

터널발파에서 파쇄암의 입도예측에 관한 사례연구

A Case Study on the Prediction of Fragmentation of Blasted Rock in Tunnel Blasting



안명석*¹
Ahn, Myung-Seog



류창하*²
Ryu, Chang-Ha

김수석*³
Kim, Su-Seog

Abstract

The investigation of the fragmentation of blasted rocks is particularly important because it is a measure of the blast efficiency. The degree of fragmentation has a major effect on the efficiency of the loading and crushing operations. Getting such an information on the large pile of blasted rock is not an easy operation. This paper presents the results of case study to evaluate the performance of two types of tunnel blasting: V-cut and burn cut. The digital images of muckpiles were analyzed to produce size distribution and it was compared with those of predictive equations.

Keywords: Tunnel Blasting, Blasted Rock, Fragmentation, Size Distribution, Image Analysis, V-cut, Burn cut

요 지

발파한 후 파쇄된 암석의 파쇄도는 발파효율을 나타내는 척도의 하나로서 발파방법을 평가하는 주요 인자이다. 파쇄도는 적재 작업과 재활용을 위한 분쇄작업에 큰 영향을 미친다. 그러나 현장규모로 쌓여 있는 발파암 더미로부터 파쇄도를 조사한다는 것은 용이한 작업이 아니다. 본 논문에서는 현장 사례연구로서 터널발파에서 가장 중요한 요소인 심빼기방법 중 경사공을 이용한 V형 심빼기와 수평공 무장약공을 이용한 burn 심빼기 발파방법 중 파쇄도 측면에서 더 효율적인 방법을 선택하기 위하여 발파후 파

*¹ 정회원, 동서대학교 응용공학부 겸임교수

*² 정회원, 한국자원연구소 책임연구원

*³ 정회원, 동서대학교 건설공학부 교수, 공학박사

쇄된 암을 사진촬영하여 이미지 분석을 실시하고 몇가지 파쇄입도 예측식을 이용한 분석 결과와 비교하였다.

주요어: 터널발파, 발파암, 파쇄도, 입도 분포, 영상처리, V-심빼기, Burn 심빼기

1. 서론

도심지에서 지하철공사는 대부분의 경우 암반을 굴착하기 위한 방법으로 발파가 필수적으로 수반된다. 인접한 건물이나 주거민, 복공관 위를 달리고 있는 차량 등을 생각할 때 안전발파는 최우선적으로 고려되어야 한다. 이를 위하여 터널발파시 발생하는 충격진동과 소음을 최소화하기 위한 정밀발파 설계가 필요하며, 또한 안전성을 확보하면서 경제성을 향상시키기 위한 발파패턴을 도출하는 것이 주요 과제중 하나가 된다. 발파암의 파쇄도는 적재 및 운반작업에 영향을 미치며 재활용을 위한 분쇄작업에도 큰 영향을 미친다. 적재장비로 처리하지 못할 크기의 파쇄암이 발생하면 2차 파쇄가 필요하며 경비 증대는 물론 전 작업공정에도 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 파쇄도는 발파효율을 나타내는 척도의 하나로서 사용되며 발파방법을 평가하는 주요 인자이다. 그러나 현장규모로 쌓여 있는 발파암 더미로부터 파쇄도를 조사한다는 것은 용이한 작업이 아니다. 본 논문에서는 터널발파 방법으로서 경사공을 이용한 V형 심빼기와 수평공 무장약공을 이용한 burn 심빼기 발파방법(김재극, 1988)중 더 효율적인 방법을 선택하기 위하여 발파암의 사진을 촬영하여 이미지 분석을 실시하고 연구발표된 3가지 파쇄입도 예측식을 이용한 분석 결과와 비교하였다.

국내의 경우 해저 자원조사를 위해 해저면 사진을 이용하여 망간단괴의 부존 밀도를 보정하는 방법으로 망간단괴의 분포 특성과 단괴의 크기, 형태분포와 퇴적물에 묻힌 정도를 연구한 사례가 있고(박찬영, 1995; 박찬영, 1996), 노천 채광발파에서 파쇄도 분석을 실시한 사례가 있으나, 토목공사장에서 파쇄암의 크기를 정량적으로 계산하고 입도분포를 연구한 예는 거의 없는 실정이다.

