

# 탄성파 탐사법을 활용한 갱도주벽 손상영역 평가방법 개발

정주환<sup>1)</sup> · 최병희 · 신중호<sup>2)</sup> · 양형식<sup>3)</sup> · 조철현<sup>4)</sup>

## 1. 서론

발파굴착으로 발생하는 손상영역은 지하공간 구조물의 건설 시 추가비용을 증가시키거나 방사성 물질의 이동통로 역할을 할 수 있으므로 이에 대한 올바른 평가와 더불어 저감방안을 마련하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

따라서 발파로 인한 갱도주벽의 암반손상영역에 대한 평가방법 개발에 대한 연구가 착수되었으며, 이 연구의 일환으로 탄성파 속도 측정법을 이용한 암반손상영역 평가의 적용가능성에 대한 연구가 수행된 바 있다(최병희 외, 2008). 본 연구에서는 충북 충주와 강원 정선에 위치한 한국지질자원연구원의 지하연구실험실 갱도 벽면에 SHT(side hole test), Cross-hole test 및 VST(vector seismic tomography)의 3가지 시험을 실시하여, 심부 방향으로 가면서 P파 및 S파의 속도를 분석함으로써 발파손상영역의 평균적인 깊이를 평가하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 SHT 법

SHT 측정 방법은 시추공 속에 3성분 수신원을 설치하고 벽체에 고정된 플레이트를 타격하여 P파 및 S파를 송신함으로써 수신된 탄성파의 속도를 산정하는 방법이다. 특히, S파는 벽체에 밀착된 타격판의 양단을 번갈아 타격하여 180° 위상 차이를 나타내는 탄성파를 발생시키며, 이는 수신기에서 위상의 역전으로 판단할 수 있다(그림 1, 2).

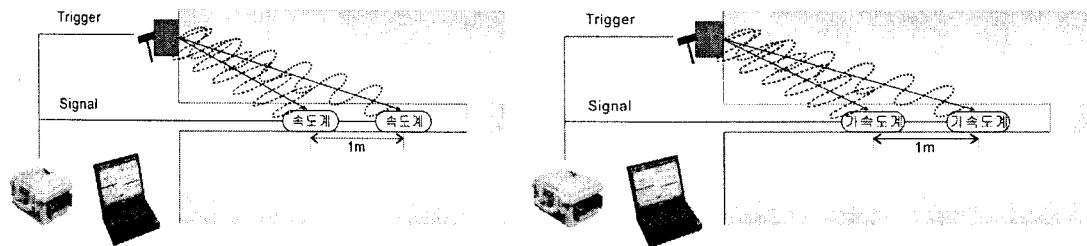


그림 1. SHT 측정법 모식도

- 1) 전남대학교 대학원 에너지자원공학과
- 2) 한국지질자원연구원
- 3) 전남대학교 에너지자원공학과
- 4) 지하정보기술(주)



그림 2. SHT 송수신기

## 2.2 Cross-hole test

Cross-hole test는 동일 벽면의 서로 다른 시추공 속에 송신기와 수신기를 같은 심도에 위치시켜 탄성파의 속도를 측정하는 방법이다. S 파는 시추공 내부의 해머 양단을 번갈아 타격하여 180° 위상 차이를 나타내는 탄성파를 발생시키며, 이는 다른 시추공의 수신기에서 위상의 역전으로 판단할 수 있다(그림 3).

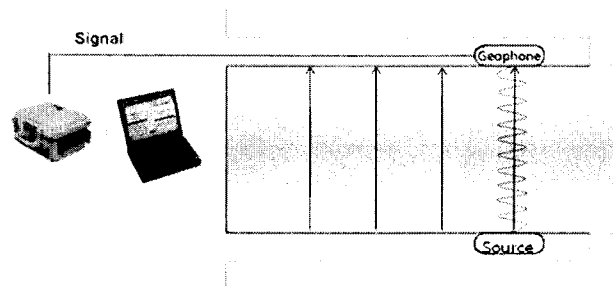


그림 3. Cross-hole test 모식도

## 2.3 VST 법

VST 탐사는 시추공에서 발진한 탄성파가 공을 중심으로 수신기가 대칭으로 설치 시 위상이 역전되는 원리를 이용한 전단파 토모그래피 방법이다. 수신부는 벽체에 3성분 속도계를 설치하고, 시추공 내에서 송신을 수행하는 방식이다(그림 4, 5).

