

## 터널내 자갈도상궤도의 자갈도상매트 시공 후 진동 저감 효과에 대한 연구

### A Study on Effect of Vibration Reduction with Ballast Mat of Ballasted Track in Tunnel

유충준<sup>†</sup>

Chung-Jun You

**Abstract** Due to the travelling of the train with high speed the period of maintenance activities of the ballasted track is coming to be short, and more from the residential area of the ballasted track tunnel circumference the civil appeal is increasing with railroad vibration problem. To reduce the vibration problem and a maintenance cost establishes the ballast mat in the tunnel within part segment. In this study, to estimate the vibration reduction effect of the ballast mat we have done a comparative analysis with the vibration field test by the transit train by at the ballasted track with ballast mat and the standard ballasted track without vibration protection in tunnel.

**Keywords** : Ballast Mat, Ballasted Track, Railroad Vibration

**요    지** 고속화 되어가는 열차의 주행으로 인한 동적인 힘에 의해 자갈도상궤도에서는 구조물의 피로가 증가하여 내구성이 저하되고 있으며 자갈의 세립화로 인한 침하에 의해 궤도의 유지보수주기가 짧아지고 있다. 더욱이 자갈도상궤도로 구성된 터널 철도 주변의 주거지역에서는 철도 진동 문제로 민원이 증가하고 있다. 자갈도상궤도에서 이러한 문제가 발생 시에는 기존의 자갈도상궤도구조를 이용하되 유지보수 및 진동을 저감시킬 수 있는 구조로서 터널 내 일부 구간에 자갈도상매트를 설치한다. 본 논문에서는 터널 내 자갈도상궤도의 자갈 도상매트 설치구간과 비 설치구간에서 측정한 진동의 크기를 통행열차별로 비교함으로서 자갈도상매트의 진동저감효과를 비교 분석하였다.

**주    요    어** : 자갈도상 매트(바라스트 매트), 자갈도상 궤도, 철도진동

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

오래 전부터 열차는 안전하고 편리한 대용량의 여객 및 화물의 운송수단으로 이용되어 왔고, 더욱 빠른 교통수단이 되기 위해 고속화가 꾸준히 추진되고 있으며 대중교통수단으로서 아주 큰 비중을 차지하고 있다. 이를 위한 철도 궤도로서 침목과 지반 사이에 차량에서 발생하는 동적하중을 분산시켜 주기 위해 사용되어 온 기존의 자갈도상궤도(Ballasted Track)는 주행하는 차량의 차륜과 궤도의 직접 접촉에 의한 상호작용으로 발생하여 바퀴를 통해 전달되는

진동을 지반으로 분산시킬 때 좋은 감쇠특성이 있고 배수 특성이 우수할 뿐만 아니라 자갈과 자갈의 틈새에 의한 흡음성이 탁월해서 터널등과 같은 밀폐된 공간에서의 음의 반사를 저감시켜주는 성능이 있다.

그러나 이러한 자갈도상궤도는 고속화되어 가는 열차의 주행으로 인한 동적인 힘에 의해 교량이나 터널과 같은 구조물의 피로가 증가하여 내구성이 저하되고 자갈의 세립화로 인한 침하에 의해 궤도의 유지보수주기가 짧아지고 있으며, 진동 발생 경로에 따라 철도 진동원으로 나타나는 궤도 진동으로 철도 주변의 주거지역에서는 철도 진동 문제로 민원이 발생하고 있다. 따라서 기존의 자갈 도상궤도를 이용하되 유지보수 및 궤도 진동을 저감시킬 수 있는 궤도 구조의 도입이 필요하다. 이를 위해 일반 자갈도상궤도의 동적 거동분석 연구[1] 및 환경지반진동의 예측[2] 등 자갈

\* 책임저자 : 정회원, 경기대학교, 기계시스템공학부, 부교수  
E-mail : chungjun@kyonggi.ac.kr  
TEL : (031)249-9816 FAX : (031)215-3415

도상의 진동문제에 대한 연구가 활발하였으며 레일 차륜간 접촉력 연구[3] 및 기존의 자갈도상궤도구조의 일부 구간에 자갈도상매트(Ballast Mat), 방진 침목(Sleeper Pad)을 설치하는 등, 방진을 주목적으로 하는 시스템 및 궤도 구성품을 개발하고 적용하여 왔다[4].

본 논문은 가야~사상간 복선 전철화 구간의 주령터널 내에서 바라스트 매트 시공에 따른 진동 저감 효과를 분석하는데 그 목적이 있다. 따라서 본 논문에서는 주령터널 내 자갈도상궤도의 바라스트 매트 설치구간과 비설치구간의 진동을 통행열차별로 동시에 측정하여 비교함으로서 바라스트 매트의 진동저감량을 분석하였다.

