

Jul. 2012

시 험 발 파 결 과 보 고 서

용마터널건설 민간투자시설사업 건설공사중 지하철도공사

2012년 07월

삼대양개발(주)

- 제출문 -

삼대양개발(주) 귀중

귀사에서 의뢰하신 「용마터널건설 민간투자시설사업 건설공사 중 지하차도공사」 현장의 암 굴착과 관련하여 해당지역은 발파작업으로 수반되는 지반진동 및 폭풍압, 비석의 공해요인이 주변대상물에 피해를 가져올 수 있기 때문에 안전시공이 이루어질 수 있도록 이에 따른 시험발파 기술용역 과업을 성실히 수행 하고 그 성과를 「시험발파 결과 보고서」로 제출합니다.

2012년 07월

 **근원이엔지기술사사무소**

서울 금천구 시흥3동 시흥유통상가24동319호

TEL : (02) 896-4910 FAX : (02) 896-4911

대표·화약류관리기술사 **김재홍**



1. 서론

1.1. 과업의 목적

『용마터널건설 민간투자시설사업 건설공사 중 지하차도공사』암 굴착과 관련하여 본 대상 지역은 발파작업이 불가피한 실정이고, 발파 굴착작업으로 인한 지반진동(Ground Vibration) 과 소음 및 비산 으로 인한 공해 요인이 주변 보안물건(아파트, 주택, 상가)에 피해를 주지 않는 수준에서 안전시공이 이루어질 수 있도록 시험발파를 실시하고 계측 결과해석으로 본 발파에 대한 발파조건을 검토하는데 목적을 두었다.

1.2. 공사개요

- ▣ 공 사 명 : 용마터널건설 민간투자시설사업 건설공사 중 지하차도공사
- ▣ 공 사 위 치 : 서울시 중랑구 면목7동 1084-9 일원
- ▣ 발 주 처 : 용마터널주식회사
- ▣ 감 리 사 : 제일엔지니어링(주), (주)경동엔지니어링
- ▣ 시 공 사 : SK건설(주)외 4개사
- ▣ 협 력 업 체 : 삼대양개발(주)

1.3. 과업내용

- ① 작업 현장의 암반의 상태. 지질 상태를 파악하고 효율적인 공 간격, 최소저항선, 천공 심도 등을 고려하여 시험발파 계획서 작성
- ② 시험발파에 따른 발파진동, 소음계측 및 결과를 분석하여 그 결과 치를 분석하고 평가서 작성

- ③ 회귀 분석하여 발파 작업 시 보안물건에 피해가 가지 않고 안전시공이 될 수 있도록 해당 지역 발파 진동 기준치를 설정
- ④ 발파 시 발생할 비산의 발생원인을 사전에 분석하고 그에 따른 방지대책 수립
- ⑤ 발파작업 시 인근에 피해가 발생되지 않는 안정성 검토와 시험발파 결과 보고서 제출

1.4. 주변현황 및 위치도

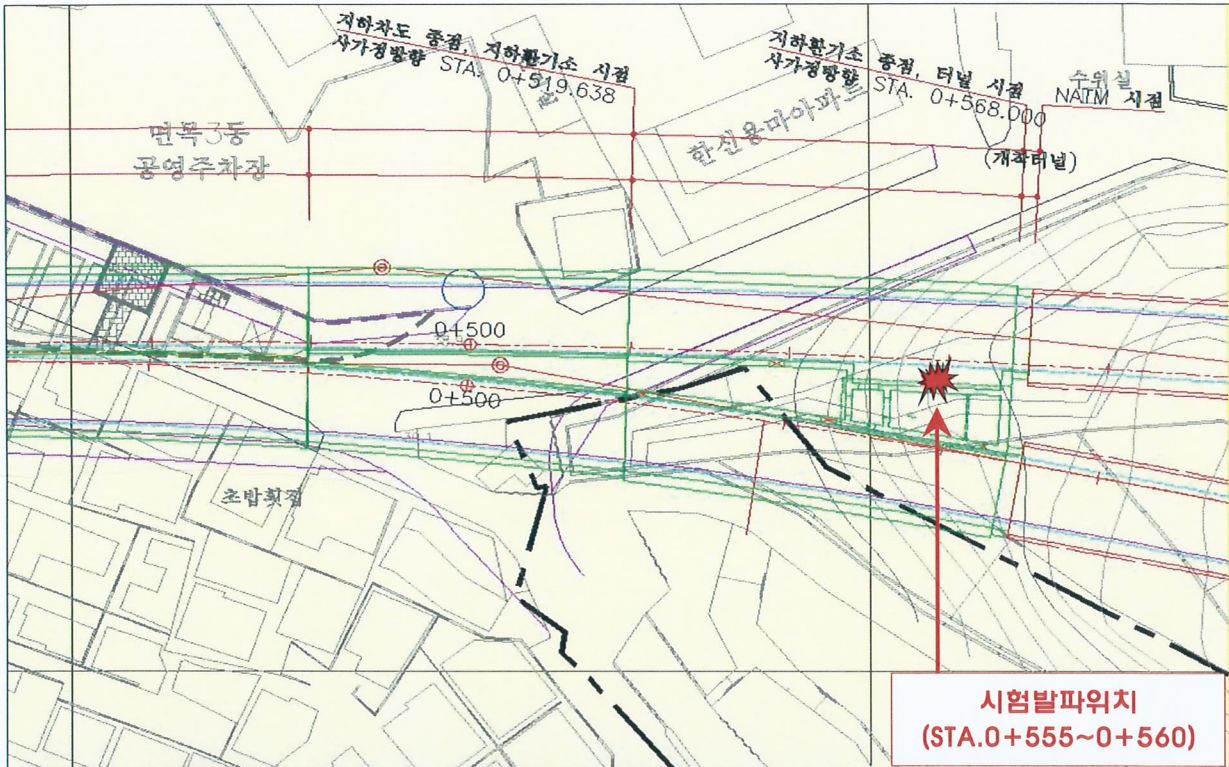
『용마터널건설 민간투자시설사업 건설공사 중 지하차도공사』 시험발파 지역의 행정구역은 서울시 중랑구 면목7동 1084-9 일원에 속하며 시험발파 위치로부터 최근거리에 아파트, 주택, 상가가 위치하고 있어 발파작업 중 발생하는 진동, 소음, 비산으로 인한 피해가 발생할 수 있다. 그 이격거리는 (Table 1.1)과 같고 주변 현황 및 위치는 (Fig. 1.1) 과 같다.

(Table 1.1) 시험발파지점과 대상물간 최소이격거리

주변대상물의 종류	시험발파지점과 대상물간 거리(m)	비고
아파트	약 32 이상	한신아파트
주택	약 64 이상	사가정로72길12
상가	약 70 이상	면목7동1085-5(콩나물국밥)

PLAN VIEW

Scale : NONE



(Fig.1.1) 시험발파 위치

1.5. 발파작업장소의 주변상황



현장전경



주변전경(한신아파트)



상가

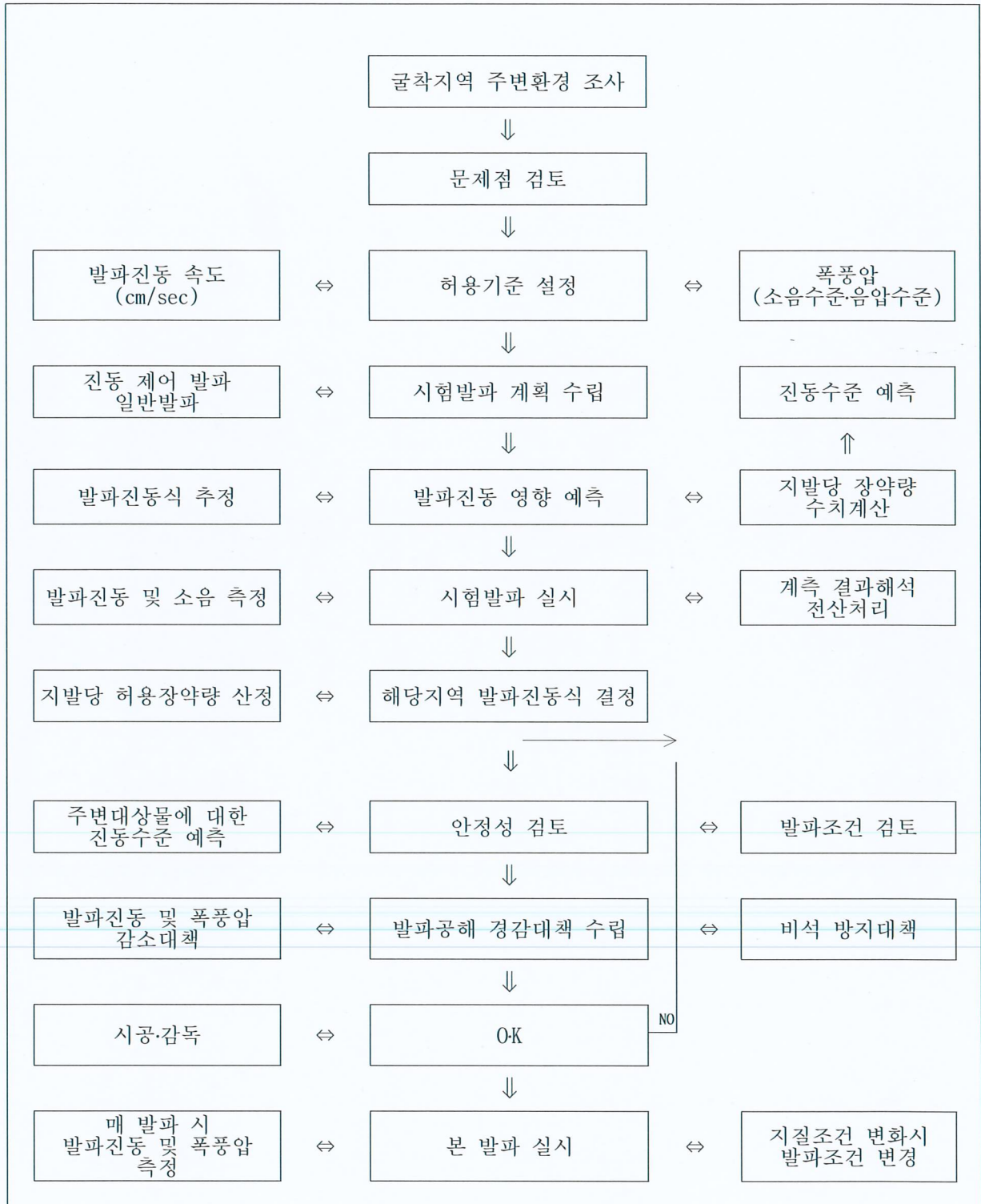


주택(사가정로72길12)

발파 지역으로부터 가까운 한신아파트, 상가, 일반주택들이 굴착경계선에서 15m이상의 거리에 위치하고 건물은 철근콘크리트 구조와 조적건물로 이루어져 있다.

2. 발파수행 흐름절차

발파 수행 흐름도는 (Fig.2.1)과 같다.



(Fig.2.1) 발파수행 흐름도

3. 발파진동의 이론적 고찰

3.1. 개요

발파작업이란 화약류를 사용하여 작업하는 모든 것을 말한다. 화약류를 사용할 때 발생하는 진동 및 폭풍압. 그리고 비석의 비산인 발파공해가 나타날 수 있다. 따라서 발파작업에 따르는 안전과 발파공해는 무시 할 수 없다.

발파진동은 발파에 따른 진동파가 구조물, 인체에 대하여 미치는 영향이 문제로 되는 것이며 발파 풍압은 발파작업에 따라 발생하는 흔들림의 문제란 점에서 발파진동과 비슷하다고 하지만 인간의 심리적인 것이 강하고 발파시 암석의 비산은 거의 인재라고 보는 관점이 많다. 이는 발파계획을 정확히 수립하고 작업에 임한다면 충분히 억제시킬 수 있다

3.2. 발파진동의 특성

폭약이 장약공 내에서 폭발하면 강력한 충격압과 가스압·고온이 발생되는데 충격압과 고온에 의해 암반이 녹거나 파쇄되고 특히, 충격압에 의한 충격파(Shock wave)의 전달로 파쇄대 이후 균열대를 형성하여 암반의 파괴영역이 확대된다.

이와 같이 3차원으로 전달되는 충격파(Shock wave)는 발생하는 총 에너지 중에서 0.5~20% 정도가 탄성파로 변환되어 암반을 통해 전파 되면서 진폭과 주기를 갖는 지반진동을 일으키는데 이 때 생성된 탄성파는 지반 위의 주변구조물·시설물 등에 피해를 줄 수도 있다.

발파로 인한 지반진동은 일반적으로 변위(Particle displacement), 진동속도(Particle velocity), 진동가속도(Particle acceleration)의 3 가지 형태와 진동주파수(Frequency wave)로 표시되며, 전형적인 발파진동의 형태를 일정한 주기의 단순 정현 진동(단순 조화

진동(Simple harmonic motion)으로 가정 할 경우 최대 진폭에서의 변위, 진동속도, 진동가속도 사이에는 식(3.1)~식(3.4)의 관계가 성립한다.

$$\mu = \mu_o \sin(\omega t + \Theta) ; \quad \dot{\mu} = \int \ddot{\mu} dx \dots\dots\dots \text{식(3.1)}$$

$$\dot{\mu} = \frac{d\mu}{dt} = \omega_o \sin\left(\omega t + \Theta + \frac{\pi}{2}\right) ; \quad \ddot{\mu} = \int \dddot{\mu} dx \dots\dots\dots \text{식(3.2)}$$

$$\ddot{\mu} = \frac{d\dot{\mu}}{dt} = \frac{d^2\mu}{dt^2} = \omega^2 \mu_o \sin(\omega t + \Theta + \pi) \dots\dots\dots \text{식(3.3)}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi\left(\frac{1}{T}\right) \dots\dots\dots \text{식(3.4)}$$

- μ, μ_o, Θ : 변위 및 최대변위(mm), 위상각(rad)
- $\dot{\mu}, \ddot{\mu}$: 입자속도(mm/sec·cm/sec·kine) 및 가속도(gal·cm/sec²)
- t, ω : 시간(sec) 및 원진동수(각속도¹⁾·Angular velocity·rad/sec
- f, T : 주파수²⁾(진동수·Frequency·Hz·cycle/sec) 및 주기(sec)³⁾

발파진동의 특성과 관련된 대부분 상황에서 최대 입자운동의 절대치⁴⁾가 중요하므로 $\mu_{\max} = \mu_o, \quad \dot{\mu}_{\max} = v, \quad \ddot{\mu}_{\max} = a$ 일 때 식(3.5), 식(3.6)과 같이 절대치로 나타낼 수 있으며, 이들 상호간에는 함수관계가 있어 진동주파수(Frequency wave)를 알고 sine파⁵⁾ 근사치의 단순 정현 진동이든 최대 입자 속도의 변수를 쉽게 구할 수 있다.

$$v = \omega \mu_o = 2\pi f \mu_o ; \quad \mu_o = \frac{v}{2\pi f} \dots\dots\dots \text{식(3.5)}$$

$$a = \omega^2 \mu_o = (2\pi f)^2 \mu_o = 2\pi f v ; \quad v = \frac{a}{2\pi f} \dots\dots\dots \text{식(3.6)}$$

파장 λ , 탄성과 전파속도 c 와 주기 T 의 관계는 식(3.7)과 같다.

$$\lambda = cT = c\left(\frac{1}{f}\right) \dots\dots\dots \text{식(3.7)}$$

주1) 2π (rad)시간에 변위가 몇 회 동일한 상태로 되돌아 오는가를 나타내는 회수
 주2) 매 초마다 반복되는 탄성파의 cycle 수
 주3) 진동의 주기적인 운동이 반복되는데 이 때 반복되는 시간
 주4) 시간적 변화는 고려하지 않음
 주5) 전형적인 발파진동은 파형과는 관계없이 시간·거리함수에 따른 sine파로 간주

3.2.1. 지반진동 성분

발파로 인한 지반진동의 측정은 (Fig.3.1)과 같이 방향에 따라 폭원으로부터 측점을 향하는 평면상파의 진행 방향성분(Longitudinal or Radial component), 진행방향에 직교하는 수직 방향성분(Vertical component), 이들 두 방향과 직각을 이루는 접선방향 성분(Transverse component)으로 이루어지며, 이들 3 성분의 상대적 크기는 대상 암반이나 지형 및 발파에 의해 생성된 탄성파 즉, P파(압축파, 종파, Primary waves), S파(전단파·횡파, Secondary waves) 및 표면파인 Rayleigh waves 등의 상호간섭에 따라 변하고 진동 주파수는 각각 다르게 나타난다. 따라서, 3성분 각각의 단일성분⁶⁾에 대한 크기와 우월 성분의 최대치가 원하는 계측위치에서 측정될 수 있어야 한다. 이러한 탄성파의 파형(Wave forms)은 매우 복잡하여 폭원으로부터 근거리에서는 육안으로 구분되지 않고 복합파의 형태로 나타나며, 비교적 원거리에서는 전파속도가 느린 표면파가 지배적인 것으로 알려져 있다.

3.2.2. 지반진동의 크기

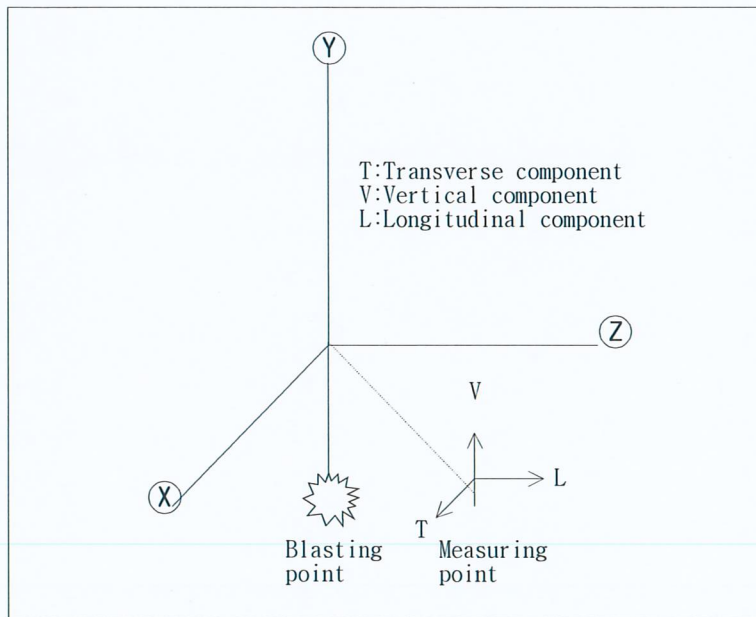
지반진동의 크기를 표시하거나 허용수준을 설정하려면 지반진동 크기를 비교할 수 있는 척도가 필요하며, 그 크기정도를 변위·진동속도·진동가속도의 3가지 형태로 표시할 수 있다. Duvall & Fogelson⁷⁾은 이의 3 가지 척도 중 구조물 피해정도를 평가하는데 진동속도가 가장 상관관계가 있음을 결론지었고 식(3.5), 식(3.6)의 성립관계를 입증하였다. 미광무국⁸⁾과 유럽, 캐나다 등에서도 구조물의 피해정도가 진동속도에 비례한다고 보고한 바 있어 발파진동의 규제기준을 진동속도로 나타내는 것이 일반적인 견해이다.

주6) Three component : Transverse component, Vertical component, Longitudinal component

주7) 1962

주8) US Bureau of mine, 1971

발파진동과 자연 지진진동의 특성을 (Table 3.1)과 같이 비교해 보면 자연지진의 경우는 1 Hz 정도 또는 그 이하의 저주파수의 파형을 보이는 반면 발파진동은 지진진동에 비해 지속시간이 비교적 짧고 주파수 범위가 수십에서 수백 Hz의 고주파인 관계로 감쇠가 쉽게 일어난다. 자연지진에서는 피해 척도를 가속도 기준으로 평가하고 있으며, 동일한 가속도에 서 주파수(Hz)의 크기에 따라 식(3.6)의 관계가 성립할 경우 구조물 평가기준인 진동속도의 크기⁹⁾는 크게 달라질 수 있다. 발파진동에 의해 영향을 받을 수 있는 구조물의 피해수준은 대상구조물과 지반조건에 따라 다양하게 나타나며, 여러 학자 및 나라에 따라 각각 다르므로 일률적으로 적용하기는 곤란하다.



(Fig.3.1) 지반진동의 3성분

주9) 가속도 : 0.07 g · 주파수 : 1 Hz일 때 $v = \frac{a}{2\pi f} = 0.07 \times \frac{980}{(2\pi \times 1\text{Hz})} = 10.9\text{cm/sec}$
 10 Hz일 때 $v = \frac{a}{2\pi f} = 0.07 \times \frac{980}{(2\pi \times 10\text{Hz})} = 1.1\text{cm/sec}$

(Table 3.1) 발파진동과 지진진동의 비교

구 분	발파진동	자연지진
진원의 깊이	지표 또는 지표 가까운 내부	지하 10 Km 이상
진동 주파수	수 10 Hz~수 100 Hz	1 Hz 정도 또는 그 이하
진동 지속시간	0.1 sec 정도 이내	10 sec 이상
진동의 파형	비교적 단순	복 잡

3.2.3. 지반진동속도 예측

발파진동의 크기를 결정하는 요소로는 입지조건과 발파조건으로 구분할 수 있는데 전자는 발파지점과 주변 구조물의 기하학적인 형태와 해당지역의 지질 및 암반상태, 지형 등에 의해 결정되는 변수(Parameter)이며, 후자는 지발당 장약량과 폭원으로부터 거리를 들 수 있는데 이들은 깊은 함수관계가 성립한다.

이와 같이 여러 학자들에 의해 발파진동의 이론적인 특성을 관련된 변수의 차원해석으로 여러 가지 경험식을 제안하였는데 가장 많이 적용되는 이론식¹⁰⁾은 식(3.8)과 같다.

$$v = K \left(\frac{D}{w^b} \right)^{-n} \dots\dots\dots \text{식(3.8)}$$

v : 지반진동 속도(mm/sec·cm/sec·kine)

D : 폭원으로부터 측정 대상물과의 거리(m)

w : 장약량(kg/delays)¹¹⁾

K, -n : 지반 조건에 의해 결정되는 입지상수

b : 장약지수(1/2 or 1/3·Square or Cube root scaled)

폭원으로부터 거리(D)와 지발당 장약량(w)의 관계는 환산거리(Scaled distance·SD)함수¹²⁾로 나타낼 수 있으며, 장약지수(b)가 실험적으로 1/2일 때 평방근 환산거리(Square root scaled distance. SRSD), 1/3일 때 입방근 환산거리(Cube root scaled distance. CRSD)

주10) Devine, 1966

주11) 동시에 기록되는 지발당 장약량을 의미

주12) $SD \propto \frac{D}{w^b}$

라 하여 이들은 차원해석(Dimension analysis)의 이론을 근거로 하고 있다. 지반 진동 속도와 환산거리는 식(3.8)과 같이 비선형(non-Linear) 관계이므로 양변을 log를 취하여 기울기(n)와 절편(log K)으로부터 식(3.9)의 선형(Linear)관계로 유도할 수 있다.

$$\log v = \log K - n \log \left(\frac{D}{w^b} \right) \dots\dots\dots \text{식(3.9)}$$

3.2.4. 주파수 대역

지금까지 구조물에 미치는 영향을 진동속도 크기만을 대상으로 하였으나 주파수 대역도 고려되어야 한다.

연구결과¹³⁾에 의하면 주파수는 0.5~200 Hz의 범위 내에 존재하며 주 주파수(또는 탁월 주파수)를 최대진동속도(Peak particle velocity)가 나타날 때 진동주파수라고 정의하면 주 주파수대역은 사용 화약량 및 폭원으로부터 측정거리와 밀접한 관계가 있으며, 발파지역의 지형·지질 조건 및 암반 내 불연속면 등에 의해서도 크게 영향을 받는다.

주 주파수 대역은 최대진동속도가 나타나는 부분의 주파수를 직접 계산하거나 진동속도와 주파수의 변화를 상대진동속도와 주파수 그래프로 도시하는 푸리에 주파수 스펙트럼 (Fast fourier spectrum)을 작성하여 가장 큰 진동속도대의 주 주파수 대역을 분석할 수 있다.

