

---

## 도심지 발파공사의 발파공해 영향평가 및 안전발파 설계기술

(문정 · 가락전력구 2차현장 중심으로)

Post-Explosion Evaluation in the Crowded Urban Area and Design  
Technology for Safe Blasting

이 태 노\*

T. S. Lee\*

---

### .. 개 요

오늘날 도심지에서 지하터파기 공사가 활발히 이루어 지면서 발파공법 도입이 본격화되고 있다. 엄청난 파괴력을 가지는 화약류를 이용하는 도심지 발파공사를 안전하고 효율적으로 수행하기 위해서는 본 발파 공사장에 체계적인 발파계획을 수립하고 그 절차에 따라 작업관리가 이루어져야 한다.

그러나 모든 발파작업은 사전에 세밀한 지반조사 및 주변 구조물 조사를 거친 후 공사의 용도와 작업방식에 맞게 작업이 이루어져야 하나, 현실적으로 불확실한 정보를 바탕으로 기존에 축적된 경험적 지식을 통하여 발파작업이 수행되고 있는 것이 현실이다. 또한 발파작업 중에도 패턴과 공법을 현장에 맞게 수정해서 적용해 야함에도 불구하고 발주처의 설계변경 신청과 승인과정의 번거로움을 피하기 위해서, 공기를 단축시킬 목적으로 무리하게 당초 계획대로 진

행시키는 경우가 많다.

도심지의 발파작업장 주변에는 상가건물, 아파트 공장, 병원 및 문화재 등이 존재하게 되는 데 발파공해(진동, 소음 및 비산)로 심각한 피해가 발생할 수도 있다.

이러한 발파공해 피해는 구조물 및 시설물 외에 인근에 거주하는 사람에게 불쾌감과 피해를 주는 등 많은 민원 발생이 야기되기 마련이다. 그렇게 때문에 도심지 발파에서는 발파공해의 피해를 막고 발파작업이 효과적으로 수행되기 위해서는 발파작업이 진행되고 있는 작업장의 조건에 따라 발파패턴 및 기법을 조정하여 안전과 효율을 동시에 추구할 수 있도록 작업이 이루어져야 한다.

도심지에서 안전발파를 수행하기 위해서는 먼저 발파대상 기반암의 특성과 주변에 존재하는 구조물의 특성 및 주민들의 민원소지여부를 충분히 조사한 후 적용할 발파공법을 계획하고 시험발파를 수행해야 한다. 시험발파 결과 발파진

---

\* 화약류관리기술사

동 허용 한계값 이내의 발파작업 가능여부와 발파효율을 분석하여 발파공법 및 각종 요소를 조정 한 후 본 발파 작업에 착수해야 한다.

여기서는 당사의 문정-가락 전력구 2차현장 수직구 발파공사 현장에서 시험발파를 수행한 후 발파공해(진동, 소음)의 영향여부를 검토하여 현장조건에 적합한 최적의 발파공법 및 패턴을 제시한 사례를 기술하고, 이에 적합한 안전관리 대책이 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 대상현장 현황

문정-가락 전력구 2차 현장은 발파공해 영향권내에 웨밀리 아파트와 지하철 8호선이 근접해서 지나가는 현장이다. 그래서 발파공사로 인한 많은 민원이 예상되며 구조물 손상이 우려되는 현장이기도하다. 본 현장의 현황은 다음과 같다.

### - 공사목적

서울 송파구 일원의 전력공급 능력을 확충하고 인근 변전소의 과부하를 해소하기 위해서 전원 공급용 지중 송전 케이블 설치하기 위한 전력구 건설 현장임.

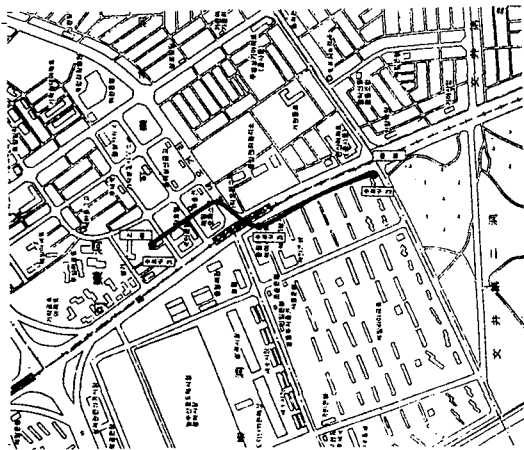


그림 2.1 현장 위치도

## 2.1 현장의 지질 및 암반조건

- 공사기간 : 1999. 1.- 2000. 11

- 공사구간 : 송파구 가락동 가락 S/S 예정부지 문정 사거리

- 총 노선거리 : 730.8m(터널구간)

- 굴착방식 : 수직구를 이용한 NATM 터널 굴착방식

금번에 시험발파가 시행된 문정-가락 전력구 현장 No.2 수직구의 기반암은 호상 흑운모 편마암으로 구성되어 있으며, 일부 구간에서 경질의 화강암으로 분포되어 있다. 지층발달 상태는 지표로부터 매립층, 충적층, 풍화대층(풍화토, 풍화암), 기반암(연암, 보통암, 경암) 층으로 구성되어 있다.

No2 수직구의 지반고는 EL+8m 정도이며, 상부 매립층의 두께는 4-5m 정도이다, 수직구 인접구간에서 발파대상 암반인 연암 또는 보통암이 출현할 것으로 보고 있다. 시추공 B-6에 분포하는 보통암은 균열이 보통 내지 심하게 발달하여 있으며, 보통암의 편마암으로서 절리면은 파동형으로 거칠게 나타나고 있다. 그러나 실제 수직구 내부 굴착으로 확인된 발파대상암반은 보통암과 흑운모질 화강암이 혼재해 있는 것으로 확인되었다. 수직구에 존재하는 암석의 압축강도는 180-940kg/cm<sup>2</sup> 정도의 암반으로 분포되어 있으며, 부분적으로 존재하는 경질의 화강암은 압축강도가 1,590kg/cm<sup>2</sup>의 매우 큰 값으로 분석되었다. 암석의 실내시험실에서의 탄성파속도(P파)는 3,090-5,100m/sec로 나타나고 있다.

## 2.2 발파지역의 주변환경 특성

본 현장은 서울 송파구 문정동 가락동을 잇는 터널공사로서 이 터널공사를 위하여 기시공된 NO.1 수직구를 포함하여 총 3개의 수직구로 구

성되어 있다. 터널위치는 지표로부터 수직하부 49m 지점에 존재하며, 터널구간은 이미 개통하여 운영되고 있는 지하철 8호선의 하부를 통과하고 있다. No.2 와 No.3 수직구는 왕복 8차선의 송파대로와 서쪽의 웨밀리 아파트 사이에 위치하고 있으며, 동쪽에는 약 28m 거리를 두고 지하철 8호선이 지나 가고 있다.

