

발파진동 제어에 의한 특수구간 터널굴착에 관한 연구

A Study on Tunnel Excavation by Controlled Blast Vibration at Particular Environment Conditions

최형빈* 임한욱**
Choi, Hyung-Bin Lim, Han-Uk

Abstract

It was difficult to apply conventional excavation methods in some sections from Seoul to Pusan high speed rail road construction of 1 lot 2, due to highway concrete road, gas pipe, water pipe and nearby factories with automatic control system machine. To excavate safely and efficiently in these sections new blast patterns were employed within allowable blast vibration level, by test blast and controlled vibration by sequential blast.

Behaviors of the rock mass including convergence and displacement around tunnel were measured with construction works and the crack width in concrete wall was also monitored for controlling allowable limits.

The results can be summarized as follow :

1. The allowable blast vibration level in structure site is less 1.0cm/sec for highway concrete, 0.5 cm/sec for gas pipe, water pipe and building housing and 0.3 cm/sec for automatic control system machine.

2. The convergence displacement, single rod extensometer and multi rod extensometer around tunnel and cracks in concrete wall were measured, it was confirmed that the measured values were converged within allowable level.

3. The empirical formular of ground vibrations with 90% confidence lines for PD-3 was given as follow.

$$V_{90\%} = 45.549 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.353}$$

키워드 : 지반진동, 허용진동치 크기, 제어발파, 진동추정식

Keywords : *ground vibration, allowable blast vibration level, controlled blast, empirical formular*

1. 서론

* 금호건설(주) 차장, 기술사
** 강원대 지구시스템공학과 교수, 공학박사

국민의 생활수준이 향상됨에 따라 교통수단의 편의성과 고속주행의 양면성을 동시에 만족시키기 위하여 우리나라에서도 최근에 고속철도, 국도 등 사회간접자본(S.O.C)의 투자가 증가되고 있다. 우리나라와 같이 국토가 협소한 경우의 건설작업은 도심지 주거지역, 밀집된 농·상업지역 등을 통과

하는 것이 불가피해지고 이로 인하여 각종 민원의 발생이 점차 증가되고 있는 추세이다.

본 연구 대상지역은 서울-부산간 경부고속철도 제 1-2 공구 노반 신설 공사 구간으로 터널은 NATM으로 시공하도록 계획되어 있고 터널의 규모는 S.L을 기준으로 할 때 너비 15.6m, 높이 10.5m가 된다.

시공구간에는 서울-안산간 고속도로, 경인 주 가스배관, 광역 상수도관 등이 통과함은 물론, 자동제어시스템에 의해 운전되는 공작기계가 설치된 공장이 위치하고 있으며, 주변에 다수의 주택 및 시설물이 위치하고 있어 이를 특수구간이라 지칭하였다.

이와 같은 특수구간은 그 연장이 411m에 달하는데 발파작업으로 굴착시 지반진동(Ground vibration)으로 인한 민원의 야기와 이로 인한 공사의 지연이 예상되었다. 따라서 굴착작업에 앞서 기존 설계서에 제시된 암반등급분류, 각 시설물에 대한 진동허용기준, 발파패턴 등을 검토, 분석한바, 지반진동의 영향이 크게 우려되었다.

본 연구에서는 특수구간의 본 공사에 앞서 일차적으로 막장관찰에 의한 암반등급분류 항목확인, 진동허용기준의 재검토, 시험발파 및 그 결과를 기초로 새로운 발파패턴을 수립하였다. 이차적으로 새로운 패턴에 따라 발파진동을 제어하면서 매 발파마다 진동의 계측과 주변시설물의 안정성 평가를 위한 몇 가지 계측을 동시에 수행하고 종합적으로 발파진동의 영향을 평가하였다.

일반적으로 터널공사를 시공하기 전 설계단계에서 표준 시공패턴을 설정하기 위한 암반의 공학적 평가를 위하여 주로 RMR 또는 Q-system에 의한 등급분류를 실시하는데 이 경우 시추코어를 대상으로 평가하기 때문에 절리의 간격, 절리의 상태, 지하수 양 등의 산정에 오차가 발생되기 쉽다. 따라서, 실제 시공시 막장관찰을 통하여 그 때 그 때 암반등급을 수정, 분류하고 그에 맞는 발파패턴을 적용하도록 하였고 발파패턴은 각 시설물별 허용 지반 진동치와 시험발파 결과를 설계에 반영하였다. 또한, 진동제어대책 방안으로 다단식 발파기에 의한 기폭시차 조절을 하였다. 즉, 기존의 분할 발파기법을 지양하고 지발 전기노관(M.S.D)의 기폭시차와 다단식발파기의 고유 기폭시차 조절을 조합하여 지발당 장약량을 최소화함으로써 발파진동의 크기를 제어하였다. 이 때, 진동의 계측은 물론이고 몇 가지 변위 계측을 동시에 실시하였는데 특히, 자동제어시스템 공작기계는 측정기 센서를 밀착시켜 진동을 계측하였고 그 결과, 정밀기기의 편차 및 오작동을 주기적으로 육안 관찰하였다. 그리고 주요 주택 등 시설물 벽면에는 균열측정 게이지(crack gauge)를 부착하여 균열의 형성파이의 성장 여부를 조사, 분석하였다.

이와 같은 과정을 반복 수행함으로써 몇 가지 시설물에 인접된 특수구간에 비교적 대 단면을 갖는 경부 고속철도 터널을 안전하게 시공할 수 있었다.

2. 연구 대상지역의 지질특성 및 주변환경

연구대상 구역의 지질특성 및 주변상황을 요약하면 흑운모 편마암(biotite gneiss)류가 기반암 (bed-rock)을 이루고 있으며, 경부고속철도와 주요 시설물과의 가장 가까운 상대적 이격거리는 32.5~52.3m이다.

해당 구역과 가장 가까운 위치의 시추결과 얻어진 대표적인 암석에 대한 실험실 시험 결과는 Table 1과 같다. 즉, 단위중량은 2.554~2.702 gr/cm³로 측정되었고 일축압축강도는 400~1,020 kgf/cm², 탄성계수와 포아송비(Poisson's ratio)는 각각 (2.235~4.128)×10⁵kgf/cm² 및 0.201~0.289, 시험 압편에 대한 P파의 탄성과 전파속도는 2,838~5,566 m/sec로 구하여졌다.

