

철도강화노반 시험부설구간에서의 열차 주행시 장기거동 계측 Long-Term Measurement under the Moving train at the Test Reinforced Roadbed Site in Railway

황선근¹⁾, Seon-Keun Hwang, 신민호²⁾, Min-Ho Shin, 이성혁³⁾, Seong-Hyeok Lee,
최찬용⁴⁾, Chan-Yong Choi, 이시한⁵⁾, Si-Han Lee,

- 1) 한국철도기술연구원 시설연구본부 책임연구원, Principal Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI.
- 2) 한국철도기술연구원 시설연구본부 본부장, General Director, Civil Engineering Dept., KRRI.
- 3) 한국철도기술연구원 시설연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Dept., KRRI.
- 4) 한국철도기술연구원 시설연구본부 주임연구원, Researcher, Civil Engineering Dept., KRRI.
- 5) 평원엔지니어링 대리, Engineer. Pyeong-Won Engineering Co.

SYNOPSIS : Nine different types of the reinforced railroad roadbeds which are located in between Suwon-Chunan station of Kyongbu line were constructed in order to increase the bearing capacity of railroad roadbed and to improve the ridability as a part of speed-up project of conventional railroad systems. Each three sections were composed of weathered granite soil, crushed stone and furnace slag(HMS25), and fully instrumented with earth pressure cells, settlement plates and geophones to monitor the behavior of roadbeds under actual train loads. Field measurement has continued since October 31, 2000 and presently with rather longer measurement interval. The measurement data such as settlement, earth pressure and vibration levels are currently under analysis process.

In this paper, only cumulative measurement data of railroad roadbeds were introduced. In the near future, comprehensive measurement data and result of analysis will be presented and design technique for the reinforced railroad roadbed will be proposed as a final product of this study.

Keywords: Reinforced Roadbed, Field Measurement, Dynamic Displacement, Cyclic Loading,

1. 서론

일반적으로 흙노반 궤도구조는 열차의 반복하중을 받게 되면 노반 연약화되어 도상 발라스트가 노반으로 관입하게 되고 이 개소에 빗물이 고이게 되면 이토화된다. 또한 이토화된 흙이 반복하중에 의한 팽팽작용으로 궤도로 분출하게 되는 현상이 발생하게 되는데, 이때 도상 발라스트 사이의 이토 흙은 윤택작용을 하게 되어 하중의 분산작용, 진동흡수 등 도상 발라스트의 기능이 저하되며, 압축침하가 발생하게 되어 열차 안전운행에 지장을 초래할 뿐 만아니라 지속적인 유지보수비용 및 보선인력의 투입이 요구된다. 이러한 철도노반의 연약화 현상은 하중, 물, 노반재의 3가지 요인이 복합적으로 작용하는 것으로 이중 하나의 요인만 제거하여도 발생을 억제할 수 있다. 따라서 철도선진국의 경우도 적정 노반재의 개발 및 배수기능 개선 등에 역점을 두어 연구를 추진하여 일본의 경우는 재래선 1급~3급선의 경우에는 강화노반을 시공하도록 규정하고 있다.

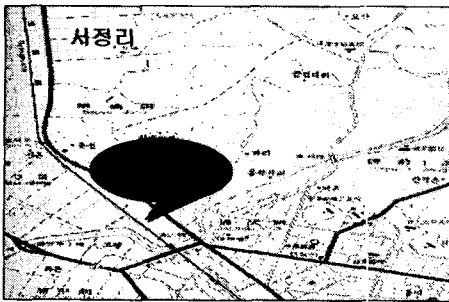
따라서, 국철의 노반에 대한 강화노반의 적용성을 검토하고 합리적인 설계법을 제시하고자 경부선 수원-천안간 2복선 노반신설현장의 연장 약 150m구간에 대해 강화노반 종류별, 두께별 조건을 설정하였으며 계측기를 매설하였다. 강화노반 실 현장부설시험구간은 서울기점 70k700~70k850(L=150m)구간에 흙, 수경성 입도조정 고로슬래그(HMS-25), 입도조정쇄석(M-40) 등 강화노반 재료별, 두께별 9개 단면을 조

성하여 실 열차운행시의 노반의 거동을 분석하기 위해 침하계, 토압계, 속도계 등의 계측기를 매설하였다. 현장부설시험구간의 계측은 2000년 10월 31일 열차개통시작일로부터 계측을 실시하였으며, 본 논문에서는 10월 31일 이후 4회 측정된 결과를 기술한 것이다.

