

# ***In situ* monitoring of rock fracturing using shear wave splitting analysis: an example from a mining setting**

Andreas Wuestefeld, J. Michael Kendall, James P. Verdon, and Andre van As

Geophysical Journal International, V187, P848-860, 2011

Date: 2014/09/19

Summarized by Hobin Lim

---

호주의 광획봉락법(block-caving operation)으로 시공되는 광산 채굴지역에 대하여, 비등방성의 시간에 따른 변화를 측정하였다. 비등방성을 토대로 시간에 따른 응력 변화를 추론하였다. 광획봉락법은 지하에서 수평 방향으로 통로를 우선 뚫는다. 그리고 지하 광산에서 지상을 향해 올라가며 채광이 이루어진다. 이전 연구(Hudyma *et al.* 2007)에서 시간에 따라 지진의 발생 빈도가 변하는 것과, 지진 깊이가 알아지는 것이 발견되었다. Wuestefeld *et al.*, 2011에서는 S파 스플리팅(Shear wave splitting)을 이용하여 시간에 따라 변화하는 비등방성(anisotropy)을 측정하였다. 그리고 수평과 수직방향 균열(fracture; 여기서 방향은 균열이 벌어지는 방향을 가리킨다.)의 밀도를 역산(inversion)을 이용하여 구하였다.

2004년 6월 부터 2005년 1월 사이에 총 12 354개의 지진(최대 2.9 규모)이 발생하였다. 우선, 직접(manually) P파와 S파 도달시간을 측정(picking)하였다. 그 뒤에 지진파 비등방성과 균열(fracture)의 특성을 자동으로 계산할 수 있는 방법(Wuestefeld *et al.*, 2010)을 적용하여 계산하였다. 연구 지역은 균일한 속도 구조를 갖는다고 가정하였다. 측정된  $\delta t$ (SV와 SH파의 도달 시간 차이)는 지진파 경로(ray path)의 길이로 나누어서 정규화(normalization)하였다. 그리고 이것을 하나의 관측(observation)된 페이즈(phase)가 지시하는 “비등방성의 정도”라고 해석하였다.

정규화된  $\delta t$ 를 이용하여 비등방성을 측정한 결과, 시간에 따라 그것이 변하는 것이 확인되었다. 이 관측은 두 개의 잠재적인 원인을 갖는다. 첫 번째 가능한 원인은 다음과 같다. 지하 광산의 지붕이 점점 위로 올라가면서, 지진의 깊이가 얕아진다. 지진의 깊이가 알아지는 만큼, 더 많은 지진파 경로가 더 얕은 곳을 지나게 된다. 또한, 지진의 평균적인 위치가 변하는 만큼, 매질에 대한 평균적인 입사각도 달라진다. 따라서, 비등방성이 시간에 따라 변한 것은 (매질 자체의 특성이 시

간에 따라 변한 것이 아니라) 오롯이 지진의 깊이가 알아진 것 때문일 수 있다. 두 번째 가능한 원인은 시간에 따라 매질의 특성이 실제로 달라졌다는 것이다. Wuestefeld *et al.*, 2011에서 매질의 특성이 변하였다는 것은, 매질에 포함된 균열(fracture)의 밀도, 주향, 그리고 경사각이 달라졌음을 가리킨다. Wuestefeld *et al.*, 2011에서는 첫 번째 원인의 가능성을 제거하기 위하여 두 가지 근거를 들었다. 첫 번째는, “지진 발생빈도-깊이”와 “비등방성-깊이”의 히스토그램의 상관관계가 떨어진다는 점이다. 극대를 이루는 깊이가 약 50 m 정도 차이가 나며, 이것은 둘 사이의 인과성이 떨어진다는 해석으로 이어진다. 두 번째는, 깊이를 고정하였을 때, 즉, 깊이를 좁은 구간(50 m)으로 나누었을 때에도, 시간에 따른 비등방성의 변화가 관측된다는 점이다.

Wuestefeld *et al.*, 2011에서는 광획분락법이 적용된 광산이 위로 올라가기 전에는 수직방향 균열보다 수평방향 균열의 밀도가 더 높은 것을 확인하였다. 이것은 수직방향 응력이 최소 응력 방향( $\sigma_3$ )이기 때문이다. 채굴이 진행됨에 따라서 광산 지붕이 중력에 의해서 아래로 쳐지게 되고, 수평방향 균열이 증가한다. 이것은 수평 최소 응력이 음수(tensile)가 되기 때문이다. 지하의 광산이 지표와 만나기 직전에는 지진의 발생이 급증하고 규모도 커진다. 광산이 지표와 완전히 연결된 후에는 비등방성의 정도가 본래의 값으로 돌아온다. 지진의 포컬메커니즘(focal mechanism)을 실제로 계산하여, Wuestefeld *et al.*, 2011에서 예측한 응력 분포와 균열 방향과 일치하는지 확인하는 것을 다음 연구 단계로 제시한다.