

한반도 3차원 지중응력의 분포와 이를 고려한 터널해석에 대한 연구

Three Dimensional In-situ Stress Distribution in the Southern Korean Peninsula and Its Application in Tunnel Analysis

김 동 갑*¹ Kim, Dong-Gab

박 종 관*² Park, Jong-Kwan

Abstract

The measurement of in-situ stress is essential to estimate the ground displacement and the stress distribution of a tunnel and an underground structure. In this study, the in-situ stress distribution of the Southern Korean peninsula was re-evaluated by the new 380 in-situ data which were determined by overcoring and hydrofracturing methods, and the three-dimensional numerical analysis of tunnelling was performed. The results of in-situ stress distribution show that the distribution of horizontal stress tends to be more irregular in metamorphosed(gneiss) and granite areas than in sedimentary and volcanic areas. The ratio of horizontal to vertical stresses(K-value) in volcanic area is less than 1 below the depth of 150m. The direction and magnitude of three dimensional in-situ stresses were shown simultaneously in a figure for the first time in Korea. The three-dimensional numerical analysis of tunnelling indicates that the orientation and magnitude of displacement around a tunnel are controlled mainly by the difference between the maximum and minimum horizontal stresses.

요 지

지중응력의 측정은 터널 및 지하구조물의 변위와 응력분포를 예측하는데 중요하다. 본 연구에서는 남부 한반도 지역의 지중응력 분포를 응력해방법과 수압파쇄법으로 측정된 새로운 380개의 자료를 통하여 재평가와 이를 고려한 삼차원 터널해석을 실시하였다. 지중응력분포의 결과에 의하면 변성암과 화강암지역의 수평응력분포는 퇴적암과 화산암의 분포에 비하여 불규칙한 경향을 보이고 있다. 화산암 지역에서는 수직응력에 대한 수평응력의 비(측압계수, K)는 150m 깊이 이상 심도에서 1보다 작다. 또한, 국내에서는 처음으로 측정된 지중응력에 대한 삼차원 방향과 크기를 동시에 그림으로 나타내었다. 삼차원 터널 해석에 의하면, 터널 주변의 변위에 대한 방향과 크기는 최대수평응력과 최소수평응력의 차이에 의하여 주로 영향을 받고 있다.

Keywords : 3-D numerical analysis, In-situ stress, K-value, Orientation of in-situ stress

1. 서 론

한 지역의 지중응력(in-situ stress) 측정을 통해 작성된 지중응력도(in-situ stress map)는 터널과 지하구조물

의 건설, 특정 활성단층의 향후 운동방향예측 및 원자력 발전소와 핵폐기물저장소의 안정성확보 등에 광범위하게 이용된다. 이러한 중요성에도 불구하고 한반도에서의 지중응력 측정은 1980년대 중반부터 시작되었

*1 정희원, (주)경성엔지니어링 상무이사 (Member, General Manager, Gyung-Sung Engrg. Co., Ltd., dgab1010@hotmail.com)

*2 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Seoul Nat. Univ. of Tech.)

다. 초기의 연구(Lim et al., 1984, 1986, 1995)는 광산개발과 관련하여 응력해방법에 의하여 이루어졌으며 시험회수가 제한되었다. 1990년대 중반부터 국내에 수압파쇄시험에 의한 지중응력 측정법이 도입되면서 한반도 중남부의 지중응력이 비교적 상세히 해석된 바 있다(최성웅, 1997). 이 논문에서는 70개소의 국내지역에서 측정된 380여 회의 새로운 지중응력 자료를 바탕으로 3차원적인 지중응력 분포를 지반특성에 따라 분류하고, 그 상관성을 규명하고 기존의 결과와 비교하였다. 또한 국내에서는 처음으로 측정된 지중응력에 대한 삼차원 방향과 크기를 그림으로 나타내고자 한다. 지형의 영향을 비교적 적게 받는 150m 이상 심도에서의 측정치를 기준으로 측정지역별로 유사한 방향과 크기를 도시하였다.

지금까지는 일반적으로 터널지보공의 설계에 있어서 터널 굴진 방향의 거동에 대해서는 고려하지 않고 있으나 터널거동은 최대수평응력과 최소수평응력의 크기 및 방향에 영향을 받고 있다.

따라서, 본 논문에서는 두 방향의 수평응력비를 고려한 삼차원 터널해석을 실시하여, 지중응력 분포가 터널변위에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 초기지중응력

원지반 암반에서의 초기지중응력은 지형, 지질구조 및 심도의 영향을 받으며 깊이의 함수로 나타내고 있다. 임의의 심도 z 에서의 수직응력 σ_v 는 식 (1)과 같으며, 평균수평응력 σ_{Hav} 는 수직응력에 대한 비는 K (측압계수)로서 식 (2)와 같이 나타내고 있다.

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

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

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

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

기반암에서의 K 는 지반조건에 따라 다양한 값을 가지며 Brown과 Hoek(1978)는 대체로 수직응력을 깊이 z (m)에 따라 $0.027z$ (MPa), 그리고 평균수평응력의 범위는 $(100/z + 0.3)\sigma_v$ 에서 $(1500/z + 0.5)\sigma_v$ 사이로 나타내

었다. 한반도 지중응력 분포에 대하여 최성웅(1997)은 수압파쇄시험을 통하여 지중응력의 분포를 발표하였으며, Lim과 Lee(1995)는 한반도에 대한 지중응력에 대하여 수직응력, σ_v 은 $0.233 + 0.024z$, 평균수평응력, σ_{hav} 은 $1.858 + 0.018z$ (OC, 오버코아팅)와 $2.657 + 0.032z$ (HF, 수압파쇄)으로 나타내었다. 또한 신희순(1999)은 심도별 지중응력비의 분포에 대하여 나타낸 바가 있다.