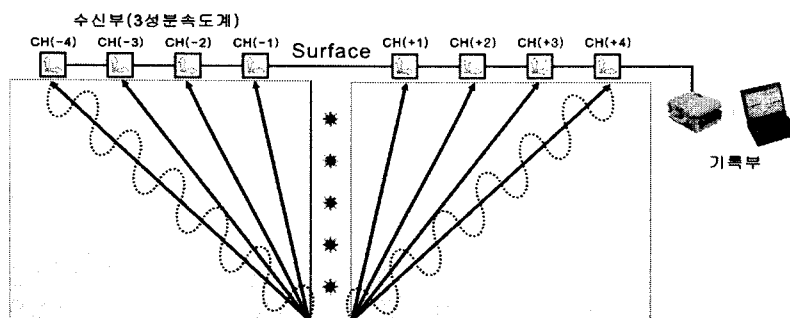


그림 4. VST 모식도



그림 5. VST 송수신기

### 3. 자료해석 방법

탄성파 속도는 송신 후 센서에 수신되는 신호를 기록하고, 이 중 최초 도달 주시를 측정하여 속도를 측정하는 방법으로 최초 도달 주시를 정확히 측정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 수치적인 기법 중 상호상관법을 이용하여 최초 도달 주시를 계산하였다.

또한, 탄성파 속도는 송신원의 위치, 센서의 위치를 고려한 실제 탄성파의 이동거리와 탄성파 초기 도달 시간사이의 관계를 이용하여 구해야하며, 탄성파의 진행 방향을 송신원에서 센서까지 곡선으로 가정하여 수행하였다(그림 6).

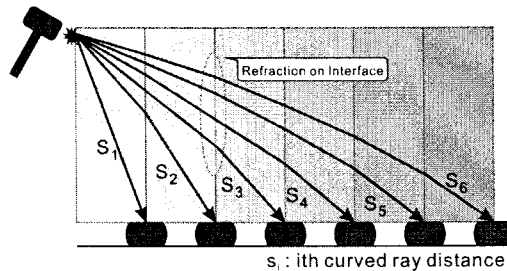


그림 6. 파선의 진행을 곡선으로 가정한 속도 산정

### 4. 자료 해석 결과

#### 4.1 SHT

##### 4.1.1 P파 속도 분석

그림 7은 SHT의 P파 성분을 심도별로 나타낸 것으로 탄성파의 초동 지점이 두 방식 모두 비교적 명확하게 나타났다.

그림 8은 송신지점을 기준으로 가속계 및 속도계까지의 파선을 스넬의 법칙에 의거하여 역산을 통해 속도를 나타낸 것으로 D 광산의 경우 심도 2~3m 부근에서 부터 속도의 증가 폭이 낮게 나타나는 것으로 보아 발파로 인한 암반손상영역은 심도 2~3m 정도로 예상되며, H 광산의 경우 심도 2.5~3m 부근에서 속도 증가 폭이 낮게 나타나며 이는 암반손상영역으로 예상할 수 있다.

