# 현장계측 및 역해석 기법을 이용한 터널 굴착에 따른 전변위 산정

윤현석[1] · 임성빈[2] · 서용석[3]* · 박시현[4]

## 1. 서 론

터널은 기하학적 특성상 전 구간에 대한 정밀 조사를 수행하기 힘들며, 조사의 정밀도를 높이는 데는 조사비용이 높아지고 처리시간이 길어지므로 시공 중에 수행되는 지질조사 및 변위거동 분석이 중요하다. 그 중 터널의 변위거동 분석을 위해 행해지는 계측은 합리적인 공학적 판단을 할 수 있는 정량적인 중요한 자료로서 경제적인 터널 시공과 시공 중 안정성 평가를 위한 필수적인 요소이다.

일반적으로 국내 터널 시공현장에서는 변위계측(주로 A계측)이 주로 이루어있다. 그러나 변위계측은 막장이 굴착된 후 환기 및 버럭 처리에 필요한 시간이 소요되고 막장에서의 거리를 두고 측정을 시작하는 등의 단점을 가진다. 즉 계측변위는 계측 시작 시점과 막장에서의 거리 등에 의해 좌우되는 변위량이며, 터널의 안정성을 판단하는 관리기준치와 단순히 비교하기에는 상당한 어려움이 따른다. 또한 터널에서는 굴착 전 이미 상당량의 선행변위가 발생하게 되는데 일반적으로 이들의 측정을 통해서 지반의 전 변위를 측정할 수 있으며, 막장전방의 연약대 및 파쇄대와 같은 지질 이상대를 파악할 수 있다. 선행변위 측정을 위해서는 흔히 수평경사계 또는 파이프 변형률계 등을 사용하지만, 현실적으로 선행변위 계측은 많은 시간과 비용이 소모되므로 일반적인 지반에서 측정한 사례는 드물다.

따라서 일반적인 지반에서의 터널 굴착에 따른 절대변위의 예측모델을 개발할 필요가 있다. 지반 특성에 따라 좌우되는 터널의 거동특성을 고려할 때, 지반 종류별 선행변위 및 전체 절대변위 발생율 등을 산정한다면, 터널 시공 시 변위예측 및 안정성 평가 등에 활용할 수 있을 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 퇴적암 지반의 터널을 선정하여 현장에서의 계측변위와 3차원 수치해석을 통한 역해석 방법을 이용하여 굴착에 따른 전변위의 분포 특성을 추정하였으며, 그에 따른 터널 절대변위의 비선형 회귀식을 산정하였다.

## 2. 본 론

굴착에 따른 전변위 추정을 위해 퇴적암을 기반으로 하는 OO 터널을 연구대상으로 선정하였으며, 그 중 RMR 분류 결과 4등급으로 분류되어 보강된 구간의 15개 지점의 변위자료를 분석하였다. Fig. 1은 OO 터널의 천단침하 특성을 나타낸 것으로서, 이는 Fig 2의 터널 굴착에 따른 지반변위 곡선 중 계측변위 구간에 해당된다. 천단침하량은 최대 5.6mm, 최소 2.0mm 그리고 평균 4.0mm를 보인다.

역해석을 통한 절대변위 추정을 위해 본 연구에서는 3차원 수치해석 프로그램인 PENTAGON 3D를 사용하였으며, 모델은 Fig. 3과 같이 최대한 OO 터널의 형상과 유사하게 하여 일반적인 4등급 지반의 굴착을 고려하여 작성하였다. 터널의 직경은 10m, 1회 굴진장은 1.5m로 상·하반 분할굴착을 가정하였으며, 숏크리트와 록볼트 보강을 적용하였다.

**주요어** : 절대변위, 역해석, 로지스틱 모형, 최소제곱추정법

1) 충북대학교 지구환경과학과(bins123@hanmail.net)
2) 충북대학교 지구환경과학과(yhs0211@hanmail.net)
3) 충북대학교 지구환경과학과(ysseo@cbu.ac.kr)
4) 한국시설안전기술공단 지하시설실(parksh@kistec.or.kr)

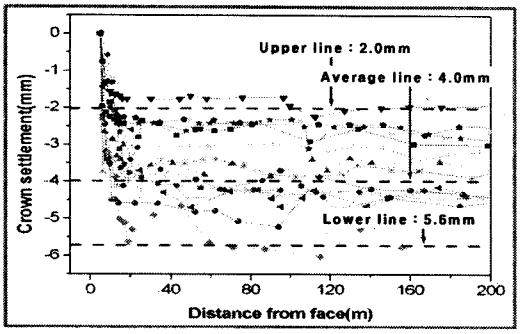


Fig. 1 Relationship between crown settlement and distance from tunnel face

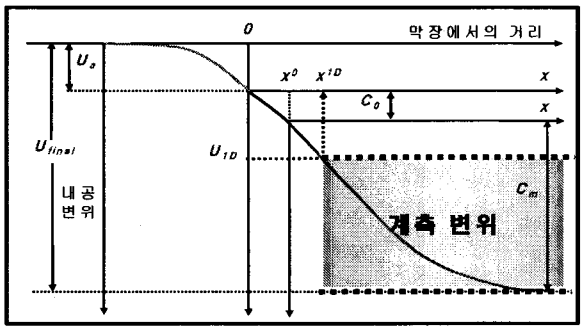


Fig. 2 Ground settlement due to excavation of tunnel

수치해석은 실제 OO 터널의 최대, 최소, 평균 천단침하량과 동일한 결과가 나올 때 까지 다른 물성을 적용하며 반복 수행되었다. Fig. 4는 수치해석에 의해 최종적으로 산출된 전변위 곡선과 실제 계측된 천단침하량을 함께 도시한 것이며, A, B, C는 각각 굴착 전 선행변위, 굴착 후 선행변위, 계측변위 구간에 해당된다. 각각의 정량적인 데이터는 Table 1에 요약하여 나타내었다.

