

궤도지지강성 변화구간에서의 광폭침목 사용에 따른 궤도거동 개선효과 분석

Simulation of Dynamic Behavior of the Track with Wide Sleepers in Transition Zone

정근영*
Chung, Keun-Young

이일화**
Lee, Il-Wha

이진욱***
Lee, Jin-Wook

최찬용****
Choi, Chan-Yong

ABSTRACT

To estimate effect of wide sleepers in track transition zone, dynamic analysis of the track with wide sleepers is carried out. The railway line of main concern is tunnel-embankment transition zone. The track in the tunnel is ballastless track with concrete bed on concrete foundation and the track located on embankment is ballasted track. In the transition zone with ballasted track approach slab is installed to reduce abrupt variation of supporting stiffness. It is studied the effect of applying some wide-sleepers in ballasted track located on approach slab is studied.

To describe vehicle-track dynamic interaction phenomena nonlinear Hertzian contact spring and nonlinear damper are adopted. The external loads acting on vehicle model are self weight of vehicle and geometry information of running surface. The constraint equation on contact surface is implemented by the Penalty method with stabilization. To describe the change in stiffness and effective mass due to sleeper size, the ballast modeling technique proposed by Zhai et al is also adopted and modified.

Numerical tests show that the use of wide sleeper will decrease settlement of ballast. Thus it is expected that wide sleeper decrease maintenance of track transition zone.

(국문요약)

본 연구에서는 구조물 접속부 지지강성 변화구간의 차량주행에 따른 궤도의 동적거동을 분석하기 위한 동적해석을 수행하였다. 해석의 대상이 되는 구간은 터널-토공 지지강성 변화구간으로서 터널부에는 콘크리트도상궤도, 터널개문입구 완충구간에는 Approach Slab에 의해 지지강성의 변화를 완화시킨 경우이다. 본 연구에서는 이 완충구간의 일부 구간에 광폭침목을 추가적으로 사용할 경우의 궤도의 거동을 비교분석하고자 하였다.

차량주행에 따른 궤도의 동적해석기법으로는 열차 및 궤도의 운동방정식을 각각 별도로 구성하고, 특정시각에서의 주행속도에 따른 각 차륜의 위치를 결정하고, 차륜의 접촉점의 높이정보를 차량운동방정식에 변위제한조건식으로 가하고, 차량운동방정식의 해를 구함으로써 구조물에 작용하는 접촉력을 계산하도록 하였다. 이와 같은 반복계산에 의해 차량-궤도간의 상호작용력을 결정하였으며, 제한조건식을 가하는 방법으로는 안정화된 Penalty방법을 사용하였다. 광폭침목의 사용에 따른 자갈도상궤도의 지지강성변화 및 유효진동질량을 산정하는 방법으로는 Zhai등(2004)에 의해 제안된 자갈도상모형화 기법을 수정하여 사용함으로써 일반침목에 비해 광폭침목을 사용하였을 때 변화하는 도상부의 강성과 유효진동질량을 고려할 수 있도록 하도록 하였다.

수치해석결과를 분석해볼 때 광폭침목은 접속부 지지강성변화구간에서 자갈도상의 침하속도를 억제하여 강성천이구간의 충격저감 및 유지관리비용의 저감에 기여할 수 있을 것으

* 책임저자: 한국철도시설산업(주) 선로시설연구소 책임연구원, 공학박사, 정회원

** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 공학박사, 정회원

*** 한국철도기술연구원, 선임연구원

**** 한국철도기술연구원, 선임연구원

로 판단된다.

1. 서론

본 연구에서는 구조물 접속부 지지강성 변화구간의 차량주행에 따른 궤도의 동적거동을 분석하기 위한 동적해석을 수행하였다. 해석의 대상이 되는 구간은 터널-토공 지지강성 변화구간으로서 터널부에는 콘크리트도상궤도, 터널개문입구 완충구간에는 Approach Slab에 의해 지지강성의 변화를 완화시킨 경우이다. 본 연구에서는 이 완충구간의 일부 구간에 광폭침목을 추가적으로 사용할 경우의 궤도의 거동을 비교분석하고자 하였다.

