

# 지하철 운행에 의한 중량터널의 진동

## Vibration of Massive Tunnel Structure Induced by Subway Operation

김 희철<sup>1)</sup>      신 효근<sup>2)</sup>  
Kim, Heecheul      Shin, Hyo-Geun

### ABSTRACT

Problems of noise and vibration induced by subway operation became one of the major factor when new subway line is under consideration. One of the most economic method in reducing the noise and vibration is the increasement of the tunnel mass. Vibration of the massive tunnel structure has been measured induced by subway operation. STEDEF system which was adopted by Seoul Metropolitan Subway Bureau has been proved that more than 99% of the vibration has been decreased at the bottom of the railway track. Most of the vibration measured inside and outside of the tunnel showed that their peak frequency is around 50Hz or 100Hz.

The propagation characteristics of vibration in massive tunnel, wave propagate in three directions. Overall frequency in the range of 0 to 125Hz horizontal transmission usually increase, while vertical transmission decreases about 50% in the range of 0 to 25Hz and 90Hz to 125Hz regardless of modal shape.

### 1. 지하철 운행과 진동

대도시의 인구증가와 함께 도시의 규모는 점점 팽창하고 있으며 이에 따른 교통난은 더욱 심각해지고 있다. 인구의 증가에 따라 발생하는 대도시의 교통난을 해소하기 위한 방안으로 지하철 수단인 지하철이 활용되어졌다. 지하철은 많은 인원을 수송할 수 있으며 지상의 교통체중에도 영향을 받지 않고 정해진 시간계획에 따라 운행되는 장점으로 인하여 대도시의 서민들에게는 꼭 필요한 교통수단이 되고 있으며 앞으로 그 활용범위는 점점 확대될 것으로 예상된다. 그러나 지하철 운행에 따른 소음과 진동은 인근 주민과 지하철을 이용하는 사람들에게 또 다른 공해로 작용하고 있다. 따라서 지하철 운행에 따른 소음과 진동의 원인을 분석하여 이에 대한 대책을 미리 마련하는 것이 지하철 중설에 따라 야기될 수 있는 주민들의 불편을 방지하는 가장 경제적인 방법이 될 것이다.

지하철 운행에 의한 소음과 진동을 감소시키기 위한 노력의 일환으로 차량, 궤도 system, 지하 구조물 및 인접 구조물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지하철 운행에 의해 발생하는 소음의 대부분은 구조물의 진동에 의한 고체전달음의 형태로 나타나므로 진동을 감소시키는 것이 보다 효과적인 소음방지 대책이 될 것이다.

지하철 운행에 의한 터널의 진동은 지표나 건물진동의 원인이 되므로 이 방지대책은 매우 중요하다. 터널진동에 영향을 미치는 요소로는 차량, 궤도, 터널의 구조, 터널주변의 지반, 레일 파상마모나 차륜의 평활(flatness), 지하철의 운행속도 등이 있다. 차량과 궤도사이에서 발생한 진동은 궤도 기초와 지하터널 구조물을 통하여 지반에 전달된다. 지반을 통하여 전달된 소음과

- 1). 삼성건설 기술연구소 수석연구원
- 2). 경희대학교 건축공학과 석사과정

진동은 지반위에 놓인 구조물에 영향을 미치게 되며 이러한 영향은 건물의 사용자뿐만 아니라, 진동에 민감한 기계/기구 및 구조물 자체에 악영향을 미치게 된다. 지하철 진동이 각종 인접 구조물 진동에 미치는 3축방향에 대한 기여순위는 전동차의 진동, 지하철 Box의 진동, 지반의 진동 순으로 나타났다.<sup>5)</sup>

지하철의 운행에 의하여 발생하는 진동에 대한 방진대책으로는 (1)진동원 대책, (2)전달경로 대책, (3)수진부 대책으로 구분할 수 있는데, 본 연구에서는 지하터널 구조물의 중량을 증가시킨 경우에 대하여 이론적 해석과 실측을 통하여 진동의 전달특성을 파악하고자 한다.

