

# 암파쇄를 위한 굴착공법 검토

발파계획을 세울 때는 암석의 종류, 지질구조, 굴진장, 폭약의 종류, 발파공의 배치, 제발도(齊發度) 등을 고려해야 한다.

## 1. 발파

### 1-1. 발파의 개념

폭발(爆發 explosion)은 “압력의 급격한 발생 또는 해방의 결과로서 격렬하게 그리고 요란하게 파괴하거나 팽창하는 것”이다. 폭발에는 발화, 착화 또는 점화(點火)에 의한 연소(燃燒)와 기폭(起爆) 또는 점폭(initiation)에 의하여 일어나는 폭굉(detonation)이 있으며, 폭발에 의한 폭파(爆破)와 유사한 용어로는 발파(發破, blasting)가 있다.

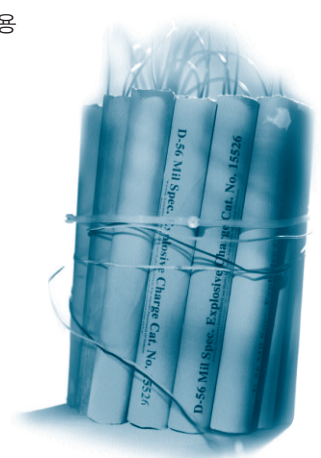
폭파(爆破)는 “폭약이 폭발에 의하여 생기는 충격파 또는 가스의 팽창력을 이용하여 물량을 파괴한다”는 뜻으로 구조물이나 시설 등을 파괴한다는 의미가 내포되어 있는 반면 발파(發破, blasting)는 “암반을 파괴하되 주변에 있는 구조물이나 시설을 보호한다”는 뜻을 지닌다.

발파(發破, blasting)현상은 충격파에 의하여 견고한 암반에 잔금이 가도록 하고 가스의 팽창에 의하여 이 잔금을 크게 넓혀서 암석괴(또는 블록)로 쪼개서 떨어뜨리게 된다. 따라서 발파계획을 세울 때는 암석의 종류, 지질구조, 굴진장, 폭약의 종류, 발파공의 배치, 제발도(齊發度) 등을 고려해야 한다.

### 1-2. 발파의 목적

발파(發破, Blasting)는 다음과 같은 목적으로서 수행된다.

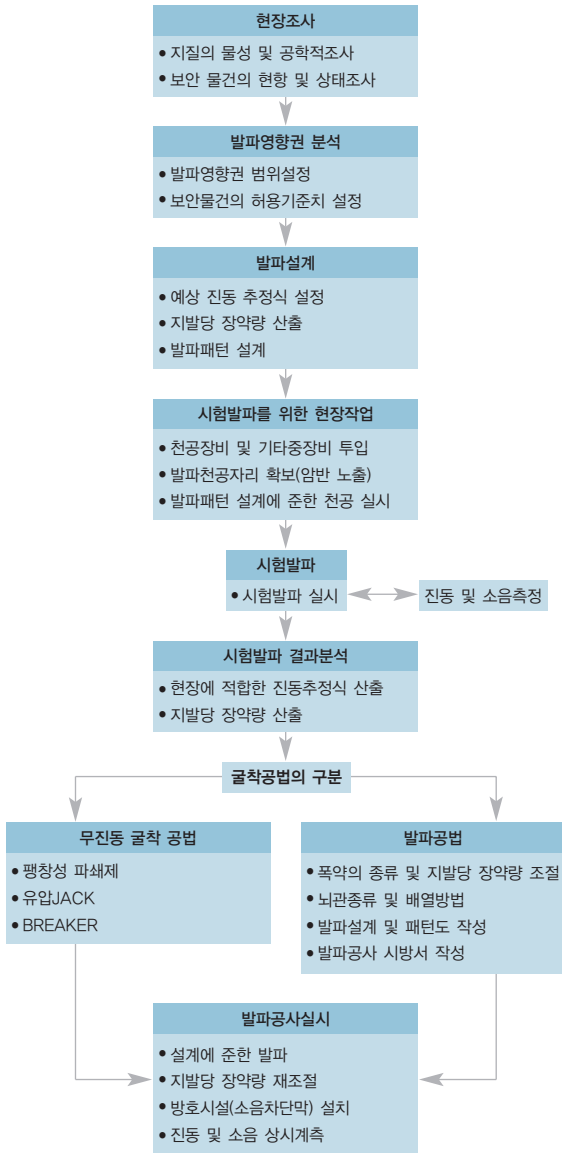
- ① 터널, 지하갱도의 굴진, 지하철 건설
- ② 도로설계, 확장, 조성
- ③ 콘크리트 골재 또는 건축용 석재(石材)의 채취(採取)
- ④ 광물(鑛物)자원의 채취(採取)
- ⑤ 수중발파(水中發破)
- ⑥ 운하건설(運河建設)
- ⑦ 지진탐광 및 지진발생의 예지
- ⑧ 지하 비축기지 및 공간이용
- ⑨ 군용(軍用)
- ⑩ 기타



