

<논 문>

## 지하철 운행에 따른 진동특성에 관한 연구

### A Study on the Characteristics of Vibration Induced by Subway Operation

배 동 명\* · 신 창 혁\* · 최 철 은\* · 박 상 곤\*\* · 백 용 진\*\*\*

Dong Myung Bae, Chang Hyuk Shin, Chul Eun Choi, Sang Gon Park  
and Young Jin Baek

(2000년 10월 14일 접수 ; 2001년 3월 2일 심사완료)

**Key Words** : Subway Train(지하철), Vibration Measurement(진동계측), Transferring Vibration(진동 전달), Vibration Reduction(진동감소), Vibration Response(진동응답)

#### ABSTRACT

In this paper the characteristics of vibration induced by subway trains running on track is discussed. The quantitative prediction of the vibration level and the countermeasure for reduction of necessary, is of importance for the better environment. It was made the constructed Bundang line as first step with the modified Young-Dan type to basis on the Japanese Young-Dan type. In this paper it was measured and analyzed to two region (①Susuh-Bokjung, ②Chorim-Suhyun region) of this, at present, operational Bundang line when averaging velocity of train is 60(km/h). As the response characteristics of frequency induced by subway operation, it was confirmed that frequency band of neighborhood of 30~80 Hz in generally dominant. Also to assess the quantitative vibration as response level to be measured for each point of two region in subway operation, the vibrational response level was measured at the state to be not subway operation. And the level was approximately 1/5~1/10 level comparing to subway operation.

#### 1. 서 론

본 논문에서는 지하철 운행에 따른 진동으로 인하여 환경에 미치는 영향을 파악하고자 분당선구간 중 두 지역을 선정하여 진동특성을 계측하고, 그 특성을 분석하여 보았다. 지하철 운행으로 인한 진동은 터널과 지반을 통해 상부지반에 전달되는데, 레일, 궤도 형태, 방진패드, 터널의 종류와 지반의 지질조건에 따라 그 진동전파특성이 다르다. 따라서 지하철 운행시 침목 상부, 콘크리트 도상 및 상부지반에서 진동을 계측하고, 터널의 종류와 지반유형에 따른 진동전파 특성을 분석하여 보았다. 또한 진동원에서 진동이 상부지반으로의 진동 전파감쇠량을 파악하고자

예측치, 실측치를 비교하여 보았다. 진동이 인접지역의 주민이나 건물, 기기장치등에 영향을 미치는 것을 고려해볼 때 진동의 특성파악 및 평가를 통하여 진동을 최소한으로 줄이기 위한 연구가 선행되어야 할 것이다.

#### 2. 지하철의 진동계측

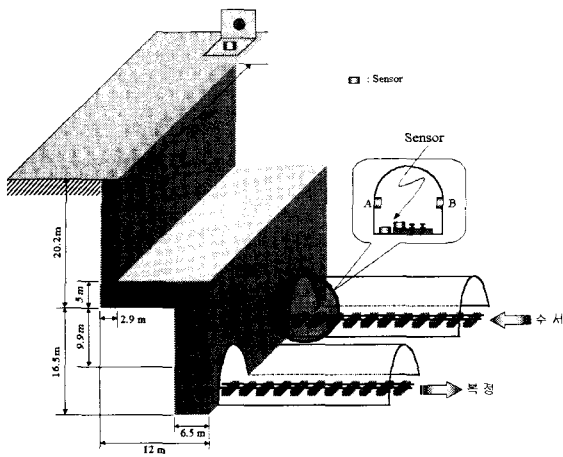
진동 발생원 및 전달매질의 동적특성을 파악하기 위해 기존 지하철 운행노선구간에서 지하철 운행과 상시미동(microtremor)에 대해 궤도 인접부위와 상부 지반에서 동시계측을 실시하였다. 즉 기존 운행노선에서 지하철 평상주행시의 진동수준을 계측하기 위해 지하철 역사가 아닌 역사와 역사 사이에 설치된 환기구를 통해 노선부근으로 접근하여, 지하철이 운행하는 근접부분(침목상부, 침목옆 콘크리트 도상 및 터널내부 벽면)과 상부 지표면에 가속도 센서를 설치하고 동시 계측하였다.

계측 위치는 분당선 운행 구간중 2개소를 임의로 선정하였고, 터널의 구조 형태는 Fig. 1에 A지역(수서~북정역

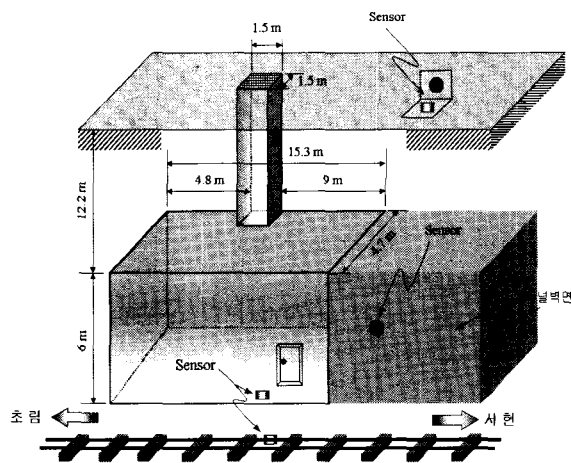
\* 정희원, 부경대학교 조선해양시스템공학과  
E-mail : dmbae@pknu.ac.kr  
Tel : (051) 622-6484, Fax : (051) 620-6480

