

# 천공패턴 및 기폭시차의 변화에 의한 파쇄암의 입도 분포 연구

Experimental Study on the Size Distribution of Fragmentation by Effects of  
Drilling Pattern and Time Delay Using the Sequential Blasting Machine

이 춘우<sup>1)</sup>, 양 형식<sup>2)</sup>, 송 승곤<sup>3)</sup>

Chun-Woo Lee<sup>1)</sup>, Hyung-Sik Yang<sup>2)</sup> and Seung-Gon Song<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>전남대학교 공학석사, <sup>2)</sup>전남대학교 교수, <sup>3)</sup>전남대학교 석사과정

---

## 초 록

본 연구에서는 계단식 발파에서 파쇄입도에 영향을 미치는 변수들로부터 대피를 줄이는 새로운 발파패턴을 제시하고자 하였다. 광주 제2순환도로 대절토 구간에서 천공경, 1회발파공수, 화약의 종류 등의 영향을 파쇄암의 평균입자의 크기와 상위 5개의 대피 평균치로 나타내었다.

그 결과 대피의 크기는 평균 파쇄암의 크기와 선형적인 추이를 나타내었으며 평균파쇄도는 저폭속 폭약인 ANFO가 NewMITE 보다 좋은 결과를 보였다. 또 천공경 65 mm와 75 mm로 ANFO를 사용했을 때 파쇄도는 약포의 직경이 작은 경우에 파쇄도가 양호하게 나타났고 총공수와 파쇄도를 살펴본 결과 평균파쇄도와 대피의 크기는 대체적으로 총공수의 증가에 비례하여 커지는 경향이었으며 평균파쇄도 보다는 대피의 크기가 증가의 폭이 컸다. 한편 첫째 열을 2단 분리장약했을 때가 일반 발파나 1열 소단벤치발파 때보다 파쇄도가 좋았다.

**핵심어** : 천공패턴, 기폭시차, 파쇄암, 파쇄입도, 천공경, 대피, 평균파쇄도

---

## 1. 서 론

계단식 발파에서 가장 중요한 것 중 하나는 대피 발생을 줄이고 적절한 파쇄입도를 유지하는 것이다. 바람직한 파쇄입도는 발파 후 암석을 처리하는데 이용되는 장비의 형태와 크기를 좌우한다. 파쇄입도는 발파 후 얻어지는 암석의

크기로 대개의 경우 평균 파쇄석의 크기( $k_{50}$ )를 기준으로 하고 있으며, 혹은 가장 큰 대피를 기준으로 삼기도 한다.

본 연구에서는 대절토 구간 현장에서 파쇄입도에 영향을 미친다고 생각되는 화약의 종류, 천공경, 1회 발파 공수의 변화에 따른 평균 입자의 크기와, 상위 5개의 대피의 크기를 측정하

였다. 이로서 평균 입자의 크기로 대파의 발생 정도를 예측할 수 있는 식을 제안하였다.

## 2. 발파에 의한 암석의 파쇄입도

### 2.1 파쇄도에 영향을 미치는 변수

제단 발파에 있어서, 파쇄입도는 암석의 지질, 천공경, 체적당 장약량, 천공패턴, 기폭순서, 공의 경사, 공의 편향, 1회 발파의 규모, 무장약 보조공의 영향, 장약공의 위치, 전색방법 등과 같은 요인에 영향을 받는다. 천공과 발파 작업을 하는 동안에 위의 요소들을 고려함으로써 파쇄에 좋은 영향을 줄 수 있다.

#### 2.1.1 천공경

어떤 발파계획에서도 발파공의 크기는 제일 먼저 고려되어야 한다. 발파공의 크기와 사용되는 폭약과 함께 저항선 그리고 천공깊이를 결정한다. 발파공이 작을수록 높은 체적당 천공장을 확보해 폭약을 암석에 더 고루 분포시켜 양호한 파쇄입도를 얻을 수 있다.<sup>1)</sup>

#### 2.1.2 체적당 장약량(specific charge)

체적당 장약량이 증가하고 천공패턴이 유지되면 암석은 더 많이 깨어질 것이다. Langefors와 Kihlstrom(1963)에 의하면 대파를 감소시키는 실험으로 최소저항선을 줄이는 것이 장약비

중을 줄이는 것 보다 더 효과적이라고 하였다.<sup>2)</sup>

Fig. 1에 의하면 채석장의 전체적인 경제성을 고려할 때 최소저항선과 장약비중을 함께 감소하여 설계하는 것이 더 효과적이라 하였다.