또한 No.2와 No.3 수직구는 왕복 8차선의 송파대로와 서쪽의 웨밀리 아파트 사이에 위치하고 있으며, 동쪽에는 약 28m 거리를 두고 지하철 8호선이 지나가고 있다.

또한 No. 2 수직구 갱구에서 105m 지점에는 지하철 8호선 가락시장역사가 위치하고 있기 때문에 항상 주간에는 다수인이 통행하고 지하철 탑승을 대기하고 있다.

No.2 수직구와 근접해있는 웨밀리 아파트의 경우 많은 주민이 거주하고 있으므로 발파작업으로 인한 피해와 민원이 발생할 소지가 많다. 그렇기 때문에 발파작업으로 발생하는 발파진동과 소음을 제어하고 차단하기 위한 시설물설치와 발파공법 선정이 필요하다.

또한, NO.2 수직구와 매우 근접해서 도시가스

Pipe Line 이 매설되어 있기 때문에 반복적으로 가해지는 발파진동으로 Pipe 손상이 생기지 않도록 해야 하며, 가스누출 상태를 수시로 점검해야 할 것으로 판단된다. 표 2.1은 No.2 수직구 발파작업시 발파공해로 인한 피해가 우려되는 주요 보안물건과의 거리를 나타낸 것이다.

### 3. 시험발파 적용공법 및 패턴

#### 3.1 발파진동 및 소음 허용기준 설정

본 현장에서 적용된 발파진동 및 소음의 허용기준은 공사 시방기준과 국내의 발파현장에서 적용하고 있는 소음진동 규제법 제 27조와 서울시 지하철 건설본부의 발파진동 고시기준을 근거로 하여 설정하였다.

#### 가. 발파진동 허용기준 설정

- 웨밀리 아파트 구조물 : 0.3 cm/sec
- 지하철 8호선 가락시장역 역사내부 : 0.3cm/sec
- 지하철 8호선 터널내부의 구조물 : 0.5 cm/sec
- 도시가스 Pipe Line : 1.0cm/sec

보안물건	형 태	보안거리	비 고
웨밀리 아파트 101동	15층 철근 Con'c 구조 Con'c Pipe 기초(L=15m)	수평 : 37.5m 수직 : 16-54m 사거리: 41-66m	현관 계단까지
웨밀리 아파트 102동	"	수평 : 79m 수직 : 16-54m 사거리 : 81-96m	"
지하철 8호선 터널구조물	콘크리트 라이닝및 레일	수평 : 28m 수직 : 0-24m 사거리 : 28-37m	터널 측벽까지
지하철 8호선 가락시장역 역사	철근 Con'c 구조	수평 : 105m 수직 : 16-85m 서거리 : 105-118m	지하철탑승 플랫폼
도시가스 Pipe Line	Steel Pipe	수평 : 3m 수직 : 16-54m 사거리 : 16-53m	

<표 2.1> No. 2 수직구 주변 보안물건의 특성및 거리

나. 발파소음 허용기준 설정

- 웨밀리 아파트 : 70dB(A)
- 지하철 8호선 가락시장 역사내부 :70dB(A)

3.2 시험발파 현황

가. 시험발파 일시

- 1차 : 1999. 4. 29 13:30-15:30
- 2차 : 1999. 5. 6일 10:50-13:20

나. 시험발파 위치

- 구간 : 문정-가락 전력구 2차 현장 No.2 수직구
- 지점 : 수직구 갱구로부터 수직하부 16-18 m 지점

다. 발파진동 및 소음 측정위치

구분	측정위치	측정거리(발파지점으로부터 사거리)
발파진동	1. 웨밀리아파트측 방음벽 뒤	20 m
	2. 방음벽-웨밀리아파트 101동 사이 화단	27.8-33.6 m
	3. 웨밀리 아파트 101동 현관앞 화단	35-42.5 m
	4. " 지하실 바닥	42 m
	5. " 중앙부 화단	57.6 m
	6. 웨밀리 아파트 102동 현관앞 화단	79 m
	7. 지하철 8호선 가락시장역 역사내부	105 m
	8. 도시가스공사 Pipe Line 매설지점 지표면	16 m
발파소음	1. 웨밀리 아파트 101 동 15 층	69 m
	2. " 8 층	48 m
	3. " 1 층	40 m

라. 발파공해 측정장비

- 발파진동 : BLASTMATE III(Instantel 사 제품)2대  
MINIMATE Plus(") 3대
- 발파소음 : PRECISION SOUND LEVEL MERER(Rion NA-29E) 2대

3.3 시험발파 적용공법 및 패턴

본 현장에서 이루어진 시험발파 적용공법 및 발파패턴은 다음과 같은 기준으로 실시되었다.

가. 발파순서

본 현장에서 수행된 시험발파는 2번에 걸쳐 이루어 졌다. 첫 번째 시험발파는 수직구 전단면을 5회로 분할하여 부분적으로 발파가 진행되었으며, 두 번째 시험발파에서는 다단식 발파기를 이용하여 2회 분할 발파를 실시하였다.

나. 적용 발파공법

적용 발파공법은 수직구 중심점에 수직으로 직경이 380mm 인 대구경 무장약공을 확보한 평행천공 발파공법(large Hole Cylinder Cut)을 적용하였으며, 수직구 외곽선의 손상방지를 위해서 조절발파(Controlled Blasting)를 실시하였다. 또한 웨밀리 아파트의 진동을 최소화하기 위해서 아파트 방향의 수직구 외곽부에 무장진공(Line Drilling)을 일렬로 설치하였다.

다. 천 공

장약을 위한 천공은 인력에 의한 레그드릴을 이용하였으며, 사용비트는 직경이 41mm 이며 길이가 1,200mm 인 일자형 비트를 사용하였다.

또한 수직구 중심에 설치한 대구경 무장약공은 수직구 주변 Pipe 설치를 위한 천공작업시 T-4 장비를 이용하여 시공하였으며, 공보호를 위해서 천공 후 가는 모래를 이용하여 충전하였다. 장약공은 수직구 전단면 자체에 천공한 후

스펀지를 이용하여 공을 보호하였다.

#### 라. 장 약

장약은 발파가 수행되는 구역만 장전하고 나머지 공은 무장약공 상태로 유지시킨 후 발파하였으며, 각 분할별 장전은 각각의 발파시 이루어 졌는데, 이는 분할 발파시 차후에 이루어지는 공이 폭력으로 손상을 받게되면 불발이 발생하여 불발화약 제거 등의 안전상에 문제가 발생할 수 있을 뿐만 아니라, 불발뇌관 발생시 이미 결선된 뇌관의 지발순서가 바뀌기 때문에 발파가 실패될 우려가 있기 때문이다.