## 2. 바라스트 매트

### 2.1 바라스트 매트 개요

열차 운행 시 트랙에서 발생되는 진동은 Fig. 1과 같이 지반을 통해 압축파(Compression Waves), 전단파(Shear Waves) 및 표면파(Surface Waves : 일명 Rayleigh파)의 형태로 전달되며, 이러한 파의 에너지가 거리가 멀어짐에 따라 분산 및 흡수로 인하여 감소되나, 부분적으로 서로 다른 주파수 범위 내에서 인간, 건물 또는 기술 장비들에 손상을 입힌다. 그런데 이미 완성된 건축물을 개선하는 것은 어려운 일이기 때문에 궤도 설계 시 소음과 진동 보호 조치 계획을 세워야 한다. 진동 전달을 저감하기 위해서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 레일 패드, 침목 패드 및 바라스트 매트를 설치하는 방법이 있다. 그러나 3가지의 탄성체를

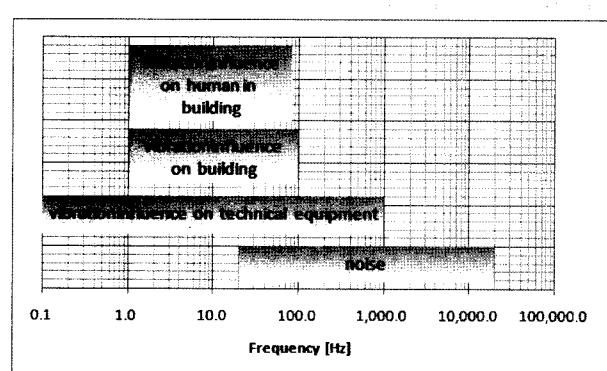


Fig. 1. Vibration transformation and exciting frequency domain [5]

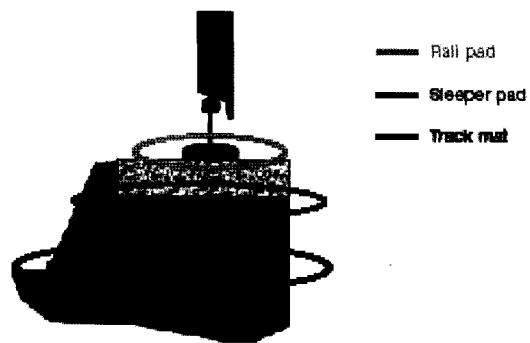


Fig. 2. Structure of ballasted track with elastomer [5]

모두 설치하는 경우 레일 치짐량과 비용이 많아지므로 이 중 1~2가지 탄성체를 선택하여 설치하게 된다. 이 때 도상 자갈층과 노반사이에 바라스트 매트를 설치하는 경우에는 방진 성능과 궤도 안정성을 가져야 하기 때문에 레일의 변형 및 도상 응력, 선로 부설조건, 동적 비율 그리고 저감효과 등을 고려하여 철도용품 표준규격[6]에 따라 차량 속도, 축하중의 적용범위와 정적탄성계수, 동적탄성계수, 삽입손실, 영구압축줄음을 및 전기저항 특성 등을 모두 만족하는 바라스트 매트가 선정되고 있다. 이러한 탄성합성고무제품인 바라스트 매트는 반복되는 차량 축중을 바라스트 매트의 바닥에 접촉되는 탄성층과 자갈보호 탄성층에 의하여 자갈에 분산함과 동시에 강한 내마모성을 가지며 열차관련 궤도 진동 감쇠와 고체음 전달을 감소하는 데 영향을 준다.

### 2.2 바라스트 매트 모델링

가야~사상간 주령터널 내 바라스트 매트 설치구간의 구조는 Fig. 3과 같이 레일-침목-자갈도상-바라스트 매트-노반으로 되어 있으며, 이 경우 Fig. 4에서처럼 차량과 레일, 침목 그리고 자갈도상을 한 질량체로 간주하여 1차원 진동 모델로 묘사할 수 있다.

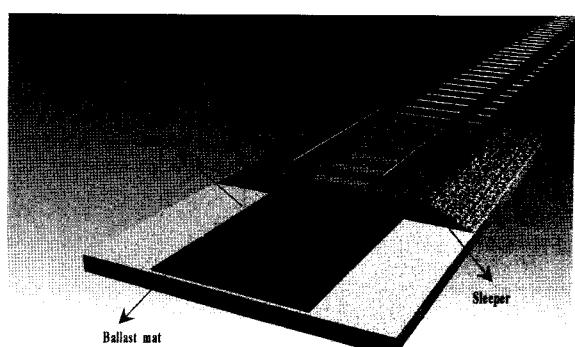


Fig. 3. Structure of ballasted track with ballast mat in tunnel

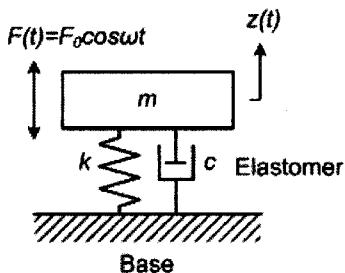


Fig. 4. 1-Dimensional modelling of a ballasted track with ballast mat

궤도의 선형 스프링 모델에서 전달률을 계산하기 위한 운동 방정식과 전달율은 아래의 식과 같이 계산한다[7].

$$m\ddot{z} + cz + kz = F(t) \quad (1)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

$$f_d = f_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3)$$

$$T_r = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta r)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (4)$$

여기서,

$m$ : 차량, 선로 및 자갈층의 질량[kg]

$c$  : 바라스트 매트 감쇠상수[Nm/s]

$k$  : 바라스트 매트 스프링 계수[N/m]