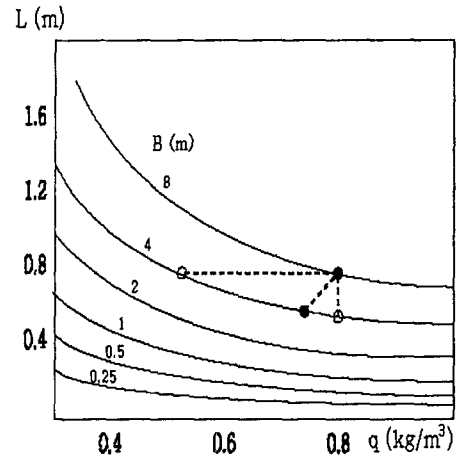


Fig. 1 Average boulder size L as function of specific charge q for various burden (from Langefors and Kihlstrom, 1963)

#### 2.1.3 천공패턴

전형적인 천공패턴의 천공간격/저항선 비 (S/B)는 1.0 ~ 1.25인데 이것은 다열 발파에서 좋은 파쇄도를 얻을 수 있는 것으로 입증되었다. Wide Space 발파의 경우 기존의 Bench cut 발파에 있어서 S/B를 보통 1.25배로 취해오던 것을 천공간격을 크게 하고 그것에 의해서

Table 1. Relation between the hole diameter and boulder size

공경 (mm)	장약밀도 (kg/m)	파쇄암의 직경 (mm)
30	0.9	35
50	2.5	70
100	10.0	150

생기는 발파효과의 저하를 최소저항선의 감소에 의하여 보완하자는 데 있다. 김과 정(1994)<sup>3)</sup>에 의하면 Wide Space 발파법을 적용함에 있어서 1열에서 최소저항선을 작게 하면 비석이 생기고, 최종 열에서는 천공간격을 크게 하면 종벽 절취가 잘 되지 않게 된다. 따라서 1열은 S/B를 기존 발파법에 의한 보통 규격으로 하고 2열부터는 Wide Space 발파 규격으로 하고, 최종 열은 S/B를 보통규격으로 발파시험을 실시한 바 있다.

#### 2.1.4 무장약공에 의한 bench 발파

계단발파에 있어서 천공상부는 비산을 염려해 충분한 전색장을 두는데, 그 결과 bench상부에서 대피가 발생하게 된다. 따라서 상부 길어진 전색장을 고려해 천공장의 절반 길이의 무장약공을 Fig. 2와 같이 인접한 열과 열 사이, 공과 공 사이에 천공을 하여 준다.<sup>4)</sup>

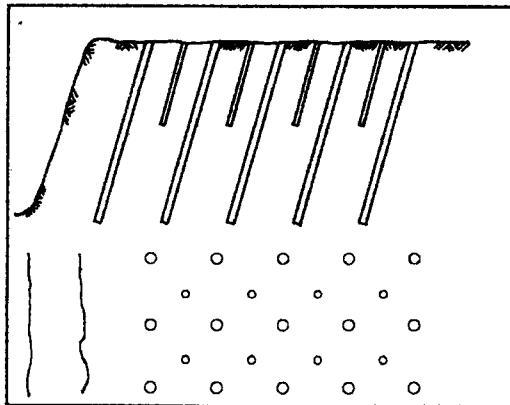


Fig. 2 A method of improving fragmentation in blasting using empty hole

하지만 이 무장약공이 bench 상부의 최소저항선을 줄여주는 역할을 해 상부의 대피는 줄어들게 되나 천공작업이 비효율적인 관계로

널리 사용되고 있지는 않다.