\*\* 정희원, 부경대학교 음향진동공학과

\*\*\* 정희원, 한국건설안전기술원



(a) Double tunnel type of A region



(b) Double box type of B region

Fig. 1 Sketch of structure type of subway and measuring points

사이구간의 복선터널형(double tunnel type)과 B지역(초림~서현역 사이구간)의 복선박스형(double box type)에 대한 개략도에서 보는 바와 같이 근본적으로 차이는 없으나 구조적인 형상, 터널의 평균벽 두께로 인한 터널의 질

량면에서 차이가 나므로 진동수준에서의 차이가 예상된다. 지하철 분당선의 궤도는 최근 우리나라에서 기술을 도입하여 사용중인 궤도로서 콘크리트 궤도 하부에 패드를 부착하여 방진성을 향상시킨 일본의 “영단형” 방진 궤도이다. 지반조건은 서울시 지하철 건설본부의 협조를 얻어 입수한 지질조사 자료를 근거로 하여 추정하였으며, Table 1에 본 연구를 위한 계측의 현장 입지조건을 요약하여 나타낸다.

또, 본 연구의 계측에 사용한 장비의 구성도 및 특성은 Fig. 2와 같으며, 열차의 평균 주행속도 60 km/h 에서, 열차 통과 시간 약 4초간의 실시간 측정된 진동 가속도를 테이프 레코더로 기록·보관하고, 분석기를 통해 주파수 범위 2~120 Hz 까지 스펙트럼 분석하였다.

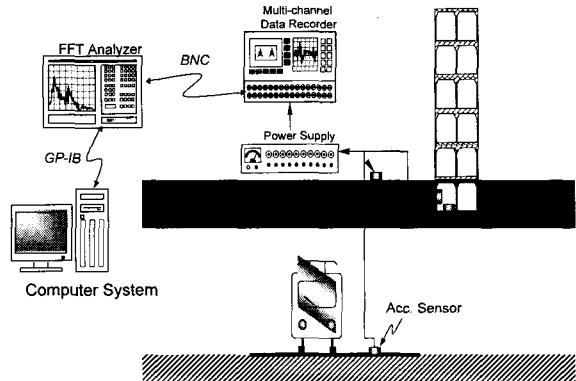


Fig. 2 Measuring and Analysis system

- Vibration Transducer (Accelerometer)
  - Dytran 3100A, Low Imp. Volt. Mode Acc.
  - B & K 4378, High Sensitivity Acc.
- Signal Amplifier
  - Dytran Current Source Power Supply 4103, 4105
  - B&K 2635 Charge Amp.
- Signal Analyzer
  - SD 380Z, 4ch. FFT Analyzer
  - HP 35665A, Dynamic Signal Analyzer

Table 1 Comparison to each measuring position according to geological type

Measuring region	Condition of vibrational source					Thickness covering on tunnel (m)	Stratum state
	Tunnel type	No. of vehicle	Velocity (km/h)	Rail Structure	Jointing type		
A Susuh~Bokjung	Double tunnel type	6	50~60	Modified Young Dan type of Japan	Rail clip (Shield with rubber)	17.86	reclamating layer accumulating layer weathering stone stiff stone
B Chorim~Suhyum	Double Box type	6	50~60			12.2	alluvial layer weathering stone smooth stone

- Multichannel Data Recorder, RACAL 16ch.
- Data Acquisition Sys., Notebook Comp. and Printer

### 3. 진동계측 결과 및 분석

#### 3.1 계측지점별 진동응답의 비교

폐적인 환경을 파괴하며 사람의 건강 및 건물에 악영향을 끼치는 공해 진동으로서, 사람에게 불쾌감을 주는 진동 범위는 1~90 Hz로, 지하철 운행에 의한 진동의 경우 공해 진동이 주로 문제가 되며, 실제 측정 및 분석은 400 Hz 까지 수행하였으나 주파수 분석은 120 Hz 까지로 한정하였다.<sup>(1,3)</sup>

##### (1) 콘크리트 침목 상부

진동원의 특성 파악을 위하여 복선터널형으로 된 A지역의 폐일 인접 콘크리트 침목 상부에서의 상시미동과 평균속도 60 km/h로 운행할 때의 진동계측을 병행하고 이를 분석하였다. Fig. 3은 열차가 지나갈 때, 진동의 가속도 응답과 특성비교를 위해서, 침목 상부에서 열차가 운행하지 않을 때의 상시미동에 대한 실시간 4초간의 진동 가속도 응답과 이의 주파수 응답 특성으로서, 10 Hz 미만의 저주파수가 지배적임을 알 수 있다. Fig. 4는 열차가 지나갈 때 진동의 가속도 응답의 시간이력곡선(a)과 이의 주파수 응답 특성(b)을 보인다. (a)에서 보면 최대 약 6 g 정도의 강한 진동 가속도가 발생하며, (b)의 주파수 응답 특성으로는, 48 Hz~67 Hz 근방이 진동의 탁월주파수 대역임을 알 수 있다.