## 2. 파의 종류와 특성 및 거리감쇠

진동원에서 발생한 진동이 매질(지반, 구조물)을 전파하는 파동을 분석하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 이들 파의 파동에너지를 보면 표면파의 일종인 Rayleigh파가 약 2/3, 실체파의 일종인 횡파가 약 4/15, 종파가 약 1/15 정도이므로 인체가 주로 느끼는 것은 Rayleigh파가 된다. 또한 이들 파의 거리감쇠를 보면 종파와 횡파는 역 2 승법칙(거리가 2배로 되면 6dB 감소)에 의하며, Rayleigh파는 역 1승법칙(3dB 감소)으로 대략 감쇠된다. 일반적으로 표면파의 전파속도는 횡파의 92~96%정도이며, 매질의 종류에 따라서 전파속도는 달라진다.

계측에 의하여 측정되는 진동은 이러한 파들의 합성으로 이루어지지만, 주로 측정되는 것은 표면파인 Rayleigh파로 알려져 있다. 이러한 진동원에 의한 진동이 매질의 고유진동수와 일치하면 공진을 일으켜 탁월현상을 유발하여 구조물에 피해를 줄 우려가 있다.

진동의 거리감쇠는 소음과 같이 역 2승법칙으로만 되지 않는 복잡한 특성을 가지고 있다. 구조체를 통해 전달되는 진동은 무수한 부분에서 반사가 반복되어지고 또한 이것이 중첩되기 때문에, 이러한 모든 요소를 고려해서 진동을 해석하기란 상당히 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 일본의 松田이 제안한 (식 1)을 이용하여 진동전달량을 해석하였다.<sup>6)</sup>

$$L_{ri} = L_{ro} - N \cdot \log\left(\frac{r_i}{r_o}\right) - \alpha \sqrt{f(r_i - r_o)} \quad \text{dB} \quad (\text{식 1})$$

여기서,  $L_{ri}$  : 측정점의 진동가속도레벨 (dB),  $L_{ro}$  : 측정기준점의 진동가속도레벨 (dB)  
 $r_o$  : 가진점에서 측정기준점까지의 거리 (m),  $r_i$  : 가진점에서 측정점까지의 거리 (m)  
 $f$  : 주 파 수 (Hz),  $\alpha$  : 상수(건물에 따라서 결정)  
 $N = 0$  : 진동의 1차원적 확산  
 $N = 10$  : 진동의 2차원적 확산  
 $N = 20$  : 진동의 3차원적 확산.

지반에서 발생하는 진동파에 대한 거리감쇠의 특징을 고찰해보면, 지반의 내부감쇠 정수인  $\lambda$ 는 지반의 종류에 따라 다르고, 주파수에 비례함으로써 높은 주파수일수록 감쇠가 커짐을 알 수 있다.<sup>7)</sup> 진동원에서 가까운 지역에서는 연직방향의 진동성분이 크나, 멀어질수록 연직성분의 영향은 거의 감소되고 수평성분의 진동만이 주로 영향을 미치게 된다. 따라서 넓은 지역에 영향을 미치는 지진과 같은 진동에 대해서는 주로 수평방향의 진동에 의한 영향을 고려하게 되나, 지하철의 운행에 의한 진동과 같이 진동원에서 가까운 지역에서의 구조물을 분석할 때에는