Table 1 Physical properties of rock materials

Borehole Items	BH-15 0-C3	BH-15 1-C	TB-1	TB-2	TB-3	Average
Station	18K+680	19K+250	18K+206	18K+240	20K+660	-
Unit weight (gr/cm ³)	2.655	2.668	2.554	2.702	2.664	2.649
P wave velocity (km/sec)	3.501	3.645	2.984	5.566	2.838	3.707
Uniaxial compressive strength (kgf/cm ²)	700	758	400	1,020	653	706
Young's modulus (× 10 ⁵ kgf/cm ²)	3.692	3.813	2.235	4.128	2.770	3.328
Poisson's ratio	0.265	0.271	0.201	0.289	0.238	0.253

본 연구 대상지역인 경부고속철도 제 1-2 공구의 터널 굴착지역은 이와 인접하여 서울-안산간 고속도로, 경인 주 가스배관, 광역 상수도관 및 공작기계와 주택 등이 위치하고 있다.

서울-안산간 고속도로는 왕복 4차선 도로로서 터널축의 중심부를 기준으로 할 때 NE~SW방향으로 STA.19K+029~19K+099구간을 교차하여 통과한다. 터널중심(STA.19K+247)으로부터 직상부 약 33.0m 거리에는 경인 주 가스 배관이 통과하는데 그 크기는 φ24 인치이고 재질은 주철관이다. 그리고 터널 중심(STA.19K+256)에서 약 32.5m 거리에는 광역 상수도관이 교차하는데 그 관의 직경은 φ1,100 mm이고 재질은 주철관이다. 또한, 터널중심(STA.19K+300)에서 사거리로 52.3m 거리에

Table 2 Estimated distance from blasting point to special structures

Structures considered	Station	Distance(m)			Vertical
		Calculation	Vertical	Horizontal	
Highway concrete	19K+090	47.1	47.1	-	-
Gas pipe	19K+247	33.0	33.0	-	28.0m+5.0m
Water pipe	19K+256	32.5	32.5	-	27.5m+5.0m
Automatic control system machine	19K+300	52.3	36.0	38.0	-
Housing building	19K+435	45.3	32.0	32.0	-

는 자동제어시스템 공작기계가 설치되어 있는태의 부 충격이 가해질 때 제품의 편차가 발생되고 오작동이 우려된다. 이 공작기계는 세일중공업 제품인 TNL-45, TNL-35(94. 4. 25 납품)과 한국산전 제품인 SYSTEM 100L 이다. 터널 직상부 (STA.19K+265~18K+440)구간의 주택 등 건축물은 대부분 철거되었으나 사거리로 45.3m 떨어진 곳에 몇 채의 주택이 위치하고 있다. 이 들 대부분의 주택은 NW-SE 방향으로 밀집되어 있으나 이들의 이격거리가 45.3m이상 되기 때문에 이 주택은 검토 대상에서 제외하기로 하였다. 한편, 경부고속철도와 이 들 주요시설물과의 대표적인 상대적 이격거리는 Table 2 와 같다.

3. 주요대상물의 진동허용기준 설정

본 연구 대상지역은 Table 2 에 제시한 바와 같이 시공 대상인 경부고속철도의 터널구간과 국가 기간 산업망이 인접하거나 또는 교차하여 통과하므로 정밀발파 (Cautious blasting)가 요구되는 구간이다.

3.1. 기존 설계 내용의 검토

기존 설계 내용에 제시된 암반의 등급 분류, 진동 허용기준치 그리고 암반등급별 세부 발파 내용을 요약하면 다음과 같다.

3.1.1 암반의 등급분류

복잡한 양상을 갖는 암반의 성질과 조건을 간결한 형태로 구분하고 분류함으로써 공학적 설계를 위한 정량적인 자료를 제공하여 설계 및 시공의 효율성을 높이기 위해 암반의 등급 분류를 실시한다. 특히, 암반조건과 설계조건이 일반적인 경우 표준 설계법을 적용하는데 이 때, 암반등급을 기준으로 하고 있다.

암반분류 방법은 여러 가지 방법이 제안, 채택되고 있으나 그 중에서도 Bieniawski(1973)가 제안한 R.M.R.(Rock mass rating)법, 그리고 Barton(1974) 등이 제안한 Q-System이 널리 채택되고 있는데 본 연구에서는 평가 항목이 비교적

용이한 R.M.R.법을 채택하였다.

한편 설계단계에서 시추코어의 상황을 기준으로 특수구간 내 암반등급을 분류한 결과는 Table 6과 같다. 여기서 특수구간이라 함은 앞에서 설명한 바와 같이 주요 시설물이 인접한 구간이므로 구체적인 위치는 STA.19K+029에서 STA.19K+440까지 411m 구간을 의미한다.

3.1.2 진동 허용기준치

발파로 인한 지반진동이 구조물에 미치는 피해를 방지하기 위하여 진동 허용 기준치를 설정하고 있다. 이 기준치는 나라마다 또 대상구조물에 따라 약간의 차이를 보이고 있으나 우리나라의 경우 대부분이 서울 지하철 건설시 채택한 독일의 기준치 (DIN-4150)을 적용하고 있다. 본 설계에서도 독일의 기준을 채택하고 있는데 그 구체적인 내용은 생략하기로 한다. 즉 진동속도를 속도로 하여 고속도로 콘크리트 구조물은 1.0 cm/sec이하, 경인 주 가스 배관과 광역상수도관 및 주택은 0.5 cm/sec 이하, 자동제어시스템 공작기계는 0.3 cm/sec이하로 기존 설계에 제시되고 있다.

3.1.3 발파패턴

발파패턴을 결정하기 위해서는 시험발파를 실시하고 그 자료를 기초로 하여 진동 허용기준치 이내에서 지발당 장약량과 그에 따른 최소저항선 및 공간격 등이 결정되어야 한다. 그러나, 기존의 설계 내용은 시험발파를 생략하고 몇 가지 이론식을 기초로 지발당 장약량을 산정하여 그 결과에 따라 설계하였는데 제일 양호한 암반등급 1의 경우를 예로들면 천공 및 기폭조건이 Fig.1과 같다.

