

# 고속철도 터널에서의 궤도 형식에 따른 궤도와 차체의 진동 특성

## Characteristics of Vibration of Track and Vehicle Body According to Type of Track in Tunnel of High-Speed Railway Lines

김만철\* · 장승엽\*\*

Kim, Man Cheol · Jang, Seung Yup

### Abstract

In the present study, in order to elucidate the vibration characteristics of track and train body according to the type of track in tunnel, the vibration accelerations of the track and the KTX train body have been measured in tunnels of Kyong-Bu high-speed railway(HSR) lines, and the frequency analysis of the measured data has been performed. From this, the vibration characteristics of the track components such as rail, sleeper, ballast and slab, the tunnel lining and the vehicle body according to the type of track are investigated and their relation is analyzed. The test results show that the vibration of rail and vehicle body rapidly increases at 80Hz in tunnel, and that is much higher in the tunnel on which the concrete slab track is placed. According to the results of the present study, rail supporting stiffness can variate the vibration characteristics of the total system including the vehicle, and therefore the correlation between the vibration of vehicle should be taken into account to determine the supporting stiffness of the slab track.

**Keywords :** ballasted track, concrete slab track, HSR lines, rail supporting stiffness, tunnel, vibration

### 요 지

본 연구에서는 터널 내에서 자갈도상궤도와 콘크리트 슬래브궤도 등 궤도 형식에 따른 궤도와 차량의 진동특성을 규명하기 위해 자갈도상궤도와 콘크리트 슬래브궤도가 부설된 경부고속철도 터널 내에서 궤도와 KTX 차체의 진동가속도를 측정하여 주파수 해석을 수행하였으며, 이를 통해 궤도 형식에 따른 레일, 침목, 자갈도상, 슬래브 등 궤도 구성품과 터널 라이닝 등 궤도의 진동과 차체의 진동 특성을 분석하고, 그 상관관계를 분석하였다. 측정결과에 따르면 터널 내에서는 80Hz 대역의 주파수에서 레일과 차량의 진동이 크게 증가하였고, 특히 콘크리트 슬래브궤도가 부설된 터널에서 진동이 더욱 크게 나타났다. 연구결과에 의하면 레일 지지 스프링의 동적특성의 변화에 따라 차량을 포함한 전체 시스템의 진동특성이 달라질 수 있으며, 따라서 콘크리트 슬래브궤도의 지지강성을 결정하는 데 있어서 시스템 측면에서 차량의 진동과의 상호관계를 고려해야 한다.

**핵심용어 :** 자갈도상궤도, 콘크리트 슬래브궤도, 고속철도, 레일 지지강성, 터널, 진동

### 1. 서 론

지금까지는 대부분 자갈도상 궤도가 궤도구조로 적용되어 왔다. 자갈도상 궤도는 열차의 하중을 횡침목(transverse sleeper)과 침목 하부의 자갈도상(ballast)을 통해 지반으로 전달하는 구조이다. 그러나 이러한 구조는 기본적으로 자갈층의 소성변형을 전제로 하고 있기 때문에, 열차의 통과횟수에 따라 점차 변형이 누적되어 궤도틀림이 발생하고, 따라서 자갈도상궤도의 선로 선형을 유지하기 위해서는 주기적인 유지보수를 필요로 하게 된다. 최근 열차속도와 통과횟수의 증가로 인해 자갈의 마모 등 궤도의 파괴가 가속화되고 이에 따라 유지보수비에 대한 부담이 점차 커져가고 있다. 이런

이유로 세계 각국에서는 선로 유지보수를 줄이는 방안이 다각도로 검토되어 왔으며 그 결과 자갈도상을 콘크리트 또는 아스팔트 지지층으로 대체하는 궤도구조가 개발되었다(Darr and Fiebig, 1999; Esveld, 2001). 이와 같은 궤도구조를 무도상궤도(ballastless track or non-ballasted track) 또는 슬래브궤도(slab track)라 한다.

국내에서도 이러한 슬래브궤도의 개발을 위한 다각적인 연구가 수행중이며(강윤석 등, 2003; 장승엽 등, 2003), 경부 고속철도 1단계 운행구간에서는 콘크리트 지지층에 침목을 매립하는 구조인 독일의 RHEDA 궤도(그림 1)가 5km 이상의 터널구간에 적용된 바 있고, 2단계 구간에 대해서는 전 구간이 이와 같은 콘크리트 슬래브궤도로 계획되고 있다.

\*한국철도기술연구원(E-mail : kimmc@krri.re.kr)

\*\*정희원 · 교신저자 · 한국철도기술연구원 선임연구원(E-mail : syjang@krri.re.kr)

