

교량 토공 접속부에서 궤도강성변화에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Variation of Track Stiffness between Earthwork and Bridge

나 성 훈*
Na, Sung-Hoon

서 사 범**
Suh, Sa-Bum

손 기 준***
Son, Ki-Jun

김 정 환****
Kim, Jung-Hwan

ABSTRACT

In order to evaluate the effect of impact load at support stiffness transition area, the field estimations are performed at the transition zone between earthwork and bridge on test operation of KTX. Due to differential settlement caused by the variations of track support stiffness, large impact forces are investigated. However, the measured values such as wheel load, rail stress, displacement and acceleration in the transition area shows that the stiffness changes in the transition area are not abrupt, and the stiffness in the infra track structure varies continuously. In this experimental study, the parameters influencing safety of transition area are not governed by partial or local stiffness because cumulative passing loads are not sufficient on test operation of KTX.

1. 서론

고속철도에서 궤도구조물은 고속으로 주행하는 차량을 직접 지지하고 유도하여 도상과 노반으로 하중을 효과적으로 분산할 수 있어야 한다. 그러나, 도상과 노반 및 궤도하부구조의 강성 변화로 인해 충격이 궤도 및 선로 시설물에 작용하여 도상이 소실되는 것과 같은 부등침하를 발생시켜 하중을 효율적으로 분산시키지 못하여 차량의 운행 안정성에 영향을 미침은 물론, 승차감을 저하시킬 뿐 아니라 과도한 궤도유지관리 비용을 필요로 하게 되고, 궤도전체 성능에 손상을 미치게 된다.

특히, 교량과 터널이 토공구간과 접속하는 구간은 강성이 불연속적으로 변화하여 궤도구조 전체에 충격력이 작용할 수 있는 궤도시설물 중 취약한 구간이다.

따라서, 이러한 강성변화구간에서 나타나는 부등침하를 제거하기 위한 방법으로 교량 또는 터널부의 강성변화구간과 주변부 축제의 강성을 동일하게 하는 방안과 급격한 강성변화를 완화시켜 강성이 점진적으로 변화하도록 하는 방안이 주로 제시되고 있다. 전자의 이상적인 강성 동일화 방안에 비하여 점진적인 변화구간을 구현하는 후자의 방안이 현실적으로 주로 적용되고 있다.

현재 건설중에 있는 경부고속철도는 총연장 412km중 터널과 교량이 각각 44%와 27%로 구조물

* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

** 한국고속철도건설공단 궤도처장, 정회원

*** 한국고속철도건설공단 궤도처, 비회원

**** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

이 차지하는 비중이 전체의 71%에 해당한다. 따라서, 본 연구에서는 경부고속철도 시험선 구간의 교량과 토공 접속구간에서 차량 하중 충격력의 효과에 대해 실험하고 그 결과를 분석하여, 강성변화구간에 대한 하중분산효과와 점진적인 강성변화 여부에 대해 논하고자 한다.

2. 강성변화구간

일반적으로 고속철도 궤도에서 강성변화구간이란 교량과 토공구간의 접속부와 같이 하부구조의 강성이 변화하는 구간을 말하는데, 교량과 토공 그리고 터널과 토공 등 유도상 궤도에서 무도상궤도로 옮겨가는 구간은 물론 궤도의 하부구조 강성이 변화하는 모든 구간을 말한다.

궤도에서 강성변화구간이 문제가 되는 이유는 강성 차이에 따른 부등 침하의 발생에 의하여 충격하중 효과가 발생하여 진입구간인 토공분야에 상대적인 과대 침하가 발생하기 때문이다. 부등 침하는 차량의 운행 안정성에 영향을 미치는 물론 승차감 저하 등에 영향을 미치는 요소로서 지속적인 유지보수를 필요로 하는 손상이다.

강성변화구간에서 나타나는 부등침하를 제거하기 위한 가장 간단하면서도 개념적인 처리 방법은 교량 또는 터널부의 강성변화구간(Transition area)과 주변부 축제(Embankment)의 강성이 동일하도록 개선시키는 것이다. 그러나 현장에서 이런 구간들에 대하여 강성을 동일하게 유지시키는 것은 불가능하다고 할 수 있으므로 급격한 강성변화를 완화시켜 강성이 점진적으로 변화하도록 하는 방안이 주로 적용되고 있다.