##### (2) 침목 옆 콘크리트 도상

A지역과 B지역에서의 침목 옆 콘크리트 도상에서 측정된 진동응답을 비교하기 위하여 진동의 시간이력 곡선과 주파수 응답 특성을 보면, Fig. 5는 열차 운행시 침목에서의 진동을 감소시키기 위해서 침목 하부에 설치된 방진패드의 성능 파악을 위해 A지역에서의 콘크리트 도상에서 계측한 진동응답의 크기 및 주파수 응답 특성으로서, Fig. 4의 침목 상부에서 측정된 진동의 크기와 비교해 보면 방진패드의 사용은 탁월한 효과가 있는 것으로 평가된다. Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 A지역 및 B지역에서의 각각의 진동의 최대 가속도 크기는 침목 상부에서의 진동 가속도 응답인 Fig. 4(a)에 비해서, 약 90 % 정도 및 약 98 % 정도의 진동을 감소시켰으며, A지역의 주파수 응답인 Fig. 5(b)는 100 Hz 아래 영역에서도 주로 7 Hz~30 Hz 근방의 대역으로, B지역의 응답인 Fig. 6(b)는 10 Hz 아래쪽 대역과 45 Hz~60 Hz 근방의 대역으로 옮겨지면서, 전체적으로는 Fig. 4(b)의 침목 상부에서의 지배적인 주파수 대역에 비해 대체로 감소됨을 알 수 있다.

##### (3) 터널 내부 벽면

터널 내벽(Fig. 1 참조)에서 측정된 수평 진동 응답의 크기와 주파수 특성으로서, Fig. 7은 A지역이고, Fig. 8은 B지역의 응답이다. Fig. 7(a)에서 보면 A지역의 터널 내부 벽면에서의 수평진동의 최대 크기는 침목 옆 콘크리트 도상의 수직진동의 최대 크기(Fig. 5(a))보다 약간 큰 정도이며, B지역의 경우는 Fig. 8(a)에서 보면 Fig. 6(a)보다 오히려 약간 큰 가속도 진동 응답의 특성을 보인다. A지역의 주파수 응답 특성으로서, Fig. 7(b)에서 보면 52 Hz, 80 Hz 및 100 Hz 근방의 주파수가 탁월주파수로 작용하고 있음을 알 수 있으며, 다른 주파수에 비해 매우 큰 응답을 보임은 터널자체의 고유진동수와 공진현상으로 판단된다. 또, B지역의 경우로, Fig. 8(b)에서 보면 10 Hz 미만의 저주파수가 중심주파수임을 알 수 있다.

##### (4) 지반진동

지하철 운행에 의한 진동이 지반을 통하여 지상 구조물에 전달될 수 있다. 이러한 영향을 검토하기 위하여, 지반의 지질특성이 Table 1에서처럼 서로 다른 두 지역으로서, A지역은 이격거리(진동원에서 계측지점까지 떨어진 거리)가 38.6 m, B지역은 20.8 m인 곳에 지반진동 계측용 가속

