필요가 있다고 생각한다. ☺

♣ 참고문헌

- [1] T. Dahlberg, Railway Track Stiffness Variations—Consequences and Countermeasures, International Journal of Civil Engineering, Vol. 8, No. 1, 2010.3.
- [2] L Puzavac, Z Popović, L Lazarević, Influence of track stiffness on track behaviour under vertical load, PROMET-Traffic & Transportation, Vol. 24, No. 5, 2012.
- [3] Sutart L Grassie, Rail irregularities, corrugation and acoustic roughness: characteristics, significance and effects of re-profiling, Rail Measurement Ltd, Cambridge, UK, 2012.8.
- [4] Eric Berggren, Stiffness and irregularity measurement; 3rd RIVAS Workshop, EBER Dynamics, 2013.10.
- [5] Lise Pesqueux, Guidelines, good practices for maintenance; 3rd RIVAS Workshop, Alstom Transport, 2013.10.
- [6] INNOTRACK, Methods of track stiffness measurements, 2006.
- [7] Wolfgang Boehr, Description of test procedures based on laboratory tests and field tests including validation, UIC, 2013.12.
- [8] SL Grassie, MJ Saxon, JD Smith, Measurement of longitudinal rail irregularities and criteria for acceptable grinding, Journal of Sound and Vibration, Vol. 227 1999.11.
- [9] E. G. Berggren, Railway track stiffness—Dynamic measurement and evaluation for efficient maintenance, PhD Thesis, Royal Institute of Technology(KTH), Stockholm, 2009.
- [10] C Norman, S Farritor, R Arnold, S E G Elias, M Fateh, M E Sibaie, Design of a system to measure track modulus from a moving railcar, Proceedings from Railway Engineering Conference, London, 2004.
- [11] Alain Robinet, Mohsen Hosseingholian, Alain Quibel, Michel Froumentin, Track stiffness assessment Abstract, UIC, 2008.11
- [12] INNOTRACK, Adapted "portancemetre" for track structure stiffness measurements on existing tracks, 2008.5
- [13] 서사범 ; 최신 철도선로(Modern Railway Track : Esveld C. 원저), 도서출판(주) 열과 알, 2003.5. (ISBN 89-5529-067-5)
- [14] 서사범 : 궤도역학 1(Fundamentals of Track Dynamics, 자갈궤도의 역학 : A. D. Kerr 원저), 도서출판 BG 북 갤러리, 2009.6.30. (ISBN 978-89-91177-79-6 93530)