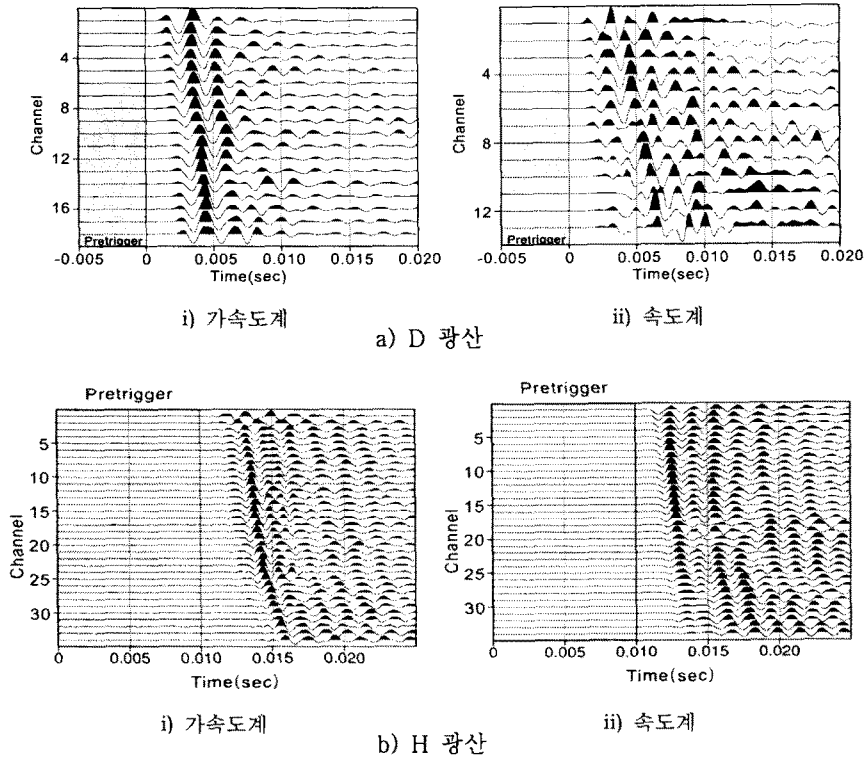


그림 7. SHT-P파

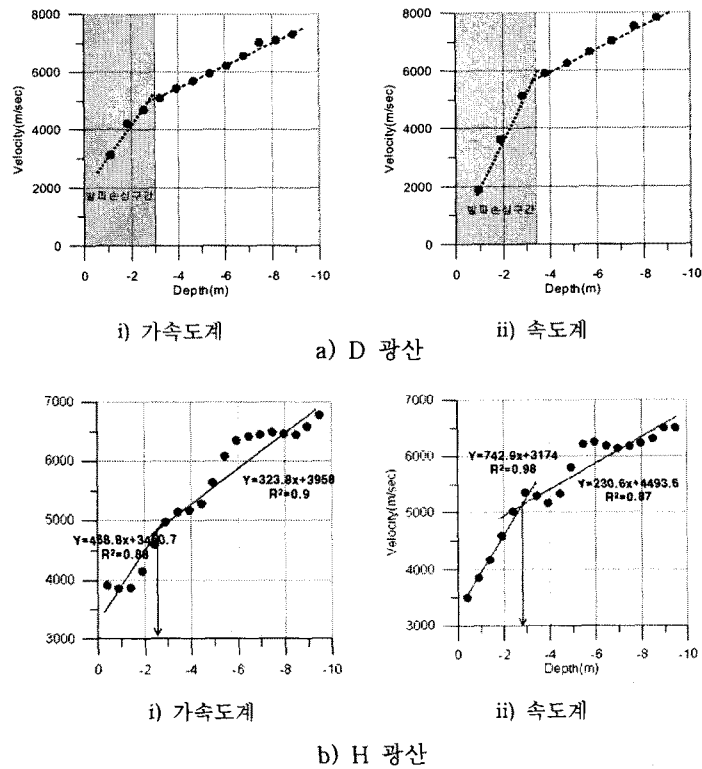


그림 8. SHT - P파속도 결과

4.1.2 S파 속도 분석

S파는 송신원에서 전단파를 발진함으로써 트레이스의 위상이 역전된 지점을 통해 구하였다(그림 9).

