

## 자갈궤도와 콘크리트궤도에서의 하중재하에 따른 노반거동 비교

### A Comparison of Behavior of the Roadbeds of Ballasted & Concrete Track with the Cyclic Loading

최 찬 용<sup>1\*</sup> Choi, Chan-Yong

이 성 혁<sup>2</sup> Lee, Sung-Heok

엄 기 영<sup>3</sup> Eum, Ki-Young

#### ABSTRACT

The track systems installed in Korea railway consist of two types on ballasted track or ballastless track. In this study, it was compared with difference of the behaviors at roadbed with cyclic loading through full scale model test. From the results of model tests, loading distribution ratio of the concrete slab track become more widely distributed than ballasted track, and loading distribution ratio at concrete track was about 30:20:15. The concrete slab track is likely to behavior of the rigid plate, while ballasted track is such as flexible pavement. The vertical stresses of upper roadbed with traffic cyclic loading in concrete track were measured about 30 kPa or less. It was a scene very similar to the results of the field train running test. The vertical stress at concrete track was occurred approximately 4 times smaller than ballasted track. Also, the soil velocities with cyclic loading at the slab track were occurred about 0.3 cm/sec or less, its 8 times smaller than ballasted track.

#### 요 지

국내에 적용하고 있는 궤도시스템은 크게 자갈궤도와 콘크리트궤도로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 콘크리트궤도와 자갈궤도의 노반 거동현상을 실험적으로 비교하였다. 실 대형 실험결과 하중 분산은 자갈궤도의 경우 연성포장구조, 콘크리트궤도는 강성포장구조의 형태로 하중이 분산되었으며 하중배분율은 약 30%:20%:15%로 자갈궤도보다 폭 넓게 분산되었다. 열차하중에 대한 노반에서 발생된 토압은 약 30kPa 이내로 기존 실차주행시험결과와 유사한 결과이며 자갈궤도에 비해 약 4배 정도 작게 발생하였다. 또한 반복하중에 대한 콘크리트궤도의 지중입자속도는 약 0.3cm/sec 이내로 자갈궤도보다 8배 정도 작게 측정되었다.

**Keywords** : Concrete track, Ballasted track, Behavior of roadbed, Full scale model test, Settlement

#### 1. 서 론

국내에서 사용하고 있는 궤도형식은 크게 전통적인 자갈궤도와 고속선과 지하철에서 적용하고 있는 콘크리트궤도로 구분할 수 있다. 과거에는 주로 자갈궤도가 시공되었으나, 2000년대 이후 사용성과 유지보수 작업 등 전과정 생애주기(LCC)를 고려하여 유지보수 작업이 거의 필요하

지 않는 콘크리트궤도로 시공되고 있다. 특히, 국내에서도 경부고속철도 2단계(대구→부산)와 호남고속철도에서는 콘크리트궤도를 적용하여 2011년부터는 콘크리트궤도로 운행할 예정이다.

콘크리트궤도는 자갈궤도에 비해 초기 투자비용은 많이 소요되지만 유지보수 비용이 거의 필요하지 않는 장점 때문에 향후 더 많이 활용될 것으로 판단된다. 이처럼 콘

1\* 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior researcher, Depart. of Railway Structure Research., KRRI, E-mail: cychoi@krii.re.kr)

2 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원 (Member, Chief researcher, Depart. of Railway Structure Research., KRRI)

3 비회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 책임연구원 (Non-Member, Chief researcher, Depart. of Railway Structure Research., KRRI)

크리트궤도의 사용이 급증함에 따라 콘크리트궤도 구조뿐만 아니라, 궤도구성품의 인터페이스에 대한 정확한 성능 검증을 실시하여 한국지형에 맞는 최적화된 설계, 시공 방법을 개발하여야 한다.

김영호 등(2008)은 점성토와 사질토지반 2종류에 대하여 콘크리트궤도와 자갈궤도로 모델링하여 지반물성 변화에 따른 침하거동을 비교하였다. 이일화 등(2006)은 현장에 부설된 콘크리트궤도를 대상으로 45km/h의 실차열차 주행시험결과, 레일변위는 약 0.6mm 발생하고, TCL(Track Concrete Layer)층을 지지하는 콘크리트층(HSB)상부에서 약 0.12mm 발생하며, 이는 대부분 레일과 레일체결장치에서 발생한다고 하였다. 또한 강화노반 상부의 토압은 약 12kPa의 범위로 매우 미미하게 발생하며, 자갈궤도의 토압 측정값 60kPa보다 약 5배 정도 작다고 보고하였다. 이성혁 등(2002)은 실 대형으로 슬래그노반을 구축하여 정적하중과 반복하중을 재하하여 노반응력, 변위 등을 정량적으로 비교하였다. 홍철기 등(2007)은 차량-슬래브궤도 상호작용 해석을 수행하여 속도별로 흙노반상의 콘크리트궤도의 허용침하량 기준을 만족할 수 있는 한계속도를 검토하여 속도변수에 따른 콘크리트궤도의 허용침하량 기준을 산정하였다.