(1) 발파진동상수

발파진동의 크기를 결정하는 요소로는 입지조건과 발파조건으로 구분할 수 있으며, 전자는 발파지점과 주변 구조물의 기하학적인 형태와 해당지역의 지질 및 암반상태, 지형 등에 의해 결정된다. 반면에 후자는 여러 요소 중 주로 지발당 장약량과 폭원으로 부터의 거리에 따라 결정되는데 이들은 일반적으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

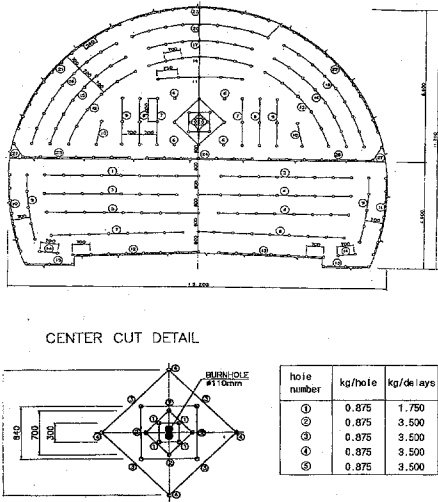


Fig.1 Drilling and ignition conditions for pattern design 1

$$v = K \left(\frac{D}{w^b} \right)^{-n} \quad (1)$$

여기서

- v ; 지반진동 속도(mm/sec · cm/sec)
- D ; 폭원으로 부터 측정까지의 거리(m)
- w ; 지발당 장약량(kg/delays)
- K, -n ; 지반조건에 의해 결정되는 입지상수
- b ; 장약지수로 1/2 또는 1/3을 선택

(1)식에서 입지상수 K, n을 구하기 위하여 (2)식을 인용하였다.

$$K = E_i(R_i \times S_c + Q_i) \quad (2)$$

(2)식은 서울 지하철 3, 4호선 건설 당시 서울지역의 암반을 화강암과 편마암으로 대별하고 구한 경험식이다[1]. 즉, E_i는 폭약의 보정계수로 다이내마이트를 기준하여 그 값을 1.0으로 하고 다른 화약류의 상대적인 위력을 표시하는 값으로 함수폭약은 0.8, 초안폭약은 0.65로 가정한 값이다. R_i는 암중에 따른 지수로 예를 들면 서울화강암의 경우 0.0371, 서울편마암은 0.0206, S_c는 일축압축강도이고 Q_i는 발파방법에 따른 보정 값이다.

예를 들면 시공구간 암반이 편마암으로 그 압축강도가 750 kgf/cm²이면 (2)식에 대입하여 입지상수 K값은 56을 얻을 수 있다.

$$K = E_i(R_i \times S_c + Q_i) = 1.0(0.0206 \times 750 + 40) = 56$$

(2) 적정장약량 산정

적정 장약량의 산정을 위한 이론식으로 (3), (4)

식을 이용하였다⁽²⁾.

$$L = L_v \cdot A \cdot W \quad (3)$$

$$L_v = \left(1 + \frac{W}{\sqrt{A}}\right)^2 \cdot f(W) \cdot g \cdot e \cdot d \quad (4)$$

여기서

L : 발파당 화약 총 사용량(kg)

L_v : 이론상 비장약량(kg/m³)

A : 단면적(m²) W : 굴진장(m)

ℓ : 천공장(m)

$$\left(1 + \frac{W}{\sqrt{A}}\right)^2 : 터널굴착 단면계수$$

$$f(W) = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{W}} - 0.41\right)^3 : 발파규모계수$$

g : 암석항력계수 e : 폭약위력계수

d : 장전밀도

3.2. 진동허용기준 설정

기존 설계에서는 주요 시설물별 허용진동치를 서울지하철의 기준을 준용하고 있는데 채택에 따른 이론적 근거가 부족한 것으로 판단되어, 국내의 문헌을 통하여 그 적정성 여부를 검토, 분석하였다. 주요시설물은 콘크리트 구조물, 가스관, 상수도 도관, 그리고 공작기계로 구분하여 검토하였다.

3.2.1 콘크리트 구조물

발파진동으로 인한 구조물의 손상정도는 발파진동속도와 밀접한 관계가 있다. 즉, 지반 내를 전파하는 속도는 구조물을 구성하고 있는 재료의 응력과 직접적인 비례관계가 성립한다. 발파진동으로 발생하는 지진파는 무한 탄성 매체를 통과할 때 (5)식의 관계가 성립한다.[3]

$$\sigma = \rho \cdot E = \rho \cdot c \cdot v \quad (5)$$

$$v = \frac{\sigma}{\rho c} \quad (6)$$

여기서

σ : 구조물 구성재료 즉, 매질의 전파방향 응력 (kgf/cm²)

ρ : 매질의 밀도(gr/cm³)

c : 매질의 탄성과 전파속도(m/sec)

v : 탄성파의 전파에 의한 매질의 진동속도 (m/sec)

한편 스칸디나비아에서는 구조물에 미치는 허용진동치를 결정할 때 발파진동속도와 기반암의 속도 등 몇 가지 요인을 고려하여 구하는 제안식이 이용되고 있다[3].

$$v = v_o \cdot F_k \cdot F_d \cdot F_t \quad (7)$$

여기서

v : 입자속도 또는 지반진동속도(cm/sec)

v_o : 보정되지 않는 수직방향의 최대입자속도

(cm/sec)

F_k : 구조물의 건축재료 계수

F_d : 폭원과 진동감지기 설치구간의 거리계수

F_t : 발파작업 연속성의 계수

따라서, 본 연구에서는 콘크리트에 대한 이론적 허용진동치를 두가지 방법 즉, 콘크리트 물성치를 이용하여 구하는 방법과 스웨덴에서 사용되는 관용식을 이용하여 구하였다. 한편 고속도로 변 콘크리트에 대한 물성시험 결과치는 Table 3과 같다.

Table 3 The physical properties of concrete used for highways

Items	W (gr/ cm ³)	P velocity (km/sec)	S _c (kgf /cm ²)	S _t (kgf /cm ²)	E (× 10 ⁵) kgf/cm ²	ν
Values	2.33	3,756	150	17	4.32	0.21

(6)식에서

$$v = \frac{\sigma}{\rho c} = \frac{17,000 \times 980 \text{ (gr/cm}^2 \times \text{cm}^2)}{2.33 \times 375,600 \text{ (gr/cm}^3 \times \text{cm/sec)}} \approx 19.0 \text{ cm/sec}$$

가 된다.

즉, 회수된 코어의 물성값을 이용하여 계산한 이론적 허용진동치는 19.0cm/sec이지만 현지 암반의 특성, 반복하여 수행되는 발파작업으로 인한 피로파괴의 영향 등을 고려하여 탄성한계 내에서 안전율을 10으로 가정하면 위의 이론적 계산치의 1/10 수준인 1.90 cm/sec가 된다. 반면에 스웨덴에서 제시된 구조물 특성 및 발파조건을 감안하여 (7)식을 이용하여 계산하면 아래와 같다. 위 계산 항목 중 F_k , F_d , F_t 산출을 위한 관계 상수식은 별도로 표시하지 않았고 위의 값 역시 안전율을 10으로 가정하면 그 허용진동치는 1.5 cm/sec가 된다.

$$v = v_0 \cdot F_k \cdot F_d \cdot F_t = 57 \times 1.2 \times 2.23 \times 1.0 = 152.5 \text{ (mm/sec)} \approx 15.25 \text{ cm/sec}$$

3.2.2 가스관 및 상수도관

발파진동으로 인한 파이프의 허용진동치는 Dennis Allen Clark[4]에 의해 제시된 바 있다. 이 연구에서는 먼저 파이프가 견딜 수 있는 휨 응력 (bending stress)을 설정하고 이 값과 최대 진동속도와와의 관계 직선을 이용하여 최대 허용 진동속도를 구하여 이를 발파진동의 허용치로 설정하였

다.