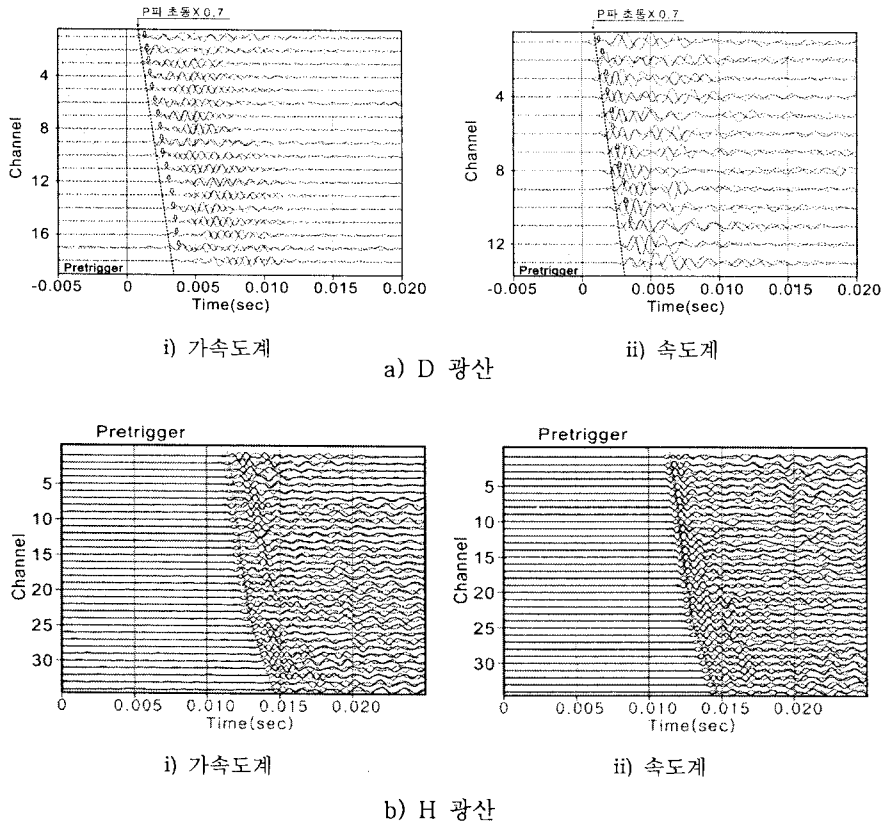


그림 9. SHT - S파

그림 10은 송신지점을 기준으로 가속계 및 속도계까지의 파선을 스넬의 법칙에 의거하여 역산을 통해 속도를 나타낸 것으로 D 광산의 경우 심도 3m 부근에서 속도의 증가 폭이 완만하게 나타남에 따라 발파로 인한 암반손상영역은 심도 3m 부근으로 예상된다.

H 광산의 경우 심도 2m 부근에서 속도의 증가 폭이 완만하게 나타남에 따라 이를 암반 손상영역으로 평가할 수 있고 3m 이후에는 속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 3m 이후 구간에 파쇄대가 존재하는 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 진행될 예정이다.

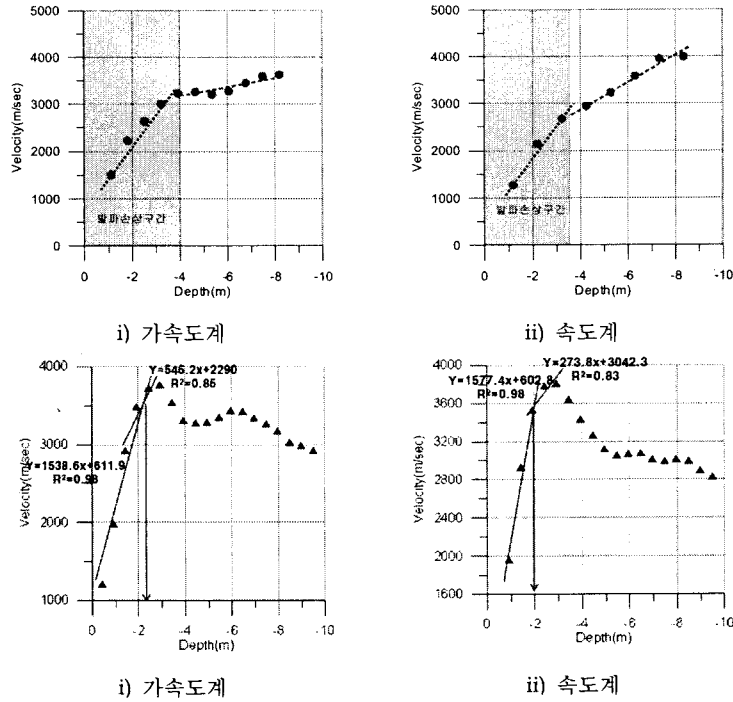


그림 10. SHT - S파속도 결과

#### 4.2 Cross-hole test

Cross-hole test는 Rezowalli 등(1984)과 Malgrem 등 (2007)에 의해 손상영역평가에 적용된 사례가 있으며 본 연구에서는 SHT 법의 결과와 비교를 위해 H 광산 내에 위치한 지하 연구실험실의 갱도 현장에 적용되었다. 그림 11은 심도별로 수신된 파형을 나타는 것이며, 트레이스의 위상이 역전된 지점을 통하여 S파 속도를 산정하였다. 그림 12는 심도별 S파의 속도를 나타낸 것이며, 이는 SHT의 S파의 속도변화 패턴과 유사하다.