$\zeta$  : 감쇠비 ( $= \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ )

$r$  : 진동수비 ( $= \frac{f_n}{f_0}$ )

$f_n$  : 가진 주파수[Hz]

$f_0$  : 비감쇠 고유진동수[Hz]

$f_d$  : 감쇠 고유진동수[Hz]

$T_r$  : 전달률

$F(t)$  : 가진력

이 때 차진율  $I(\%)$ 는

$$I(\%) = (1 - T_r) \times 100 [\%] \quad (5)$$

이며,

차진레벨(방진효과)  $\Delta V$ 는 다음과 같다.

$$\Delta V = 20 \log(1/T_r) [\text{dB}] \quad (6)$$

### 2.3 바라스트 매트 USM2030의 진동 특성

탄성체의 진동 저감 효과는 탄성체의 고유진동수와 감쇠 계수 및 가진 주파수에 따라 달리 나타난다. 절연 영역에서는 진동수비가 클수록 진동 저감 효과가 커진다. 그렇다고

고유진동수가 작은 탄성체를 선호하는 것은 궤도 안정성 등의 다른 문제점을 야기하므로 바라스트 매트 선정 시 가진 주파수의 범위뿐만 아니라 바라스트 매트의 진동 특성을 조사할 필요가 있다.

본 연구와 관련된 터널의 일부 구간에는 국철의 LS22ton의 하중과 120~200km/h의 속도를 견디는 바라스트 매트로서 USM2030이 설치되었다. 따라서 재하 하중 0.02N/mm<sup>2</sup>을 만족하는 면적 115mm × 115mm의 바라스트 매트 USM2030 샘플과 질량  $m = 28\text{kg}$ 으로 구성된 동력학적 상사 모델을 구축하여 Fig. 5와 같은 측정 시스템을 구성하였으며, 충격 중에 의한 측정 결과로서 Fig. 6에 나타낸 감쇠 진동 응답곡선으로부터 감쇠 고유진동수 26.0Hz와 감쇠비 0.045의 값을 구하였다. 이로부터 동력학적 상사모델의 스프링 상수( $k$ ) 748,743N/m와 감쇠 상수( $c$ ) 412Ns/m의 값을 산출하였으며, 식 (4)로 부터 Fig. 7과 같은 전달율 곡선을 나타내었다. 본 시험의 결과로서 주어진 하중 조건에서 진동 절연은 36.8Hz 이상의 가진 주파수 영역에서 기대할 수 있다.

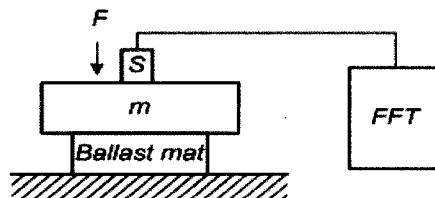


Fig. 5. Measurement system with ballast mat for vibration characteristic

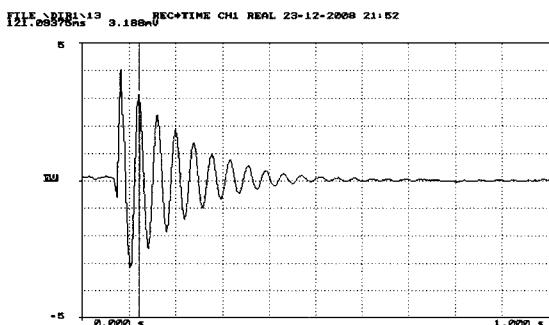


Fig. 6. Time history of damped vibration response

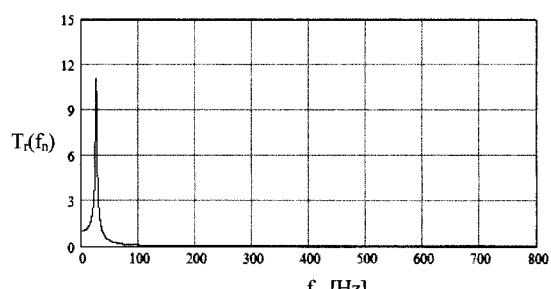


Fig. 7. Transmissibility according to Eq. (4)

또한 제품 제조사의 자체 시험 결과로서 바라스트 매트 USM2030의 초기하중에 따른 고유진동수 변화를 나타낸 Fig. 8로부터 바라스트 매트 USM2030의 하중 조건에 따른 고유진동수가 15~30Hz 사이에 놓여 있음을 보이고 있다. 이것은 Fig. 6의 감쇠 진동 응답곡선으로부터 얻은 바라스 트 매트 USM2030의 동적 특성결과와 잘 일치하고 있음을 보이고 있다.

차륜과 레일의 접촉에 의한 궤도진동은 일정한 간격으로 배치되어 있는 바퀴와 침목으로 인하여 각 바퀴가 레일의 특정점을 지날 때마다 규칙적으로 발생되는 차륜통과주파수(Wheel Passing Frequency)와 침목통과주파수(Sleeper Passing Frequency)가 발생하며, 바퀴의 마모 및 레일 표면의 파상마모에 의하여 불규칙적인 초단파장(ultrashort wave), 단파장(short wave)과 장파장(long wave)의 주파수가 발생된다. 열차 속도가 70~80km/h, 바퀴 간격이 2.1m, 침목 간격이 0.625m, 초단파장이 3~8cm, 단파장은 8~30cm 그리고 장파장이 0.6~2.3m 일 때 이로 인해 발생되는 진동주파수는 다음과 같다[8-11].

