

## 암반굴착에 의한 발파진동, 소음 및 비석의 조절

류창하<sup>1)</sup>

### Control of Blast Vibration, Air Blast, and Fly Rock in Rock Excavation

Chang-Ha Ryu<sup>1)</sup>

#### ABSTRACT

Blasting operations associated with rock excavation work may have an environmental impact on nearby structures or human beings. With the increase of construction work in urban areas, vibration problems and complaints have also increased. In order to determine the optimum design parameters for safe blast, it is essential to understand blast mechanism, design variables involved in blast-induced damage, and their effects on the blasting results. This paper deals with the characteristics of ground vibrations, air blast and fly rock caused by blast, including the general method of establishing the vibration predictors, and damage criteria suggested by various investigators. The results of field measurements from open pit mine and tunnel construction work are discussed. Basic concepts of how to design blast parameters to control the generation of ground vibrations, air blast and fly rock are presented.

#### 1. 머리말

화약이 산업계에 도입된 후 화약발파는 유용 광물자원의 채취, 댐, 고속도로 및 지하철 건설 등 광업, 토목, 건설분야의 각종 작업에서 암반

굴착을 위한 방법으로 널리 이용되어 오고 있다. 암반굴착을 위한 발파설계시 각 설계변수들은 효율성, 안정성 및 안전성의 세가지 측면에서 검토되어야 한다. 발파로 파괴된 암석(또는 광석)들은 적재, 운반 및 처리가 용이하도록

\* 1992年 5月 接受

1) 正會員. 한국자원연구소 자원개발연구부

특 적정 파쇄도를 보여야 하며 발파로 인하여 주위 암반에 과도한 손상을 주지 말아야 한다. 파쇄도가 불량할 경우 2차발파와 같은 추가 작업이 필요하게 되어 경제적 손실은 물론 전 작업공정에 차질을 가져오게 된다. 또한 손상을 받은 터널 벽면이나 사면은 지지능력을 잃고 파괴의 가능성이 높아지며 보강대책이 심각한 문제가 된다. 안전성의 문제는 발파에 의해 야기되는 발파재해와 관련된 것으로서 도심지 밀집지역의 각종 공사 증가와 함께 발파가 주위 환경에 미치는 영향은 매우 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 발파재해의 주원인은 발파로 인하여 발생하는 발파진동, 발파풍(Air blast)으로 인한 소음 또는 폭풍압과 파쇄된 암석의 비산을 들 수 있으며 이로 인하여 인접 민가, 건물 등의 구조물에 피해를 주거나 인체에 영향을 미치며 때로는 인명사고를 가져오기도 한다.

역사적으로 보면 2차 세계대전 말기부터 도심지 인구증가, 각종 토목, 건설공사의 증가와 함께 발파진동과 발파풍으로 인한 인접 민가의 피해문제가 심각한 사회문제로 대두되기 시작하여 미국, 유럽 등지에서는 일찌기 발파진동에 관한 일련의 연구들이 수행되어 왔다. 미국의 경우 미광무국(U.S.Bureau of Mines)을 중심으로 발파진동의 특성 및 피해문제에 대한 장기간 연구가 수행되어 왔으며 수차에 걸쳐 종합결과가 발표되었다.<sup>1-4)</sup> 발파진동에 대한 구조물의 피해는 발파진동의 특성과 대상 구조물의 반응특성에 따라 좌우되나 발파진동의 특성을 결정하는 요소인 폭원과 전파매질인 지역적 특성이 다양하고, 구조물의 형태 및 종류도 다양하여 피해기준을 명확히 표현하는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 각국에서 채택하고 있는 발파진동의 허용기준도 다양하다. 국내의 경우 1970년대 까지만 하더라도 민원문제는

심각한 고려대상이 아니었으며 암반굴착 또는 채광을 위한 발파작업이 공장건물 및 주요 시설물에 미치는 영향을 검토하기 위해 연구가 수행된 바 있다.<sup>5,6)</sup> 그러나 지하철 건설공사, 도시 재개발 사업 등에 따라 인구가 밀집한 지역에서 발파를 이용한 암반굴착 작업이 증가하고 경제성장, 사회의식구조의 변화와 함께 발파재해에 대한 민원문제가 급증하여 안전성은 발파설계의 가장 우선적인 기준으로 대두되고 있다. 아직 발파재해로 인한 구체적인 기준이 설정되어 있지 않아 외국의 예에 준하고 있는 실정으로 국내 구조물의 특성, 발파원의 특성을 고려하여 법제화가 시급하다고 사료된다.

안전한 발파설계를 위해서는 주위 환경에 따라 관련 설계변수들의 적절한 조절이 필요하다. 변수들의 조절은 발파에 의한 암반의 파괴 메카니즘, 발파진동, 발파풍 및 비석의 특성에 대한 이해와 설계변수들의 영향이 제대로 파악될 때 가능하며 도심지의 건물밀집 지역에서도 안전한 발파작업을 가능하게 하는 고도의 발파 기술의 기초가 된다. 본 논문에서는 발파재해의 주요 원인이 되고 있는 발파진동, 발파풍, 비석의 특성을 검토하고 국내 측정사례와 이들의 제어를 위한 관련 설계변수들의 영향을 기술한다.

## 2. 발파진동 전파특성 및 구조물에 미치는 영향

### 2.1 발파진동 전파특성

폭약이 장약공내에서 폭발하면 강력한 폭굉 충격과 함께 에너지가 주위 암반으로 전달되면서 여러 형태의 암반파괴를 일으키며 일부 에너지는 응력과(Stress wave)의 형태로써 전파된다. 응력파의 도달에 따라 지반의 반응은 진폭과 주기를 갖는 진동의 형태로 나타나며 이

를 발파진동(Blast vibration)이라 부른다. 발파진동의 크기는 진동을 전달하는 매질의 변위 (Particle displacement, u), 속도(Particle velocity, v) 및 가속도 (Particle acceleration, a) 로 표시되며 이들 사이의 관계는 수학적으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$u = \int v dt ; v = \int a dt ; a = \dot{v} = \ddot{u} \quad (1)$$

진동의 형태를 일정 주기의 단순진동으로 가정할 경우 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$u = \frac{v}{2\pi f} ; v = \frac{a}{2\pi f} ; f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

