

자갈궤도 뜬침목 간이 평가 방법

Easy Evaluation Method of Hanging Sleepers in Ballasted Track

김대상* 김현기** 이태균*** 김석동**** 김성중*****
Kim, Dae Sang Kim, Hyun Ki Lee, Tae Gyun Kim, Seok Dong, Kim Sung Jung

ABSTRACT

Hanging sleepers, which are not fully supported between the sleepers and the ballast, could cause large dynamic forces especially on high speed ballasted track. The dynamic forces resulting from insufficient supporting forces may badly affect the running stability and safety of train. These also accelerate track irregularities and deteriorate track components rapidly. Consequently, the hanging sleepers will lead to sharp increases in track maintenance cost.

This paper introduces a rapid and easy method to detect hanging sleepers with portable light falling weight deflectometer (LFD) and summarizes the results of experiments performed at the high speed ballasted track.

1. 서론

현재 고속으로 운행 중인 고속철도 1단계 건설구간은 자갈궤도형식을 채택하였다. 자갈궤도는 레일과 침목을 지지하는 층이 자갈로 구성되어 있는 궤도로, 경제적인 뿐만 아니라 건설의 용이성 등으로 인하여 초기 철도의 건설과 함께 사용되어 온 궤도구조 형식이다. 많은 장점에도 불구하고 자갈궤도는 궤도를 지지하는 도상과 노반에서 지속적으로 발생하는 침하를 유지보수 해야 하는 단점을 갖고 있다. 최근의 인건비 및 유가 상승 등 외부적인 사회요인 들은 유지보수 비용이 작은 궤도형식을 요구하고 있다. 따라서 고속철도 선진국이라고 할 수 있는 독일과 일본에서는 도상에서의 침하를 근본적으로 억제할 수 있는 콘크리트 궤도를 개발하여 사용하고 있다.

고속철도가 운행 중인 자갈궤도에서 발생하는 연속 혹은 불연속적인 궤도의 침하(궤도틀림)에는 다양한 원인이 있을 수 있다. 다양한 원인에 의하여 발생할 수 있는 도상에서의 침하 중 침목 직하에서 발생하는 침하는 침목과 도상사이에 그림 1과 같은 공극을 발생 시킨다. 이와 같은 침목과 도상 사이의 공극은 고속으로 주행하는 열차의 주행 안전성 및 승차감을 크게 악화 시킬 뿐만 아니라 동적 운중의 증가로 레일, 침목, 체결구 및 도상자갈의 수명을 감소시키게 된다. 본 연구에서는 우선적으로 뜬 침목 발생량을 정량적으로 평가할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하고, 향후 뜬 침목 발생을 저감 시

* 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원

E-mail : kds@krri.re.kr

TEL : (031)460-5305 FAX : (031)460-5319

** 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원

*** 정희원, 한국철도시설공단 부장

**** 정희원, 한국철도기술공사 차장

***** 비희원, 한국철도기술연구원 연구원

킬 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하고자 한다.

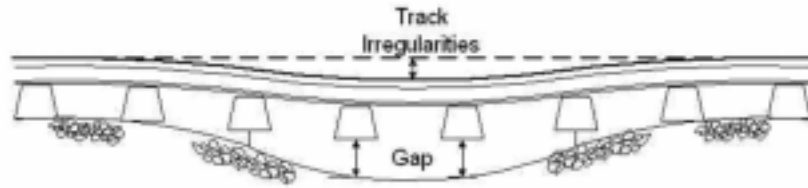


그림 1 뜯 침목 개념도

2. 현장 시험개소 및 방법

그림 2는 고속철도 운행 구간 중에서 뜯 침목이 발생한 것으로 보고된 시험구간 개요도이다. 시험구간은 뜯 침목이 자주 발생하여 유지보수가 빈번한 구간이다. 표 1은 시험구간의 거리, 시험방법, 구간 특징을 간단하게 요약하였다.