#### 2.1.5 기폭순서

계단 발파는 보통 MS 발파로 시행된다. 발파공 및 열 간의 지연시간을 충분히 확보하고, 전단의 파쇄암석에 방해되지 않는 충분한 공간이 만들어지도록 해야 한다. Bernt Larsson은 다열 발파에서 다음 열이 폭발되기 전에 저항선의 1/3은 이동할 수 있는 여유가 있어야 한다고 한다. 열간의 시간차는 일반적으로 저항선거리의 15 ms/m가 좋다. 이 단차 시간은 좋은 파쇄도와 비석 제어에 좋은 결과를 얻을 수 있다.

Langerfors는 시차와 최소저항선과의 관계를 다음 식으로 표시하였다.

$$\tau = kB$$

B : 최소저항선

k : 3 - 5 ms/m의 값을 갖는 상수

$\tau$  : 최적 지발시간(ms)

Janelid는 5-8 m 정도의 큰 최소저항선을 갖는 경우는  $k = 5$ 가 적당하다고 하였고, Gustafsson은 이 값들이 1열, 2열 발파일 때 적합하고, 다열발파의 경우에는 k값이 약 12 정도가 적합하다고 하였다.

#### 2.2 파쇄도의 평가 방법

대규모 스케일에서 파쇄도의 정량적인 평가는 매우 어려운 작업이다. 파쇄도를 완전하게 정량적으로 평가할 수 있는 방법은 파쇄된 물질 전체를 분류시키는 것이다. 그러나 이 방법은 실제적이지 못한 방법이다. 파쇄도를 평가하는 방법에는 육안분석, 사진분석, 초고속 항공사진 측량법, Oversize 옥석 집계법, 2차 발파

에서의 화약소모량, 쇼벨 적재속도, 분급 등이 있다.

### 2.3 파쇄도의 예측 이론

파쇄입도분포를 추정하는 여러 가지의 수학적 모델이 제안되었다. Schumann의 식, Rosin - Rammler의 식, Kuznetsov의 식, SveDeFo의 식, Kuz-Ram 모델, Larsson - Holmberg 모델 등이 대표적이다.

Larsson(1974)은 암석의 파쇄입도의 평균치를  $k_{50}$  이라고 표시하고, 파쇄입도의 50%가 통과되는 정사각형의 체(sieve)의 길이를 나타내었다. 그리고 실험을 통하여 파쇄입도의 평균치와 대피의 평균치의 상관관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$L \approx 2.6 k_{50}$$

Larsson의 경험식으로부터 Holmberg(1981)은 파쇄입도의 크기를 다음 식과 같이 나타내었다

$$y = 1 - \exp\left[-\left(\frac{0.76x}{k_{50}}\right)^{1.35}\right]$$

$x$  : sieve size (m)

$y$  : sieve size  $x$  를 통과한 weight percent

$k_{50}$  : 평균파쇄입도의 크기

이러한 모델중 일부는 파쇄입도분포를 추정하는데 있어 어떤 특수한 상황에서는 효과적이지만 다른 상황에서는 잘 맞지 않는 경우가 있다.

본 연구에서는 대피의 크기는 사진촬영에 의해서 상위 5개 대피의 평균치를 선택하였고 평균파쇄도도 같은 방법으로 처리하여  $k_{50}$ 을 채택하였다.

### 3. 실험 방법

본 연구대상지역의 지반조사 결과에 의하면

Table 2 Physical and mechanical properties of blasting site

구 분	연 압	경 압
시 험 압 편	응회암	화강암
압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )	790.0	1310.0-1660.0
비 중	2.71	2.70-2.82
흡 수 율	1.92	0.28-1.58
내부마찰각 (°)	52	51.0-52.0
점 착 력(kg/cm <sup>2</sup> )	150.0	230.0-280.0
탄성계수(10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	3.66	5.4-6.41
poisson 비	0.24	0.20-0.27

