

발파손상영역에 관한 문헌 고찰

정주환·양형식¹⁾·최병희·류창하²⁾

1. 서론

발파는 수백 년간 지속되어 왔고, 산업 발전에 많은 영향을 미쳤지만 원하지 않는 과도한 손상영역은 경제적, 안전성 측면에서 항상 문제가 되어왔다. 더욱이, 최근 산업이 급속도로 발전함에 따라 터널의 고속 굴진에 대한 필요성도 증가하고 있고, 이를 위해 빠른 시공과 함께 손상영역의 방지가 절실히 요구되었다. 이를 위해 발파공법에 따른 손상영역 평가가 매우 중요한 문제로 인식되고 있다.

따라서 본 연구에서는 발파에 의한 암반 손상영역의 평가 및 예측 방법에 대한 최근 연구동향과 추후연구 방향을 다루고자 한다.

2. 손상영역

암반 손상영역(the Excavation Disturbed Zone or Damaged Zone)은 그림 1과 같이 굴착으로 인하여 터널 주변의 암반이 모암과의 변형계수, 수리전도도, 탄성파 속도 등 암반 특성의 변화가 나타나는 영역으로 파괴영역, 손상영역, 교란영역을 모두 포함하는 영역을 의미한다. 파괴영역은 암반블록이 암반으로부터 완전히 분리된 영역이고, 손상영역은 미소파괴가 발생하여 변형계수의 감소, 투수계수의 증가 등과 같은 암반 특성의 영구적인 변화가 발생하는 영역이며, 교란영역은 굴착에 의한 응력 재분배 등으로 인하여 응력 또는 수리적 특성의 변화가 발생하는 영역으로 암반특성의 변화는 크기 않거나 회복 가능한 영역으로 정의된다.

이러한 손상영역은 굴착 방법, 주응력 상태, 암반 물성에 따라 다르게 나타나고, 일반적으로 발파공법을 이용할 경우의 암반 손상영역은 기계식 굴착공법으로 인한 손상영역 보다 더 크게 발생한다고 알려져 있다(장수호 외, 2000, Sato 외, 2000). 또한 발파에 의한 굴착 손상영역의 경우 최외곽공과 전열공의 저항선, 장약량 등에 민감한 것으로 알려져 있고, 암반손상을 줄이기 위해서는 최외곽공에 근접한 발파공에 대한 저항선과 장약량을 제어해야 한다(정용훈, 2006).

1) 전남대학교 지구시스템공학과
2) 한국지질자원연구원

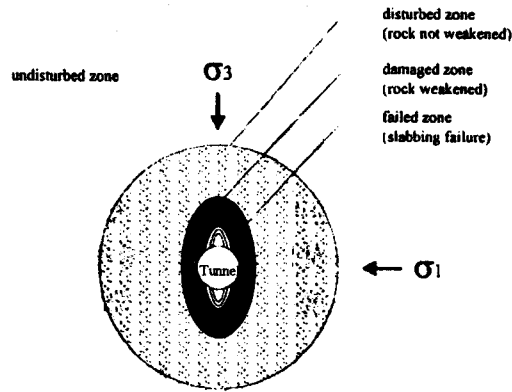


그림 1. EDZ 모델 (장수호 외, 2000)

3. 실험을 통한 손상영역 평가

실험을 통한 손상영역을 평가는 URL 프로젝트가 활발히 진행 중인 스웨덴(ZEDEX), 캐나다(Mine-by tunnel), 일본 등에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

Sato 외(2000)는 발파와 기계굴착을 통한 암반 손상영역을 비교 하였고, 발파진동, 수압시험, 물성변화 등의 측정을 통해 여러 가지 손상영역 평가방법을 비교분석 하였다.

또한, Cai 외(2005)는 캐나다 Mine-by 터널에서 Seismic Monitoring을 통하여 손상영역 평가 방법의 타당성을 검증하였다.