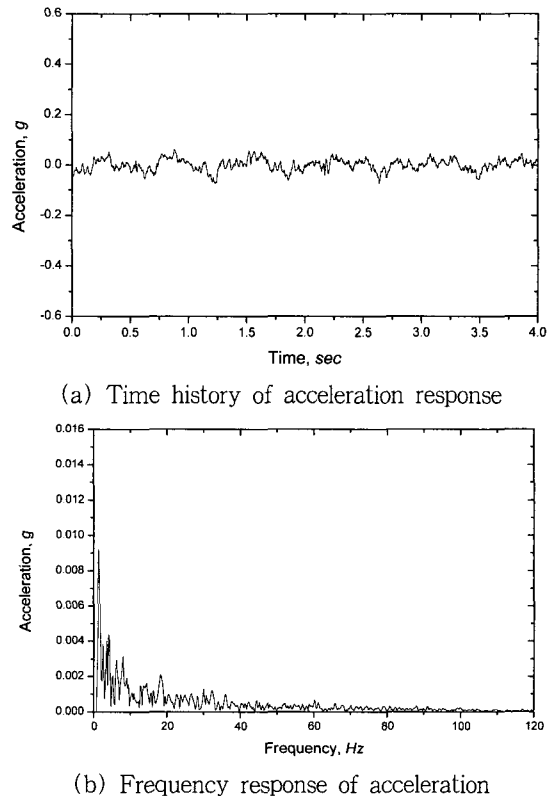
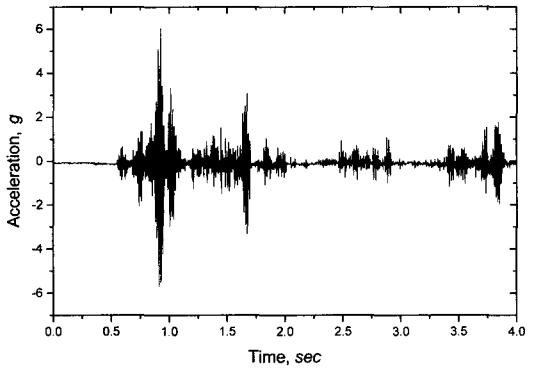
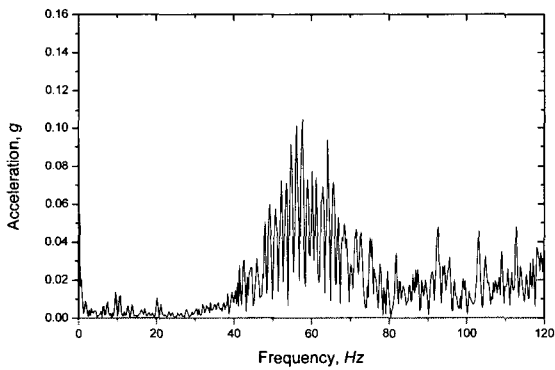


Fig. 3 Vertical vibration response on tie of A region when subway doesn't pass through

도 센서를 설치하고 계측하였다. 진동원에서 지반을 통과한 후 지표면에서의 A지역과 B지역에서의 진동의 크기는 Fig. 9(a)와 Fig. 10(a)를 보면, 미미하지만 나타나는 약간의 차이는 이격거리에 의한 기하 감쇠가 적용된 결과로 보이며, 두 지역 모두 거의 상시미동에 가까운 진동응답의 크기로서, 방진궤도의 채택으로 지하철 운행으로 인한 진동이 상부지반에 미치는 영향을 감소시키는데 있어서, 현재 사용중인 방진 궤도의 효과는 매우 우수한 것으로 판단

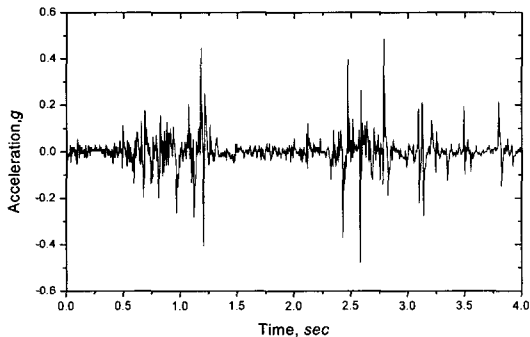


(a) Time history of acceleration response

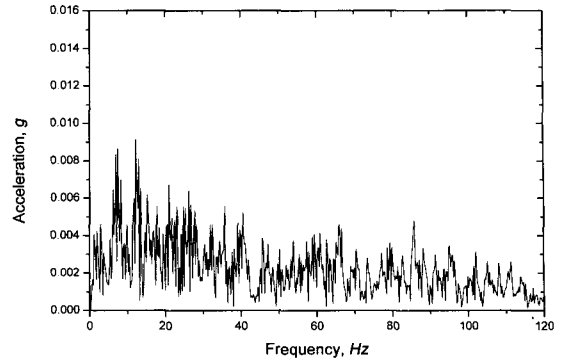


(b) Frequency response of acceleration

Fig. 4 Vertical vibration response on tie of A region when subway passes through

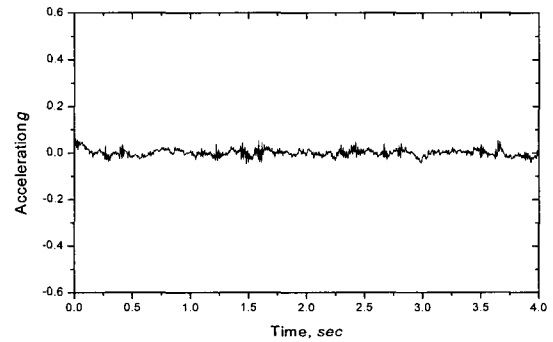


(a) Time history acceleration response

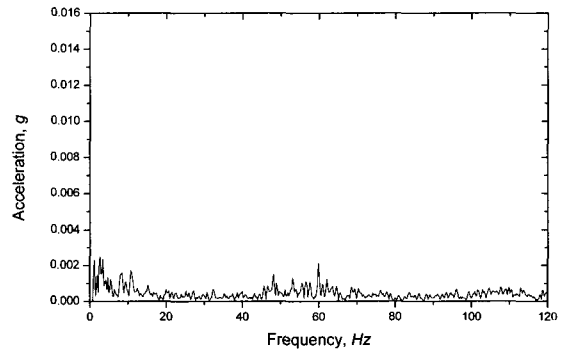


(b) Frequency response acceleration response

Fig. 5 Vertical vibration response on the tie side of concrete bottom, of A region when subway passes through



