

터널발파에서 파쇄암의 입도예측에 관한 연구

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

안 명석¹⁾, 류 창하²⁾, 김 수석³⁾

Myung-Seog Ahn, Chang-Ha Ryu, Su-Seog Kim,

¹⁾동서대학교 응용공학부, ²⁾한국지질자원연구원, ³⁾동서대학교 건설공학부

초 록

발파한 후 파쇄된 암석의 파쇄도는 발파효율을 나타내는 척도의 하나로서 발파방법을 평가하는 주요 인자이다. 파쇄도는 적재작업과 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 심빼기 방법 중 경사공을 이용한 V형 심빼기와 수평공 무장약공을 이용한 Burn 심빼기 발파방법중 파쇄도 측면에서 더 효율적인 방법을 선택하기 위하여 발파후 파쇄된 암을 사진 촬영하여 이미지 분석을 실시하고 몇 가지 파쇄입도 예측식을 이용한 분석 결과와 비교하였다.

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

1. 서 론

도심지에서 지하철공사는 대부분의 경우 발파가 필수적이다. 인접한 건물이나 복공판 위를 달리고 있는 차량을 생각할 때 안전발파가 최우선일 것이다. 터널발파 시에는 충격진동과 소음·음압을 최소화하여 인근 건물에 피해를 줄이기 위해, 또한 파쇄암의 입도를 줄여 2차 파쇄를 줄이기 위해 정밀설계를 해야하고, 파쇄후의 운반용이 및 2차 파쇄에 따른 경제성·환경성·안전성을 고려해야 한다. 현재 국내에서는 대부분 경험적·육안검사에 의존하고 있는 터널발파에서의 파쇄암의 입도예측에 관한 연

구 실험을 대구지하철 공사현장을 대상으로 하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법

연구대상지역은 대구지하철 2호선 터널 굴착 공사를 위한 암반발파현장으로서 총포도검화약 류등 단속법시행령 제 1장 제 2조 6항에 의한 제 1종 보안 물건인 시가지의 상가와 주택 등이 21~24m 지점에 위치하므로 주변 건물에 진동·소음·비산먼지 등 발파공해를 최소화 하

면서 최대한의 경제성 있는 파쇄도를 고려해야 한다. 대상암질은 중생대 백악기의 경상누층군에 속하는 퇴적암류로서 하양층군 중의 반야월층으로 분류되고, 암회색 내지 흑색셰일 및 사암, 슬레이트가 기반암으로 분포하고 있으며, 본 대상암체는 절리간격 20~70cm, 일축압축강도 500~1,900 Kg/cm² 정도의 보통암내지 경암의 흑색셰일 암반을 대상으로 진동·소음·음압측정 분석 및 입도예측식 검토, 암파쇄 상태 조사분석 등의 실험을 실시하였다.

가. 기초이론 (입도예측 이론식)

국내의 경우 해저자원조사를 위해 해저면 사진을 이용하여 망간단괴의 부존 밀도를 보정하는 방법으로 망간단괴의 분포 특성과 단괴의 크기·형태 분포와 퇴적물에 묻힌 정도를 연구한 사례는 있으나, 토목공사장에서 파쇄암의 크기를 정량적으로 평가하고 입도 분포를 연구한 예는 거의 없는 실정이다. 다만 최근 발행된 발파공학 교재에서 Kuznetsov(1973)는 TNT의 양과 지질구조와의 관계에서 파쇄입자의 평균 크기에 대해 제안 연구식이 소개되어 있으나 현장적용 사례는 별로 보이지 않는다.

(1) Kuznetsov의 파쇄암의 평균입자 크기에 관한 연구식

$$Sav = C \cdot (V/Q)^{0.8} Q^{0.167} \text{ ----- (1)}$$

여기서, Sav : 평균입자크기 (cm)

C : 암석계수

(연암 10, 보통암 30, 경암 50~80)

V : 발파공당 파괴암석의 체적 (m³)

Q : 발파공당 TNT의 양 (Kg)

(2) Cunningham의 파쇄암의 평균입자 크기에 관한 변형식

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

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

여기서, E : 실제 사용폭약의 강도 (ANFO 100)

(3) Lundborg & Lasson의 파쇄암의 입도 예측식

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

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)

나. 입도 크기 조사방법

(1) 육안 검사법

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

(2) 채가름법

쇄석용 암괴를 요구 할 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.