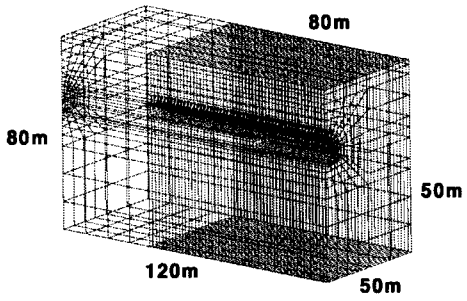


Fig. 3 A mesh for 3-dimensional analysis

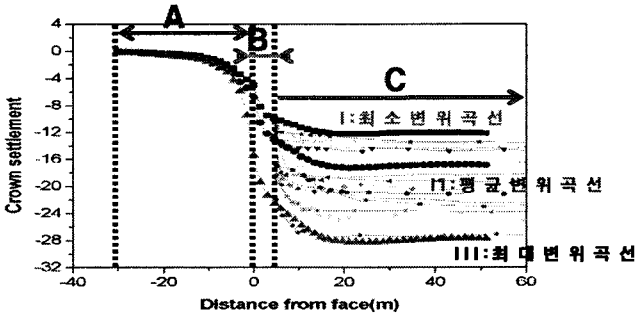


Fig. 4 Crown settlements of longitudinal crowr nodal points

Table 1 The summarized results of 3-dimensional numerical analysis

| Parameter | Lower line | | Average line | | Upper line | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Crown settlement (mm) | Displacement ratio (%) | Crown settlement (mm) | Displacement ratio (%) | Crown settlement (mm) | Displacement ratio (%) |
| Total displacement | -12.1 | 100 | -17.2 | 100 | -28.1 | 100 |
| Pre-displacement(A) | -5.3 | 44.0 | -7.1 | 41.1 | -15.4 | 54.8 |
| Pre-displacement(B) | -4.7 | 39.0 | -6.1 | 35.6 | -7.4 | 26.3 |
| Measured displacement(C) | -2.0 | 17.0 | -4.0 | 23.3 | -5.6 | 18.9 |

굴착에 따른 절대변위의 변화를 가장 잘 표현할 수 있는 비선형 회귀모형은 여러 가지 검토를 거친 결과 로지스틱 모형이 가장 적합한 것으로 판단되었다. 본 연구에 적용된 로지스틱 모형식은 식 (1)과 같다.

$$y = \frac{K}{1+\exp(a-bx)} + \epsilon \qquad (1)$$

여기서, y : 누적 관측값, a, b : 모수
K : 극한값, ε : 오차

비선형 모형의 모수 추정을 위해서는 일반적으로 최소제곱추정법이 사용된다. 그 과정에서 정규방정식의 해를 구하기는 쉽지 않다. 따라서 선형화법(linearization), 최대경사법(steepest decent method), 심플렉스탐사법(simplex search method) 또는 선형화법과 최대경사법을 혼용하여 만든 Marquart의 방법을 이용하여 최소제곱추정값을 수치적으로 계산한다.

최종적으로 추정된 모수는 Table 2와 같으며, Fig. 5는 추정된 비선형 회귀식에 의한 곡선과 수치해석에 의한 결과를 함께 나타낸 것이다.

Table 2. Estimated parameters by least square estimation

| | Estimated parameter | | | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|
| | a | b | K | |
| Lower | -0.107 | 0.293 | -12.074 | 0.997 |
| Average | 0.160 | 0.268 | -16.954 | 0.998 |
| Upper | -0.007 | 0.330 | -27.732 | 0.997 |

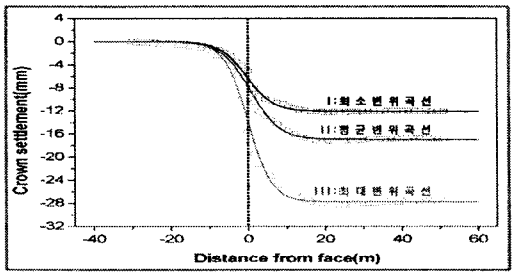


Fig. 5 Nonlinear regression curves

## 3. 결 론

퇴적암 4등급 지반의 계측변위와 3차원 수치해석을 통한 역해석 방법을 이용하여 굴착에 따른 전변위를 추정하였고, 이로부터 굴착에 따른 절대변위의 비선형 회귀식을 산정하였다. 이 결과는 계측 결과의 일부만으로 전체변위를 예측하여 터널의 굴착 중 안정성을 평가하거나, 변위의 수렴지점을 조기에 예측하는 등의 다양한 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

향후 퇴적암의 다른 등급의 지반에 대한 분석과 화성암 및 변성암을 기반으로 하는 터널에 대한 동일한 연구를 계속 수행할 예정이다.

## 4. 사사

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업인 "IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공기술개발 - 막장전방 보강재의 성능평가 기법 및 보강효과에 대한 현장실험적 연구(과제번호:C105A1020001-05A0502-00240)" 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.