차량주행에 따른 궤도의 동적해석기법으로는 열차 및 궤도의 운동방정식을 각각 별도로 구성하고, 특정시각에서의 주행속도에 따른 각 차륜의 위치를 결정하고, 차륜의 접촉점의 높이정보를 차량운동방정식에 변위제한조건식으로 가하고, 차량운동방정식의 해를 구함으로써 구조물에 작용하는 접촉력을 계산하도록 하였다. 이와 같은 반복계산에 의해 차량-궤도간의 상호작용력을 결정하였으며, 제한조건식을 가하는 방법으로는 안정화된 Penalty방법을 사용하였다. 광폭침목의 사용에 따른 자갈도상궤도의 지지강성변화 및 유효진동질량을 산정하는 방법으로는 Zhai등(2004)에 의해 제안된 자갈도상모형화 기법을 수정하여 사용함으로써 일반침목에 비해 광폭침목을 사용하였을 때 변화하는 도상부의 강성과 유효진동질량을 고려할 수 있도록 하도록 하였다.

수치해석결과를 분석해볼 때 광폭침목은 접속부 지지강성변화구간에서 자갈도상의 침하속도를 억제하여 강성천이구간의 충격저감 및 유지관리비용의 저감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 궤도 지지강성 변화구간의 해석이론 및 수치적 모형화 기법

2.1 차량주행에 따른 궤도동적해석법의 이론적 배경

차량주행에 의한 차량-구조물의 상호작용력 산정을 위해서는 궤도 및 구조물부의 동적인 운동방정식과 차량의 동적인 운동방정식을 별도로 구성하여 각각의 운동방정식의 해를 따로 구하는 것이 편리하다. 이 개별적인 운동방정식간의 관계는 접촉점에 작용하는 접촉력과 변위제한조건식으로 상호 연결되도록 하였다. 즉, 특정시간에서의 차륜재하위치의 구조물의 변위 및 답면 높이정보가 차량의 운동방정식에 안정화된 Penalty방법(정근영 등 2006)에 의해 변위제한조건식(Displacement Constraint Equation)으로 가해지고 추가적으로 차량의 중량을 고려하여 차량운동방정식의 해를 구함으로써 비선형 헤르쯔 접촉스프링(Nonlinear Hertzian Contact Spring, Escalona 2003)에 작용하는 새로운 접촉력이 산정되고, 이 접촉력이 구조물에 가해져 새로운 구조물의 변위를 산정한다.

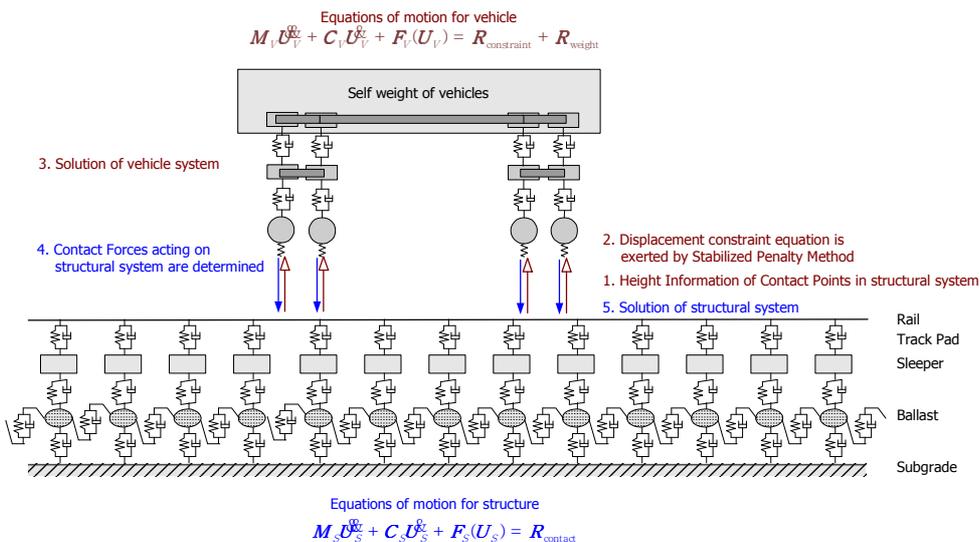


그림 1. 특정 시각의 접촉점 위치와 반복해석에 의한 상호작용력 산정
이러한 계산과정은 접촉력의 값이 특정한 값에 수렴할 때까지 반복된다. 즉, 이러한 차량과

주행로를 이루는 구조물과의 접촉력산정에 있어서 매 시간단계마다 해가 수렴할 때까지 반복해석을 수행하는 것이 요구된다(그림 1).