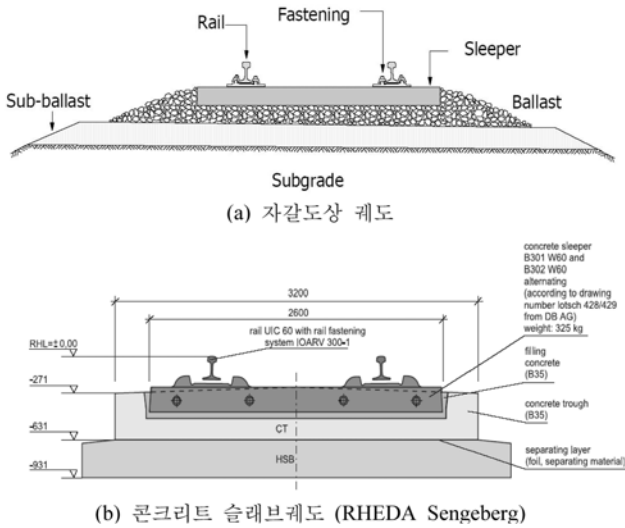


그림 1. 궤도구조의 형식

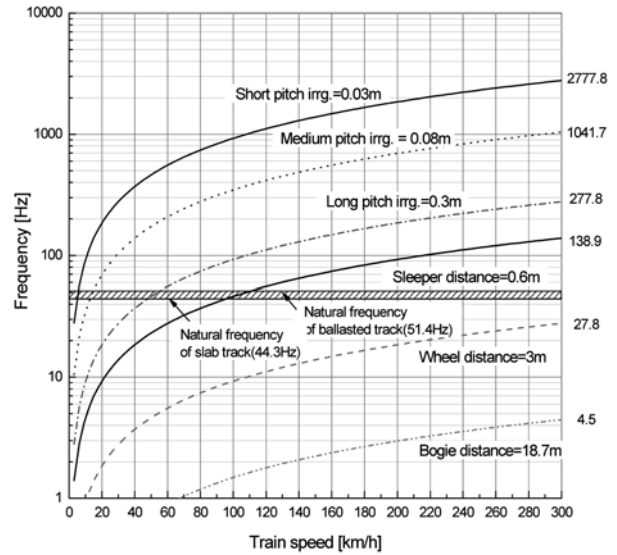


그림 2. 궤도 진동 원인에 따른 주파수 성분

콘크리트 슬래브궤도는 진동감소를 위해 자갈도상궤도의 자갈층 대신 고탄성(high resiliency)의 패드를 사용하고 있다. 그러므로 사용하는 패드의 탄성에 따라 레일 하부의 진동을 자갈도상궤도보다 낮게 제어할 수 있으나, 레일과 열차 차체의 진동이 자갈도상궤도에 비해 더 커질 수 있다. 특히, 최근 터널에서 차내 소음의 증가문제가 대두되고 있으며, 이는 차체의 진동과 밀접한 연관이 있는 것으로 보고되고 있다(김재철 외, 2004).

본 연구에서는 터널 내에서 소음증가와 연관이 있는 차체의 진동이 궤도의 진동특성과 어떠한 관계에 있는가를 규명하기 위해 자갈도상궤도와 콘크리트 슬래브궤도가 부설된 경부고속철도 터널 내에서 궤도(레일, 침목, 도상자갈 및 슬래브, 라이닝)와 KTX 차체의 진동가속도를 측정하여 주파수 해석을 수행하였다. 그리고 이를 기초로 궤도와 차체의 진동 특성을 비교하고, 그 상관관계를 분석하였다.

## 2. 궤도의 가진원과 고유진동수

### 2.1 궤도의 가진원

궤도 구성품 및 궤도 하부 구조물의 진동은 차량 주행 시 차륜/레일 인터페이스에 의하여 발생하게 된다. 진동의 발생 원인은 크게 규칙적인 경우와 불규칙적인 경우로 나눌 수 있으며, 진동의 발생 원인에 따라 진동 주파수가 달라진다. 규칙적인 경우로는 열차의 대차(bogie)와 차륜이 레일의 특정점을 통과할 때 반복적으로 발생하는 대차통과 주파수(bogie passing frequency)와 바퀴통과 주파수(wheel passing frequency), 그리고 차륜이 레일 지지점을 통과할 때 발생하는 침목통과 주파수(sleeper passing frequency) 등을 고려할 수 있으며, 불규칙적인 경우는 바퀴와 레일의 마모 및 레일 표면의 요철 등에 의해 발생하는 주파수 성분으로, 이러한 불규칙 성분은 파장에 따라 8~30cm의 것은 long-pitch, 3~8cm의 것은 short-pitch로 구분된다. 이들 각 주파수 성분의 크기는 열차 속도에 따라 그림 2와 같이 나타난다. 280~300km/h의 속도로 주행 할 때 대차통과 주파수는 대략 4.2~4.5Hz, 바퀴통과 주파수는 25.9~27.8Hz, 침목통과 주파수는 약 129.6~138.9Hz의 범위에 있으며, 레일표면의

불규칙성에 기인하는 진동은 요철의 크기에 따라 259.3Hz에서부터 2777.8Hz의 고주파 영역에까지 넓게 분포한다.

### 2.2 고유진동수

본 연구에서 검토하고 있는 자갈도상궤도와 슬래브궤도는 그림 3과 같은 2중보 모델로 단순화할 수 있다. 여기서 자갈도상궤도의 침목은 슬래브궤도에서의 베이스플레이트에, 자갈도상은 베이스플레이트 패드에 대응된다. 궤도 스프링 상부의 질량은 레일의 질량과 차량에 의한 부가질량(added mass)을 고려하였다. 문헌(Vossloh system 336 구조검토, 2003)에 의하면 차량의 의한 부가질량으로 스프링하 질량(unsprung mass)만을 고려한다. KTX 차량의 경우, 차축의 질량은 약 2ton이며, 따라서 레일에 의해 분배되어 단일 레일 지지점에 작용하는 스프링하 질량은 레일지지 스프링계수에 따른 분배율을 고려할 때 콘크리트 슬래브궤도의 경우 약 378kg, 자갈도상궤도의 경우는 399kg이 된다. 궤도 모델에 대한 고유치 해석결과 고유진동수는 자갈도상궤도의 경우 약 51.4Hz, 콘크리트 슬래브 궤도의 경우 44.3Hz로 나타났다. 궤도의 고유진동수에 대한 궤도 가진원과의 공진가

