

## 계측자료를 이용한 터널의 종단변형도

장원일<sup>1)\*</sup>, 양형식<sup>2)</sup>, 정소걸<sup>3)</sup>

### Longitudinal Deformation Profile in Tunnel using Measured Data

Won-Yil Jang, Hyung-Sik Yang and So-Keul Chung

**Abstract** Longitudinal deformation profile (LDP) has been obtained mostly by numerical analysis. In this study, LDP was plotted by measured data from horizontal inclinometer and crown settlement. Deformation of face ahead was determined by comparing to the maximum deformation point and deformation of after excavation was determined by regression of the measured crown settlement data.

The result shows that crown deformation began as far as 3D ahead of the face. Crown settlement at the face was 40 % of ultimate deformation, which was 10 % higher than numerical results, and the deformation converged after excavation of 4D.

**Key words** Tunnel, Longitudinal deformation profile, Measurement

**초 록** 기존의 연구에서 터널 종단변형도는 대부분 수치해석적 방법으로 구해졌으나, 본 논문에서는 실제 계측치를 이용하여 종단변형도를 구성하고 굴착에 따른 터널의 종단변위 발생 경향을 검토하였다. 막장전방의 변위는 수평경사계 계측치의 최대변위에 대한 지점 변위를 비교·분석하여 가장 적합한 결과를 나타내는 지점의 변위를 채택하였고, 막장 후방은 천단변위계에 의한 계측치를 회귀분석하여 구하였다.

연구 대상 터널의 계측치로 천단변위를 분석한 결과, 막장 3D 이전부터 변위가 발생하였고, 막장에서는 수치해석적으로 구한 내공 변위에 비해 10% 정도 높은 약 40%의 변위가 발생하였으며, 막장 후방 4D 이후 최종변위에 수렴하는 것으로 나타났다.

**핵심어** 터널, 종단변형도, 계측

## 1. 서 론

굴착에 따라 발생하는 지반의 전체 거동을 분석하여 시공 중 터널의 안정성에 영향을 미치는 요인들을 사전에 파악하기 위해서는 막장 후방 뿐 아니라 막장 전방의 변형을 포함하는 터널 종단변형을 고려해야 한다. 그러나 막장 후방에 발생하는 변위는 계속작업이 막장 전방에 비해 비교적 간단하고 문제가 되는 초기변위 예측에 대해서도 많은 연구가 수행되었으나, 막장전방에 발생하는 변위의 정량적인 계측은 최근 3차원 계측 등

의 방법이 도입되는 등 모니터링 기법이 계속 발전하고 있지만, 현실적으로 어려움이 따른다.

수치해석적인 방법을 통하여 Carranza-Torres and Fairhurst(2000)는 굴착에 따라 발생하는 종단변형도(longitudinal deformation profile, LDP)는 S자 형태와 비슷한 양상을 보인다고 하였으며, Hoek and Marinos(2000)에 의하면 터널 굴착기간 동안 암반 주위에 응력이 변화하고, 이에 따라 주변 암반에 변형이 발생하며, 변형은 터널 축을 따라 2~3D, 혹은 4D의 거리에서 급속히 감소한다. 또한 Lunardi(2000)는 막장 전진에 따른 전방 core 거동의 이해와 제어는 성공적인 굴착을 위해 반드시 필요한 사항이며, 막장에서는 터널 자체와 동일한 일반적인 변형 패턴을 따르고 총변위의 약 30% 정도가 발생한다고 하였다.

이와 같이 막장 후방에 발생하는 변위를 포함한 LDP에 대한 연구는 대부분 수치해석적 방법에 의해 수행되

<sup>1)</sup> 한국해양대학교 해양개발공학부 교수

<sup>2)</sup> 전남대학교 건설지구환경공학부 교수

<sup>3)</sup> 지질자원연구원 책임연구원

\* 교신저자 : jwy@hhu.ac.kr

접수일 : 2008년 9월 10일

심사 완료일 : 2008년 10월 7일

게재 확정일 : 2008년 10월 10일

있고 현장에서 계측된 막장후방의 변위를 포함한 LDP에 대한 연구 사례는 외국의 경우에도 많지 않다.