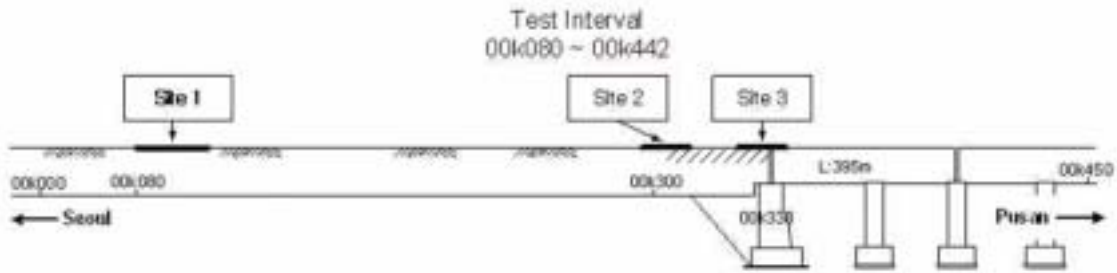


그림 2 시험구간 개요도 (00k080 ~ 00k442)

표 1 시험구간의 특징 및 방법

	시험 구간	시험 방법	구간 특징
전 구간	000k080~000k442(362m)	LFWD	토공, 교량
Site 1	000k080~000k095(15m)	말뚝고정식	토공구간
Site 2	000k314~000k324(10m)	말뚝고정식	접속부(토공+ 뒷채움)
Site 3	000k332~000k342(10m)	라인스캔카메라	접속부(뒷채움+ 교대)

그림 2 및 표 1과 같이 시험 전 구간에 대하여 중추 낙하 시험법(LFWD)를 적용하였고, 뜯침목이 많이 발생한 일부 구간(Site 1, 2, 3)에 대하여 기존의 말뚝 고정식 변위 측정 방법과 새로운 라인스캔 카메라를 이용한 방법을 추가로 적용하여 뜯침목을 발생 정도를 평가하였다.

그림 3, 4, 5는 침목의 연직변위를 측정하기 위한 기본 개념도이다. 그림 3은 현재 많이 사용되고 있는 말뚝 고정식 침목 연직변위 측정 개념도이다. 이 방법은 1.0m에서 1.5m 길이의 말뚝을 변위를 측정하고자 하는 침목 주변에 박고, 말뚝에 변위계를 설치하여 열차 운행 시에 침목에 발생하는 연직변위를 측정할 수 있다. 그림 4는 LFWD의 개념도이다. LFWD는 다짐 후 노반면이나 도로 포장체의 탄성계수를 측정하도록 고안된 장치이다. 본 시험법은 대상 매질에 동하중을 작용시켜 하중과 처짐을 측정하여 탄성론을 이용하여 탄성계수를 역산하는 원리를 이용한다. 본 연구에서는 측정된 하중과 침하로부터 침목의 지지강성 및 뜯침목 발생량을 평가하였다. 그림 5는 라인 스캔 카메라로 침목의 연직 변위를 측정하는 개념도이다. 본 시험법은 변위를 측정하고자 하는 대상체에 타겟을 설치하고, 0.025mm의 해상도

로 초 당 20,000회 촬영이 가능한 라인스캔 카메라와 이미지 프로세싱이 가능한 PC를 이용하여 열차 주행 중 발생 변위를 측정하는 방법으로 철도 분야에 처음으로 도입되었다.

