

터널/토공 접속부에 대한 대형침목 보강효과 분석 Analysis on the Reinforcement Effect for Large Type Sleeper on Transition zone between Earthwork and Tunnel

이진욱¹⁾, Jin-Wook Lee, 최찬용²⁾, Chan-Yong Choi, 이일화³⁾, Il-Wha Lee

1), 2), 3) 한국철도기술연구원 선임연구원, A senior researcher of Korea Railroad Research Institute

SYNOPSIS : It is very important to pay careful attention to construction of earthwork/tunnel transition zone for railway. The transition zone of the railway is the section which roadbed stiffness is suddenly varied. Differences in stiffness have dynamic effects and these increase the forces in the track and the extent of deformation. In this study, performance of transition zone was investigated through the field tests. The wheel loads and sleeper settlement were measured after installing field testing sections.

Key words : Earth/tunnel transition zone, Wheel load, Sleeper settlement, Field test

1. 서 론

철도노반은 구조에 따라 토공구간, 터널구간, 교량구간, 접속구간으로 구분 할 수 있으며, 이 중에서 접속구간은 교량과 토공, 터널과 토공 그리고 유도상 궤도에서 무도상궤도로 옮겨가는 궤도의 하부구조 강성이 변화하는 구간으로서 열차운행에 안정성과 신뢰성에 큰 영향을 미치는 구간이다. 강성변화구간의 일반적인 현상은 충격효과에 의한 토공부분의 과대 침하발생으로 차량의 운행 및 안전성에 영향을 주며, 승차감이 저하되어 지속적인 유지보수를 필요로 한다. 또한, 열차진동으로 인해 도상자갈의 유실 등의 현상이 발생하며, 접속부구간의 구조적 특성으로 MTT 등 기계화 작업의 어려움으로 유지보수하기가 어려운 특징을 가지고 있다. 이러한 유지보수 노력을 줄이기 위하여 도상아래의 발라스트 매트를 설치하거나, 보강레일 및 Approach Block을 적절히 설계 배치함으로써 궤도에 미치는 충격을 최소화 하고 있는 실정이다.

현장계측구간은 전라선 개량구간으로 OO~OO역 구간의 OO터널구간으로 터널과 토공접합부에서 콘크리트와 자갈도상간의 강성차이로 인하여 궤도처짐이 증가 등 궤도변형이 가속화되고 있는 현장이다. 이러한 접속구간에 대한 문제를 해결하기 위하여 보강공법의 일환으로 대형침목을 토공부 쪽으로 약 15m(침목 20개)를 대형침목으로 설치하여 보강 전·후를 계측하였다. 또한, 철도전용노반해석프로그램(Geotrack)을 활용하여 일반침목과 대형침목과의 응력 및 침하특성을 검토하였다.

2. 접속부에서의 궤도손상 및 원인

접속부에서 열차주행에 의한 궤도손상 및 원인은 궤도, 터널, 토공 등이 서로 복잡하게 작용하여 발생하게 된다. 하나의 발생요인은 또 다른 요인을 야기시켜 최종적으로는 궤도틀림이 발생되어 유지보수비용이 증가하게 된다. 표 1은 접속부 위치별 문제와 특징과 문제점을 나타내었다.

표 1. 접속부 위치별 문제와 특징

터널/토공구간	<ul style="list-style-type: none"> 교량에 비하여 강성변화정도가 상대적으로 작음 과대한 변형현상에 의한 추가적 소음 및 진동발생
교량/토공구간	<ul style="list-style-type: none"> 일시적 작용하중과 반복적 작용하중 <ul style="list-style-type: none"> - 일시하중: 단기변형유발(대부분 복원), - 장기지속하중: 소성변위 유발(강성변화구간의 문제요인)
	<ul style="list-style-type: none"> 과대 변위의 발생요인 <ul style="list-style-type: none"> - 주변 축제, 교대 뒷채움제의 불충분한 다짐 또는 압밀과정 - 차량하중 또는 온도하중에 의한 궤도구조 및 교량의 이동변위

2.1 접속부에서의 궤도손상 및 원인

분야별 접속부의 성능에 영향을 미치는 인자는 크게 토공분야, 궤도분야로 구분될 수 있다. 토공분야에서는 노반침하, 도상손상, 배수불량, 성토사면의 전단변형 등이 발생할 수 있으며, 궤도분야는 수직적 결함, 수평적 결함, 침목의 상승 등이 있다. 표 2는 각 분야별 접속부 성능에 미치는 인자에 대하여 기술하였다.