강성변화 구간은 궤도의 하부구조에 나타나는 강성의 불연속성에 의하여 정적거동은 물론 동적 거동의 충격효과를 발생시킨다. 이에 따라 강성이 강한 부분과 일반 토공 부분사이에 부등침하의 문제를 발생시켜 차량의 운행안정성과 승객의 승차감을 저하시키며, 궤도구조 자체의 성능감소 등의 영향이 나타난다. 또, 궤도의 마모와 구조물의 손상, 소음과 진동의 증가, 차량의 고속화 및 중량화 불가 등의 문제점이 있다.

강성변화에 따라 변화구간에서 과대한 변위가 발생하는데 이는 주변 축제와 교대 뒷부분 뒷채움재의 불충분한 다짐 또는 뒷채움 재료의 압밀 과정, 차량 하중 또는 온도하중에 의한 궤도구조 및 교량의 이동변위 등에 의하여 발생한다고 볼 수 있다.

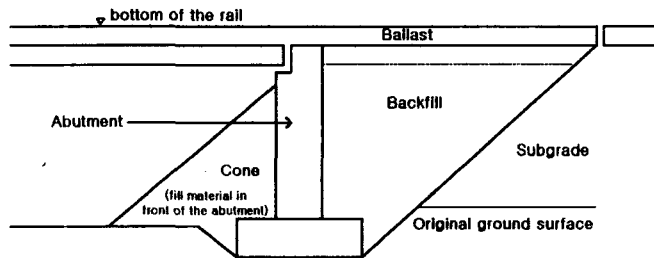


그림 1. 교량, 궤도 뒷채움 재료

이러한 작용들은 <그림 1>과 같이 교량과 뒷채움 재료 그리고 궤도간의 상호작용을 유발한다. 차량하중에 의한 변형은 두 가지 양상으로 나눌 수 있는데, 한 대의 차량이 이동할 때 가해지는 단기하중에 의하여 발생하는 탄성변형(대부분 복원됨)과 반복적으로 작용하는 지속하중에 의한 소성 변형을 들 수 있다. 문제가 되는 것은 소성변형으로서 교량의 강성변화구간에 발생하는 거대 변위를 방지하기 위해서는 이러한 소성변형을 제거해야 한다고 할 수 있다. 이런 소성 변형은 교량의

형식이나 궤도 시스템의 특성 그리고 토공설계 등에 의하여 영향받을 수 있다. 이러한 상호작용의 존재 및 그 영향은 이미 인지되고 있을 뿐, 상호작용 시스템의 정확한 거동 체계에 대한 이해나 이에 대한 일반적 엄밀 해석은 사실상 많은 어려움을 가지고 있으며, 많은 가정들을 포함하는 해석 결과들은 실제 거동과 상이한 차이를 나타내고 있다. 또한, 현재 이미 고속철도가 운행중에 있는 독일과 일본 등지에서 궤도의 레일응력, 변위등 각부의 계측값이나 주행안정 판정값들은 자국의 실정에 맞게 제안하고 있으나, 강성변화구간에 대한 궤도 각부의 계측값이나 기준값은 제시하지 못하고 있는 실정이다.

이와 같은 교량과 토공의 접속부 강성변화구간의 거동을 경부고속철도 시험선 구간에 대해 측정을 실시하여 궤도의 실제 거동을 파악하고자 한다.

3. 계측위치와 항목

토공과 교량의 접속구간 계측은 고속철도 시험선 구간중에 궁현2교 북단 DKP 124km772 지점에서 실시 되었다. <그림 2>은 접속구간의 궤도 전경이고, <그림 3>의 A점은 계측이 실시된 접속부이다.



그림 2. 토공-교량 접속구간 궤도 전경

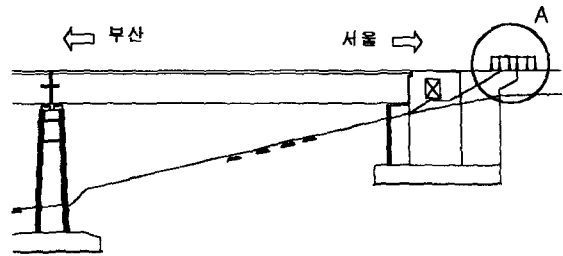


그림 3. 궁현2교의 교량-토공 접속부 측면도

교량과 토공의 접속부에서 윤중 9개, 레일변위와 침목변위 각각 3개, 레일휨응력 5개, 도상가속도 3개, 레일가속도 3개, 침목가속도 3개 지점에 계측을 실시하였으며, 계측결과를 주행방향별로 비교 분석하였다. 특히, 강성이 변화하는 교량과 토공구간의 접속부 A지점에 집중적으로 센서를 배치하였으며, 토공구간과 교량구간에도 센서를 배치하여 접속부와 비교하였다.