- 차륜 통과 주파수 : 9.3~10.6Hz
- 침목 통과 주파수 : 31.1~35.6Hz
- 장파장에 의한 주파수 : 8.5~37.0Hz
- 단파장에 의한 주파수 : 64.8~277.8Hz
- 초단파장에 의한 주파수 : 243.1~740.7Hz

따라서 하중 조건이 동일할 경우 상기 차륜 통과 주파수와 침목 통과 주파수 및 파상 마모의 장파장에 의한 주파수는 증폭영역에 있으며, 파상 마모의 단파장에 의한 주파수와 초단파장에 의한 주파수는 절연영역에 놓인다. 증폭 영역과는 반대로 절연영역에 있는 주파수 성분은 진폭이 저감되는 효과를 기대할 수 있다. 식 (6)에 의하여 각각의 가진 주파수에서의 방진효과는 다음과 같은 값을 기대할 수 있다.

- 차륜 통과 주파수 성분 : -1.2~-1.6dB
- 침목 통과 주파수 성분 : -1.2~-7.2dB
- 단파장에 의한 주파수 성분 : 14.1~38.2dB
- 초단파장에 의한 주파수 성분 : 36.4~49.4dB

장파장에 의한 주파수 범위에는 고유진동수가 놓여 있어서 공진이 발생할 수 있다. 그러나 일반적으로 레일 표면의 불규칙성에 기인하는 진동은 상대적으로 규칙적인 차륜 및 침목 통과주파수보다 파장이 작으며, 고주파 영역에 속한다[12].

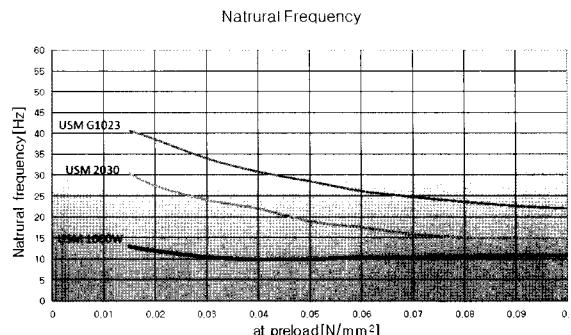


Fig. 8. Natural frequency of ballast mat [5]

### 3. 진동 측정

#### 3.1 개요

진동 저감 효과 분석을 위해 바라스트 매트 시공구간과 미시공구간의 진동 레벨을 소음진동공정시험방법에 준하여 KSC-1507에 정한 진동측정기기를 사용하여 수직방향(V특성)의 진동을 통과 열차별로 동일 열차에 대하여 동시 측정하여 비교분석하였다. 측정 위치는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 바라스트 매트 미설치구간의 중간지점(A, 수직구 지역)과 바라스트 매트 설치구간의 중간 지점(B, 수직구로부터 좌측으로 318m 지점)을 선정하였으며, 진동 센서를 Fig. 10에서 보는 바와 같이 침목으로부터 1.13m 이격된 터널 벽 쪽 옆 콘크리트 노반의 연장선에 수직으로 설치하였다.

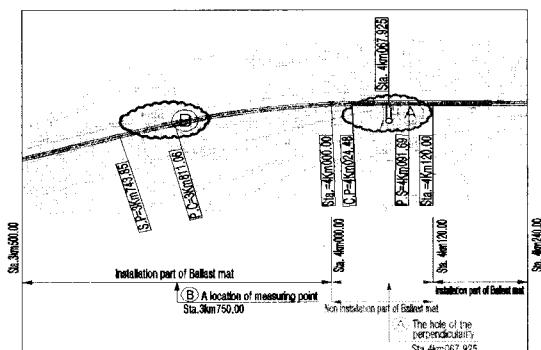


Fig. 9. Plan for measurement

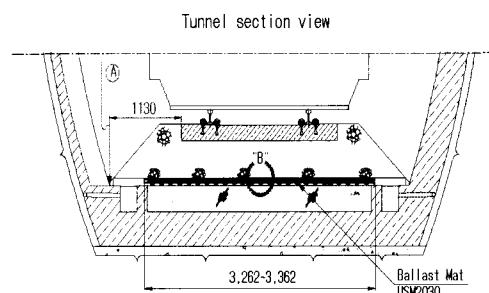


Fig. 10. Sensor position in tunnel

미시공 구간에는 Fig. 11(a)와 같은 슬래브위에 바로 자갈도상이 설치되었으며, 시공 구간에는 슬래브와 자갈도상 사이에 Fig. 11(b)와 같은 바라스트 매트<Type A(W= 3.262m) Clouth USM2030-Sub Ballast Mat>가 설치되었다.