특정 시간단계에서의 매 반복단계마다 6자유도 차량모델의 접촉점에 가해지는 변위제한조건식(Displacement Constraint Condition)은 차륜중심궤적, 답면형상 및 처짐정보에 종속적이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_6 = Y_r + Y_g + Y_w \quad (1)$$

여기서, Y_6 은 6자유도 차량모델의 접촉점(contact point)에서의 변위, Y_r 는 주행로상의 접촉점위치에서의 구조물 연직변위, Y_g 는 주행로상의 접촉점위치에서의 기하학적인 형상(geometry surface), 즉 주행로의 요철높이며, Y_w 는 차륜에 편마모가 존재하는 경우의 차륜의 구름(Rolling)에 따른 차륜중심궤적(Wheel Center Trajectory)에 관련된 위치정보이다.

본 연구에서는 차륜 접촉점의 위치정보 및 질량 간의 연결조건에 관한 제한조건식을 안정화된 Penalty방법에 의해 구현하였으며, 3질량을 갖는 1/8 차량모델의 대차간 혹은 차체간 연결조건 설정을 위하여 회전자유도가 도입된 6자유도 차량모델 채택하였다(정근영 등 2005). 이러한 제한조건식에 의한 열차모형화 기법에 의해 다양한 차량이 모형화 될 수 있으며, 그림 2에 나타난바와 같은 근사적인 모형화 기법에 의해 디젤기관차 7300호대 1량과 객차 7량이 연결된 열차를 궤도동적해석에 이용하였다.