표 2. 각 분야별 접속부의 성능에 영향을 미치는 인자

구분	인자	현상
토공 분야	노반침하	노반침하는 접속부의 일차적인 원인이며, 궤도 기하구조 손상의 주요인이 된다. 대부분의 경우 재료의 다짐불량이나 노반 연약화에 의해 발생하며 대체로 신선 건설시 주로 발생된다. 침하는 건설초기에 단기간 동안 발생하며 시간이 경과할수록 침하량은 감소한다. 그러나 재료가 불량하거나 배수가 불량할 경우 장기적인 압밀침하 발생가능성이 크며 지속적인 유지보수가 필요하게 된다.
	도상손상	도상 손상의 발생은 접속부의 상호작용에 의한 충격하중이 주요 원인이다. 도상을 충분히 다져지지 않기 때문에 발생하며 빈번한 도상다짐작업의 원인이 될 수 있다.
	배수불량	흙쌓기재료 자체의 배수불량과 뒷채움재가 배수가 잘 되지 않는 재료나 구조로 시공될 때 발생한다. 배수불량은 노반의 지지력을 급격히 감소시키기 때문에 노반유지관리에서 중요한 요인중에 하나이다.
	성토사면의 전단변형	성토사면의 과도한 전단변형이 발생하여 궤도 침하를 유발시키며 도상 사라짐의 한 원인이 된다.
궤도 분야	수직적 결함	궤도의 수직결함은 노반침하의 의해 발생하는 초과하중 또는 과대변위로 인하여 발생한다. 궤도의 수직결함에 의해 발생될 수 있는 문제점은 운영 안정성 저해, 차량 및 레일의 마모와 손상, 속도제한, 승차감 저하, 소음 진동의 증가 등이다.
	수평적 결함	위치별 수직변위의 차에 의한 마찰면 부족으로 인하여 도상 횡저항력이 감소하여 궤도 좌굴이 발생한다.
	침목의 상승	국부적으로 노반 및 도상 침하가 발생하게 되면 일부 침목은 도상과 떨어져 있는 상태가 되게 된다. 궤도에 하중이 작용하지 않는 경우에는 도상과 침목사이에 틈이 있음을 의미한다. 열차가 통과하게 되면 침목과 도상의 반복적 접촉으로 도상과 하부노반에 높은 충격하중이 발생시키며 도상파쇄 등에 의해 침하가 발생한다.

2.2 국내외 터널-토공 접속부 시공기준

일반적으로 터널-토공 접속부는 구조적 불연속성으로 인해 취약 단면으로 구분되어 관리하고 있다. 한국고속철도공단에서 터널-토공부 관리기준과 일본에 제시된 접속부에 대한 기준과 시공예는 다음과 같다.

- 1) 한국고속철도공단 구조물 접속부
 - 터널/토공 접속부

기호	명칭	재질 및 다짐도
1	시멘트 처리된 보조도상	$D_{max}=31.5\text{mm}$ (3% 시멘트), 다짐도 $\geq 100\%$ $E_{v2} \geq 120\text{MN/m}^2$, $E_{v2}/E_{v1} < 2.2$
2	시멘트처리된 자갈	$D_{max}=63.0\text{mm}$ (3% 시멘트), 다짐도 $\geq 100\%$ $E_{v2} \geq 120\text{MN/m}^2$, $E_{v2}/E_{v1} < 2.2$
3	입도조정 부순돌	$D_{max}=63\text{mm}$, $E_{v2} \geq 80\text{MN/m}^2$, $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$

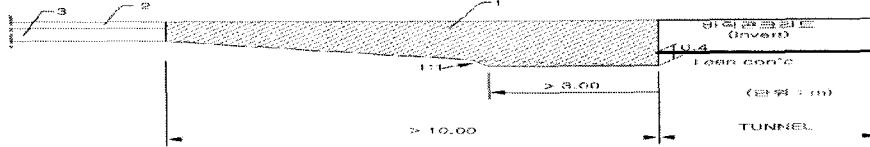


그림 1. 한국고속철도공단 구조물 접속부 단면도 및 시공관리기준

2) 일본 (일반철도 접속부)

