

발파에 의한 지반진동 및 소음 저감을 위한 지연시차 조절에 관한 연구

이봉현¹⁾, 최성웅^{1)*}

A Study on Delay Time Control for Lowering Grounding Vibration and Noise Induced by Blasting

Bong-Hyun Lee, Sung-Oong Choi

Abstract Ground vibration and noise from blasting operation are known to be the most representative constituents which can cause human and material damage. In this study, the effect of delay time on ground vibration is investigated by adopting seven different delay times in bench blasting. For each delay time, three blasting operations were performed. The prediction equations for blasting vibration are derived from 50 sets of measurement and the time theory of Langefors is evoked in the analysis of the blasting vibrations and frequencies. For the delay times of 8 ms and 28 ms, the average values of ground vibration are 5.76 cm/sec and 5.75 cm/sec, respectively, which are considerably low. Also the cyclic variation in the vibration measurements with the delay time confirms the interference effect. From the application of the measurements of blasting vibration and frequency to the time theory of Langefors, it is concluded that the optimum delay times are 8 ms and 24 ms for the test site.

Key words Delay time, Blasting vibration, Blasting noise, Time theory of Langefors

초 록 발파에 의한 진동과 소음은 주변 지역에 대하여 인적·물적 피해를 일으킬 수 있는 대표적인 환경피해 요소이다. 본 연구에서는 지연시차를 7단계로 변화시키고 각 단계마다 3회씩 반복하여 총 21회의 발파를 수행하였으며, 총 50개의 측정값으로 환산거리에 의한 발파진동 추정식을 도출하였고, 진동속도 측정값과 주파수를 이용하여 Langefors 시차이론을 적용하였다. 지연시차가 8ms와 28ms일 경우 진동속도의 평균값은 각각 5.76cm/sec 및 5.75cm/sec로 비교적 낮은 값을 나타내었으며, 지연시차에 따라 주기적으로 높은 측정값과 낮은 측정값이 반복되어 간섭효과를 확인할 수 있었다. 진동속도와 주파수의 측정값으로 Langefors의 시차이론을 적용한 결과, 본 연구에서 발파진동을 저감할 수 있는 최적의 지연시차는 8ms와 24ms로 확인되었다.

핵심어 지연시차, 발파진동, 발파소음, Langefors 시차이론

1. 서 론

대부분의 노천광산에서는 채광을 목적으로 장기간에 걸쳐 주기적인 발파가 수행되고 있으며, 이러한 발파작업은 대개 분진, 지반진동 및 소음 등과 같은 환경적인 문제를 동반하게 된다. 발파공해 중 특히 지반

진동 및 소음은 주변 구조물의 구조적인 손상 외에도 사람 또는 가축에게 육체적·정신적으로 피해를 줄 수 있는 대표적인 환경피해의 원인으로 알려져 있다.

이러한 지반진동 및 소음에 의한 발파공해를 줄이기 위한 방안으로 강추원 외(2014), 이창훈 외(2001), Alejandro et al.(2007), Reza(2011) 등에 의해 다양한 연구가 국내외적으로 수행된 바 있지만, 지반진동과 소음의 측정값은 해당 현장의 특성에 의해 좌우되는 경향이 강하며, 특히 경험에 의존하여 발파패턴을 결정하는 경우가 많기 때문에 현장발파에 대한 정량적인 분석이 쉽지 않다.

¹⁾ 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과

* 교신저자 : choiso@kangwon.ac.kr

접수일 : 2014년 11월 30일

심사 완료일 : 2014년 12월 22일

게재 승인일 : 2014년 12월 26일

따라서 본 연구에서는 석회석 노천광산에서의 발파에 의한 지반진동 및 소음을 줄일 수 있는 대책 중의 하나로, 이미 알려져 있는 지연시차의 영향 정도를 정량적으로 분석하기 위해 벤치발파 작업장에서 지연시차를 제외한 다른 모든 발파조건을 동일하게 유지하였으며, 이외 동시에 전자뇌관을 사용함으로써 지연시차의 정확성을 유지하도록 노력하였다.