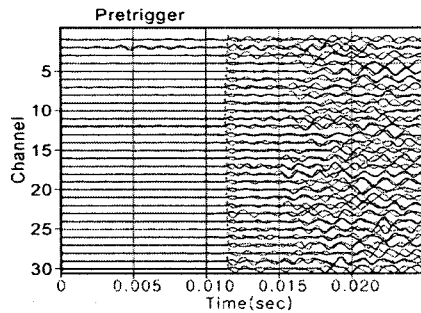


그림 11. Cross-hole test - S파

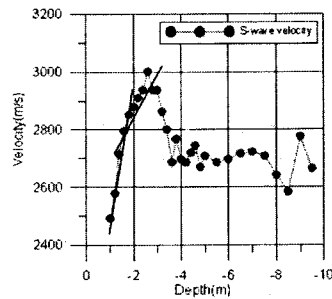


그림 12. Cross-hole test - S파 속도

### 4.3 VST

VST법은 충주의 D 광산에 적용되었다. 그림 13은 심도에 따른 트레이스를 나타낸 것으로써, 수신기 위치에 따라 공벽과 가까운 CH(1) 수신기는 압축파의 영향이 커져 전단파 분석이 어려워 CH(2)~(4)의 위상역전 지점을 분석하여 S파 속도를 구하는 자료로 사용하였다.

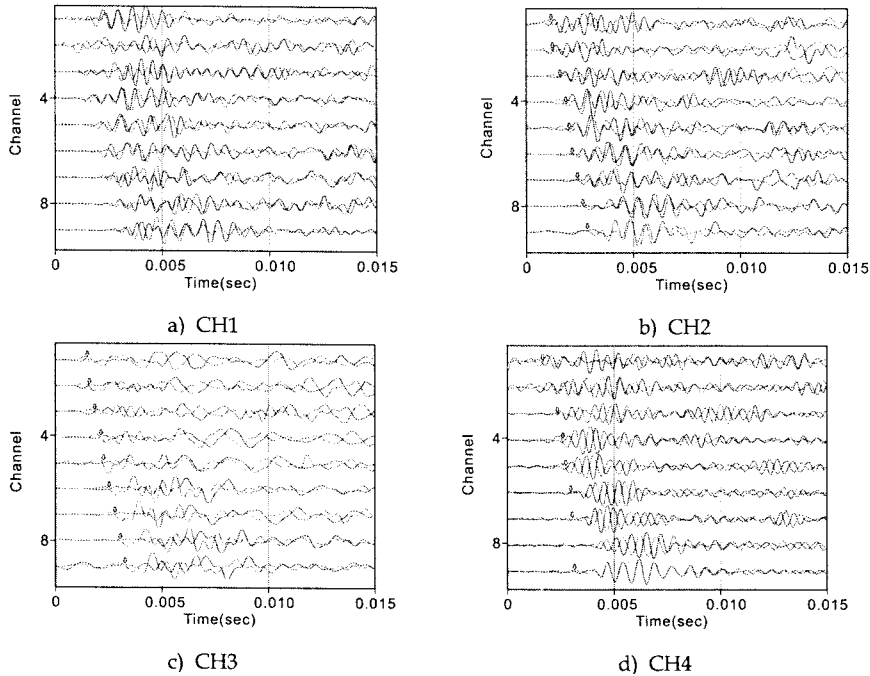


그림 13. 심도별 트레이스

그림 14는 S파 분석에서 얻은 자료를 통해 토모그래피 역산 수행 시 파선이 지나가는 양상을 나타내며, 그림 15은 토모그래피를 수행한 후 심도별 S파 속도 단면을 나타낸 것이다.