지층은 상부로부터 붕적토층, 풍화토층, 풍화암, 연암 및 기반암인 경암으로 구성되어 있다. 이 중 연암층과 경암층, 그리고 일부 풍화암중 발파를 요하는 지반을 중심으로 실험을 하였다. 발파작업이 주로 이루어진 장소는 대체로 화강암과 안산암 및 응회암이 주로 분포하고 있으며, 암석시험 결과는 다음과 같다.(Table 2 참조)

본 연구에 사용된 천공장비는 유압드릴로 FURUKAWA HCR9-DS II(3대)와 TOYO-650(2대)를 사용하여 수직천공 하였으며, 천공직경은 45, 65, 75 mm의 bit를 사용하였고, Rod는 노천발파용 3 m Rod를 사용하였다.

기폭장치로 사용된 뇌관은 20 ms 단차의 MS series(0-380 ms)와 LP series(4번(400 ms)-17번(3000 ms)) 전기뇌관을 병행하여 사용하였고, 80공 이상의 발파를 할 때는 진동을 고

려해 다단식 발파기를 사용하였다.

사용폭약은 4.5m 이상 천공시 상부 장약은 ANFO를 사용하였고, 이때 공저 장약은 50 mm NewMITE나 25 mm HiMITE를 사용하였다. Bench의 최종 열에서 45 mm를 천공한 곳에서는 32 mm NewMITE를 사용하였다.

비산방지를 위해 2.5×6 m 크기로 Rubber blasting mat를 25매 제작하여 사용하였다.

파쇄암을 분석하기 위해 Fuji 사의 MX700 Digital camera와 일반 4배율 촬영이 가능한 camera로 촬영하였으며, 파쇄도의 비교를 위해 3 m의 scale bar를 0.5 m 간격으로 표식을 하여 파쇄도를 분석하였다.

폭발 열에 의한 NewMITE 와 ANFO의 RWS(relative weighty strength)는 76과 100로 계산되었다. Table 3은 사용된 화약의 강도를 나타내었는데, 이 중 가스량과 폭발열, 화약력

Table 3. Weight strength of explosives

항 목	단 위	HiMITE 5500	NewMITE 5500	ANFO
폭 속	m/s	5500-5900	5300-5500	2700-3000
탄동구포	%	79	120(*)	70
화 약 력	ℓ kg/cm <sup>3</sup>	10725	8445	9720
폭 발 열	kcal/kg	1077	839	1104
RWS		97.55	76	100
가 스 량	ℓ /kg	915	785	967
비 중	-	1.3	1.2	0.85
낙추감도	cm	50불폭(8급)	50불폭	50불폭
내 수 성	-	우수	최우수	취약
내 한 성	℃	-20	-20	-30

은 이론치이고, (\*)는 T.N.T 기준 대비이며 기타는 Blasting gelatine(Ng/NC=92/8) 기준 대비이다.

### 3.4 발파패턴도

발파패턴을 크게는 화약의 종류에 따라 ANFO를 사용할 경우와 NewMITE를 사용할 경우로 나누었다. ANFO를 사용할 때 기폭약포는  $\phi 25$  mm HiMITE 나  $\phi 50$  mm NewMITE를 사용하였다. 체적당 장약장의 길이를 증가시키기 위해 65 mm로 천공을 하였고, 바닥면이 고르지 않고, 균열로 인해 천공이 막힐 우려가 있는 곳에서는 75 mm로 천공하였다. 그리고 대절토구간에서 법면 정리를 위해 45 mm로 천공하였다. Table 4는 천공경과 천공장에 따른 발파 패턴을 나타내었다. Fig. 3은 발파패턴 I을 도시하였다.