국외에서는 이미 슬래브궤도는 많은 연구가 진행되고 있으며, 열차속도 증속에 대하여 보다 안정성을 확보하고 탄성력을 가질 수 있는 궤도시스템이 개발되고 시공되고 있다. 지반측면에서 보면, 양호한 지반뿐만 아니라 연약한 지반 상에서의 콘크리트궤도의 안정성을 평가하고 이를 확대적용하려는 연구가 많이 진행되고 있다. 일본에서는 Momoya 등(2009)은 점성토지반에서 상부표층과 RC노반(Reinforced concrete)으로 보강하여 콘크리트궤도의 안정성을 실험과 수치해석으로 평가하였다. 그 결과 상부표층 보강지반에서 콘크리트궤도의 안정성을 충분히 확보할 수 있으며 변위 측면에서도 기준 이내로 억제할 수 있어 적용 가능한 공법이 될 수 있을 것이라고 발표하였다. 이와 같이 콘크리트궤도는 앞으로 새롭게 건설되는 철도현장에서 많이 채택할 것으로 판단되며, 콘크리트궤도의 노반 거동을 정량적으로 평가하여 경제적이며 합리적인 설계방법을 제시할 수 있도록 기술수준을 발전시켜야 할 것으로 판단된다. 따라서 이 논문에서는 콘크리트궤도에 대하여 자갈궤도와 비교하여 열차하중에 따른 선로 종방향 하중배분율과 하중재하방법에 따른 노반의 응력, 침하량을 정량적으로 비교하였다. 또한 지중 입자속도를 측정하여 노반 깊

이별 열차진동에 따른 감쇄정도와 궤도형식에 따른 지반 입자속도의 특성을 평가하였다.

## 2. 실대형 모형실험 조건

### 2.1 모형지반 조성

모형지반의 크기는 2.4m(높이)×5.1m(길이)×4.2m(폭)의 단선조건으로 모형지반을 조성하였다. 콘크리트궤도는 그림 2에서와 같이 2층으로 궤도슬래브와 콘크리트노반으로 구성되며 궤도슬래브는 레일과 침목매입식 현장타설 콘크리트 방식으로 콘크리트 강도는 35MPa의 강도를 가지도록 하였다. 궤도슬래브를 지지하는 콘크리트노반은 3.8m(폭)×5.0m(길이)로 15MPa의 강도를 가지고 상부의 하중을 하부에 분산시키는 역할을 하도록 하였다. 궤도슬래브와 콘크리트노반 사이에는 구조물이 일체식으로 거동하게 하기 위하여 충전 콘크리트를 사용하였으며, 충전 콘크리트는 무수축 조강시멘트를 15%정도 배합하여 시공균열을 방지하였다.

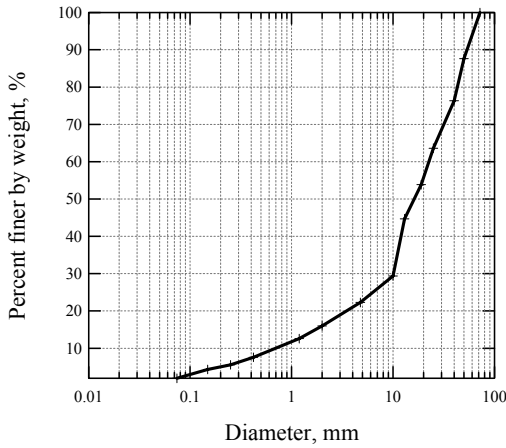
실험에 사용된 노반재료는 터널에서 채취한 시료를 최대입경이 75mm이하의 재료만 사용하였다. 노반의 한층 다짐높이는 15cm로 하고, 중량비로 함수비와 토사를 소정의 다짐정도를 가질 수 있도록 소형진동다짐기를 이용하여 층별 다짐을 실시하였다. 실험조건에서 가정된 노반의 지지력은 4가지 케이스로 소정의 다짐도를 가질 수 있도록 다짐회수로 조정하였다. Case 1의 경우 1층 다짐에 5회, Case 2의 경우 10회, Case 3 실험조건은 15회로 하였으며, Case 4는 10회 다짐회수로 평균함수비가 23%가 되도록 시험단면을 조성하였다. 층별 다짐이 완료되면 들밀도 시험을 통해 층별 함수비와 건조단위중량을 체크하고 이를 전체적으로 산술평균하여 평균함수비와 평균건조단위중량을 구하였다.

표 1은 실험에 사용된 흙에 대한 기본물성과 역학시험 결과를 정리하였다. 흙의 강도정수는 직접전단시험으로 구하였다. 그림 1은 대상 시료의 입도분포곡선과 다짐곡선으로 입도분포곡선을 보면 최대입경은 75mm미만이며 200번체 통과량 2%, 4번체 통과량 22.3%, 균등계수(Cu)와 곡률계수(Cg)가 각각 26.6, 13.2로 통일분류법에 의하면 GW의 시료이다.