- 터널-토공 접합부

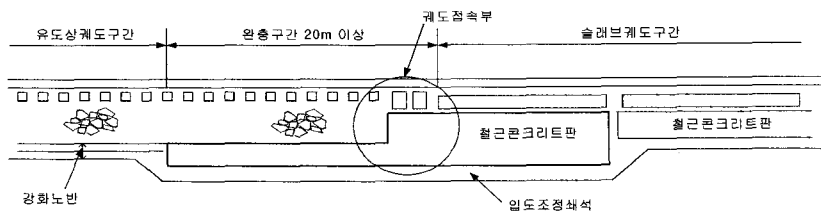


그림 2. 노반과의 접속부 시공예 (鐵道構造物等設計標準東解説 省力化軌道用土構造物)

3. 현장개요

현장계측시험 위치는 죽림온천역~서도역 사이의 OO터널로 터널과 토공으로 이루어진 접속구간이다. 터널내의 적용된 궤도구조는 ALT+RC블럭 형태로 이루어져 있다. 봉천터널 현장계측은 2005년 3월 18일부터 2005년 10월4일까지 계측하였으며, 열차의 운행방향은 고강성에서 저강성(터널→토공부)으로 이동하는 궤도조건을 계측구간으로 선정하였다.

본 현장에 적용된 보강공법은 일반적으로 이음매 침목으로 사용되고 있는 대형침목을 터널과 토공접속부에 토공부 쪽으로 약 15m(침목 20개)를 대형침목으로 교환하는 방법으로 2005년 8월 4일 열차를 차단시켜 설치하였다. 이러한 대형침목으로 설치함에 따라 침목간의 중심 간격이 좁혀지는 효과와 대형침목에 의해 열차 하중이 넓게 분산되는 2가지의 효과 동시에 볼 수 있는 공법으로 보강 전·후 약 1달간 3회 계측을 실시하였으며, 보강 전·후를 비교분석하였다.

그림 3은 현장부설시험 지역의 위치와 터널에 설치된 계측기 단면을 나타내었다. 현장에서 측정된 항목은 윤중과 침목변위를 측정하였으며, 터널부와 도상부에 설치된 측정점은 윤중 8개소, 침하 11개소로 총 19개 측정점을 설치하였다.