가스관 및 상수도관(파이프)이 견딜 수 있는 휨 응력은 제작회사에서 제시한 175 kgf/cm²를 채택하고 휨 응력과 진동속도와의 관계 실험 직선에 대입하면 허용진동 속도는 약 23.0cm/sec이 된다. 이때, 안전율을 10으로 가정할 경우 그 최대 값은 2.3cm/sec임을 알 수 있다.

한편 Dowding[5]은 그의 연구 논문에서 다음과 같이 기술하고 있다. 미국가스협회(AGA)의 후원으로 실시한 일련의 시험발파 결과, 이론적으로 구한 값은 계측된 값보다 훨씬 큰 값을 보인다. 따라서, 이론적으로 구한 값 2.3cm/sec보다 적게 설정하는 것이 안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

3.2.3 공작기계

자동 제어시스템의 공작 기계류 중 진동에 가장 민감한 부품은 콘트롤 패널 (control panel)로 알려져 있다. 이 장비의 진동 주파수는 14.3Hz이며, 변위(진동 폭)은 0.3 mm, 정적 수평가속도는 0.3 G(294 cm/sec²)로 제시되고 있다.

발파에 의한 지반진동을 단순조화 진동(simple harmonic motion)으로 가정할 경우 변위, 지반진동속도 및 가속도 사이에는 (8), (9)식의 관계가 성립한다.

$$v = \omega \mu_0 = 2\pi f \mu_0 ; \mu_0 = \frac{v}{2\pi f} \text{ ----- (8)}$$

$$a = \omega^2 \mu_0 = (2\pi f)^2 \mu_0 = 2\pi f v ; v = \frac{a}{2\pi f} \text{ (9)}$$

μ_0 : 최대변위(mm) , v , a : 진동속도 및 진동가속도(cm/sec, cm/sec²) , w , f : 각속도 및 주파수(진동수 · Frequency · Hz · c/sec)

위 관계식으로부터 구한 지반진동 속도는 각각 2.69 cm/sec와 3.27 cm/sec값으로 약간의 차이를 보이는데 이는 지반 내 진동의 전파를 단순조화운동으로 가정할 때 기인한 것으로 판단된다. 이 경우 안전율을 10으로 가정하면 허용진동치는 0.27 cm/sec가 된다.

$$v = 2\pi f \mu_0 = 2 \times 3.14 \times 14.3 \times 0.03 \approx 2.69 \text{ cm/sec}$$

$$v = \frac{a}{2\pi f} = \frac{294}{(2 \times 3.14 \times 14.3)} \approx 3.27 \text{ cm/sec}$$

3.2.4 진동허용치의 상호비교

기존 설계서에 제시된 허용기준치와 앞에서 구한 값을 비교하여 요약하면 Table 4와 같다.

기존 설계에서 설정한 허용진동치의 크기는 이론적으로 구한 허용진동치와 거의 유사한 것으로 확인되었으나 가스관 및 상수도관(파이프)의 경우는 매우 보수적이었다.

Table 4 Comparison of design and theoretical values of ground vibration

Items	Value of design data (cm/sec)	Theoretical values
Automatic control system machine	0.3	0.27
Gas & water pipe	0.5	2.30
Housing building with partial crack	0.5	0.50
Highway Concrete	1.0	1.50

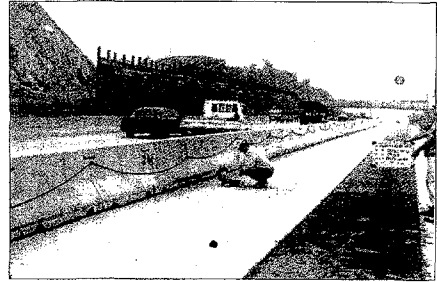


Fig. 2 Vibration monitor and installation of transducer

4. 발파진동 및 변위계측

특수구간 굴착시 기존 설계서에 제시된 발파패턴을 채택해도 안전한 지 여부를 확인할 필요가 있다. 이를 위하여 우선 시험발파를 실시하였고 진동 허용기준치를 고려하여 새로이 발파 패턴을 설계하였다. 이후, 시공과 동시에 진동은 물론 변위, 균열의 변화 등을 계측하면서 정밀발파를 수행하였다.

4.1. 시험발파와 그 결과

진동을 제어하면서 특수구간의 암반을 효율적으로 굴착하기 위하여 시험발파를 실시하였다. 시험 조건은 암반등급별로 구분하여 즉, PD-1은 천공장을 1.5m, 2.0m, 2.5m 등 3가지로 설정하고 이에 따라 장약량은 0.5625에서 1.875 kg/delays로 변화를 주면서 실시하였다. 마찬가지로 PD-2에서는 천공장을 1.5m 및 2.0m · 장약량은 0.5625에서 0.125 kg/delays, PD-3에서는 천공장을 1.5m로 고정시키고 장약량은 0.500에서 0.5625 kg/delays로 조정하였다. 한편, 폭원과 측침까지의 거리는 48.1m에서 147.2m까지 여러 단계로 구분하였다.

진동 계측기는 측침치의 오차를 감안하여 캐나다 Instantel Co. 제품인 Blast-mate II 가중만을 사용하였다. 구체적인 진동계측 자료는 생략하였으며, 이를 정리 요약하면 Table 5 및 Fig. 3과 같다.

Fig. 2는 대표위치에서 발파진동 측정 모습 중 한 예를 보여준 것이다. Table 5의 값들은 계측 자료를 이용하여 회귀분석(regression analysis)을 실시하고 (1)식에 제시된 입지상수 K, n 값을 구한 결과이다. 그림에서 SRSD, CRSD, VS는 각각 평방근 환산거리(square root scale distance), 입방근 환산거리(cubic root scale distance), 단일성분의 최대입자속도(peak particle velocity)를 벡터 값으로 환산한 벡터합(vector sum)의 약자이다.

