

터널굴착변위를 활용한 시공중 피드백 해석기법 연구

Feedback Analysis Technique for Tunnel Safety by Using Displacements Measured during the Tunnel Excavation

박 시 현¹ Park, Si-Hyun

신 용 석² Shin, Young-Suk

Abstract

The purpose of this study is to develop a new technique to quickly assess the quantitative stability of a tunnel by using measured displacement at the tunnel construction site. To achieve this purpose, in this study, a critical strain concept was introduced for the first time and applied to an assessment of a tunnel under construction. The new technique calculates numerically the strains of the surrounding ground by using displacements measured during tunnel excavation. The techniques considering the relative displacement, shotcrete, and anisotropic characteristics of ground were newly introduced after reinvestigating the existing analysis technique. In addition, an analysis module was developed based on the proposed analysis technique in this study, and the applicability of the developed module was verified. To verify the module, first of all, the calculated excavation displacements of a cylindrical tunnel by analytic method and commercial programs (Pentagon-3D, Flac-2D) were compared for the confirmation of applicability of commercial programs. Then, the calculated excavation displacements under the same initial condition, both with and without a shotcrete lining, by two commercial programs were compared. Finally, we assess the load condition and material properties of in-situ ground by inputting tunnel excavation displacement, which was calculated by a commercial program, into the developed analysis module (FAST-Ver. 1.2, Feedback Analysis System for Tunneling), and checked whether the assessed results conform to the originally assumed values.

요 지

본 연구에서는 굴착이 진행 중인 터널 시공현장에서 계측변위를 활용하여 신속하게 터널의 안정성을 정량적으로 평가할 수 있는 기법을 새롭게 개발하였다. 이를 위해, 본 연구에서는 Critical strain 개념을 새롭게 도입하였으며, 굴착 중인 터널의 안정성 평가에 이를 활용하였다. 본 연구에서 개발한 해석기법은, 굴착면에서의 변위값을 입력하여 주변지반의 변형률을 구하는 방법으로서, 기존에 제안된 해석기법을 재검토하여, 상대변위활용기법, 쏫크리트 반영기법, 지반의 이방특성 반영기법을 새롭게 제안하였다. 아울러 본 연구에서 제안한 해석기법을 토대로 해석모듈을 개발하였으며, 개발된 해석모듈의 활용성을 평가하기 위한 검증 실험을 수행하였다. 검증 방법으로는 먼저, 이론해석과 상용프로그램(Pentagon-3D, Flac-2D) 해석을 통해 원형 터널에서의 굴착변위를 서로 비교하여, 상용프로그램의 활용성을 검토하였다. 이어서, 두 종류의 상용프로그램을 활용하여 쏫크리트 라이닝의 유무에 따라, 동일한 초기조건에서의 굴착변위를 구하여, 두 상용프로그램의 해석결과를 비교하였다. 마지막으로, 상용프로그램에서 획득한 터널굴착변위를 본 연구에서 개발한 해석모듈(FAST-Ver. 1.2, Feedback Analysis System for Tunneling)에 입력치로 이용하여, 원지반의 하중상태 및 재료특성 등을 추정하고, 추정된 값들이 당초 가정하였던 값들을 얼마만큼 재현할 수 있는지에 대한 검증을 수행하였다.

Keywords : Critical strain, Excavation displacement, Feedback, Stability of tunnel

¹ 정회원, 한국시설안전기술공단 지하시설실 팀장 (Member, Director, Dept. of Underground structure, KISTEC, parksh@kistec.or.kr, 교신저자)

² 정회원, 한국시설안전기술공단 지하시설실 실장 (Member, Section Chief, Dept. of Underground structure, KISTEC)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

터널을 시공하는 경우에 있어서, 구조체로서의 터널에 대한 안정성을 평가하기 위해서는 터널구조체에 대해 직접적으로 변형이나 응력을 계측할 필요가 있다. 그러나 시공현장에서의 터널구조체는 지반굴착이 이루어진 후에 건설되기 때문에, 주변지반과의 상호작용의 영향을 직접적으로 받아, 주변 지반에 대한 평가도 동시에 실시할 필요가 있다. 이렇듯이 터널의 안정성을 평가하기 위해서는 구조체에 발생한 응력을 조사하거나, 굴착에 의해 응력해방이 발생한 주변지반의 변위를 조사하여 평가하는 방법을 취하고 있다. 이때, 구조체의 응력을 계측하는 것은 고가의 계측장비를 매설하여야만 가능하기 때문에, 시간적·경제적 제약이 크다고 할 수 있다. 이에 비하여 굴착지반에 대한 변위계측은 응력계측에 비해 신속하고 경제적으로 수행될 수 있는 장점이 있다.

