

한반도 3차원 지중응력과 이를 고려한 터널해석에 대한 연구 Korean Three Dimensional In-situ stresses and Tunnel Analysis Considering These Stresses

김동갑¹⁾, Dong-Gab Kim, 박종관²⁾, Jong-Kwan Park, 김수정³⁾, Su-Jeong Kim

¹⁾ (주)경성엔지니어링 상무이사, General Manager, Gyung-Sung Engineering Co., Ltd.

²⁾ 서울산업대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Seoul Nat. Univ. of Tech.

³⁾ 현대엔지니어링 과장, Lead Engineer, Hyundai Engineering Co., Ltd.

개요(SYNOPSIS) : The magnitude and the orientation of in-situ stresses contribute to ground displacement and stresses in the field of underground space. This paper investigates in-situ stresses at various depth on the basis of 392 data which were determined by over-coring and hydro-fracturing test methods in the Korea peninsula. The result shows that in-situ stress distribution are more or less non-uniform through the Granite and Gneiss sub-area, and that the K-value in the Volcanic sub-area are below 1 at the deep depth. Also, the result of three dimensional numerical analyses of tunnel shows that the direction and magnitude of displacement around tunnel are much effected by the stress difference between the maximum and the minimum horizontal stress.

주요어(Key words) : In-situ stress, Orientation of in-situ stress, K-value, 3-D numerical analysis

1. 서론

한반도 중남부의 지중응력 분포에 관한 연구는 1980년대부터 응력해방법에 의한 활발한 연구가 시작되었다(Lim et al., 1984, 1986, 1995). 이러한 지중응력 초기의 연구는 주로 광산의 개발과 관련하여 응력해방법에 의하여 이루어졌으며 시험회수가 제한되었다. 1990년대 중반부터 도입된 수압파쇄시험에 의한 지중응력의 측정은 시험의 간편성으로 인하여 다수의 시험이 시행되었고 이들 자료로부터 한반도 중남부의 지중응력이 비교적 상세히 발표되었다. 최근에는 최성웅(1997)은 한반도 중남부를 대상으로 하는 심도에 따른 최대수평응력을 나타내었다. 본 연구에서는 국내에서 측정된 392여회의 지중응력 측정 자료를 바탕으로 3차원적인 지중응력을 지반 특성에 따라 분류하여 그 상관성을 검토하고, 이를 터널해석 적용하여 그 영향을 평가하고자 한다.

2. 한반도 중남부의 초기지중응력분포

2.1 초기지중응력

암반내의 초기지중응력은 깊이, 지형 및 지질구조의 영향을 받으며 일반적으로 깊이의 함수로 나타내

고 있다. 임의의 심도 z 에서의 수직응력 σ_v 는 식(1)과 같이 나타내며 평균수평응력 σ_{Ha} 는 수직응력에 대한 비 K 로 식(2)로 나타내고 있다.

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

$$\sigma_{Ha} = K \cdot \sigma_v \quad (2)$$

여기서, γ 는 암의 단위중량이며 K 는 축압계수이다. K 값은 방향에 따라 σ_H (최대수평응력), σ_h (최소수평응력) 및 σ_{Ha} (평균수평응력)에 따라 아래와 같이 정의한다.

$$K_H = \frac{\sigma_H}{\sigma_v}, \quad K_h = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}, \quad K_{Ha} = \frac{\sigma_{Ha}}{\sigma_v} \quad (3)$$

기반암에서의 K 는 지반조건에 따라 다양한 값을 가지며 Brown과 Hoek(1978)는 대체로 수직응력은 깊이 z 에 따라 $0.027z$ (Mpa) 그리고 평균수평응력의 범위는 $(100/z + 0.3)\sigma_v$ 에서 $(1500/z + 0.5)\sigma_v$ 사이로 나타내었다. 최성웅(1997)은 수압파쇄시험을 통하여 한반도 지중응력 분포방향을 발표하였으며 Lim와 Lee(1995)는 한반도에 대한 지중응력에 대하여 수직응력, σ_v 은 $0.233+0.024z$, 평균수평응력, σ_{Ha} 은 $1.858+0.018z$ (OC)와 $2.657+0.032z$ (HF)으로 나타내었다.