### 1-3. 암파쇄 설계 흐름도

암파쇄 과정은 아래에 보여주는 설계의 흐름도와 같이 수행된다.

〈그림 1〉 암파쇄 설계흐름도



### 1-4. 발파의 종류

발파는 발파현장의 종류 및 주변의 조건에 따라서 여러 가지로 분류 할 수 있으며 다음과 같다.

#### (1) 일반발파 및 대발파

발파설계를 위해서는 주변사항과 현장의 지질학적 내용을 바탕으로 사전에 발파영향권을 분석·검토한 후 예측치를 발파설계에 반영하여 설계에 의한 계획적인 작업이 이루어져야

한다. 그러나 일반발파 공법은 상기와 같은 발파설계가 없이 현장의 몇몇 경험만을 위주한 숙련공의 기량에 좌우되어 실행되고 있다.

따라서 이론적이거나 학술적으로 우수한 기술자가 발파작업에 관여되지 못하므로써 발생하는 발파공해에 대응할 수 있는 사전예측과 분석이 불가능하고 결과적으로 민원 발생은 물론 현장주변의 각종 보안물건에 대한 피해를 방지할 수 없는 것이 현실이다. 일반발파(대발파) 역시 사전 예측으로 설계가 이루어지며 주변보안물건과 일정거리 이상 이격된 위치에서 적용하는 관계로, 흔히 말하는 소발파 및 제어발파가 될 수 없다.

따라서 대량의 물량을 생산 하므로써 경제적인 가치에 중점을 둔 것이 일반발파(대발파)라 할 수 있으며, 주로 민원의 소지 및 발파공해(진동·소음·비석)에 직접적인 관계가 없는 채석장발파나, 신설도로건설 현장 등에 적용된다.

#### (2) 미진동 제어발파(미진동파쇄 포함)의 개념 및 종류

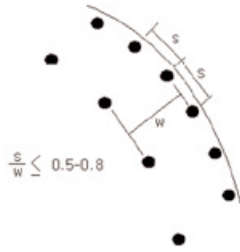
선진국에서 환경문제가 사회문제로 심각하게 작용하였던 1970년대에 현재의 국내 상황과 같이 도심지 발파문제로 주민들과 건설업자간에 분쟁이 계속되어 상기와 같은 무진동 굴착공법이 개발되었다. 그러나 이들 공법은 대규모 굴착물량에 대해서는 적용키 어려우므로 주변상황에 피해를 주지 않고 굴착할 수 있는 발파공법이 추가로 개발되었다. 이는 첨단 계측장비와 발파공법을 접합시켜 최적의 조건을 만듦으로써 발파지역에 인접되어 있는 구조물의 상태 및 현황을 정확하게 파악하여 허용진동치 이내로 발파하도록 하는 공법이다.

진동제어 발파공법은 발파시마다 진동을 계속하여 분석과 검토를 거치면서 현장에 적용하여야 되는 관계로 경험과 기술이 풍부한 기술자가 현장관리를 해야 한다는 제한 조건이 있다. 또한 미진동제어발파는 사면발파, 터널발파 등 현장 내에서도 계획된 굴착면을 손상 없이 얻기 위해서 많이 이용되고 있다.

