

접속부 궤도의 동적거동분석을 위한 실험적 연구

An Experimental Study on Dynamic Behavior Evaluation of Transitional Track

조성정*
Cho, Sung Jung

최정열**
Choi, Jung Youl

천대성***
Chun, Dae Sung

김만철****
Kim, Man Cheol

박용걸*****
Park, Yong Gul

ABSTRACT

In domestic transitional zone design, there is regulation to prevent generation of irregular substructure behaviors that negatively influence in prevention of plasticity settlement on approach section and contact section as well as relieve overall track rigidity by reducing sectional foundation and track stiffness difference, but design guideline that considers dynamic behavior of transitional track in actual service line is very insignificant. Therefore in this study, characteristics of transitional track dynamic behaviors by substructure stiffness are researched and measured dynamic response of transitional track by substructure stiffness in order to prove correlation between substructure and track and calculate elasticity(stiffness) and track load of transitional track by using measurement and formula to provide basic information for developing design guideline considering dynamic behavior of service line transitional track.

key words : transitional track, track stiffness, field test

요 지

철도에서 접속구간은 교량과 토공 또는 터널과 토공 사이의 노반상태가 변화하는 구간이나 궤도구조형식이 변화하는 구간을 말한다. 이들 구간에서는 궤도지지강성이 갑작스럽게 변화함으로써 레일변위가 급하게 변화하여 차량의 이상 진동 및 충격운중이 발생한다. 열차의 진동은 차량의 주행안정성 및 승차감을 저하시키고 충격운중은 노반의 침하 및 궤도재료의 열화, 손상을 가속시키는 결과를 초래한다. 자갈도상 궤도구조에서의 접속구간은 노반강성이 차이가 생기는 교량경계부와 터널경계부가 가장 보편적인 천이접속형태이며 특히 교량부와 토공부는 각각 일정한 고유의 탄성을 가지고 있어 서로 큰 강성차를 가진다. 교량부와 토공부의 강성차로 인해 궤도에서 발생하는 탄성변위량이 일치하지 않기 때문에 동적운중은 하부구조의 과도한 변위를 유발시킬 수 있는 큰 충격하중을 발생시키고 이러한 과하중은 토공부의 궤도구성품의 손상을 유발하게 된다. 따라서 현재 국내에서는 접속구간 설계 시 구간별 노반 및 궤도강성차를 줄여 전체적으로 궤도지지강성 변화를 완화시키고, 토공구간의 소성침하 방지와 접속부에 부정적 영향을 주는 노반구조물의 비이상적 거동발생을 방지할 수 있는 규정을 제정하여 이를 바탕으로 설계하고 있으나 실제 운행선에서 발생하는 접속부 궤도의 동적거동을 감안한 설계 지침은 아직 미약한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 노반강성별 접속부 궤도의 동적거동 특성을 파악하고 노반구조물과 궤도구조의 상호관계를 입증하기 위해 노반강성별 접속부 궤도의 동적응답을 측정하고 측정 및 이론식을 이용한 접속부 궤도의 탄성력 및 궤도부담력을 산출하여 운행선 접속부 궤도의 동적거동을 감안한 설계지침 개발을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

주요어 : 접속부, 궤도강성, 현장측정

1. 서 론

궤도 구조는 건설에 많은 비용이 소요되는 노반구조물 특히 교량이나 터널 등의 설계에 큰 영향을 미치게 되므로 궤도 구조물의 상호작용에 대한 현상을 이해하는 것이 필요하며 철도 시스템 전체의 기

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, (주)대한콘설탄트 철도부 이사대우, 일반회원
E-mail : jin33169@kornet.net

** (주)대한콘설탄트 철도부 궤도팀 사원, 공학석사, 정회원

*** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 학생회원

**** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 책임연구원, 정회원

***** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사 정회원

능을 확보하는 측면에서 궤도기술을 파악하고 철도구조물의 설계 규정과 제한값에 대한 이해를 넓히는 것이 중요하다.