그림 16는 시추공 지점의 전단파 속도 변화 그래프로써 심도 3.3m 부근에서 속도의 변화가 나타나나, SHT 방식과 달리 이후 구간에서도 심도의 증가에 따라 속도 변화가 빠르게 나타남으로 다소 부정확한 것으로 판단된다.

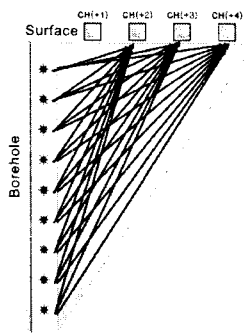


그림 14. 송-수신 파선경로(VST)

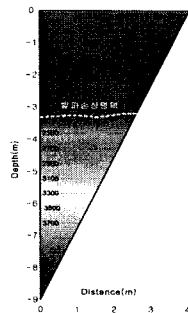


그림 15. 토모그래피 역산결과(VST)

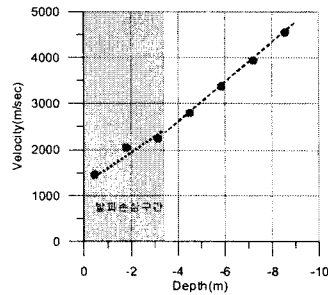


그림 16. 시추공 지점의 전단파 속도와 속도(VST)

## 5. 결론

본 연구에서는 충주의 D광산과 정선의 H광산 내부에 위치한 지하연구실험실 갱도주벽에서 탄성파속도 측정법을 이용하여 발파로 인한 암반손상영역을 파악하였다. SHT 방식에서는 수신기로서 속도계 및 가속도계를 이용하는 2가지 방법을 사용하였으며, 이는 Cross-hole test를 통하여 검증하였다. 또한 탄성파 토모그래피 방법의 일종인 VST 방법도 적용하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

### 1) SHT 방식

가속도계 방식과 속도계 방식 모두 비교적 안정적인 데이터를 얻을 수 있었으며 일부 구간에서 속도의 변화 양상을 파악할 수 있었고, 이를 발파로 인한 암반손상영역으로 추정할 수 있었다.

H 광산의 실험결과에서 S파를 이용한 경우에서 속도변화 양상이 보다 명확하게 나타났으며, Cross-hole test의 속도변화 양상과 유사하게 나타났다. 이는 S파의 경우가 암석의 물성변화를 효과적으로 반영하기 때문이라고 판단된다.

D 광산에서의 실험결과에서 P파 속도가 지나치게 크게 나타나는 문제가 있었으나 이는 심도 10m 이내의 좁은 영역에서 시험이 이루어졌기 때문으로 보인다. 하지만 속도변화의 경향을 파악하는데 별다른 문제점이 없는 것으로 보인다.

### 2) VST 방식

통상적으로 갱도 벽면이 고르지 않음으로써 시추공을 중심으로 수신기를 대칭적으로 설치하기가 어렵고, 송신 시추공에 수신기를 너무 가까이 위치시키면 압축파의 영향으로 전단파의 구분이 어렵다는 단점이 있었다.

발파로 인한 암반손상영역은 속도의 변화가 나타나는 심도 3.3m로 판단되나 이후 안쪽 구간에서도 심도에 따른 속도변화가 빠르게 나타남으로 다소 정확성이 떨어졌다.

## 사사

본 연구는 지식경제부 기본사업인 '고심도 지하연구실험실(URL)구축 및 실증실험연구' 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 최병희, 정주환, 신중호, 조철현, 2008, 탄성파 탐사법을 활용한 광산갱도 주벽의 발파 손상대 평가, 대한화약발파공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 21-31
2. Malmgren, L., D. Saiang, J. Töyrä and A. Bodare, 2007, The excavation disturbed zone (EDZ) at Kiirunavaara mine, Sweden-by seismic measurements, J. of Applied Geophysics 61, pp.1-15.
3. Rezowalli, J. J., M. S. King, L. R. Myer, 1984, Cross-hole Acoustic Surveying in Basalt, Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol.21, pp.213-216.