(3) 이미지 분석법

발파후 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.

(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 적용예가 적고, 분석기술에 따라 오차율이 크므로 더 많은 사례연구와 분석 및 시스템 개발이 필요하다.

(5) 파쇄암수 조사법

스케일에 의해 기준치 이상의 파쇄암만을 조사하는 간편하고 널리 사용되는 방법으로서 간단히 전석의 수와 평균 입도율을 조사하는 방법이며, 현장에서 개략적인 조사·평가방법에 속한다.

3. 실험결과

연구대상지역은 도심지의 지하철 발파 현장

으로서 빗트 직경 Ø38mm의 착암기로 천공장은 1.3m로 동일하게 하고, 천공수 및 심빼기 방법을 달리할 때 생산된 파쇄암의 크기와 진동·소음·음압의 크기를 조사하였다.

가. 시험발파 방법

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

시험발파 제원은 Table 1과 같다. 먼저 장약 및 패턴상태를 확인한 후 Burn-cut 심빼기 64공을 1차 발파하면서 21~24m 떨어진 보안물건에서 진동·소음·음압을 측정하였으며, 잠시후 2차 발파는 V-cut 심빼기 84공을 21~24m 떨어진 보안물건에서 진동·소음·음압을 측정하였다. 그리고 터널내부를 충분히 환기시킨 후 파쇄된 대상 발파지역에 대해 사진촬영 및 육안검사를 하였으며, 사진인화 후에 파쇄암의 규격별 숫자와 크기 등을 이미지 분석법으로 분석하여 전기한 식에 의한 파쇄입도 예측식의 예측입도와 비교 분석하였다.

Table 1. 시험발파의 제원

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

REGRESSION LINE FOR WOODSH.BDF

5th LINE EQUATION: $V = 82.0002 * (SD)^{-1.057}$
 COEFFICIENT OF DETERMINATION = 0.671 STANDARD DEVIATION = 0.053

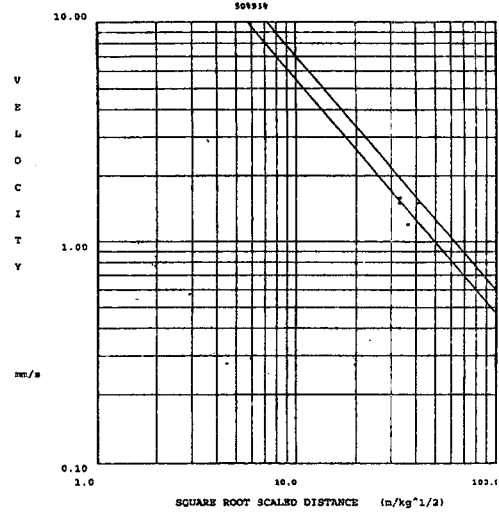


Fig. 1 진동측정치의 회귀분석결과

나. 진동·소음·음압 측정 결과

발파현장으로부터 직선거리로 21~24m 떨어진 주유소, 상가, 아파트 등에서 측정된 결과치는 Table 2와 같으며, 측정된 진동수치를 회귀 분석한 결과는 Fig 1과 같다.

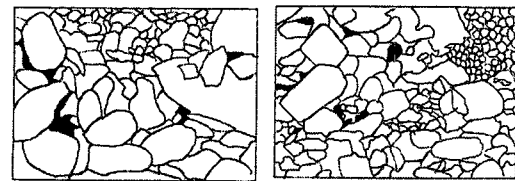
Table 2. 진동·소음·음압측정 결과

측정 회수	측정위치	거리	진동치	발파음	측정기기 명
1차 발파	서부중앙주유소	21m	0.17Kine	69.0dB(A)	InstanTel DS-677
	서부중앙주유소	21m	0.17Kine	97.7dB	Thomas VMS-200s
	LG전자프라자	24m	0.16Kine	101.2dB	Thomas VMS-100s
2차 발파	광장수영장	21m	0.156Kine	66.8dB(A)	InstanTel DS-677
	광장수영장	21m	신호불일치로 측정안됨		Thomas VMS-200s
	광장타운입구	24m	0.09Kine	98.5dB	Thomas VMS-100s

다. 파쇄암의 입도 예측치와 실측결과

발파 파쇄암의 평균입도 크기는 전기한 입도 예측 이론식(1)(2)(3)을 적용하여 계산한 결과 (1)(2)식은 실측치에 비해 예측치가 약 10배 이상 크므로 국내에 적용하기 위해서는 보정치에 대한 연구가 시급한 것으로 판명되었고, (3)식은 예측치 기준 실측치에 대한 오차율이 +20 ~ -12.5%로서 ±16.25%임을 알 수 있었다.

