

발파에 의한 화강암반의 손상 평가

Evaluating Blasting Induced Damages of Granite

목영진¹⁾ 임수빈²⁾ 남천우³⁾ 이중재⁴⁾
Mok, Young Jin Im, Soo Bin Nam, Chon Woo Lee Joog Jae

ABSTRACT

Blasting induced damage boundary was determined by measuring vibrations adjacent to charging holes. The criterion adopted to define damages is that blasting-induced strains exceeding tension-crack strain level cause damages. The blasting vibrations were measured in terms of acceleration and converted to strains. The tension-crack strain level was determined with tensile strengths and elastic moduli of rock cores. The damage zone was found to be extended radially about 1meter from the blasthole detonated with 250 to 700 grams of explosives. The comparison of shear wave velocity profiles before and after blasting shows that the damage boundary of 1 meter seems to be reliable.

1. 서론

터널 설계와 시공은 원 지반의 지지력을 활용하여 수행하고 있다. 따라서 터널의 성공적 건설은 굴착 단면에 인접한 주변 암반의 지지력 평가가 선행되어야 한다. 대부분 터널은 천공과 발파 공법(drilling and blasting)으로 굴착하고 있다. 이 때, 굴착 이완에 의한 정(靜)적인 요인과 발파 충격에 의한 동(動)적인 손상으로 굴착단면 외곽 암반의 지지력이 저하하고 있다. 이 저감된 지지력을 감안하여 지보 설계를 하여야 터널의 안정성을 확보할 수 있다. 현재, 이완에 의한 정적인 지지력 저하는 터널 단면 해석에 적용되어 지보재와 주변암반의 응력과 변형을 예측하고, 품질 및 안전 관리를 위한 계측 기준치를 결정하고 있다. 그러나 발파에 의한 인접 암반의 손상 영역과 지지력 저하는 반영하지 못하고 있는 실정이다.

이 논문에서는, 굴착단면에 인접한 암반의 손상 상태를 정량적으로 규명하는 일차적 단계로, 발파에 의한 손상 영역을 현장 시험을 통해 규명하였다. 이 결과는 터널의 수치해석 시 발파에 의한 손상을 감안한 이완 영역 설정과 암반의 강도 및 변형 특성 선정에 이용될 수 있다. 또한 록볼트(rock bolts)의 길이 결정에 직접적으로 활용할 수 있다.

2. 시험 현장

서울시 서대문구 소재 불광 배수지 터널 공사 현장에 두 지역을 선정하였다. 한 지역은

- 1) 경희대학교 부교수, 정회원
- 2) 동부엔지니어링(주), 상무이사
- 3) 동곡화약기술사 사무소, 대표이사
- 4) 경희대학교 대학원, 석사과정

TBM 조립을 위한 보조터널 이고(이하 현장 A로 부름), 다른 지역은 직경 3.5m TBM pilot 터널을 직경 7m 마제형으로 확공하는 터널 막장이다(이하 현장 B로 칭함). 이 현장의 암반은 화강암으로 압축강도가 500 kg/cm^2 , 탄성계수가 $1.2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 을 상회하는 신선한 경암으로 분류된다.

2.1 시험 계측공 설치

발파 진동의 근접 계측과 크로스홀 시험을 위한 계측공을 설치하였다. 발파공의 개수에 따라 현장을 A-1, A-2, B-2, B-3로 세분하였다. 여기서 숫자 1, 2, 3은 발파공의 수를 나타내며 각 현장의 계측공 배치는 그림 1과 같다.

발파공은 일반 장약공 천공기로 직경 38mm 깊이 2m, 계측공은 수세식 시추기로 직경 76mm 깊이 2m 까지 천공하였다. 계측공 천공과 함께 암석 역학 시험을 위해 코어를 채취하였다.

