

## 지발당 장약량에 대한 이론적 고찰

김종인 · 강추원<sup>1)</sup>

### 1. 서론

발파에 의한 공해 요인 중 발파진동의 전파 특성을 결정짓는 인자는 크게 입지조건과 발파조건으로 나눌 수 있으며, 입지조건은 발파부지와 인근 구조물의 기하학적 형태, 대상암반의 지질학적 특징 및 역학적 성질 등을 말하고, 발파조건은 사용하는 폭약의 종류, 지발당 장약량, 기폭방법, 전색상태, 자유면의 수, 발파유형, 폭원과 측정간의 거리 등을 말한다.

이 인자들 모두가 발파진동의 크기와 전파특성에 영향을 미치게 되고, 이 중에서 특히 지발당 장약량과 측정간의 거리가 가장 중요한 요인으로 작용하나, 측정간의 거리는 조절 불가능한 변수인 반면, 조절 가능한 변수인 지발당 장약량이 동일한 발파작업의 조건일 경우 발파 설계에 있어 가장 중요한 인자가 된다.

지발당 장약량은 현재 우리나라에서 발파진동의 예측에서 대부분 사용되는 환산거리식의 주요 변수이다. 지발당 장약량은 동시에 기폭되는 장약 혹은 공간의 지연단차가 8ms 이하인 장약들의 총합으로 정의할 수 있다. 이러한 근거는 USBM에서 발간한 RI 6151(Duvall et al., 1963)을 바탕으로 마련된 것이다.

또 다른 발파진동의 예측방법으로 Langefors(1978)는 USBM의 환산거리 개념에 해당되는 장약레벨(Charge levels) 개념을 도입하였으며 환산거리 방식의 지발당 장약량 개념에 해당되는 협동장약(Cooperating charges)의 개념을 사용하였다. 이 협동장약은 단당 총 장약량으로 정의되며 뇌관의 발화 오차와 지반의 주주파수를 고려한 감쇠인자(Reduction factor)를 곱하여 협동장약량을 산출하였다. 또 인접 단차간의 간섭을 피할 수 있는 지연단차에 대해서는 지반의 주주파수에서 산출되는 주기(T)의 3배 이상인 단차를 주장하였으며 상쇄간섭을 포함하여 2.5T의 지연단차를 다른 단차에 의한 간섭이 없는 것으로 가정하였다.

지발당 장약량(Weight per delay)과 협동장약(Cooperating charge)의 개념의 차이점은 지반의 주파수 고려 여부로 구분될 수 있다. 국내에서는 발파진동의 예측 방법 중 발파진동을 다루는데 더 효과적인 개념이라 여겨 환산거리 방식을 사용하고 있다.

본 연구에서는 지연시차와 장약공과 측정과의 거리, 그리고 발파진동의 전달속도의 관점에서 문헌 조사에 의한 자료를 토대로 환산거리 방식의 발파진동예측 방법의 주요 변수인 지발당 장약량의 설정에 대해 고찰하였으며 지발당 장약량 설정의 기준이 되는 8ms 기준을 Langefors 시차이론을 토대로 고찰하였다.

1) 조선대학교

## 2. 지연단차의 불확실성

### 2.1 뇌관의 발화 오차의 영향

MS 지발발파는 각 장약 공간의 짧은(millisecond unit) 지연단차를 이용하는 발파 방법으로서 현대의 발파기술은 이러한 개별 장약간의 지연단차를 조절하는 방법에 크게 의존하고 있다. 개별 장약공간의 지연단차를 생성하는 방법으로는 발파기에 의한 방법과 뇌관의 지연시차를 이용하는 방법으로 구분할 수 있다. 뇌관에 의한 방법은 Fig. 1과 같이 뇌관 내에 연시장치가 삽입되어 있으며 이 연시 장치에 의해 각 단의 뇌관은 지연시차를 갖게 된다. 그러나 뇌관 내의 연시 장치는 불가피하게 발화 오차를 갖으며 이로 인해 뇌관의 기폭시간의 오차가 발생하게 된다.