그러나 시공현장에서의 변위계측에는 다양한 제약이 있기 때문에 아직까지 터널시공 실무현장에서의 활용성과 제약이 존재하고 있는 것이 현실이다(박시현 등, 2007; 천병식 등, 1996). 그림에도 불구하고, 터널시공현장에서 계측되는 변위값은 현장의 지반상태, 지보상태, 터널굴착상태 등의 다양한 요인들을 그대로 표현하고 있는 의미있는 정보이다. 실제 터널시공 실무에서는 현장에서의 시공관리를 위하여 변위개념에 의한 시공관리기준치를 제시하고 있다. 그러나 이러한 기준치는 나라마다, 기관마다, 그리고 시공현장마다 기준이 서로 다르며, 통일된 지침이 수립되어 있지 않은 상태이다(한국지반공학회, 1996; 한국도로공사, 1995; 日本トンネル技術協會, 1983; 清水建設株式会社, 1998; 高山 昭, 1993).

본 연구의 저자들은 변위개념으로 안정성을 평가하기 위한 방법으로 Critical strain 개념(BTS, 2004)을 이용하여 굴착터널에 대한 정량적 안정성 평가 기법을 새롭게 제안한 바 있다. 본 연구에서는 Critical strain 개념을 토대로 하여, 터널굴착면에서 계측되는 계측변위를 활용하여, 터널굴착이 이루어지는 주변지반의 변형률을 파악하기 위한 해석적 기법 개발에 대한 연구를 수행한 것이다.

2. Critical strain 개념

영국터널협회에서 최근 새롭게 개정된 Tunnel lining

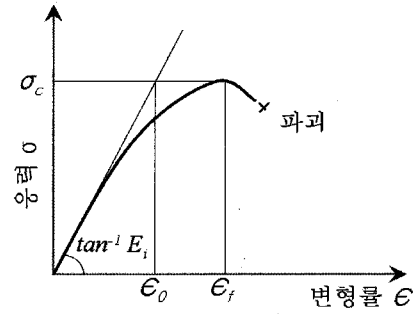


그림 1. 일축압축시험에 의한 응력-변형률선도

design guide (BTS, 2004)에서는 Critical strain 개념을 소개하고 있는데, 이는 Sakurai(1997)의 연구결과를 그대로 인용한 것으로서 원저자의 자료를 토대로 요약하면 다음과 같다.

Critical strain(ϵ_0)은 그림 1과 같이 현장에서 채취한 시편의 일축압축시험결과인 응력-변형률 관계로부터 구해지며, 일반적으로 파괴시의 변형률인 파괴변형률(ϵ_f) 보다는 작은 값을 가지게 되어 공학적인 측면에서는 보수적인 평가가 가능한 개념이다. Critical strain에 대한 보다 구체적인 내용과 이에 대한 활용사례 등은 기 발표된 연구논문(박시현 등, 2007)을 참조하기 바란다.

터널굴착에 의한 주변지반의 변형률을 파악하는 방법으로서 현장계측에 의한 변위값을 그대로 활용하는 방법에 대해 이미 논한바 있다(박시현 등, 2007). 본 연구에서는 터널 시공현장에서 계측된 변위값을 해석적인 기법을 이용하여 변형률로 환산하는 방법에 대해 새롭게 정리한 것이다.

3. 변형률 산정을 위한 해석적 기법 개발

3.1 정해석 기법의 개요

본 연구에서는 변형률 산정을 위한 해석적 기법 개발을 위해 유한요소에 의한 수치해석 기법을 활용하였다. FEM에서는 전체 요소의 각 절점에 작용하는 외력과 각 절점에서의 변위에 의한 외부일과 개별 요소의 내부에서 발생한 응력과 변형률의 내부일을 전체 요소에 대해서 합산한 것이 서로 같다는 가정에 의해 가상일의 원리를 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{\delta u_{node(g)}}^T \cdot \overline{F_{(g)}} = \sum_V^E \int_V \overline{\delta \epsilon_{(e)}}^T \overline{\sigma_{0(e)}} dV \quad (1)$$

상기 식에 대해 [응력-변형률] 및 [변형률-변위]관계 식으로 도입하게 되면 식(2)와 같이 나타내어진다.

$$\overline{F}_{(g)} = \sum \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot \overline{u}_{node(e)} dV = [K] \cdot \overline{u} \quad (2)$$

본연구에서는 2차원 평면변형률 조건을 가정한 해석 기법을 개발코자 하며, 따라서 상기 식에서의 [D]는 아래와 같다.

$$[D] = \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & 0 \\ \nu & (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.2 변형률 산정 기법 개발

변형률 산정 기법을 개발함에 있어서, [초기응력상태], [변위계측값], [주변지반의 물성치]를 각각 연관시켜야 한다. 지반은 일반적으로 비등방비균질하며 지반 재료는 비선형적, 비탄성적 등의 다양한 특성을 지니고 있으나, 본 연구에서는 지반조건을 등질등방의 선형탄성적인 특성으로 가정하기로 한다.

