

지발당 장약량에 대한 이론적 연구

김종인¹⁾, 강추원²⁾, 김재웅³⁾

A Theoretical Study on a Weight per Delay

Jong-In Kim, Choo-Won Kang and Jea-Wong Kim

Abstract : The blasting vibration prediction in Korea is mainly carried out by the scaled distance method. The delay interval of the scaled distance method is generally considered to be 8ms, where the effect of vibration between adjacent holes is not included. In this study, the origin and issues of 8ms criterion are reviewed from literatures and Langefors' 2.5T criterion is applied to evaluate the applicabilities of 8ms, 17ms and 25ms intervals in which a vibration does not affect an adjacent hole.

Key words : scaled distance, weight per delay, 8ms criterion

초 록 : 국내에서는 주로 환산거리방식에 의한 발파진동 예측 방법이 주로 사용되고 있다. 환산거리 방식에서 중요한 변수인 지발당 장약량은 인접 단차간에 진동의 영향이 없는 단차로서 통상적으로 8ms를 기준으로 한다. 본 연구에서는 8ms 기준의 기원과 문제점을 문헌고찰을 통해 제시하고 인접단차 간에 진동의 영향이 없는 단차로 각 학자 별로 제시된 8ms, 17ms, 25ms 단차를 Langefors의 2.5T 기준으로 고찰하였다.

핵심어 : 환산거리, 지발당 장약량, 8ms 기준

1. 서 론

지발당 장약량(weight per delay)은 현재 우리나라에서 발파진동의 예측에서 일반적으로 사용되는 환산거리식의 주요 변수이다. 지발당 장약량은 동시에 기폭되는 장약 혹은 공간의 지연 단차가 8ms 이하인 장약들의 총합으로 정의할 수 있다(Rustan, 1998). 이러한 근거는 USBM에서 발간한 RI 6151(Duvall et al., 1963)을 바탕으로 마련된 것이다.

또 다른 발파진동의 예측방법으로 Langefors and Kihlström(1978)은 USBM의 환산거리 개념에 해당되는 장약레벨(charge levels) 개념을 도입하였으며 환산거리 방식의 지발당 장약량 개념에 해당되는 협동장약(cooperating charges)의 개념을 사용하였다. 이 협동장약은 단당 총장약량으로 정의되며 뇌관의 발화 오차와 탄성

파의 주주파수를 고려한 감쇠인자(reduction factor)를 곱하여 협동장약량을 산출하였다. 또 인접 단차간의 간섭을 피할 수 있는 지연단차에 대해서는 탄성파의 주주파수에서 산출되는 주기(T)의 3배 이상인 단차를 주장하였으며 상쇄간섭을 포함하여 2.5T의 지연단차를 다른 단차에 의한 간섭이 없는 것으로 가정하였다. 그러므로 지발당 장약량과 협동장약의 개념의 차이점은 지반을 전파해온 진동 주파수 고려 여부로 구분될 수 있다. 국내에서는 발파진동의 예측 방법 중 발파진동을 다루는데 더 효과적인 개념이라 여겨 환산거리 방식을 사용하고 있다.

본 연구에서는 지연시차, 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 에너지자원신기술연구소

2) 조선대학교 자원공학과

3) (유)동광

* Corresponding author : cwkang@mail.chosun.ac.kr

접수일 : 2006년 11월 17일

게재승인일 : 2006년 12월 11일

2. 지연단차의 불확실성

2.1 뇌관의 발화 오차의 영향

MS 지발발파는 각 장약 공간의 짧은 지연단

차를 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.

Winzer 등(1979)은 제조상 야기되는 기폭시간의 통계적 오차를 결정하기 위해 전형적인 MS 지발뇌관의 기폭을 고속카메라로 기록하였다. 기폭시간의 일관성을 $x \pm 1\sigma$ 로 표시한 평균(x)과 표준 편차(σ)로 측정하였으며 연구 결과 기폭시간의 역전의 가능성을 제시하였다.

