한국전산구조공학회
2000년도 봄 학술발표회 논문집

지하철 운행에 따른 진동특성에 관한 연구

A Study on the characteristics of vibration induced by Subway operation

배동명* 신창혁** 이창훈*** 박상곤*** 백용진****
Bae, Dang Myung Shin, Chang Hyuk Lee, Chang Hun Park, Sang Gon Back, Young Jin

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 30~80Hz 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 분석하여 보았다. 지하철 운행으로 인한 진동은 터널을 통해 상부지반에 전달되는데, 레일, 궤도 형태, 방진패드, 터널의 종류와 지반의 지질조건에 따라 그 진동전파특성이 다르다. 따라서 진동원인 침목, 콘크리트 도상, 상부지반에서 진동을 계측하였고, 터널의 종류와 지반유형에 따른 진동전파 특성을 분석하여 보았다. 또한 진동원에서의 진동이 상부지반으로의 진동 전파감쇠량을 파악하고자 예측치와 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.

* 부경대학교 조선해양시스템공학과 교수
** 부경대학교 조선해양시스템공학과 석사
*** 부경대학교 음향진동공학과 석사
**** (재)한국건설안전기술원

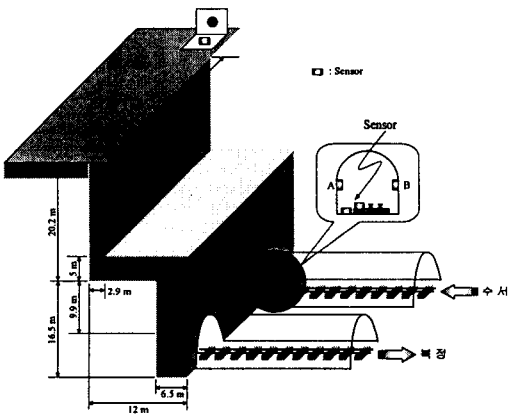
2. 지하철 진동측정 실험

발생원 및 전달매질의 동적특성을 파악하기위해 기존 운행노선구간에서 지하철 운행과 상시미동에 대해 궤도 인접부위와 상부 지반에서 동시계측을 실시하였다. 즉 기존 운행노선에서 지하철 평상 주행시의 진동수준을 계측하기 위해 지하철 역사가 아닌 역사와 역사 사이에 설치된 환기구를 통해 노선부근으로 접근하였으며 침목, 콘크리트 도상등 발생원측과 상부 지표면의 수신부측에 가속도 센서를 동시에 설치하여 상시미동, 지하철 운행시 궤도 및 터널 바닥의 진동, 지표면의 지반진동수준 등을 계측하였다.

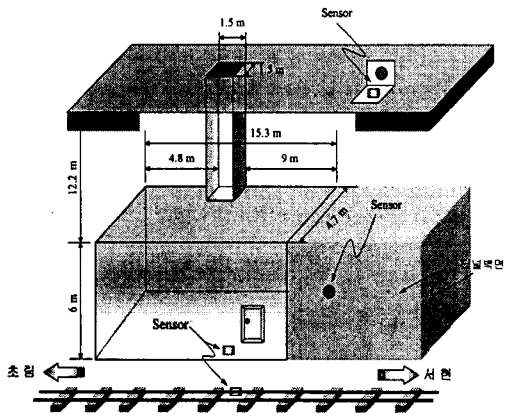
계측위치는 일본의 영단형 방진궤도를 사용한 분당선 운행구간중 2개소를 임의로 선정 하였고 터널의 구조형태는 복선BOX 및 복선터널이고 지반조건은 지질조사 자료를 근거로 추정하였다. Table 1은 본 계측현장의 입지조건을 요약하여 나타낸 것이다.

Table 1 Comparison to each measuring position according to geological type

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



(a) A region
(betwean Susuh and Bokjung sta.)



(b) B region
(betwean Chorim and Suhyun sta.)

Fig. 1 Sketch of measuring region

본 계측에 사용된 장비는 RACAL사의 16채널 데이터 기록기(Data Recorder)와 Hewlett-Packard사의 신호 분석기(Dynamic Signal Analyzer) 모델 HP35665A이고 B&K사의 가속도 센서(Accelerometers)를 이용하여 진동파형을 측정 하였다.

Fig. 2은 본 계측 시스템 구성도를 나타낸 것이다. 가속도 센서로부터 계측된 진동 파형을 테이프 레코드에 열차가 통과하는 시간동안 실시간 기록하여 FFT 분석기를 통해 주파수 범위 2~120 Hz까지 스펙트럼 분석을 수행하였다.