3.2.1 [초기응력상태]와의 연관

식(2)는 아래와 같이 초기응력성분과 연관시킬 수 있다. 이때, 요소는 4절점 요소, 초기응력성분은 해석대상 영역에 걸쳐 일정한 것으로 가정하기로 하며, 따라서 상수로서 취급이 가능하다.

$$\begin{aligned} \sum \overline{F}_{(e)} &= \sum \int_V \begin{bmatrix} F_0x \\ F_0y \\ F_1x \\ F_1y \\ F_2x \\ F_2y \\ F_3x \\ F_3y \end{bmatrix} = \sum \int_V \begin{bmatrix} N_0,x & 0 & N_0,y \\ 0 & N_0,y & N_0,x \\ N_1,x & 0 & N_1,y \\ 0 & N_1,y & N_1,x \\ N_2,x & 0 & N_2,y \\ 0 & N_2,y & N_2,x \\ N_3,x & 0 & N_3,y \\ 0 & N_3,y & N_3,x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x_0} \\ \sigma_{y_0} \\ \tau_{xy_0} \end{bmatrix} dV \\ &= \sigma_{x_0} \overline{F}_1 + \sigma_{y_0} \overline{F}_2 + \tau_{xy_0} \overline{F}_3 \end{aligned} \quad (4)$$

3.2.2 [주변지반의 물성치], [변위계측값]과의 연관 (櫻井, 1982)

우선, 굴착주변지반의 물성치는 지반의 탄성계수를 이용하여 아래와 같이 연관시킨다.

$$\overline{F}_{(g)} = [K] \cdot \overline{u} = E_g [K_g] \cdot \overline{u} \quad (5)$$

여기서, 지반의 탄성계수는 E_g 이며, $[K_g]$ 은 $E_g=1$ 일 때의 지반 강성으로서, 지반의 포아송비에 의해 결정된다.

한편, 변위 계측값과 연관시키기 위해서는 식(6)을 식(7)과 같이 변환시킴으로써 가능하다.

$$\sigma_{x_0} \overline{F}_1 + \sigma_{y_0} \overline{F}_2 + \tau_{xy_0} \overline{F}_3 = E_g [K_g] \cdot \overline{u} \quad (6)$$

$$\sigma_{x_0} \begin{Bmatrix} \overline{F}_{11} \\ \overline{F}_{12} \\ \overline{F}_{13} \end{Bmatrix} + \sigma_{y_0} \begin{Bmatrix} \overline{F}_{21} \\ \overline{F}_{22} \\ \overline{F}_{23} \end{Bmatrix} + \tau_{xy_0} \begin{Bmatrix} \overline{F}_{31} \\ \overline{F}_{32} \\ \overline{F}_{33} \end{Bmatrix} = E_g \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{u}_1 \\ \overline{u}_2 \\ \overline{u}_3 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서, \overline{u}_1 는 굴착면에서 측정되는 절점의 변위(기지), \overline{u}_2 는 모델 \overline{u}_1 내부의 측정점 이외의 절점변위(미지), \overline{u}_3 는 모델 경계상의 절점변위(바깥경계)를 의미하며, 그림 2에 나타난 바와 같다. \overline{u}_3 는 변위가 발생치 않는 것으로 가정할 수 있기 때문에, 결과적으로 식(7)은, \overline{u}_1 과 \overline{u}_2 에 대한 두식으로 구성되기 때문에, 이로부터 \overline{u}_1 을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\overline{u}_1 = \begin{bmatrix} [K_N]^{-1} \overline{F}_a & [K_N]^{-1} \overline{F}_b & [K_N]^{-1} \overline{F}_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\sigma_{x_0}}{E_g} \\ \frac{\sigma_{y_0}}{E_g} \\ \frac{\tau_{xy_0}}{E_g} \end{Bmatrix} = [A] \cdot \overline{c} \quad (8)$$

여기서,

$$[A] = [[A_1] [A_2] [A_3]]$$

$$[A_1] = [K_N]^{-1} \overline{F}_a$$

$$[A_2] = [K_N]^{-1} \overline{F}_b$$

$$[A_3] = [K_N]^{-1} \overline{F}_c$$

$$\overline{F}_a = \overline{F}_{11} - [K_{12}] [K_{22}]^{-1} \overline{F}_{12}$$

$$\overline{F}_b = \overline{F}_{21} - [K_{12}] [K_{22}]^{-1} \overline{F}_{22}$$

$$\overline{F}_c = \overline{F}_{31} - [K_{12}] [K_{22}]^{-1} \overline{F}_{32}$$

$$[K_N] = [K_{11}] - [K_{12}] [K_{22}]^{-1} [K_{21}]$$

$$\overline{c} = \begin{Bmatrix} \sigma_{x_0}/E_g \\ \sigma_{y_0}/E_g \\ \tau_{xy_0}/E_g \end{Bmatrix}$$

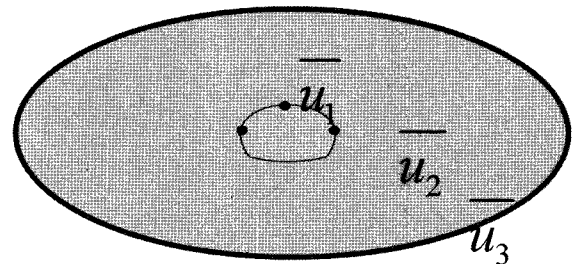


그림 2. 해석시 고려된 변위에 대한 구분

식(8)에서 $[A]$ 는 요소의 형상함수, 절점의 좌표, 그리고 기반재료의 포아송비에 의해 결정된다. 따라서 기반재료의 포아송비를 가정할 수만 있으면, 터널 계측현장에서 굴착면에서의 변위(\bar{u}_1)만을 이용하여 원지반에 대한 응력성분(\bar{c})을 추정할 수 있게 된다.