#### 마. 사용 화약류

화약은 지반상태와 현장여건을 감안하여 저폭성 폭약인 Emulsion 계 화약을 사용하였다.

화약의 종류는 (주)한화에서 생산하는 NEWMITE 5500 화약으로서 약경이 25mm 이고 화약량이 1분당 125g 이다. 뇌관은 당초 설계대로 전기식 뇌관인 MS 뇌관과 DS 뇌관을 사용하였다.

#### 바. 발파공해 안전장치 설치

발파시 발생하는 발파공해의 피해를 방지하고 민원발생을 최소화하기 위해서 시험발파 전에 수직구 주변에 방음벽을 설치하였다. 이러한 방음벽은 발파소음의 투과계수 및 회절음 전달 경로를 정확히 계산하여 설계 및 시공이 이루어 졌다.

수직구 갱구에는 2중의 방음막을 설치하였다, 안쪽의 방음막은 천을 이용한 방음막을 구조 시스템이며, 바깥쪽의 방음막은 LG 건설(주) 기술연구소에서 특별히 제작한 시스템으로서 페타이어 재료를 이용한 3중막 시스템이다.

또한, 장약이 이루어진 발파면은 고무재료의 블라스팅 매트(Blasting Mat)를 설치하여 발파시

발생하는 비산 및 폭풍압을 제어하였다.

#### 사. 지하철 운행관리

본 현장에 인접해서 위치한 지하철 8호선 노선에 지하철의 전동차가 통가지 않을 때 발파작업을 수행하였다. 이는 전동차와 승객의 안전을 보호하기 위해서 이며, 가락시장역 지하철 직원의 협조를 받아 실시하였다.

#### 아. 발파진동 측정

발파진동의 측정은 앞장에서 기술한 바와 같이 웨밀리 아파트 101동 현관앞 화단 등 6군데에서 동시에 이루어 졌다. 정확한 지반진동을 체크하기 위하여 토사중에서는 핀을 센서에 설치하여 지중에 매설하였으며, 콘크리트 또는 구조물 바닥에서 측정할 때는 센서와 바닥면과 접촉이 완벽하게 될 수 있도록 센서 위에 모래 주머니를 올려 놓았다.

#### 자. 발파소음 측정

발파소음은 웨밀리 아파트 101도의 1층 및 8층, 15층 복도계단에서 측정하였다. 소음계는 지상 1.5m 지점, 계단실의 창문밖 1m 떨어진 지점에서 소음원 방향으로 행하여 측정하였다. 소음계의 동특성은 "FAST" 반응으로 고정하였



그림 31 발파진동 측정장면(웨밀리아파트 101동 현관)

으며, 발파시의 최대소음 레벨(Lmax,dB(A))을 측정하였다.



그림3.2 소음계를 이용하여 발파소음을 측정하는 장면

#### 4. 발파진동 및 소음 측정결과 분석

##### 4.1 발파진동 측정결과 및 분석

2회에 걸쳐 수행된 시험발파로 발생된 발파진동은 앞장에서 표기한 바와 같이 발파진동은 측정되는 각 점에서 복합된 성분을 동시에 측정하였다. 동시에 측정된 성분은 폭원으로 부터의 진행방향의 성분(Radial Component), 수직인 성분(Vertical Component), 그리고 두 방향과 직각을 이루는 접선 방향의 성분(Transverse Component)이다. 이러한 성분의 측정값을 벡터합으로 측정하여 나타난 결과치를 이용하여 발파진동의 측정을 분석하였다. 표 4. 1은 시험 발파시 각 위치에서 측정된 발파진동 측정치인데, 이 표에서 나타난 바와 같이 7회에 걸쳐 측정된 진동값은 거리별 상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 발파진동을 측정한 위치별 발파진동 크기의 특징을 보면, 지하철 8호선 가락시장역의 플랫폼에서 발파진동을 4회에 걸쳐 측정하였으나, 발파진동이 감지되지 않았다. 이는 발파진동 측정기에 설정된 지반속도 최소값(Trigger Level)이 0.013cm/sec인 것을 감안하면, 전혀 발파진동이

전달되지 않고 있음을 할 수 있다.

또한, 웨밀리 아파트의 경우, 수직구 발파지점으로 부터 35m 떨어진 101동 현관에서 측정된 값이 0.193cm/sec 으로 나타나, 아파트에서의 허용진동값 0.3cm/sec 보다 훨씬 못 미친 값으로 측정되어 발파진동에 의한 구조물 및 인체에 미치는 발파공해 피해는 전혀 없을 것으로 판단된다. 특히, 아파트 지하에서는 0.0222cm/sec로 나타났고, 아파트 앞 화단의 지반에서 측정된 값 또한 0.100cm/sec 로 나타나 지층특성에 따른 발파진동 영향이 구조물에 미치는 영향은 전혀 없을 것으로 판단된다. 또한, 수직구에 근접해 있는 도시가스 Pile Line 이 발파진동으로 인하여 파손 또는 균열등의 손상여부를 판단하기 위해 Pile Line 이 매설된 직상부 지표면에서도 발파진동을 측정하였으나, 진동이 감지되지 않았다. 이는 발파가 지하 16m 이하의 수직구에서 이루어진 관계로 직상부에서는 오히려 진동의 전파가 제대로 이루어 지지 않은 결과라고 판단된다. 그러나 Pile Line의 시공상태와 재질의 특성에 따른 변수가 발생할 수 있으므로 가스누출을 탐지하는 것과 아울러 발파 작업시에도 수시로 가스누출을 탐지하여 Pile Line 손상여부를 판단해야 할 것으로 보인다.

위의 결과를 종합해 볼 때, 발파공사가 이루어지고 있는 본 현장의 수직구와 터널의 발파공사로 인하여 현장 주변에 배치되어 있는 각종 구조물 및 시설물은 적정 장약량을 사용할 경우 발파진동에 의한 피해는 발생하지 않을 것으로 사료된다. 그림 4.1 은 발파진동 측정기 설치 위치도이다.

##### 4.2 발파소음 측정결과 및 분석

발파소음 측정은 발파시의 소음으로 인해 피해가 예상되는 지역으로서 웨밀리 아파트 101동에서 이루어졌으며, 측정지점은 저층부의 경우는

현장에 설치된 방음벽 및 지붕에 의해 암영대가 형성되므로 이의 영향이 적을 것으로 판단되는 고층부(8층, 15층)에서 1차 및 2차 발파시 소음 측정을 실시하였다.