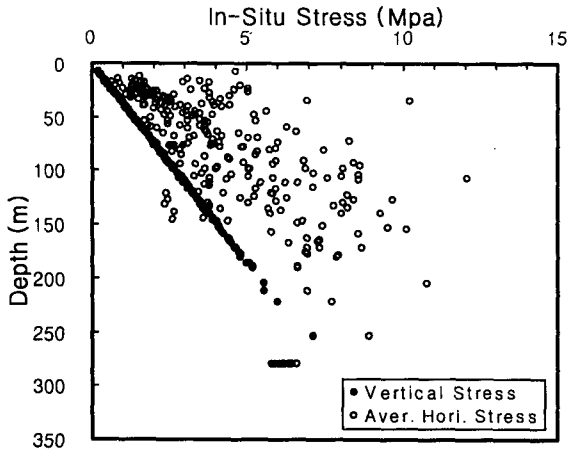
지중응력은 여러 가지 요인에 의하여 영향을 받는다. 그중에서도 원지반의 지중응력은 중력과 지구조적 응력(Tectonic Stress)의 영향을 가장 크게 받으며 지구조적응력의 영향을 받는 환경은 정단층계($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$), 수평변위단층계($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$) 및 역단층계($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$)로 구분된다.

2.2 한반도 중남부의 지중응력분포

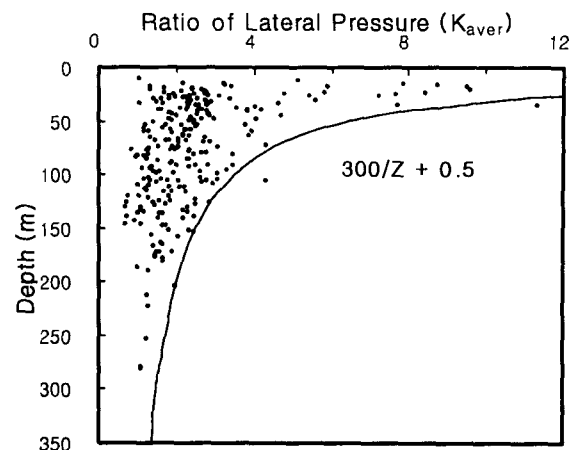
한반도 중남부의 지중응력분포를 확인하기 위하여 지금까지 측정된 392개의 자료를 바탕으로 지역별 지중응력 분포특성을 검토한다. 지중응력에 대한 자료는 수압파쇄시험과 응력해방법에 의하여 측정되었다. 수압파쇄시험법에 의한 측정치는 주로 도로터널 및 지하저장시설 등으로서 구조물 건설 지역으로 측정 최대 심도 309m정도에 해당된다. 도로터널의 경우에는 대부분 100m이내의 심도에서 시행된 것이 많다. 응력해방법에 의한 측정치는 지하발전소 및 광산 등에서 측정된 것으로, 시험 심도는 최대 약800m정도로써 수압파쇄법에 의한 것 보다 비교적 깊은 심도에서 시행되었으나 측정빈도가 적음으로 인하여 315m 심도까지의 측정 자료를 대상으로 하였다.

2.2.1 심도별 지중응력의 분포

측정된 지중응력은 지반의 종류와 지반 구조적 특성을 고려하여, (1) 변성암 및 화강암지역, (2) 세일, 사암 및 석회암으로 구성된 퇴적암지역 그리고 (3) 안산암 및 응회암으로 구성된 화산암지역으로 분류하여 지중응력의 분포특성을 파악하였다. 그림 1은 변성암지역과 화강암지역에서 측정된 것이다. 수평응력의 분산이 심하며 K 의 상한은 $300/z+0.5$ 정도이다. 그림 2는 경남, 경북, 대구, 부산 및 강원도의 사암, 세일 및 석회암 분포지역으로서 퇴적암지역에서 측정된 것이다. 수평응력의 분산도가 적으며 측정심도에서 K 의 상한은 $400/(z+70)+0.5$ 이다. 그림 3은 경남과 전남의 안산암 및 응회암 분포지역으로서 화산암지역에서 측정되었다. 심도 150m 이상에서는 수평응력이 수직응력보다 작아지는 경향이 있으며 심도 150m 이하에서는 분산되어 나타난다. 심도 150m 지점 부근에서 측정된 일부자료를 제외하면 K 의 상한은 $200/z+0.5$ 이다.