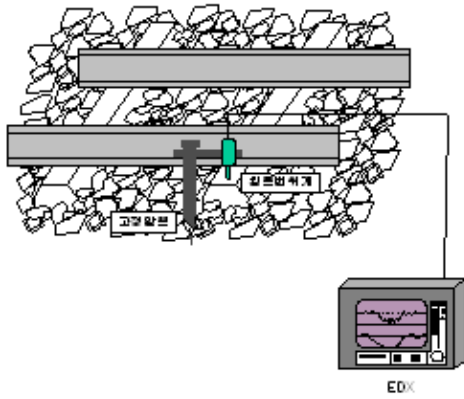


그림 3 말뚝고정식 침묵변위 측정법

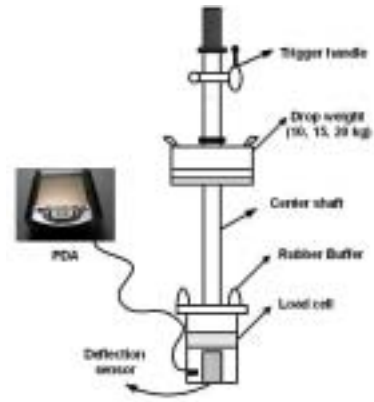


그림 4 LFWD를 이용한 침묵변위 측정법

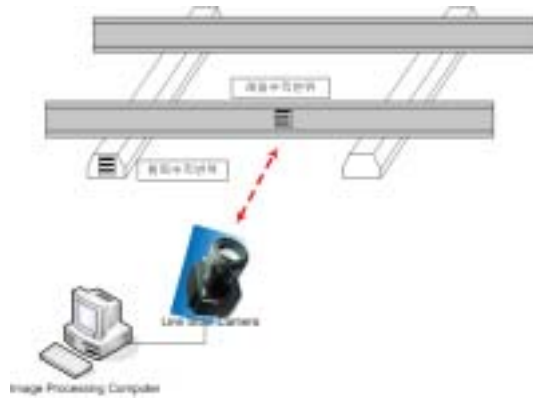


그림 5 라인스캔카메라를 이용한 침묵변위 측정법

3. 시험 결과

레도지지강성 평가 시 LFWD의 적용성을 평가하기 위하여, LFWD 시험 시 침묵에 작용하는 응력 수준과 고속열차 운행 시 침묵에 발생하는 응력레벨을 비교하였다. 그림 6과 그림 7은 LFWD 방법과 고속열차 운행 시 침묵 상에서 발생한 응력을 측정된 결과이다. 그림 6은 10cm²의 재하판을 이용하여 20kgf의 하중 재하 시의 시험 결과로 최대 2.26MPa의 응력이 침묵상에 작용하고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 속도 181km/hr와 243km/hr의 고속 열차 주행 시 침묵에 작용하는 응력으로 1.0~1.5MPa 범위의 응력이 침묵상에 발생하는 것을 알 수 있다. 비록 응력 측정지점이 LFWD의 경우 레일 측면이고 KTX 운행 중인 경우는 레일 직하라는 차이는 있으나, 발생 응력 수준만을 평가해 보면 LFWD의 침묵상 지지강성 평가 및 뜬침묵 발생량 평가를 위한 적용 가능성은 충분하다고 판단되었다.

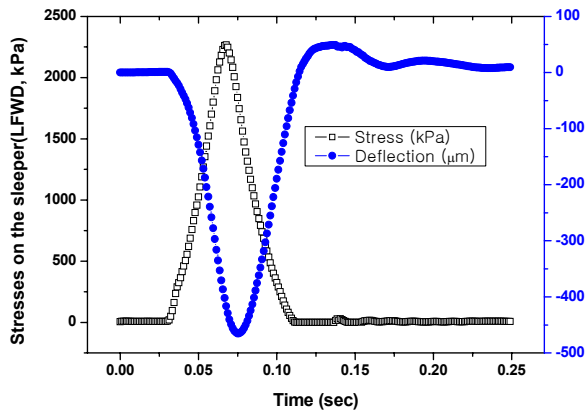


그림 6 LFW 발생응력(침목상)

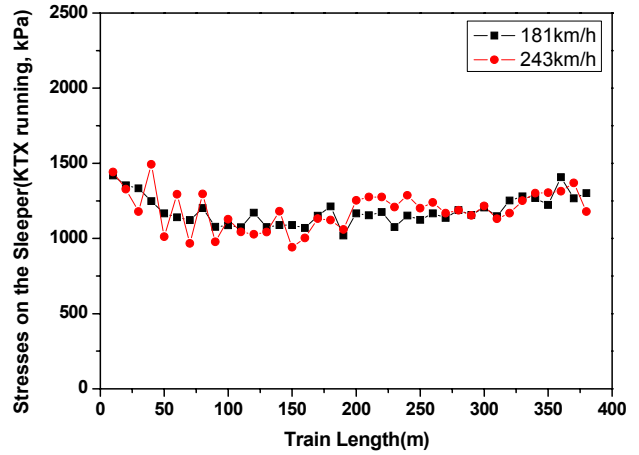


그림 7 KTX 주행 중 발생 응력(침목상)

그림 8은 시험 전 구간에 대한 20kgf 하중 재하 시 침목의 연직 변위 발생량을 평가한 결과이다. 발생 연직 변위는 0.25~0.5mm 범위에 있었으나, 44k332m지점 421번 침목과 44k436m지점 595번 침목에서의 연직 변위 발생량은 1.9mm와 1.7mm로 크게 발생하였다. 44k333m지점의 423번 침목의 경우 LFW의 침하 측정 한계인 2.5mm를 초과하는 침하가 발생하였다. 따라서 본 개소의 경우 라인스캔 카메라를 이용하여 침하를 측정하였다.