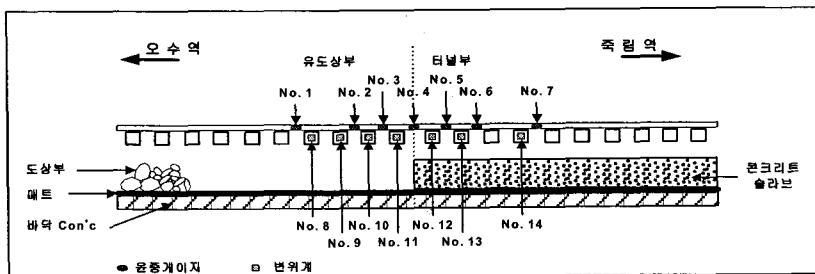


그림 3. 토공접속부 현장계측 개요도

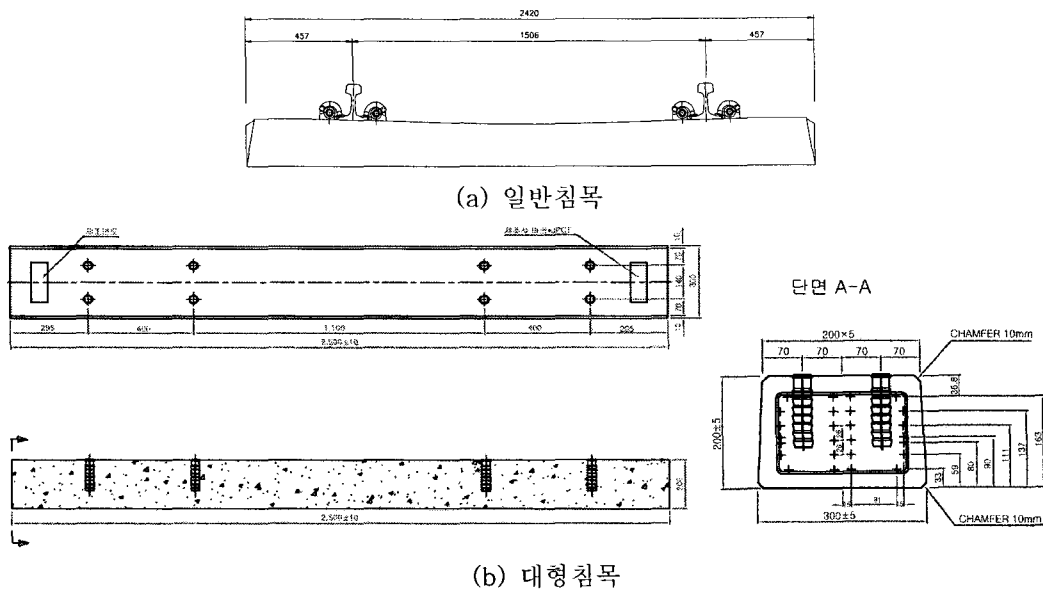


그림 4. 일반침목과 대형침목(이음매)의 크기 및 형상

4. 실험결과 및 분석

4.1 운중 및 변위측정 결과

운중은 터널부 4측점, 토공부 4측점으로 총 8개 측점을 측정하였다. 계측기는 현장에 노출되어있기 때문에 사소한 부주의로 인해 계측기가 망실될 우려가 많으며 기온차, 현장여건 등으로 인해 계측 종료 시점에서는 약간의 계측기가 망실되어 측정이 어려운 측점도 발견되었다.

그림 5~6은 날짜별 열차종류별 운중변화값을 보이고 있으며, 운중 최대값으로 표시하였다. 그림에서와 같이 보강된 이후에 미소하지만 운중이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 특히 접속부 구간에서 감소폭이 가장 크게 발생되어 대형침목의 효과가 충분히 발휘하고 있는 것을 알 수 있다.

