

## 불규칙한 천공장이 발파진동 크기에 미치는 영향에 관한 연구

강 추 원<sup>1)\*</sup>

### A Study on the Effect of Irregular Drill-hole Depth on Blast Vibration

Choo-Won Kang

**Abstract** This study is to evaluate an irregular drill-hole depth having an effect on the blast vibration. The relationship between a peak particle velocity and a cube root scaled distance with respect to three drill-hole depths with 2.1m, 2.3m and 2.4m are compared and analyzed using a numerical regression analysis. According to the results, the deeper a drill-hole depth is the larger a peak particle velocity is. It is suggested that a drill-hole depth is proportional to a peak particle velocity at the same scaled distance. Therefore, a regular drill-hole should be carried out in order that the blast vibration velocity of a fixed range under a allowable vibration velocity is maintained.

**KeyWords:** blast vibration, regression analysis, irregular drill-hole depth

**초 록** 본 연구에서는 불규칙한 천공장이 발파진동에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 각각 2.1m, 2.3m, 2.4m의 천공장에 대한 최대 진동속도와 삼승근환산거리의 관계를 비교 분석한 결과 동일 환산거리에서 천공장의 크기가 깊어질수록 더 큰 진동속도를 보였다. 그러므로 허용진동 속도이하의 일정범위의 발파 진동치를 유지하기위하여서는 규칙적인 천공이 되도록 관리가 필요할 것으로 판단된다.

**핵심어:** 발파진동, 회귀분석, 불규칙한 천공장

## 1. 서 론

발파에 의한 암석의 파괴는 이론적으로 체계화시키고 응용하기에는 상당히 난해한 부분이다. 다양한 암반의 상태와 물성 그리고 매우 제어 및 예측하기 어려운 폭약의 힘 때문에 다른 공학 분야보다 그 진보가 더딘 것이 사실이다. 특히, 발파원으로 부터 전파되는 발파진동의 크기는 여러 가지 변수(암반상태, 암석물성, 폭약종류, 기폭방법 등)에 의해 다양하게 변하므로 개개의 변수들에 대해 다양한 연구가 진행되어 왔으며 현재에도 상당히 많은 연구가 진행 중에 있다.

일반적으로 발파 진동의 크기에 영향을 미치는 요소 중에서 암반의 조건과 폭약 종류, 장약량 등 제 요소가 동일한 경우에는 최소 저항선 거리와 자유면의 수에 의해 발파 진동이 결정되는 것으로 알려져 있다. 그러나 국내의 여러 학자들의 연구<sup>1)2)</sup> 결과 터널발파에서 최소

저항선거리와 자유면의 수 외에 자유면의 크기가 발파진동의 크기를 결정하는 주된 요소로 작용하는 것으로 연구되었다.

그러므로 발파진동의 크기에 영향을 미치는 여러 가지 변수 중 천공장의 변화는 장공에서는 별 무리가 없겠지만 단공에서는 그 차이가 적지 않을 것으로 생각된다. 천공장이 변화한다는 것은 장약의 중심이 이동하는 것으로 단일 자유면으로 간주 될 수 있는 발파 형태에서는 발파 설계에 크게 영향을 주는 최소저항선의 변화로 간주될 수도 있다.

본 연구에서는 실제 발파 현장에서 천공장이 불규칙한 발파 형태가 발파 진동의 크기에 어떤 영향을 미치는지를 천공장의 변화에 따른 발파진동의 크기를 조사하여 접근하였다. 시험 방법으로는 실제 발파 현장에서 천공장을 변화시켜 장약의 중심을 변화시키는 방법으로 발파진동을 계측하고 분석하였다.

<sup>1)</sup>정회원, 조선대학교 자원공학과 교수

\*교신저자(Corresponding Author): cwkwang@mail.chosun.ac.kr

접수일: 2003년 6월 18일

심사 완료일: 2003년 8월 19일

## 2. 연구지역의 지질

본 현장의 기반암은 선캠브리아기 편마암류와 이를 관입한 쥐라기 화강암류 그리고 부분적으로 분포하는 백악기 화산암류 및 암맥 등이 관입 분포하고 있으며 이들을 제 4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다.

