

# 터널 거동에 대한 암반 연약대의 영향 평가를 위한 수치해석적 연구

## Numerical Analysis on the Effect of Heterogeneous Nature of Rock Masses on Tunnel Behavior

백승한\*<sup>1</sup>, 김창용<sup>2</sup>, 김광염<sup>3</sup>, 홍성완<sup>4</sup>, 문현구<sup>5</sup>

Baek, Seung-Han · Kim, Chang-Yong · Kim, Kwang-Yeom · Hong, Sung-Wan · Moon, Hyun-Koo

### Abstract

The structural anisotropy and heterogeneity of rock mass, caused by discontinuities and weak zones, have a great influence on the deformation behavior of a tunnel. A tunnel construction in these complex ground conditions is very difficult. No matter how excellent a geological investigation is, local uncertainties of rock mass conditions still remain. Under these uncertain circumstances, an accurate forecast of the ground conditions ahead of the advancing tunnel face is indispensable to a safe and economic tunnel construction. This paper presents the effect of anisotropy and heterogeneity of the rock masses to be excavated by numerical analysis. The influences of distance from weak zone, the size or dimension, the different stiffness and the orientation of weak zones are analysed by 3-D finite element analysis. By analysing these numerical results, the tunnel behavior due to excavation can be well understood and the prediction of rock mass condition ahead of the tunnel face can be possible.

**Keywords :** Heterogeneity, displacement, stress, vector orientation

### 요 지

불연속면 또는 연약대로 인해 야기되는 암반의 구조적 이방성과 비균질성은 터널의 변형 거동에 큰 영향을 미친다. 아무리 우수한 지반조사가 이루어진다 하더라도, 지역적 불확실성은 여전히 남아 있으므로 복잡한 지반 조건에서의 터널 굴착은 매우 어려운 작업이다. 이러한 불확실한 환경에서 터널 막장 전방의 지반 상태를 정확히 예측하는 것은 안전하고 경제적인 터널 건설에 필요불가결하다 할 수 있다. 따라서 본 논문은 3차원 수치해석을 통하여 암반의 이방성 및 비균질성의 영향을 평가하였다. 즉 터널 굴착으로 인해 야기되는 지반 거동을 분석하고 이에 대한 연약대의 폭과 강성 그리고 방향성의 영향을 정량적으로 평가하였다.

**주요어 :** 비균질성, 변위, 응력, 벡터방향성

---

\*1 정회원, 한양대학교 산업과학연구소 연구조교수 (shbaek@hanyang.ac.kr)  
 2 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 수석연구원  
 3 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구원  
 4 정회원, 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구위원  
 5 정회원, 한양대학교 지구환경시스템공학과 교수

## 1. 서론

터널의 변형은 굴착면 진행의 영향과 굴착면 주변의 하중 이력에 대응한 암반의 변형특성에 의해 결정된다. 터널 벽면에서 발생하는 변위는 굴착 이전에 발생하는 변위와 이후 발생하는 변위로 구분할 수 있으며, 굴착 이전에 발생하는 변위는 지반의 변형특성에 의존하는 것으로 알려져 있다. 변위는 터널 안정성에 있어서 중요한 요소이지만, 굴착 이전에 발생하는 터널 거동을 실측할 수 없고 다양한 영향변수를 고려하지 못하므로 인하여 계측을 통한 정량적 예측이 불가능하였다. 이러한 계측 값 자체의 한계와 신뢰성 문제로 인해 계측변위를 이용한 역해석(back analysis) 방법 등의 적용이 쉽지 않아서 계측한 변위값들이 터널현장에서 크게 이용되지 못하고 있는 실정이다. 최근 3차원 절대변위 계측 기술 및 디지털 영상정보를 활용한 계측 기술의 발달로 비교적 정확한 변위 계측값을 손쉽게 얻을 수 있으며, 이러한 기술이 점차 현장에 적용되고 있다.

그럼에도 불구하고 암반은 많은 불연속면과 연약대 및 파쇄대 등을 포함하고 있으며, 이러한 불연속면 및 이상대의 존재는 암반의 이방성 및 비균질 특성을 부여하게 된다. 이방성/비균질성 암반에서의 터널 굴착은 예상치 못한 터널 변형을 초래할 수 있으며, 이는 터널의 안정성에도 큰 영향을 미친다. 이러한 지반에서는 터널 막장 전방의 상태를 미리 정확히 예측할 수 있다면 시공 중 적절한 굴착공법의 결정 및 지보/보강의 선정 등을 통하여 과도한 터널 변형 또는 붕괴/붕락 등의 사고에도 미리 대처할 수 있을 것이다. 또한 이방성/비균질성 암반 주변의 굴착으로 인한 응력 재분배 상태를 이해한다면, 터널의 변형과 하중 상태를 보다 정확하게 평가할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 3차원 수치해석을 통하여 불연속면 및 연약대/파쇄대 등의 존재로 인한 이방성 및 비균질 거동을 분석하고 막장 전방의 연약대/파쇄대의 발달 정도를 정량적으로 예측할 수 있는 토대를 마련하고자 한다.

## 2. 암반의 이방성 및 비균질성

암석의 물리적 및 공학적 특성은 광물의 배열, 불연속

면의 발달 방향과 정도 등 암석 내 내재된 방향성에 따라 다르게 나타나는데 이러한 성질을 이방성이라고 한다. 암석 시료를 대상으로 실시되는 암석시험에서 공학적 특성이 방향에 따라 다르게 나타나는 것이 좋은 예라고 할 수 있다. 일반적으로 자연 상태에서 완전 등방성 거동을 보이는 암석은 거의 없다. 과상암반인 화강암의 경우도 역시 미세균열의 발달 정도가 강도 및 변형 이방성에 영향을 미치고 있음에도 불구하고 터널 설계시 이방성을 고려하는 경우가 거의 없다. 특히 점판암, 천매암, 편암 등과 같이 암석 내부에 편리 또는 엽리 등 층상구조가 현저히 발달한 경우는 설계시 반드시 이방성 요소를 고려해야만 한다.

비균질성은 물성이 공간적으로 변동을 보이는 것으로, 미시적으로 보면 동일 암종에서도 각 부분(위치)별로 물성이 다르게 나타난다. 본 논문에서는 거시적 관점에서 절리나 파쇄대 등의 연약대로 인한 암반의 비균질성을 고려하고자 한다. 불연속면이 균등하게 분포되어 있다면 암반은 균질한 물성을 나타내고 굴착에 의한 거동을 쉽게 예상할 수 있을 것이다. 하지만 일반적으로 불연속면 또는 파쇄대 등의 연약대의 존재로 인해 암반은 전체적으로 비균질한 물성을 보이며, 이로 인해 위치에 따라 서로 상이한 거동을 나타낸다. 따라서 파쇄대와 같은 연약대의 존재 파악을 위해 설계시 충분한 지질조사가 이루어져야 하지만 조사 비용 및 작업의 어려움으로 충분한 조사 자료를 얻을 수 없다. 따라서 시공 중 터널 굴착에 따른 거동을 분석함으로써 막장 전방 상태의 예측 및 지보대책 등의 연구가 필요하다 하겠다.