지중응력은 여러 가지 요인에 의하여 영향을 받는다. 그중에서도 원지반의 지중응력은 중력과 지구조적응력(Tectonic Stress)의 영향을 가장 크게 받으며 지구조적응력의 영향을 받는 환경은 정단층계($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$), 주향이동단층계($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$) 및 역단층계($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$)로 구분된다. 현생의 지질시대에 발생하는 지진, 특히 한반도의 경우에는 대부분의 지진이 단층발생으로부터 유발되며, Anderson이론에 의하여 분류된 단층(정단층, 역단층, 주향이동단층)은 미끄러짐(slip)의 방향에 따라 발생하는 지진파가 지역적으로 인장 혹은 압축을 나타낸다. 동일한 지진파에 대하여 초기지진파가 인장 혹은 압축으로 나타나는 성질을 이용하여 지중응력의 방향을 측정하는 연구가 활발히 진행중이다(Lee et al. 2001). 한반도에서 발생한 지진파를 이용한 지중응력의 분포 방향은 다음 그림 1과 같다. 한반도 중남부에서의 육상에서 측정된 자료는 지리산부근과 동해시 부근에서 역단층계($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$)를 나타낸다.

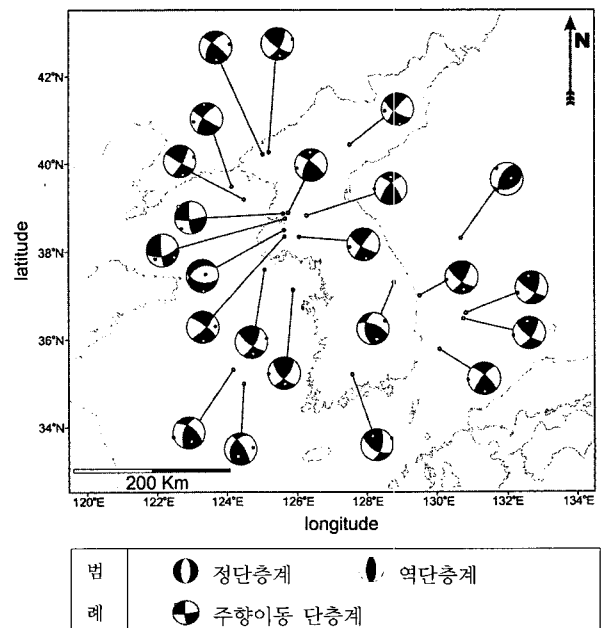


그림 1. 진양부근의 지중응력 분포도(Lee et al, 2001)

3. 한반도 중남부의 지중응력분포

본 논문에서는 한반도 중남부의 초기지중응력 분포를 확인하기 위하여 현재까지 측정된 70개소 380회의 자료를 바탕으로 지역별 지중응력 분포특성을 재검토하고자 한다. 지중응력에 대한 자료는 수압파쇄시험과 응력해방법에 의하여 측정되었다. 수압파쇄시험법에 의한 측정치는 주로 도로터널 및 지하저장시설 등의 구조물 건설 지역으로서 측정 최대 심도는 309m 정도에 해당된다. 도로터널의 경우에는 대부분 100m 이내의 심도에서 시행된 것이 많다. 응력해방법에 의한 측정치는 지하발전소 및 광산 등에서 측정된 것으로, 시험 심도는 최대 약 800m 정도이며 수압파쇄법에 의한 것 보다 비교적 깊은 심도에서 시행되었으나 대심도에서의 측정 빈도가 적음으로 인하여 350m 심도까지의 측정 자료를 대상으로 하였다. 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.

3.1 심도별 지중응력의 분포

수압파쇄시험(HF)에 의한 초기지중응력은 추정된 수직응력(σ_v), 최대수평응력(σ_H) 및 최소수평응력(σ_h)으로 측정된다. 응력해방법은 서로 다른 3방향의 굴진공

에서 측정된 변형율(오버코어링, OC)로부터 측정되며 최대주응력(σ_1), 중간주응력(σ_2) 및 최소주응력(σ_3)으로 측정되며 수직응력, 최대 및 최소 수평응력으로 환산할 수 있다. 지중응력의 표시는 심도별 수직응력, 심도별 평균 수평응력($\sigma_{hav} = (\sigma_H + \sigma_h) / 2$)과 심도별 수평응력비($K_{aver} = \sigma_{hav} / \sigma_v$)로 표시한다. 본 논문에서는 심도별 수직응력은 수압파쇄시험에서 구한 자료의 빈도가 월등하여 추정치가 거의 일정한 상태를 나타낸다($\sigma_v = 0.027z$). 이러한 경향에서 벗어나는 수직응력 자료는 응력해방법에 의하여 직접 측정된 자료이다.

그림 2는 변성암지역과 화강암지역의 지중응력 분포도를 나타낸 것이다. 변성암류는 편마암 및 편암 등의 분포지역으로서 서울, 경기 및 충청지역의 경기편마암 복합체와 지리산편마암 복합체가 해당된다. 화강암류는 경남, 경북지역의 불국사화강암과 서울, 경기, 강원 및 충남지역의 대보화강암 지역의 측정자료이다. 경기편마암, 지리산편마암, 불국사화강암 및 대보화강암 지역의 응력 측정자료는 대체로 유사하여 동일 분류지반으로 적용하였다. 심도 100~150m의 일부 측정자료에서는 수평응력이 수직응력보다 작게 측정되었다. 수평응력의 분산도는 매우 심하며 K_{aver} 의 분포 상한은 $300/z + 0.5$ 정도이다.