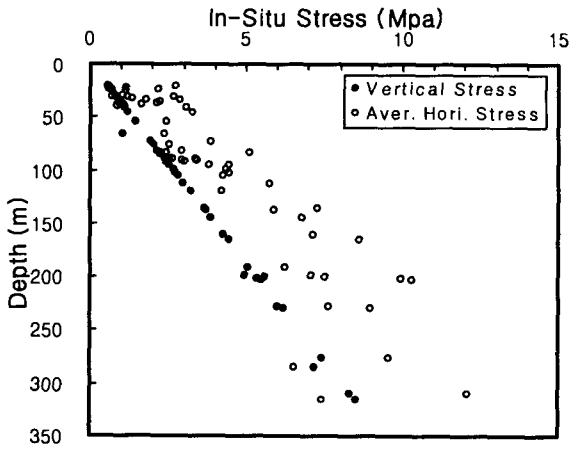


(a) 심도별 수직응력 및 평균수평응력 분포

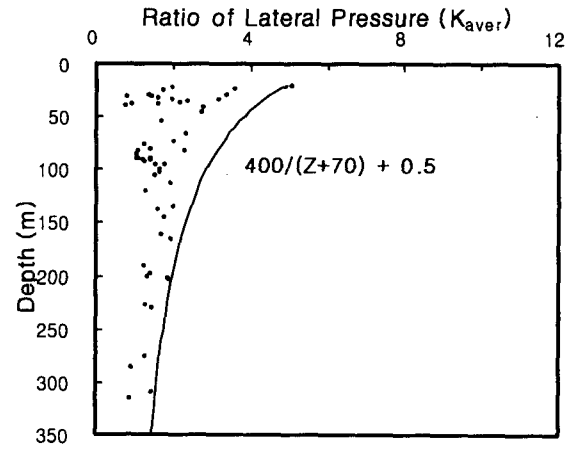


(b) 심도별 K 값의 분포범위

그림 1. 변성암 및 화강암 지역의 지중응력 분포

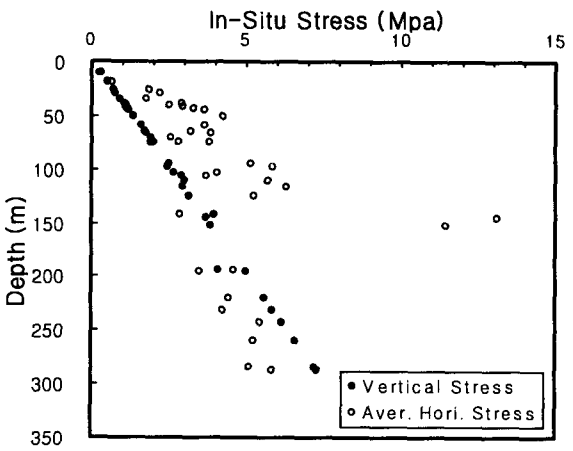


(a) 심도별 수직응력 및 평균수평응력 분포

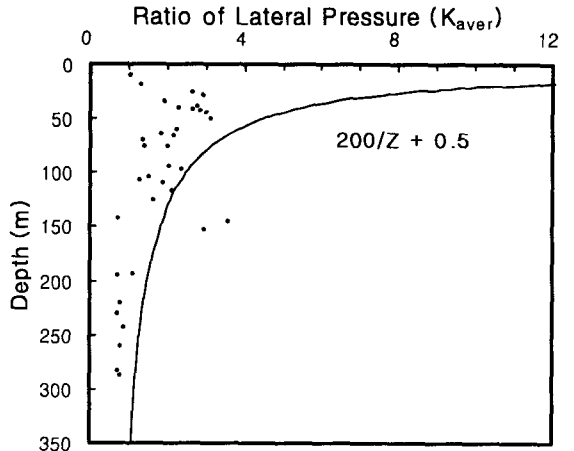


(b) 심도별 K 값의 분포범위

그림 2. 퇴적암 지역의 지중응력 분포



(a) 심도별 수직응력 및 평균수평응력 분포



(b) 심도별 K 값의 분포범위

그림 3. 화산암 지역의 지중응력 분포

한반도 전체의 지중응력은 그림 4와 같다. 수직응력은 Brown과 Hoek이 제안한 $\sigma_v = 0.027z$ 와 유사하다. 수평응력의 분포는 기존에 국내에서 연구된 Lim(1995) 및 Choi(1997)의 범위내 있으며 앞으로 깊은 심도에서 많은 측정자료가 추가되어져야 할 것으로 판단된다. 최대 및 최소수평응력의 비(σ_H / σ_h)는 1~2 범위에 집중되며 최대 2.6을 나타낸다. K 의 상한은 $300/z + 0.5$ 로서 Brown과 Hoek이 제안한 $1500/z + 0.5$ 보다 적은 범위에 분포한다. 그러나 하한 값은 심도에 무관하게 최소 0.67을 나타낸다.