2. 연구방법

터널발파에서의 파쇄암의 입도 예측에 관한 연구대상 지역은 대구지하철 2호선 공사현장으로서 터널 굴착공사를 위한 암반발파 현장이다. 총포도검화약류 등 단속법시행령 제 1장 제 2조 6항에 의한 제 1종 보안 물건인 시가지의 상가와 주택 등이 21~24 m 지점에 위치하므로 주변 건물에 진동·소음·비산먼지등 발파공해를 최소화하면서 최대한의 경제성 있는 파쇄도를 고려해야 한다. 대상 암질은 중생대 백악기의 경상누층군에 속하는 퇴적암류로서 하양층군 중의 반야월층으로 분류되고, 암회색 내지 흑색셰일 및 사암, 슬레이트가 기반암으로 분포하고 있으며, 본 대상 암체는 절리간격 20 ~ 70 cm, 일축압축강도 500~1,900 kg/cm² 정도의 보통암 내지 경암의 흑색셰일 암반을 대상으로하여 진동·소음·음압을 측정하여 분석 및 입도예측식 적용여부 검토, 암파쇄 상태 조사 분석 등의 실험을 실시하였다.

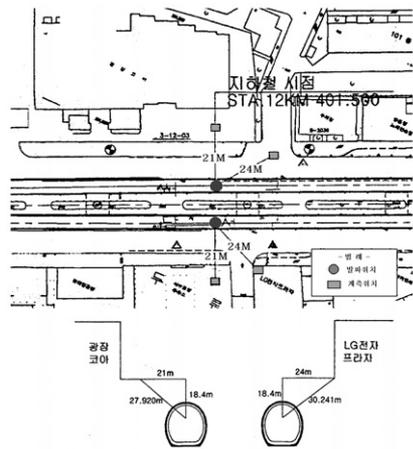


그림 1. 연구대상지역의 위치도

2.1 입도 크기 조사방법

2.1.1 육안 검사법

공사현장에서 일반적으로 사용하고 있는 방법으로서 육안 및 경험적으로 대략의 파쇄암의 크기와 양을 추정하여 운반하거나 브레이킹, 크랏샤 등 2차 파쇄의 공정에 적용하고 있으며, 향만 매립석 등 일정한 규격이 요구될 때는 샘플링하여 상세입도 검사를 한다.

2.1.2 채가름법

쇄석용 암괴를 요구할 시는 크랏샤의 용량에 적합한 규격이 요구되는 등 목적에 적합한 입도 평가를 위해 파쇄암의 채가름이 필요하다. 그러나 일반발파에서의 파쇄암은 대체로 직경과 중량이 매우 큰 편이므로 정량화가 매우 곤란하다.

2.1.3 이미지 분석법

발파 후 파쇄암의 모습을 사진 촬영하여 규격별 숫자와 크기를 컴퓨터에 의해 이미지 분석을 한다. 이 때 파쇄암의 그림자에 의한 부분은 검은 색으로 표기하여 분석에서 제외한다. 이 분석법은 숙련도에 따라 오차율을 많이 줄일 수 있으므로 평균 파쇄입도와 분포도를 정량적으로 쉽게 알 수 있는 장점이 있다.

2.1.4 사진 분석법

전후좌우 여러 각도로 파쇄암을 사진 촬영하여 파쇄암에 대한 이미지를 전자 펜에 의해 컴퓨터로 전송하여 분포도를 컴퓨터에 의해 자동 계산한다. 편리하고 과학적인 방법이지만 적용 예가 적고, 분석기술에 따라 오차율이 크므로 더 많은 사례연구와 분석 및 시스템 개발이 필요하다.

2.1.5 파쇄암 수 조사법

스케일에 의해 기준치 이상의 파쇄암만을 조사하는 간

편하고 널리 사용되는 방법으로서 간단히 전석의 수와 평균입도율을 조사하는 방법이며, 현장에서 개략적인 조사·평가방법에 속한다.