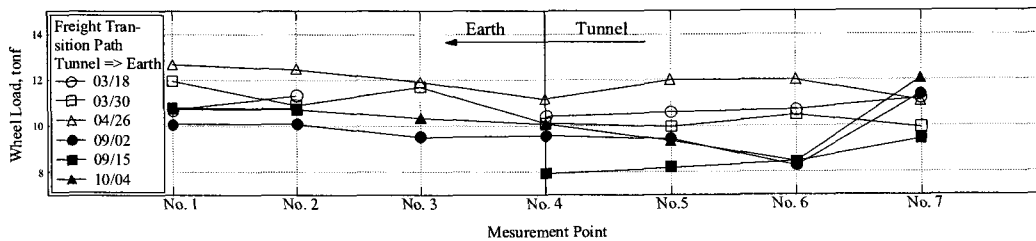


그림 5. 화물열차 하행(터널→토공) 운행시 각 측점별 최대운중

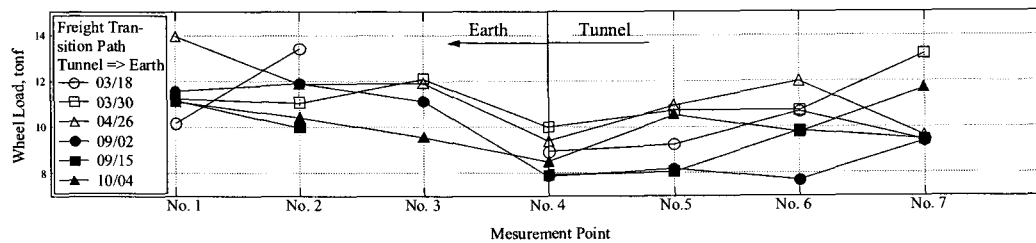


그림 6. 무궁화 열차 하행(터널→토공) 운행시 각 측점별 최대운중

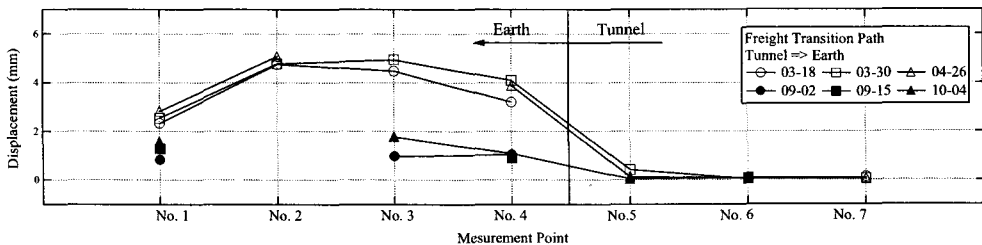
탄성변위는 운중과 마찬가지로 계측기는 총 7개 측점에서 측정하였으며, 토공부에 4측점과 터널부에 3측점을 측정하였다. 터널부보다 토공부에서 도상부에 점진적인 침하가 더 발생되기 때문에 정밀도가 높은 L.V.D.T. (Linear Variable Differential Transformer)을 사용하여 계측하였다.

표 3은 화물열차통과시 날짜별 탄성변위를 각 측정점별 나타내었다. 표에서와 같이 터널부보다 토공부에서 보다 많은 탄성변위가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 터널부에서는 거의 탄성침하가 발생하지 않고 있는 것을 알 수 있다. 표에서 (-)의 의미는 침하가 상향으로 올라오는 것을 침하량을 의미하며 보수하기 전에 토공부에서 최대 36.1mm가 발생되어 궤도에 상당한 피로를 주고 있는 것을 알 수 있다. 반면, 보수후에는 최대 7mm로 약 6배 이상의 침하가 억제되었으며, 이러한 침하특성을 고려할 때 접속부에 대형침묵으로 시공시 상당부분 궤도의 피로를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

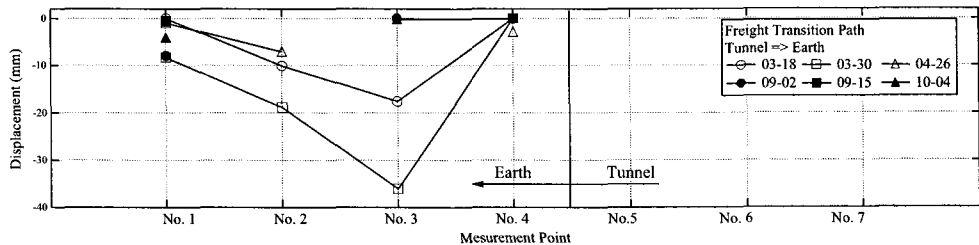
표 3. 화물열차 통과시 측정점별 탄성변위

측정일	계측 측정점							비고
	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	
'05.03.18	2.33 (-0.0)	4.75 (-10.08)	4.48 (-17.58)	3.2 (0.0)	-	-	0.1	보강전
'05.03.30	2.55 (-8.28)	4.78 (-18.88)	4.95 (-36.08)	4.1 (0.0)	0.42	0.04	0.05	
'05.04.26	2.83 (-0.98)	5.08 (-7.03)	-	3.88 (-2.87)	-	-	-	
'05.09.02	0.83 (-7.95)		0.975 (0.0)	1.05 (-0.13)	-	-	-	보강후
'05.09.15	1.3 (-0.6)		-	0.9 (0.0)	-	-	-	
'05.10.04	1.58 (-4.13)		1.78 (-0.2)	1.1 (0.0)	-	-	-	
대상 구조물	토공부				터널부			

그림 7~8은 열차종류별 탄성변위량을 나타내었다. 보수전에 측정된 최대 탄성변위량은 토공부에서 약 7mm 이내로 측정되었으나, 보수후에는 2mm이하로 감소하여 보강효과가 상당히 있는 것으로 측정되었다. 특히, 토공부에서 최대, 최소 변위량의 폭이 상대적으로 많이 줄어들어 상하 진동에 의한 도상 자갈의 파쇄 등을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

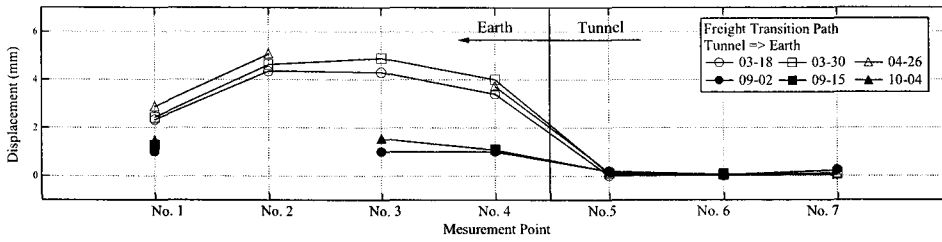


(a) 최대변위(침묵 아래방향의 변위량)

