

실대형 실험을 이용한 가진주파수 변화에 따른 콘크리트궤도의 동적평가

Dynamic behavior of Track/Roadbed with Loading Frequency in Concrete Track through Full Scale Model Test

최찬용^{1*}, 김현기², 엄기영³, 강운석⁴

Chanyong Choi^{1*}, Hunki Kim², Kiyong Eum³, Yunsuk Kang⁴

¹Member, Senior Researcher, High Speed Railway Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

²Member, Senior Researcher, High Speed Railway Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

³Non-Member, Principal Researcher, High Speed Railway Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

⁴Non-Member, Principal Researcher, High Speed Railway Research Division, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, the full scale model tests were performed with track-roadbed system such as Ho-nam high speed railway. The measured data gives good similar a roadbed pressure with equivalent depth to the Odemark's theory. In the case of earth pressures have a under 50 kPa at upper-subgrade applying 330 kN static loading. Results of cyclic loading tests did not differ significantly from those of static loading test. The elastic displacement at HSB layer has a level of 1/100 compared to the 1 mm that it was evaluation criteria for speed up of High Speed Railway. Elastic displacement at subgrade layer was measured a level of 1/175. The dynamic characteristics of track-roadbed with loading frequency level were linearly increased under 35 Hz, while the wheel loading, displacement and acceleration of roadbed were decreased loading frequency above 35 Hz.

요 지

호남고속철도에 부설된 동일한 궤도노반시스템을 실제 열차하중이 가능한 실대형 가진시험을 통해 성능을 평가하였다. 실험결과 Odemark 등가깊이 이론에 의한 노반압력과 매우 유사한 것을 확인하였다. 콘크리트궤도에서 정적하중 330 kN을 재하시 노반 상부의 토압은 50 kPa 이내로 발생하였고, 정적하중시험과 반복하중시험 결과는 비교적 큰 차이가 없었다. HSB의 탄성변위는 증속시험 시 관리기준값 1 mm에 비해 약 1/100 수준이며, 노반의 탄성변위량과 비교해볼 때 1/175 정도로 매우 작은 변위가 발생하였다. 가진주파수의 크기에 따라 궤도노반의 동적거동은 가진주파수가 35 Hz이하에서는 모든 측정값이 거의 선형적으로 증가하였으나, 35 Hz이상에서는 윤중, 변위, 지반가속도 등이 감소하였다.

Keywords : Track roadbed, Full scale model, Loading frequency, Odemark's theory, Concrete track

1. 서 론

국내 고속철도의 도입으로 철도기술 발전은 높은 수준

으로 발전되었으며, 약 10년간의 고속철도의 운영 경험을 바탕으로 고속철도의 기술이 안정화가 되었다고 볼 수 있다. 특히 정부 1단계 자갈궤도부터 정부2단계 콘크리트궤도로 적용함으로써 철도구조의 대표적인 자갈궤도와 콘크리트궤도를 모두 운영하게 되었다.

현재 철도선진국에서는 고속철도의 기술을 안정성뿐만 아니라 보다 빠른 속도의 기술발전을 요구하고 있다. 국내

Received 9 May. 2014, Revised 11 Sep. 2014, Accepted 18 Sep. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-31-460-5317; Fax: +82-31-460-5289

E-mail address: cychoi@krii.re.kr (C. Choi)

차량기술 개발은 최고속도 430km/h급 차세대고속철도개발 사업이 진행되면서 2012년 시제차량인 HEMU430(이하 해무열차)이 개발되어 시험 운행 중에 있다. 현재 해무열차는 동력분산형 시스템으로 축중이 140kN으로 기존 산천 KTX의 축중 170kN보다 약 30kN 정도 작으며 속도 증가에 따른 발생할 수 있는 여러 인자들을 고려한 차세대 고속열차이다. 고속열차 차량이 400km/h 이상의 속도로 주행할 경우 이는 초당 약 100m 내외의 거리를 주행하는 아주 빠른 속도이다. 또한 고속철도의 최고속도의 증속뿐만 아니라 400km/h의 운영속도를 보유할 수 있는 기술을 확보하여 세계최초 운영속도 400km/h의 인프라 구조물의 요구사항과 성능을 점검하고 이를 설계 기준화하는 연구가 진행 중에 있다. 운영속도의 증속은 최종적으로 표정속도의 증가로 사용자의 편리성과 밀접한 관계가 있으며 보다 많은 철도 이용을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 고속 속도대역에서의 열차하중에 대한 궤도노반과 구조물에 대한 동적거동의 평가는 매우 중요한 설계인자이기 때문에 정확한 평가가 이루어져야 한다. 이 논문에서는 실험실 조건에서 실제 열차의 축중과 차량의 보기와 차축에서 발생 가능한 재하주파수를 실험 변수로 하여 호남고속철도에 부설되어 있는 궤도노반 표준단면에서의 동적거동을 확인하였다.