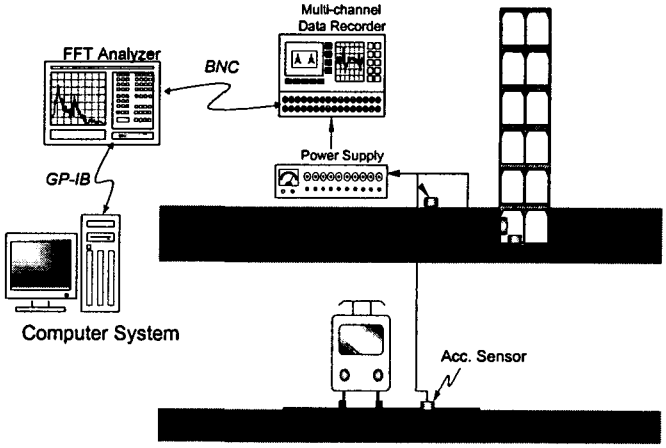
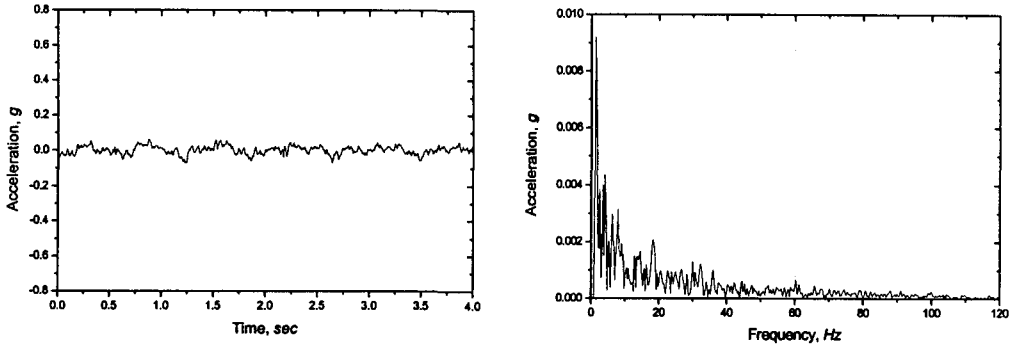


Fig. 2 Measuring and Analysis system

3. 지하철 진동측정 실험결과 및 분석

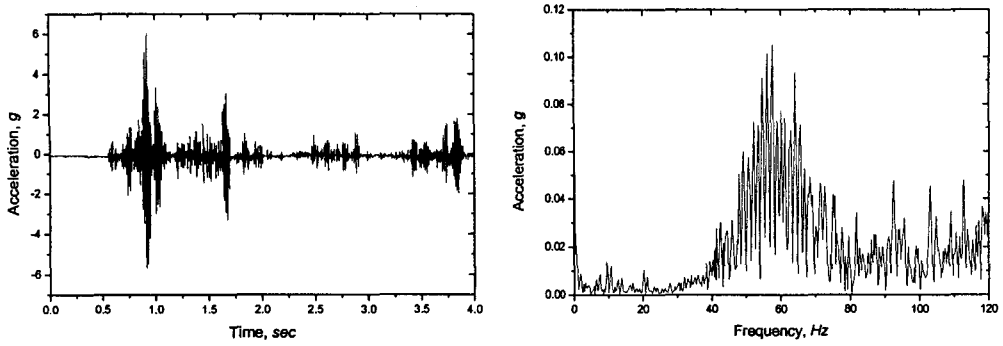
3.1 계측지점별 진동수준 비교분석

진동원의 특성파악을 위하여, 진동원에서의 상시미동과 평균속도 60(km/h)로 운행하는 지하철의 진동을 계측하고 이를 분석하였다. 지하철 운행시 관심주파수인 저주파수대역 중 40~80Hz에서 진동수준이 높으며, 시간이력곡선에서 최대 6g정도의 상당히 강한 진동이 발생함을 알수 있다.