그림 3은 경남, 경북, 대구, 부산 및 강원도의 세일, 사암 및 석회암 분포지역으로서 퇴적암지역에서 측정된 것이다. 일부의 자료를 제외하면 대부분 수평응력이 수직응력 보다 크지만 수평응력의 분산도가 가장 작게 나타났다. K_{aver} 값은 대부분 2이내이며 대체로 4를 초

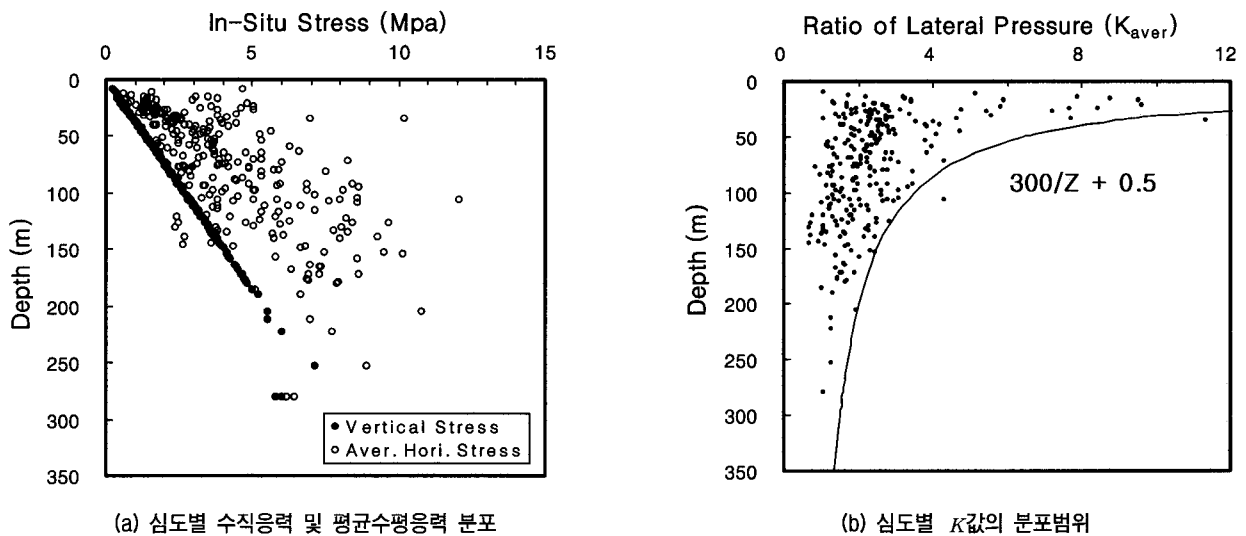


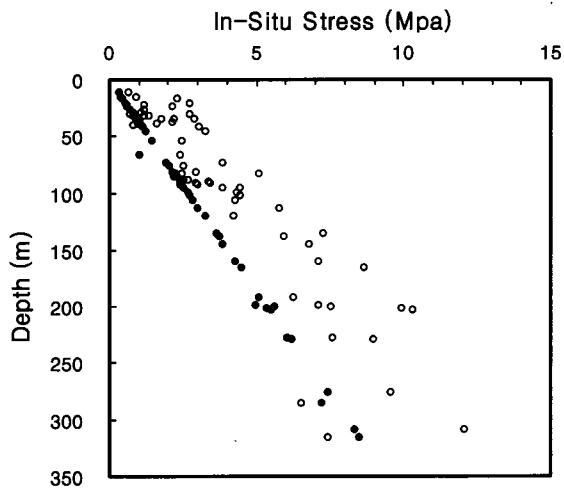
그림 2. 변성암 및 화강암 지역의 지중응력 분포

과하지는 않는다. K_{aver} 의 상한은 $400/(z+70)+0.5$ 정도이다.

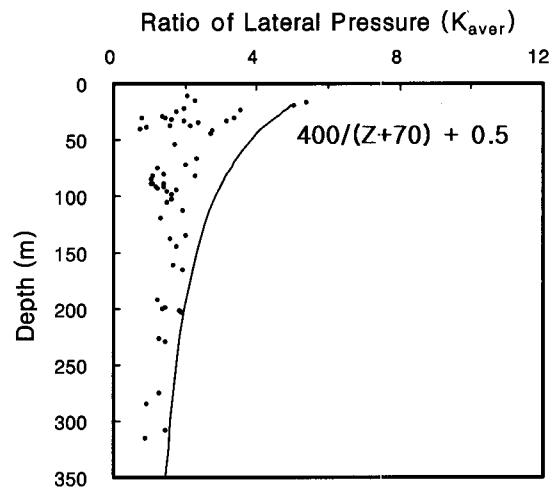
그림 4는 경남과 전남의 안산암 및 응회암 분포지역으로서 화산암지역에서 측정된 것이다. 화산암 지역에서는 심도 150m를 중심으로 그 상부와 하부가 뚜렷한 차이를 나타낸다. 심도 150m 부근에서는 수평응력의 분산도가 매우 심하지만 그 상부에서는 수평응력이 수직응력 보다 크고 분산도는 심하지 않다. 하부에서는 수평응력보다 수직응력이 크게 나타난다. K_{aver} 값은 4를 초과하는 경우가 없으며 150m 이하의 심도에서는 1미만의 값을 나타낸다. K_{aver} 의 상한은 $200/z+0.5$ 정도이다.

