

## 횡등방성 암반의 침식에 따른 초기응력비 변화의 수치해석 연구

최미진<sup>1)</sup>, 김원범<sup>2)</sup>, 양형식<sup>3)\*</sup>

### A Numerical Study on the Variation of Initial Stress Ratio by Erosion of Transversely Isotropic Rock Mass

Mi Jin Choi, Won Beom Kim and Hyung Sik Yang

**Abstract** Variation of horizontal to vertical stress ratio of transversely isotropic rock caused by erosion was studied by numerical analysis. Influence of transversely isotropic was less than 5% for isotropic case. Difference between stresses obtained by numerical analysis and theoretical solution was small when initial stress ratio was small and the difference increased as erosion depth increased. Stress ratios diverged from initial ones as depth increased. An equation to determine stress ratio considering erosion according to the analyses was suggested.

**KeyWords** Initial stress ratio, Transversely-isotropic, Erosion, Numerical analysis

**초 록** 침식에 따른 횡방성 암반의 초기응력비 변화를 수치해석적으로 구하여 등방성의 경우 및 이론해와 비교한 결과 횡등방성의 영향은 크지 않아 초기지응력비가 작고 침식심도가 깊을 때만 고려하는 것이 좋을 것으로 판단되었다. 수치해석에 의한 응력과 이론적인 값의 차이는 초기 지응력비가 클수록 또 침식되는 깊이가 증가할수록 증가하였다. 또 침식 후의 초기응력비는 심도가 깊어짐에 따라 초기 응력비로부터 발산하였다. 이를 감안하여 침식에 따른 초기응력비 산정식을 제안하였다.

**핵심어** 초기응력비, 횡등방성, 침식, 수치해석

## 1. 서 론

지하 암반 구조물의 안전한 설계와 안정성 평가에 있어서 현지 암반의 초기 응력 산정은 매우 중요한 요소이다. 암반의 초기응력비는 초기 응력상태를 나타내는 것으로서 터널이나 지하굴착에 의한 응력 재분배와 응력 집중현상의 인자이다.

초기응력비의 영향인자로는 암반의 심도와 암석의 종류, 암질, 주변 지형 등이 있으며, 현지 암반의 초기 응력은 중력에 의한 자체하중 뿐만 아니라 과거의 지각 운동, 지표의 퇴적이나 침식등의 작용으로 인해 부지마다 크게 달라진다.

또한 이들은 지반의 역학적 조건에 따라 변화하므로 지반거동 해석 시 중요한 요인이 되며(문흥득, 1999),

정확한 초기응력 산정을 위해서는 이방성도 고려되어야 한다(Heerden, 1983, Amadei, 1996).

실제로 암석의 경우 방향에 따라 탄성적 성질은 동일하지 않으며 특히 열리가 발달한 변성암 계열이나 층리구조가 발달한 경우 일정한 평면에 대칭하여 탄성적 성질이 일치하지만 다른 평면을 설정하였을 때는 탄성적 성질이 상이하다. 또는 일정한 축을 중심으로 대칭적으로 탄성적 성질이 일치하지만 다른 축을 설정하면 탄성적 성질이 상이한 경우를 흔히 볼 수 있다. 여기서 한 개의 좌표축을 중심으로 대칭적으로 탄성적 성질이 일치하는 경우를 횡등방성(Transversely isotropic)이라 부른다.

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON<sup>3D</sup>를 이용하여 지반의 초기 응력비가 침식에 따라 변화하는 정도를 알아보고 암반의 횡등방성이 이에 미치는 영향을 검토하였다. 또 침식 심도에 따른 초기응력비의 변화식을 산정하였다.

