

# 변형률 연화모델과 현장계측을 이용한 저토피 NATM터널의 변형해석

## Deformation Analysis of a Shallow NATM Tunnel using Strain Softening Model and Field Measurement

이 재 호<sup>1)</sup> · 김 영 수<sup>†</sup> · 문 흥 득<sup>2)</sup> · 김 대 만<sup>3)</sup> · 김 광 일<sup>4)</sup>

Lee, Jaeho · Kim, Youngsu · Moon, Hongduk · Kim, Daeman · Jin, Guangri

**ABSTRACT** : The control and prediction of surface settlement, gradient and ground displacement are the main factors in urban tunnel construction. This paper carried out the estimation and prediction of ground behavior around tunnel due to excavation using computational method and case study in detail for the analysis of deformation behavior in urban NATM tunnel. Computational method was performed by FLAC-2D with strain softening model and elastic plastic model. Field measurements of surface subsidence and ground displacement were adopted to monitor the ground behavior resulting from the tunneling and these values were applied to modify tunnel design parameters on construction.

**Keywords** : NATM tunnel, Strain softening modeling, Deformation analysis, Case study

**요 지** : 지표면 침하량, 침하 기울기 그리고 터널주변의 지반변위에 대한 관리와 예측은 도심지 터널 시공에 있어서 주요한 인자가 된다. 본 논문은 도심지 NATM터널의 변형거동에 대한 세밀한 분석을 위하여 사례분석과 수치해석적인 방법을 통하여 굴착에 따른 지반 평가와 거동 예측을 수행하였다. 수치해석적인 방법은 FLAC-2D 변형률 연화모델과 탄소성모델을 이용하였다. 현장계측은 지표면 침하와 지중변위를 수행하였으며, 계측결과는 시공중 설계물성치의 재설정에 이용되어졌다.

**주요어** : 도심 NATM tunnel, 변형률 연화모델, 변형 해석, 사례분석

## 1. 서 론

최근, 인구밀집형 거대 도시, 도시 근교지역의 주거지화 그리고 중소형 도심지의 발달에 있어서 입체적인 도시 미각과 환경 정비 그리고 대중 교통수단으로서의 지하철도 이용에 대한 욕구에 의해 도심 지하공간의 개발과 활용에 관하여 보다 많은 관심이 대두되고 있다. 도심지 지하 터널은 주변 구조물의 존재 하에서 미고결성 저토피 지반에 건설되는 경우가 많기 때문에 일반 산악 터널이나 대심도 암반층에 건설되는 지하공동과는 달리 터널 주변의 지반 변위와 지표면 침하가 터널 설계의 주요인자가 된다(Peck, 1969).

이러한 지반에서의 터널 굴착에 따른 변형거동은 터널 어깨로부터 발달하는 전단대(shear band)의 형성과 터널 상부 지반의 이완에 따른 공동 침하가 특징적이다(Hansmire와 Cording, 1985). Negro와 de Queiroz(2000)은 저토피 터널에 있어서 수치해석적인 관점에서의 예측과 실제에 관하여 적용 사례를 분석하였다.

그들은 저토피 터널에 대한 변형거동의 예측이 일반적으로 탄성과 탄소성 모델을 활용한 수치해석적인 방법에 크게 의존하고 있기 때문에 현장의 변형거동을 묘사하기에는 부족한 점이 많으며, 비선형적인 구성모델과 초기 계측결과의 적극적인 활용을 수행한다면 어느 정도 실제의 거동을 묘사할 수 있다고 설명하였다. 최근, 우리나라도 다양한 해석적인 기법을 통해 도심지 터널에 대한 안정성과 변형거동에 관하여 연구가 진행되고 있다(유광호 등, 2000 ; 신종호와 이인근, 2001 ; 김영민, 2005 ; 김영수 등, 2006). 또한, 현장 계측결과를 통해 미고결 저토피 터널의 역학적인 거동에 대한 특성에 대하여 연구한 사례도 있(홍성완 등, 1985 ; 배규진, 1989). 그러나, 설계 및 시공단계에서 수행되어진 수치해석 결과와 시공단계에서 계측되어진 값과의 비교·검토를 수행한 연구는 많지 않다. 도심지 NATM터널의 경제적이고 안정적인 설계 및 시공을 위해서는 미고결 지반에서의 역학적인 거동 특성의 해명, 지보시스템 효과의 파악, 지표면 침하에 대한 지하수의 영향

1) 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사후 연수 연구원

† 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail : kimysu@knu.ac.kr)

2) 정희원, 진주산업대학교 이공대학 토목공학과 부교수

3) 정희원, University of British Columbia 공과대학 토목공학과 박사후 연수 연구원, 캐나다

4) 비희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사수로

등을 연구할 필요성이 있다.

본 논문은 저토피 미고결지반인 도심지 터널의 합리적인 설계 해석 방법의 확립을 위한 기초적인 연구로서 현장 계측 분석과 연화모델을 이용한 수치해석적인 방법의 현장 적용성에 관하여 연구한 내용이다. 수치해석은 2차원 유한 차분 해석프로그램인 FLAC 2D V. 4.0(2003)이 사용되어졌다. 현장 계측을 위한 연구 터널은 일본 동북신간선 00 터널(Kitagawa 등, 2005)을 대상으로 하였다. 본 연구는 2가지 방향으로 이루어졌다. 첫 번째, 수치해석적인 매개변수 연구(parameter study)를 통한 지반 거동의 평가를 연구하였다.