표 4.2 시험발파시의 발파소음 측정결과 및 측정지점의 암소음도를 나타낸 것이다. 암소음(주변소음)의 측정은 등가소음 레벨(Leg dB(A))로서 5분간 측정하였다. 측정결과 발파작업시의 측정된 소음레벨이 주변소음측정결과 2dB 이상 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한, 2차 발파시의 소음은 차량이 장차한 시점에 발파가 이루어졌기 때문에 당시의 최고 소음도를 측정한 것으로 암소음도 보다도 낮게 나타났다. 이러한 현상은 아파트 측정위체에 전달되는 발파소음이 주변환경소음(차량소음, 주변 생활소음)보다 작게 나타나기 때문이며, 또한 웨일

리 아파트에 인접한 송파대로의 차량소음을 측정한 결과 평균적으로 74-75dB(A)로 나타나고 있어, 발파에 의한 소음은 인접 건물로 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

따라서, 발파소음의 크기와 수직구 주변에 설치된 방음벽 투과손실 효과를 측정하기 위해서 방음막이 설치된 수직구의 갱구 상부에 마이크로폰을 설치하여 측정하였으며, 측정된 발파소음은 표 4.3와 같다.

측정결과 2회 걸쳐 시험발파시 수직구 상부에서 측정한 소음레벨은 71.2dB(A) 87.3dB(A)로 나타나고 있으나, 피해가 예상되는 인접아파트와의 거리에 따른 거리감효과와 발파가 수행되는 수직구 갱구를 둘러싸고 있는 방음벽/지붕에 의한 소음 전파경로의 차단과 및 투과손실에 의한 소음저감 효과를 기대할 수 있다.

측정 번호	보안거리 (M)	최대장약량 (kg/지발당)	발파진동의 크기 (cm/kg/sec)				측정위치
			T	V	L	Sun	
1	20	0.5625	0.0397	0.0794	0.0413	0.0841	웨일리아파트측 방음벽 뒤
2	20	0.5625	0.0508	0.0826	0.0905	0.117	"
3	20	0.5625	0.0318	0.0651	0.0365	0.0746	"
4	20	0.25	0.0572	0.0762	0.114	0.117	"
5	20	0.375	0.184	0.0889	0.121	0.217	"
6	29	0.75	0.156	0.187	0.190	0.251	방음벽~101동 화단
7	27.8	0.25	0.229	0.1701	0.114	0.262	"
8	27.8	0.375	0.198	0.178	0.143	0.238	"
9	33.6	0.75	0.0730	0.0968	0.0651	0.102	"
10	33.6	0.25	0.0937	0.122	0.100	0.148	"
11	35	0.375	0.186	0.140	0.151	0.193	101동 입구
12	42.5	0.25	0.0730	0.0619	0.0921	0.0982	101동 화단
13	42.5	0.375	0.0889	0.0635	0.0254	0.100	"
14	42	0.75	0.0127	0.0222	0.0159	0.0222	101동 지하
15	57.6	0.375	0.0905	0.0667	0.0857	0.0964	101동 중앙부 화단
16	79	0.75	0.0508	0.0381	0.0508	0.0622	102동 화단
17	79	0.75	0.0508	0.0381	0.0381	0.0648	"
18	105	0.5625	미감지	미감지	미감지	미감지	가락시장 전철역사
19	105	0.5625	미감지	미감지	미감지	미감지	"
20	105	0.5625	미감지	미감지	미감지	미감지	"
21	105	0.25	미감지	미감지	미감지	미감지	"

표 4.1 발파진동 측정결과표

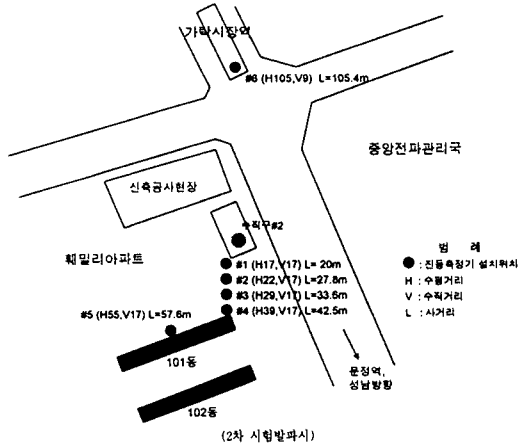


그림 4.1 발파진동 측정기 설치 위치도

일반적으로 공사현장에서 발생되는 소음에 대한 피해 예상지역으로의 거리에 따른 소음감쇠 효과는 실용적으로 반구면파 감쇠로서 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$SPL=20\log R-8dB(A)$$

여기서, R : 소음원로부터의 거리 소음감쇠 또한 현장에 적용된 방음벽에 의한 효과는 방음벽의 재질, 설치상태, 현장여건 및 시공 상태에 따라 큰 차이가 있으나 시험에 의한 투과손실 및 흡입율은 표 4.4와 같다.

따라서 피해예상지역인 헤밀리 아파트에서의 발파소음은 발파지점과의 거리를 30m 정도로 가

구분	측정위치	최대소음레벨 (LMAX,dB(A))	비고
3차 발파	수직구 갭구 상부 1m지점	71.2	
4차 발파	수직구 갭구 상부 1m지점	87.3	

<표4.3> 수직구갭구 상부에서 측정된 발파 소음측정결과

구분	주파수						
	125	250	500	1K	2K	4K	평균
투과손실(dB)	9.3	14.0	16.7	25.0	33.4	38.4	22.80
흡입율	0.134	0.584	0.913	0.832	0.657	0.328	0.27

\*방제실험연구소 장항실 시험결과

<표 4.4> 현장적용(P.E.B방음벽)의 투과손실 및 흡입율

정하였을 때 이론적으로 약 20dB(A)정도, 또한 방음벽설치에 의한 소음전파경로의 차단 및 투과손실을 고려할 때 인접아파트에서의 발파소음의 영향은 없을 것으로 판단된다. 그러나, 본 결과는 시험발파시에 측정된 것으로, 측정결과를 바탕으로 발파패턴 및 화약량의 조절을 통하여 소음발생을 최대한 억제할 수 있도록 노력을 기울여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 안전발파 공법 및 패턴 제안

### 5.1 현장조건에 적합한 발파진동 추정식 및 허용 장약량 산출

본 현장의 지반조건에 적합한 최적의 발파진동 추정식을 설정하기 위해서 수직구에서 적절한 거리를 두고 측정된 발파진동값, 지발당장약량, 보안거리를 활용하였다. 이러한 추정식은 향후 본 현장에서 수행되는 발파공사가 발파진동 허용기준내에서 이루어질 수 있는 발파패턴을 설정하기 위함이다.