그림 9는 지지강성(하중/침하량)을 전 구간에 대하여 평가한 결과이다. 평균 지지강성은 54.8MN/m, 최대지지강성은 44k329m지점 416번 침목에서 188MN/m, 최소지지강성은 44k332m지점 421번 침목에서 8.8MN/m이었다. 접속부와 교량사이의 구간에서 지지강성 변화가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 레일 용접개소인 595번 침목에서의 지지강성은 9.6MN/m로 최소값에 가까운 작은 값으로 관측되었다.

개소별 지지강성 변화를 평가하기 위하여 최소 지지강성을 기준으로 지지강성을 정규화한 결과 정규화한 지지강성은 최소지지강성의 4~8배 범위에 있었고, 최대 지지강성개소의 지지강성은 최소 지지강성 개소 지지강성의 21.4배에 달하였다. 그림 2의 시험구간 개요도와 그림 9의 전 구간 지지강성을 비교해 보면 접속부(뒷채움-교대), 교각 상, 레일 용접개소에서 지지강성이 작은 것을 확인할 수 있었다.

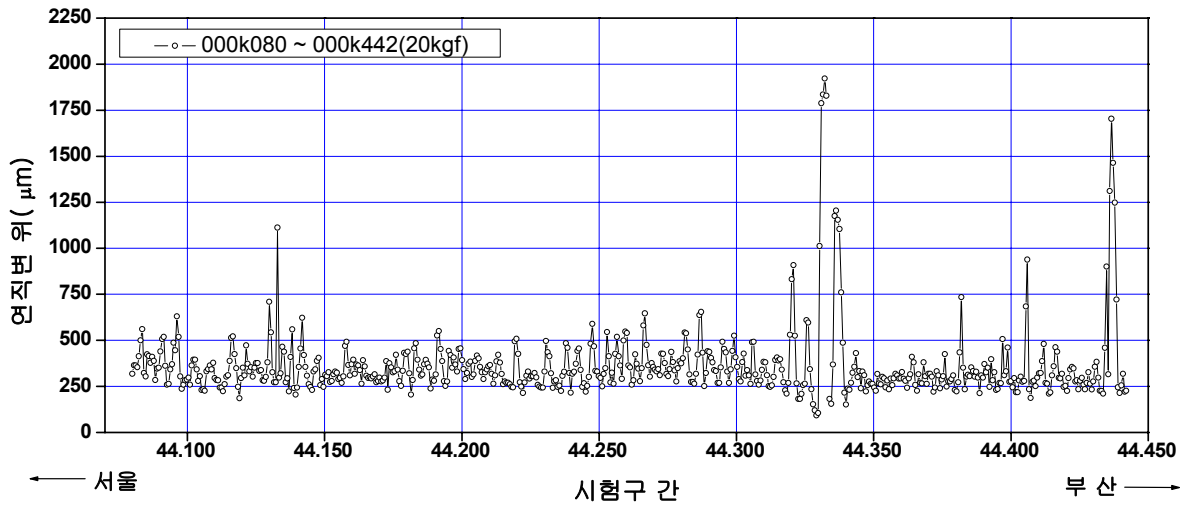


그림 8 전 구간의 침목 연직변위(LFWD, 20kgf)

