

## 역해석기법을 통한 NATM 터널의 안정성 평가

### Stability Estimation of NATM Tunnel due to Excavation using Back Analysis

이재호<sup>1)</sup>, Jae-Ho Lee, 김영수<sup>2)</sup>, Young-Su Kim, 김광일<sup>3)</sup>, Guang-Ril Jin, 박진규<sup>4)</sup>, Jin-Kyu Park, 박시현<sup>5)</sup>, Si-Hyun Park, 최칠용<sup>6)</sup>, Chil-Yong Choi.

- 1) 경북대학교 토목공학과 박사 후 연구원, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University.
- 2) 경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University.
- 3) 경북대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University.
- 4) 한국농촌공사 사원, Engineer, Korea Rural Community & Agriculture Corporation.
- 5) 한국시설안전기술공단 지하시설실 팀장, Director, Dept. of Underground Structure, KISTEC.
- 6) 한국수자원공사 기술관리실 대리, Engineer, Construction Technical Management Office, Korea Water Resources Corporation.

**SYNOPSIS** : Successful design, construction and maintenance of NATM tunnel demands prediction, control, stability estimation and monitoring of surface settlement, gradient and ground displacement with high accuracy. Back analysis using measured data and forward analysis have been and are indispensable tools to achieve this goal. Sakurai provided the hazard warning levels for assessing the stability of tunnels using the relation of critical strain and apparent Young's modulus.

This paper performed the estimation of tunnel stability on construction. Firstly, the apparent Young's modulus concept and back analysis method is introduced for the assesment of tunnel safety during excavation a brief framework. Secondly, this paper deals with case study using "Apparent Young's modulus" and "Back analysis" for the purpose of estimating the stability of NATM tunnel in Korea. Finally, a general method that can be estimated the tunnel stability discussed by a flow chart.

**Key words** : NATM tunnel, direct strain estimation, apparent Young's modulus estimation, ground strain distribution, back analysis.

## 1. 서론

최근 국내에는 효율적인 국토의 이용, 국가 균형 발전, 도심권 교통문제의 해결, 인구과밀을 해결하기 위한 각종 고속도로, 고속철도 및 도심지 지하철도가 건설 중이거나 설계단계에 있다. 우리나라는 국토 면적의 70% 이상이 산지로 이루어져 있고, 산지를 구성하는 암반 조건도 비교적 양호하여 도로 및 철도 건설에 있어서 터널 공법이 우세하게 적용되고 있는 실정이다. 최근 건설되고 있는 터널은 장대화와 대형화, 난공사구간의 증가라는 어려운 시공조건과 더불어 비용 절감과 위험관리라는 문제를 극복해야 하는 등 과거보다 안정성과 경제성에 있어서 엄밀한 조건이 요구되고 있다. 이러한 환경에서 건설시 급속 시공 및 안정화 그리고 장기적인 내구성확보에 관한 터널기술개발이 시급히 요구되고 있다.

터널의 안정성과 경제성을 극대화하기 위해서는 설계 및 시공 중의 안정성 평가방법의 확립과 관리기

준의 설정방법이 무엇보다도 중요하다. 터널의 안정성 평가는 이론해석적인 방법, 수치해석적인 방법, 경험적인 방법 그리고 역해석적인 방법 등이 주로 이용되고 있다(トンネル工学委員会, 1996; Sakurai 2003; The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers, 2004).

터널의 관리기준 설정은 아직 확립되어 있지 않지만 몇 가지 고려되고 있는 방법으로는 과거의 유사 시공실적을 토대로 정하는 방법, 같은 터널현장에서의 시공실적을 통해 관리기준을 정하는 방법, 수치해석의 결과를 기본으로 하여 정하는 방법, 주변구조물의 안정성확보를 위한 기준에 기본으로 하여 정하는 방법 등이 있다(岩盤力学委員会, 1987; Miura, 2003; The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers, 2004).

국내의 경우, 터널 설계와 시공에 있어서 적용되고 있는 안정성 평가방법과 관리기준치는 현장 조건과 설계 및 시공업체마다 서로 다른 값을 사용하고 있으며, 적용 근거에 대한 뚜렷한 지침이 없는 실정이다(박시현 등, 2007; 천병식 등, 1996).

Sakurai는 겔보기탄성계수 안정정성 평가법과 역해석 기법을 통하여 터널의 안정성을 검토하였으며 좋은 결과를 얻었다.

본 연구에서는 건설 중인 국내 NATM터널의 시공현장을 대상으로 신속하고 적용이 용이한 변위개념을 기본으로 터널 안정성 평가에 관한 사례 연구를 수행하였다. 안정성평가를 위한 분석 도구로서 겔보기탄성계수 개념과 역정식 해석방법을 적용하였다.

## 2. 겔보탄성계수 안정성평가법과 역해석 기법을 이용한 터널 안정성 평가

### 2.1 터널의 계측종류

계측은 터널 전체길이에 대하여 터널 자신의 안정도나 주변구조물의 거동을 항상 평가할 수 있도록 실시한다. 현행 터널에 대하여 시행되는 계측 종류를 살펴보면, 다음 그림 1과 같이 터널 내 계측과 터널 외 계측으로 대별된다(대한터널협회, 1999; 한국 지반공학회, 1996). 표 1은 일반적인 터널 계측 항목 및 간격을 나타내고 있다.