시험발파시 사용된 지발당 최대 장약량과 보안거리의 환산거리와 총 7회에 걸쳐 수집된



거리(m)	자승근일 경우(kg)	삼승근일 경우(kg)
15	0.4831	0.2901
16	0.5497	0.5521
17	0.6206	0.4223
18	0.6957	0.5013
19	0.7752	0.586
20	0.8589	0.6877
21	0.9469	0.7961
22	1.0393	0.9153
23	1.1359	1.0459
24	1.2368	0.1883
25	1.3420	1.3431
26	1.4515	1.5108
27	1.5653	1.6919
28	1.6834	1.8870
29	1.8058	2.0965
30	1.9325	2.3209
35	2.6304	3.6855
40	3.4356	5.5014
45	4.3482	7.8331
50	5.3681	10.7449
55	6.4954	14.3015
60	7.7300	18.5673
65	9.0721	23.6066
70	10.5215	29.4841
75	1200782	36.2642
80	13.7423	44.0113
85	15.5138	52.7899
90	17.3926	62.6645
95	19.3788	73.6996
100	21.4724	85.9596

\*거리별 최대 허용 장약량은 최소값으로 적용하기 위해서 자승근과 삼승근으로 산출된 장약량중 음영으로 표시된 것으로 한다.

표 5.1 허용진동속도 0.3cm/sec일 경우 거리별 지발당장약량

발파진동값의 3성분 벡터합을 이용하여 그림 5.1 및 그림 5.1와 같이 로그-로그 좌표상에 도시하고, 최소자승법에 의해 회귀분석(Regression Analysis)을 하면 환산거리의 대수값과 진동속도의 대수값과 진동속도의 대수값사이에서 하나의 직선식을 구할 수 있다.

이때의 3 성분 벡터합에 의한 자승근과 삼승근으로 환산한 50% 및 90%의 발파진동 추정식은 아래의 식과 같이 산출할 수 있다.

-자승근일 경우

$$V=0.57(SD)^{-0.42} \quad (50\% \text{ 신뢰구간})$$

$$V=1.09(SD)^{-0.42} \quad (90\% \text{ 신뢰구간})$$

-삼승근일 경우

$$V=0.80(SD)^{-0.52} \quad (50\% \text{ 신뢰구간})$$

$$V=1.52(SD)^{-0.52} \quad (90\% \text{ 신뢰구간})$$

여기서 50%는 측정자료의 평균선으로서, 실제 발파시 절반정도는 예상 진동수준 이상으로 발생될 것이며, 90%는 발파시 10% 정도는 예상 발파진동 수준이상으로 나타난다고 가정하는 것이다. 일반적으로 발파현장에서 95% 선의 발파진동 추정식이 이상적일 것으로 판단하였으며, 90% 선의 추정식을 이용하여 지발당 최대 허용 장약량을 산출하였다.

본 시험 발파를 수행한 수직구 주변은 앞장에서 나타낸 것처럼 다수인이 거주하는 아파트와 많은 상가, 그리고 지하철 8호선 역사 등의 보안물건이 존재하는 구간이다. 이 중에서 가장 많이 민원이 예상되는 보안물건은 웨밀리아아파트로 판단된다.

그래서 웨밀리아 아파트 101동 중심으로 시험발파 결과 측정된 진동값으로 추정된 90% 예정선을 이용하여 노모그램을 작성하고 최대 지발당장약량을 산출하였다.

