

횡등방성 암반의 침식에 따른 지응력비 변화의 수치해석 연구

양형식, 최미진, 김원범 (전남대학교)

1. 서론

암반의 지응력비는 초기 응력상태를 나타내는 것으로서 터널이나 지하굴착에 의한 응력 재분배와 응력 집중현상의 인자이다. 초기 지응력비의 영향인자로는 지반의 심도와 암석의 종류, 암질, 주변 지형 등이 있으며, 현지 암반은 중력에 의한 자체하중 뿐만 아니라 과거의 지각운동, 지표의 퇴적이나 침식등의 작용을 받아왔다. 이들은 지반조건에 따라 변화하므로 지반거동 해석 시 중요한 요인이 된다.(문홍득, 1999) 정확한 초기응력 산정을 위해서는 이 방성도 고려되어야 한다.(Heerden, 1983, Amadei, 1996)

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON^{3D}를 이용하여 지반의 초기 지응력비가 침식에 따라 변화하는 정도를 알아보고 암반의 횡등방성이 이에 미치는 영향을 검토하였다. 또 침식 심도에 따른 지응력비의 식을 산정하였다.

2. 암반의 초기응력 산정

암반이 균질 등방의 탄성체이고 지표는 수평이며 암반 내에는 지질학적 불연속면이 없고, 중력에 의한 응력만 작용하고 있다면 초기 응력은 연직 응력과 정수압 상태의 수평 응력으로 구성되어 있다고 생각할 수 있다. 이때 지표로부터 임의 심도에서의 초기 응력 성분 중 연직 응력은 암반의 단위 하중에 의해 결정되고 수평 방향의 응력은 그 변형이 구속되어 있다는 가정으로부터 Hooke의 탄성 관계식으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\sigma_v = -\gamma \cdot z \quad (1)$$

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) \quad (2)$$

여기서, σ_v , σ_h 는 연직 및 수평 응력, ν 는 포아송 비(Poisson's ratio), γ 는 암반의 평균 단위 중량 그리고 z 는 지표로부터 대상 지점까지의 깊이이다.

그러나 이러한 이론식에 의한 수평응력의 산정결과는 실측치와는 크게 다르다. 그 이유로서는 수직압에 의해 유도된 수평압이 유지되는 상황에서 상부지층이 유실된 경우와 지각운동 등으로 외적 수평압이 작용하는 경우 등 다양한 원인을 들 수 있다.

현재 국내에서는 주로 강원도, 경상북도, 전라남도 등지의 광산 개발지역에서 지하자원 채굴 및 갱도유지 문제와 관련하여 암반의 특성 및 현지암반 초기응력이 조사되어 왔다. 근래에 들어 지하양수발전소, 지하유류비축기지, 도로터널, 대도시 내 지하철 등의 건설이 증가하면서 현지초기응력의 측정평가도 점점 늘어가고 있다. 국내외에 여러가지 초기응력 추

세식이 발표되어 있지만 이러한 추세식은 그 범위가 넓고 분산이 크므로 추정식으로 사용할 수 없다. 그리고 이들 초기응력 추세식을 살펴보면 침식에 의한 영향은 반영시키지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 침식에 의한 영향을 반영하는 초기응력 추정식을 산정하고자 한다.

3. 수치해석을 이용한 지응력비 변화

본 연구에서는 PENTAGON^{3D}를 이용하여 암반등급 III등급인 암반을 대상으로 초기 지응력비가 2.0, 1.2, 1.0, 0.8, 0.5인 경우에 대하여 100 m, 200 m, 300 m, 400 m 침식된 후의 지응력비 변화에 대하여 지압변화를 계산하고 검토하였다.