수치해석은 가능성 있는 몇 가지 지반 물성치를 이용하여 수행하였다. 둘째, 매개변수 연구와 현장계측 결과를 통하여 시공중 재설정된 물성치와 함께 연화모델의 현장 적용성을 검토하였다.

## 2. 저토피 터널의 변형거동 특성

그림 1은 워싱턴 D.C의 지하철 터널 건설시에 계측된 지중 변위계 및 경사계의 현장 계측결과에서 Hansmire와 Cording(1985)이 이끌어낸 터널 주변 최대 전단 변형률의 분포도이다.

Murayama와 Matsuoka(1969)은 알루미늄 붐을 이용한 트랙도어(trak door) 실험을 수행하여 저토피성 지반에서의 변형 거동 및 토압 특성에 관하여 연구를 수행하였다. 그림 2는 모형실험 결과와 변형 특성을 설명하기 위해 나타낸 그림이다. 그림 2에서 영역 I은 트랙도어와 함께 저하되고, 그 결과로 인하여 영역 II가 침하한다. 영역 III은 변형거동

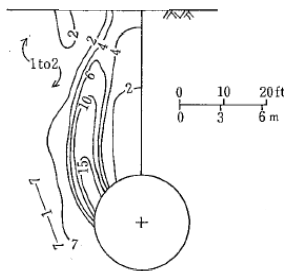


그림 1. 터널주변의 전단대

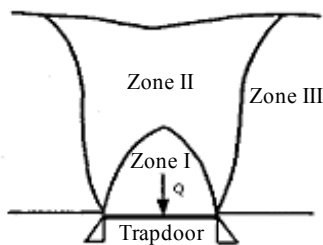


그림 2. 실험에서 나타난 변형특성

의 영향을 받지 않는 구간이다. 그림 1과 2에서 터널 양 어깨부에서 지표 방향으로 비선형적인 전단대의 형태가 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 형태는 미고결 저토피 터널에서 아칭이론이 성립되기 어려움을 표시하며, 전단과 터널 상부지반이 동시에 침하가 일어나는 위험한 상태를 알 수 있다. 미고결 저토피 터널이 가지는 비선형적인 거동을 설명하기 위하여 얼마간의 수치해석적인 방법이 연구되어졌다(Sakurai와 Akayuli, 1998; Sterpi, 1999).

본 논문에서는 미고결 저토피 NATM 터널의 비선형적인 변형특성을 고려하기 위해 변형률 연화모델을 이용하였다.

## 3. 현장 개요 및 계측

### 3.1 지형 및 지질

본 논문은 일본의 동북 신간선 00 터널(Kitagawa 등, 2005)의 종점측 갱구에서 시점 측으로 400m 떨어진 614k 750m (A지역)에 대해서 계측한 값을 분석하였다(그림 3). 이 지점은 사질토의 미고결 지반으로 구성되어 있으며, 연구의 목적이 되는 저토피 터널의 주변 지반 거동을 명확하게 파악할 수 있다고 예상되어 검토 단면으로 선정하였다. 그림 3은 본 연구 대상이 되는 동북 신간선 00 터널(Kitagawa 등, 2005)의 평면도 및 종단도를 나타내고 있다. 그림 3에서 터널이 지나가는 구간은 모래가 퇴적하여 이루어진 층 (Nos)으로 구성되어 있음을 알 수 있다. Nos(사질토)층은 세립 분포율이 10%정도이며, 균등계수가 5이하인 비교적 세립질의 작은 입자가 나열된 모래층에 위치하고 있는 지층이다(Kitagawa 등, 2005). Nos(사질토)층의 상부에는 화산재층(ta, te)이 쌓여 있는 상태이다.

### 3.2 터널 굴착 및 지보공법

굴착 패턴은 상·하 분할 굴착을 실시하였고, 굴착시 지보공법으로는 20cm두께의 쏫크리트(shtcrete) 시공과 150H의 강재 지보공(steel rib), 길이 3m의 락볼트(rock bolt) 시공,

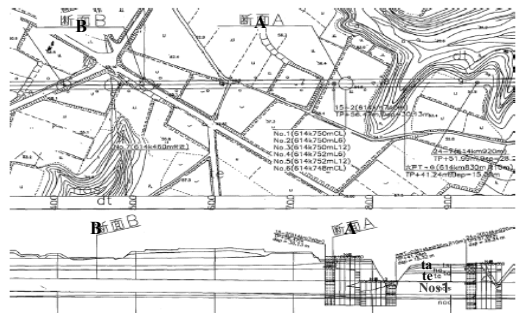


그림 3. 종단면도와 횡단면도

30cm의 복공콘크리트(lining) 시공 등이 실시되었다. 그림 4는 터널 단면 형태를 나타내고 있다.

### 3.3 현장 계측

터널 주변 지반 거동에 대한 상세한 계측은 비교적 평탄하고, 토피고가 약 13m 정도인 614k 750m부근에서 실시되었다. 그림 5는 계측 평면도를 나타낸 것이다.

계측 항목은 천단 침하, 내공 변위, 지표면 침하(Subsidence), 지중침하(Extensometer), 지중수평변위(Inclinometer) 그리고 전단대 변위(Pipe gauge)가 각각 측정되었으며, 계측단면에서 막장이 40m정도 떨어진 시점에서부터 시작하였다.