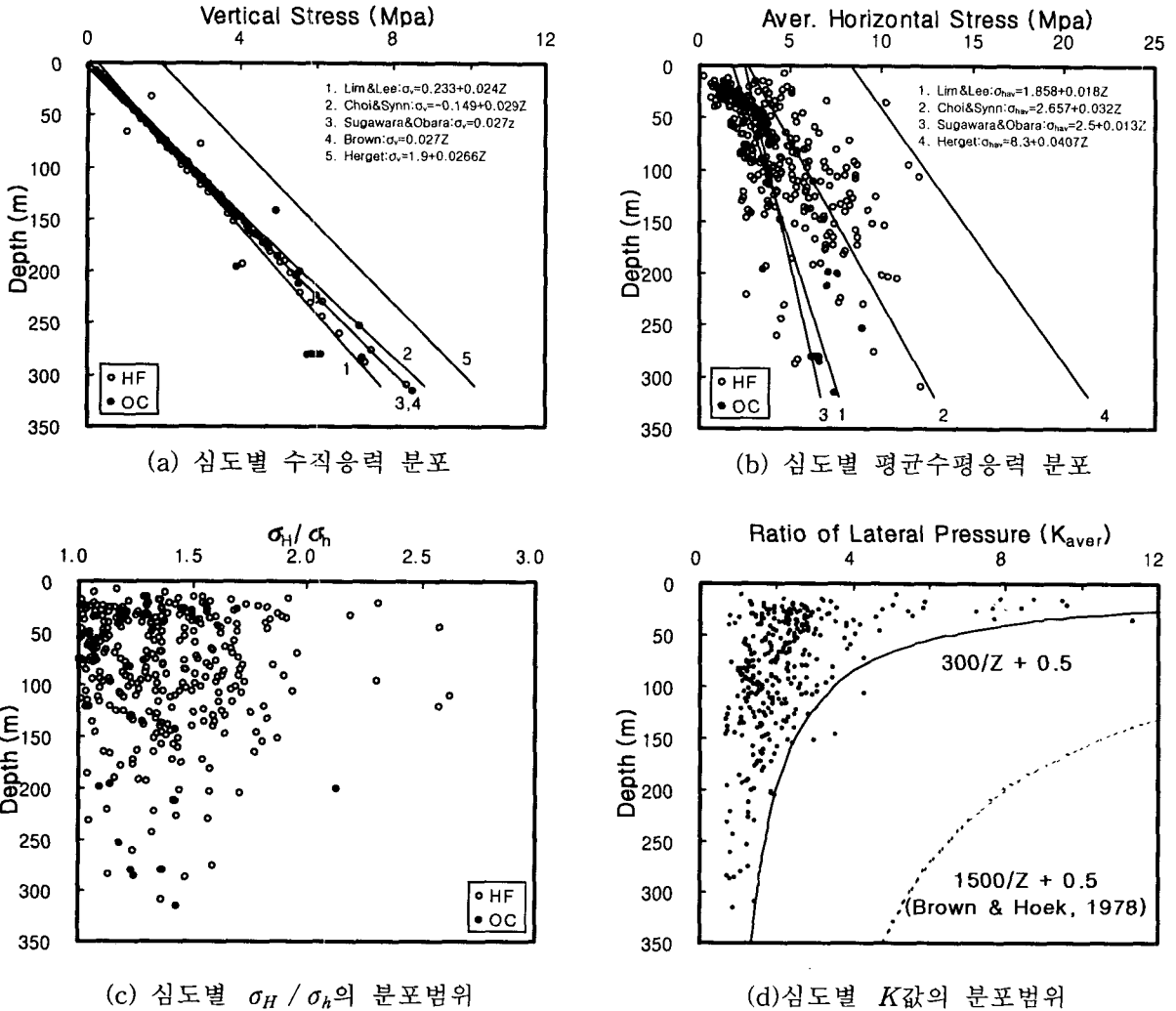


그림 4. 한반도 중남부 지역의 지중응력 분포

2.2.2 지중응력의 분포방향

지중응력의 분포방향은 일반적으로 최대수평응력의 분포방향을 기준으로 한다. σ_v , σ_H 및 σ_h 를 한 지점에 원의 크기 및 형태로 응력 환경에 따라 구분할 수 있다. 지중응력의 방향은 현재의 지형과 지구구조적인 영향에 의하여 지배되며 심도가 깊을수록 지형의 영향을 적게 받게된다. 그림 5는 지형의 영향을 비교적 적게 받는 100m 이상의 심도에서의 측정치(121개소)를 기준으로 유사한 방향과 크기를 가진 자료를 평균을 취하여 도시하였다.