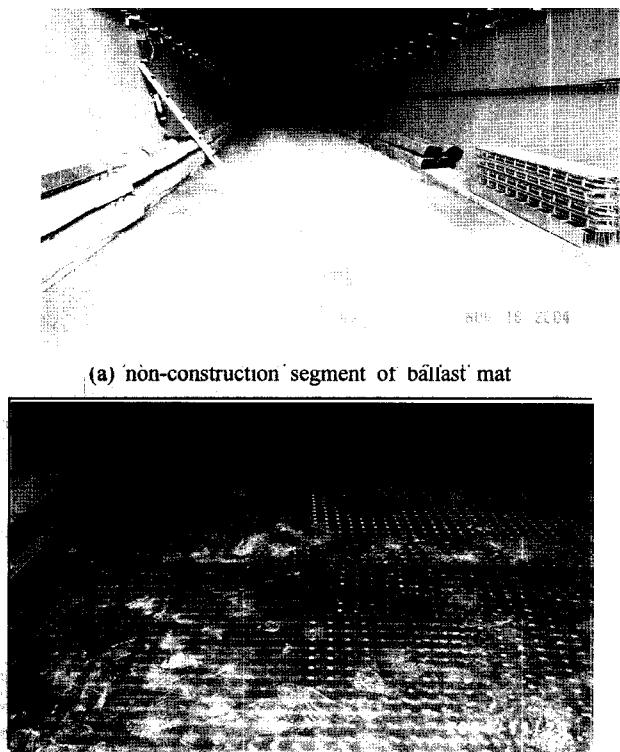


Fig. 11. Non-construction and construction segment of ballast mat at ballasted track in tunnel

통과 열차는 여객 열차인 무궁화호와 새마을호, 그리고 화물 디젤차이며, 여객열차의 주행 속도는 약 80km/h 그리고 화물열차는 약 70km/h였다.

측정은 Fig. 12와 같은 측정 시스템을 구성하여 수행하였으며, KSC-1507에서 정한 측정 장비, 진동 측정 센서의 설치 및 통과 열차에 대한 현장 모습을 Fig. 13에 나타내었다.

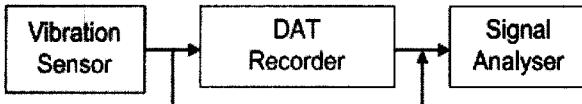


Fig. 12. Measurement system for vibration analyse

측정값은 측정 신호 진폭의 유효값(RMS)으로 나타내었다. 측정 시 수직구 지역의 암전동 레벨은 평균 31.85

dB(V)로서 측정진동레벨에 미치는 영향이 극히 작기 때문에 암전동의 보정없이 측정진동레벨을 대상진동레벨로 하였다.

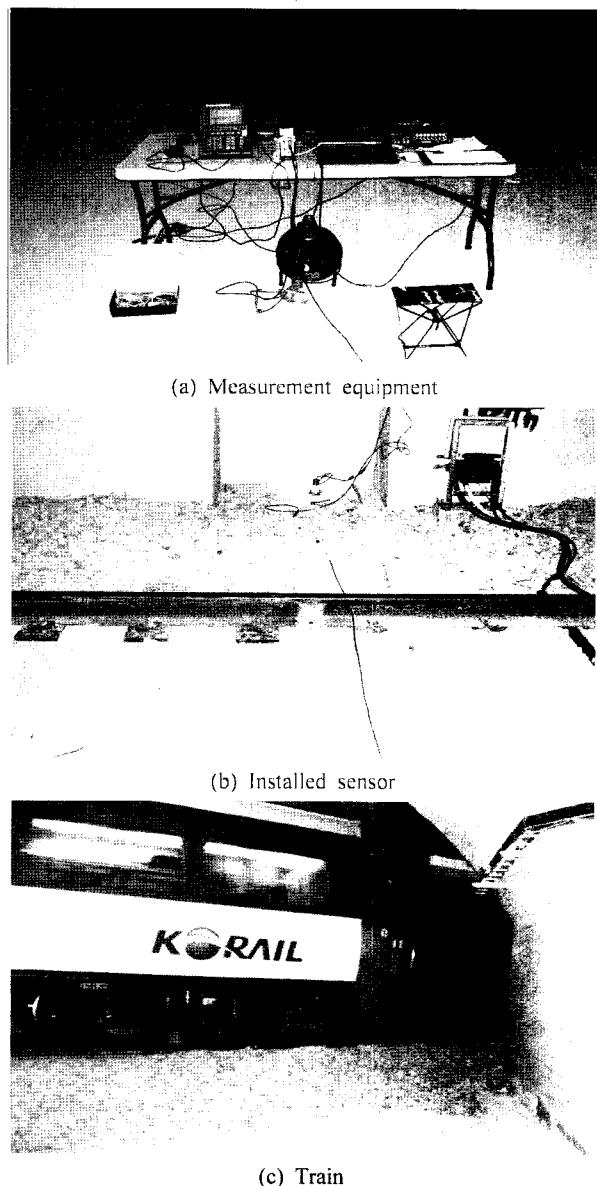


Fig. 13. Measurement equipment, installed sensor and train

### 3.2 측정 결과

신호 분석기의 측정 주파수 대역을 800Hz로 설정하여 측정 데이터의 신호를 분석하였으며, 그 결과로서 가속도 신호의 시간이력 특성과 주파수 응답특성을 바라스트 매트 시공 여부에 따라 열차별로 비교할 수 있도록 Fig. 14a와 Fig. 14b, Fig. 15a와 Fig. 15b 그리고 Fig. 16a 와 Fig. 16b에 나타내었다.