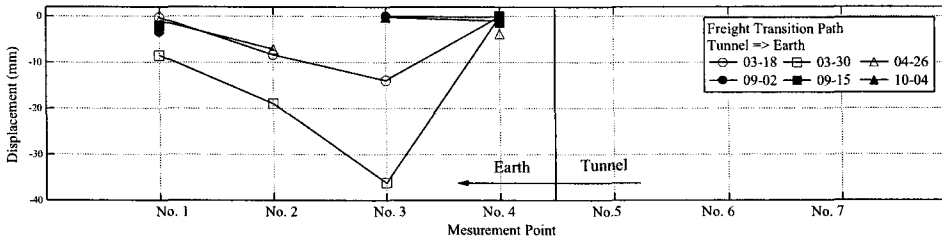


(b) 최소변위량(침묵 상향으로 발생하는 변위량)

그림 7. 화물열차 하행(터널→토공) 운행시 각 측정점별 최대 변위 측정



(a) 최대변위(침목 아래방향의 변위량)



(b) 최소변위량(침목 상향으로 발생하는 변위량)

그림 8. 무궁화 열차 하행(터널→토공) 운행시 각 측정점별 최대 변위 측정

4.2 Geotrack을 이용한 궤도조건별 수치해석

대형침목의 효과를 정량적으로 검토하기 위하여 Geotrack 프로그램을 이용하여 대형침목의 효과를 수치 해석을 통해 관찰하였다. GEOTRACK 프로그램은 1) 축하중, 2) 레일과 침목의 물성치, 3) 도상과 하부층에 대한 물성치, 4) 침목 간격과 층 두께 등을 고려할 수 있는 프로그램이다. 이 프로그램은 또한 동일한 변수의 해석으로 도상, 보조 도상 그리고 노반층에서 응력과 변형을 해석할 수 있다.

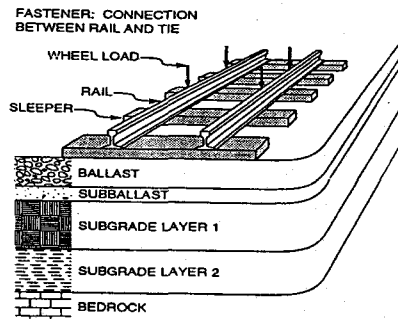


그림 9 궤도의 구성요소

그림 9은 모형 구조에 포함되어 있는 궤도의 구성 요소이다. 레일은 각 침목에 지지대가 있는 선형 탄력 빔으로 나타나며, 레일에 11개의 침목이 연결되고 끝 부분에서 그리고 각 침목에서 자유로이 회전한다. 레일과 침목사이의 체결구는 스프링으로 표현되며, 침목은 기초 도상위 10곳의 동일 공간 위치에 지지되어 있는 선형 탄성 빔으로 표시된다. 하중은 수직방향의 하중의 크기만 고려되어지며, 한 개의 하중에 대하여는 11개 침목을 가진 궤도구조에서 중앙부 침목에 재하된다.

4.2.1 해석조건

본 해석에서는 궤도의 물성치 변화에 따른 침하량의 변화도와 침목의 강성 및 침목의 간격을 변화시켰을 경우 노반표면에 작용하는 침하와 응력을 검토하였다. 각각의 실험조건은 표 4에 나타내었다. 표 4에서와 같이 노반조건을 흙노반 80cm로 하였을 경우 궤도의 조건을 상이하게 변화시킨 후 침하량과 응력의 변화 등을 관찰하였다.