2. 철도노반의 응력산정과 등가치환 깊이

2.1 노반의 응력산정 및 등가치환 깊이

Fig. 1은 장방형 등분포하중에 의한 지중응력을 계산하기 위한 개략도이며 장방형의 등분포하중에서의 연직응력(증가토압)에 대하여 Boussinesq의 이론에 근거하여 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 이는 열차하중에 의해 궤도로

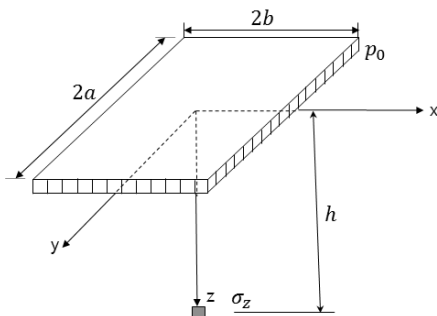


Fig. 1. Undergruund stress with uniformly rectangular distributed stress

전달하여 노반상부에 발생하는 응력을 구하는데 이용된다. 일본에서는 Barber's의 2층계 탄성 해석에 의한 방법으로 강화노반 두께를 결정하는 설계방법으로 이용하였다. 강화노반과 그 아래의 노상으로 이루어진 2층의 지반으로 가정하여 열차하중에 해당하는 동적응중과 도상자갈로 전달되는 하중분산율 등을 고려하여 노반의 변형이 2.5mm가 발생할 때 이 두께를 강화노반 두께로 산정하고 있다. 수식에서 사용되는 노반재료의 탄성계수(변형계수)는 기존 이론과 실험결과를 바탕으로 쇄석과 슬래그노반에 탄성계수를 결정하여 두께를 결정하였다. 국내에서도 Choi et al.(2010)은 자갈궤도와 콘크리트궤도에서 열차하중에 상당하는 정적하중을 재하할 경우 노반상부의 토압은 자갈궤도는 약 100kPa, 콘크리트궤도에서는 약 30kPa 수준이라고 발표한바 있다.

$$\sigma_z = \frac{2P_0}{\pi} \left[\frac{m \cdot n}{\sqrt{1+m^2+n^2}} \cdot \frac{(1+m^2+2n^2)}{(1+n^2) \cdot (m^2+n^2)} + \sin^{-1} \left[\frac{m}{\sqrt{m^2+n^2} \cdot \sqrt{1+n^2}} \right] \right] \quad (1)$$

여기서 σ_z : 연직응력, P_0 : 작용응력, m : a/b , n : Z/b , $2a$, $2b$: 사각형 한 변의 길이, Z : 원점으로부터 깊이이다.

Fig. 2는 호남고속철도에 적용된 콘크리트궤도 표준단면으로 궤도슬래브(TCL)와 콘크리트기층(HSB)으로 구성되어 있다. 콘크리트궤도는 2층 구조이기 때문에 흙 노반의 지지조건을 탄성스프링으로 치환하는 경우에는 Fig. 3, Fig. 4와 같이 등가치환깊이에 따른 노반의 스프링계수(k_s)와 이에 따른 등가깊이(h_e)를 결정하여야 한다. Eisenmann과 Leykauf(2000, 2001)은 Boussinesq이론과 Odemark의 등가깊이이론에 따라 다층구조를 간단하게 산출할 수 있는 방법을 간단하게 식 (3)과 같이 제안하였다.

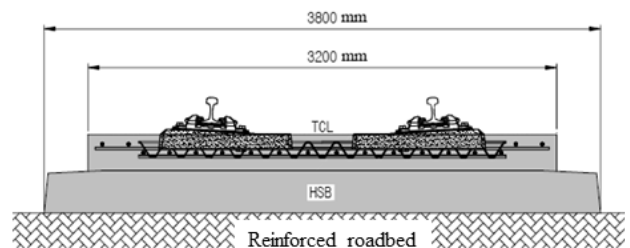


Fig. 2. The diagram of cross-section in Honam HSR

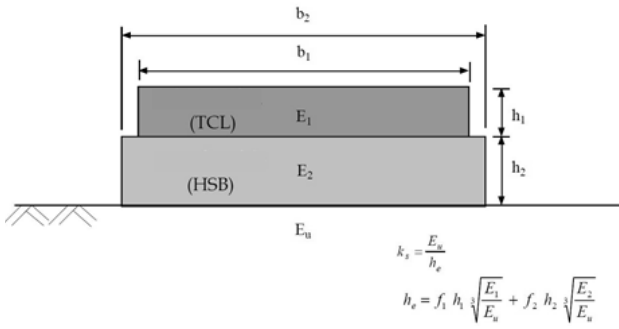


Fig. 3. Boussinesq's theory and spring coefficient with equivalent depth to the Odemark's theory

$$k_s = \frac{E_s}{h_e} \quad (2)$$

$$h_e = \sum_{i=1}^n f_i h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_u}} \quad (3)$$

여기서, k_s : 노반지지 스프링계수(MN/m), h_e : 가상노반 두께(m), h_i : 1번째 층 두께(m), E_i : 1번째 층의 탄성계수(MPa), E_s : 흙노반(강화노반)의 탄성계수(MPa), $E_s = E_{v2}$, f_i : 각 층 결합특성에 관한 상수(역청질 결합 또는 비결합 0.9, 수경성 결합 0.83)이다.

2.2 노반의 허용토압

열차하중에 의해 발생하는 노반의 토압은 중요한 설계

인자중에 하나로서 여러 나라에서 노반의 허용응력을 고려하고 있다. 식 (4)은 일본에서 경험적으로 사용하고 있는 노반의 허용노반압력이다. 식에서와 같이 선형함수로서 연간 통과톤수(A)를 변수로 허용노반압력을 산정할 수 있으며 열차통과톤수가 100만톤의 경우 약 220kPa의 허용노반압력을 요구하고 있다.

$$P_a = 2.4 - 0.0188A \quad (4)$$

여기서, P_a : 허용노반압력(kgf/cm²), A : 연간통과톤수(단위 백만톤)이다.