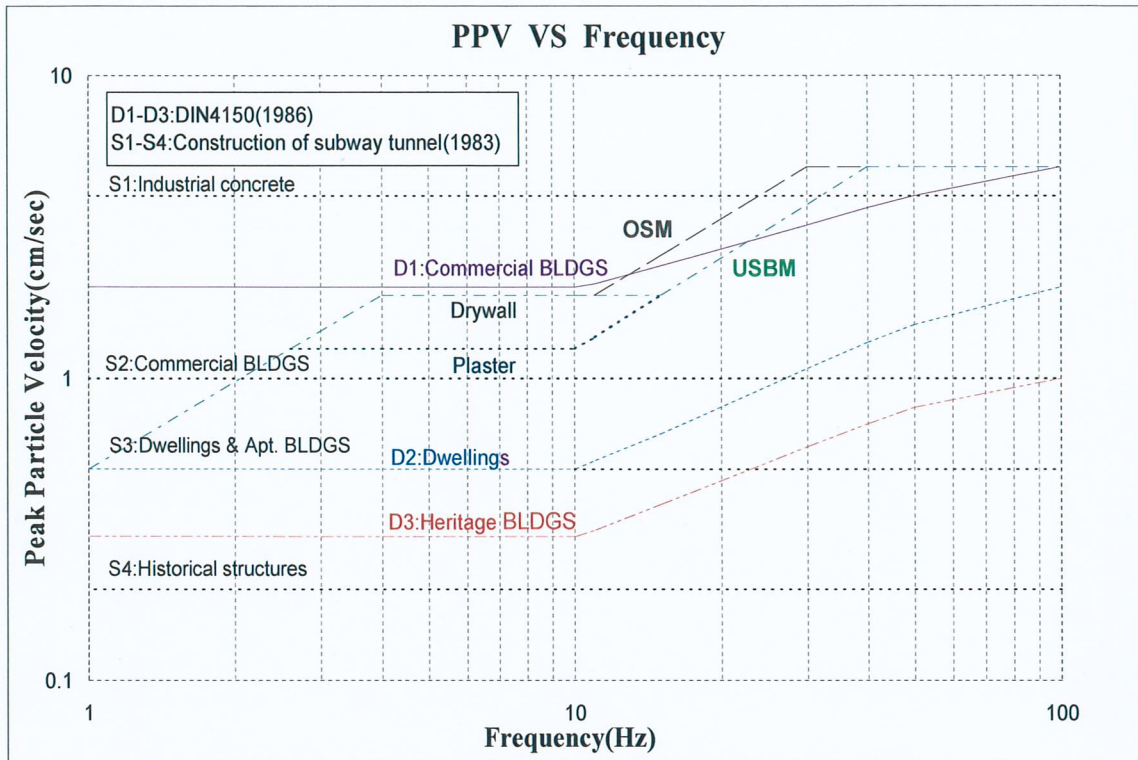
발파진동 측정을 전용으로 하는 계측기기들은 측정기기 내에 주파수 스펙트럼 분석 모듈이 내장되어 있어 짧은 시간 내에 자동으로 산정 할 수 있다.

구조물에 미치는 영향을 진동주파수에 따라 검토¹⁴⁾한 결과 40 Hz이하 저주파수대는 1.2 cm/sec 수준에서 구조물의 손상(Damage)을 가져올 수 있다고 하였으며, 미국의 노천채광

주13) Crenwelge, 1988

주14) Siskind, 1980

청15)에서는 (Fig.3.2)와 같이 피해한계를 30 Hz의 주파수 경계로 하였고 독일의 국가표준 서16))는 피해수준을 10 Hz이하, 10~50 Hz, 50~100 Hz의 주파수 경계로 하였다.



(Fig.3.2) 진동속도대 주파수 관계(미국노천채광청)

3.3. 폭풍압 특성

폭풍압(Air blast)은 발파에 의해 생성되는 공기압력파이다. 즉, 이러한 충격파(Shock wave)는 주로 폭발에너지가 파쇄되는 압괴를 통하여 공기 중으로 방출되며, 지반진동과 같은 이력으로 나타나는데 이때의 진폭은 입자속도 대신 공기압력이다.

일반적으로 폭풍압은 0.1 Hz~200 Hz 넓은 범위의 주파수로서 20 Hz 이상은 가청영역의 소음이 되며 20 Hz 이하 저주파의 영역은 들을 수 없으나 저주파의 음압에 의해 가옥등의 구조물을 진동시켜 2차적으로 가청 소음을 발생시킨다. 따라서, 저주파수를 동반한 폭풍

주 15) U.S Office of Surface Mining

주 16) DIN4150, 1986

압이 구조물 피해의 주요 원인이 되며, 폭풍압의 생성원인은 다음과 같이 4가지로 분류¹⁷⁾할 수 있다.

- ① 발파지점의 직접적인 압반 변형으로 인한 공기압력파(Air Pressure Pulse, APP)
- ② 지반진동으로 인한 반압파(Rock Pressure Pulse, RPP)
- ③ 발파공으로 방출되는 가스파(Gas Release Pulse, GRP)
- ④ 불완전 전색에 의해 분출되는 가스파(Stemming Release Pulse, SRP)

이 때, 발파에서 발생하는 저주파음의 대부분은 APP의 경우이며, GRP·SRP의 경우는 발파설계에 의해 제어할 수 있는 변수이다.

3.4. 주파수 보정회로

발파소음이란 일반적으로 발파 작업시 발생하는 소음중 인간에게 불쾌감을 주는 소음(dB(A))과 구조물의 안정성에 관계되는 저주파의 풍압(dB(L)) 두가지 모두를 일컫는다.

폭풍압의 세기는 압력의 단위(Pa, Psi) 또는 사람의 청감보정을 가한 음압수준인 데시벨(dB) 단위로 표현¹⁸⁾하는데 Pa 단위는 소리의 압력 그 자체를 가리키고 주파수에 관계없이 일정하며, 데시벨 단위는 주파수에 따른 청감 보정을 가한 단위이다.

즉, 식(3.10)에 의하여 음압(과압·Overpressure)과 음압수준 변환관계가 성립하며, 이를 도시하면 (Fig.3.3)와 같다.

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \dots\dots\dots \text{식(3.10)}$$

SPL : 음압수준(Sound pressure level·dB(L))

P : 측정된 최대음압(Pa·Psi·N/m²)

주17) Siskind, 1980
 주18) Charles H. Dowding, 1985

P_0 : 가청 최저음압(2×10^{-5} Pa· 2.9×10^{-9} Psi)

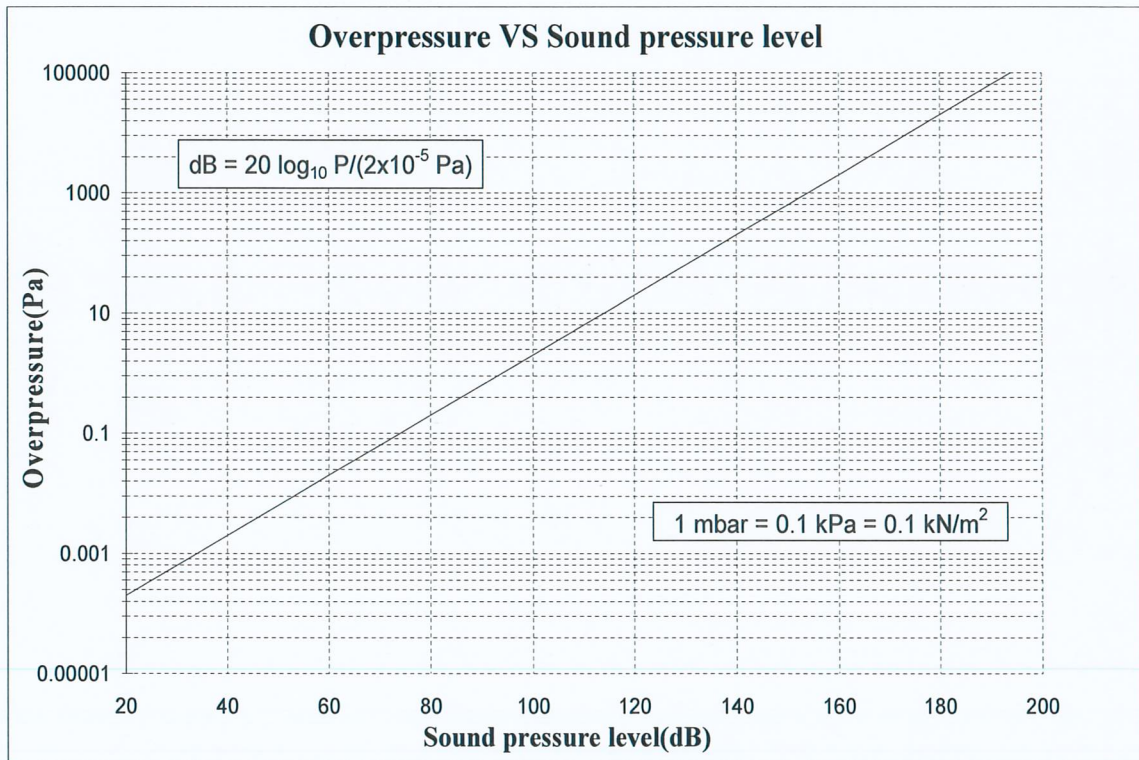
음압수준(Sound pressure level dB(L))을 소음수준(Sound level dB(A))으로 환산 할 경우 청감보정에 따른 주파수 대역별 보정치를 적용한 식(3.11)의 관계가 성립한다.

$$SL = SPL + Lr \quad \text{식(3.11)}$$

SL : 소음수준(Sound level·dB(A))

SPL : 음압수준(Sound pressure level·dB(L))

Lr : 청감보정에 따른 주파수 대역별 보정치(Table 3.2)



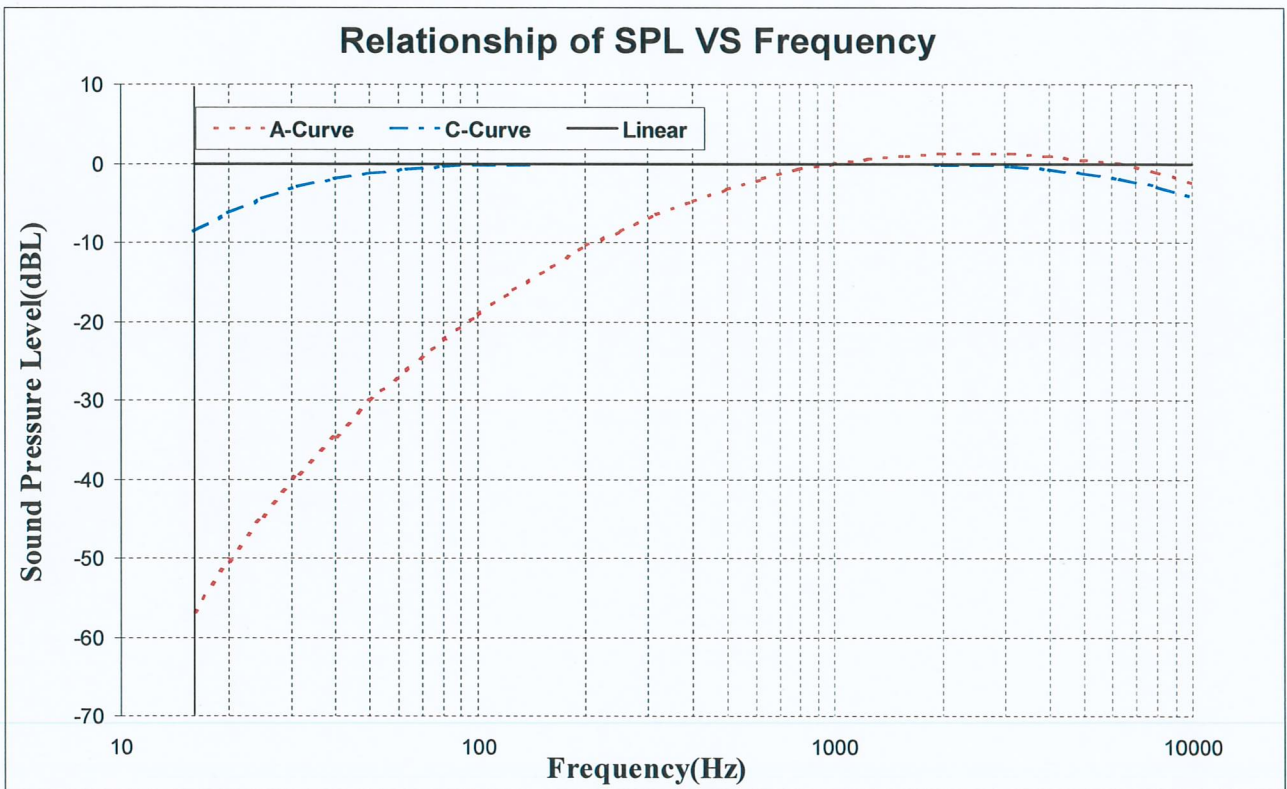
(Fig.3.3) 음압과 음압수준의 관계(Siskind 외, 1980)

일반적으로 보정회로는 (Fig.3.4)와 같이 Linear, A, C 의 3 가지가 쓰이며, 푸리에 주파수 스펙트럼(Fourier frequency spectrum)은 변환기의 응답을 나타내는데 이는 고주파수 음파와 구조물에 피해를 줄 수 있는 저주파수 파동에는 동일하게 응답하지 않음을 의미한다. 즉, 저주파를 가지는 공기압력파의 파동은 A, C 보정회로를 사용할 경우 실제 값보다

낮게 기록되는데 이는 저주파수 압력파동에 응답하지 않음을 의미한다.

그러므로, A와C 보정회로는 가청응답을 측정하는데 적합하지만 구조물의 응답과 가청범위 압력을 모두 기록하려면 선형(Linear)보정회로가 적합하다.

BlastMate Series(INSTANTEL INC./CANADA)계측기기의 경우 Linear를 선택하면 주파수에 관계없이 구조물 반응의 공기압력파(Air Pressure)를 결정하여 구조물의 손상정도를 평가한다.



(Fig.3.4) 청감 보정회로의 특성곡선

(Table 3.2) 청감보정에 따른 주파수 대역별 보정치

주파수(Hz)	A 특성(dB(A))	C 특성(dB(C))	Linear 특성(dB(L))	허용편차(dB)
16	-56.7	-8.6	0.0	+5.0 -∞
20	-50.4	-6.3	0.0	+5.0 -∞
25	-44.6	-4.5	0.0	+5.0 -∞
31.5	-39.2	-3.0	0.0	± 5.0
40	-34.5	-2.0	0.0	± 4.5
50	-30.2	-1.3	0.0	± 4.0
63	-26.1	-0.8	0.0	± 3.5
80	-22.3	-0.5	0.0	± 3.0
100	-19.1	-0.3	0.0	± 2.5
125	-16.1	-0.2	0.0	± 2.0
160	-13.2	-0.1	0.0	± 2.0
200	-10.3	0.0	0.0	± 2.0
250	-8.6	0.0	0.0	± 2.0
315	-6.5	0.0	0.0	± 2.0
400	-4.8	0.0	0.0	± 2.0
500	-3.2	0.0	0.0	± 1.0
630	-1.9	0.0	0.0	± 2.0
800	-0.8	0.0	0.0	± 2.0
1000	0.0	0.0	0.0	± 2.0
1250	0.6	0.0	0.0	± 2.0
1600	1.0	-0.1	0.0	+2.5 -2.0
2000	1.2	-0.2	0.0	+3.0 -2.5
2500	1.2	-0.3	0.0	+3.5 -3.0
3150	1.2	-0.5	0.0	+4.0 -4.5
4000	1.0	-0.8	0.0	+4.5 -4.0
5000	0.5	-1.3	0.0	+5.0 -4.5
6300	0.1	-2.0	0.0	+5.5 -5.0
8000	-1.1	-3.0	0.0	+6.0 -5.5
10000	-2.4	-4.3	0.0	+6.0 -∞
12500	-4.2	-6.0	0.0	+6.0 -∞
16000	-6.5	-8.4	0.0	+6.0 -∞
20000	-9.2	-11.1	0.0	+6.0 -∞

3.5. 발파진동과 구조물, 인체와의 관계

3.5.1. 지상구조물에 대한 진동의 영향

Duval과 Fogelson(1962)은 미광무국의 지원 아래 지상구조물의 피해에 대하여 연구한 결과, 발파시 발생하는 진동속도가 구조물의 피해 정도와 가장 깊은 상관관계를 갖는다고 결론지었으며 1971년에 미광무국에서 그때까지의 연구결과를 종합하여 건물의 피해정도를 진동속도로 나타내는 것이 가장 적합하다고 보았다.

유럽과 캐나다 등 여러 나라에서도 주파수가 수십~수백Hz의 진동에서 구조물의 피해정도는 진동속도에 비례한다고 보고 발파진동의 규제 대상으로 삼고 있다.

3.5.2. 발파진동이 인체에 미치는 영향

위의 국내, 외 허용기준들은 구조물을 피해대상으로 설정하고 있으나 생활환경에 대한 인식이 높아지고 인체에 미치는 반응정도에 관심이 고조되면서 건물에 아무런 피해가 나타나지 않더라도 인체에 대한 불쾌감·불안감·위압감 등의 정성적인 영향으로 허용기준치가 매우 엄격해지는 추세를 보이고 있다. Wiss는 발파진동속도에 따른 인체의 반응정도를 (Table 3.3)과 같이 구분하였고 Goldman은 인체의 반응정도를 진동속도와 관련하여 진동 주파수로 구분¹⁹⁾하였는데 주파수가 높을수록 견디기 힘들며, 인체의 공진주파수²⁰⁾대인 저진동 주파수에서는 인체의 반응정도가 둔감하게 나타났다. 이는 동일한 진동속도라 하더라도 주파수에 따라 반응정도가 달라짐을 알 수 있다.

(Table 3.3) 진동속도에 따른 인체의 반응(Wiss-1968)

구 분	진동속도 수준(cm/sec)
인지가능(Perceptible)	0.08~0.2
인식가능(Notable)	0.2~0.38
불편한계	0.38~0.8
심리적 교란(Disturbing)	0.8~1.3
불쾌감(Objectionable)	1.3~2.0

따라서, 주파수에 따른 구조물의 피해정도는 저주파수대에서 피해영역이 확대되는 반면, 인체에 대한 반응정도는 고주파수대에서 민감한 반응을 보여 상반된 양상이 나타나므로 민원발생에 따른 피해정도 기준을 설정하는 데는 어려움이 있으나 발파진동에 대한 구조물의 피해정도가 우선 평가되어야 한다.

주 19) 산업화학과의 발파공학, 1986, 김재극

주 20) 1~10 Hz

4. 발파진동 소음 허용기준

발파로 인한 지반진동이 구조물에 미치는 피해를 방지하기 위하여 구조물과 대상물의 용도에 따라 진동 허용 기준을 설정하였으며, 이 기준은 나라마다 또한 대상구조물에 따라 차이를 보이고 있다.

4.1. 국외 진동 허용기준

구조물의 손상 가능성 정도는 독일에서 발표한 (Table 4.1)과 같이 주파수와 구조물의 층에 따라 일시 진동으로 평가²¹⁾하였던 것을 각국에서 사용하고 있는바 독일의 진동 허용 기준치는 1971년 이후 대상구조물을 주파수 범위에 따라 구조물의 손상 대해서는 최소한 50~100 Hz 범위에 해당되는 평가기준을 적용하였고 입자속도는 직교 3축 방향의 성분을 동시에 측정한 성과 중에서 각 성분 중 가장 큰 값을 기준으로 하였다.

주21) 독일, DIN 4150-part 3, 1986

(Table 4.1) 구조물 손상 가능성 평가기준(DIN 4150)

종류	구조물의 종류	입자속도 : 단위 mm/sec ^{*2}					
		적용구분	구조물 전체				구조물 부재
		측정위치	구조물 기초 ^{*3}			구조물 최상부층 바닥평면 ^{*4}	각층 바닥 ^{*5}
		구조물 반응 주파수	10Hz 이하	10 ~ 50Hz	50 ~ ^{*1} 100Hz	주파수 복합	주파수 복합
1종	상업 / 산업용건물 ; 기타 이들과 유사한 형태로 설계된 건축물	사무실 / 공장건물	20	20 ~ 40	40 ~ 50	40	20 ^{*6}
2종	주거용 건물 ; 기타 이들과 유사한 형태로 설계 되거나 또는 주거용으로 사용되는 건축물	단독주택, 연립, 복합주택, 아파트	5	5 ~ 15	15 ~ 20	15	
3종	진동예민건축물 ; 진동에 특별히 예민하여 1종 및 2종 구조물에 대한 기준의 적용이 불가능한 구조물.액면가치로 따질 수 없는 중요구조물(예:법적보존조치가 취해진 건물)	취약구조 / 노후건물, 유문 화재 급구조물	3	3 ~ 8	8 ~ 10	8	20
비고	원본주석 *1 : 100 Hz 이상의 진동에 대해서는 최소한 (50 ~ 100Hz) 범위에 해당되는 기준치를 평가 기준으로 적용해야 함.						
원본해설	<p>*1 : 발생빈도에 있어서 피로(Fatigue)손상을 일으킬 가능성이 높거나 발생 시간간격(Interval) 측면에서 공진(Resonance)현상을 일으킬 우려가 없는 진동을 말한다. 특히, 진동햄머 및 진동기에 의한 진동 영향평가에 적용해서는 안된다. 이 경우는 본질적으로 「정상진동」의 경우에 해당될 뿐아니라 건물 각종 바닥(Floor) 및 벽체의 피로 및 공진현상을 일으킬 가능성을 배제할 수 없으므로 정상진동에 관한 기준을 적용한다.</p> <p>*2 : 직교 3축방향(수평 : XY, 수직 : Z)의 성분을 동시에 측정한 성과중에서 성분 구별없이 가장 큰 값을 기준으로 한다.</p> <p>수평성분의 어느하나(X or Y)는 건물 외곽선과 평행한 방향을 택한다.</p> <p>*3 : 지하실 최저층의 최외벽 벽체를 기준하고 벽체 하단의 기초나 벽체내부 또는 벽체의 우묵한 곳을 택한다. 지하실이 없는 경우는 건물외곽 벽체의 지면에 가까운 하단부를 기준 하되, 지표면에서 50cm 이상 떨어지지 않은 지점으로 해야한다.</p> <p>*4 : 수평(XY방향)진동성분의 측정위치는 건물 최외측 벽면, 석조 외장부(Masonry)의 내부 또는 이에 가능한 가까운 지점으로 한다.</p> <p>*5 : 수직(Z방향)진동성분만을 기준한 값임. 측정위치는 진동속도가 가장 클 것으로 예상되는 지점(보통 바닥 중앙부)으로 한다.</p> <p>*6 : 바닥 부재의 손상 발생 가능성을 배제할 수 있는 안전치(초과한다고 해서 반드시 손상이 발생함을 의미하지 않음).</p>						

나라별, 학자들간의 대표적인 발파진동 허용기준은 (Table 4.2)과 같고 대부분 허용한계가 5.0 cm/sec 이하이며, 국내의 허용기준보다 매우 높게 설정되어 있다.

(Table 4.2) 최대진동속도와 피해수준(Edwards 외)

cm/sec	Langefors (Sweden)	Duvall & Forgelson	Nicholls (USA)	Siskind (USA)	Edwards (CANADA)	SUSUKI (JAPAN)	ASCE (USA)
상당피해			상당피해				
20.0	균열생성	상당피해 (Major Damage)	경미한피해	피해발생	피해발생	피해발생	구조물함
15.0	경미한피해			피해발생			
10.0	주의	경미한피해 (Minor Damage)	주의		주의		구조물의 (10, 35Hz)
5.0	안전	안전	안전	안전 (≥ 40 Hz)	안전	주의	기계의 안전한계 (10, 30Hz)
0.0				안전 (<40 Hz)		안전	

캐나다²²⁾는 10 cm/sec 이하의 진동속도에서 안전하고 10~12 cm/sec에서 건물에 피해가 우려된다고 하였으며, 안전율을 고려하여 진동속도 허용한계를 5.0 cm/sec로 정하고 있다.

미국의 듀폰(Dupont)사가 제시한 구조물의 피해정도는 (Table 4.3)와 같이 진동속도가 13.9cm/sec에 달하면 회벽이 갈라지기 시작한다고 보고하였으며, 미광무국은 5.0 cm/sec를 안전한계로 추천하였다.

주22) Edwards & Northwood, 1960

(Table 4.3) 최대 진동속도와 피해수준(Dupont사)

최대진동속도(cm/sec)	피해정도
30.5	터널 암반의 낙석유발
19.3	회벽에 커다란 피해
13.9	회벽이 갈라지기 시작
7.6	밀폐지역 발파의 규제치
5.0	미광무국이 추천한 안전한계

4.2. 국내 발파진동 허용기준(공공기관별)

우리나라의 경우 허용기준의 대부분이 독일의 국가표준서²³⁾를 기초로 하고 있으며 국내 지하철 건설공사와 노동부 「발파작업 표준안전 지침」 및 국토해양부 「도로공사 및 노천발파설계 시공요령」의 경우는 진동주파수에 관계없이 대상 구조물을 분류하여 0.2~5.0 cm/sec로 권고하고 있으며, 국토해양부는 기준치 한계 내에서 설계자의 판단에 맡기고 있다. 이는 기존 구조물에 금이 있거나 노후 구조물 등에 대하여 기준 실정에 따라 허용 범위를 하향 조정하고 이 기준을 초과할 때에는 발파를 중지하고 그 원인을 규명하여 발파 기준에 의하여 작업을 재개하도록 규정하고 있다. 현재는 대부분 국토해양부의 「도로공사 및 노천발파설계 시공요령」에 따라 작업하고 있다. 단 토지개발공사만이 주파수 영향을 고려한 허용기준치를 고려하여 수정 제한하였는데 30Hz이하 저주파에서 허용기준치를 감소시켰다.