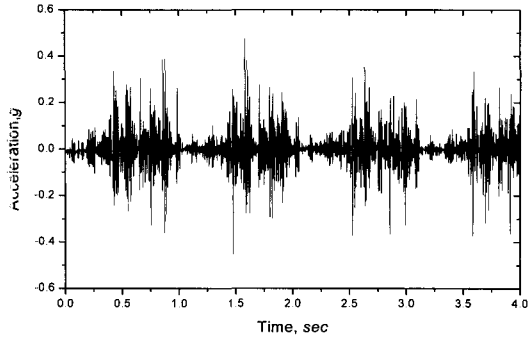
(a) Time history acceleration response



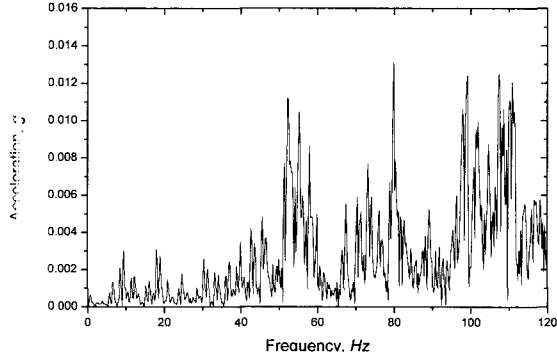
(b) Frequency response acceleration response

Fig. 6 Vertical vibration response on the tie side of concrete bottom, of B region when subway passes through

된다. 또, 두 지역의 주파수 특성으로서 Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)에서 보면, A지역은 60 Hz 근방이 지배적인 주파수 대역이며, B지역은 80 Hz 미만의 전체에 고루 분포되어 있음을 알 수 있다.