국내의 경우 손상영역 평가에 대한 실험적인 연구가 많이 부족하다고 할 수 있는데, 장수호 외(2000)는 실험실 시험, 발파진동예측식, 보어홀 카메라, 미소파괴음(AE) 측정 등을 이용하여 발파로 인한 암반의 손상영역을 평가하고, 각 평가 방법의 타당성을 검증하고자 하였다. 암석의 역학적 특성들 중 탄성계수와 σ_{AE} (미소파괴음 event가 급격하게 증가하기 시작하는 응력수준)의 변화는 편차가 크게 나타나 손상영역을 평가하기가 어려웠고, 탄성과파속도를 이용한 방법이 비교적 타당하다는 결론을 내렸다. 또한, 발파진동 예측식을 통한 손상영역의 범위는 실험실 시험 결과와 비슷하게 예측되었지만, 보어홀 카메라를 통한 손상영역 측정 결과는 미세균열들을 관찰하기가 어렵기 때문에 정량적인 손상영역 평가가 어려웠다.

따라서, 보다 효과적으로 손상영역을 평가하기 위해서는 어느 한 방법에만 의존하지 않고, 위에서 제시된 방법 외에 탄성과 굴절법 탐사, 물리검층, 투수시험 등 가능한 모든 방법들을 적용하는 것이 유용하다는 결론을 도출하였다.

4. 수치해석을 통한 손상영역 평가

수치해석을 이용한 방법은 직접 실험을 하지 않고 암반 손상영역을 예측할 수 있는 장점이 있지만 폭굉압과 가스압에 의한 발파메카니즘을 정확히 반영할 수 있는 구성 모델을 만들기 어렵다는 단점이 있다.

Yang 외(1996)와 Liu 외(1997)는 체적변형률, 균열밀도함수를 이용하여 연속체 손상모델을 제시하였다. 동적 암반손상은 응력과 시간의 함수이고 체적 당 균열 수를 나타내는 균열 밀도함수 C_d 는 다음 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$C_d = \alpha(\theta - \theta_c)^\beta t \quad (1)$$

α, β : 재료상수
 θ : 체적변형률
 θ_c : 임계 체적변형률
 t : 시간

식(1)을 이용하여 파괴확률을 나타내는 식(2)를 구할 수 있고, 이는 손상변수 D 와 동일한 개념으로 사용할 수 있다.

$$p_f = 1 - e^{-C_d V_0} = D \quad (2)$$

V_0 : 단위체적

발파하중으로 인해 발생하는 균열들의 증가가 암반의 강성에 미치는 영향은 다음 식(3)과 같다.

$$E_d = E(1 - D), G_d = G(1 - D) \quad (3)$$

E_d : 탄성계수
 G_d : 전단계수

이인모 외(2003)는 연속체 손상모델인 식(3)을 코딩하여 손상변수 D 를 산출하고, ABAQUS/Explicit를 이용하여 수치해석을 실시하여 굴착선 주변의 손상영역을 평가하였다 (그림 2). 암반이 파괴되기 시작하는 시점인 손상변수 D_{min} 은 Shocky 외(1974)에 의해 제안된 0.632를 적용하였다.

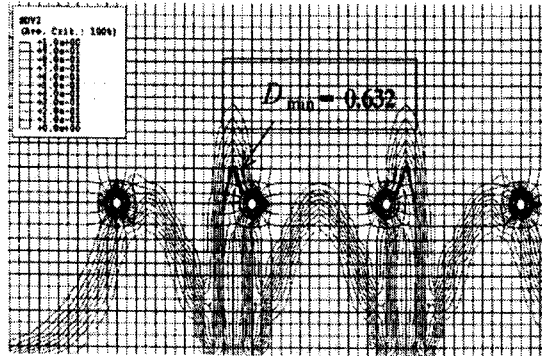


그림 2. $D_{min} = 0.632$ 등가선과 과굴영역
(이인모 외, 2003)

또한, 이인모 외(2004)는 Fuzzy-random 파쇄확률의 등가선을 이용하여 파쇄 경계를 결정하는 방법과 손상계수의 등치선을 이용하는 방법을 비교하였다. 그림 3과 같이 파쇄 경계는 Fuzzy-random 파쇄확률을 적용하는 것이 유용하다고 결론지었다.

