

## 구조물 및 시설물이 인접한 구릉지 암반굴착 발파설계

류창하, 선우춘, 신희순, 정소걸, 최병희  
(한국자원연구소 자원개발연구부)

### 1. 서론

본 연구는 S시의 택지개발사업지역을 대상으로 암반굴착 작업을 위한 발파설계 기준의 마련과 효율적인 발파공법을 도출하기 위한 목적으로 수행되었다. 대상지역은 구획정리사업이 본격화 됨에 따라 풍화암을 포함한 리핑가능한 부분에 대한 절토작업이 거의 완료되고 리핑방법을 적용하기 어려운 암굴착을 위하여 화약발파를 이용한 암발파 작업이 요구되고 있으나 인접한 지역에 주요 구조물들과 micron/sec 단위의 허용수준을 요구하는 진동에 매우 민감한 시설물들이 있어 발파작업으로 인한 지반진동의 영향문제가 매우 심각한 지역이다. 연구의 주요 내용은 발파진동에 의한 인근 주요 건물 및 시설물에 미치는 영향여부를 검토하고, 발파진동 피해를 예방할 수 있는 적정 화약발파 설계를 위한 기준의 마련과, 발파진동 감소방안 및 발파 대안책으로서의 암반굴착방법 도출 등이다.

### 2. 대상지역의 암반특성조사

Fig.1과 Fig.2는 대상지역의 주요 구조물 위치와 3차원 지형도를 보여 준다. 발파진동은 매질인 암반의 특성에 큰 영향을 받으므로 대상지역의 암반을 이해하는 것은 매우 중요한 일이다. 암반의 특성을 평가하기 위하여 시추자료 검토, 시추코아에 대한 실험실 물성실험, 현지 탄성파속도 측정 등을 실시하였다. 측정자료를 종합하여 보면 대상지역의 암반은 풍화토에서 경암까지 분류될 수 있으며 비교적 암질의 변화가 큰 것으로 나타났다. 시추주상도에 나타난 지표 5m이하 심도의 보통암에 대해서는 리핑이 어렵고 대부분 발파에 의한 절취작업이 필요할 것으로 판단되었다. 시험발파시 측정자료가 이 지역 암반의 특성을 반영할 수 있도록 하였다.