식 (5)은 독일에서 Heukelom-Klomp 제안한 상부노반에서의 허용노반압력이다(Korea Rail Network authority, 2008). 설계에서 사용되는 허용노반응력은 상부노반의 동탄성계수(E_{dym})를 45MPa를 적용하여 노반에 작용하는 허용노반압력을 50MPa 이내로 하고 있다. 일반적으로 최상층 강화노반의 변형률계수(E_{v2})의 값이 120MPa으로 다짐 관리하고 있기 때문에 약 2.5배의 설계 여유도를 가지고 있다고 볼 수 있다.

$$f_{sa} = \frac{0.006 \cdot E_{dym}}{1 + 0.71 \log(n)} \quad (5)$$

여기서, E_{dym} : 상부노반의 동탄성계수(MPa), n : 하중반

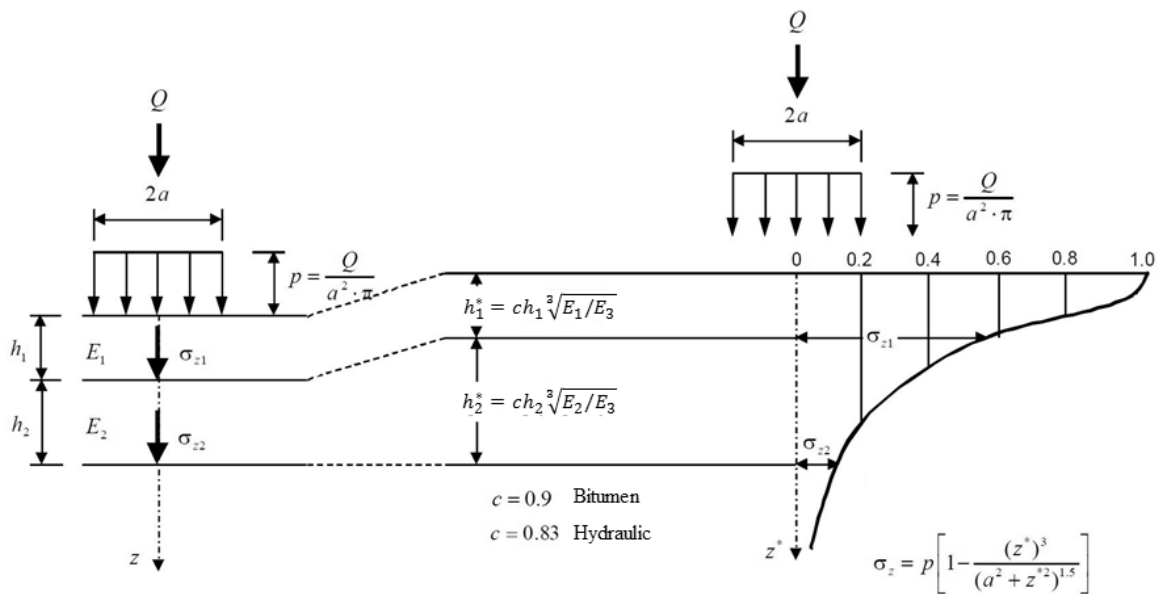


Fig. 4. Equivalent depth to the Odemark's theory (Korea Rail Network authority, 2008)

Table 1. Review of allowable roadbed pressure with existing formula

Calculation of Roadbed pressure	Allowable roadbed pressure	Note
Coeff. of subgrade reaction, k_{30}	$P_c > 300$ kPa	$k = \frac{E_s}{B(1-\mu^2)}$, $k_{30} > 110$ kPa/m ³
Deformation modulus, E_{v2}	$P_c > 800$ kPa	$E_{v2} > 80$ MPa
Selig & water (1996)	$P_c > 280 \sim 410$ kPa	-
PCA (1984)	$P_c > 275$ kPa	$k_{30} > 110$ kPa/m ³ , $CBR > 10$
Empirical formula (Japan)	$P_c > 230$ kPa	$P_a = 2.4 - 0.0188A$
Empirical formula (German)	$P_c > 50$ MPa	$f_{sa} = \frac{0.006 \cdot E_{dym}}{1 + 0.7 \log(n)}$, $E_{dym} = 45$ MPa

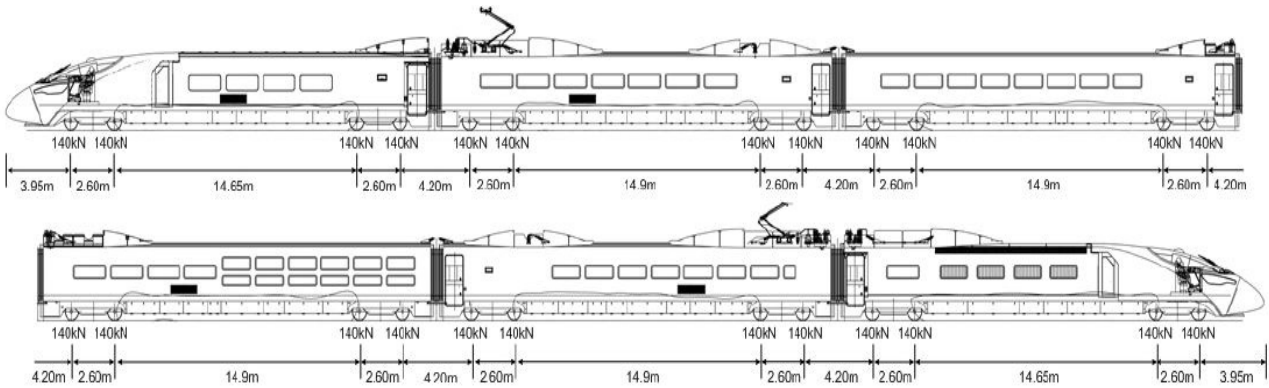


Fig. 5. Axle distribution of HEMU-430x

복횡수, $n=2 \times 10^6$ 이다.