이러한 현장발파시험을 통해 얻어진 지반진동 및 소음을 분석하여 발파진동 추정식 및 거리에 따른 소음등을 구하였으며, Langefors의 시차이론을 이용하여 최종적으로 본 연구가 수행된 현장에서 발파에 의한 지반진동을 저감할 수 있는 지연시차를 도출하였다.

2. Langefors 시차이론

간섭의 영향은 지연시차(τ)가 진동주기(T)만큼 크거나 정수의 곱으로 적용될 때 얻어지고, 진동의 협동은 서로 다른 지연시차에서 진동이 합해짐으로써 발생한다. 이것은 H 가 정수의 비율일 때 적용되며, 그 관계식은 식 (1)과 같다(Langefors and Kihlstrom, 1978).

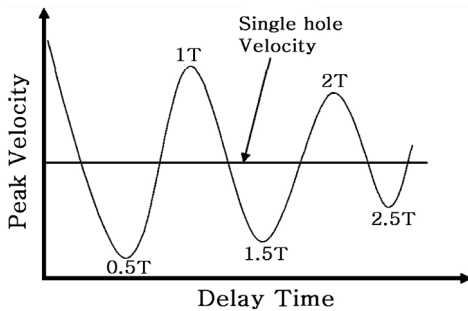


Fig. 1. Relation between peak velocity, frequency and delay time.

$$\tau = H \cdot T \tag{1}$$

여기서 H 는 서로 다른 파를 단절시키거나 약화(또는 상쇄)시키는 상수이다. 이러한 현상은 H 가 1/2 일 때 거의 완벽하게 나타나지만, H 가 5/2보다 더 큰 값을 나타내면 간섭에 의해 규정된 영향은 이 규칙을 따르지 않는다. 즉, Fig. 1에서 보듯이 지연시차가 발파진동 주기의 0.5, 1.5, 2.5 배 일 때 상쇄간섭이 일어나고, 1, 2, 3 배 일 때 보강간섭이 일어나며, 3 배 이상일 경우에는 상쇄 또는 보강의 간섭효과가 더 이상 일어나지 않는다고 할 수 있으며, 이것이 Langefors의 시차이론에 대한 정의이다.

3. 현장측정

3.1 현장개요

본 연구가 수행된 현장은 강원도 동해시 삼화동에 위치한 (주)쌍용자원개발의 동해광업소 SL200 구역이다. 이 일대의 지질은 선캄브리아기의 태백산편마암복합체를 기저로 하는 고생대 두위봉형 조선누층군으로 구성된다. 동해광업소는 주로 하부 석회암 대를 대상으로 채광이 진행되고 있다(최용근 외, 2004).

2012년도 한국지질자원연구원의 기술자문보고서(선우춘 외, 2012)에서 분석된 자료에 따르면 본 연구에서 발파를 수행한 지역의 석회석은 일축압축강도 124MPa, 탄성계수 41.5GPa로 경암의 특성을 나타내고 있다. 자세한 공학적 특성은 Table 1에 나타내었다.

3.2 발파개요

본 연구에서는 지연시차를 제외한 발파조건을 일정하게 유지한 상태에서 발파를 수행하였다. 전자뇌관의 시차는 4, 8, 12, 16, 20, 28, 40ms의 총 7단계로 변화를 주었으며, 각 발파마다 공간 지연시차를 동일

Table 1. Engineering characteristics of rock in test site (Sunwoo et al., 2012)

Site	Density (g/cm ³)	Elastic wave velocity (m/sec)		UCS (MPa)
		P-wave	S-wave	
SL200	2.74	4,870	2,560	124
Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Tensile strength (MPa)	Cohesion (MPa)	Internal friction angle (°)
41.5	0.18	7	19	49

Table 2. Blasting conditions

Description	Unit	Value
Drilled hole diameter	mm	102
Burden	m	4.0
Spacing	m	4.9
Bench height	m	17.0
Sub drill	m	2.0
Drilling length	m	19.0
Tamping length	m	5.5
Charge length	m	13.5
Charge per hole	kg	132
Holes	EA	9
Powder factor	kg/m ³	0.397
Delay time	ms	4, 8, 12, 16, 20, 28, 40

하게 설정하고 발파공수 만큼 단차를 나누어, 각 발파공들의 뇌관이 순차적으로 기폭 할 수 있도록 하였다. 또한 각 지연시차가 적용된 7회 발파를 1 cycle로 정하고 3 cycle을 반복하여, 총 21회 발파를 수행하였다. 지연시차를 포함한 세부적인 발파조건은 Table 2와 같다.