대부분 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 인 역단층계의 응력상태를 보인다. 수평변위단층계는 150m이상 심도에서의 울진~충주, 전주~진주 구간에서 확인되며 100~150m 심도에서는 양구, 의왕, 평택, 광주, 여수 및 밀양 등의 지역에서 산발적으로 분포한다. 정단층계는 황성, 여수, 대구 및 울산 지역으로서 지구구조와 관계

되는 것으로 판단된다. 분포방향은 다소 불규칙하며 최대수평응력을 기준으로 서울~춘천 구간은 북서-남동, 춘천 북동부에서는 동-서, 서울-평택 구간은 동-서, 충주-청주 구간은 북서-남동, 강릉-울진 구간에서는 남북 및 동서, 대구-부산구간에서는 울산부근을 제외하면 대체로 북서-남동, 광주-전주-진주에서는 북동-남서 방향이 우세하다.

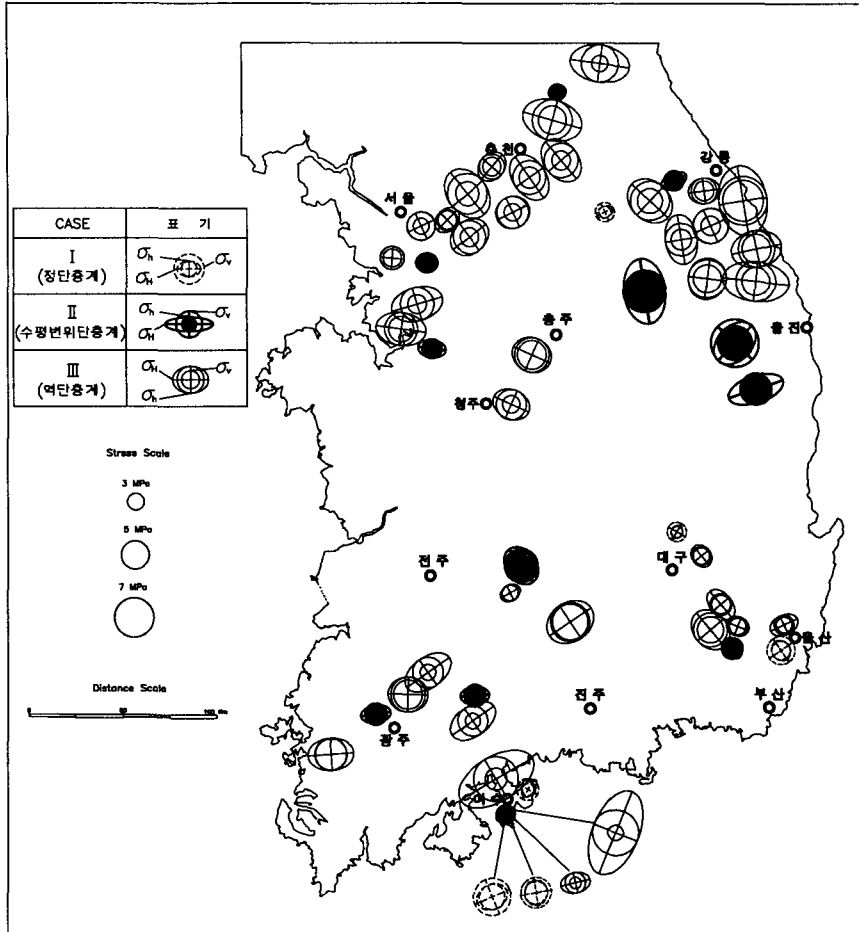


그림 5. 지중응력 분포방향

3. 3차원 지중응력을 고려한 해석

3.1 3차원 수치해석 조건

본 연구에서는 3차원 지중응력이 터널의 응력과 변위에 미치는 영향을 규명하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 해석단면은 최근 국내에서 시공중인 고속도로의 2차선 터널단면으로 폭 13m와 높이 8m의 타원형으로 하였으며, 유한차분법을 이용한 수치해석 프로그램인 FLAC3D(Itasca consulting Group, Inc.)를 사용하였다. 지반은 13,000여개의 요소로 이루어진 3차원 연속체로 모델링 하였으며, 응력-변위 특성은 탄소성(Mohr-Coulomb)모델을 사용하였다. 경계면에서 발생하는 구속효과를 최대한 배제하기 위하여 터널 천단 및 하반에서 상하 3D이상, 좌우측벽부 3D이상 떨어진곳에 경계면을 두었다.

