

## 대구 지하철 구간내 선형 변동에 따른 소음 및 진동 저감 방안 연구

지왕률<sup>1)</sup> · 최재진<sup>2)</sup> · 강상수<sup>3)</sup> · 강대우<sup>4)</sup>

The optimal control methods to reduce the environmental hazards surrounding the YoungNam Uni. Rotary of City Taegu constructing Subway Line No. 1

Wang Ruel Jee, Jae Jin Choi, Sang Su Kang and Dae Woo Kang

**ABSTRACT** The objective of this study is to predict the minimization effect of the noise and vibration during the construction and the train operation regarding to the design modification of the Taegu Subway Line No. 1. It was suggested optimal control blasting methods to reduce the causing vibration Nuance to the resident in City Taegu and also proposed the better governing method to decrease the environmental hazard to the near buildings and residents during the train operation. When the high-density gaseous reaction of explosion products exerts a high pressure in motion outward, a dynamic stress field will be created in the surrounding buildings. Therefore, in the region close to the charge, permanent damage begins to occur at a great critical level of partial velocity, that is difficult from different structure as working conditions. It is reliable to predict that the damages could be reduced if we know the peak velocity and the exact reasons through the conducting of detail studies of structural analysis of the related buildings with the optimal blasting designs. A blasting technique should be deemed to take advantage of the reduction of damage of the surrounding rocks and structures to improve the in-city blasting. This is a typical in-city blasting operation where success depends on closely controlling the ground vibrations in case of better designed blasting methods. There are techniques that can be applied to prevent large vibrations from damaging the important buildings through the Route Modification of the Taegu Subway Line No. 1.

### 1. 서 론

대구 지하철 1호선 제1구간 건설공사중 남대구 정거장에서 영선정거장 구간의 설계 변경으로 인하여 평면 선형이 변경되었다. 이로 인하여 지하철 구조물 시공 시와 지하철 운행 중에 발생하는 소음과 진동이 인접 건물에 미치는 영향을 재평가하여야 하는 필요성이 제기되며, 본 연구에서는 인접 건물에 대한 소음과 진동의 영향을 예측, 평가하고, 발생 원으로부터 소음과 진동을 억제할 수 있는 저감 방안에 대한 연구를 실시하여 인접 건물에 미치는 영향을 최소화하는데 그 목적이 있다.

### 2. 지하철 시공시 발생하는 소음과 진동

도심지 지하철 시공시 발생하는 소음과 진동은 동일

한 발생원에서 전파되지만, 이를 취급하는 관점에 따라 달라질 수 있으므로 명확하게 구분하기는 어렵다. 소음은 인체에 대한 영향의 표현이며 심리적이고 감각적인 것인데 비하여, 진동은 인체 및 구조물의 안정성 평가에 대한 기준으로서의 의미가 강하다. 공해 진동은 공장, 건설 공사, 노면교통등 여러 가지 요인에 의해 발생되고 있으나, 구조물과 인접한 굴착공사시 발생하는 진동은 토류 가설 공의 H-Beam 말뚝박기, 뽑기 및 발파 작업시 등에서 주로 발생된다.

#### 2.1 진동의 인체에 대한 영향

진동의 인체에 대한 영향은 심리적 측면과 생리적 측

- 1) 정회원, 동아건설 설계실 부장
- 2) 정회원, 동아건설 설계실 사원
- 3) 정회원, 한국자원연구소 자원개발연구부 선임연구원
- 4) 정회원, 동아대학교 자원공학과 교수

Table 1. Relationship between the effect of vibration and vibration level (Japanese Environmental Department)

		생리적 영향	수면 영향	주민반응	
공장진동에 있어서 야간의 기준치의 범위	약진 (III)	90dB	• 인체에 유해한 생리적 현상이 생기기 시작		
		80dB	• 산업직장에 있어서 쾌감 감퇴경계(8시간 폭로)	• 수면심도 1,2 모두 대부분 각성한다	• 잘 감지, 진정을 50% 정도의 물적 피해에 대한 피해감이 보인다.
	경진 (II)	70dB		• 수면심도 1,2 모두 대부분 각성하는 경우가 많다. • 수면심도 1의 경우는 대부분 각성한다.	• 잘 감지, 진정을 40% • 잘 감지, 진정을 80%
		60dB	• 진동을 느끼기 시작(최저치)	• 수면심도 1의 경우는 과반수가 각성한다. • 수면영향은 대부분 없다.	• 대략감지, 진정을 50% • 주택내부 진동의 감지 한계
	미진 (I)	50dB			
무감 (0)	40dB	상시 경동			

면에서 고려될 수 있으나, 건설현장에서 통상 문제시되는 것은, 쾌적도로써 심리적인 측면이다. 일본환경청의 연구에 의하면 인간이 느끼는 진동에 의한 심리적 상태, 수면 관련, 주민 반응, 인간의 지각 한계 등의 영향과 지표의 진동 레벨과의 관계를 Table 1과 같이 규정하고 있다.

Table 1에 의하면, 쾌감, 감퇴 경계는 80dB(지표 값에서 대략 75dB)이나, 이 값은 산업 현장에서 8시간 동안 노출되어 대응된 상태로 일반적으로 공해 진동의 기준 값은 이것보다는 적게 설정되고 있다.

2.2 진동이 구조물에 미치는 영향

2.2.1 발파 진동

도심지에 건설되는 지하철 공사의 경우 연암 이하에는 가급적 기계식 굴착 방식을 사용하고 있으나, 대개 경암의 경우에는 발파 공법을 사용할 수밖에 없다. 발파 작업은 발파시 막대한 양의 에너지가 발생하여 주변 암반을 파쇄하게 되며, 발파 후 시간이 경과하면 발파 압력은 암석의 인장 강도 보다 낮아지게 되어 더 이상의 암석 파괴나 소성변형은 진행되지 않는다. 그러나, 역학적 파괴에 사용되지 않고 남은 에너지는 탄성 변형을 일으키고 탄성 변형은 결국 인위적인 탄성파를 발생시킨다. 이렇게 발생된 탄성파가 구조물이나 인간의 활동에 피해를 주는 진동을 유발시킨다. 이러한 발파 재해를 억제하기 위해서는 암반의 파괴 조건 및 이로 인한 진동

소음의 발생 원인을 파악하여 주변 구조물과 주민들에 대한 발파의 영향 범위와 피해 정도를 고찰하고 현장 조건 및 발파 설계 변수들의 영향을 고려하여 안전 발파를 위한 발파 진동 경감 대책을 수립해야 한다.<sup>1)</sup>

구조물의 발파 진동에 대한 영향의 평가는 지반이 움직이는 폭을 나타내는 진폭 (Amplitude), 지반이 움직

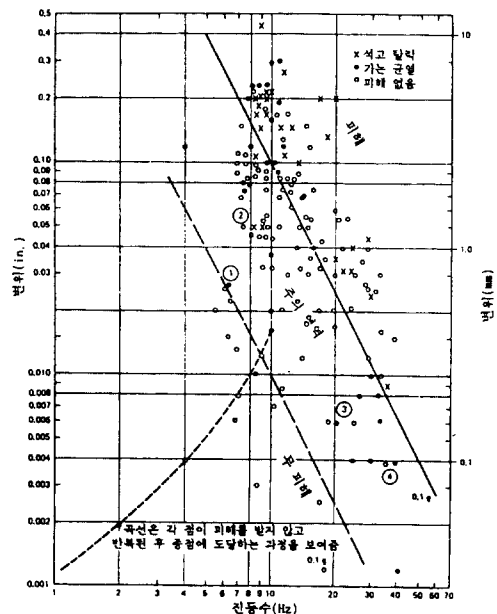


Fig. 1. Damage to building according to frequency and displacement.