여기서 f는 진동주파수, T는 진동주기들의 미한다. 자연 지진동의 주파수 범위가 수 헤르쯔 또는 그 이하의 저주파를 보이는 반면에 발파진동은 수십 헤르쯔 또는 그 이상의 주파수 범위를 보여준다. 발파진동 측정용 장비의 감응 주파수대역은 보통 2-200헤르쯔 범위이다. 측정위치에서 발파진동의 세기는 직교하는 세 성분인 진행방향의 성분, 진행 방향과 수직성분 및 수평성분으로 측정할 수 있다. 발파진동의 세기에 영향을 주는 변수들은 1) 화약의 종류와 장약량, 2) 발파원으로부터 측정까지의 거리, 3) 암반의 역학적, 구조적 특성, 4) 천공 패턴, 장약방법, 점화순서 등의 발파방법이며 지역적 특성과 발파조건에 따라 다르므로 대상 지역별로 발파조건에 따른 발파진동측정을 통하여 전파특성을 도출하여야 한다. 발파진동에 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 발파원으로부터의 거리를 주요 변수로 하여 (3)~(5)식과 같은 유형으로 표현할 수 있다. (3)~(5)식에서 화약의 특성, 전파매질인 암반의 특성, 발파조건의 영향은 감쇠지수 등의 상수들에 반영되어 나타난다.

$$V = kD^a W^b ; V = kD^a W^b e^{cd} \quad (3)$$

$$V = k\left(\frac{D}{W^b}\right)^n ; V = k\left(\frac{D}{W^b}\right)^n e^{cd} \quad (4)$$

$$V = k\left(\frac{D}{W^{1/2}}\right)^n ; V = k\left(\frac{D}{W^{1/3}}\right)^n \quad (5)$$

여기서

V = 진동속도, cm/sec

D = 폭원으로 부터의 거리, m

W = 지발당 최대장약량, kg

k, b, c = 자유면 상태, 화약의 성질, 암질 등에 따르는 상수

n = 감쇠지수

식 (5)는 거리를 장약량의 자승 및 삼승의 비율로 환산한 형태로서 각각 자승근 환산(root scaling) 및 삼승근 환산(cube root scaling)이라 부른다.

### 2.2 자료처리

(3)~(5)식들은 비선형(nonlinear)이나 양변을 로그변환시키면 선형(linear)의 식으로 만들 수 있으며 측정자료는 중회기분석(multiple regression analysis)기법을 이용하여 처리할 수 있다. 예를 들면 식 (3)의 양변에 로그를 취하면,

$$\log V = A + B \log D + C \log W \quad (6)$$

로 표시되며 다음과 같이 선형식으로 표시할 수 있다.

$$Y_i = A + B X_{i1} + C X_{i2} + e_i \quad (7)$$

여기서

$X_{i1}$  = logD의 i번째 측정값

$X_{i2}$  = logW의 i번째 측정값

$Y_i$  = i번째 (logD, logW)에 대한 측정값

$e_i$  = error 항

(7)식에서 n개의 측정자료에 대해 식을 대표 하는 상수 A,B,C의 계산은

$$\sum_{i=1}^n \{Y_i - (A + BX_{i1} + CX_{i2})\}^2 = \text{minimum} \quad (8)$$

이 되는 값을 찾는 것이며 이 계산방법은 최소 자승법(least square method)이라 부른다. 이 방법의 해는 행렬식으로 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_{i1} & \sum X_{i2} \\ \sum X_{i1} & \sum X_{i1}^2 & \sum X_{i1}X_{i2} \\ \sum X_{i2} & \sum X_{i2}X_{i1} & \sum X_{i2}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum X_{i1}Y_i \\ \sum X_{i2}Y_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서

$$\sum = \sum_{i=1}^n$$

### 2.3 측정사례

발파진동 전파식의 유형에서 (3)과 (4)식은 진동의 전파형태에 따라 기하학적 분산 및 비탄성적인 감쇠효과를 반영하는데 지수함수를 이용하여 좀 더 높은 적합도를 보이는 예측식으로 사용될 수 있으나<sup>7)</sup> 일반 발파설계시 실용적인 면에서 (5)식의 자승근 및 삼승근 환산이 주로 사용된다. 미광무국에서 수행된 노천채광 발파진동 자료들의 처리결과는 자승근 환산으로 좋은 적합도를 보이고 있으며 지하 핵 및 고성능 폭발시험, 터널굴착시 발파진동자료 처리에 있어서는 삼승근 환산에 의한 자료처리가 더 좋은 적합도를 보이고 있다.<sup>8-10)</sup> Fig. 1은 국내 주요 석회석 노천채굴장에서 측정된 발파진동 자료들로서 삼승근 환산거리에 대한 진동속도를 로그-로그 스케일로 도시한 결과를 보여 준다. 측정대상 지역은 강원도 동해시에 위치한 쌍용자원개발 동해사업소의 석회석 광산

과 삼척군에 위치한 동양시멘트 석회석 광산 및 충북 단양군의 한일 시멘트 석회석 광산 등으로 1978년도부터 1992년까지 기간에 측정된 자료를 종합한 결과이다.<sup>11-13)</sup> 자료처리 결과는 삼승근 환산을 이용한 자료처리가 자승근 환산에 비해 별 차이가 없거나 약간씩 더 높은 적합도를 보이는 경향이 있다. 전파특성은 지역별 및 성분별로 차이를 보이며 상관계수는 대부분 0.9이상을 나타내고 있다. Fig. 2는 쌍용 석회석 광산에서의 측정결과로서 79년도와 그 이후의 측정자료들을 대표하는 회귀선들을 비교하여 보면 동일 지역에서의 발파진동인데도 감쇠를 나타내는 기울기의 경향이 차이가 있음을 보인다. 이는 발파효율을 개선하기 위하여 79년도 이후 발파패턴 및 점화방법을 변경함으로써 인한 영향으로 해석될 수 있다. Fig. 3은 서울시 지하철 공사시 화강암 및 편마암 지역에서 굴착작업에 의한 발파진동 측정자료를 종합한 결과로서<sup>14)</sup> 삼승근 환산을 이용한 자료처리가 더 높은 적합도를 보이고 있다. 외국의 발파진동 측정사례와 비교하여 볼 때 터널발파의 경우 모두 삼승근 환산으로 더 높은 적합도를 보이나 노천채굴 발파진동의 자료처리 결과는 상이한 면을 보인다. 외국의 경우 자승근 환산에 의한 자료처리가 더 높은 적합도를 보이는 반면 국내의 경우 별 차이를 보이지 않거나 때로는 삼승근 환산을 이용한 자료처리가 오히려 더 높은 적합도를 보이고 있다. 이러한 경향은 폭원 특성의 차이에서 기인하는 것으로 보인다. 진동에 수반되는 에너지의 감쇠는 진동원의 기하학적 형상과도 관련이 되며 진동원의 형상이 선에 가까울수록 자승근 환산에 근접할 것으로 예상되나 국내 노천채굴의 경우 대규모 발파가 많지 않아 지반당 동시에 점화되는 장약공에서 형성되는 폭발의 기하학적 형상이 점 또는 구의 형태와 근접하게 되는 이유