2. 현장개요

본 연구의 현장부설시험구간은 경기도 평택시 장당동 417-1 경부선 2복선 노반 신설 공사(4공구)구간(서울 기점 70k700-70k850 구간)으로서 J건설(주)과 D컨설팅에서 시공 및 감리를 담당하고 있다 <그림 1 참조>. 당 현장시험부설구간은 기존 운행 중인 경부선(상행선)에 인접하여 위치하고 있으며, 노상의 경우, 원지반의 상부에 토사를 이용하여 성토고 약 3m, 폭 10m, 비탈면 구배 1:1.5로 조성하였다.

노상 조성 후 강화노반의 거동 특성을 평가하기 위해 노상 상부에 각 재료별로 강화노반의 두께를 달리하면서 3종류의 계측기를 각각 매설하였다.



<그림 1> 현장위치도



<사진 1> 현장 전경

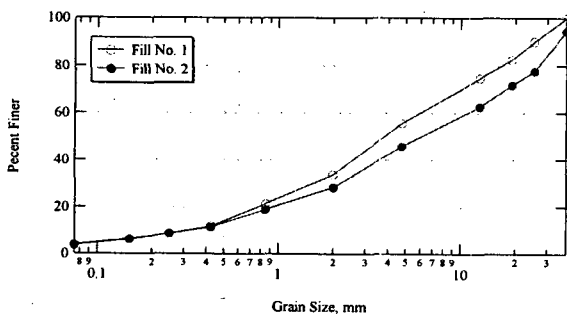
3. 현장부설시험

3.1 노반재료의 물리적 특성

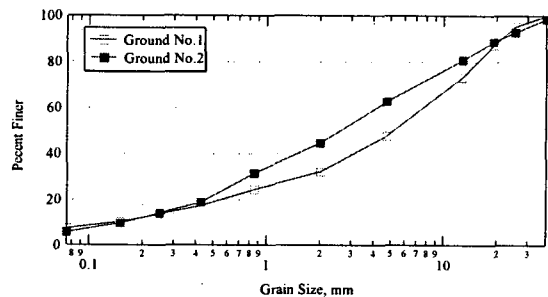
본 시험구간의 강화노반의 시공 전에 원지반 및 노상(성토)시료의 물성을 획득하기 위해 시료를 채취하였다. <표 1>은 원지반과 노상재료의 기본물성시험결과를 나타낸 것으로 설계에 요구하는 노상 및 원지반재료로서의 물성을 만족하고 있다.

<표 1> 원지반과 노상재료의 기본물성시험결과

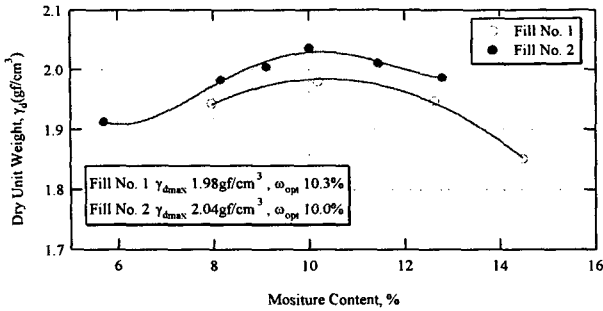
시료명	성토-1	성토-2	원지반-1	원지반-2
다짐시험				
최적함수비, %	10.3	10.0	10.3	10.3
최대건조단위중량, tf/m^3	1.98	2.04	1.98	1.98
입도시험				
#4체 통과량, %	55.6	45.8	47.7	62.8
#200체 통과량, %	3.5	3.8	7.2	5.5
균등계수(C_u)	22.2	40.7	45.9	25.3
곡률계수(C_g)	1.78	1.63	1.33	0.88