2.2 입도예측식

2.2.1 Kuznetsov의 파쇄암의 평균입자 크기에 관한 연구식

$$S_{av} = C \cdot (V/Q)^{0.8} Q^{0.167} \quad (1)$$

여기서, S_{av} : 평균입자크기 (cm)

C: 암석계수

(연암 10, 보통암 30, 경암 50~80)

V: 발파공 당 파괴암석의 체적 (m^3)

Q: 발파공 당 TNT의 양 (Kg)

2.2.2 Cunningham의 파쇄암의 평균입자 크기에 관한 변형식

Cunningham은 TNT외에 다른 폭약을 사용할 경우 평균입자 크기추정에 대해 Kuznetsov식을 변형한 식 (2)를 제안하였다.

$$S_{av} = C \cdot (V/Q)^{0.8} Q^{0.167} (E/115)^{-0.63} \quad (2)$$

여기서, E: 실제 사용폭약의 강도 (ANFO 100)

2.2.3 Lundborg & Lasson의 파쇄암의 입도 예측식

$$\begin{aligned} K_{50} &= S \times (1 + 4.67 \times (h/H)^{2.5}) \\ &\times \exp(0.29 \times \ln(V^2/E/V/1.25)) \\ &- 1.18 \times \ln(q/C) - 0.82 \end{aligned} \quad (3)$$

- 여기서, S : 발파상수
 (보통 0.5, 균질한 암석 0.4, 강한 암석 0.6)
 h : 전색길이 (m)
 H : 공길이 (m)
 V : 저항선 (m)
 E : 공간격 (m)
 q : 비장약량 (kg/m³)
 C : 암석계수 (kg/m³)

3. 시험발파 및 결과

시험발파시 천공은 비트직경 38 mm의 착암기로 실시하였고, 천공장은 1.3 m로 동일하게 하고, 천공수 및 심빼기 방법을 달리할 때 생산된 파쇄암의 크기와 진동·소음·음압의 크기를 조사하였다.

3.1 시험발파 방법

연구대상 터널발파의 패턴은 터널 크기 가로 6.272m, 높이 6.872m의 마제형 전단면중 상부 3.685m의 반단면을 대상으로 하였다. 그림 2는 터널 전단면의 형상으로서

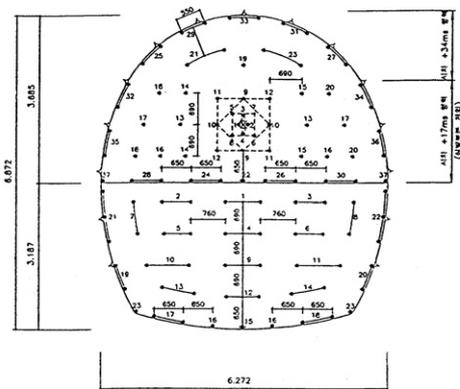


그림 2. 터널형상 및 발파패턴

상부 패턴은 burn-cut 심빼기법으로 설계되어 있다.

시험발파 제원은 표 1과 같다. 먼저 장약및 패턴상태를 확인한 후 burn-cut 심빼기 방법을 이용한 총 64공을 1차 발파하면서 21~24 m 떨어진 보안물건에서 진동·소음·음압을 측정하였으며, 2차 발파는 V-cut 심빼기 방법을 이용한 총 84공의 발파에 대해 21~24 m 떨어진 보안물건에서 진동·소음·음압을 측정하였다. 그리고 터널내부를 충분히 환기시킨 후 파쇄된 대상 암더미에 대해 여러 각도로 사진촬영을 하였으며, 실제 파쇄암에 대해서도 육안조사와 실측을 하였으며, 인화 후 파쇄암의 규격별 숫자와 크기 등을 이미지 분석법으로 분석하고 파쇄입도 예측식을 이용하여 계산한 예측입도와 비교 분석하였다.