그림 5는 전체의 지중응력 자료를 도시한 것이다. 전

술한 바와 같이 그림 5(a)의 수직응력은 대부분 수압파쇄시험의 자료로, 국내에서 임한옥등(1995)이 제안한 관계식 $\sigma_v = 0.233 + 0.024z$ 과 최성용등(1997)이 제안한 관계식 $\sigma_v = -0.149 + 0.029z$ 보다 Brown등(1978)이 제안한 관계식인 $\sigma_v = 0.027z$ 에 보다 잘 일치된다. 평균 수평응력은 그림 5(b)에서 보는바와 같이 자료의 분산 및 지역별 지반의 특성 등으로 인하여 일정한 관계식을 도출하기는 곤란하지만 심도 200m를 기준으로 상부는 최성용등(1997)이 제안한 $\sigma_{hav} = 2.657 + 0.03z$ 과 하부는 임한옥 등(1995)이 제안한 $\sigma_{hav} = 1.858 + 0.018z$ 과 비교적 일치한다. 그림 5(c)의 최대수평응력과 최소수평응력의 비(σ_H/σ_h)는 최대 2.6을 나타내지만 대부분 1~

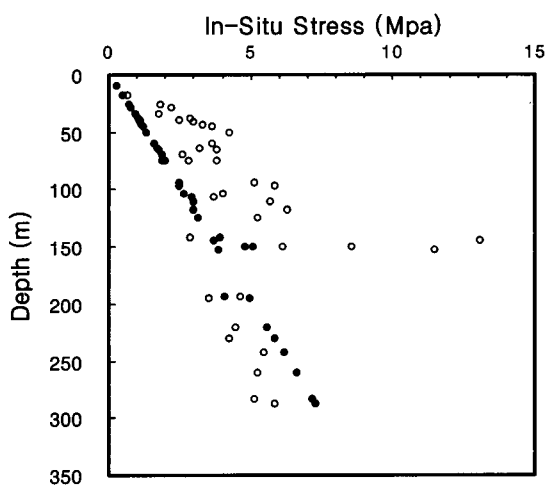


(a) 심도별 수직응력 및 평균수평응력 분포

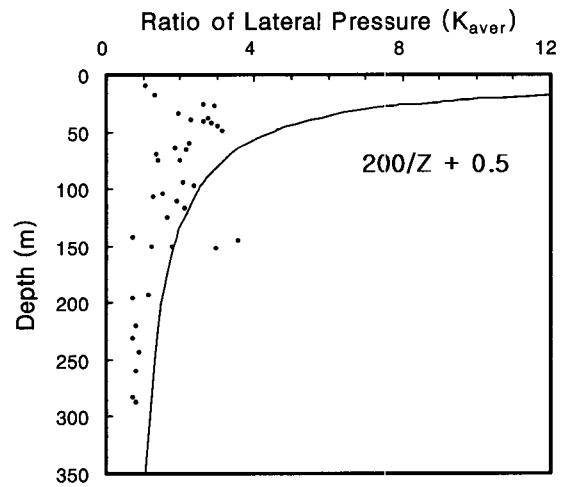


(b) 심도별 K 값의 분포범위

그림 3. 퇴적암 지역의 지중응력 분포

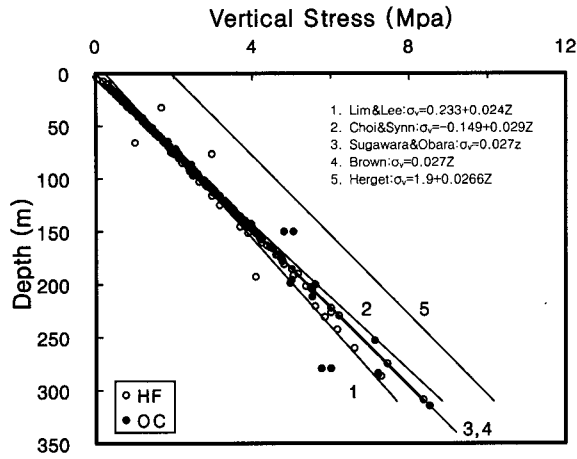


(a) 심도별 수직응력 및 평균수평응력 분포

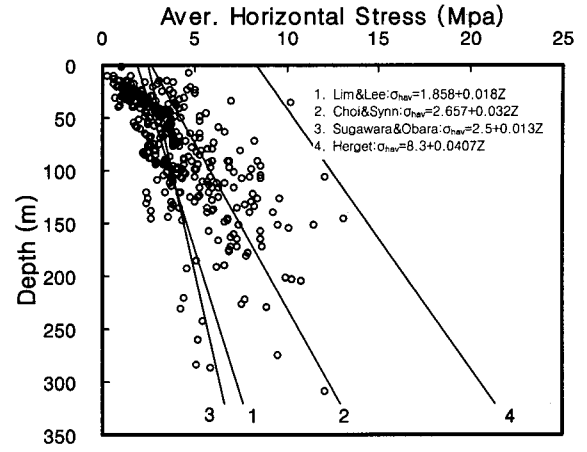


(b) 심도별 K 값의 분포범위

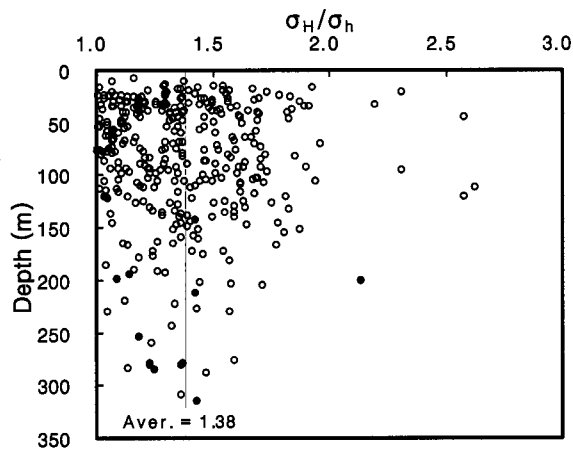
그림 4. 화산암 지역의 지중응력 분포



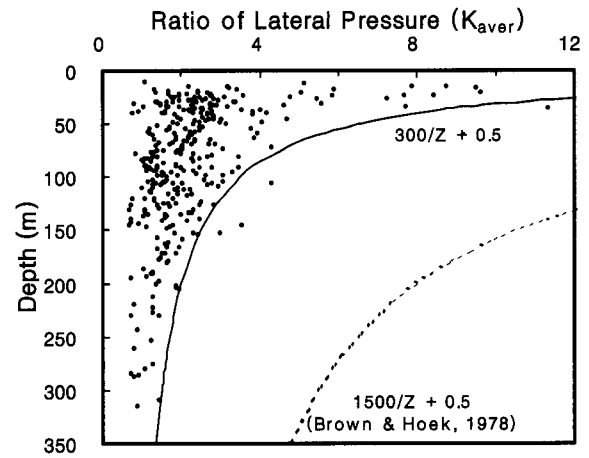
(a) 심도별 수직응력 분포



(b) 심도별 평균수평응력 분포



(c) 심도별 σ_H / σ_h 의 분포범위



(d) 심도별 K 값의 분포범위

그림 5. 한반도 중남부 지역의 지중응력 분포

2 범위에 있으며 심도가 깊어지면(200m 이하) 그 차이는 적어진다. 그림 5(d)의 심도별 K 값의 분포는 변성암 및 화강암지역의 K 값의 상한 $(300/z + 0.5)$ 을 초과하지 않으며 하한은 명확하지 않으나 심도에 무관하게 약 0.67을 나타낸다. Brown 등(1978)이 제안한 $1500/z + 0.5$ 와는 차이가 나타난다.