환산거리의 자승근과 삼승근중에서 적용하는

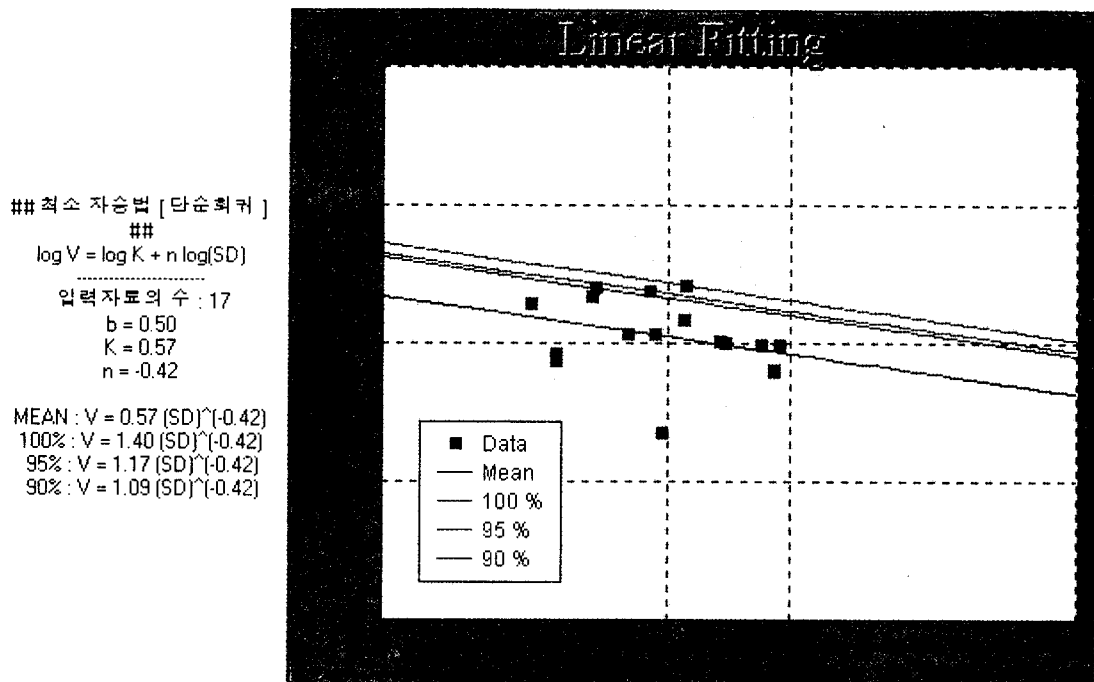


그림 5.1 자승근 환산거리-진동속도 수준 그래프

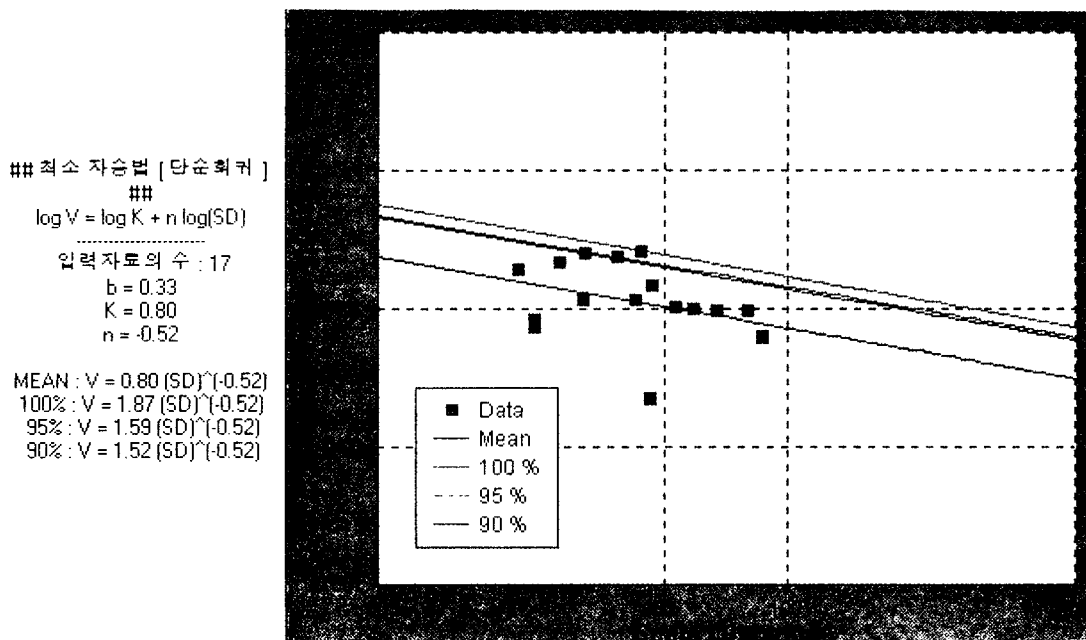


그림 5.2 삼승근 환산거리-진동속도 수준 그래프

허용장약량은 거리별에 따라 달리 적용하였다. 즉, 안전발파를 위해서는 거리별 최소 장약량으로 산출된 것을 적용하였다. 그래서 발파지점으로부터 24m 까지는 삼승근을 적용하였으며, 25m 부터는 삼승근을 적용하였다.

표 5.1은 위 발파진동 추정식을 이용하여 발파진동 허용기준이 0.3cm/sec일 때 자승근 및 삼승근 환산거리를 적용할 경우의 거리별로 허용되는 지발당 최대 장약량을 나타낸 것이다.

## 5.2 현장의 암반특성에 적합한 발파패턴 제시

본 현장에서 적용할 수 있는 발파패턴은 발파진동의 피해가 우려되는 보안물건인 웨일리 아파트 101동에서의 허용 장약량을 기준으로 설정하였는데, 보안거리가 19m 에서의 사용가능한 화약량으로 설계하여 안전율을 높였다.

또한, 2회에 걸쳐 수행된 시험발파가 결과 확인된 암반상태별 발파효과가 다양하게 나타나는 것이 확인되었으므로 본 현장 No.2 수직구의 발파패턴은 발파대상 기반암의 물리학적 특성과 공학적 암반상태에 따라 발파패턴과 화약류를 달리 하여 적용하도록 제시하였다. 표 5.2와 표 5.3은 암반조건별 적용 발파패턴이며, 그림 5.3과 5.4는 이때의 발파 패턴도이다.

이러한 발파패턴 제시는 당초 실시설계상의 발파패턴과 상당한 차이가 나타나고 있는데, 다음과 같은 사유로 인하여 조정되었다.

### 가) 연암의 경우

#### · 무장진공 변경

- 당초 천공장을 1,300mm 으로 해도 보안물건이 발파진동으로 전혀 피해가 없을 것으로 판단되기 때문에 장약공 천공장과 동일 깊이인 1,300mm로 변경함.
- 당초의 공간격은 200mm으로 하여 외곽선 조

절 발파공 뒷면에 천공하도록 되어 있으나, 현실적으로 수직구 현단면을 유지하면서 무장진공 공간을 외곽선 조정발파공의 공과 공 사이에 설치하도록 함. 이럴 경우 조절발파공의 폭발시인 장파괴를 유도할 수 있기 때문에 발파진동을 제어하는 효과가 있을 뿐만 아니라, 수직구 외곽면을 매끄럽게 유지할 수 있기 때문에 발파진동을 제어하는 효과가 있을 뿐만 아니라, 수직구 외곽면을 매끄럽게 유지 할 수 있기 때문에 시공성 및 경제성으로 볼때 매우 유리함.

#### · 천공조건

- 천공장은 당초 1,100mm에서 1,300으로 조정하는데, 이는 시험발파 결과 웨일리 아파트에서의 발파진동 측정치를 고려할 경우 천공장을 당 초 경암패턴 수준인 1,300mm으로 해도 무리가 없을 것으로 판단됨. 또한 발파암반의 물리학적, 공학적으로 볼때 굴진장 증대에 따른 지반 보강에 문제는 전혀 없을 것으로 판단됨.

- 심발공의 최소저항선은 당초 550mm에서 400mm으로 조정하는데, 이는 대구경 무장약공 유지상태가 슬라임의 충전과 지하수로 채워져 있을뿐만 아니라 대체적으로 심발주 중심의 암반이 매우 불량하여 심발공 첫 번째 장약공을 무장약공 직경의 1.1배로 하여 유지하는 것이 파괴력이 우수할 것으로 판단됨. 또한 최초로 발파가 되는 심발공이 암반파괴 역할을 제대로 못할 경우 전체적인 발파가 실패될 우려가 있으므로 동간격을 줄이고자 함.

- 확대공의 최소저항선은 당초 700mm 이었으나. 이는 천공장에 비해 너무 넓기 때문에 표준 발파 형태를 이룰 수 없는 간격임.

즉,

·  $Burden\ stiffness = Bench\ Height / Burden = 2$  이므로 천공장이 1.1m-1.3m 일경우 저항선은

구 분	세 부 항 공	단 위	발 파 패 턴	
천 공	심 발 부 발 파 공 법	-	대구경 무장약공 발파공법	
	조 절 발 파 공 법	-	Smooth Blasting	
	무 장 진 공	천공장	mm	1,300
		공간격	mm	400
		천공경	mm	41
	천공각도	°	90	
	무장약공 직경	mm	381	
	장약공 직경	mm	41	
	천공장(굴진장)	mm	1,300(1,100)	
	천 공 수	공	226	
	최소저항선	심발공	mm	400
		확대공	mm	600
	공간격	확대공	mm	600
		조절발파공	mm	400
장 약 및 발 파	사용화약	-	Emulsion 계	
	사용뇌관	-	비전기식 뇌관	
	공당장약량	심발공	kg/공	0.1875
		확대공	kg/공	0.25
		조절발파공	kg/공	0.225
	지발당 최대장약량	kg/지발	0.5	
	총장약량	kg	54.3	
	비장약량	kg/m'	0.79348	
	기폭방식	-	비전기식 뇌관에 의한 전단면 발파	
	결선방식	-	직병렬 연결	

표 5.2 암반조건별 적용 발파패턴(연암이하)

50cm-60cm 정도가 효율적임.

또한, 발파면 암반의 변화가 심하고 커다란 절리층이 형성되어 있을 뿐만 아니라 지하수 유출이 심하여 확대공의 공간격이 넓을 경우 대피 형성 및 발파 진동이 크게 발생할 우려가 있음.