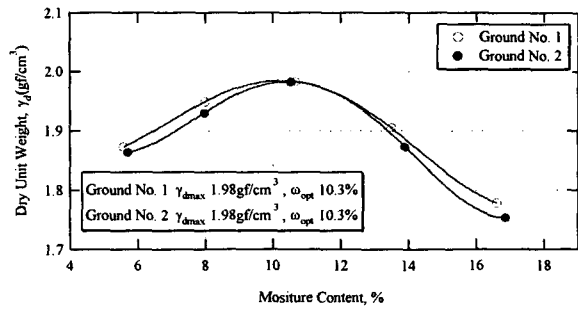
<그림 2> 노상(성토)시료의 입도시험결과



<그림 3> 원지반토의 입도시험결과



<그림 4> 노상(성토) 시료의 다짐시험 결과

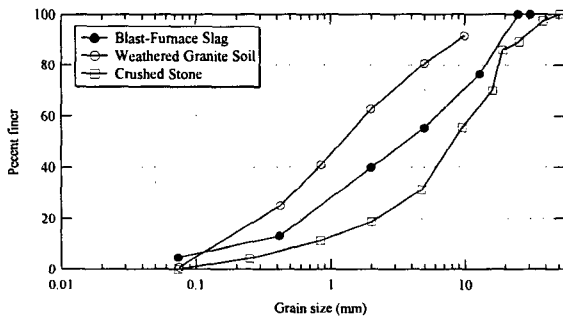


<그림 5> 원지반의 다짐시험결과

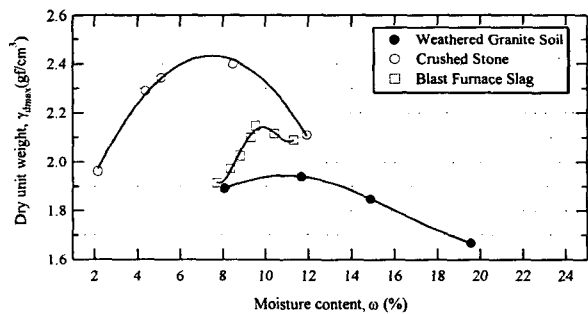
또한, 강화노반 재료로는 수경성입도조정 고로슬래그(HMS-25), 입도조정쇄석(M-40), 양질의 토사 등 3종류의 재료를 선정하여 시험부설하였으며, 슬래그는 D개발(주)에서, 쇄석은 경기도 안성에 위치한 S개발(주)의 것을 사용하였다. <표 2>는 HMS-25와 쇄석의 공학적 특성을 나타내었다. 쇄석의 주요 구성 성분은 호상 편마암이 주를 이루고 있다.

<표 2> 강화노반재료의 기본물성

슬래그		쇄석	
40번체 통과량	13.3%	겉보기비중	2.70
200번체 통과량	4.8%	흡수율	0.71%
-	-	일축압축강도	829kgf/cm ²
-	-	마모율	24.1%
최대건조밀도(γ _{dmax})	2.15gf/cm ³	최대건조밀도(γ _{dmax})	2.45gf/cm ³
최적함수비(w _{opt})	9.55%	최적함수비(w _{opt})	7.45%



<그림 6> 현장 부설 재료의 입도분포곡선



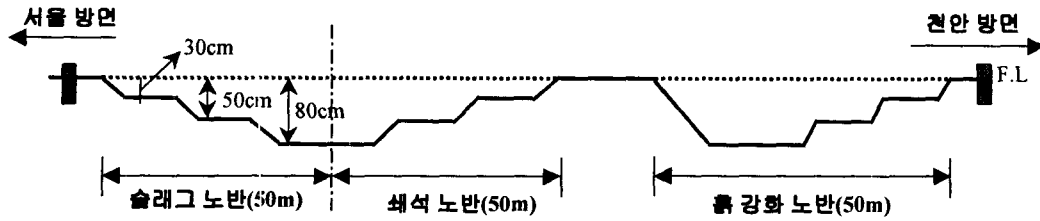
<그림 7> 현장 부설 노반재료의 다짐곡선

3.2 강화노반 단면 조성 방법

강화노반의 단면은 노상 상부에 궤도 중심선 측량을 하여 궤도의 위치를 정한 후, 각각의 재료를 15cm 두께로 고르게 포설하고 소요의 다짐도를 확보하기 위해 수시로 살수를 하면서 진동롤러로써 다짐을 하여 조성하였다.

각 층별 다짐관리는 재료별 최대건조밀도(γ_{dmax}) 및 함수비를 기준으로, 실내 시험에서의 γ_{dmax}의 95%를 기준으로 하여 다짐도 및 함수비를 조절하였다.