3.1 해석조건

해석 조건으로는 균질한 횡등방성 암반의 폭과 높이가 1000 m와 500 m이며, 심도는 1000 m인 상태로 설정하였다. 수치해석에 적용된 지반 물성치는 암반등급 III에 속하는 화강암의 물성치이다. 암반에 대한 입력 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 수치해석 입력자료

암반 등급	단위중량 (tf/m^3)	전단강도 (tf/m^3)	내부마찰 각($^\circ$)	영율 E_1 (tf/m^3)	영율 E_2 (tf/m^3)	포아송 비 ν_1	포아송 비 ν_2	초기 지응력비 k_0
III	2.4	50	40	300,000	600,000	0.27	0.25	2.0, 1.2, 1.0, 0.8, 0.5

해석에 사용된 3차원 모델은 직육면체로서 상부지표면은 자유 경계조건, 측면과 하부는 각 면에 수직인 방향의 변위를 구속하는 변위 경계조건을 적용하였다.

3.2 해석결과

표 2는 횡등방성 암반에서 이방성을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우의 수치해석결과, 초기 지응력비가 2.0, 1.2, 1.0, 0.8, 0.5에 대해 100, 200, 300, 400 m 침식된 후의 응력의 차이이다.

표 2. 횡등방성 및 등방성 수치해석 결과 지응력의 차이

침식 심도	$k_0 = 2.0$		$k_0 = 1.2$		$k_0 = 1.0$		$k_0 = 0.8$		$k_0 = 0.5$	
	σ_h	σ_H	σ_h	σ_H	σ_h	σ_H	σ_h	σ_H	σ_h	σ_H
100 m	0.3%	0.2%	0.5%	0.4%	0.6%	0.5%	0.8%	0.6	1%	1%
200 m	0.6%	0.5%	1%	0.8%	1%	1%	2%	1%	3%	2%
300 m	1%	0.7%	2%	1%	2%	2%	3%	2%	5%	4%
400 m	1%	1%	2%	2%	3%	2%	4%	3%	7%	5%

횡등방성 암반의 수치해석에서 이방성을 고려한 경우가 이방성을 고려하지 않는 경우보다 응력이 크고 초기 지응력비가 작을수록, 또 침식되는 심도가 증가할수록 응력 오차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 그 차이가 대체로 5 % 이하이므로 초기 지응력비가 작으면서 침식이 많이 일어난 경우의 횡등방성 암반에서는 이방성을 고려해야 할 필요성이 있다. 표 3과 4는 횡등방성 암반에서 이방성을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우에 대한 수치해석을 통한 응력과 이론값과의 오차를 나타낸다.

표 3. 횡등방성 침식지반의 수치해석 결과와 이론값의 차이

침식 심도	$k_0 = 2.0$			$k_0 = 1.2$			$k_0 = 1.0$			$k_0 = 0.8$			$k_0 = 0.5$		
	σ_h	σ_v	σ_H	σ_h	σ_v	σ_H	σ_h	σ_v	σ_H	σ_h	σ_v	σ_H	σ_h	σ_v	σ_H
100 m	4%	6%	4%	3%	6%	3%	2%	6%	2%	1%	6%	1%	1%	6%	2%
200 m	15%	6%	15%	12%	6%	12%	11%	6%	11%	9%	6%	9%	3%	6%	2%
300 m	29%	7%	29%	25%	7%	24%	22%	7%	22%	19%	7%	18%	9%	7%	8%
400 m	48%	8%	47%	41%	8%	40%	38%	8%	36%	32%	8%	31%	17%	8%	15%

표 4. 등방성 침식지반의 수치해석 결과와 이론값의 차이

침식 심도	$k_0 = 2.0$		$k_0 = 1.2$		$k_0 = 1.0$		$k_0 = 0.8$		$k_0 = 0.5$	
	σ_h	σ_v	σ_h	σ_v	σ_h	σ_v	σ_h	σ_v	σ_h	σ_v
100 m	4%	5%	2%	5%	1%	5%	0.4%	5%	3%	5%
200 m	14%	6%	11%	6%	10%	6%	7%	6%	0.3%	6%
300 m	28%	7%	22%	7%	20%	7%	16%	7%	4%	7%
400 m	46%	8%	37%	8%	34%	8%	28%	8%	9%	8%

표에서 초기 지응력비가 작을수록 수치해석에 의한 응력값과 이론값과의 오차가 작게 나타나는 것을 볼 수 있고 침식되는 깊이가 증가할수록 응력의 오차도 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 횡등방성 암반에서 응력을 이론값과 비교해보면 이방성을 고려한 경우가 이방성을 고려하지 않는 경우보다 응력 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 그러나 그 차이가 크지 않으므로 심도가 깊고 지응력비가 작은 경우의 횡등방성 암반에서는 이방성을 고려해야 할 필요성이 있다.