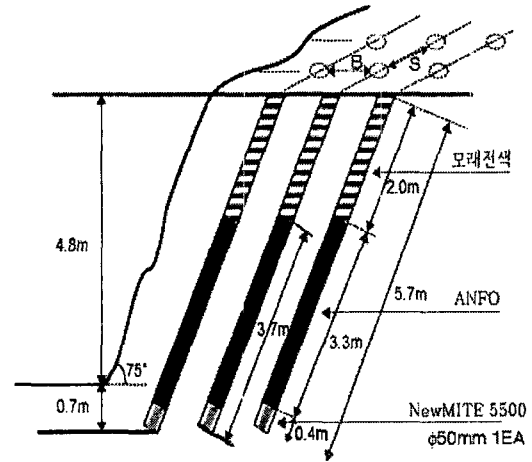


Fig. 3 Blasting pattern I

Fig. 4 및 Fig. 5는 다단식 발파기(sequential blasting machine)를 이용해 80공, 100공일 때 사용되관과 이 때 각 공의 지발시차를 보여주고 있다.

Table 4. Blasting patterns

구분	I	II	III	IV	V	VI
비트직경 (m/m)	65	65	65	65	75	45
천공장 (m)	6.0	4.5	4.0	3.0	6.0	3.0
천공간격 (m)	2.0	1.5	1.3	1.2	1.5	0.5
최소저항선 (m)	1.8	1.2	1.2	1.0	1.5	0.8
지발당 장약량(kg)	6.3	3.3	2.9	1.3	5.4	0.5
화약수량	0.25포	4개	3.5개	1.5개	6.5개	2개
화약종류	ANFO	NewMI TE50 $\phi$	NewMI TE50 $\phi$	NewMI TE50 $\phi$	NewMI TE50 $\phi$	NewMI TE32 $\phi$
발파위치	전구간	6+880~ 7+240	7+130~ 7+220	7+130~ 7+220	7+130~ 7+220	7+130~ 7+220

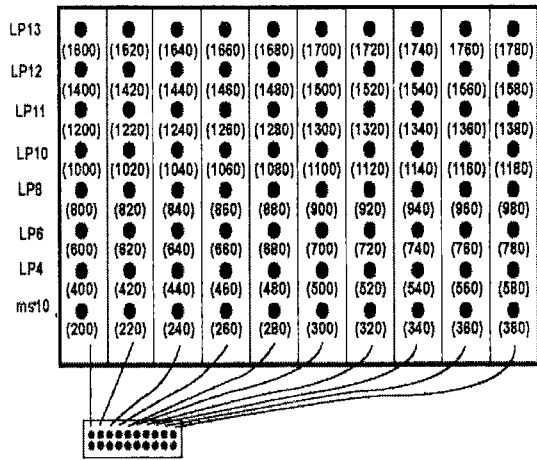


Fig. 4 8-row shot with the sequential blasting machine(80 holes)

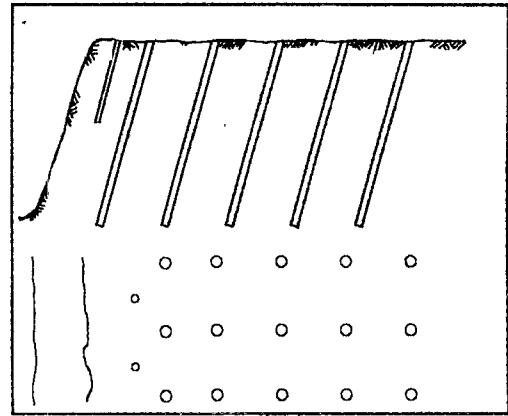


Fig. 6 A method of improving fragmentation in blasting using small benches

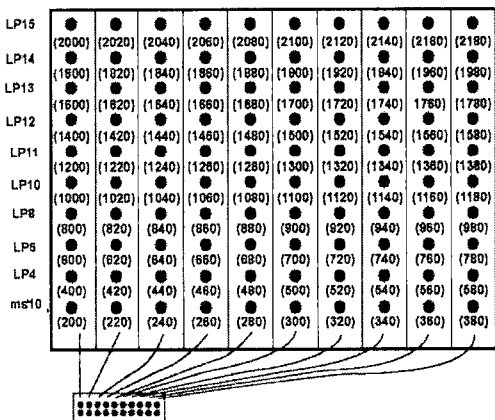


Fig. 5 10-row shot with the sequential blasting machine(100 holes)

Fig. 6은 Fig. 2의 응용패턴으로 bench 상부 대피발생을 줄이기 위해 공 사이에 무장약공을 천공하던 것을, 제 1열을 원래 천공장의 50~70% 천공을 해서 상부의 대피를 줄이고자 했다.