로 판단된다. Fig. 4는 석회암 지역에서의 노천 발파시 측정된 발파진동기록의 한 예로서 폭원으로부터 270m 떨어진 곳에서의 성분별 파형을 보여준다. 근거리에서의 측정으로서 최대 진동속도에 수반된 주파수는 50-120Hz의 주파수 영역을 보이고 있다.

#### 2.4 구조물의 반응과 허용수준

발파진동에 대한 구조물의 손상은 대상 구조물에 따라 다양하게 나타난다. 발파진동에 대한 구조물 피해와 관련된 연구를 보면 일찌기 Rockwell(1927)은 채석장발파에 대한 인근 가옥의 피해여부를 조사하여 60~90m이상 떨어진 거리의 가옥들은 손상을 받지 않는다는 연구결과와 함께 장약량과 거리의 함수로 진동수준을 표시할 필요가 있음을 지적하였다.<sup>15)</sup> Thoenen and Windes(1942)는 구조물의 손상을 평가하는 기준으로 가속도가 적합한 것으로 보고하면서 안전기준으로 0.1g 이하를 제시하였고 1g이 넘으면 손상발생 가능성이 높다고 보고하였다.<sup>1)</sup> Crandell(1949)은 1000가구 이상의 가옥, 상가, 학교 등 여러종류의 건물에 대해 건물 근처 지반진동을 측정하고 발파 전, 후 구조물의 피해상황과의 관계를 조사하여 연구결과를 발표하였다.<sup>16)</sup> 구조물의 피해에 대한 허용수준은 다음과 같이 진동 가속도와 주파수를 고려하여 에너지율(Energy Ratio, E.R.)이라는 척도를 정의하여 기술하였다.

$$E.R. = \left( \frac{\text{acceleration, ft/sec}^2}{\text{frequency, cycle/sec}} \right)^2 \quad (10)$$

그의 연구 결과에 의하면 E.R.이 3이하일 때 안전한 수준으로 타나났으며 6이상일 때 손상을 발생할 위험이 매우 큰 것으로 나타났다. 미국의 몇개 주는 안전율을 고려하여 건물근처의 발파에 대해 에너지율 1.0을 허용기준으로 사용하고 있다. 스웨덴의 Langefors등이 도입

지 재개발 사업을 위한 기존 건물근처 암반에서의 발파작업시 측정된 결과를 종합하면 진동속도 7cm/sec까지 건물에 아무런 피해도 나타나지 않은 것으로 보고되었으며<sup>17)</sup> 캐나다의 Edwards와 Northwood(1960)는 10.2~10.5cm/sec속도까지 피해가 나타나지 않는 것으로 결론 짓고 안전율을 고려하여 진동속도 허용치로 5cm/sec를 제시하였다.<sup>18)</sup> 미광무국을 중심으로 수행된 미국의 연구결과를 보면, 1942년 1차 종합결과 발표 후 1959년 발파진동과 구조물에 대한 영향을 재검토해 달라는 요청을 받고 1942년도의 USBM자료, 캐나다의 자료 및 Langefors등(1958)의 자료를 통계적인 방법도 도입하여 해석하였다. 이 결과는 USBM bulletin 656(1971)에 종합 발표되었는데 결과를 요약하면 구조물에 미치는 피해는 진동의 크기를 변위로 측정하였을 때 주파수와 밀접한 관련을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 진동속도에 대해 나타낼 경우 구조물의 피해와 그 정도는 주파수의 영향을 거의 받지 않고 속도의 일정값으로 표시할 수 있는 것으로 보고되었다. 즉 낮은 진동 변위에서도 주파수가 클 때에는 피해가 발생할 확률이 높으며, 높은 진동 변위라 하더라도 주파수가 작을 때에는 피해가 발생할 확률이 작음을 보여주었다. 결론적으로 진동속도 5cm/sec를 일반 구조물에 대해 피해를 일으키지 않는 안전한계로 제시하였고 이 손상기준은 현장에서 일반적으로 적용되어 왔고 많은 기관에서 법적인 규제 기준으로 받아들여 졌다. 그러나 이 기준의 적용에 대해서도 계속 피해 시비가 끈이지 않아 1974년 발파진동해석에 대한 재해석이 시도되었다. 주파수에 대한 구조물의 반응특성 및 손상에 초점을 두어 추가로 측정을 실시하고 그 동안의 자료를 확률적인 해석기법을 적용하여 분석하고 1980년에 그 결과를 발표하였다. 결과에 의하면 주

파수 40Hz를 중심으로 40Hz이상의 진동주파수를 갖는 발파진동에 대해서는 5cm/sec가 그대로 안전 기준치로서 적용될 수 있으나 40Hz 이하의 낮은 진동주파수를 갖는 발파진동에는 손상받을 확률이 높아 안전기준을 1.2cm/sec로 낮추어야 할 것이 보고되었다. 미국의 Office of Surface Mining은 노천 석탄채광작업에 대한 안전기준으로 미광무국과 유사한 기준을 제

안하고 있는데 30Hz의 진동주파수를 경계로 하고 있음이 주된 차이이다. 이들이 제안한 안전 기준은 Fig. 5와 같으며 특별한 규제조항이 없는 경우 가옥, 건물 등의 구조물에 대한 발파진동 허용기준으로 통상 적용되고 있는 기준이다. 제안된 허용기준들을 요약하면 Table 1과 같다.