이는 정도를 나타내는 진동 속도 (Vibration Velocity), 진동 가속도(Vibration Acceleration)의 3가지 요소가 있다. 진동과 구조물의 피해 관계를 규정하는데 있어서 3가지 요소중 어떤 값을 기준으로 할 것인가에 관한 설정은 없으나 여러 연구자들의 결과를 종합하면 인체에 감응하는 정도는 진동 가속도 성분에 따라 변하고 구조물이 받는 피해 정도는 진동 속도를 기준으로 규정하고

있다. Theonen과 Windes는 구조물의 피해와 발파 진동의 진폭, 주파수의 상관관계 및 지반 조건을 고려한 진동 속도와와의 관계를 규명하였다(Fig. 1).<sup>1)</sup>

미국 내무부, 캐나다의 Edward와 미국 토목 학회, 독일의 Banik, 스웨덴의 Langefors 등의 연구 결과에 의하면 Table 2와 같이 각국별로 발파 진동 속도와 피해 상태가 약간씩 차이를 알 수 있다.<sup>1)</sup>

Table 2. Relationship between peak particle velocity and damage level

연구자 변위속도	Langafors (Sweden)	Edwards (Canada)	Department of Interior (U.S.A)	E.Bunik (Germany)	ASCE
50	큰 균열이 발생 균열이 발생 미세한 균열	피해발생	큰 피해의 균열이 발생 벽체의 흠이 떨어진 가벼운 피해	큰 피해	구조물이 위험
10	요주의	요 주의	요주의	피해발생	10 Hz, 35 Hz 구조물 주의
5	눈에 보이는 피해는 없다.	안 전	안 전	극히 가벼운 피해	10 Hz, 30 Hz 기계의 안전 한계
1				요주의	
0.5	인체에 잘 느껴지나 구조물에 피해는 없다.				
(cm/sec= Kine)					
0.1	일반적으로 많은 사람이 진동을 느낀다.				
0.05	대단히 예민한 사람만이 진동을 느낀다.				
0.01					
0.005	인체에 감각이 없다.				

Table 3. Seismic intensity level (1949): Japanese Weather Forecasting Observatory

진도계	지진의 명칭	최대진동속도 (kine=cm/sec)	진동가속도 레벨(dB)	감 지 특 성
0	무감 (No Feeling)	0.13 이하	55	인체에 감지 없으며 지진계에 기록되는 정도
I	미진 (Slight)	0.13~0.40	55~65	정지하고 있는 사람이나 특히 지진에 주의깊은 사람에게 감지
II	경진 (Weak)	0.40~1.26	65~75	대부분의 사람들이 느낄 수 있는 정도로서 창문 등이 조금씩 움직이는 것을 알 수 있는 정도
III	약진 (Rather Strong)	1.26~4.0	75~85	가옥이 흔들리고, 문과 미닫이가 덜컹거리며 전등이 흔들리고 그릇 속의 물이 움직이는 것을 알 수 있는 정도
IV	중진 (Strong)	4.0~12.6	85~95	가옥의 동요가 심하여 화병이 넘어지고, 그릇 속의 물이 넘친다. 또 걷고 있는 사람에게도 감지되며, 많은 사람들이 집밖으로 뛰어나올 정도
V	강진(Very Strong)	12.6~39.8	95~105	벽에 금이 가고, 묘석, 석조물이 넘어지며 연돌, 돌담등이 파손되는 정도
VI	열진(Disastrous)	39.8~63.7	105~110	가옥의 파괴는 30% 이하이고, 산이 무너지며, 땅이 갈라
VII	격진 (Very Disastrous)	63.7 이상	110 이상	가옥의 파괴가 30% 이상이고, 산이 무너지며, 지반이 갈라지며, 단층 등이 발생

(주) 최대 진동 속도(kine)는 진동가속도레벨(dB)로부터 환산된 값이다.

또한, 발파로 인한 진동은 아니나, 지진이 빈번한 일본 기상청의 1949년에 공포한 진도 단계를 진동 레벨별 감지 특성으로 살펴보면 다음 Table 3과 같다.

2.2.2 H-Beam 말뚝박기(천공 향타)에 의해 발생하는 진동

최근에 들어서 H-Beam 말뚝을 박기 위하여 향타시 충격 소음이 큰 디젤 해머 대신 비교적 진동소음이 적은 T-4 장비로 천공한 후 말뚝을 삽입하고 드롭해머 또는 진동 파일해머로 정착시키므로, 향타진동이 인접 건물에 미치는 영향은 비교적 적으며 실제 민원의 대상이 되는 것은 대부분 소음이다.

Table 4에 의하면 디젤해머를 사용할 때 진동레벨이 제일 큰 것으로 나타나고 있다. 현재 국내에서 적용되

Table 4. Examples of the vibration level depending on the construction equipment (Mean value in Japan)

장 비 명	진동레벨(dB)				비고
	기계로부터의 거리				
	5 m	10	20	30	
디젤 파일 드라이브	84	78	72	68	
진동 파일 드라이브	80	73	66	63	
드릴합마	84	76	67	62	
강구과괴기	79	69	60	-	
노면 포장 파쇄기	77	72	68	-	
브레이크	71	61	-	-	

고 있는 건설공사장 생활소음 규제기준치(1994. 11. 21, 소음·진동규제법 제32조, 제57조 관련 별표<sup>15)</sup>는 Table 5와 같이 주거지역은 주간 70dB, 야간 55dB로 규제 기준 범위를 설정하고 있다.

진동 규제치는 현재 국내에서는 건설 장비에 대한 허용치가 규정되어 있지 않은 실정으로 일본 진동규제법 시행규칙 제11조 특정 건설 작업의 규제에 관한 기준은 Table 6과 같다.

### 3. 지반 굴착 공사시 발생하는 소음과 진동의 허용치 설정

본 공사 구간은 개착공법 구간으로서 굴착측벽과 인접 건물과의 이격거리가 1.0~5.0 m의 협소한 실정이다. 건물과 인접하여 지반 굴착 공사를 할 경우 소음과 진동에 의하여 인근 주민과 건물에 심한 손상을 줄 수도 있으므로, 안전시공이 될 수 있도록 하기 위하여 어느 정도까지 소음과 진동치를 허용하는가에 대한 허용치를 다음과 같이 설정하였다.

#### 3.1 소음의 허용치는 70 dB이하로 한다.

단 야간에는 (22:00-05:00) 55 dB이하로 한다. 본 공사장 주변은 도시계획법선 상업지역이므로 건설공사장 생활소음규제 기준의 범위에 근거하여 정한다.

Table 5. Allowed noise level of each construction lot

(Unit: Leq dB(A))

구 분	조간, 석간 (05:00~08:00) (18:00~22:00)	주간 (08:00~18:00)	야간 (22:00~05:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역 중 취락 지역 및 운동 휴양지구, 자연환경보전지역, 학교·병원·공공도서관의 부지경계선으로부터 50 m 이내 지역	65 dB 이하	70 dB 이하	55 dB 이하
상업지역, 공업지역, 농림지역 및 준도시 지역 중 취락 지구외의 지구, 미도시지역	70 dB 이하	75 dB 이하	55 dB 이하

Notes: 1. 대상지역의 구분은 국토이용관리법에 의하며, 도시지역은 도시계획법에 의한다.  
2. 공사장 소음의 규제 기준은 주간인 경우 소음 발생 시간(작업 시간)의 1일 2시간 미만일 때는 +10 dB, 2시간 이상 4시간 이하일 때는 +5 dB를 보정한다.

Table 6. Allowed noise level for special construction work

건설 작업의 종류	기준 진동의 크기	작업을 해서는 안되는 시간		하루의 작업 시간		동일 장소에서 작업 시간		일요일과 휴일의 작업
		제 1 호 구 역	제 2 호 구 역	제 1 호 구 역	제 2 호 구 역	제 1 호 구 역	제 2 호 구 역	
		19시~다음 날 07시	22시~다음 날 06시	10시간	14시간	연속	6일	
향타용 기계를 사용하는 작업, 강구, 추를 사용하는 작업 등	75 dB를 넘지 않을 것	19시~다음 날 07시	22시~다음 날 06시	10시간	14시간	연속	6일	금지

### 3.2 발파 진동 속도의 허용치는 3 mm/sec로 한다.

우리 나라에서는 건설 진동에 대한 허용치를 규정하고 있지는 않다. 1976년 제정된 일본의 진동 규제 법에 의하면 진동을 유발하는 항타기 작업시 주중의 주간에는 75 dB을 한계로 규정하고 있으나 발파 작업에 의한 규정은 없다. 진동 속도의 Peak 값과 진동 레벨과의 관계를 이론적으로 진동 속도(mm/sec)로 환산하는 추정식은 다음과 같다.

$$VL = 20 \log VEL + 71.0 \quad (1)$$

여기서, VL : 진동레벨 (dB)

VEL : 진동속도 (mm/sec)

식(1)에 의하면 75dB값은 1.6 mm/sec 값이 된다. 이러한 값은 정현파라는 가정과 일정 주파수 대역에서 추정해 보는 수준에서 사용이 되며, 발파 진동 허용치를 정하는데 참고로 이용되었다.