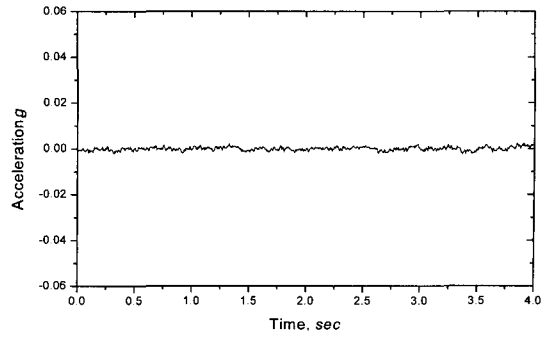


(a) Time history acceleration response

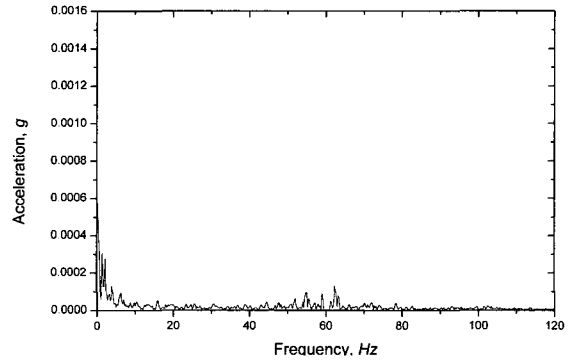


(b) Frequency response acceleration response

**Fig 7** Horizontal vibration response on the wall side of tunnel, of A region when subway passes through

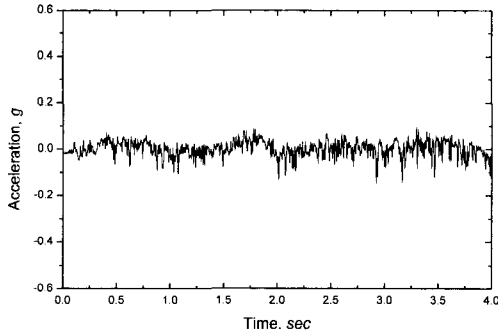


(a) Time history acceleration response

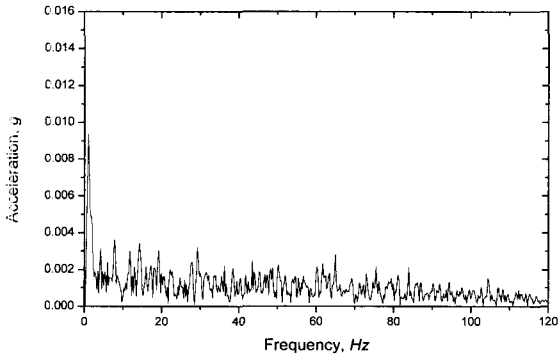


(b) Frequency response acceleration response

**Fig. 9** Vertical vibration response on the upper ground, of A region when subway passes through

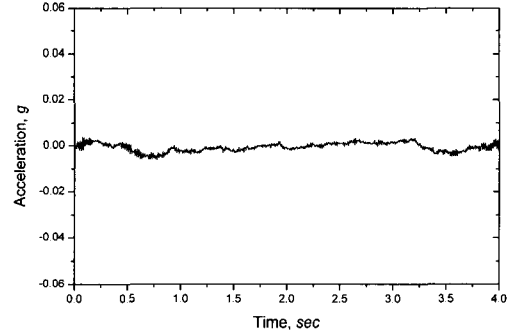


(a) Time history acceleration response

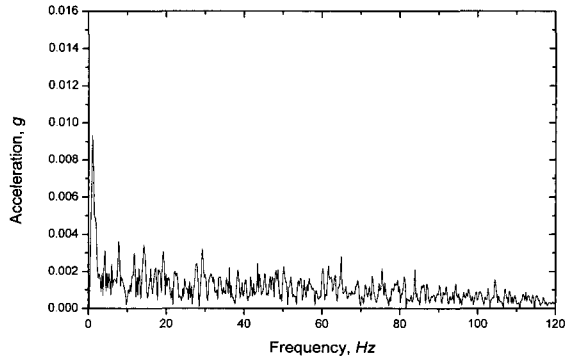


(b) Frequency response acceleration response

**Fig. 8** Horizontal vibration response on the wall side of tunnel, of B region when subway passes through



(a) Time history acceleration response

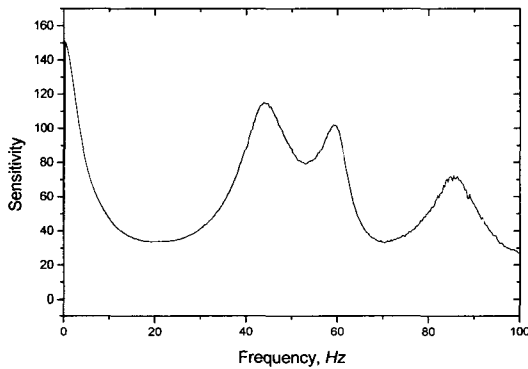


(b) Frequency response acceleration response

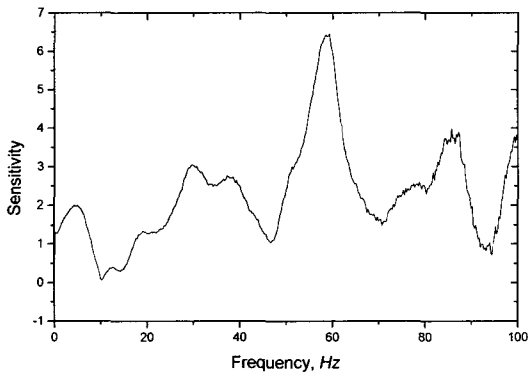
**Fig. 10** Vertical vibration response on the upper ground, of B region when subway passes through

### 3.2 지반 유형별 전파특성

본 계측에서는 지반의 지질특성 및 터널 구조가 Table 1에서처럼 서로 다르고, 이격거리가 38.6 m와 20.8 m로 다른 A 및 B 두 지역을 대상으로 지하철이 운행할 때 발생하는 진동이 지반을 통과할 때의 지반 전파특성을 파악하고자 구한 주파수응답함수(frequency response function)를 Fig. 11에 보인다. 지반진동으로 판단되는 10 Hz 이하의 주파수응답을 제외하면 A지역은 40 Hz, 60 Hz 및 85 Hz 부근에서 큰 응답을 보이며, B지역은 30 Hz, 60 Hz 및 85 Hz 근처에서 응답이 크게 나타남을 알 수 있다. 또, 두 지역에 대한 FRF의 크기는 B지역보다 A지역이 크며, 60 Hz와 85 Hz 근방 이외에, B지역에서는 A지역과는 달리 30 Hz 근방에서 지배적인 주파수 응답을 보이는데, 이는 두 지역의 지반지질의 특성 차이, 터널 구조의 상이성 및 이격거리의 차이 때문인 것으로 판단된다.



(a) A region

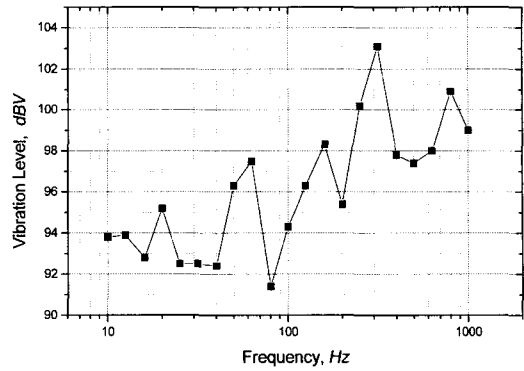


(b) B region

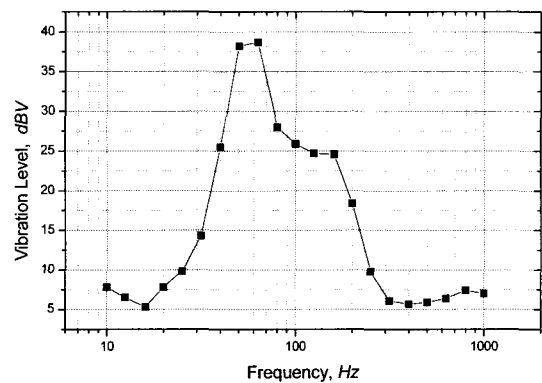
Fig. 11 Frequency response function of the upper ground at A and B region

### 3.3 지반 감쇠특성

Fig. 12는 지하철 통과시 궤도의 콘크리트 도상과 상부 지반에서의 진동수준을 1/3 옥타브 해석을 통하여, B 지역(초립~서현구간)에서의 주파수별로 분석한 결과이다.