#### 1) 스무스 발파(Smooth Blasting)

이 공법은 주로 터널현장에서 주변공을 맨 마지막에 폭파 시키는 점에서 일반적인 발파방법과 같지만 다수의 주변공을 평행히 접근시켜 배치하고, 공경보다 훨씬적은 직경의 폭약을 사용하여 약장약으로 폭파시키는 점에서 다르며 이공법의 특징은 다음과 같다.

〈그림 2〉 Smooth Blasting

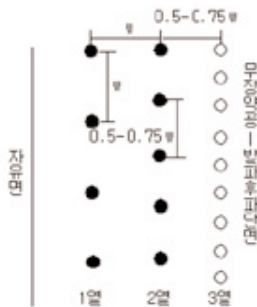


- 1) 암반의 손상이 적다.
- 2) 여굴이 적고 매끈한 굴착 면을 얻을 수 있다.
- 3) 부석이 적다.

2) 라인드릴링(Line Drilling)

그림과 같이 굴착 예정선을 따라 다수의 공(Line Drilling공)을 근접 천공하여 인공적으로 파단면을 만들고, 인접공 발파시에는 크랙이 발생하여 굴착예정선 까지만 파괴된다. Line Drilling공에는 장약을 하지 않고 자유면과 굴착예정선 사이에 천공한 폭파공에 장약 한다. 폭발시 에너지는 Line drilling공으로 형성된 면에서 차단되며 그 보다 더 깊숙한 암반에는 영향이 적으며 매끈한 면을 얻을 수 있다. 본 공법은 암반의 손상이 최소가 되지만 천공수가 많아져 천공비가 증가되며 또 Line Drilling공을 평행히 천공하기 위해서는 숙련된 기능이 필요하다. 무장약공의 공간격은 천공경의 2-4배로 하여 천공을 하면 된다.

〈그림 3〉 Line Drilling



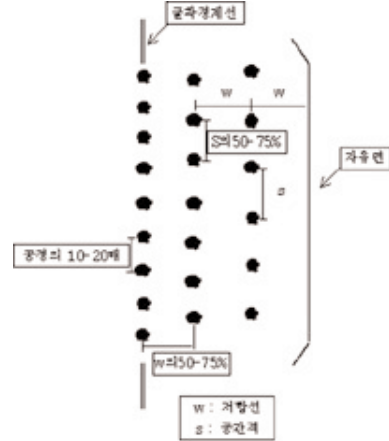
3) 선균열발파(Pre-Splitting)

다수의 공을 천공한 다음 주변공을 먼저 폭파시켜 파단면을 만든 다음 나머지 부분을 폭파시키는 방법이다. 주변공은 공간격이 Smooth Blasting보다 적고 장약량도 적다. 맨 먼저 폭파시키면 각 공 사이에 균열이 발달되어 파단면이 형성됨으로 후속 발파로 인한 영향을 억제 시킨다.

Line Drilling에 비하여 천공수는 적지만 마찬가지로 평행공을 천공하여야 됨으로 숙련된 기능이 요구되며 또 암반의 균열이 많

은 경우는 폭파 에너지가 인접공 사이보다도 암반내 균열을 따라 전파됨으로 장약량, 공간격을 암반조건에 맞도록 결정해야 한다.

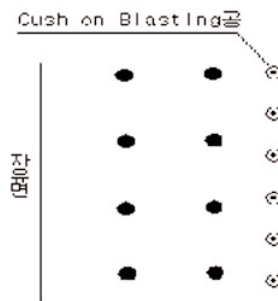
〈그림 4〉 Pre-Splitting



4) 쿠션발파(Cushion Blasting)

Smooth Blasting과 유사한 방법으로 주변공을 맨 나중에 폭파시키지만 장약방법이 특이하다. 장약 방법은 폭파공보다 훨씬 적은 약량의 폭약을 폭파공내에 분산시켜 자유면 쪽으로 장약하고 나머지 공 전부를 모래로 채운다. 이것은 폭발시에 모래와 공기를 완충(cushion)작용시켜 파단면 보다 더 깊숙히 작용하는 폭파에너지를 약화시켜 자유면 방향으로 파괴를 유도 한다.