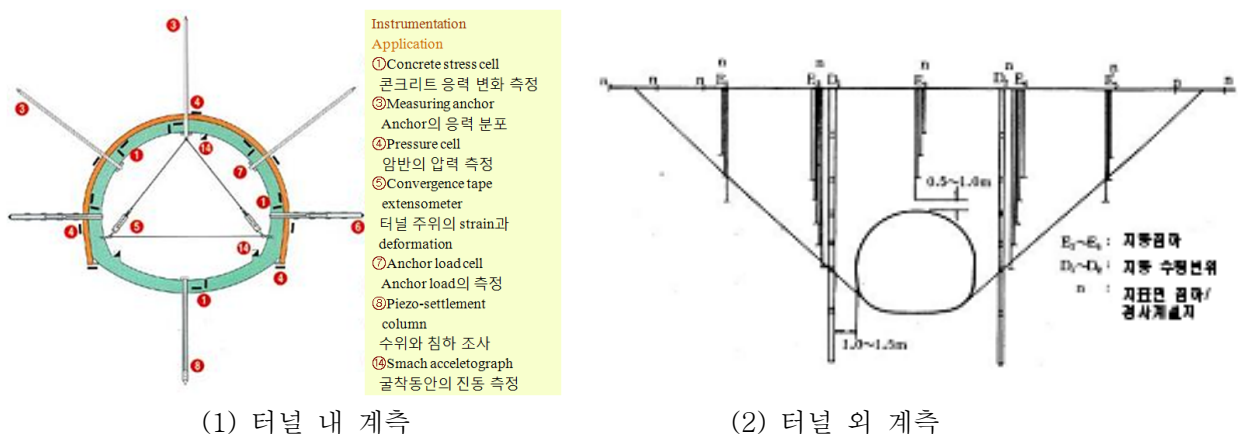
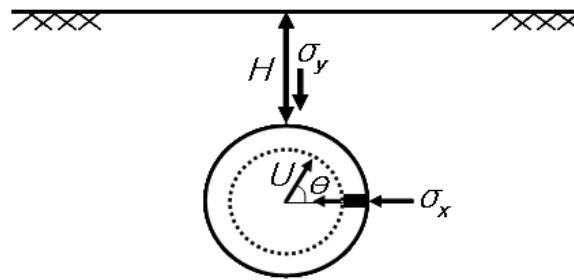


표 1. 계측항목 및 간격

계측항목	계측간격
갱내변위측정	전연장
내공변위측정	10~30m
천단침하측정	10~30m
Rock Bolt 인발시험	50~100m
지반재료시험	200~500m
지중변위	
Rock Bolt 축력측정	
Shotcrete 응력측정	
지표 및 지중침하	500m 마다(필요시)
갱내탄성과 속도시험	500m 마다(필요시)

## 2.2 겔보기탄성계수 안정성 평가법을 이용한 터널의 안정성 평가

Sakurai(1998)는 계측된 값으로부터 역으로 구하여진 터널 주변의 거시적인 탄성계수를 이용하여 터널의 안정성을 간단히 평가할 수 있는 판정 도표를 제시하였으며, 이를 “겔보기 탄성계수에 의한 평가법”이라 하였다. 역계산 된 탄성계수를 흙, 암석 또는 암반의 실제 탄성계수와 구별하기 위해 일반적으로 “겔보기 탄성계수”라 부른다.



$$U = f(\alpha, H, \omega, \nu, E, k_0)$$

그림 2. 무한 지반 탄성해석을 위한 터널 개념도

겔보기 탄성계수를 위한 역계산은 이축응력이 작용하고 있는 무한 지반에 무지보상태의 원형 터널을 굴착한 경우에 생기는 지반의 변위를 이용하였다(그림 2).

무한 탄성지반을 가정한 터널의 변위는 식 (1)으로 구할 수 있다(Timoshenko, S. and Goodier, J., 1970).

$$U = \frac{(1+\nu)a}{2E} \left[ \frac{a}{r}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{a}{r}(\sigma_x - \sigma_y) \left\{ \frac{4a(1-\nu)}{r} - \frac{a^3}{r^3} \right\} \cos 2\theta \right] + 2\tau_{xy} \left[ \left\{ \frac{4a(1-\nu)}{r} - \frac{a^3}{r^3} \right\} \sin 2\theta \right] \quad (1)$$

여기서,  $U$ 는 터널 변위,  $a$ 는 터널 반경,  $r$ 은 터널 중심에서 임의의 점까지의 거리,  $\nu$ 는 포아송비를 나타내며,  $\sigma_y$ 는 연직방향의 응력도,  $\sigma_x$ 는 수평 방향응력도 그리고,  $\tau_{xy}$ 는 전단 응력도를 나타낸다. 식 (1)의  $\theta$ 는 터널중심을 통과하는 수평축으로부터의 계산되는 지점까지의 각도를 나타낸다.