따라서 본 논문에서는 단방향 굴착 터널에 대한 천단 변위의 막장 후방 계측치와 수평경사계에 의한 막장 전방 계측치를 이용하여 굴착에 따른 터널의 LDP를 구하고 타당성 여부 등을 검토하고자 한다.

### 2. 이론적 배경

터널 굴착에 따른 막장 전, 후방에 발생하는 변위에 대한 연구는 많으나 대부분 수치해석적 방법에 의해 수행되었고, 굴착에 따라 발생하는 내공변위의 경우 그림 1과 같이 막장으로부터 터널 직경의 2배에 해당하는 2D 전방에서 변위가 발생하여 막장에서는 약 30%의 변위가 발생하고, 막장으로부터 후방 4D에서 최대변위로 수렴한다고 알려져 있다(Unlu and Grecek, 2003).

또한 막장으로부터 거리에 따라 발생하는 변위를 Panet (1995)는 막장 후방에 발생하는 최대변위에 대한 변위를 식 (1)과 같이 제안하였고

$$\frac{U}{U_{MAX}} = 0.25 + 0.75 \left[ 1 - \left( \frac{0.75}{0.75 + x/R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Carranza-Torres 등(2000)은 막장 전방과 후방에서 발생하는 변위를 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$\frac{U}{U_{MAX}} = \left[ 1 + \exp\left(\frac{-x/R}{1.10}\right) \right]^{-1.7} \quad (2)$$

여기서  $U$ 는 터널의 반경방향변위,  $U_{MAX}$ 는 발생 최대 변위,  $R$ 은 터널의 반경,  $x$ 는 막장에서의 거리를 나타낸다.

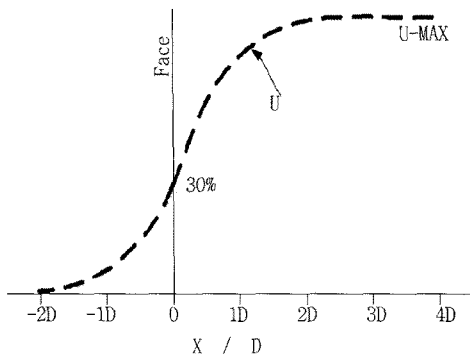


그림 1. 굴착에 따라 발생하는 내공변위(Unlu & Grecek, 2003)

그러나 이와 같은 식들은 수치해석에 의한 결과이며, 그림 2와 같이 막장에서의 내공변위는 Panet(1995)의 식에 의하면 최대변위의 28%, Carranza-Torres 등 (2000)에 의하면 최대변위의 31.8%가 발생한다.

### 3. 계측치 및 분석

터널 굴착으로 인하여 막장으로부터의 거리에 따라 막장 전방과 후방에 발생하는 예측 변위에 대하여 이와 같은 수치해석적 방법과는 달리 본 논문에서는 실제 계측치를 분석하여 검토하였다. 굴착에 따른 종단변형도는 수평경사계에 의해 계측된 자료를 분석, 그 결과를 바탕으로 적합성이 높은 지점의 데이터를 이용하여 막장으로부터의 거리에 따른 전방의 변위로 나타내고, 막장 후방은 천단변위계에 의한 계측치를 회귀 분석한 결과를 이용하여 나타내었다.

현장 계측은 당진-대전간 고속도로 제6공구 차동터널에서 수행되었다. 천단변위 계측은 그림 3의 Sta+690 지점, Sta+695 지점과 Sta+710 지점을 중심으로 수행되었고, 암반등급 IV, V에 해당하는 Sta+690 지점과 Sta+710 지점의 천단변위를 분석하여 막장으로부터 거리에 따른 막장 후방에 발생하는 변위를 예측하였다. 막장 전방 선행변위 계측을 위한 수평경사계는 한 방향 굴착 터널의 특성을 고려하여 그림 3과 같이 Sta+664와 Sta+694 사이에 길이 30 m로 매설하고 계측은 수평경사계 끝 부분 27.2 m 전방에서부터 계측하여 수평경사계 매설 30 m 구간에서 0.5 m 간격으로 계측하였다(장원일 외 2007). 지점변위를 중심으로 변위발생 양상을 분석한 “터널 시공 중 수평경사계를 이용한 변위분석(장원일 외 2007)”과 수평경사계 계측자료는 동일하