〈그림 5〉 Cushion Blasting



- ① 장점 : 라인드릴링이나 선균열발파보다 공간격이 넓어 천공비용을 줄일 수 있으며 견고하지 않은 암반에서도 좋은 결과를 얻을 수 있고, 선균열 발파와 같이 분할 발파를 하지 않아도 된다.
- ② 단점 : 라인드릴링과 선균열 발파를 병행하지 않고는 90° 코너의 폭파가 어렵다.

5) 에어튜브발파(Air Tube, 신기술)

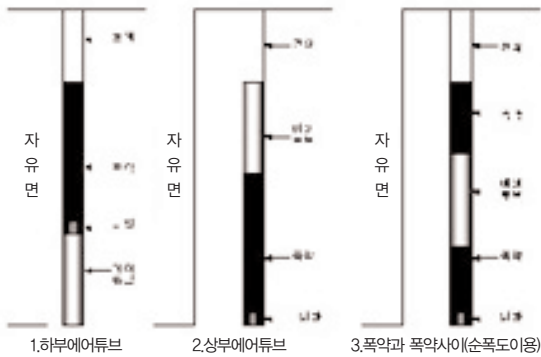
① 개념 및 효과



산정된 장약량을 적정 분할하고, 그 사이에 Air Tube를 장착 하여 일시에 발파함으로써 발파효율 증대, 2차파쇄(소함)의 효율성 확보, 이중내관 사용 불필요 및 소음·진동 저감이 가능함. 따라서 발파공사시, 경제성이 크게 증진됨(공사비 20%까지 절감가능)

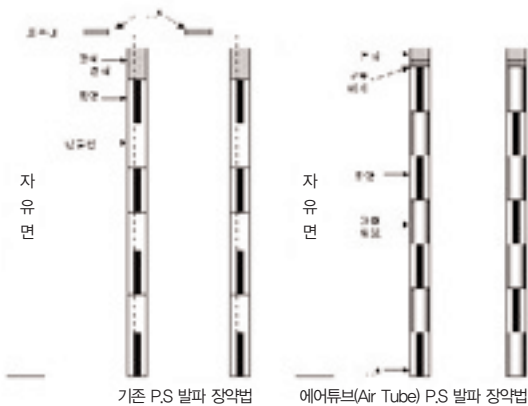
② Air Tube 발파패턴

<그림 6> Air Tube 장착패턴



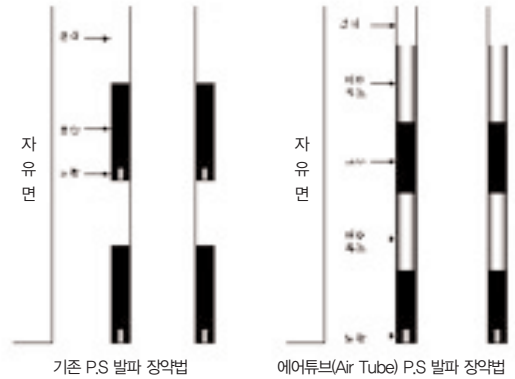
③ 기존의 선균열발파(Pre-Splitting)와 Air Tube 발파패턴