주23) DIN 4150, 1971

(Table 4.4) 국내의 진동 허용기준치(cm/sec)

구조물의 종류	지하철 건설공사	노동부 고시	대한주택 공사	토지개발공사		국토 해양부
				f ≥ 30Hz	f ≤ 30Hz	
문화재, 정밀기기설치 건물	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
주택, 아파트(실금이 있는정도) 주택, 아파트(거주인이 많은 건물) 결함이 있는 건물, 빌딩 균열이 있는 저택	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3~0.5
상가, 사무실, 공공건물	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0
RC, 철골조, 회벽이 없는 공업용콘크리트 구조물	1.0~4.0	1.0~4.0	1.0~4.0	1.0~4.0	0.8~2.0	1.0~5.0

4.3. 발파소음 허용기준

우리나라 발파소음의 허용기준은 소음, 진동규제법 제20조 제3항 (Table 4.6)과 같이 등가 소음수준(Equivalent sound level)인 생활소음, 진동의 규제기준²⁴⁾으로 대상지역, 시간별, 소음원에 따라 45~83dB(A)의 규제 범위를 정하고 있는데 발파작업에 따른 폭풍압은 지속시간이 짧고 주파수에 관계없이 구조물 및 가청 범위 압력을 모두 응답하므로 인체 평가 대상인 등가 소음수준 보다 폭풍압 특성이 반영²⁵⁾된 구조물의 손상 정도를 우선 평가하여야 한다. 따라서, 구조물의 응답을 기준으로 살펴보면 기 보고된 일본의 자료에 의하여 음압수준 120 dB(L)에서 고통을 느끼기 시작하며, 150dB(L)에서 고막이 손상되었다고 하였으며²⁶⁾, 미국의 Dupont사는 인체에 영향을 미치지 않는 음압수준을 115 dB(L)로 제안하였다. 미광무국²⁷⁾은 (Table 4.5)와 같이 구조물 및 시설물에 피해를 미치지 않는 안전수준을 129 dB(L), 허용한계치를 134 dB(L)로 제안하였다.

주24) 생활소음·진동의 규제기준(소음·진동규제법 제20조 제2항 관련)

주25) 암발파 설계 기법에 관한연구, 토지개발공사, 1993

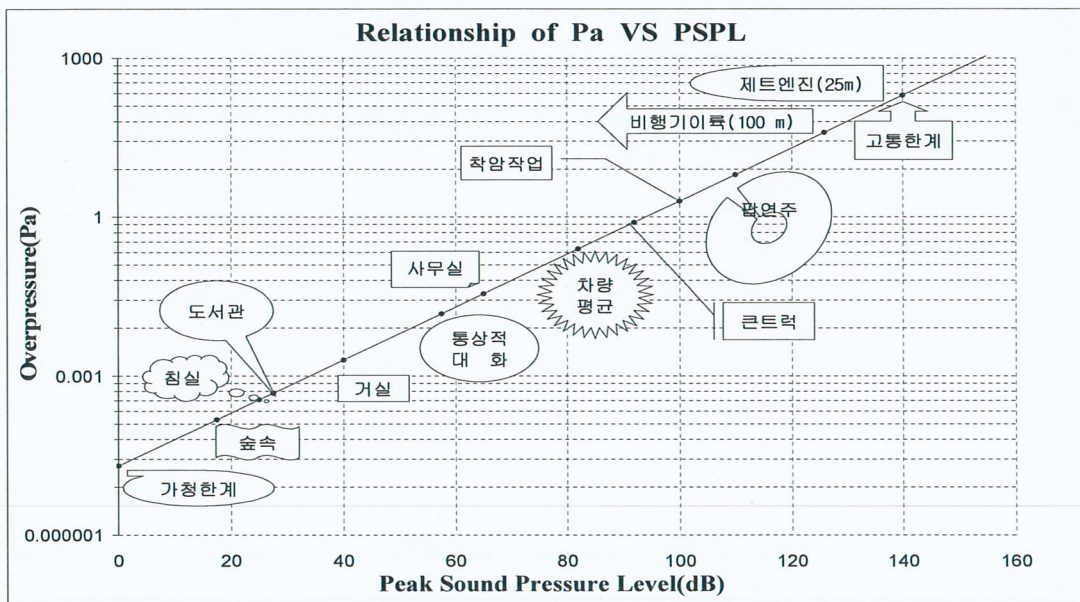
주26) 암발파 설계기법에 관한 연구, 한국토지공사, 1992. 3

주27) U.S Bureau of mine(after Siskind & Summers, 1974)

(Table 4.5) 음압수준에 따른 인체 및 구조물의 반응(미광무국)

dB(L)	Pa	Response
180	20,000	← 구조물의 손상
170	6.32×10^3	← 대부분의 유리창 깨짐
150	6.32×10^2	← 피해한계
140	200	
134		← 미광무국 허용한계치
130	6.32×10^1	
129	5.64×10^1	← 미광무국 안전수준
120	20	← 고통한계
115	1.12×10^1	← 불평한계, Dupont사 안전수준
110	6.32	
70	6.32×10^{-2}	
60	2×10^{-2}	← 일상적인 대화
40	2×10^{-3}	← 병실
20	2×10^{-4}	← 속삭임
0	2×10^{-5}	← 가청한계

폭약의 폭발로 발생하는 폭풍압²⁸⁾은 일반적으로 (Fig.4.1)과 같이 착암기의 음압수준 100 dB(L)에서 체트기 이륙(Sonic boom)의 음압수준인 140 dB(L)정도²⁹⁾까지 분포한다.



(Fig.4.1) 음압과 음압수준

주28) 음압·과압·Overpressure·Air blast
 주29) Bruel & Kjaer Instruments, 1976

(Table 4.6) 생활소음 규제기준(소음, 진동규제법 제20조 제3항)

단위 : dB(A)

대 상 지 역	시간별		아침 , 저녁 (05:00~07:00, 18:00~22:00)	낮 (07:00~18:00)	밤 (22:00~05:00)
	소음원				
주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구 및 관광·휴양개발 진흥지구, 자연환경보전지역, 그 밖의 지역안에 소재한 학교· 병원·공공도서관	확성기	옥외설치	60 이하	65 이하	60 이하
		옥내에서 옥외로 소음이 나오는 경우	50 이하	55 이하	45 이하
	공 장		50 이하	55 이하	45 이하
	사업장	동일건물	45 이하	50 이하	40 이하
		기 타	50 이하	55 이하	45 이하
	공사장		60 이하	65 이하	50 이하
그 밖의 지역	확성기	옥외설치	65 이하	70 이하	60 이하
		옥내에서 옥외로 소음이 나오는 경우	60 이하	65 이하	55 이하
	공 장		60 이하	65 이하	55 이하
	사업장	동일건물	50 이하	55 이하	45 이하
		기 타	60 이하	65 이하	55 이하
	공사장		65 이하	70 이하	50 이하

1. 소음의 측정 및 평가기준은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조제1항제2호에 해당하는 분야에 따른 환경오염공정시험기준에서 정하는 바에 따른다.
2. 대상 지역의 구분은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른다.
3. 규제기준치는 생활소음의 영향이 미치는 대상 지역을 기준으로 하여 적용한다.
4. 공사장 소음규제기준은 주간(주간)의 경우 특정공사 사전신고 대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 3시간 이하일 때는 +10dB을, 3시간 초과 6시간 이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.
5. 발파소음의 경우 주간에만 규제기준치(광산의 경우 사업장 규제기준)에 +10dB을 보정한다.
6. 공사장의 규제기준 중 다음 지역은 공휴일에만 -5dB을 규제기준치에 보정한다.

가. 주거지역

- 나. 「의료법」에 따른 종합병원, 「초·중등교육법」 및 「고등교육법」에 따른 학교, 「도서관법」에 따른 공공도서관의 부지경계로부터 직선거리 50m 이내의 지역

7. “동일 건물”이란 「건축법」 제2조에 따른 건축물로서 지붕과 기둥 또는 벽이 일체로 되어 있는 건물을 말하며, 동일 건물에 대한 생활소음 규제기준은 다음 각 목에 해당하는 영업을 행하는 사업장에만 적용한다.
 - 가. 「체육시설의 설치·이용에 관한 법률」 제10조제1항제2호에 따른 체력단련장업, 체육도장업, 무도학원업 및 무도장업
 - 나. 「학원의 설립·운영 및 과외교습에 관한 법률」 제2조에 따른 학원 및 교습소 중 음악교습을 위한 학원 및 교습소
 - 다. 「식품위생법 시행령」 제21조제8호다목 및 라목에 따른 단란주점영업 및 유흥주점영업
 - 라. 「음악산업진흥에 관한 법률」 제2조제13호에 따른 노래연습장업
 - 마. 「다중이용업소 안전관리에 관한 특별법 시행규칙」 제2조제4호에 따른 콜라텍업

4.4. 생활진동 규제기준

(Table 4.7) 생활진동 규제기준

[단위 : dB(V)]

대 상 지 역	시간대별	주간 (06:00~22:00)	심야 (22:00~06:00)
		주거지역, 녹지지역, 관리지역 중 취락지구 및 관광·휴양개발진흥지구, 자연환경보전지역, 그 밖의 지역안에 소재한 학교·병원·공공도서관	65 이하
그 밖의 지역		70 이하	65 이하

1. 발파진동의 경우 주간에만 규제기준치에 +10dB을 보정한다.

4.5. 당 현장 발파 진동·소음 허용기준 설정

「용마터널건설 민간투자시설사업 건설공사 중 지하철도공사」 현장주변의 보안물건은 과업구간 경계로부터 아파트, 주택, 상가가 있다.

이 보안물건에 대한 진동, 소음 관리기준은 용마2차 한신아파트의 심각한 민원상황과 인근 주택 및 상가등의 노후상태로 보아 발파시 발생된 진동으로 대상물에 대한 피해를 주지 않기 위해서는(Table 4.8)을 참고하여 발파작업을 수행 한다면 매우 안전하리라 판단되며 이를 기준으로 관리함이 소음노출에 따른 안정성 향상과 민원 분쟁발생을 최소화하고 보호를 받을 수 있는 권고사항으로 판단된다.

(Table 4.8) 당 현장 진동·소음관리기준

구 분	보안물건의 종류	허용기준치	관리기준치	비 고
발파진동	아파트 및 주택	0.3~0.5cm/sec 이하	0.3cm/sec 이하	
	상가	0.5cm/sec 이하	0.3cm/sec 이하	
생활진동	아파트 및 주택 상가	주간(06:00~22:00)	주간(06:00~22:00)	
		75dB(V)이하	75dB(V)이하	
발파소음	아파트 및 주택 상가	낮(07:00 ~ 18:00)	낮(07:00~ 18:00)	
		75dB(A)이하	75dB(A)이하	

5. 시험발파 실시

- 위치 : 용마터널건설 민간투자시설사업 건설공사 중 지하차도공사
(STA.0+460~0+568 중 0+555~0+560지점)
- 시행일자 : 2012년 07월 25일
- 시험발파 참관 : 서울시도시기반시설본부 관계자외, 용마터널주식회사 대표이사
제일엔지니어링(주), (주)경동엔지니어링 관계자
SK건설(주) 관계자
삼대양개발(주) 관계자
서울중량경찰서 생활질서계장 외.
- 시험발파 수행기관 : 근원이엔지기술사사무소 화약류관리기술사 김 재 흥

5.1. 시험발파 조건

(Table 5.1)의 설계내용으로 시험발파를 실시하였으며, 이 때 적용된 발파패턴도는 (Fig. 5.1)~(Fig.5.5)과 같다.

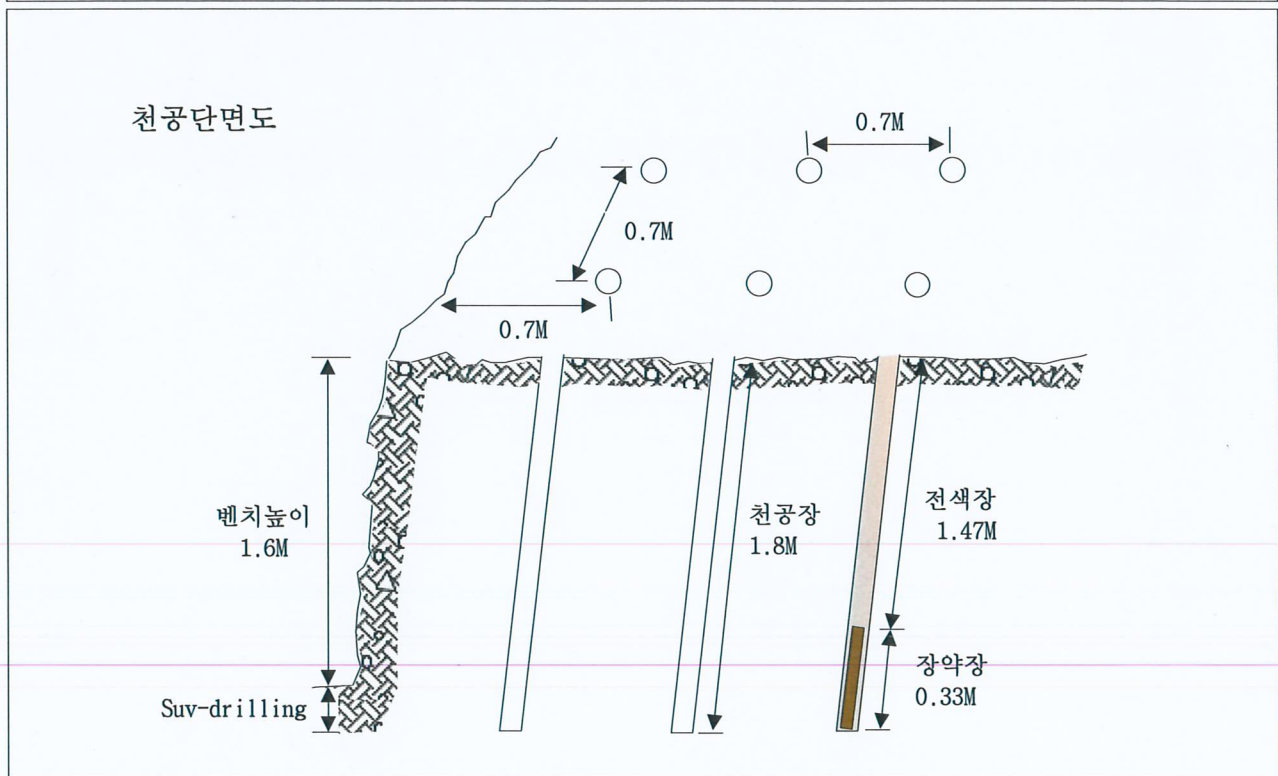
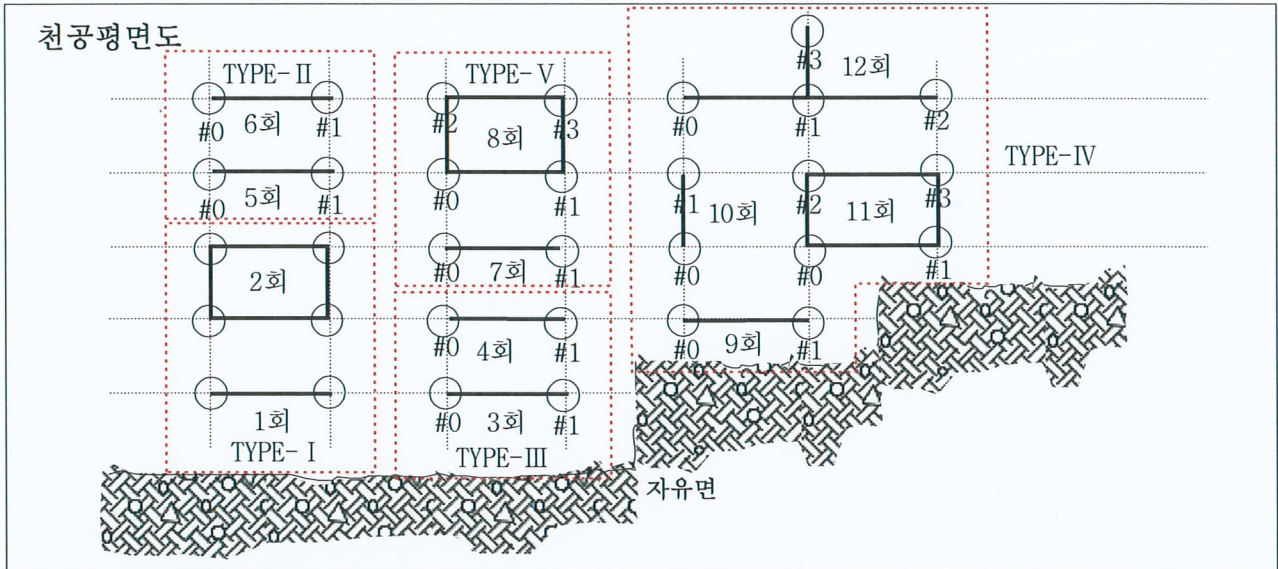
(Table 5.1) 시험발파 설계내용

구 분 \ 발파사양	TYPE- I	TYPE- II	TYPE-III	TYPE-IV	TYPE- V	비 고
천공장비	유압드릴					
천공구경	Ø51mm이내					
사용폭약	프라즈마 캡슐	뉴화이넥카		에멀전폭약		
사용뇌관	-	ID & MS#1	ID & MS#1	ID & MS#3	ID & MS#3	
천공장(m)	1.8	1.5	1.8	1.5	1.8	
계단높이(m)	1.6	1.3	1.6	1.3	1.6	
최소저항선(m)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
천공간격(m)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	
공당장약량(kg/Hole)	0.500	0.12	0.24	0.25	0.375	
지발당장약량(kg/delay)	1.0~2.0	0.12	0.24	0.25	0.375	
비장약량(kg/m ³)	0.56	0.16	0.27	0.34	0.37	
1회발파공수*횟수	2공*1회 4공*1회	2공*2회	2공*2회	2공*2회 4공*2회	2공*1회 4공*1회	총계 : 32공 횟수 : 12회
총장약량(kg/Total)	3.0 kg	0.48 kg	0.96 kg	3.0 kg	2.25 kg	프라즈마캡슐:3kg 화이넥카:1.44kg 뉴마이트:5.25kg 총계:9.69kg
전색(Stemming)	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	

5.1.1. 시험발파 패턴도(TYPE- I)

PLAN VIEW

Scale : NONE



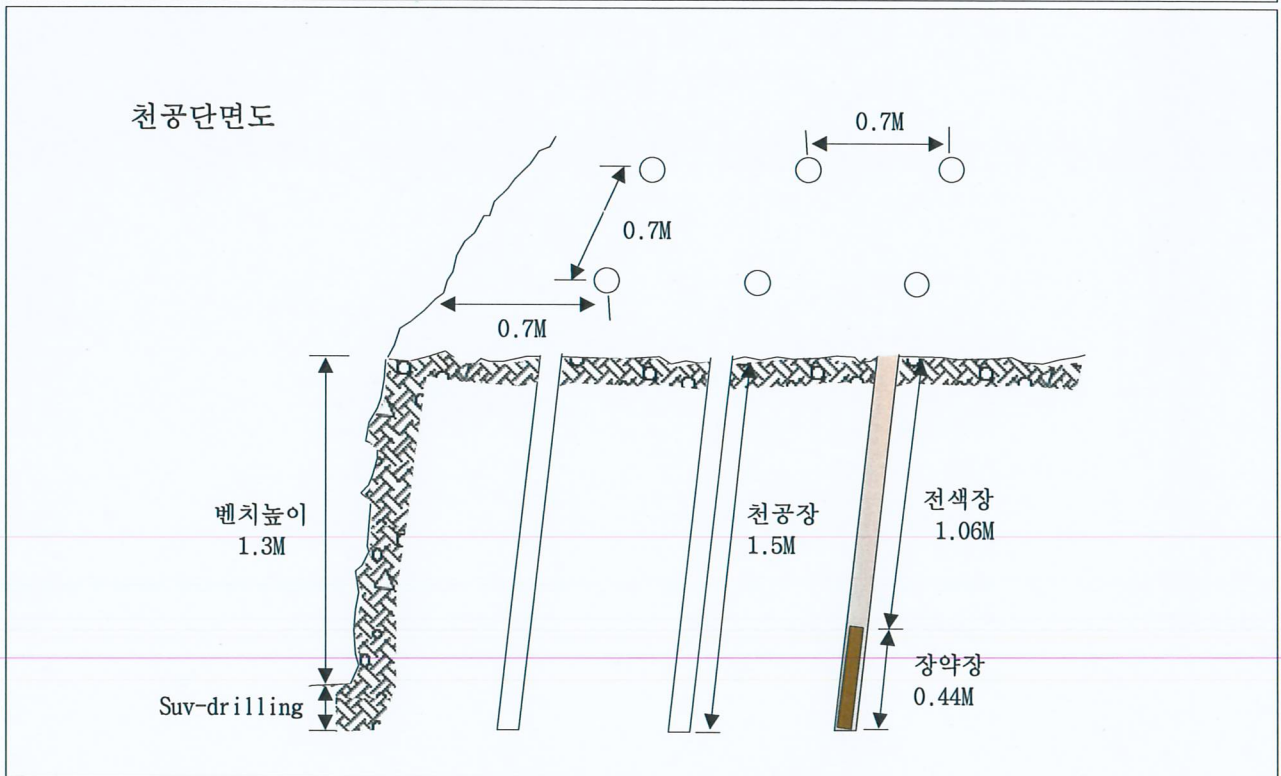
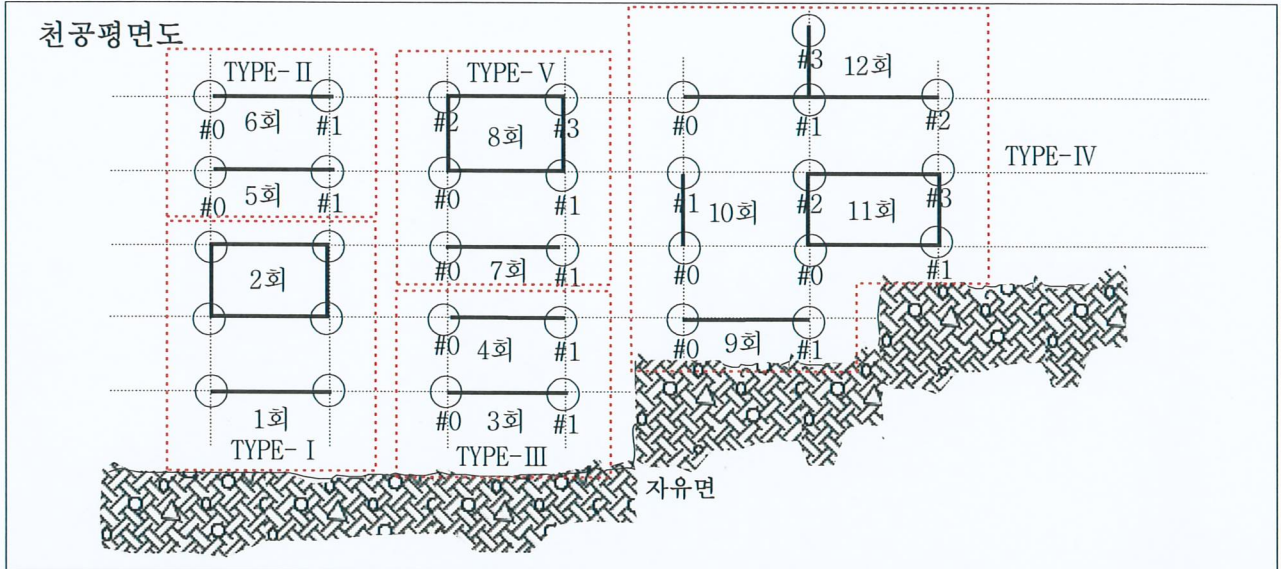
천 공 경	Ø 51 mm이내	천공장	1.8 m
최소저항선(BB ₁)	0.7 m	공간격(E)	0.7 m
계단높이	1.6 m	공당장약량	0.500 kg
지발당장약량	1.0~2.0 kg	비장약량	0.56 kg/m'
사용폭약 및 뇌관류	C.S.Kim Capsule Class-600		

(Fig 5.1) 시험발파 패턴도(TYPE- I)

5.1.2. 시험발과 패턴도(TYPE-II)