Dowding(1996)은 Fig. 2와 같이 서로 인접하여 기폭되는 두개의 뇌관 기폭시간 역전을 설명하였다. 일반적으로 뇌관 지연시차의 발화 오차는 지연시차가 클수록 커지게 된다. 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 유효장약량을 변화시킬 가능성이 존재한다고 사료된다. 그러나 최근에는 이러한 뇌관의 발화 오차를 극복하기 위하여 기폭 오차의 범위가 2ms 이내인 전자뇌관이 개발되어 일부 국가에서 사용되고 있으며 현재 국내에서도 몇몇 현장에서 적용되고 있다.

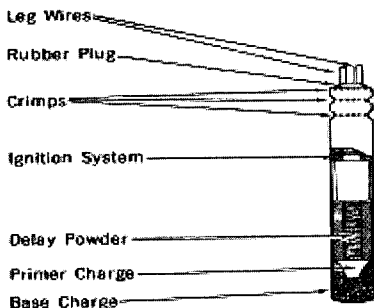


Fig. 1. The structure of electric detonator.

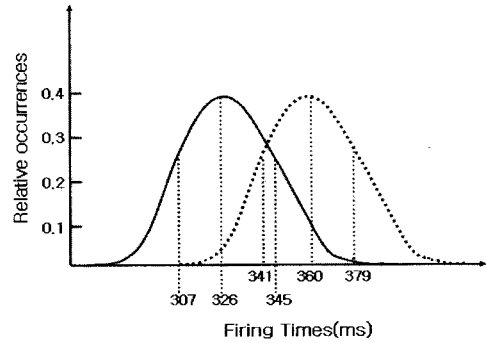


Fig. 2. Distribution of firing times for two-delay caps($T_{avg}=326$ and $360ms$; standard deviation= $19ms$).

2.2 전파 속도의 영향

발파에 의해 발생한 탄성파는 발파시 계획한 지연단차로 계측지점까지 도달되지 않는 경우가 있다. 그 이유는 발파공간의 거리, 발파공 내에 삽입된 뇌관의 지연시차에 따른 기폭 방향성 변화 등을 들 수 있다.

Reisz 등(2006)의 8ms 기준에 관한 연구를 바탕으로 예를 들면, Fig. 3과 같이 동시 기폭되는 두공이 계측지점과 각각 300, 350(m) 이격되어 위치할 때 P파의 전파속도를 2750m/sec라 가정하고 단순히 P파의 이동시간만을 계산한다면 두공의 계측지점까지의 도달시간은 다음과 같다.

1ms당 이동거리 :

$$2750m/sec = \frac{2750m}{1000ms} = 2.75m/ms$$

300m까지의 도달 시간 :

$$\frac{300m}{2.75m/ms} = 109ms$$

350m까지의 도달 시간 :

$$\frac{350m}{2.75m/ms} = 127ms$$

두 발파공이 정확히 동시에 폭발한다고 해도 도착시간은 계측지점에서 18ms의 차이가 발생한다. 이와 같이 각각의 발파공에서 계측지점까지의 거리차이에 의한 영향으로 계획된 지연단차는 계측지점에서는 변화될 수도 있다. 각각

다른 지연단차의 발파공에서 발생된 탄성파가 계측 지점에 동시에 도착하여 동일단의 뇌관을 사용하여 기폭한 진동의 크기를 보일 수 있다. 즉, 유효장약량을 상승시키는 결과를 초래 할 수도 있다.

일반적으로 뇌관 기폭방향의 반대 방향에 비해 뇌관 기폭방향이 높은 진동 속도가 관측되며 이러한 현상을 "Snowballing Effect"라 한다. 이러한 현상을 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.

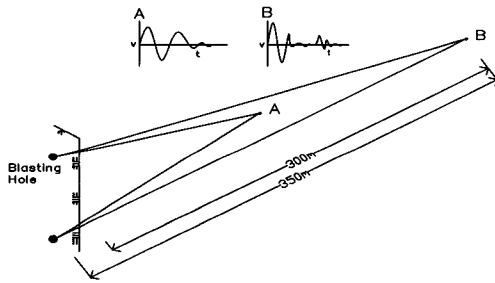


Fig. 3. The effect of velocity of sound.