Table. 1. Summary of Suggested Safety Limit of Blast Vibration Level to Structure

Source	Parameters	Suggested Safety Limit
Rockwell, E.H., 1927	Charge size & distance	60~90m from blast
Thoenen & Windes, 1942	Particle acceleration	0.1g or less
Crandell, 1949	Energy Ratio(acc. & freq)	3 or less
Langefors, et al, 1958	Particle velocity	2.9 ips
Edwards & Northwood, 1960	Particle velocity	5cm/sec
Devine, 1966 <sup>19)</sup>	Particle displ. & scaled dist.	0.03", 50ft/lb 1/2
Nicholls, et al 1971	Particle velocity	5cm/sec
Wiss & Nicholls, 1974	Particle velocity	7~20 ips
Siskind, et al, 1980	Particle velocity & Frequency	5cm/sec for >40Hz 1.2cm/sec for <40Hz

발파진동의 영향은 건물 이외의 각종 구조물의 안정성에도 영향을 미친다. 노천채굴작업에서의 발파진동으로 인하여 암반사면에 손상을 가져오기도 하고<sup>20)</sup>, 인접한 지하 터널 또는 채광장의 광주의 안정성에도 영향을 미친다.<sup>21, 22)</sup> 터널굴진으로 인한 발파진동은 이미 설치한 로크볼트의 인장력에 변화를 주는 것으로 관찰되었고<sup>23)</sup>, 주위암반과 콘크리트 라이닝에도 영향을 미친다.<sup>24, 25, 26)</sup> 측정예를 보면, 콘크리트 라이닝의 파괴개시 수준은 35cm/sec로 측정된 바 있고 발파작업장으로부터의 거리에 따라 암반과 라이닝의 진동수준이 상이하게 나타나고 있음이 관찰된 바 있다.

여러나라에서 채택하고 있는 허용안전 진동 기준을 살펴보면 다음과 같다. 독일 DIN4150에서 진동측정, 건물 및 인체에 미치는 영향, 허용기준에 대해 비교적 상세히 규정하고 있다. DIN4150 Blatt3에 규정된 허용기준은 Table 2와 같다. 일반산업건물 및 콘크리트 구조물에 대해서는 속도의 합력성분이 1~4cm/sec로 규제하고 있으며, 문화재적 가치가 있는 건물에 대해서는 0.2cm/sec까지 제한하고 있다.

호주는 (CA 23-1967)에서 주파수 15Hz이하의 진동에 대해서는 0.02cm의 변위를 허용기준으로 하고, 15Hz이상에 대해서는 진동속도의 합력성분이 1.9cm/sec를 넘지않도록 하고

Table. 2 German Vibration Standards, DIN 4150 Blatt 3

Class	Type of Construction	Peak Pseudo Vector Sum Particle Velocity, cm/sec
I	Ruins, ancient and historic buildings given antiquities protection	0.2
II	Buildings with visible damage and cracks in masonry	0.4
III	Buildings in good condition, possibly with cracks in plaster	0.8
IV	Industrial and concrete structures without plaster	1.0~4.0

있다. 체코는 1cm/sec의 진동속도를 허용기준으로 채택하고, 영국은 주파수 12Hz 이하인 노천석탄광발파에 대해 진동속도 1.2cm/sec의 허용기준을 채택하고 있다. 영국은 특별히 규제조항이없는 경우 인구밀집지역의 터널발파는 1cm/sec로, 인구희박지역에서는 2.5cm/sec가 되도록 설계하고 있다.

국내에서는 발파진동에 대한 구체적인 규제조항은 아직 규정되지 않은 상태이며 서울시 지하철공사시 진동속도 0.5~0.7cm/sec 값이 발파진동의 허용기준으로 제안된 바 있어<sup>14)</sup> 도심지 발파시 통상 0.5cm/sec가 적용되고 있으며 기타 경우에는 조건에 따라 미광무국 등 외국사례를 근거로 하여 설계기준을 마련하고 있다.

### 3. 소음전파 특성 및 구조물과 인체에 미치는 영향

발파에 의해 대기로 방출되는 발파풍에 의한 폭풍압 또는 소음의 세기는 압력의 단위나 또는 dB(데시벨) 단위로 표현할 수 있으며 두 단위 사이에는 (11)식과 같은 관계가 있다.

$$L_p \text{ in dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (11)$$

여기서

$$P = \text{sound pressure in Pa ; } P_0 = 20 \mu\text{Pa}$$

(음성을 듣는 수준)

자동차로부터의 소음수준은 대략 80~90dB 정도로 측정된다. 일반적인 발파풍의 전파는 (12)식의 형태로 표시할 수 있다.<sup>3)</sup>

$$P = K \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^\beta \text{ or ; } L_p = \alpha + \log \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^\beta \quad (12)$$

Fig. 6은 노천채광 발파시 측정된 결과를 보여 준다.<sup>13)</sup> 자료처리 결과 발파풍의 전파는 (13)식으로 나타나고 있으며 상관계수는 0.72로서 발파진동 자료처리에 비교하여 보면 적합도가 많이 떨어지고 있음을 알 수 있다.

$$L_p = 155.21 + \log_{10} \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-17.7} \quad (13)$$

발파풍의 전파는 기상조건과 지형적 조건에 따라 민감한 영향을 보이며 발파시 바람의 영향이나 바닥발파 또는 옥석 발파의 효과를 고려한다면 높은 적합도를 얻을 수 있을 것이나 실제 이러한 영향을 반영하는 것은 용이한 작업이 아니다. 폭풍압 또는 소음의 세기는 폭원에서 자유면을 통해 대기중으로 전달되는 발파풍외에도 지반진동의 수직성분에 의해 생성되는 음압의 영향도 있다.<sup>27)</sup>