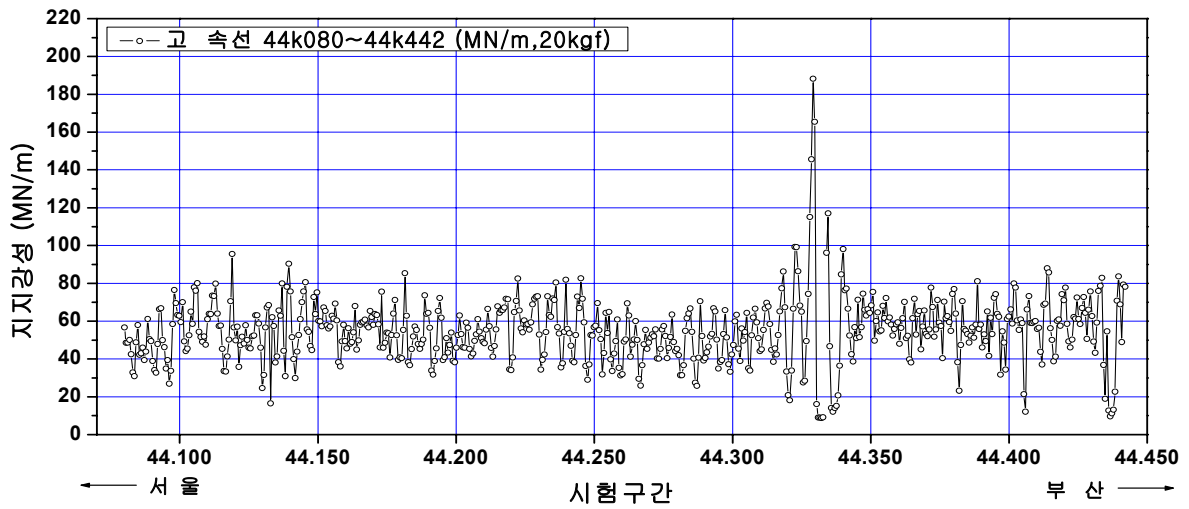


그림 9 전 구간의 지지강성

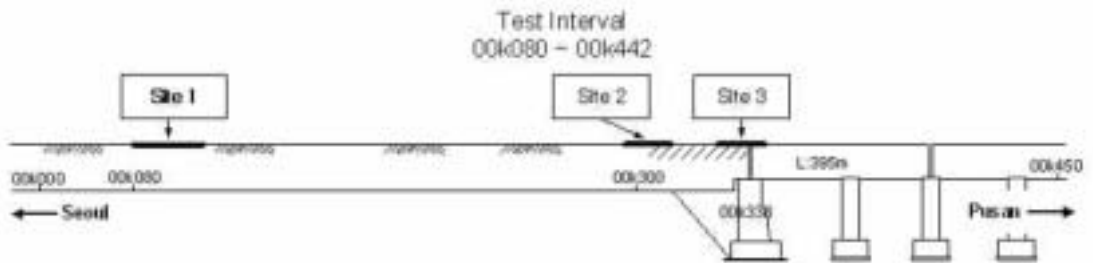


그림 2 시험구간 개요도 (000k080 ~ 000k442)

그림 10, 11, 12는 재하 하중이 각각 10kgf 와 20kgf 인 경우에 대하여 Site 1, 2 그리고 3에서의 LFWD 시험 결과이다. 그림에서 붉은색의 원형점은 10kgf 하중 재하 시의 시험 결과이고, 흑색의 사각 점은 20kgf 하중 재하 시의 시험 결과이다. 전체적으로 10kgf 하중 재하 시 발생 침하량이 작은 것을 확인할 수 있었으며 그 침하 발생 패턴은 개소별로 일정하지 않았다.

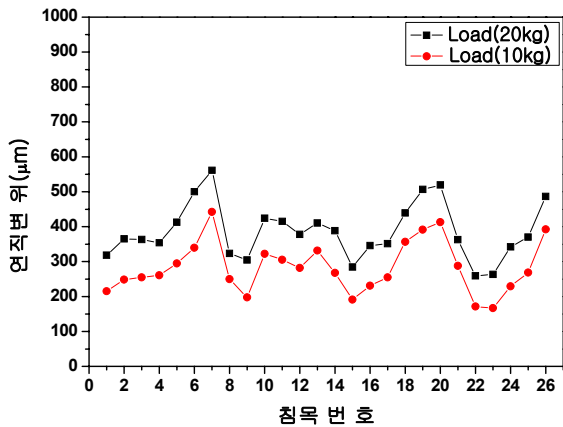


그림 10 침목 연직변위 변화(Site 1)

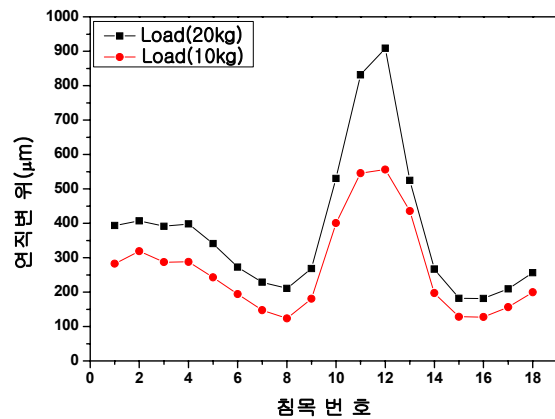


그림 11 침목 연직변위 변화 (Site 2)