해석시 적용된 암반은 경암으로 지보패턴은 슛크리트에 의한 보강만 고려하였다. 굴착형태 및 굴착단계는 전단면 굴착으로서 1회 굴진장은 3.0m, 그리고 전체 굴진장은 해석시 굴착 시점부의 구속효과 및 종점부의 막장효과등을 고려하여 69m를 적용하였다. 3차원 해석시에 적용된 지반정수는 표 1과 같다.

표 1. 해석에 사용된 지반정수 및 보강재의 물성치

구 분	종 류	적 용 치	구 분	종 류	적 용 치
원지반 (암반)	탄성계수 (t/m^2)	800,000	숏크리트	포아슨비	0.20
	포아슨비	0.22		탄성계수 (t/m^2)	1,000,000
	점 착 력 (t/m^2)	200.0			
	내부마찰각 (°)	40.0			

3.2 해석 지중응력의 적용

해석은 터널의 토피고를 200m로 하고 축압계수 0.5, 1.0 과 2.0으로 가정하여 각각의 경우에 대하여 터널의 굴진방향과 주응력과의 경사를 30° 간격으로 6방향을 고려하여 모두 13가지 경우에 대하여 실시하였다. 각 경우에 대한 구분은 표 2와 같으며, 그림 6은 방향에 대한 정의를 나타내고 있다.

표 2. 축압계수와 지중응력방향에 따른 해석 경우

CASE (토피고200m)	축압계수(K) ($\sigma_H = \sigma_v, \sigma_h = K\sigma_v$)	지중응력방향 (각도 °)	CASE (토피고200m)	축압계수(K) ($\sigma_H = \sigma_v, \sigma_h = K\sigma_v$)	지중응력방향 (각도 °)
C-1-a	0.5	0	C-3-a	2.0	0
C-1-b	0.5	30	C-3-b	2.0	30
C-1-c	0.5	60	C-3-c	2.0	60
C-1-d	0.5	90	C-3-d	2.0	90
C-1-e	0.5	120	C-3-e	2.0	120
C-1-f	0.5	150	C-3-f	2.0	150
C-2	1.0	0			