#### 3.3.1 지표면 침하

본 지역의 지표 침하 계측은 오토 레벨과 바코드 스테프를 이용한 광학 방식에 의해 측정되어졌다. 계측기 설치 방법은 계측 구역 내에 그림 6에 표시한 바와 같이 2대의

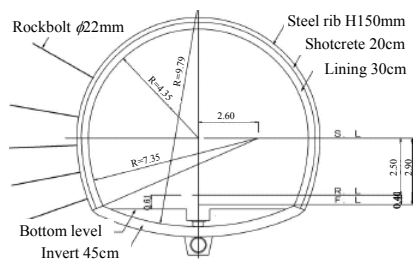


그림 4. 터널 단면 형상

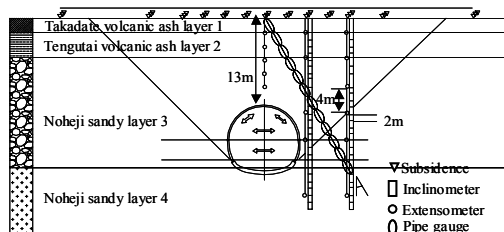


그림 5. 계측 평면도

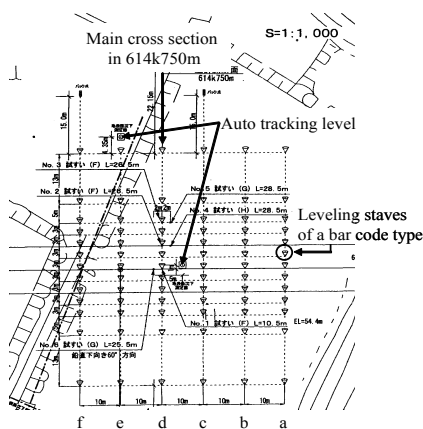


그림 6. 614k 750m주변의 계측공 평면도

오토레벨(그림 7)과 계측 점에서의 바코드스테프(그림 8)를 설치하였다.

계측은 굴착에 따른 지표면 침하와 함께 설치되어진 바코드 스테프도 변위가 발생되며, 오토 레벨은 자동적으로 바코드 스테프를 측정하여 변위를 읽게 되는 방식이다. 본 계측이 실시되는 동안 오토 레벨 자체도 침하하기 때문에 터널의 굴착 영향 범위 외에 기준점을 만들어 오토 레벨 자체의 침하도 보정해 주어야 한다. 그림 7과 8은 오토레벨과 바코드 스테프를 나타내고 있다.

#### 3.3.2 지중 침하 및 측방변위 계측

지중침하 계측은 614k 750m-d에서만 계측되어 졌다. 계측기는 일반적인 와이어식 지중변위계(Extensometer)를 이용하였고, 그림 5와 같이 터널 센터에서는 지중 2m간격으로 5개 지점을 계측하였고, 센터에서 오른쪽으로 6m, 12m에서는 지중 4m간격으로 6개 지점의 침하를 계측하였다. 지중 측방변위 측정은 고정식 지중 경사계(Inclinometer)를 이용하여 측방 변위량을 측정하였고, 계측기 설치개소는 그림 5와 같이 터널 센터에서 오른쪽으로 6m와 12m의 2개 지점에서 각각 실시하였다.

## 4. 설계시 연화모델을 이용한 수치해석적인 매개변수 연구

### 4.1 모델의 개요

연구에 사용된 지반거동 모델에는 탄성 모델, Mohr-Coulomb 탄소성 모델, 연화 모델(Softening Model)이 있다. 탄성 모델과 Mohr-Coulomb 탄소성 모델의 경우 일반적으로 터널의 설계 및 해석에서 가장 많이 사용되고 있는 모델이며, 연화 모델은 지반강도가 파괴후에 순차적으로 저하해서 잔류치에 이른다라는 개념을 도입하고 있다(FLAC, 2003). 연화 모델은 비관련 흐름 법칙(non-associated flow rule)과 관련 흐름 법칙(associated flow rule)이 적용되는 Mohr-Coulomb 모델에 기초를 두고 있다. 모델간의 차이점은 Mohr-Coulomb 탄소성모델은 해석중 점착력, 마찰각, 팽창각(dilation angle), 인장강도가 일정하게 유지되나, 연



그림 7. 오토(자동) 레벨



그림 8. 바코드 스테프

화 모델에서는 소성 항복이 발생한 이후 이 값들이 연화되어진다. 본 장에서는 연화물성치와  $K_0$ 에 따른 지반 변형 거동의 특성을 파악하기 위해 매개변수 연구를 수행하였다. 현장 조건에 적합한  $K_0$ 를 실험으로 구하기는 경제적인 관점에서 어려움이 따른다. 이에 본 논문에서는 수평변위의 계측정보를  $K_0$ 산정에 이용하고자,  $K_0$ 의 매개변수 연구를 수행하였다.

본 논문에서 입력되어지는 연화 물성치는 그림 9와 같이 소성 변형율의 함수로서 점착력  $c$ 와 마찰각  $\phi$ 를 감소시키고 팽창각, 인장강도에 대한 연화는 변형거동에 끼치는 영향이 미소하므로 생략하였다(이성운, 2004; 김영수 등, 2006).  $\Delta\sigma$ 은 초기 강도값에서 잔류 강도값까지의 비율을 나타내며,  $\Delta r$ 은 항복후 잔류값에 도달하기 까지의 전단 변형률을 의미한다.