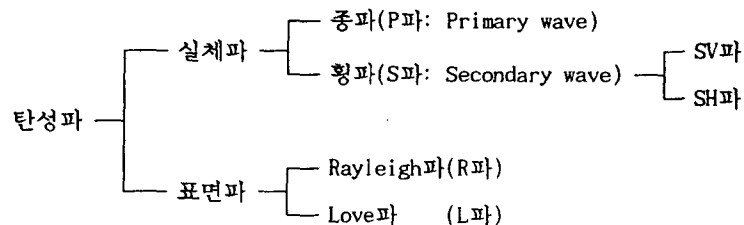


그림 1. 진동에 의한 파동의 종류

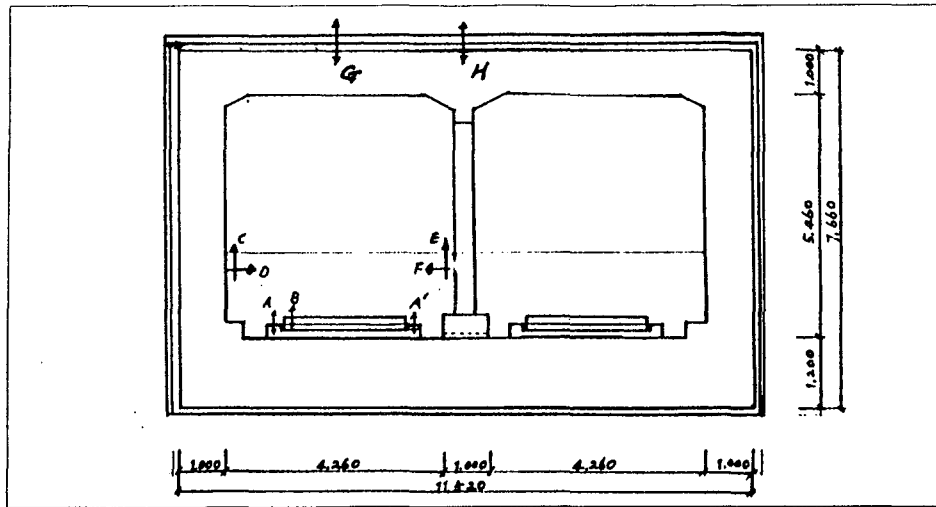


그림 2. 본선 BOX 일반도.

연직성분의 진동에 의한 영향이 더 중요해진다. 구조물의 진동은 강성과 질량의 분포에 따라 절대적인 영향을 받는다.<sup>8)</sup>

일본의 경우, 각계의 전문가로 구성된 영단의 <소음-진동대책위원회>는 연속된 궤도와 터널을 일정한 길이의 질량과 Spring계로 치환한 모델을 설정하여 터널의 진동가속도를 식으로 유도했다. 터널질량이 2배로 되면 진동 가속도 레벨(VAL)은 약 7.2dB 감소된다. 따라서 터널에서 발생하는 진동을 감소시키기 위해서는 터널질량을 증가시키는 것이 가장 경제적인 방법중의 하나이다. 그러나 터널중량을 어느 정도 증가시켜야 최대의 효과를 얻을 수 있는가는 아직도 미결문제로 남아있다. 또한 터널 바닥의 콘크리트 두께를 크게 할수록 터널내 진동은 감소된다. 한편 C.STUBEL씨는 터널벽 두께를 2배로 하면 벽면 진동은 10dB(V) 감소한다고 한다. 예로써 일본의 영단에서도 사유지를 통과하는 경우는 터널 부재두께를 크게하여 효과를 올리고 있다. 이외의 방법으로는 부재의 절점 현치를 크게하여 강결도를 높이거나 2층형등 절점수를 많게하는 방법등이 있다. 특히 주목해야 할 것은 경량인 터널에서의 방진궤도는 전혀 효과가 없거나 오히려 나쁜 결과를 초래할 수 있다는 것이다.<sup>9)</sup>

### 3. 진동측정결과

사람에게 불쾌감을 주는 진동으로 쾌적한 생활환경을 파괴하며, 사람의 건강 및 건물에 피해를 주는 공해진동은 진동수가 1 ~ 90(Hz)이며, 그 레벨은 60dB(지진의 진도계로 대략 I)부터 80dB(진도계로 대략 III) 까지가 많고 사람이 느끼는 최소 진동치는  $55 \pm 5$ dB 정도이다.<sup>10)</sup> 지하철 운행에 의한 진동에서 공해진동이 커다란 문제가 되므로, 실제 측정은 500Hz까지 이행하였으나 주파수 분석은 125Hz까지 만을 사용하기로 한다. 각 위치의 표기와 진동 방향은 표 1과 같으며, 그림 3은 진동 측정에 사용된 장비의 구성도다. 채널은 4개를 사용했고, 각 채널에 사용된 가속도 센서의 민감도는 0.1V/g, 0.5V/g, 10V/g, 신호 단위는 G's, 주파수는 500Hz까지, 사용한 Window는 Hanning Window를 사용하였다. 측정된 Data의 일부를 부록 I.에 첨가 하였으며, A점을 진동원으로 가정하여 각 지점의 운동을 수평과 수직으로 나누어 고찰해보면 다음과 같다.