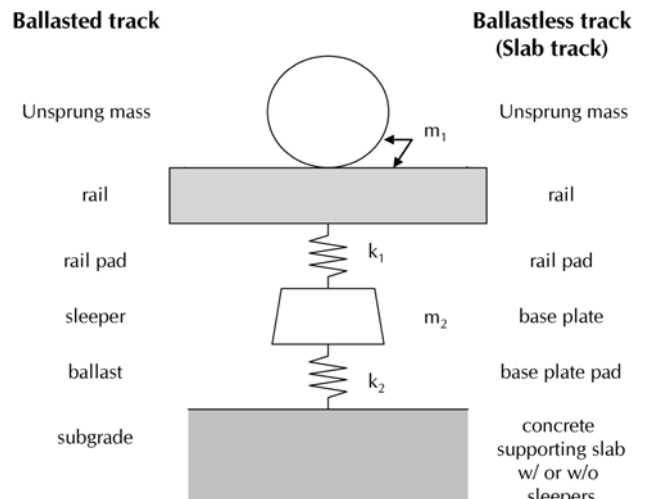


그림 3. 궤도 2중보 모델

능성을 그림 2에 검토하였다. 그림에서 알 수 있듯이 KTX 상용속도 250km/h 이상 속도대역에서는 궤도 가진원에 의한 공진가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

### 3. 터널 내 궤도의 진동 측정

#### 3.1 측정방법

경부고속철도 터널 내에서의 궤도 각 부의 진동 측정을 위해 자갈도상궤도와 콘크리트 슬래브궤도가 부설된 터널 각 1개소를 시험 대상으로 선정하였다(표 2 참조). 각 대상 터널에서 KTX의 해당구간 운행 시 궤도 각 구성품인 레일, 침목, 도상 또는 슬래브와 터널 라이닝에 대한 진동 가속도를 측정하였다. 그림 4는 터널 내 가속도 측정위치를 나타내고, 그림 5는 시험대상 터널에서 진동 가속도 센서가 설치된 모습을 보여주고 있다. 진동 가속도의 측정에는 ICP type의 진동가속도계가 사용되었으며, 측정 위치에 따른 가속도계의 측정용량은 표 3에 나타낸 바와 같다. 차량의 주행속도는 측정된 가속도 신호로부터 추정하였다.

#### 3.2 측정결과 및 분석

자갈도상궤도가 부설된 터널에서는 17회, 콘크리트 슬래브

표 2. 터널 진동 측정 위치 현황(KTX 주행방향 : 하행)

구분	자갈도상궤도	콘크리트 슬래브 궤도 (RHEDA 김도)
터널명	영동터널	화신5터널
측정위치(서울기점)	195.615km	200.839km
터널연장	1,720m	6,247m
KTX 주행속도	286.4km/h	284.0km/h

표 3. 가속도계의 용량

측정위치		자갈도상궤도	콘크리트 슬래브궤도
레일	수직	500g	500g
	수평	500g	500g
침목		100g	50g/100g
슬래브/자갈도상		5g	50g
터널 라이닝		0.5g	0.5g

궤도가 부설된 터널에서는 26회 측정하였고, 그 가운데 KTX 주행속도가 가장 비슷한 데이터에 대해 1/3 Octave band 해석결과를 그림 6과 7에 비교하였다. 콘크리트 슬래브 궤도 부설 터널과 자갈궤도 부설 터널에서의 KTX 주행속도는 각각 284km/h와 286.4km/h로 약 2.4km/h의 차이가 있

표 1. 궤도 구성품의 물성

구성품	항목	단위	자갈도상궤도	콘크리트 슬래브 궤도 (RHEDA)
차륜	unsprung mass	kg	377.7	399.4
레일	중량(종류)	kg/m	60 (UIC60)	60 (UIC60)
	지시간격	m	0.6	0.65
레일패드	동적스프링계수	kN/mm	150*	1000
침목	중량(1/2)	kg	140	-
베이스플레이트	중량	kg	-	5.8
자갈도상	동적스프링계수	kN/mm	81.0	-
베이스플레이트패드	동적스프링계수	kN/mm	-	33.75**

주) \*정적 스프링계수 100kN/mm × 동적배율 1.5

\*\*정적 스프링계수 22.5kN/mm × 동적배율 1.5

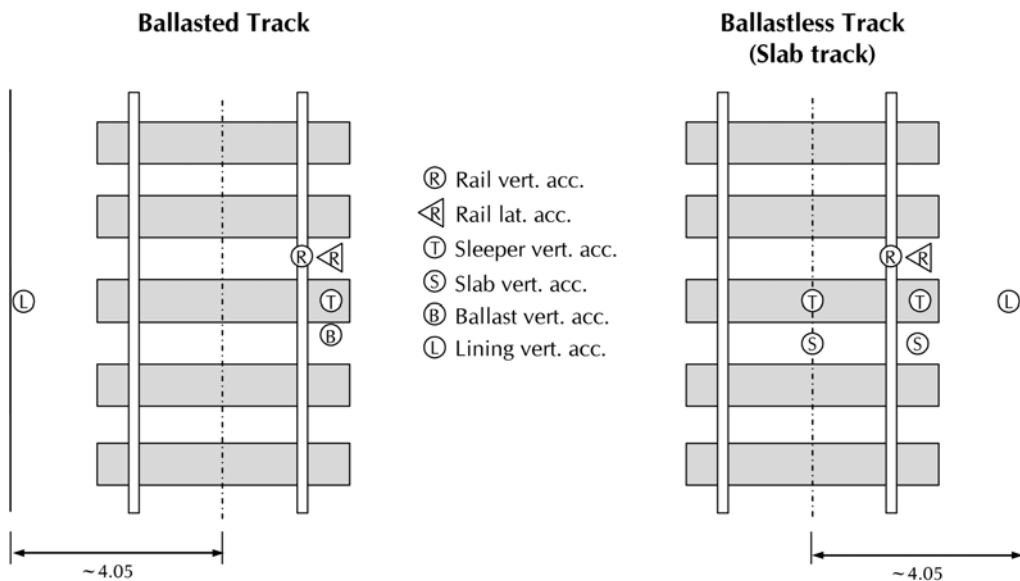


그림 4. 터널 내 진동 측정위치



(a) 경부고속철도 터널



(b) 레일, 침목 등에 설치된  
가속도계(자갈도상궤도)