발파에서의 지연단차는 대부분 뇌관 고유의 지연시차에 좌우되고 있으며 불행히도 뇌관의 오차 때문에 계획된 지연단차가 현장의 발파에서 이루어지지 않는 경우가 있다. 이러한 오차들은 배열에서 일어날 수 있는 무작위 인적 오차, 제조상의 통계적 오차 및 규칙적 오차 등이 있다. 인적 오차가 가장 빈번하게 일어나는 오차인데 발화 시간 오차의 가능성에 주의한다면 제조상의 오차와 마찬가지로 조절할 수 있다(Dowding, 1984).

Winzer(1979)는 제조상 야기되는 폭굉 시간의 통계적 오차를 결정하기 위해 전형적인 ms 지발뇌관의 폭굉을 고속카메라로 기록하였다. 폭굉 시간의 일관성을  $x \pm 1\sigma$ 로 표시한 평균( $x$ )과 표준 편차( $\sigma$ )로 측정하였으며 연구 결과 평균 폭굉 시간만을 고려하면 폭굉 시간의 역전이 가능한 것으로 결론지었다. 실제 발파에서 역전이 열간에 발생했을 때, 파쇄가 불량하고 큰 입자속도가 초래된다. 이러한 역전의 가능성은 Fig. 2의 뇌관의 발화시간 분포에서도 확인할 수 있다.

Winzer(1979)의 연구 이래로 화약류 제조업자들은 뇌관의 실제 점화시간에서 발생하는 변화를 줄이는 조치를 취하였으며 최근에는 이러한 뇌관의 발화 오차를 극복하기 위하여 기폭 오차의 범위가 2ms 이내인 전자뇌관이 개발되어 일부 국가에서 사용되고 있으며 현재 국내에서도 몇몇 현장에서 적용되고 있다.

즉, 국내에서 대부분 사용되는 뇌관에 지연장치가 있는 비전기식 뇌관과 전기 뇌관만을 고려한다면 뇌관의 발화 오차에 의해 인접 단차가 동시 혹은 구조적으로 파가 강화될 수 있는 범위 내에서 기폭되어 유효장약량(지발당 장약량,  $W$ )를 변화시킬 가능성이 있다.

### 2.2 전파 속도의 영향

발파 장소로부터 일정 거리만큼 떨어진 지점의 발파 진동의 도달 시간을 고려할 때 발파 장소의 공간거리와 발파공 내에 삽입된 뇌관의 각각 지연시차에 따른 기폭의 방향성으로 인해 계측 지점에서 발파에 의해 발생한 탄성파는 종종 계획하는 지연단차로 도착하지 않는

결과를 초래한다.

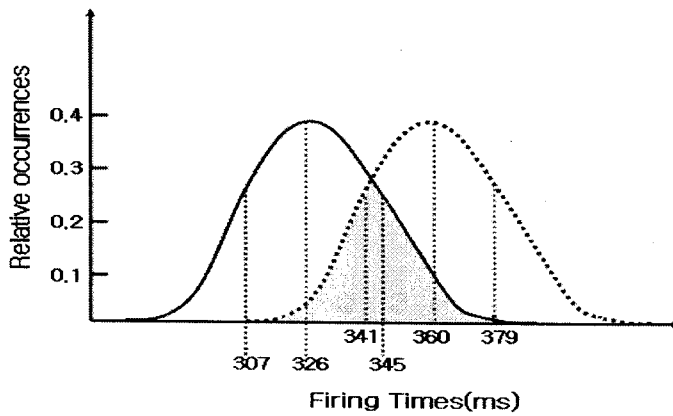
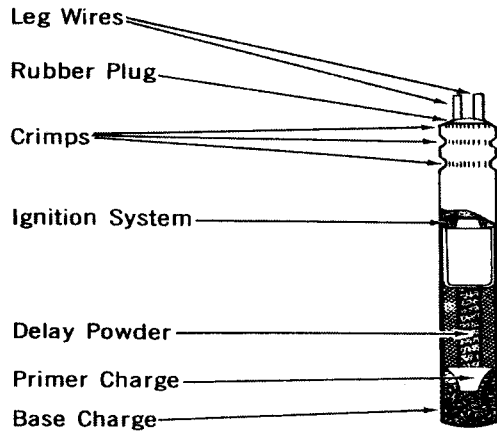