미광무국(1980)의 연구결과에 의하면 시설

물에 영향을 미치지 않는 안전한 폭풍압의 세기는 0.1H filter를 가진 측정계기를 사용할 경우 134dB, 2Hz filter를 가진 측정계기를 사용할 경우 133dB, 6Hz filter를 가진 측정계기를 사용할 경우에는 129dB로 제한된 바 있다. 폭풍압의 영향은 구조물의 창문에 가장 먼저 나타나며 유리창이 파손되는 폭풍압 수준은 약 169dB이고 기와장이 떨어질 정도의 폭풍압 수준은 약 186dB이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 국내 노천채광 생산발파시 측정된 폭풍압 측정 결과를 보면 지발당 350kg의 화약량을 사용하였을 경우 폭원에서 150m지점에서 제트엔진의 소음수준과 비슷한 142dB의 가장 높은 값을 보이고 있다. 따라서 발파진동에 의한 영향에 비하면 실제 폭풍압이 가옥에 미치는 영향은 심각한 수준에 이르지 못함을 알 수 있다. 그러나 구조물에 물리적인 영향을 주는 수준에 미치지 않는 소음에 대한 주민이 느끼는 감각적인 영향은 그 피해여부를 판단하기 어려운 문제가 되고 있다. 사람의 반응은 다양하며 조사에 의하면 어떤 사람들은 듣고 느끼었으나 또 어떤 사람은 거의 영향을 느끼지 못한 경우도 있으며 실제 손상은 발생하지 않았으나 손상받았다는 느낌을 가질 수 있다. 능가 근처에서는 발파가 동물에 미치는 영향으로 종종 민원이 야기되고 있으나 적절한 기준의 설정은 용이하지 않다. 발파소음에 의한 허용기준 설정시 주파수 특성 및 인체 또는 동물에 미치는 생물학적인 영향을 고려하기 위해서는 앞으로 계속적인 연구가 필요할 것이며 일반적으로 건설 또는 교통관련 법규에 규정된 소음규제 조항에 있어서도 일반 소음과 별도로 발파소음의 특성이 반영되어야 할 것으로 보인다.

#### 4. 비석(Fly Rock)

발파로 인하여 파쇄된 암석들은 대기중으로 비산된다. 파쇄암이 비산하는 추진력은 응력과에 의한 영향과 폭발후 형성되는 가스압의 영향으로 대별된다. 비석의 예측은 발파진동이나 발파풍의 경우와 같이 일반식의 도출이 용이하지 않으나 암반이 균질하다고 가정할 때 발파과정 초기 자유면 부근에서의 응력파에 의해 파쇄되는 암석의 속도는 다음과 같이 예측할 수 있다.<sup>28)</sup>

$$V = 2c\epsilon \quad (14)$$

여기서

$c$  = P파 속도

$\epsilon$  = 응력파에 의한 최대 변형률

발파후 형성되는 가스압은 파쇄암을 가속시키는 추진력을 부가하여 발파공 부근의 파쇄암 비산의 주 원인이 되며 힘의 크기, 방향에 따라 비산되는 암석들 사이의 상호 작용이 예상된다. Chieppetta 등은 현장에서의 고속촬영 실험결과를 해석하여 사용화약의 에너지 등을 주요 변수로 하는 (15)식과 같은 실험식을 제안하였다.<sup>29)</sup>

$$V = k \left( \frac{B}{E} \right)^b \quad (15)$$

여기서 B는 최소저항선, E는 화약에너지, k, b는 입지상수(site constants)이다.

암반에 존재하는 절리 등 불연속면은 파쇄도와 같은 발파효율에도 큰 영향을 미치지만 파쇄암의 비산에도 영향을 미친다.<sup>30, 31)</sup> 비산의 방향은 자유면의 방향과 점화순서에 따라 어느정도 예측이 가능하나 가스압이 작용하는 절리면의 방향에 따라 예기치 못한 방향으로 비석이 발생할 수 있으며 이러한 현상은 절리가 발달한 암반에서는 발파작업시 종종 나타나고 있다.

최근 노천발파에서 관심의 대상은 cast



blasting이라는 분야로 제거대상인 포토나 암반을 원하는 장소까지 비산시킴으로서 적재, 운반작업에 소요되는 경비와 시간을 절약하는 방법이다. 이와 같은 발파기법은 예전에는 생각하기 어려웠으나 정밀화약류의 개발로 세밀한 발파기술의 적용이 가능하고 계측장비, 해석기법의 발달로 발파에 의한 암반의 파괴 메카니즘에 대한 이해가 명확해 지면서 가능하게 되고 있다. Fig. 7은 개별요소법에 기초한 CBLOCK수치해석모델을 이용하여 여러 장약 조건에 대해 암반이 파괴되어 비산하는 과정을 컴퓨터로 시뮬레이션한 예이다. 이러한 컴퓨터 시뮬레이션은 (14) 또는 (15)와 같은 식으로는 검토할 수 없는 절리의 영향이나 장약방법에 의한 영향 등을 검토할 수 있는 잇점이 있다.

## 5. 발파설계의 적용

발파설계에 있어서 진동, 소음, 비석에 영향을 주는 주요 변수들은 화약과 관련된 변수로는 폭속, 화약력과 같은 화약의 특성과 발파방법과 관련된 변수로서 장약량, 장약방법, 최소저항선, 공간격, 전색의 깊이, 기폭제, 점화순서, 지발간격 등이 있으며 이들의 선택은 대상암반의 특성을 고려하여 결정되어야 한다. 또한 이들 변수들 사이의 관계는 독립적이지 아니며 파쇄도 등 발파효율과도 상호 연관이 있으므로 모두를 만족시킬 수 있는 적정설계를 도출한다는 것은 용이한 일이 아니다. 각 변수들의 이해로부터 가능한 한 최대 공약수의 조절이 필요하며 경우에 따라서는 어느 한 요소의 희생이 필요할 때도 있을 것이다.

진동과 소음에 관련된 적정 설계변수를 결정하기 위해서는 시험발파를 통하여 발파진동의 전파특성, 소음전파특성의 규명이 선행되어야 하며 이들은 허용장약량의 산정 또는 안전거리

산정의 기본이 된다. 계산된 장약량의 허용치가 크지 않을 때에는 지발뇌관을 사용하여 지발당 최대 장약량이 허용장약량 수준 이하가 되도록 함으로써 총 화약량을 조절할 수 있으나 이 경우 지발 시차에 주의를 요한다. 지발 발파에 미광무국등이 제안한 식들을 적용할 경우 지발시차는 9ms이상이어야 하며 그 이하일 경우 증폭효과가 나타날 수 있다. 실측예를 보면 5ms지발시차의 경우 9ms와 비교하였을 때 2배 이상의 큰 지반진동이 측정되었으며,<sup>32)</sup> 진동성분의 증폭효과를 감소시키기 위해 17ms이상의 지발간격이 제안된 바도 있다.<sup>33)</sup> 반면에 60ms의 긴 지발간격에서는 구조물 반응이 증폭되어 손상을 가져올 수 있음이 보고된 바 있다.<sup>34)</sup> 화약의 특성에 있어서도 종류에 따라 화약력의 차이뿐 아니라 반응특성과 암반특성에 따라 효율 및 진동도 다르게 나타난다. 다이나마이트를 사용한 presplit발파에 의한 지반진동이 ANFO를 사용한 일반 작업발파시의 진동보다 4배정도 크게 측정된 사례가 있으며<sup>32)</sup> 국내 지하철 공사시 측정된 예에서도 합수폭약과 ANFO사용시 다이나마이트에 비해 80~65%의 진동수준을 보이고 있으므로 여러 종류의 화약을 사용할 경우 화약의 종류에 따른 전파특성의 규명도 필요하다.