철도구조물은 궤도를 통하여 원활한 차량주행과 외부로부터 가해지는 하중을 지지하도록 건설되는 구조물로서 이를 위해서는 무엇보다도 궤도와 철도구조물의 동적 상호작용 등의 특성에 대한 이해가 필요하다. 철도구조물은 상부에 궤도를 부설하기 위한 기반 시설로서 탄성체의 영구적인 구조물로 축조되거나 궤도는 각 구성재료를 조립하여 도상자갈의 다짐과 강성에 의해서 단면을 유지하는 탄소성체의 구조물로 부설되게 된다. 따라서 열차주행시의 궤도와 철도구조물의 거동은 크게 다를 뿐만 아니라 온도 등 자연환경의 변화 하에서 상호주고 받는 영향이 민감하다. 또한 궤도구조는 비교적 유연하고 균일한 강성을 갖는 작은 단면의 부재로 구성되어 있으나 철도구조물은 자연지형에 따라 교량이나 터널 또는 토공구조물로서 건설되며 비교적 큰 단면의 부재와 강성에도 불구하고 불균일한 강성으로 궤도를 지지하게 된다. 역학적으로 탄성거동을 하는 토목구조물과 소성적인 거동을 하는 궤도구조물과의 경계 문제는 일정한 주행로만을 접촉하여 움직이는 열차하중의 특성과 조합되어 철도공학의 특수한 기술분야로 연구되고 있다. 궤도기술은 이러한 문제와 특성을 이해하는 데서부터 출발한다고 볼 수 있으며 궤도와 철도구조물에 대한 설계의 기준으로서 이에 대한 여러 가지 시방규정을 적용하게 하고 있다.

궤도와 철도구조물의 목적이 원활한 차량의 주행로 확보와 외력을 지지하는 튼튼한 구조물의 실현에 있다고 한다면 이러 관점의 기준은 무엇보다도 차량의 주행 안전성과 승차감 기준을 정립하는 측면에서 출발되어야 하며 이에 대한 이론적인 근거와 배경이 주요한 착안점이 될 것이다. 따라서 철도구조주행에 따른 교량, 터널 및 토공구간의 궤도변위 및 가속도 등의 현장계측 데이터를 이용하여 접촉부 궤도의 동적거동특성을 분석하고자 한다.

2. 선로 구조물 접속구간

일반적으로 철도에서 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 중요한 이유는 노반 및 궤도의 강성 차이에 따른 부등침하 발생으로 충격하중 효과가 발생하여 상대적으로 낮은 강성구간인 토공구간에 과대 침하가 발생하기 때문이다. 이러한 궤도 및 노반의 부등침하는 차량의 운행 안정성에 영향을 미침은 물론 승차감 저하 등에 영향을 미치는 요소로서 지속적인 유지보수를 필요로 하는 손상 중 하나이다. 강성변화구간은 궤도의 하부구조에 나타나는 강성의 불연속성에 의하여 정적거동은 물론 동적거동의 충격효과를 발생시킨다. 이에 따라 강성이 강한 부분과 일반 토공 부분 사이에 부등침하의 분체를 발생시켜 차량의 운행안정성과 승객의 승차감을 저하시키며, 궤도구조 자체의 성능감소 등의 영향이 나타난다. 또, 궤도의 마모와 구조물의 손상, 소음과 진동의 증가, 차량의 고소화 및 중량화 불가 등의 문제점이 있다. 차량하중에 의한 변형은 두 가지 양상으로 나눌 수 있는데, 한 대의 차량이 이동할 때 가해지는 단기하중에 의한 탄성변형과 반복, 지속하중에 의한 소성변형을 들 수 있다. 접속구간에서 문제가 되는 것은 소성변형으로서 교량의 강성변화구간에 발생하는 거대 변위를 방지하기 위해서는 이러한 소성변형을 제거해야 한다고 할 수 있다. 이러한 소성변형은 교량의 형식이나 궤도 시스템의 특성 그리고 토공설계 등에 의하여 영향 받을 수 있다. 그러나 구조물-궤도-노반의 상호작용에 대한 영향은 이미 인지되고 있을 뿐, 상호작용 시스템의 정확한 거동 체계에 대한 이해나 해석적으로 규명할 수 있는 해석기법의 개발은 사실상 많은 어려움을 가지고 있으며, 수많은 가정들을 내포하고 있는 해석결과는 실제 운행선에서의 접속구간의 정, 동적거동과 상이하게 나타나고 있다. 또한, 국내외의 연구결과 일반 궤도의 레일응력, 변위 등을 비롯한 궤도 각부의 측정값이나 주행 안정성 평가를 위한 수치들은 자국의 실정에 맞게 제한하고 있으나, 공용중인 접속부 궤도의 측정값이나 거동 한계의 기준값은 제시하지 못하고 있는 실정이다. 이와 같은 교량과 토공의 접속부 강성변화구간의 거동을 기존 운행선 구간에 대해 측정을 실시하여 궤도의 실제 거동을 파악하고 향후 합리적인 접속부 궤도설계를 위한 기초데이터를 확보하고자 한다.

