

**고속선 터널내 궤도 형식에 따른 궤도 구성품의  
진동 특성에 관한 연구**  
**A study on vibration characteristics of track components  
according to track type in HSL tunnel**

김만철\*      장승엽\*\*      강윤석\*\*\*      한진석\*\*\*\*      한상철\*\*\*\*\*  
Kim, Man-Cheol   Jang, Seung-Yup   Kang, Yun-Suk   Han, Jin-Seok   Han, Sang-Cheol

-----  
**ABSTRACT**

In this paper, an experimental study is carried out to analyze the vibration characteristics of components of the ballast track and the slab track layed in HSL tunnels. According to vibration level test of ballast tracks and concrete tracks on HSL, the vertical vibration level of rails on concrete tracks is 6.2dB more than that on ballast tracks, and especially on 50~80Hz frequency band, the difference is more than 6dB. The orther track components according to track type are appeared to be smaller on the slab track than on the ballast track. Regarding car body vibration, 80Hz component, which was not remarkable while running on open tracks, is considerably amplified in tunnels where concrete tracks are laid.

-----

**1. 서론**

우리나라 고속철도를 비롯하여 지금까지 대부분의 궤도구조는 자갈도상 궤도(ballasted track)가 주류를 이루어 왔다. 자갈도상 궤도는 열차의 하중을 횡침목(transverse sleeper)과 침목 하부의 자갈도상(ballast)을 통해 지반으로 전달하는 구조로 열차의 주행을 원활히 하는 궤도구조의 기본 목적에 잘 부합하는 궤도구조다. 그러나 기본적으로 자갈의 소성변형을 수반하며, 이 때문에 선로의 선형을 적합하게 유지하기 위해서는 반드시 유지보수를 필요로 하는 구조이기도 하다. 특히 최근 열차속도의 증가와 축중의 증가로 인해 자갈의 마모 등 궤도의 파괴가 더욱 가속화되고 이에 따라 유지보수비에 대한 부담이 점차 커져가고 있는 데다 유지보수 인력과 작업시간의 확보도 여의치 않은 실정이다. 이런 이유로 세계 각국에서는 선로 유지보수를 줄이는 방안이 다각도로 검토되어 왔으며 그 결과 자갈도상을 사용하지 않은 궤도구조가 개발되어 적용되기에 이르렀다. 이와 같은 궤도구조를 통틀어 일반적으로 무도상 궤도(ballastless track or non-ballasted track)라 한다.

\* 한국철도기술연구원/궤도·토목연구본부 선임연구원/공학박사, [kimmc@krri.re.kr](mailto:kimmc@krri.re.kr), 031-460-5321  
\*\* 한국철도기술연구원/궤도·토목연구본부 선임연구원/공학박사  
\*\*\* 한국철도기술연구원/궤도·토목연구본부 선임연구원/박사수료  
\*\*\*\* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과/공학석사  
\*\*\*\*\* 서울산업대학교 토목공학과/교수

국내에서도 이러한 무도상 궤도 구조개발을 위한 다각적인 연구가 수행중이며, 이중 독일 레다 Classic 콘크리트 궤도가 1단계 고속선에서 5km 이상의 터널구간에 부설되어 현재 운행중에 있고, 2단계 구간에 대해서는 전구간이 콘크리트 궤도로 설계중이다. 이러한 콘크리트 궤도는 고탄성 탄성패드를 사용하며, 진동측면에서 볼 때 이로 인하여 궤도 하부에서의 진동은 자갈도상 궤도보다 낮게 나타나지만 레일과 열차의 진동가속도가 자갈도상 궤도에 비해 다소 커질 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다.

본 논문에서는 궤도 구조 형식별 동적특성을 분석하므로써 차량과의 상호작용을 고려하여 시스템 측면에서 이를 검토하기 위하여 1단계 고속선에 부설된 터널내 콘크리트 궤도와 자갈도상 궤도에 대한 궤도 구성품 및 라이닝의 수직 진동 가속도를 측정하여 주파수 해석을 수행하였으며, KTX 차체 진동과 그의 상관성을 검토하였다.