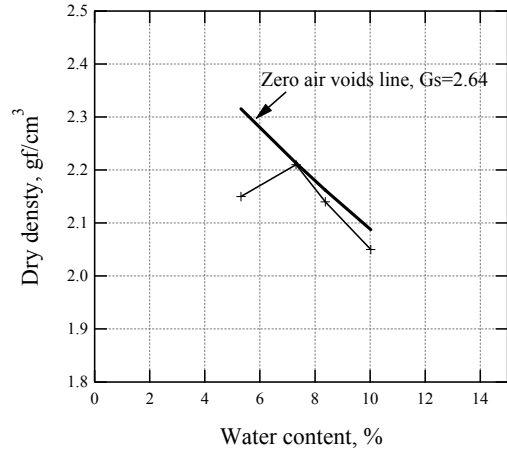
그림 2(a)는 실험지반에 매설된 계측기 단면도이다. 그림에서와 같이 토조내부에는 토압계와 지중침하판, 그리고

표 1. 현장채취의 시료에 대한 물성시험결과

시험종류	시험결과	시험종류	시험결과
체분석	$D_{10}=0.62\text{mm}$ $C_u=26.6$ , $C_c=13.2$ $F_{200}=2\%$ , $F_{40}=7.7\%$	다짐시험	최대건조단위중량 $=22.3\text{kN/m}^3$ 최적함수비 7%
비중시험	$G_s=2.64$	전단시험	내부마찰각 $31.4^\circ$ 점착력: $34\text{kPa}$
		LA마모시험	마모율= $16.3\%$

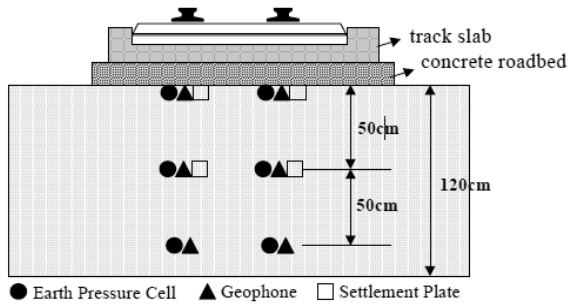


(a) 입도분포곡선

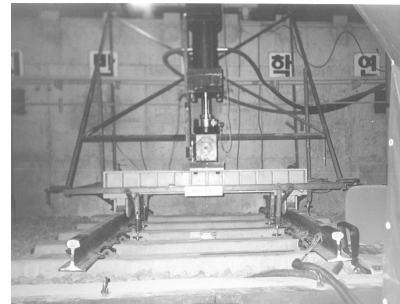


(b) 다짐곡선

그림 1. 대상시료의 입도분포곡선과 다짐곡선



(a) 실험지반의 계측기 매설위치



(b) 시험구체의 하중재하 단계

그림 2. 실험지반 및 계측기 매설도

속도계를 하중재하 직하부에 노반상부, 노반기준면에서 (-)50cm, (-)100cm에 각각 설치하였다. 궤도에서는 레일 변위를 측정할 수 있는 변위계와 궤도슬래브에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 그림 2(b)는 노반과 궤도슬래브, 그리고 콘크리트노반이 조성완료이후 하중을 거치시켜 하중재하 직전의 전경이다.

표 2는 지반내에 매설된 계측기의 사양과 한계용량으로 계측기에서 측정된 데이터를 데이터로거를 통해 저장하고 신호분석을 수행하여 분석하였다.

## 2.2 실험조건

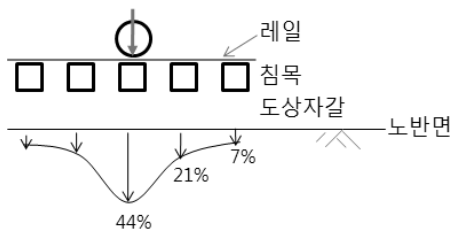
표 3은 실험조건별 지반의 지지력과 평균함수비, 현장단위중량이다. 지반의 지지력은 노반 최상부에서 평판재하시험으로 구하였다. 표에서와 같이 지반의 조건은 총 4가지 조건으로 연약, 보통, 우수지반으로 분류하였다. Case 3은 지반지지력이 가장 우수한 노반이며, Case 1은 가장 연약한 지반조건으로 지반반력계수가  $60\text{MN/m}^3$ 이 되도록 하였다. Case 4의 경우는 보통지반 조건에서 함수비를 23%가

표 2. 계측기 및 측정장비

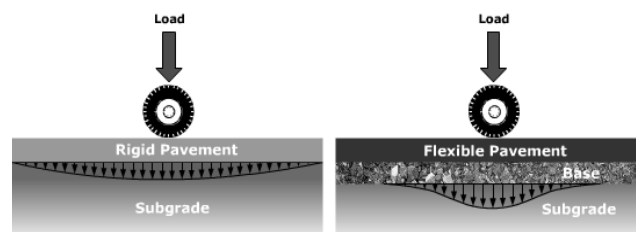
사용센서	측정항목	용량	계측장비
LVDT	침하량	50mm	EDX-1500A SA 390
토압계	토압	200kPa, 500kPa	
속도계	지중속도	GS-11D	