3. 현장측정

Fig. 1은 현장측정 대상선로의 궤도 전경이고, Fig. 2는 측정센서가 설치된 접속부의 위치를 나타낸다.

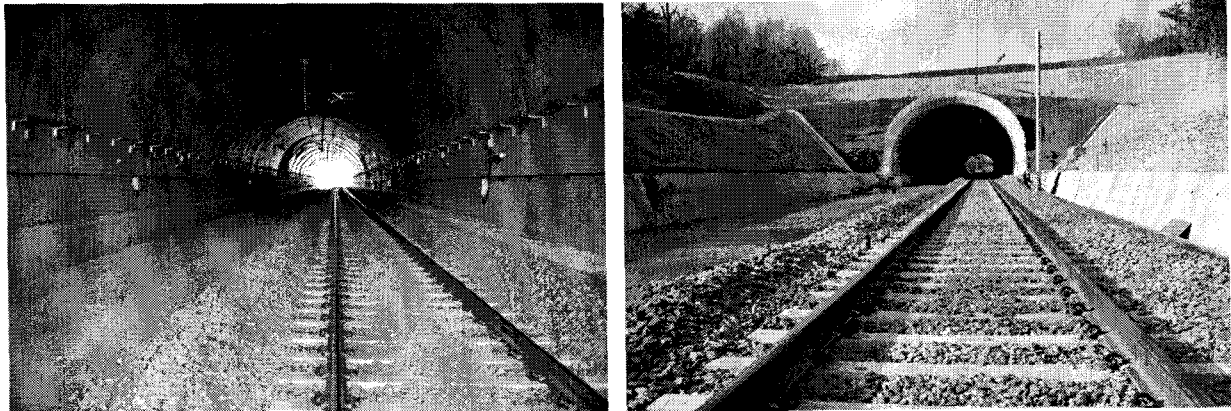


Fig. 1 토공-교량- 접속구간 궤도 전경

강성이 변화하는 교량-토공-터널구간의 접속부를 중심으로, 토공-터널 및 교량구간에도 센서를 배치하여 접속부와 비교하였다. 교량-토공-터널의 접속부에서 윤중 9개, 레일변위와 침목변위 각각 3개, 레일휨응력 5개, 도상가속도 3개, 레일가속도 3개 지점에서 측정을 실시하였으며, 측정결과를 주행방향별로 비교 분석하였다.