<sup>1)</sup> 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사과정

<sup>2)</sup> 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사과정

<sup>3)</sup> 정희원, 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

\*교신저자(Corresponding Author): hsyang@jnu.ac.kr

접수일: 2004년 9월 22일

심사 완료일: 2004년 10월 20일

**2. 암반의 초기응력 산정 및 국내·외의 초기응력 적용 실태**

**2.1 암반의 초기응력 산정 이론**

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.

$$\sigma_v = -\gamma \cdot z \tag{1}$$

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

여기서,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_h$  : 연직 및 수평 응력

$\nu$  : 포아송 비(Poisson's ratio)

$\gamma$  : 암반의 평균 단위 중량

$z$  : 지표로부터 대상 지점까지의 깊이이다.

그러나 식 (2)에 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.

**2.2 국내·외의 초기응력 적용 실태**

터널해석에서 암반내의 초기응력은 초기응력비의 형태로 적용된다. 70년대부터 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.

Table 1은 여러 학자들로부터 제시된 국내·외의 초기응력 추세식을 나타낸다.

이러한 추세식은 그 범위가 넓고 분산이 크므로 추세식으로 사용할 수 없다. 그리고 이들 초기응력 추세식을 살펴보면 침식에 의한 영향은 반영시키지 못하고 있는 실정이다.

**Table 1.** Equations for varitio of initial stress as a function of depth and their ratio

Author	Equation	Remark
Herget (1973)	$\sigma_{hav}^* = (8.16 \pm 0.54) + z(0.042 \pm 0.002)$ $\sigma_v = (1.88 \pm 1.23) + z(0.026 \pm 0.003)$	
Gay (1975)	$K = 0.45 + (248/z)$	
Worotniki and Denham (1976)	$\sigma_{hav}^* = 7.26 + z(0.0215 \pm 0.0028)$ $\sigma_v = 0.027z$ $K = 200/z + 0.80$	USA
Haimson (1978)	$\sigma_{hav}^* = 4.90 \pm 0.020z$ $\sigma_v = 0.025z$ $K = 200/z + 0.80$	Australia
Brown (1978)	$100/z + 0.30 \leq K \leq 1500/z + 0.50$	
Mc Cutchen (1982)	$K = 1.697/z(km) + 0.3$	
임한옥 (1984)	$0.2 + 80/z \leq K \leq 0.4 + 900/z$	
임한옥, 이정인 (1991)	$\sigma_{hav}^* = 2.78 + 0.0183(MPa)$ $\sigma_v = 1.36 + 0.0233z(MPa)$	USBM (150-800 m)
김정원 (1998)	$\sigma_{hav}^* = 11.29 + 0.248z$ $\sigma_v = 2.13 + 0.264z$ $0.4 + 15/z < K < 1.1 + 330/z$	CSIRO HI CELL

\* : hav=horizontal average

본 연구에서는 침식에 의한 영향을 반영하는 초기응력 추정식을 산정하고자 한다.

### 3. 수치해석을 이용한 초기응력비 변화

본 연구에서는 PENTAGON<sup>3D</sup>를 이용하여 암반등급 III등급인 암반을 대상으로 초기 응력비가 2.0, 1.2, 1.0, 0.8, 0.5인 경우에 대하여 100 m, 200 m, 300 m, 400 m 침식된 후의 응력비 변화에 대하여 지압변화를 계산하고 검토하였다.

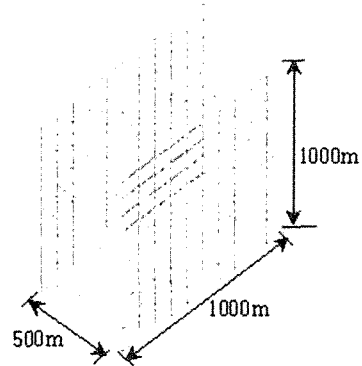


Fig. 1. Numerical model

#### 3.1 해석조건

해석 조건으로는 균질한 등방 및 횡등방성 암반의 폭과 높이가 1000 m와 500 m이며, 심도는 1000 m이며 절점수는 770개 요소수는 700개이다. 수치해석에 적용된 지반 물성치는 암반등급 III에 속하는 화강암의 물성치이다. 암반에 대한 입력 물성치는 Table 2와 같다. 파괴 조건식은 횡등방성 암반의 경우 Transversely-isotropic 조건식을 사용하였으며, 등방성의 경우 탄소성 해석인 Mohr-Coulomb 조건식을 사용하였다.