이미지 분석 그림은 Fig. 2와 같으며 파쇄 크기별 개수 및 면적은 Table 3과 같다.



a) 1차 발파 (Burn-cut) b) 2차 발파 (V-cut)

Fig. 2 파쇄암의 이미지 분석 결과

Table 3. 파쇄암 크기별 개수 및 면적

입도 No.	입도구분 (mm)	1차 발파암		2차 발파암					
		구분간격별 개수	구분간격별 면적	구분간격별 개수	구분간격별 면적				
1	0~5	46	47.92	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
합 계		96	100	3500	100	200	100	3500	100

1차 파쇄암의 경우 5cm 이하의 입도는 총 96개중 46개로서 47.92%를 차지하였고, 5~10cm의 입도는 30개로서 31.25%를 차지하였고, 10~15cm의 입도는 10개로서 10.42%이었고, 15~20cm의 입도는 9개로서 9.38%를 차지하여 98.97%가 20cm 이하의 입도에 해당하였으며 평균입도는 6.0cm이었다. 2차 파쇄암의 경우 총 200개 중 136개가 5cm이하의 압도로서 68%를 차지하였고, 5~10cm 입도는 53개로서 27%이었다. 즉 95%가 10cm이하의 입도에 해당하여 파쇄암의 소할 상태가 매우 균일·양호하였으며 평균입도는 4.2cm이었다.

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

Table 4. 입도예측식에 의한 계산 결과

제안식	1차 발파압	2차 발파압
(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

Table 5. L&L의 파쇄암 예측치와 이미지분석 실측치

발파제원	발 파 공 법 (심빼기)	
	Burn - cut	V - cut
천 공 경(mm)	Ø 38	Ø 38
천 공 장(m)	1.3	1.3
전 색 장(m)	0.556	0.550
최소저항선(m)	0.70	0.60
공간간격(m)	0.70	0.60
공당장약량(Kg)	0.37	0.40
총발파공수(공)	64	84
비장약량(Kg/m ³)	0.67	0.72
예측파쇄크기(cm)	5.00	4.80
실측파쇄크기(cm)	6.00	4.20
오 차 율	+ 20 %	- 12.5 %

4. 결과 고찰

가. 진동·소음·음압 측정치의 분석결과

- 1차 Burn-cut 심빼기발파 패턴의 경우 발파지점으로부터 21m 떨어진 주유소 앞에서 측정된 진동치는 0.17Kine으로서 진동안전기준치 0.5Kine 대비 34%이었으며, 소음치는 69.0 dB(A)로서 소음기준치 80 dB(A) 대비 86.25%이었고, 음압치는 97.7dB로서 음압기준치 120dB 대비 81.42%이었다. 이 때 동일한 지점에서 측정된 소음과 음압의 비는 69.0/97.7로서 1/1.416이었고, 주파수 27~64Hz 범위에서 음압이 소음보다 28.7dB이 높아 이론 비교치에 근접했다. 또한 24m 떨어진 전자플라자 상가 앞에서 진동은 0.16Kine으로서 진동안전기준치 대비 32%이었고, 음압은 101.2dB로서 음압기준치 대비 84.33%이었으므로 주변 구조물에 균열 발생 등 물리적인 피해는 없는 것으로 판단되었다.

- 2차 V-cut 심빼기발파 패턴의 경우 발파지점으로부터 21m 떨어진 수영장 앞에서 측정된 진동치는 0.156Kine으로서 진동안전 기준치 대비 31.2%이었으며 소음치는 66.8dB(A)로서 소음기준치 대비 83.5%이었고, 24m 떨어진 광장 타운 앞에서 측정된 진동치는 0.09Kine으로서 진동기준치대비 18%이었으며, 음압치는 98.5 dB로서 음압기준치 대비 82.08%이었다. 그러므로 Burn-cut 심빼기 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 심빼기 방법보다 더 적은 것으로 판명되었다.