표 3. 실험조건별 지반의 지지력 측정결과

실험명	실험지반의 $K_{30}(MN/m^3)$	평균현장단위 중량( $kN/m^2$ )	평균 함수비(%)	비교
Case 1	60	21.8	5.78	연약
Case 2	107	22.5	6.26	보통
Case 3	203	23.7	6.54	우수
Case 4	71	22.0	23.0	보통



(a) 자갈궤도에서의 하중분산



(b) 도로포장구조에서의 하중분산

그림 3. 차량하중에 따른 노반상부에서의 하중분포

되도록 지반을 조성하였다.

반복재하시험에서 하중재하횟수와 하중재하주파수를 산정하기 위하여 고속철도의 일반객차의 대차간 간격을 고려하여 산정하였다. 하중재하주파수는 식 (1)을 이용하여 고속철도의 대차간의 간격 15.7m, 최고속도인 300km/h를 고려하여 구하면 5Hz로 이 값을 하중재하주파수로 산정하였다. 반복재하횟수는 열차통과톤수 17MGT으로 가정하여 1000만회 재하하였다.

$$f = 1/T = V/d \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 재하진동수,  $T$ 는 통과주기,  $d$ 는 대차간 거리,  $V$ 는 열차주행속도이다.

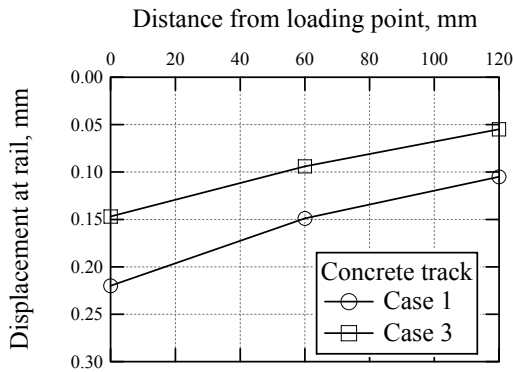
하중재하방법으로는 정적하중과 반복하중으로 정적재하의 경우 최대 정적재하하중을 300kN까지 재하하였으며 정적하중 150kN까지는 단계하중을 30kN씩 재하시키고, 150kN이상에서는 50kN씩 단계하중을 재하하였다. 반복하중의 경우에는 정현파하중으로 최대하중 310kN, 최소하중은 10kN으로 재하하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

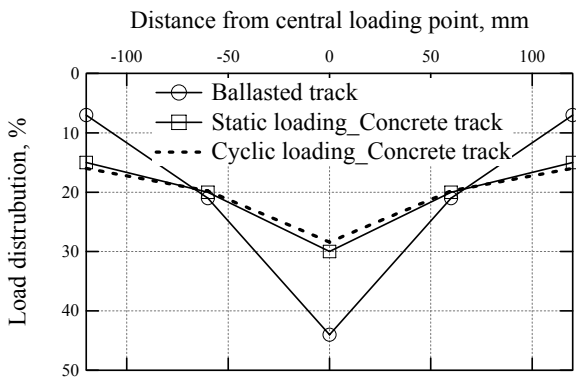
#### 3.1 하중재하에 따른 선로 종방향 하중분산 효과

일반적으로 자갈궤도의 경우 열차하중이 작용하면 궤도의 강성으로 인해 인접 침목으로 그림 3(a)에서와 같이 선로 종 방향으로 하중이 분산되며, 국내에서 측정된 실험결과를 보면 44%:21%:7%로 하중이 분포된다고 하였다(황선근 등, 2002; 최찬용 등, 2007; 한국철도기술연구원, 2007). 그림 3(b)은 연성포장구조와 강성포장구조의 하중분산형태이다. 그림에서와 같이 콘크리트 포장구조의 경우 강성이 큰 슬래브를 통해 하중이 넓게 분산되는 형태를 보이고, 연성포장구조의 경우 재하된 지점에서의 하중이 가장 크고, 주변으로 하중이 분산되는 특징을 가지고 있다. 철도의 자갈궤도와 비교해 보면 도로의 연성포장구조와 같은 거동을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

그림 4(a)는 콘크리트궤도에서의 최대정적하중 재하에 따른 레일변위 특성이다. 최대 정적하중 150kN 작용할 때 지반의 지지력이 60kN/m<sup>3</sup>과 203kN/m<sup>3</sup>의 경우 최대 레일 변위는 약 0.22mm, 0.15mm로 노반의 지지력이 커짐에 따라 레일의 변위가 작아지며 약 30%정도 감소되었다. 설



(a) 지반의 지지력에 따른 하중분산



(b) 자갈궤도와 콘크리트궤도의 하중분산

그림 4. 노반지지력 변화에 따른 레일변위와 하중분배율 비교

계기준에서 콘크리트궤도의 열차하중에 의한 허용 침하량은 5mm로 이 기준과 비교해 볼 때 설계기준에 여유가 많은 것을 알 수 있다. 그림 4(b)는 정적하중 재하에 따른 자갈궤도와 콘크리트궤도의 하중분배율을 비교하였다. 콘크리트궤도의 경우 침묵하중분배율은 30%:20%:15%로 자갈궤도와 비교할 때 더 넓게 하중이 분배되고 재하 침묵에서 3번째 침묵에서도 약 15%정도로 7% 정도를 받는 자갈궤도보다 약 2배 정도 크게 발생하였다.