원형터널의 경우 터널의 천단 및 내공변위는 식 (1)으로부터 식 (2)와 (3)로 간단히 나타낼 수 있다.

$$U_c = \frac{(1-\nu^2) \cdot a \cdot w \cdot H}{E} \left\{ 2K_0 - \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \right\} \quad (2)$$

$$U_h = \frac{(1-\nu^2) \cdot a \cdot w \cdot H}{E} \left\{ 2 - \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} K_0 \right\} \quad (3)$$

여기서,  $U_c$ 는 터널의 반경방향 천단변위,  $U_h$ 는 터널의 반경방향 내공변위를 나타내며,  $E$ 는 대상암반의 탄성계수,  $K_0$ 는 원 지반 상태의 초기 응력 상태 그리고,  $w$ 는 지반의 단위중량을 나타낸다. 시공 중인 터널에 있어서  $U_c$ 와  $U_h$ 는 쉽게 구할 수 있으며, 지보와 굴착조건에 의해 보강된 거시적인 지반의 겉보기 물성치를 구하는데 사용된다. 식 (4)과 (5)은 식 (4)와 (5)에서의 탄성계수를 구하기 위해 역계산 된 수식을 나타낸다. 여기서,  $E_c'$ 와  $E_h'$ 는 계측된 천단침하와 내공변위의 겉보기 탄성계수임을 알 수 있다.

$$E_c' = \left\{ \frac{1+\nu}{U_c'} \right\} \cdot w \cdot H \cdot a \cdot \{ 2(1-\nu) \cdot K_0' - (1-2\nu) \} \quad (4)$$

$$E_h' = \left\{ \frac{1+\nu}{U_h'} \right\} \cdot w \cdot H \cdot a \cdot \{ 2(1-\nu) - (1-2\nu) \cdot K_0' \} \quad (5)$$

여기서,  $U_c'$ 와  $U_h'$ 는 실제현장에서 계측된 천단과 내공변위값을 의미한다. 식(4)과 (5)의  $K_0'$ 는 겉보기 측압계수를 의미한다.  $E_c'$ 와  $E_h'$ 를 같다고 놓으면,  $K_0'$ 는 식 (6)과 같이 구하여진다.

$$K_0' = \frac{2(1-\nu) \cdot U_c + (1-2\nu) \cdot U_h}{2(1-\nu) \cdot U_h + (1-2\nu) \cdot U_c} \quad (6)$$

Sakurai(1998)는 그림 3과 같이 실제 계측된 내공변위를 통한 천단변형률과 변위 값을 역계산한 겉보기 탄성계수의 관계를 막장의 상태와 함께 나타내었다. 막장은 안정, 불안정 그리고 파괴상태를 고려하였으며, 이 결과를 통해 그림 3에서 표시된 기준선을 제시하였다.

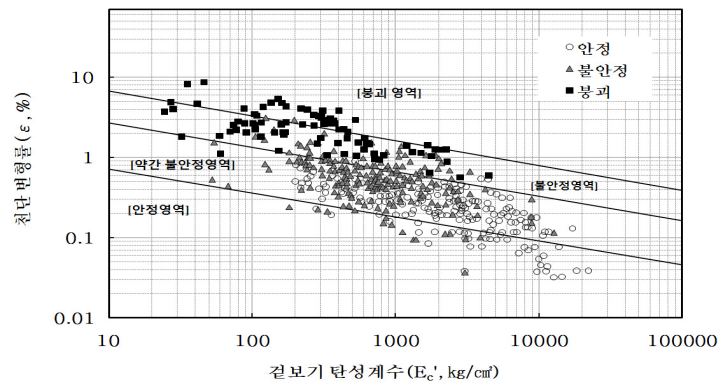


그림 3. 겉보기 탄성계수와 천단 변형률의 관계

그림 3에서 붕괴(■)와 불안정(▲)한 터널 단면의 경우 불안정과 붕괴 영역에 집중되어 있음을 알 수 있으며, 결과적으로 그림 3에서 제시된 영역으로 막장의 안정성 평가가 타당함을 알 수 있다. 겉보기 탄성계수에 의한 방법은 계측 결과를 기본으로 간단한 수식으로 이루어졌지만, 터널의 크기와 기본 물성치, 그리고 계측결과를 통해 대략적인 터널 안정성 평가가 가능함을 알 수 있었다.

## 2.3 역해석기법을 이용한 터널의 안정성 평가

그림 2와 식 (3)에 의한 겉보기탄성계수는 원형터널에만 가능함을 알 수 있다. 보다 일반적인 수치해석기법을 통한 겉보기탄성계수 산정이 필요하다. 다음은 역해석기법을 통한 겉보기탄성계수 산정과 이를 통한 안정성평가 방법을 나타낸다.

지금까지 제안된 지반(암반)공학에서의 역해석 수법의 기본적인 해석 흐름은 일반적으로 계측치와 해석치의 차이 등을 이용하여 정의하는 오차규준식을 최소화하는 것에 의하여 미지의 파라메타를 구하는 것이다. 일반적으로 직접정식화법(그림 4), 역정식화법(그림 5) 등으로 나눌 수 있다.