### 3. 발파진동에 의한 영향평가 및 허용수준 설정

#### 주요 구조물에 대한 허용수준의 설정

택지개발지구 근처에 위치한 구조물들은 K, D사의 주요 설비가 있는 산업건물, 아

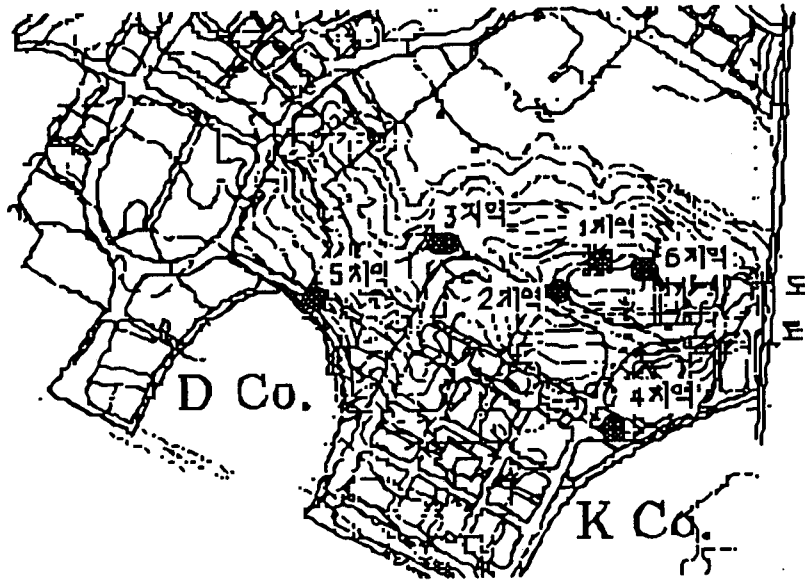


Fig. 1 굴착대상지역 및 인근 구조물

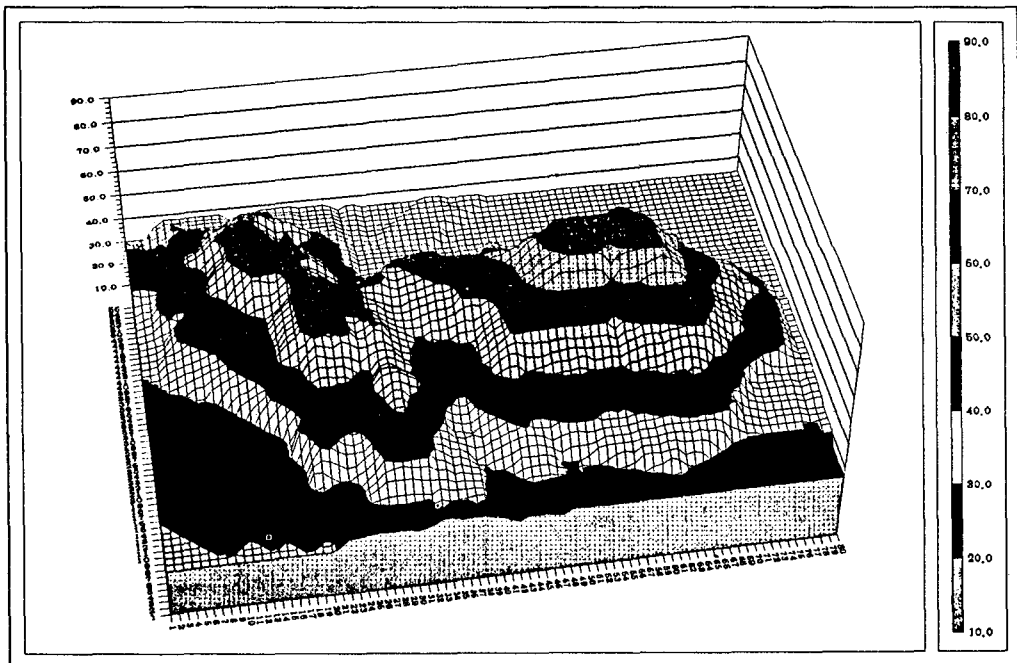


Fig. 2 3차원 지형도

파트 건물 및 주택, 상가 건물들과 철거예정인 가옥들로서 건물들의 상태를 파악하기 위하여 건물외부 및 내부의 균열들을 조사하였다. 대상지역의 건물들에 대한 허용기준으로, 국내 지하철 공사시 통상 적용하고 있는 건물 형태에 따른 허용기준과 독일기준, 미 광무국 및 노천채광국에서 제안한 허용기준 중 가장 엄격한 수치를 대상지역의 건물들에 대한 허용기준으로 채택하였다.

#### 주요 시설물에 대한 허용수준의 설정

대상 지역의 주요 시설물로는 진동에 대해 micron/sec 단위의 허용수준을 요구하는 매우 민감한 장비류와 컴퓨터류가 있다. 주요 장비류에 대한 발파진동의 영향은 각 제작회사로부터의 장비에 대한 특성자료와 사양서를 분석하여 평가하였다. 장비류에 대한 발파진동의 영향을 평가하는 데 있어서 발파진동은 일회적인 진동이므로 대부분의 장비 사양서에서 대상으로 하고 있는 주기적인 진동에 비해 장비에 미치는 영향이 작을 것으로 예상되지만 발파설계는 최대 진동수준이 사양서의 진동수준을 넘어서지 않는 것을 기본 원칙으로 하였다. 주파수 대역 및 진폭으로 규정된 기준은 속도치로 환산하여 비교하였고 허용수준의 설정은 장비류중 가장 민감한 장비에 대한 진동속도치로 하였다.

기타 컴퓨터류, 계측기류, NETWORK 등은 발파진동에 대한 구체적인 허용기준이 명시되어 있지 않으나 외국의 규격서 또는 표준서에 제시되어 있거나 기계류 및 전기, 전자장비에 대한 허용수준 제안치와 구조물에 대해 가장 엄격한 진동수준인 유적이나 고적등의 문화재와 컴퓨터 시설물에 대한 허용진동수준과를 비교하여 낮은 수준을 허용수준으로 설정하도록 하였다.

#### 발파설계기준

기초내진 설계가 되어 있거나 또는 완충장치를 사용하는 경우에도 이러한 시설들이 외부로부터의 진동을 어느 정도 차단 또는 감쇠시킬 수 있는지의 수치가 정량적으로 표시되어 있지 않으므로 기계기초 및 건물 바닥에 정밀도가 높은 진동가속도계를 설치하여 1차적으로 장비가 설치되어 있는 건물 바닥의 진동수준을 계측하고 진동이 감지될 경우 바닥의 진동을 trigger signal로 하여 기계 기초에 전달되는 진동을 계측한 후 전달되는 진동수준이 설정된 허용수준을 넘어서지 않는 것을 설계기본으로 하였다.