3.3 측정방법

지반진동과 소음은 Canada Instanet사의 Blastmate II, III와 Minimate를 이용하여 측정하였으며, 발파원으로부터 후방으로 45m 만큼 이격된 1개의 고정지점과 발파원으로부터 전방으로 80~300m 만큼 이격된 임의지점을 측정지점으로 설정하였다. Fig. 2는 측정기의 위치를 나타낸 사면의 모식도이며, Fig. 3은 발파원으로부터 굴착반대방향으로 45m 만큼 떨어진 지점과, 발파원에서 굴착진행방향으로 90m 만큼 떨어진 지점에 각각 측정기를 설치하는 모습과 발파작업 이후의 모습을 보여주고 있다.

4. 측정결과 및 분석

전체 발파 중 특이사항이 존재하는 발파는 1차의 16ms 발파와 3차의 4ms 발파로서, 전자의 경우 거둬진 발파에 의해 벤치의 너비가 감소하여 현장 여건상 발파공 수가 기존의 9공이 아닌 8공에 대한 발파가 수행되었기 때문이며, 후자의 경우 벤치 하단을 일정하게 유지하는데 충분한 발파가 이루어지지 않아 벤치 하단이 상승하는 문제가 발생함에 따라 벤치 높이를 조절하기 위해 토우발파(toe blasting)가 추가적으

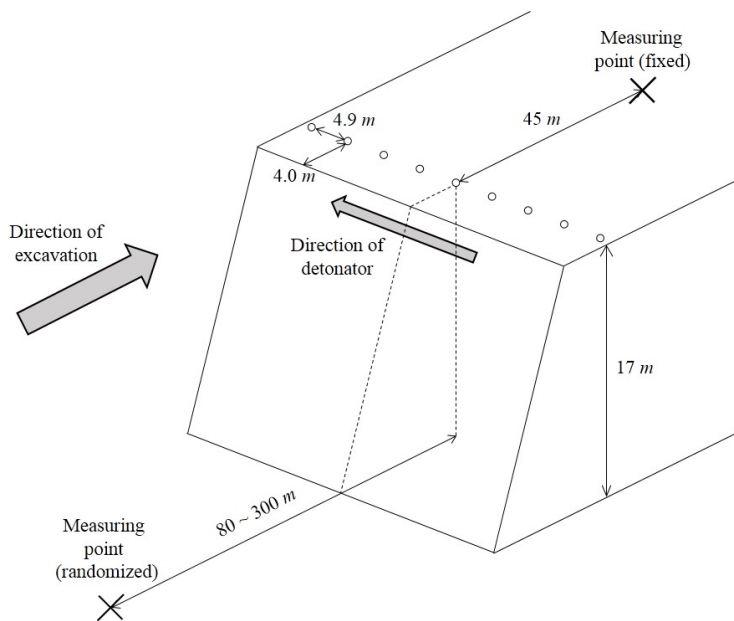


Fig. 2. Schematic diagram of blast measurement in bench.