3. 문헌 고찰

3.1 8ms 기준에 대한 고찰

지발당 장약량의 기원이 되는 8ms 기준에 대한 연구는 Alden, Iowa 근처의 석회석 채석장에서 Duvall 등(1963)에 의해 수행 되었다. 또한, 인접단차에 의한 진동 간섭 영향에 대하여 몇몇 연구자들에 의해 수행된 바 있다. 그 연구들을 살펴보면, Langefors & Kihlström(1978)은 상쇄 간섭을 고려할 때 발파 진동 주기의 2.5배 이상의 시차를 갖도록 발파가 수행 되어야만 인접하고 있는 공 사이의 간섭이 없다고 하였으며, Linehan & Wiss(1978)는 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). 여러 수행된 연구 결과에도 불구하고 8ms의 기준에 따른 환산거리 방식이 발파진동의 예측에

있어서 높은 예측의 정확도와 간편함으로 인해 널리 통용되고 있다

한편 지발당 장약량에 영향을 미치는 다른 인자들에 대한 연구가 진행되었다. 그 연구들을 살펴보면, Oriard & Emmert(1980)는 매질의 전파속도, 장약간의 거리, 기폭 진행방향과 같이 다른 인자와 함께 탄성파가 보강간섭에 의해 유효 장약량을 변화 시킬 가능성도 있으며 분석에 신중을 기해야 한다고 했다. Linehan & 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. 각 발파공에서 발생된 폭풍압과 진동은 지연단차에 따라 간섭을 일으키며 전파한다. 이때 측정지점에 도달하는 실제 지연단차(유효 지연단차)는 공사이의 지연단차, 공간격, 각 발파공과 측정지점사이의 각도, 그리고 탄성파의 전파속도에 따라 변화되어 간섭을 일으킨다. 그러므로 파의 간섭에 의한 폭풍압과 진동의 크기가 발파공내의 지연단차에만 의존하지 않는다는 것을 보인 것이다.

$$t_c = t_n - \frac{S \cos \phi}{VC} \tag{1}$$

여기서,

t_e = 유효 지연단차

t_n = 공사이의 지연단차

S = 공간격

ϕ = 연속적으로 폭발된 공들과
측정 지점 사이의 각도

VC = 전파 속도

이러한 연구들을 바탕으로 한, 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). 이 연구 결과의 의미는 인접단차간의 영향을 미치지 않는 단차를 지발당 장약량의 설정의 기준으로 사용함으로, 인접단차간의 영향을 미치지 않는 단차는 발파지역에서 발파에 의해 전파하는 탄성파의 주파수에 따라 변화될 수 있다는 것을 의미한다. 그러므로 8ms의 기준은 발파에 의해 전파

하는 탄성파의 주파수를 고려하지 않은 상태에서는 개략적인 약량 산출에만 사용될 수 있음을 의미한다.

3.2 Langefors의 시차이론에 대한 고찰

Langefors & Kihlström(1978)에 의하면 인접단차에 대한 발파진동 간섭의 영향은 지연시간(τ)이 진동주기(T)만큼 크거나($1T$) 배수($2T$)가 될 때 보강간섭을 일으켜 커지며, $3T$ 이상에서는 간섭의 영향으로부터 멀어진다고 하였다. 또한, $0.5T$, $1.5T$, 그리고 $2.5T$ 일 때 상쇄간섭을 일으켜 발파진동의 크기가 감소한다고 하였다. 그 관계는 식(2)과 같다.

$$\tau = HT \quad (2)$$

발파진동은 측정지점의 주파수와 지연단차에 따라 그 크기가 변화하는데 지연단차가 0.5 , 1.5 , 그리고 $2.5T$ 일 때 상쇄간섭에 의해 최저점의 진동 속도를 보이며, 1 , $2T$ 일 때 보강 간섭에 의해 최고점의 진동 속도를 보인다. 또한 지연단차가 $2.5T$ 일 때 진동은 상쇄 간섭을 일으키므로 다른 단차간의 간섭에 의한 발파진동의 협동은 $\tau > 2.5T$ 일 때에 일어나지 않는다고 추측할 수 있다. 그러므로 Langefors의 시차이론(Langefors & Kihlström, 1978)에 의하면 지발당 장약량은 $2.5T$ 내로 기폭되는 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.