Table 5 Vibration constants at 90% confidence lines

Rock mass classes	Square root scaled distance			Cubic root scaled distance		
	K	-n	r	K	-n	r
PD-1	115.927	1.480	0.966	207.786	1.605	0.956
PD-2	70.548	1.448	0.967	137.735	1.619	0.957
PD-3	52.334	1.362	0.917	47.323	1.371	0.916

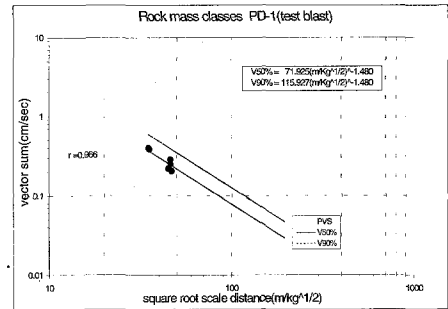


Fig. 3 Relationship between scale distance and vector sum(test blast)

4.2. 막장 암반의 평가

기존 설계에서는 앞에서 기술한 바와 같이 시추 결과 얻어진 코어를 대상으로 R.M.R 평가 기준에 제시된 5개의 평가 항목을 정량적으로 구한 것이다. 이는 절리의 간격 및 상태, 지하수의 양 등은 객관적으로 평가하기 어려워 때때로 가정(假定)을 하기때문에 시공과정에서 구한 실제 막장관찰 결과와는 차이를 보이기도 한다.

암반의 역학적 성질 및 물성은 지질구조에 큰 영향을 받기 때문에 터널 막장 관찰을 통하여 지층면이나 단층면의 연장과 방향을 추정하는 외에도 암반에 발달된 절리의 방향, 균기, 풍화 및 변질의 정도를 측정하고 새로이 막장 암반의 등급을 분류하였다.

기존 설계에서 암반 등급은 Table 6과 같이 대

체로 R.M.R.을 기준할 때 PD-1, PD-2 및 PD-4로 결정되었다. 시공할 때는 각 암반 등급별로 새로운 표준 발파 패턴을 설정해 놓고 관찰된 암반 등급에 따라 적정 패턴을 선택하여 적용하는 절차를 밟았고 막장 조건이 나쁜 지점에서는 선진 보링(pilot boring)을 실시하기도 하였다.

특수지역인 본 공사 발파시 총 193개소 막장을 관찰하여 얻어진 결과를 요약하면 Table 6과 같다.

실제 관찰 결과는 기존 설계에서의 평가시 보다 더 우수한 것으로 판정되어 수정, 보완하였다. 즉, 기존의 PD-2 및 PD-4 암반 등급 구간 중 일부가 PD-1 및 PD-3 등급으로 수정되었다.

특히, 막장 관찰시 막장 좌측 높이가 기준선에서 막장 우측벽까지 줄자를 연장시켜 절리면의 간격, 균열의 크기 등을 기재하였는데 발파로 인한 균열과 막장의 절리면은 색상, 거칠기, 절리면의 풍화정도, 분리성 등을 고려하여 식별하였다.

Table 6 Rock mass classes at particular condition areas

Rock mass classes	Design stage	
	Range	Length(m)
PD-1	19K+029.0~19K+060.0	31.0
PD-2	19K+060.0~19K+200.0	140.0
PD-3	-	-
PD-4	19K+200.0~19K+440.0	240.0
Total		411.0
Excavation stage		
PD-1	19K+029.0~19K+181.5	152.5
PD-2	19K+181.5~19K+235.5	54.0
PD-3	19K+235.5~19K+440.0	204.5
PD-4	-	-
Total		411.0

4.3. 진동 허용기준치를 고려한 발파패턴설계

일반적으로 발파진동은 장약량을 감소할수록 적어진다. 그러나, 암반을 충분히 파쇄하기 위해서 필요한 폭약량을 감소시키면 발파효과가 줄어든다. 따라서, 파쇄효과를 충분히 얻기 위해서 발파방법 또는 진동 감소 방안에 대한 대책이 요구 된다.

발파로 인한 진동의 크기를 감소하는 방안으로는 크게 두 가지 방법을 들 수 있다. 첫째, 발파원에서 진동발생을 억제하는 방법과 둘째, 진파하는 진동을 차단하는 방법이 있는데 본 연구에서는 지형 특성상 첫째 방안 중의 하나인 다단식 발파공법[6]을 채택하였다. 아울러, 시험발파 결과 등을 종합하여 새로이 발파 패턴을 설계하였다.

4.3.1 다단식 발파공법

발파로 인한 지반 진동을 감소시키기 위한 방안

의 하나로 다단식 발파기에 의한 시차 조정을 하였다. 다단식 발파기란 폭약을 기폭시키는 시간차를 발파기로 조정함으로써 지발 효과를 얻는 것이다. 현재 우리나라에서는 지발보관으로 밀리세컨트(milli second) 뇌관과 데시세컨트(decy second) 뇌관이 생산, 판매되고 있으나 그 단차가 각각 20여 개에 불과하기 때문에 한 막장의 천공수가 40공을 초과하는 경우 지발당 뇌관수의 증가가 불가피하고 이에 따라 지발당 장약량이 커지므로 진동이 크게 된다. 반대로 지발당 뇌관수를 감소시킬 때에는 분할(分割)발파가 불가피하므로 이로 인한 작업의 지연, 위험도의 증가 등 현장에서 분할발파의 채택을 기피하는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 다단식 발파기의 기계적 작동에 의해 시간차를 조정하여 진동을 최소화하였는데 이때 사용한 다단식 발파기는 미국 Research Energy of Ohio Co. 제품의 BM175-10PT 규격이다.

4.3.2 암종별 발파 패턴설계

새로운 발파패턴을 설계하기 위해서는 각각의 대상물에 진동의 영향을 미치지 않는 즉, 진동허용범위 내에서 지발당 최대 장약량을 구하여야 한다.

본 연구에서는 평방근 환산거리의 상관관계가 높게 나타났으므로 장약치수 b는 평방근 환산거리를, 그리고 신뢰도는 90%를 택하여 임피상수 K, n 값을 구하였다. 즉, Table 6 에서 채택한 세 가지 암반 등급별 진동추정식은 다음과 같다.

$$v_{90\%} = 115.927 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.480} \text{ at PD-1} \dots \dots \dots (10)$$

$$v_{90\%} = 70.548 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.448} \text{ at PD-2} \dots \dots \dots (11)$$

$$v_{90\%} = 52.334 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.362} \text{ at PD-3} \dots \dots \dots (12)$$

여기서 지발당 최대 장약량(W)은 각 대상물별로 설정된 진동허용치 Table 4의 값과 폭원에서 대상물까지 최단거리(D) 즉, Table 2 의 값을 대입하여 구하면 그 결과는 Table 7에 제시한 바와 같다. 지발당 최대장약량은 Table 7에 제시된 값을 초과하지 않은 범위 내에서 천공조건 즉, 공경·천공장·단면적·저항선·공간격 등을 경험식과 참고자료 등[2]을 종합하여 새로운 발파패턴을 설계하였다. 그 결과 중 한 예를 들면 Fig.4와 같다.