Fig. 7은 본 발파의 첫 열을 동일한 장약량으로 분리 장약하여 첫 열의 상부 전색장을 줄이고 상부 대피 발생을 감소시키려 하였다.

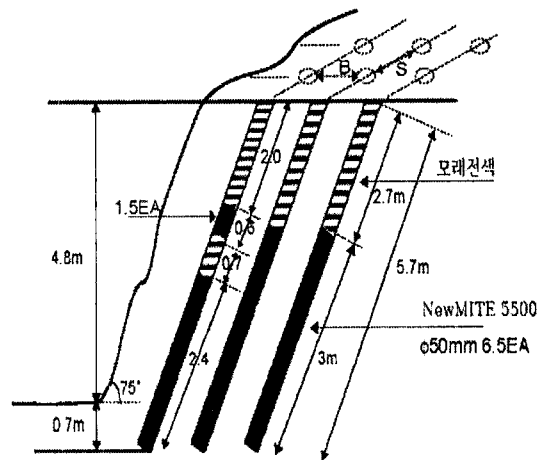


Fig. 7 A method of improving fragmentation in blasting using deck charges

#### 4. 실험 결과

다단식 발파기를 사용한 28회의 발파와 14회의 ms지발발파를 통해 파쇄석의 평균파쇄도와 상위 5개의 대피의 평균치를 측정하였다.

##### 4.1 평균파쇄도와 대피의 상관관계

Fig. 8은 파쇄암의 평균입자크기와 상위 5개의 대피평균치의 상관관계를 분석해 본 결과 상관계수  $R=0.8807$ 을 갖는 선형의 추세를 나타내었다.

$$L_5 = 1.59k_{50} + 0.127$$

Larsson(1974)는  $L \approx 2.6 k_{50}$ 로 유도하였다. 이로써 몇 회의 파쇄암의 입도분포를 통해 평균파쇄도가 구해지면, 이 값으로 대피의 발생 정도를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

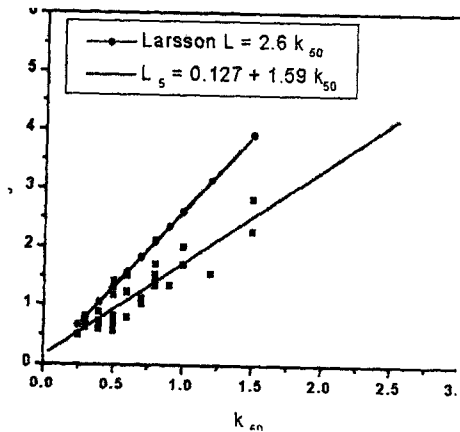


Fig. 8 Trend of boulder size for average boulder size( $k_{50}$ )

##### 4.2 사용화약에 대한 대피 및 평균파쇄율 분석

Fig. 9와 Fig. 10은 ANFO와 NewMITE를 사용했을 때의 평균파쇄암의 크기와 대피의 크기를 나타내었다.

평균파쇄도( $k_{50}$ )는 ANFO가 0.3-0.8 m, NewMITE가 0.3-1.7 m의 분포를 나타내었다. 대피의 분포도 ANFO가 0.5-2.4 m, NewMITE가 0.6-2.7 m로 저폭속 폭약인 ANFO가 NewMITE보다 좋은 결과를 나타내었다.