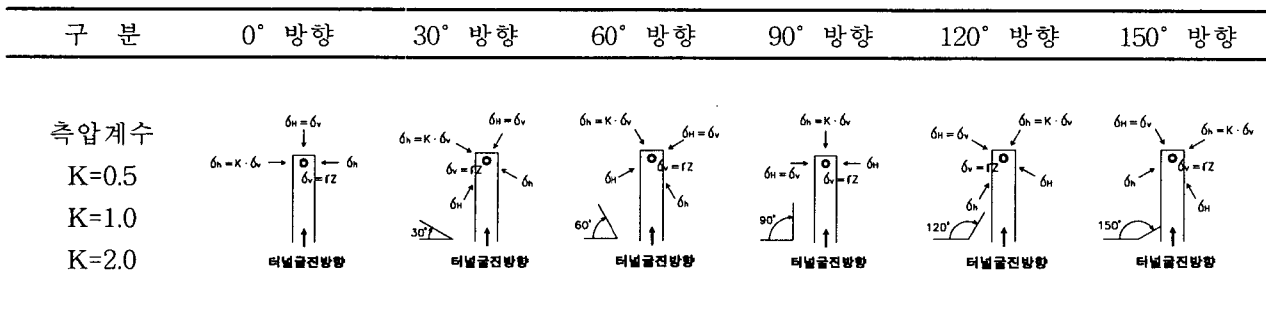


그림 6. 굴진방향에 대한 정의

3.3 해석결과

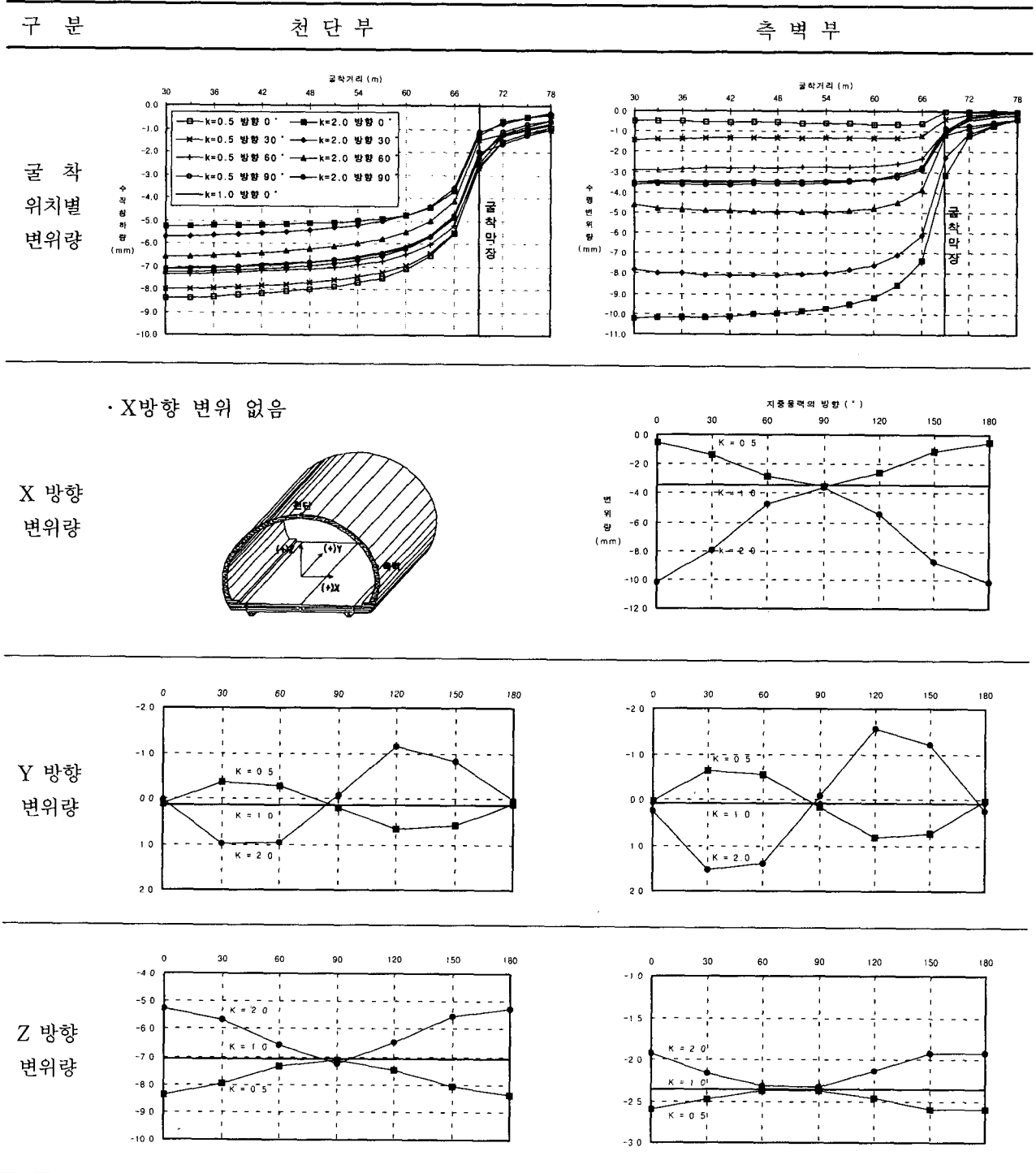
지중응력의 크기와 방향을 고려한 13가지 경우에 대해서 단계별 굴착에 따라 해석을 실시하였다. 표 3은 토피고 200m에 대한 지중응력의 크기와 방향에 따른 천단 및 측벽부의 수직침하량, 수평변위량, x, y, z방향에 대한 변위를 나타낸 것이다.