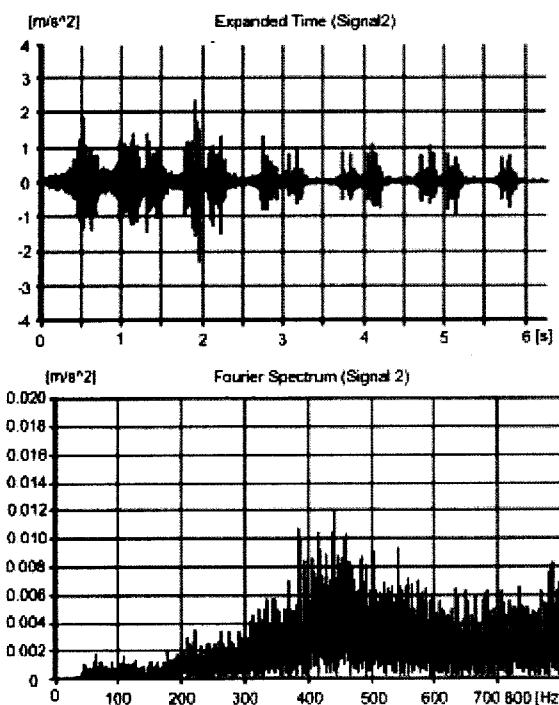


Fig. 14a. Time history and spectrum of acceleration by Mugungwha at the standard ballasted track without vibration protection

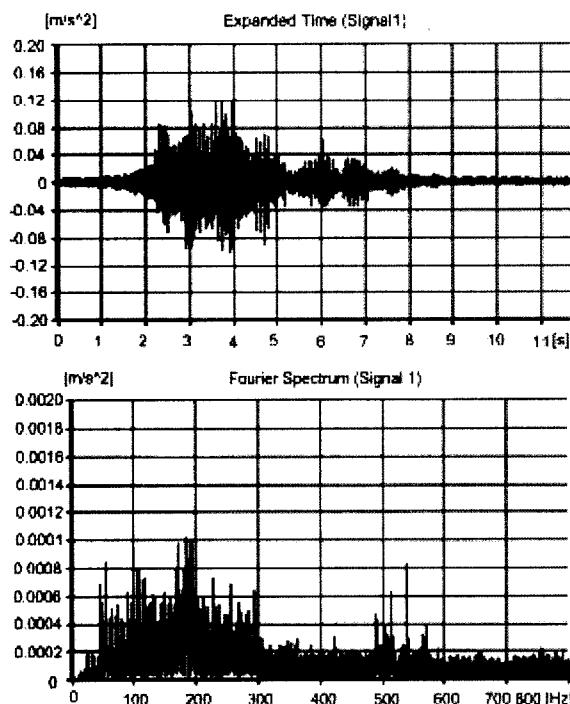


Fig. 14b. Time history and spectrum of acceleration by Mugungwha at the ballasted track with ballast mat

바라스트 매트를 설치하지 않은 경우 발생한 진동의 스펙트럼에서 가진 주파수는 40Hz 이상에 놓여 있음을 확인할 수 있는데, 이로서 가진 주파수는 바라스트 매트

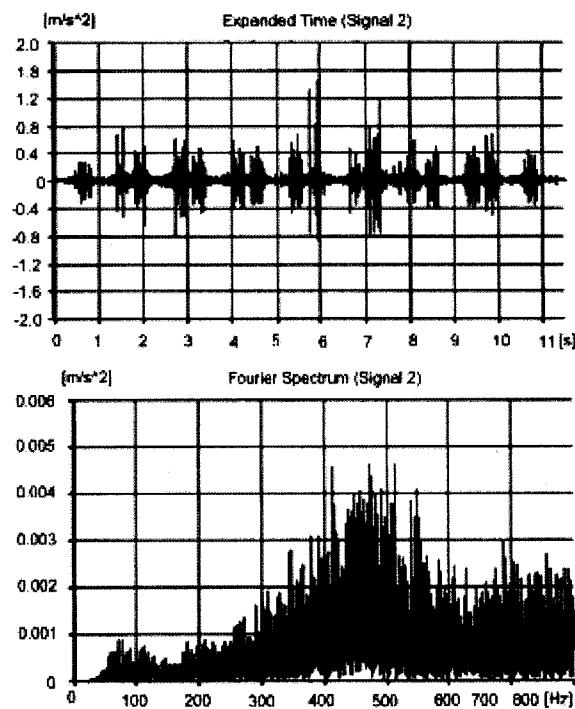


Fig. 15a. Time history and spectrum of acceleration by Saemaul at the standard ballasted track without vibration protection