#### 4.2 수치해석 모델링

본 논문에서는 그림 5에 나타난 계측 단면에 대해서 수치해석을 실시하였다. 터널의 천단에서 지표까지는 13m로 대략 1D(D; 터널의 직경)에 해당하며, 지표면은 대체로 평탄한 지형이므로 수평으로 모델링하였다. 지반 구성은 본 터널의 지반조사(Kitagawa 등, 2005)를 참조하여 4개의 지층으로 구분하였다. 연구의 목적이 미고결성 저토피코 NATM 터널의 변형거동을 평가하는 것이므로, 지보 부재에 대해

서는 간략화한 모델기법이 수행되어졌다. 그림 10은 수치해석의 요소망을 나타낸 것이다. 경계조건은 하부조건은 y 방향 변위를, 좌/우측 경계는 x방향의 변위를 구속하였다. 좌우 측벽 및 하부 경계는 터널굴착에 의해 응력 및 변위의 변화가 발생하지 않는 터널 직경의 4배와 3배 정도의 거리가 고려되어졌다. 터널형상은 좌우 대칭이므로 반단면만을 모델링하였으며, 2차원 평면 변형 조건에서 stress release method(Panet and Guenot, 1982)을 사용한 굴착모델링을 수행하였다. 본 논문에서 시공 순서에 따라 초기응력상태, 상반 굴착, 상반지보 설치, 하반 굴착, 하반지보 설치, 인버트 굴착, 인버트 설치의 총 7단계로 모델링하였으며, 하중 분담율은 상반 40%, 상반 지보설치후 60%로 적용하였다. 자중해석에 있어서 굴착전 원지반 상태의 응력상태  $K_0$ 는  $\nu/(1-\nu)$ 를 고려하였다. 여기서,  $\nu$ 는 포아송비를 의미한다. 터널 설계시 지반물성이 터널 주변지반의 거동에 미치는 영향은 매우 크기 때문에 보다 합리적인 터널해석을 위해서는 해석에 사용되는 설계정수 산정에 세심한 주의가 요구된다. 본 논문에서는 기본 해석 케이스를 선정하기 위하여 대상 터널의 실내시험과 설계보고서(동북 신간선 터널 시공기술 위원회, 2003)를 바탕으로 표 1과 같이 기본 입력자료를 결정하였다. 지층은 그림 10에서 보듯이 지표로부터 화산잔적토층(ta, te)과 사질토층(nos1, nos2) 순으로 구성되어 있으며, 터널이 굴착되는 지층은 nos1 구간이 된다. 위에서 설명하였듯이 지보패턴에 대해서는 슛크리트만을 모델링하였다. 슛크리트는 빔 요소로 모델링하였으며, 입력 자료는 표 1과 같다. 인버트 굴착후 인버트를 폐합하여 설치하게 되는데, 적용되어진 인버트 부분의 물성치는 슛크리트와 동일하게 적용하였다. 탄성과 탄소성 해석은 표 1을 기준으로 하였다.  $\Delta\sigma$ 와  $\Delta r$ 는 삼축실험, 직접전단실험 및 링 전단실험등으로 구할 수 있으나, 터널 주변 지반에 대해 상세히 설정하는 것은 어렵다. 본 논문에서는 실내 실험을 통해 대략적인 초기강도와 잔류강도를 구한 다음, 그 값을 고려하여 대표적인 몇 가지 경우를 선택하여 수치해석을 수행하였다.

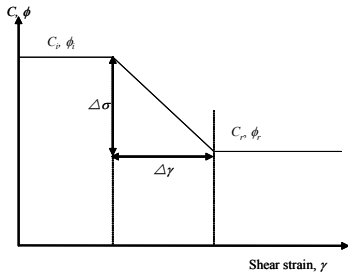


그림 9. 강도 연화 과정

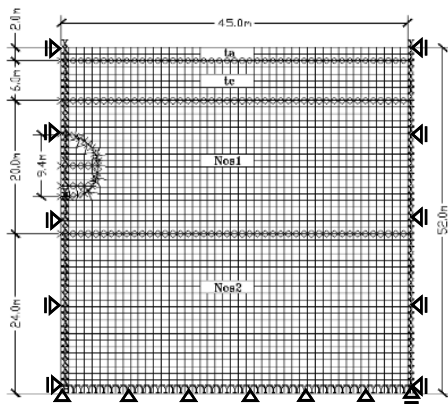


그림 10. 수치해석 요소망 (mesh)

표 1. 지반 및 지보 물성치

지반 물성치		단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (kPa)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)
ta	화산	14	10,000	0.286	30	0
te	잔적토	18	10,000	0.286	45	0
nos1	사질토	20	160,000	0.286	30	35
nos2		20	200,000	0.286	50	35
지보 물성치		탄성계수(kPa)	포아송비	면적(m <sup>2</sup> )	단면2차모멘트	
Shotcrete		5,000,000	0.2	0.2	0.00067	
Invert		5,000,000	0.2	0.2	0.00067	

표 2는 재성형된 사질토를 대상으로 삼축 실험에서 구하여진 초기 및 잔류 강도이다. 표 3은 연화해석을 위한 6가지 경우를 나타낸 것이다.