3.2.3 해석기법의 기능개선

(1) 상대변위 활용

일반적으로 현장에서 측정되는 계측변위는 그림 3과 같이 2점간의 상대변위에 의한 변화를 의미하며, 실무 활용성을 높이기 위해서 절대변위값이 아닌, 상대변위에 대한 식으로 변경하면 다음 식(9)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \bar{u}_1 &= \begin{bmatrix} u_2' - u_1' \\ v_2' - v_1' \end{bmatrix} \quad \left[\begin{array}{l} \because u_1' = u_1 \cos \theta + v_1 \sin \theta \\ v_1' = -u_1 \sin \theta + v_1 \cos \theta \end{array} \right] \\ &= \begin{bmatrix} u_2 \cos \theta + v_2 \sin \theta - u_1 \cos \theta - v_1 \sin \theta \\ -u_2 \sin \theta + v_2 \cos \theta + u_1 \sin \theta - v_1 \cos \theta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} \\ &= [T^e] \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{Bmatrix} = [T^e] \cdot \bar{u}_1 \\ &= [T^e][A] \cdot \bar{c} = [A'] \cdot \bar{c} \end{aligned} \quad (9)$$

(2) 쏿크리트 반영 기법

굴착주변지반의 물성치(E_g) 뿐만이 아니라, 시공현장에 타설되는 쏿크리트를 고려하기 위하여, 쏿크리트 물성치(E_i)를 다음과 같이 연계시킬 수 있다.

$$\sigma_{x_0} \bar{F}_{1(g)} + \sigma_{y_0} \bar{F}_{2(g)} + \tau_{xy_0} \bar{F}_{3(g)} = E_g [K_g] \cdot \bar{u} \quad (10)$$

$$[K] \cdot \bar{u} = ([K_g] + [K_i]) \cdot \bar{u} = (E_g [K_g]^* + E_i [K_i]^*) \cdot \bar{u} \quad (11)$$

이때, 주변지반과 쏿크리트의 물성중에서, 쏿크리트의 물성치는 기지로 하고, 지반의 물성치는 계산해내는 값으로 한다. 이를 위해서, 일단 지반의 물성치를 임의 값으로 가정하여 $[K_g]^* = [K_g]/E_g$ 를 계산하고, 파라미터 $R = E_i/E_g$ 을 새롭게 도입하여 아래와 같이 정리한다.

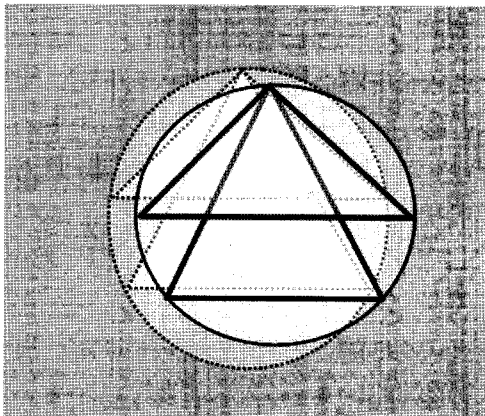
$$\sigma_{x_0} \bar{F}_{1(g)} + \sigma_{y_0} \bar{F}_{2(g)} + \tau_{xy_0} \bar{F}_{3(g)} = E_g [K]^* \cdot \bar{u} \quad (12)$$

여기서, $[K]^* = [K_g]^* + R[K_i]^* = [K_g]^* + E_i/E_g [K_i]^*$ 이며, $[K_i]^*$, $[K_g]^*$ 값은 지반 및 쏿크리트의 포아송 비에 의해 결정된다. 그리고 이 후의 해석은 상기의 식(8)과 동일하게 수행한다.

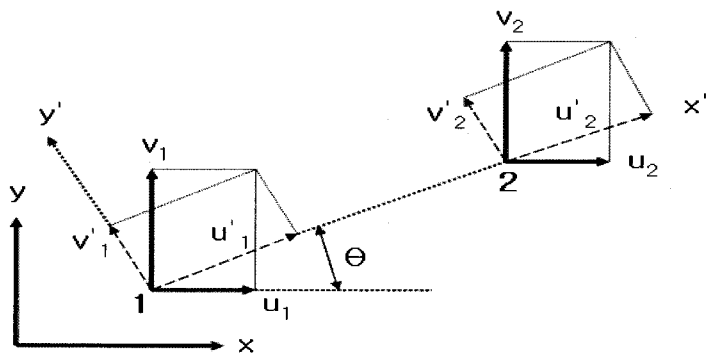
또한, 이 방법에 있어서는 계산된 결과의 타당성을 검증하여야 하는데 즉, 초기에 가정된 $R (=R_1)$ 을 해석에 의해 새롭게 계산된 $R (=R_2)$ 로 하여 $\left| \frac{R_{i+1} - R_i}{R_i} \right| < \epsilon$, ($i \geq 1$, $\epsilon = \text{오차한계}$)가 만족될 때까지 반복 수행하여야 한다.