표 1. 부호의 위치와 방향

	A(내부)	B(내부)	C(내부)	D(내부)	E(내부)	F(내부)	G(외부)	H(외부)
방향	Y	Y	Y	X	Y	X	Y	Y
위치	바닥	침목	벽(1.5M)	벽(1.5M)	기둥(1.5M)	기둥(1.5M)	천정 중앙	기둥 위

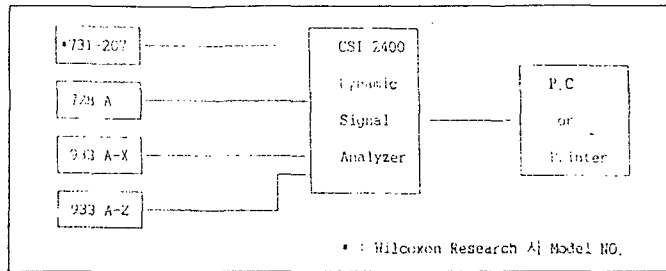


그림 3. 진동 측정 장비 구성도

A점에서의 측정가속도를 기준으로한 벽과 기둥의 수평진동

벽의 수평진동(D)은 96Hz 이상에서만 감소를 보일뿐 96Hz 이하에서는 증가하고 있다. 특히 저주파수인 5Hz까지는 크기가 7배나 된다. 일부 구간을 제외하고는 진동파가 증폭되는 현상을 보이고 있는 데 이에 대한 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다. 기둥의 수평방향 진동은 전반적으로 A점에서와 같은 크기를 보이고 있으며, 벽에서와 마찬가지로 5Hz까지 3.5배 커지는 경향을 보이고 있다. 특히 50Hz에서는 약 18배정도 커지는데 이는 Computer에서 계산한 56Hz, 네번째 모드와의 공진현상(Resonance)으로 인한 것으로 추측된다. 수평진동의 특성은 전 주파수대(0~125Hz)에서 진동파가 증가하는 경향이 있고, 벽체보다는 기둥이 더 큰 영향을 받고 있다. 이것은 강성과 질량 때문이라 판단된다.

A점에서의 측정가속도를 기준으로한 벽, 기둥 및 천정의 수직진동

벽에서의 수직진동(C)은 전반적으로 감소하는 경향이 있으며 특히 90Hz 이상에서는 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 증폭되는 구간은 Computer에서 계산한 모드에서 발생하며 70 - 90Hz는 5, 6번째 모드에 해당된다. 기둥의 수직진동(E)은 90Hz 이상 주파수대에서의 감소는 C와 비슷하지만, 5Hz까지의 증폭은 E가 C보다 더욱 증폭되었음을 보여주고 있다. 이는 Computer에서 계산한 첫번째 모드에 해당하는 것으로, Computer 계산에서 헌치와 기둥의 받침에 대한 고려가 없었기 때문이라 판단된다. 유한요소법(FEM)을 이용한 동적해석을 이용하면 좀 더 정확한 값을 얻을 수 있으리라 생각된다. 기둥상부 천정 슬라브(H)와 천정 슬라브 중앙(G)에서 측정된 진동파의 모양은 A점에서와 거의 같이 나타나며, 3번째 모드에서의 증가비도 거의 같다.

A점을 진동원으로 볼 때, 수직진동은 모드와 상관없이 0~25Hz와 90~125Hz는 감소율이 50% 정도되며, 중간주파수(25~90Hz) 대역에서는 천정 Slab( $I=225E+06 \text{ cm}^4$ ), 기둥( $I=25E+06 \text{ cm}^4$ ), 벽( $I=5.76E+06 \text{ cm}^4$ )의 순서로 영향을 받는데, 여기에서 중량 터널구조물의 진동 전달특성을 파악하기 위해서는 질량과 휨강성외에 다른 요인이 있음을 알 수 있다. 앞에서 Computer분석한 고유주기를 중심주파수로하는 1옥타브 대역에서의 Overall값을 각 위치에서 크기순서로 나타내면 표 2와 같다. 표 2에서 보면 중심주파수는 87Hz(62~123Hz)를 중심으로 중량 터널구조물 전반에 걸쳐 가장 많은 영향을 미친다고 생각할 수 있다. 이것은 B점을 제외하면 42~50dB에 해당하는 값들이다.