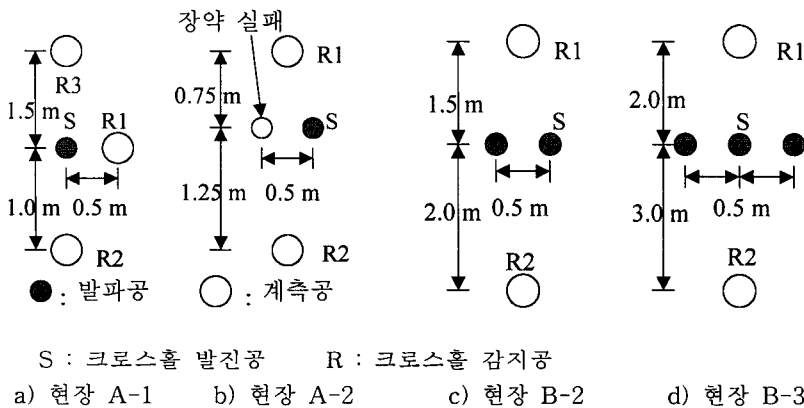


그림 1. 발파 계측공 배치

3. 발파 근접계측

3.1 계측 준비

발파의 근접 계측에 사용된 감지기는 PCB사 고충격 가속도계(high shock accelerometer)를 사용하였다. 이 가속도계의 사양은 다음과 같다.

표 1. 고충격 가속도계의 사양

| Model No. | Voltage Sensitivity | Frequency Range | Amplitude Range |
|-----------|---------------------|-----------------|-----------------|
| 305A03 | 0.5mv/g * | 0.1~13,000 Hz | 10,000g |

* g 는 중력가속도 9.8 m/sec^2 임.

발파 진동을 정확히 감지하기 위해 가속도계를 계측공 내에 완전히 밀착시키는 썬치장치를 고안하였다. 그림 2.는 가속도계를 장착한 썬치장치이다. 아래 썬치에 수평으로 가속도계

를 고정하고, 계측 깊이에서 아래썰기와 위 썰기를 서로 맞물려 계측공 내에 단단히 끼운다. 발파공에는 터널 단면 외곽에서 채택하는 제어발파에 사용하는 장약량을 표 2와 같이 사용하였다.

표 2. 현장 별 장약량

| 현 장 | 장약공 수 | 사용 화약 량 | | 지발당 화약량 |
|-----|-------|-------------------|-----------------|---------|
| | | Slurry 25mm | Finex-1 17mm | |
| A-1 | 1 | 0.5ea/공 (125g) | 1ea/공 (100g) | 225g |
| A-2 | 1* | 0.5ea/공x1공 (125g) | 1ea/공x1공 (100g) | 225g |
| B-2 | 2 | 1ea/공x2공 (500g) | 1ea/공x2공 (200g) | 700g |
| B-3 | 3 | 0.5ea/공x3공 (375g) | 1ea/공x3공 (300g) | 675g |

* 발파공 두 공 중 한 공이 막혀, 한 공에만 장약함.

계측공에 설치한 가속도계를 기록장치인 HP-35670A 파형분석기에 연결하고, 발파공에 화약을 표 2와 같이 장약하고 모래를 전색물로 사용하여 나머지 발파공을 채웠다(그림 3 참조). 전기뇌관(I.E.D. 8호)으로 발파시켜 근접 진동을 계측하였다. 그림 4는 발파 후 계측기를 회수하고 발파공의 전색을 압축공기로 불어낸 그림으로 우측 작은 공이 발파공이고, 좌측의 큰 공이 계측공이다. 그림 5는 발파 직후 모래가 분출된 계측공의 사진이다.