### 3.2 하중재하에 따른 토압 및 침하특성

그림 5는 콘크리트궤도에서 반복하중재하시 지반의 지지력 변화에 따른 노반 침하특성이다. 현행 설계기준에서 요구하고 있는 지지력 만족기준은  $11\text{MN/m}^3$  이상으로 그림에서와 같이 설계기준 이하의 경우에는 노반 침하가 많이 발생하고, 기준 이상의 지지력이 확보할 경우 노반의 침하가 작게 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 노반의 지지력이  $7\text{MN/m}^3$ 의 경우 노반 상부의 침하량은 약 0.3mm로 약 0.025% 변형률이 발생하고, 노반기준면(F.L) 아래로

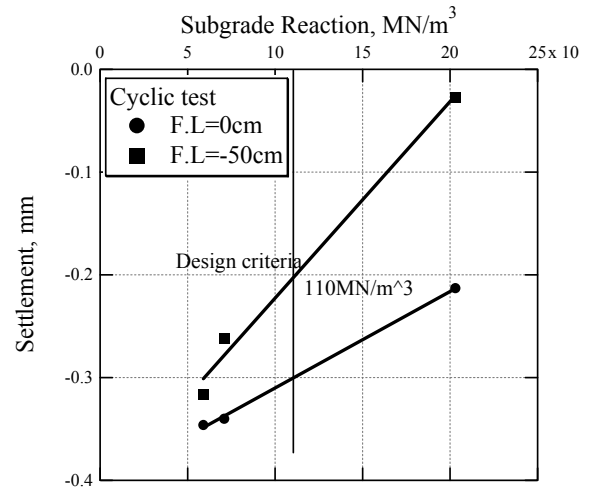


그림 5. 콘크리트궤도에서의 지반의 지지력조건에 따른 노반의 침하거동

(-)50cm 부근에서는 0.016% 발생하였다. 자갈궤도에 대한 수치해석 결과 노반의 탄성계수가 90MPa의 경우 노반 상부에서 발생하는 변형률은 약 0.046% 정도이며, 이 값과 비교해 볼 때 콘크리트궤도의 경우 자갈궤도 보다 약 2배 정도 변형률이 작게 평가될 수 있다[1]. 따라서 콘크리트궤도의 경우 슬래브의 강성에 의해 하중이 넓게 분산되고 노반에 발생하는 침하와 토압이 작게 발생하기 때문에 장기적으로 노반의 열화정도가 자갈궤도에 비해 작아지는 특징을 확인할 수 있었다.

그림 6은 콘크리트궤도에서의 정적하중과 반복하중에 따른 침하, 토압특성이다. 그림에서와 같이 반복하중이 정적하중보다 더 큰 토압과 침하가 발생하였으며, 특히 침하 차이는 더 크게 나타났다. 일반적으로 자갈궤도의 경우에는 하중재하 지점에서 반복재하횟수가 증가함에 따라 침묵 들뜸 현상으로 인해 침하와 토압이 감소하는 특징을 가지고 있다. 그러나 콘크리트궤도의 경우 침묵 들뜸 현상이 없기 때문에 반복재하횟수가 증가함에 따라 토압과 침하가 커지는 특징을 보였다. 이러한 침묵 들뜸 현상은 레일의 충격하중과 침묵의 휨 응력을 증가시키는 요인으로 발생하며, 궤도틀림이 발생하는 등 주기적으로 유지관리를 하여야 하는 취약한 개소로 분류된다. 따라서 콘크리트궤도에서는 이러한 문제를 가지고 있지 않기 때문에 장기적으로 우수한 성능을 유지하고 궤도보수 등이 필요 없는 것으로 판단된다. 콘크리트궤도에서 노반기준면(F.L=0m)과 기준면 아래 (-)50cm에서 침하는 레일변위에 대하여 각각 31.8%, 10%로 감소하였다. 황선근 등(2002)이 발표한 논문에서 자갈궤도의 경우 레일변위의 약 40%가 노반상부