지금까지 이러한 불연속면 및 파쇄대 등의 연약대로 인한 터널 거동과 관련된 많은 연구가 진행되어 왔다. 먼저 Schubert(1993)에 의하면 오스트리아에서 단층대를 지나는 경우 터널 종방향 변위가 크게 나타났으며, 종방향 변위와 천단변위의 비율의 분석이 막장 전방 상태를 예측하는데 유용한 도구가 됨이 밝혀졌다. 그 후 Schubert와 Budil(1995)은 터널 막장 전방의 강성 변화의 예측을 위하여 변위벡터 방향성의 중요성을 3차원 수치해석을 통해 확인하였으며, Steindorfer와 Schubert(1997)는 앞선 연구를 여러 응력 조건과 비균질 방향성 조건에서 공간변위 벡터 방향성으로 확장하였다. 또한 Steindorfer와 Schubert는 굴착에 따른 암반 거

동의 단기 예측을 위한 터널 천단변위 계측 결과의 활용 기법을 제시하였으며, Sellner(2000)는 현장에서 계측 결과를 직접 분석함으로써 변위 예측이 가능한 GeoFit 이라는 소프트웨어를 개발하였다.

국내의 경우, 이민모 등(1998, 1999)은 기 채굴한 공동에 인접한 터널을 굴착할 경우와 파쇄대가 막장 전방에 존재할 경우에 대하여 터널의 변위 거동을 분석하였으며, 박연준 등(2004)은 탄소성 해석의 차이, 연약대의 두께, 연약대의 물성 및 경사 등에 대하여 수치해석으로 분석하였으나, 연약대의 3차원적 기하구조인 주향 및 경사를 동시에 고려하지는 않았다. 최근 들어 김창용 등(2004) 및 Kim et al. (2005)은 터널 내공변위 함수 파라미터 X, C와 막장 전방 암반 상태의 관계를 3차원 수치해석을 통하여 분석한 바 있다.

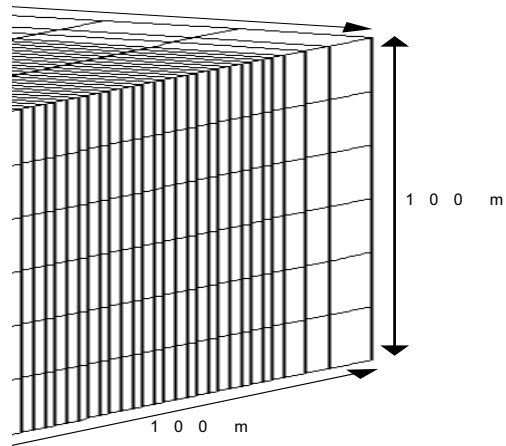


그림 1. 해석에 사용된 3차원 유한요소 모델

### 3. 모델 설정 및 조건

연약대/파쇄대 존재 암반의 터널 내공변위 거동 및 응력 변화를 알아보기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 본 해석에 사용된 유한요소 프로그램인 U3 코드는 다수의 절리 및 파쇄대 등의 연약대가 임의의 방향성, 두께 및 탄성계수를 갖고 분포할 때, 각 요소 개별적으로 연약대의 특성을 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이에 대한 전후 처리를 위해서 연약대의 물성을 계산할 수 있는 PM 코드와 공간상에서 절리나 파쇄대의 기하특성을 파악할 수 있는 Vol4 코드를 이용하였다(문현구 외, 1991; 백승환과 문현구, 2001). 먼저 불연속면 등의 자료로부터 복합체역학을 이용한 연약대의 물성을 평가하여 이를 입력자료로 하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

해석에 사용한 유한요소 모델은 그림 1과 같으며, 좌우 및 상하 영역이 100m이고 터널 직경은 10 m로 결정하였다. 암반과 연약대의 자체의 영향만을 분석하기 위하여 지보를 고려하지 않았으며, 전단면 굴착을 기본으로 하여 매 막장 2.5m 굴진하는 것으로 설정하였다. 암반의 탄성계수와 전단계수 그리고 포아송비는 각각 1 GPa, 0.4 GPa 그리고 0.35를 적용하였으며, 연약대의 물성은 물성차이에 대한 거동 양상을 명확히 확인하기 위하

여 균질하게 암반의 1/2, 1/10, 1/50를 그리고 축압계수는 0.5를 적용하였다. 또한 연약대의 방향성은 일반적으로 터널 굴진방향에 수직인 경우만 많이 연구되었으나, 본 연구에서는 연약대의 3차원적 방향성의 영향을 파악하기 위하여 주향과 경사를 동시에 고려한 여러 가지 경우를 추가하였다.

### 4. 결과 분석 및 고찰

지보가 설치되지 않은 터널의 굴착에 의해 발생하는 변위는 암반의 변형특성과 시공이력 그리고 굴착이 중지된 상태에서의 암반의 시간의존성 특성에 영향을 받는다. 특히 파쇄대 또는 연약대가 존재할 경우 변위는 암반의 변형특성 외에 추가로 연약대의 영향으로 균질/등방성 암반 굴착시의 거동과 상이한 거동을 보인다.

그림 2는 연약대가 존재하지 않는 경우 터널 중심부에서의 굴착단계별 천단변위를 나타낸다. 최종변위는 약 2.5D 전방에서 약 6.5mm 발생하였으며, 변위 분석 지점인 막장면 도달시 약 2mm의 변위로 최종변위의 약 31.2%에 해당한다. 변위 분석점 약 2.5D 후방에서 선변형의 약 10%가 발생하였으며, 약 1.5D 후방에서 최종변

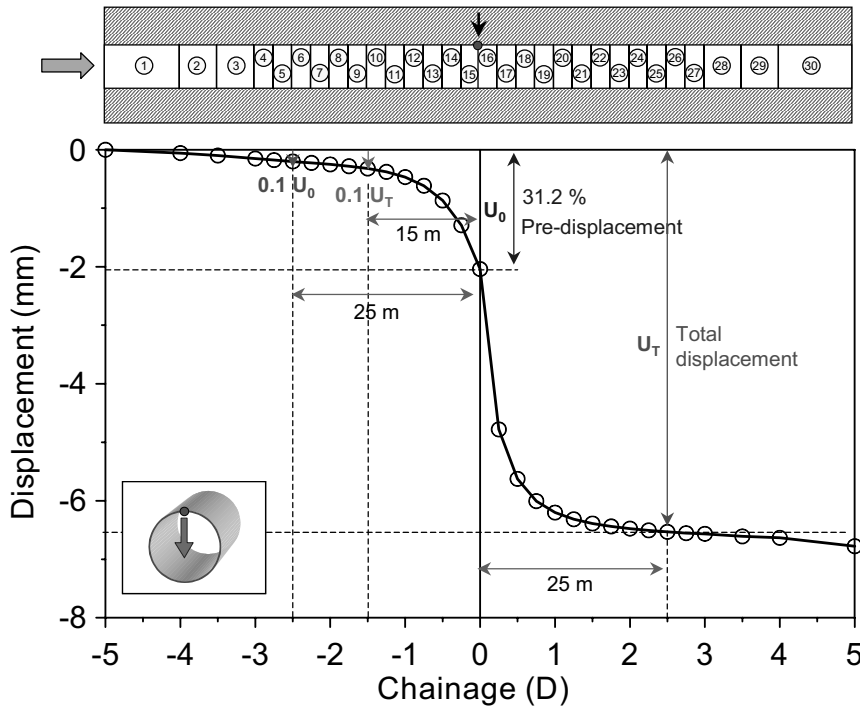


그림 2. 균질한 암반에서의 굴착단계별 천단변위

위의 약 10%가 발생하였다.