발파 진동은 진동 지속 기간이 극히 짧고 1일 실시 회수도 수회에 그치며, 또한, 발파 시간을 예측할 수 있는 점등을 고려하면 일본의 항타진동 규제치인 2 mm/sec 보다는 크고 감각적으로 약간의 진동을 느끼게 되고 인가에 전혀 피해가 없는 3 mm/sec을 진동 속도 규제치로 하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 한편 고천지구 택지 조성 공사 암반 발파 진동 계측 보고서(한국건설연구원, 92.4)에 따르면 인근 주택가의 주민 반응 및 민원 발생 요인을 감안하여 허용진동속도를 3 mm/sec로 제한하였다. 국내 각종 연구보고에 따르면 지상구조물에 대한 진동 허용치는 5 mm/sec 이하이면 거의 안전하며 10 mm/sec에서는 이를 감지하여 불쾌감을 갖게 된다. 주택 공사의 택지 조성의 경우 진동 허용 기준치를 주택 밀집 지역에서 5 mm/sec로 제한하고 있으나(6), 공사중 작은 소음과 진동에 의해서도 민원이 발생될 수 있다는 사실을 감안하여 도심지 발파 허용 진동 기준치를 3 mm/sec로 선정하였다(Table 6).

### 3.3 소음 경로 대책

소음 경로 대책으로는 차음벽, 공기층, 및 소음기를 사용하는 터널차음법이 있고, 복도 및 장벽을 이용한 야외에서의 차음 방법이 있다. Fig. 2와 같이 차음 벽에서의 소음 효과에 따른 소음 손실은 다음과 같다.

$$TL = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 14.2 \log W + 5.5(\text{dB}) \quad (2)$$

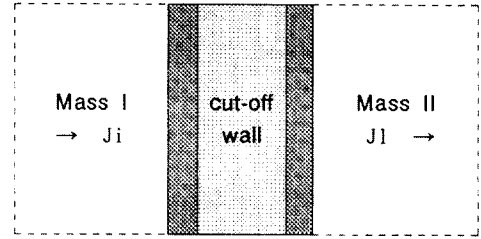


Fig. 2. Effect of the noise cut-off wall.

$\tau$  : 음향 투과율

W : 면적 당 중량

Ji : 입사하는 음의 강도

Jl : 투과하는 음의 강도

## 4. 소음과 진동의 저감 대책

### 4.1 항타작업시의 저감 대책

지하철공사시 사용되는 H말뚝 박기 작업에 의한 진동이 인접 건물에 미치는 영향은 거의 없으며 단지 T-4장비에서 발생하는 소음이 주민 생활에 방해가 될 것으로 판단된다. 서울 지하철 3호선 연장 구간 개착구간에서 실시한 T-4에 대한 소음 측정 결과에 의하면, 10 m 떨어진 측정점에서 89-93 dB이었고, 50 m 떨어진 지점에서 72-77dB로 나타났고, 대구 지하철 1호선 영대네거리에서 개착터널 굴착시 소음 측정 결과에 의하면 10m 떨어진 곳에서 평균 93-98 dB이었고, 50 m 지점에서 71-81 dB가 측정되었다.

따라서 T-4 항타시 발생하는 소음 저감책으로 다음 방법을 제안한다.

- T-4의 부속 장비인 공기 압축기와 T-4장비는 서로 50 m 이상 떨어진 장소에서 가동한다.
- 소음 측정기를 설치하여 주거 밀집 지역은 소음 발생이 70dB를 넘지 않도록 장비를 가동 한다.
- 가동 장비 주변에 소음 방지 방음벽을 설치한다.
- 작업 시간을 주간인 6:00시부터 저녁 18:00 까지로 정한다.

### 4.2 발파 진동의 저감 대책

발파 진동에 가장 큰 영향을 미치는 것은 지발당 장약량의 크기이다. 발파 효과를 충분히 유지하면서 발파 진동을 감소시킬 수 있는 방법이 필요하며, 그 방법으로는 다음과 같은 것들이 있다.<sup>3)</sup>

- 진동을 발생원으로부터 억제시키는 방법

저비용, 저폭속의 폭약을 사용한다. 함수 폭약의 경우 제라틴 다이너마이트보다는 20% 진동이 경감된다. 대구의 기반암인 세일의 탄성과 속도는 1000-2500 m/sec로 함수 폭약의 경우 3500 m/sec(K-300)로 발파 효과의 저하 없이 진동 조절이 유리하다고 판단된다.

- 화약량의 제한과 분할 발파에 의한 억제 방법  
발파규제치를 넘지 않도록 설계하여 시험 발파를 시행한 후 규제치를 초과할 시는 지발당 장약량을 줄이거나, 단차를 더 늘리는 지발발파법을 이용하여 진동 억제를 유도한다.
- 인근 주요 구조물 등의 영향으로 발파 규제치를 더 하향 조정할 경우는 비전기 뇌관을 사용하여 지발단차 횡수를 더 늘려 지발당 장약량을 하향 조절하여 발파 진동을 억제토록 한다.
- 공벽과 약포 상의 공간을 확보하여 Decoupling 효과를 이용하여 충격파를 완화시키고, 발파압으로부터 주변암의 피해를 줄일 수 있다.
- Line Drilling 또는 Presplitting 방법을 이용하여 발파 진동의 전파를 방지하는 방법

4.3 본 현장에서의 발파 진동 저감을 위한 공사 계획

현장 조사를 통하여 본 공사 구간의 입지 여건 및 지질 현황을 고려하여 인접 구조물과 주민에게 미치는 영향을 최소화하는 방법으로 시공 계획을 수립하였다.

4.3.1 대구 지역의 지반

대구 지역은 중생대 백악기의 퇴적암 층으로 구성되어 있으며, 본 퇴적암 층은 신라역암층 아래의 부정합을 경계로 낙동층군과 신라층군으로 대별되며 경상계 퇴적암의 특성인 상향세립화하는 특성이 있다. 본 구간의 기반암은 세일로서 상부는 저색 세일이 나타나며 하부로 갈수록 흑색 세일이 분포하고 있다. 본 지역의 지질종단도는 Fig. 3과 같고 도면에 나타나는 것처럼 평균 굴착 깊이 18.2 m 중, 지표로부터 평균 두께 5.2 m의 토사 층과 2.8 m의 풍화암, 1.6 m의 연암이 분포하며, 지표 평균 9.6 m 이하 지점부터 분포하는 경암이 주발파 대상 암반이다.

토층은 실트질 모래, 세립-조립질모래, 사질점토, 점토질모래 및 자갈 호박돌의 혼합층으로 하부로 갈수록 층적층이 나타나고 자갈 및 호박돌의 양이 증가하며, 기반암은 흑색 세일로 전형적인 대구 지질 상태이다.<sup>2)</sup>

4.3.2 지층별 굴착 방법

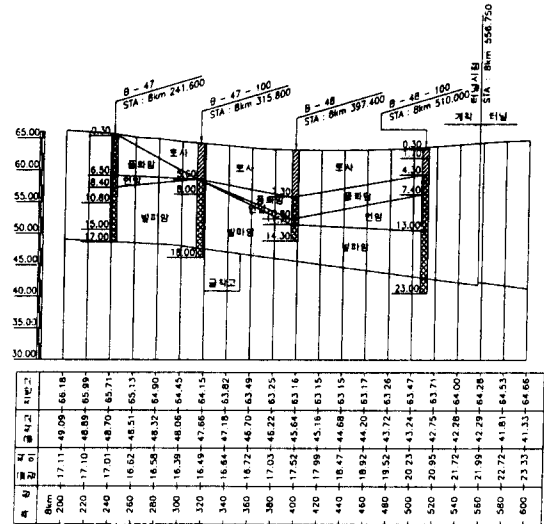


Fig. 3. Drawing of the geological longitudinal section map.

Fig. 4의 굴착 종단면에 나타난 바와 같이 지하철 선형이 건물에 인접한 구간(중앙공무사 앞)을 선정하여 본 구간의 표준으로 삼아 발파 진동을 저감할 수 있는 암발파공법을 설계하였다. 토층은 기계 굴착으로 도져 등을 사용하고, 연암 굴착은 발파와 기계 굴착을 병행하는 것이 좋으나, 진동 저감을 위해서 가능하면 기계

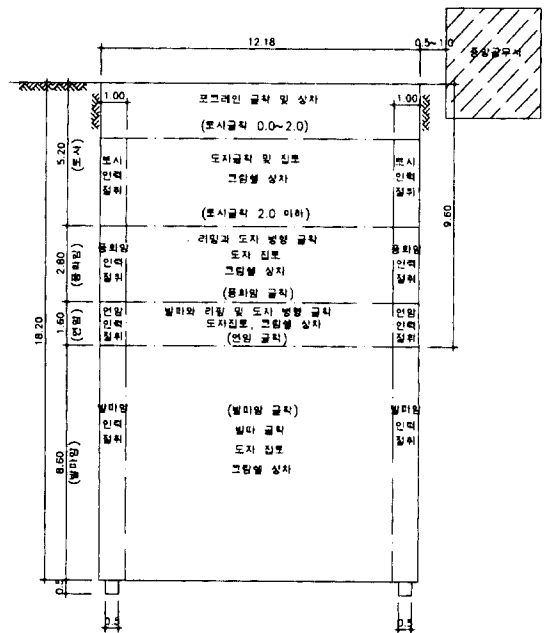


Fig. 4. Typical drawing of the cross sectional excavation view.