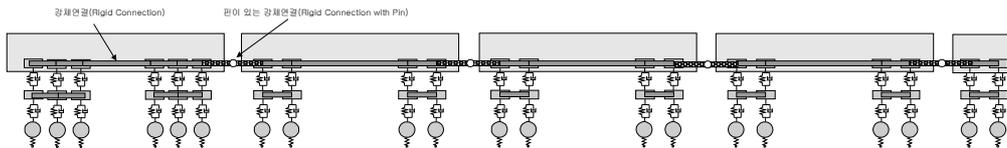


그림 2. 변위제한조건에 의한 디젤기관차 및 객차로 구성된 열차의 근사적 모형화

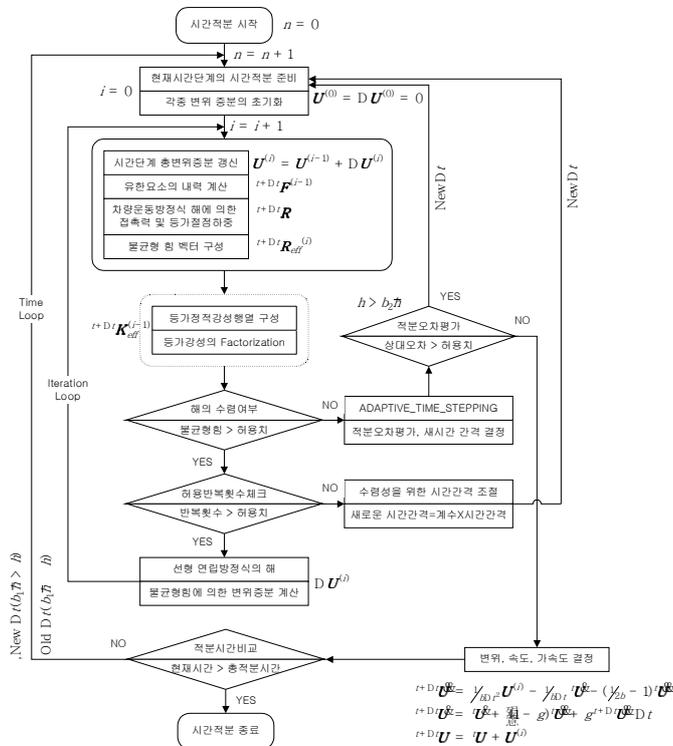


그림 3. Newmark적분법에 의한 적응적시간적분의 흐름도

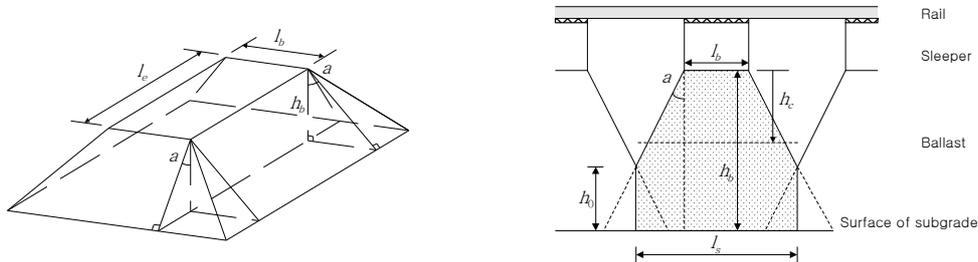
본 연구에서는 차량 및 구조물의 동적인 운동방정식을 Newmark 적분방법(Bathe 1993)에 의해 직접적분(Direct Integration)함으로써 비선형운동방정식의 해를 구하였다. Zeng 등(1992)에 의해 제안된 국지적 오차의 평가(Local Error Estimate)에 의한 적응적 시간간격기법(Adaptive Time-Stepping Procedure)의 도입에 의해 해의 정확성의 유지와 계산시간의 효율성을 증가시키고자 하였으며, 차량-구조물 상호작용력이 허용된 반복계산횟수에 도달할 때까지 수렴하지 않을 경우에는 시간간격을 조절하고, 운동변수 및 부재내력을 이전시간단계의 값으로 초기화하고 시간적분을 재시도하도록 하였다. 이때의 새로운 시간간격은 이전 시간단계에 1보다 작은 상수 m 를 곱함으로써 결정된다.

$$Dt' = mDt \quad (2)$$

이상과 같이 적분오차가 상한계값을 초과한 경우나 해의 수렴성이 나쁜 경우 시간간격이 이전의 시간간격보다 작도록 조정되며, 이렇게 새로운 시간간격이 적용된 경우에는 지정된 횟수만큼의 시간단계수 동안 시간간격을 다시 증가시키지 않도록 함으로써 너무 빈번한 시간간격의 조절에 의한 계산의 비효율성을 방지하도록 하였다. 또한, 시간간격의 최대값의 설정기능과 특정시간까지 초기시간간격을 사용하여 일정한 시간간격을 유지하도록 하는 기능 등을 설정할 수 있도록 하였다.

2.2 지지강성변화구간의 수치모형화 기법

본 연구에서는 자갈도상의 동적수치해석모형화에 있어 Zhai 등(2004)에 의해 제안된 자갈도상의 모형화기법을 수정하여 사용하였다. Zhai 등은 쇄석으로 이루어진 자갈도상의 진동모델을 설정하기 위해 Ahlebeck의 가설인 “침목으로부터 전달된 하중은 특정한 하중분포각(Load Distribution Angle)으로 분포된다”에 근거하여 침목의 유효지지면적하부의 자갈도상 진동영역(Vibrating Part of the Ballast)을 설정하였다. Zhai의 동적해석모델에서는 침목간격이 좁거나 자갈도상의 두께가 두꺼운 경우 이 진동영역은 인접 침목하부의 진동영역과 겹치는 경우가 발생하는데 이 겹치는 영역을 고려하여 유효진동영역을 설정하였으며, 자갈도상부의 연속성을 고려하기 위하여 도상전단강성을 고려하였다(그림 4).



(a) Ahlebeck의 하중분산에 관한 가설 (b) Zhai의 자갈도상 진동영역 개념도

그림 4. Ahlebeck의 가설에 근거한 Zhai의 자갈도상진동영역 설정

Zhai의 동적레도모형에서는 자갈도상부의 유효진동영역을 연속체로 간주하고 그 진동영역의 등가강성행렬과 등가질량을 산정함으로써 레도해석모형을 유도하였으며, 산정된 자갈도상 강성하부에 도상의 질량이 집중되는 것으로 묘사하였다(그림 5).