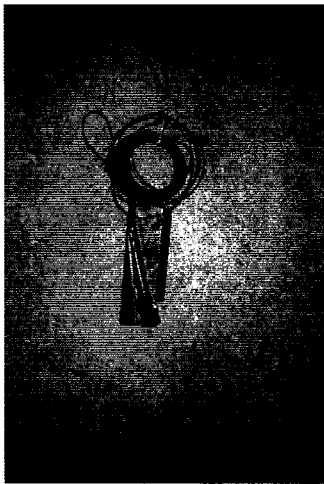


그림 2. 감지기 썰기장치

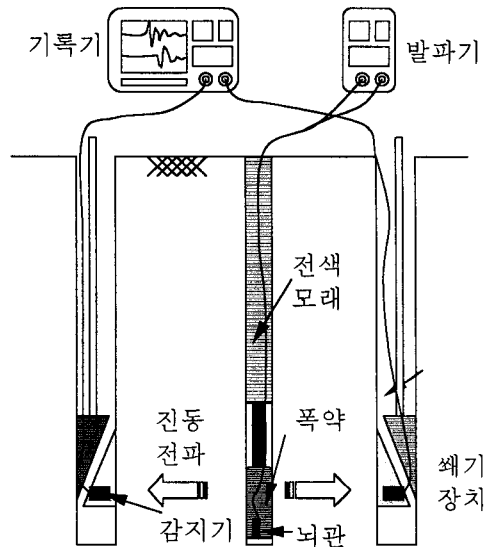


그림 3. 발파 계측 모식도

3.2 계측 결과

가속도계로 측정한 전형적인 진동 기록은 그림 6의 a)와 같다. 이 기록을 FFT(fast Fourier transform)와 디지털 필터(digital filter)를 이용하여 적분한 입자속도와 변위는 각각 그림 6의 b)와 c)이다(백영식 과 목영진 등, 1996). 모든 계측 기록의 최대 입자가속도와 입자속도는 표 3에 정리하였다.

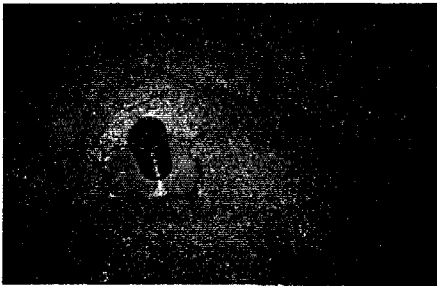


그림 4. 발파후 발파공과 계측공

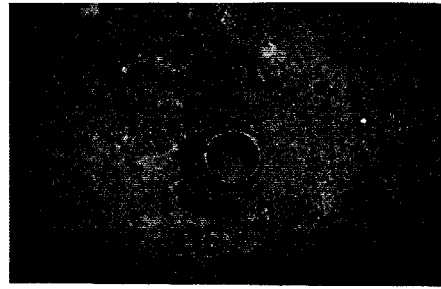


그림 5. 발파 후 모래가 분출된 광경

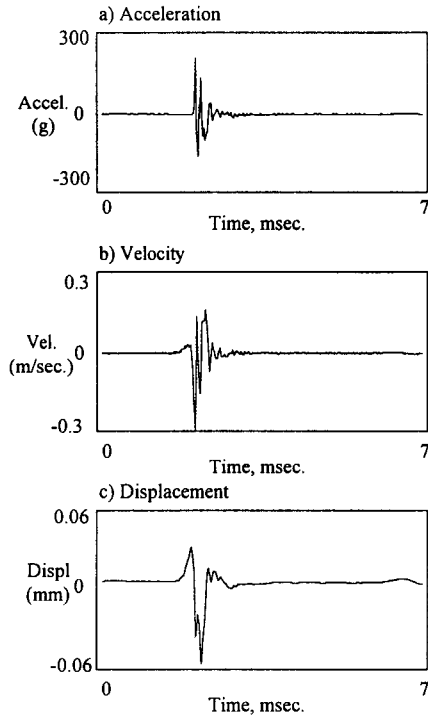


그림 6. 발파 진동 기록
(현장 B-2, 거리=2.25m)

표 3. 거리 별 진동 크기

| 현장 | 거리 m | 가속도 g | 속도 m/sec. |
|----|---------|----------|--------------|
| A | 0.50 | 6,730 | 2.40 |
| | 0.75 | 5,211 | 1.81 |
| | 1.10 | 2,284 | 0.43 |
| | 1.50 | 490 | 0.30 |
| B | 1.50 | 337 | 0.38 |
| | 1.92 | 622 | 0.24 |
| | 2.25 | 205 | 0.21 |
| | 3.00 | 262 | 0.14 |

4. 손상 영역 평가

발파에 의한 암반의 균열은 발파 충격에 의해 발생하는 인장 변형률과 인장강도에 좌우된다. 암반의 인장균열이 발생하기 시작하는 변형률은 아래 식으로 구하였다.

$$\epsilon_t = \sigma_t / E_d \quad (1)$$

여기서 ϵ_t 는 인장균열 변형률, σ_t 는 암석의 압열인장강도, E_d 는 동탄성계수이다. 시추시 채취한 코아의 역학적 시험 및 실내 탄성파시험으로 인장강도와 동탄성계수를 산출하였다. 계산한 인장균열 변형률은 그림 7(사각형 심볼)에 도시하였다.