(c) 레일, 침목 등에 설치된 가속도계(콘크리트  
슬래브궤도)



(d) 터널 라이닝에 설치된 가속도계

그림 5. 시험 대상 터널과 가속도계의 설치

가속도의 경우 1.4dB이 콘크리트 슬래브궤도에서 크게 나타났으며 그 외 침목, 도상 및 슬래브, 터널 라이닝 등에서의 수직 가속도는 반대로 자갈도상궤도에서 더 크게 나타났다(그림 6, 7). 이러한 현상은 콘크리트 슬래브궤도의 경우 자중이 크고, 터널 인버터와 강결되어 있는 콘크리트 구조체 위에 궤광이 놓여지고, 고탄성패드에 의해 레일이 하부 콘크리트와 진동절연(vibration isolation)되어 있기 때문으로 판단된다. 즉, 자갈도상궤도는 레일패드, 자갈도상으로 나누어져 진동이 감쇠되지만, 슬래브궤도와 같이 자갈도상이 없는 궤도는 오직 방진고무패드에 의해서만 진동감쇠가 이루어지기 때문에 레일 하부의 스프링강성이 훨씬 낮아지게 되어 레일의 수직진동이 증가하게 되는 것이다. 일반적으로 고속철도 선로에서는 자갈도상궤도의 경우 약 100kN/mm의 정적 스프링계수를 가지는 패드를 사용하며, 콘크리트 궤도의 경우에는 22.5kN/mm의 패드를 사용하고 있다(표 1 참조). 그림 7은 궤도 각 구성요소의 진동의 크기를 비교한 것으로 궤도 형식에 따른 진동의 차단효과를 잘 보여주고 있다.

레일의 수직방향 가속도의 경우 5~16Hz 대역을 제외한 전 주파수 대역에서 자갈도상궤도에 비해 콘크리트 슬래브 궤도에서 높고, 주파수의 증가에 따라 진동이 점차 증가하는 것으로 나타났다(그림 6a). 콘크리트 슬래브 궤도와 자갈도상궤도에서 측정된 레일 수직가속도를 비교해보면(그림 6a, f), 40Hz 대역까지는 진동레벨이 약 5dB 이하의 차이를 보이고 있으나, 50~80Hz와 160Hz 이상의 주파수 대역

에서는 5dB 이상 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 반면, 레일의 횡방향 가속도에서는 탁월 주파수 성분이 뚜렷하게 나타나지 않았다(그림 6b). 자갈도상궤도와 콘크리트 슬래브 궤도에서 모두 25Hz 대역의 수직진동이 인접 주파수 대역에 비해 높게 나타났는데 이는 차륜통과 주파수(차륜간격 3m)에 해당한다. 또한, 50~80Hz 영역에서도 자갈도상궤도와 콘크리트 슬래브궤도에서 모두 진동이 인접주파수 대역에 비해 다소 크게 나타나고 있으나, 이 주파수 대역의 레일 진동은 궤도 가진원이나 고유진동수와는 뚜렷한 연관성을 찾기 어려우므로 터널 내에서 차량이 고속으로 주행할 때 추가적으로 발생하는 진동성분으로 보는 것이 타당할 것이다.

그림 8은 레일과 자갈도상 또는 슬래브의 진동가속도 차를 비교한 것이다. 그림에서 레일의 진동가속도와 자갈도상 또는 슬래브의 진동가속도 차는 레일의 진동이 하부와 절연된 정도를 나타낸다. 이 그림에 따르면, 콘크리트 슬래브궤도와 자갈도상궤도의 진동감쇠성능은 확연한 차이를 나타낸다. 우선 전체 주파수 대역에서 자갈도상궤도에 비해 콘크리트 슬래브궤도에서의 진동감쇠성능이 우수한 것으로 나타났고, 자갈도상궤도의 경우 20Hz, 100~125Hz 대역에서 진동감쇠성능이 가장 낮게 나타나고 있지만, 콘크리트 슬래브궤도의 경우에는 125Hz 대역에서 진동감쇠성능이 낮고, 25Hz와 80Hz 대역에서는 감쇠성능이 우수한 것으로 나타났다. 진동에너지의 소산측면에서 볼 때 진동감쇠성능이 우수하다는 것은 진동에너지가 스프링으로 모형화된 궤도 구성요소