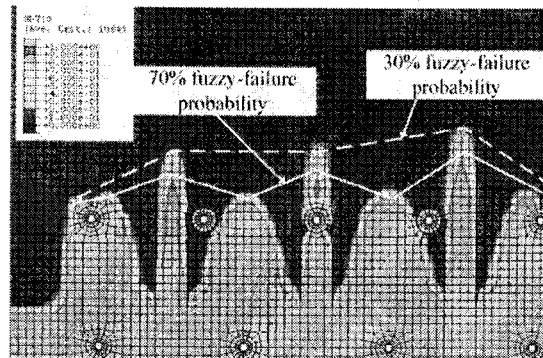


그림 3. 퍼지 랜덤 균열 가능성
(이인모 외, 2003)

Cho 등(2004)은 Nilson 등(1985, 1988)에 의해 연구된 균열 내의 압력 분포 산정법을 기초로 하여 유한요소법을 이용한 응력파와 가스압에 의한 암석의 동적 파쇄 특성에 관한 연구를 수행하였다.

박봉기(2005)는 밀장전 발파압력에 의한 등방성과 이방성 암반손상의 비교를 위한 수치해석을 실시하였다. 화강암에 대한 이방성계수를 1.4로 가정하여 등방성 암반손상 해석결과와 비교하였다(그림 4). 이방성 해석결과 수평 방향 손상영역은 등방성 보다 34% 증가하였고, 수직 방향 손상영역은 12% 감소하였다. 따라서 암반의 손상영역에 대해서 암반의 이방성을

고려하는 것이 합리적이라는 결론을 도출하였다.

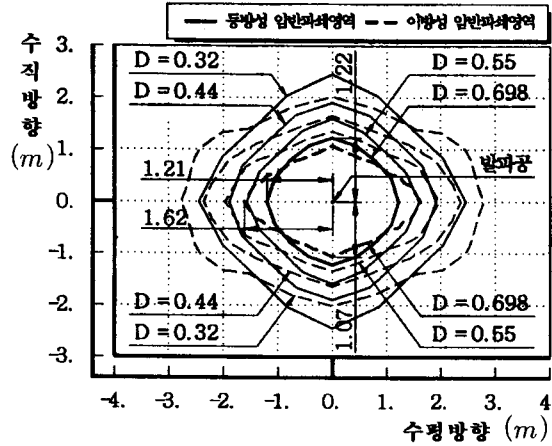


그림 4. 등방성 및 이방성 암반의 파쇄영역 비교
(박봉기, 2005)

심영종 외(2006)는 파괴역학의 원리를 적용하여 발파 시 발생하는 가스압에 의해 생성되는 균열의 최종 진행 길이를 예측함으로써 발파로 인한 최종 손상영역을 간단하게 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 발파 후 충격파에 의해 균열이 생성되고, 발파공에 작용하는 가스압과 균열에 작용하는 가스압을 분리하여 계산하였다. 균열이 가스압에 의해 진행되기 위해서는 다음 식(4)와 같은 조건을 만족해야 하며, 이를 통해 최종 균열길이(l)를 구하였고, 이를 수치해석에 적용하여 암석물성과 단열지수에 의한 균열길이를 예측하였다.

$$K_I = \left(p_0 k_{IA} \left(\frac{l}{r} \right) + p_0 k_{IB} \left(\frac{l}{r} \right) \right) \sqrt{\pi r} \geq K_{IC} \quad (4)$$

k : 무차원 함수

r : 발파공의 반경

K_I : Mode I 응력확대계수

K_{IC} : Mode I 암석 파괴인성

정용훈(2006)은 PFC2D 해석을 이용하여 굴착 손상영역을 예측하고자 하였다. 먼저 해석 모델의 물성을 반영하기 위해 PFC2D 입자의 미시변수 결정법을 제시하였고, 식(5)와 같이 이상폭굉이론에 기초한 최대 폭굉압력($P_{d,max}$), 식(6)과 같이 AN-EOS에 기초한 최대 가스압($P_{g,max}$)을 산정하여 폭굉압력과 가스압을 고려한 알고리즘을 적용하여 수치해석을 실시하