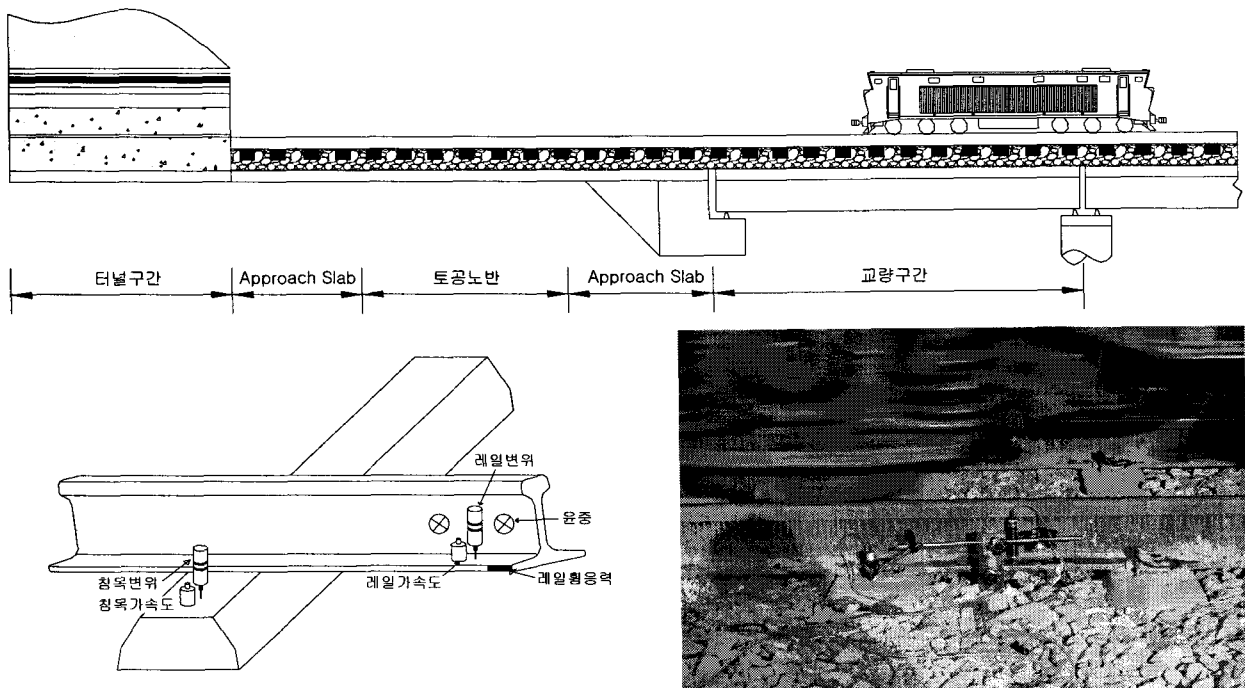


Fig. 2 측정대상구간 센서 설치위치도

4. 측정 및 분석결과

4.1 주행방향별 윤중의 변화

일반적으로 윤중을 측정함으로써 궤도 특히, 레일에 작용하는 동적하중의 충격력 효과를 직접적으로

평가할 수 있다. Fig. 3은 교량구간에서 토공구간으로 각각의 열차 주행할 때 계측이 실시된 모든 속도대역에서 발생한 동적 윤중의 변화를 도시한 그림이다.