(3) 지반의 이방성 특성의 반영

기존에 제안된 해석적 기법은 탄성등방지반을 대상으로 하고 있으나, 이를 보다 확대 적용하기 위하여, 이방성 지반의 특성을 반영한 해석기법을 개발하기 위하여 한 방향의 절리가 존재하는 경우에 대해 그림 4에서와 같이 식(13)을 이용하여 이를 해석기법에 반영하는 새로운 방법을 도입하였다. 아래의 이방성 특성을 반영하기 위한 변수로는 절리의 간격 S , 절리각도, 수직강성(K_n), 수평강성(K_s)의 4가지로 이끌어 낼 수 있다.



(a) 내공변위 계측 축선



(b) 국소좌표계와 전체좌표계의 변환도

그림 3. 상대변위 계측기법의 고려

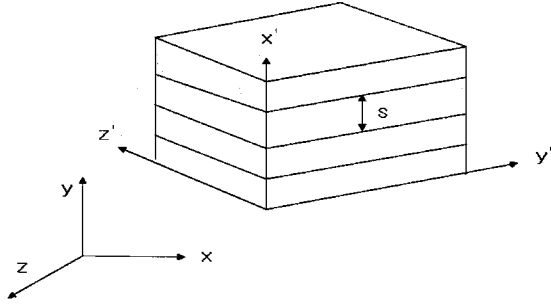


그림 4. 이방성 지반의 모식도

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{x'} \\ \epsilon_{y'} \\ \epsilon_{z'} \\ \gamma_{xy'} \\ \gamma_{yz'} \\ \gamma_{zx'} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{K_n S}\right) - \frac{\nu}{E} - \frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} - \frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{K_s S}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{K_s S}\right) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \sigma_{z'} \\ \tau_{xy'} \\ \tau_{yz'} \\ \tau_{zx'} \end{pmatrix} \quad (13)$$

해석기법을 위한 가정으로써 절리간격 S와 절리각도는 현장조사로써 알게 된 값(기지값)을 사용하고, $K_n=K_s$ 로 가정하여 미지수의 수를 하나로 줄인다. 이는 K_n 이 일반적으로 K_s 보다 큰 값이지만, 터널굴착 주변의 이완의 영향으로 K_n 값이 작아지게 되는 특성을 반영한 것이다. 따라서, 1개의 미지수인 K_n (또는 K_s)값을 강성 매트릭스 $[K]$ 에 함께 사용하기 위해서 $K_n \cdot 1m = \alpha \cdot E_g$ 을 이용하여 상기 식에서의 $[K]$ 를 정리할 수 있다.

3.2.4 해석기법의 특징 및 변형률 산정 방법

본 해석기법에서 최종적으로 추정되는 미지수 \bar{c} 는 3개 항목으로 이루어져 있기 때문에 3개의 계측정보만으로 구할 수 있게 된다. 오늘날의 대부분의 터널시공현장에서는 3차원 계측을 수행하고 있기 때문에 천단부 및 좌우측 지점의 3개소에 대하여 평면상의 두 방향의 변위를 계측하게 되면, 모두 6개의 계측정보를 획득할 수 있게 된다. 따라서 계측정보가 3개보다 더 많아지게 되는데, 이러한 경우에는 계측된 값들을 해석상에 모두 고려할 수 있게 되어 신뢰도를 더욱 더 높일 수 있게 된다.

한편, 초기 응력을 나타내는 \bar{c} 가 구해지면, 이를 활용하여 다음과 같은 두가지 방법으로 변형률을 산정할 수 있다. 먼저, \bar{c} 를 그대로 FEM의 정해석 기법에 활용하여 터널굴착시의 주변지반에 대한 변형률을 산정할 수 있다. 또 다른 방법으로는, $\gamma H = \sigma_{y0}$ 라는 가정을 이용하여 먼저, σ_{y0} 를 구하고 이어서, $E_y, \sigma_{x0}, \tau_{xy0}$ 를 차례대로 구할 수 있게 된다. 이렇게 구해진 초기응력 및 물성치

를 FEM의 정해석 기법에 활용하여 터널굴착시의 주변지반에 대한 변형률을 산정할 수 있게 된다.

또한, 본 연구에서의 해석기법은 탄성해석을 기본 토대로 하고 있다. 따라서 해석모듈을 충분히 보완하여 시스템화시켜 하나의 프로그램으로 완성시키기만 하면, 현장에서의 계측결과를 입력하여, 곧바로 변형률을 산정할 수 있게 된다. 이렇게 산정된 변형률을 원지반의 Critical strain과 비교함으로써, 시공현장에서 계측된 지점의 안정성을 신속하게 평가하고, 이를 토대로 그 다음 막장에서 안정성 평가에 곧바로 피드백할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 해석기법의 검증