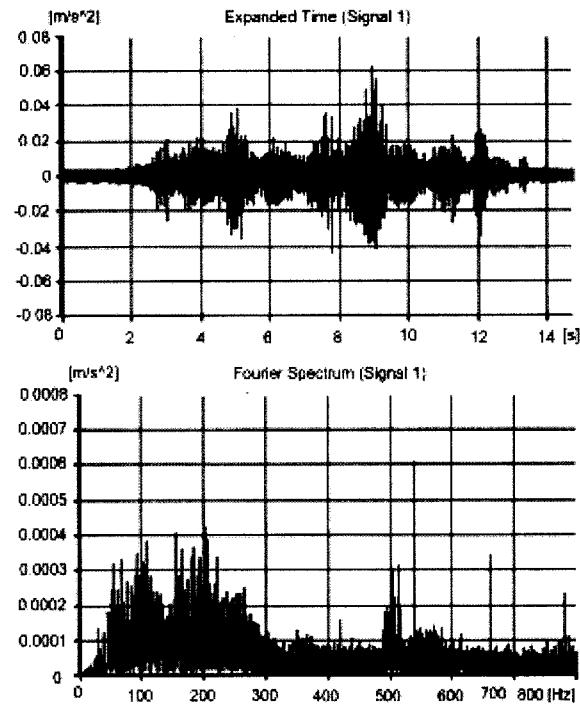


Fig. 15b. Time history and spectrum of acceleration by Saemaul at the ballasted track with ballast mat

의 진동 절연 영역에 있음을 알 수 있다. 따라서 바라스트 매트의 설치로 진동 절연 효과를 기대할 수 있으며, 바라스트 매트 시공 시의 진동 신호와 스펙트럼을 나타

낸 각 그림 결과들에 의하면 가속도 신호의 최대 진폭이 바라스트 매트 시공으로 약 1/10배 이상 줄어들었음을 보이고 있다.

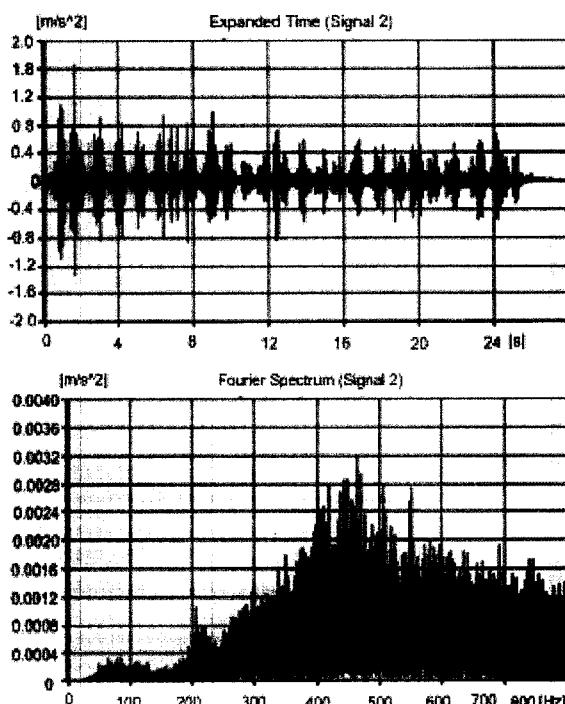


Fig. 16a. Time history and spectrum of acceleration by freight train at the standard ballasted track without vibration protection

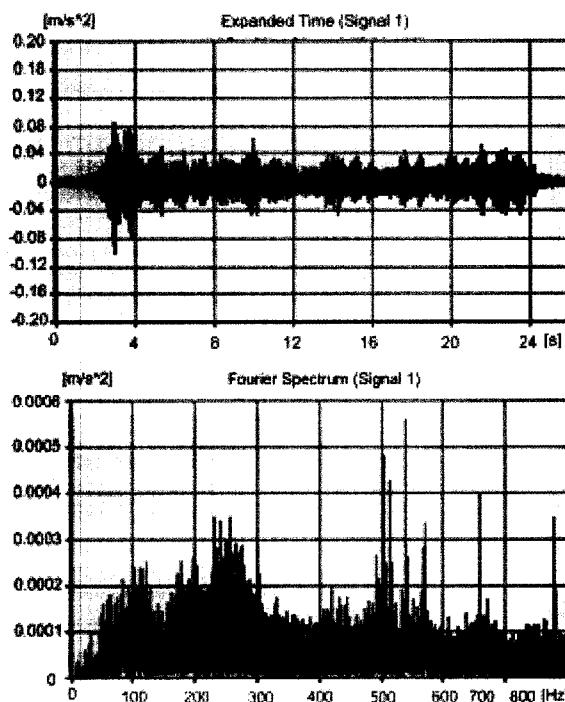


Fig. 16b. Time history and spectrum of acceleration by freight train at the ballasted track with ballast mat

Fig. 17은 열차가 바라스트 매트 시공과 비시공구간을 통과할 때 측정된 진동레벨과 그 차이 레벨을 각 열차별로 나타낸 Table 1의 수치를 도표로 표현한 그림으로서 바라스트 매트 설치로 인하여 무궁화호는 15.45~15.96dB(V), 새마을호는 17.66dB(V) 그리고 화물열차는 15.93~17.63dB(V)의 진동 레벨 저감효과를 가져왔음을 보여주고 있다. 따라서 바라스트 매트 USM2030 설치로 인하여 15.71~17.66 dB(V)의 진동 저감 효과가 있음을 알 수 있다.