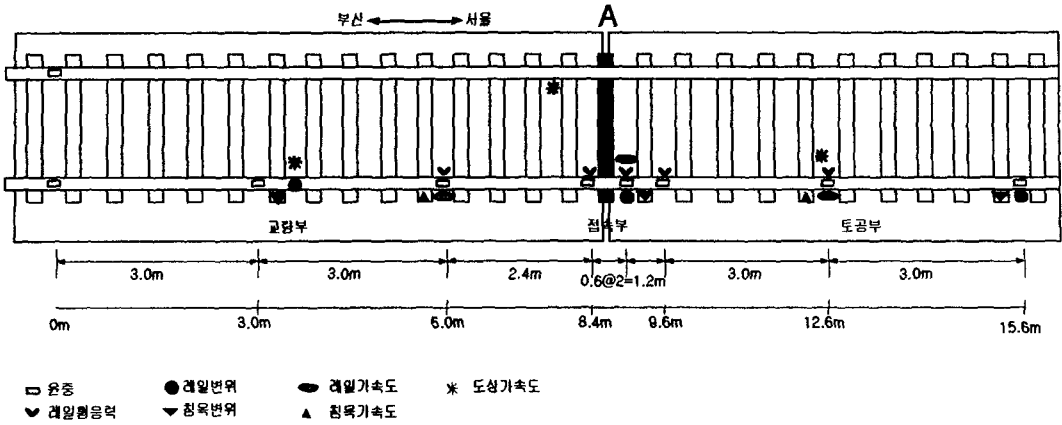


그림 4. 접속구간 센서 배치도

또한 측정값의 최대값이 위치한 차량의 부분을 표시하기 위해 <그림 5>와 같이 동력차, 동력객차, 객차 부분으로 나누어 최대값을 나타내는 차량부분과 차축을 분석하였다.

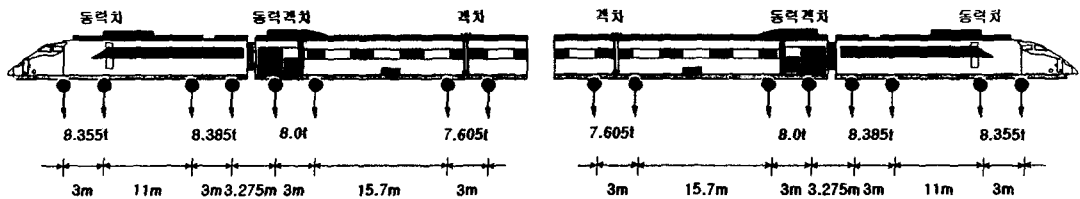


그림 5. KTX의 차축위치

4. 계측 및 분석결과

4.1 주행방향별 윤증의 변화

일반적으로 윤증을 측정함으로써 궤도 특히, 레일에 작용하는 동적하중의 충격력 효과를 직접적으로 평가할 수 있다. <그림 6>은 교량구간에서 토공구간으로 KTX가 주행할 때 계측이 실시된 모든 속도의 윤증의 변화를 도시한 그림이다.