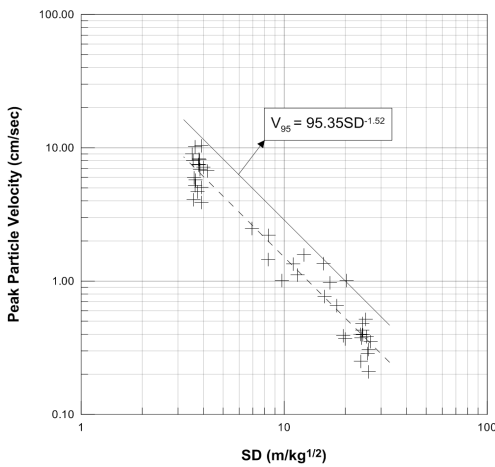


(a) Installation of measuring device

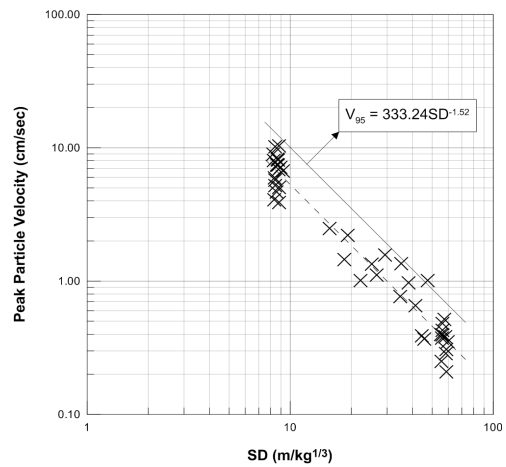


(b) Measurement of vibration and noise

Fig. 3. Photos of measuring blast vibration and noise.



(a) Square root scaling



(b) Cube root scaling

Fig. 4. Correlation between scaled distance and peak particle velocity.

로 수행되었기 때문인 것으로 판단되었다.

따라서 이와 같이 특이사항이 존재한 경우에 대한 발파의 측정값은 전체적인 경향 및 평균값과 많은 차이가 나는 것을 확인하였으므로, 이는 오차로 간주하여 추후 모든 분석에서 제외하였다.

4.1 지반진동

발파에 의한 지반진동 측정결과 및 진동속도 추정식 산출

고정지점과 임의지점에서 측정된 값들을 살펴보면, 고정지점에서는 진동속도가 3.89~10.40cm/sec의 범

위를 나타냈으며, 평균 6.93cm/sec의 값을 나타내었다. 임의지점에서는 0.21~2.48cm/sec의 진동속도를 갖으며, 평균 0.81cm/sec의 값을 나타내었다.

측정된 총 50개의 지반진동 값을 이용하여 95% 신뢰구간에 대한 자승근 환산거리에 의한 추정식 (2)와 삼승근 환산거리에 의한 추정식 (3)을 도출하였으며, Fig. 4의 (a)와 (b)에 환산거리와 지반진동과의 관계를 log-log plot에 도시하였다. 추정식 도출 결과 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리에 대해 입지상수는 각각 95.35와 333.24로, 감쇠상수는 각각 동일하게 -1.52로 확인되었다.

$$V_{95} = 95.35 \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^{-1.52} \quad (2)$$

$$V_{95} = 333.24 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.52} \quad (3)$$

여기서 D 는 발파원과 측정지점 간 거리이며, W 는 지발당 장약량이다.

발파에 의한 지반진동과 지연시차의 상관성

Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, 최대진동속도는 발파원과 측정지점 간 거리 영향을 받으므로, 지연시차와의 상관성 분석에서는 발파원과 측정지점 간 거리를 일정하게 유지한 상태에서 지연시차의 변화만을 고려하기 위해 45m 고정지점의 측정값만을 분석에 이용하였다.

Fig. 5는 지반진동 측정값을 각 지연시차에 따라 평균값으로 도시한 것이다. 그래프를 보면, 지연시차가 4ms와 16ms일 경우 측정값의 평균이 각각 9.14cm/sec와 8.91cm/sec로 나타났으며, 지연시차가 8ms와 28ms일 경우 각각 5.76cm/sec와 5.75cm/sec로 나타났다. 이것은 지연시차가 4ms와 16ms로 진행된 발파의 경우는 탄성파가 서로 보강간섭을 일으켜 PPV가 커지는 현상이 나타난 것이며, 반대로 지연시차가 8ms와