### 4.3 해석 결과

#### 4.3.1 지표면 침하

그림 11은 터널의 중심부터 30m 떨어진 지점까지의 지표면 침하 곡선을 나타낸 것이다. 모델간 침하곡선을 비교

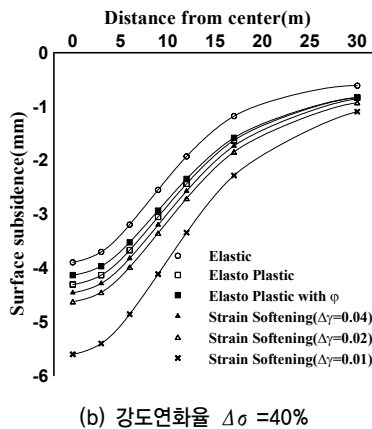
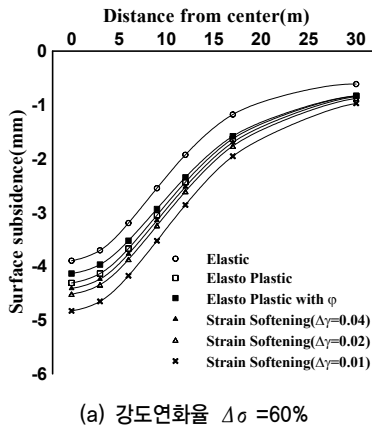


그림 11. 연화 물성치에 따른 지표면 침하 곡선

표 2. 실내실험에서 구한 강도 물성

초기 점착력	5kPa	초기 점착력	5kPa
잔류 점착력	5kPa	잔류 점착력	5kPa
초기 내부마찰각	41.4°	초기 내부마찰각	41.4°
잔류 내부마찰각	32.2°	잔류 내부마찰각	32.2°

표 3. 연화거동을 고려한 6가지 케이스

연화 파라메타	$\Delta\sigma(\%)$	$\Delta\gamma$
Case 1	60	0.01
Case 2	60	0.02
Case 3	60	0.04
Case 4	40	0.01
Case 5	40	0.02
Case 6	40	0.04

하면 탄성, 탄소성, 연화모델 순으로 침하량이 크게 발생하였으며, 연화모델에 있어서는 같은 강도연화율  $\Delta\sigma$ 에 있어서는 전단 변형률 증분을  $\Delta\gamma$ 이 0.04, 0.02, 0.01 순으로 침하량이 크게 발생하였다. 또한, 같은 전단 변형률 증분을  $\Delta\gamma$ 에 있어서 강도연화율  $\Delta\sigma$ 이 적을수록 상대적으로 큰 침하량이 발생하였다.

#### 4.3.2 지중 침하(6m 지점)

그림 12는 터널 중심으로부터 6m 떨어진 지점의 깊이별 수직 침하량을 나타내었다. 이 경우 터널 천단정도의 깊이인 13m 부근에서 가장 큰 침하가 발생하였다. 모델간 침하곡선을 비교하면 탄성, 탄소성, 연화모델 순으로 침하량이 크게 발생하였으며, 연화모델에 있어서 같은  $\Delta\sigma$ 에 있어서  $\Delta\gamma$ 가 0.04, 0.02, 0.01 순으로 침하량이 크게 발생하였다.

#### 4.3.3 지중 수평 변위(6m 지점)

그림 13은 터널 중심으로부터 6m 떨어진 지점의 깊이별 수평 변위를 나타내었다. 이 경우 터널 측벽부인 18-22m 부근에서 가장 큰 수평변위가 발생하였다. 연화 해석에 있어서  $\Delta\sigma=60\%$ 와  $\Delta\gamma=0.01$ 인 경우가 잔류강도에 도달하는 것

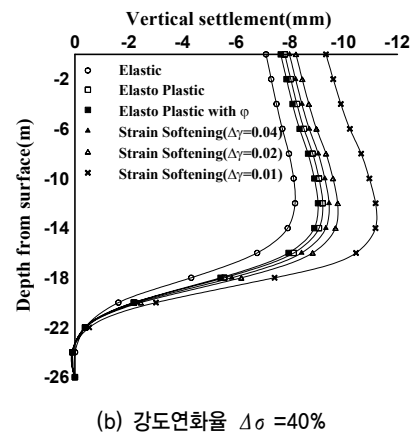
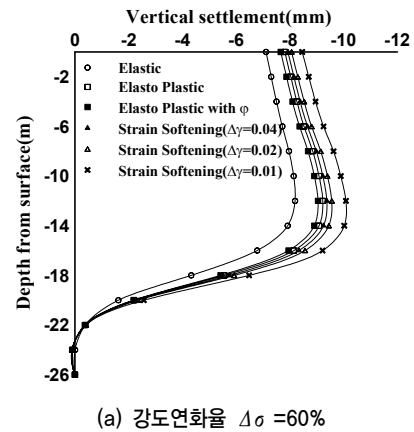
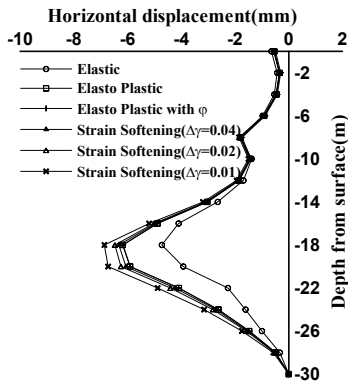
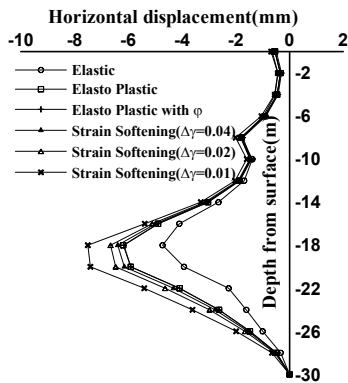


그림 12. 연화 물성치에 따른 터널 6미터지점에서의 지중침하



(a) 강도연화를  $\Delta\sigma = 60\%$



(b) 강도연화를  $\Delta\sigma = 40\%$

그림 13. 연화 물성치에 따른 터널 옆 6미터지점에서의 지중수평변위  
이 빠르기 때문에  $\Delta\sigma=60\%$ 와  $\Delta\gamma=0.04$ 인 경우보다 변위가 크게 발생하였다.