125 Hz까지의 Overall값을 보면 표 3과 같다. A점을 진동원으로 생각할 때, 수직진동은 3dB까지 감소한다. 특히 수평부재보다는 수직부재에서 더 많은 감소가 이루어지고 있다. 수평진동을 보면 벽은 변화가 없으나 기둥에서는 약 5dB 정도 증가하고 있다. 이는 진동파의 전달 특성면에서 기둥이 크게 불리한 부재로 작용하고 있음을 보여주고 있다.

표 2. 125 Hz까지의 각 위치별 Overall 값

	A	B	C	D	E	F	G	H
m/s <sup>2</sup>	0.002601	0.29294	0.001773	0.00276	0.001729	0.00459	0.001887	0.002447
dB	48	89	45	49	45	53	46	48

표 3. 중심 주파수 범위와 중심 주파수에서의 각 위치별 Overall값의 크기 순서

		측정 위치 크기순		A	B	C	D	E	F	G	H
		Hz	m/s <sup>2</sup>								
1	Hz	87		87	87	87	87	87	56	40	87
	m/s <sup>2</sup>	0.00239		0.26993	0.00163	0.00248	0.00193	0.00393	0.00136	0.0018	
2	Hz	72		72	72	72	72	72	40	56	56
	m/s <sup>2</sup>	0.1124		0.1211	0.00126	0.00228	0.00105	0.00377	0.00133	0.00159	
3	Hz	56		56	56	56	56	56	37	37	40
	m/s <sup>2</sup>	0.00088		0.07603	0.00083	0.00174	0.00104	0.00348	0.00131	0.00153	
4	Hz	40		40	40	40	40	40	72	87	37
	m/s <sup>2</sup>	0.00064		0.06522	0.00054	0.00084	0.00096	0.0028	0.0012	0.00148	
5	Hz	37		37	37	37	37	37	87	72	72
	m/s <sup>2</sup>	0.00059		0.0619	0.00046	0.00071	0.00092	0.00235	0.00114	0.00145	
6	Hz	10		10	10	10	10	10	10	10	10
	m/s <sup>2</sup>	0.0001		0.01533	0.00007	0.00023	0.00007	0.00012	0.00001	0.00002	

	주 파 수 범위(Hz)
10	7 ~ 16
37	26 ~ 53
40	28 ~ 57
56	40 ~ 79
72	51 ~ 102
87	62 ~ 123

4. 이론적 해석

4-1. A에서 측정한 DATA를 이용한 터널 구조물의 진동주기

본 연구에서 사용된 터널의 구조는 그림 2와 같이 일반적인 터널에 비하여 바다, 벽 및 천정두께를 두껍게 하였다. 터널 중앙의 기둥이 3M 간격으로 설치되어 있으므로 해석에 사용된 모델은 3M만 이용하였다. 터널 상부의 슬래브는 각각 10개의 요소로 분리하였으며 양쪽 벽과 기둥은 5개의 요소로 분할하였다. 가진력(Excited Force)으로는 A점에서 측정된 가속도를 사용하였으며 해석 결과에 따른 구조물의 고유진동수는 표 4와 같으며, 그림 4에는 9번째 모드까지를 표시하였다.

표 4. 모드별 터널의 고유진동수.