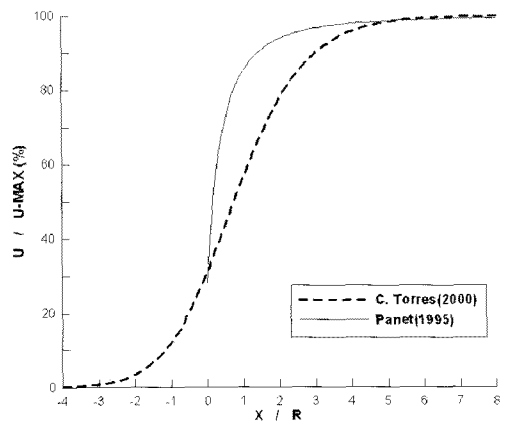


그림 2. Panet(1995)와 C. Torres(2000)에 의한 내공변위 발생 양상

나 본 논문에서는 종단변형도의 타당성 검토를 위해 동일한 자료를 이용하여 막장후방 천단변위 분석과 연계하여 LDP를 중심으로 다루었다.

수평경사계에 의한 천단변위는 계측치의 최대변위 대한 지점변위가 비교적 일치하는 구간의 자료를 중심으로 막장으로부터 거리에 따른 막장 전방에 발생하는 변위를 분석하였다.

최대변위에 대한 수평경사계 계측지점 변위가 거의 일치하는 양상을 나타내는 구간의 자료를 분석한 결과, 지보 설치 등으로 인하여 불안정한 값을 나타내는 구간까지 추적한 수평경사계에 의한 계측구간의 최대치는 32.44 mm로 예측되었다.

따라서 계측치의 회귀 분석 결과를 최대변위 32.44 mm로 정규화하여 막장으로부터의 거리에 따라 막장전방에 발생하는 변위로 하고, Sta+690 지점과 Sta+710 지점의 천단변위계에 의한 계측치의 회귀 분석 결과를 막장후방의 변위로 하여 분석하였다.

수평경사계 기준 26.0 m 지점의 계측치를 막장 전방의 발생 변위로, Sta+690 지점의 천단변위계에 의한 결과를 막장 후방의 발생 변위로 하여 이를 나타내면 그림 4와 같다. 그림에서 막장 전방의 변위는 막장으로부터

터 전방 3D에서 발생하여 막장에서는 총 변위의 약 40%가 발생하고 막장 후방 4D 이후 최대변위에 수렴하는 것으로 나타났다.

수평경사계 기준 24.0 m 지점의 계측치를 막장 전방의 발생 변위로, Sta+690 지점의 천단변위계에 의한 결과를 막장 후방의 발생 변위로 하여 이를 나타내면 그림 5와 같으며, 막장 전방의 변위는 막장 전방 5D 이전부터 발생하여 막장에서는 총 변위의 약 40%가 발생하고, 막장 후방 4D 이후 최대변위에 수렴하는 것으로 나타났다.

그림 6, 7은 막장 후방의 발생 변위는 Sta+710 지점의 천단변위계에 의한 계측 자료를 분석하여 나타내고, 막장 전방은 각각 수평경사계 기준 26.0 m, 24.0 m 지점의 자료를 분석하여 나타낸 것이다.

그림 4, 5와 그림 6, 7의 막장 후방에서의 거리에 따라 발생하는 변위 양상의 차이는 Sta+690 구간은 암반 등급 V이고 Sta+710 구간은 암반등급 VI의 결과로 판단되며, 이는 암반을 탄성으로 가정하고 수치해석적 방법으로 접근한 Panect(1995)의 결과와 Sta+710 구간은 거의 비슷한 양상을 보인다.