그림 14는  $K_0$ 를 매개변수로 한 해석결과이다. 그림에서 축압계수가 0.4인 경우에 지반 쪽으로 변위가 발생하며, 축압계수가 1.0인 경우에는 터널 쪽으로 변위가 발생함을 알 수 있다. 그림 11, 12 그리고 13을 통해 굴착에 따른 변형 경향은 연화 물성치의 값에 의존함을 알 수 있다.

그림 14로부터 지반의 수평변위의 경우는  $K_0$ 에 의존함을 알 수 있으며, 계측 정보의 해석에 있어 지중 수평변위의 변형양상을 통해  $K_0$ 를 고려할 수 있다고 사료되어진다.

## 5. 계측 결과를 이용한 수치 해석

### 5.1 계측 결과

#### 5.1.1 지표침하

그림 15는 연구 단면에서의 지표침하량의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 상반 굴착 시에는 약 5~6mm 정도의 침하를 나타내었으며, 하반 굴착 시는 약 11mm 정도의 침하량을 확인 할 수 있었다. 그림 16은 굴착 스텝에 따른 최대 지표면 침하량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 상

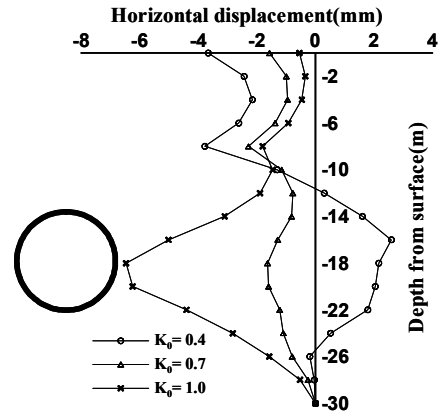


그림 14. 축압계수  $K_0$ 를 고려한 해석

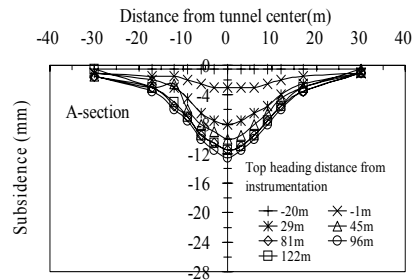


그림 15. 굴착에 따른 지표면침하 곡선

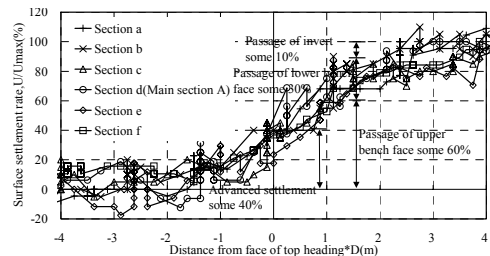


그림 16. 굴착에 따른 최대 지표 침하량의 변화도

반 도착에서 40%, 그 이후 60% 정도의 침하량이 발생함을 알 수 있다.

#### 5.1.2 터널 주변의 지반 거동

그림 17과 18은 연구 단면에 있어서 침하 상황을 상반 도달시와 하반 도달시에 대하여 벡터 형식으로 나타낸 것이다. 지반거동은 지표면 침하, 지중침하 그리고, 지중수평 변위를 의미한다.

그림에서 터널 주변의 지반이 굴착함에 따라 터널 중심 방향으로 이동하는 것을 알 수 있다. 터널 직상부의 지중 침하는 심도에 따라 차이가 없음을 알 수 있었다. 터널로부터 12m 떨어진 지점에서의 지중 수평변위 및 지중 침하는 상·하반 도달시 모두 변형거동이 거의 발생 하지 않았고, 터널로부터 6m 떨어진 부근에서는 하반 도달시 터널 하부 측 지중 수평변위가 크게 증가 하는 것을 알 수 있다.

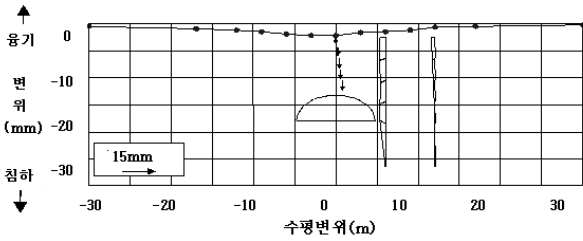


그림 17. 상반 도달시의 지반 변형거동

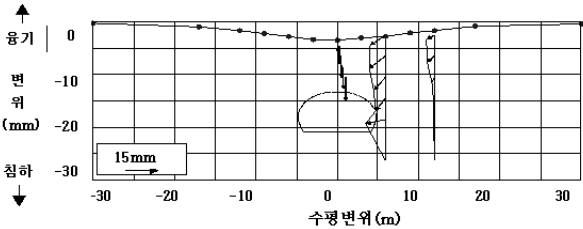


그림 18. 하반 도달시의 지반 변형거동

## 5.2 수치해석

### 5.2.1 터널 굴착 모델링

미고결 토사 지반에서는 변형을 연화현상이 발생하며, 터널 수치해석시 이를 고려하는 것이 보다 정확한 터널 거동 예측을 할 수 있다고 사료된다(김영수 등, 2006 ; Sterpi, 1999). 수치해석에 있어서 요소망 및 경계조건, 시공순서에 따른 굴착해석, 지보재는 4.2장을 참고하여 수행되어졌다. 예측된 수평변위의 분석 결과, 터널 쪽으로 발생하였으므로, 4.3장의 파라메타 스터디를 참고하여,  $K_0$ 는 대략 1.0정도로 가정하였다. 수치해석에서 사용된 물성치는 표 4와 같다.