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7	Mode 8	Mode 9
Frequency (Hz)	10.16	37.05	39.91	56.02	72.36	87.04	101.22	103.92	125.55

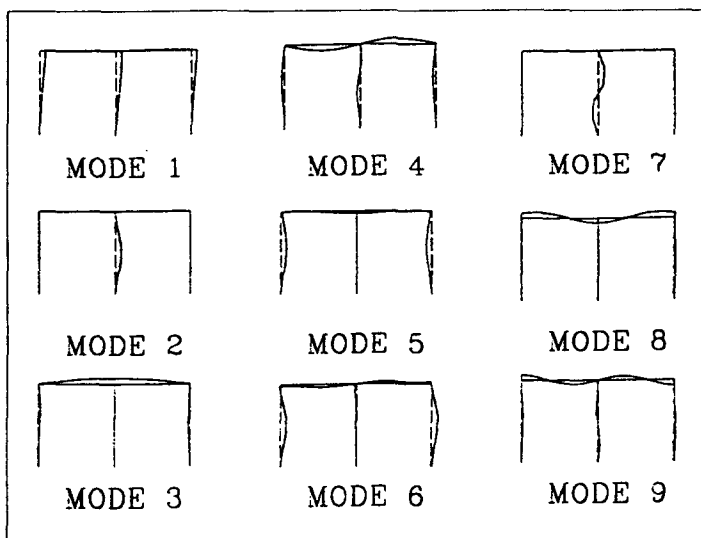


그림 4. 해석에 의한 터널의 모드

#### 4-2. 제안식에 의한 중량터널의 거리감쇠

松田이 제안한 (식 1)을 이용해 실측한 Data에 대한 진동 전달량을 계산하면 그림 5와 같다. 침목(B)에서 측정한 Data와 바닥 슬라브에서 측정한 Data를 비교하면 주파수 전 범위에서 진동의 크기가 99%이상 감소하는데, 이는 STEDEF 궤도시스템 사용에 의한 것으로 사료된다. 따라서 그림 2의 A점을 측정 기준으로 하고(선로 중앙을 기준으로 반대쪽도 A와 같은 크기의 진동파가 발생한다고 가정했다. 그림 2의 A'위치.), 가진점을 선로의 중앙(A에서 2m 거리)으로 하여 표 5와 같은 형식으로 회기분석한 결과  $N = 20$ ,  $\alpha = -0.5421(C), -0.6364(E), -0.6327(H), -0.4916(G)$  등으로 나타났다. 건물 구조체에서 진동의 감쇠가 1차원적인 감쇠량이 지배적이다<sup>11)</sup>는 기존 연구와는 달리 중량 터널 구조물에서는 진동이 3차원적으로 확산된다는 것을 의미한다. 이는 중량 터널 구조물의 슬라브와 벽 강성이 기둥보다 4 - 39배 크며, 크기에서는 건물 구조체의 5배 이상이기 때문으로 판단된다.

표 5. (식 1)의 제안식에 사용된 거리와 결과치  $\alpha$

	C	E	G	H
기준점까지 거리( $r_o$ , m)	2	2	2	2
측정점까지 거리( $r_i$ , m)	4.5	4.5	12.5	10
$\alpha$ (평균값)	-0.5421	-0.6364	-0.6327	-0.4916