### 4. 현장계측 및 결과분석

#### 측정장비 및 측정방법

본 연구에 사용된 계측장비는 발파진동 전용 측정장비와 진동 가속도계 및 signal

conditioning system 들이며 대상지역 암반에서의 지반진동과 건물내에서 주요 시설 물이 기초한 바닥의 진동수준을 계측하였다. 기계기초의 진동 또는 기계가 설치되어 있는 구조물의 바닥 진동의 계측은 일반 발파진동 계측기기를 사용하여 측정할 수 있는 수준을 넘어선 정밀도를 필요로 하므로 본 연구에서는 정밀도가 높은 압전재료를 이용한 진동 가속도계를 사용하였다. 진동파형은 디지털 스토리지 오실로스코우프를 사용하여 계측하고 컴퓨터로 전송한 후 분석하였다. 진동계의 부착은 구조물 바닥이나 기계의 경우 양면 테이프를 이용하여 표면에 부착하였고 지반의 경우에는 지반에 꽂을 수 있는 스파이크를 제작하여 가속도계에 부착한 후 설치하였다.

### 시험발파

시험발파의 목적은 암반굴착을 위한 본격적인 발파작업을 실시하기 전에, 일련의 사전 발파작업 및 발파진동 계측을 통하여 사용 화약의 종류, 화약량 및 발파패턴이 지반 진동에 미치는 영향과 대상지역의 암반조건에 따른 진동감쇠 특성, 진동주파수 특성 등 지반진동의 전파특성을 조사하고 주위 주요 시설물에 대한 영향평가 및 발파설계를 위한 기초자료를 구하는 데 있다. 3차례의 시험발파를 실시하여 60회 이상의 지반진동을 측정하였다.

1차시험은 연암 및 보통암지역에서 실시하였고 1차시험 결과를 기초로 하여 2차 및 3차 시험발파는 지발시차의 영향과 경암에 대한 발파효과의 분석과 실제 발파수준을 적용하여 시험발파결과의 타당성을 검토하였다.

### 발파지점 및 계측지점의 선택

발파에 의한 지반진동의 수준에 영향을 주는 변수들중 대상지역에서 특별히 고려하여야 할 변수들을 세분하여 살펴보면, 1차적으로 폭약류의 선택과, 파괴대상 암반 즉 장약을 한 부분의 암반조건에의 영향, 지반진동의 전파경로 등을 들 수 있다. 발파대상 암반이 연암, 보통암, 경암인가에 따라 암반을 파쇄하는데 사용되는 에너지와 암반중에 탄성파의 형태로 전달되는 에너지의 비율이 달라지며 또한 암반에 발달해 있는 절리 등 구조적 특성 역시 파쇄도 및 진동수준에 큰 영향을 미친다. 대상지역에서의 암반 물성을 측정된 결과를 보면 연암에서 경암까지 다양하게 분포하고 있어 지반진동 전파특성을 대표할 수 있는 관계식을 유도하기 위해서 여러 장소를 선정하여 발파지점을 변화시키고, 장약량의 조절과 폭원으로 부터의 거리를 조절하여 발파위치, 장약량 및 측정위치의 변화를 충분히 반영할 수 있도록 하였다. 발파지점은 6개의 지역을 선택하였고 (Fig. 1 참조) 지반진동 측정위치는 폭원으로 부터 인접한 15m 거리로 부터 150m 거리까지 분포하였다.

### 지반진동 계측결과

진동계측자료로 부터 암반의 영향, 지발시차의 영향 등이 분석되었고 진동전파경향은 회기분석을 통하여 유도하였다. 측정자료들의 회기분석 결과는 세계급근환산과 제급근 환산의 경우 큰 차이는 없으나 접합도가 약간 더 높은 세계급근 환산방법으로 측정자료의 대표식을 표시하였다.

Fig. 3은 대상지역에서 측정된 최대 진동속도치를 세계급근 환산에 대해 도시한 결과를 보여준다.