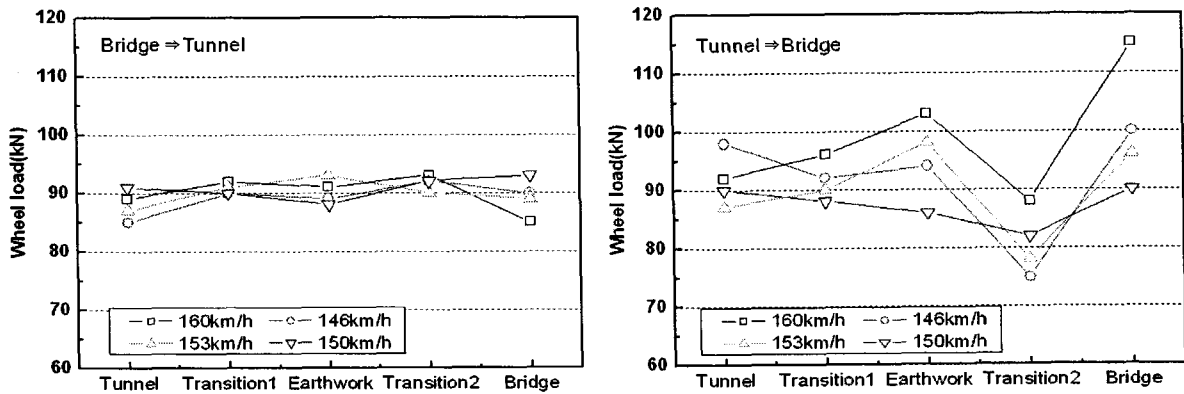


Fig. 3 주행방향별 윤중의 변화

교량에서 터널 방향으로 열차주행시 구간별 윤중의 변화는 교량, 터널 및 토공구간에 있어서 정상적인 경향을 보이고 있지는 않다. 또한 강성이 변하는 접속부에서 윤중이 크게 발생하지도 않고 있다.

그러나 터널구간에서 교량으로 열차가 주행할 때 발생한 윤중의 위치별 변화는 교량에서 터널 방향으로 주행한 경우보다 윤중의 변화가 다소 심하며 특히 교량부에서 최대윤중이 발생하였다. 또한 접속부에서 윤중의 영향이 크게 발생하지는 않는 것으로 계측되었다.

4.2 주행방향별 레일변위의 변화

Fig. 4는 주행방향별 교량, 접속부, 토공구간의 레일변위를 구간별로 측정된 모든 속도에 대해서 도시한 그림이다.

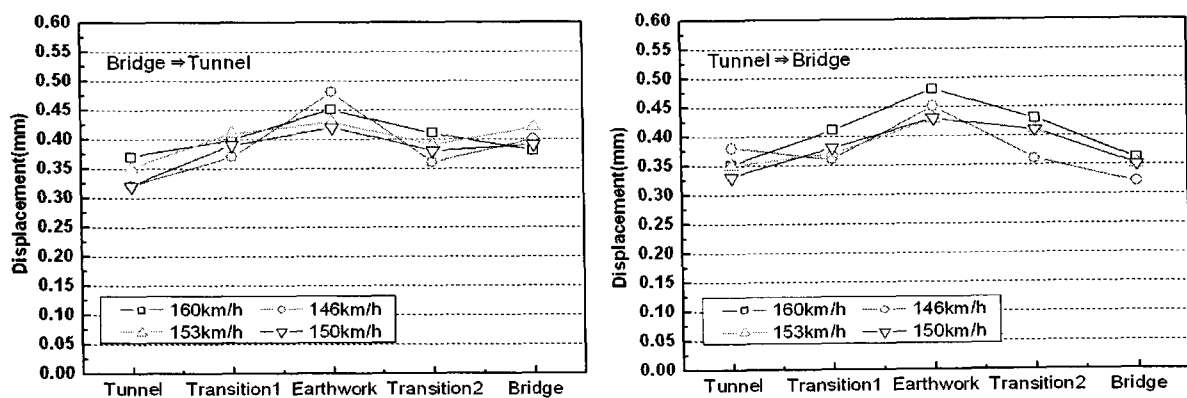


Fig. 4 주행방향별 레일변위의 변화

토공구간에서의 레일변위를 측정된 결과 레일변위는 0.42-0.49mm 정도 측정되었고, 차량이 교량과 토공의 접속부를 통과할 경우 레일변위는 약 0.1mm 정도 감소하여 발생하였다. 토공부에서 가장 큰 레일변위가 발생하고 있으며, 접속구간별 차량의 진행방향에 따른 레일변위의 차는 최대 0.25mm의 분포를 보이고 있다. 윤중의 계측결과와 마찬가지로 레일변위 또한 터널과 토공, 접속부에서 0.1mm 정도 크게 발생하고 있다. 이는 국부적으로 접속부의 레일 스프링 강성이 교량과 토공구간에 비하여 작은 것으로 해석할 수 있다. 또한 터널에서 교량으로 열차가 주행할 때 각구간별 접속부 레일변위가 토공부를 제외하고 교량과 터널의 응답치보다 다소 크게 나타났다.