이 지역을 구성하는 지질 계통중에 가장 고기의 암체인 편마암류는 흑운모 편암과 그 후를 관입한 화강암질 편마암으로 이루어지며 이들 편마암류의 절대 연령은 아직 잘 알려지지 않았지만 분포상으로 보아 영남 육괴의 소백산 변성암 복합체의 일부로 인정된다. 그리고 이를 피복하고 있는 화강암류는 우리나라 전역에 가장 우세하게 분포하는 쥐라기 화강암이며, 흑운모 화강암, 순창 화강암, 반상 화강암으로 대별 된다. 상위의 백악기 화산암류는 편마암류 및 화강암류 지역의 곳곳에 산포하며 유문암류, 안산암류 그리고 염기성 및 산성 암맥으로 구성된다. 상기암들을 부정합으로 덮고 있는 제 4기의 충적층은 수계를 따라 넓게 분포하고 있다. 본 지역은 화강암질 편마암이 기반암으로 분포한다.

## 3. 발파진동식의 설정

발파진동의 전파특성을 이론적으로 파악하려는 여러 학자들에 의해서 발파현상에 관련된 변수의 차원해석과 발파진동의 측정 경험을 토대로 발파진동을 제안하고 있으며, 복잡한 지반을 대상으로 한 발파진동식의 이론적 전개는 아직 완전히 이루어지지 않고 있으나 현재 국내외로 가장 널리 적용되고 있는 발파진동식은 식 (1)과 같다.

$$V = K \left( \frac{R}{W^b} \right)^n \quad (1)$$

여기서

$V$ = 지반의 진동속도(particle velocity, mm/sec)

$R$ = 폭원으로부터의 거리(distance, m)

$W$ =지발당 장약량(charge per delay, kg)

$K, n, b$ 는 지반조건에 따른 상수

Devine<sup>3)</sup>은 식 (1)의 장약지수  $b$ 값에 대해 실험적으로 1/2의 값을 제안하였고 이를 square root scaling이라 한다. 그리고  $b$ 의 값을 1/3로 둘 때 이를 cube root scaling이라 하며 이는 차원 해석결과 나온 이론적인 값이다.

또 환산거리(scaled distance, SD)를 식 (2)으로 두고

$$SD = \left( \frac{R}{W^b} \right) \quad (2)$$

$b = 1/2$ 이면 이를 자승근 환산거리(square root scaled distance),  $b = 1/3$ 이면 삼승근 환산거리(cube root scaled distance)라 한다. 이는 각각 거리를 장약량의 자승 및 삼승의 비율로 환산한 형태이다. 자승근 환산거리는 장약이 긴 막대기 형태로 분포한 것으로 본 것이며, 삼승근 환산거리는 전파경로 위의 한 점에서 보는 장약 형태를 구형으로 가정한 경우이므로 둘 다 모두 사용되고 있다. 일반적으로 가까운 거리에서는 삼승근 환산거리가, 먼 거리에서는 자승근 환산거리가 지발당 장약량이 작게 결정되어 안전율이 높게 나타나는 것으로 알려져 있다.

## 4. 실험 조건과 실험 가정

### 4.1 실험 조건

본 연구를 수행한 지역은 광주광역시 광산구 평동 산업단지 진입도로 개설공사(2차구간)의 일환으로 노출된 암반을 제거하기 위하여 발파작업을 실시한 공사현장이다.

발파작업은 Table 1과 Fig 1, 2와 같이 45 mm의 천공경에 32 mm Emulsion계 폭약을 사용하였으며, 천공장은 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m으로 공간격은 0.8 m의 조건으로 발파를 실시하였다. 또 발파형태는 2자유면(Bench)의 단일 발파 형태가 아닌 자유면이 존재하나 그 영향이 미미한 Fig. 1과 같은 다열 발파형태로 천공장의 변화로 장약의 중심이 이동하여 단일 자유면으로 간주 될 수 있는 발파 형태로서 최소저항선의 변화를 유도하여 시험하였다. 이런 발파형태는 현장에서 초기 암반 파쇄 과정이나 암반 파쇄 작업도중 작업공정상 쉽게 접할 수 있는 경우에 해당된다.

발파작업에 사용된 뇌관은 MS전기뇌관으로 0번부터 19번까지 각각 16 ~20단의 뇌관을 사용하여 1회 발파당 16~20공을 발파하였다. 각 발파공에 사용된 뇌관은 모두 20 ms 간격의 시차를 갖는 뇌관을 사용하여 지발당 최대 장약량과 공당 장약량이 모두 0.625 kg으로 동일하게 하였다.