최소저항선과 전색깊이는 소음과 비석에 영향을 미치는 주요 변수들이다. 벤치발파의 경우 (16)식과 같은 경험식을 이용하여 천공직경과 사용화약 및 암반 물성에 따라 기본적인 수치를 추정할 수 있으나<sup>35)</sup> 절리 발달상태에 따라 조절이 필요하다.

$$B = K_B \frac{d}{1000}; T = K_T B \quad (16)$$

여기서

$$B = \text{최소저항선, m}$$

$T$  = 전색깊이, m

$d$  = 공직경, mm

$K_B, K_T$  = 화약 및 암반에 관련된 상수

절리의 발달이나 발파후 파쇄대의 확장은 가스  
의 누출로 인한 소음과 비석뿐만 아니라 실  
질 최소저항선 및 전색깊이의 변화를 야기시킨  
다. 비석의 방향은 자유면 방향에 좌우되나 점  
화순서에 따라 시차적으로 형성되는 자유면의  
방향이 다르게 되므로 인위적인 조절이 가능하  
며 발파용 매트를 이용하여 소음과 비석을 억  
제하는 방법도 고려할 수 있다.

진동, 소음 및 비석의 정밀한 제어를 위해서  
는 주요변수들과 기타 변수들의 영향이 한두개  
의 상수에 반영되는 plug-in형태의 경험식 또  
는 실험식에서 나아가 각 변수의 영향을 검토  
할 수 있는 모델링 및 시뮬레이션 기법의 개발  
및 활용이 요구된다.

## 6 결 론

화약발파를 이용한 암반굴착시 발생하는 지  
반진동, 소음, 비석이 인근 가옥, 건물 등의 구  
조물에 미치는 영향은 발파설계시 고려하여야  
할 매우 중요한 요소중의 하나이다. 본 논문에  
서는 이들의 일반적인 특성과 국내외 측정사례  
를 기술하고 안전 발파설계를 위해 관련 설계  
변수들의 영향 및 조절의 기본 개념을 제시하  
였다. 간략히 기술하면, 1) 국내 발파진동 측정  
자료를 종합하여 볼 때, 열과 열 단위의 대형  
발파를 실시하지 않는다면 터널발파와 노천발  
파 모두 삼승근 환산을 이용한 전파식으로 진  
동의 예측이 가능하다. 2) 발파로 인해 종종  
발생하는 민원의 원만한 해결을 위해서는 한국  
의 전통적인 가옥과 같은 한국적인 구조물 특  
성과 다양한 발파원 특성의 영향에 대한 연구  
와 이에 근거한 구체적인 규정의 제도화가 필

요하다. 3) 기존의 제안된 설계식을 활용할 경  
우 상수들에 가려져 있는 변수들의 영향에 대  
한 고찰이 필요하다. 특히 이전 발파로 인하여  
생성된 파쇄대의 영향과 절리가 발달한 불연속  
암반의 특성은 예기치 못한 소음 및 비석의 원  
인이 되며 발파효율에도 큰 영향을 미치는 요  
소들이다. 4) 발파진동, 소음, 비석의 정밀한  
제어를 위해서는 파쇄 메카니즘 및 관련설계변  
수들에 대한 명확한 이해가 필요하며 이들을  
정량적으로 평가할 수 있는 기법의 개발 및 활  
용이 요구된다. 또한 5) 발파원의 특성을 조절  
할 수 있는 다양하고 정밀한 화약류의 개발과  
해석 기법의 개발은 고도의 발달기술 적용을  
위한 필요조건이라 할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Thoenen, J.R. & Windes, S.L., 1942, Seismic Effects of Quarry Blasting, USBM Bulletin 442, 83 pp.
2. Duvall, W.I. & Fogelson, D.E., 1962, Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibrations, USBM RI 5968, 19pp.
3. Nicholls, H.R., Johnson, C.F., and Duvall, W.I., 1971, Blasting Vibrations and Their Effects on Structures, USBM, Bulletin 656, 105 pp.
4. Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kopp, J.W. & Dowding C.H., 1980, Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting, USBM RI 8507, 74 PP.
5. 우형주, 염영하 외, 1967, 폭파작업이 시설물에 미치는 영향, 대한광산학회지, Vol.4, pp. 81-93.