본 연구에서는 상기의 해석적 기법을 토대로 해석모듈(FAST-Ver. 1.2, Feedback Analysis System for Tunneling)을 새롭게 개발하였다. 아래에서는 본 연구에서 개발한 해석모듈의 타당성을 검증하기 위한 일련의 과정들을 정리한 것이다. 해석모듈의 타당성을 검증하기 위해서는, 먼저, 이론해석과 상용프로그램(에메달드 소프트웨어, 2004, Itasca Consulting Co.; 1991) 해석을 수행하여, 원형 터널에서의 굴착변위에 대한 비교를 통해 상용프로그램의 활용성을 검토하였다. 상용프로그램(Pentagon-3D, Flac-2D)의 활용성을 확인한 후, 마제형 터널에 대하여 슛크리트 라이닝의 유무에 따라 동일한 초기하중 조건에서의 굴착변위를 구하여 두 상용프로그램의 해석결과에 대해 비교하였다. 마지막으로, 상용프로그램 해석에서 획득한 터널굴착변위를 본 연구에서 개발한 해석모듈에 입력치로 활용하여, 해석모듈의 타당성에 대한 검증을 실시하였다.

4.1 이론해석과 상용프로그램 해석에 의한 결과 비교

이론해석과 상용프로그램을 이용한 해석결과를 비교하기 위해, 우선 해석결과와 비교가 가능한 원형터널 굴착변위에 대한 이론해석을 수행하였다. 이론해석으로는 Original Kirsch 이론(Szechy, 1973)을 활용하였다. 아래 그림 5는 Kirsch의 해석모델을 나타내고 있으며, 터널굴착면에서의 변위는 다음 식(14)와 같다. 해석조건으로 터널직경 10m, 지반 탄성계수 $E=980\text{MPa}$, 포아송비 $\nu=0.3$ 단위중량 $\gamma=2.68\text{t/m}^3$, 수평작용토압 $\sigma_x=0.49\text{MPa}$, 수직작용토압 $\sigma_y=1.03\text{MPa}$ 을 각각 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 u &= \int \epsilon_r dr \\
 &= \frac{1+\nu}{E} \frac{p+q-p_i-q_i}{2} \frac{a^2}{r} \\
 &+ \frac{1+\nu}{E} \frac{p-q-p_i+q_i}{2} \left(-\frac{a^4}{r^3} + (1-\nu) \frac{4a^2}{r} \right) \cos 2\theta
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

상기 이론식에서, 측벽부에서의 터널 반경방향의 변위를 계산해보면, 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{1.52}{4 \times 376.9231} \frac{5^2}{5} + \frac{0.54}{4 \times 376.9231} \frac{5^2}{5} \\
 &[4(1-0.3) \frac{5^2}{5^2}] \cos 180 = 1.817mm
 \end{aligned}$$

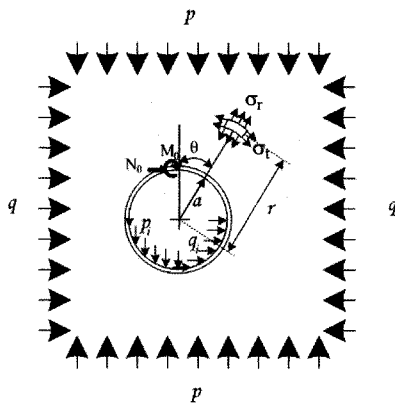
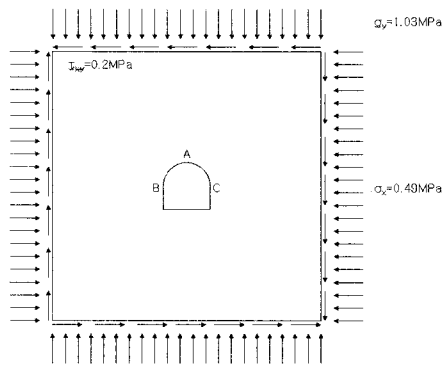
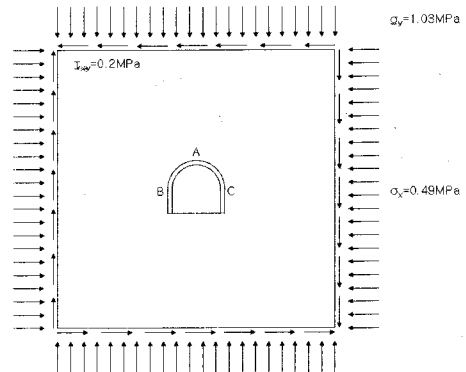


그림 5. Kirsch의 해석 모델



(a) 순굴착 상태에서의 모델링



(b) 숏크리트 라이닝을 고려한 모델링

그림 6. 마제형 터널의 모델링

표 1. 순굴착 상태에서의 터널굴착 변위

터널분류	해석프로그램	변위(mm)					
		A점		B점		C점	
		X	Y	X	Y	X	Y
마제형 터널	Flac-2D	-2.269	-7.708	2.545	1.244	-3.347	-4.028
	Pentagon3D	-2.078	-7.288	2.446	1.127	-3.152	-3.698
해석결과 차이	변위차(mm)	0.19	0.42	0.10	0.12	0.20	0.33
	백분율(%)	8.4	5.4	3.9	9.4	5.8	8.2

다음으로, 상용프로그램인 Flac-2D와 Pentagon-3D를 이용하여 측벽부 변위를 계산하였다. 해석조건은 이론 해석에서와 동일한 탄성해석을 실시하였으며, 터널 측벽부 반경방향의 해석변위는, Flac-2D에서는 1.829mm, Pentagon-3D에서는 1.831mm가 각각 발생하는 것으로 나타났다. 이를 통해, 이론해석치와 수치해석치의 결과가 거의 동일한 것을 확인할 수 있었다.