또 매 공마다 천공장을 측정하여 각각의 시험 천공장 규격에 맞지 않은 공에 대해서는 모래를 사용하여 시험 규격에 맞추도록 하였다.

Table 1. Blasting condition.

Division	2.1 m Hole Depth	2.3 m Hole Depth	2.4 m Hole Depth
Drilling Length(m)	2.1	2.3	2.4
Hole Diameter(mm)	45	45	45
Hole Space(cm)	80	80	80
Detonator	MS electric detonator	MS electric detonator	MS electric detonator
Explosive	Emulsion	Emulsion	Emulsion
Weight/delay(kg)	0.625	0.625	0.625

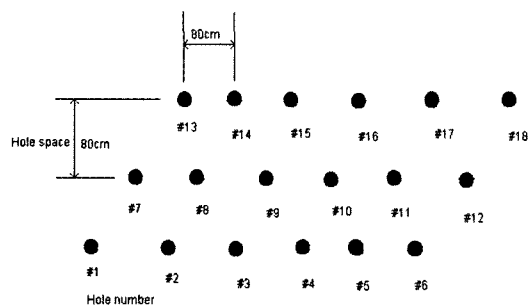


Fig. 1. Drilling pattern.

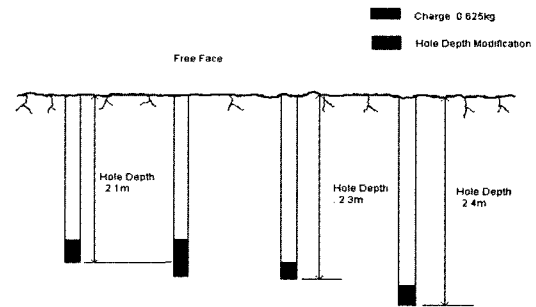


Fig. 2. Charge method and hole depth modification.

#### 4.2 실험 가정

실험 가정으로 2.3 m의 천공장으로 설계된 발파 현장에 있어 과천공 10 cm에 의한 2.4 m의 천공장과, 약천공 10 cm와 자연매움에 의한 10 cm를 가정한 2.1 m의 천공장으로 가정하여 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m의 세 가지 pattern의 천공장으로 실험하였다. 즉, 이들 세 가지의 천공 pattern은 천공 작업 시 천공 깊이의 오차를 모두 포함하는 것으로 가정하였다. 이런 가정은 부주의한 천공작업으로 인해 발생할 수 있는 실제현장의 예로서 가정하여 시험하였다.

실험 방법으로 천공장의 변화에 의한 발파 진동의 변화 추이를 살펴보기 위하여 각각 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m의 천공장에 대해 각각 장약을 하여 각각의 진동을 측정하였다. 또 세 가지의 천공장을 모두 포함하는 측정 자료는 획득하지 않았으며, 이것은 계측된 각각의 진동 측정자료들의 모두를 포함하는 측정 자료는 불규칙한

천공장에 의한 것으로 가정하였기 때문이다.

### 5. 측정결과 및 분석

#### 5.1 진동측정 결과

동일한 지발당 장약량으로 천공장을 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m로 변화시키고 각각의 천공장에 대한 발파 진동을 발파지점과 계측지점과의 거리를 변화시키면서 측정하였다. 각각 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m의 천공장에 대한 측정 Data는 30개, 20개, 21개로 총 71개의 자료를 수집하여 분석에 사용하였다.

천공장의 변화에 따른 진동속도의 변화를 관찰하여 이를 토대로 불규칙한 천공장의 영향을 알아보기 위하여 1회 발파당 16~20공씩 발파를 실시하고, 20~118 m의 거리에서 측정된 발파 진동치를 각각 분석한 결과 Table 2와 같은 결과를 얻었다.

Table 2. Result of regression analysis.