발파 진동에 의해 발생하는 입자 변형률은 암반의 입자속도와 압축파 속도로 부터 구할

수 있다 (Richart, et.al., 1970).

$$\epsilon_u = \dot{u} / V_p \quad (2)$$

여기서 ϵ_u 는 입자변형율이고, \dot{u} 는 입자속도, V_p 는 압축파속도이다. 발파공으로부터 거리 별 입자변형율은 그림 7에 도시된 것처럼 대수그래프상에서 직선 형태로 나타났다. 그림 7로부터 발파에 의한 손상 영역은 발파공으로부터 1m 내외인 것으로 판단된다.

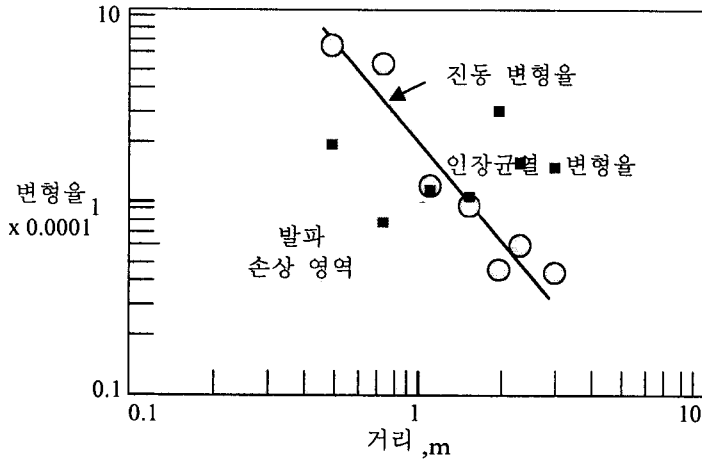


그림 7. 발파에 의한 진동 변형율과 손상영역

5. 손상 영역 검증 시험

5.1 크로스홀시험

손상영역을 검증하기 위해 발파 전후의 암반의 전단파속도를 측정하였다. 그림 1에 "S"로 표시된 발파공을 발진공(source hole), "R"로 표시된 계측공을 감지공(receiver hole)으로 사용하여 크로스홀시험을 수행하였다(Mok, 1987). 이 크로스홀시험의 현장 배치는 그림 8과 같다. 직경 38mm 공내에 설치하도록 소형쇄기형 발진자를 제작하였다(그림 9와 10 참조).