(a) Time history of acceleration response (b) Frequency response of acceleration

Fig. 3 Vertical vibration level on tie when subway doesn't pass through

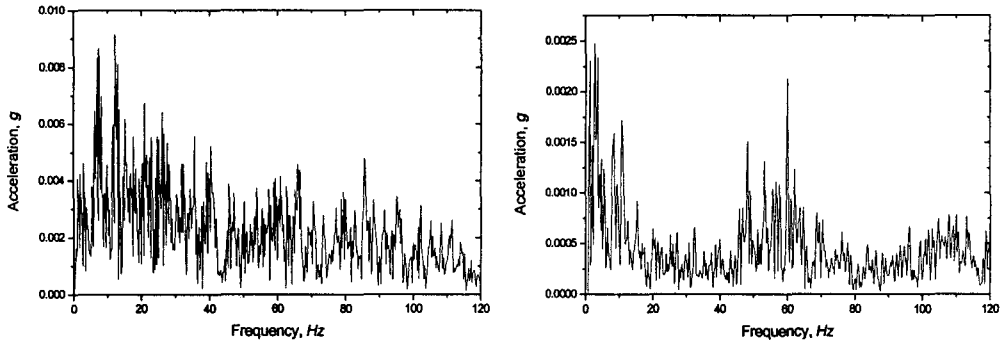


(a) Time history of acceleration response (b) Frequency response of acceleration

Fig. 4 Vertical vibration level on tie when subway passes through

진동원인 침목에서의 진동을 감쇠시키기 위하여 침목 하부에 설치된 방진패드의 성능을 파악하기 위해 A 지역과 B지역에서 각각 침목 옆 콘크리트 도상에서 계측을 실시하였다.

진동원인 침목 위의 진동수준에 비해 A지역 침목 옆 콘크리트 도상에서의 진동수준은 40Hz 이상의 주파수 대역의 진폭이 90% 정도로 감소하였고, B지역 침목 옆 콘크리트 도상에서의 진동수준은 98% 정도 감소하였다. A지역의 경우 B지역보다 진동수준이 크게 나타나는데, 이는 방진패드 및 레일의 보수 및 유지상태의 차이로 판단된다.

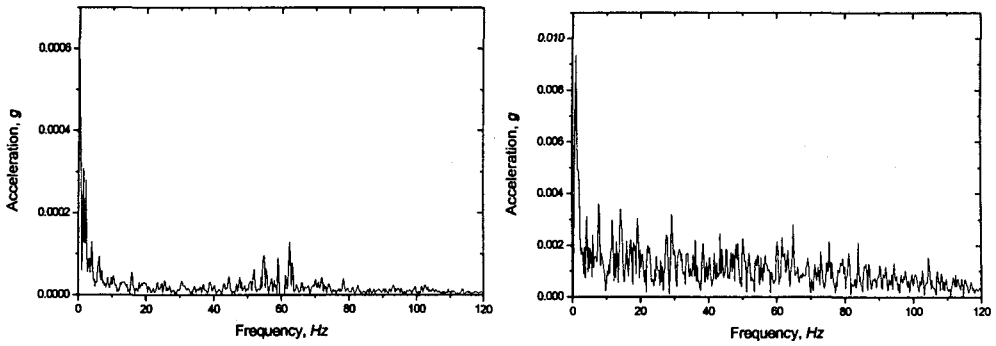


(a) A region (b) B region

(betwean Susuh and Bokjung sta.) (betwean Chorim and Suhyun sta.)

Fig. 5 Vibration level on concrete bottom side of tie when subway passes through

상부지반에서의 진동수준을 보면 지반진동수대역에 비해 진동원의 주파수 대역인40~80Hz 대역에서 큰 폭으로 진폭이 증가함을 알 수 있는데, 앞의 A 지역(수서~복정구간)의 경우는 이격거리가 약 38.6m 이며, B 지역(초림~서현구간)의 경우는 이격거리가 약 20.8m 인 점을 고려한다면, 거리에 의한 기하감쇠가 적게 작용한 결과로 볼수 있다.



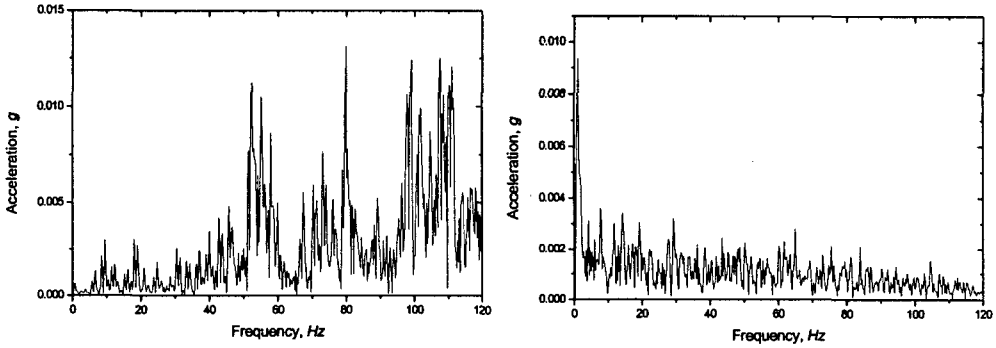
(a) A region (between Susuh and Bokjung sta.)