층별로 현장 들밀도 시험을 실시하여 다짐도를 관리하면서 소요의 다짐이 될 수 있도록 하였다. <그림 8>은 상기 방법에 의해 조성된 강화노반의 개략적인 횡단면도를 보인 것이다.



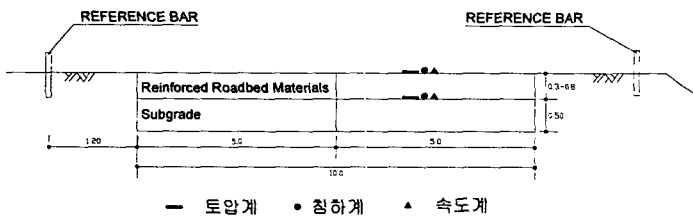
<그림 8> 강화노반 횡단면도

3.3 계측기 종류 및 매설 방법

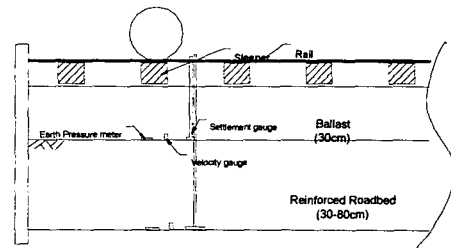
강화노반의 현장 적용성 및 성능 평가를 위한 장기 거동 특성 계측을 위하여 각각의 단면에 대해 노상의 상부 및 강화노반의 상부에 <표 3>에 보인 바와 같이 토압계, 속도계(Geophone), 침하계 등을 설치하였다. <그림 9>와 <그림 10>은 각각 매설된 계측기의 종·횡단면도를 나타낸 것이다.

<표 3> 매설된 계측기 종류 및 수량

종 류	수 량	산출 근거	사용 목적
토압계	36개	4개/단면×9단면	열차운행 하중에 의한 토압측정 및 하중 분산 효과 측정
속도계	36개	4개/단면×9단면	열차운행 하중에 의한 노반진동 정도 및 동적 변위 측정
침하계	18개	2개/단면×9단면	열차통과톤수에 따른 소성 침하량 측정



<그림 9> 계측기 매설 단면도



<그림 10> 계측기 매설 평면도

<그림 9>에 보인 바와 같이 토압계는 열차 주행시 레일 하부에서의 응력 측정을 위해 단면별로 양쪽 레일의 연직 하부의 위치에 노상 및 노반 상부에 각각 2개씩 매설하였으며, 속도계는 토압계의 가이드 판에서 약 25cm 떨어진 위치에 각각 2개씩 매설하였다. 침하계는 궤간 중심부의 침목과 침목사이에 설치하였다.

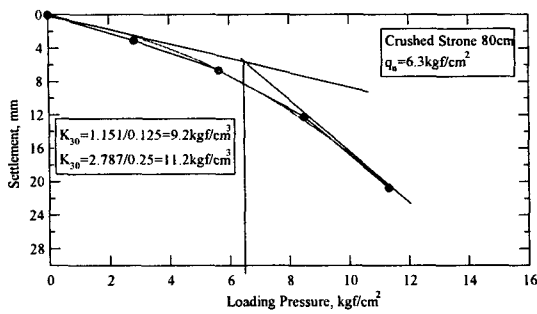
4. 현장실험결과 및 분석

4.1 평판재하 실험결과

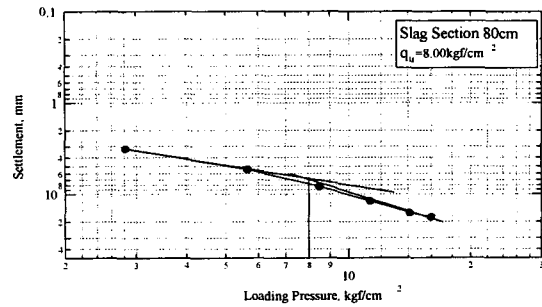
현장부설시험구간의 각각의 단면에 대해 실시한 노상의 평판재하실험결과는 <표 4>에 나타내었다. <표 4>에 보인 바와 같이 모든 단면이 K_{30} 이 약 $10\sim 33\text{kgf/cm}^3$ 정도로서 철도토목공사 전문시방서에 제시되어 있는 $K_{30}\geq 7\text{kgf/cm}^3$ 의 노상 조건을 만족하고는 있다. 그러나 전체 단면을 동일한 지지력을 유지하는 것은 사실상 불가능하므로 노상의 조건을 7kgf/cm^3 이상인 경우를 대상으로 하였다.