4.2 상용프로그램 해석에 의한 굴착변위의 비교

(1) 순굴착 상태에서의 굴착변위

숏크리트 등의 지보재가 타설되기 이전인 순굴착 상태에 대해서 상용프로그램을 이용하여 터널굴착에 의한 변위를 구하였다. 그림 6(a)는 순굴착 상태에서의 터널모델링 단면을 나타낸 것이다. 해석조건으로는 터널 직경 10m, 지반 탄성계수 E=980MPa, 포아송 비 ν=0.3 단위중량 26.8kPa, 수평응력 σ_x=0.49MPa, 수직응력 σ_y=1.03MPa, 전단응력 τ_{xy}=0.2MPa를 각각 적용하였다.

상용프로그램을 이용하여 그림 6 (a)의 천단부(A점)와 측벽부(B점, C점)에 대하여 터널굴착으로 인한 변위는 표 1과 같이 정리된다. 이들 해석결과에서 알 수 있는 바와 같이, 두 종류의 상용프로그램을 활용하여, 순

굴착에 의한 굴착변위를 비교하면, 최대 9.4%(0.12/1.24) 정도의 차이를 보이고 있으나, 전반적으로 해석결과와의 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다.

(2) 숏크리트 라이닝을 고려한 상태에서의 굴착변위

숏크리트 라이닝을 고려한 해석에서는 숏크리트에 대한 물성치를, 지반의 E값보다 10배 큰 값으로 적용하였으며, $\nu=0.3$ 으로 동일하게 적용을 하였다. 숏크리트 라이닝의 두께는 터널 굴착면을 따라 30cm로 고려하였다. 나머지 해석조건은 상기의 순굴착 상태의 해석조건과 동일하다. 상용프로그램을 이용하여 그림 6 (b)의 천단부(A점)와 측벽부(B점, C점)에 대하여 터널굴착으로 인한 변위는 표 2와 같이 정리된다. 이들 해석결과에서 알 수 있는 바와 같이, 상용프로그램에 따른 굴착변위를 비교하면, 최대 12.1%(0.42/3.51) 정도의 차이를 보이고 있으나, 전반적으로 해석결과와의 차이는 크지 않은 것으로 조사되었다.

4.3 개발된 해석모듈의 타당성 검증

그림 7은 본 연구에서 개발한 해석모듈의 화면 상태를 나타내고 있으며, 해석모듈의 검증을 실시하기 위하여, 상기의 상용프로그램 해석에서 구한 굴착변위값을 해석모듈의 입력치로 활용하였다. 해석모듈의 검증 절차는 다음과 같다.

- ① 상용프로그램을 활용하기 위해 초기응력조건과 지반의 물성치를 가정한다. 이때, 연직응력은 토 피하중으로부터 가정한다.
- ② 상용프로그램을 활용하여 터널굴착으로 인해 발생하는 천단 및 벽면에서의 변위값을 계산한다.
- ③ ②에서 얻은 변위를 입력치로 하여 해석모듈을 실행한다.
- ④ 해석모듈의 결과로서 \bar{c} 값을 얻는다.
- ⑤ 토피고로부터 연직응력 $\gamma H = \sigma_{y0}$ 을 가정하여 σ_{y0}

를 구하게 되면, \bar{c} 에서 E_g 를 구할 수 있고, 연이어 σ_{x0}, τ_{xy0} 를 각각 구할 수 있다.

- ⑥ 해석모듈에서 구한 응력조건과 지반의 물성치를 초기의 가정치와 비교함으로써, 해석모듈의 타당성을 검증한다.

본 연구에서는 해석모듈의 타당성을 검증하기 위하여 세가지 방법으로 검토하였다. 즉, 두 종류의 상용프로그램에서 구해진 굴착변위를 그대로 활용하여 Case 1에서는 Pentagon-3D, Case 2에서는 Flac-2D의 결과를 각각 활용하였다. 또한, 본 해석모듈에서는 최소 3개의 계층변위 데이터만으로도 해석이 가능하기 때문에, 천단부의 x, y변위와 좌우 측벽부의 x변위 즉, 4개의 변위만을 입력하여 해석을 수행하였다(Case 3).

해석결과는 각각 표 3과 표 4에 정리하였다. 표 3은 순굴착 마제형 터널, 표 4는 숏크리트 라이닝 마제형 터널에서의 해석결과를 각각 나타내고 있다. 해석을 수행한 결과, 순굴착 및 숏크리트 라이닝을 고려한 경우에서 Case 1과 Case 2에서는 초기입력조건을 그대로 재현하는 것을 알 수 있다. Case 2에서는 전단응력에서 다소 차이(0.01MPa=5%)가 발생하였으나, 그 정도는 미비한 것으로 나타났다.