$E_1, E_2$ 는 각각 횡등방성 평면과 여기에 수직인 방향의 탄성계수이고,  $\nu_1, \nu_2$ 는 각각 횡등방성 평면에 평행과 수직으로 작용하는 응력에 대한 횡등방성 평면에서의 횡방향 변형률을 통해 구해지는 포아송비이다.

Fig. 1은 해석에 사용된 3차원 모델을 나타낸다. 경계 조건은 상부지표면은 자유경계조건, 측면과 하부는 각면에 수직인 방향의 변위를 구속하는 변위경계조건을 적용하였다.

#### 3.2 해석결과

Table 3과 4 그리고 Table 5는 횡등방성 암반에서 이방성을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우의 수치해석 결과로서 초기 응력비가 2.0, 1.2, 1.0, 0.8, 0.5에 대해 100 m, 200 m, 300 m, 400 m 침식된 후의 응력과 오차이다.

횡등방성 암반의 수치해석에서 이방성을 고려한 경우가 이방성을 고려하지 않는 경우보다 응력이 크고 초기 응력비가 작을수록, 또 침식되는 심도가 증가할수록 응력 오차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 그 차이가 대체로 5% 이하이거나 초기 응력비가 작으면서 침식이 많이 일어난 경우의 횡등방성 암반에서는 이방성을 고려해야 할 필요성이 있다. Table 6과 7은 횡등방성 암

Table 2. Input data for numerical analysis

Rock class	Unit weight ( $tf/m^3$ )	Cohesion ( $tf/m^2$ )	Friction Angle ( $^\circ$ )	Young's Modulus $E_1$ ( $tf/m^2$ )	Young's Modulus $E_2$ ( $tf/m^2$ )	Poisson's Ratio $\nu_1$	Poisson's Ratio $\nu_2$	Initial stress ratio $K_0$
III	2.4	50	40	300,000	600,000	0.27	0.25	2.0, 1.2, 1.0, 0.8, 0.5

Table 3. Calculated stresses for eroded ground (transversely isotropic)

Erosion depth	$K_0=2.0$			$K_0=1.2$			$K_0=1.0$			$K_0=0.8$			$K_0=0.5$		
	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$
100 m	4485	2040	4481	2661	2040	2657	2205	2040	2201	1749	2040	1745	1065	2040	1061
200 m	4411	1800	4403	2587	1800	2579	2131	1800	2123	1675	1800	1667	991	1800	983
300 m	4336	1560	4324	2512	1560	2500	2056	1560	2044	1600	1560	1588	916	1560	904
400 m	4262	1320	4245	2438	1320	2421	1982	1320	1965	1526	1320	1509	842	1320	825

**Table 4.** Calculated stresses for eroded ground (isotropic)

Erosion depth	$K_0=2.0$			$K_0=1.2$			$K_0=1.0$			$K_0=0.8$			$K_0=0.5$		
	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$
100 m	4471	2040	4471	2647	2040	2647	2191	2040	2191	1735	2040	1735	1051	2040	1051
200 m	4383	1800	4383	2559	1800	2559	2103	1800	2103	1647	1800	1647	963	1800	963
300 m	4294	1560	4294	2470	1560	2470	2014	1560	2014	1558	1560	1558	874	1560	874
400 m	4205	1320	4205	2381	1320	2381	1925	1320	1925	1469	1320	1469	785	1320	785

**Table 5.** Calculated initial stress difference between transversely isotropic and isotropic rocks

Erosion depth	$K_0 = 2.0$		$K_0 = 1.2$		$K_0 = 1.0$		$K_0 = 0.8$		$K_0 = 0.5$	
	$\sigma_h$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
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%