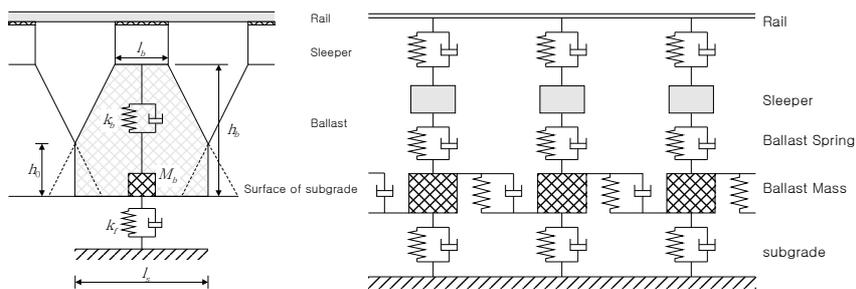


그림 5. Zhai의 자갈도상부 강성 및 질량 산정

Zhai의 동적궤도해석모델은 침목의 폭, 자갈도상의 두께, 침목중심간격 등의 변화요인에 따라 자갈도상의 유효질량과 강성을 산정할 수 있는 방법이나, 강성노반인 경우에는 동적궤도해석모델에서의 도상질량위치가 부적절하다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 Zhai의 동적궤도모형을 근거로 자갈도상의 질량위치를 침목하면으로부터 특정한 위치에 위치시켰으며 동적궤도모형이 강성노반인 경우에도 적용 가능하도록 수정하였다. 수정된 해석모델에서는 침목을 지지하는 강성은 질량위치 윗부분의 도상강성이며, 도상질량을 지지하는 강성은 질량위치 아랫부분의 강성과 노반의 강성의 직렬연결로 구성된다(그림 6).

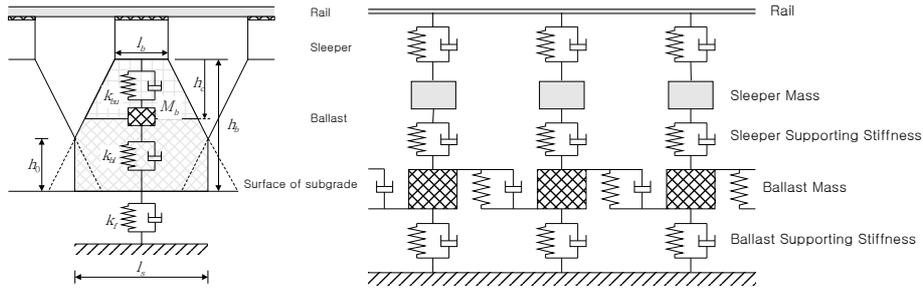


그림 6. 수정된 궤도해석모델

지지강성이 급변하는 강성노반 접속부 영역에서는 위치별로 궤도 및 노반조건이 다르므로 수정된 Zhai의 궤도해석모델을 그대로 적용하기는 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 궤도의 도상자갈부분은 Zhai의 궤도해석모델을 기본으로하여 모형화하고 접속슬래브 및 콘크리트도상부는 등가의 보요소로 모형화함으로써 지지강성변화구간을 수치적으로 모형화하였다(그림 7).

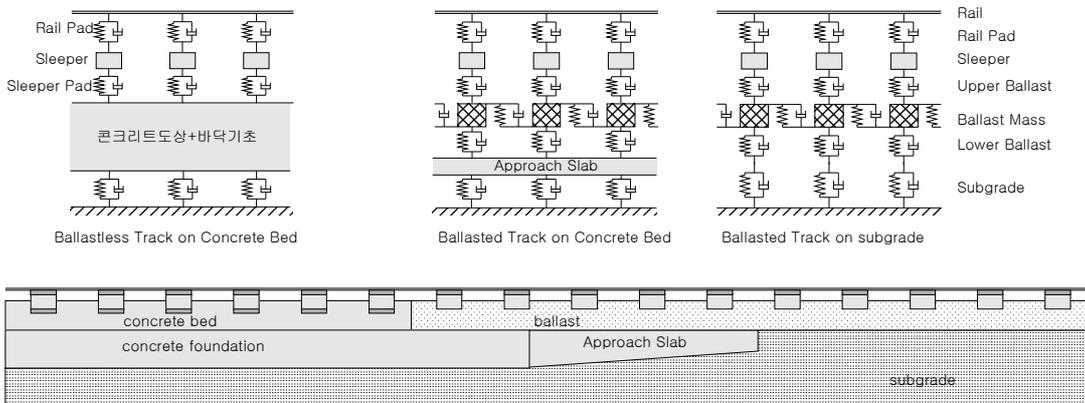


그림 7. 터널갱문입구 완충구간 수치모형화 개념도

3. 수치시험

본 연구에서는 그림 8에 나타난 대형침목을 콘크리트도상궤도와 인접한 완충구간의 9개 침목에 대해 적용 적용유무에 따른 거동을 비교하고자 하였다(이일화 등 2004).