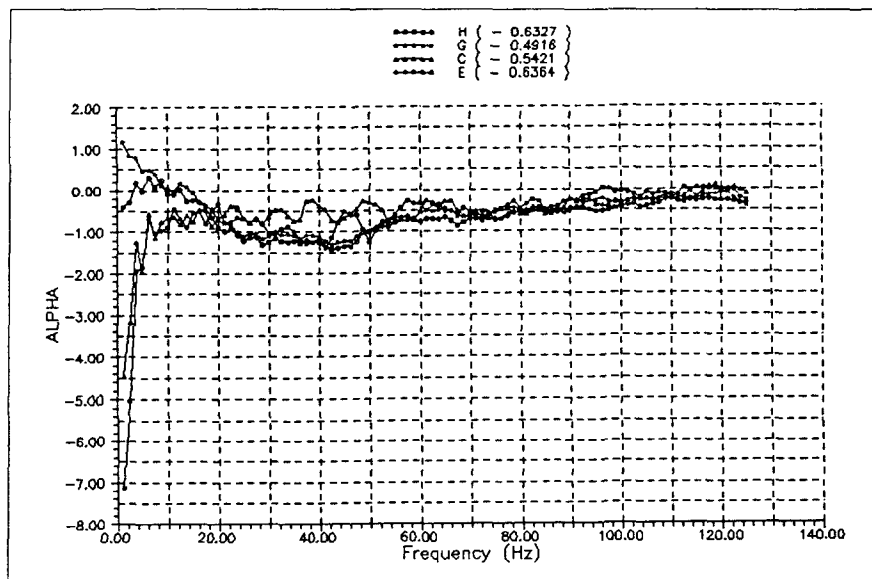


그림 5.  $N=20$ 일 때, 松田의 제안식에 대한 주파수별  $\alpha$ 값

#### 5. 결론

지하철 진동에 의한 중량 터널구조물에서의 진동의 전달 특성을 파악하고, 예상하기 위한 기초적인 연구로서 제안식과 실측을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지하철 진동의 수평방향 진동의 전달 특성을 보면, A점(바닥 Slab)을 진동원으로 생각할 때, 125Hz 까지의 전 주파수 범위에서 진동파가 증가하는 경향이 있고, 벽체보다는 기둥이 더 큰 영향을 받고 있다.

2) 지하철 진동의 수직방향 진동의 전달 특성을 보면, 수직진동은 모오드와 관계없이 0~25 Hz와 90~125Hz 사이에서 감소율이 50% 정도되며, 중간주파수(25~90 Hz)대역에서는 천정, 기둥, 벽의 순서로 영향을 받는 크기가 달리 나타나는데, 여기에서 중량 터널구조물에서의 수직 진동은 질량과 휨강성외에 또 다른 요인이 있음을 보여주고 있다.

3) 125 Hz까지의 각 위치별 Overall 진동값을 보면 수직진동은 3dB정도 감소하고 있으며, 수평 진동은 벽체는 변화가 없으나 기둥에서는 약 5dB 정도 증가하는데, 진동파의 전달 특성면에서 볼 때 중량 터널구조물의 기둥은 수평진동레벨, dB(H),을 증가시키는 부재임을 알 수 있다.

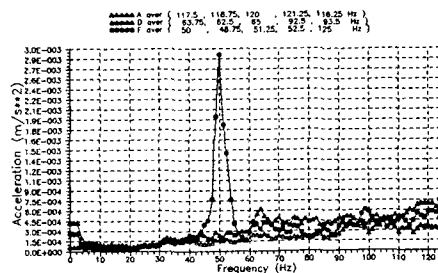
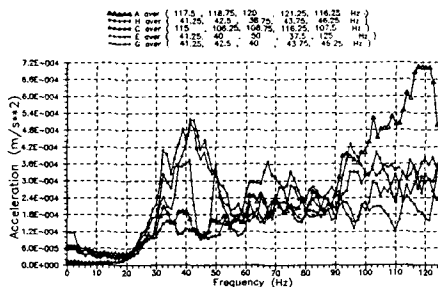
4) 松田의 제안식을 중량 터널구조물에 이용할 경우  $N = 20$ ,  $\alpha$ 는 수직부재에 대해 -0.5421와 -0.6364 사이의 값, 수평부재에 대해서는 -0.6327와 -0.4916 사이의 값을 사용하면 큰 무리가 없이 진동의 크기를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 중량 터널구조물에서 진동파의 전달 특성은 3차원적으로 전달됨을 알 수 있다.

지하철 운행에 의한 진동파의 전달을 보다 정확하게 예측하기 위해서는, 헌치와 기둥의 받침 부분, 벽과 슬래브의 진동을 파악할 수 있으며 3차원적 전달 특성을 반영할 수 있는 프로그램의 개발과 (식 1)에서 사용되는 정확한  $\alpha$ 값을 위해 더 많은 실측이 있어야 할 것으로 사료된다.