4. Langefors 시차 이론에 의한 8ms 기준의 해석

8ms 기준의 기원이 되는 Duvall 등(1963)의 연구는 0, 9, 17, 그리고 34ms의 시차에 대해 공당 200lb(약 90kg)의 단일 열로 실험을 실시하였다. 이 실험 결과로부터 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.

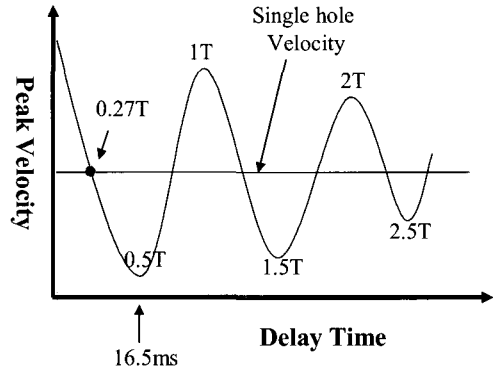


Fig. 4. Relation among peak velocity, frequency and delay time.

이 연구에 대해 Siskind(2000)는 인접 단차에 영향을 미치지 않는 단차는 8ms이하라는 Duvall 등(1963)의 연구결과는 전혀 놀라운 것이 아니라고 서술했다. 그 이유로 Duvall 등(1963)은 지반의 주파수가 30~40Hz인 시험 장소에서 행해진 것이며, 만약 주파수가 30Hz 이고 두 번째 파가 8ms 시차로 도착한다면 8ms는 첫 번째 파의 1/4주기($T=1/30=33.33ms$)인 지점에 불과하다고 서술하고 있다.

여기서, Langefors 시차 이론에 의해 8ms 기준을 접근한다면 식(2)에 의해 지연시차(τ) 9ms, 주기(T) 33ms이므로 H 는 0.27이 된다. 즉, Fig. 4와 같이 0.27T(9ms) 부근에서 단일공 수준의 진동수준을 기록하고 0.5T(16.5ms)에서 가장 낮은 진동수준을 기록할 것이며, 상쇄간섭에 의해 단일공 이하의 진동수준을 기록하는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 33ms 부근에서 보강 간섭에 의해 다시 단일공 진동수준 보다 훨씬 큰 진동을 기록할 것이다.

5. 주파수와 지연단차의 관계

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 기준

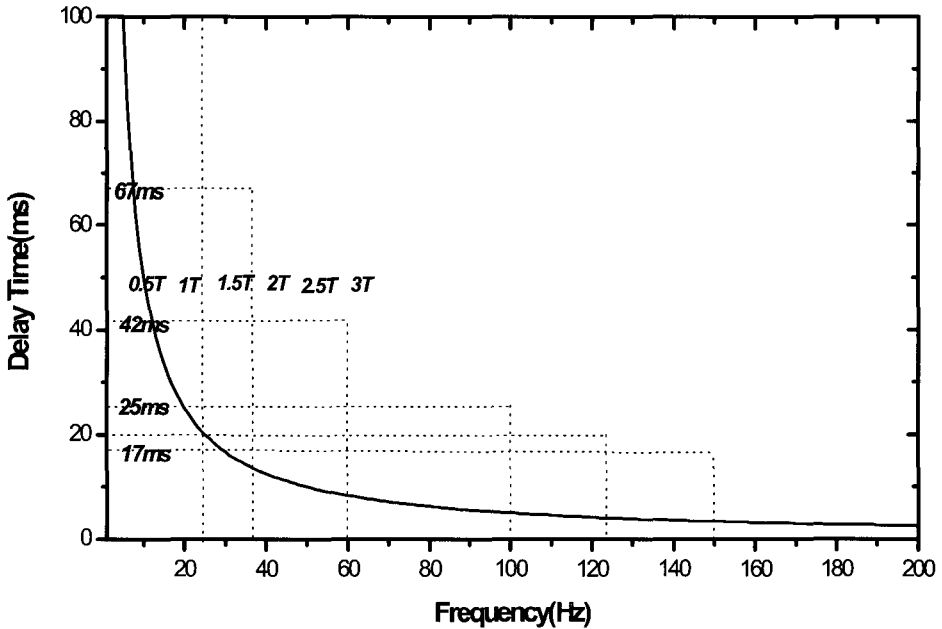


Fig. 5. Relationship between delay time and frequency.