### 암반의 영향

경암에 대한 발파효과를 알아보기 위하여 3차시험시 BH-1 시추공 지역에서 경암이 드러나도록 굴착한 후 시험발파를 실시한 결과와 보통암 및 연암지역에서의 결과와 비교 검토하였다.

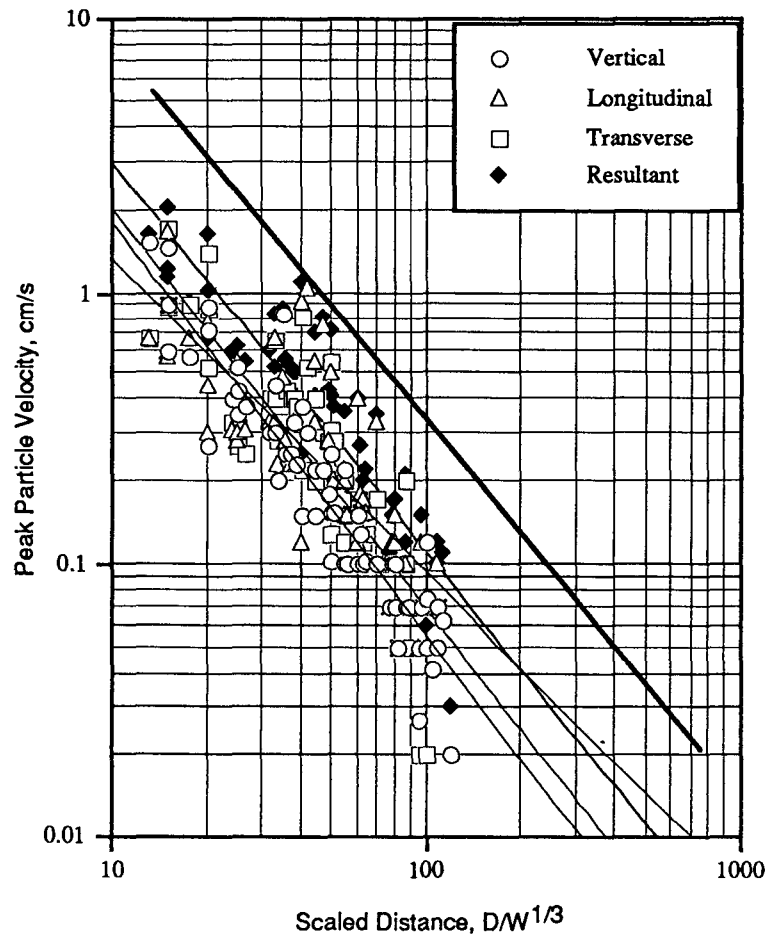


Fig. 3 Peak Particle Velocity vs. Scaled Distance

### 지발시차의 영향

향후 대상지역에서의 암반굴착을 위한 발파작업은 주위 조건으로 사용 화약량의 제한을 받게 되므로 제한된 화약량으로 보다 원활한 발파효과를 얻기 위해서는 지발비관을 이용하여 시차를 두어 발파하는 지발발파의 적용이 필연적이다. 일반적으로 ms 지발발파의 효과는 진동수준의 감소와 파쇄효과의 증대를 가져오는 것으로 알려져 있다. 그러나 1차 시험발파의 순발발파에서 측정된 발파진동파의 진동지속시간은 약 100-200 ms로 나타났으며 따라서 25 ms의 시차는 진동수준의 증폭 또는 감쇠효과를 가져올 수 있는 것으로 나타났으며 2차 및 3차 시험발파에서 시차효과의 영향을 확인하였다.

## 5. 발파설계

### 사용 화약량의 한계 결정

사용 화약량의 한계를 결정하기 위하여 3차에 걸친 시험발파를 실시하여 대상지역에서 진동수준을 예측하기 위한 식으로써 예상평균 진동수준과 예상최대 진동수준에 대한 예측식을 도출하였다. 실용적인 면에서 암반별 영향, 지발시차 영향을 별도로 구분하지 않고 예측식에 그 영향들이 포함되도록 보수적으로 처리하였다.

사용 장약량 및 거리에 따른 진동수준 평균은 진동성분의 벡터합을 처리한 식인 다음 식으로 예측할 수 있다.

$$V_{ave} = 79.57 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.424}$$

그러나 안전문제를 고려하여 대상지역에서의 설계에 이용할 예측식은 모든 측정자료를 포함하는 다음식을 이용하여 진동 상한값을 예측하였다.

$$V_{max} = 220.3 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.424}$$

현장에서의 용이한 활용을 위하여 발파지점으로 부터의 거리, 사용화약량, 예상 진동치를 표로 볼 수 있도록 작성하여 제시하였다.