연화 물성치의 경우, 실험을 통하거나 경험적인 값에 근거하여 산정하는 것이 적절하다고 판단되었으나, 실제 시공 지반에서 연화물성치를 평가하는 것은 어려운 실정이다.

본 논문에서는 6가지의 연화케이스와 예측되어진 지표면 침하의 비교를 통하여 선택하였다. 하중분담율은 그림 16의 최대 지표침하량 곡선을 고려하여 상반 40%, 상반 지보 후 60%를 고려하였다.

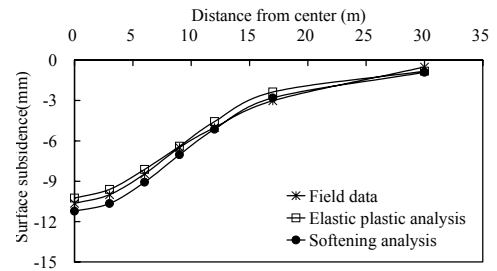
### 5.2.2 해석 결과 분석

본 논문에서는 몇가지 조건의 연화 물성치를 고려하여 수치해석을 수행하였으며, 시공단계에서 예측되어진 변위를 통해 적절한 연화 물성치를 평가하였다. 평가된 연화 물성치는  $\Delta\sigma=60\%$ 와  $\Delta r=0.01$ 이며, 이를 고려한 변형률 연화해석결과와 현장 계측을 비교한 것이 그림 19와 20이다.

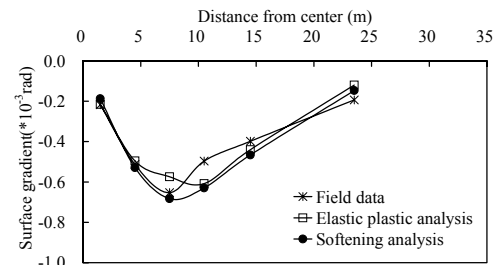
그림 19와 20에서 연화모델의 결과와 비교하기 위해 탄소성해석을 수행하였으며, 그 결과를 첨가하였다. 그림 19는 하반 굴착시의 예측결과와 수치해석에 의한 지표면 침하와 침하 기울기를 비교한 것이다. 지표면 침하기울기(Surface gradient)는 예측되어진 두 지점간의 지표면 침하량과 거리의 관계

표 4. 수치 해석에 적용된 지반 및 지보 물성치

지반 물성치		단위중량 ( $\text{kN/m}^3$ )	탄성계수 (kPa)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 ( $^\circ$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\Delta r$
ta	화산	14	5,000	0.286	30	0		0.01
te	잔적토	18	5,000	0.286	45	0	40	
nos1	사질토	20	80,000	0.286	30	35	60	0.02
nos2		20	100,000	0.286	50	35		0.04
지보 물성치		탄성계수(kPa)	포아송비	면적( $\text{m}^2$ )	단면2차모멘트			
Shotcrete		5,000,000	0.2	0.2	0.00067			
Invert		5,000,000	0.2	0.2	0.00067			

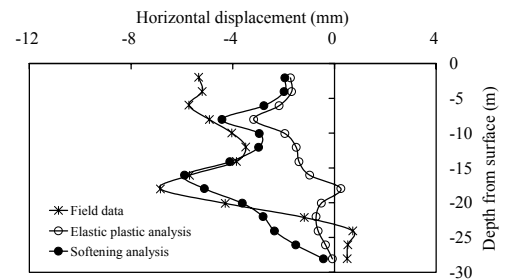


(a) 지표면 침하곡선

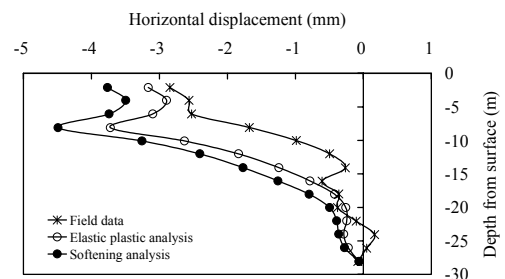


(b) 지표면 침하 기울기

그림 19. 지표면 침하에서의 수치해석과 현장 계측 비교



(a) 터널 옆에서 6미터 떨어진 지중 수평변위



(b) 터널 옆 12미터 떨어진 지중 수평변위

그림 20. 터널 주변 지반 변위에서의 수치해석과 현장 계측 비교

를 고려하여 구하여졌다. 그림 19에서 연화모델을 이용한 수치해석 결과는 전체적으로 현장 계측과 유사한 거동을 보임을 알 수 있으며, 탄소성해석결과도 계측되어진 침하량과 기울기를 잘 묘사할 수 있음을 알 수 있었다. 매개변수연구와는 달리 본 사례분석의 경우, 침하량의 절대값이 작게 나타나므로, 연화와 탄소성 모델간의 비교가 어렵다고 사료된다.