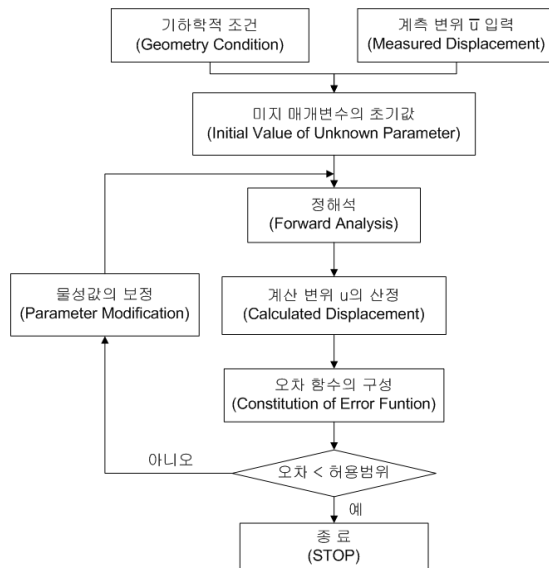


그림 4. 직접정식화법의 흐름도

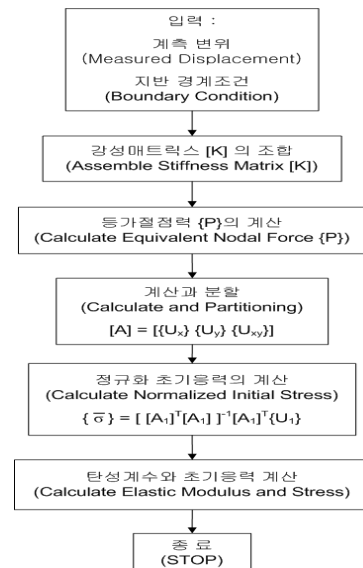


그림 5. 역정식화법의 흐름도

터널을 대상으로 한 탄소성 문제의 역해석수법의 연구로서 Giorda(1980)등은 지반을 Mohr-Coulomb의 항복규준으로 한 탄·완소성체로 가정하고 수실(水室)시험에서 얻은 변위로부터 암반의 점착력, 내부마찰각 및 초기응력을 구하는 역해석법을 제안 하였다. 또 荒井등은 쌍곡선형 응력-변형률관계를 이용하여 초기응력은 기지(既知)의 값으로 가정하고 터널의 내공변위로부터 지반의 변형·강도정수를 역해석에 의하여 구했다. 두 방법 모두 해의 안전성의 문제에서 축대칭 경우(등방초기응력, 원형단면)에 한정되고 있다. 하지만 두 방법은 모두 직접 정식화법에 속하는 역해석 수법이다. 직접정식화법은 복잡한 수학적인 바탕 없이도 기존의 유한요소 프로그램에 약간의 수정을 하여 사용할 수 있고, 적용성이 광범위하여 비선형 문제에도 적용이 가능하지만, 미지변수를 변화시키면서 반복 계산에 의해 최적치를 구하므로 소요되는 시간이 많이 걸린다. 그러나 역정식화법은 응력 해석의 지배방정식을 역순으로 하는 새로운 프로그램화 과정을 필요로 한다. 직접법보다 프로그램을 작성하는데 많은 시간이 걸리지만 일단 프로그램이 완성되면 직접법에 비해 계산 시간을 절약할 수 있다.

Sakurai는 유한요소법에 의한 수치해석 시뮬레이션으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다(Sakurai, 1979). 우선 탄소성 유한 요소해석에 의하여 얻은 변위를 “계측변위”로 가정하고 등질 등방의 탄성모델에 기초하여 역정식화 역해석을 실시하고 암반의 겉보기 초기응력 및 탄성계수를 구한다. 그리고 이들을 입력데이터로 하여 탄성해석을 실시하여 얻은 지반 최대전단변형률 등고선이 탄소성 경계와 근사적으로 일치한다는 연구결과를 얻었다.

본 연구에서는 대상지반(암반)의 탄성계수와 초기응력, 지반의 변형을 산출하는 프로그램인 역해석 프로그램(Sakurai, 1993)을 사용하였다. 역정식해석 프로그램을 이용하여 국내 건설 중인 경주 터널에서의 실측 변위를 입력하여 각 터널 단면에 대한 주변 암반의 등가탄성계수 즉 겉보기탄성계수를 산정하고 이를 Sakurai의 겉보기탄성계수 평가법에 적용하여 굴착지반의 안정성을 평가하였다.

### 3. 00터널의 개요

#### 3.1 시공 현황

터널 시공은 상·하반 굴착으로 실시하였고, 지보시스템으로 25cm두께의 슛크리트 시공과 강제 지보공, 길이 5m인 락볼트 30개, 40cm의 복공 콘크리트 등이 실시되었다. 터널의 천단과 막장 그리고 지표면 안정을 위해 보조공법으로서 언블레라방법 (Umbrella method)의 일종인 강관다단그라우팅을 시공하였다. 그림 6은 터널 시공현장의 평면도와 종단도를 나타내고 그림 7은 터널 단면형상을 나타내고 있다.