<그림 11>은 슬래그 80cm 단면의 평판재하실험결과를 나타내었다. 일반적으로 많이 사용되는 하중-침하곡선으로 지반반력계수와 극한지지력을 구하였으며, 하중-침하곡선으로 변곡점이 나타나지 않은 경

우 <그림 12>와 같이 각 좌표를 log scale로 변환시켜 그 변곡점을 극한지지력으로 산정하였다.



<그림 11> 하중-침하곡선과의 관계



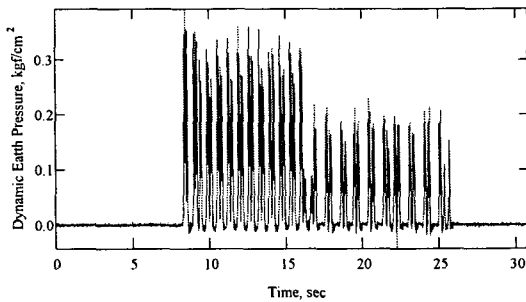
<그림 12> 하중-침하곡선과의 관계

<표 4> 평판재하실험결과

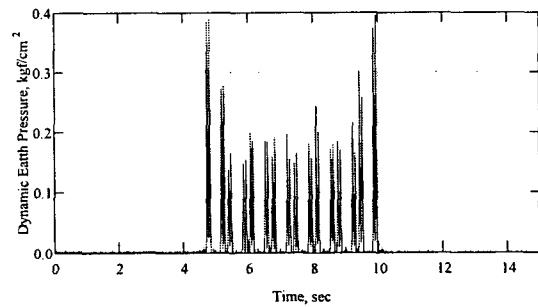
실험단면	노상 지반반력계수, K_{30} (kgf/cm ³)	극한지지력, q_u (kgf/cm ²)	허용지지력, q_a (kgf/cm ²)	
쇄석단면	30cm	25.5	13.5	4.5
	50cm	33.4	14.2	4.7
	80cm	9.2	7.0	2.3
슬래그 단면	30cm	25.8	14.9	4.9
	50cm	14.6	8.2	2.7
	80cm	9.7	8.0	2.6
흙 단면	30cm	10.1	9.9	3.3
	50cm	11.2	7.9	2.6
	80cm	28.1	10.0	3.3

4.2 열차통과시 단면별 토압분포

현장부설시험구간 계측은 2000년 10월 31일 열차개통시간부터 각각의 단면에 대해 측정을 하여 분석하였다. 본 논문에서는 11월 9일까지의 데이터를 분석한 결과를 수록한 것으로 일반적으로 하루에 본 시험구간에 통과되는 열차는 새마을 40회, 무궁화 84회, 화물차 48회로 약 124,480tonf이 통과하고 있는 것으로 볼 때 11월 9일까지의 환산 누적 통과톤수는 약 1,219,600톤이었다.



(a) 화물차



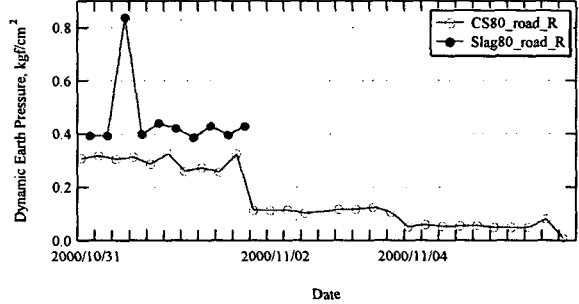
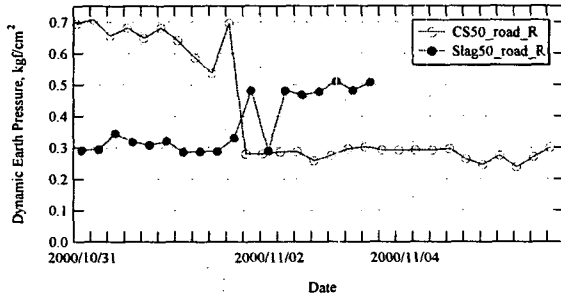
(b) 새마을