PLAN VIEW

Scale : NONE



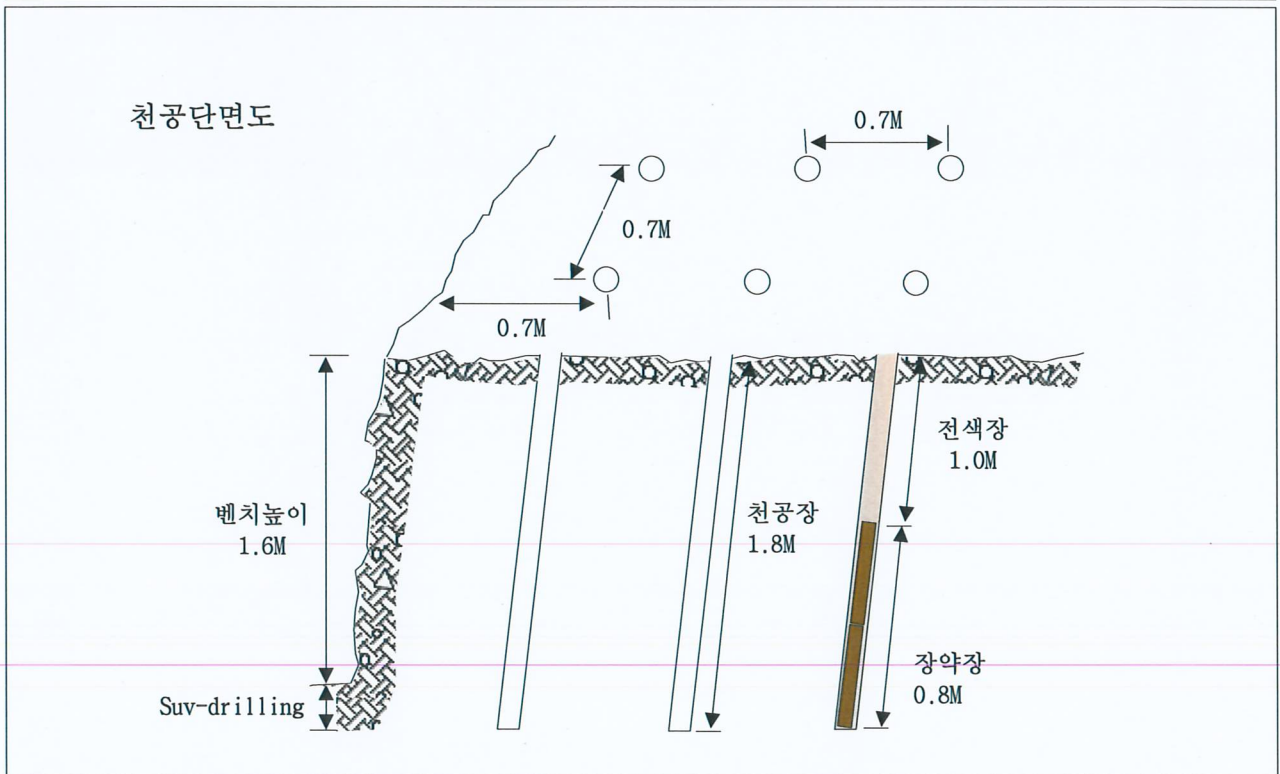
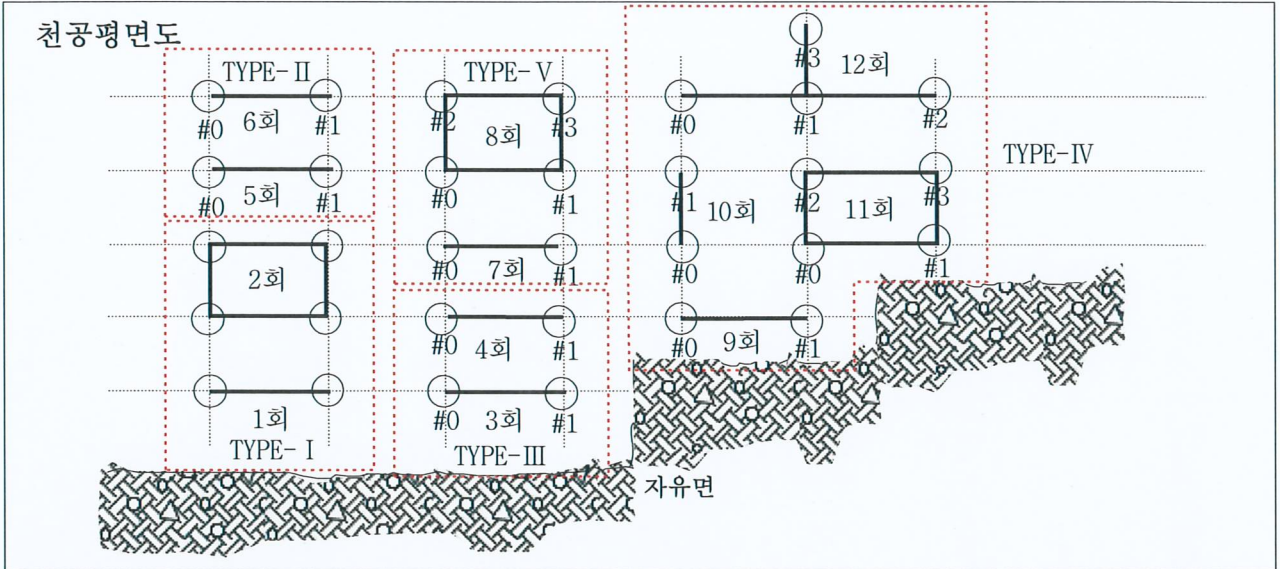
천공경	Ø 51 mm이내	천공장	1.5 m
최소저항선(BB ₁)	0.7 m	공간격(E)	0.7 m
계단높이	1.3 m	공당장약량	0.12 kg
지발당장약량	0.12 kg	비장약량	0.16 kg/m ³
사용폭약 및 너관류	뉴화이넥카 Ø 22mm, 전기너관ID & MS Series #1		

(Fig 5.2) 시험발과 패턴도(TYPE-II)

5.1.3. 시험발파 패턴도(TYPE-III)

PLAN VIEW

Scale : NONE



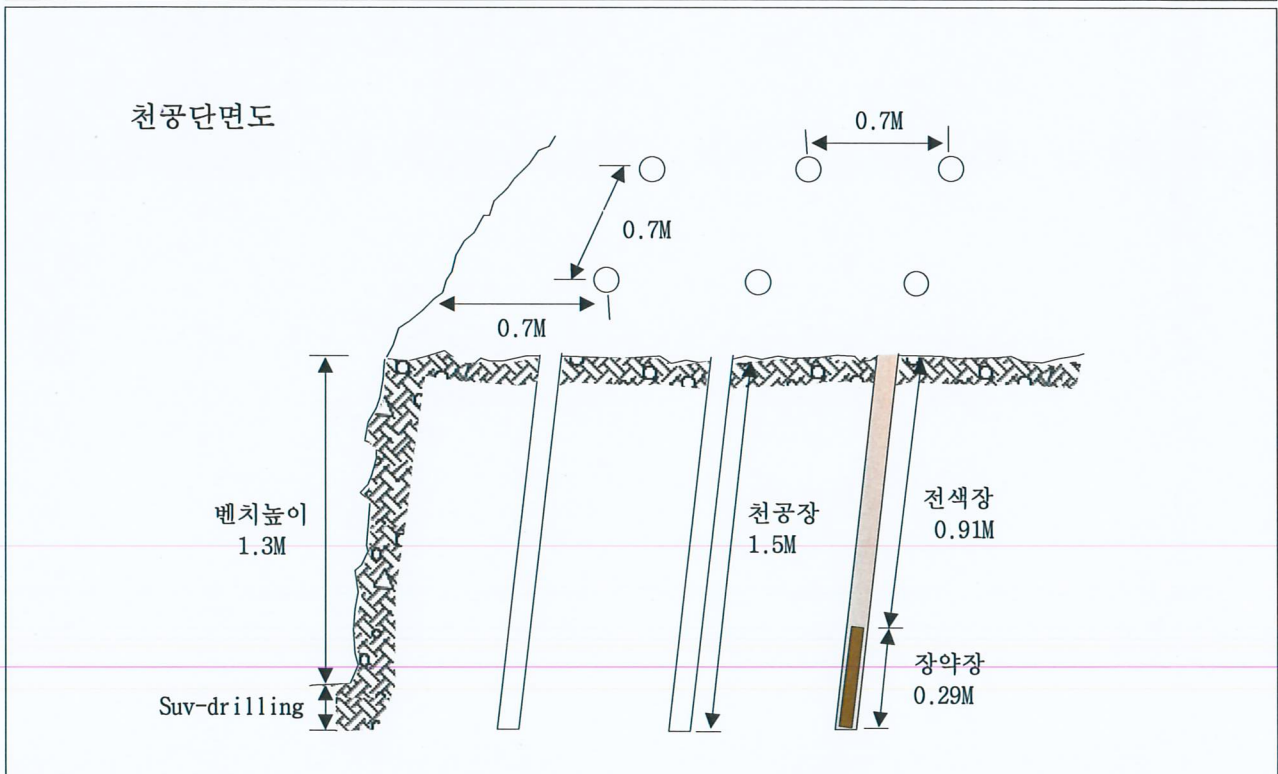
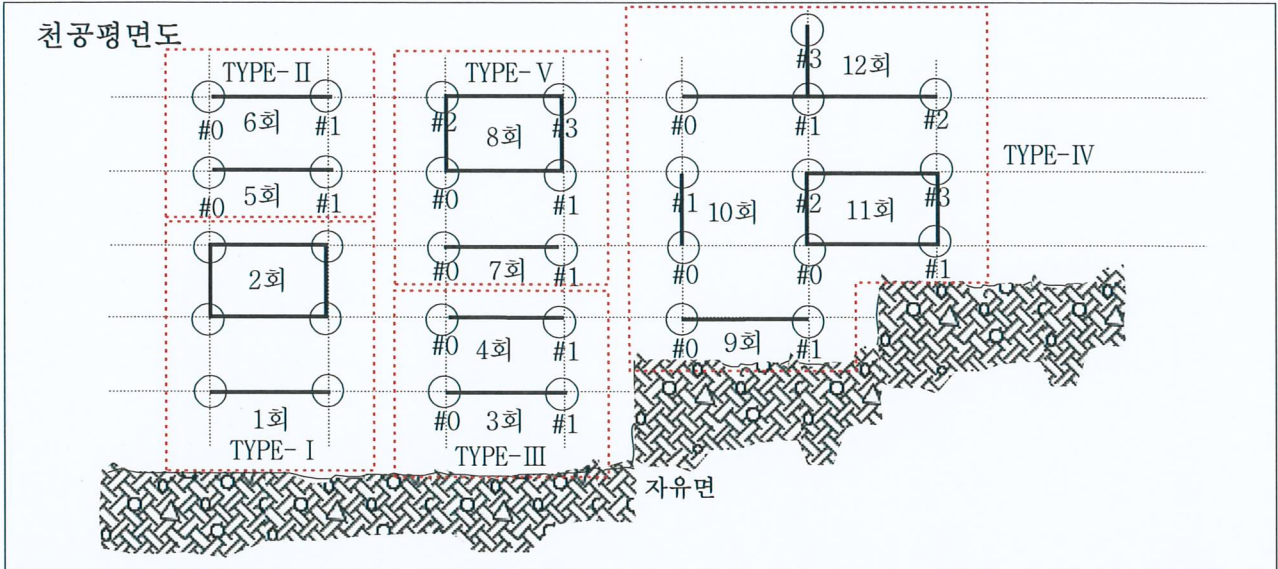
천공경	Ø 51 mm이내	천공장	1.8 m
최소저항선(BB ₁)	0.7 m	공간격(E)	0.7 m
계단높이	1.6 m	공당장약량	0.24 kg
지발당장약량	0.24 kg	비장약량	0.27 kg/m ³
사용폭약 및 너관류	뉴화이넥카 Ø 22mm, 전기너관ID & MS Series #1		

(Fig 5.3) 시험발파 패턴도(TYPE-III)

5.1.4. 시험발과 패턴도(TYPE-IV)

PLAN VIEW

Scale : NONE



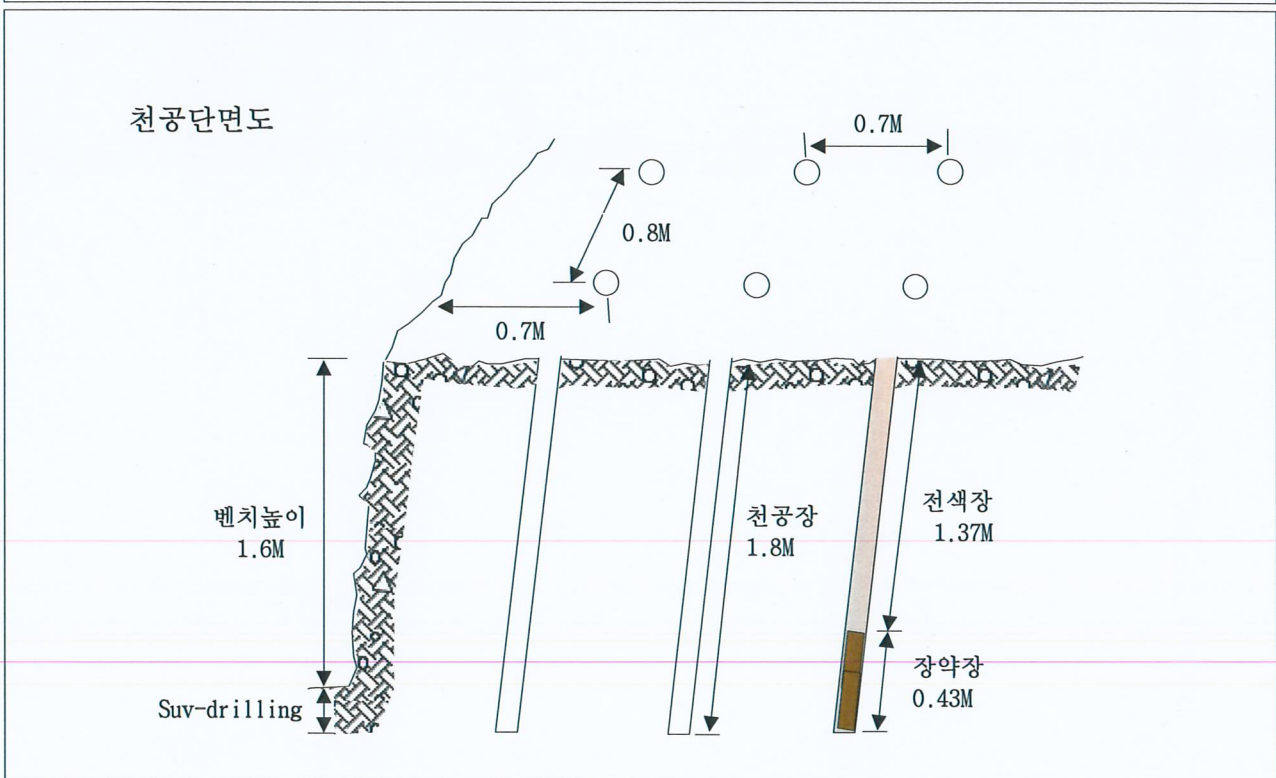
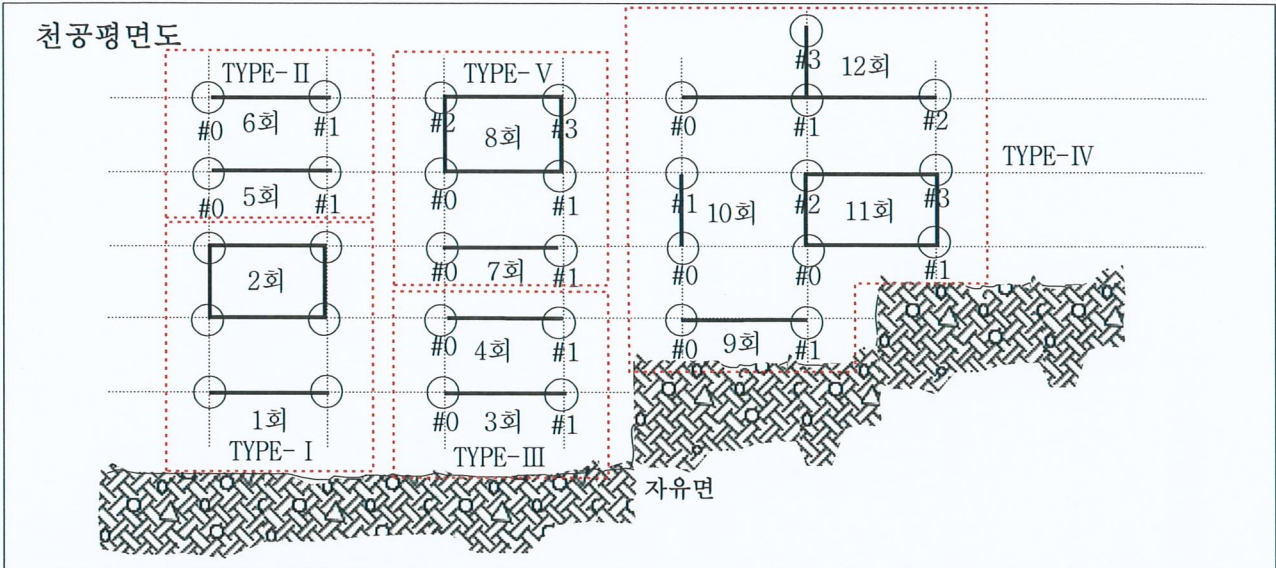
천공경	Ø 51 mm이내	천공장	1.5 m
최소저항선(BB ₁)	0.7 m	공간격(E)	0.7 m
계단높이	1.3 m	공당장약량	0.25 kg
지발당장약량	0.25 kg	비장약량	0.34 kg/m ³
사용폭약 및 뇌관류	에멀전폭약 Ø 32mm, 전기뇌관ID & MS Series #1~#3		

(Fig 5.4) 시험발과 패턴도(TYPE-IV)

5.1.5. 시험발파 패턴도(TYPE-V)

PLAN VIEW

Scale : NONE



천공경	Ø 51 mm이내	천공장	1.8 m
최소저항선(BB ₁)	0.7 m	공간격(E)	0.8 m
계단높이	1.6 m	공당장약량	0.375 kg
지발당장약량	0.375 kg	비장약량	0.37 kg/m ³
사용폭약 및 너관류	에멀전폭약 Ø 32mm, 전기너관 ID & MS Series #1~#3		

(Fig 5.5) 시험발파 패턴도(TYPE-V)

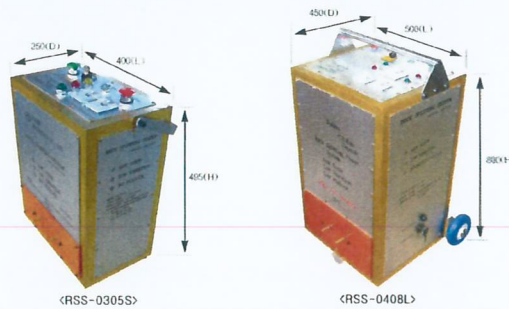
5.2. 사용화약류

화약류는 폭약과 뇌관으로 나눌 수 있는데 현재 생산된 폭약의 종류는 암석의 강도와 지질의 상태에 따라 사용할 수 있도록 다양하게 생산되고 있으며, 본 시험발파에서 사용한 폭약은 그 성능이 우수하고 안전성이 좋은 에멀전(Emulsion) 계열의 뉴마이트 플러스, 뉴화이넥카와 플라즈마는 C.S.KIM Capsule Class-600을 사용하였으며, 종류 및 특징은 (Table 5.3~5.6)와 같다.

5.2.1. 플라즈마 파암 제원

1) 대전력 공급기

1. C.S.KIM Capsule Rock Breaking System		
MANUFACTURER	Yulim Materials Co., Ltd.	
MODEL NAME	RSS-0305S	RSS-0408L
SIZE	495(H) × 400(L) × 250(D)mm	800(H) × 500(L) × 450(D)mm
WEIGHT	22 Kg	67 Kg
INPUT Power Supply	AC 220V	AC 220V
Power Consumption	1 KW	3 KW
Charging Time	About 17 sec	About 15 sec



(Table 5.2) 대전력 공급기

파암기	제 원	
모델명	출력	비 고
RSS-0408L	4,000[V]	

2) C.S.KIM Capsule제원

2. C.S. KIM Capsule			
Capsule Types	Length(mm)	Diameter(mm)	Application
Class-200	250	30	Small Trench, Boulder
Class-300	310	30	Small Trench, Boulder
Class-400	270	40	Concrete, Rock, Boulder
Class-600	330	40	Concrete, Rock, Boulder
Class-800	510	40	Concrete, Rock, Boulder
Wire Specification	1.2MM(D), 2.5M(L)		



(Table 5.3) C.S.KIM Capsule Class-600

사용 캡슐(C.S.KIM Capsule)	
적용 Size	비 고
Class-600	플라스틱용기

5.2.2. 화약류의 제원

(Table 5.4) 폭약류 제품성능

폭약류	평균폭발속도 (m/sec)	가비중 (g/cc)	폭발열 (Kcal/kg)	낙추감도 (cm)	가스량 (ℓ /kg)	내한성 (°C)	내수성
뉴화이텍카	3,400	0.82	366	100	886	-20	최우수
New MITE PLUS	5,700	1.1~1.20	880	100	826	-20	최우수

(Table 5.5) 폭약류 제품 및 포장규격

폭약류	약 경(mm)	약 장(mm)	본당중량 (g)	포장수량 (EA/box)	순중량 (kg/box)	포장형태
뉴화이텍카	22	440	0.120	50	6	PE Tube
New MITE PLUS	32	295	0.250	80	20	Wax Paper

(Table 5.6) 하이테토 플러스 초시규격

MS 시리즈					
단 수	초시(ms)	각선색깔	단 수	초시(ms)	각선색깔
순발	0	주황	10	200	적황
1	20	백적	11	220	백적
2	40	백청	12	240	백청
3	60	백자	13	260	백자
4	80	백녹	14	280	백녹
5	100	백황	15	300	백황
6	120	백흑	16	320	백흑
7	140	적청	17	340	적청
8	160	적자	18	360	적자
9	180	적녹	19	380	적녹

5.3. 안전대책


발파에 관련된 모든 작업은 화약류 관리보안책임자의 지시를 따르도록 하고 이와 관련된 사항은 화약류 단속법(단속법이하)을 준하였다.

5.4. 계측수행

사용된 계측기기는 변위·진동속도·진동가속도·주파수·폭풍압을 모두 측정할 수 있는 제품³⁰⁾을 사용하였으며, 주요 계측기기의 특성은 (Table 5.7)과 같다. 본 기기는 Blast monitor, 연결 Cable, Sensor, Blast ware out-put 등 본체와 부속물로 구성되어 있으며, Software와 접속시켜 Full wave forms, FFT(Fast fourier transform) 등 정밀분석을 할 수 있다. 계측기기는 (Table 5.8)과 같이 설치하였으며 (Fig.5.6)은 계측위치, 사용화약, 사용장비, 검측, 장약모습, 비산방지매트, 발파후 모습을 보여주고 있다.