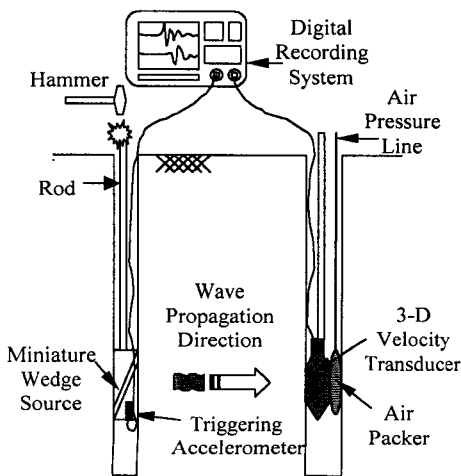


그림 8. 크로스홀시험 배치

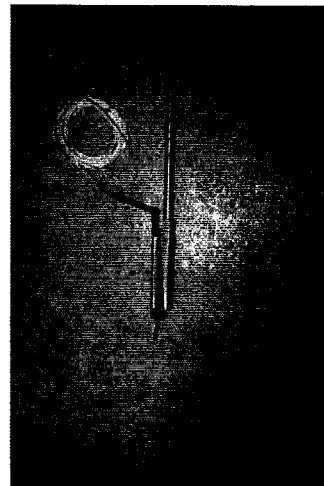


그림 9. 소형 쇄기 발진자

아래 썰기에 트리거 가속도계(triggering accelerometer)를 장착시키고, 위 썰기는 로드(rod)로 공내에 꽂아 끼게 한다. 로드의 두부(頭部)를 망치로 때리면 썰기가 암반으로 전달 에너지가 많은 탄성파를 발생시킨다. 감지공에는 삼상속도계(3-D geophone)를 장착된 공기주머니(air bag)를 압축공기로 부풀려 공내에 밀착시킨다(그림 11 참조). 트리거 가속도계와 감지기를 기록기에 연결하여 전단파를 기록한다.

그림 12에서 "T"로 표시된 시점이 발진자에서 탄성파가 출발한 시점이고, "S"가 표시된 시각이 전단파가 감지기에 도달한 시점이다. "T"와 "S"사이의 시간차가 전단파가 발진자와 감지기 사이를 전파하는데 걸린 시간이다(전단파 전파시간). 그림 12에서 발파후 암반이 손상되어 전단파 전파시간이 현저하게 증가되었다.



그림 10. 발진자 설치

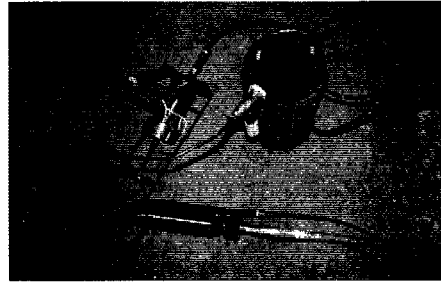


그림 11. 감지기와 밀착장치

그림 12에서 "T"로 표시된 시점이 발진자에서 탄성파가 출발한 시점이고, "S"가 표시된 시각이 전단파가 감지기에 도달한 시점이다. "T"와 "S"사이의 시간차가 전단파가 발진자와 감지기 사이를 전파하는데 걸린 시간이다(전단파 전파시간). 그림 12에서 발파후 암반이 손상되어 전단파 전파시간이 현저하게 증가되었다.

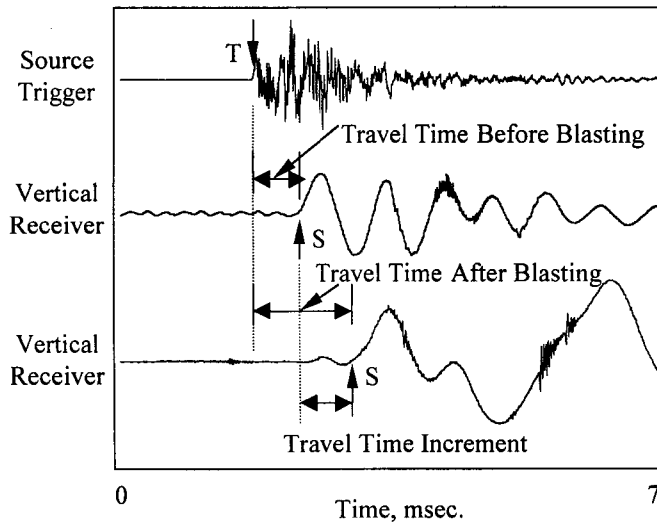


그림 12. 발파 전후의 전형적인 크로스홀 기록
(현장 A-2, 거리 = 1.25m, 깊이 = 0.6m)

5.2 전단파속도

발진자와 감지기 사이의 거리를 전단파 전파시간으로 나누어 암반의 전단파속도를 계산한다. 그림 13의 a)는 현장 A-2에서 발진공(S)과 감지공 R1 사이(거리 = 0.75m)의 암반의 전단파속도를 변화를 나타낸 것이다. 발파 후 전단파속도가 현저히 감소한 것은 이 구간의 암반이 상당히 손상을 입은 것을 의미한다. 그림 13의 b)는 발진공과 감지공 R2 사이(거리 = 1.25m)의 발파 전후의 전단파속도 변화이다. 발파후 이 구간의 전단파속도는 소폭으로 감소하여 암반손상이 정도가 거리가 멀어짐에 따라 줄어든 것을 나타내고 있다.