6. 류창하, 이정인, 1979, 발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 대한광산학회지, Vol. 16, pp. 42-44.
7. Ghosh, A. & J.J.K. Daemen, 1985, Statistics-A Key to better blast vibration predictions, 26th US Symp. on Rock Mech., SD, p. 1141-1149.
8. Sauer, F.M., Clark, G.B., & Anderson, D. C., 1964, Nuclear Geophysics-part IV-Empirical Analysis of Ground Motion and Cratering, Stanford Res. Inst., Rpt no. DASA-1285(N).
9. Olson, J.J., et al, 1972, Ground Vibrations from Tunnel Blasting in Granite : Cheyenne Mountain(NORAD)Colorado, USBM RI 7653, 25 PP.
10. Snodgrass, J.J & Siskind, D.E., 1974, Vibrations from Underground Blasting, USBM RI 7937, 33 PP.
11. 류창하, 1979, 석회석 노천채굴장에서 순발 및 MS 지발발파에 의한 지반진동에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교, 47pp.
12. 이경운, 김민규외, 1985, 무릉계곡 발파진동 및 소음측정에 관한 연구보고서, 한국동력 자원연구소, 동해시 용역보고서, 73 pp.
13. 류창하, 선우춘외, 1992, 동해석회석광산 적정발파설계연구, 한국자원연구소, 쌍용자원개발 용역보고서, 168pp.
14. 김응수, 이경운외, 1983, 발파진동식 확립과 제어발파 지침결정을 위한 연구보고서, 강원대학교, 서울시 지하철공사 용역보고서, 168pp.
15. Rockwell, E.H., 1927, Vibrations Caused by Quarry Blasting and Their Effect on Structures, Rock Products, Vol. 30, pp. 58-61.
16. Crandell, F.J., 1949, Ground Vibration Due to Blasting and Its Effect Upon Structures, J.Boston Soc. of Civil Engineers, pp. 222-245.
17. Langefors, U., Kihlström, B., and Weterberg, H., 1958, Ground Vibrations in Blasting, Water Power, Vol. 10, pp. 333-338, 390-395, 421-424.
18. Edwards, A.T. & Northwood, T.D., 1960, Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures, The Engineer, Vol. 210, pp. 538-546.
19. Devine, J.F., 1966, Avoiding Damage to Residences from Blasting Vibrations, Highway Research Record No. 135, pp. 35-42.
20. Oriard, L.L., 1972, Blasting Effects and Their Control in Open-Pit Mining, Geotechnical Practice for Stability in Open-Pit Mining, AIME.
21. Fourie, G.A., 1987, The Influence of Surface Blasting on the Stability of Underground Workings, Underground Mining Method & Technology, Szwilski & Richard(ed.), Elsevier, Amsterdam, pp. 281-296.
22. Rupert, G.B. & Clark G.B., 1977 Criteria for the Proximity of Surface Blasting to Underground Coal Mines, 18th Symp. on Rock Mech., Colorado, pp. 3C3-1~3C3-10.
23. Stehlik, C.J., 1964, Mine Roof Rock and Roof Bolt Behavior Resulting from near-by Blasts, USBM RI 6372.

24. Sakurai, S. & Kitamuta, Y., 1977, Vibration of Tunnel due to Adjacent Blasting Operation, Proc. Int. Symp. on Field Measurements in Rock Mechanics, Zurich.
25. Sakurai, S. & Kitamura, Y., 1990. Dynamic Behavior of structures caused by Blasting for Excavations in Rock, Static and Dynamic Considerations in Rock Engineering. Brummer(ed.), Rotterdam, pp. 287-295.
26. Langefors, U., Kihlström, B., 1978, The Modern Technique of Rock Blasting, 3rd ed., John Wiley & Sons, 438 pp.
27. Siskind, D.E., 1977, Structure Vibrations from Blast Produced Noise, 18th Symp. on Rock Mech., Colorado, pp. 1A3-1~1A3-5.
28. Petkof, B. Atchison, T.C. and Duvall, W. I., 1961, Photographic Observation of Quarry Blasting, USBM RI 5849, 15 PP.
29. Chieppetta, R.F., et al, 1985, The Use of High Speed Picture Photography in Blast Evaluation and Design, J. Soc. Explo. Eng., pp. 1-26.
30. Burkle, W.C, 1980, Geology and Its Effects on Blasting, Society of Explosive Engineers, April.
31. Ryu, C.H. & Pariseau, W.G., 1986, Numerical Simulation of Fragmentation During the Throw Stage of Blasting, Proc. 2nd Symp. on Explosives and Blasting Research, Society of Explosives Engineers, Atlanta, Georgia, 1986, pp. 103-109.
32. Lutton R.J., 1977, Probability of Specified Ground Vibrations from Blasting, 18th Symp. on Rock Mech., Colorado, pp. 3C2-1~3C2-7.
33. Linehan, P. and Wiss, J.F., 1982, Vibration and air Blast Noise From Surface Coal Mine Blasting, Mining Eng., pp. 391-395.
34. Linehan, P.W., 1977, Spectral Analysis of Air and Ground Vibrations from Blasting in Surface Coal Mines, 18th Symp. on Rock Mech., Colorado, pp. 1A4-1~1A4-6.
35. Ash, R.L., 1963, The Mechanics of Rock Breakage", Parts I-IV, Pit and Quarry, vol. 56, no. 2-5, pp. 98-100 & 112 ; pp. 118-123 ; pp. 126-131 : pp. 109-111 & 114-118.

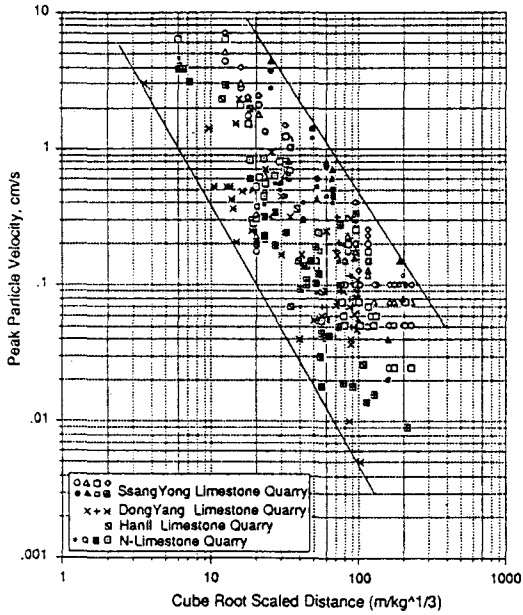


Fig. 1. Peak Particle Velocity vs. Cube Root Scaled Distance. (Blast Vibrations from Limestone Quarries '78~'92)

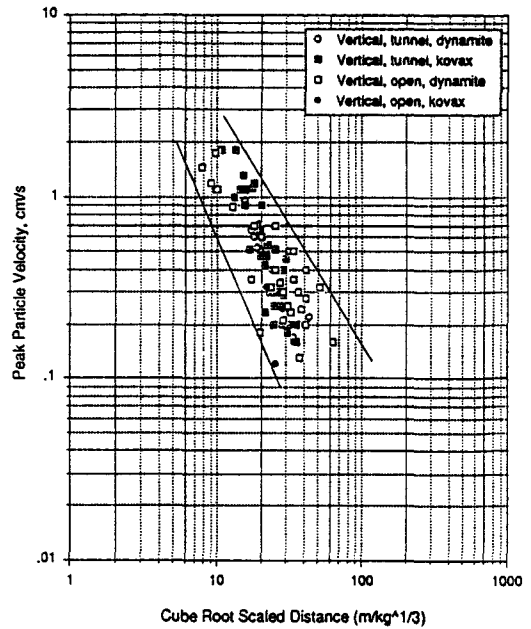


Fig. 3. Peak Particle Velocity vs. Cube Root Scaled Distance. (Blast Vibrations from Seoul Subway Construction Work)