Fig. 2 이단 지발뇌관의 발화시간 분포( $T_{avg}=326$  and  $360ms$ ;  
표준편차= $19ms$ )

Reisz(2006)의 연구를 바탕으로 예를 들면, Fig. 3과 같이 동시 기폭되는 두공이 계측지점과 각각 300, 350m 이격 되어 위치할 때 P파의 전파속도를 2750m/sec라고 가정하고 단순히 P파의 이동시간만을 계산한다면 두공의 계측지점까지의 도달시간은 다음과 같다.

$$1ms\text{당 이동거리} : 2750m/sec = \frac{2750m}{1000ms} = 2.75m/ms$$

$$300m\text{까지의 도달 시간} : \frac{300m}{2.75m/ms} = 109ms$$

$$350m\text{까지의 도달 시간} : \frac{350m}{2.75m/ms} = 127ms$$

두 발파공이 정확히 동시에 폭발한다고 해도 도착시간은 계측지점에서 18ms의 차이가 발생한다.

발파 장소에서 발파공의 공간거리에 따른 계측지점까지의 거리의 영향으로 인해 계획된 지연단차는 계측지점에서 이루어지지 않을 수도 있으며 계측지점에 각각 다른 지연 시차의 발파공에서 발생된 탄성파가 동시에 도착하여 유효장약량을 상승시키는 결과를 초래 할 수도 있다.

이러한 경향은 발파방향에 따른 진동속도를 연구하게 하였으며 기폭방향의 반대 방향에 비해 높은 진동 속도가 관측되며 이러한 현상을 "Snowballing Effect"라 한다. 즉, 이러한 영향을 탄성파의 도착 시간측면에서 검토한다면 먼저 기폭되고 먼 거리에 있는 발파공에서 발생된 탄성파는 가까운 거리에서 늦게 기폭된 발파공에서 발생된 탄성파와 동시 혹은 인접해서 도착되므로 유효장약량을 상승시켜 높은 진동속도가 관측되는 것으로 해석할 수 있다.

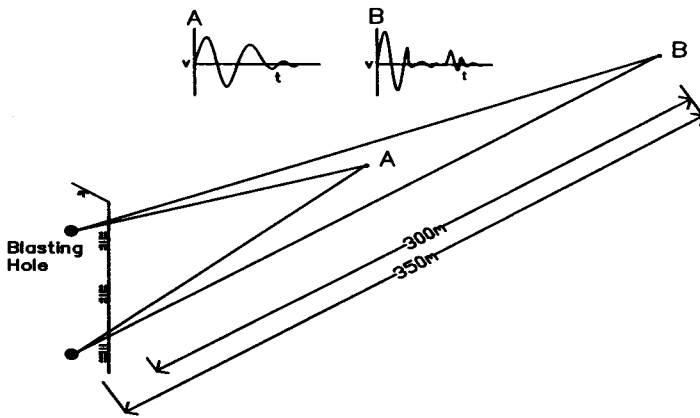


Fig. 3 탄성파 속도의 영향

### 3. 8ms 기준과 Langefors 시차이론에 대한 고찰

#### 3.1 8ms 기준에 대한 고찰

진동 문제를 다룰 때 지발당 장약량의 산출은 매우 중요하다. 왜냐하면 이 지발당 장약량은 환산거리식의 주요 변수중 하나이기 때문이다. 지발당 장약량의 개념은 1회의 발파에서 동시에 기폭되는 장약들의 합 또는 8ms 이하로 기폭되는 장약들의 합의 의미를 가지며 인접 단차에 영향을 미치지 않는 지연단차로 정의할 수 있다(Agnerustan, 1998).