축압계수 K=0.5의 경우 천단부의 수직침하량(Z)은 지중응력의 방향이 0° ~ 90° 으로 변화할 때 차츰 감소하다가 90° ~ 180° 으로 변화할 때 다시 증가하는 반면 측벽부의 수평변위량(X)은 수직침하 경향과

는 반대로 증가 후 다시 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 터널 종방향으로의 변위량(Y)는 $0^\circ \sim 180^\circ$ 으로 변화할 때 천단 및 측벽에서 90° 의 주기를 가지고 증가와 감소 및 변위방향의 전환이 발생한다.

측압계수 $K=2.0$ 의 경우 천단부의 수직침하량(Z)은 지중응력의 방향이 $0^\circ \sim 90^\circ$ 으로 변할 때 차츰 증가하다가 $90^\circ \sim 180^\circ$ 으로 변화할 때 다시 감소하며, 측벽부의 수평변위량(X)은 감소 후 증가하는 것으로 나타났다. 터널 종방향으로의 변위량(Y)은 $K=0.5$ 의 경우와 경향은 비슷하나 정반대방향으로의 변위경향을 나타냈다. 측압계수 $K=1.0$ 의 경우에는 $K=0.5$ 의 90° , $K=2.0$ 의 90° 와 수직침하량 및 수평 변위량이 비슷한 크기를 나타내는 것으로 나타났다.

표 3. 천단 및 측벽 변위



4. 결론

본 연구에서는 국내에서 측정된 지중응력의 지반특성에 따른 비교 및 분포경향을 파악하고 터널 해석 시 3차원 지중응력을 고려하는 경우의 암반거동에 대한 연구를 실시하였으며 그 결과에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 수평응력은 변성암과 화강암에서의 분산도가 매우 심하며 퇴적암에서는 비교적 분산 정도가 적은 편이다. 화산암의 경우에는 심도 150m이상에서 수평응력이 수직응력 보다 작아진다. 최대/최소수평응력비는 대체로 1~2사이에 분포한다.
2. 수평/수직응력비(K)는 변성암과 화강암, 퇴적암, 화산암에서 분포범위가 다르다. 대표적인 분포 상한 값은 $300/z+0.5$ 이며 하한 값은 명확하지 않다.
3. 응력계는 역단층계가 우세하며 수평변위단층계는 분산되지만 깊은 심도에서는 충주~울진, 무주에서 우세하다. 정단층계는 횡성, 대구, 울산, 여수 구간에 제한적으로 분포한다.
4. 3-D 해석에 의하면 K 의 크기에 따라 최대 변형량이 발생하는 위치가 다르다. 지중응력의 방향에 따라 3차원적 변형이 발생하여 굴착방향 혹은 굴착반대 방향으로의 변형이 발생한다.

참고문헌

1. 최성웅(1997), "현지암반 초기지압의 분포특성 및 암반터널설계에의 적용", 터널과 지하공간, 한국암반 공학회, Vol. 7, pp.323-333.
2. Amadei, B. and Stephansson, O.(1997), "Rock Stress and Its Measurement", Chapman & Hall, pp.1-323.
3. Brown, E. T. and Hoek, E.(1978), "Trends in Relationships between Measured In-situ Stresses and Depth", Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 15, pp.211-215.
4. Choi, S. O. and Shin, H. S.(1997), "Application of In-situ Stresses Measured by Hydraulic Fracturing to a Tunnel Design in Korea", Proc. Int. Symp. on Rock Stress, Japan, pp.539-543.
5. Herget, G.(1973), "Variation of Rock Stresses with Depth at a Canadian Iron Mine", Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. 10, pp.37-51.
6. Lim, H. U., Kim, W. S. and Suh, B. S.(1984), "A study on Rock Stress Measurements around Excavated Cavity and Rock Bolt to Reinforce Supporting", Jour. of the Korean Inst. of Mineral and Mining Engineers, 21, pp.289-297.
7. Lim, H. U. and Lee, C. I.(1986), "In-situ Measurements of Rock by Stress Relief Method at some Locations in Korea", Pro. of the Inter. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1-3 September, pp.561-568.
8. Lim, H. U. and Lee, C. I.(1995), "Fifteen Years Experience on Rock Stress Measurements in South Korea", Int. Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth, Japan, pp.7-12.
9. Sugawara, K. and Obara, Y.(1995), "Rock Stress and Rock Stress Measurements in Japan, Proc. Int. Workshop in Rock Stress Measurement at Great Depth", Tokyo, Japan, 8th ISRM Cong., pp.1-6.