<그림 7> 기존의 P.S 발파(선균열) 장약법과 Air Tube



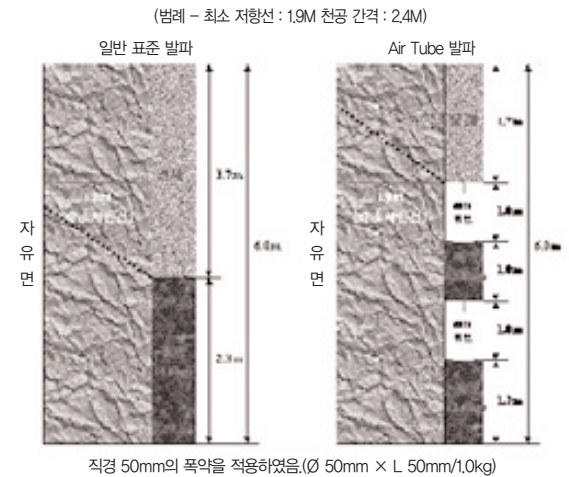
④ 기존의 분산장약(Deck charge)와 Air Tube 발파패턴

<그림 8> 기존의분산장약과 Air Tube에 의한 장착패턴



⑤ 기존의 일반발파와 Air Tube 발파패턴

<그림 9> 기존의 일반발파와 신기술 Air Tube 발파패턴

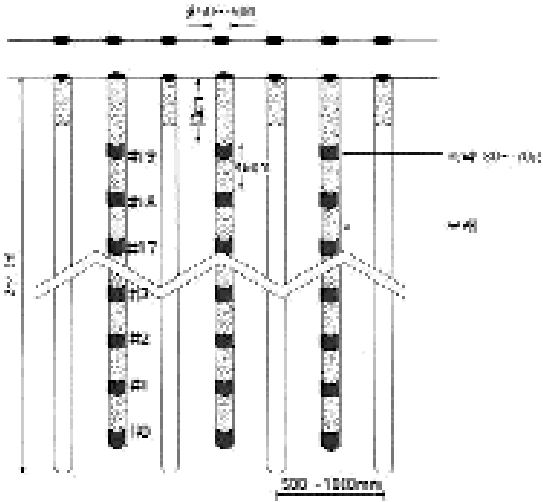


직경 50mm의 폭약을 적용하였음.(Ø 50mm × L 50mm/1.0kg)

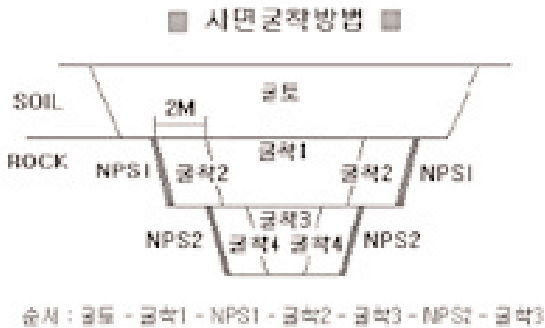
6) 사전암반절단(NPS:New\_Presplitting, 신기술)

이 공법은 발파전 단계에서 발파진동, 소음이 외부에 유출되지 않도록 발파구역의 외곽암반을 사전에 절단하는 방진발파공법으로서 첫째, 본 발파시 발파작업으로 발생하는 민원을 줄일 수 있으며 둘째, 계획된 굴착면(사면발파 포함)을 얻으므로 여굴을 방지(계획굴착예정선의 모암손상 방지)하며 셋째, 인접된 보안물건에서 실시될 무진동(유압잭, 약액파쇄 등) 굴착구간을 줄이므로써 공기 및 경비의 절감을 얻을 수 있다.

〈그림 10〉 NPS 발파패턴



〈그림 11〉 NPS를 이용한 사면발파패턴



## 2 미진동 및 무진동 굴착공법

미진동 및 무진동 굴착공법이란 기계굴착(Breaker, Dozer) 및 발파작업이 곤란한 현장에 일차적으로 천공장비로서 천공을 한 다음 미진동파쇄기, 플라즈마(고전압·대전류), 유압 및 팽창제 등으로 사전 균열을 유도하고, 최종적으로 Breaker를 이용하여 암반을 파쇄하는 방법이다. 이러한 미진동, 무진동굴착공법은 1차 파쇄시 진동 및 폭음, 비산과 같은 공해는 일반적인 발파보다는 미약하나, 2차 파쇄시 발생하는 기계소음 및 여진이 연속되기 때문에 인체에서 느끼게 되는 감도는 의외로 크게 확장될 수도 있고, 추가적으로 공사 효율성 및 공사비 증액의 요인이 될 수 있으며 아래에 비교표를 간략히 제시 한다.