(a) Vertical vibration response on the tie side of concrete bottom



(b) Vertical vibration response on the upper ground

Fig. 12 1/3 Octave analysis of B region

관심 주파수 영역인 40~80 Hz 대역에서, 궤도바닥과 상부지반의 진동수준이 60 dB 가량 감소하는 경향을 보임을 알 수 있고, 100 Hz 이상의 고주파수 대역에서 80~90 dB 정도가 감소하였다.

지하철이 운행하는 터널 구조물에서 인근 구조물까지 전달되는 진동의 감쇠는 거리에 따라 에너지가 확산되는 현상으로 일어나는 기하 감쇠(geometrical damping)와 지반 내 매질의 입자간 마찰로 인해 발생하는 에너지 손실로서의 재료감쇠(material damping)로 나뉘며, 지반감쇠의 특성을 평가하기 위해서 진동원에서의 진동응답으로부터 이들 전달감쇠성분을 고려한 응답과 상부지반에서 계측된 응답을 비교해 보았다.

지하철 운행시의 동하중을 발생시키는 진동원의 기하 감쇠량 ( $L_1$ )을 구하는 모델은 Gutowski 등에 의하면 식 (1)과 같다.<sup>(3,4)</sup>

$$L_1(dB) = K \times \log(r/r_0) \quad (1)$$

여기서,  $K$ 는 기하감쇠 상수로서, 선진동원일 경우에는

10으로, 점진동원일 경우에는 20으로 가정하였다.

Table 2 Components of geometrical damping for ground vibration

Measuring position	Kind of vib.	r(m)	r <sub>0</sub> (m)	L <sub>1</sub> (dB)
Chorim~ Suhyun (STA.25K720)	Line vib. (K=10)	19.23	1.5	11.08
	Point vib. (K=20)	19.23	1.5	22.16

한편, 지반내 내부 마찰에 의해서 생기는 재료감쇠로 인한 진동감쇠량(L<sub>2</sub>)을 구하는 방법으로는, 지반 매질의 종류에 따른 진동파의 주파수(f(Hz))와 전파속도(c(m/sec))를 고려한 모델은 식 (2)와 같이 제안되고 있다.<sup>(3,5)</sup>

$$L_2(dB) = 27.29 hf(r - r_0)/c \quad (2)$$

여기서, h는 손실계수(loss factor)이다.

Table 3 Material damping component of ground vibration

Measuring position	r(m)	r <sub>0</sub>	f	c	h	L <sub>2</sub> (dB)
Chorim~ Suhyun (STA.25K720)	19.23	1.5	4	457	0.1	0.42

과의 전달경로에 서로 다른 특성을 갖는 지반의 통과로 인한 진동 감쇠량 추정에는 Tokita가 제안한 모델을 참고로 하여, 전달감쇠(L<sub>3</sub>) 성분은 2.62 dB로 하였다.<sup>(6,7)</sup>

진동원의 진동응답(L<sub>0</sub>(dB))은 지하철 통과시 발생하는 진동응답을 5회 반복하여 측정하였다. Table 4는 초립~서현 구간에서의 진동원의 진동수준(크기), 측정치와 감쇠를 고려한 예측치를 비교하고 그 오차의 범위를 평가한 것으로, 진동원의 특성을 선진동으로 가정했을 때 48.2 %, 점진동으로 가정했을 때 32.4 %의 평균오차가 있음을 알 수 있다. 따라서 지하철 운행시의 진동원은 점진동으로 가정하는 것이 예측치가 실측치에 보다 접근함을 알 수 있다.

여기서, 감쇠를 고려한 예측치(계산치)의 평가는 토질의 특성에 따라 감쇠량은 큰 차이가 나게 마련이며, 본 연구에서는 지하철 운행으로 발생한 진동이 암반에서 모래로 전달되는 것으로 가정한 예측치이므로 실제 측정지점의 토질과는 상당한 차이가 예측될 수 밖에 없고, 지하철 운행

에 의한 진동원을 점진동으로 가정할 것인가 선진동으로 가정할 것인가가 관심의 초점이었다.