터널 직경의 0.5D 후방 지점에서 변위벡터가 이루는 각을 변위벡터 방향성( $\alpha$ )라고 하며, 파쇄대가 없는 균질/등방성 암반의 본 연구에서는 약 19°로 나타났다. 또한 최종 굴착 완료시 터널 천단에서의 초기수평응력 $\sigma_x$ 에 대한 굴착에 의해 재분배된 x방향 응력의 비( $\sigma_x/\sigma_h$ )는 약 1.72로 나타났다.

#### 4.1 터널 축방향에 수직한 연약대의 영향

그림 3은 연약대 폭과 물성에 따른 천단변위를 보여준다. 연약대의 폭은 10, 20, 30, 40m의 4가지가 고려되었고, 그림에서는 음영으로 표시하였다. 연약대에 접근함에 따라 신선 암반에서의 변위는 아주 조금씩 증가하며, 연약대의 폭은 절대 변위량과 변위곡선의 형상에 매우 큰 영향을 미쳤다. 연약대의 물성이 낮을수록 그리고 연약대의 폭이 증가할수록 최종굴착 완료후 천단변위는

증가하였으며, 연약대의 폭과 물성에 관계없이 그 경향은 매우 유사하게 나타났다. 연약대의 폭 40m의 경우 연약대의 물성이 1/2, 1/10, 1/50으로 감소함에 따라 천단변위는 13.1mm, 61.4mm, 300.2mm로 나타났다.

앞서 언급하였듯이 연약대가 없는 균질/등방성 암반에서의 변위벡터 방향성은 약 19°로 나타났다. 그림 4와 같이 연약대에 접근함에 따라 변위벡터 방향성은 기준(normal)값에서 벗어나 증가하고 다시 연약대에서 신선 암반에 접근할수록 다시 감소하였다. 물성이 감소함에 따라 기준값과 큰 차이를 보이는 반면에 연약대 폭의 영향은 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 연약대의 물성이 1/2, 1/10, 1/50으로 감소함에 따라 최대값은 약 27~29°, 43~47°, 49~53°이며, 최소값은 약 7~10°, -6~-1°, -10~-4° 정도로 나타났다. 파쇄대의 물성에 관계없이 변위벡터 방향성의 변화 경향은 유사하게 나타났다.