특히, 본 연구에서는 다단식 발파기에 의한 기폭시차를 조정하였는데 이들은 서로 20ms의 지연시차를 갖도록 설계된 것이다.

4.4. 발파진동의 계측

암반 등급별로 제시된 발파패턴을 적용하여 발파를 실시하면서 그 때 그 때 진동을 계측하고, 그 결과를 분석한 자료는 Table 8과 같다. 여기에는 지발당 최대장약량, 폭원에서 측정점까지의 거리, 그

리고 진동속도를 벡터합으로 환산한 값을 반영하고 있다.

4.5. 터널 내 변위계측 및 주변시설물 점검

발파작업시 지반진동이 터널굴착 주변암반의 거동 및 주변 시설물에 미치는 영향을 확인하기 위하여 터널 내에서 몇 가지 계측을 실시하였고 주택에서는 균열의 확대 여부를 점검하였다.

4.5.1 변위 및 침하계측

터널 시공 중 여러 가지 계측을 실시하고 그 결과를 복합적으로 판단하여 시간에 따른 터널 주변 암반의 이완영역 등 거동을 파악하는 일은 안정성을 평가하는데 대단히 중요하다.

터널의 계측은 시행목적에 따라 시공중 공사의 안정성 및 적합성을 확인하는 일상관리계측(계측 A)과 설계의 타당성을 판단하고 앞으로 시공될 구간의 안전성을 추정할 수 있는 대표 위치에서의 계측(계측B)으로 구분할 수 있는데 본 연구에서는

발파로 노출된 2차 지압의 시간이력 변화 추이와 암반의 이완영역을 확인하기 위하여 A, B 계측

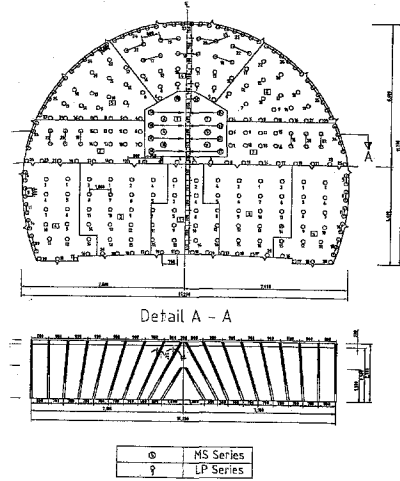


Fig.4 Drilling and ignition for pattern design 1 by sequential blast

Table 7 Maximum charge weight per delays and distance(test blast)

Structure site	Station	Distance (m)	Allowable Vibration value (cm/sec)	Charge per delays(kg)		
				PD-1	PD-2	PD-3
Highway concrete	19K+090	47.1	1.0	3.609	-	-
Gas pipe	19K+247	33.0	0.5	-	1.170	-
Water pipe	19K+256	32.5	0.5	-	1.135	-
Automatic control system machine	19K+300	52.3	0.3	-	-	1.395
Housing building	19K+435	45.3	0.5	-	2.205	-

중 내공변위측정, 지중변위측정, 지중침하 측정을 실시하였다.

계측기 위치는 시공지침에 의해 일정한 간격으로 설치하였으며, 이 때 터널 주변암반의 변위

Table 8 Vibration constants for various rock mass classes at 90% confidence lines

Rock mass classes	Square root scaled distance			cubic root scaled distance		
	K	-n	r	K	-n	r
PD-1	167.118	1.594	0.970	196.584	1.594	0.971
PD-2	114.965	1.582	0.951	116.668	1.583	0.941
PD-3	45.549	1.353	0.974	36.582	1.332	0.972

량을 상호 비교하기 위하여 측정항목은 동일단면 상에 설치하였다. 지중 침하의 경우에는 막장과의 거리가 2D 즉, 30m이상 전방거리에 미리 설치하여 굴착 전, 후의 터널 주변 암반의 이완 영역을 판단하였다. 계측빈도는 일반적으로 변위속도와 응력의 변화는 굴착직 후 크게 나타나지만 시간이 어느 정도 경과하고 막장과의 거리가 멀어짐에 따라 변화정도가 떨어지기 때문에 계측초기 1주일만 매일, 그 이후에는 2회/주, 1회/주 등으로 조정하여 68~97일간 시간이력에 따른 변위량을 얻었다. STA.19K+255지점에서 계측한 내공변위, 지중변위, 지중침하 결과를 보여준 몇가지 예를 들면 Fig.5 ~ Fig.7과 같다.

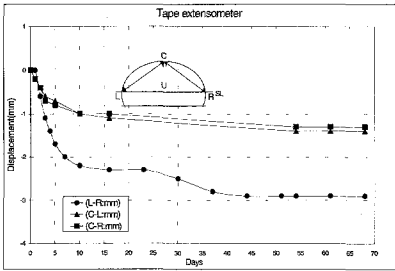


Fig.5 Convergence measured by tape extensometer

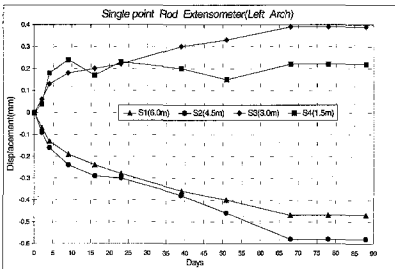


Fig.6 Convergence measured by single point extensometer

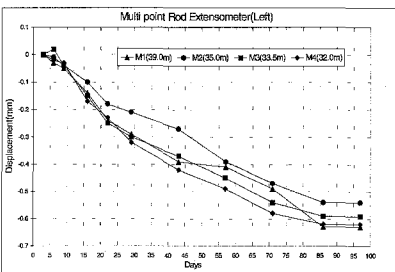


Fig.7 Convergence measured by multi point extensometer

4.5.2 주변시설물 점검

주변 대상물 중 주거지역인 주택 등 건축물은 발파로 인한 지반진동으로 인하여 이미 발생된 기존 균열들이 진행하여 피해를 동반하거나 민원발생의 분쟁을 가져올 수 있으므로 건축물의 균열발생에 따른 성능저하 상태를 조사하고 벽면의 균열의 크기를 측정하여 발파진동에 따른 영향을 조사하였다.

가장 가까운 거리에 위치하는 주택을 선정하여 기준점을 3개소에 설치하고 3일 후부터 총 81일 동안 크랙계이지를 이용하여 20회 측정하였는데 이때 구한 변위량은 Fig.8과 같다. 이 주택은 지상 1층 조적조의 구조형식이며, 10년 이상 노후화 된

건축물이다. 균열형태는 수직균열이 우세하며, 그 너비가 0.1~11.0mm의 기존 균열을 갖고 있다.