이와 같이 다양한 국가에서 자갈궤도와 콘크리트궤도의 조건에 따라 철도노반의 허용노반압력을 결정하고 있으며, Table 1과 같이 정리할 수 있다. 표에서와 같이 노반의 허용노반응력은 200kPa 이상을 요구하고 있으며, 현장에서는 노반의 상태를 평가하기 위하여 평판재하시험장비를 이용한 지반반력계수나 변형률계수 그리고 LFWD와 같은 장비를 이용한 동탄성계수로 관리하고 있다.

3. 실대형실험 조건

3.1 실대형실험 개요

차세대 고속철도(HEMU430-x)열차의 차축배열은 Fig. 5와 같다. 그림에서와 같이 기존 KTX의 관절형 대차형식이 아니라 일반보기 방식으로 설계되어 있으며 고정축거리는 2.6m이며 대차간 중심간격은 17.5m로 설계되었다. 현재 개발된 시제편성차량은 최대축중은 140kN으로 6량 1편성(5MIT)로서 동력분산형 열차시스템이다.

하중재하시험장비는 철도연에서 보유하고 있는 종합궤도노반 시험장비를 사용하였다. 하중재하장치는 미국 MTS

Table 2. Specifications of MTS loading system

Items	Contents
Performance	<ul style="list-style-type: none"> ■ Max. dynamic loading force : 250 kN/Actuator ■ Loading frequency : 0~100 Hz ■ Displacement : ± 100 mm ■ Capacity of oil pressure : 3000 psi

사의 제품으로 하중재하 장치의 기본 사양과 특징은 Table 2와 같으며, 구성품으로는 로드셀, 변위센서(LVDT, 150mm), 지그로 구분되어 있다. 최대하중주파수는 100Hz까지 가능하며 최대하중 250kN까지 재하시킬 수 있다. 토조 크기는 길이 3m, 폭 5m, 깊이 5m로 단면을 조성하였다.

Photo 1은 실대형실험 조성과 궤도노반 표준시험체의 전경사진이다. 호남고속철도 구간에 부설되는 표준 궤도 형식과 동일한 크기와 구조로 궤도노반 표준체를 조성하였으며, 노반은 상부노반과 강화노반의 설계기준에 부합되는 재료와 다짐도가 만족되도록 조성하였다.

최대하중은 열차 축중을 고려하여 동적 속도충격율을 고려하였다. 속도 충격율은 콘크리트궤도에서 흙 구조물, 토압 등에 적용하는 1.5의 충격율로 계산하였다. 실험조건은 2가지로 최대하중 150kN과 최소하중 20kN으로 진폭이 130kN 되는 하중조건에서 대차간격 14.9m를 가정하여

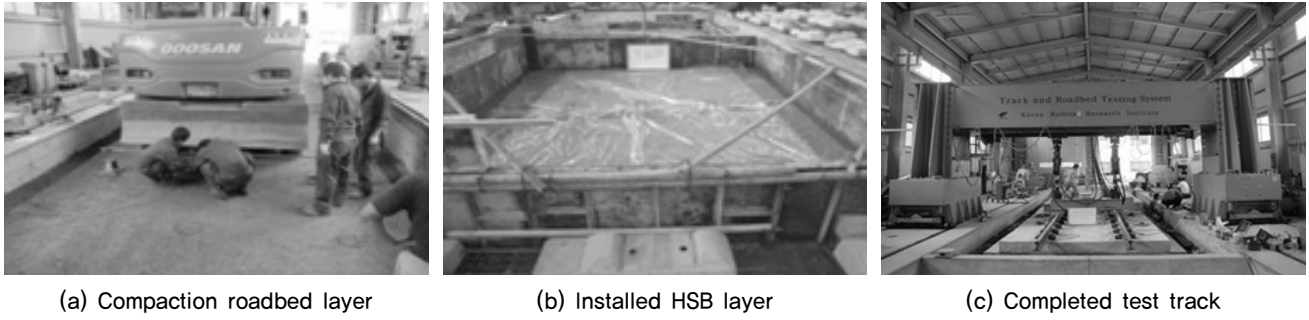


Photo 1. Process of installation of full scale model test

Table 3. Case of model test with loading frequency

Velocity, km/h	Loading frequency with interval of bogie (Hz)		Loading frequency with interval of axle (Hz)	
	Calculation	Test	Calculation	Test
300	6.3	6.0	32.1	32
325	6.8	7.0	34.7	35
350	7.3		37.4	37
375	7.8	8.0	40.1	40
400	8.4		42.7	42
425	8.9	9.0	45.4	45
450	9.4		48.1	48
475	9.9	10.0	50.7	51
500	10.4	11.0	53.4	53

식 (6)에 의하여 가진주파수를 6, 7, 8, 9, 10, 11Hz로 하였고, 2번째는 최대 60kN와 최소 40kN으로 되는 하중조합으로 축간 간격 2.6m을 고려하여 32, 35, 37, 40, 42, 45, 48, 51, 53Hz로 실시하였다. 반복하중은 Sine 정현파로 하중을 재하하고 정적시험 이후 실시하였다. Table 3은 실험 조건이다.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{d}{V} \quad (6)$$

여기서 f : 가진주파수(Hz), V : 열차속도(km/h), d : 대차 간거리(m)이다.