굴착(대형브레이커+리핑+도저)을 유도하였다. 연암을 발파에서 제외하면 지표에서 9.6 m 이하에서부터 암발파 작업이 적용되게 된다.<sup>2,3)</sup>

① 시공 계획

계단식 발파 공법인 Bench Cut을 채택하며 적은 장약으로 발파 효율을 높이기 위해 처음에는 Trench를 시공한다. 처음 심배기는 대형 브레이커를 이용하여 기계 굴착으로 자유면을 확보하고 발파예정선에 대하여 Line Drilling을 실시하여 인위적인 파단면을 형성하여 발파시 진동의 전파 방지 효과를 이룬다. 또한 도로 한복판으로부터 가장자리로 갈수록 장약량을 줄여서 파단면의 진동 억제 및 여굴을 줄인다. 진동 허용 설계치는 3 mm/sec를 적용한다. 굴착 순서는 Fig. 5와 같다.<sup>4,5)</sup>

② 발파 계획

인접 건물에 전파되는 발파 진동 속도가 0.3 cm/sec 가 되도록 지발당 장약량과 진동 예상치를 산정한다. 발파진동식은 다음과 같다.<sup>6,7)</sup>

$$V = K \left( \frac{D}{W^b} \right)^{-n} \tag{3}$$

여기에서, V : 발파 진동 속도 (mm/sec)  
 K : 발파 진동 상수로서 이는 지질과 발파 형태에 의존

W : 지발당 장약량 (kg)  
 D : 폭원과 축점의 거리 (m)  
 n : 감쇠지수로 대구세일의 경우 1.6,  
 b : 일반적으로 삼승근 법과 자승근 법을 사용하는데, 터널의 경우에 삼승근 법이, 노천 발파에서는 자승근법 적용  
 발파진동상수 :

$K = E_i (R_i \cdot S_c + Q_i)$   
 E<sub>i</sub> : 폭약보정율(함수폭약 Slurry: 0.8)  
 R<sub>i</sub> : 암종에 대한 상수 (대구세일=0.0206, 서울편 마암값 인용)  
 S<sub>c</sub> : 암석의 단축압축강도 (1,000 kg/cm<sup>2</sup>)  
 Q<sub>i</sub> : 발파형태에 따른 보정치 (확대발파 33)

상기식을 이용하여 지발당 최대 장약량 W를 구한다.  
 V=0.3 cm/sec, D=9.6m (지하실 기준), K=42.88,  
 n=-1.6 (대구세일), b=1/2(개착)

$W = D^2(V/K)^{2/n} = 9.6^2(0.3/42.88)^{2/-1.6} \times 0.8 = 0.246 \text{ kg}$   
 (지발당 장약량 250 g)  
 (여기서 Line Drilling에 의한 20% 저감효과 적용)

이론적으로 진동 속도(Particle Velocity)는 지발당 장약량과 비례하고, 폭원의 거리에 반비례관계에 있다. 국내의 경우 일반적으로 개착의 경우 자승근 환산거리 (b=1/2), 터널의 경우 삼승근 환산거리(b=1/3)를 사용하며, 이는 서울시 지하철 3, 4호선 터널설계시(허진) 진동 추정식으로 삼자승근을 사용하는 등 많은 검증은 거쳤다. K, n 등의 입지상수는 지반조건과 화약의 배열 및 기폭방식에 따라 달라지며, 시험발파 후 이를 통해 입지 상수를 결정해야 한다.

• 심발설계

상기 식에서 지발당 장약량(W)은 0.25 kg이며, 이에 따른 Trench 발파 방법은 공간 거리 0.5 m, 천공경 34 mm, 천공깊이 2.8 m, 사용폭약은 함수폭약 또는 에멀전 폭약으로 기폭 방법은 DS-4 단발(1지발당 2공 동시 발파, 공당 125 g)을 사용하고, 지발당 장약량은 250 g으로 하여 Fig. 6과 같이 한다.<sup>8,9)</sup>

발파 순서 ① ② 단차의 장약량은 맨 가장자리 공을 W/3로 하고, 그 다음 공은 2W/3로 장약한다.

• 확대 발파

확대 발파는 공간 거리 0.5 m, 천공경 34 mm, 천공깊이 2.8 m, 사용 폭약은 함수 폭약 또는 에멀전 폭약

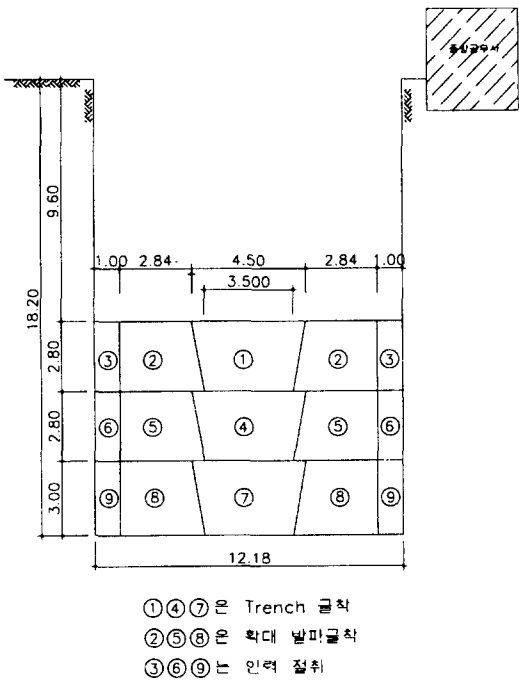
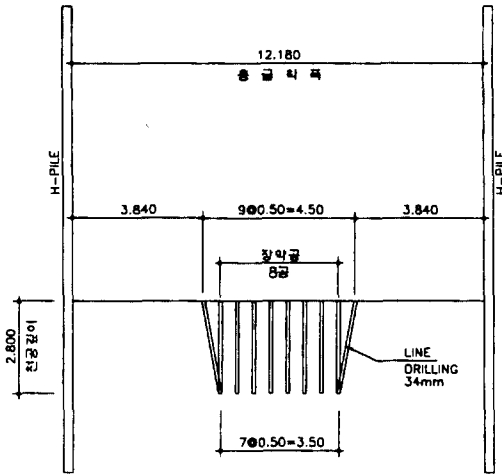


Fig. 5. Excavation method.

TRENCH 발파 횡단면



TRENCH 발파공 평면 배치

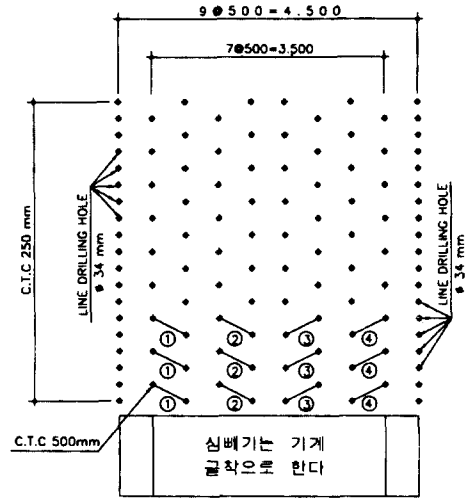


Fig. 6. Drawing of the cross, and plain section view for the trench cut blasting.