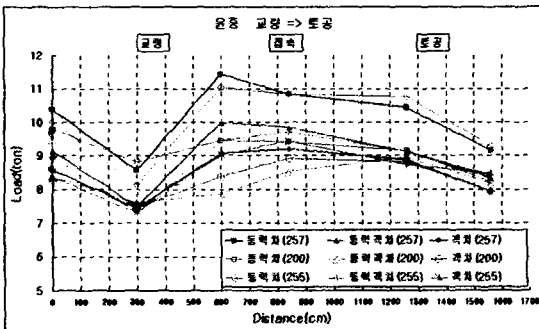


그림 6. 주행방향별 윤증의 변화
(교량 → 토공)

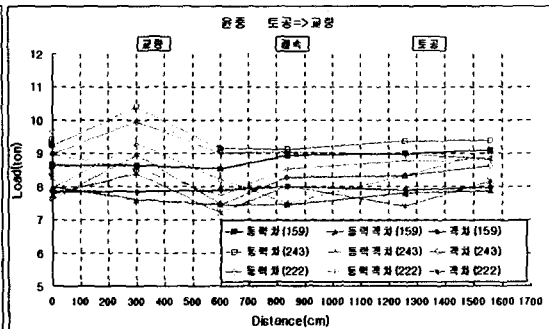


그림 7. 주행방향별 윤증의 변화
(토공 → 교량)

교량과 접속부와 토공구간에 있어서 윤증의 변화가 정성적인 경향을 보이고 있지는 않다. 또한 강성이 변하는 접속부에서 윤증이 크게 발생하지도 않고 있다.

<그림 7>은 토공구간에서 교량으로 열차가 주행할 때 발생한 윤증의 위치별 변화 그래프이다. 마찬가지로, 접속부에서 윤증의 영향이 크게 발생하지는 않는 것으로 예측되었다.

4.2 주행방향별 레일변위의 변화

<그림 8>는 접속구간에서 열차가 교량에서 토공구간으로 주행할 때 교량, 접속부, 토공구간의 레일변위를 거리별로 측정된 모든 속도에 대해서 도시한 그림이고, <그림 9>는 토공구간에서 교량으로 진행할 때 모든 속도에 대해 거리별로 나타낸 레일변위이다.

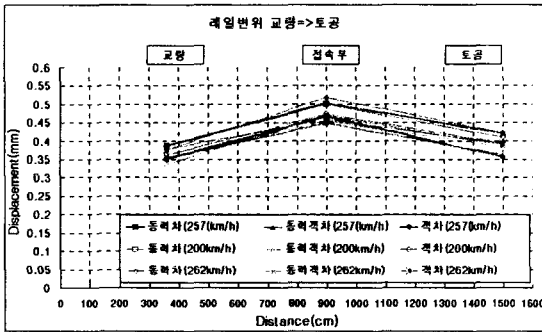


그림 8. 주행방향별 레일변위의 변화
(교량 → 토공)

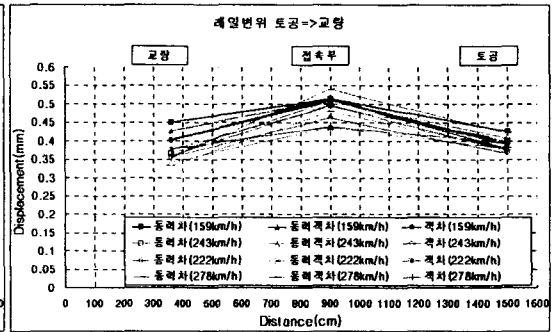


그림 9. 주행방향별 레일변위의 변화
(토공 → 교량)

공현2교 북단(토공)에서의 레일변위를 측정한 결과 레일변위는 0.35~0.45mm정도 측정되었고, 차량이 교량과 토공의 접속부를 통과할 경우 레일변위는 약 0.1mm정도 증가하여 발생하였다. 접속부에서 가장 큰 레일변위가 발생하고 있으며, 접속구간에 차량의 진행방향에 따른 레일변위의 차는 최대 0.05mm의 분포를 보이고 있다. 윤증의 계측결과 동적하중은 접속구간의 계측위치에 관계없이 발생하고 있는데 반하여 레일변위는 접속부에서 0.1mm 정도 크게 발생하고 있다. 이는 국부적으로 접속부의 레일 스프링 강성이 교량과 토공구간에 비하여 작은 것으로 해석할 수 있다.