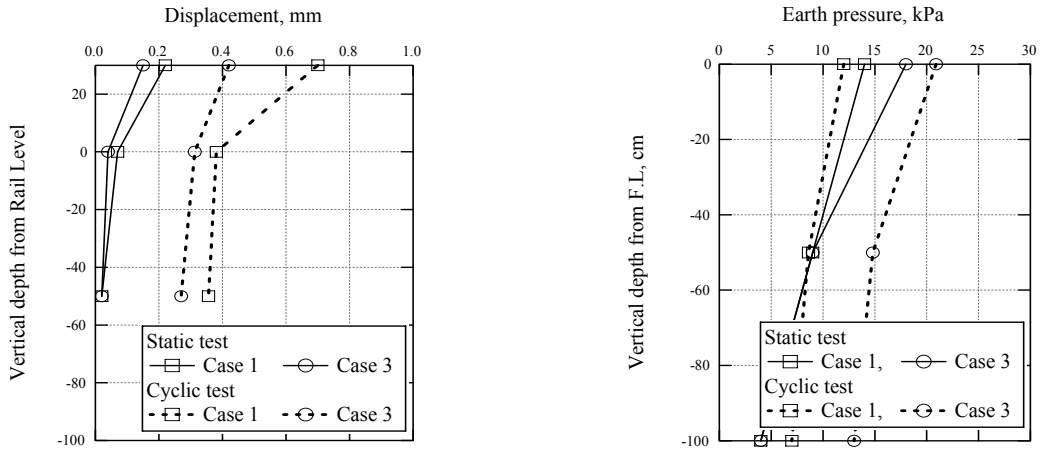


그림 6. 콘크리트 궤도에서의 반복하중과 정적하중재하에 따른 변위와 토압 분포

표 4. 경부선 평택구간 측정된 지중속도(화물열차)

노반	구분	위치	지중속도(cm/sec)	속도감소율(%)
슬래그 30cm		F.L.=0m	2,621	100
		F.L=(-)30cm	0,726	27.7
슬래그 50cm		F.L.=0m	1,758	100
		F.L=(-)50cm	0,523	29.7
슬래그 80cm		F.L.=0m	1,506	100
		F.L=(-)80cm	0,455	30.2

에서 발생하고, 노상부에서는 약 18%이하로 감소한다고 발표한 바 있다. 이러한 결과와 비교할 때 콘크리트궤도가 자갈궤도보다 노반의 변위를 상대적으로 더 감소시키고 있는 것을 알 수 있다. 결국 콘크리트궤도는 노반에서 경험하는 응력이 작기 때문에 동일한 노반토를 사용할 경우 자갈궤도 조건보다 노반 허용응력이 상대적으로 작기 때문에 노반의 반복하중에 따른 장기적 측면에서 유리한 구조가 될 수 있는 것이다.

그림 6은 정적하중 재하에 따른 콘크리트궤도에서 토압 특성으로 노반상부의 토압은 약 14~18kPa범위를 나타냈으며, 경부선 자갈궤도의 실측결과와 비교해 보면 하부노반에 작용하는 토압은 20~60kPa으로 이 값보다 약 5배 정도 작게 발생하였다(이일화 등, 2006). 노반 아래의 토압분포를 보면 노반기준면 (-)50cm에서 약 9kPa, (-)100cm에서는 약 4kPa으로 노반상부 토압의 약 64%와 28.6% 정도 발생하였다. 반복재하시험에서는 토압은 노상상부, (-)50cm, (-)100cm가 각각 20.9kPa, 14.8kPa, 13kPa으로 반복하중이 정적하중보다 더 큰 값을 보이고 있다. 이일화 등(2006) 현장실측시험결과 상부노반에서 토압범위는 12.2

~12.4kPa으로 이와 거의 유사한 범위로 발생한 것을 알 수 있다.

### 3.3 반복하중에 따른 지중속도 특성

표 4는 경부선 자갈궤도 구간에서 측정된 화물열차 통과에 따른 깊이별 지중속도변화이다. 표에서와 같이 도상 아래 부분에서의 지중속도는 약 1.51~2.56cm/sec정도로 측정되었으며, 노반깊이가 깊어짐에 따라 점차적으로 감소하는 특징을 보였다. 노반기준면에서 (-)80cm 지점의 지중속도는 약 0.46cm/sec으로 노반상부의 지중속도의 약 30%정도 발생하였다. Dvorak(1962)가 제시한 주거구조물에 대한 발파영향평가를 위한 지중속도에 따르면 발파 진동에 대하여 안정 값으로 1cm/sec, 그리고 주의를 요하는 한계치로서 3cm/sec을 제시한 바 있다. 이 기준과 비교해 볼 때 상부노반의 지중속도는 주의를 요하는 한계치와 근접한 값을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 7은 실대형 실험에서 측정된 노반상부와 노반기준면에서 (-)50cm, (-)100cm의 지중속도 분포이다. 그림에

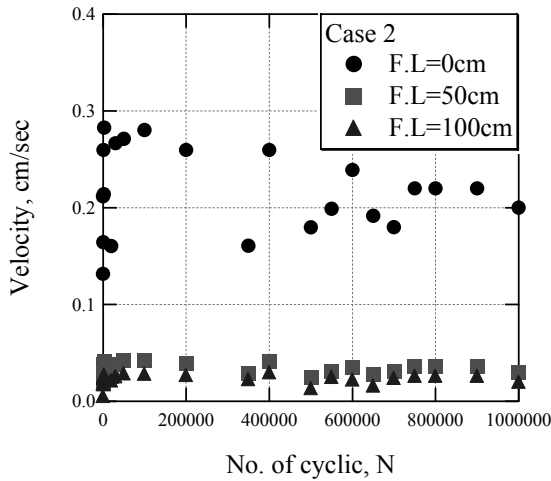


그림 7. 반복하중에 따른 지중속도변화(Case 2)