측정시스템은 궤도와 노반부에서 각각 측정하였으며, 주로 궤도부에서는 레일, TCL, HSB에 윤중, 횡압, 응력, 변위, 가속도를 측정하였고, 노반부에는 토압, 변위, 가속도를 측정하였다(Fig. 6. 참조). 측정결과는 데이터로거에서 5kHz의 샘플링으로 데이터를 획득하였으며, 데이터 처리는 60Hz Low pass 필터를 사용하여 노이즈를 제거하여 분석하였다.

3.2 사용재료의 기본물성 및 다짐평가

노반재료의 기본물성 결과는 Table 4와 같다. Table 4에서와 같이 200번째 통과율이 9.2%이며 소성지수는 기준

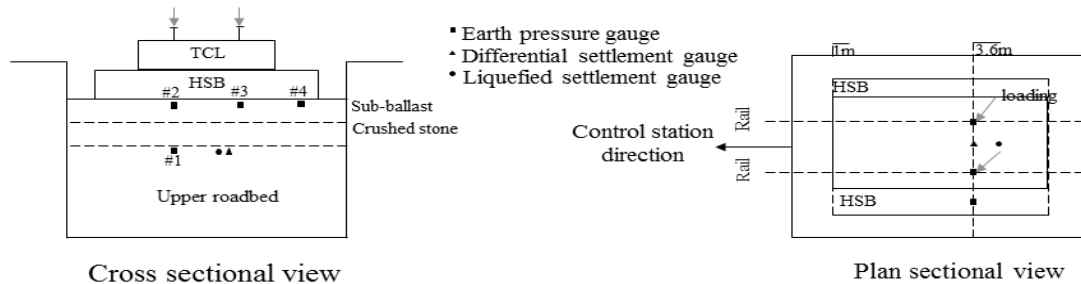


Fig. 6. Position of measured sensing network

Table 4. The results of rail roadbed materials properties

Soil	Gravity	P.I	Passing of no. 200 (%)	Compaction test		Note
				Dry density (kN/m ³)	OMC (%)	
Subgrade	2.66	15.8	9.2	19.89	11.2	USCS: SC
Sub-ballast	-	-	2.0	21.38	4.4	L.A Abrasion: 21.4

Table 5. The results of compaction quality with cyclic plate loading test

Layer	Criteria	Measured data	Note
Subgrade	Ev2>80 MN/m ³	Ev2>61.5 MN/m ³	84% than criteria
Hydraulic stabilized crushed stone	Ev2>80 MN/m ³	Ev2>84.3 MN/m ³	105% than criteria
Sub-ballast	Ev2>120 MN/m ³	Ev2>134.0 MN/m ³	112% than criteria

값보다 다소 높은 15.8로 통일분류법에 의거하면 SC의 재료이다. Table 5는 다짐품질관리 시험인 반복평판재하시험결과로서 상부노반재료를 제외한 입도조정층과 보조도상은 다짐관리기준을 충족하였으며, 다짐 품질관리기준대비 각각 84%, 105%, 112%로 평가되었다.

4. 실험결과

4.1 정적하중에 따른 노반거동

정적실험은 최대하중 330kN으로 단계별 30kN씩 증가하여 실험하였다. Fig. 7은 단계별 하중증가에 따른 토압 변화량이다. 최대하중 330kN재하시 강화노반 상부토압은 하중이 재하되는 직하부(No.1), 직하부에서 50cm(No.2) 떨어진 지점과 1m(No.3) 지점에서 측정된 결과 20.8kPa(No.1), 15.2kPa(No.2), 14.3kPa(No.3)으로 측정되었다. 콘크리트 궤도의 경우 강성기초와 같이 전반적으로 등분포하중의 형태로 토압이 발생하며, TCL층과 HSB층에서 거의 대부분의 열차하중을 분산시켜 노반에 전달되고 있는 것을 볼 수 있다. 수직방향의 토압특성은 강화노반 40cm 아래지만 상부노반에서 토압은 약 28kPa으로 측정되었다. 정적하중

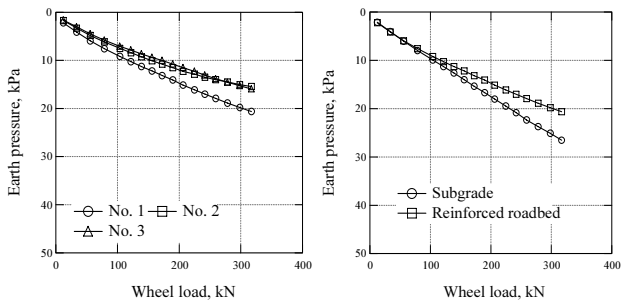


Fig. 7. Variation of earth pressure with static loading

실험결과 노반에 발생하는 하중은 약 50kPa 이내로 콘크리트궤도(TCL+HSB)에서 대부분의 하중이 분산되는 것을 확인하였다.

