

철도 노반분니 현상에 대한 연구

Research of the Mud-Pumping Phenomena on Railway Trackbed

김대상* 이진욱** 신민호*** 권병성****
Kim, Dae-Sang Lee, Jin-Wook Shin, Min-Ho Kwon, Byung-Sung

ABSTRACT

The status of mud-pumping in the existing railroad lines were investigated and real-scale tests simulating mud-pumping phenomena were carried out to analyze its mechanism. The penetration of ballast material into the subgrade and the cause of mud-pumping are explored. The results of the investigation and tests will be used to develop the new method and materials for the prevention of mud-pumping.

1. 서론

분니란 선로에 이토가 분출하는 현상으로, 분니에는 도상분니와 노반분니가 있다. 도상분니는 열차하중에 의하여 세립화된 도상자갈을 공급원으로 하고, 노반분니는 노반토가 그 공급원이다. 두 경우 모두 열차하중, 강우 및 지하수, 그리고 흙의 상호작용에 의하여 이토가 만들어져서 도상 전체에 분출된다. 분니가 발생하게 되면 궤도의 침하가 발생하고 도상부의 공극이 이토에 의하여 충전되기 때문에 도상의 탄성이 저하된다.

분니현상에 대한 연구를 수행하기 위해서는 현장조사에 의한 실태 파악, 실내시험을 통한 분니 발생과정의 추측, 그리고 발생에 기여하는 요인 분석을 통하여 분니대책 공법의 제안과 그 효과의 확인이 필요하다.

본 논문에서는 국내 노반분니 현황에 대하여 소개하고 실험을 통하여 분니현상을 재현해 봄으로서 그 발생에 기여하는 요인을 분석해 보고자 한다.

2. 국내 분니발생 현황

국내의 분니발생 현황에 대한 최근의 연구결과에 따르면 국내의 분니발생 연장은 약 100km에 달하고 있는 것이 현실이다. 2004년 4월부터 시작된 고속철도의 영업 운행과 기존선의 속도

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 수석연구원, 정회원
**** 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

향상으로 인하여 향후 분니에 대한 문제는 더욱 심각해 질 것으로 판단된다. 분니의 발생이 궤도보수에 미치는 영향을 간단히 정리해 보면 다음과 같다.

분니발생->궤도틀림과 궤도틀림 진행의 증대->필요 궤도보수량 증대, 승차감 악화, 서행운전

2.1 선구별 분니현황 분석

총 28개 선구에 대한 분니현황 조사 결과는 표 1과 같다. 총 조사대상 선구의 연장은 2,841.5km 이었고, 이 구간 중에서 분니발생 연장은 91.956km로 분니 발생율은 3.24%로 확인되었다. 본 조사 대상 분니개소의 경우 분니현상이 뚜렷이 발생하고 있는 지역으로서 보선업무에 지장을 초래하고 있는 개소를 대상으로 하였으므로, 현재 분니가 진행 중인 구간을 고려한다면 실제로는 조사에서 나타난 비율보다 많은 구간에서 분니가 발생 되었거나 진행 중인 것으로 판단할 수 있다.

표 1. 분니 발생 조사 결과

항 목	조 사 결 과
조사대상 선구 연장 (km)	2,841.5
분니발생 연장 (km)	91.956
분니발생율 (%)	3.24

2.2 분니 현황 분석

분니가 발생한 개소의 원인 분석을 위하여 16개 시설사무소에 설문 조사를 실시하였다.



그림 1 선별 분니발생비율

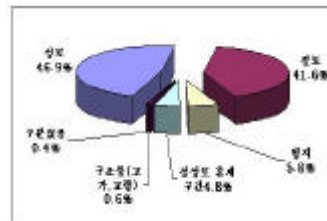


그림 2 토공별 분니발생비율

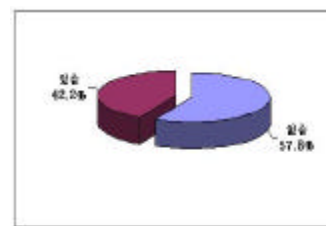


그림 3 결도랑 유무별 분니발생비율

그림 1과 같이 국내 선구별 분니발생비율(분니발생연장/총연장)은 충북선이 10.3%로서 가장 발생 비율이 높고 그 다음이 호남선으로 7.5%가 발생한 것을 알 수 있다. 그림 2의 토공별 분니 발생 현황을 보면 절·성토구간에서 거의 비슷한 수준의 분니가 발생함을 알 수 있다.