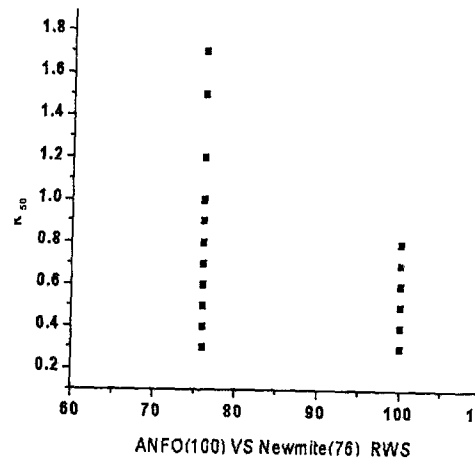


Fig. 9 Effect of strength of explosives on average fragment size( $k_{50}$ )

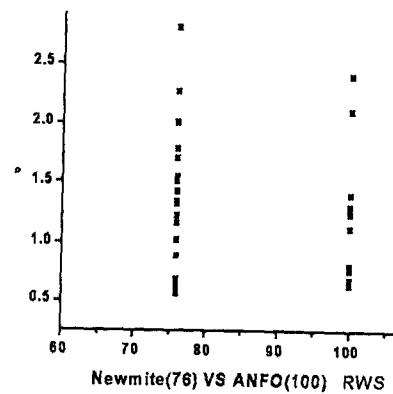


Fig. 10 Effect of strength of explosives on boulder size ( $L_5$ )



### 4.3 약포의 직경과 파쇄도 분석

Fig. 11과 Fig. 12는 천공경이 65 mm와 75 mm일 때, ANFO를 사용했을 때 파쇄도의 분포를 나타내고 있다. 65 mm 일 때 대피치는 0.6-1.4 m, 평균파쇄도는 0.3-0.7 m, 75 mm 일 때 대피치는 0.6-2.4 m, 평균파쇄도는 0.4-0.8 m 로 약포의 직경이 작은 경우가 파쇄도가 우수하게 나타났다.

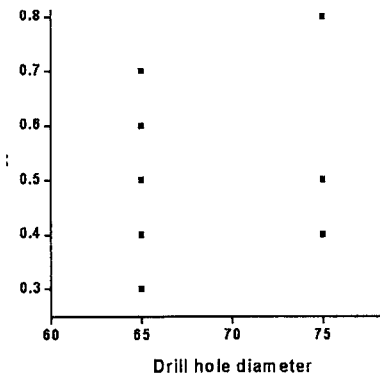


Fig. 11 Effect of hole diameter on average fragment size( $k_{50}$ )

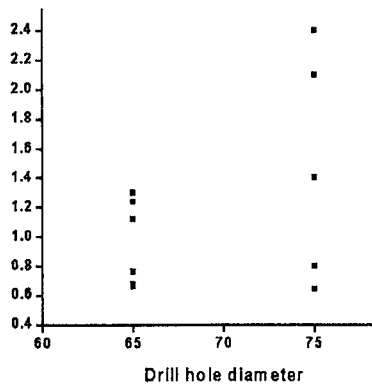


Fig. 12 Effect of hole diameter on boulder size( $L_5$ )

### 4.4 총 공수와 파쇄도 분석

Fig. 13은 ANFO만 사용한 경우 총 공수와 파쇄도를 살펴본 결과이다. 평균파쇄도와 대피의 크기는 대체적으로 총 공수가 증가하는데 따라 커지는 경향이있으며 평균파쇄도 보다는 대피의 크기가 증가의 폭이 컸다. 이는 공수가 증가할수록 대피발생 빈도가 높은 제 1열의 공수가 많아져 대피가 발생한 것으로 사료된다.

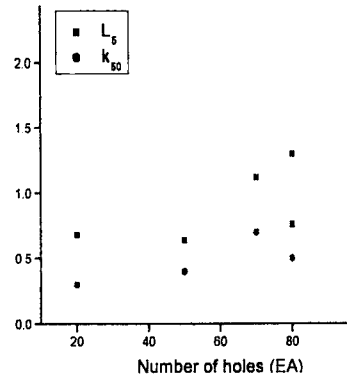


Fig. 13 Effect of number of hole on boulder size( $L_5$ )

### 4.5 천공패턴별 분석

Fig. 3, Fig. 6, Fig. 7에 의한 파쇄입도 분석 결과 1열 분산장약에 의한 경우가 가장 우수한 결과를 나타내었고, 1열 소단 벤치를 이용한 경우 평균파쇄도는 0.3 m로 좋은 결과를 나타냈으나 대피의 크기가 0.8 m로 좋은 결과를 나타내지 못했다.