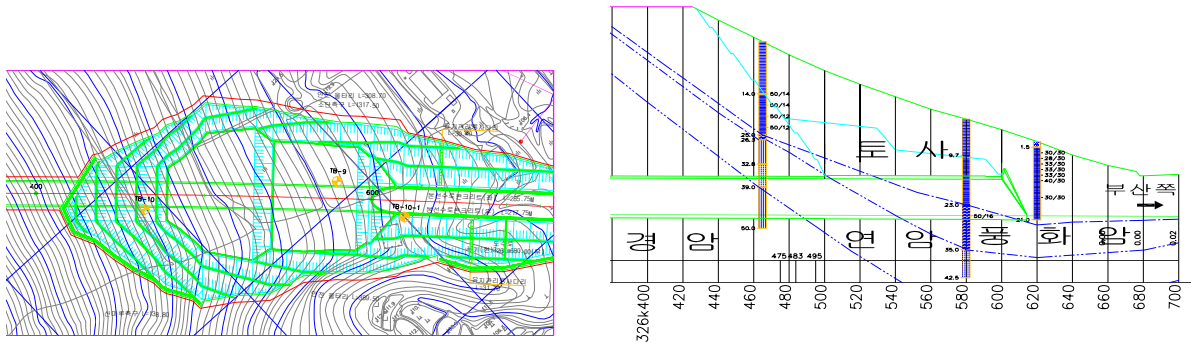


그림 6. 연구대상 터널에서의 종단면도와 평면도

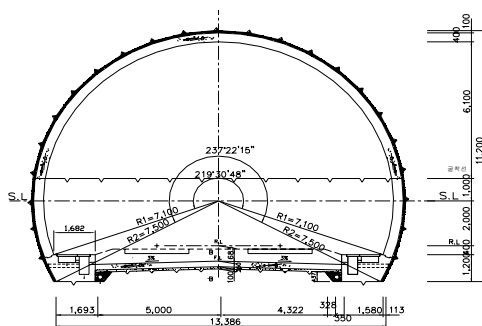


그림 7. 터널 단면 형상

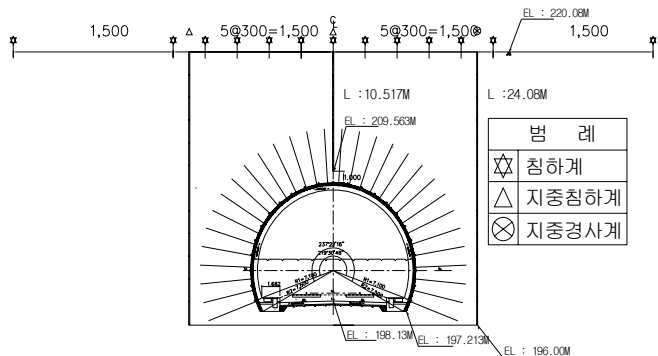


그림 8. 계측공 횡단면도

#### 3.2 현장 계측

그림 8은 계측공 횡단면도를 나타낸 것이고 표 2는 계측항목 및 개소를 나타낸 것이다. 지중침하 및 지중 수평변위는 고정식 지중 경사계를 이용하였다. 지중 침하의 센터에서 오른쪽으로 13.5m, 왼쪽으로 13.5m인 지역에서 계측을 수행하였다. 지중 수평변위는 지표에서 0.5m 간격으로 20개 지점을 계측하였고, 지중침하하는 지중 3m 간격으로 총8개 지점의 침하를 계측하였다.

표 2. 계측항목

계측항목		계측개소	계측목적
갱내	천단변위	각 막장	터널거동 파악
	내공변위	각 막장	
갱외	지표면침하	1 개소	침하량, 침하구배의 측정
지중변위측정		3 개소	지중 침하, 지중 측방변위 측정 (전단대파악)

### 3.3 대상 지반의 역학적 특성

대상터널에서의 지층 상태를 조사하기 위하여 시추조사를 수행하였으며, 지하수상태를 확인하기 위해 전기 비저항 탐사를 실시하였다. 원 지반 탄성계수를 구하기 위해 실내 일축압축 실험과 공내재하 시험을 실시하였다. 표 3은 대상지반의 실내·외 물리 역학적 실험 결과를 나타낸 것이다. 표 3에서 대상지반의 한계 및 파괴변형률은 Sakurai가 제시한 방법을 통하여 산정하였다.

표 3. 대상 지반의 물리·역학적 물성치

구분 항 목		풍화암	연 암
단위중량( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		2.298	2.694
일축압축강도( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )		3.108	818.9
탄성파속도( $\text{km}/\text{sec}$ )	P파	-	5.125
	S파	-	1.904
탄성계수 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	일축압축시험	176	476190
	공내재하시험	718~3738	65834
한계변형률(%)		1.7	0.15
파괴변형률(%)		2.8	0.219

### 3.4 계측 결과

#### 3.4.1 지표침하

그림 9는 326k 483m에서 계측된 막장거리에 따른 지표면 침하 변화를 나타내고 있다. 최대 지표침하량은 16mm가 발생하였다. 그림 10은 터널 센터부분에서 발생하는 최대 지표 침하량의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 최대 발생 지표면 침하량을 고려할 경우, 상반 도착에서 약 38%, 그 이후 약 62% 정도의 침하량이 발생함을 알 수 있다.