그림 5는 연약대 폭과 물성에 따른 최종 굴착 완료후

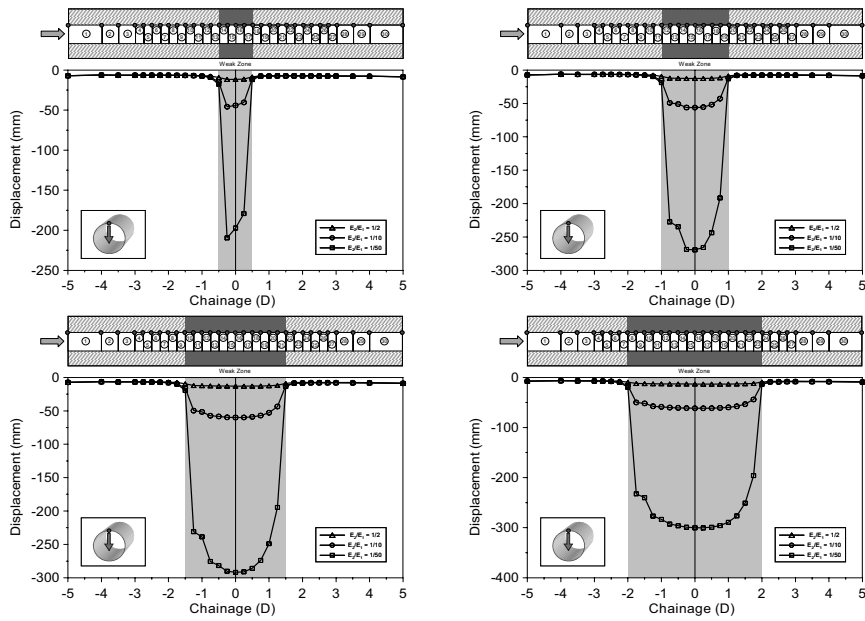


그림 3. 연약대 폭과 물성에 따른 최종 굴착 완료후 천단 변위

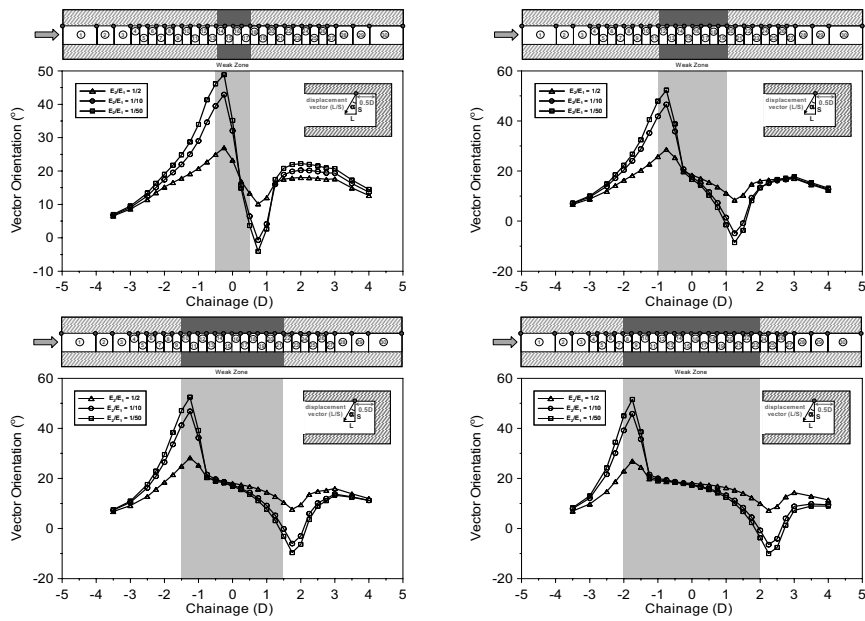


그림 4. 연약대 폭과 물성에 따른 변위벡터 방향성

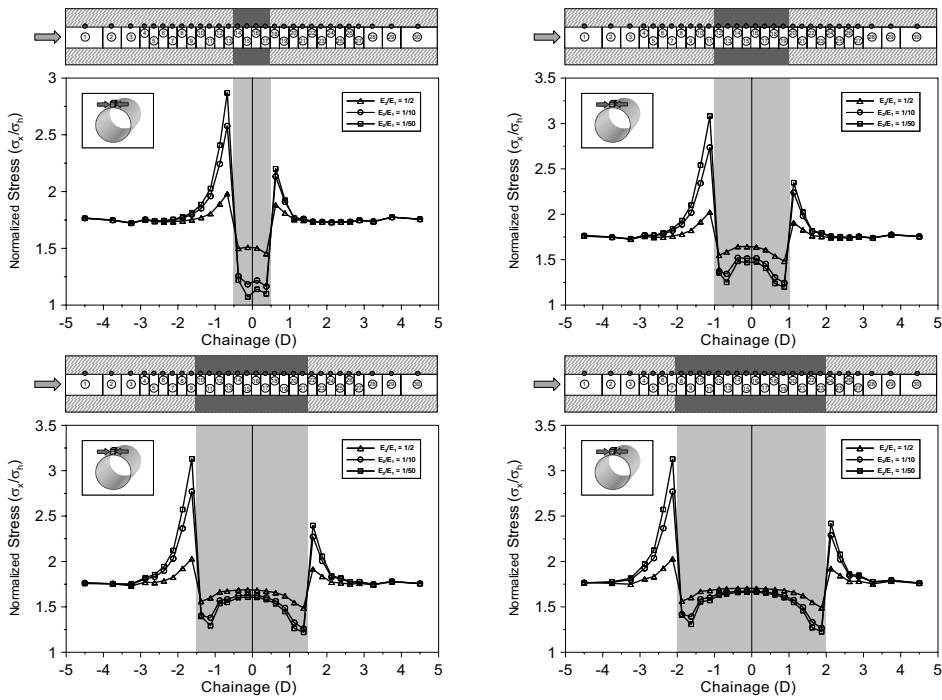


그림 5. 연약대 폭과 물성에 따른 최종 굴착 완료후 천단부 접선응력

천단부 접선응력은 나타낸 그래프로서, 연약대에 접근함에 따라 터널 천단부 접선응력은 연약대 폭에 비례하여 증가하였으며, 연약대의 물성이 감소할수록 신선암반영역에서 응력의 증가가 크게 나타났다. 암반조건이 변하는 지점의 신선암반에서 최대 응력이 나타나고 파쇄대 구간에서 최소응력을 보여주고 있다. 신선암반과 연약대 경계 부분에서 최대 응력 증가와 최대 응력 감소를 보이고 있으며, 이 역시 천단변위 및 변위벡터 방향성과 같이 연약대의 폭의 영향은 미미하게 나타났다.

연약대가 무한히 클 경우의 천단변위에 대한 연약대 중앙지점의 천단변위의 비를 그림 6에 나타내었다. MC=10일 경우 연약대의 폭이 0m, 5m, 10m, 20m, 30m, 40m로 증가할수록 천단변위 비는 10%, 52.9%, 67.2%, 82.6%, 88.2%, 90.3%로 증가하였다. 즉 연약대 폭이 증가함에 따라 천단변위는 증가하지만 천단변위의 증가비는 감소하여 연약대가 무한히 클 경우의 천단변위에 수렴함을 알 수 있다.

연약대가 없는 균질/등방 암반에서의 변위벡터 방향성

기준값에 대한 최대 변위벡터 방향성 편차의 크기는 연약대 폭의 영향을 크게 받고 있다. 연약대의 폭이 5m, 10m, 20m, 30m, 40m로 증가함에 따라 17.7°, 23.9°, 27.6°, 27.8°, 26.8°로 나타나 최종 약 27°에서 수렴하였다.

또한 연약대 폭이 5m, 10m, 20m, 30m, 40m일 경우 응력증가량은 34.8%, 50%, 59.3%, 58.1%, 61%로 나타났으며, 응력감소량은 -42.4%, -32.6%, -27.3%, -26.7%, -26.2%로 나타났다. 따라서 연약대의 폭이 2D(20m)인 지점에서부터 거의 수렴된 값을 가짐을 알 수 있다.

#### 4.2 연약대 경사의 영향

앞서 분석한 결과들은 모두 터널 굴진방향과 수직으로 위치한 연약대에 대한 결과로서 아래 그림 7의 세 번째 경우인 090/90에 해당한다고 볼 수 있다. 여기서는 주향이 터널 굴진방향에 수직으로 존재하지만 경사의 변화