표 1. 시험발파의 제원

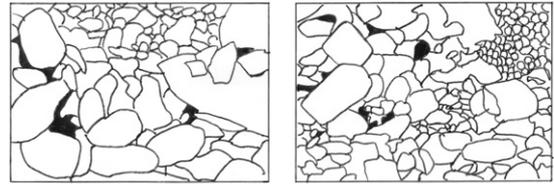
패턴구분 발파제원	1차 발파 (Burn-cut)	2차 발파 (V-cut)
천공경	38 mm	38 mm
천공장	1.3 m	1.3 m
전색장	0.556 m	0.550 m
저항선, 간격	0.6~0.7 m	0.6~0.7 m
공당장약량	0.325~0.4125 kg	0.25~0.5 kg
지발당장약량	0.375~0.825 kg	0.25~0.5 kg
1회발파공수	64공 (+ 무장약공 2공)	84공
사용폭약	에멀존, 정밀폭약	에멀존, 정밀폭약
사용뇌관	MSD, DSD	MSD, DSD
총화약량	23.725 kg	34.10 kg
비장약량	0.67 kg/m ³	0.72 kg/m ³

3.2 진동·소음·음압 측정 결과

발파현장으로부터 직선거리로 21~24 m 떨어진 주유소, 상가, 아파트 등에서 측정된 결과치는 표 2와 같으며, 측정된 진동자료를 회귀 분석한 결과는 $V=82.0(SD)^{-1.067}$ 이었다.

표 2. 진동·소음·음압측정 결과

측정 회수	측정위치	거리	진동치	발파음	측정기기명
1차 발파	서부중앙 주유소	21 m	0.17 cm/s	69.0 dB(A)	Instantel DS-677
	서부중앙 주유소	21 m	0.17 cm/s	97.7 dB(L)	Thomas VMS-200s
	LG전자 프라자	24 m	0.16 cm/s	101.2 dB(L)	Thomas VMS-100s
2차 발파	광장 수영장	21 m	0.156 cm/s	66.8 dB(A)	Instantel DS-677
	광장 수영장	21 m	신호불일치로 미측정		Thomas VMS-200s
	광장타운 입구	24 m	0.09 cm/s	98.5 dB(L)	Thomas VMS-100s



a) 1차 발파 (Burn-cut) b) 2차 발파 (V-cut)

그림 3. 파쇄암의 이미지 분석 결과

1차 발파암의 경우 5 cm 이하의 입도는 총 96개중 46 개로서 47.92%를 차지하였고, 5~10 cm의 입도는 30개 로서 31.25%를 차지하였고, 10~15 cm의 입도는 10개로 서 10.42%이었고, 15~20 cm의 입도는 9개로서 9.38% 를 차지하여 98.97%가 20 cm 이하의 입도에 해당하였으 며 평균입도는 6.0 cm이었다.

2차 발파암의 경우 총 200개 중 136개가 5cm 이하의 입도로서 68%를 차지하였고, 5~10 cm 입도는 53개로 서 27%이었다. 95%가 10 cm 이하의 입도에 해당하여 파 쇄암의 소할 상태가 매우 균일, 양호하였으며 평균입도는 4.2 cm이었다.

입도 예측식에 의한 계산결과는 표 4와 같고, 예측치와 실측치의 비교표는 표 5와 같다.

3.3 파쇄암의 입도 예측치와 실측결과

발파 파쇄암의 평균입도 크기는 전기한 입도예측 이론 식 (1), (2), (3)을 적용하여 계산한 결과 (1), (2)식은 실측 치에 비해 예측치가 약 10배 이상 크므로 국내에 적용하 기 위해서는 보정치에 대한 연구가 시급한 것으로 판단되 었고, (3)식은 예측치 기준 실측치에 대한 오차율이 +20 ~ -12.5%였다.

이미지 분석 그림은 그림 3과 같으며 파쇄 크기별 개수 및 면적은 표 3과 같다.

표 3. 파쇄암 크기별 개수 및 면적

입도구분		1차 발파암				2차 발파암			
입도	입도구분	구분간격별	구분간격별	구분간격별	구분간격별	구분간격별	구분간격별	구분간격별	구분간격별
No.	(cm)	갯수	%	면적	%	갯수	%	면적	%
1	0~5	46	47.92	490	14	136	68	525	15
2	5~10	30	31.25	1015	29	53	27	1645	47
3	10~15	10	10.42	665	19	8	4	805	23
4	15~20	9	9.38	700	20	3	2	525	15
5	20~25	0	0.00	0	0	0	0	0	0
6	25~30	1	1.04	630	18	0	0	0	0
합계		96	100	3500	100	200	100	3500	100