## 2. 궤도 형식별 터널내 궤도 진동 측정

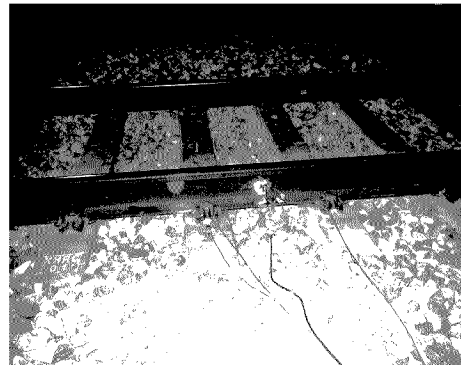
### 2.1 개요

고속선 구간에서 자갈도상 궤도가 부설된 터널과 콘크리트 궤도가 부설된 터널을 시험 대상개소로 선정하였다. 각 대상개소에 대해 KTX의 해당구간 운행시 궤도 구성품인 레일, 침목, 도상 또는 슬라브와 터널라이닝에 대한 진동 가속도를 측정하였다. 차량의 주행속도는 측정된 가속도 신호에서 산정하였다. 그림 1은 시험대상 터널에서의 진동 가속도설치 현장을 보여주고 있다.

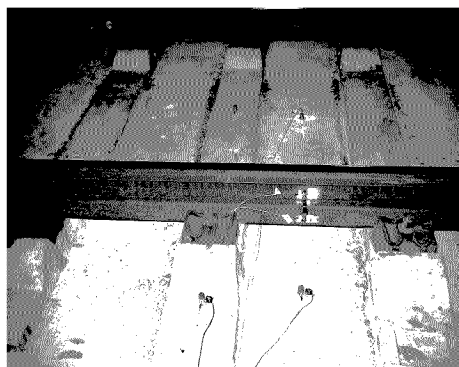
궤도 구성품 및 터널라이닝 진동은 차량 주행시 차륜/레일 인터페이스에 의하여 발생하게 된다. 진동이 발생하는 원인은 크게 규칙적인 경우와 불규칙적인 경우로 나눌 수 있다. 규칙적인 경우는



(a) 고속선 터널



(b) 레일 수직 및 횡, 침목 측정(자갈도상)



(c) 레일 수직 및 횡, 침목 측정(콘크리트도상)



(d) 라이닝 수직 가속도 측정

그림 1. 터널내 진동 측정사진

열차의 바퀴가 일정한 간격으로 배치되어 있기 때문에 각 바퀴가 레일의 특정점을 지날 때마다 반복적으로 발생하는 바퀴통과 주파수(wheel passing frequency) 및 침목통과 주파수(sleeper passing frequency)이다. 불규칙적인 경우는 바퀴의 마모 및 레일표면의 불균일성에 의하여 발생하는 파상마모이며 long-pitch와 short-pitch로 구분된다. 전자의 pitch는 8~30cm이고 후자의 pitch는 3~8cm이다. 이들에 대한 주파수 성분은 표 1과 같다.

표 1. 구조물에서의 진동 발생 원인 및 특성

진동원인		발생주파수(Hz)		
		v=300km/h	v=285km/h	
차륜간격	3m	27.8	26.4	
대차간격	18.7m	4.5	4.2	
침목간격	0.625m	133.3	126.7	
레일표면 불균일성	long-pitch	0.3m	277.8	263.9
		0.08m	1041.7	989.6
	short-pitch	0.03m	2777.8	2638.9

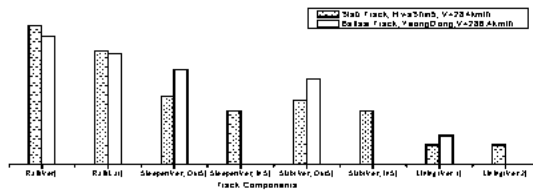
## 2.2 시험결과

콘크리트 궤도 부설 터널과 자갈도상 궤도 부설 터널내 KTX 주행속도는 각각 284km/h와 286.4km/h로 약 2.4km/h의 차이를 보였다. KTX 주행시 궤도 구성품 및 라이닝 진동가속도에 대해서 1/3 Octave Band 해석을 수행하였다. 주파수 분석 결과 레일의 수직 가속도의 경우 6.2dB, 횡방향 가속도의 경우 1.4dB가 콘크리트 궤도에서 크게 나타났으며 그 외 침목, 도상 및 라이닝에서의 수직 가속도는 자갈도상 궤도에서 크게 나타났다(그림 2-a). 이러한 현상은 자중이 큰 콘크리트 구조체가 강결되어 있고 또한 콘크리트 궤도의 고탄성 탄성패드에 의한 영향으로 판단된다. 일반적으로 고속선에서는 자갈도상 궤도의 경우 80~120kN/mm의 탄성을 가지고 있는 패드를, 콘크리트 궤도의 경우에는 22.5kN/mm의 탄성을 가지고 있는 패드를 사용하고 있다.