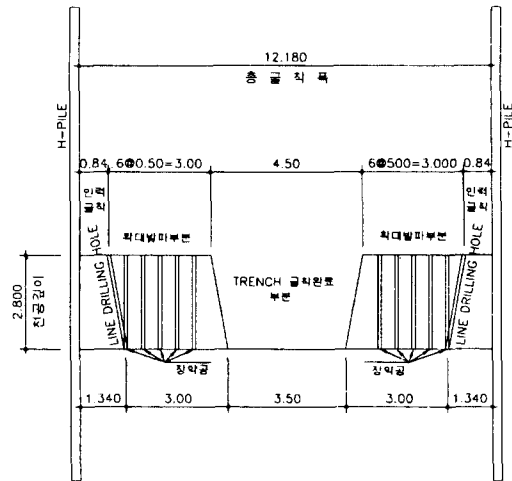
으로 기폭 방법은 DS-4 단발(1지발당 2공 발파)을 사용하고, 지발당 장약량은 250 g으로 한다. 상기 설계대로 하되 발파작업전 시험 발파를 하여 장약량 및 발파 설계를 조정한다. 매발파시 발파 진동을 측정하여 진동 규제치를 벗어날 경우 설계 조정을 하도록 한다. 또한, 소할 발파구간이나 노면에 맞춰 복공판이 설치된 곳에서는 지상으로 나오는 비석은 없을 것으로 판단되나, 상부 가설 공의 손상을 방지하기 위해서 발파 대상 암반 위에 직접 방호구를 설치하여 발파시 비석에 의한 피해를 방지한다. 확대 발파에 대한 중평면도는 Fig. 7과 같다.<sup>7,10)</sup>

4.3.3 발파 진동 측정 결과 및 해석

지하철 구조물 시공시 늘 문제가 되는 민원 발생의 위험 요소를 제어하여 공기내 안전하고 주변 환경에 피해를 주지 않는 것이 발주처 및 시공자의 의무 사항이다. 설계한 대로 발파 준비를 하고 제어 발파 효과를 분석하기 위해서 대구 영대 네거리 중앙공무사부근 현장에서 지하철 선형과 Cross되는 사거리에서 양편으로 일정한 간격으로 측정기를 설치한 후 시험 발파 및 측정 시험을 실시하였다. 이때 주변 대상 암석의 압축 강도는 60-100 MPa이었고, 시료의 비중은 2.6이었다.

진동 측정은 발파 진동의 3성분을 합성하여 Vector 합을 구하여 이 값을 측정 기준으로 하였다. 측정의 용이함으로 속도를 이용하며 발파 진동의 단위는 mm/sec로 표시하였고, 측정 장비는 Instantel Co. 제품인

확대발파 횡단면



확대발파공 평면배치

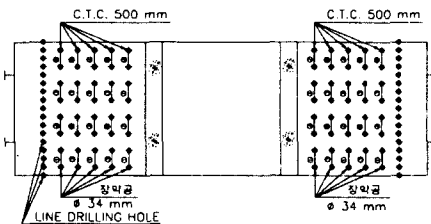


Fig. 7. Drawing of the cross, and plain section view for the expanding blast.

Blastmate 677 2대를 사용하였다. 본 장비 내에는 Fast Fourier Transform 분석 모듈이 내장되어 있다.



측정은 설계장약량을 투입한 후 각각의 시간단차를 주어 폭원으로 부터의 거리에 따른 진동속도를 영남대 네거리(대구지하철 1호선, 1-6공구)에서 지하철 선형과 직각 양방향으로 도로변을 따라서 20, 40, 60, 80 m 거리로 변화시키면서 실시하였다. 현장 측정 결과는 Table 8에 나와 있다. 이들 계측치를 회귀 분석한 결과 95%이상이 허용 진동 속도 내로 들어와 본 설계 변경의 신뢰도를 높이는 결과가 됐다(Fig. 8, 9, 10, 11). 이들 분석치는 회귀 분석에 의해 입지 상수 K, n을 구하기 위하여 최대 진동 속도와 환산 거리의 log-log 1차 상관관계를 이용하여 전산 처리하였다. 그래프에 따르면, 값이 유별나게 크게 측정된 오른쪽 첫 번째 값을 제외한 변수는 b=1/2일 때, K값은 8.7~31.4 (평균 21.54), n값은 -0.377~-0.674 (평균 0.60), b=1/3일 때,

Table 7. Currently allowed vibration levels of subway construction lots in Seoul and Pusan

건 물 형 태	허용기준, cm/sec
유적, 문화재, 컴퓨터 시설물 주	0.2
주택, 아파트: 실금이 있는 상태	0.5
상가: 금이 있는 상태	1.0
철근 콘크리트 빌딩, 공장	1.0~4.0

Table 8. Measurements results of mean peak particle velocity and its distance

발파진동속도 (cm/sec)	폭원으로 부터 거리 (m)			
	20	40	60	80
No. 1 (Left)	0.15	0.14	0.13	0.05
No. 2 (Left)	0.18	0.21	0.19	0.09
No. 3 (Left)	0.22	0.20	0.18	0.07
No. 4 (Right)	0.62	0.43	0.25	0.18
No. 5 (Right)	0.11	0.10	0.09	0.04
No. 6 (Right)	0.10	0.08	0.05	0.04
평 균	0.23	0.19	0.15	0.08

측점	K		n	
	square	Cube	Square	Cube
No. 1 (Left)	18.4905	15.9706	0.63333	0.63329
No. 2 (Left)	8.66589	7.94093	0.37758	0.37755
No. 3 (Left)	31.2759	26.7706	0.672408	0.67237
No. 4 (Right)	366.946	149.147	0.895585	0.895538
No. 5 (Right)	23.3236	10.1516	0.599524	0.599488
No. 6 (Right)	25.9294	11.0941	0.673680	0.673645
평 균	21.54	14.40	0.60	0.60

Note: 위 Table의 평균값은 No. 4를 제외하고 계산한 값임.

K값은 7.9~26.8 (평균 14.4), n값은 -0.377~-0.674 (평균 0.60)으로 기존의 이론 식으로 계산된 값에는 b=1/2일 때 K값이 이론치 42.88에 접근하며, n값은 -1.6에서 -0.6으로, b=1/3 일때보다, 이론식에 접근되었으며, 개착 난장 발파 형태인 현장 실험에 근거한 발파진동식은 다음과 같이 제시 될 수 있으나, 여기에는 보다 많은 후속 조사가 요구된다.

$$V = 21.54 \left( \frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-0.60}$$

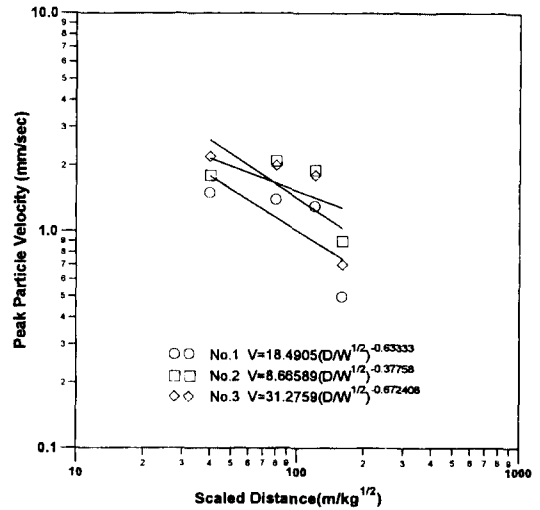


Fig. 8. The relationship between peak particle velocity and square root scaled distance at left side from the blasting point.

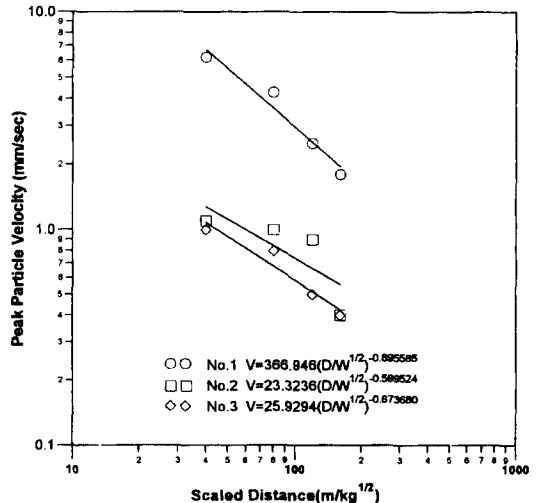


Fig. 9. The relationship between peak particle velocity and square root scaled distance at right side from the blasting point.

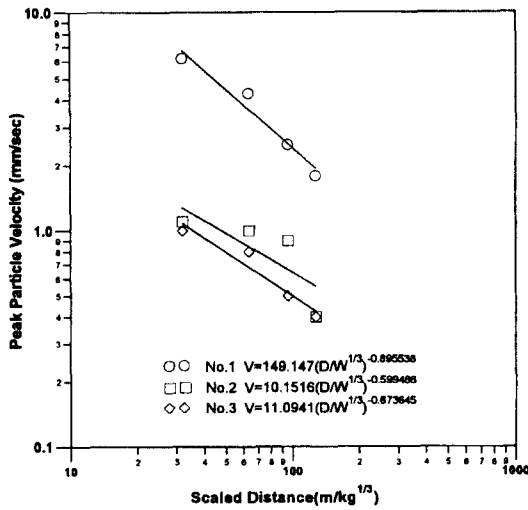


Fig. 10. The relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance at right side from the blasting point.