표 4. 입도예측식에 의한 계산 결과

제 안 식	1차 발파암	2차 발파암
(1) Kuznetsov 식	58.07 cm	58.07 cm
(2) Kuznetsov & Cunningham 식	61.50 cm	61.50 cm
(3) Lundborg & Lasson 식	5.00 cm	4.80 cm

표 5. L&L의 파쇄암 예측치와 이미지분석 실측치

	발 파 공 법 (심빼기)	
	Burn-cut	V-cut
예측파쇄크기(cm)	5.00	4.80
실측파쇄크기(cm)	6.00	4.20
오 차 율	+20 %	-12.5 %

4. 결과 고찰

4.1 진동 · 소음 · 음압 측정치의 분석결과

1차 burn-cut 심폐기 발파패턴의 경우 발파지점에서부터 21 m 떨어진 주유소 앞에서 측정된 진동치는 0.17 cm/sec로서 진동안전기준치 0.5 cm/sec 대비 34%이었으며, 소음치는 69.0 dB(A)로서 소음기준치 80 dB(A) 대비 86.25%이었고, 음압치는 97.7 dB(L)로서 음압기준치 120 dB(L) 대비 81.42%이었다. 이 때 동일한 지점에서 측정된 소음과 음압의 비는 69.0/97.7로서 1/1.416이었고, 주주파수 27~64 Hz 범위에서 음압이 소음보다 28.7 dB이 높아 이론 비교치에 근접했다. 또한 24 m 떨어진 전자프라자 상가 앞에서 진동은 0.16 cm/sec로서 진동안전기준치 대비 32%이었고, 음압은 101.2 dB(L)로서 음압기준치 대비 84.33%이었으므로 주변 구조물에 균열발생 등 물리적인 피해는 없는 것으로 판단되었다.

2차 V-cut 심폐기 발파 패턴의 경우 발파지점으로부터 21 m 떨어진 수영장 앞에서 측정된 진동치는 0.156 cm/sec로서 진동안전 기준치 대비 31.2%이었으며 소음치는 66.8 dB(A)로서 소음기준치 80 dB(A) 대비 83.5%이었고, 24 m 떨어진 광장타운 앞에서 측정된 진동치는 0.09 cm/sec로서 진동기준치 대비 18%이었으며, 음압치는 98.5 dB(L)로서 음압기준치 대비 82.08%이었다.

그러므로 burn-cut 심폐기 발파법에 비해 진동치는 대체로 2.8~14%가 감소하였고, 소음치는 2.75%가 감소하였으며, 음압치는 2.25%가 감소하였으므로 주변 구조물에 균열 발생 등 물리적인 피해는 burn-cut 심폐기 방법보다 V-Cut 심폐기 방법이 진동 · 소음 · 음압이 더 적은 것으로 판명되었다.

진동 측정 결과는 DS550 프로그램으로 회귀 분석한 결과 $V=82.0(SD)-1.067$ 이었다. 이 때 예측식의 적합도를 나타내는 결정계수(coefficient of determination)는 0.671이었으며 계측자료수의 제한으로 인해 적합도는 높

지 않은 편이었다.(안명석, 2000; Konya & Walter, 1990; Ryu & Sunwoo, 1999)

4.2 파쇄암의 입도 크기 예측치와 실측결과 비교 분석

L&L의 파쇄암의 입도 예측식에 의한 계산결과와 실측 결과를 비교 분석하면 1차 burn-cut 심폐기 발파패턴의 경우 예측 파쇄암의 입도 크기는 5.0 cm이었으며, 실측 파쇄암의 평균 입도 크기는 6.0 cm로서 예측치 기준 오차율은 +20%이었다.

2차 V-cut 심폐기 발파패턴의 경우 예측 파쇄암의 입도 크기는 4.8 cm이었으며 실측 파쇄암의 평균 입도 크기는 4.2 cm로서 예측치 기준 오차율은 -12.5%이었다.