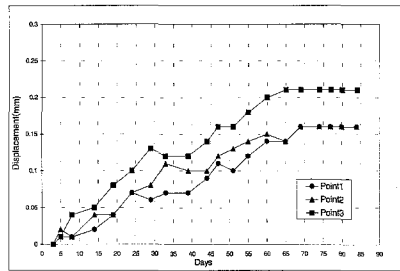


Fig.8 Displacement measured by crack gauge

5. 결과 및 해석

특수구간의 시공에 앞서 새로이 발파패턴을 설계하고 이에 따라 안전 시공을 위해 매 발파 때마다 진동의 계측은 물론, 터널 내에서 변위와 주력 벽면에서 균열을 계측하였다.

5.1. 발파진동 결과분석

암반등급 PD-1의 경우 장약량 1.75~1.875 kg/delays를 사용하여 47.1~126.4m 떨어진 지점에서 진동을 계측한 결과는 0.0699~0.445cm/sec이고 PD-2의 경우 1.0~1.125 kg/delays 사용시 40.8~73.8m 범위에서 0.0897~0.245 cm/sec, PD-3의 경우 0.50~0.5625 kg/delays 사용시 32.1~77.2m 범위에서 0.0506~0.202 cm/sec로 계측되었다. 이들 상관관계는 완전히 일치하지는 않지만 대체로 유사한 경향을 보인다.

특수구간을 시공할 때 주요 대상구조물에 작용한 진동의 크기를 일부 지점에서는 직접 계측할 수 없었다. 즉, 고속도로 콘크리트·주력 및 공작 기계가 위치한 지점에서는 직접 계측하였으나 가스배관 및 상수도관은 지중(地中)에 매설되어 있기 때문이다. 따라서, 후자의 경우에는 실제 굴착시 구해진 진동추정식에 거리와 지발당 장약량을 대입하여 그 크기를 추정하였다. 이 때, 특수구간 시공시 계측결과 해석에 따른 진동추정식도 시험발파 결과와 동일하게 장약지수 b는 평방근 환산거리를, 그리고 신뢰도는 90%를 택하였다.

Table 9에 제시된 값은 주요대상물별 진동 허용진동치에 비하여 훨씬 적은 값을 나타내고 있는데 그 이유는 시험발파 결과, 신뢰도 90%를 적용한 진동추정식을 이용하여 설계하였기 때문이다. 만일 신뢰도를 50%로 설정하고 그에 따라 발파를 실시했다면 진동허용치와 실측치 사이의 차이는 훨씬 감소되었을 것이다. 가스배관 상수도관은 실제 대상물에서 측정하였다 하더라도 추정치와 큰 차이는 없었을 것으로 판단된다.

Table 9 Vibration level monitored at some structures

Structures considered	Allowable vibration values (cm/sec)	Distance (m)	Charge per delays (kg)	Actual and assumed values (cm/sec)
Highway concrete	1.0	47.1 ~ 47.5	1.875	0.313 ~ 0.445
Gas pipe Water pipe	0.5	34.9 38.4	1.125	*0.457 *0.393
Housing building	0.5	40.0 ~ 45.3	0.5625	0.137 ~ 0.141
Automatic control system machine	0.3	46.0 ~ 50.4		0.100 ~ 0.121
Remarks	* assumed value			

5.2. 암반등급별 진동상수

본 연구 대상 구역은 서로 다른 3종류의 암반등급으로 분류된다. 이와 같이 암반등급만이 달라질 때 입지상수 K, n값이 어떻게 변화하는지를 검토하였다.

PD-1, PD-2, PD-3 등급에서 얻어진 진동추정식 중 K, n값만을 기준하여 분석하면 다음과 같다. 즉 암반등급이 경암에서 연암으로 변화해 갈 때 이들은 모두 감소 경향을 보인다. 상대적인 크기를 비교하기 위하여 거리를 50m, 장약량을 1.875 kg/delays로 고정하고 진동추정식에 대입해 보면 그 때, 진동의 크기가 각각 0.540, 0.386, 0.350 cm/sec로 구해진다. 즉, PD-1의 경우 진동의 크기를 1로 하였을 때 PD-2는 0.72, PD-3는 0.65로 변화함을 알 수 있다. 따라서, 암반등급에 따라 진동의 크기는 달라지므로 앞으로 이에 대한 상세한 연구가 요구된다.

5.3. 변위의 계측결과 및 해석

본 구간에서는 내공변위, 지중변위, 지중침하량을 측정하였는데 먼저 Fig.5에서 가장 큰 값을 보이는 수평방향의 내공변위(L-R)는 응력이 개방된 후 10일까지 변위속도가 0.23mm/일로 급격히 증가하고 이후 23일까지는 0.075mm/일로 서서히 줄어들기 시작하여 44일째 이후에는 전체적으로 2.90mm의 변위로 수렴되어 안정상태를 보이고 있다.

천반과 좌측(C-L), 천반과 우측(C-R) 사이의 최대 변위는 70여일 동안 1.3~1.4mm인데 비하여 좌, 우 수평변위(L-R)는 2.9mm의 값을 보인 이유는 천반의 침하보다는 수평변위가 크게 일어났음을 알 수 있다. 내공변위의 관리기준은 국내의 경우 확정된 값이 없으므로 Franklin(1976)의 연구결

과, 오스트리아 Alberg 터널기준, 일본국철의 관리기준 등[7]과 비교할 때 본 연구대상 구간의 NATM 터널은 매우 안정한 것으로 판단된다.

Fig.6의 지중변위 계측치는 각 측정점(1.5m, 3.0m, 4.5m, 6.0m)영역에서 68일 쯤까지 0.01~0.045 mm/day 변위 속도를 보이고 있는데 좌측 아치부에서 4.5m, 천반부에서 3.0m, 우측 아치부에서 6.0m까지가 주변암반의 이완대로 볼 수 있으나 0.50~0.58 mm를 최대 변위 값으로 보아 암반의 이완영역은 매우 적을 것으로 생각된다. 68일 이후 수렴되어 안정상태를 보이고 있으며, 변위 양상도 내공변위와 매우 유사한 시기로 보인다.

Fig.7과 같이 지표에서 측정된 터널 주변암반의 침하 정도는 내공변위량의 2/10 수준인 0.59~0.67 mm정도에 지나지 않았고 86일 쯤 이후 수렴되어 안정상태를 보이고 있다. 이상의 변위 계측결과와 국제적으로 인용되는 관리기준치를 서로 비교해 볼 때 NATM 터널 굴착시 주변 암반의 거동은 안정상태에 놓인 것으로 판단된다.