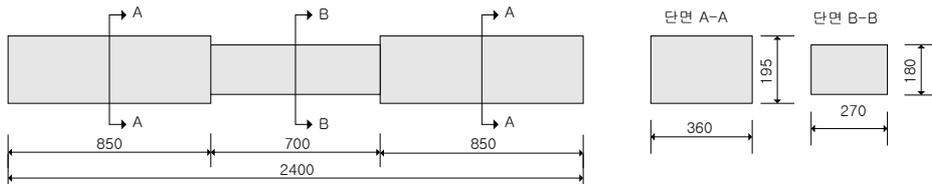


그림 8. 해석에 사용된 광폭침목의 제원

차량의 주행조건으로는 7300호대 기관차와 객차7량이 연결된 열차가 주행속력 100km/h로

좌에서 우로 진행하는 것으로 설정하였으며(그림 7), 궤도틀림은 없는 이상적인 상태를 가정하여 열차주행에 따른 동적해석을 수행하였다.

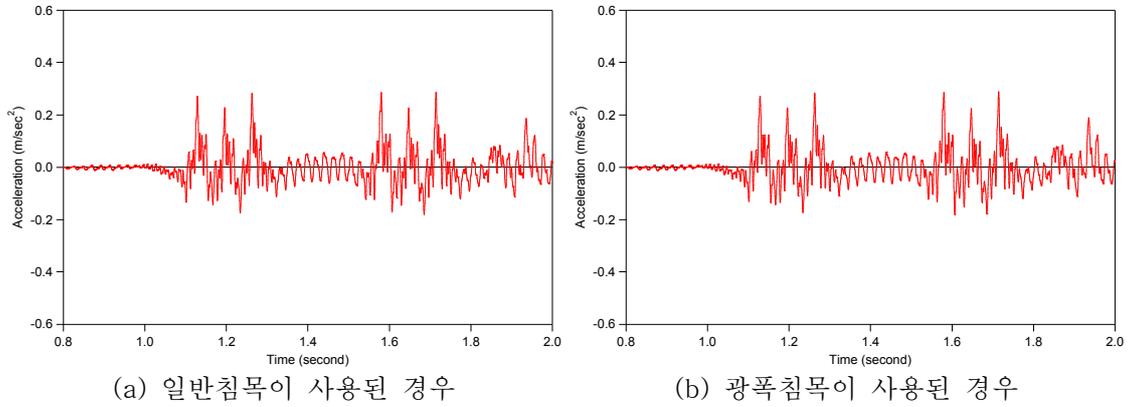


그림 9. 완충구간 3번째 침목위치에서의 자갈도상의 진동가속도

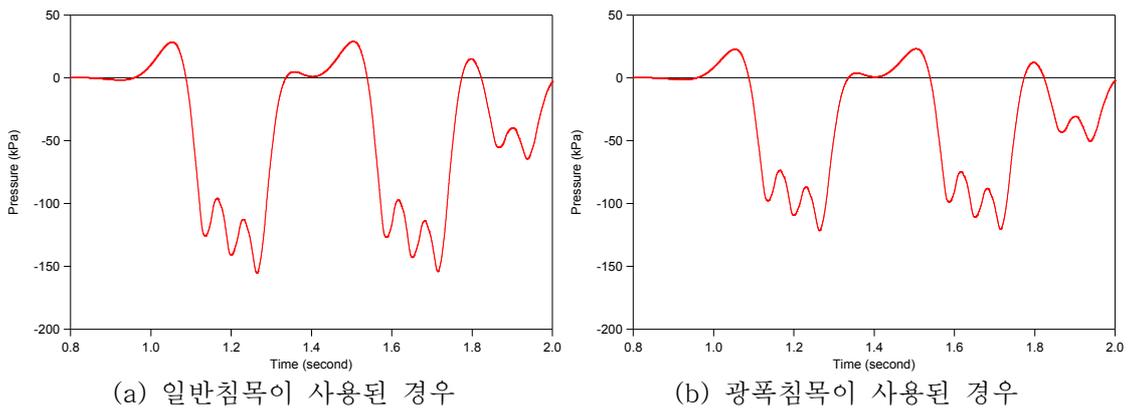


그림 10. 완충구간 3번째 침목위치의 침목하면에 작용하는 압력

기하학적인 결함이 없는 이상적인 궤도에 대한 동적해석결과를 분석해 본 결과 완충구간에서 광폭침목을 도입하여도 도상가속도 및 침목하면에 작용하는 작용력은 변화가 미흡하였다(그림 9). 하지만 침목하면에 거의 동일한 힘이 압축력으로 작용할 경우 광폭침목의 경우 침목하면의 유효지지면적이 일반침목에 비하여 크므로 도상자갈에 작용하는 압력을 감소시키는 효과를 보였다(그림 10).

궤도파괴이론에 의하면 도상다짐이 시행된 자갈도상 궤도는 열차의 통과에 의해 반복하중을 받아 다음과 같이 침하가 발생하게 된다(이종득 2001).

$$y = \gamma(1 - e^{-\alpha x}) + \beta x \quad (3)$$