4.3 주행방향별 레일휨응력의 변화

Fig. 5는 접속구간에서 주행방향별 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 없을 수 있으나 국부적인 레일 강성 저하도 궤도 전체에 과도한 부담력을 하부구조에 전달 할 수 있으므로 주의가 필요하다. 그러나 측정결과 응력의 변화량이 5~9MPa 내외에서 발생하고 있으므로, 접속구간에서의 레일 전체 강성변화는 급격하지 않은 것으로 판단된다.

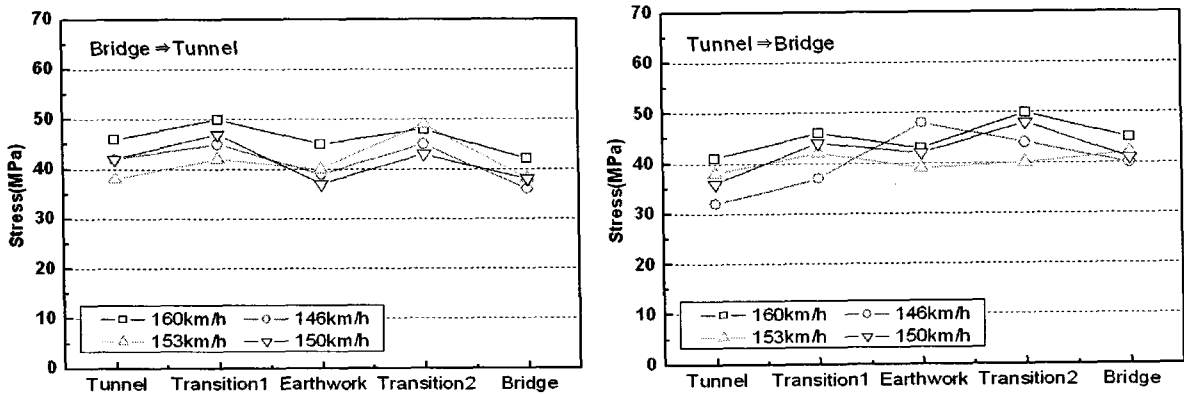


Fig. 5 주행방향별 레일휨응력의 변화

4.4 주행방향별 레일가속도의 변화

일반적으로 궤도의 진동성분 중에서 레일의 진동이 가장 복잡한 양상을 띄는 것으로 나타나 있다. 동일한 측정점에서 계측하는 경우라 할지라도 레일의 고유진동성분 이외에 차륜과 레일간의 구름접촉에 의한 가진, 차륜플랫의 상태, 레일두부면의 상태, 차량과 레일간의 요철로 인한 가진, 주행차량의 속도등에 따라 매우 다양한 진동성분들이 함께 응답하는 이력을 보인다. 따라서 정량적인 레일가속도 응답평가는 현실적으로 무리가 있을 것으로 예상했으나 접속구간별 경향 파악을 위해 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6은 각각의 주행방향일 때, 위치별로 발생한 레일가속도의 최대값을 도시한 그림이다.