(b) B region (between Chorim and Suhyun sta.)

Fig. 6 Vibration level on the upper ground when subway passes through

3.2 터널 유형별 전파특성

A 지역(복선터널형)과 B 지역(복선Box 터널형)의 터널 구조적 특징에 따라 진동전파 특성이 다르다. Fig. 7에서 보인 바와 같이 터널 구조에 따라 약 4배 정도의 진동수준차가 있다.



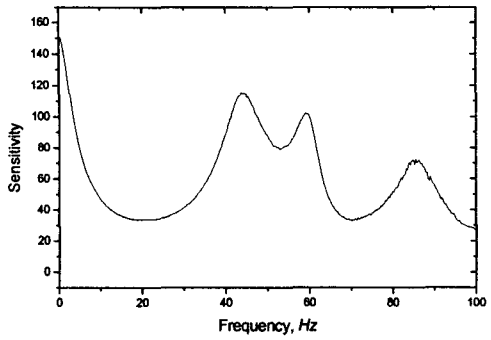
(a) A region (Double tunnel type)

(b) B region (Tunnel type of double Box)

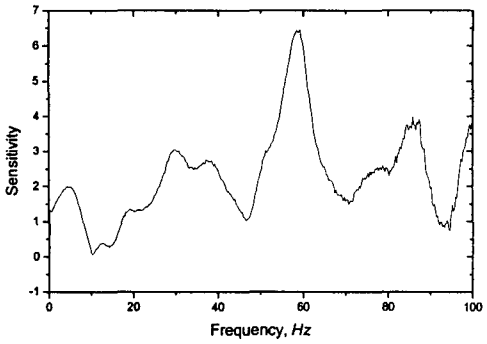
Fig. 7 Vibration level on the side wall of tunnel when subway passes through

3.3 지반유형별 전파특성

본 계측에서 선정한 두 지역을 대상으로 지반 전파특성을 파악하고자 주파수 응답함수(FRF)를 구하였다. Fig. 8은 A 지역(수서~복정구간), B 지역(초림~서현구간)에서 산정된 FRF를 보인 것이다. 지반 진동으로 판단되는 10Hz이하의 주파수 응답을 제외하면, A 지역의 경우에는 40Hz, 60Hz, 83Hz 부근에서 큰 응답을 보였으며, B 지역의 경우에는 30Hz, 40Hz, 60Hz 및 83Hz 근처에서 응답이 크게 나옴을 알 수 있다.



(a) A region (Double tunnel type)



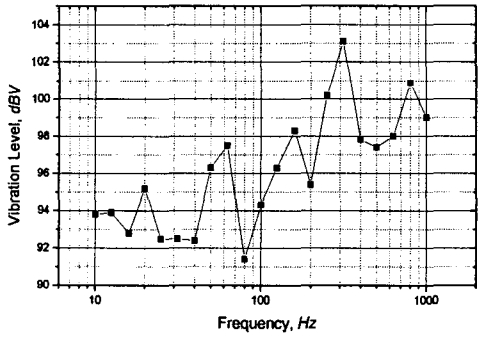
(b) B region (Tunnel type of double Box)

Fig. 8 Frequency response function of the upper ground

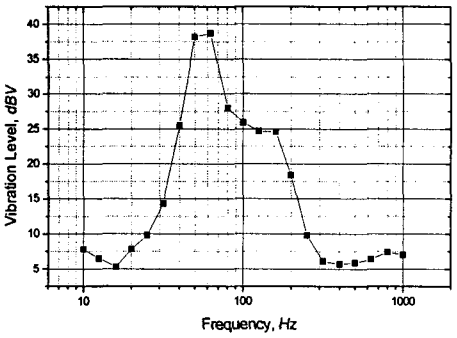
3.4 지반감쇠특성

Fig. 9은 지하철 통과시 궤도의 콘크리트 도상과 상부지반에서의 진동수준을 1/3 옥타브 해석을 통하여, B 지역(초림~서현구간)에서의 주파수별로 분석한 결과이다.

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



(a) Vibration level of the rail foundation



(b) Vibration level of the upper ground

Fig. 9 1/3 Octave analysis of B-region (between Chorim and Suhyun station)

상부지반에서 실측된 진동수준과 비교하기 위하여, 진동원의 신호에서 기하감쇠와 재료감쇠 및 전달 감쇠 성분을 뺀 나머지를 실측치와 비교하였다.