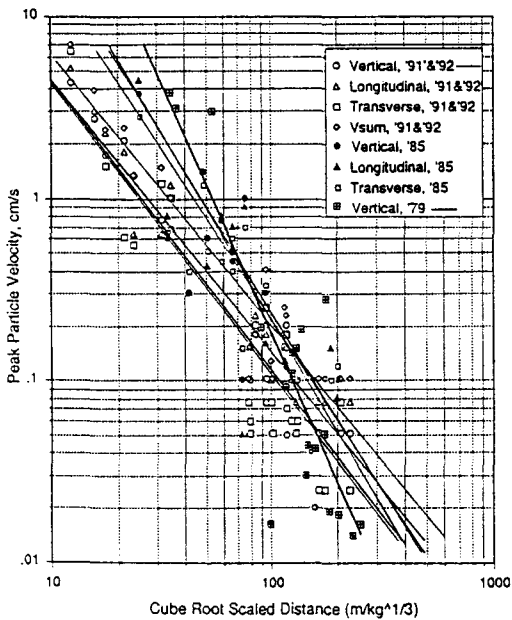


Fig. 2 Peak Particle Velocity vs. Cube Root Scaled Distance. (SsangYong DongHae limestone quarry '79, '85, '91 & '92)

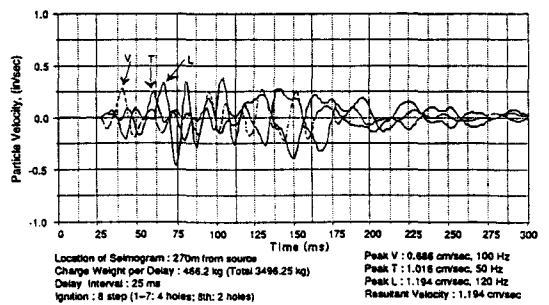


Fig. 4 Typical Ground Vibration Record.

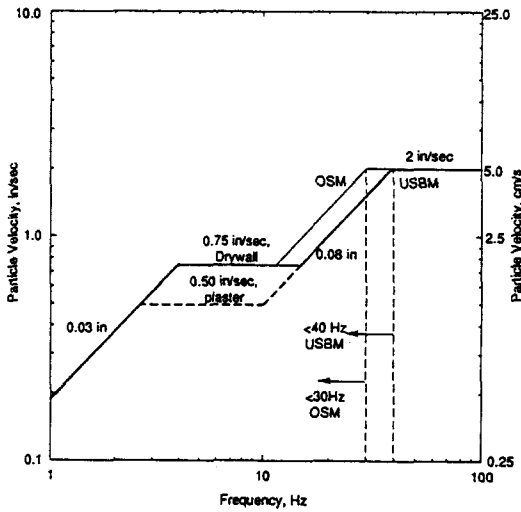


Fig. 5 Safe Levels of Blasting Vibration for Houses Suggested by USBM(1981) & OSM(1983)

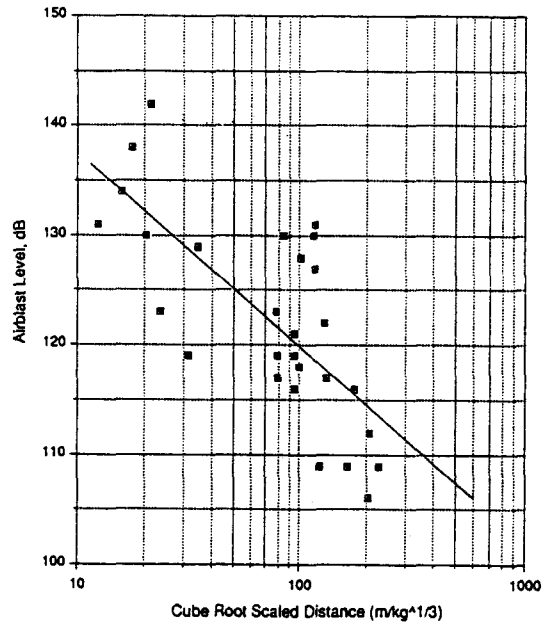


Fig. 6. Airblast Level vs. Cube Root Scaled Distance. (SsangYong DongHae limestone quarry '91 & '92)

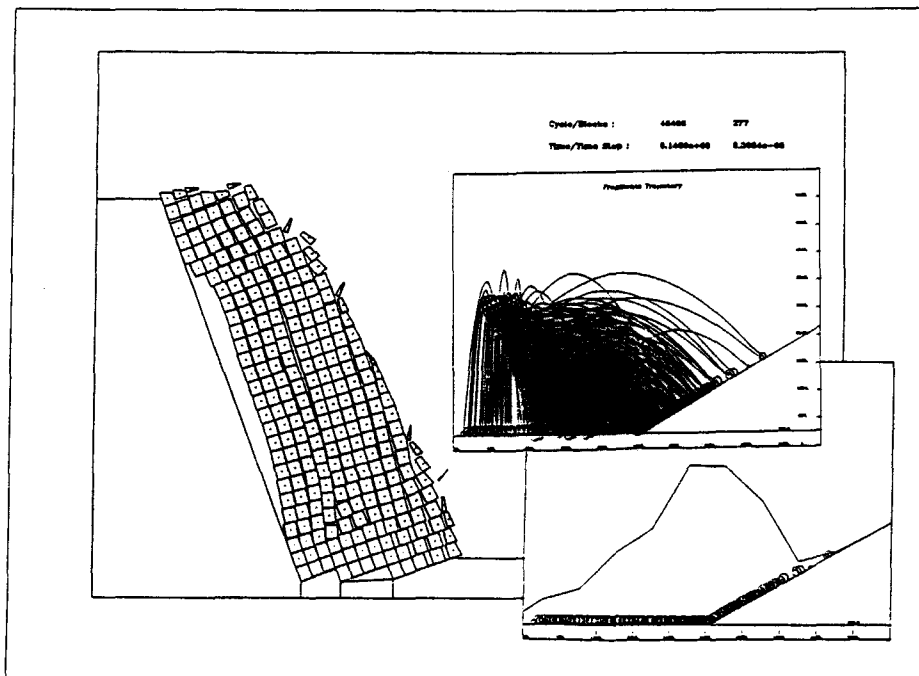


Fig. 7 Simulation of Cast Blasting Using CBLOCK model