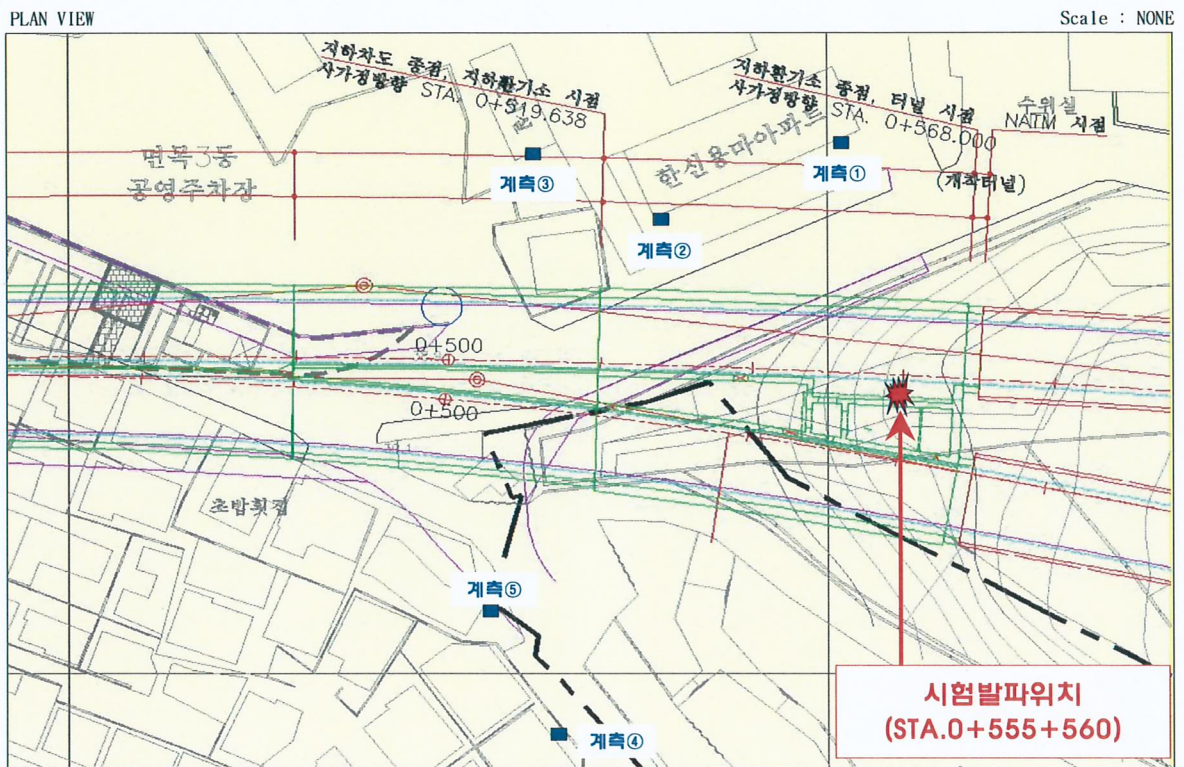
주30) BlastMate Series II·III·VMS 2000

(Table 5.7) 계측기기의 특성

항 목	구 분	내 용
진동	최대측정범위	254 mm/sec 까지 자동 범위 설정
	최소분석가능치	0.0159 mm/sec
	Trigger Level	0.13~253.9 mm/sec의 범위 내에서 0.01 mm/sec 단계로 설정가능
	가속도	0.01~30 gal 범위 내 진동 가속도 계산 가능
	변위	0.0001" ~ 1.5" 범위 내 진동 변위 계산 가능
	주파수 분석	최고치의 주파수 및 USBM/OSMRE와 DIN4150 주파수 분석
	정확도	B & K Reference accelerometer @15Hz의 1%내에서 검정됨
소음도: "A"형	측정범위	55 ~ 110 dB
	최소분석가능치	0.2 dB
	Trigger Level	55.0~110.0 dB 범위 내에서 0.2 dB 단계로 Level 설정 가능
	주파수 응답	0.5~8 kHz, 기록시간에 독립적 Impulse Filtering
주파수	표본 추출율	모든 채널, 모든 기록 방식에 대해 1,024 sample/sec
	주파수 응답 (-3 dB Point)	기록시간에 독립적으로 1.5~250 Hz의 진동과 선형풍압, 정밀한 주파수 측정을 보장하는 하드웨어 "Anti-alias"필터
파형기록	기록방식	수동, 자동, 단일, 연속
	고정기록시간	1초의 증가치로 1~10 sec에서 선택, 트리거전 0.25 sec 기록
	자동기록시간	1~24초 기록
	주기소요시간	5 sec이하의 전 Data 분석 및 저장
계측기기 사진		

(Table 5.8) 계측위치 선정

계측위치	폭원과의거리(M)	비고
계측①	한신아파트	32
계측②	한신아파트	38
계측③	한신아파트경비실	56
계측④	주택	64
계측⑤	상가	70
		사가정로72길12
		면목7동 1085-5(콩나물국밥)



(Fig.5.6) 계측위치



계측위치 : 한신아파트①



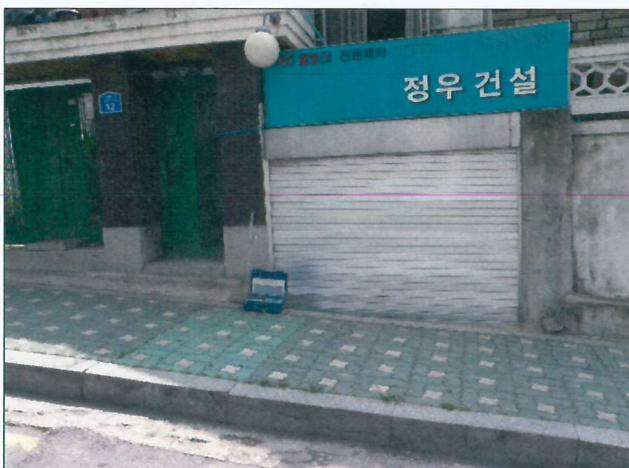
계측위치 : 한신아파트②



계측위치 : 한신아파트(경비실)



계측위치 : 면목7동1085-5(콩나물국밥)



계측위치 : 사가정로72길12



사용장비(파암기)



계측위치 : 한신아파트①



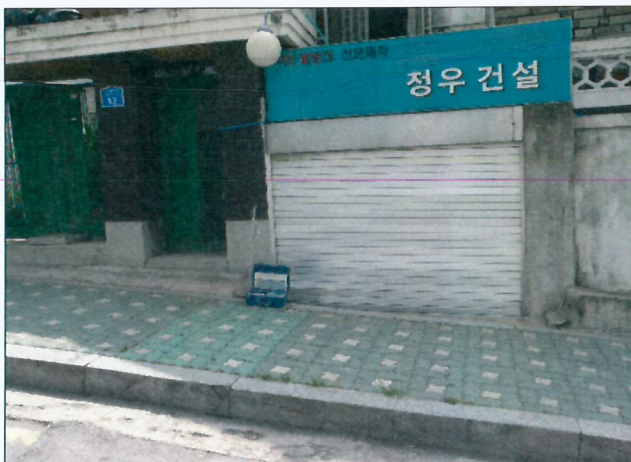
계측위치 : 한신아파트②



계측위치 : 한신아파트(경비실)



계측위치 : 면목7동1085-5(콩나물국밥)



계측위치 : 사가정로72길12



사용장비(파암기)



사용화약(플라즈마 캡슐)



사용화약(뉴화이넥카)



사용화약(뉴마이트)



천공완료



검측(천공장)



검측(공간격, 최소저항선)



배열



장약



장약



결선



결선완료



도통시험



소음 및 비산방지 1차



소음 및 비산방지 2차



발파완료후 모습



발파완료후 모습

6. 계측결과 해석

6.1. 계측결과

시험결과 계측결과는 (Table 6.1~6.3)과 같고 플라즈마공법과 뉴화이넥카발과공법의 데이터 중 신뢰성이 좋은 데이터 14개를 추출하고, 뉴마이트의 데이터는 19개를 추출하여 직선관계식을 유도하였는데 이 때, 선형(Linear)관계의 회귀분석(Regression analysis)은 전산처리 하였다.

(Table 6.1) 계측결과(C.S.Kim 플라즈마)

Serial No.	계측위치	번호	지발당 최대장약량 (Kg/Delays)	거리 (m)	PPV(cm/sec)			폭풍압 소음수준(dB(A))
					Tran	Vert	Long	
3233	한신아파트①	1	1.0	32	0.0327	0.0222	0.0254	50.6
		2	2.0		0.0578	0.0302	0.0502	52.4
2171	한신아파트②	1	1.0	38	0.0297	0.0286	0.0254	63.8
		2	2.0		0.0434	0.0445	0.0397	54.2
3236	경비실	1	1.0	56	-	-	-	-
		2	2.0		0.0356	0.0206	0.0349	56.0
2513	사가정로72길12	1	1.0	64	-	-	-	-
		2	2.0		0.0127	0.0127	0.0175	62.0
3152	면목7동1085-5 (콩나물국밥)	1	1.0	70	-	-	-	-
		2	2.0		-	-	-	-

(Table 6.2) 계측결과(뉴화이넥카)

Serial No.	계측위치	번호	지발당 최대장약량 (Kg/Delays)	거리 (m)	PPV(cm/sec)			폭풍압 소음수준(dB(A))
					Tran	Vert	Long	
3233	한신아파트①	1	0.24	32	0.0587	0.0286	0.0492	51.6
		2	0.24		0.0397	0.0191	0.0429	50.6
		3	0.12		0.0349	0.0127	0.0365	50.0
		4	0.12		0.0333	0.0206	0.0270	50.0
2171	한신아파트②	1	0.24	38	0.0429	0.0667	0.0397	56.4
		2	0.24		0.0445	0.0460	0.0381	53.6
		3	0.12		0.0286	0.0317	0.0286	52.2
		4	0.12		0.0286	0.0286	0.0238	64.2
3236	경비실	1	0.24	56	0.0349	0.0191	0.0413	52.2
		2	0.24		0.0349	0.0191	0.0349	55.4
		3	0.12		-	-	-	-
		4	0.12		0.0238	0.0079	0.0206	51.2
2513	사가정로72길12	1	0.24	64	0.0127	0.0191	0.0254	61.6
		2	0.24		0.0127	0.0143	0.0175	61.2
		3	0.12		-	-	-	-
		4	0.12		-	-	-	-

(Table 6.2 계속) 계측결과(뉴화이넥카)

Serial No.	계측위치	번호	지발당 최대장약량 (Kg/Delays)	거리 (m)	PPV(cm/sec)			폭풍압
					Tran	Vert	Long	소음수준(dB(A))
3152	면목7동1085-5 (콩나물국밥)	1	0.24	70	0.0079	0.0095	0.0191	63.2
		2	0.24		-	-	-	-
		3	0.12		-	-	-	-
		4	0.12		-	-	-	-

(Table 6.3) 계측결과(뉴마이트)

Serial No.	계측위치	번호	지발당 최대장약량 (Kg/Delays)	거리 (m)	PPV(cm/sec)			폭풍압
					Tran	Vert	Long	소음수준(dB(A))
3233	한신아파트①	1	0.375	32	0.0603	0.0429	0.0730	53.8
		2	0.375		0.0730	0.0365	0.0730	56.4
		3	0.250		0.0730	0.0397	0.0762	52.6
		4	0.250		0.0206	0.0143	0.0206	52.6
		5	0.250		0.0762	0.0445	0.0826	52.4
		6	0.250		0.0968	0.0508	0.0651	54.4
2171	한신아파트②	1	0.375	38	0.1160	0.0937	0.0429	57.6
		2	0.375		0.1080	0.0968	0.0794	59.6
		3	0.250		0.0540	0.0397	0.0302	51.6
		4	0.250		0.0238	0.0317	0.0254	55.0
		5	0.250		0.0619	0.0508	0.0556	53.4
		6	0.250		0.0968	0.0857	0.0556	59.8
3236	경비실	1	0.375	56	0.0651	0.0365	0.0968	57.4
		2	0.375		0.0762	0.0397	0.0905	59.0
		3	0.250		0.0254	0.0159	0.0270	55.6
		4	0.250		0.0191	0.0095	0.0175	55.4
		5	0.250		0.0222	0.0175	0.0397	54.8
		6	0.250		0.0429	0.0286	0.0460	58.0
2513	사가정로72길12	1	0.375	64	0.0127	0.0222	0.0238	62.0
		2	0.375		0.0159	0.0222	0.0365	61.6
		3	0.250		0.0127	0.0079	0.0143	61.0
		4	0.250		-	-	-	-
		5	0.250		0.0159	0.0143	0.0254	62.0
		6	0.250		0.0159	0.0191	0.0238	61.6
3152	면목7동1085-5 (콩나물국밥)	1	0.375	70	0.0111	0.0095	0.0159	62.0
		2	0.375		0.0127	0.0079	0.0254	59.4
		3	0.250		-	-	-	-
		4	0.250		-	-	-	-
		5	0.250		0.0111	0.0095	0.0159	58.0
		6	0.250		0.0111	0.0095	0.0175	60.8

6.2. 진동속도

지반진동 측정결과 단일성분의 3 방향 성분³¹⁾ 중 Longitudinal component(진행방향)이 가장 우세하게 나타났으며 측정결과 한신아파트①.②. 한신아파트경비실 0.0191~0.1160cm/sec 사가정로72길 12 0.0143~0.0365cm/sec, 면목7동1085-5(콩나물국밥) 0.0159~0.0254cm/sec의 진동수준을 보였다.

DIN 4150의 최대입자속도(Peak particle velocity)와 주파수(Frequency) 관계 그래프로 피해 영향범위를 도시하면 (Fig.6.1)과 같고 이는 보안물건의 피해한계를 고려할 때 3 방향(TVL)의 각각 단일성분의 값은 주파수 범위에 따라 달라질 수 있는데 비교적 저주파수 대에서는 최대 입자 속도가 낮게 나타나더라도 대상물에 피해를 줄 수 있다는 의미를 포함하고 있다. 지발당 최대 장약량은 계측위치별 최대 입자 속도(Peak particle velocity)이 나타나는 시간대의 장약량으로 해석하였다.

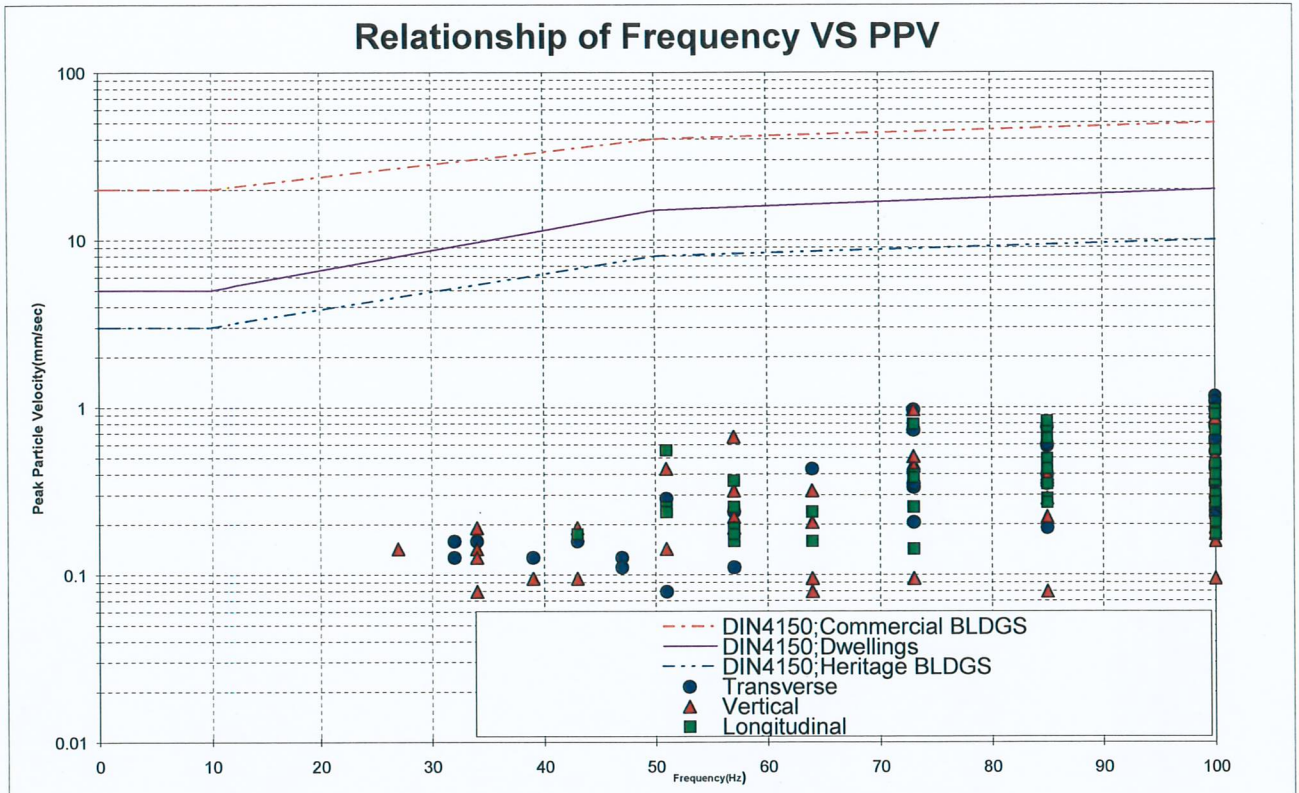
6.3. 발파소음

발파소음 측정결과 한신아파트①.②. 한신아파트경비실 50.0~64.2.8dB(A) 사가정로72길 12 61.0~62.0dB(A), 면목7동1085-5(콩나물국밥) 58.0~59.4dB(A)의 소음수준을 보였다.

6.4. 주파수 대역

단일성분의 우월 성분 최대 입자속도대 주 주파수 발생범위는 30~> 100Hz대역으로 볼 수 있는데 이는 전형적인 발파진동으로 생성되는 진동주파수로서 거리의 특성상 비교적 근거리 조건에서 우세한 고주파수 진동 파형은 암반 중에서 쉽게 소멸되고 원거리에서 우세한 저주파수 파형이 Pick up Sensor에 도달된 것으로 판단된다.

주31) Three component : Transverse component(접성방향), Vertical component(수직방향), Longitudinal component(진행방향)



(Fig.6.1) 최대입자속도(PPV)대 주파수(Hz)의 관계

6.5. 해당지역 발파진동식 결정

지반을 통하여 3차원으로 운동하는 발파진동은 3방향의 단일성분(T, V, L) 중 어느 한 성분이 우월하게 나타나며, 특정한 시간대에서 단일성분의 최대 값으로 기록된다. 본 현장에서는 단일성분의 최대값을 적용하여 해당지역 발파진동식으로 결정하였고 최대 입자 속도는 cm/sec 척도로 환산하여 해석하였다. 최대 입자속도와 환산거리(D/W^b)의 관계는 선형 회귀분석(Linear regression analysis)으로 통계 처리하여 기울기(n)와 절편(logK)으로부터 K, n 값을 구하였고 장약지수(b)는 평방근 환산거리(Square root scaled distance)와 입방근 환산거리(Cube root scaled distance)의 회귀선(Regression line)을 구분하고 95%의 신뢰구간을 택하였다. 뉴마이트의 결정계수(Coefficient of determination)는 장약지수(b)가 95%의 평방근(입방근) 환산거리 일 때 0.87(0.82)의 회귀직선 기여율을 보였으며 뉴화이

넥카의 결정계수(Coefficient of determination)는 장약지수(b)가 95%의 평방근(입방근) 환산거리 일 때 0.86(0.84)의 회귀직선 기여율을 보였다.

뉴마이트 $r^2 = 0.77$ $v_{95\%} = 891.531 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.978}$ 식(6.1)

뉴마이트 $r^2 = 0.68$ $V_{95\%} = 965.143 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.064}$ 식(6.2)

뉴화이넥카 $r^2 = 0.74$ $v_{95\%} = 15.990 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.166}$ 식(6.3)

뉴화이넥카 $r^2 = 0.71$ $V_{95\%} = 11.930 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.170}$ 식(6.4)

이 때, $V_{95\%}$ 의 입지상수 K값은 95% 신뢰구간을 의미하며, SRSD · CRSD의 단위는 각각 $\frac{m}{\sqrt{kg}}$ · $\frac{m}{\sqrt[3]{kg}}$ 이다.

(Table 6.4) 발파진동상수

지반진동속도 (cm/sec)		입지상수(K)	장약지수(b)	감쇠지수(-n)
뉴마이트	$V_{95\%}$	891.531	$\frac{1}{2}$	1.978
	$V_{95\%}$	965.143	$\frac{1}{3}$	2.064
뉴화이넥스	$V_{95\%}$	15.990	$\frac{1}{2}$	1.166
	$V_{95\%}$	11.930	$\frac{1}{3}$	1.170

회귀분석을 위한 측정자료는 30개³²⁾이상일 경우는 표준정규분포³³⁾에 의한 통계적 추론으로 해석하고 그 이하인 경우는 t분포³⁴⁾를 적용하여야 한다. 당 현장 회귀분석자료는 뉴마이트 19개, 뉴화이넥스 14개로 t분포를 적용하여 통계처리 하였다.

환산거리(Scaled distance)와 단일성분의 최대 값(Peak particle velocity) 관계를 그래프로 도시하면 (Fig.6.2~6.5)와 같다.

주32) 유용한 근사값을 얻기위한 표본은 표준정규분포를 따르며, 대체로 $n > 30$ 이면 근사정도를 만족

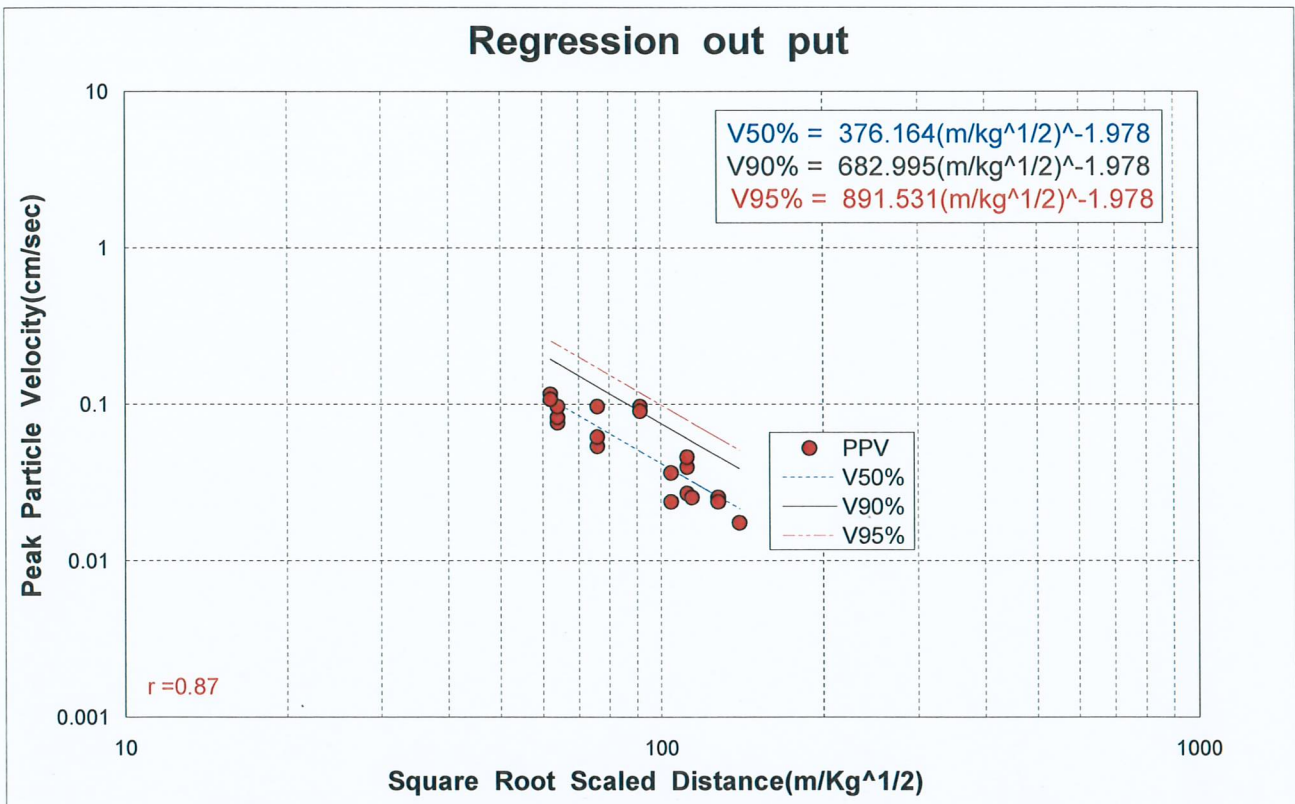
주33) $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 일 때 확률변수 X가 평균 μ , 표준편차 σ 인 정규분포

$Z \sim N(0, 1)$ 일 때 $P\{Z > z_\alpha\} = \alpha$ 를 만족하는 z_α 의 값을 표준정규분포의 100(1- α)% 백분위수라 정의

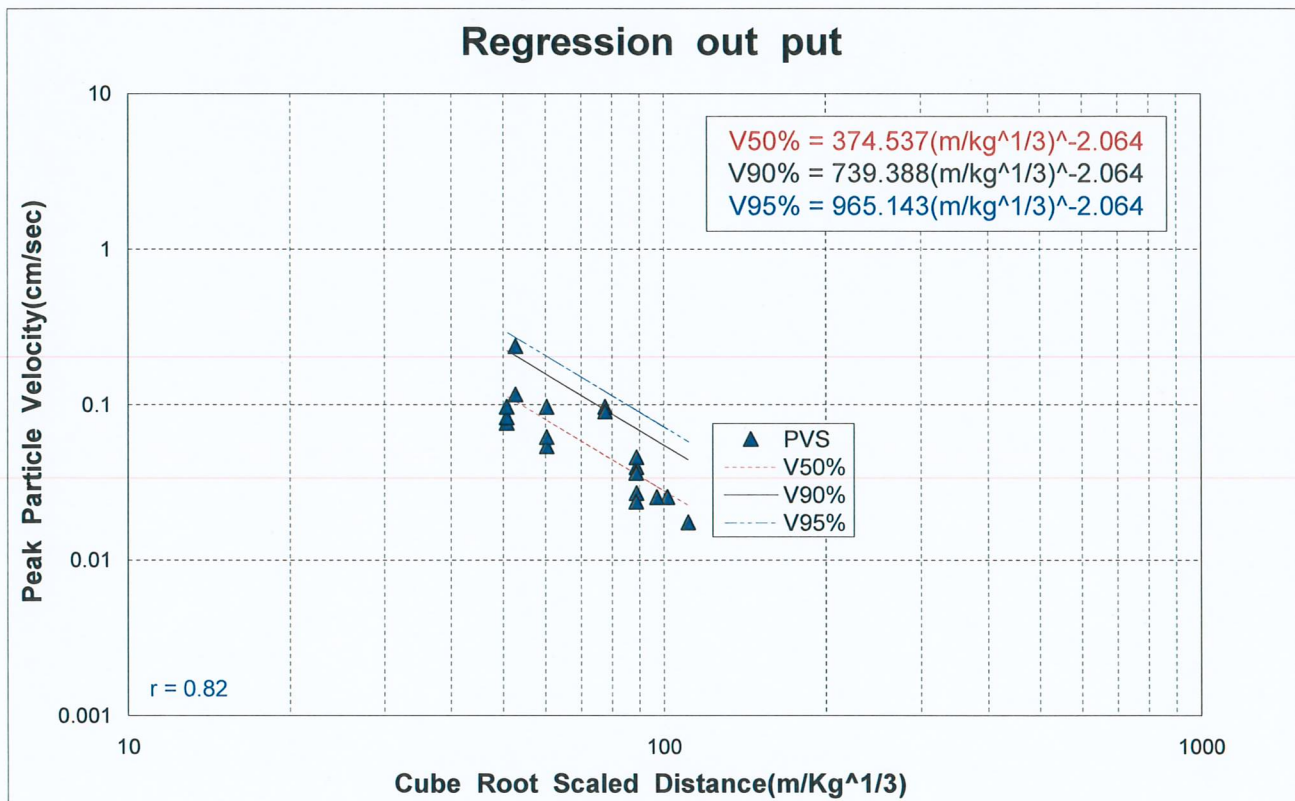
주34) $T = \frac{Z}{\sqrt{V/k}}$, $T \sim t(k)$, 자유도 k인 t분포