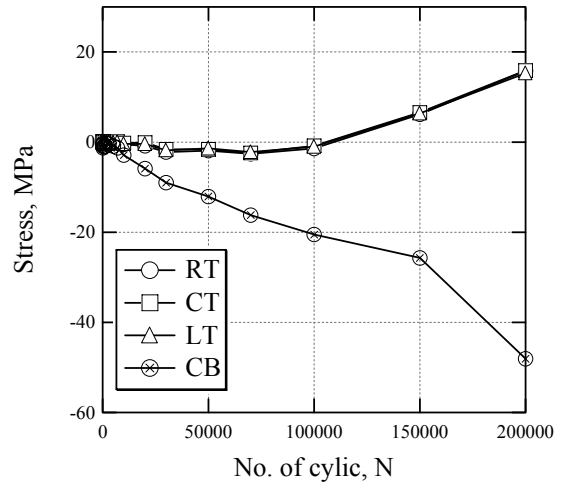


그림 8. 슬래브내부 이형철근의 반복하중에 따른 응력변화

표 5. 자갈궤도와 콘크리트궤도의 노반거동 비교

노반거동	자갈궤도	콘크리트궤도
선로 종단 하중배분율	44%:21%:7%	30%:20%:15%
열차하중에 대한 도상의 응력분포형태	등분포하중	등분포하중
노반상부에서의 변형률	0.046%	0.025%
노반상부에서의 토압	100kPa <sup>1)</sup>	30kPa 이내
레일변위에 대한 노반상부에서의 침하율	40%	31%
반복하중에 따른 노반상부의 진동속도	1.51~2.6cm/sec <sup>1)</sup>	0.12~0.3cm/sec

주) 현장계측결과임

서와 같이 노반상부의 반복하중에 따른 지중속도의 분포는 약 0.12~0.3cm/sec으로 이는 앞서 자갈궤도에서 측정된 결과보다 약 8배 정도로 이는 자갈궤도의 (-)80cm에서 측정된 0.45cm/sec와 거의 비슷한 값이다. 콘크리트궤도의 경우 자갈궤도보다 도상의 강성이 크기 때문에 열차하중이 넓게 분산되어 노반상부에서 발생하는 토압이 작게 발생하고 이에 따라 입자속도도 작게 발생하는 것으로 판단된다. 이러한 콘크리트궤도와 자갈궤도의 노반 거동차이로 인해 열차의 반복하중과 같은 장기적으로 자갈궤도보다 유리할 수 있는 것으로 판단된다.

표 5는 앞서 검토된 노반거동에 대하여 자갈궤도와 콘크리트궤도의 특징을 비교하였다. 표에서와 같이 자갈궤도보다 콘크리트궤도에서 더 작은 응력, 침하, 진동속도 등을 보이고 있으며, 이러한 궤도의 차이로 인해 자갈궤도보다 우수한 품질을 가지는 콘크리트궤도가 가능한 것으로 판단된다.

### 3.4 반복하중에 따른 콘크리트궤도의 철근 응력

반복하중에 따른 콘크리트내부의 이형철근의 응력변화

를 측정하였다. 이형철근은 상·하부면을 매끄럽게 처리한 후에 스트레인지지를 부착하였다. 게이지 부착위치는 하중재하 직하부에 각각 1개씩 부착하였고, 중앙에 1개 부착하였다(그림 8 참조).

그림 8은 반복하중에 따른 콘크리트내부의 이형철근의 응력 변화이다. 그림에서 RT와 LT는 하중재하의 오른쪽과 왼쪽 직하점이며, CT와 CB는 하중직하 지점의 중앙부에 위 부분과 아래에 부착된 지점이다. 그림에서와 같이 CB지점을 제외한 3개의 지점에서 반복하중에 따라 거의 같은 거동을 보이고 있으며, 이러한 결과를 볼 때 콘크리트 전단면에서 열차하중이 골고루 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 자갈궤도와 같이 하중재하 지점에서만 응력이 집중되는 것이 아니라 슬래브 전체가 하중을 분산시켜 등분포하중으로 작용하고 있는 것을 간접적으로 알 수 있다.

철근의 응력변화를 보면 초기에는 (-)의 압축력을 받다가 반복재하횟수가 증가함에 따라 (+)인장력을 받는 것을 알 수 있다. 이러한 특징은 초기에는 콘크리트 자체의 강성으로 받다가 반복하중이 증가함에 따라서 철근에서도

하중을 받는 것으로 판단된다. 이형철근 하부에 부착된 CB 지점의 경우 반복하중이 증가함에 따라 점진적으로 증가하다가 100만회 재하시점에서 약 48MPa 정도의 (-) 응력이 발생하고 있다.