4.3 주행방향별 레일휨응력의 변화

<그림 10>과 <그림 11>은 접속구간에서 위치별 레일 휨응력의 변화를, 측정된 모든 속도에 대해 도시한 그래프이다. 레일휨응력의 계측결과는 접속부를 통과할 때 주행방향별로 일정한 경향을 나타내고 있다. 교량에서 토공으로 진행할 경우에는 큰 변화가 없었고, 토공구간에서 교량구간으로 열차가 주행할 경우 접속부에서 가장 큰 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 레일의 변위측정에서 예측한대로 접속부에서 레일의 휨강성이 약간 감소하고 있는 것으로 판단된다. 일반적으로 레일의 강도는 허용응력내에서 거동하고 있으면 피로파괴에 대한 응력검토 이외에는 크게 문제가 없는 궤도 구성품이나 국부적으로 레일의 강성이 저하되면 궤도 전체에 과도한 부담력을 하부구조에 전달할 수 있으므로 주의가 필요하다. 그러나 계측결과 응력의 변화량이 50kg/cm²내외에서 발생하고 있으므로, 접속구간의 전체 강성변화는 급격하지 않은 것으로 여겨진다.

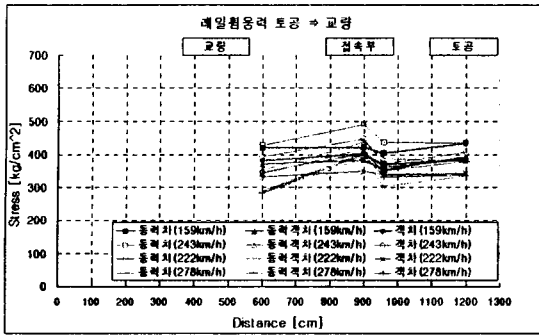


그림 10. 주행방향별 레일휨응력의 변화 (토공→교량)

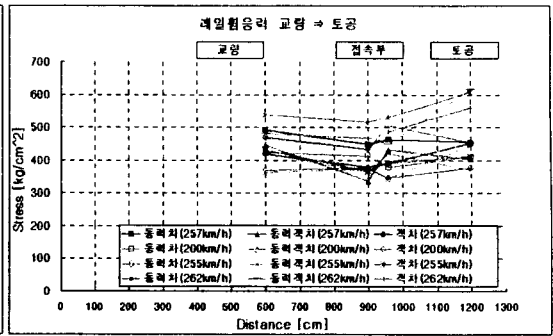


그림 11. 주행방향별 레일휨응력의 변화 (교량 → 토공)

4.4 주행방향별 레일가속도의 변화

일반적으로 궤도의 진동성분중에서 레일의 진동이 가장 복잡한 양상을 띄고 있다. 동일한 측정점에서 계측하는 경우라 할지라도 레일의 고유진동성분 이외에 차륜과 레일간의 미끄러짐에 의한 가진, 차륜플랫의 상태, 레일두부면의 상태, 차량과 레일간의 요철로 인한 가진, 주행차량의 속도등에 따라 매우 다양한 진동성분들이 함께 응답하는 이력을 보인다.

<그림 12>와 <그림 13>은 각각의 주행방향일 때, 위치별로 발생한 레일가속도의 최대값을 도시한 그림이다.

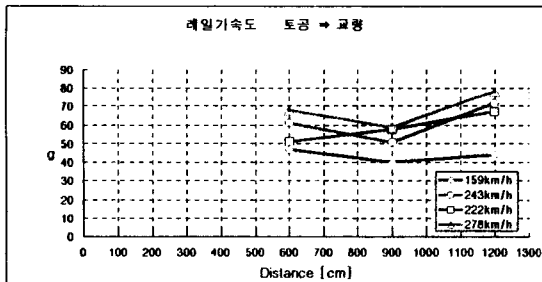


그림 12. 주행방향별 레일가속도의 변화 (토공 → 교량)

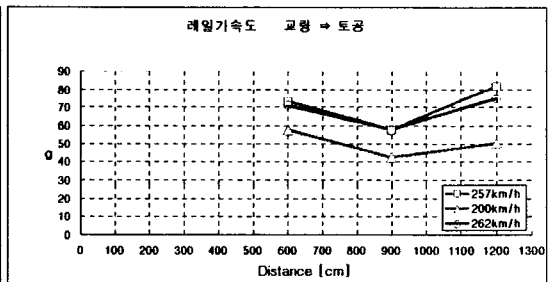


그림 13. 주행방향별 레일가속도의 변화 (교량 → 토공)

접속구간에서 레일가속도는 주행열차의 속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며 최대 78g에서 최소 40g 정도의 가속도가 발생하고 있다. 용력이나 변위등 다른 측정값에 비하여 그 계측값의 편차가 크게 발생하는데, 이는 레일의 다양한 진동성분 때문인 것으로 판단된다.