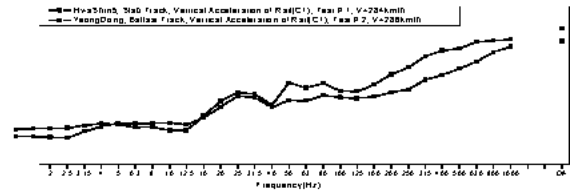
레일의 수직방향 가속도의 경우 5~12.5Hz 대역을 제외한 전 주파수 대역에서 자갈도상 궤도에 비해 콘크리트 궤도에서 높고, 주파수의 증가에 따라 진동이 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다(그림 2-b). 자갈도상 궤도와 콘크리트 궤도에서 모두 25Hz 대역의 진동이 인접 주파수 대역에 비해 높게 나타났는데 이는 차륜 간격에 해당하는 주파수 성분에 의한 것으로 판단된다. 콘크리트 궤도의 경우에서 50~80Hz 영역이 진동이 인접 주파수 대역에 비해 크게 나타났다.

그림 2-c는 콘크리트 궤도의 레일 수직가속도( $L_{slab}$ )와 자갈도상 궤도에서 측정된 레일 수직가속도( $L_{ballast}$ )의 차( $L_{slab}-L_{ballast}$ )를 정리한 것이다. 40Hz 대역까지는 진동레벨이 약 5dB 이하의 차이를 보이고 있으나, 50~80Hz와 160Hz 이상의 주파수 대역에서는 5dB 이상 차이를 보이고 있다. 레일의 횡방향 가속도에서는 탁월 주파수 성분이 잘 나타나지 않았다(그림 2-d).

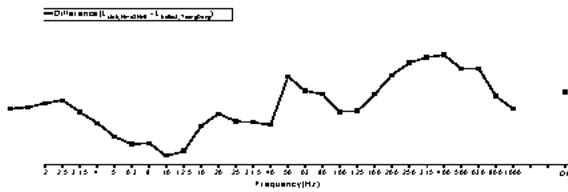
콘크리트 궤도의 침목 및 슬라브 수직 가속도는 궤도 외측에서 측정된 값이 궤도 내측 즉, 침목 중앙지점에서 측정된 진동레벨에 비해 크게 나타났다(그림 2-a). 이는 차량하중에 대한 궤도 구조의 내력 분포형태와 일치한다. 또한 50Hz 대역과 125Hz 대역에서 탁월성분이 나타난다(그림 2-e, f). 125Hz 대역에서 진동레벨이 큰 이유는 침목 간격 0.625m에 해당하는 통과 주파수와 일치하기 때문이다. 자갈도상의 경우 침목 및 도상의 탁월 주파수 성분은 25Hz와 125Hz 대역 부근으로 나타났다. 이 또한 25Hz 대역은 차륜 간격 3m에 해당하는 통과 주파수와 일치하고, 125Hz



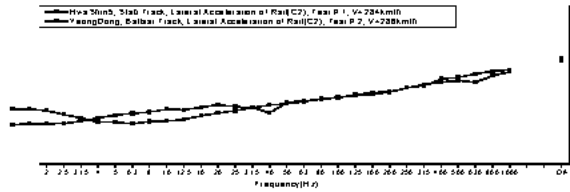
(a) 궤도 각부 진동 레벨(O.A.)



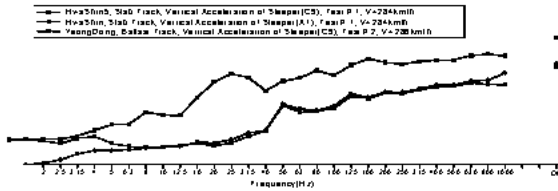
(b) 레일 수직 가속도



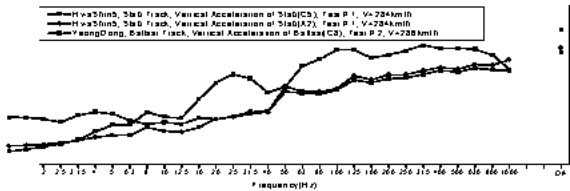
(c) 궤도구조별 레일 수직가속도 차



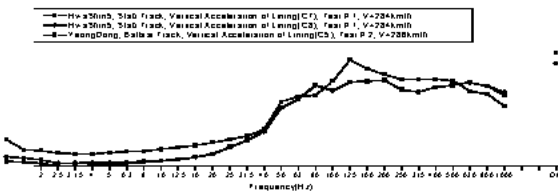
(d) 레일 횡가속도



(e) 침목 외측 수직가속도



(f) 도상 및 슬라브 외측 수직가속도



(g) 라이닝 수직가속도

그림 2. 궤도구조별 터널내 궤도 각부 및 라이닝 진동레벨(1/3 Octave)

대역은 침목 간격 0.625m에 해당하는 통과 주파수와 일치한다.