거리 0.75m 와 거리 1.25m 구간의 전단파속도 감소폭으로 미루어, 1m 내외로 평가된 암반손상 영역이 신빙성이 있는 것으로 판단된다.

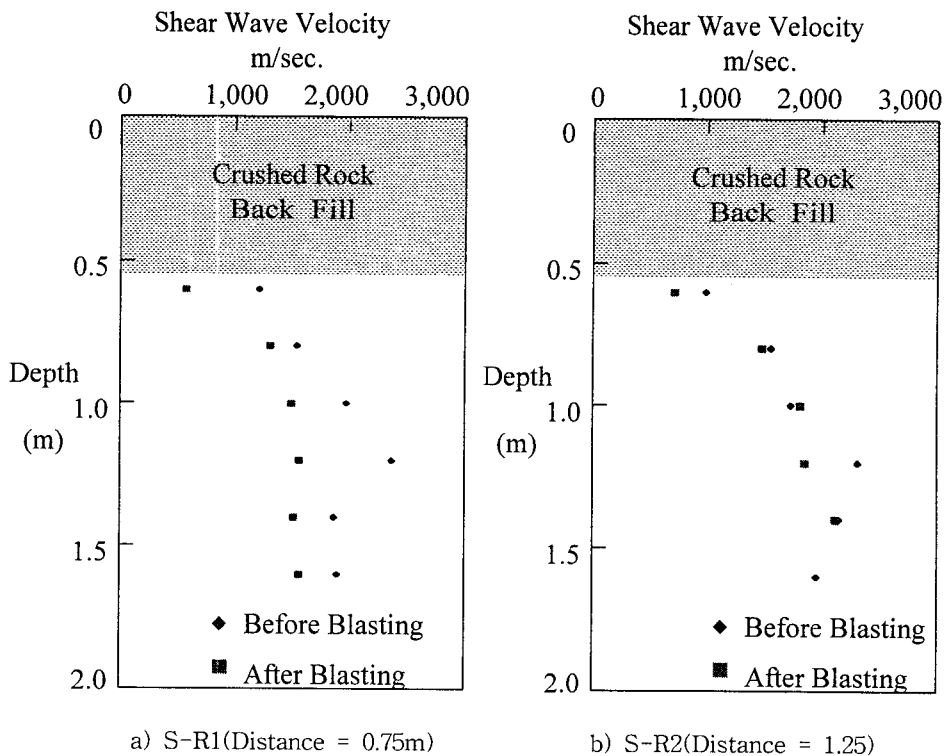


그림 13. 발파 전후의 전단파속도 변화

6. 결론

굴착단면에 인접한 암반의 손상 상태를 정량적으로 규명하는 일차적 단계로, 발파에 의한 손상 영역을 정량적으로 평가하였다. 발파공 가까이(3m 이내)에서 발파 진동을 계측하여 입자 변형율을 계산하고, 암반의 인장균열 변형율과 비교하여 암반손상 영역을 결정하였다. 또한 발파 전후에 크로스홀시험을 수행하여 전단파속도의 변화 폭으로 이손사영역을 검증하였다. 이 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 화강암에서 터널 굴착시 암반의 손상 깊이는 1m 내외이다.
2. 인장균형 변형율과 발파진동의 입자 변형율을 계산하여 암반 손상을 평가하는 방법은

합리적인 것으로 판단된다.

3. 전단파속도는 암반손상 정도를 효율적인 물성치이다.

참고문헌

1. 백영식, 목영진 등(1996), “진동기록 데이터 처리와 적용”, 대한토목학회, 제16권 III-4호, pp. 351~358.
2. Mok, Y.J. (1987), “Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods,” Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 272 p.
3. Richart, F. E. Jr., Hall, J. R., and Woods, R. D.(1970), “Vibrations of Soils and Foundations.” Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

감사의 글

본 연구를 위해 아낌없는 현장 지원을 해 주신 삼주건설(주)에게 깊은 감사를 드린다.