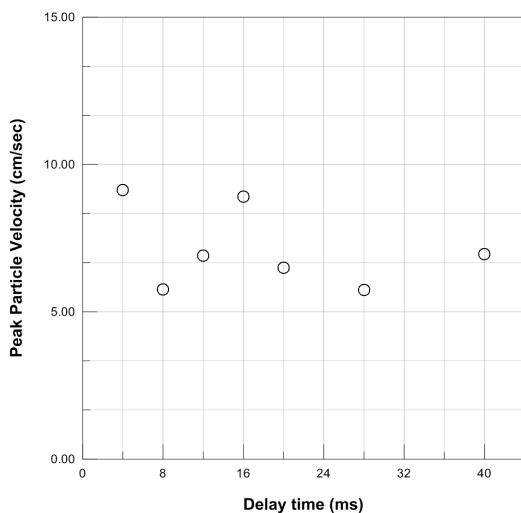


Fig. 5. Average of peak particle velocity considering change of delay time (when the distance between blasting source and measuring device is 45m).

28ms로 진행된 발파의 경우 서로 상쇄간섭을 일으켜 PPV가 작아지는 현상이 나타난 것으로 볼 수 있다.

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이, 본 현장에서 지연시차에 따른 지반진동은 지연시차가 8ms 씩 증가할 때마다 보강간섭과 상쇄간섭이 나타나게 된다. 이렇게 주기적으로 반복되는 간섭효과에 따라 본 연구에서 측정하지 않은 지연시차가 24ms인 발파에 대해 상쇄간섭으로 인해 상대적으로 낮은 PPV가 측정될 수 있음을 생각할 수 있다.

따라서, 본 연구가 수행된 현장에서 지연시차에 따른 발파진동을 측정된 결과, 발파진동을 저감할 수 있는 지연시차는 상쇄간섭이 나타나는 8ms와 24ms임을 확인할 수 있었다.

Langefors의 시차이론에 따른 진동속도 분석

Langefors의 시차이론을 이용한 분석은 일반적으로 단일공 발파에 의한 파형과 같이 중첩이 없는 파형을 기준으로, 지연시차에 따른 중첩모텔링을 통해 이루어진다. 하지만 본 연구에서는 현장 여건상 중첩이 발생하지 않는 파형을 얻지 못하여, 중첩모텔링을 수행하지 못하였다. 따라서 부득이 중첩이 포함된 파형을 기준파형으로 하여 Langefors의 시차이론을 간략히 검토해보았다.

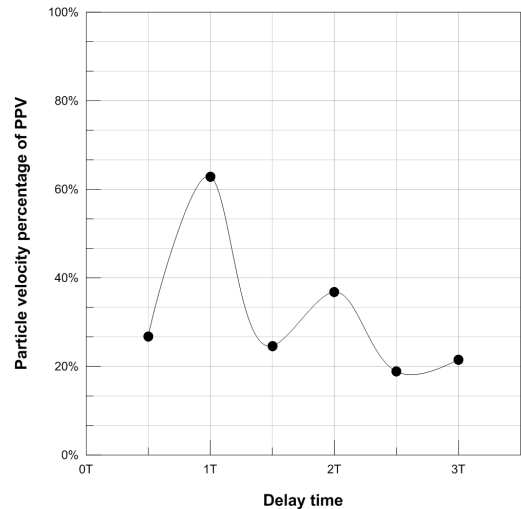


Fig. 6. Average of particle velocity percentage of PPV considering change of delay time based on time theory of Langefors (when the distance between blasting source and measuring device is 45m).

각각의 발파에서 PPV가 나타나는 방향성분의 파형을 기준파형으로 설정하고, 주파수를 이용하여 주기를 구한 뒤, 식 (1)에 따라 보강간섭과 상쇄간섭이 일어나는 시간을 계산하였다. 또한, 계산된 시간으로 파형에서 진동속도를 구하였으며, 이를 PPV에 대한 백분율로 나타내었다. 분석은 고정 측정지점에서 측정된 값과 임의 측정지점에서 측정된 값으로 나누어 수행하였고, 고정 측정지점에 대한 평균 백분율을 Fig. 6에 나타내었다.