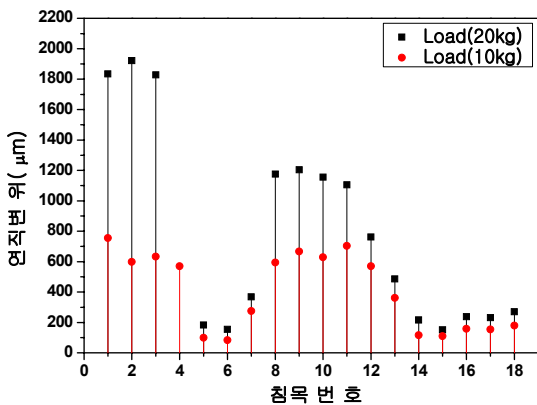


그림 12 침목 연직변위 변화(Site 3)

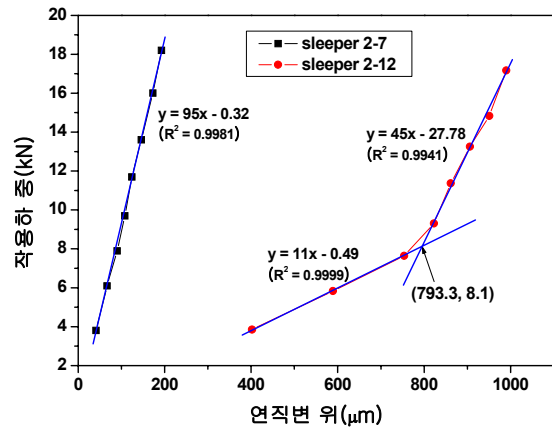


그림 13 재하 하중에 따른 지지강성 변화

그림 13은 Site 2에서 변위 발생이 작은 7번 침목과 변위 발생이 큰 12번 침목에 대하여 작용 하중을 3.8kN에서부터 18.2kN까지 변화시키면서 침목의 연직변위 발생량을 측정한 결과이다. 7번 침목에서는 최대 0.19mm의 침하가 발생하나, 12번 침목의 경우 8.1kN 까지는 지지강성이 작고 0.793mm의 침하가 발생하나, 8.1kN 이후부터는 지지강성이 크고 침하 발생이 작았다. 따라서 0.793mm까지는 침목이 떠 있는 뜬침목 상태일 것으로 판단되었다. 7번 침목과 12번 침목의 지지력 시험 결과, 7번 침목에 대한 12번 침목의 지지강성 비는 95/11로 8.64배 이었다. 이는 불과 3m 떨어진 두 침목 사이에서 지지강성이 11.6%까지 감소 될 수 있음을 의미한다.

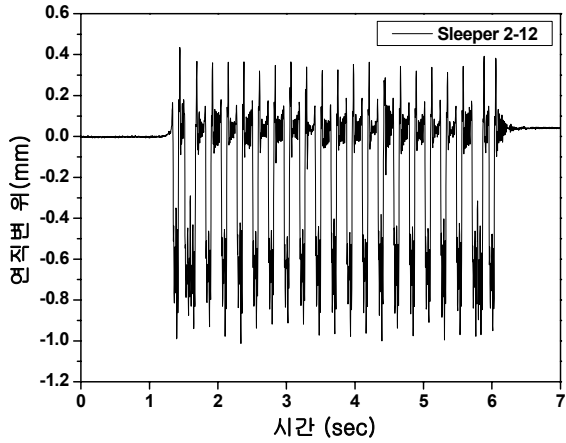


그림 14 고정말뚝을 이용한 침목 연직변위
(Site 2, 12번 침목)

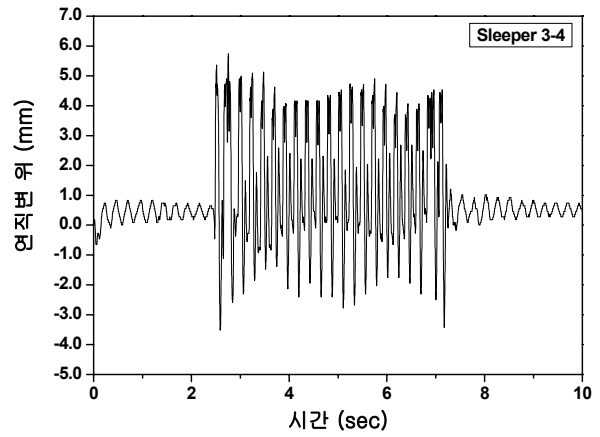


그림 15 라인스캔카메라를 이용한 침목 연직변위
(Site 3, 4번 침목)