여기서, y 는 침하량, x 는 반복횟수 혹은 통과톤수, α , β , γ 는 계수로서 γ 는 초기침하의 크기, α 는 초기침하의 반복횟수와 관련된 계수이다. 위의 식의 1항은 도상자갈작업 초기의 급격한 침하성분을 나타내는 항으로서 도상입자간의 조밀하게되는 초기압밀과정에 해당한다. 제 2항은 초기압밀과정 이후의 직선적인 침하를 나타내며 침목하부의 도상자갈 입자가 측방으로 이동하는 유동과정에 기인한다. 2항에 등장하는 계수 β 는 열차에 의한 궤도파괴에 직접 관계되며 도상압력과 도상가속도에 비례하는 특성을 갖는다. 즉

$$\beta \propto (\text{도상압력}) \times (\text{도상가속도}) \quad (4)$$

이 궤도파괴이론에 근거해 판단해볼 때 광폭침목의 사용에 따라 침목하면의 유효지지면적이 커지고, 동일한 침목하면의 힘에 대해서도 도상압력은 작게 되므로 열차의 운행에 따른 자

갈도상부의 침하를 억제하는 효과를 갖는 것으로 판단된다.

대상구간에서의 터널부 콘크리트도상부는 침하가 발생하지 않는 반면에 완충구간 및 토공부에서는 자갈도상 및 토노반에서의 침하가 지속적으로 발생할 것으로 예상된다. 따라서 이러한 터널-토공부 지지강성변화구간에서는 강성노반을 갖는 콘크리트궤도와 인접한 자갈도상구간에서는 침하에 의한 단차가 발생할 가능성이 있다. 본 연구에서는 광폭침목이 사용되지 않은 경우에 자갈도상부의 침하에 따른 영향을 비교하기 위하여 추가적인 동적해석을 수행하였다. 본 연구에서는 일반 PC침목이 사용된 완충구간의 자갈도상부에 2개의 침목구간에 걸쳐 0.5mm만큼의 단차가 발생한 경우를 가정하여 수치해석을 수행하였다(이지하 2005). 자갈도상궤도에서의 침하에 의한 단차는 궤도틀림조건으로 고려하였으며, 궤도틀림의 형상은 코사인함수를 이용하였다(그림 11).