라이닝의 경우레일의 수직가속도에 비해 약 65dB가 적게 나타났다. 탁월 주파수 대역은 자갈도상 궤도와 콘크리트 궤도 모두 125Hz 부근의 주파수 대역에서 발생하였다(그림 2-g).

일반적으로 레도 구성품에서의 탁월 주파수 성분은 25Hz, 50~80Hz와 125Hz 대역으로 나타났다. 이중 25Hz와 125Hz 대역은 차량의 주행속도 285km/h에 대한 차륜 간격 3m와 침목 간격 0.625m에 해당하는 통과 주파수와 일치한다. 50~80Hz 대역에서 탁월성분이 발행하는 원인에 대해서는 추가적으로 연구가 수행되어야 할 것이다. 참고로 해석적인 방법으로 콘크리트 궤도에 대한 자유진동 해석을 수행한 결과 횡모드에 대한 첫 번째 고유진동은 130Hz 대역으로 나타났다.

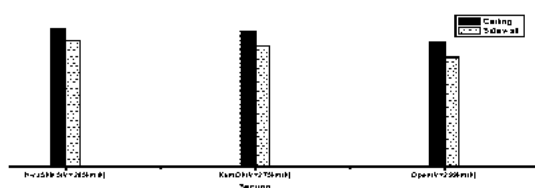
### 3. 차체 진동 측정

전체 시스템 측면에서 궤도 구성품의 진동과 차체 진동과의 상관관계를 분석하기 위하여 KTX 차량에 대해 차체 벽과 천장에서 진동 측정 시험을 실시하였다. 콘크리트 궤도 부설 터널에서의 평균 주행속도는 285km/h이었고, 자갈도상 궤도 부설 터널에서는 평균 275km/h, 자갈도상 궤도인 개활지 구간에서는 평균 299km/h의 속도로 주행하였다. 측정된 각각의 가속도에 대해 1/3 Octave Band 해석을 실시하였다.

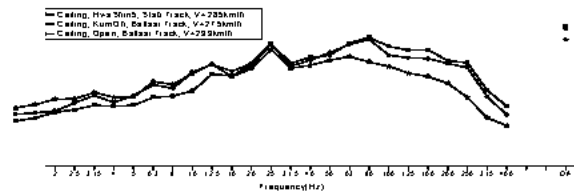
천장에서 발생하는 진동은 콘크리트 궤도 부설 터널에서 128.5dB로 자갈도상 궤도 부설 터널의 경우 127.4dB와 자갈도상 궤도 개활지 구간 122.1dB에 비해 가장 크게 나타났다. 차체 벽에서는 각각 122.7dB, 120.2dB와 114.4dB를 보였다. 일반적으로 궤도 조건 및 터널 조건에 관계없이 천장의 진동이 차체 벽보다 크게 나타났다(그림 3-a).

천장의 경우 궤도조건이나 터널내외와 개활지에 관계없이 50Hz 대역까지는 유사한 진동특성을 보여주고 있다. 이 중 레일의 수직진동과 같이 25Hz에서 진동이 크게 나타나고 있다. 궤도 형식에 관계없이 터널내에서는 모두 80Hz 대역에서 인접 주파수 대역에 비해 진동이 큰 것으로 나타났다(그림 3-b). 50Hz 이상의 주파수 대역에서는 자갈도상 개활지 구간에 비해 터널내에서 진동이 약 5dB 이상 크게 나타나고 있으며 특히, 콘크리트 궤도 부설 터널과 개활지 구간의 진동차가 가장 크게 나타났다. 콘크리트 부설 터널과 자갈도상 궤도 부설 터널에서의 진동의 차이는 거의 전 주파수대역에서 5dB를 넘지 않는 것으로 분석되었다(그림 3-c).