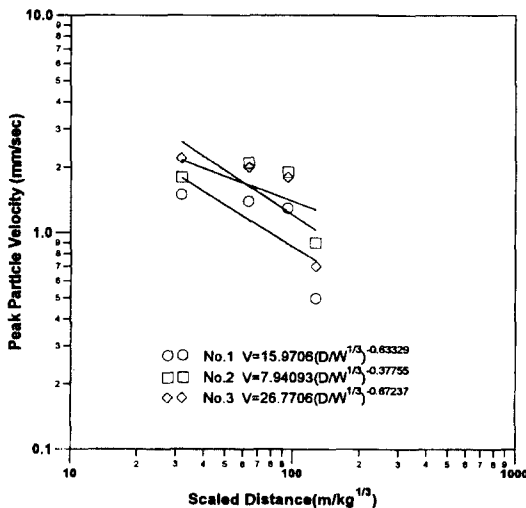


Fig. 11. The relationship between peak particle velocity and cube root scaled distance at left side from the blasting point.

이론적으로 발파시 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생 전파되어 균열대를 형성하게 된다. 발파에 의한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 암반 중에 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키며, 이것이 발파 진동이다. Hendron, Devine, Oriad 등은 발파와 관련된 변수의 차원 해석을 근거로 하여 지반의 진동 속도를 지발당 최대 장약량과 폭원으로 부터의 거리를 매개변수로 경

험적 관계식을 제의하였다. 이때 자승근 환산 거리와 삼승근 환산 거리에 따른  $n$  값,  $K$  값을 구하게 된다 (Table 8).

현장 계측 결과 영대네거리 좌측부 20 m에서 벡터 합은 1.5~2.2 mm/sec 40 m에서 1.4~2.1 mm/sec, 60 m에서 1.3~1.9 mm/sec, 80 m에서 0.5~0.9 mm/sec로 거리에 발파 진동 속도가 반비례함을 알 수 있었고, 현장 계측 결과 영대네거리 우측부 20 m에서 벡터 합은 1.0~6.2 mm/sec, 40 m에서 0.8~4.3 mm/sec, 60 m에서 0.5~2.5 mm/sec, 80 m에서 0.4~1.8 mm/sec로 좌측부와 같이 거리와 발파 진동 속도 관계가 반비례함을 알 수 있었고, 진동이 강하게 전달된 곳은 강한 지반, 장약량 초과 등에 기인하는 것으로 판단된다. 계측 결과 이론식과 유사하게 입자속도는 지발당 장약량과 비례하고, 폭원과의 거리에 반비례함을 알 수 있고, 환산 거리의 비교 검토에서 우측 20 m의 경우 진동값이 가장 큰 것으로 나왔는데, 이는 지반의 강도 특성에 기인한 것으로 판단되었다.

그러나, 이러한 진동속도값이 구조물에의 구조적 영향 정도를 나타낸다고 볼 수는 없다. 발파 진동 속도가 6.2 mm/sec 미만일 경우 인근 구조물에 피해는 없었고, 발파 진동 속도가 3.0 mm/sec 이상일 경우 주민들의 항의가 있었고, 2.5 mm/sec 이하일 경우 주민들의 항의가 거의 없었다. 이에 따라 구조물 보다는 인체의 반응이 민원의 주요한 원인이 된다고 볼 수 있다. 또한, 현장에서 시공중 실제 발파에 의한 피해는 진동 속도만이 문제가 아니라 주파수 대역과도 관계가 있기 때문이다. Table 9는 이러한 관점에서 주파수 대역을 고려한 독일의 진동속도 규제치를 보여준다. 따라서 주파수 대역까지 고려한다면, 현장에서 실측된 대구 지하철 1호선 영남대 네거리 구간에서의 진동 속도는 (최대값 6.2 mm/sec) 주위 구조물에는 별다른 피해를 입히지 않은 것으로 평가되었다. 그러나, 더욱 안전을 기하기 위해서 주요 구조물 주변에서는 Line Drilling용 무장약공의 크기를 45 mm로 증가시키고, 그 공간격을 공경의 2배 정도로 공수도 늘려 시공하는 것이 좋고, 진동 저감 효과를 증대시키기 위해서는 도로변 가장자리 단에 Finex 1호를 사용하면 그 효과가 클 것으로 판단된다.

발파소음은 일반적으로 음압이 180 dB 이하가 되면 음파로 생각할 수가 있으며 발파 작업에서는 소음의 대상으로서는 주로 음파로서의 발파음이다. 발파음은 지속 시간이 매우 짧으며 주파수는 50~2000 Hz에 분포

하며 주요 주파수는 50~150 Hz로서 발파 조건에 의해서 주파수와 음압이 변화한다. 소음을 생각할 때는 음압 Level과 소음 Level을 구별하여야 한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다(Dowding, 1985).<sup>11)</sup>

$$S = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

여기에서, S: 음압 Level (dB)

P: 음압실효치

Po: 기준 음압 실효치 (0.0002 μ bar = 2 × 10<sup>-5</sup> Pa)

음압 Level에서 P는 대상으로 하는 음압 그 자체를 말하며 그 값은 주파수에 무관한 일정치인데 반해 소음 Level에서는 P는 청감 보정을 가한 음압이다. 이 보정은 별도의 표에 의해서 수행된다. 발파음이 인체나 구조물에 미치는 영향은 Table 9와 같다.

이 표에 의하면 음압 Level이 150 dB이상이 되면 귀의 고막이 손상됨은 물론 그 이하의 음압에서도 장기간 노출되어 있으면 청력이 피로하고 난청이 되나, 80dB 이하이면, 음의 종류에 관계없이 청력피해를 일으킬 확률은 적다. 미국 내무성 USBM(1980)의 연구결과에 의하면 시설물에 영향을 미치지 않는 안전한 음압의 세기는 0.1 Hz Filter를 가진 측정기계를 사용할 경우 134 dB, 2 Hz Filter를 가진 측정기계를 사용할 경우 133 dB, 6 Hz Filter를 가진 측정기계를 사용할 경우는 129 dB로 제안된 바 있다. 현장에서의 발파음은 106~116 dB로 관측되었으나, 최대치 116dB에 대한 청감보정을 수행하면 약 90 dB로 예측되며, 이는 상기에 언급한 미내무성 USBM 제안치에 의하면 안전할 것으로 판단되었고, 민원에 의한 문제를 최소화 할 수 있었다.

제어 발파 설계시는 지발당 장약량 뿐 아니라 총 사용 폭약량도 최소화하는 것이 필요하며 설계 단계에서 민원의 발생 소지가 있는 곳은 정밀 제어 발파를 실시

하도록 설계하고, 설계대로 안전 시공하도록 철저한 감리제도의 정착이 필요하다. 항상 설계와 시공 상에서 시험 발파 실시를 통해 현장 조건에 적합한 발파설계보정을 해주는 Interface Engineering 기술이 중요하다. 국내시공현장에서는 이를 소홀히 하여, 차후에 더 큰문제를 안게 되는 경우가 많은데, 발파 및 터널전문기술자의 시공사 의무고용을 법령화하여 발파의 품질관리를 철저히해야 한다. 발파로 인한 민원은 설계를 이해하고 발파효율을 높여려는 전문시공기술자의 부족에 대부분 기인한다.

### 5. 지하철 운행시 지반진동 영향평가 및 대책

운행시 진동피해에 대한 원인규명을 위해서 Fig. 8과 같이 차량특성 및 운전 조건, 궤도 시스템 및 선로 구조물, 지반의 성층특성 및 토질, 수질, 구조물의 구조적 특성 등 다양한 영향 요소들의 복잡한 동력학적 특성에 대한 종합적인 이해가 요구된다. 진동 및 소음 저감 대책은 아래와 같다.