**Table 6.** Differences between calculated and theoretical stresses for eroded ground (transversely isotropic)

Erosion depth	$K_0 = 2.0$			$K_0 = 1.2$			$K_0 = 1.0$			$K_0 = 0.8$			$K_0 = 0.5$		
	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_v$	$\sigma_H$
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%

**Table 7.** Differences between calculated and theoretical stresses for eroded ground (isotropic)

Erosion depth	$K_0 = 2.0$		$K_0 = 1.2$		$K_0 = 1.0$		$K_0 = 0.8$		$K_0 = 0.5$	
	$\sigma_h$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_H$	$\sigma_h$	$\sigma_H$
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%

반에서 이방성을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우에 대한 수치해석을 통한 응력과 식 (1)과 식 (2)를 이용한 응력과의 오차를 나타낸다.

표에서 초기 응력비가 작을수록 수치해석에 의한 응력값과 이론값과의 오차가 작게 나타나는 것을 볼 수 있고 침식되는 깊이가 증가할수록 응력의 오차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 횡등방성 암반에서 응력을 이론값과 비교해보면 이방성을 고려한 경우가 이방성

을 고려하지 않는 경우보다 응력 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 그러나 그 차이가 크지 않으나 침식심도가 깊고 초기 응력비가 작은 경우의 횡등방성 암반에서는 이방성을 고려해야 할 필요성이 있다.

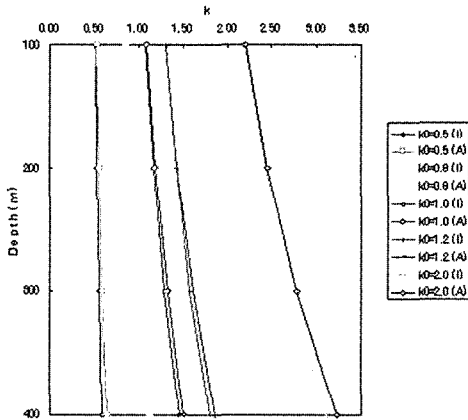
Table 8과 9, Fig. 2는 초기 응력비 2.0, 1.2, 1.0, 0.8, 0.5에 대해 침식되는 심도에 따른 초기응력비의 변화이다.

**Table 8.** Ratio of horizontal to vertical stress after erosion (transversely isotropic)

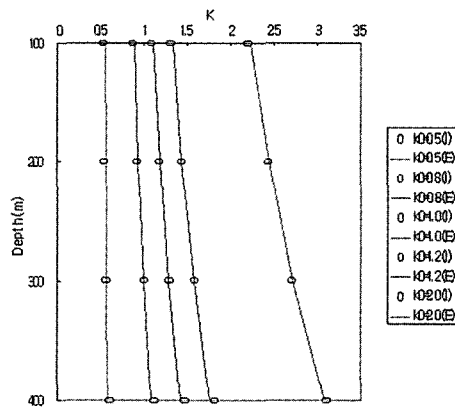
Erosion depth	$K_0=2.0$	$K_0=1.2$	$K_0=1.0$	$K_0=0.8$	$K_0=0.5$
100 m	2.2	1.3	1.1	0.9	0.5
200 m	2.5	1.4	1.2	0.9	0.6
300 m	2.8	1.6	1.3	1.0	0.6
400 m	3.2	1.8	1.5	1.2	0.6

**Table 9.** Ratio of horizontal to vertical stress after erosion (isotropic)

Erosion depth	$K_0=2.0$	$K_0=1.2$	$K_0=1.0$	$K_0=0.8$	$K_0=0.5$
100 m	2.2	1.3	1.1	0.9	0.5
200 m	2.4	1.4	1.2	0.9	0.5
300 m	2.7	1.6	1.3	1.0	0.6
400 m	3.1	1.8	1.5	1.0	0.6



**Fig. 2.** Relationship between depth and initial stress ratio



**Fig. 3.** Relationship between depth and initial stress ratio

Fig. 2에서 I는 이방성을 고려하지 않는 경우를 나타내며 A는 이방성을 고려한 경우를 나타낸다.