<그림 13> 열차종류별 대표적인 동적 토압 측정 곡선

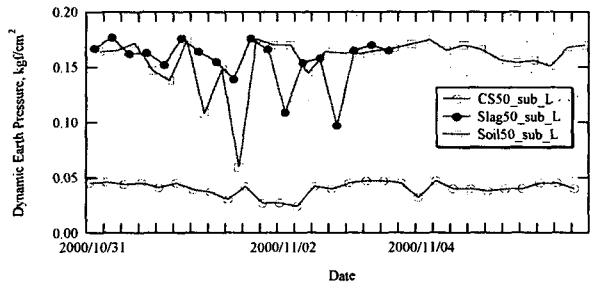
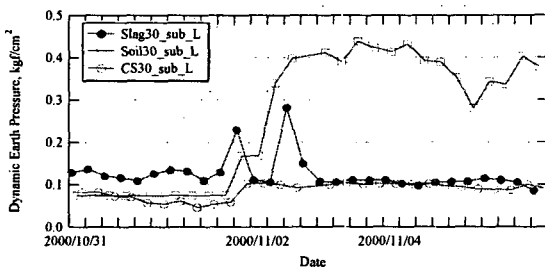
<그림 13>는 각 열차종류별 노반부의 토압계 측정결과를 보인 것인데, 기관차 부분에서 가장 큰 측정값을 보이고 있으며, 노반부에서는 0.3kgf/cm²~0.7kgf/cm²이며, 노상부는 0.05~0.2kgf/cm²가 측정되었다. 일반적으로 설계에 적용되는 하중은 기관차 측중을 고려하여 설계하는 것이 안전측이라고 할 수 있다.

4.2.1 열차통과시 동적 토압

<그림 14>~<그림 15>는 열차통과시 노반부에 발생된 동적토압 측정결과를 나타낸 것이다. <그림 14>에 보인 바와 같이 10월 31일 계측된 결과는 쇄석노반이 슬래그노반보다 큰 토압이 측정되었으나, 11월 2일, 4일의 경우에는 슬래그노반이 쇄석노반보다 큰 토압이 측정되었다. 일반적으로 노반부에서 측정된 토압은 도상발라스트의 다짐정도, 하중 작용점 등에 많은 영향을 받을 수 있으며 또한 상기의 결과는 슬래그 노반의 경우가 쇄석노반에 비해 수경성의 영향으로 견고한 상태이므로 도상 발라스트의 관입 등이 다소 덜 발생되었기 때문이라 판단된다.



<그림 14> 노반재료별 노반 우측부의 토압분포 <그림 15> 노반재료별 노반 우측부의 토압분포



<그림 16> 노상 좌측부 토압분포(D=30cm)

<그림 17> 노상 좌측부 토압분포(D=50cm)

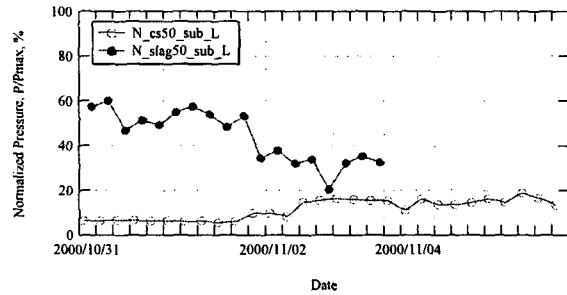
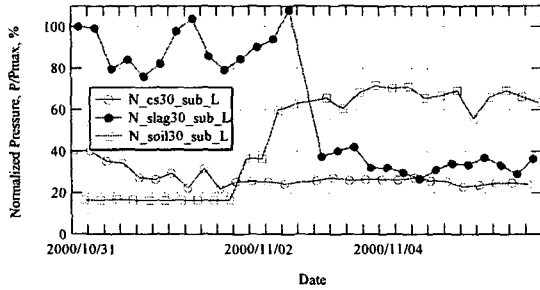
<그림 16>~<그림 17>은 노반재료별 노반두께가 30cm, 50cm 일 때 노상 좌측부의 동적 토압을 나타내었다. <그림 16>에서와 같이 계측 초기에는 흙노반, 쇄석노반, 슬래그노반의 측정값이 거의 유사한 경향을 보이고 있으나, 시간의 경과에 따라 흙노반 30cm의 경우, 상당히 큰 토압이 측정되는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 노반의 상부가 지속적인 열차 하중에 의해 도상발라스트의 관입 및 이동으로 하중 재하점이 보다 근접해지기 때문으로 판단된다. 그러나 슬래그, 쇄석노반의 경우 초기 조건과 거의 유사한 측정값을 보이고 있다.