한반도 중남부에서의 지중응력 분포는 지형, 암반종류 및 지구조 등에 의하여 분산되는 경향을 보인다. 퇴적암이나 화산암지역 보다 화강암 및 변성암류 지역에서 수평응력비(K_{aver})가 더욱 분산되는 것은 암반이 생성되는 지질적 환경과 영향이 있는 것으로 판단된다. 즉, 화강암이나 변성암의 생성 심도가 퇴적암이나 화산암에 비하여 깊어서 지표까지 노출되는 동안의 응력변화가 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 지중응력의 분포방향

지중응력의 크기는 심도의 영향을 받으며 지형의 영향은 K 의 분산정도로서 추정할 수 있다. 측정된 지중응력은 그림 2, 3 및 4에서 보는바와 같이 기반암의 종류에 따라 다르게 나타난다. 지형 등에 의한 응력분산은 그림 5(d)에서 처럼 대체로 심도 150m 상부에서는 심하게 나타나며, 그 하부에서는 미약한 것으로 나타났다. 지구조적 영향에 의한 지중응력의 분산정도는 지형의 영향을 매우 많이 받는 지표부근을 제외하면 모든 응력계(정단층계, 역단층계 및 주향이동단층계)에서 심도에 관계없이 일정하게 나타난다. 지중응력의 분포방향은 일반적으로 최대수평응력의 분포방향을 기준으로 한다. 그러나, 정단층계의 경우에는 $\sigma_v > \sigma_H$ 이므로 실제로는 수평인장상태 이므로 최대수평응력의 방향보다는 응력

계의 상태로 도시하는 것이 합리적이다. 따라서 본 연구에서는 지중응력의 분포 양상을 응력계에 따라 분류하여 표시하고자 한다.

그림 6은 지형의 영향을 비교적 적게 받는 150m 이상 심도에서의 측정치(20개소 53회)를 기준으로 150~200m, 200~300m, 300m 이상 심도 구간으로 나누어 측정지역 별로 유사한 방향과 크기를 가진 자료를 평균을 취하여 도시한 것이다. σ_v 는 지표에 수직인 방향이므로 원으로 표시되고 원의 지름이 커질수록 수직응력 σ_v 가 증가하며, 또한 심도가 깊다는 것을 알 수 있다. σ_h 와 σ_H 의 크기는 동일하지 않으므로 σ_h 를 원으로 표시하면 σ_H 는 타원으로 표시할 수 있다. 이때, 타원의 장경의 방향 및

길이가 최대수평응력(σ_H)의 방향 및 크기가 되며, 단경은 최소수평응력(σ_h)을 의미한다.

분석결과 측정된 응력계는 대부분의 지역에서 역단층계($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$)를 나타낸다. σ_v 가 가장 큰 응력상태를 가지는 정단층계는 여수, 울산 및 상동지역 일부에서만 나타난다. 주향이동 단층계는 지리산 부근과 강원도 산간에 주로 분포한다. 최대수평응력의 방향은 측정 위치 마다 다르게 나타난다. 그러나 지역별로는 대구-부산 지역에서는 남북방향, 여수부근에서는 북북동-남남서 방향, 지리산 부근에서는 동서 방향, 강릉-포항 구간에서는 동서 및 남북방향, 서울-강릉 구간에서는 북서-남동방향이 비교적 우세하다.