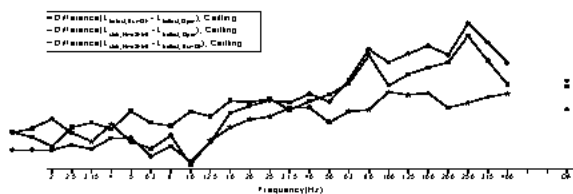
차체 벽에서 발생하는 진동 양상도 천장의 진동 양상과 비슷하게 나타났다. 다만 궤도구조 형식



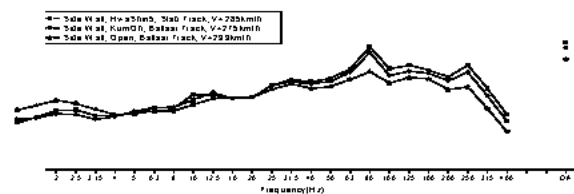
(a) KTX 천장 및 차벽 가속도(O.A.)



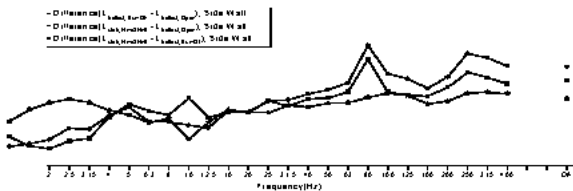
(b) KTX 천장 수직 가속도



(c) 궤도구조별 KTX 천장 수직가속도 차



(d) KTX 차체 벽 가속도



(e) 궤도구조별 KTX 차체 벽 수직가속도 차

그림 3. 궤도구조별 터널내 궤도 각부 및 라이닝 진동레벨(1/3 Octave)

에 관계없이 터널 내에서의 탁월 주파수 대역은 80Hz와 250Hz로 나타났다(그림 3-d, e).

천장과 차체 벽의 진동에서 탁월 주파수 성분은 25Hz, 80Hz와 250Hz 대역으로 나타났다. 이 중 25Hz와 250Hz 대역은 각각 차륜간격과 침목간격 또는 0.3m 파장의 레일표면불규칙성과 연관성이 큰 것으로 판단되나, 80Hz에 대해서는 추가적인 분석이 이루어져야 할 것이다.

#### 4. 결론

레일 수직진동은 콘크리트 궤도 부설 터널에서 자갈도상 궤도 부설 터널에 비해 크게 나타났으며, 콘크리트 궤도 부설 터널의 경우 50~80Hz 대역에서 인접 주파수에 비해 크게 나타났다. 그 외의 침목, 도상 및 라이닝의 경우에는 자갈도상 궤도 부설 터널에서 진동이 크게 나타났다. 이는 콘크리트 궤도에 사용되는 고탄성 레일 패드에 의한 영향으로 판단된다. KTX 차체에서는 차체 벽보다는 천장에서 진동이 큰 것으로 분석되었으며, 레일의 수직진동과 밀접한 연관성이 있는 천장의 진동의 경우 탁월 주파수 대역이 레일의 수직진동 탁월 주파수 대역과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 궤도 형식별 천장의 진동의 차이는 레일 진동의 차이에 비해 크지 않은 것으로 나타났다.

터널 주행시 KTX 차량의 실내소음 저감방안 도출을 위한 기초용역에서 정리한 독일에서 수행한 시험결과에 따르면 콘크리트 궤도의 레일패드 강성에 따라 주파수별 레일의 진동레벨이 변화하는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 연구결과를 이용하면 전체적인 시스템 측면에서 차량진동과의 상호작용을 고려한 저진동 콘크리트 궤도의 설계가 가능한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 고속철도 운행을 위한 철도시설정비사업 및 기존선 전철화 사업 기술자문(3단계), 고속철도 시험 및 시운전 보고서 : 시설분야 (2004. 6), 철도청
2. 시운전시 궤도노반시설물의 성능검증(2003.12) 한국고속철도공단
3. 경부고속철도 제1,3공구 궤도공사 실시설계 보고서(2003.3) 한국고속철도건설공단
4. 터널 주행시 KTX 차량의 실내소음 저감방안 도출을 위한 기초용역(2004. 11), 철도청
5. Darr, E. and Fiebig, W., Feste Fahrbahn-Konstruktion, Bauarten, Systemverlaggleich Feste Fahrbahn - Schotteroberbau, Band 1, Teetzlaff Verlag, 1999.
6. Sato, T., 新軌道力學, 1997.
7. Ando, K., Kozeki, M., Fukui, Y., Nagafuji, T. and Miura, S., System engineering on new track structures, RTRI Report, Vol. 9, No. 12, 1995, pp. 55-60.
8. Esveld, C., Modern Railway Track, 2nd ed., MRT- productions, Zaltbommel, 2001.