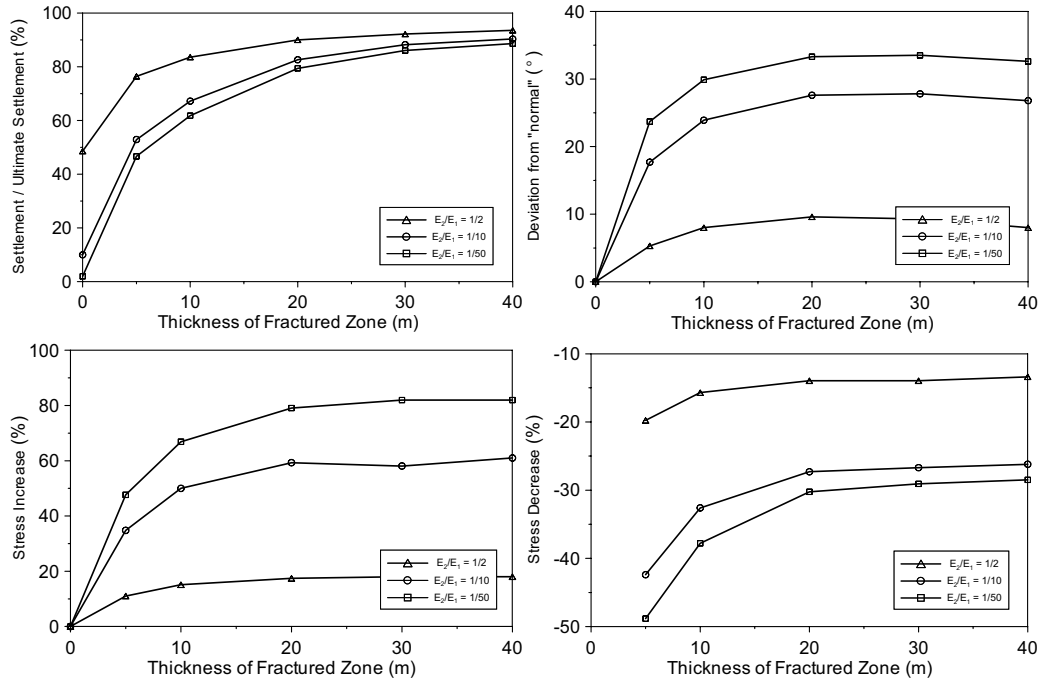


그림 6. 연약대 폭에 대한 천단변위, 변위벡터, 응력 변화

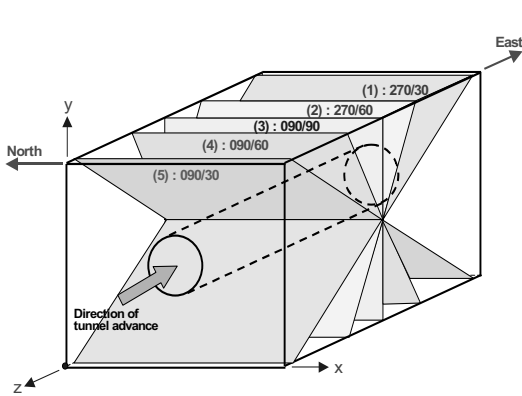


그림 7. 주향이 터널축과 수직인 연약대의 경사 모델

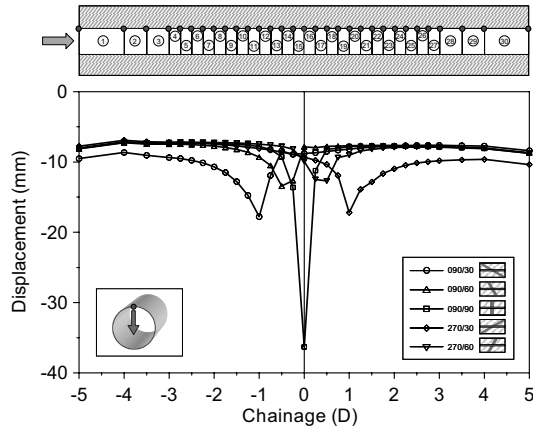


그림 8. 연약대의 경사에 따른 최종 천단변위

에 대하여 터널 변위 및 응력 그리고 변위벡터 방향성을 분석하기 위하여 그림 7과 같이 5가지 경우에 대하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 연약대의 두께는 5m로 설정하였으며, 연약대의 물성은 암반 물성의 1/10 그리고 축압계수는 0.5를 적용하였다.

그림 8은 각 모델별 천단변위를 나타낸 그래프로서, 터널 굴진함에 따라 090/30 모델 천단에서 가장 먼저 연약대를 만나므로 천단변위가 가장 먼저 변화를 나타내고 270/30 모델이 가장 후에 변화를 보이고 있다. 최대 천단변위는 090/30, 090/60, 090/90, 270/60,

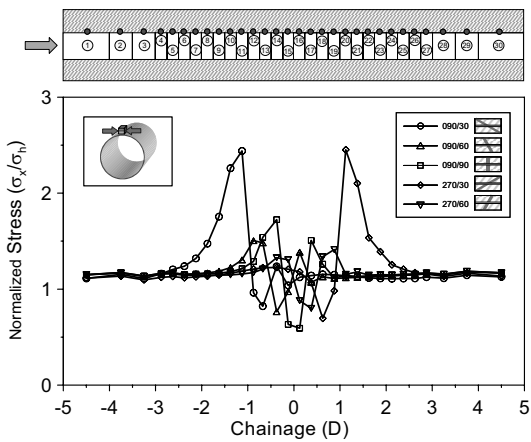


그림 9. 연약대의 경사에 따른 최종 천단부 응력

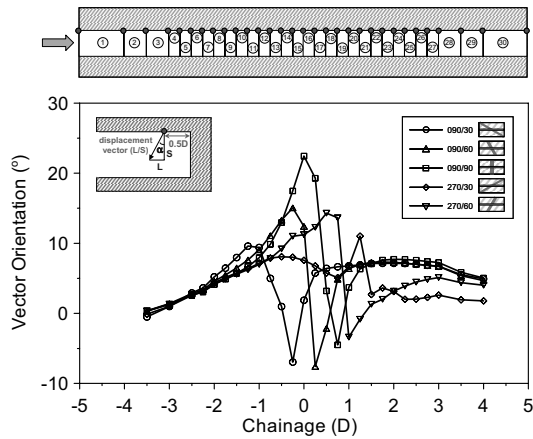


그림 10. 연약대의 경사에 따른 최종 변위벡터 방향성

270/30 모델별로 각각 17.8mm, 13.4mm, 36.3mm, 12.7mm, 그리고 17.2mm로 나타났다.

천단부 접선방향 응력은 그림 9와 같이 090/30과 270/30 모델에서 큰 응력 집중을 보였으며, 터널에서의 위치는 연약대가 인접한 곳에서 발생하였다. 일반적으로 연약대를 만나기 직전 암반에서 큰 응력 집중을 나타냈다가 연약대로 굴진이 이루어진 경우에 응력이 감소함을 볼 수 있다.

경사방향이 터널 굴진방향과 동일할 경우 경사가 90°에 가까울수록 변위벡터 방향성이 급격히 증가하였으며, 경사방향이 터널 굴진방향과 반대인 경우는 경사가 감소함에 따라 변위벡터 방향성이 감소하였다(그림 10). 변위벡터 방향성은 연약대를 만나기 직전에 최대이고 연약대 내로 굴진하였을 때 최소가 되었다. 변위벡터 방향성의 최대값은 090/30, 090/60, 090/90, 270/60, 270/30 모델별로 각각 9.6°, 15.1°, 22.4°, 14.3°, 그리고 11°이며, 최소값은 각각 -6.95°, -7.6°, -4.5°, -3.4°, 그리고 2.7°로 나타났다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 변위벡터 방향성은 연약대가 수직으로 위치할 때 가장 영향을 많이 받고, 가장 뚜렷한 결과를 보여준다.

#### 4.3 수직인 연약대의 경사방향의 영향

터널 굴착에 따른 수직인 연약대의 경사방향에 대한

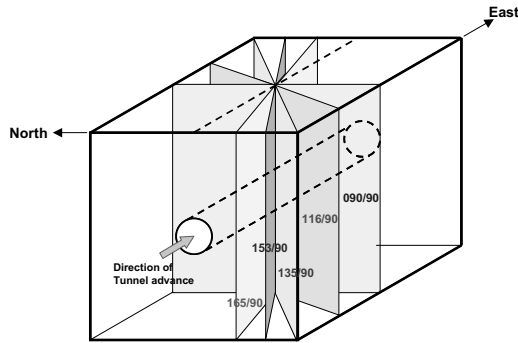


그림 11. 수직인 연약대의 경사방향 모델

터널 내공변위 거동을 분석하고자 그림 11과 같이 090/90, 116/90, 135/90, 153/90, 165/90의 총 5가지 모델에 대하여 유한요소코드인 U3를 이용하여 3차원 해석을 수행하였다. 해석 조건은 앞서 분석한 모델과 같으며, 이방성을 나타내는 연약대는 Intact rock mass와의 전체 matrix에서 차지하는 체적분율(Volume fraction)을 약 0.2로 설정하였고 연약대의 물성은 암반 물성의 1/10 그리고 축압계수는 0.5로 가정하였다.