〈표 1〉 미진동파쇄 및 무진동굴착공법의 비교

구분	암파쇄		무진동굴착		
	가스압	전력충격 파압공법	화학제품 (팽창력)	유압장비	
제품종류 (취급회사)	· CARDOX · PIKROSE CO · CCR	플라즈마	· 비폭성파쇄제 (쌍용양회) · BENTONITE · KUBATEC(스위스) · BRISTAR · 오노다시멘트(일본)	· SUPER WEDGE (쌍용건설 신기술) · DARDA · SFS · HFS · CRS	
파쇄원리	CO2가 가스가 기화되는 과정 에서 발생하는 가스압력 이용	고전압, 대전류의 순간적인 방전에 의한 충격력 및 팽창력 이용	석회석규산염을 주제로 한 무기 화합물의 경화 팽창력 이용	급속유압에 의해 금속재가 돌출하여 인장파괴 유도	
시공도시					
공해 정도	진동	微	微	無	無
	소음	微	微	微	無
	비석	공발 및 비산 가능	공발 및 비산 가능	공발가능	無
작업 허가 조건	자격 허가 불필요	자격 허가 불필요	자격 허가 불필요	자격 허가 불필요	
파쇄시간	즉시	즉시	12~24시간 이내	즉시	
팽창압	C-74:1260kg/cm <sup>2</sup> F-57:2360kg/cm <sup>2</sup>	-	12시간 기준 300kg/cm <sup>2</sup>	500~ 1300kg/cm <sup>2</sup>	
시공방법	천공→장악→ 전색→발파→보호 →발파→2차파쇄	천공→충격쇄상임 →전색→발파보호 →파쇄→2차파쇄	천공→파쇄제주입 →대기(12~24hr) →파쇄 2차파쇄	천공→장비삽입 →유압작동→ 파쇄→2차파쇄	
적용현장 (주 사용지)	도심지 중, 소규모	도심지 및 외곽 대,중,소 각종 현장	도심지 중, 소규모	도심지 중, 소규모	
천공장비	크로러드릴, 인력	크로러드릴, 인력	크로러드릴, 인력	크로러드릴	
천공	구경(mm)	45~65	51	38~75	65~105
	깊이(mm)	1.5~2.0	1.5~3.0	1.5~2.0	0.8~1.0
	간격(mm)	천공경의 30배 이내	0.6~1.0	천공경의 30배 이내	0.5~0.8
일일작업량 (지하터파기 2차파쇄포함)	유압 드릴	50~100m <sup>2</sup>	100~200m <sup>2</sup>	50~100m <sup>2</sup>	50~180m <sup>2</sup>
	가격대비 (실행단가)	2대 기준 20,000원/m <sup>2</sup> ~30,000원/m <sup>2</sup>	18,000원/m <sup>2</sup> ~25,000원/m <sup>2</sup>	60,000원/m <sup>2</sup> ~80,000원/m <sup>2</sup>	35,000원/m <sup>2</sup> ~60,000원/m <sup>2</sup>

## 3. 발파진동 및 진동관리 방안에 대한 고찰

### 3-1. 발파진동의 고찰

#### (1) 발파진동과 측정

발파진동에 대한 주변 구조물이나 시설물의 피해 정도는 지반을 전파하는 지반진동의 크기와 공기 층을 전파하는 충격파(shock wave)로 유발된 폭풍압의 크기에 의해 피해규모를 예측한다. 시험결과에 의하면 발파로 인하여 발생하는 총에너지 중에서 0.5~20%가 탄성파로 변환되고, 이러한 탄성파가 암반 내를 전파함으로써 전면에서는 진폭과 주기를 갖는 진동으로 나타난다.

발파에 의한 지반진동의 측정은 방향에 따라 수직방향(vertical), 진동원로부터 측정점을 향하는 평면상의 파(longitudi-



nal) 및 이 두 방향과 직각을 이루는 접선방향(transverse)의 3 성분으로 이루어진다. 이들 3성분의 크기는 대상 암반, 지형 및 발파에 의하여 생성된 탄성파 즉, 실제파(P파와 S파) 및 표면파(love파와 Rayleigh)들의 상호 간섭에 따라 변한다. 발파진동의 시간영역에서의 변위, 속도, 가속도와 그에 따른 진동수 특성은 원하는 방향에 대한 값을 도출하며 이때 각 진동값의 최대치를 예측하기 위하여 적절한 계측기를 사용해야 한다.

## (2) 발파진동의 특성

발파 진동의 시간이력신호를 설명하는데 필요한 변수로는 최대진폭, 탁월주기 및 진동 지속시간을 들 수 있다. 이들 변수들은 발파순서와 전달매체에 의존한다. 폭원에서 가까운 지반진동의 크기는 매우 큰 값을 갖게 되므로 일반 측정장비로는 계측이 불가능할 수 있다. 그러므로 폭원과 거리 및 지발당 장약량에 따라 큰 진동을 측정할 수 있는 측정기기를 이용하여야 한다.