표 4 궤도의 매개변수에 따른 해석조건

실험조건	해석조건	비고
Joint 1	흙노반 80cm, 탄성계수: 535.7kgf/cm ² 침목간격 60cm, 침목길이 260cm, 침목폭 24cm	표준 단면 침목 6개, 총길이: 3,240mm
Joint 1-1	흙노반 80cm, 침목간격 60cm→50cm	침목 7개, 총길이: 3,240mm
Joint 1-2	흙노반 80cm, 침목간격 60cm→74cm	침목 5개, 총길이: 3,200mm
Joint 1-3	침목길이 260cm→240cm	
Joint 1-4	침목길이 260cm→280cm	
Joint 1-5	침목폭 24cm→30cm, 침목간격 60cm	침목 6개, 총길이: 3,300mm
Joint 1-6	침목폭 24cm→30cm, 침목간격 50cm	침목 7개, 총길이: 3,300mm

일반적으로 열차하중에 작용하는 하중의 크기에 따라 다르지만, 일반적으로 성토높이는 열차하중의 영향범위가 노반표면으로부터 3m 정도이므로 3.5m로 가정하여 해석을 수행하였다. 본 프로그램은 앞서 언급한 바와 같이 철도궤도구조전용해석 프로그램이기 때문에 지반물성치, 침목 및 레일의 물성치 등을 모두 고려하여 해석에 수행하였다. 표 5 은 해석단면과 지반의 물성치를 나타내었다.

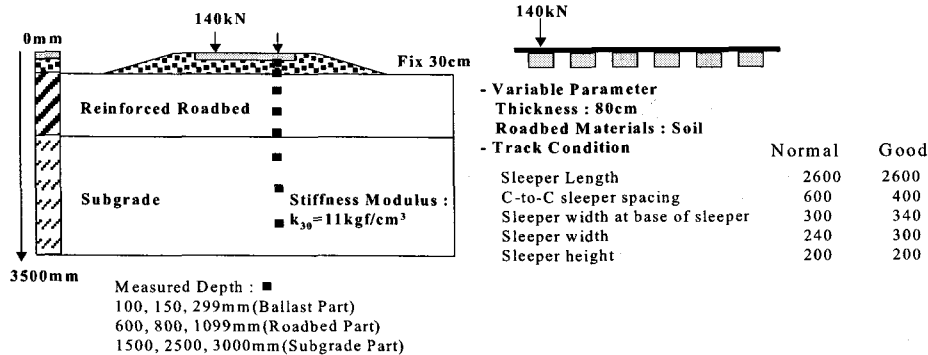


그림 10. 해석단면

표 5. 해석물성치

Layer No.	초기 탄성계수(MPa)	포아손비	각 층의 두께 (mm)	흙의 단위중량 (kN/m ³)	횡방향 토압계수	응력 상관계수	k1	k2
1	310	0.3	300	1.7	1.0	1	1569	0.535
2	100	0.4	2700	1.8	0.7	6	0	0
3	100	0.4	infinite	1.8	0.7	6	0	0

4.2.2 해석결과 및 분석

궤도의 매개변수의 변화정도에 따른 레일부에서 발생하는 윤증을 검토하였다. 그림 6에서와 같이 일반적인 궤도부(Joint 1)의 경우 레일부에서 발생하는 하중의 크기는 축중(140kN)의 약 47%정도인 65.4kN이 발생되었으며, 이론적인 값 40%에 근접한 결과를 볼 수 있었다.

궤도 매개변수인 침목 중심간격과 침목수에 따른 레일부의 윤증결과, 레일부의 윤증결과, Joint1-2의 경우가 가장 큰 윤증이 발생한 반면, Joint1-1(58.8kN)과 Joint 1-6(59.3kN)의 경우, Joint 1 경우에 비해 약 10%정도 윤증의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과 레일부에 발생하는 하중의 크기를 감소시키는 방안으로 침목의 중심 간격과 침목의 크기를 조절함으로써 레일부에 윤증이 감소하는 것을 알 수 있었다.

그림 12는 각 조건별 침목에서 발생하는 탄성변위를 나타내었다. 그림 11에서와 같이 레일부에 작용된 하중의 결과와 유사하게 Joint1-2가 가장 크게 탄성침하가 발생하였으며, Joint1-6이 가장 작은 탄성침하가 발생하는 것을 볼 수 있다. Joint 1의 경우 침목에서 발생하는 탄성침하량은 1.51mm로 일본 철도총합기술연구소에서 제시한 노반의 탄성침하량 2.5mm보다 상대적으로 적은 침하가 발생하였다.