지발당 장약량의 기초가 되는 8ms 기준에 대한 연구는 1960년에 Duvall, Johnson, Meyer, 그리고 Devine에 의해서 실시되었고, 1963년에 RI 6151로 간행되었다. 이 연구는 Alden, Iowa 근처의 석회석 채석장에서 1열 19단의 순발 및 지발로 기폭시키고 그 결과를 계측하는 방법으로 수행되었다.

한편 다른 연구자들에 의해 인접단차와의 영향 정도가 연구 되어졌으며 Langefors(1978)는 상쇄간섭을 포함하면 진동 주기의 2.5배 이상의 시차를 인접한 공사와의 간섭이 없는 것으로 가정했으며, Linehan and Wiss (1978)은 17ms를 주장한바 있다. 또 다른 연구가 NECGB(Nobel's Explosives Co. of Great Britain)에 의해 수행된 연구에 의하면 가장 낮은 진동 수준은 25ms 시차에서 이루어짐을 보였다(Carlos, et al., 1995).

그럼에도 불구하고 8ms의 기준에 따른 환산거리 방식은 발파진동의 예측에 있어서 높은 예측의 정확도와 간편함으로 인해 오늘날까지 널리 통용되고 있다. 그러나 8ms 기준에 대한 발파 기술자들의 많은 의구심과 더불어 Douglas Anderson (1989)은 8ms 기준은 너무 긴 시차라고 지적했다. Oriard and Emmert(1980)는 매질의 전파속도, 장약간의 거리, 기폭 진행방향과 같이 다른 인자와 함께 구조적으로 파가 강화되어 유효 장약량을 변화 시킬 가능성도 있으며 분석에 신중을 기해야 한다고 했다. Linehan and Wiss(1980)는 폭풍압과 진동의 크기들은 초기 방향성, 지연시차, 공간격, 그리고 전달 속도에 의해서 영향을 받는다는 것을 증명하는 실험으로 단일 열의 실험 결과로 부터 식(1)을 발표하였다.

$$t_e = t_n - \frac{S \cos \phi}{VC} \quad (1)$$

- 여기서,  $t_e$  = 유효 지연시차  
 $t_n$  = 공 폭발 사이의 지연시간  
 $S$  = 공간격  
 $\phi$  = 연속적으로 폭발된 공들과 관심 지점 사이의 각도  
 $VC$  = 전파 속도

Siskind(2000)는 "Vibrations from Blasting"의 저서에서 8ms 규정에 대해 그들의 결과는 전혀 놀라운 것이 아니며, 지반의 주파수가 30Hz 이고 두 번째 파가 8ms 시차로 도착한다면 8ms는 첫 번째 파의 1/4주기(T)인 지점에 불과 하다고 서술하고 있다.

최근의 연구 결과에 의하면 8ms 기준은 새로운 지역의 개략적 약량의 산출 등의 제한된 범위에서 사용될 수 있으며, 환산거리에 대한 개념의 재 정의를 논하였다(Reisz, et al., 2006).