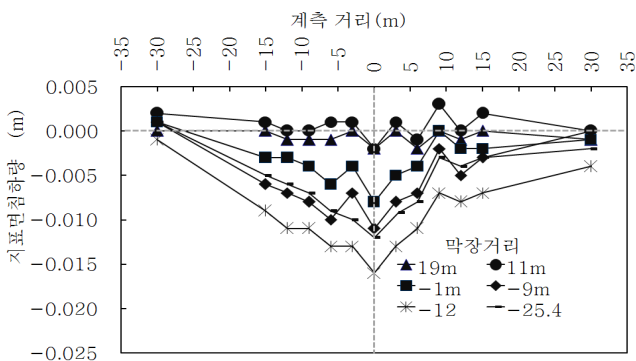


그림 9. 막장거리에 따른 지표침하

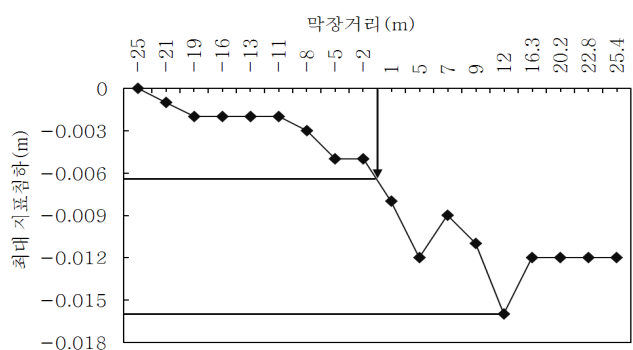
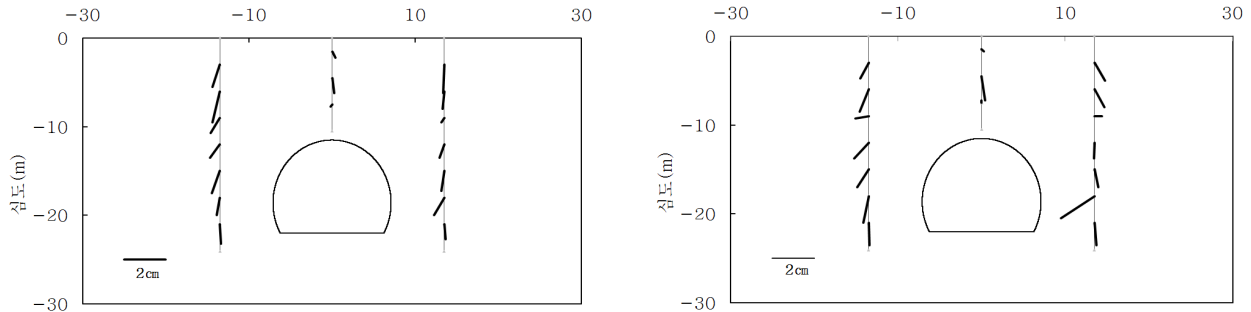


그림 10. 막장거리에 따른 최대지표침하

#### 3.4.2 지반 거동

그림 11은 326k 483m에서 계측된 지중 침하와 지중 수평변위의 결과를 벡터형식으로 나타낸 결과이다. 계

측시점은 터널이 막장이 도달한 경우와 막장에서 25.4m정도 지났을 때를 기준으로 나타내었다. 그림 11(a),(b)에서 좌측의 지중변위가 지반쪽으로, 우측은 터널쪽으로 변위를 보이는 이유는 지층의 절리방향이 침하방향과 같이 경사진 것으로 판단된다. 그림에서 횡방향 지중 벡터에서 심도 15m에서 18m부근에서 지반이 터널 쪽으로 많이 변화하는 결과를 나타냈으며, 터널 상부 지반은 대체적으로 안정한 거동을 나타내고 있다.



(a) 막장통과(막장거리 1m) 시점

(b) 막장거리 25.4m 시점

그림 11. 횡단면도의 지중 변위 벡터

### 3.4.3 터널 거동

다음 표 4는 계측 단면의 천단침하와 내공변위를 시공단계에 따라 나타낸 것이다.

표 4. 터널 계측단면의 내공변위 및 천단침하

구 분 계측단면	상반완성		하반도착		하반완성	
	천단침하 (mm)	내공변위 (mm)	천단침하 (mm)	내공변위 (mm)	천단침하 (mm)	내공변위 (mm)
326k380	2	2	5	3	3	5
326k410	3	3	1	3	2	4
324k780	3	4	2	7	1	9
326k425	3	4	1	4	3	5
326k448	3	6	2	12	2	12
326k460	6	4	4	8	5	12

## 4. 역해석기법을 이용한 터널의 안정성 평가

### 4.1 안정성 평가 흐름

본 논문은 건설 중인 국내 NATM터널의 시공현장을 대상으로 계측데이터의 분석과 함께 변위개념을 토대로 한 터널 안정성 평가를 설계와 시공단계에 걸쳐 수행하였다. 또한 시공단계에서의 터널 안정성 평가는 역해석 결과를 통한 직접 변형률 평가법을 이용하였다. 터널 안정성 및 지보 평가에 관한 전체적인 흐름을 간단히 나타내면 그림 12와 같다.



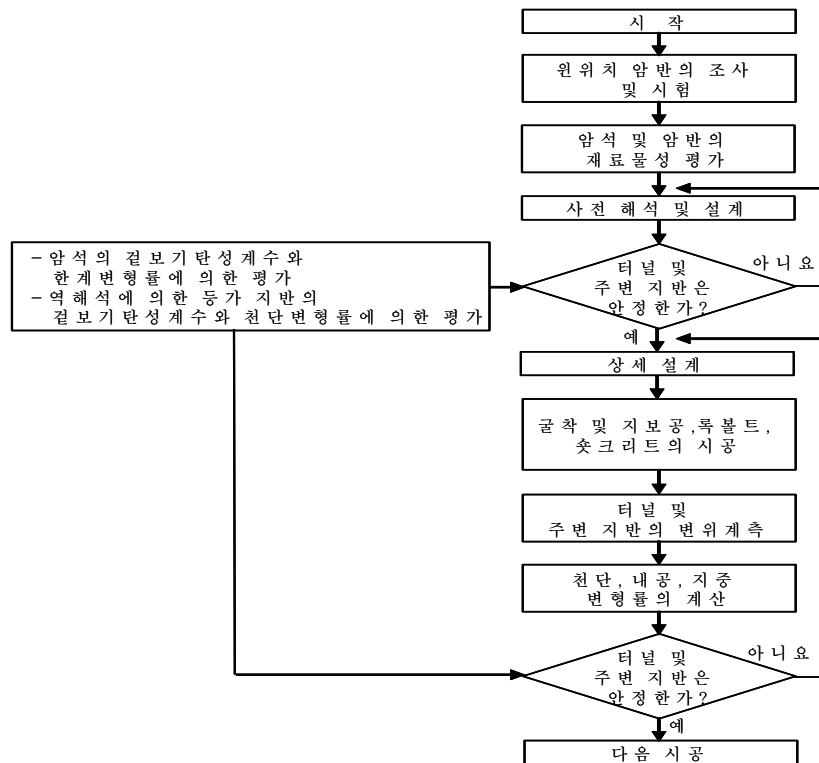


그림 12. 안정성 평가시스템에 관한 흐름표

## 4.2 겔보기탄성계수 방법 적용

그림 13과 그림 14는 실제 터널 시공현장 상반완성 및 하반완성 시 계측된 천단변위를 Sakurai의 겔보기 탄성계수 평가법을 이용하여 나타낸 결과이다. 그림 13과 그림 14에서 나타낸 것은 천단변위를 직경으로 나누어서 나타낸 것이다. 터널의 안정성 평가를 위해서는 터널단면에서의 전변위를 고려할 필요성이 있다.