5. 결론

본 논문에서는 사례연구로서 지하철 공사장에서 인근 건물에 대한 안전도와 경제성 · 환경성을 향상시키기 위해 터널발파방법 중 대표적인 심폐기 방법인 평형공 무장 약공을 이용한 burn-cut 심폐기와 경사공을 이용한 V-cut 심폐기 두 가지 방법을 적용하여 시험발파를 실시하고 진동 및 소음을 계측하였으며 파쇄암의 입도분포를 예측식과 실측 자료로부터 비교 검토하여 평가하였다. 주요 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- 1) 시험대상 지역은 대구지역의 전형적인 퇴적암층 비교적 강도가 강한 암회색 내지 흑색 셰일, 슬레이트 질 암반으로서 시험발파한 결과 21~24 m 떨어진 건물에서 측정된 진동치는 0.09~0.17 cm/sec로서 진동기준치 0.5 cm/sec 대비 18~34%이었고, 소음치는 66.8~69.0 dB(A)로서 소음기준치 80 dB(A) 대비 83.5~86.25%이었으며, 음압치는 97.7~101.2

dB(L)로서 음압기준치 120 dB(L) 대비 81.42~84.33%로서 인근 건물에 균열발생 등의 피해는 없는 수준이었다.

- 2) 파쇄암의 입도 크기 예측방법으로 제안된 3가지 식 중에서 Lundborg & Lasson의 예측식을 적용하였을 때 burn-cut 심빼기 발파방법의 경우 20 cm 이하의 파쇄암이 98.97%이었고, 예측 입도 평균 크기는 5.0 cm이었으나 실측 입도 평균크기는 6.0 cm로서 예측치 기준 오차율은 +20%이었다. 또한 V-cut 심빼기 발파법의 경우 10 cm 이하의 파쇄암이 95%이었으며, 예측 입도 평균크기는 4.8 cm이었으나 실측 입도 평균크기는 4.2 cm로서 예측치 기준 오차율은 -12.5%이었다.
- 3) 본 시험발파에 사용된 두 가지의 심빼기 발파패턴은 최적화 되었다고 보기는 어렵고 또한 그 결과는 현장조건에 따라 달라질 수 있으므로 일반적인 결론을 도출할 수는 없으나 당 현장의 제한된 조건 하에서 시험한 결과 두 가지 패턴중 V-cut의 경우가 진동, 소음, 음압의 규제치를 만족하면서 더 나은 경제성을 보이는 것으로 나타났다.
- 4) 도심지 터널 발파에서 안전성은 매우 중요한 요소로서 시공중 진동·소음·음압의 철저한 계측관리를 통하여 시험발파시 평가한 자료의 타당성을 검증하고 필요시 수정 보완을 하여 대처방안을 강구할 필요가 있으며, 또한 경제성과 관련된 파쇄암의 입도 크기 예측기술을 고도화하기 위하여 계측기술의 향상과 다양한 현장의 많은 계측자료로부터 국내에 적합한 보정치를 도출하기 위한 노력이 지속되어야 할 것이다.

참고 문헌

- 1) 김재극 (1988), "산업화약과 발파공학", 서울대학교 출판부, pp. 300~302
- 2) 박찬영 (1995), "한국심해연구지역 망간단괴광상의 매장량 평가를 위한 지구 통계학적연구", 서울대학교 박사학위논문, pp. 130
- 3) 박찬영, 전호택, 강정극 (1996), "영상처리 기법에 의한 심해저 망간단괴의 부존밀도 보정", 한국자원공학회지, Vol. 29, No. 4, pp. 429~437
- 4) 김일중, 기경철 (1998), "산학인을 위한 발파공학", 기공사, pp. 97~99
- 5) 안명석 (2000), "건설현장에서 안전성 향상을 위한 지반진동 소음 비산먼지 측정자료의 분석에 관한연구", 동아대학교 박사학위논문, pp. 118~120
- 6) Holmberg, R. (1997), "Rock Damage", Dyno Nobel, pp. 120~125
- 7) Konya, C. J. and Walter, E. J. (1990), "Surface Blast Design", Prentice Hall, pp. 240~281
- 8) Nitro Consult AB (1997), "Cautious Blasting in Density Built-up Areas", Dyno Nobel, pp. 45~55
- 9) Ryu, C. and Sunwoo, C. (1999), "Case Study of Blast Design in Jointed Rock Mass", 99 Japan-Korea Rock Mechanics Sym., Fukuoka, Japan, pp. 419-428.
- 10) U.S Department of Transportation, (1991) "Rock Blasting and Overbreak Control", pp. 55~77