Table 4 Comparison on between estimated and measured values of ground vibrational level for Chorim and Suhyun section

Measuring No.	Vib. source (L <sub>0</sub> ) O.A value (dB)	Measuring O.A value (dB)	Estimated O.A value(dB)		Error(%)	
			Line vib. (L <sub>1</sub> )	Point vib. (L <sub>2</sub> )	Line vib.	Point vib.
1	110.5	65.4	101.62	90.54	55	38
2	111.9	67.3	103.02	91.94	53	37
3	110.3	74.9	101.42	90.34	35	21
4	111.2	66.8	102.32	91.24	53	37
5	110.4	70.1	101.52	90.44	45	29
Ave.	110.86	68.9	101.98	90.9	48.2	32.4

#### 4. 결 론

본 논문에서는 우리나라의 지하철 운행시에 발생하는 진동의 수준과 지반을 통해 전달된 진동특성을 분석하여 보았다.

일본의 '영단형'궤도를 수정한 형태로 시공되어 현재 운행중인 분당선 1단계 시공 부분 중 두 지역(수서~북정 및 초립~서현)의 터널 내부에서 평균 차량속도 60 km/h 일 때 터널 내부의 침목 옆 콘크리트 도상(수직 및 수평), 침목 위(수직) 및 터널벽면(수평)에서 진동수준을 측정하였다. 지하철 통과시 주파수 응답특성은 대체로 30 Hz~80 Hz 근방의 주파수 대역이 지배적임을 확인할 수 있었으며, 5 Hz미만에서 나타나는 저주파수 대역의 큰 진동성분들은 지반진동의 영향으로 판단된다. 한편 측정한 2지역의 각 포인트에 대한 지하철 통과시 진동응답의 정량적인 수준을 평가하기 위해서 측정한 상시미동의 진동응답은 대체로 지하철 통과시에 비해 1/5~1/10배 정도이었다.

(1) A지역(수서~북정)에서는 상부지반의 진동수준이 진동원에서의 가속도응답에 비해 약 2 % 정도였다. 주파수 응답은 대체로 52 Hz~62 Hz 근방이 지배적인 주파수 대역이었으며, 지반진동의 영향으로 평가되는 5 Hz 미만 저주파수 대역의 큰 진동성분이 확인되었다. B지역(초립~서현)에서는 상부지반의 진동수준이 진동원에서의 가속도 응답에 비해 약 7 % 미만(5.2 %, 6.6 %)이었다. 주파수

응답은 80 Hz 미만의 전체에 고루 분포되어 있음을 알 수 있다.

(2) 복선터널형(A지역)에서 계측된 최대 가속도응답이 복선 Box형(B지역)보다 10배 이상 크게 나타났다. 진동원으로부터의 이격거리가 서로 다른 2지역의 진동원에서 발생한 진동이 상부지반에 미친 진동응답은 거리에 의한 기하감쇠의 영향으로 볼 수 있다.

(3) 지반의 진동전달 특성으로 판단되는 10 Hz 이하의 성분을 제외하면, A지역의 FRF는 대체로 40 Hz, 60 Hz 및 85 Hz 근방이 지배적임을 알 수 있다. 또, 두 지역에 대한 FRF의 크기는 B지역 보다 A지역이 크며, B지역에서는 A지역과 달리 60 Hz와 85 Hz 근방 이외에 30 Hz 근방에서도 지배적인 주파수응답을 보이는데, 이는 두 지역의 지반지질의 특성차이, 터널구조의 상이성 및 이격거리의 차이 때문인 것으로 판단된다.

(4) 이격거리가 A지역에 비해 짧은 B지역(20.8 m)의 궤도바닥 진동수준에 비해 상부지반의 진동수준은 60 dB 정도 감소하는 경향을 보이며, 100 Hz 이상의 고주파수대역에서는 80~90 dB 정도 감소함을 볼 수 있는데, 이는 B지역의 이격거리 및 연약지반 등의 특성 때문으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 양신추, 조양희 변재양, 1993, "터널내 고속철도 주행에 의한 지반진동의 예측", 한국고속철도건설공단.
- (2) 건설교통부, 1995, "지하철 운행에 의한 건물의 소음, 진동 저감기술개발 및 실용화방안 연구".
- (3) 한국고속철도건설공단, 1995, "고속철도 환경소음 기준 및 진동기준에 대한 연구(진동대책편)".
- (4) Gutowski, T. G. and Dym, C. L., 1979, "Propagation of Ground Vibration: A review", Jour. of Sound and Vibration, 49(2), pp. 179~193.
- (5) Kurzweil, L. G., 1979, "Ground-borne Noise and Vibration from Underground Rail Systems", Jour. of Sound and Vibration, 66.
- (6) Bender, E. K., Kurze, U. J., Lee, K. S., and Ungar, E. E., 1969, "Predictions of Subway-induced Noise and Vibration in Buildings".
- (7) Ungar, E. E. and Wittig, L. E., 1980, "Wayside Noise of Elevated Rail Transit Structures : Analysis of Published Data and Supplement Measurements", U. S. Dept. of Transportation Administration, Rep. No. UMTA-MA-06- 0099-80-6.