그림 14는 고정말뚝을 이용하여 Site 2의 12번째 침목의 연직 변위를 측정된 결과이다. 뜬침목의 최대 연직변위는 1.0mm로 LFWD로 측정된 그림 11의 결과 중 20kgf 하중 재하 시의 연직 변위 발생량인 0.9mm와 큰 차이가 없었다. 그림 15는 라인스캔 카메라로 측정된 Site 3의 4번째 침목 연직변위를 측정된 결과이다. 뜬침목의 최대 연직 변위는 3.52mm로 이는 현재 사용 중인 LFWD 장비로 측정할 수 없는 변위 발생량이었다. 특이한 점은 연직 상 방향 변위도 5.74mm로 측정되어 침목의 연직 하 방향 변위보다 상 방향 변위가 크게 발생하고 있다는 점이다. 따라서 침목의 상하 연직변위의 합은 총 9.26mm 발생하였다. 이는 뜬침목 발생 개소의 경우 레일 및 침목은 상하 방향으로 과도하게 진동함으로서 체결구를 포함한 궤도 구성품의 수명이 급격히 저감될 수 있음을 시사한다.

4. 결론

본 논문에서는 뜬침목을 평가하고자 3가지의 변위 시험 방법을 뜬침목이 발생한 고속철도 현장에 적용하였다. 3가지 변위 측정 방법은 중추낙하시험기(LFWD)를 이용한 방법, 말뚝을 고정하고 변위계를 설치하여 침하를 측정하는 방법, 라인스캔 카메라를 이용하는 방법이다.

1) 각 방법의 장단점을 간단히 분석하면 다음과 같다. LFWD 방법은 이동식으로 시험이 쉽고 빠르나, 현 단계에서는 장비가 고가이고 변위 측정 범위에 제한이 있다. 따라서 추가적인 장비 개선이 필요하다. 고정 말뚝법은 저가이나 시험이 어렵고 열차 진동에 의한 영향이 큰 경우 결과의 신뢰성이 떨어질 수 있다. 라인스캔 카메라 법은 현재 개발 중인 시험법으로 정확한 시험 결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 현 단계에서는 고가이며 고정식으로 이에 대한 개선이 필요하다.

2) 본 연구를 수행한 구간에서의 최대 뜬침목 발생량은 3.52mm이었다. 고정 말뚝법과 라인스캔 카메라를 이용한 연직 변위 측정 결과 뜬침목 발생 개소에서는 상방향 진동도 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

3) LFWD를 이용하여 시험구간에 대하여 지지강성을 평가한 결과, 평균 지지강성은 54.8MN/m, 최대

지지강성은 188MN/m, 최소지지강성은 8.8MN/m 이었다. 접속부와 교량사이의 구간에서 지지강성 변화가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 레일 용접개소에서 지지강성은 9.6MN/m로 최소값에 가까운 낮은 값으로 관측되었다. 최대 지지강성개소의 지지강성은 최소 지지강성 개소 지지강성의 21.4배에 달하였다. 지지강성 부족개소로는 접속부(뒷채움-교대), 교각 상, 레일 용접개소를 확인할 수 있었다.

4) 본 시험 결과 불과 0.8mm의 뜯침목 발생으로도 지지강성은 정상 지지침목의 11.6%까지 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 불과 3m 떨어진 두 침목 사이에서 지지강성이 급감하므로 고속 주행 중인 열차의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 향후 타 구간에 대한 뜯침목 발생량의 정량화에 대한 추가 연구를 통하여 뜯침목 개선 방안에 대하여 좀 더 심도 있는 연구를 수행할 계획이다.

참고 문헌

1. Coenraad Esveld, Modern Railway Track
2. 이지하, 2005, 고속열차 운행시 뜯침목 구간에서 발생하는 궤도의 동특성, 건국대학교 토목공학과 박사학위 논문