#### 5.1 차량 진동 개선

주안점은 레일에 전달하는 진동력 자체를 줄이는데 있으며, 이를 위해 차체의 유효 중량을 감소시키고, 유연한 Flexible Frame을 사용하도록 한다. 또한 주축 스프링(Primary Spring)의 강성도를 낮춰서 레일에 전달되는 차체진동력의 전달율을 낮출 수 있다. 이는 진동 전달률이 주축스프링의 공진특성과 밀접한 관계가 있기 때문이다. 주축스프링의 공진 주파수가 10~12 Hz이하가 되도록 주축스프링의 강성도를 낮추면 진동 전달율을 크게 감소시켜 진동레벨을 10~15 dB 정도로 줄일 수 있다. 탄성차륜(Resilient Wheel)을 사용하면 30~40 Hz 고주파진동에 대하여 8~12 dB 정도로 진동 감소효과가 있다.

#### 5.2 차량 및 레일의 유지관리 개선

차륜의 편마모제거(Wheel Truing) 및 표면연삭(Rail Grinding)이 가장 효과적인 방법이다. 그러나, 이 방법은 연속 장대 레일을 사용했을 때 효과적이다. 레일 이음부(Rail Joint)는 상기 효과를 절감시킨다. 이 방법을 통해 100Hz이상의 고주파 진동은 10~18 dB 정도로 감소된다. 이 방법을 체계적으로 활용하기 위해서는 차륜의 마모도 및 레일의 거침도를 정량적으로 측정

Table 9. Control Levels due to the Frequency of Blast-ing (Revised in 1986)

Type of Construction	Safety Velocity, cm/sec		
	Seismic Transient Predominant		
	< 10 Hz	10~50 Hz	50~100 Hz
Particularly Delicate	0.3	0.3~0.8	0.8~2.0
Residential	0.5	0.5~1.5	1.5~2.0
Industrial	2.0	2.0~4.0	4.0~5.0

할 수 있는 측정 장비를 사용해야 한다. 레일의 마모는 급곡선부에서 크게 발생되므로 본 공사 구간은 곡선 반경 300 m 미만 개소에 레일도유기를 설치하여 주행 차량의 차륜후렌지 마모 방지와 레일의 편마모 현상을 방지하고 차륜과 레일의 마찰 소음을 감소토록 한다. 또한 도유기는 정착식 F형 도유기를 외케내측에 약 200 m 간격으로 설치하여 열차주행시 자동 도유가 되도록 하여 레일과 차륜후렌지의 마모를 방지한다.

### 5.3 레일 연결 및 유지 관리 시스템

지반 진동 레벨은 레일 연결/지지 시스템의 레일 지지 계수(Rail Support Modulus)값이 작을 수록 감소한다. 레일 지지 계수는 레일 연결/지지 시스템의 수직 강성도를 침목간격으로 나눈 값을 말한다. 레일의 안정 정상 레일 지지 계수를 낮출 수 없으므로 지지 계수를  $70 \text{ kg/cm}^2$  이하로 할 수는 없다. 대부분의 경우 설계 지지 계수는  $175\sim 1400 \text{ kg/cm}^2$  정도로 한다.

### 5.4 방진 궤도의 적용

#### 5.4.1 방진침목

이것은 방진궤도 슬라브와 함께 콘크리트 도상의 궤도시스템의 방진 효과를 높이기 위해 고안된 방진 궤도시스템의 일종으로 대표적인 것은 RS-STEDEF시스템이다(Fig. 12). 이 방법으로 레일은 독립 콘크리트 블록에 의해 지지된다. 각 콘크리트 블록은 고무 상자(Rubber Boot)에 쌓여 도상 콘크리트의 홈과임 부분에 안치되고, 콘크리트 블록과 고무 상자 바닥 사이에는

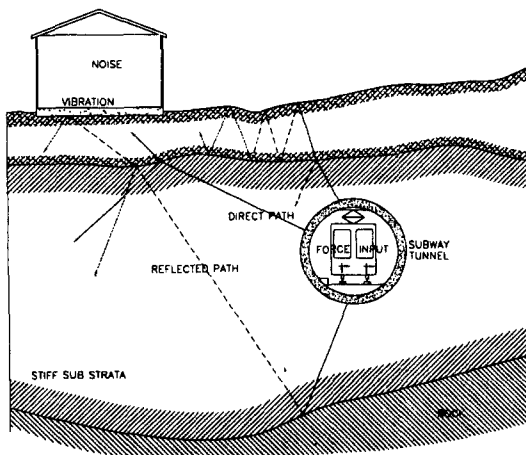


Fig. 12. Noise and vibration of the neighbour buildings according to the subway operation.

진동을 감소시켜 주는 탄성 패드(침목패드)가 놓인다. 레일과 콘크리트 사이에도 얇은 탄성 레일 패드가 놓이는데, 진동 경감 효과는 미미하다. 또한 콘크리트 블록은 도상 콘크리트와 분리거동을 하게 되어 사실상 레일의 중량을 증가시키는 역할을 하므로 추가적인 진동 저감효과를 가져온다.<sup>4)</sup>

STEDEF시스템의 방진 효과는 자갈도상등 다른 궤도보다 더 우수하다. 시공 사례에 따르면 주파수 성분에 따라 차이는 있으나 평균 10dB의 높은 진동 감소 효과를 가져옴을 알 수 있다. 그러나 낮은 주파수에서는 자갈도상보다 못한 진동 저감 효과를 나타내기도 하였다.

#### 5.4.2 방진 궤도 슬라브

이 방법은 인버트와 분리 시공되는 별도의 도상슬라브를 탄성 패드를 통하여 지지시키는 방진 궤도 시스템이다. 도상슬라브와 인버트사이에 놓이는 탄성 슬라브 패드의 강성도 및 도상 슬라브의 중량을 조절하여 인버트에 전달되는 진동력 자체를 낮추어 진동 저감 효과를 극대화시킨다. 연구 결과에 따르면 최대 2 dB의 진동력을 감소시킬 수 있다. 일반적으로 지하철에 사용되는 방진 궤도 슬라브의 설계 공진 주파수는 대략 15 Hz내외임을 알 수 있다. 그러나 23 Hz이하의 저주파수 성분에 대해서는 오히려 진동이 증가하는 경향을 보이기도 한다.

또한 약 30 Hz이하의 고주파 성분은 최소 10 dB에서 최대 30 dB까지 진동이 감소한다. 방진 궤도 슬라브는 지하철 진동 민원의 대부분이 약 30 Hz의 주파수 영역에 놓이는 지반소음인 것을 감안할 때 매우 효과적인 대책이라 하겠다.

#### 5.4.3 발라스트 매트(Ballast Mats)

이 매트는 자갈 도상 궤도에 있어서 발라스트 재료의 파쇄를 감소시킬 목적으로 사용되는 것이나 부가적으로 진동 감소 효과를 가져온다. 발라스트 매트의 방진 효과는 논란이 많으나, 일반적으로 63~250 Hz 범위의 고주파 진동에 한하여 최소 5dB에서 최대 15dB의 진동 레벨 저감 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 30 Hz이하의 저주파수 성분 진동에 대해서는 사실상 진동 효과를 기대할 수 없다.<sup>4)</sup>

### 5.5 노선의 구조물 형식

지하철 노선 구조물 주변 지반으로 전파되는 진동의 에너지 강도 및 주파수 특성은 지하철 터널 단면의 크기

및 형상, 단위 노선 길이 당 중량, 라이닝 및 인버트 콘크리트의 두께 등에 의해 크게 좌우된다. 그러나, 이와 같은 노선 구조물의 진동 에너지 방사 특성이 터널 벽체, 인버트층 어느 쪽에 지배적인 영향을 받는지, 또한 터널 노선 방향에 따른 터널 구체의 휨진동(Bending Vibration)에 대한 영향 등에 관해 규명된 것은 없어 실제 설계에 반영시킬 신뢰성 있는 진동 저감을 위한 터널 단면설계 지침을 제시하기는 매우 어렵다. 한편 터널 벽체의 두께와 진동 레벨의 상관관계에 대해서는 다음의 경험식이 뉴욕 지하철에서 제안되었다.

$$Lv(dB) = (56 - 69) \log\left(\frac{d}{40}\right) \quad (5)$$

여기서, Lv : 터널벽면의 진동속도 레벨  
 (기준치  $5 \times 10^{-8}$  m/sec)  
 d : 터널벽체의 평균 두께  
 (전단면의 평균두께 cm)

일반적으로는 원형 단면의 터널이 진동 소음 저감 효과가 Box형보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