터널의 천단변위는 그림 12에서와 같이 090/90을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 090/90 모델에서의 천단변위가 36.3mm로 최대로 나타났으며, 그 외



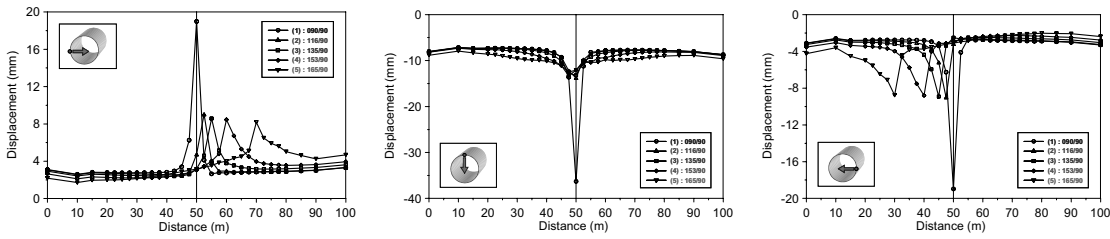


그림 12. 연약대의 경사방향(주향)에 따른 내공변위

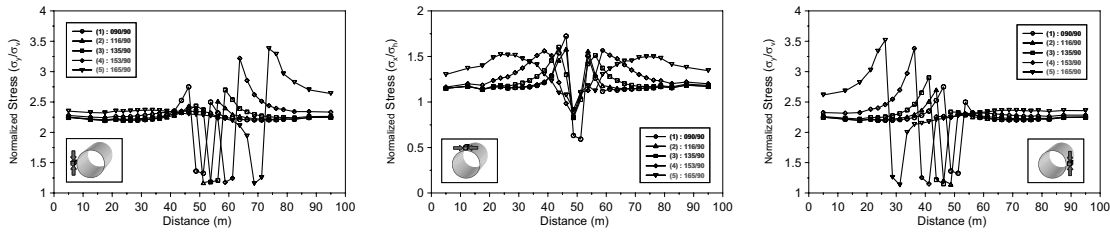


그림 13. 연약대의 경사방향(주향)에 따른 접선방향 응력

의 모델에서는 12~13mm 정도가 발생하였다. 연약대의 기하학적 구조로 인해 터널 우측벽 변위가 먼저 나타나고 좌측벽 변위가 나중에 나타났다. 터널 우측벽 변위는 경사방향이 165° 인 경우에 30m 지점에서 8.8mm, 경사방향이 153° 인 경우는 40m 지점에서 약 8.8mm, 경사방향이 135° 인 경우는 45m 지점에서 약 8.9mm, 경사방향이 116° 인 경우는 약 9mm 그리고 경사방향이 90° 인 경우는 50m 지점에서 약 19mm의 최대변위를 보였다. 반면에 좌측벽 변위는 이와 반대의 경향을 나타내며 변위 절대량은 우측벽의 경우와 거의 유사하게 나타났다. 응력은 그림 13과 같이 연약대를 통과하기 직전 암반에서 최대를 보이고 통과시 최소값을 나타낸다. 좌우 측벽부 접선응력은 서로 위치에 대칭되는 양상을 보이고 있다.

그림 14 는 터널 굴진방향 25m, 50m, 75m 지점에서의 단계별 내공변위 변화 양상을 보여준다. 먼저 경사방향이 90° 인 경우 연약대의 대칭적인 기하구조로 인해 좌우 측벽 변위가 거의 유사하게 나타나며, 50m 지점에서 연약대로 인해 최대변위가 발생하였다.

경사방향이 116° 인 경우 25m 지점의 변위는 터널이 25 m 지점을 굴진할 때 좌측벽은 약 0.74mm, 우측벽은

0.79mm가 발생하였고 최종적으로 좌측벽은 2.66mm 그리고 우측벽은 2.84mm 발생하여 좌측벽에 비해 우측벽의 변위가 약 7~8% 정도 크게 나타났다. 이는 연약대가 터널 우측에 존재하기 때문으로 판단된다. 연약대가 터널을 교차하는 50m 지점은 연약대의 기하학적 위치에 의해 좌측벽에 비해 우측벽 변위가 비교적 먼저 수렴함을 알 수 있으며, 변위는 좌측벽이 우측벽에 비해 약 1.5 배로 나타났다. 75m 지점은 25m 지점과 반대의 경향을 나타내어 우측벽보다 좌측벽의 변위가 크게 나타남을 알 수 있다.

경사방향이 135° 인 경우는 터널과 연약대가 정확히 45° 차이를 보이므로 25m 지점과 75m 지점의 변위는 서로 반대(대칭)의 경향을 보이며, 25m 지점은 우측벽이 그리고 75m 지점은 좌측벽이 반대측벽에 비해 약 1.2 배의 변위가 발생하였다. 50m 지점에서의 굴착시 좌우 측벽부 변위는 1.13mm와 0.9mm로 최종변위의 약 36%이며, 최종 수렴된 변위는 3.17mm와 2.51mm로 나타났다.

경사방향이 153° 인 경우는 앞선 경우보다 좀 더 뚜렷한 좌우 측벽 변위의 차이를 보이고 있다. 25m 지점에서의 천단변위는 최종 7.73mm이고 막장 통과시 천단변위

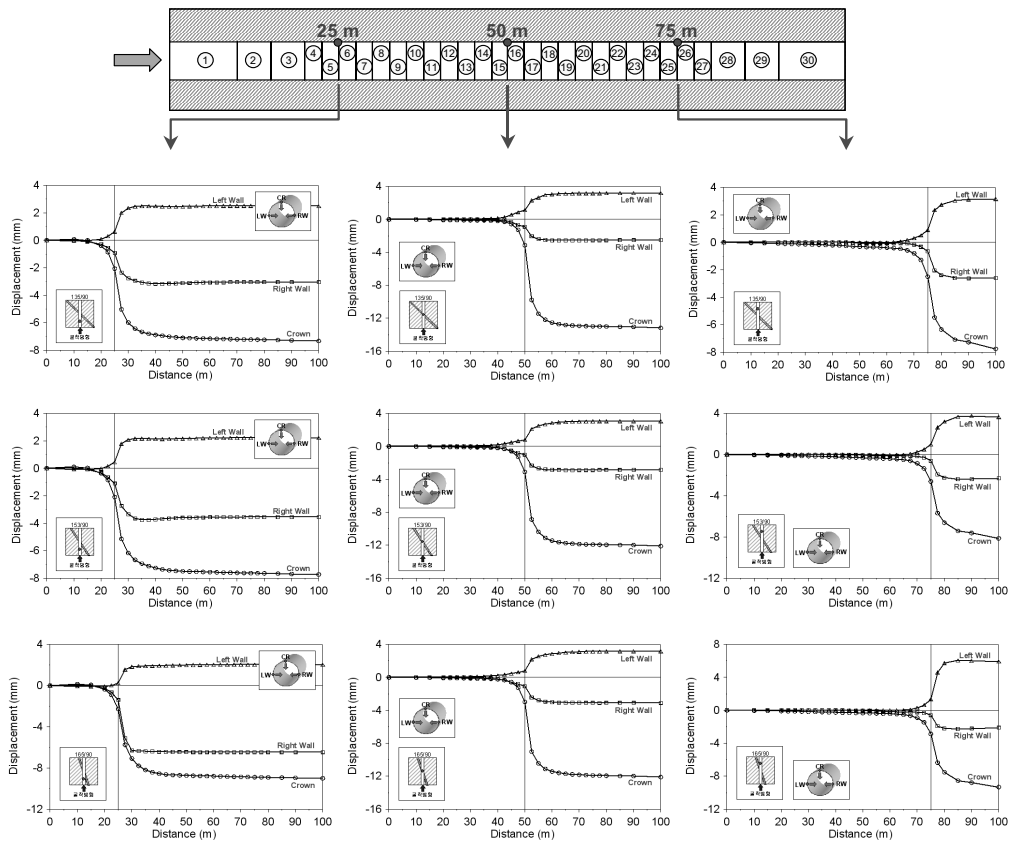


그림 14. 경사방향에 따른 각 터널 위치별 단계별 변위 거동 양상

는 2.1mm로 약 27%에 해당한다. 좌우측벽부 변위는 연약대 위치의 영향으로 그 차이가 명확하여 막장 통과시 좌측은 0.45mm, 우측은 1.11mm로 각각 최종 변위의 20%와 32%로 나타났으며, 우측벽 변위가 좌측벽에 비해 2.5배로 나타났다. 최종변위는 우측벽이 3.55mm로 좌측벽 변위의 약 1.6배로 뚜렷한 이방성 변위 양상을 보여주고 있다. 또한 50m 지점은 천단변위는 25 m 지점 보다 크게 나타났으나 좌우측벽부 변위는 오히려 감소하였는데, 이는 연약대가 터널 내부에 포함되어 있어 좌우측벽부는 연약대의 영향을 거의 받지 않았기 때문으로 판단된다.