### 3.2 Langefors의 시차이론에 대한 고찰

Langefors에 의해 지연시차의 서로 다른 인자인 공수, 주파수가 발파 진동에 얼마나 영향을 미치는가에 대한 최종적인 결론이 제시되었다. 간섭의 영향은 지연시간( $\tau$ )이 진동시간( $T$ )만큼 크거나 정수의 곱으로 적용될 때 얻어지고, 진동의 협동은 서로 다른 지연시차에서 진동이 합해짐으로서 발생한다. 이것은  $H$ 가 정수의 비율일 때 적용된다(Langefors and Kihlström, 1978). 그 관계는 식(2)과 같다.

$$\tau=HT \tag{2}$$

지연시차가 주기만큼 길거나 또는 값이 두 배가 될 경우( $\tau=T$  or  $2T$ ), 서로 다른 장약 공으로부터 진동의 협동을 피하는 것이 불가능 하다. 만약, 1회의 발파가 수많은 지연 단수를 가진다면  $3T$ 나 그 이상의 상대적인 시간거리에 놓인 지연시차를 갖는 발파공은 일반적으로 비협동(non-cooperative)이라는 것을 예상할 수 있으며 상쇄 간섭을 포함한다면 서로 다른 단차간의 협동은  $\tau>2.5T$ 때에 일어나지 않는다고 추측할 수 있다.

즉, Langefors의 시차이론(Langefors and Kihlström)에 의하면 지발당 장약량은  $2.5T$  내로 기록되는 공의 총장약량으로 평가 될 수 있다. 그러나 지반에 따라 변화되는 주파수를 모두 고려하기란 불가능하며 고려한다 할지라도 상쇄나 보강 간섭을 모두 포함하므로 자료처리가 더 난해해질 수 있다. 그러므로 Langefors 시차이론에 의한 지발당 장약량의 규정이 더 정량적이라 할지라도 환산거리식의 지발당 장약량의 적용에는 무리가 있을 것으로 사료된다.

### 3.3 Langefors 시차 이론에 의한 8ms 기준의 해석

Duvall(1963)등은 "Vibrations from instantaneous and millisecond delayed quarry blasts"의 RI 6151에서 0, 9 17, 그리고 34ms등 각각의 시차에 대해 공당 200lb(약 90kg)의 단일 열로 실험을 실시하였다. 실험 결과 0ms 지연을 제외하고 지발당 1공의 경우에 비해 공수와 지연 시차의 길이는 평균 진동수준에 영향을 주지 못한 것으로 결론을 내렸다. 그러므로 인접공의 기폭으로 인한 진동의 영향을 주지 않는 시차로 9ms 이상의 지연시차 사용을 제시하였다. 이후 이러한 8ms 기준은 발파진동을 예측하는 환산거리식에서 지발당 장약량을 결정하는 기준이 되었다. 그러나 8ms의 기준을 얻은 실험에 대한 결과 주파수가 30~40Hz인 시험 장소에서 행해진 것이며 만약 30Hz 지반을 고려할 경우 8ms의 지연 단차는 두 번째 파가 도착하는 지점이 첫 번째 파의 1/4주기인 지점에 불과 하다(Siskind, 2000).

여기서, Langefors 시차 이론에 의해 8ms 기준을 접근한다면 식(2)에 의해 지연시차( $\tau$ ) 9ms, 주기( $T$ ) 33ms이므로  $H$ 는 0.27이 된다. 즉,  $0.27T(9ms)$  부근에서 단일공 수준의 진동수준을 기록하고  $0.5T$  (16.5ms)에서 가장 낮은 진동수준을 기록할 것이며, 상쇄 간섭에 의해

단일공 이하의 진동수준을 기록하는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 33ms 부근에서 보강 간섭에 의해 다시 단일공 진동수준 보다 훨씬 큰 진동을 기록할 것이다.

상기에서 살펴본 바와 같이 RI 6151의 8ms 기준과 Langefors 3T의 기준은 인접 발파공의 발파로 인한 진동의 영향을 미치지 않는 단차로 정의하고 있다. 8ms 기준과는 달리 3T의 기준은 주파수를 고려한다는 점에서 더 정량적이라 할 수 있다. 하지만 동일한 발파 장소라 할지라도 계측지점과 발파 원과의 거리 변화에 따라 주파수의 변화가 다양하므로 지발당 장약량 설정에 있어서 3T의 기준은 적용하기 곤란할 것으로 판단된다.