4.2 소음

발파에 의한 소음 역시 발파원으로부터 45m 만큼 이격된 고정 측정지점에서 측정된 값으로 분석을 실시하였다. 측정된 발파소음은 86.2~99.8dB(A)의 범위에 있었으며, 평균 92.8dB(A)의 값을 나타내었다. 고정 측정지점에 대해 발파소음은 지연시차가 16ms 일 경우 평균 97.7dB(A)로 가장 높게 측정되었으며, 지연시차가 8ms일 경우 평균 89.2dB(A)로 가장 낮게 측정되었다. 전체적인 경향을 살펴보면, 지연시차가 증가할수록 발파소음은 증가하다가 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다(Fig. 7).

하지만 발파소음은 노천광산의 특성상 기후조건의 제약이 따르기 때문에 시험발파 당일의 기후조건에

따라 오차발생 확률이 높다. 실제로 1차 20ms 발파와 3차 4ms 발파에서 소음을 측정하지 못하였는데, 이는 측정당시 기후조건인 풍속이 타 발파 시 보다 강해 측정에 많은 영향을 미칠 것이라고 판단하였기 때문이다.

이처럼 본 연구에서 측정된 발파소음은 지연시차의 변화만으로 측정된 순수 결과 값으로 보기 어렵기 때문에, 이를 이용하여 지연시차와 발파소음 간 상관성을 분석하는 것은 다소 무리가 있다고 판단된다.

5. 토의 및 고찰

발파에 의한 진동과 소음은 그동안 국내외적으로 많은 선행 연구가 진행되어 왔으며, 그 중에서도 공내 기폭위치, 협동장약, 비장약량 등의 영향인자들에 의한 진동 및 소음 저감에 대한 연구가 보고되고 있다 (최와 류, 2012; Qingguo et al., 2011; Zhenyu et al., 2013).

현재 진동속도 추정식에 이용되는 환산거리의 변수인 지발당 장약량(W)을 산정하는 과정에서 지발시간에 대한 기준은 Duvall et al.(1960)에 의해 8ms로 제시되었다. 8ms의 기준에 따른 환산거리 방식은 진동속도 예측에 있어서 높은 정확도와 간편함으로 오늘 날까지 널리 통용되고 있으나, 주파수의 영향과 뇌관의 기폭 정확도를 고려하지 않았다는 점에서 그 타당성에 대한 의문점이 제기되었다(Anderson, 1989; Oriard and Emmert, 1980). 이러한 8ms의 기준으로 본 연구의 결과를 살펴보면, 지연시차가 8ms 이하로 적용된 발파의 경우 제발발파로 간주되어 지연시차의 영향을 받지 않아야한다. 하지만 Fig. 5에서도 확인할 수 있듯이, 지연시차가 4ms로 수행된 발파와 8ms로 수행된 발파의 결과가 서로 상이함을 알 수 있다. 이는 8ms 기준과 상반되며 따라서, 본 연구의 결과를 통해서도 8ms 기준에 대한 의문을 제기할 수 있다.

한편, 미광무국(USBM)에서 주도한 실험(Devine, 1966)은 발파에 의한 진동속도를 저감시키는데 있어 지연시차에 대한 효과를 보여주었다. 이 실험은 석회석 채광장에서 장약공 사이의 지연시차만을 다르게 하여 발파를 수행하였으며, 7공과 15공 발파에서 각 지연시차에 대해 거리를 증가시키면서 최대진동속도를 기록하였다. 7공 발파에서는 지연시차가 9ms와 34ms 일 경우에 진행방향성분의 진동속도가 제발발파에 비

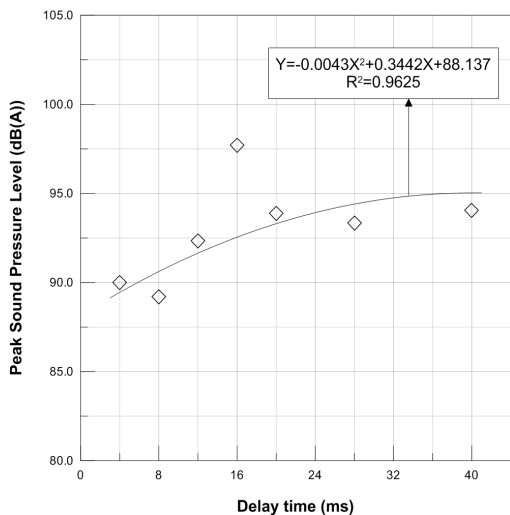


Fig. 7. Average of peak sound pressure level considering change of delay time (when the distance between blasting source and measuring device is 45 m).