### 허용진동수준

허용진동수준은 상기에 기술한 발파진동이 구조물 및 시설물에 미치는 영향을 분석한 결과로 부터 설정하였고 본격적인 암굴착 발파작업이 시작될 때 지반에서의 진동계측치

로 구조물 및 시설물에 대한 허용수준을 평가할 수 있도록 허용수준을 도출하였다.

#### 발파패턴 및 작업장의 형성

대상지역과 같이 제한된 조건하에서 발파효율의 증대를 위한 방안 중 하나로 벤치를 이루는 계단식 작업장을 형성하여 구릉지 형태를 굴착하도록 설계하였다. 1자유면의 경암지역에서의 시험발파결과는 제한된 장약량으로도 어느정도의 발파효율을 얻을 수 있는 것으로 나타났으며 벤치를 형성하여 자유면을 증대시킨다면 발파효율의 증대와 함께 진동 감쇠효과도 얻을 수 있는 장점이 있다.

벤치의 형성 및 발파패턴은 파쇄암의 비산을 고려하여 안전성을 확보할 수 있도록 설계하였다.

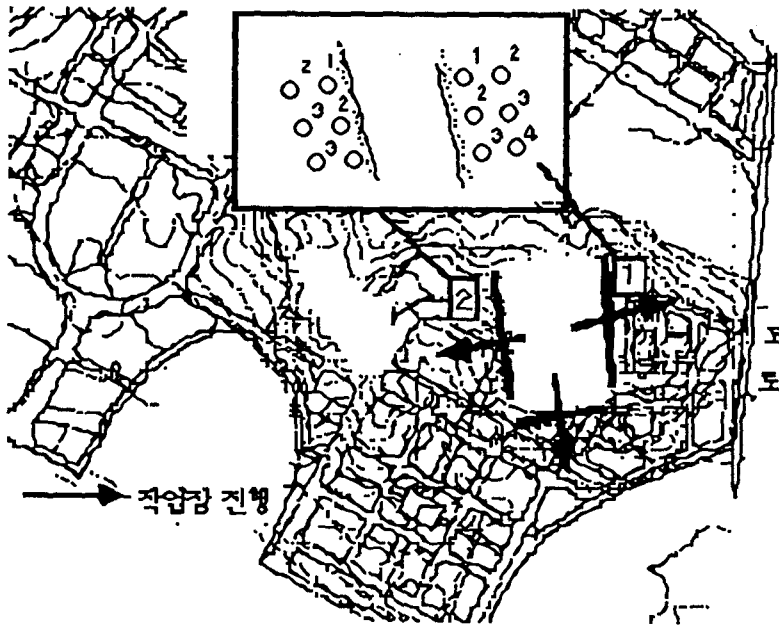


Fig. 4 벤치 형성 및 발파패턴 예

#### 기타 공법

주요구조물 및 시설물에서 100m 이내로 인접한 지역에서 정상적인 발파작업에 의해 높은 지반진동이 예상될 경우의 굴착방법으로 선행이완 발파공법과 화약발파대신에 적용할 수 있는 연속천공에 의한 방법과 유압식 할석기에 의한 방법이 제시되었다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구는 주요 구조물과 진동에 매우 민감한 시설물이 인접한 지역에서의 암반굴착 작업을 위한 발파설계 기준의 마련과 효율적인 발파공법을 도출하기 위한 목적으로 수행되었다. 본 연구를 통하여 대상 구조물의 형태와 주요 시설물들의 진동반응 특성을 분석, 허용진동수준을 설정하였고 지역적 특성과 발파패턴의 영향이 반영될 수 있도록 3차례에 걸쳐 시험발파를 실시하고 시험발파를 통하여 계측한 지반진동자료를 처리하여 대상지역에서의 평균진동수준과 진동 상한값을 예측할 수 있는 식을 유도하였다.

발파효율의 증대와 파쇄암의 비산 등으로 부터 안전성을 확보할 수 있도록 지형에 적합한 발파패턴이 도출되었고 정상적인 발파가 이루어지기 어려운 근접지역에서의 암반굴착을 위한 보조공법들이 제시되었다.