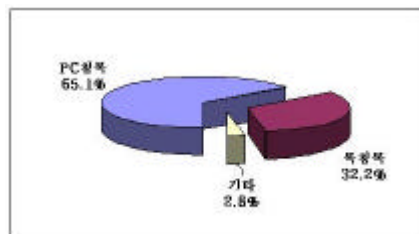


그림 4 침목 종류별 분니발생비율

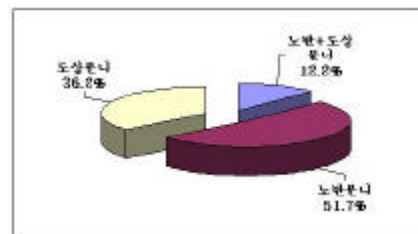


그림 5 분니종류별 분니발생비율

결도랑 기능은 선로로부터의 배수기능과 선로밖에서 선로로 흘러 들어오는 유수의 차단기능으로 볼 수 있다. 그림 3을 보면 결도랑이 없는 경우가 있는 경우 보다 높은 분니발생 비율을 보이

고 있다. 침목 종류별 분니발생 현황은 그림 4와 같다. 침목의 종류는 크게 PC침목과 목침목으로 구분되며, PC침목이 65.1%의 비율로 발생비율이 높지만, 국내의 경우 PC침목이 주를 이루고 있으므로 침목별 발생빈도를 수치상으로 단순 비교하기는 어려움이 있다.

현황조사를 시행한 구간에 대한 도상분니와 노반분니의 비율은 그림 5와 같이, 도상분니가 36.2%, 노반분니가 51.7%, 도상과 노반분니의 혼재가 12.2%로 나타났다. 수치상으로는 노반분니가 도상분니보다 많이 발생하는 것으로 나타남을 확인할 수 있었다.

3. 실대형 분니 재현 실험

도상 분니 현상은 반복 열차하중, 강우 및 배수 상태, 노반 흩이라고 하는 3가지 조건이 조합하여 발생한다. 따라서 상기의 조건을 적절히 열차운행조건과 조합하여 분니재현 실험을 수행하였다.

그림 6은 실험 전경으로 폭5m, 깊이3m의 토조, 50ton 용량의 반력대와 2기의 250kN Actuator를 이용하였다. 그림 7은 실대형 실험의 평면도, 정면도, 측면도를 보여주고 있다. 전면은 그림 8과 같이 아크릴판으로 제작하여 도상자갈의 거동을 눈으로 확인할 수 있도록 하였다. 도상자갈의 거동은 2만회 재하시마다 사진을 촬영하여 분석하였다. 분석 시 자갈의 횡방향과 종방향 이동량 및 회전량을 해석하기 위하여 비주얼 디지털라이징 프로그램을 작성하였다.