### 5.6 지중방진벽의 설치

지중 방진 벽은 진동원 또는 수진 구조물의 인접 지반에 수직으로 트렌치 (단순 굴착 또는 그라우트, 스티로폴의 충전타설) 굴착, 널 말뚝 (Sheet Pile) 및 콘크리트 연속벽의 설치 또한 단순한 주열 천공의 조성을 통하여 소음 전파 억제를 방음벽과 같은 지반 진동 차단대를 두는 방법이다. 진동의 주원인인 표면파의 차단 목적으로 방진벽 구성 재료와 지반과의 진동 저항 특성의 불일치 및 진동파의 회절, 간섭 효과를 이용하는 것이다. 지중 방진 벽의 깊이는 최소한 표면파 파장의 1/3~1/2 될 때 유효하다. 표면파의 파장은 주파수 성분 및 전파 속도에 따라 달라지는데, 전형적인 토사 지반의 경우 표면파 전파 속도는 200 m/sec 내외임을 감안

하면 유효 지하철 진동의 하한계 주파수를 20 Hz로 본다면,  $200/20 \text{ m} = 10 \text{ m}$ 이므로 대략적인 계산으로 지중 방진벽의 최소 심도는 10/3~10/2=3~5 m 이상으로 해야 함을 알 수 있다.<sup>4)</sup>

### 5.7 인접 건물의 방진 설비

건물 진동은 건물의 기둥과 기초 사이에 고무 등의 탄성재를 이용한 스프링 요소를 삽입하여 건물의 기초부에 전달된 진동이 상부 구조로 전파되는 것을 방지하는 방법으로 건물 진동은 방진스프링재의 방진 저항도가 건물 자체의 진동 저항도 보다 작게 설계되어야 유효하다. 상당한 방진 효과를 얻기 위해서는 스프링 재의 동적 순응도~저항도와 역비례하는 척도를 건물의 동적 순응도를 지배하는 지반의 동적 순응도 보다 훨씬 크게 해야 한다. 그러나, 실제적으로 기존 건물에 대해서 건물의 일부를 해체하는 등의 특수 작업을 필요로 하므로 경비면에서 큰 부담이 가는 최후의 대책이라 할 수 있다.

## 6. 결 론

대구 1호선 남대구정거장~영선정거장 구간에서 지하철 인접 구간에 미치는 지하철 진동의 저감 대책 방법에 대하여 연구하였다. 따라서 현실적으로 실효성 있는 저감 대책 방안을 다음과 같이 제시한다.

#### 1) 공사중 소음 진동 저감대책

공사중 발생될 진동과 소음을 줄이기 위해, 항타작업용 T-4의 천공 장비 가동시는 압축공기기와 천공기를 50 m 이상 떨어뜨려 놓고, 작업 시간을 주로 주간으로 하며, 소음 허용치를 넘지 않도록 방음막 등을 설치한다. 발파 진동을 억제하기 위해서는 철저한 조절 발파법을 적용하고, 저폭속 폭약을 사용하고, 다단 발파에 의한 지발당 장약량을 감소시켜 발파원의 폭력을 필요한 정도 이하로 감소시켜 주변 구조물에 피해가 없도록 하여 민원을 근본적으로 차단시켜야 한다. 발파 진동 측정을 하여 이들 계측치를 회귀 분석한 결과 95%이상이 허용 진동 속도 내로 들어왔고, 발파음에 대한 데이터도 안전치내로 분석되어 본 설계변경의 신뢰도를 높이는 결과가 됐다.

제어발파 설계시는 지발당 장약량 뿐아니라 총 사용 폭약량도 최소화하는 것이 필요하며 풍화암의 경우 심뻐기는 기계굴삭을 하여 발파 진동 절감 효과가 있

Table 10. Efficiency of Blasting Noise to the Human beings and Structures

음압 (dB)	인 체	구 조 물
180		구조물 손상
170		대부분의 창유리 파손
150	고막손상	창유리 약간 파손
140		창유리 파손 안됨
120	통증을 느낌	
100	장기간에 난청	
80	안전	

었다.

물론 정밀 제어 발파를 실시할 경우 공사비 증대와 공기 지연은 불가피하나, 설계 단계에서 민원의 발생 소지가 있는 곳은 정밀 제어 발파를 실시하도록 설계하고, 설계대로 안전 시공하도록 철저한 감리제도의 정착이 필요하다.

항상 설계와 시공 상에서 시험 발파 실시를 통해 현장 조건에 적합한 발파 설계 보정을 해주는 Interface Engineering 기술이 중요하다. 이를 위해서 미국, 일본, 호주와 같이 터널시공기술사, 발파 전문 기술사 제도 등을 도입하여 지반 발파 기술의 전문화를 이룰 필요가 있으며, 토목과 등 지반 공학 관련 학과의 경우 대학 커리큘럼 상에도 외국의 대학처럼 발파 기술, 화약학, 터널 시공 기술, 암반 굴착 공학, 터널 설계 기술, 암석 역학 등 산악 지대인 국내 여건상 시공 물량이 많은 터널 공사를 비롯한 지하 공간 구조물 공사에 대한 학문적 뒷받침이 절실히 요구되며 관련 기술자들도 학문적 배경 뿐 아니라 실무 경력이 가해져야만 국내 건설 업계에서 필요로 하는 기술의 발전이 가능할 것이다. 현장에서 측정된 자료의 신뢰도가 떨어져 직접 측정을 해야만 하는 문제는 측정 자료에 따라 설계 변경 등의 작업을 하기보다는 쉽게 처리하기 위하여 늘상 현장에서 측정 기준치 이상의 자료를 제거해 버리는 데서 기인하며, 이러한 신뢰도의 문제가 민원의 주된 원인을 일으키고 있다.

## 2) 운행중 소음 진동 저감 대책

근본적으로 차량 진동의 특성 개선도 중요한 과제이지만, 차량의 보수가 잘 되어 있으면 열차가 양호하게 주행할 수 있으므로, 차바퀴의 진동 소음을 줄일 수 있다. 특히 차량에서의 차륜의 보수는 매우 중요하며 차량이 제동이 미끄러짐에 의해 레일의 파상마모와 차륜의 표면 손상이 발생하면 주행이 충격이 발생하여 진동을 유발시킨다. 레일의 파상마모 부분을 양호한 상태로 보수함으로써 진동을 방지할 수 있다. 레일 두부의 파상마모를 정리하여 6 dB정도의 진동을 감소시킬 수 있다. 차륜과 레일 이음부에서 충격 소음을 없애기 위하여 레일 이음부를 용접하고 레일표면을 연마 절삭하여 레

일을 장대화함으로 약 3~4 dB정도의 진동을 감소시킬 수 있다. 또한 차량의 진동이 하부구조에 전달되는 것을 방진 고무를 사용하여 침목하부에 Rubber Boots와 Microcellular 패드를 부착시켜 이중으로 진동을 감소시켜 약 10~12 dB의 방진 감소 효과를 얻을 수 있다. 그리고 레일의 마모는 급곡선부에서 크게 발생함으로 곡선 반경 200 m 개소에 레일 도유기를 설치하여 차량과 레일의 마찰 소음을 감소시킨다. 이러한 대책은 전동차 운행 시작과 더불어 차량 진동 저감 효과 분석을 통해 문제점을 확인하여야 할 것이다.

## 7. 감사의 글

본 논문을 작성하는데 많은 도움을 주신 대구 지하철 건설 본부 설계과 김홍연, 정교수씨의 관련 직원 여러분께 진심으로 감사를 드린다.

## 참 고 문 헌

1. Pen-Anders Persson, Roger Holmbery, Jaimin Lee, 1996. Rock Blasting & Explosive Engineering, CRC Press. Inc.
2. 대구광역시 지하철 건설 본부, 1994. 대구 지하철 지반 분류 기준
3. 대구광역시 지하철 건설 본부, 1994. 대구 지하철 2호선 지반 조사 보고서
4. 서울시 지하철 건설 본부, 1994. 서울 지하철 6-5공구 실시 설계 보고서
5. 지왕률, 최재진, 1994. 대구 지하철 터널의 적정지보 패턴 선정에 관한 연구, 터널과지하공간, 제4권, 3호.
6. 신경건설, 1994. 창원 터널 축조 확대 공사 보고서
7. 한국 토지 개발 공사, 1993. 암발파 설계 기법에 관한 연구
8. 건설부, 1985. 터널 공사 표준 시방서
9. 원기술 편집부 역, 1994. 발파 진동의 주변에의 영향과 대책, 원기술
10. 원기술 편집부역(감수 김정진), 1994. 신발파핸드북, 원기술
11. Charles H. Dowding, 1985, Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice--Hall
12. 천병식, 오재웅, 1993. 3. 건설 기술자를 위한 지반 진동 영향과 대책, 건설 연구사