<그림 17>은 노반두께가 50cm일 때 노상 좌측부의 토압분포를 나타 낸 것으로 슬래그, 흙노반의 경우 거의 유사한 토압분포를 나타내고 있다.

일반적으로 노반표면에서 측정된 토압으로 강화노반에 대한 정량적 효과를 평가하기는 곤란하다. 이러한 이유는 앞서 언급한 바와 같이 도상발라스트의 두께 및 다짐 정도를 동일하게 시공하는 것은 불가능하기 때문이다. 따라서 <식 1>와 같이 토압율로 표현하여 강화노반두께별 특성을 분석하고자 하였다.

$$\text{토압율}(\%) = \frac{\text{노상부 토압}}{\text{노반부 토압}} \times 100$$

<식 1>



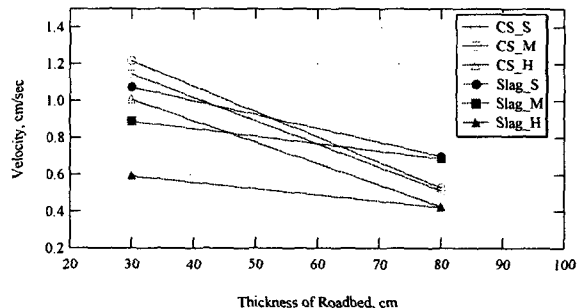
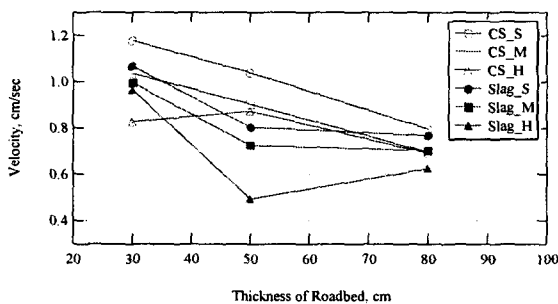
<그림 18> 노반 토압에 대한 노상 토압을 <그림 19> 노반 토압에 대한 노상 좌측부의 토압을

<그림 18>은 노반부에 발생된 동적토압에 대하여 노상 좌측부에 발생된 토압을 토압율로 나타내었다. <그림 18>에서와 같이 동일한 노반두께에 대하여 각 재료별 토압율을 보면 흙노반 30cm의 경우 초기에는 노반에 작용하는 토압의 20%정도 받다가 시일이 경과함에 따라 노반면의 토압을 60%이상이 노상면에 토압이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 슬래그 노반 30cm의 경우 초기에는 노반과 거의 유사한 토압이 노상면에서 발생하고 있으나, 시일이 경과함에 따라 노반의 안정화로 인해 토압율이 약 40% 이하로 점차적으로 노상면의 토압이 감소하는 것을 알 수 있다. 쇄석 30cm의 경우 초기 계측값은 노반면의 토압율은 약 40%이하로 토압이 발생하는 것을 알 수 있다.

<그림 19>는 노반두께가 50cm인 단면에서의 노상 좌측부 토압율을 나타내었다. <그림 19>에서와 같이 노반두께가 50cm일 경우 슬래그 노반은 초기에는 노반에서 측정된 토압의 약 60%정도를 노상면에서 받는 것을 알 수 있으나, 시일의 경과에 따라 노상면의 토압율이 약 40%이하로 감소하는 것을 알 수 있다. 쇄석 50cm의 경우 노상면에서 20%이내의 토압율이 발생하고 있으나 시일의 경과에 따라 다소의 토압율이 증가하는 것을 볼 수 있다.

4.2.3 노반두께별 속도변화

현장부설시험구간에서 열차통과시 노반재료별, 두께별 진동 속도의 변화를 분석하기 위하여 속도계를 이용하여 깊이별 측정을 하였다.