해 3~5 배로 저감하였다. 15공 발파에서는 진동속도의 저감효과가 7공 발파보다 더 적게 나타났지만, 세방향성분 모두 지연시차 34ms에서 진동속도가 저감하여, 이 실험에서는 7공과 15공 발파 모두 지연시차가 34ms인 경우에 진동속도 저감효과가 나타났다.

본 연구에서 발파진동을 저감시킬 수 있는 지연시차인 8ms와 24ms는 USBM의 연구결과와 큰 차이를 보인다. 이는 같은 석회석 광산에서 실시한 발파임에도 불구하고 지반조건과 발파조건이 서로 상이하여 나타난 결과로, 현장에서 지연시차를 결정할 때 지반조건(지반의 동적 특성, 불연속면 분포 특성 등)과 발파조건(발파공 간격, 장약량, 저항선 등)을 상세히 검토한 후 그 현장에 적합한 지연시차를 결정해야 함을 보여주고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 강원도 동해시 삼화동에 위치한 (주)쌍용자원개발 동해광업소에서 석회석 암반을 대상으로 전자뇌관에 의한 지연시차의 변화와 발파진동 및 소음과의 상관성을 살펴보았다. 총 50개의 측정값을 지연시차와 측정거리에 따라 분석하였으며, Langefors의 시차이론을 적용하였다. 본 연구에서 분석된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 발파진동은 발파원으로부터 후방으로 45m 만큼 이격된 고정 측정지점에 대해 지연시차가 4ms일 경우와 16ms일 경우 상대적으로 높은 값을 나타내었으며, 지연시차가 8ms일 경우에 상대적으로 낮은 값이 측정되었다. 측정된 PPV를 지연시차에 따라 살펴보면, PPV의 측정값이 일정한 주기를 갖는 형태를 띠어 보강간섭과 상쇄간섭이 반복되어 나타난 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구가 수행된 현장에서 발파진동을 저감할 수 있는 지연시차는 상쇄간섭이 나타나는 8ms와 24ms로 확인되었다.
- 2) Langefors 시차이론을 바탕으로 고정 측정지점과 임의 측정지점으로 나누어 간섭효과를 검토한 결과, 두 분석에서 모두 이론에 잘 부합하는 결과를 확인하였다. 이에 본 연구에서 측정된 발파진동의 크기는 Langefors의 시차이론에 따른 간섭효과로 설명할 수 있으며, 제한적인 범위 내에서 직접 적

용하지 못한 지연시차에 대한 PPV를 일정 수준 내에서 유추할 수 있었다.

- 3) 발파소음은 지연시차가 16ms일 경우 평균 발파소음이 가장 높게 측정되었으며, 지연시차가 8ms일 경우 가장 낮게 측정되었다. 전체적인 경향은 지연시차가 증가할수록 발파소음도 증가하여 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였으나, 본 연구가 수행된 노천광산 특성상 기후조건이 발파소음 측정에 많은 영향을 미쳤을 것이라고 판단하여, 발파소음과 지연시차의 상관성을 분석하기에는 어렵다고 판단하였다.

이상의 결과를 통해 본 연구가 수행된 현장에 대해 지연시차를 8ms 또는 24ms로 설정 하는 것이 발파진동을 저감하는데 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 하지만 본 연구에서 도출된 결과는 (주)쌍용자원개발 동해사업소 SL200 구역의 사면에 대한 국부적인 결과로, 발파조건과 입지조건 등의 영향을 충분히 고려해야 하는 현장 결과이다. 따라서 본 연구의 결과만으로도 현장에 대한 직접적인 적용은 무리가 있을 것으로 생각된다.