기하감쇠와 재료감쇠를 고려하여, 기하감쇠 (L_1) 와 재료감쇠 (L_2) 를 구하기 위한 성분값 및 계산결과 값은 Table 2와 Table 3에서 보인다. 또한 지하철 운행에 의해 발생한 진동이 암반에서 모래로 전달되는 것으로 보고, Tokita가 제안한 것을 참조하여 전달감쇠 (L_3) 성분을 2.62dB로 결정하였다.

· Geometrical Damping Factor (L_1)

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

Table 2 Components of geometrical damping for ground vibration

Measuring position	Kind of vibrational source	$r(m)$	$r_0(m)$	$L_1(dB)$
Chorim~Suhyun (STA.25K720)	Line vibration (K=10)	19.23	1.5	11.08
	Point vibration (K=20)	19.23	1.5	22.16

· Material Damping Factor (L_2)

$$L_2 = 27.29\, h f (r - r_0)/C$$

$$f = 4\,Hz, \quad C = 400$$

Table 3 Material damping component of ground vibration

Measuring position	$r(m)$	$r_0(m)$	f	C	h	$L_2(dB)$
Chorim~Suhyun (STA.25K720)	19.23	1.5	4	457	0.1	0.42

진동원의 진동수준 (L_0)을 예측하기 위하여 지하철 통과시 발생하는 진동의 O.A(Overall)값을 5회 반복하여 구하였다. Table 4은 초림~서현 구간에서의 진동원의 진동수준 및 예측치와 실측치를 비교하고, 그 오차를 구한 것이다.

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

Meauring No.	Vib. source(L_0) O.A value(dB)	Measuring O.A value(dB)	Estimated O.A value(dB)		Error(%)	
			Line vibration(L_1)	Point vibration(L_2)	Line vibration	Point vibration
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

진동원의 특성을 선진동으로 가정했을 때 35~55%, 점진동으로 가정했을 때 21~38%의 오차가 발생하였다. 따라서, 진동원의 특성을 선진동 보다도 점진동으로 가정했을 경우에 예측치가 실측치에 더 근사해짐을 알 수 있다.

5. 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~복정 및 초림~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 계측하였다. 지하철 통과시 주파수 응답특성은 대체로 30Hz~80Hz 근방의 주파수 대역이 지배적임을 확인할 수 있었으며, 5Hz미만에서 나타나는 저주파수 대역의 큰 진동성분들은 지반진동의 영향으로 판단된다. 한편 계측한 2지역의 각 포인트에 대한 지하철 통과시 진동응답의 정량적인 수준을 평가하기 위해서 계측한 상시미동의 진동응답은 대체로 지하철 통과시에 비해 1/5~1/10배 정도이었다.

1) A지역(수서~복정)에서는 상부지반의 진동수준이 진동원에서의 가속도응답에 비해 약 2%정도였다. 주파수 응답은 대체로 52Hz~62Hz 근방이 지배적인 주파수대역이었으며, 지반진동의 영향으로 평가되는 5Hz 미만 저주파수 대역의 큰 진동성분이 확인되었다.

B지역(초림~서현)에서는 상부지반의 진동수준이 진동원에서의 가속도응답에 비해 약 7% 미만(5.2%, 6.6%)이였다. 주파수응답은 대체로 40Hz~70Hz 근방이 지배적인 주파수대역으로 확인되었다.

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 10Hz 이하의 성분을 제외하면, A지역의 FRF는 대체로 40Hz, 60Hz 및 83Hz 근방이 지배적임을 알 수 있으며, B지역의 FRF 파형은 앞의 두지역의 FRF특성과 다소 다르며, 30Hz, 40Hz, 60Hz 및 83Hz 부근이 지배적임을 알 수 있다.

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

참고문헌

1. 양신추, 조양희 변재양, "터널내 고속철도 주행에 의한 지반진동의 예측", 한국고속철도건설공단, 1993

2. Propagation of Ground Vibration : A Review, T.G.Gutowski and C.L.Dym Journal of Sound and Vibration, 1979, 49(2), 179-193

3. E. K. Bender, U. J. Kurze, K. S. Lee, and E.E. Ungar, "Predictions of subway-induced noise and vibration in buildings", 1969

4. 건설교통부, " 지하철 운행에 의한 건물의 소음, 진동 저감기술개발 및 실용화방안 연구, 1995