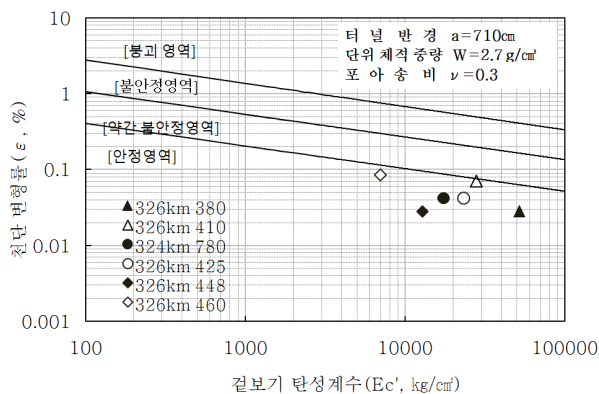


그림 13. 계측에 의한 겔보기탄성계수에 의한 안정성 평가(상반완성)

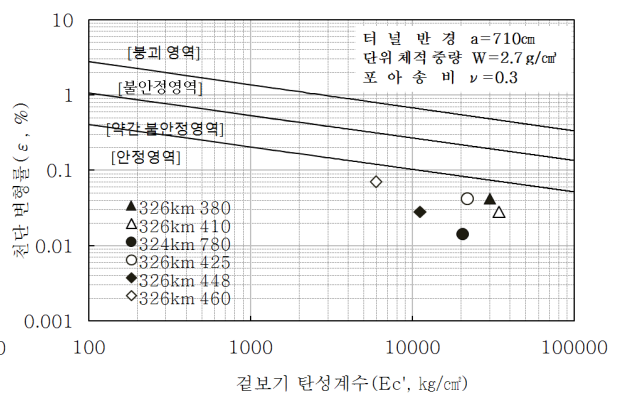


그림 14. 계측에 의한 겔보기탄성계수에 의한 안정성 평가(하반완성)

사용된 천단변위는 그림 11을 참조하여 막장도달 시점에 이미 40%가 발생한 것을 고려한 전 변위량을 이용하였다. 그림 13과 그림 14의 겔보기 탄성계수는 천단변위와 식 (6)을 고려하여 구하였다. 그림 13과 그림 14에서와 같이 터널 시공에 따라 시공단면의 안정성이 확보되고 있음을 알 수 있다.

### 4.3 역해석방법의 적용

시공 중 측정된 변위데이터를 이용하여 역해석을 실시하였으며, 역해석을 위한 대표적인 계측 단면의 유한요소망을 나타내면 다음 그림 15와 같다.

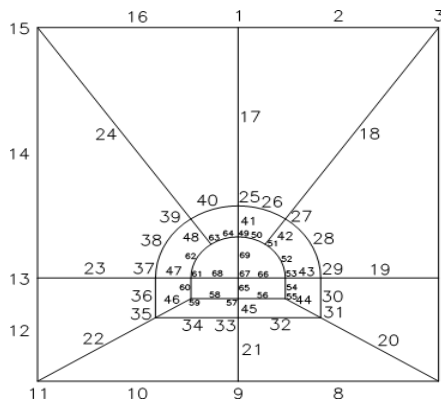


그림 15. 326km 380 계측단면의 유한요소망(예시)

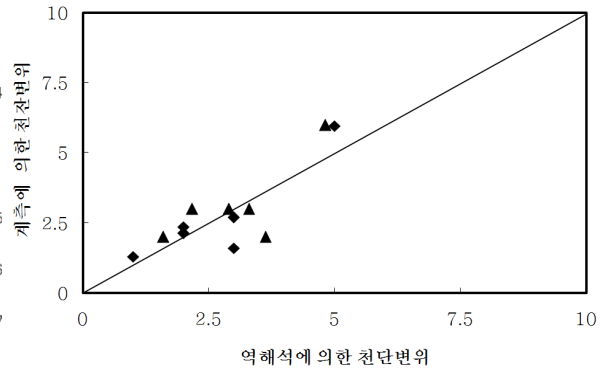


그림 16 실제 계측과 역해석에 의한 천단변위

### 4.3 안정성 평가 결과

그림 16은 상반완성과 하반완성 시에서의 역해석에 의하여 산정된 천단변위와 실제 계측된 천단변위의 비교를 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 실제계측에 의한 천단변위와 해석에 의한 천단변위가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

역해석을 이용하여 구한 상반완성 및 하반완성 단계 천단변형률에 의한 안정성 평가 결과는 다음 그림 17과 그림 18과 같다. 그림 17과 그림 18은 전체 단면에 대한 시공 후 계측데이터를 통한 역해석 결과로 구한 겉보기 탄성계수와 천단변형률의 관계이다. 사용된 천단변위는 그림 10을 참조하여 막장도 달 시점에 이미 40%가 발생한 것을 고려한 전 변위를 이용하였다. 그림 17, 그림 18에서와 같이 터널 시공 단계에 따라 굴착주변 지반의 안정성이 확보되고 있음을 알 수 있다.