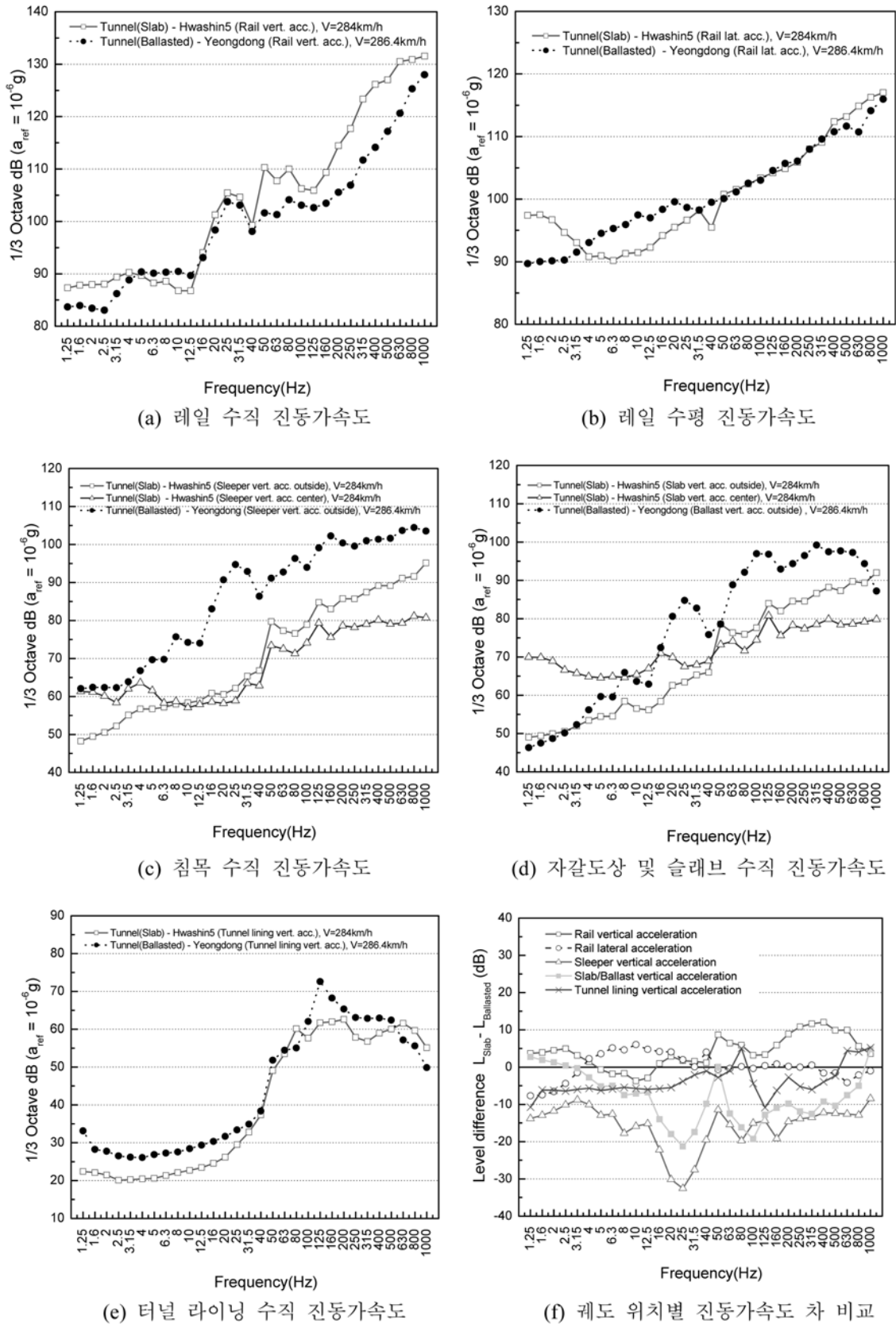


그림 6. 궤도 위치별 진동가속도

에 의해 감소되어 그만큼 하부로 전달되지 않았다는 것을 의미하므로, 진동감쇠성능은 레일을 포함한 궤도 스프링 상부 질량의 진동에도 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서, 이와 같은 결과는 콘크리트 슬래브궤도에 사용된 방진패드의 진동감쇠특성이 자갈도상과는 상이하며, 이 차이가 특정 주파수 대역에서의 레일과 궤도 스프링 상부 질량의 진동과 밀접한 관련이 있음을 시사하고 있다.

콘크리트 슬래브궤도에서 침목 및 슬래브의 수직 가속도는 궤도 외측에서 측정된 값이 궤도 중앙에서 측정된 진동레벨에 비해 크게 나타났다(그림 6c, d). 이는 차량하중에 대한 궤도 구조의 내력 분포형태와 일치한다.

침목의 수직가속도에 대한 탁월주파수는 자갈도상의 경우 25, 50~80, 125~160Hz 대역 근처에서, 콘크리트 슬래브궤도의 경우에는 50Hz와 125Hz에서 관찰된다(그림 6c). 침

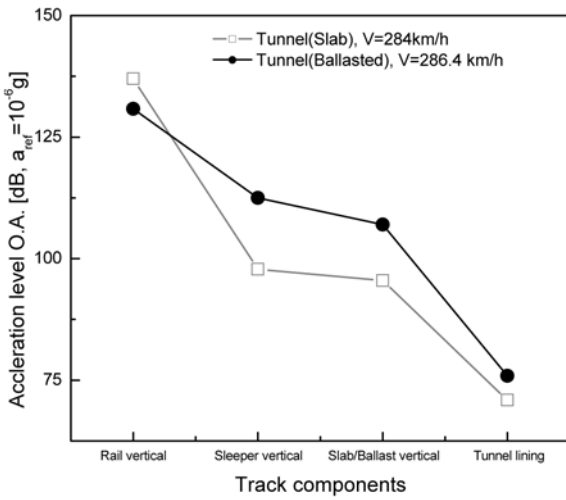


그림 7. 궤도 위치별 진동가속도 Overall 값 비교

목은 레일의 진동이 하부로 전달되는 중간에 위치하므로 진동의 전달특성을 관찰할 수 있는데, 자갈도상궤도에서는 침목의 진동 탁월 주파수가 160Hz 부근을 제외하고 레일의 경우와 대략 일치하고 있는 반면, 콘크리트 슬래브궤도에서는 50Hz 부근을 제외하면 레일의 경우와는 상당히 다르게 나타나고 있다. 이 사실 또한 자갈도상궤도와 콘크리트 슬래브궤도에서 사용된 패드의 동특성의 차이를 말해주고 있다.