그림 6 실험 전경

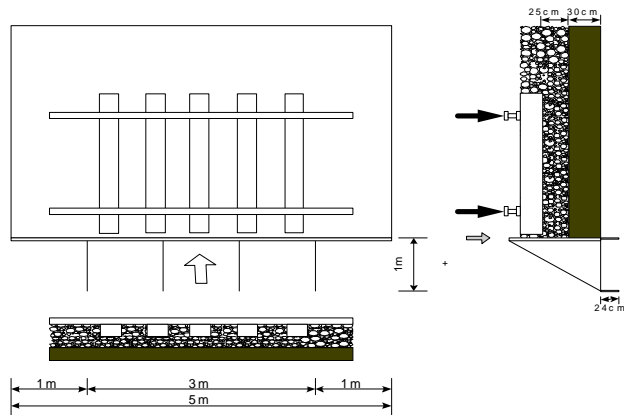


그림 7 실험 도면

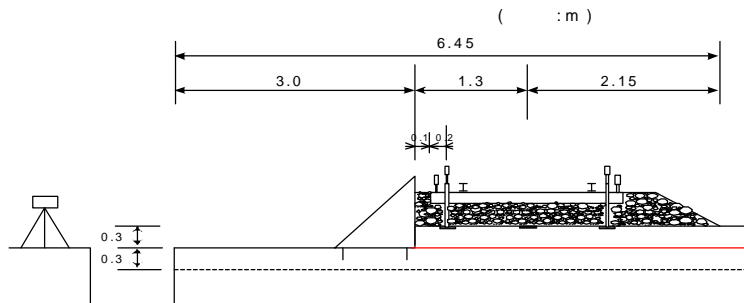


그림 8 시험 횡단면 상세도

3.1 하중조건

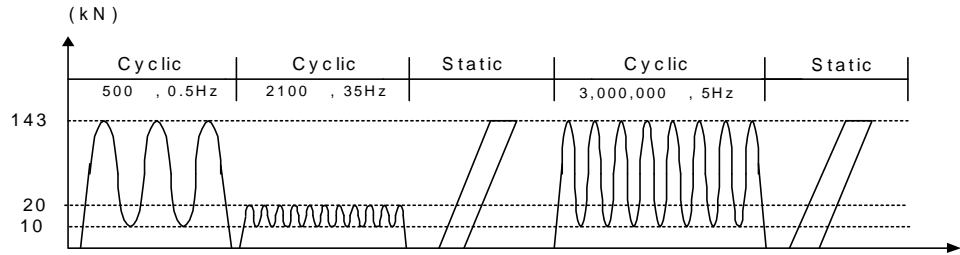


그림 9 하중재하 조건

그림 9와 같이 반복 재하 실험 전에 도상을 충분히 안정시키기 위하여 도상부를 실제 현장 수준에 준 하도록 다짐을 실시하였다. 이를 위하여 열차의 서행에 해당하는 낮은 주파수(0.5Hz)와 MTT 작업 주파수에 해당하는 높은 주파수(35Hz)로 동다짐을 실시하였다. 그리고 반복재하 실험 전에 정재하 시험을 통하여 간접적으로 노반의 강성을 평가하였다.

설계 운중은 L-22 표준 활하중을 적용하여 기존선 속도향상의 목표 최고속도인 200km/h에 대하여 장대레일에 대한 충격계수를 결정하여, 최소 최대 운중을 10kN(약1tonf)와 143kN(약14.3tonf)으로 하였다. 재하 진동수의 경우 최고속도 200km/h, 대차간 거리를 11.2m로 가정하여 5Hz를 사용하였다. 총 반복 재하 횟수는 300만회로 분니가 충분히 발생했다고 판단되는 시점까지 재하 하였다.

3.2 살수 및 배수조건

살수는 궤도, 노반의 초기침하가 상당히 진행되었다고 판단되는 34만회부터 10mm(4회), 20mm(2회), 30mm(1회)를 총 7회 실시하였다. 체류수면을 항상 일정하게 노반상면으로부터 10cm 위치, 즉 도상 내에 유지하도록 살수하였다. 재하 중에 레일과 침목의 침하에 대한 양로작업은 수행하지 않았다. 그림 7과 같이 상부노반과 하부노반사이에 물의 이동을 차단하기 위하여 불 투수 시트를 부설하였다. 토조와 반력대 사이의 경계부에서의 완전 차수를 위하여 실리콘 등의 방수제를 이용하였으나 완전차수는 쉽지 않았다. 따라서 배수되는 물은 소형 펌프를 이용하여 도상 상면에 재 가수하였다.

3.3 노반 토질 조건

노반토의 물리적 특성(액성한계, 소성지수, 입도분포)은 노반 분니발생에 많은 영향을 주게 된다. 일본 철도기술연구원(RTRI)은 다음 4조건을 동시에 만족하면 분니가 발생하기 어려운 토질조건이라는 연구결과를 발표하였다.

- 1.#40체 통과율 70%미만
- 2.(#200체 통과율/#40체 통과율)의 비 65%미만
- 3.액성한계 35%미만
- 4.소성지수 9미만

이에 의하면 노반토질의 연경도(Consistency)와 입도가 분니 발생에 밀접한 관계가 있다. 즉 가는 모래보다 작은 입경의 흙이 적게 포함되고 소성도가 낮은 토질의 경우 분니가 적게 발생함을 알 수 있다.

표 2 시험에 사용한 흙의 물리적 특성

노반재료	G_s	입도시험			Atterberg Limits		통일 분류법 (USCS)	다짐시험	
		#200 통과량(%)	#40 통과량(%)	유효입경 D_{10} (mm)	w_L (%)	I_p		γ_{dmax} (g/cm^3)	w_{opt} (%)
상부노반	2.75	41.2	78	0.009	38	7.5	SM	1.61	23.0
하부노반	2.70	30.3	58	0.006	23.9	1.5	SM	1.98	11.2

따라서 본 실험에서는 상기의 4가지 조건을 고려하여 실험용 흙을 선정하였다. 표 2는 상부노반과 하부노반 조성 시에 사용한 토질 조건으로 상부노반의 경우 #40체 통과율이 70%를 초과함을 알 수 있다.