Table 1. Vibration level(VAL) [dB(V)]

train	ballast mat	1	2	mean
Mugungwha	a) with	84.69	82.21	83.63
	b) without	69.24	66.25	68.00
	reduction	15.45	15.96	15.71
Saemaul	a) with	77.59	-	77.59
	b) without	59.93	-	59.93
	reduction	17.66	-	17.66
Freight train	a) with	79.57	82.86	81.52
	b) without	63.64	64.93	64.34
	reduction	15.93	17.63	17.19

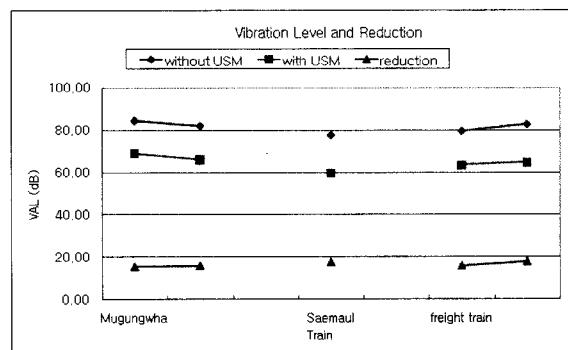


Fig. 17. Vibration- and reduction level

#### 4. 결론

기초콘크리트와 자갈도상 사이에 바라스트 매트 USM2030로 방진 시공을 한 “가야~사상간 복선 전철화 구간”의 주령터널구간 내에서 소음진동공정시험방법에 준하여 KSC-1507에 정한 진동측정기기를 사용한 진동측정을 통하여 바라스트 매트의 시공에 따른 진동저감 효과를 나타내는 것을 목적으로 하였으며, 이를 위하여 터널 내 바라스트 매트 미시공 및 시공지역의 진동의 크기를 시간 영역과 주파수 영역에서 비교분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 바라스트 매트 미 시공 시 발생하는 40Hz 이상의 성분

을 가지는 궤도 진동은 고유 진동수가 26.0Hz이며 진동 절연영역이 36.8Hz 이상인 바라스트 매트 설치에 의하여 방진효과를 가져왔다.

- 바라스트 매트 시공 구간의 진동가속도 최대 진폭이 미시공 구간의 진동가속도 최대 진폭의 약 1/10배 이상 줄어들었다.
- 바라스트 매트 시공으로 바라스트 매트 미시공 구간의 진동 레벨과 비교 시 15.71~17.66dB(V)의 진동레벨 감쇠효과를 가져 왔다.

따라서 가야~사상간 복선 전철화 구간의 바라스트 매트 시공 및 미시공 구간의 진동 저감량을 비교 분석한 결과와 같이 자갈도상궤도에 적절히 선택된 방진 매트를 시공함으로써 궤도 주변 주거지역으로 전달되는 진동 크기의 감소 효과를 기대할 수 있다.

### 감사의 글

본 논문은 2006년도 R.T.Korea의 “가야~사상간 복선 전철화 궤도공사 구간의 바라스트 매트 시공 후 진동 저감 효과 분석” 의뢰에 따른 연구로서, R.T.Korea, 신승 설계, 한국철도시설공단 부산영남지역본부 및 한국철도공사 가야 차량기지 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 박용걸, 최정렬(2006), “현장 측정을 통한 자갈도상 궤도의 동적 거동 분석”, 한국철도학회논문집, 제9권 제14호, pp.401-411.
2. 김정태(2007), “환경지반진동의 예측사례: 터널통과시 미치는 영향”, 한국철도학회 논문집, 제10권 제1호, 한국철도학회, pp. 45-50.
3. 홍용기, 유원희, 이희성, “신개념의 레일차륜간 접촉력 측정에 관한연구”, 한국철도학회 논문집, 제10권 제6호, pp.1-6.
4. 양신추, 김태욱, 강윤석(2004), “고속철도의 선로구축물의 소음 진동 저감대책”, 소음·진동 Vol. 14, No. 2, pp.26-34.
5. Calenberg-Ingenieure GmbH, “USM Track Mats”, USM-Brochures.
6. KORAIL(2005), “철도용품 표준규격 방진재(자갈매트)”, 철도 2250-1070가.
7. Rao(2003), “Mechanical Vibration”, Prentice Hall.
8. 서사범(1995), “레일 파상 마모의 특징, 원인 및 대책”, 철도기술협력회, 철도시설 No. 57, pp.30-39.
9. 김재철(1999), “차륜/레일 접촉에 의한 소음과 저감 대책”, 한국 소음진동공학회지 제9권 제3호, pp. 443-450.
10. 김형곤, 장서일(2003), “휠/레일연마에 의한 지하철 곡선구간의 소음저감에 관한 연구”, 대한환경공학회, 춘계학술연구발표회논문집, pp.836-845.
11. 서사범(2006), “표면요철 레일진동의 해석 및 레일 파상마모의 메커니즘”, 철도시설, 통권 제102호, pp.48-61.
12. 김만철(2007), “경부고속선 자갈궤도의 진동에 영향을 미치는 인자에 대한 분석”, 한국철도학회논문집 제10권 제5호, pp. 463-472.

접수일(2008년 10월 22일), 수정일(2009년 1월 9일),  
제재확정일(2009년 1월 20일)