4.5 주행방향별 침묵변위의 변화

<그림 14>와 <그림 15>와 같이 전체속도대에서 발생한 침묵 변위를 모두 도시한 그래프에서 알 수 있듯이, 침묵변위는 0.17~0.26mm 정도 측정되었고, 교량과 토공구간의 접속부에서 열차의 주행방향에 관계없이 구간변화에 따라 침묵변위의 변동이 최고 0.02mm로 매우 작은 것으로 측정되었다. 접속부에서 침묵의 변위가 거의 일정하게 발생하고 있는데, 침묵과 도상에서 레일의 스프링 강성 변화를 충분히 감당하고 있다고 판단된다.

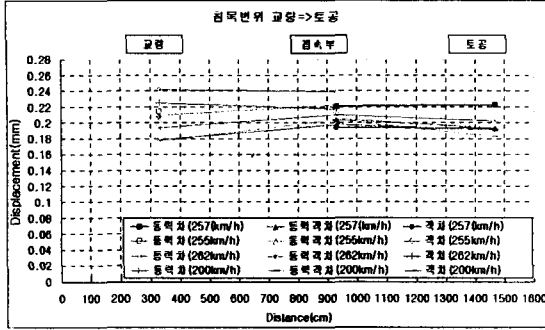


그림 14. 주행방향별 침목변위의 변화
(교량 → 토공)

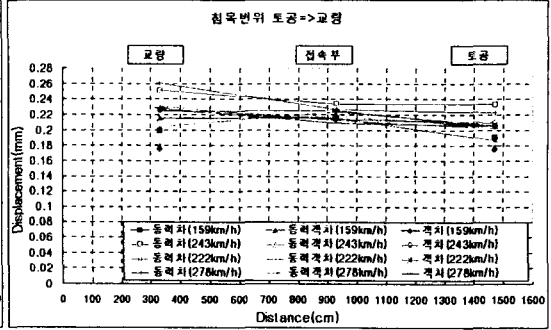


그림 15. 주행방향별 침목변위의 변화
(토공 → 교량)

4.6 주행방향별 침목가속도의 변화

<그림 16>과 <그림 17>에서 보는 바와 같이 토공, 접속부, 교량구간에 대해 3m 간격으로 침목 가속도계를 설치하고 이때 발생하는 침목가속도의 변화를 분석하였다. 일본 신간선의 계측자료를 참고하면 신간선의 침목에서는 1g~20g정도의 가속도가 열차속도에 따라 발생되었다. 일반적으로 레일가속도의 측정결과에서는 차량의 하중에 의한 강한 충격으로 과대한 응답이 자주 발생하는데, 침목가속도는 교량, 토공, 접속부의 각 구간에서 외국계측자료와 비교하여 침목가속도 발생 범위내에서 응답하고 있으며, 접속부에서 강한 충격의 영향은 없는 것으로 판단된다.

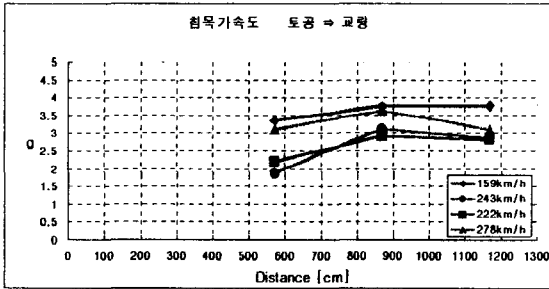


그림 16. 주행방향별 침목가속도의 변화
(토공 → 교량)

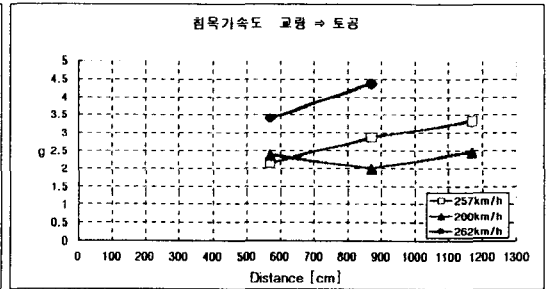


그림 17. 주행방향별 침목가속도의 변화
(교량 → 토공)