상부노반 조성에 사용한 흙은 CL계열의 흙이 SM계열 보다 분리가 발생하기 쉬우나, 실험 시 다짐작업이 쉽지 않은 관계로 수원지역에서 채취한 SM 계열의 흙을 사용하였다.

3.4 실험체 구축 및 계측

실 대형 반복재하실험체 구축 순서는 다음과 같다.

1. 기존에 다짐도 90%이상으로 다져져 있는 노상을 사용하여 실험을 수행하였다.
2. 도상하면으로부터 60cm아래에서 시작하는 하부노반층은 두께 30cm로 두께 15cm씩 단계별로 다짐을 실시하였다. 이 부분에서는 가급적 침하가 발생되지 않고 지반반력계수가 $11kgf/cm^3$ 이상의 다짐조건을 조성하기 위하여 3.5tonf 진동롤러를 사용하여 진동 왕복 5회의 다짐을 실시하였다. 롤러 작업이 어려운 측벽부는 소형 다짐 컴팩트로 충분히 다짐을 실시하였다.
3. 30cm 두께의 하부 노반층이 시공된 후에 방수를 위하여 방수시트를 깔고 아크릴 창을 가진 반력대를 설치하였다.
4. 반력대 설치 후 반력대 하부 경계면을 방수용 실리콘으로 방수 처리 한 후 반력대의 투명 아크릴판 부분과 도상자갈과의 마찰저항을 최소화하기 위하여 아크릴판의 표면에 투명 그리스를 바르는 작업을 수행하였다.
5. 도상아래 30cm 구간의 상부 노반층도 두께 15cm씩 단계별로 다짐을 실시하였다. 상부노반의 경우 지반반력계수가 $7kgf/cm^3$ 인 다짐조건을 조성하기 위하여 3.5tonf 진동롤러를 사용하여 왕복 2회 다짐을 실시하였다.
6. 상부노반의 다짐이 완료된 후 토압계와 7개와 침하판 6개를 그림 9와 같이 각각의 정해진 위치에 설치하고 상부 노반면에서 다짐도를 파악하기 위하여 들밀도 시험, DCP 시험과 함수비 측정 시험을 실시하였다. 간극수압 측정을 위한 간극수압계와 가속도계는 설치하지 않았다.

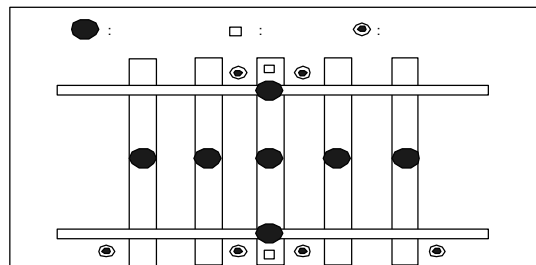


그림 10 계측기 배치도

7. 도상자갈의 거동을 사진 촬영으로 파악하기 위하여 반력대의 투명 아크릴판면 안쪽에 조립식

박스형의 공간(폭 1m, 두께 10cm)을 만들고 나머지 부분은 도상자갈을 25cm 두께로 포설하였다. 도상두께의 경우 분니 발생에 큰 영향을 주므로 1급선 설계기준인 30cm 보다 적은 두께로 결정하였다. 도상자갈은 일반 국철 현장에서 사용되고 있는 쇄석(22.4mm-63mm)을 사용하였다.

8. 도상자갈 부분을 충분히 다짐기로 다진 후 5개의 침목으로 만들어진 궤광을 거치시킨 후에 침목 높이까지 도상자갈을 추가로 부설하였다.

9. 박스형의 공간에 도상자갈 거동의 가시화가 가능하도록 색깔을 표시한 자갈을 채워 넣었다.

10. 시험에 사용된 8개의 변위계(침하계용 변위계 6개+침목 변위계 2개)를 토조에 고정된 강제 프레임에 설치하였다.