하지만, 발파진동 및 소음에 대한 지연시차의 상관관계를 보다 정량적으로 규명하기 위해 지연시차 이외의 모든 변수들은 고정하여 현장시험을 수행하였으며, 지연시차의 에러 발생율을 최소화하기 위해 전자뇌관을 사용하였다는 점에서 많은 의의를 둘 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 지연시차 외에 지발당 장약량이나 비장약량 등과 같은 다른 발파조건에 대한 상관관계를 규명할 경우에도 좋은 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 특히, 본 연구의 현장시험결과를 통해서도 검증된 Langefors의 시차이론을 적극 적용한다면 노천발파현장에서의 발파진동 및 소음 저감 대책마련에 정량적인 결과를 제시해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 강추원, 류복현, 최태홍, 2014, 발파공 사이의 지연시차와 기폭위치가 지반진동에 미치는 영향, 터널과 지하공간, Vol. 24, No. 1, pp. 97-109.
2. 선우춘, 류창하, 최병희, 박찬, 이병주, 김현우, 2012, 동해광산 2지구 채진 사면 안정성분석 및 적정 정리

- 방안 기술자문보고서, 한국지질자원연구원(KIGAM).
3. 이창훈, 강추원, 김종인, 2001, 발파공수에 따른 진동 속도 특성에 관한 연구, 화약발파, Vol. 19, No. 1, pp. 63-70.
 4. 최병희, 류창하, 2012, 지반진동 규제기준에서 진동레벨과 진동속도의 상호관계에 대한 고찰, 화약발파, Vol. 30, No. 2, pp. 1-8.
 5. 최용근, 이정인, 이정상, 김장순, 2004, 벤치발파에서 암석 파쇄도에 영향을 미치는 요인 분석, 화약발파, Vol. 22, No. 3, pp. 1-12.
 6. Alejandro, D. A., Robert, R. S., Nanna, E. and Rick, E., 2007, Vibration and air pressure monitoring of seismic sources, CREWES research report, Vol. 19, Chap. 16, pp. 1-14.
 7. Anderson, D., 1989, The 8 Millisecond "Criterion": Have We Delayed Too Long in Questioning It?, Proc. 15th Conf. on Explosives and Blasting Technique, ISEE, New Orleans, Louisiana, pp. 381-396.
 8. Devine, J. R., 1966, Avoiding damage to residences from blasting vibration, Highway research record 135, pp. 35-44.
 9. Duvall, W. I., Johnson, C. F., Meyer, A. V. C. and Devine, J. F., 1963, Vibration From Instantaneous and Millisecond-Delayed Quarry Blast, USBM RI 6151, pp. 1-34.
 10. Langefors, U. and Kihlstrom, B., 1978, The Modern Technique of Rock Blasting, 3rd ed., John Wiley & Sons, pp. 258-293.
 11. Oriard, L. L. and Emmert, N. W., 1980, Short delay blasting at Anaconda's Berkeley open pit mine, montana, Society of Mining Engineers.
 12. Qingguo, L., Yafang, A., Lei, Z., Dewu, L. and Liping, Y., 2011, Comparative Study on Calculation Methods of Blasting Vibration Velocity, Rock Mech. Rock Eng., Vol. 44, No. 1, pp. 93-101.
 13. Reza, N., 2011, Prediction of ground vibration level induced by blasting at different rock units, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 48, No. 6, pp. 899-908.
 14. Zhenyu, W., Fang, C., Chen, Y. and Cheng, W., 2013, A comparative study of delay time identification by vibration energy analysis in millisecond blasting, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol, 60, pp. 389-400.



이봉현

강원대학교 에너지·자원공학과

Tel: 033-255-6253

E-mail: bh8416@kangwon.ac.kr



최성웅

강원대학교 에너지·자원공학과

Tel: 033-255-6253

E-mail: choiso@kangwon.ac.kr