Z : 표준정규분포 $N(0, 1)$ 을 따르는 확률변수, V : 카이제곱 분포의 확률변수

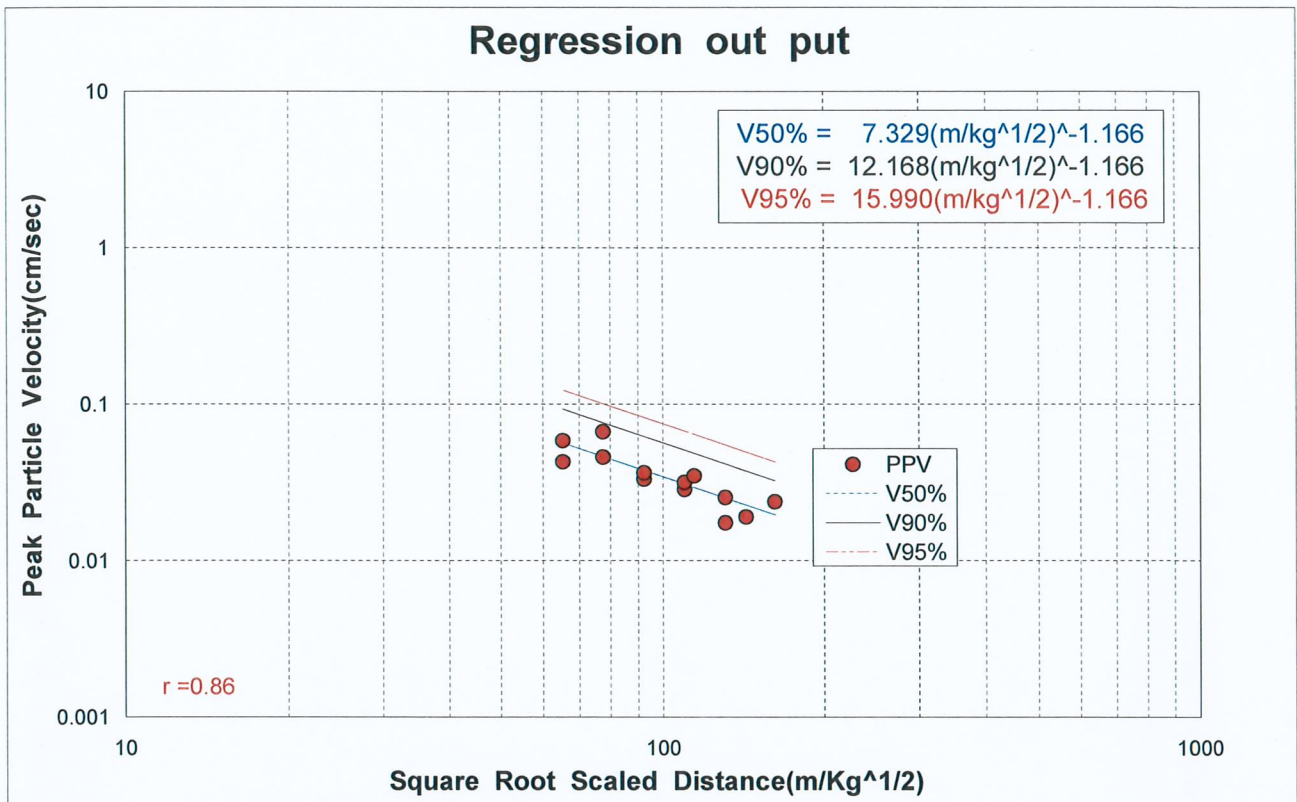
$P\{T \geq t(k, \alpha)\} = \alpha$ 가 성립하는 $t(k, \alpha)$ 값을 자유도 k인 t 분포의 100(1- α)% 백분위 수라 정의



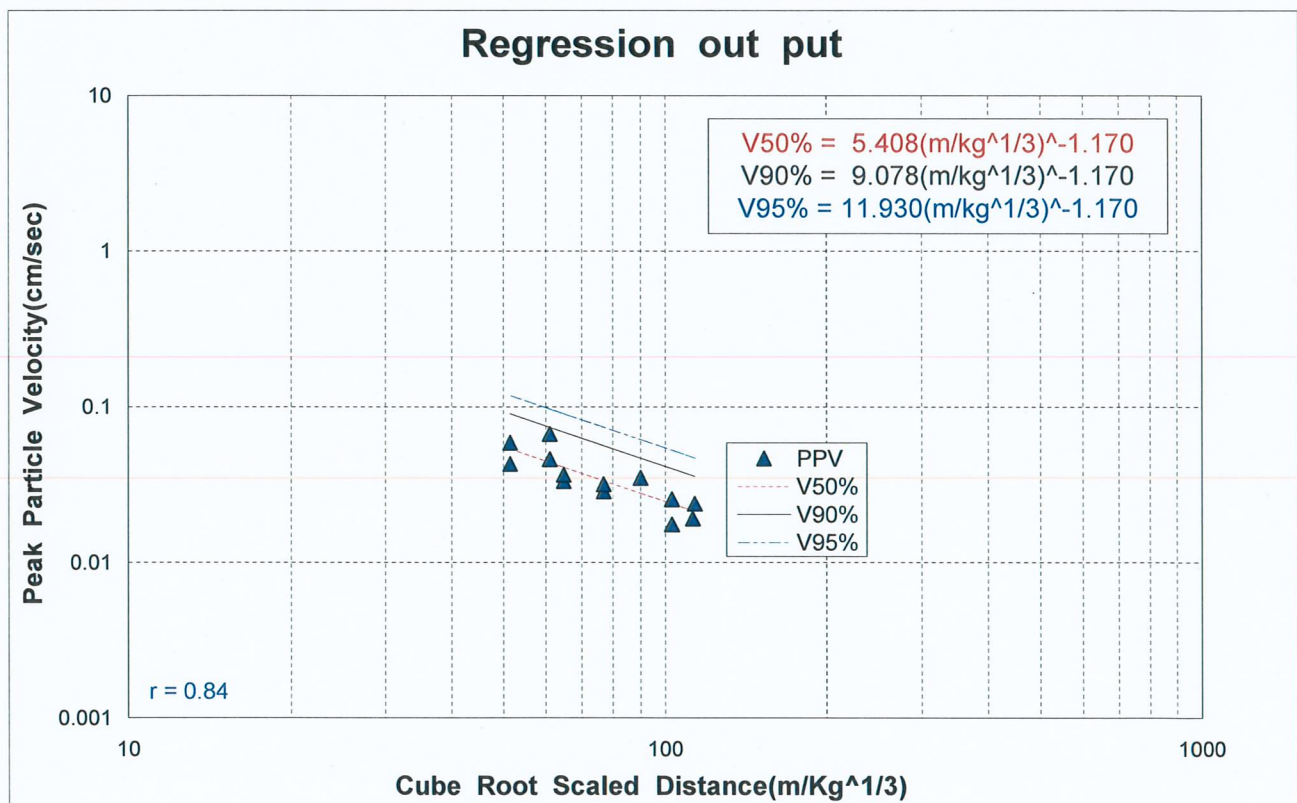
(Fig.6.2) 환산거리와 단일성분의 최대 값(Peak particle velocity)의 관계(SRSD)(뉴마이트)



(Fig.6.3) 환산거리와 단일성분의 최대 값(Peak particle velocity)의 관계(CRSD)(뉴마이트)



(Fig.6.4) 환산거리와 단일성분의 최대 값(Peak particle velocity)의 관계(SRSD)(뉴화이넥카)



(Fig.6.5) 환산거리와 단일성분의 최대 값(Peak particle velocity)의 관계(CRSD)(뉴화이넥카)

6.6. 해당지역 지발당 장약량

해당지역 최종 발파진동식(6.1~6.4)를 근거로 할 때 뉴마이트의 지반진동속도 0.3cm/sec에 해당되는 신뢰도 95% 환산거리(95% SRSD)는 평방근(입방근) 환산거리가 56.9717(50.0552)이며 뉴화이백카의 지반진동속도 0.3cm/sec에 해당되는 신뢰도 95% 환산거리(95% SRSD)는 평방근(입방근) 환산거리가 30.3043(23.2591)이다. 이때 지발당 장약량과 거리는 반비례 관계가 성립하므로 동일한 진동속도 조건에서 환산거리가 커질수록 안전율이 증가된다. 환산거리가 구해지면 거리별 허용할 수 있는 지발당 장약량은 식(6.5~6.6)을 적용하여 쉽게 산출할 수 있으며, 그 결과는 (Table 6.5~6.6)과 같다.

$$SRSD = \frac{D}{\sqrt{w}} : w = \left(\frac{D}{SRSD} \right)^2 \dots\dots\dots \text{식(6.5)}$$

$$CRSD = \frac{D}{\sqrt[3]{kg}} : W = \left(\frac{D}{CRSD} \right)^3 \dots\dots\dots \text{식(6.6)}$$

따라서, (Table 6.5~6.6)의 거리별 지발당 장약량을 발파작업시 적용함으로써 안전시공에 만전을 기할 수 있다.

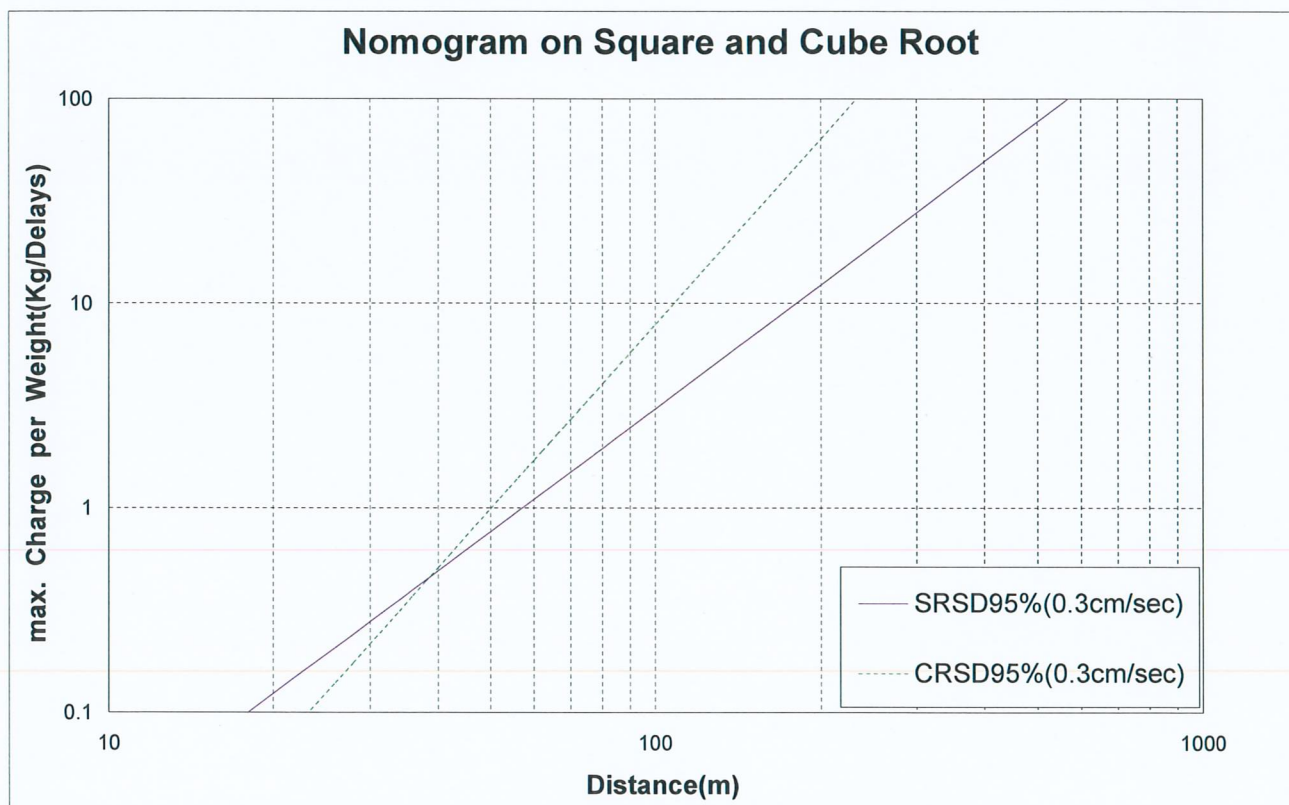
(Table 6.5) 거리별 지발당 허용장약량(뉴마이트)

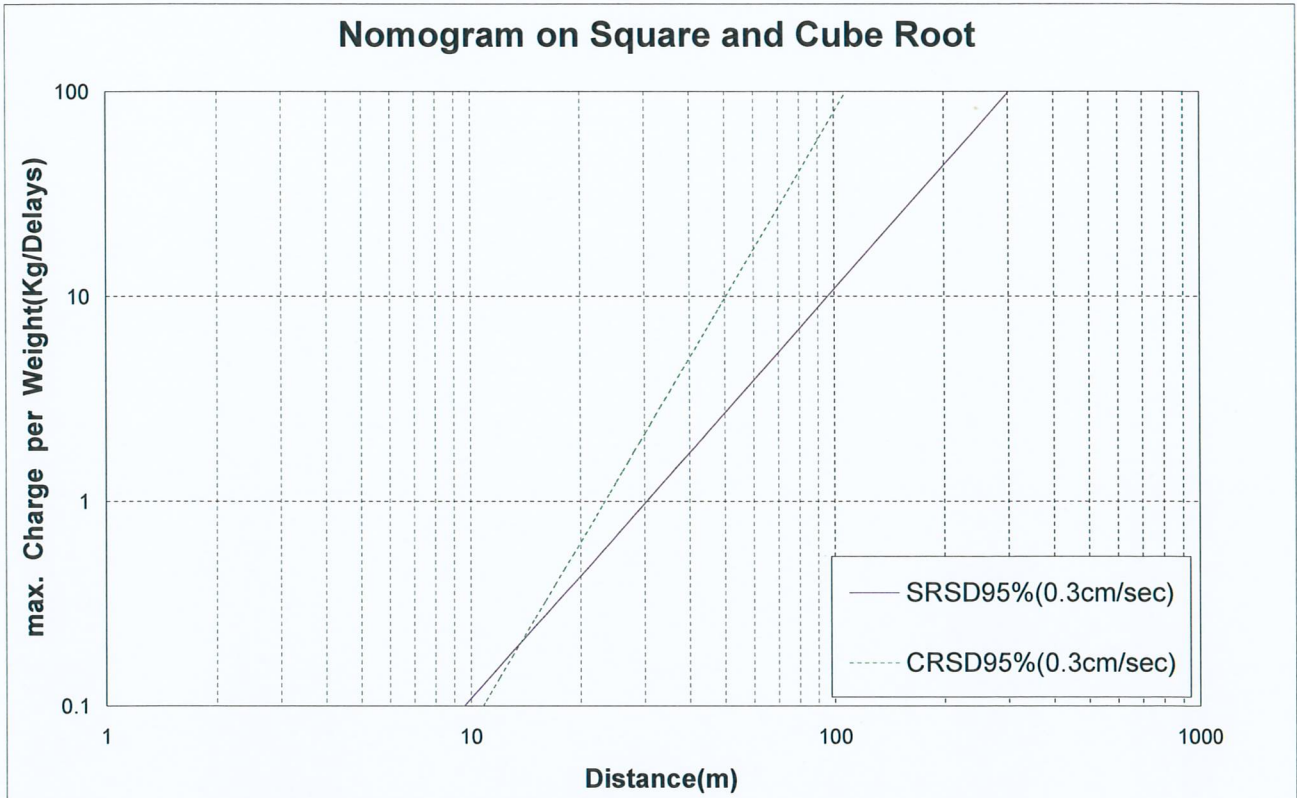
거리 (m)	지발당 장약량(kg/delays)		거리 (m)	지발당 장약량(kg/delays)	
	0.3cm/sec			0.3cm/sec	
10	0.008	$V_{95\%} = 965.143 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.064}$ 적용	52	0.833	$V_{95\%} = 891.531 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.978}$ 적용
12	0.014		54	0.898	
14	0.022		56	0.966	
16	0.033		58	1.036	
18	0.047		60	1.109	
20	0.064		62	1.184	
22	0.085		64	1.265	
24	0.110		65.8	1.342	
26	0.140		68	1.425	
28	0.175		70	1.510	
30	0.215		72	1.597	
32	0.261		74	1.687	
34	0.313		76	1.780	
36	0.372		78	1.874	
38.6	0.459	80	1.972		
40	0.493	82	2.072		
42	0.543	84	2.174		
44	0.596	86	2.279		
46	0.652	88	2.386		
48	0.710	90	2.496		
50	0.770	92	2.608		

(Table 6.6) 거리별 지발당 허용장약량(뉴화이넥카)

거리 (m)	지발당 장약량(kg/delays)		거리 (m)	지발당 장약량(kg/delays)	
	0.3cm/sec			0.3cm/sec	
1	0.000	$V_{95\%} = 11.930 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.170}$ 적용	22	0.527	$V_{95\%} = 15.990 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.166}$ 적용
2	0.001		23	0.576	
3	0.002		24	0.627	
4	0.005		25	0.681	
5	0.010		26	0.736	
6	0.017		27	0.794	
7	0.027		28	0.854	
8	0.041		29	0.916	
9	0.058		30	0.980	
10	0.079		31	1.046	
11	0.106		32	1.115	
12	0.137		33	1.186	
13.7	0.204		34	1.259	
14	0.213	$V_{95\%} = 15.990 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.166}$ 적용	35	1.334	
15	0.245		36	1.411	
16	0.279		37	1.491	
17	0.315		38	1.572	
18	0.353		39	1.656	
19	0.393		40	1.742	
20	0.436		41	1.830	
21	0.480		42	1.921	

폭원으로부터 거리(Distance)와 지발당 최대장약량(max. Charge per weight)의 관계를 Nomogram으로 도시하면 (Fig.6.6~6.7)와 같고 진동허용기준이 0.3 cm/sec일 때 뉴마이트는 38.6m에서 환산거리에 관계없이 지발당 장약량이 0.459 kg/delays으로 동일하며 38.6m이하 거리에서는 입방근 환산거리, 그 이상 거리에서는 평방근 환산거리가 안전율이 커짐을 의미하며 뉴화이넥카는 13.7m에서 환산거리에 관계없이 지발당 장약량이 0.204 kg/delays으로 동일하며 13.7m이하 거리에서는 입방근 환산거리, 그 이상 거리에서는 평방근 환산거리가 안전율이 커짐을 의미한다. 이와 같이 발파진동 허용기준치에 해당되는 지발당 장약량은 보수적인 값을 적용할 때 안전율을 크게 할 수 있다.





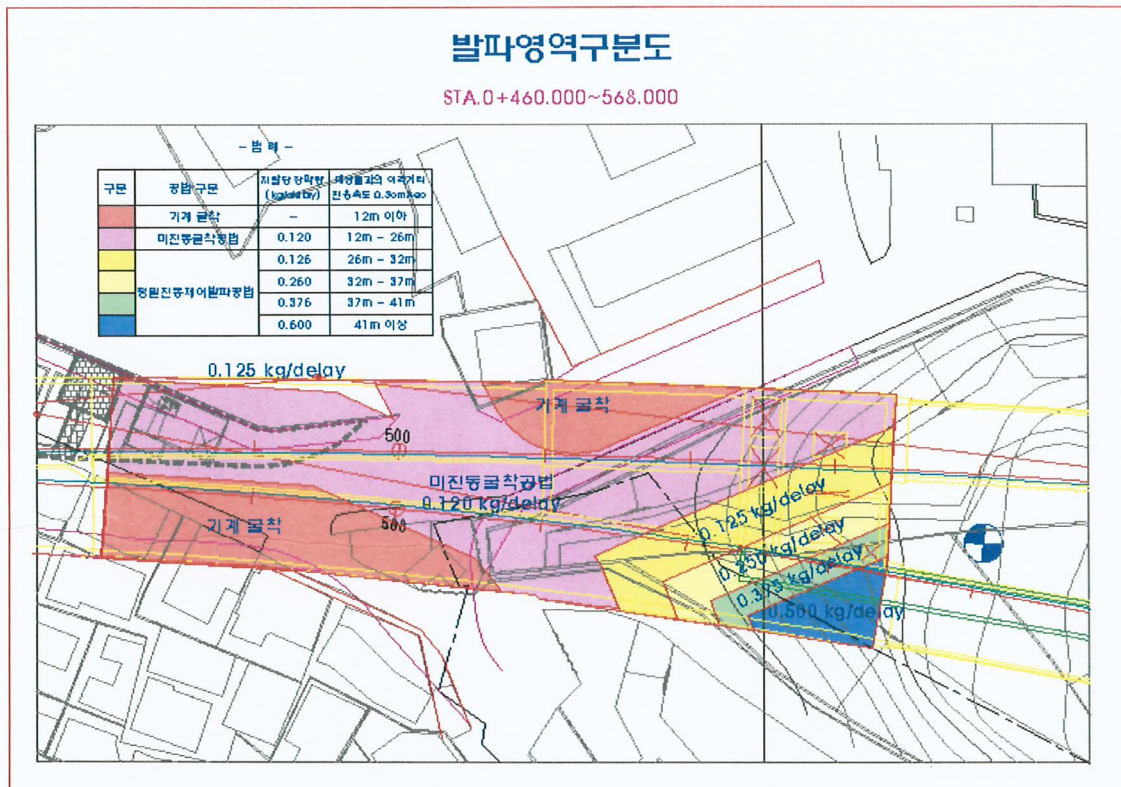
(Fig.6.7) 거리와 지발당 장약량의 관계(뉴화이넥카)

6.7. 해당지역 발파공법 검토

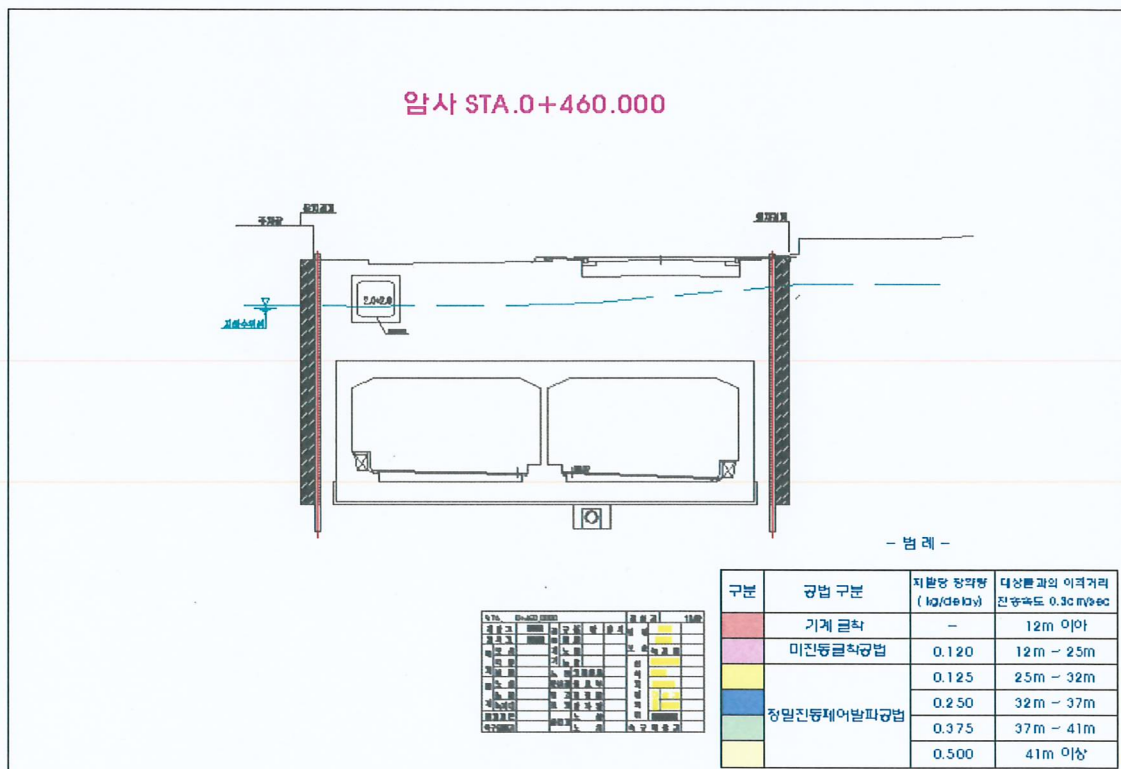
회귀분석결과에 의한 지발당 장약량 산출에 따른 보안물건을 중심으로 한 이격거리별 발파공법의 구분은 다음과 같다.