발파진동의 탁월진동수 특성은 지진이나 핵폭발로 인한 진동수보다 높고, 짧은 지속시간의 발파진동은 지진이나 핵폭발에 의한 진동에 비해 아주 작은 에너지가 전달되는 특성이 있다.

## (3) 탁월진동수

일반적으로 발파에 의한 탁월진동수는 전달매체와 폭원으로부터의 거리에 영향을 받게 되고, 저진동수 성분을 갖는 일반 구조물에 대해서는 발파로 기인되는 저진동수 성분에 의해 손상될 수 있는 경우가 종종 발생하므로 이에 유의하여야 한다.

Engineering value로 사용되는 최대 발파 진동치를 갖는 진동 신호는 다수의 진동수들이 동시에 영향을 주고 있고, 이는 지반 특성에 따라 그 탁월 진동수 성분이 각각 다르게 나타난다. 이때 상대적으로 큰 진동치를 나타내는 진동수들을 탁월진동수 성분으로 정의한다. 결과적으로 발파에 의한 지반진동은 3방향이 모두 상이한 값을 가지며, 지배하는 탁월진동수 성분들 역시 각각 차이가 있으므로 진동 성분 방향에 따라 그 특성을 정확히 분석하는 것이 좋다.

## (4) 성분의 최대치와 벡터합

발파진동은 지반을 3차원적으로 운동하게 하는데 지반의 운동을 정의하기 위해서는 서로 직각인 3방향(L, T, V)의 성분을 측정한다.

다. 발파에서 이들 3성분 중 어느 하나가 항상 주가 되는 것이 아니고 최대성분은 발파상황에 따라 변화한다. 또한 최대치는 거의 서로 다른 시각에 존재하며 진동수 특성 또한 다르게 나타난다. 현장 계측은 시간영역에서 3방향 최대 진동량과 각 방향 입자 속도의 임의의 시각에 대한 vector합을 기록한다. 이중 각 임의의 시각에서의 vector합들 중 가장 큰 값을 발파시 산정된 resultant PPV(peak particle velocity)라 정의하고 있으며 이는 항상 일정 진동 방향 성분의 최대 속도 vector량 이상의 값을 갖게 된다. 따라서 진동 속도에 의한 현장 지반 진동량은 상기 resultant PPV를 기준으로 한 자료를 근거로 발파 설계 및 계측 관리가 이루어지게 된다.

## (5) 지반진동을 지배하는 요소

발파로 인하여 발생하는 지반진동의 크기는 여러 가지 인자에 의하여 결정되는 바 이들 인자 중 인위적으로 조절이 가능한 화약의 종류, 발파방법이 있으나 암반의 종류와 상태, 주변건축물 사이의 이격거리는 인위적으로 결정이 불가능하며 이들은 조작 불가능한 독립변수로 보아야 한다.

발파진동의 크기를 지배하는 요소는 첫째, 발파대상물인 암석의 물리적 특성 또는 구조물 등의 강성 특히 대상물 자체의 성질에 관한 것이고 둘째, 선택하고자 하는 화약류(폭약과 뇌관)의 종류와 기폭방법이며 셋째, 발파방법의 변화라고 할 수 있다. 그 분류 방법은 다음과 같다.

- 1) 암석의 물리적 특성 : 압축강도, 인장강도 및 암반의 상태 등
- 2) 화약류(폭약, 뇌관)의 선정
  - ① 폭약의 종류, 비중, 폭속, 가스량 등
  - ② 뇌관의 종류(전기, 비전기), 지연시차 등
- 3) 발파공법의 선택
  - ① 천공경, 최소저항선, 공간격, 천공장, 천공각도 등의 천공작업의 숙련도 및 방법의 선택
  - ② 장약후 실시하는 전색의 종류 및 방법(정확도)
  - ③ 발파공법의 선택 : 수평발파, 수직발파, 다단장약, 지발당장약량의 조절, 기타 여러가지의 제어발파(Smooth Blasting, Cushion Blasting, Pre-splitting 등)