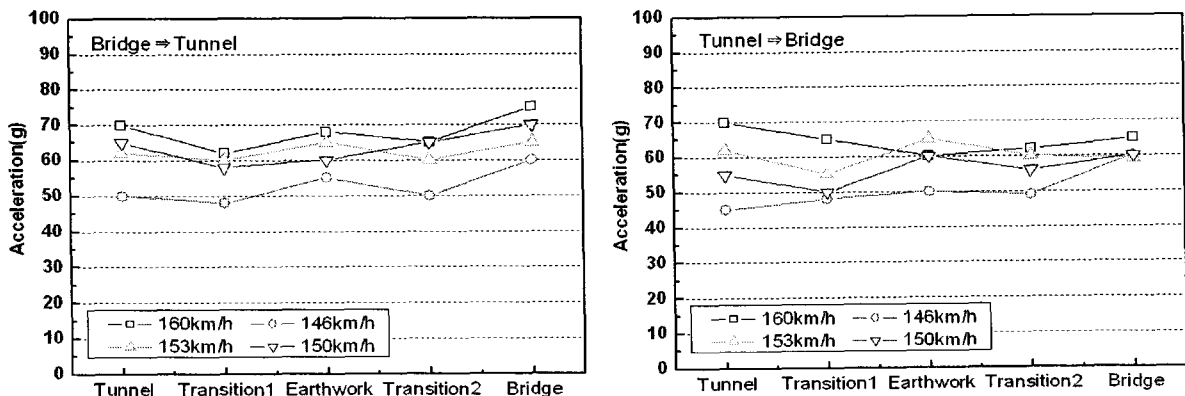


Fig. 6 주행방향별 레일가속도의 변화

접속구간에서 레일가속도는 주행열차의 속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며 최대 78g에서 최소 46g 정도의 가속도가 발생하고 있다. 응력이나 변위 등 다른 측정값에 비하여 그 측정값의 편차가 크게 발생하는데, 이는 레일의 진동 성분 때문인 것으로 판단된다. 그러나 다른 측정값과 응답의 경향은 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

4.5 주행방향별 침묵변위의 변화

Fig. 7과 같이 전체속도대역에서 발생한 침묵 변위를 모두 도시한 그래프에서 알 수 있듯이, 침묵변위는 0.17~0.26mm 정도 측정되었고, 교량과 토공구간의 접속부에서 열차의 주행방향에 관계없이 구간 변화에 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. 또한 교량에서 터널로 열차가 주행할 때 발생한 응답이 터널에서 교량으로 주행시의 응답보다 약 0.08mm정도 크게 나타났으며 이는 모든 접속구간에 동일한 경향으로 나타났다.

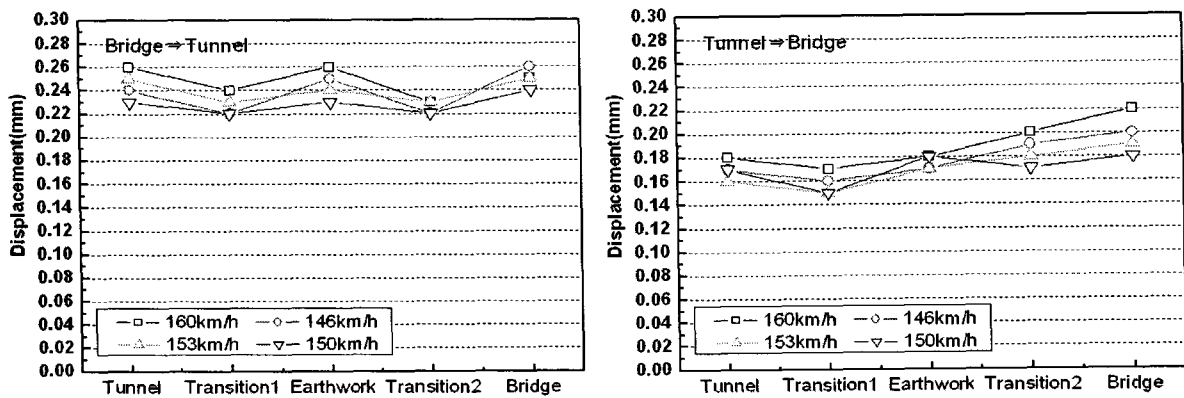


Fig. 7 주행방향별 침묵변위의 변화

4.6 주행방향별 도상가속도의 변화

Fig. 8은 주행방향별로 각 구간에서 발생한 도상 가속도의 변화를 위치별로 도시한 그래프이다. 도상가속도는 교량에서의 응답이 토공의 가속도 최대값보다 약 30%정도 크게 발생하고 있으며, 강성변화 구간에서 도상가속도의 응답이 다른 일반구간의 가속도값 보다 다소크게 발생하고 있어, 접속부에서 동적하중의 충격이 도상까지 비교적 원활하게 전달되지 않는 것으로 판단된다. 일반적으로 도상가속도는 열차의 주행가속도에 의해 지배적으로 영향을 받고 있으며 대상구간의 경우 강성변화구간인 접속부에서 충격의 영향이 있는 것으로 판단된다.