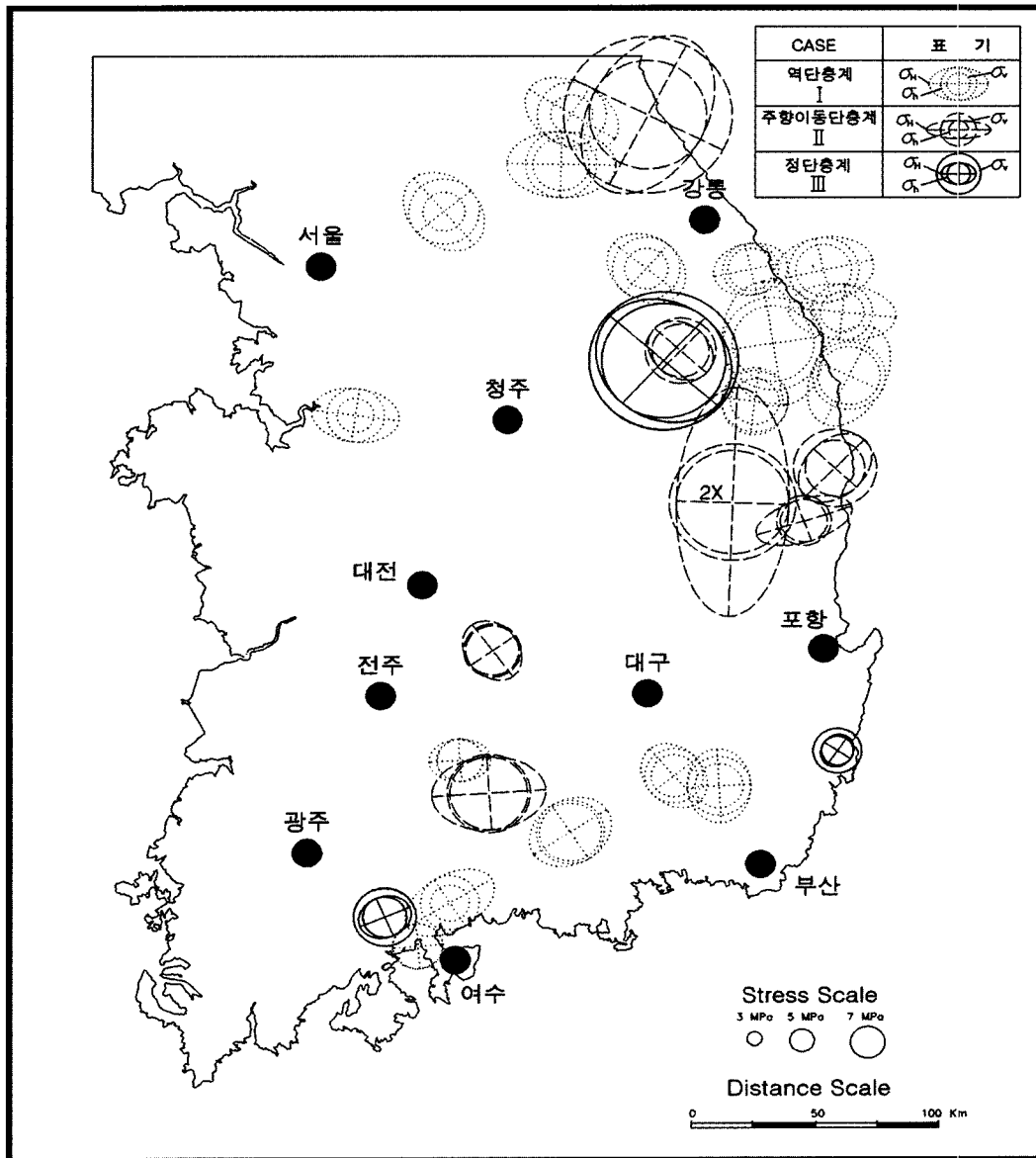


그림 6. 지중응력 분포방향 및 크기

지진파의 초기거동을 이용한 지중응력 방향에 대한 연구는 대상심도가 1~2km 정도로서 건설분야에서 대상으로 하는 구조물 심도와는 큰 차이가 난다. 그러나 지형의 영향을 제외한다면 지중응력의 방향은 지진파의 초기거동 분석에 의한 것(간접측정법)과 HF와 OC 방법(직접측정법)에 의하여 측정된 것이 동일하여야 한다. 불행하게도 지진파의 초기거동 분석에 의한 지중응력 연구는 국내에서 초기단계이고 지금까지 한반도 중남부 육상에서는 그림 1에서 보는바와 같이 지리산과 동해시 부근에서만 역단층계로 분석되었다. HF와 OC 방법에 의한 측정지도 동해시 부근에서는 역단층계, 지리산 부근에서는 역단층 및 주향이동단층계가 우세하다. 주향이동단층은 역단층이 발생할 때 2차 단층으로 발생하는 것을 고려하면 지진파의 초기거동 분석자료는 지형의 영향이 제외된 심도에서의 직접측정법(HF, OC)에 의한 응력상태를 반영하는 것으로 판단된다.

정단층계의 응력상태가 확인된 지역은 상동, 울산, 여수지역으로서 울산지역은 동해분지 생성과 관련된 지구조 운동과 관계를 가질 것으로 판단되며, 상동 및 여수지역은 단층대 및 화산암과 관련되어 나타난다. 이러한 지역에서의 지중응력은 향후 면밀한 조사가 요구되는 지역이다.

그림 6에 나타난 바와 같이 지구조에 의한 최대수평응력(σ_H)의 방향은 지역적으로 매우 불규칙하게 나타나므로 구역을 나누어 획일화 시킬 수 없다.

또한, 그림 5에서 보는 바와같이 분석대상 구간인 심도 150m 하부에서는 축압계수(K)가 대체로 2.5 이하로 나타나고 있으며, 최대 및 최소수평응력비(σ_H/σ_h)는 1.0~2.0의 범위를 가지므로 전반적인 수평응력이 수직응력보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 지구조적으로 역단층계 또는 주향이동 단층계가 우세하다는 것을 반영한다.

이상과 같은 분석결과는 지하구조물의 건설시 수행하는 3차원 수치해석에 적용할 수평응력의 작용방향을 지구조적인 관점에서 접근하여 추정할 수 있다는 중요한 의미를 지닌다.