3.5 실험 결과의 해석

분니 현상은 도상자갈이 노반 면으로 관입하면서 시공기면을 파괴하고 이 과정에서 새로이 생성된 파괴 면에 물이 고이기 쉬운 조건을 형성하면서 노반 흙을 재성형하는 단계를 거치면서 뜬 침목 상태가 된 침목의 상하운동으로 인하여 펌핑 작용의 결과로 발생한다.

실험 결과 관찰 면인 아크릴 표면에서 2~3cm 정도의 이토 상승과 자갈 관입 현상을 확인할 수 있었다. 그리고 인력 굴착에 의하여 도상 하면의 분니발생을 확인해 본 결과 그림 11과 같이 5~7.5cm 정도의 분니가 발생함을 확인할 수 있었다. 체수높이가 10cm인 점을 감안하면 분니가 충분히 발생했다고 볼 수 있다. 사진 확인 결과 시험도중 아크릴면의 자갈의 이동량은 대략 1~2cm 정도에 불과 했다. 이는 침목과 아크릴 면까지의 거리가 10cm 정도로 떨어져 있어서 작용하는 하중이 작았기 때문이라고 판단된다.

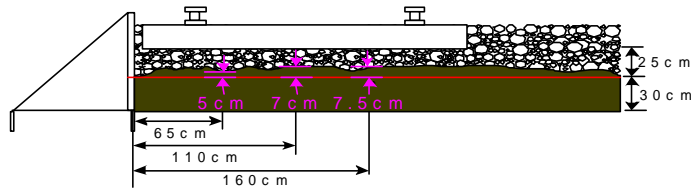


그림 11 실험 후 지점별 분니발생 높이

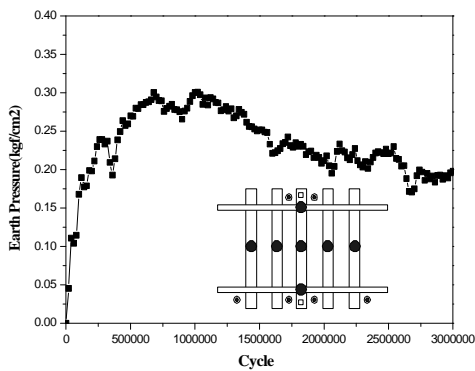


그림 12 반복재하에 따른 연직토압

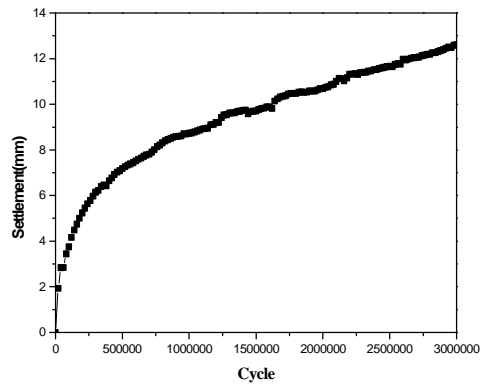


그림 13 반복재하에 따른 침하량

300만회의 시험 동안 레일 직하부에 작용하는 토압은 $0.2 \sim 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ 의 범위에 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 침목 상면에 거치한 변위계의 침하량은 최대 12mm 정도까지 지속적으로 증가함을 알 수 있었다. 토압과 침하량 모두 살수 시점에서 측정값의 변화를 보여주고 있다. 현재 토압과 침하량에 대한 실험 결과를 자세히 분석 중이며 차후에 발표할 예정이다.

4. 결론

1. 가는 모래와 세립분을 70% 이상 함유한 SM계열의 노반 흙으로 분니 재현 실험을 수행한 결과 체수조건이 10cm 인 상태에서 5~7.5cm 정도의 분니가 발생함을 확인할 수 있었다. 그리고 노반으로의 자갈관입 현상을 확인 할 수 있었다.

2. 300만회의 시험 동안 지반반력계수가 7kgf/cm^3 인 레일 직하부에 작용하는 토압은 $0.2\sim 0.3\text{kgf/cm}^2$ 의 범위에 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 침목 상면에 거치한 변위계의 침하량은 최대 12mm 정도까지 지속적으로 증가함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 이진욱, 김대상(2003), “철도연약노반 강화기술개발 및 구조물과 토공접합부 보강기술개발”, 보고서, pp 57, 한국철도기술연구원
2. 이노우(1983), “철도노반의 분니현상의 해명과 그 방지대책”, 일본철도기술연구소
3. Ernest T. Selig(1994), “Track Geotechnology and Substructure Managment”