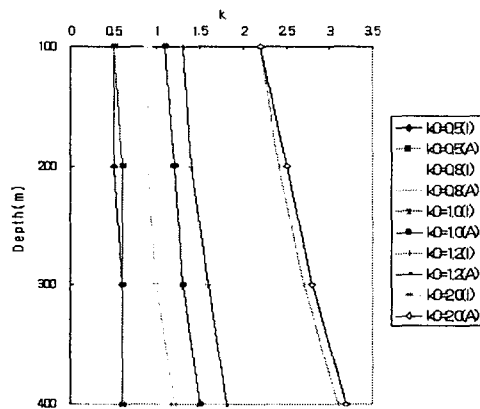


그림 1. 침식심도와 지응력비의 관계

그림 1은 초기 지응력비 2.0, 1.2, 1.0, 0.8, 0.5에 대해 침식된 후의 심도에 따른 지응력비의 변화이다. 그림에서 I는 이방성을 고려하지 않는 경우를 나타내며 A는 이방성을 고려한 경우를 나타낸다. 해석결과를 보면 횡등방성 암반에서 이방성을 고려할 때와 고려하지 않을 때 초기 지응력비는 침식 심도가 증가할수록 지응력비가 증가하며 침식심도가 작을수록 초기 지응력비에 수렴하는 것을 볼 수 있으며 이방성을 고려한 해석이 이방성을 고려하지 않는 해석에 비해 지응력비의 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

이상의 자료를 회귀분석하여 등방성 암반의 침식에 따른 지응력비 식을 산정하였다.

$$K = 0.5 + \frac{k_0 z_0 - 450}{z} \quad (3)$$

여기서, K 는 침식후의 지응력비, k_0 는 초기 지응력비, z_0 는 원심도 그리고 z 는 침식 후의 심도이다.

4. 결론

본 연구에서는 횡등방성 암반에서 이방성을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우에 대해 초기 지응력비가 침식에 의해 어떻게 변화하는지 알아보기 위해 수치해석적인 방법을 이용하여 침식에 따른 지응력비를 비교하였다.

횡등방성 암반에서 이방성을 고려할 때와 고려하지 않을 때의 수치해석 결과, 횡등방성의 영향은 전반적으로 크지 않았으나, 초기 지응력비가 작을수록 또 침식심도가 증가할수록 응력의 오차가 증가한다. 따라서 지응력비가 작고 심도가 깊은 경우에는 횡등방성을 고려하여야 할 것으로 판단된다. 지응력비는 초기지응력비가 클수록 또 침식되는 깊이가 증가할수록 이론값과의 차이가 증가한다. 침식 후의 지응력비는 심도가 깊어짐에 따라 초기 지응력비로부터 발산한다. 침식에 따른 지응력비 산정식을 제안하였다.

참고문헌

1. 문홍득, 1999, 수치해석에 의한 암반 내 초기응력의 영향인자 분석 연구, *진주대학교 공과대학 산업과학기술연구소보*, 7, 43-50
2. Amadei, B., 1982 Important of Anisotropy When Estimating and Measuring In Situ Stress in Rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 33.3. 293-325
3. Brown, E. T. and E. Hook, 1978, Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 15, 211-215
4. McCutcheon, W. R., 1982, Some elements of a theory for in-situ stress, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 19, 201-203
5. Heerden, W. L. V., 1983, Stress strain relations applicable to overcoring techniques in transversely isotropic rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 8.6, 277-282