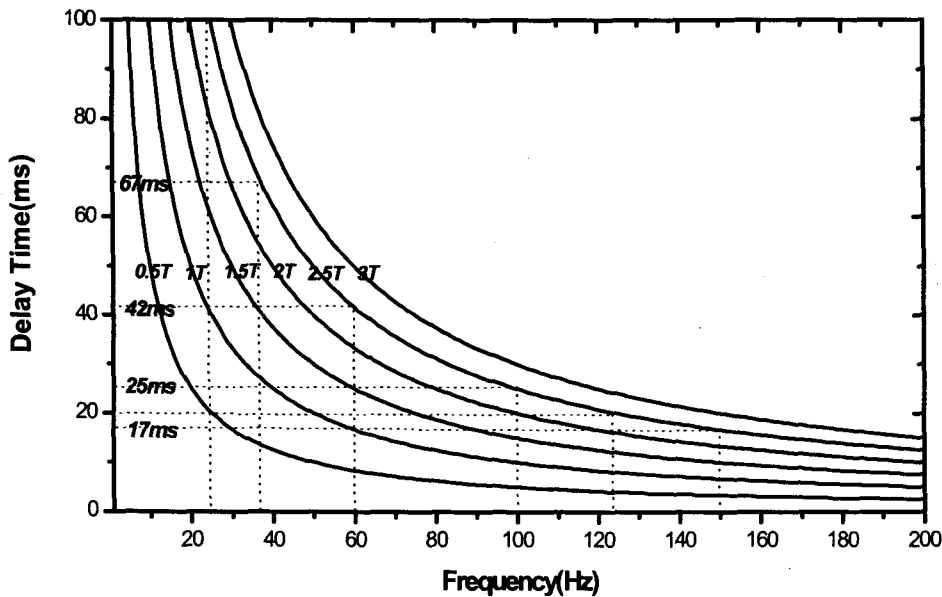


Fig. 4 주파수와 지연시차의 관계

지발당 장약량 설정의 가장 중요한 면은 변수를 설정함으로써 진동의 예측과 관리, 그리고 평가의 신뢰성이 요구되는 단순화를 추구 하는데 있다. 현재까지의 8ms 기준을 사용하는 환산거리식에 의한 발파 진동의 예측과 관리, 그리고 평가에 있어서 대두되는 문제점은 지반조건, 발파방법, 발파 규모 등이 변화될 때 발파 진동을 예측하는 환산거리식도 함께 재조정해야 한다.

Fig. 4는 Langefors 시차 이론(Langefors and Kihlström, 1978)에 근거한 발파진동의 간섭에 있어서 보강(1T, 2T, 그리고 3T)과 상쇄(0.5T, 1.5T, 그리고 2.5T) 간섭이 반복되는 각각의 주파수에 따른 지연단차를 도시한 것이다.

인접단차 간에 진동의 영향이 없는 단차를 Langefors의 3T(상쇄간섭을 포함한 2.5T),

Duvall(1963)등의 8ms, Wiss and Linehan (1978)의 17ms, 그리고 NECGB(Nobel's Explosives Co. of Great Britain)의 25ms로 발표되었다. 이들 중 2.5T의 기준으로 8, 17, 그리고 25ms의 단차를 Fig. 4를 토대로 고찰하면 다음과 같다.

- ① 인접 단의 영향이 없는 단차로 8ms이하를 설정한다면 주파수 1~200 Hz 범위에서 0.5T와 1T 구간 포함되며 60Hz에서 상쇄 간섭에 의해 가장 낮은 진동 속도가 관찰 될 것이며 다른 주파수 대역에서는 60Hz 보다 높은 진동 속도가 관찰 될 것이다.
- ② 17ms로 설정한다면 주파수 1~150Hz 범위에서 보강과 상쇄간섭이 모두 나타나며 대략 150Hz 이상에서 인접 발파와의 간섭이 사라질 것이다.
- ③ 25ms로 설정한다면 1~100Hz의 범위 내에서는 보강과 상쇄간섭을 보이나 100Hz 이상에서는 인접공의 간섭은 사라질 것이다.