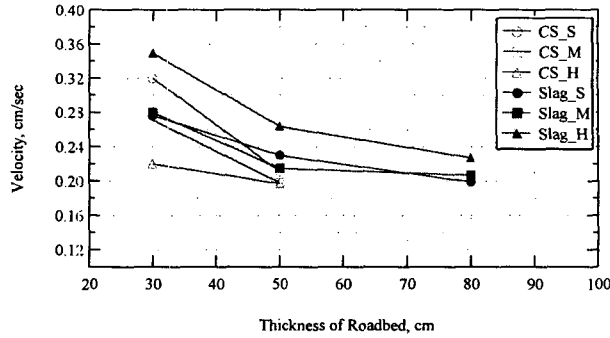


※ S: 새마을 M: 무궁화 H: 화물차

<그림 20> 열차종류별 노반 우측부 속도변화 <그림 21> 열차종류별 노반 좌측부 속도변화

<그림 20>~<그림 21>에 나타난 속도값은 현장에서 계측된 결과를 평균하여 열차종류별, 노반두께별 속도값을 분석한 것이다.

<그림 20>은 노반재료별 노반 우측부에서 계측된 속도변화를 나타낸 것으로 강화노반두께의 증가에 따라 측정값은 감소하는 것을 볼 수 있으며, 전반적으로 슬래그노반이 쇄석노반보다 작은 값을 나타내었다. 이러한 경향으로 볼 때 슬래그노반이 쇄석노반보다 탄성 변위가 작을 것으로 판단된다. <그림 21>은 노반 좌측부에서의 속도변화값을 나타낸 것으로 노반 좌측부에서 계측된 결과와 유사한 경향을 보이고 있다.



※ S: 새마을 M: 무궁화 H: 화물차

<그림 22> 열차종류별 노상 우측부 속도변화

또한 <그림 22>는 열차 종류별 노상 우측부의 속도변화를 나타낸 것으로 노반두께의 증가에 따라 속도값이 점차 감소하는 것을 알 수 있으며, 쇄석노반이 슬래그노반보다 작은 값을 보이고 있다.

현재까지 계측된 결과에 의하면, 열차속도가 가장 빠른 새마을 열차가 통과시 각 단면별 속도값이 가장 크게 측정되었으며, 슬래그노반과 쇄석노반의 경우, 노반두께의 증가에 따라 속도값이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 열차 속도에 따른 충격하중의 영향으로 볼 수 있으며, 강화노반으로 시공할 경우, 노반부에서의 탄성변위를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

현재 철도강화노반 현장시험부설구간은 열차개통 후 1개월 정도 계측한 자료를 분석한 결과이므로 강화노반의 현장 적용성 및 성능평가에 직접 활용되기는 미흡하지만, 향후 장기계측을 수행하게 되면 상당히 유용한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 열차 운행시 토압, 진동 속도 등을 계측하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현장시험부설구간에서 계측된 노반부의 토압은 $0.3 \sim 0.7 \text{kgf/cm}^2$ 이며, 노상부는 $0.05 \sim 0.2 \text{kgf/cm}^2$ 이 측정되었다.
2. 노반두께 30cm의 경우 흙노반은 노반토압에 대한 노상부의 토압율이 60% 발생하였으나, 쇄석노반과 슬래그노반의 경우 토압율이 40%이하이다.
3. 노반두께의 증가에 따라 진동속도가 감소하며, 노반면과 노상면에서의 진동속도는 각각 $1.2 \sim 0.4 \text{cm/sec}$ 와 $0.35 \sim 0.2 \text{cm/sec}$ 이다.
4. 속도계의 측정결과, 열차속도가 가장 빠른 새마을 열차가 통과시 각 단면별 속도값이 가장 크게 측정되었으며, 슬래그노반과 쇄석노반의 경우 노반두께의 증가에 따라 속도값이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원, “철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한 연구(3차년도 연차보고서)”, 2000. 12.
2. 須長誠, 關根悅夫, “鐵道強化路盤厚さの低減に関する研究”, 土木學會論文集 No. 498/VI-24, pp. 57~66, 1994. 9.
3. 關根悅夫, 村本勝巳, “營業線 路盤の支持力特性に関する研究”, RTRI REPORT, Vol. 9, No. 7, '95. 7, pp 19~24.