슬래브 또는 자갈도상의 수직가속도를 보면(그림 6d), 침목의 경우와 대략 유사한 경향을 보인다. 자갈도상궤도에서는 침목의 진동이 자갈층에 그대로 전달되고 있으며, 콘크리트 슬래브궤도의 경우에도 침목이 슬래브에 매립되어 있으므로 거의 일체거동을 하고 있는 것으로 보인다.

터널 라이닝의 경우, 레일의 수직가속도에 비해 약 65dB가 적게 나타났으며, 탁월 주파수 대역은 자갈도상 궤도와 콘크리트 슬래브궤도 모두 대략 125Hz 부근에서 발생하였고, 콘크리트 슬래브 궤도의 경우에는 80Hz 부근에서도 피크가 나타나고 있다(그림 6c).

#### 4. KTX 차체의 진동 측정

##### 4.1 측정방법

전체 시스템 측면에서 궤도 각 위치별 진동과 차체 진동과의 상관관계를 분석하기 위하여 KTX차량이 자갈도상궤도가 부설된 터널, 콘크리트 슬래브궤도가 부설된 터널 그리고 자갈도상궤도가 부설된 개활지를 주행할 때 차체 측벽과 천장에서의 진동가속도를 측정하였다. 측정위치는 표 4에 나타난 바와 같고, 측정 차량은 KTX 32호(17호 객차)이다. 차체 진동의 측정에서도 궤도 진동 측정에 사용된 것과 동일한 ICP type의 가속도계를 사용하였다.

표 4. 차체 진동 측정 구간 현황(KTX 주행방향 : 하행)

	금오터널	조심1터널	화신5터널	황학터널	개활지
궤도형식	자갈도상궤도		콘크리트 슬래브 궤도		자갈도상궤도
측정구간(서울기점, km)	245.202-242.221	238.613-237.287	206.852-200.756	218.652-208.923	230.564-224.266
터널연장	4,690m	1,329m	6,247m	9,975m	-
KTX 주행속도	275.8km/h	299.0km/h	285.61km/h	282.9km/h	298.8km/h

#### 4.2 측정결과 및 분석

열차의 주행속도는 콘크리트 궤도가 부설된 터널에서 평균 285km/h이었고, 자갈도상궤도가 부설된 터널에서는 평균 275km/h, 자갈도상궤도가 부설된 개활지 구간에서는 평균 299km/h의 속도로 주행한 것으로 나타났다. 여기서 차량의 주행속도가 3.2절의 터널 내 궤도의 진동 측정 시 열차주행속도와 차이가 나는 이유는 각각의 경우 측정위치가 서로 다르기 때문이다. 측정된 차체의 진동가속도에 대해 궤도 진동의 경우와 마찬가지로 1/3 Octave Band 해석을 실시하였다(그림 9).

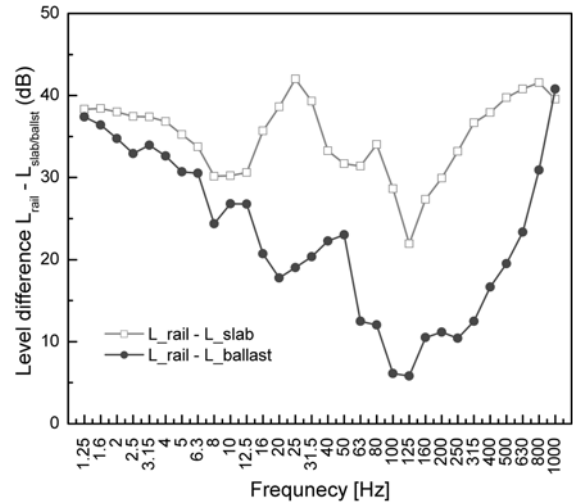
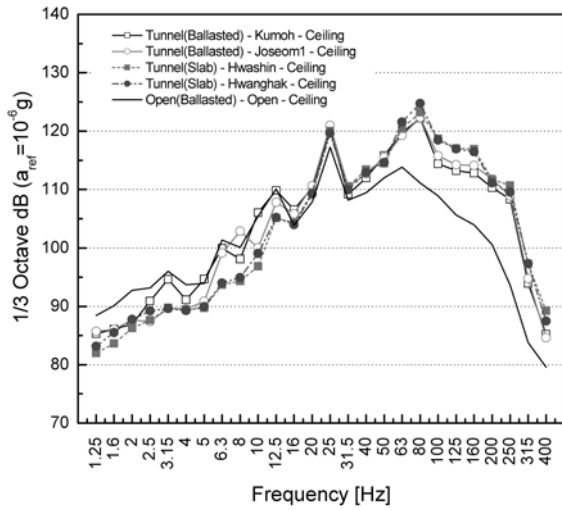


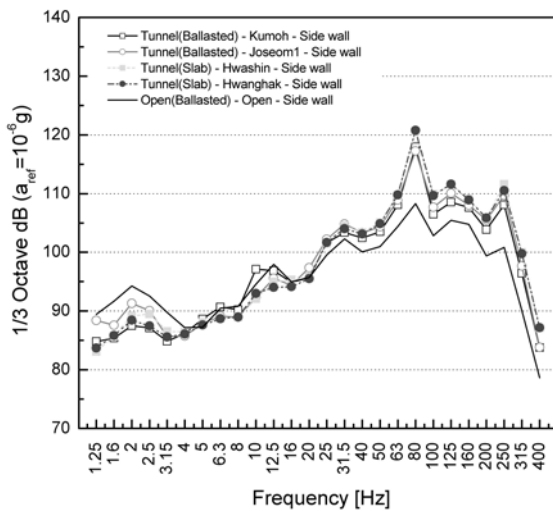
그림 8. 레일과 자갈도상 또는 슬래브 진동가속도 차 비교

천장에서 발생하는 진동은 콘크리트 슬래브궤도가 부설된 터널에서 128.5dB로 자갈도상궤도가 부설된 터널의 127.4dB과 개활지(자갈도상궤도) 구간의 122.1dB와 비교할 때 가장 높은 것으로 나타났다. 차체 측벽에서는 각각 122.7dB, 120.2dB와 114.4dB로 천장과 측벽 모두 대략 5dB 이상 터널 내에서의 진동이 더 큰 것으로 나타났으며, 궤도 조건 및 터널 조건에 관계없이 천장의 진동이 차체 측벽보다 크게 나타났다(그림 10).