앞서 Fig. 4에서 등가치환 깊이이론에서 구한 2층 구조로 된 TCL층과 HSB층의 최대하중 330kN을 재하하는 경우 각각의 환산 등가깊이는 $h_1=1.57m$ 과 $h_2=1.09m$ 으로 TCL층과 HSB층의 총 등가치환 깊이는 약 2.66m로 계산될 수 있다. 이때 이론적인 노반상부에서의 응력은 $Z_{2.66m}=15.2kPa$ 으로 계산에 의한 값과 실험값을 비교해보면 약 5kPa정도 차이가 발생하였다. 계산하중(P) 산정에서 $a=1.6m$ 으로 가정하고 TCL층을 전체에 대하여 등분포한다고 가정하여 계산된 값이기 때문에 실측값보다 작게 평가된 것으로 판단된다. 그러나 등가치환 높이에 의한 계산값과 실험값의 차이가 약 5kPa정도로 하중크기로 볼때는 작은 값으로 계산값과 실험값이 비교적 잘 맞는 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트궤도에서 등가치환깊이 이론에 근거하여 노반의 압력을 구하는데 있어 적절한 평가방법이라고 할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 단계별 정적하중 재하시 변위곡선으로 그림에서와 같이 TCL층의 변위는 거의 발생하지 않고 있으며,

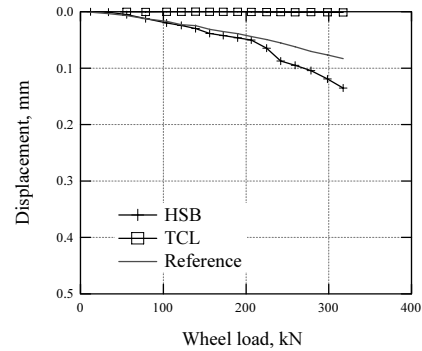


Fig. 8. Variation of displacement with static loading

HSB층에서의 변위 양상은 약 200kN까지는 선형적으로 증가하다가 200kN 이상 부터는 다소 변위가 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. HSB층의 변위는 0.13mm로 주행안전성 평가기준 1.0mm의 약 1/100의 수준으로 나타났다. 이 결과조차도 HSB층을 측정하기 위하여 설치된 지지말뚝에서의 변위량 기준점(Reference) 0.08mm를 제외한다면 0.05mm로 매우 작은 변위라고 할 수 있다.

4.2 가진주파수의 영향

Fig. 9는 최대하중 150kN과 최소하중 20kN으로 130kN의 진폭으로 대차조건 13.5m 조건하에서 실시한 가진주파수 실험결과이다. 레일에서의 운동은 가진주파수가 증가함에 따라 다소 증가하고 있으나 거의 일정한 수준으로 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 또한 상부노반에서의 측정된 토압도 약 20kPa 이내로 가진주파수의 영향은 크지 않는 것으로 나타났다. 이에 반해 노반상부에 설치한 지반 가속도는 0.1g 이내로 크기는 매우 작지만, 가진주파수가 증가함에 따라 점진적으로 증가하였다. 따라서 노반상부에 가진주파수의 영향을 받을 수 있으며, 결과적으로 열차

속도에 따라 진동의 영향은 있다고 할 수 있다.

Fig. 10은 가진주파수에 따른 변위곡선이다. 레일의 수직변위는 2.5mm 이내로 고속철도 증속 시 관리기준인 3.0mm 이내로 측정되었다. 가진주파수가 커짐에 따라 레일의 최대 변위와 진폭도 감소하였다. 일반적으로 가진주파수가 증가하면서 레일의 변위는 증가하는 것이 일반적이지만 레일의 변위는 가진주파수가 커짐에 따라 감소하였다. 레일의 변위는 레일체결구와 레일패드 등 레일과 연결되는 구성품에서의 발생된 전체변위로서 적절한 탄성을 확보하는 것이 콘크리트궤도의 성능과 유지보수성을 확보할 수 있을것으로 판단된다. 가진주파수가 커짐에 따라 탄성변위가 작아진다는 것은 콘크리트궤도와 같이 탄성이 부족한 경우에는 장기적으로 강구조인 콘크리트의 사용성과 소음진동이 커지게 하는 원인이기 때문에 이러한 특성을 반영하여 궤도설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 레일슬래브를 지지하고 있는 HSB층의 변위는 약 0.1mm 이내로 레일의 전체 변위의 약 4% 정도로서 레일과 체결구 시스템에서 거의 대부분 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 콘크리트궤도에서의 변위의 대부분은 레일을 지지하는 체결구에서 거의 모두 발생하고 있으며 궤도의 적

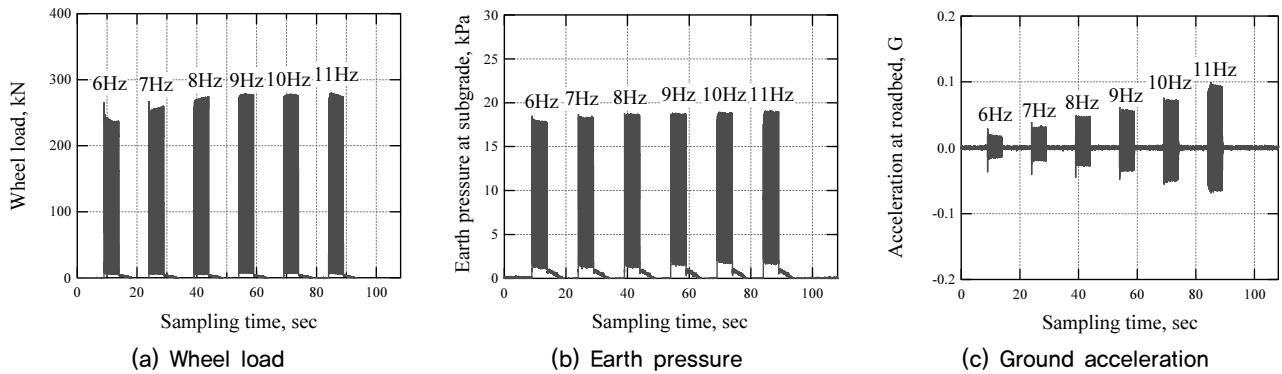


Fig. 9. Dynamic response of each sensors with loading frequency (Max. 150 kN/Min. 20 kN)