마지막으로 경사방향이 165° 인 경우는 25m 지점과 75m 지점의 변위에서 알 수 있듯이 가장 연약대의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 연약대의 기하구조적

위치로 볼 때 터널과 가장 가까이 위치해 있으므로 좌우측벽부에서 강한 이방성 변위거동을 보여주고 있다. 25m 지점은 우측벽이 6.45mm 그리고 75m 지점은 좌측벽이 5.91mm로 각각 반대편 변위에 비해 약 3배 정도로 큰 값을 보였으며, 강한 이방성 거동 양상으로 추론해 볼 때 연약대의 위치를 간접적으로 확인할 수 있었다.

#### 4.4 터널과 45° 로 교차하는 연약대의 경사의 영향

터널 굴착에 따른 주향이 터널축방향과 45°를 갖는 연약대의 경사에 따른 내공변위 거동을 분석하였다. 135/30, 135/60, 135/90의 총 3가지 모델에 대하여 유한요소코드인 U3를 이용하여 3차원 해석을 수행하였다. 모

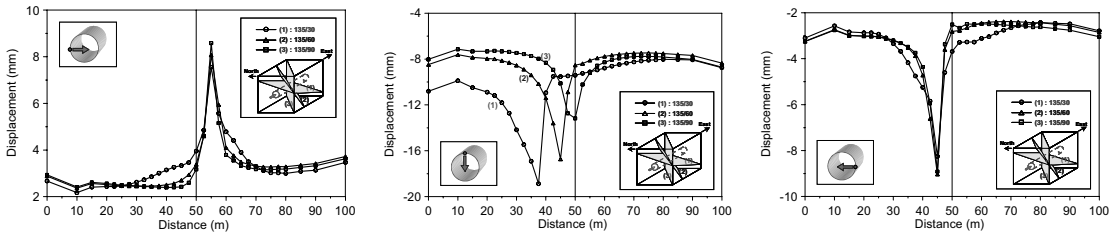


그림 15. 경사방향이 135인 연약대의 경사에 따른 내공변위

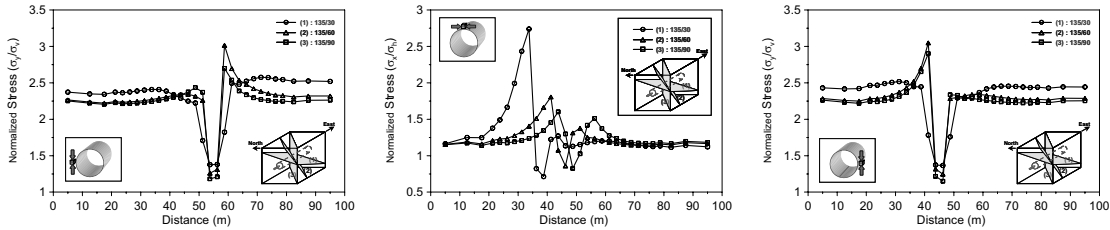


그림 16. 경사방향이 135인 연약대의 경사에 따른 접선방향 응력

델과 조건은 앞서 분석한 모델과 같다.

터널의 천단변위는 그림 15에서와 같이 경사가 30° 일 때 가장 변위 발생하였으며, 그 크기는 경사가 30°, 60°, 90° 일 경우 18.88mm, 16.73mm, 13.18mm로 나타났다. 이는 연약대가 천단부에 가까이 존재하는지에 관련되어 나타나는 결과이다. 좌우측 변위는 그 경향 및 최대 변위 발생 지점은 큰 차이가 없이 유사하게 나타났으며, 우측변 변위가 좌측변 변위에 비해 다소 크게 나타났다.

그림 16과 같이 연약대의 영향을 받기 직전에 최대응력을 보인다. 천단부 응력은 경사 30° 에서 가장 큰 값을 보이고 좌우측변부 응력은 경사 60° 에서 가장 큰 응력값을 나타내는데, 이는 연약대의 영향을 많이 받는 정도로 생각할 수 있다.

그림 17은 경사방향이 135° 인 연약대의 경사방향에 대한 터널 굴진방향 25m, 50m, 75m 지점에서의 단계별 내공변위 변화 양상을 나타내었다.

경사가 30° 인 경우 25m 지점은 연약대가 터널 천단부와 가장 가까이 위치하므로 천단변위가 가장 큰 영향을 받으며, 최대변위는 11.8mm이다. 연약대가 좌측에서 우측으로 약간 기울어져 위치하므로 좌측변위에 비해 우측변위가 약 1.2배로 큰 값을 보였다. 터널 굴진방향으로

연약대가 천단부에서 터널을 통과한 후 터널 하부로 이어져 있으므로 25m, 50m, 75m에서의 천단변위는 점점 감소하였다.

경사 60° 인 경우도 30° 의 경우와 유사하지만 좌우측 변위의 이방성 경향이 더 크게 나타났으며, 25m와 75m 지점에서 약 1.3배 변위 이방성을 보였다. 천단변위는 50m 지점에서 가장 큰값인 8.54mm를 나타냈으며, 이는 연약대가 직접 터널 천단부를 관통하고 있기 때문이다.

마지막으로 경사 90° 인 경우는 좌우 측변부 변위에서 가장 뚜렷한 변위 이방성을 볼 수 있으며, 25m 지점은 우측변에서 그리고 75m 지점은 좌측변에서 큰 변위를 보였다.