Division	2.1 m Hole depth		2.3 m Hole depth		2.4 m Hole depth		All data	
	Square root	Cube root	Square root	Cube root	Square root	Cube root	Square root	Cube root
k	7314	6319	10802	9348	23115	19848	2448	2185
n	-1.86	-1.86	-1.84	-1.84	-1.93	-1.93	-1.44	-1.44
r <sup>2</sup>	0.746	0.746	0.929	0.929	0.755	0.755	0.795	0.795

Table 2에서 K는 진동상수, n은 감쇄지수,  $r^2$ 은 결정계수이다. 여기서 결정계수( $r^2$ )란 회귀분석에서 회귀직선의 유의성 검정과 더불어, 회귀분석에 의한 종속변수가 설명되어지는 정도를 나타내는 것이다. 결정계수 값( $r^2$ )이 0에 가까울수록 추정된 회귀직선은 신뢰성이 낮고 1에 가까울수록 신뢰성이 높은 회귀직선이 된다<sup>4)</sup>.

**5.2 천공장 변화에 따른 발파진동의 변화 형태 분석**

본 연구에서는 천공장이 각각 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m로 변화될 때 발파진동 크기의 비교를 위하여 Fig 3과 같이 도시했으며 이것은 편의상 삼승근 환산거리에 의한 95% 발파 진동 전파식만을 사용 비교하였다.

Fig. 3에서와 같이 각각의 천공장 별 발파진동 크기의 양상은 동일 환산거리에서 천공장의 깊이가 깊어질수록 더 큰 진동속도를 보인다.

천공장 별 장약 상태는 2.3 m의 천공장을 표준장약으로 본다면 2.1 m의 천공장은 과장약 상태이며 2.4 m의 천공장은 약장약 상태로 볼 수 있다. 여기서 과장약 상태나 약장약 상태를 표준 장약 상태로 수정하기 위하여서는 2.1 m의 천공장의 장약량은 줄여주고 2.4 m의 천공장의 장약량은 늘려 주어야 하는데 발파 진동은 가장 큰 지발당 장약량에 좌우되므로 불규칙한 천공장을 현장에서 조사하여 공당 장약량을 늘려서 표준 장약량으로 수정하는 방법은 발파 진동 조절면에서는 바람직하지 못하다. 즉, 바람직한 수정방법은 약 천공장은 장약량을 줄여서 수정하고 과 천공장은 모래 등을 사용하

여 매우는 방법으로 천공장을 줄여서 수정하여야 한다.

**5.3 불규칙한 천공장에 의한 발파진동의 변화 형태 분석**

Fig. 4는 불규칙한 천공장에 의한 발파 진동의 변화 형태를 보기 위하여 Fig. 3에서 도시된 각각 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m 천공장의 95 % 발파진동 전파식과 이들을 모두 포함하는 측정 자료에 대한 95 % 발파 진동 전파식을 동일 Log-Log그래프 상에 도시한 것이다.

Fig. 4에서 보이는 것과 같이 2.3 m의 천공장으로 설계된 발파 진동 전파식과 불규칙한 천공장에 의해 발생할 수 있는 발파 진동 전파식이 환산거리 40부근에서 교차하고 환산거리 90부근에서 2.4 m 천공장의 발파 진동 전파식과 교차한다. 이것은 환산거리 40~90 범위에서는 동일한 지발당 장약량과 거리에서 모든 측정자료를 포함한 불규칙한 천공장은 2.3 m의 천공장 보다 큰 진동속도를 보일 것이다. 왜냐하면 발파 진동은 동일 지발당 장약량일 경우 가장 큰 진동 속도는 과천공된 공에서 발생할 것이기 때문이다.

그러므로 불규칙한 천공장에 의한 발파는 과장약 혹은 약장약을 유발하여 인근 보안 물건 등에 피해를 줄 수 있는 여지가 있음을 암시하는 것으로서 설계의 오류 혹은 감리의 오류로 인식될 수 있는 소지가 있다. 즉, 발파진동 예측 용역이나 영향평가 등에 의해 설계된 설계양식에 의하여 시공 감리를 하였더라도 불규칙한 천공장에 의해 충분히 예상 진동치 보다 높은 진동을 주위 보안물건에 전달하여 피해를 주고 결국에는 예측 용역이

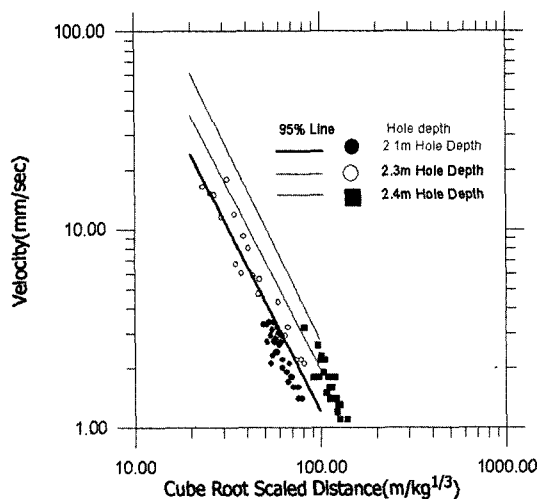


Fig. 3. Relationships between peak particle velocity and cube root scaled distance by 2.1 m, 2.3 m & 2.4 m.