정주환, 양형식, 최병희, 류창하

였고, 단위면적당 균열 길이 제곱을 이용하여 굴착손상영역을 정량적으로 산정하였다.

$$P_{d,\max} = \frac{\rho_c}{4} D_c^2 \quad (5)$$

$$P_{g,\max} = \frac{(2/3)f}{(D.I.)^2/\rho_c - \alpha} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{1.5}{1.26 + 1.33\rho_c} \quad (7)$$

ρ_c : 폭약의 밀도

D_c : 폭굉속도

f : 폭약의 비에너지

$D.I.$: 디커플링 지수

5. 검토

일반 터널 시공과 지하 방사성 폐기물 처분장 시공에서의 안정성, 경제성의 확보를 위해서는 굴착 시 발생하는 손상영역의 최소화가 필수적이라 하겠다. 특히 터널의 고속굴착에는 손상영역의 발생이 불가피할 것으로 생각되며 이에 대한 평가는 시공성과 함께 안전율의 확보에도 중요한 요소가 될 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 발파로 인한 암반 손상영역에 대해 기 발표된 자료를 중심으로 고찰하였다.

손상영역 평가에 대한 현장시험의 한계성으로 인해 수치해석적인 연구가 주를 이루어지고 있고, 발파 메카니즘에 대한 명확한 구현이 이루어지지 못한 상태에서 수치해석의 적용으로 인해 이 역시 많은 한계점을 가지고 있다고 하겠다.

따라서 보다 다양한 조건에서의 현장실험과 축소 모형실험을 통한 명확한 발파 메카니즘의 구현과 이를 수치해석적 적용을 통해 보다 효율적인 손상영역 평가 방법에 대한 검증 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 'IT 및 신소재를 활용한 급속안정화 터널 시공기술 개발(과제번호 : 05건설핵심 D03-01)'의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박봉기, 2005, 발파압력과 암반손상에 관한 연구, 제3회 한화 발파기술 심포지움, 157-168
2. 심영종, 조계춘, 김홍택, 2006, 발파에 의한 암반의 손상영역 예측, 2006, 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, 229-237
3. 이인모, 박봉기, 백채우, 2004, 터널발파로 인한 굴착선주변 암반거동의 확률론적 연구, 한국지반공학회논문집, 20.4, 89-102
4. 이인모, 이형주, 박봉기, 윤현진, 이상돈, 2003, 굴착선 주변공 발파의 암반손상을 고려한 터널 안정성 검토, 한국지반공학회논문집, 19.4, 167-178
5. 장수호, 신일재, 최용근, 이정인, 2000, 발파에 의한 터널 주변 암반의 손상영역 평가에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 16.5, 129-140
6. 정용훈, 2006, 발파에 의한 굴착손상영역의 수치해석적 산정, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원
7. Cho, S.h., Y. Nakamura and K. Kaneko, 2004, Dynamic fracture process analysis of rock subjected to stress wave and gas pressurization, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41.3(CD-Rom)
8. Liu, L. and P.D. Katsabanis, 1997, Development of a continuum damage model for blasting analysis, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 34.2, 217-231
9. Nilson, R.H., W.J. Proffer and R.E. Duff, 1985, Modelling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22.1, 3-19
10. Nilson, R.H., 1988, Similarity solutions for wedge-shaped hydraulic fractures driven into a permeable medium by a constant inlet pressure, Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomech., 12, 477-495
11. Sato, T., T. Kikuchi and K. Sugihara, 2000, In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan, Engineering Geology, 56, 97-108
12. Shockey, D.A., D.R. Curran, L. Seaman, J.T. Rosenberg and C.F. Peterson, 1974, Fragmentation of rock under dynamic loads, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 11, 303-317
13. Yang, R., W.F. Bawden and P.D. Katsabanis, 1996, A new constitutive model for blast damage, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 33.3, 245-254