4. 3차원 지중응력을 고려한 해석

4.1 3차원 수치해석 조건

지중응력의 3차원적인 분포가 터널굴착중의 응력과

변위에 미치는 영향을 규명하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 해석에 사용된 터널형태는 폭 13m와 높이 8m의 2차선 도로 터널로서 토피고 100m를 적용하였다. 그림 7은 해석단면의 3차원 요소망을 나타낸 것으로, 지반은 11,000여개의 요소로 이루어진 탄성(Elastic) 모델의 연속체로 가정 하였고, 수치해석은 유한차분법을 이용한 프로그램인 FLAC3D(Itasca consulting Group, Inc.)를 사용하였다. 경계면에서 발생하는 구속효과를 배제하기 위하여 터널굴착면에서 터널폭의 두배되는 거리에 경계면을 두었다.

해석시 적용된 원지반은 경암으로서 지보공은 고려하지 않았으며, 전단면 굴착으로 1회 굴진장은 3.0m로 하고 전체 굴진장은 시점부의 구속효과 및 종점부의 막장효과 등을 고려하여 60m로 하였다. 수치해석에 적용된 지반물성치는 다음 표 1과 같다.

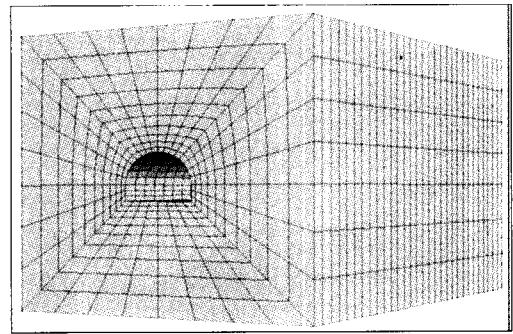


그림 7. 해석단면의 3차원 유한요소망

표 1. 해석에 사용된 지반정수

구 분	적 용 치
탄성계수(t/m ²)	800,000
포아송비	0.22
점착력(t/m ²)	100.0
내부마찰각(°)	40.0
단위중량(t/m ³)	2.65

4.2 해석 지중응력의 방향

수직응력(σ_v)은 단위중량(γ)과 심도(z)의 함수로 정의($\sigma_v = \gamma z$)하고 축압계수(K)가 0.5, 1.0 및 2.0인 경우에 대하여 해석하였다. 표 2는 해석한 경우의 응력방향에 대한 정의를 나타낸 것으로 축압계수가 $K=0.5$ 이면 $\sigma_v = \sigma_H$, $\sigma_h = 0.5\sigma_v$ 로 정의 하였으며, 이는 굴진방향과 수직인 방향에서 σ_h 의 방향을 해석기준으로 적용한

표 2. 응력방향에 대한 정의

구 분	0°방향	30°방향	60°방향	90°방향	120°방향	150°방향
K=0.5 (측압계수)						
	C-1-a	C-1-b	C-1-c	C-1-d	C-1-e	C-1-f
K=1.0	방향에 상관없이 동일, C-2					
K=2.0						
	C-3-a	C-3-b	C-3-c	C-3-d	C-3-e	C-3-f

것이다. 측압계수가 $K=1.0$ 이면 $\sigma_v = \sigma_H = \sigma_h$ 이므로 굴진방향에 상관없이 동일한 응력상태에 놓이게 된다. 또한, 측압계수가 $K=2.0$ 이면 $\sigma_v = \sigma_h$ 가 되며 $\sigma_H = 2.0 \sigma_v$ 로 정의된다. 이는 굴진방향과 수직인 방향에서 σ_H 의 방향을 해석기준으로 적용한 것이다. 따라서 터널해석은 수평응력의 방향이 30° 간격, $K=0.5, 2.0$ 이면 각각 응력방향이 6가지의 경우가 발생하므로 $K=1.0$ 인 경우를 포함하여 13가지의 경우에 대해서 해석하였다.

4.3 해석결과

지중응력의 크기와 방향을 고려하여 단계별 굴착에 따른 지반변형에 대한 대표적인 해석결과는 표 3과 같다. 표 3은 지중응력의 크기와 방향에 따른 굴착위치별 천단 및 측벽부의 수직침하량 및 수평변위량과 대표지점(굴착거리 30m 지점)에서의 천단 및 측벽의 X, Y, Z 방향에 대한 변위를 나타낸 것이다.

천단부의 수직침하량(Z 방향)은 측압계수 $K=0.5$ 인 경우 0° 방향으로 작용할 때 가장 크게 나타나며, $K=2.0$ 일 때에는 90° 방향으로 작용할 때 가장 크게 나타났다. 측압계수 $K=0.5$ 와 $K=2.0$ 일 때의 수직침하량은 $\delta_{K=2.0} \leq \delta_{K=0.5}$ 의 형태를 보이며, $K=0.5$ 의 90°, $K=1.0, K=2.0$ 의 0° 방향에서는 대체로 같은 크기의 수직침하량을 보이고 있다. 이는 지중응력의 방향에 따라 변위의 형태도 바뀌지만 터널단면에 작용하는 수평응력(σ_H 혹은 σ_h)의 영향이 가장 크기 때문이다.

측벽부의 수평변위량(X 방향)은 측압계수 $K=0.5$ 에서 90° 방향으로 작용할 때 가장 크며, $K=2.0$ 에서 0° 방향으로 작용할 때 가장 크게 나타났다. 측압계수 $K=0.5$ 와 $K=2.0$ 일 때의 수평변위량은 $\delta_{K=0.5} \leq \delta_{K=2.0}$ 의 형태를 보이며, $K=0.5$ 의 90°, $K=1.0, K=2.0$ 의 0° 방향에서는 대체로 같은 크기의 변위량이 발생하였다.

전체적인 변위 발생형태나 거동방향은 천단부 X 방향과 측벽부 Z 방향이 유사하며, 측벽부 X 방향과 천단부 Z 방향이 유사하다. 천단부 및 측벽부에서 측압계수 $K=0.5$ 와 $K=2.0$ 일 때의 X, Y, Z 방향의 변위량은 상대값으로 비교하면 천단부 최대수직 변위량은 $\delta_{K=0.5} \approx 2 \cdot \delta_{K=2.0}$ 관계를 가지고 있다.