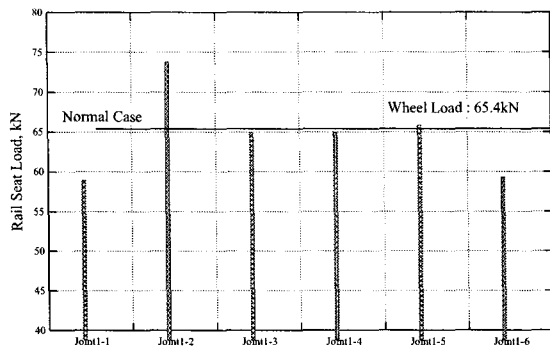


그림 11 레일부에서 발생된 운중의 크기

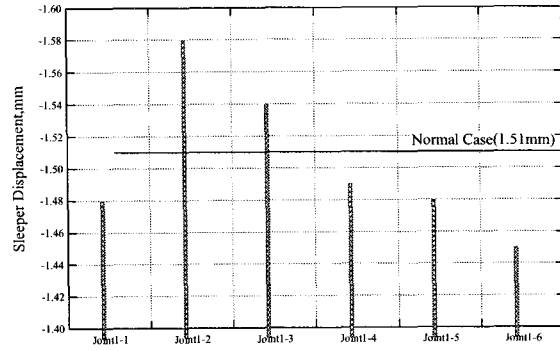


그림 12 침목에서 발생되는 탄성변위

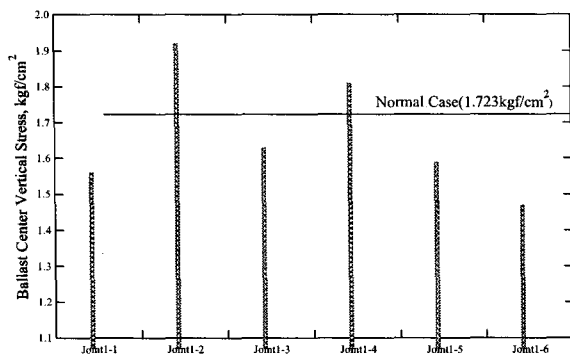


그림 13 각 조건별 도상부에서의 응력(kgf/cm²)

그림 13 은 각 조건별 도상부에서 발생되는 응력의 크기를 나타내었다. 그림 13에서와 같이 평균 궤도조건인 경우 도상부에서 1.723kgf/cm²가 발생하였으며, 모든 조건이 2kgf/cm²이하로 해석되었다. 궤도의 조건별, Joint1-2에서 응력이 가장 크게 발생하였으며, Joint1-1과 Joint 1-6에서 가장 작은 응력이 발생하였다. Joint 1의 경우에 비해 약 15% 감소되는 효과를 볼 수 있다.

5. 결론

전라선 OO터널 터널-토공 접속부 보강공법으로 실시한 대형침목에 대한 현장측정결과 아래와 같은 결론을 보였다.

1. 도상부에서 1.723kgf/cm²가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 모든 조건이 2kgf/cm²이하로 해석되었다. 궤도 매개변수에 따라, Joint1-2에서 응력이 가장 크게 발생하였으며, Joint1-1과 Joint 1-6에서 가장 작은 응력이 발생하였다. Joint 1에 비해 약 15% 감소되는 효과를 볼 수 있다
2. 궤도부로 조성된 경우 레일부에서 발생되는 하중의 크기는 축중(140kN)의 약 47%정도인 65.4kN이 발생되었으며, 이론적인 값 40%에 근접한 결과를 볼 수 있었다.
3. 대형침목교환의 경우, 궤도부의 침하억제효과와 운중감소 효과를 상당부분 감소시키는 것을 볼 수 있었으며, 보수 전후를 비교할 때 약 6배 정도의 침하억제효과가 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 대형침목으로 교환할 경우, 유지보수주기의 절감과 궤도부의 피로억제 등으로 인해 내구연한이 상당히 증가 될 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 한국고속철도공단(2003), “고속철도공사 전문시방서(노반편)”
2. 한국철도기술연구원(2005), “철도연약노반 강화기술개발 및 구조물과 토공접합부 보강기술개발”
3. 鐵道總合技術研究所(1999), “鐵道構造物等設計標準東解説 省力化軌道用土構造物”
4. 이일화(2005), “상호작용을 고려한 교량-토공 접속부의 설계 및 유지관리”, 철도시설