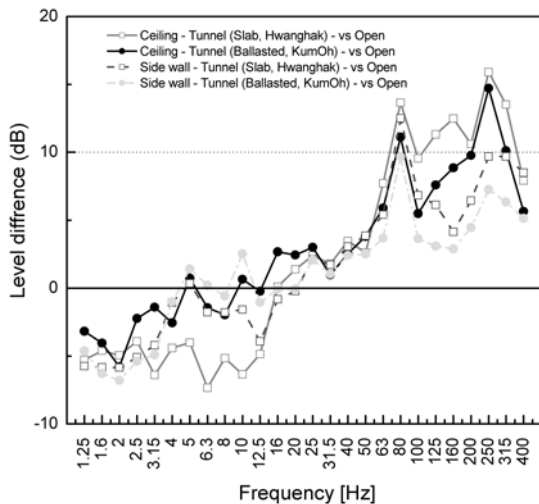
천장의 경우 궤도조건이나 터널 내와 개활지에 관계없이 50Hz 대역까지는 유사한 진동특성을 보여주고 있으며, 레일의 수직진동의 경우에서와 같이 25Hz에서 탁월 주파수가 나타났다. 이것은 차륜통과 주파수와 잘 일치한다. 그러나, 50Hz 이상의 주파수 대역에서는 터널 내에서가 개활지에 비해 진동이 더 크고, 궤도 형식에 관계없이 터널 내에서는 80Hz 대역에서 최대 피크가 나타났다(그림 9a). 개활지에서는 나타나지 않는 80Hz 대역에서의 탁월 주파수는 터널 내 궤도에서 레일 진동의 탁월 주파수와 일치하며, 따라서 이 주파수 대역의 진동이 터널 내에서 열차의 주행에 따라 추가적으로 발생하는 진동성분이라는 사실을 확인할 수 있다.



(a) 천장



(b) 측벽



(c) 개활지와 터널의 차체 진동가속도 차 비교

그림 9. KTX 차체 진동가속도

차체 측벽에서 발생하는 진동 양상도 천장의 진동 양상과 비슷하게 나타났고, 궤도구조 형식에 관계없이 터널 내에서의 탁월 주파수 대역은 80Hz와 250Hz로 나타났고, 이 중 80Hz에서 최대 진동가속도가 발생하였다(그림 9b). 250Hz 대역은 장파장(0.3m 파장)의 레일 불규칙성에 기인하는 진동 성분과 잘 일치하고, 80Hz 성분의 경우는 천장의 진동과 일치한다.

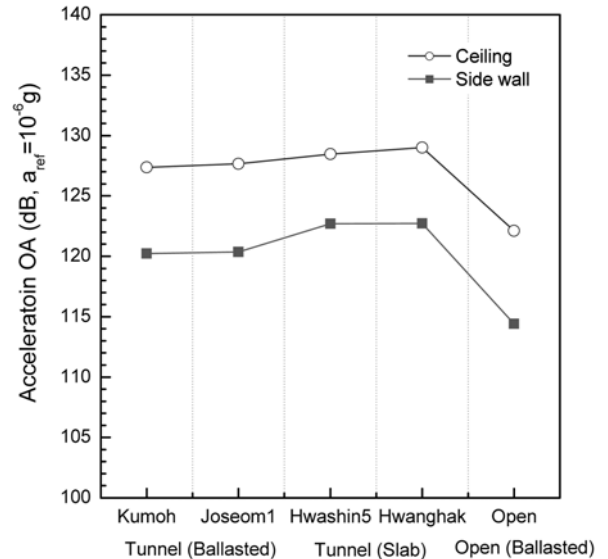


그림 10. KTX 차체 진동가속도 Overall 값 비교

주파수 대역별로 터널 주행 시의 차체 진동을 개활지 주행 시와 비교해 보면(그림 9c), 터널 내에서의 진동 증가경향을 뚜렷이 관찰할 수 있다. 그러나, 콘크리트 슬래브궤도가 부설된 터널과 자갈도상궤도가 부설된 터널에서의 진동의 차이는 전 주파수대역에서 최대 5dB을 넘지 않는 것으로 분석되었다.

## 5. 궤도 진동과 차체 진동의 상관관계

그림 11은 자갈도상궤도가 부설된 터널과 콘크리트 슬래브궤도가 부설된 터널에서의 차체 진동의 차와 레일의 수직진동의 차(Level difference, Lslab-Lballasted)를 비교한 것이다. 그림에 따르면 차체 진동의 차는 80~160Hz에서 크게 나타나지만, 레일의 수직진동의 차는 50, 400Hz 부근에서 가장 큰 것으로 나타난다. 그러나, 전체적으로 볼 때 레일의 진동의 차이가 커지면 차체 진동 차 역시 커지고 있음을 알 수 있으며, 이것은 레일의 진동과 차체 진동의 분명한 상관관계를 보여준다.