(Table 6.7) 시험발파 결과에 의한 공법구분

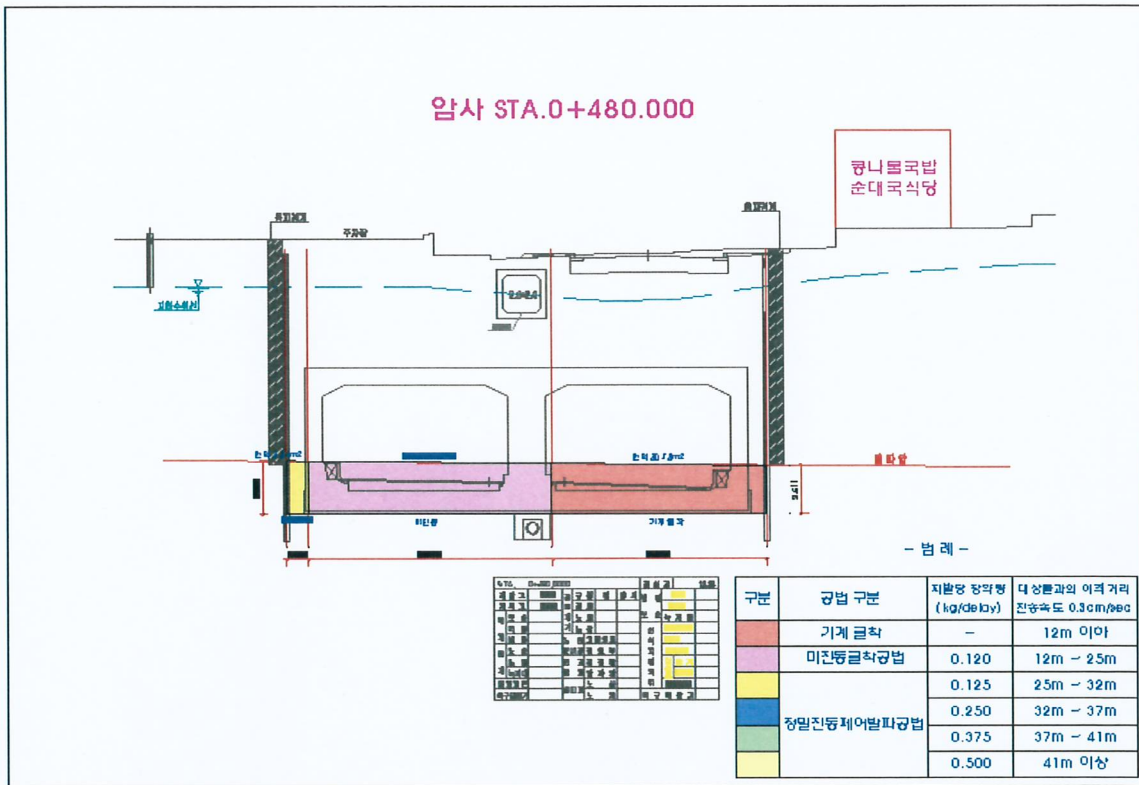
발파공법	지발당장약량(Kg)	적용거리(m)
		0.3cm/sec
기계굴착공법	-	12 이하
미진동굴착공법	0.120	12 ~ 25
정밀진동제어발파	0.125	25 ~ 32
	0.250	32 ~ 37
	0.375	37 ~ 41
	0.500	41 이상



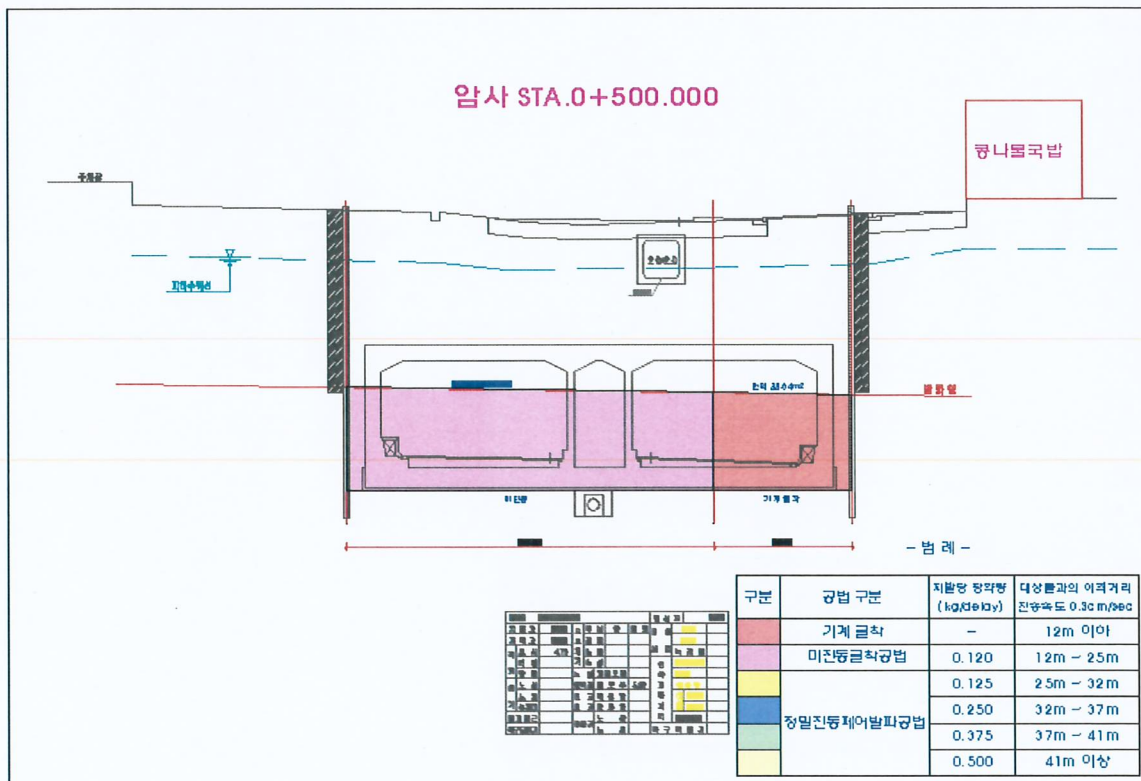
(Fig.6.8) 발파영역구분도 (평면)



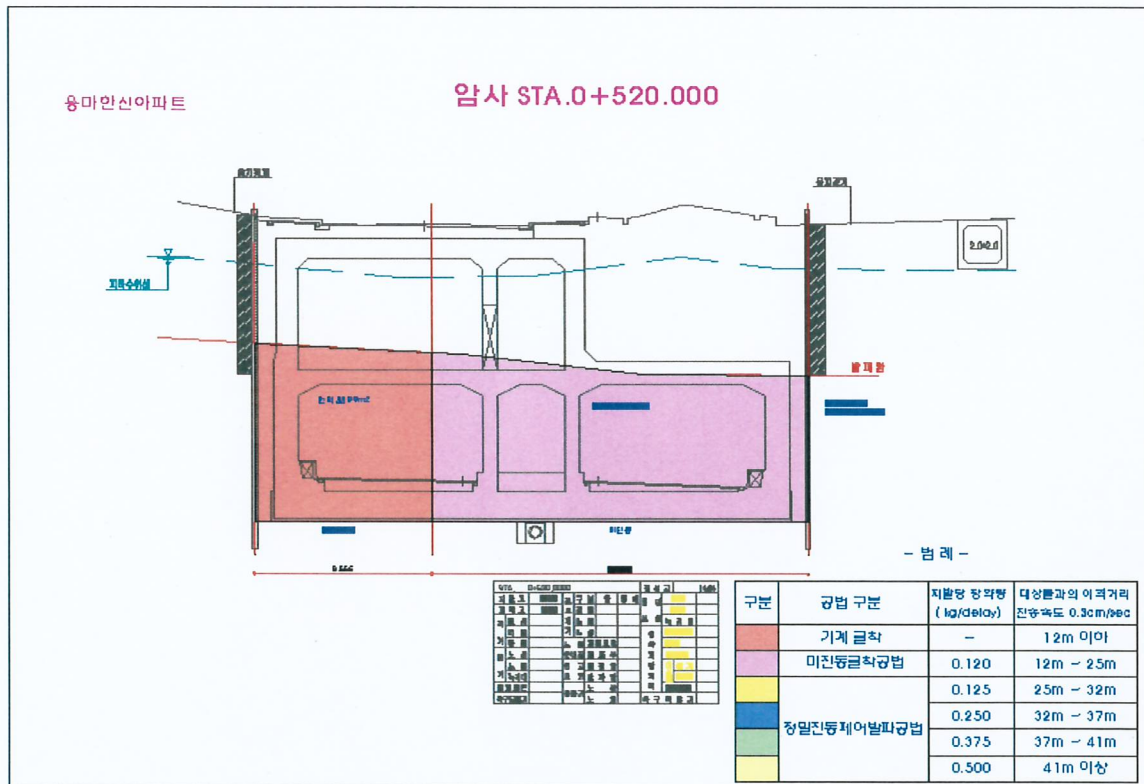
(Fig.6.9) 발파영역구분도 (단면 STA. 0+460km) 지하차도구간



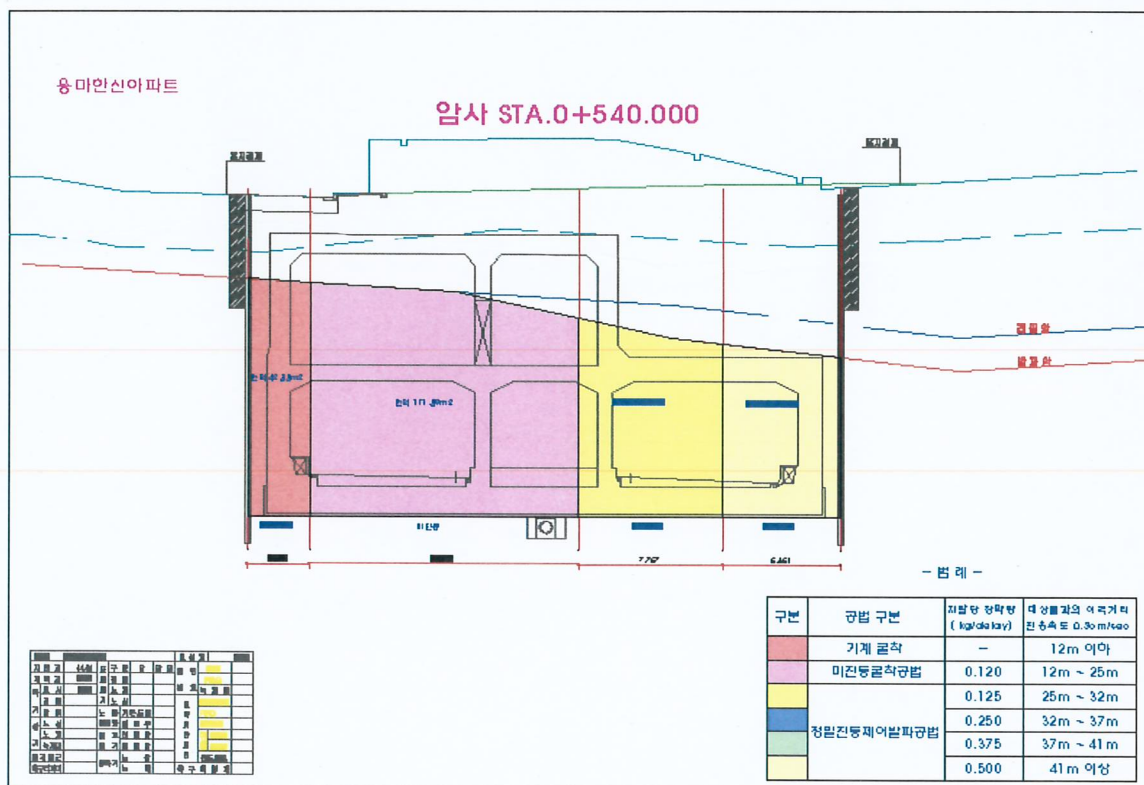
(Fig.6.10) 발파영역구분도 (단면 STA. 0+480km) 지하차도구간



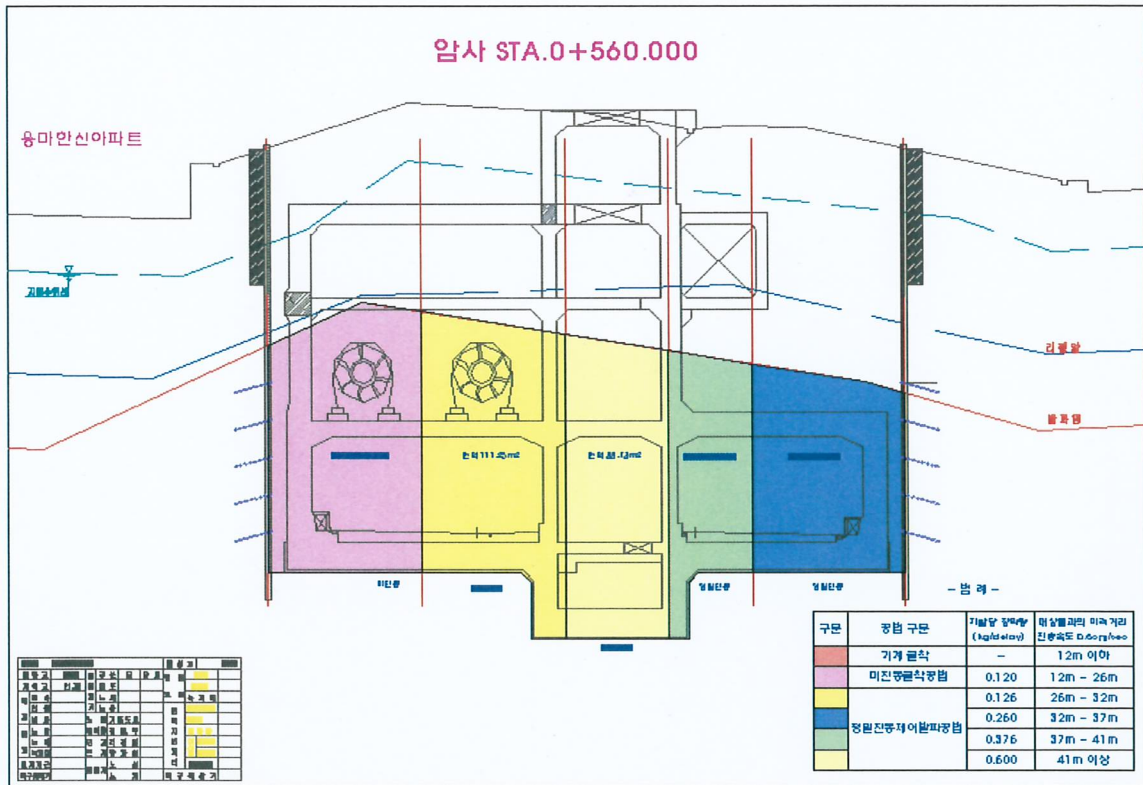
(Fig.6.11) 발파영역구분도 (단면 STA. 0+500km) 지하차도구간



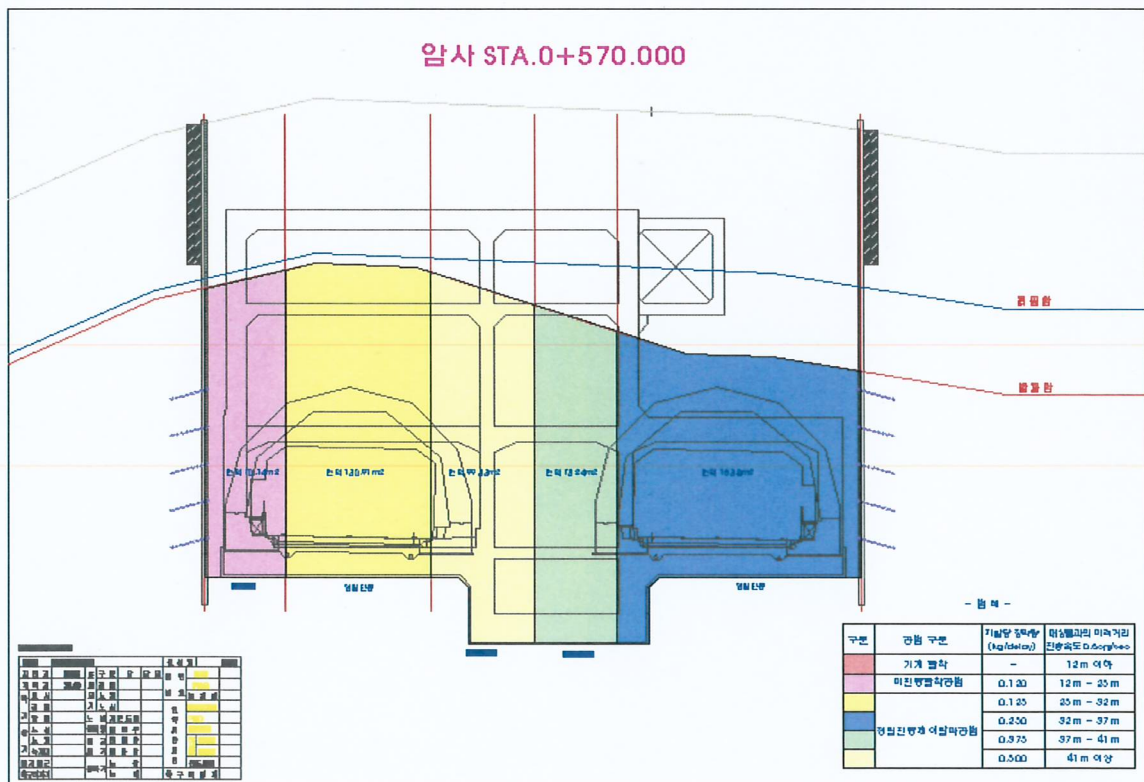
(Fig.6.12) 발파영역구분도 (단면 STA. 0+520km) 지하차도구간



(Fig.6.13) 발파영역구분도 (단면 STA. 0+540km) 환기소구간



(Fig.6.14) 발파영역구분도 (단면 STA. 0+560km) 환기소구간



(Fig.6.15) 발파영역구분도 (단면 STA. 0+570km) 환기소구간

7. 지반진동 및 폭풍압 경감대책

발파작업은 폭약의 폭발에너지를 이용하여 암반 등을 파괴하는 목적으로 수행되므로 진동 및 폭풍압을 완전히 제거할 수는 없다. 일반적으로 장약량을 감소시키면 발파진동은 작아지나 발파효과가 떨어지므로 발파효과를 충분히 유지하면서 발파진동을 억제하여야 한다.

발파진동은 암반을 통해 탄성파의 형태로 전파되어 주변구조물 등에 도달하므로 매질 특성에 따른 파동의 전파 특성을 파악하고 영향범위와 피해수준을 고찰하여 현장조건 및 발파 설계 변수들의 영향을 검토한 경감대책이 수립되어야 하는데 (Table 7.1)과 같이 발파진동의 크기를 결정하는 요소를 고려하여야 한다.

(Table 7.1) 발파진동 영향요소

입지조건	발파조건
<ul style="list-style-type: none"> - 발파지점과 주변 구조물의 기하학적 형태 - 해당지역의 지질 및 암반상태, 지형 등에 의해 결정되는 요소 	<ul style="list-style-type: none"> - 지발당 장약량 - 폭원과 측점 간의 거리 - 화약의 종류 및 특성 - 기폭방법 - 전색(Tamping)의 상태 - 폭약의 장약집중도 - 자유면 수

① 장약량 조절 및 분할발파 방법 : 발파진동이 주변구조물 등에 피해가 예상되는 경우 허용기준치 이내의 안전수준에서 발파작업이 이루어 질 수 있도록 단위체적당 장약량(비장약량, Specific charge) 사용을 준수하며, 진동을 더 감소시켜야 할 경우 발파당 채석량을 조절하여야 한다.

② MS 기폭시차 : 제발발파의 경우에는 다수의 발파공을 동시에 기폭 시키므로 각 발파공에서 폭발위력이 중첩되어 발파효과는 높으나 지반진동이 커진다. 이와 달리 짧은 MS시차

의 뇌관을 사용할 경우 진동의 상호간섭효과로 발파효과가 저하되지 않고 진동 감소효과를 얻을 수 있다.

③ 화약류 선택 : 발파진동은 충격파의 동적파괴에 의해 주변구조물 등에 영향을 미치므로 지반진동이 예상되는 경우 제품에 따라 동적파괴 효과가 적은 저비중, 저폭속폭약(상품명 : New Emulite) 사용은 바람직하다. 서울 지하철(3, 4호선)건설 당시 폭약 종류에 따른 진동의 크기를 Dynamite를 1로 하였을 때 함수폭약은 0.8, 초안폭약은 0.65로 나타났다.

④ 전파경로 차단방법 : 장약공 내 폭약의 폭발로 발생하는 폭풍압은 암반변형으로 인하여 공기 중을 전파하므로 현장 외곽 차음막 설치는 직접 차단 효과가 대단히 양호하다.

⑤ 음원대책 방법 : 짧은 시차의 MS 지발뇌관을 이용하여 대기 중으로 발생하는 충격파를 감소시킬 수 있다.

⑥ 불완전 전색에 의한 공발(Blow out)발생을 최대한 억제하여야 한다. 특히, 수공일 경우에는 장약 전 반드시 공 내 수분을 모두 제거하여야 한다.

⑦ 불연속면, 파쇄대가 존재할 경우 이들 방향을 고려하여 국부적인 장약량 조절이 필요하며, 폭발가스가 새어 폭풍압의 발생 원인이 되므로 전색 효과가 좋은 전색물을 선택한다.

8. 비산

8.1. 비산발생의 원인

암석편의 비산은 주로 노천의 벤치발파나 소할발파 등에서 자주 발생하는 재해이다. 화약이 장약공 내에서 폭발하면 그 충격압에 의해 장약공 주위의 암석은 분쇄 또는 파쇄되어 균열이 발생하고 지반중으로 전파된 응력파는 자유면에서 반사되면서 홉킨슨(Hopkinson)효과에 의해 암석을 파괴하고 이후 계속되는 고압의 가스압은 파쇄된 암석을 이동시키고, 발파에 의한 균열이나 암반내에 존재하고 있던 불연속면을 통하여 고속으로 분출된다. 이때 가스의 압력과 분출속도에 의해 암석편은 일정 초기속도로 공중으로 비산되며, 이 비산되는 암편을 비석(飛石)이라 한다.

비산발생 주 요인은 Table 8.1처럼 여러 가지로 나눌 수 있다

(Table 8.1) 비산 발생의 주요인과 대책

순번	주 요 인	대 책
①	암반내에 단층, 균열, 연약층의 암석 강도저하	현장 암반상태 주시관찰 현장여건 부합시공
②	천공의 오차로 인한 국부적인 장약공 집중현상	천공 간격 정밀시공
③	뇌관 점화순서에 의한 지나친 기폭시차 지연	지발시차100m/s이하 뇌관사용
④	과장약에 의한 충격에너지 효과를 초과하여 자유면 전면으로 암편 비산	표준장약량 시공
⑤	불안전 전색에 의한 장약공 입구의 가스분출	완전전색 및 전색확인 시공
⑥	암반내 불연속면·파쇄대 존재로 연약면 가스 분출	현장 암반상태 주시관찰 현장여건 부합시공
⑦	약장약에 의한 공발(BLow Out) 원인이 공구방향으로 암편비산	표준장약량 시공

8.2. 비석의 원인과 대책

폭약의 폭발에 의해 암석이 불규칙하게 튀어나가는 현상을 비산(Throw)이라 하고 비산된 암을 비석(Fly rock)이라 정의할 수 있다.