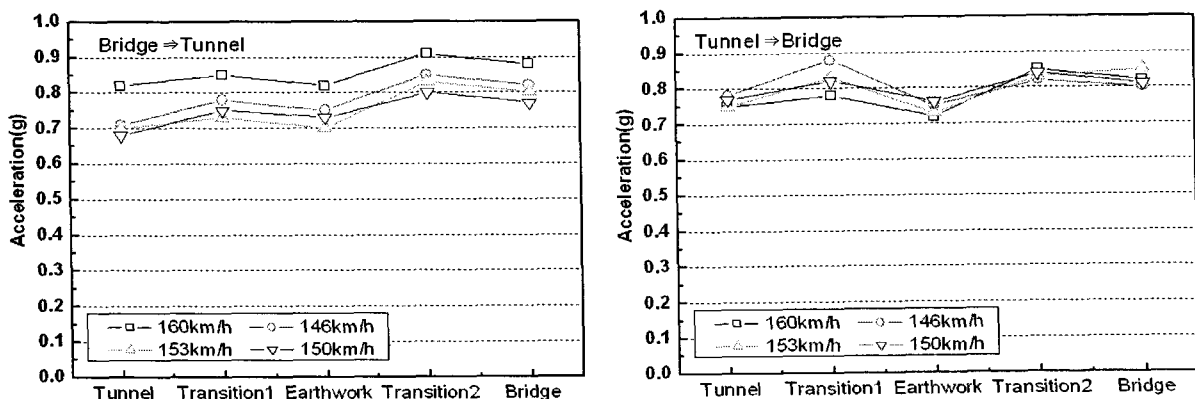


Fig. 8. 주행방향별 도상가속도의 변화

5. 결 론

본 연구에서는 대표적인 강성변화구간인 교량-토공-터널구간의 접속부에서 강성변화여부와 주행차량의 충격력의 효과에 대해 현장측정을 통한 검토를 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 접속부 레일변위의 측정결과 접속부에서 토공, 교량구간보다 약0.1mm(20%)정도 크게 발생하고 있으며, 레일응력은 5~9MPa(10~18%)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(300MPa)의 0~15%만 발생하고 있으므로 레일의 스프링 강성만 국부적으로 약간 저하되었을 뿐, 궤도 전체의 안전성에는 영향은 없는 것으로 판단된다.

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

3. 주행열차 동적하중의 효과를 구간별로 하중이 전달되는 운중-레일(변위, 가속도, 응력)-침목(변위)-도상의 순으로 하중분산 효과를 검토한 결과, 레일의 국부적인 강성변화를 나머지 침목까지의 궤도구조에서 대부분 충분히 부담하고 있는 것으로 나타났으나 도상가속도 측정결과 접속부 가속도응답이 크게 발생하여 접속부 도상 충격하중을 효과적으로 분산시키지 못하는 것으로 판단된다. 이는 접속부 궤도가 기타구간에 비해 과도한 충격의 영향으로 인한 자갈도상의 상태변화에 따른 충격흡수효과 저감에서 기인하는 것으로 예측되었으며 접속부 자갈도상의 상태관리가 중요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원 (2000) “시운전시 궤도·노반시설물의 성능검증”, 한국고속철도건설공단
2. 나성훈 외 3명 (2001) “교량-토공 접속부에서 궤도강성변화에 대한 실험적 연구”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집
3. C. Esveld (1989) "Modern Railway Track", MRT-Production
4. 양신추 외 7명 (2000) “운행선 궤도구조에 관한 생력화 방안연구”, 한국철도기술연구원