4.7 주행방향별 도상가속도의 변화

<그림 18>과 <그림 19>는 주행방향별로 각 구간에서 발생한 도상가속도의 변화를 위치별로 도시한 그래프이다. 도상가속도는 교량에서 응답이 토공의 가속도 최대값보다 약 28%정도 크게 발생하고 있으며, 강성변화구간에서 도상가속도의 응답이 다른 일반구간의 가속도값과 비슷하게 발생하고 있으므로, 접속부에서 동적하중의 충격이 도상까지 비교적 고르게 전달됨을 알 수 있다. 일반적으로 도상가속도는 열차의 주행가속도에 의해 지배적으로 영향을 받고 있으며 강성변화구간인 접속부에서 큰 충격의 영향은 없는 것으로 판단된다.

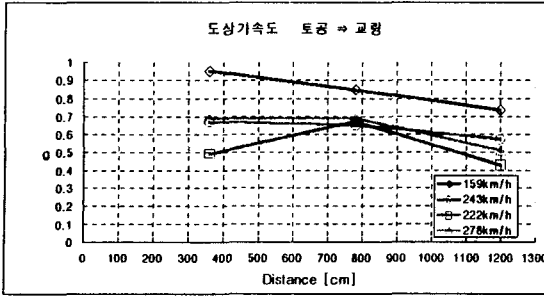


그림 18. 주행방향별 도상가속도의 변화
(토공 → 교량)

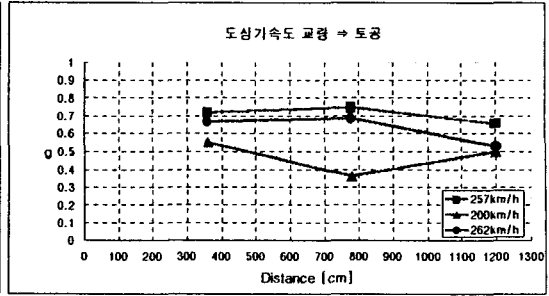


그림 19. 주행방향별 도상가속도의 변화
(교량 → 토공)

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 대표적인 강성변화구간인 교량과 토공구간의 접속부에서 강성변화여부와 주행차량의 충격력의 효과에 대해 실험하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 접속부 레일변위의 측정결과 접속부에서 토공,교량구간보다 약 0.1mm(20%)정도 크게 발생하고 있으며, 레일응력은 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ (10%)정도 크게 발생하고 있으므로, 계측이 실시된 접속부에서 국부적으로 레일의 스프링 강성이 저하된 것으로 판단된다. 그러나, 접속구간이 아닌 다른 토공구간의 계측값과 일정한 값을 나타내고 있으며 일본 신간선의 레일변위 표준치(3mm)의 20% 정도, 레일응력은 표준치($3000\text{kg}/\text{cm}^2$)의 10~15%만 발생하고 있으므로 레일의 스프링 강성만 국부적으로 약간 저하되었을 뿐, 궤도 전체의 안전성에는 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

- 침목변위, 침목가속도, 도상가속도의 측정결과 큰 충격의 영향은 없는 것으로 판단되며, 궤도 하부구조의 접속구간에서 구간별 궤도의 강성변화는 점진적이며 연속성이 있는 것으로 판단된다.

- 주행열차 동적하중의 효과를 구간별로 하중이 전달되는 윤중-레일(변위,가속도,응력)-침목(변위,가속도)-도상의 순으로 하중분산 효과를 검토한 결과, 레일의 국부적인 강성변화를 나머지 하부구조에서 충분히 부담하고 있는 것으로 판단된다.

- 현재 실험이 수행된 시험선 구간은 누적통과하중이 강성변화구간에서 발생하는 최대의 문제인 부등침하에 영향을 미치기에 충분하지 않기 때문에, 충분한 누적 열차하중이 주행한 이후의 강성변화구간에 대한 추가적인 실험을 실시할 계획이다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원 (2000) “시운전시 궤도·노반시설물의 성능검증”, 한국고속철도건설공단
2. 右藤吉彦 (1989) “新軌道力學”, 鐵道現業社
3. C. Esveld (1989) “Modern Railway Track”, MRT-Production
4. 양 신추외 7명 (2000) “운행선 궤도구조에 관한 생력화 방안연구”, 한국철도기술연구원