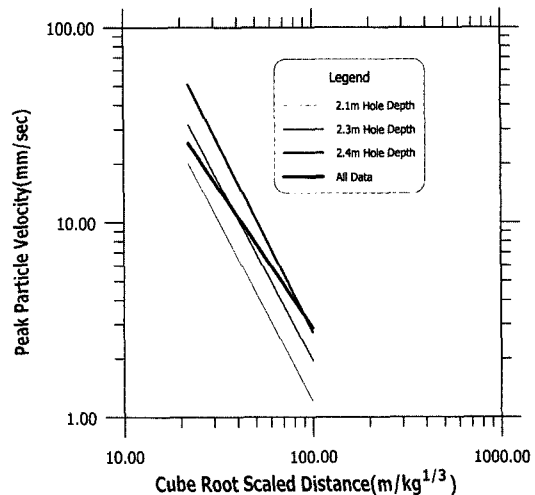


Fig. 4. Relationships between peak particle velocity and cube root scaled distance by 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m & all data.

나 시공감리의 오류로 그 책임이 전가되어질 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 실제 발파 현장에서 부주의하게 취급 되는 불규칙한 천공장으로 인해 설계된 천공깊이와 다른 천공 깊이를 갖는 발파 형태가 발파 진동의 크기에 어떤 영향을 미치는지 또 천공 깊이가 변화될 때 발파 진동의 크기가 어떻게 변화되는지를 연구하기 위하여 실제 발파 현장에서 천공깊이를 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m로 변화시켜 장약의 중심을 이동시키는 방법으로 발파진동을 계측하고 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 각각 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m의 천공장 별 발파진동 크기의 양상은 발파진동을 계측하고 분석한 결과 동일 환산거리에서 천공장의 크기가 길어질수록 더 큰 진동 속도를 보인다. 이것은 발파형태가 2자유면(Bench)의 단열 발파 형태가 아닌 자유면이 존재하나 그 영향이 미미한 다열 발파형태로 천공장의 변화로 장약의 중심이 이동하여 단일 자유면으로 간주 될 수도 있는 발파 형태로서 최소저항선이 천공장의 변화에 따라 변화된 결과로 사료된다.
- 2) 각각 2.1 m, 2.3 m, 2.4 m 천공장의 95 % 발파 진동 전파식과 이들을 모두 합하여 얻은 95 % 발파 진동

전파식을 도시하여본 결과 환산거리 40~90에서 2.1 m, 2.3 m, 불규칙한 천공장(측정된 모든 data), 2.4 m의 천공장 순으로 진동속도가 커지는 것으로 나타났다. 그러므로 허용진동 속도이하의 일정범위의 발파 진동치를 유지하기위하여서는 규칙적인 천공이 되도록 관리가 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 2001년 조선대학교 교비지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 신일재, 이정인, 백종현, 2001, 최소저항선이 발파진동의 크기에 미치는 영향에 관한 실험연구, 대한 화학기술학회지, 19.1, 53-62.
2. 두준기, 양형식, 2001, 최소 저항선과 자유면의 크기가 발파 진동에 미치는 영향 고찰, 대한화학기술학회지, 19.3, 59-66.
3. Devine, J. R., et al, 1996, Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting, U. S. Bur. of Mines Rpt. of Invest, 37p.
4. 류창하 등, 1993, 발파영향 평가 및 발파공법 연구, 한국자원연구소, 13-31, 51-58.

### 강 추 원



1973년 조선대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1981년 조선대학교 공과대학 자원공학과  
공학석사  
1999년 강원대학교 대학원 자원공학과  
공학박사  
Tel: 062-230-7117  
E-mail: cwkang@mail.chosun.ac.kr  
현재 조선대학교 자원공학과 교수