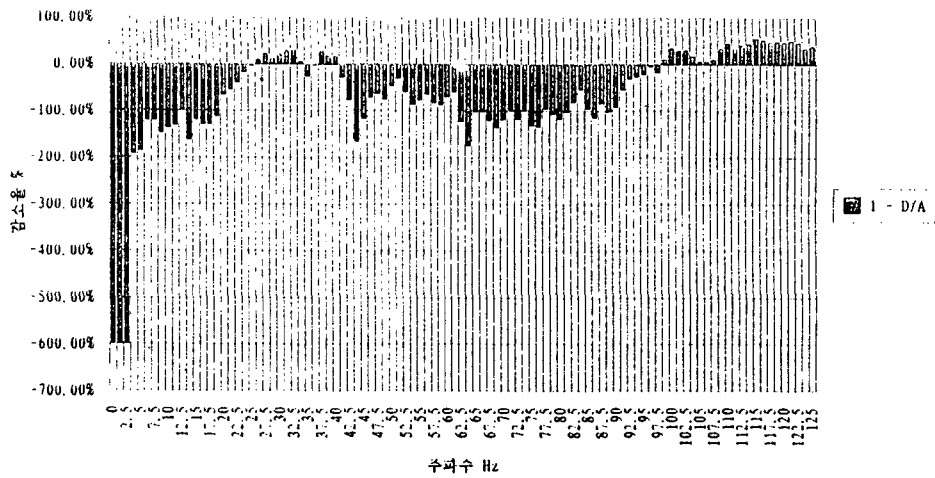
#### 참고문헌

1. Wilson, Ihrig and Associates Inc : Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control, National Technical Information Service, 1982
2. James T. Nelson and Hugh J. Saurenman : State-of-the-Art Review: Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit Trains, National Technical Information Service, 1983
3. W. Weaver, P. R. Johnston : Structural Dynamics by Finite Elements, Prentice Hall Inc., 1987
4. B. Bernek and Newman, Inc : Control of Wheel/Rail Noise and Vibration, National Technical Information Service, 1983
5. 강호정 : 지하철 진동이 주변지반 및 인접구조물에 미치는 영향, 한양대학교 환경과학대학원, 1986, p29
6. 松田由利 外 : 建築構造體中における固体音の傳搬性状, 日本音響學會誌, 35卷 11號, 1979
7. 車日煥・玉正權 : 騒音振動工學, 文運堂, 1994 p 213
8. 김희철 외 : 지하철 진동이 구조물에 미치는 영향분석 모델, 한국 전산 구조 공학회, 가을 학술 발표회 논문집, 1993
9. 韓國鐵道技術協力會 : 地下鐵 騒音・振動 關聯資料, 1994
10. 鄭一錄 : 騒音・振動(理論과 實務), 신광문화사, 1994, p 119
11. 吳尙駿 : 建物構造體에서의 振動傳達特性에 관한 研究, 한양대학교 대학원, 건축공학과, 1989, p 43

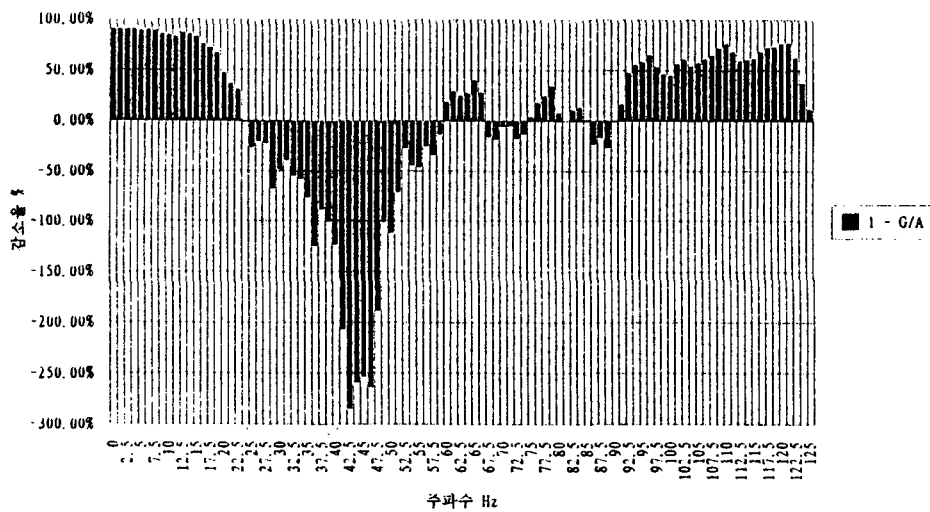
#### 부 록 1



바닥에 대한 비체(내부)의 수평 가속도의 주파수별 감소율



바닥에대한 천장승압의 주파수별 감소율



바닥에 대한 기둥의 수평 가속도의 주파수별 감소율