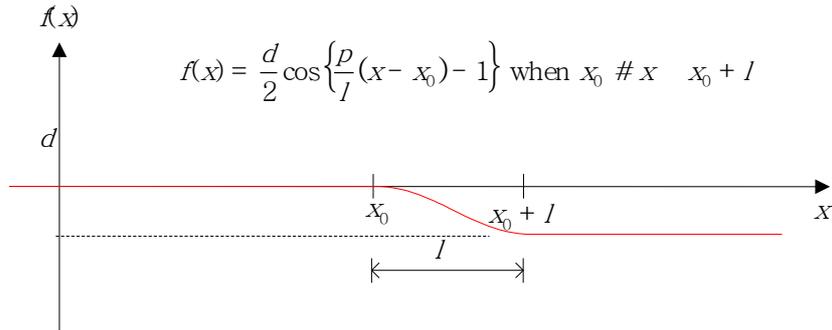
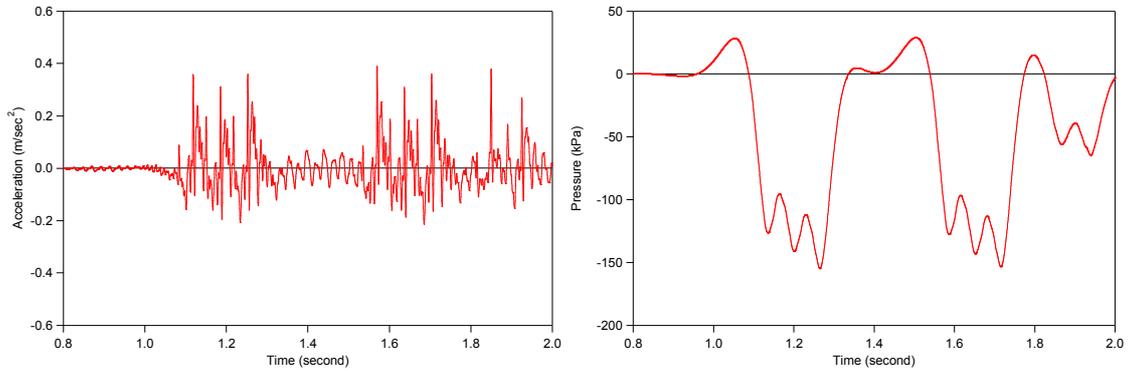


그림 11. 자갈도상부의 침하에 의해 발생하는 궤도틀림 모형화

수치해석결과 침목2개구간($l=1.2m$)에 걸쳐 0.5mm정도의 하향단차를 갖는 경우에는 침목하면의 압력변화는 미소하였으나, 자갈도상의 진동가속도는 증가하는 현상을 보였다(그림 12). 이러한 자갈도상부의 침하에 의한 단차에 의해 자갈도상부의 진동가속도와 압력을 증가시키므로써 단차의 크기를 증가시킬 위험성이 있으므로, 강성천이구간에서의 자갈도상궤도의 침하 및 충격이 크게 되는 것으로 판단된다.



(a) 자갈도상의 진동가속도

(b) 침목하면 압력변화

그림 12. 침목2개구간에 걸쳐 0.5mm의 단차가 존재하는 경우의 거동

이상과 같은 해석결과를 살펴 볼 때 지지강성변화구간에 광폭침목을 적용하는 경우 자갈도상부의 도상압력을 감소시켜 침하속도를 완화시키고, 충격이 요인이 되는 궤도침하를 억제하는 효과가 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 Zhai에 의해 제안된 자갈도상 모형화기법을 이용하여 구조물 접속부 지지강성변화구간에서의 자갈도상부의 거동을 분석하고자 하였다. 동적해석결과를 분석해볼 때 지지강성변화구간에 광폭침목을 적용하는 경우 자갈도상부의 도상압력을 감소시켜 침하속도

를 완화시키고, 충격이 요인이 되는 궤도침하를 억제하는 효과가 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 이종득(2001) 철도궤도역학, 노혜출판사
- 이일화 등(2004) 기존선 자갈궤도 생력화를 위한 포장궤도 개발(II), 한국철도기술연구원 연구보고서
- 정근영, 이성욱, 민경주 (2005) 비선형 헤르쯔 접촉스프링과 변위제한조건식의 적용에 의한 차량-궤도-교량 동적상호작용 수치해석기법, 한국철도학회, 2005 추계학술대회
- 이지하(2005), 고속열차 운행시 뜬침목 구간에서 발생하는 궤도의 동특성, 건국대학교 대학원, 박사학위 청구논문
- 정근영, 이성욱, 이석무 (2006) 안정화된 Penalty방법에 의한 접촉력 산정법과 요철부 통과시의 차륜-레일간 접촉분리현상, 한국철도학회, 2006 춘계학술대회
- Bathe, Klaus-Jürgen(1993) *Finite Element Procedures*, Prentice Hall Publishing Company Limited Escalona et al.(2003) A technique for validating a multibody wheel/rail contact algorithm, *Proceedings of DETC'03*, Chicago, Illinois, USA
- Zeng et al(1992) A Posteriori Local Error Estimation And Adaptive Time-Stepping for Newmark Integration in Dynamic Analysis, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 21, pp. 555-571
- Zhai, W.M, Wang, K.Y, Lin, J.H.(2004) Modelling and experiment of railway ballast vibration, *Journal of Sound and Vibration*, 270, pp. 673-683