## 5. 결론

본 논문에서는 터널 거동에 대한 연약대의 폭, 강성 그리고 방향성의 영향을 평가하기 위하여 여러 가지 인자에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

연약대의 강성과 폭은 터널 주변 지반의 응력 분포뿐만

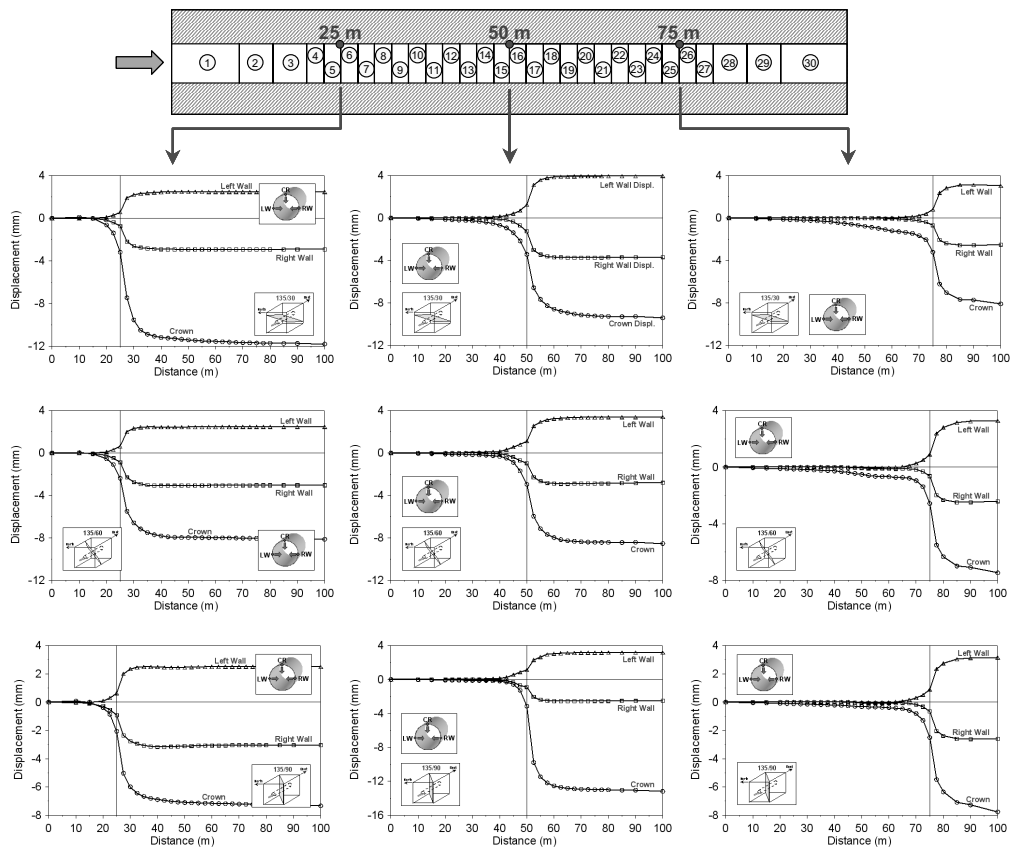


그림 17. 경사방향이 135인 연약대의 경사방향에 따른 단계별 변위 거동 양상

아니라 변위 거동에도 영향을 미친다. 일반적으로 응력은 연약대와 경계한 상대적 강성이 높은 암반에서 증가하는 반면에 연약대에서는 응력이 감소하였다. 연약대와 암반의 강성 차이가 클수록 응력 차이가 크게 나타났으며, 연약대의 폭은 절대변위량과 변위 곡선의 형상에 큰 영향을 미치고 그 경향은 유사하게 나타났다. 또한 연약대의 방향성에 따라 터널과의 기하학적 구조에 의해 단계별 굴착에 따라 이방성 거동을 나타내며, 이러한 강한 이방성 거동 양상으로부터 연약대의 위치와 발달 정도를 간접적으로 확인할 수 있다.

연약대나 파쇄대가 확실한 방향성을 가지고 존재하는 경우 변위 및 응력 그리고 벡터 방향성 등의 경향은 매우 뚜렷하게 나타났으며, 이러한 분석을 통해 막장 전방의 지반 상태를 예측 평가가 가능하다고 생각된다. 하지만

경사 및 경사방향이 터널 축방향과 복잡하게 교차하는 경우는 터널 천단부와 좌우 측벽부 변위 및 응력 분석으로는 그 경향성이나 변위 양상의 차이를 명확히 파악하기가 매우 어렵다. 따라서 천단, 좌우 측벽 그리고 좌우 어깨부 등을 포함한 가능한 많은 지점에서 변위 계측을 통하여 분석한다면 지반상태를 더욱 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서 분석한 결과들을 종합해볼 때 연약대가 터널 축방향과 수직으로 위치할 경우 변위, 응력 그리고 변위벡터 방향성이 가장 영향을 크게 받았으며, 경사 및 경사방향에 대한 터널 거동을 경향성이나 영향성 및 공간벡터 방향성 등을 통해 확인할 경우 본 해석의 결과를 활용한다면 개략적인 연약대의 위치 및 특성 등을 유추해 볼 수 있을 것으로 판단되며, 이와 더불어 막장 맵핑

결과를 동시에 활용한다면 변위 계측 및 분석으로부터 막장 전방 지반 상태를 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사사

본 연구는 건설교통기술혁신사업중 산학연공동연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김창용, 홍성완, 김광염, 백승한 (2004), "터널 내 공 변위 거동 분석에 관한 연구", 한국터널공학회 학술논문집 터널기술, Vol. 6, No. 3, pp. 183-197.
2. 문현구, 김창용, 김선홍 (1991) "지하 양수발전소 설계를 위한 불연속 암반의 2차원 및 3차원 응력해석", 한국자원공학회지, Vol. 28, No.4, pp. 273-283.
3. 박연준, 유광호, 송헌찬, 김기선, 이대혁 (2004), "3차원 수치해석을 이용한 터널막장 전방 지반 상태의 예측", 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 14, No. 6, pp. 440-449.
4. 백승한, 문현구 (2001) "불연속 암반의 3차원 이방성 변형특성의 평가", 한국자원공학회지, Vol. 38, No. 5, pp. 364-372.
5. 이인모, 강기돈, 박광준 (1998), "3차원 절대내공변위를 이용한 터널 막장전방의 지반변화 예측기법", 한국지반공학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 17-31.
6. 이인모, 김돈회, 이석원, 박영진, 안형준 (1999), "파쇄대 예측을 위한 터널의 3차원 수치해석", 한국지반공학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 99-112.
7. Kim, C.Y., et al. (2005), "Tunnel convergence analyses in heterogeneous/anisotropic rock masses", Proc. of the 31st ITA-AITES world Tunnel Congress, Istanbul, Turkey, Vol. 2, pp. 1091-1097.
8. Schubert, W. (1993), "Erfahrungen bei der Durchörterung einer Grosse Störung im Inntal tunnel", Felsbau 11, Nr. 6, pp. 287-290.
9. Schubert, W. and Budil, A. (1995), "Importance of longitudinal deformations in tunnel excavation", 8th Congress on Rock Mechanics, Proc. of Int. Society for Rock Mechanics, Tokyo, Japan, pp. 1411-1414.
10. Sellner, P.J. (2000), Prediction of Displacements in Tunnelling, Ph.D. thesis, Graz University of Technology, Austria, p. 130.
11. Steindorfer, A. and Schubert, W. (1997), "Application of new methods of monitoring data analysis for short term prediction in tunnelling", Tunnels for People. Golser, Hinkel, Schubert (eds.), Balkema, Vol. 1, pp. 65-69.



**백승한**

한양대학교 산업과학연구소  
연구조교수  
shbaek@hanyang.ac.kr



**김창용**

한국건설기술연구원 국토지반연구부  
수석연구원  
cykim@kict.re.kr



**김광엽**

한국건설기술연구원 국토지반연구부  
연구원  
kimky@kict.re.kr



**홍성완**

한국건설기술연구원 국토지반연구부  
연구위원  
swhong@kict.re.kr



**문현구**

한양대학교 지구환경시스템공학과  
교수  
hkmoon@hanyang.ac.kr