막장으로부터 거리에 따라 발생하는 내공변위의 경우

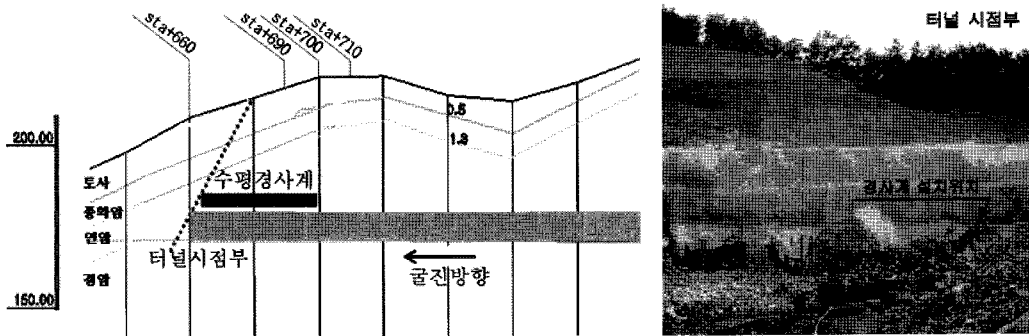


그림 3. 수평경사계 및 천단변위 계측 지점

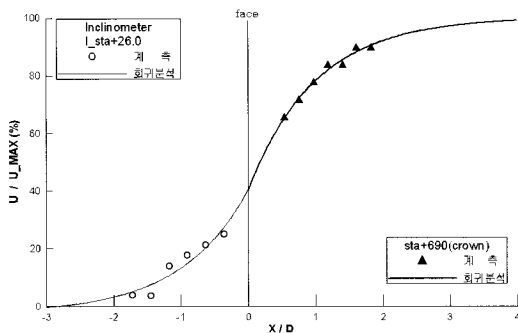


그림 4. 막장에서 거리에 따른 발생 천단변위(I\_Sta+26.0, Sta+690)

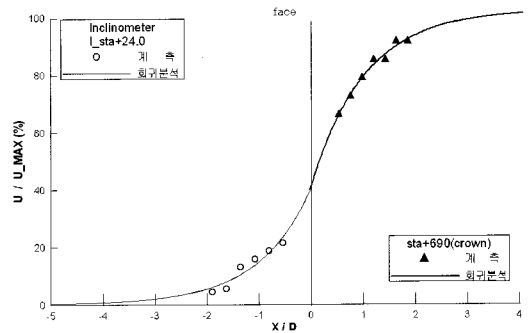


그림 5. 막장에서 거리에 따른 발생 천단변위(I\_Sta+24.0, Sta+690)

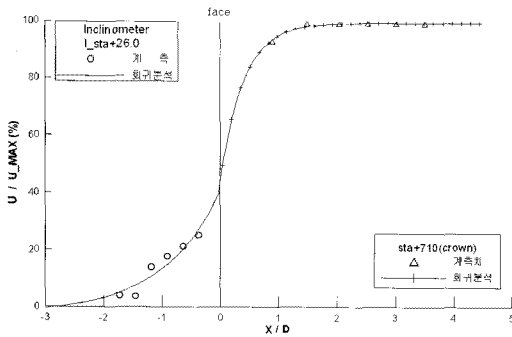


그림 6. 막장에서 거리에 따른 발생 천단변위(I\_ Sta+26.0, Sta+710)

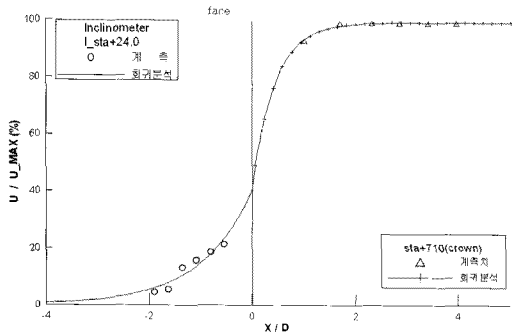


그림 7. 막장에서 거리에 따른 발생 천단변위(I\_ sta+24.0, sta+710)