-조절발파공의 간격은 전열 최소저항선보다 작

게(S <0.8B ) 하는 것이 원칙으로 당초의 0.7cm으로 할 경우 조절발파 효과가 없음. 다시 말해서 최소저항선이 0.6m일 경우에는 조절발파공의 간격은 0.4m로 하는 것이 이상적임. (0.6m × 0.8=0.48m)

· 사용뇌관

-실시설계상의 사용뇌관은 전기식 뇌관을 사용

구 분	세 부 항 공		단 위	발 파 패 턴
천 공	심 발 부 발 파 공 법		-	대구경 무장약공 발파공법
	조 절 발 파 공 법		-	Smooth Blasting
	무 장 진 공	천공장	mm	1,300
		공간격	mm	400
		천공경	mm	41
	천공각도		°	90
	무장약공 직경		mm	381
	장약공 직경		mm	41
	천공장(굴진장)		mm	1,300(1,100)
	천 공 수		공	250
	최 소 저 항 선	심발공	mm	400
		확대공	mm	500
	공 간 격	확대공	mm	600
		조절발파공	mm	400
장 약 및 발 파	사용화약		-	Emulsion 계
	사용뇌관		-	비전기식 뇌관
	공 당 장 약 량	심 발 공	kg/공	0.25
		확 대 공	kg/공	0.3125
		조 절 발 파 공	kg/공	0.2875
	지발당 최대장약량		kg/지발	0.625
	총장약량		kg	75.925
	비장약량		kg/m <sup>3</sup>	1.10949
	기폭방식		-	비전기식 뇌관에 의한 전단면 발파
	결선방식		-	직병렬 연결

표 5.3 암반조건별 적용 발파패턴(경암 이상)

하도록 되어 있으나, 본 현장의 수직구는 안전 상으로 볼 때 반드시 비전기식 뇌관으로 교체 되어야 할 것으로 판단됨.

- 본 현장의 수직구에서는 지하수가 많이 유출 되기 때문에 장약작업시 전기 펌프를 가동해야 함.
- 그러나, 전기뇌관은 전류가 0.2 A 으로도

기폭이 가능하기 때문에 전기 펌프에 서 누설전류가 발생할 경우 엄청난 폭발사고 로 인하여 인명 및 재산상의 피해가 발생할 수 있음.

- 그래서 본 현장에서는 전기적 위험요인이 전혀 없는 비전기식 뇌관으로 교체되어야 할 것으로 판단됨

· 장약량

-2회에 걸쳐 실시한 시험발파 결과 본 현장에서 사용되는 화약량은 표에서 기술한 바와 같이 조절발파공은 공당 0.2kg에서 0.225kg으로 조정 되어야 함.

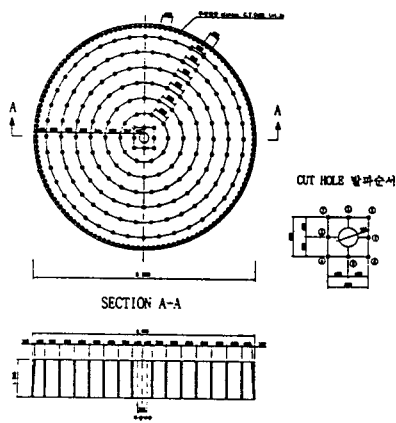


그림 5.3 연암 이하구간 발파 패턴도

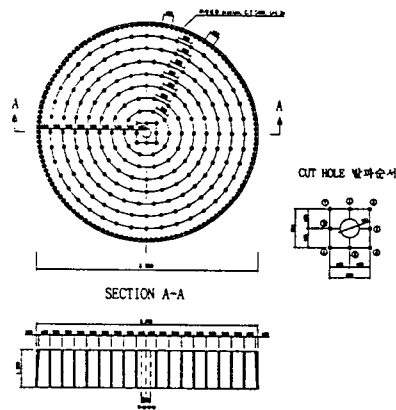


그림 5.4 경암이상구간 발파 패턴도

-총장약량은 최소저항선 및 공간격의 축소로 공수가 늘어나고, 조절발파공의 장약량이 당초 0.534kg/m'에서 0.793 kg/m'으로 조정됨.

· 기폭 및 결선방식

- 당초 설계의 기폭방식은 수직구 단면당 2회 분할발파를 실시하도록 되어 있으나, 분할 발

파를 실시할 경우 차회발파를 위한 장약공의 붕괴와 파손으로 발파작업에 많은 지장을 줄 뿐만 아니라 안전사고 발생및 발파 진동 증대현상이 발생할 우려가 큼.

-시험발파시 발파소음 및 발파진동을 측정간 결과 전단면 발파를 실시하여도 발파공 해로 인한 주변 구조물및 인체에 전혀 피해가 없을 것으로 판단됨.

-비전기식 뇌관은 이용하여 뇌관결선할 경우 뇌관시차에 따라 직병력 연결방식을 채택하여야 함.

나) 경암의 경우

· 당초의 공간격은 200m으로 하여 외곽선 조절발파공 뒷면에 천공하고록 되어 있으나, 현실적으로 수직구 현단면을 유지하면서 무장진공 공간을 확보하기는 불가능하며, 천공작업에 많은 어려움이 발생함.

그래서 무장진공을 400mm으로 하여 외곽선 조절발파공의 공과 공사이에 설치하도록 함.

이럴 경우조절발파공의 폭발시 인장파괴를 유도할 수 있기 때문에 발파진동을 제어하는 효과가 있을 뿐만 아니라, 수직구 외곽면을 매끄럽게 유지할 수 있기 때문에 시공성 및 경제성 으로

볼때 매우 유리함.

· 천공조건

-심발공의 최소저항선은 당초 33.2kg에서 54.3kg으로 증대됨.

-이상과 같은 발파패턴 조정으로 비장약량이 당초 0.53kg,m'에서 550mm에서 300mm으로 조정하는데, 이는 대구경 무장약공 유지상태가 슬라임의 충전과 지하수로 채워져 있을 뿐만 아니라 대체적으로 심발부 중심의 암반이 매우 불

량하여 심발공 첫 번째 장약공을 무장약공 직경의 1.1배로 하여 유지하는 것이 파괴력이 우수할 것으로 판단됨. 또한 최초로 발파가 되는 심발공이 암반파괴 역할을 제대로 못할 경우 전체적인 발파가 실패될 우려가 있으므로 공간격을 줄이고자 함.

확대공의 최소저항선은 당초 700mm이었으나, 이는 천공장에 비해 너무 넓게 때문에 표준발파 형태를 이룰 수 없는 간격임.

즉,

· Burden stiffness=Bench Hieght/Burden=2 이므로

천공장이 1.1m-1.3m 일 경우 저항선은 50cm-60cm 정도가 효율적임. 또한, 발파면 암반의 변화가 심하고 커더란 절리층이 형성되어 있을 뿐만 아니라 지하수 유출이 심하여 확대공의 공간격이 넓을 경우 대괴 형성 및 발파진동이 크게 발생할 우려가 있음.