해석결과를 보면 횡등방성 암반에서 이방성을 고려할 때와 고려하지 않을 때 초기응력비는 침식 심도가 증가할수록 응력비가 증가하며 침식심도가 작을수록 초기응력비에 수렴하는 것을 볼 수 있으며 이방성을 고려한 해석이 이방성을 고려하지 않는 해석에 비해 초기응력비의 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

이상의 자료를 회귀분석하여 등방성 암반의 침식에 따른 초기응력비 식을 산정하였으며, 횡등방성 암반의 경우 응력 오차가 대체로 5% 미만이므로 본 연구에서는 등방성 암반의 산정식을 사용하여도 무방할 것으로 사료된다.

Fig. 3은 본 연구에서 산정한 식과 등방성으로 가정하

였을때의 침식 심도에 따른 축압계수 변화 그래프이다. 그림에서 알수 있듯이 본 연구에서 수치해석을 통해 산정한 식과 큰 차이가 나타나지 않음을 확인 할 수 있다.

$$K = 0.5 + \frac{K_0 z_0 - 450}{z} \tag{3}$$

여기서,  $K$  : 침식후의 초기 응력비

$K_0$  : 침식전의 초기 응력비

$z_0$  : 원심도

$z$  : 침식 후의 심도

#### 4. 결 론

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 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 횡등방성 암반에서 이방성을 고려할 때와 고려하지 않을 때의 수치해석 결과, 횡등방성의 영향은 전반적으로 크지 않았으나, 초기 지응력비가 작을수록 또 침식심도가 증가할수록 응력의 차이가 증가한다.
- 2) 지응력비가 작고 침식심도가 깊은 경우에는 응력차이가 5% 이상이 되므로 횡등방성을 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- 3) 응력비는 초기응력비가 클수록 또 침식되는 깊이가 증가할수록 이론해를 이용한 응력값과의 차이가 증가한다.
- 4) 침식 후의 초기응력비는 심도가 깊어짐에 따라 초기응력비로부터 발산한다.
- 5) 침식에 따른 초기응력비 산정식을 제안하였다.

## 참고문헌

1. 문홍득, 1999, 수치해석에 의한 암반 내 초기응력의 영향인자 분석 연구, 진주대학교 공과대학 산업과학기술연구소보, 7, 43-50.
2. Heerden, W. L. V., 1983, Stress strain relations applicable to overcoring techniques in transversely isotropic rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 20.6, 277-282.
3. 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.
4. Brown, E. T. and E. HoEk, 1978, Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 15, 211-215.
5. McCutheen, W. R., 1982, Some elements of a theory for in-situ stress, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 19, 201-203.
6. 임한욱, 1984, 응력변화법에 의한 한반도 일부지역에서의 암반응력 측정에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
7. 임한욱, 이정인, 1991, 심도에 따른 암반 내 초기응력의 변화와 그 경향성, 한국암반공학회, 1, 91-101.
8. 김정원, 1998, CSIRO HI Cell을 이용한 초기응력 측정 및 해석에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위논문.

### 최 미 진

2003년 조선대학교 공과대학 자원공학과  
공학사

Tel: 062-530-0824  
E-mail: wangle@hanmail.net  
현재 전남대학교 공과대학 자원공학과 석사과정

### 양 형 식

1979년 서울대학교 자원공학과 학사  
1981년 서울대학교 자원공학과 석사  
1987년 서울대학교 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724  
E-mail: hsyang@jnu.ac.kr  
현재 전남대학교 건설지구환경공학부  
교수

### 김 원 범

2002년 전남대학교 공과대학  
자원공학과 공학사  
2004년 전남대학교 공과대학  
자원공학과 공학석사

Tel: 062-530-0824  
E-mail: rockyman@krpost.net  
현재 전남대학교 공과대학 자원공학과  
박사과정