은 주파수를 고려한다는 점에서 더 정량적이라 할 수 있다. 그러나 동일한 발파 장소라 할지라도 계측지점과 발파 원과의 거리 변화에 따라 주파수의 변화가 다양하므로 지발당 장약량 설정에 있어서 3T의 기준은 적용하기 곤란할 것으로 판단된다.

지발당 장약량 설정의 가장 중요한 변수는 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 한다는 것이다.

Fig. 5는 Langefors 시차 이론(Langefors & 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 단차는 Langefors의 3T(상쇄간섭을 포함한 2.5T),

Duvall(1963)등의 8ms, Wiss & 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 단차에 대해 Fig. 5를 토대로 고찰하면 다음과 같다.

① 인접 단의 영향이 없는 단차로 8ms이하를 설정한다면 주파수 1~200Hz 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.

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.

6. 결 론

본 연구에서는 지연시차, 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. 그 결과 지발당 장약량 산정 기준인 8ms는 대상지반의 주파수가 고려되지 않은 것으로 볼 수 있다. 그러므로 대상지반의 주파수를 고려하여 지발당 장약량의 개념보다 더 포괄적인 유효장약량 혹은 협동장약량의 결정은 주파수와 지연시차의 관계에서 유도 될 수 있었다. 즉, 인접 발파와의 간섭이 사라질 수 있는 지연단차는 150Hz 이상에서 17ms의 단차, 100Hz 이상에서는 25ms의 단차, 60Hz 이상에서는 42ms의 단차, 37Hz 이상에서는 67ms의 단차, 그리고 25Hz 이상에서는 100ms의 지연단차로 결정할 수 있다.

참고문헌

1. Carlos, L. J., J. EmiloLopez and J. A. C. Rancisco, 1995, Drilling and Blasting of Rocks, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 333-339.
2. Dowing, C. H., 1996, Construction Vibrations, Prentice Hall, pp. 466-468.
3. Duvall, W., C. Johnson, A. Meyer and J. Devine, 1963, Vibrations from Instantaneous and Millisecond Delayed Blasts, RI 6151, USBM, pp. 1-32.
4. Langefors, U. and B. Kihlström, 1978, The modern technique of Rock Blasting, Third edition, Halsted Press, New York, pp. 258-293.
5. Linehan, P. and J. F. Wiss, 1980, Vibration and air blast noise from surface coal mine blasting, SME/AIME Proceedings of Fall Meeting, Minneapolis, USA.
6. Oriard, L. L. and N. W. Emmert, 1980, Short delay blasting at Anaconda's Berkeley open pit mine, Montana, Preprint 80-60, Society of Mining Engineers, Littleton, Co.
7. Reisz, W., R. McClure and D. Bartley, 2006, Why the 8 MS Rule Doesn't Work, ISEE, Proceedings of The Thirty-Second Annual conference on Explosives and Blasting Technique, Cleveland, Ohio, USA, Vol. 2.
8. Rustan, A., 1998, Rock Blasting Terms and Symbols, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 40.
9. Siskind, D. E., 2000, Vibrations from Blasting, International Society of Explosives Engineers, pp. 20.
10. Winzer, S. R., W. Furth and A. Ritter, 1979, Initiator Firing Times and Their Relationship to Blasting Performance, Proceedings of the 20th Symposium on Rock Mechanics, University of Texas, Austin, pp. 461-470.

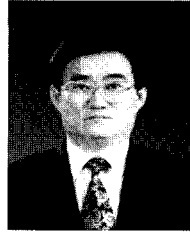


김 종 인

조선대학교 에너지자원신기술연구소 연구원

전화 : 062)230-7241

E-mail : nam4tin@nate.com



강 추 원

조선대학교 자원공학과 교수

전화 : 062)230-7117

E-mail : cwkang@mail.chosun.ac.kr



김 재 웅

(유)동광 기획관리 차장

전화 : 063)453-1884

E-mail : novoct@hanmir.com