그림 20은 터널 주변의 수평 지반거동에 대한 수치해석과 현장 계측 결과를 비교한 결과이다. 그림 20의 지중 수평 변위의 경향은 탄소성해석보다 연화 모델이 현장의 변형 거동을 잘 묘사함을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

논문은 도심지 NATM 터널의 합리적 설계해석 방법의 확립을 위한 기초적인 연구로서 수치해석적인 방법과 현장 계측 결과의 분석을 통하여 대상 지반과 터널의 굴착에 따른 변형거동 평가를 수행하였다. 결과는 다음과 같다.

- (1) 수치해석에 의한 매개변수 연구 결과, 연화 모델이 기존의 탄성 및 탄소성 모델보다 지표면 침하와 침하 기울기 그리고 지중 침하 등에서 침하량이 크게 발생하였다. 굴착에 따른 주변 지반의 변형거동은 연화파라메타의 값에 의존함을 알 수 있었으며, 수평변위의 경우 축압계수에 의존하는 것으로 나타났다.
- (2) 현장 계측 결과, 주변 지반의 거동은 터널이 굴착함에 따라 터널 중심 방향으로 향하는 것을 알 수 있으며, 터널 직상부의 지중침하는 심도에 따른 큰 차이 없이 침하가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 터널에서 12m 지점에서의 지중변위는 상·하반 도달시 지반 거동이 거의 발생되지 않았으며, 터널로부터 6m 부근에서는 하반 도달시 터널 하부방향으로 지중 수평변위가 크게 증가 하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 현장 계측에서 얻어진 정보를 바탕으로 시공중 수치해석을 수행하여 대상 터널의 변형 거동을 평가하였다. 이 때, 적용된 물성치와 굴착해방력은 매개변수 연구와 현장 계측결과를 고려하여 설정되어졌다. 연화모델은 지표 침하와 침하 기울기, 수평변위 등에서 실제 변형거동을 잘 묘사함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 터널 굴착에 따른 안정성을 판단하는데 있어서 지보재의 거동이 아닌 지반의 변형거동만을 평가·검토하였다. 또한, 지반 내에 존재하는 지하수의 영향에 대해서도 고려하지 않았다. 이러한 부분에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 연화 물성치의 평가와 연화 해석의 적용상에 있어서 명확한 검증이 필요하다. 본 논문은 설계당시와 시공 중에서의 수치해석결과를 통한 지반평가라는

관점에 있어서 서술된 논문임을 강조하고 싶다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 CTRM (05 건설핵심 D03-01)에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김영민(2005), 굴진장을 고려한 얇은 터널파괴거동에 대한 모형 실험 및 수치 해석. *한국암반공학회지*, 터널과 지하공간, 제15권 제6호, pp. 400~410.
  2. 김영수, 정우섭, 이성운, 석태룡(2006), 도시 NATM 터널의 변형을 연화모델을 이용한 지반거동예측. *한국터널공학회*, 학술논문집, Vol. 8, No. 1, pp. 21~30.
  3. 동북신간선 터널 시공기술 위원회(2003), *침하예측 연구 계획*, 제1회 위원회 자료.
  4. 배규진(1989), *토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위 예측에 관한 연구*, 박사학위논문, 연세대학교 대학원, pp. 160.
  5. 신중호, 이인근(2001), 화강토지반내 복합막장 터널의 파괴메카니즘 연구. *한국지반공학회 논문집*, 제17권, 4호, pp. 317~329.
  6. 유광호, 박연준, 배규진(2000), 연약 암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가. *한국터널공학회*, 제2권, 제3호, pp. 47~57.
  7. 이성운(2004), *도시 NATM 터널의 지반 거동 예측*, 석사학위논문, 경북대학교 대학원, 120p.
  8. 홍성완, 배규진, 구본호, 정하익(1985), 현장계측에 의한 터널 주변지반의 변위연구. *대한토질공학회지*, 제1권 제2호, pp. 41~53.
  9. FLAC 2D(2003), *사용설명서*, ITASCA CONSULTING INC.
  10. Hansmire, W.H. and Cording, E.J.(1985), Soil tunnel test section; Case history summary. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 11, pp. 1301~1320.
  11. Kitagawa, T., Iida, H., Sudo, T., Matsunaga, T., Akutagawa, S., and Konishi, S.(2005), Tunneling and measurements in unconsolidated ground, *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, Erdem & Solak(eds.), Turkey, pp. 897~902.
  12. Murayama, S. and Matsuoka, H.(1969), On the settlement of granular media caused by the local yielding in the media. *Proceedings of JSCE*, Vol. 172, pp. 31~41.
  13. Negro, A. and de Queiroz, P.I.B.(2000), Prediction and performance : A review of numerical analyses for tunnels. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, edited by Fujita and Miyazaki, pp. 409~418.
  14. Panet, M. and Guenot, A.(1982), Analysis of convergence behind the face of a tunnel. *Tunneling '82*, London, pp. 197~204.
  15. Peck, R.B.(1969), Deep excavation and tunneling in soft ground, State of the Art Report. *Proceedings of the 7th International Conference on SMFE*, Mexico City, State of the Art Volume, pp. 225~290.
  16. Sakurai, S and Akayuli, C.F.A.(1998), Deformational analysis of geomaterials considering strain-induced damage, In:Cividini, A.(ed), *Proc. 4th Europ.*, pp. 729~738.
  17. Sterpi, D.(1999), An analysis of geotechnical problems involving strain softening effects. *Int. J.Num. Analyt. Meth. Geomech.*, 23, pp. 1427~1454.
- (접수일: 2007. 6. 29 심사일: 2007. 7. 20 심사완료일: 2007. 10. 29)