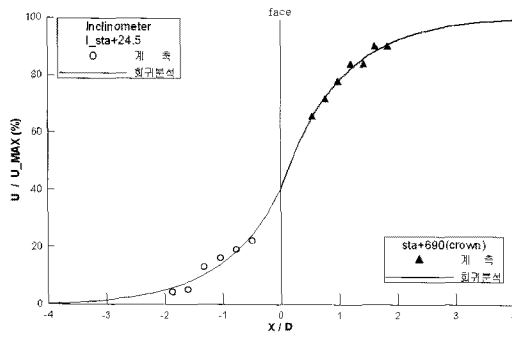


그림 8. 막장에서 거리에 따른 발생 천단변위(I\_ Sta+24.5, Sta+690)

Panet(1995), Carraza-Torres 등(2000)의 수치해석적 방법에 의하면 막장 전방 2D에서 변위가 발생하여 막장에서 약 30%의 변위가 발생하며, 막장 후방 4D에서 최종변위에 수렴하고 있다. 그러나 본 논문의 연구 대상 터널에서의 계측치에 의한 천단변위의 발생 양상은 막장 3D 이전부터 변위가 발생하여 막장에서는 수치해석

적 방법에 의한 내공 변위에 비해 10% 정도 높은 약 40%의 변위가 발생하고, 막장 후방 4D 이후 최종변위에 수렴하는 것으로 나타났다.

수평경사계 각 계측 지점의 분석을 바탕으로 연구 대상 터널에서의 대표적인 굴착에 따른 발생 변위 양상을 도시하면 그림 8과 같다.

그림 8은 수평경사계 지점 변위 분석결과 가장 적합한 결과를 나타내는 수평경사계 기준 24.5 m 지점의 계측치를 분석하여 막장 전방의 변위로 하고, 막장 후방의 변위는 이와 암반등급이 동일하다고 볼 수 있는 Sta+690 지점의 천단변위계에 의한 계측치를 분석하여 적용한 것이다.

#### 4. 결론

단방향 굴착 터널에 대한 천단변위의 막장 후방 계측치와 수평경사계에 의한 막장 전방 계측치를 이용하여 굴착에 따른 터널의 중단변위 발생 경향과 중단변형도를 검토한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 연구대상 터널의 수평경사계 누적변위 중 최대변위에 대한 지점변위가 거의 일치하는 양상을 나타내는 구간의 자료를 분석한 결과 수평경사계에 의한 천단변위 최대치는 32.44 mm로 예측되었다.
- (2) 굴착에 따른 중단변형도는 수평경사계에 의해 계측된 자료를 분석, 그 결과를 바탕으로 적합성이 높은 지점의 데이터를 이용하여 막장 전방 변위로 나타내고, 막장 후방은 천단변위계에 의한 계측치 회귀분석 결과를 적용하는 방법은 적합하였다.
- (3) 계측치에 의한 천단변위 분석 결과, 막장 3D 이전부터 변위가 발생하여 막장에서는 내공 변위에 비해 10% 정도 높은 약 40%의 변위가 발생하고, 막장 후방 4D 이후 최종변위에 수렴하는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 장원일, 양형식, 정소걸, 2007, 터널 시공 중 수평경사계를 이용한 변위분석, 터널과 지하공간, Vol. 17, 428-434
2. C. Carranza-Torres and C. Fairhurst, 2000, Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion, Tunnelling Underground Space Technol., 15(2), 187-213.
3. Hoek, E., and P. Marinos, 2000, Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses, Tunnels and Tunnelling International, 32, 45-51, 32, 34-36.
4. Lunardi, P., 2000, The design and construction of tunnels

- using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils, T&T international ADECO-RS Approach may, 3~30.
5. Panet, M., 1995, Calcul desT unnels par la Me'thode de Convergence-Confinement. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chausse'es, Paris, 178.
  6. Unlu T., H. Gercek, 2003, Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel Tunnelling and Underground Space Technology, 18, 547~553.

### 장 원 일



1977년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
학사  
1980년 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
2008년 전남대학교 대학원 지구시스템공학과  
박사

Tel: 051-410-4438  
E-mail: jwy@hhu.ac.kr  
현재 한국해양대학교 해양개발공학부 교수

### 양 형 식



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

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

### 정 소 걸



1975년 서울대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1982년 Ecole des mines de Nancy (France)  
DEA  
1984년 Orleans 대학(France) 공학박사

Tel: 042-868-3231  
E-mail: skchung@kigam.re.kr  
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부  
책임연구원