확대공의 공간격은 연암의 경우보다 100mm가 좁은 500mm으로 간격을 유지함.

조절발파공의 간격은 전열 최저저항선보다 작게(S < 0.8 B)하는 것이 원칙이므로 당초의 0.7m으로 할 경우 조절발파 효과가 없음. 다시 말해서 최저저항선이 0.6m일 경우에는 조절발파공의 간격을 0.4m로 하는 것이 이상적임. (0.6m × 0.8=0.48m)

· 사용화약

당초 사용화약은 저폭성 폭약인 Emulsion 계 폭약을 사용하도록 하였으나, 현재 본 현장 수직구에서 경암으로 나타나는 흑운모질 화강암류는 압축강도가 약 1,500kg/cm<sup>2</sup> 정도이며, 탄성파속도(P파)가 약 5,000m/sec 이상임.

발파시 암석의 파쇄효과가 가장 우수한 것은 화약류의 폭발속도와 암석의 탄성파속도가 비슷할 때나, 본 현장의 암석의 특성으로 볼 때 Emulsion 계폭약은 부적합하며, 강력한 파괴력

을 가진 Dynamite 계 화약을 사용해야 함.

· 사용뇌관

- 실시설계상의 사용뇌관은 전기식 뇌관을 사용하도록 되어 있으나, 본 현장의 수직구는 안전상으로 볼때 반드시 비 전기식 뇌관으로 교체되어야 할 것으로 판단됨.

· 본 현장의 수직구에서는 지하수가 많이 유출되기 때문에 장약작업시 전기펌프를 가동해 함.

· 그러나, 전기뇌관은 전류가 0.2A 로도 기폭이 가능하기 때문에 전기펌프에서 누설전류가 발생할 경우 엄청난 폭발사고로 인하여 인명 및 재산상의 피해가 발생할 수 있음.

· 그래서 본 현장에서는 전기적 위험요인이 전혀 없는 비전기식 뇌관으로 교체되어야 할 것으로 판단됨.

· 장약량

-2회에 걸쳐 실시한 시험발파 결과 본 현장에서 사용되는 화약량은 표에서 기술한 바와 같이 조정되어야 함.

-총 장약량은 최소저항선 및 공간격의 축소로 공수가 늘어나고, 조절발파공의 장약량이 증대함에 따라 1회 발파당 총장약량이 당초 40.3kg에서 75.95으로 증대됨.

-이상과 같은 발파패턴 조정으로 비장약량이 당초 0.540kg/m<sup>3</sup>에서 1,109kg/m<sup>3</sup>으로 조정됨.

· 기폭 및 결선방식

-당초 설계의 기폭방식은 수직구 단면당 2회분할 발파를 실시하도록 되어 있으나, 분할 발파를 실시할 경우 차회발파를 위한 장약공의 붕괴와 파손으로 발파작업에 많은 지장을 줄 뿐만 아니라 안전사고 발생 및 발파진동 증대 현상이 발생할 우려가 큼.

-시험발파시 발파소음 및 발파진동을 측정한 결과 전단면 발파를 실시하여도 발파공해로 인한 주변 구조물 및 인체에 전혀 피해가 없을 것으로 판단됨.

-비전기식 뇌관을 이용하여 뇌관 결선할 경우 뇌관시차에 따라 직병렬 연결방식을 채택하여야 함.

본 현장 주변에 보안물건이 많이 배치되어 있고 다수인이 거주하는 아파트가 존재하기 때문에 다음과 같은 발파관리 안전수칙을 준수하면서 공사가 수행되어야 한다.

- 발파시 수직구 갱구에 부직포를 이용하여 개폐가 용이한 차단문을 만들어 사용한다.
- 설계 장약량을 준수하고 천공장 및 저항선 간격을 정확히 유지한다.
- 폭약을 장전후 전색을 완벽하게 해야한다.
- 절리가 발달된 암반에서는 폭풍압이 발생되지 않도록 전색을 잘한다.
- 공발현상을 억제하기 위해서 메지와 다짐을 철저히 한다.
- 뇌관의 미주전류로 인한폭발사고를 방지키위해 비전기식 뇌관을 사용한다.
- 사용하는 화약은 발파진동을 최소화하기위해서 저폭성 폭약을 사용하되, 기반암의 특성을 고려하여 폭발속도가 5,000m/sec 이상인 폭약을 사용한다.
- 발파작업시 발파진동 측정기를 보안물건위치에 설치하여 데이터를 수집한다.
- 발파작업전 발파공사 준수사항을 반드시 체크하여 안전상태를 확인한 후 발파 작업에 임한다.
- 본 발파시 화약류관리기술사 또는 기사 입회하에 발파작업을 진행한다.
- 발파전에 안전 유도원을 배치하여 인원, 장비 철수 및 외부인을 통제한다.
- 뇌관 및 화약은 반드시 다른 용기에 분리하여 보관한다.
- 발파작업자는 반드시 안전모 및 안전화를 착용하고 작업에 임해야 한다.
- 화약류 취급시 및 발파작업시는 흡연 및 화기

취급을 금해야 한다.

-발파시 천공 및 장약은 동시에 이루어지면 안된다.

-발파모선은 발파점화를 안전하게 실시할 수 있는 충분한 거리까지 연장한다.

-기 발파된 구멍에는 재천공 및 재장전을 하지 않도록 한다.

-불발화약이 생겼을 때는 [총포,도검, 화약류단속법 시행령] 제 27조에 준하여 처리한다.

-민원이 예상되는 최단거리의 보안물건에서 는 매발파시 발파진동및 진동소음을 측정하여 피해가능 여부를 파악하도록 한다.

## 7. 결론

지금 까지 기술한 바와 같이 도심지에서 이루어지는 발파작업은 주변에 많은 구조물과 민가가 산재해 있기 때문에 발파공해로 인한 피해와 민원이 야기될 우려가 높다. 이러한 지역에서의 발파공사는 발파작업 전에 충분한 지반 및 주변여건을 조사한후 발파계획을 수립해야 하며, 안전발파가 이루어 질 수 있도록 사전조치와 관리가 이루어져야 한다.

그래서 당사가 공사하는 문정-가락 전력구 2차현장 No.2 수직구 발파공사시 발생하는 발파진동 및 소음으로 주변에 위치한 웨밀리 아파트, 지하철 8호선 구조물 및 역사에 미치는 영향을 최소화 하기 위해서 2차에 걸쳐 시험발파가 실시되었으며, 그 결과를 분석하여 현장 암반상태에 적합한 최적의 발파패턴을 설정하여 제시되었다.

향후, 도심지에서 발파공사가 이루어질 경우에는 이와 같은 작업절차를 준수 하여 발파공사가 이루어져 하며, 발파진동 및 소음을 매 발파시마다 측정하여 주변 구조물 손상방지와 민원을 최소화해야 할 것이다.