- 진동측정 결과는 DS550 프로그램으로 회귀 분석한 결과 Fig.1에서와 같이 $V=82.0(SD)^{1.067}$ 이었다. 이 때 결정계수(Coefficient of Determination)는 0.671로서 충분한 신뢰수준에 이르지 못하였다.

나. 파쇄암의 입도 크기 예측치와 실측결과 비교분석

- L&L의 파쇄암의 입도 예측식에 의한 계산 결과와 실측결과를 비교 분석하면 1차 Burn-cut 심빼기 발파패턴의 경우 예측파쇄암의 입도 크기는 5.0cm이었으며, 실측파쇄암의 평균 입도 크기는 6.0cm로서 예측치 기준 오차율은 +20%이었다.

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

5. 결 론

지하철 공사장에서 터널발파 중 Burn-cut 심빼기와 V-cut 심빼기를 비교하여 인근건물에 대한 안전도와 경제성·환경성을 향상시키기 위한 파쇄암의 입도 예측 및 실측에 관한 연구 실험 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

1) 대구지역의 전형적인 퇴적암층 비교적 강도가 강한 암회색 내지 흑색셰일·슬레이트질 암반에서 시험 발파한 결과 21~24m 떨어진 건물에서 측정된 진동치는 0.09~0.17Kine으로서 진동기준치 0.5Kine 대비 18~34%이었고, 소음치는 66.8~69.0 dB(A)로서 소음기준치 80 dB(A)대비 83.5~86.25%이었으며, 음압치는 97.7~101.2dB로서 음압기준치 120dB대비 81.42~84.33%로서 인근 건물에 균열발생 등의 피해는 없었다. 이때 진동측정결과를 회귀 분석한 결과는 $V=82.0(SD)^{-1.067}$ 이었다.

2) 파쇄암의 입도 크기 예측식 3가지중 Lundborg & Lasson의 예측식을 적용하였을 때 Burn-cut심빼기 발파법의 경우 20cm이하의 파쇄암이 98.97%이었고, 예측 입도 평균 크기는 5.0cm이었으나 실측 입도 평균크기는 6.0cm로

서 예측치 기준 오차율은 +20%이었다. 또한 V-cut 심빼기 발파법의 경우 10cm 이하의 파쇄암이 95%이었으며, 예측 입도 평균크기는 4.8cm이었으나 실측 입도 평균 크기는 4.2cm로서 예측치 기준 오차율은 -12.5%이었다.

3) 도심지 터널 발파에서 안전성과 경제성·환경보전성을 향상시키기 위해서는 필히 진동·소음·음압의 측정관리가 있어야 할 것이며, 파쇄암의 입도 크기 예측기술과 실측기술에 대한 연구가 긴요하며, 현장적용 실험이 더욱 다양해야 할 것이고 국내에 적합한 보정치에 대한 연구가 더욱 활성화되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 박찬영·전효택·강정극, 1996, "영상처리 기법에 의한 심해저 망간단괴의 부존밀도 보정", 한국자원공학회지 Vol. 29, No.4, pp. 429~437
2. 박찬영, 1995, 한국심해연구지역 망간단괴광상의 매장량 평가를 위한 지구 통계학적연구, 서울대학교 박사학위논문
3. 김재극, 1988, "산업화약과 발파공학" 서울대학교 출판부.
4. 김일중·기경철, 1998, "산학인을 위한 발파공학", 기공사
5. 안명석, 2000, "건설현장에서 안전성 향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에 관한연구", 동아대학교 박사학위논문
6. Calvin J. Konya and Edward J. Walter(1990), "Surface Blast Design", by prentice-Hall. Inc. pp. 240~281
7. U.S Department of Transportation, "Rock Blasting and Overbreak Control", 1991
8. Roger Holmberg, 1997, "Rock Damage", Dyno Nobel
9. Nitro Consult AB, 1997, Cautious Blasting in Density Built-up Areas, Dyno Nobel