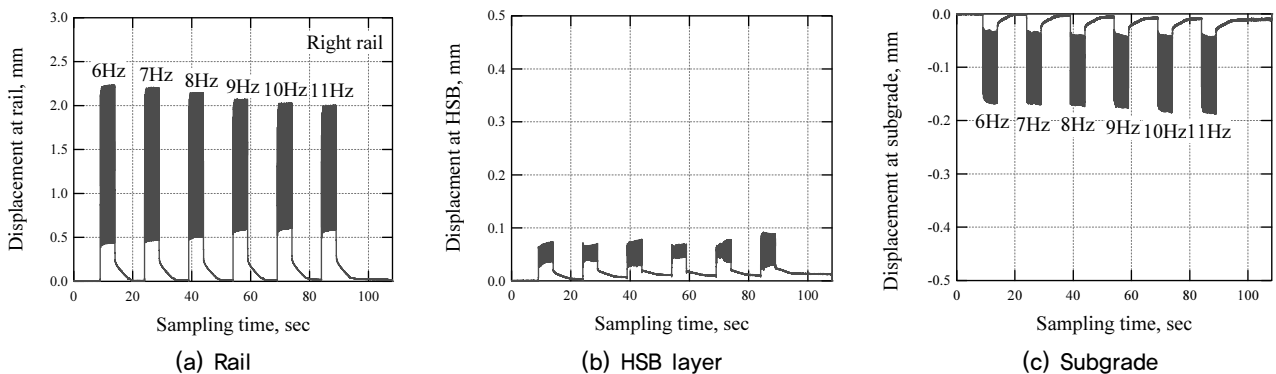


Fig. 10. Dynamic response of each displacement with loading frequency (Max. 150 kN/Min. 20 kN)

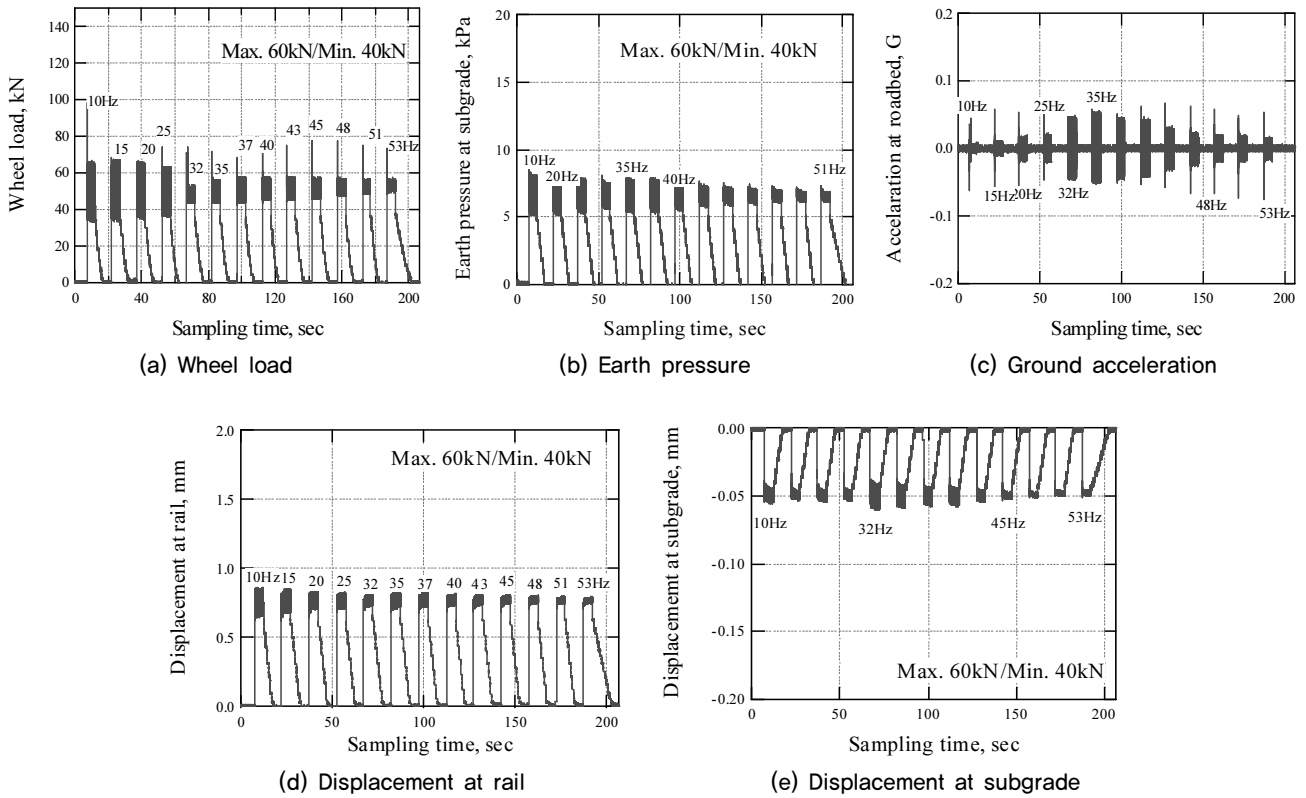


Fig. 11. Dynamic response of each sensors with loading frequency (Max. 60 kN/Min. 40 kN)

절한 탄성력을 유지하기 위하여 약 3mm 이내로 제어하고 있는 것으로 판단된다. 상부노반의 변위는 전체 0.2mm이하로서 가진주파수가 증가함에 따라 다소 증가하는 경향으로 나타났다. 현재 콘크리트궤도에서 열차하중에 의한 허용소성침하량 5mm로 볼 때 약 1/250정도이며, 노반의 탄성침하량 2.5mm에 대해서는 약 1/175 수준으로 매우 작은 변위가 발생하고 있는 것을 확인하였다.