#### 4. 결론

앞으로 국내 철도건설 시장은 자갈궤도보다 장기적으로 유리한 콘크리트궤도로 시공할 것으로 판단된다. 이에 대하여 콘크리트궤도를 실물 크기로 조성하여 자갈궤도의 노반 거동과 차이를 정량적으로 비교하여 노반에서의 응력, 지중 속도, 침하량 등을 비교하였다.

- (1) 자갈궤도에 비해 콘크리트궤도의 경우 콘크리트의 강성에 의해 열차하중이 넓게 분포되며, 선로 종방향 하중배분율이 약 30%:20%:15%로 자갈궤도의 약 44%:21%:7%보다 더 넓게 하중이 분산시키고 있는 것을 확인하였다. 또한 노반상부에 측정된 최대토압은 약 30kPa으로 자갈궤도에 비해 약 4배 정도 작게 발생하였다.
- (2) 콘크리트궤도에서 정적하중과 반복하중에 따른 레일변위와 노반응력은 반복하중이 더 크게 발생하고 있다. 자갈궤도에서는 반복하중에 따라 하중이 재하된 침묵에서 들뜸현상으로 인해 반복하중이 정적하중보다 더 작은 응력과 침하 결과가 나타나지만, 콘크리트 궤도에서는 침묵 들뜸 현상이 발생하지 않기 때문에 반복하중이 더 크게 발생하였다. 따라서 열차의 반복하중에 대한 궤도의 열화진행 특성이 다르기 때문에 콘크리트궤도의 경우 장기적으로 유리한 구조특성을 가지고 있다.
- (3) 하중에 따른 지중 응력 거동은 콘크리트궤도와 자갈궤도 거의 차이가 없으며, 열차하중이 궤도를 통해 노반에 작용하는 하중이 크고 작음에 따라 달라지는 특징을 가지고 있다.
- (4) 지반입자속도는 콘크리트궤도 경우 노반상부에서 약 0.3cm/sec 이내로 발생하였으며, 이는 자갈궤도와 비교해 볼 때 약 8배 정도 작은 것으로 나타났다.

즉, 콘크리트궤도보다 강성이 작은 자갈궤도는 도상에 의해 하중이 분산되어도 거의 직접적으로 노반에 작용하며, 콘크리트궤도의 경우 열차하중이 열차하중에 따른 노반의 진동영향이 매우 작기 때문에 노반의 장기간 안정성 측면에서 자갈궤도보다 매우 유리하고 생력화된 구조가 될 수 있는 것으로 판단된다.

- (5) 콘크리트궤도에 매설된 이형철근의 응력측정 결과 하중재하 지점에서의 응력변화와 슬래브 중앙에서 측정된 응력의 차이가 거의 없이 일체화되어 변화하는 것을 확인하였으며, 이는 결국 열차주행시 콘크리트궤도 전체가 지지하여 하중을 골고루 등분포 하중으로 분산되어 노반에 작용하는 것을 알 수 있다.

#### 참고문헌

1. 김영호, 정상섭, 설훈일, 한영아 (2008), “고속철도 궤도종류에 따른 허용침하량 분석”, *한국지반공학학회논문집*, 제24권, 제11호, pp.25-34.
2. 이성혁, 이진욱, 최찬용, 황선근 (2002), “반복하중재하시의 슬래브궤도 노반의 거동특성”, *한국철도학회 학술발표대회논문집*, pp.381-386.
3. 이일화, 이수형, 강운석 (2006), “고속철도 콘크리트궤도용 흙노반의 거동특성”, *한국철도학회 논문집*, 제9권, 제3호, pp.298-304.
4. 최찬용, 이성혁, 황선근 (2007), “철도하중에 따른 강화노반 두께별 토압특성”, *대한토목학회 논문집*, 제27권, 제2D호, pp.217-224.
5. 홍철기, 양신추, 김연태 (2007), “토노반상 콘크리트궤도의 노반허용침하기준설정에 관한 연구”, *한국철도학회논문집*, 제10권, 제3호, pp.355-364.
6. 황선근, 이성혁, 최찬용 (2002), “동적하중 재하시 강화노반 재료별 침하특성”, *한국철도학회지*, 제5권, 제2호, pp.83-89.
7. 한국철도기술연구원 (2007), *토공노반 최적두께 산정을 위한 설계표준 기술연구 보고서*.
8. Dvorak, A (1962), “Seismic Effects of Blasting on Brick Houses”, *Proce Geofvrikeniha Ustance Ceskoslavenski Akademic*, Geofysikalni Sbornik, Vol.169, pp.189-202.
9. Momoya, Y., Sekine, E., Takahashi, T., Maruyama, O. (2009), “Performance Evaluation of Reinforced Concrete Roadbed for slab track on clay subgrade” *QR of RTRI*, Vol.50, No.2, pp.110-115.

(논문집수일 2010. 7. 8, 심사완료일 2010. 8. 11)