전술한 바와 같이 80Hz에서 차체 진동이 증가하는 현상은 레일 수직진동의 탁월 주파수와 일치하고 있으며 따라서, 터

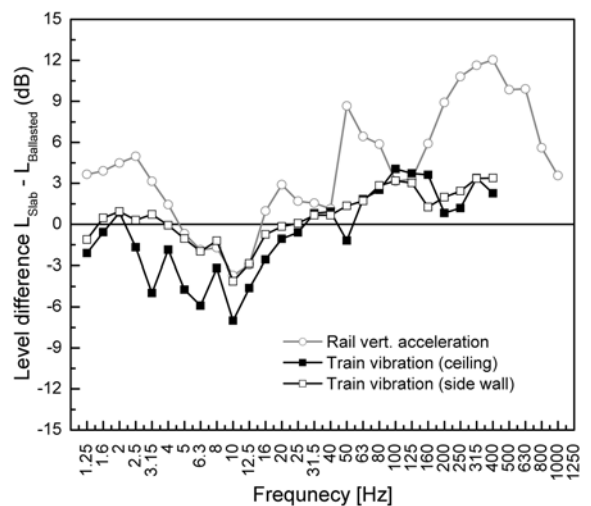


그림 11. 궤도 형식에 따른 레일 수직진동 차와 차체 진동 차

널 주행 시에 차체 진동이 80Hz에서 특히 증가하는 원인과 역시 이 주파수 대역에서 레일의 진동이 증가되는 원인이 매우 밀접한 연관이 있는 것으로 판단된다. 특히 콘크리트 슬래브케도가 부설된 터널 내에서 진동레벨이 더 크게 나타나고 있는데, 이것은 콘크리트 슬래브케도에 적용된 방진패드와 자갈도상케도에 적용된 레일패드 및 자갈도상의 동특성의 차이에서 기인하는 것으로 추정된다(그림 8).

## 6. 결 론

본 연구에서는 경부고속철도 터널 내에서 KTX의 고속 주행 시 케도와 차체의 진동특성을 관찰하고 그 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 레일 수직진동은 콘크리트 케도 부설 터널에서 자갈도상 케도 부설 터널에 비해 크게 나타난 반면, 침목, 도상 및 라이닝 등의 진동은 자갈도상 케도 부설 터널에서 더 크게 나타났다. 이는 콘크리트 케도에 사용되는 고탄성 패드에 의한 영향으로 판단된다.
2. 케도에서의 진동 탁월 주파수는 위치에 따라 주로 25Hz, 50~80Hz, 125Hz 등의 대역에서 나타났다. 25Hz와 125Hz는 차륜통과 주파수와 침목통과 주파수와 잘 일치하지만, 레일의 수직 진동에서 나타난 50~80Hz 대역의 주파수는 일반적인 케도 가진원에 의한 진동성분과는 뚜렷한 연관성을 찾을 수 없었다.
3. KTX 차체에서는 차체 벽보다는 천장에서 진동이 큰 것으로 분석되었으며, 차체 진동의 탁월 주파수는 25Hz, 80Hz, 250Hz 등에서 나타났고, 이 중 80Hz에서 최대 진동가속도를 나타냈다. 25Hz와 250Hz는 차륜통과 주파수와 레일표면의 장파장 요철에 의한 진동 주파수와 잘 일치하지만, 최대 피크를 나타낸 80Hz의 진동 성분은 일반적인 케도 가진원과는 관계없이 레일 진동의 탁월 주파수와 일치한다. 따라서, 80Hz 성분에서의 진동은 터널 내에서 열차의 주행에 따라 추가적으로 발생하는 진동성분으로 볼 수 있으며, 이 주파수 대역에서의 차체와 레일 진동의 증가는 매우 밀접한 연관이 있다.

4. 자갈도상케도와 콘크리트 슬래브 케도에서의 차체 진동과 레일의 진동의 차는 양의 상관관계를 갖는 것으로 나타났다.
5. 콘크리트 슬래브케도가 부설된 터널 내에서 차체와 레일의 진동레벨이 더 크게 나타나는 것은 콘크리트 슬래브케도에 적용된 방진패드와 자갈도상케도의 레일패드 및 자갈도상의 동특성의 차이에서 기인하는 것으로 추정된다.

본 연구의 결과에 의하면, 레일 지지 스프링의 동적특성의 변화에 따라 차량을 포함한 전체 시스템의 진동특성이 달라질 수 있다. 따라서 콘크리트 슬래브케도의 지지강성을 결정하는 데 있어서 시스템 측면에서 차량의 진동과의 상호관계를 고려해야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국철도공사의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

강윤석 등(2003) 고속철도 선로구축물 시스템 안정화 기술개발. 연구보고서, 한국건설기술연구원, 건설교통부.  
 김재철 등(2004) 터널 주행시 KTX 차량의 실내소음 저감방안 도출을 위한 기초용역. 연구보고서, 한국철도기술연구원, 철도청.  
 장승엽 등(2003) 도시철도 선로시스템 표준화. 연구보고서, 한국철도기술연구원, 건설교통부.  
 최강윤 등(2004) 고속철도 운영을 위한 철도시설정비사업 및 기존선 전철화 사업 기술자문(3단계), 고속철도 시험 및 시운전 보고서 : 시설분야. 연구보고서, 한국철도기술연구원, 철도청.  
 Darr, E. and Fiebig, W. (1999) *Feste Fahrbahn-Konstruktion, Bauarten, Systemvergleich Feste Fahrbahn - Schotteroberbau*, Band 1, Teetzlaff Verlag, Hamburg.  
 Esveld, C. (2001) *Modern Railway Track*, 2nd ed., MRT-productions, Zaltbommel.  
 Vossloh system 336 구조검토 (2003) 동일기술공사.

(접수일: 2005.5.23/심사일: 2005.8.5/심사완료일: 2005.11.21)