폭약이 장약공 내에서 폭발하면 그 충격압에 의해 주위 암석은 분쇄·파쇄되어 균열이 발생되고 지반 중으로 전파되는 응력파는 자유면으로 반사되면서 암석을 파괴시킨다. 이후 발생된 가스압은 파쇄 암석을 이동시키고 균열 틈이나 발파공·불연속면을 따라 분출될 때 비교적 작은 암편들이 일정한 초속도로 먼 거리까지 비산되는데 이 때, 응력파에 의한 비산의 영향요소는 크지 않으며, 폭발가스 압력과 가스의 분출이 중요한 영향을 미치게 된다. 균질암반일 경우 식(8.1)에 의해 암반 내의 P파속도와 응력파에 의한 최대 변형률을 구하여 암석의 비산 속도를 예측³⁵⁾할 수 있다.

$$V = 2C\varepsilon \quad \text{식(8.1)}$$

C ; P파속도

ε ; 응력파에 의한 최대변형률

파쇄 암석이 비산할 때 공기저항을 무시할 경우 초 속도를 알고 있으면 식(8.2)에 의해 비산 거리를 쉽게 구할 수 있으며, θ 가 45° 일 때 수평거리는 최대가 되며, 식(8.3)이 된다.

$$\ell = \left(\frac{V_0^2}{g} \right) \times \sin 2\theta \quad \text{식(8.2)}$$

ℓ ; 수평거리(m)

V_0 ; 초속도(m/sec)

θ ; 사 각($^\circ$)

g ; 중력가속도(9.8 m/sec²)

주35) Petkof, 1961

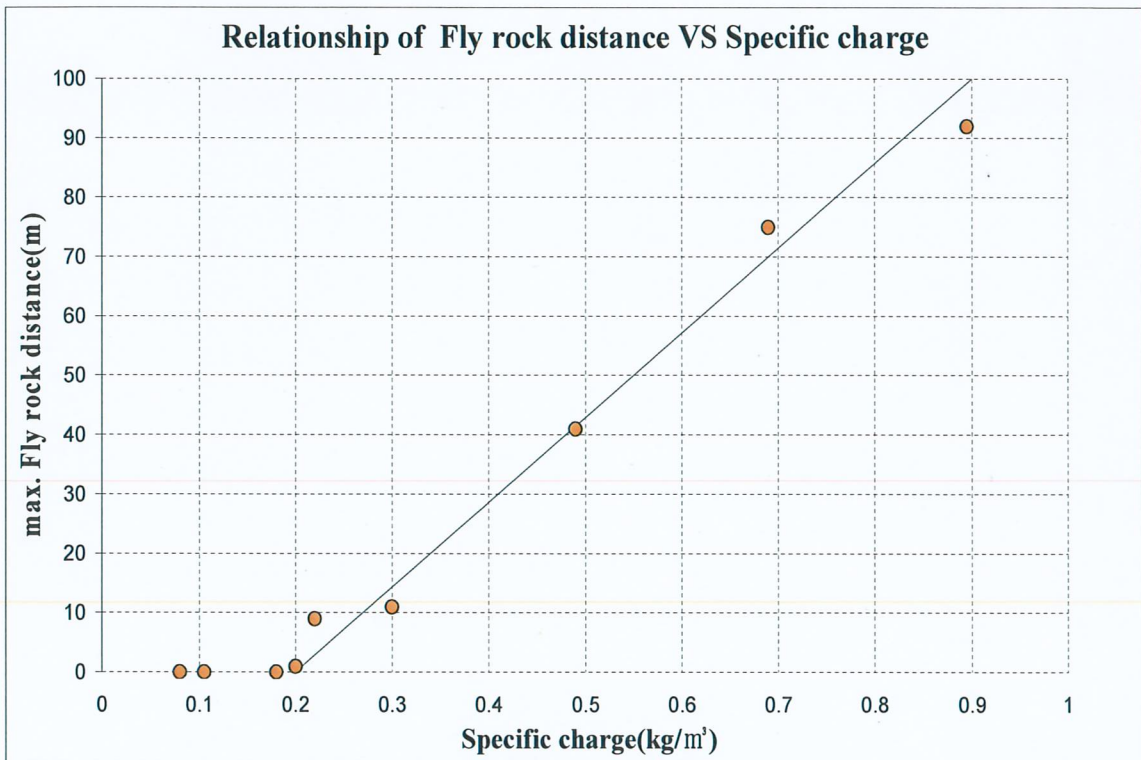
$$\ell_{max.} = \left(\frac{V_0^2}{g} \right) \dots\dots\dots \text{식(8.3)}$$

A. Persson³⁶⁾는 천공경 $\Phi 25$ mm 벤치발파에 의한 비석을 고속 촬영으로 관찰하고 장약량과 암편의 최대 비산거리를 (Fig.8.1)과 같이 제시하였으며, 이는 식(7.4)로부터 추정할 수 있는데 단위 체적당 장약량은 0.2 kg/m^3 이 한계이고 한계치 이하일 때에는 거의 비석이 발생되지 않음을 의미한다.

$$\ell = 143g - 28 \dots\dots\dots \text{식(8.4)}$$

ℓ ; 최대 비산거리(m)

g ; 단위체적당 장약량(kg/m^3)



(Fig.8.1) 최대 비산거리(A. Persson)

본 현장의 발파작업으로 인한 공해요인 중 비석은 치명적인 원인이 되므로 다음의 원인

주36) L. Lundborg : Keeping the Lid on flyrock in open-pit Blasting, Engineering & Mining Journal

요소를 제거하여야 한다.

8.2.1. 비석발생 원인

- ① 단층, 균열, 연약층의 암석 강도저하
- ② 천공의 오차로 인한 국부적인 장약공 집중현상
- ③ 점화순서에 의한 지나친 기폭시차 지연
- ④ 과장약에 의한 충격에너지 효과를 초과하여 자유면 전면으로 암편 비산
- ⑤ 불완전 전색에 의한 장약공 입구의 가스분출
- ⑥ 암반내 불연속면·파쇄대 존재로 연약면 가스 분출
- ⑦ 약장약에 의한 공발(Blow out) 원인이 공구방향으로 암편 비산

8.2.2. 비석 방지대책

① 공구부 직접방호 : 공구부 또는 비석을 방지 하고자하는 방향의 암반을 방호용 매트 (Blast mat)로 직접 방호함이 가장 효과적인 방법이다. 광역의 발파영역일 경우에는 적정 비장약량으로 비석을 방지할 수 있다.

② 장약량 조절 : 암석에 균열이 많거나 벤치가 높을 경우 비석의 위험이 크며, 과장약은 지나친 파쇄효과, 약장약은 공발(Blow out)의 원인이 되므로 시험발파 결과 단위 체적당 장약량(비장약량·Specific charge·kg/m³)을 준용하여야 한다.

③ 천공의 오차로 인한 국부적인 장약공 집중을 유발하므로 천공의 정확성을 유지하여야 한다.

④ 암반 내 단층, 불연속면, 연약층의 파쇄대가 존재하여 강도가 급격히 변화하는 경우 연약면을 따라 가스분출로 암편이 비산될 수 있으므로 국부적으로 이들 방향을 고려하여

천공하며, 최소저항선의 방향은 피해 대상물과 일치되지 않도록 하여야 한다.

⑤ 불완전 전색에 의하여 암석이 파괴하지 못하고 장약공 입구로 암편이 비산되어 비석의 원인이 되므로 완전전색을 하여 이의 원인요소를 제거하여야 한다.

⑥ 지발 기폭시차 : 지나치게 지연된 기폭시차는 비석의 원인이 된다. 즉, MS 기폭 시차의 뇌관은 초시간격이 짧기 때문에 전열발파에 의한 파쇄암석이 비상 중이며, 다음 열 발파시 이것이 Curtain 역할³⁷⁾을 하여 비석을 억제한다. 지발시차(100MS이상)가 너무 길면 전열발파에 의한 암석이동이 이미 종료되었기 때문에 다음열의 방호벽 기대효과는 어려워 지므로 제품에 따라 20~25MS 기폭시차 뇌관 사용을 제안한다.

⑦ 발파공 내에 암분 삽입 등에 의한 거칠음 정도가 심하여 제대로 장전하지 못할 경우 비석발생의 근본적인 원인이 되므로 공 내 청소를 충분히 한 후 장약한다.

⑧ 가능한 천공각은 70° 이상을 유지하여야 파쇄 효율성을 향상시킬 수 있으며, 특히, 45. 이하 예각 천공에 의한 발파작업을 금하고 집중장약이 되지 않도록 한다.

주37) Swedish Blasting Technique, SPI, Gothenburg, Sweden, Gustafsson

9. 작업원의 안전대책

9.1. 복장 및 태도

- ① 안전모를 반드시 착용하고 턱끈을 맨다
- ② 작업복은 단정하게 입고 회사에서 지급한 안전장구를 반드시 착용한다.
- ③ 음주한 자는 발파작업에 임할 수 없다.
- ④ 작업장내에서는 뛰어서는 안된다.

9.2. 화약류의 취급

- ① 화약류의 취급은 기 선임된 화약류관리보안책임자의 지시에 따른다.
- ② 화약류를 취급하는 용기는 목재상자 또는 배낭을 이용한다.
- ③ 폭약과 화공품은 서로 다른 용기에 분리하여 취급하여야 한다.
- ④ 굳어진 폭약은 주물러서 사용할 것
- ⑤ 사용하고 남은 화약류는 반드시 화약류 취급소에 반납하여야 한다.
- ⑥ 발파장소에는 당해 발파시의 사용예정량을 초과하지 않도록 한다.
- ⑦ 화약류 취급시에는 기타 화기 취급을 하여서는 안된다.

9.3. 천공 및 발파

- ① 발파작업 보조자는 화약류 관리보안책임자의 지시에 따라 천공 및 장약을 하고 수불량, 잔량 등을 철저히 관리할 것
- ② 천공과 장약작업을 동시에 실시하지 않도록 할 것.
- ③ 장전 전에 장약공 또는 약실의 위치 및 암반의 상태를 점검하고, 안전하게 장전 할 것

- ④ 한번 발파한 구멍에는 재천공 및 재장약을 금할 것
- ⑤ 비석으로 인한 피해를 예방하기 위한 조치를 취할 것
- ⑥ 누설전류를 장약하기전에 항상 검침하되 전류가 50mA 이상으로 검지될 때는 전기발파에 의한 작업을 중단하고 원인분석을 하고 전류에 이상이 없을 경우 작업을 하여야 한다.
- ⑦ 메지는 안전하게 공 입구까지 다져 넣는다.
- ⑧ 도통시험기는 1mA 이하의 것을 사용할 것
- ⑨ 낙뢰의 위험이 있을 때에는 전기 발파를 중단하여야 한다.
- ⑩ 발파모선은 동력선 또는 전등선과 반드시 격리하여 설치토록 할 것
- ⑪ 발파전에 위험구역에 경계원을 배치하여 이상이 없음을 확인하고, 발파한다는 경고음을 발송한 다음 점화 할 것

9.4. 불발장약 및 발파후의 조치

- ① 불발약은 고무호스로 압력수 또는 압축공기를 주입하여 메지만을 뽑아낸 후, 새로운 전폭약포를 장전하고 다시 점화할 것.
- ② 발파가 끝난 후에는 발파로 인한 유해가스가 제거된 후, 이상유무를 검사확인 할 때까지 지위고하를 막론하고 접근을 금지시킬 것
- ③ 지위고하를 막론하고, 화약류관리 보안책임자의 지시에 따라야 한다.

10. 화약류 취급의 주의사항

10.1. 폭약취급의 주의사항

- 1) 20세 미만인 사람에게 화약류를 취급하게 해서는 아니된다.(법 제19조)
- 2) 화약류의 발견, 습득시는 가까운 경찰관서에 신고해야 하고 경찰공무원(전투경찰, 순경포함) 지시없이 만지거나 두들기거나 해체 또는 옮겨서는 안된다.(법 제23조)
- 3) 화약류를 취급하는 사람은 화약류관리보안책임자의 안전상의 지시, 감독에 따라야 한다.
(법 제 31조)
- 4) 화약, 폭약과 화공품은 각각 다른 용기에 넣어서 취급해야 한다.(령 제16조)
- 5) 화약류를 취급함에 있어서는 항상 도난방지에 유의해야 한다.(령 제16조)
- 6) 발파후 불발되어 확인이 곤란시는 점화후 15분이상 (전기발파시는 발파기에서 모선을 떼어 놓은 후 5분이상) 경과후 현장에 접근한다.(령 제 21조)
- 7) 발파 위험성이 제거된 후 위험의 유무를 검사, 확인한 후(대발파시는 발파후 30분이상 경과후안전확인 된 후)가 아니면 발파장소, 그 부근에 사람을 접근시키지 않아야한다.
(령 제 22조)
- 8) 화약류의 폐기는 관할 경찰서에 신고 후 다음과 같이 시행한다.(령 제 24조)
 - ① 해안으로부터 8km이상 떨어진 깊이 300m이상 바다밑에 가라 앉힌다.
 - ② 화약, 또는 폭약은 조금씩 폭발, 또는 연소시킨다.
 - ③ 질산염, 과염소산염의 수용성분의 화약 또는 폭약은 안전한 수용액으로 강물에 흘려 보낸다.

- ④ 얼어서 굳어진 다이ना마이트는 완전히 녹여서 연소처리하거나 500g이하 적은 량으로 나누어서 순차적으로 폭발 처리한다.
- ⑤ 폐기장소는 주위에 높이 2미터 이상의 흙둑을 설치한다.
- ⑥ 폐기장소 주위에는 붉은 색 기를 달고 감시원을 배치하여 작업에 필요한 사람의 외의 통행을 금지시킨다.

10.2. 뇌관취급의 주의사항

- 1) 전기뇌관은 도통 또는 저항시험을 하되 미리 시험전류를 측정하여 0.01A를 초과하지 않는 것을 사용한다.(령 제 16조)
- 2) 낙뢰의 위험이 있을 때는 전기뇌관을 사용하는 작업을 하지 않아야 한다. (령 제16조)
- 3) 폭약과 뇌관은 동일인이 원반하지 않도록 한다.
(다만 각각 다른 용기에 넣어서 운반시에는 그렇지 않는다.)(령 제 18조)
- 4) 발파장소에 누전이 되었을 때는 전기발파를 하지 않는다(령 제18조)
- 5) 전기뇌관 운반시는 각선이 노출되지 않도록 하고 건전지, 그 밖의 전선이 노출된 전기기구를 지니거나 전등선, 동력선 그밖의 누전될 염려가 있는 물건에 접근하지 않는다.
(령 제 19조)
- 6) 발파모선은 고무등으로 절연된 전선 30미터 이상의 것을 사용한다.(령 제 19조)
- 7) 발파모선 부설시는 전선, 충전부 그 밖의 정전기를 일으킬 염려가 많은 것으로부터 거리를 띄어서 부설한다.(령 제 19조)
- 8) 전선은 점화하기 전에 화약류를 장전한 장소로부터 30미터 이상 떨어진 안전한 장소에서 도통시험 및 저항시험을 한다,(령 제 19조)

10.3. 발파작업의 주의사항

10.3.1. 천공작업 주의

- 1) 천공작업전에 막장상태(부석이나 전석)을 확인한 후 낙석사고 원인을 제거한 후 천공작업을 실시한다.
- 2) 잔류공을 확인하여 그 공은 필히 표시하고 재차 천공하지 않도록(잔류화약으로 인해 불의의 폭발이 됨) 안전작업 지시를(작업반장, 착암공에게)한다.
- 3) 현장막장이나 잔류공 등에 불발 화약류가 남았는지를 확인 점검한다.
- 4) 천공작업중에 자체 작업진동으로 인하여 부석, 돌출암반 및 파쇄암의 낙석 우려가 존재하는지 확인과 처리상태를 점검한다.
- 5) 심발 천공작업은 설계 발파패턴 및 이론교육에 의한 작업과 규정을 준수하는지(심발발파의 성공여부에 따라 전단면 발파성패가 달려 있음)를 확인하고 지도 한다.
- 6) 천공심도의 준수 여부(천공장이 길어짐에 따라 장약량이 많아져 발파진동, 폭음 증가로 민원발생의 원인이 됨)를 확인한다.
- 7) 천공 중 장약작업을 실시하는지 여부(천공 중 장약시 뇌관 각선이 착암기 빗트와 마찰하여 불의의 폭발이 일어날 우려가 있음)를 확인 및 지도한다.

10.3.2. 장약작업 주의사항

- 1) 화약류 운반은 필히 폭약과 뇌관을 따로 분리하고 뇌관은 운반배낭을 만들어 폭약과 뇌관은 각기 다른 용기에 운반한다.
- 2) 화약류 운반후 막장에서의 보관상태를 점검한다.

- ① 폭약과 뇌관은 최소한 2미터 이상 떨어져서 보관한다.
- ② 화약류는 누수지역, 누설전류 가능지역, 습기 있는 지역을 배제하여 보관한다.
- ③ 전폭약포 제작이나 장약작업전에 누설전류 및 미주 확인 후 안전한 조건하에서 작업을 실시한다.
- 3) 장약작업시 전색봉은 목봉이나 그밖의 불전도체(대나무등)로 사용한다.
- 4) 장약작업전에는 필히 막장단면 및 갱측벽, 갱바닥, 철물류 등에서 누설전류 측정을 실시하여 안전함을 확인한다.(5회 이상 측정)
- 5) 장약 중 전색은 공구까지 채우는 것을 확인한다.
- 6) 뇌관각선 결선은 외부충격이나 전류 등에 안전하게 정리하여 결선하는지를 확인한다.
- 7) 장약 후 남은 화약류는 정확히 계산하여 즉시 화약류 취급소에 반납, 입고 시키도록 한다.(작업막장에 은닉시켜 사용하거나 잊어버리고 불의의 폭발사고를 야기시키는 경우가있슴)
- 8) 장약작업 중 부근에서 불씨를 다루거나 담배를 피우지 않도록 하고 전류와 관계되는 조명등 등은 안전하게 이격시키도록 지도한다.
- 9) 장약작업 중 사용 후 남은 폭약 및 뇌관을 현장의 아무 곳이나 방치하지 않도록 한다.
(전폭약포 그대로 막장에 방치하여 폭발사고 위험 : 뇌관배낭, 불전도체의 폭약박스를 제작하여 날개는 안전하게 보관한다.)
- 10) 장약작업 중 주변에서 중장비작업의 매연으로 정전기가 발생하지 않도록한다.
- 11) 장약 중 막힌 공에는 공 청소(Blow Pipe로 청소)를 철저히 실시하여 재차 장약하도록 한다. (규정 준수치 않을 때 비산의 원인)

10.3.3. 발파의 주의사항

- 1) 발파전에 발파장소를 충분히 경계한다.
- 2) 작업종사자 및 주변인원에게 발파전에 발파선에서 안전한 곳으로 대피하도록 철저히 교육시킨다.
- 3) 발파횟수와 발파시간을 작업종사자 및 관련부서에 필히 연락한다. (불시에 접근하여 사고발생)
- 4) 발파시 발파의 위치는 구조물이 무너지지 않을 곳이나 파쇄석이 날아오지 않을 곳을 택하고 경계원으로 부터 연락을 받을 수 있는 안전한 곳을 선정한다.
- 5) 발파시에는 발파중임을 알리는 무전이나 신호깃발, 호루라기 등으로 일체로 통제가 될 수 있도록 한다.

11. 결론 및 제언

「용마터널건설 민간투자시설사업 건설공사 중 지하차도공사」현장의 암 굴착과 관련하여 주변대상물에 대한 피해수준 이내에서 안전하고 효율적인 발파작업이 수행될 수 있도록 시험발파를 실시하고 계측결과 해석으로 발파영향권과 최적의 발파제원을 검토하였으며, 세부적인 검토내용은 다음과 같다.

① 해당지역 발파진동, 소음 관리기준은 아래와 같이 참고하여 발파작업을 수행하여야 한다.

구 분	보안물건의 종류	허용기준치	관리기준치	비 고
발파진동	아파트 및 주택	0.3~0.5cm/sec 이하	0.3cm/sec 이하	
	상가	0.5cm/sec 이하	0.3cm/sec 이하	
생활진동	아파트 및 주택	주간(06:00~22:00)	주간(06:00~22:00)	
	상가	75dB(V)이하	75dB(V)이하	
발파소음	아파트 및 주택	낮(07:00 ~ 18:00)	낮(07:00~ 18:00)	
	상가	75dB(A)이하	75dB(A)이하	

② 지반진동 측정결과 단일성분의 3 방향 성분 중 진행방향 성분이 가장 우세하게 나타났으며 측정결과 한신아파트①.②.한신아파트 경비실 0.0191~0.1160cm/sec 사가정로72길 12 0.0143~0.0365cm/sec, 면목7동1085-5(콩나물국밥) 0.0159~0.0254cm/sec의 진동수준을 보였다.

위의 발파진동 측정치는 허용기준치 이내 이므로 보안물건에 미치는 피해는 없는 것으로 판단된다.

③ 발파소음 측정결과 한신아파트①.②.한신아파트경비실 50.0~64.2.8dB(A) 사가정로72길 12 61.0~62.0dB(A), 면목7동1085-5(콩나물국밥) 58.0~59.4dB(A)의 소음수준을 보였다. 위의 발파소음 측정치는 허용기준치 이내수준이므로 인체에 미치는 피해정도는 없는 것으로 판단된다.

④ 시험발파 해석결과 해당지역 최종 발파진동식은 아래와 같이 결정하였으며 거리에 따른 지발당 장약량은(Table 6.5~6.6)과 같다.

뉴마이트 $V_{95\%} = 891.531 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.978}$ $V_{95\%} = 965.143 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-2.064}$

뉴화이백카 $V_{95\%} = 15.990 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.166}$ $V_{95\%} = 11.930 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.170}$

⑤ 발파진동 및 소음은 지반의 조건 및 자유면과 폭약의 종류, 최소저항선, 공간격에 따라 달라질 수 있다. 그러나 시험발파 회기분석 결과에 의한 거리에 따른 장약량(Table 6.5~6.6)을 현장에 적용 한다면 주변 아파트, 주택 및 상가에 대해 안전하다고 판단된다.

⑥ 보안물건에서 발파지역까지 12m이하는 기계굴착공법을 사용하고 12~25m 에서는 미진동굴착공법 25m이상은 정밀진동제어발파 공법을 사용하여야 주변보안물건에 대해서 안전하리라 판단된다.

발파공법	지발당장약량(Kg)	적용거리(m)
		0.3cm/sec
기계굴착공법	-	12 이하
정밀진동제어발파	0.120	12 ~ 25
	0.125	25 ~ 32
	0.250	32 ~ 37
	0.375	37 ~ 41
	0.500	41 이상

⑦ 발파지역 최근거리에 아파트, 주택 및 상가가 밀집되어 있으므로 발파진동, 소음, 비산에 각별히 주의를 요하며 피해가 발생하지 않도록 주어진 발파공법과 충분한 방호매트를 사용하여야 한다.

- ⑧ 발파시 공사장 주변 작업차량, 장비 및 인원은 안전한 곳으로 대피시킨 후 사방에 경계원을 배치하고 발파 경고를 하고 작업에 임할 것.
- ⑨ 플라즈마 캡슐은 4,000V 이상에서만 작용하므로 최소 4,000V이상의 전압이 파암기를 통해 흘러나오므로, 고전압 방출로 인한 감전사고 및 안전사고에 각별한 주의가 요구된다.
- ⑩ 플라즈마 공법과 뉴화이넥카공법의 소음, 진동에 대한 우수성은 인정되지만 굳이 비교하게 된다면 플라즈마는 뇌관이 지발이 없고 뉴화이넥카는 지발뇌관이 있어 플라즈마의 작업은 발파횟수 증가로 발파시간이 오래 걸리므로 타 작업에 지장을 초래하고 주변 건물에 민원을 발생할 확률이 높다고 하겠다.
- ⑪ 플라즈마 공법과 뉴화이넥카 발파공법은 소음 및 진동의 관리가 우수하다고 사료되나, 시험발파와 같은 조건의 완벽한 자유면이 확보된 후 작업을 실시하여야 파암효과를 최대화 할 수 있다.
- ⑫ 미진동굴착공법의 암파쇄는 플라즈마 공법 및 뉴화이넥카 폭약을 사용하여 작업하되, 현장여건(지하수 용출, 발파작업소요시간 및 타 공정등)을 고려하여 안전한 시공이 이루어 질수 있도록 화약류관리보안책임자의 판단에 맡긴다.
- ⑬ 폭약의 성능이 동등할 경우 제조사의 다른 폭약을 사용하여도 무방하다.
- ⑭ 매 발파시 공인된 기관으로부터 소음 및 진동의 계측을 실시하여 근거자료를 보관하여 민원에 대비하여야 한다.
- ⑮ 발파작업은 거리별 지발당장약량(Table 6.5~6.6)을 준수하되, 화약류관리보안책임자의 관리 및 감독하에 현장의 암반상태에 따라 천공장, 최소저항선, 공간격 및 장약량을 일부 조정할 수 있으며, 허용기준치 이내의 안전시공에 만전을 기하여야 한다.

본 보고서는 “용마터널건설 민간투자시설사업 건설공사 중 지하차도공사” 현장의 시험발파예정지에서의 암반상황에 따른 시험발파 측정결과를 기초로 분석된 자료이므로 당 현장에만 적용가능하며, 본 보고서에 명시되지 않은 사항은 별도의 조사가 필요하다.