이상의 고찰로부터 천공경은 대구경 발파시 75 mm보다는 65 mm를 사용하는 것이 천공속도와 파쇄도를 고려할 때 더 좋을 것으로 사료된다. 화약에 있어서 NewMITE와 같은 에멀전계 화약보다 ANFO가 파쇄도에 유리함을 알 수 있다. 천공 패턴도 제 1열 발파가 매우 중요한 만큼 분리 장약에 의한 첫열의 대피를 줄이

고 표준장약을 해줌으로 대피의 발생을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

Table 5. Comparison with a boulder size by blasting patterns

	$L_5$ (대피)	$k_{50}$ (평균파쇄도)
일반발파	0.755	0.5
1열 소단벤치	0.8	0.3
1열 분리장약	0.533	0.333

## 5. 결 론

본 연구의 대절토 구간에서 파쇄입도에 영향을 미치는 중요 변수들을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 노천발파에서 대피의 크기는 평균 파쇄입도의 크기와 선형적인 추이를 나타내었다. 대피의 크기는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_5 = 1.59 k_{50} + 0.127$$

2. ANFO와 NewMITE를 사용했을 때의 평균파쇄도는 ANFO가 0.3-0.8 m, NewMITE가 0.3-1.7 m의 분포였고 대피의 분포도 ANFO가 0.5-2.4 m, NewMITE가 0.6-2.7 m로 저폭속 폭약인 ANFO가 NewMITE 보다 좋은 결과를 나타내었다.

3. ANFO를 사용했을 때 파쇄도의 분포는 천공경 65 mm인 경우 대피치는 0.6-1.4 m, 평균파쇄도는 0.3-0.7 m, 75 mm인 경우 대피치는

0.6-2.4 m, 평균파쇄도는 0.4-0.8 m 로 약포의 직경이 작은 경우에 파쇄도가 우세하게 나타났다.

4. 총 공수와 파쇄도를 살펴본 결과 평균파쇄도와 대피의 크기는 대체적으로 총 공수가 증가하는데 따라 커지는 경향이었으며 평균파쇄도 보다는 대피의 크기가 증가의 폭이 컸다.

5. 첫째 열을 2단 분리 장약했을 때가 일반 발파나 1열 소단벤치발파 때보다 파쇄도가 좋았다.

## 참 고 문 헌

1. 임한욱 외, 1993, 암발파 설계 기법에 관한 연구, 한국토지개발공사, pp.511-517
2. Langefors, U., and Kihlstrom, B., 1963, The modern technique of rock blasting, John Wiley & Sons, Inc., New York, and Almqvist & Wiksell, Stockholm
3. 김용수, 정동호, 1994, Wide Space 발파의 효과적인 적용에 관한 연구, 한국자원공학 회지, Vol. 31, pp.103-108
4. Persson, P. A., Holmberg, R., and J. Lee, 1994, Rock blasting and explosives engineering, CRC Press, pp.249-256
5. 한공창, 선우춘, 류창하, 최병희, 김인균, 송원경, 김인기, 1997, 채석 및 석재가공 기술 연구(II), 한국 자원연구소, pp.6-13
6. Clark, G. B., 1987, Principles of rock fragmentation, A Wiley-interscience publication, pp.436-438
7. Faddeenkov, N. N., 1975, Application of

- the Rozin-Rammmler law to the analysis of the grain size composition of blasted rock, Institute of Mining, No. 1, Jan.-Feb.
8. Kuznetsov, V. M., 1973, The mean diameter of the fragments formed by blasting rock, Soviet Mining Sci. 9, pp.144-148
  9. Langefors, U., and Kihlstrom, B., 1978, "Rock blasting", (3rd Ed.), Wiley, New York
  10. Larsson, B., 1974, Blasting of low and high benches, fragmentation from production blasting, Swedish Rock Blasting Committee, Stockholm, Sweden, pp.247-271
  11. Olofsson, S. O., 1988, Applied explosives technology for construction and mining, pp.31