3차원 지중응력을 고려한 터널해석에서는 암반상태를 양호한 것으로 가정하여 변형율이 매우 적게 나타났다. 그러나 지반이 불량한 경우에는 3차원적인 거동특성이 뚜렷하게 발생할 것으로 예상된다. 2차원 단면에서 최대 수평응력(σ_H)의 작용방향에 따라 천단부 및 측벽부의 수직 및 수평변위량이 달라지기 때문에 지중응력의 방향을 고려한 3차원 해석이 필요한 것으로 판단된다. 지반거동에 따른 터널보강은 굴착공법(NATM, ASSM, TBM 및 SHIELD 등)에 의하여 다르나, 지금까지는 터널지보공 설치시에 터널축(Y) 방향의 거동은 일반적으로 고려하지 않고 있다. 따라서, 불량한 암반의 경우 3차원 해석결과를 고려하여 굴착공법과 보강형태를 결정하는 것이 바람직하다.

표 3. 지중응력의 변화에 따른 천단 및 측벽 변위

구분	천단부	측벽부
관측 변위량 (a)		
X 방향 변위량 (b)		
Y 방향 변위량 (c)		
Z 방향 변위량 (d)		
방향		<ul style="list-style-type: none"> · X 방향 : 터널 단면의 수평방향(우:⊕, 좌:⊖) · Y 방향 : 터널의 굴착 진행방향(굴착방향:⊕) · Z 방향 : 터널 단면의 수직방향(상:⊕, 하:⊖)

5. 결론

본 연구에서는 국내에서 측정된 지중응력의 지반특성에 따른 비교 및 작용방향의 분포 경향을 파악하고

터널 해석시 3차원 지중응력을 고려하는 경우의 암반거동에 대한 연구를 실시하였으며 그 결과에 대한 요약 및 결론은 다음과 같다.

참 고 문 헌

- (1) 수직응력의 심도별 분포는 Brown 등(1978)이 제안한 $\sigma_v = 0.027z$ 에 잘 일치되고 있다. 수평응력의 분산 정도는 변성암 및 화강암에서 심하게 나타났고 퇴적암 및 화산암에서는 상대적으로 작게 나타났다. 수평응력의 크기는 심도 200m를 기준으로 상부는 최성웅 등(1997)이 제안한 $\sigma_{hav} = 2.657 + 0.03z$, 하부는 임한옥 등(1995)이 제안한 $\sigma_{hav} = 1.858 + 0.018z$ 와 비교적 일치한다. 또한 최대/최소 수평응력비는 편차가 큰 $\sigma_H/\sigma_h=2.0$ 이상되는 구간을 제외하면 그 평균값은 약 1.38 정도이다.
- (2) 수평/수직 응력비(K)는 암종별로 다음과 같이 상한값을 가진다.
- 변성암 및 화강암 : $K=300/z + 0.5$
 - 퇴적암 : $K=400/(z + 70) + 0.5$
 - 화산암 : $K=200/z + 0.5$
- 또한 하한 값은 약 0.67 정도로서 심도에 영향을 거의 받지 않는다.
- (3) 지구조적인 지중응력 분포는 역단층계 및 주향이동단층계가 우세하며, 정단층계는 상동, 울산, 여수 지역에 제한적으로 분포한다. 최대수평응력의 분포방향은 지역적으로 매우 불규칙하게 나타나며, 지구조적 관점에서의 접근이 필요하다.
- (4) 3차원 해석에 의하면 K 의 크기에 따라 최대 변형량이 발생하는 위치가 다르고 $K=0.5$ 와 $K=2.0$ 에서의 천단부 최대수직 변위량은 $\delta_{K=0.5} \approx 2 \cdot \delta_{K=2.0}$ 측면부에서의 최대수평 변위량은 $2 \cdot \delta_{K=0.5} \approx \delta_{K=2.0}$ 의 관계를 가지며, 변위가 발생하는 방향은 상호대칭이다. 지중응력의 방향에 따라 3차원적 변형이 발생하여 굴착방향 혹은 굴착반대 방향으로의 변형이 발생한다.

1. 최성웅(1997), "현지암반 초기지압의 분포특성 및 암반터널설계에의 적용", 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol.7, pp.323~333.
2. 김수정(2001), "한국의 지중응력 측정"(학위논문 작성중, 미발간).
3. 한국암반공학회등(1999), 지반조사 및 시험기술, pp.506~539.
4. Amadei, B. and Stephansson, O.(1997), Rock Stress and Its Measurement, Chapman & Hall, pp.1~323.
5. 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.
6. 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.
7. Herget, G.(1973), "Variation of Rock Stresses with Depth at a Canadian Iron Mine", Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci., Vol.10, pp.37~51.
8. Lee, J. H.(2001), "Quaternary Reactivation of Tertiary Faults in Southeastern Korea Peninsula and Age Constraint of Faulting by Optically Stimulated Luminescence Dating(inreview, permitted by the author)".
9. 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, Vol.21, pp.289~297.
10. 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 Int. Symp. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, Stockholm, 1-3 September, pp.561~568.
11. Lim, H. U. and Lee, C. I.(1995), "Fifteen Years Experience on Rock Stress Measurements in South Korea", Proc. Int. Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth, Japan, pp.7~12.
12. Sugawara, K. and Obara, Y.(1995), "Rock Stress and Rock Stress Measurements in Japan," Proc. Int. Workshop on Rock Stress Measurement at Great Depth, Japan, pp.1~6.

(접수일자 2001. 11. 21, 심사완료일 2002. 4. 12)