Fig. 11은 최대 60kN과 최소 40kN으로 진폭 20kN으로 축간 간격(2.6m)으로 산정된 하중조건에서의 실험결과이다. 윤중의 경우 가진주파수 25Hz까지는 윤중의 변화가 미미하였으나 가진주파수가 32Hz 이상부터 윤중과 진폭이 점진적으로 감소하는 경향으로 나타났다. 토압의 경우도 윤중과 마찬가지로 가진주파수가 증가함에 따라 큰 변화가 없다가 가진주파수 35Hz 대역에서 점진적으로 감소하는 경향으로 나타났다. 지반가속도의 경우에도 가장 크게 진폭이 발생하는 것은 약 35Hz 대역에서 큰 값을 보이다가 점진적으로 감소하였다. 즉, 측정된 모든 계측결과(토압, 가속도, 변위량)에서 가진주파수 35Hz 부근에서 측정값이 감소하였다. 가진주파수 35Hz 대역에서 변곡지점이라고 할 수 있다. 이를 차량속도로 가정할 경우 약 320~340km/h 속도대역으로 에너지의 급격한 증가와 감소가

발생할 수 있는 것으로 판단된다. 본 실험은 하중방향이 수직방향 1축으로서 실제 차량에서와 같이 여러 축이 이동하는 거동이 아니기 때문에 향후 현장계측을 통해 이러한 특성을 보다 면밀히 검토할 예정이다.

레일의 변위는 약 1.0mm이하로 가진주파수가 증가함에 따라 점진적으로 감소하는 경향으로 앞서 실시한 가진주파수시험과 유사한 결과가 나타났다. 지반변위는 0.1mm이하로 가진주파수 32Hz에서 급격하게 증가하다가 다시 감소하는 특성을 보였다.

5. 결론

실제 열차하중과 유사한 조건과 궤도노반 표준체로 조성한 실험실실험을 통하여 가진주파수에 따른 콘크리트궤도와 노반에서의 동적거동을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 정적재하시험에서의 구한 실험값과 등가값이 이론에서 구한 노반압력의 결과가 매우 잘 일치하고 있으며 콘크리트궤도의 노반압력을 예측할 때 적절한 방법으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 정적하중 330kN

을 재하시 콘크리트궤도에서 발생하는 강화노반 상부의 토압은 약 20.8kPa이며, 상부노반은 28kPa으로 50kPa 이내로 발생하였다.

- (2) 정적하중 330kN 재하시 변위측정값은 모든 관리기준 이내의 변위가 발생하였으며 HSB의 탄성침하량 1mm에 비해 1/100 수준, 노반의 변위는 열차하중에 의한 허용소성침하량 5mm과 비교할 때 약 1/250정도이며, 노반의 탄성침하량 2.5mm에 대해서는 약 1/175 수준으로 평가되었다.
- (3) 가진주파수 11Hz 이내에서는 토압과 윤중의 크기는 가진주파수가 증가함에 따라 미미하게 증가하였으며, 지반가속도와 상부노반의 변위는 점진적으로 증가하였다. 이와 반대로 레일의 변위는 가진주파수가 증가함에 따라 감소하는 특성을 보였다. 레일체결구의 구조와 탄성력 및 패드의 강성에 따라 레일의 변위가 감소하는 것으로 판단된다.
- (4) 가진주파수 11Hz 이상의 실험조건에서는 가진주파수 35Hz이하에서는 모든 측정값이 거의 선형적으로 증가하였으나 가진주파수가 35Hz이상에서는 윤중, 변위, 지반가속도 등이 모두 감소하였다. 실험결과 가진주파수 35Hz 부근에서 변화지점으로 판단되며, 가진주파수에 따라 에너지의 변화점이 발생하고 있는 것을 확인하였다. 본 실험은 하중방향이 수직방향 1축으로서 실제 차량에서와 같이 여러 축이 이동하는 거동이 아니기 때문에 향후 현장계측을 통해 이러한 특

성을 보다 면밀히 검토할 예정이다.

Acknowledgement

This research was financially supported by Ministry of Land, Infrastructure and Transport through a research project “Development of Infra Technology for 400km/h High Speed Rail”.

References

1. Choi C.Y., Lee S.H., Eum K.Y. (2010), “A comparison of behavior of the roadbed of ballasted & Concrete track with Cyclic loading, Journal of the Korean Geosynthetics Society, Vol.9, Issue.3, 2010, pp.1-8.
2. Eisenmann J., Leykauf G., (2000), “*Feste Fahrbahn Fur Schienenbahnen*” Sonderdruck aus, Beton Kalender.
3. Eisenmann J., Leykauf G., (2001), “*Beton-Fahrbahnen*”, 2nd Edition, Ernst&Sohn a Wiley Company.
4. Korea Railroad Research Institute (2011), *Study on design standards of track system for the HSR at 400km/h*, R&D/10PRTD-B056522-01.
5. Korea Rail Network authority (2008), *A study on performance improvement of Interface for concrete track(Final report)*, 102 611H09-501-001.
6. Selig, E.T. and Waters, J.M. (1996), *Track Geotechnology and Substructure Management*, Telford, England.
7. PCA (1984), *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavement*, Portland Cement Association.