즉, Fig. 4와 같이 대략 150Hz 이상에서 17ms의 단차가, 100Hz 이상에서는 25ms의 단차가, 60Hz 이상에서는 42ms의 단차가, 37Hz 이상에서는 67ms의 단차가, 그리고 25Hz 이상에서는 100ms의 단차가 인접 발파와의 간섭이 사라질 수 있는 단차로 결정될 수 있다. 즉, 전파속도의 차이를 배제하고 지연단차만을 고려하면 지발당 장약량의 산정하는 기준은 25, 60, 100, 200Hz의 지반 주파수에 따라 적용하는 것이 타당할 것이다.

주파수의 변화가 심한 지역에서 간섭의 영향은 환산거리 방식에 의해 발파 진동을 예측할 때 자료의 분산으로 나타난다. 그리고 이러한 분산의 영향은 옳은 자료일지라도 전체 자료의 신뢰도를 높이기 위하여 버려질 수 있음을 예상할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지연시차와 장약공과 측정과의 거리, 그리고 발파진동의 전달속도의 관점에서 문헌 조사에 의한 자료를 토대로 환산거리 방식의 발파진동예측 방법의 주요 변수인 지발당 장약량의 설정에 대해 고찰하였으며 지발당 장약량 설정의 기준이 되는 8ms 기준을 Langefors 시차이론을 토대로 고찰하였다.

국내에서 지발당 장약량 설정의 기준이 되는 8ms의 지연시차에 대한 의문은 1990년대 초반에 많은 시간을 할애하여 논의된 것으로 기억된다. 그 후 다단발파기의 도입과 다수의 특허, 신기술등의 현장적용에서 전기뇌관의 발화 오류와 더불어 논쟁의 대상이 되어 왔다.

이제 국내의 발파산업은 보다 정밀해진 전자뇌관의 일반화를 앞두고 있다. 이와 함께 보다 정량화된 발파기술의 평가방법의 개발이 요구된다. 앞선 논쟁들은 이러한 정밀한 발파기술의 도입과 정량화된 발파기술의 평가방법의 개발로 인해 시시비비가 가려질 것으로 기대된다.



참고 문헌

1. Agnerustan, Rock Blasting Terms and symbols, 1998, pp. 40
2. Carlos lopez Jimeno, EmiloLopez Jimeno, and Rrancisco Javier Ayala Carcedo, Drilling and Blasting of Rocks, 1995, pp. 333-339.
3. Dowding C. H., Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall, 1984, pp. 236-243.
4. Duvall, W., Johnson, C., Meyer, A., and Devine, J., Vibrations from Instantaneous and Millisecond Delayed Blasts, RI 6151, 1963.
5. Langefors U. and Kihlström B., The modern technique of Rock Blasting, Third edition, 1978, pp. 258-293
6. Linehan, P., and J. F. Wiss, Vibration and air blast noise from surface coal mine blasting, SME-AIME Fall Meeting, 1980.
7. Oriard, L. L., and Emmert, N. W., Short delay blastin at Anaconda's Berkeley open pit mine, montana, Society of Mining Engineers, 1980.
8. Reisz W., McClure R., and Bartley D., Why the 8 MS Rule Doesn't Work, ISEE, Proceedings of The Thirty-Second Annual conference on Explosives and Blasting Technique, Vol. 2, 2006.
9. Siskind, D.E., Vibrations from Blasting, International Society of Explosives Engineers, 2000.
10. Winzer, S. R., Furth, W., and Ritter, A., Initiator Firing Times and Their Relationship to Blasting Performance, Proceedings of the 20th Symposium on Rock Mechanics, 1979, pp. 461-470.