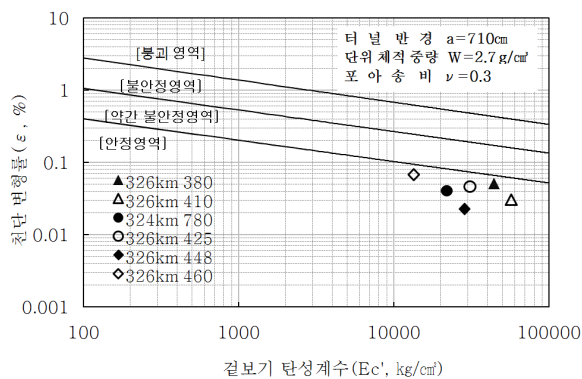


그림 17. 역해석에 의한 겉보기탄성계수 안정성 평가(상반완성)

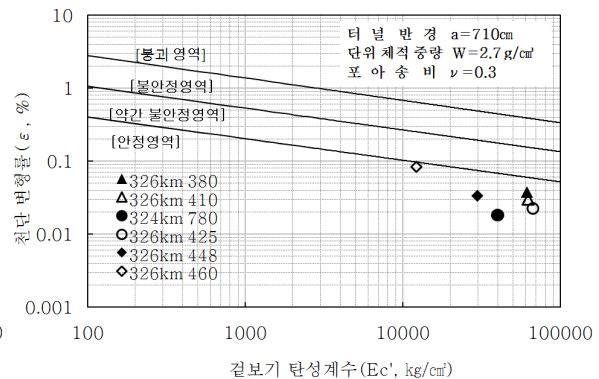


그림 18. 역해석에 의한 겉보기탄성계수 안정성 평가(하반완성)

상기의 실제 계측에 의한 안정성 평가와 역해석에 의한 안정성 평가 결과로부터 알 수 있듯이 역해석에 의한 천단변형률에 의한 안정성평가의 타당성을 확인 할 수 있었으며 역해석에 의하여 터널의 안정성을 평가 및 예측할 수 있는 가능성을 보여 주었다.

본 연구에서는 겉보기탄성계수에 의한 평가방법으로만 안정성을 평가하였으나 추후 역해석에 의하여 시공 중에 암반의 역학적 정수 등을 구하여 설계 시에 이용된 역학적 정수 등을 재검토하거나 또는 이를

이용하여 순해석을 실시하여 굴착지반의 안정성을 평가하는 방법 등에 대하여 계속적인 연구 및 적용성 검토를 할 예정이다.

## 5. 결론

본 논문은 건설 중인 국내 NATM터널의 시공현장을 대상으로 신속하고 적용이 용이한 변위개념을 기본으로 하여 설계와 시공에서의 터널 안정성 평가 그리고 지보시스템의 평가에 관한 사례 연구를 수행하였다. 터널 거동의 평가는 역해석기법을 이용한 “굴보기탄성계수 평가법”을 이용하였다.

대상 터널의 실제 계측된 천단변위를 직접변형률 평가법 및 역해석을 이용한 직접변형률 평가법을 이용하여 안정성 평가를 수행하였으며 역해석 결과에 의한 안정성 평가의 타당성을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서는 굴보기탄성계수 평가법으로만 안정성을 평가하였으나 추후 역해석에 의하여 시공 중에 암반의 역학적 정수 등을 구하여 설계 시에 이용된 역학적 정수 등을 재검토하거나 또는 이를 이용하여 순해석을 실시하여 굴착지반의 안정성을 평가하는 방법 등에 대하여 계속적인 연구 및 적용성 검토를 할 예정이다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 대한터널협회(1999), **건설교통부제정 터널표준시방서**, 구미서관, pp.72-84.
2. 박시현, 신용석 (2007), “한계변형률 개념을 활용한 터널 안정성 평가에 관한 연구”, **한국지반공학회는 문집**, pp. 29-41.
3. 천병식, 남순성(1996), “서울지하철 터널의 계측관리 기준치에 관한 연구”, **대한토목학회논문집**, 제16권, 제 III-1호, pp.47-59.
4. 한국지반공학회(1996), **지반공학시리즈 7 터널**, 구미서관, .pp. 442.
5. 岩盤力学委員会(1987), “トンネルにおける調査・計測の評価と利用”, (社) 土木学会, pp.335.
6. トンネル工学委員会(1996), **JAPANESE STANDARD FOR MOUNTAIN TUNNELING** -1996- The Fifth Edition, (社) 土木学会, pp.182.
7. 櫻井春輔, 武内邦文(1983), “トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法”, **土木学会論文報告集**, 337:137-145.
8. Gioda, G.(1980). Indirect identification of the average elastic characteristics of rock masses", *In Proc. Int. Conf. on Structural Foundations on Rocks*, pp. 65-73, Sydney.
9. Miura, K.(2003), ““Design and construction of mountain tunnels in Japan”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.18, pp.115-126.
10. Skurai. S. and Abe. S., (1979), "A design approach to dimensioning underground openings". *In Proc. 3rd Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics*, pp. 649-661.
11. Sakurai, S., Akutagawa, S., Takeuchi, K. and Shinji, M.(2003), “Back analysis for tunnel engineering as a modern observation method”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.18, pp.185-196.
12. Sakurai, S.(1998), *Practice of Urban Tunnels*, Kajima Publ., pp.241.
13. The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers (2004), *Tunnel lining design guide*, Thomas Telford, pp.184.
14. Timoshenko, S. and Goodier, J.(1970), *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, New York.