발파진동으로 인한 국내의 건축물이나 시설물에 대한 균열 허용 기준은 아직까지 없는 실정이다. 따라서, 대부분 국내에서는 주로 미국 콘크리트학회의 균열폭 산정식인 Gergely-Lutz식[8]을 채택하여 구한 Table 10의 값을 기준으로 하고 있다.

Table 10 Maximum allowable crack displacement(ACI)(8)

Exposure condition	Tolerable crack width(mm)
Dry air or protective membrane	0.41
Humidity, moist air, soil	0.30
Deicing chemicals	0.18
Seawater and seawater spray ; wetting and drying	0.15
Water-retaining structures (excluding nonpressure pipes)	0.10

주변 대상물 중 주거지역인 주택 벽면의 3개소에서 균열의 크기를 측정된 결과는 80여일 동안 최대 0.21 mm였고 62일 쯤 이후 수렴되어 안정상태를 보였다. 이는 미국 ACI의 건조한 외기조건으로 분류된 항목의 최대 균열 허용폭인 0.41mm보다 0.20~0.21mm 작은 값을 알 수 있다. 본 건축물은 불안정한 구조상태에서 발파작업이 이루어졌고 진동 허용기준치를 초과하지 않더라도 경과일에 따른 변위량은 증가할 수도 있다. 본 건축물 부근에서 0.137~0.141 cm/sec 범위의 진동으로 인한 새로운 균열발생과 이미 발생된 균열의 변위 속도를 증가시키는 영향은 매우 희박할 것으로 생

각된다.

자동제어시스템 동작기계는 측정기기의 센서를 밀착시켜 진동을 측정하고 정밀기기의 편차 및 오작동을 주기적으로 육안 관찰하였는데 진동수준 0.100~0.121 cm/sec 범위에서 정밀기기의 이상 현상은 발견되지 않았다.

6. 결 론

서울-부산간 경부고속철도 제 1-2공구는 기존 설계에서 NATM으로 시공하도록 계획되어 있었다. 터널 굴착구간 상부로는 4차선 서울-안산간 고속도로, 24인치 경인 주 가스배관, 직경 ϕ 1.100 m의 주철관으로 된 광역 상수도관이 통과하는데 발파지점과 최단거리는 각각 47.1, 33.0, 32.5m 이격되어 있다. 자동제어로 운전되는 공장의 기계는 52.3m, 주택은 45.3m 떨어져 있는 조건이다. 따라서, 이 구간을 안전하고 효율적으로 굴착하기 위하여 발파 진동 허용치를 재검토하고 시험발파 및 그 결과를 기초로 하여 발파패턴을 새로이 설계하였다. 아울러 새로운 패턴에 의해 발파를 실시하면서 진동 제어는 물론, 터널 내 변위의 계측과 주택벽면의 균열을 관찰, 조사하고 이들을 허용기준치 범위 내로 관리함으로써 안전시공을 수행할 수 있었다. 이 과정에서 중요한 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구 대상지역에서 진동허용치는 고속도로 콘크리트 1.0 cm/sec, 경인 주 가스배관·광역상수도관 및 주택에서 0.5 cm/sec, 자동제어시스템에 의해 운전되는 동작기계를 0.3 cm/sec이하로 설정하였다.
2. 세 가지 암반등급에 대하여 총 56회의 시험 발파를 실시하고 각각 90 % 신뢰도를 갖는 진동식을 추정하였는데 $b = \frac{1}{2}$ 일 때 K 및 -n은 각각 115.927, 70.548, 52.334와 1.480, 1.448, 1.362였다.
3. 진동허용치, 시험발파 결과를 종합하여 새로이 발파 패턴을 설계하였다. 또한, 진동의 크기를 감소시키기 위하여 다단식 발파기를 채택하여 시차 조정을 하였는데 이 때, 암반 등급별 지발당 장약량은 다음과 같이 조정하였다.

Table. 11 Max charge weight per Rock classes

Rock mass classes	Design pattern (kg/delays)	Excavation pattern (kg/delays)	Remarks
PD-1	3.50	1.875	upper (center hole)
PD-2	3.00	1.125	
PD-3	2.50	0.5625	
PD-4	1.75	-	

4. 터널 주변 암반의 거동을 검토하기 위하여

여러 가지 계측 방법 중 내공변위, 지중변위 및 지중침하를 계측하였다. 천반과 좌측(C-L), 천반과 우측(C-R) 사이의 최대 변위는 70여일 동안 1.3~1.4mm인데 비하여 좌, 우 수평변위(L-R)는 2.9mm의 값을 보인 이유는 천반의 침하보다는 수평변위가 크게 일어났음을 알 수 있었다. 지중변위는 68일 동안 최대 0.50~0.58mm, 지중침하량은 최대 0.59~0.67mm이다. 이들 계측결과 관리기준치를 비교할 때 안전한 값으로 판단된다.

5. 특수구간 내에 위치한 주택에서 시공 중 계측된 진동 실측치와 진동허용치는 Table 10과 같다. 진동허용치에 비하여 실측치가 적은 값을 보이고 있다. 이와 같이 상대적으로 그 차이가 큰 것은 시험발파 결과, 신뢰도 90%를 적용한 진동추정식을 이용하여 설계하였기 때문이다.

참 고 문 헌

- [1] 임한옥, 김용수, 이경운 외, "도심지 발파에서의 지반진동 측정에 관한 연구", 서울지하철 공사, pp.97-106, 1983.
- [2] 김용수, 민경원, "적정장약량 산정과 표준발파 설계에 관한 연구", 대한광산학회지, vol.18, pp.18-26, 1981.
- [3] 김형도, 임한옥, 이태노, "수개 인접암반 굴착에 따른 구조물의 안정성 평가에 관한 연구", 한국암반공학회지, pp.208~220, 1997.
- [4] 이정인, 임한옥, "발파진동에 의한 구조물 상호 영향 평가 성과 보고서", 한국석유개발공사, pp. 19~20, 1990.
- [5] Charles H. Dowding, "Blast Vibration Monitoring and Control", Prentice Hall, Englewood Cliffs, U.S.A., pp.10~12, 1985.
- [6] 조영동, 이상은, 임한옥, "터널굴착에서 다단식 발파기에 의한 전단면 발파의 적용성 연구", 한국암반역학회지, vol.4, pp.132-143, 1994.
- [7] 서영호, "연약 암반에 굴착되는 NATM터널의 변형거동과 보강설계", 서울대학교 공학박사 학위논문, pp.21~35, 1993.
- [8] "콘크리트 구조물의 균열", 한국 콘크리트 학회, pp.13~25, 1997.