한편, 그림 8에서는 순굴착 마제형 터널에 대하여, 초기 원지반의 입력조건과 해석에 의한 결과중에서 가장

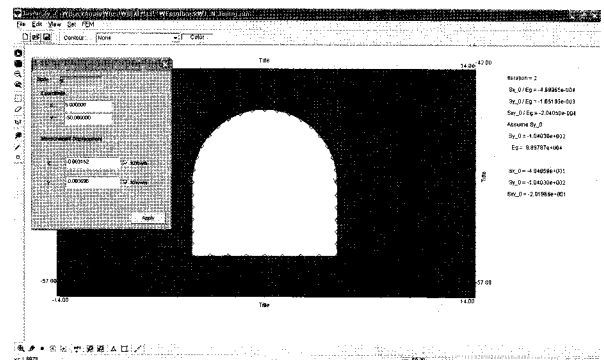


그림 7. 해석모듈(FAST-Ver. 1.2)의 화면 상태

표 2. 라이닝을 고려한 상태에서의 터널굴착 변위

터널분류	해석프로그램	변 위(mm)					
		A점		B점		C점	
		X	Y	X	Y	X	Y
마제형 터널	Flac-2D	-1.557	-5.610	1.556	0.473	-2.620	-3.510
	Pentagon3D	-1.438	-5.294	1.480	0.510	-2.428	-3.086
해석결과 차이	변위차(mm)	0.12	0.32	0.08	0.04	0.20	0.42
	백분율(%)	7.6	5.6	4.9	7.8	7.3	12.1

표 3. 순굴착 마제형 터널에서의 해석결과

구 분	변위 입력 조건	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)	E(MPa)
Case 1	천단부와 좌우측벽부의 X, Y 변위(Pentagone-3D)	-0.49	-1.03	-0.20	980
Case 2	천단부와 좌우측벽부의 X, Y 변위(Flac-2D)	-0.48	-1.03	-0.21	980
Case 3	천단부 X,Y 변위와 좌우측벽부 X 변위	-0.49	-1.03	-0.20	980
참 고	초기의 입력조건	-0.49	-1.03	-0.20	980

표 4. 슛크리트 라이닝 마제형 터널에서의 해석결과

구 분	변위 입력 조건	σ_x (t/m ²)	σ_y (t/m ²)	τ_{xy} (t/m ²)	E(t/m ²)
Case 1	천단부와 좌우측벽부의 X, Y 변위(Pentagone-3D)	-0.49	-1.03	-0.20	980
Case 2	천단부와 좌우측벽부의 X, Y 변위(Flac-2D)	-0.49	-1.03	-0.20	980
Case 3	천단부 X,Y 변위와 좌우측벽부 X 변위	-0.49	-1.03	-0.20	980
참 고	초기의 입력조건	-0.49	-1.03	-0.20	980

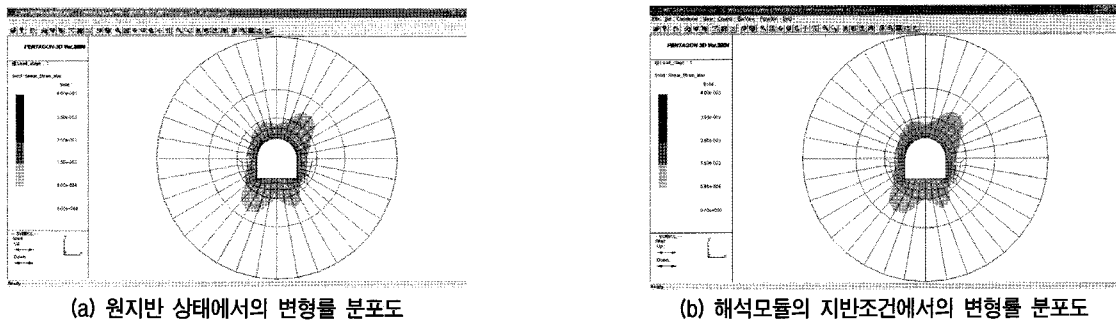


그림 8. 순굴착 마제형터널에 대한 변형률 분포의 비교

차이가 심한 상태에서의 지반조건(Case 2)에 대하여 각각 전단 변형률 분포를 도시한 것이다. 지반조건의 차이가 미비한 것과 마찬가지로, 변형률 분포에 있어서도 그림에서 알 수 있는 바와 같이 거의 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 터널시공현장에서 일상적으로 계측되는 터널변위 계측 값을 이용하여, 굴착터널의 안정성을 신속하게 평가하기 위한 방법으로서, 응력개념이 아닌 변형률 개념에 의한 안정성 평가에 관한 연구를 수행한 것이다. 변형률 개념에 의한 안정성 평가를 수행하기 위해서는 Critical strain 개념을 활용하였으며, 계측변위값을 변형률로 변환시키기 위한 해석적 기법을 정리하였으며, 또한 이를 토대로 해석모듈을 새롭게 개발하여, 개발모듈에 대한 타당성을 검증하였다. 이하에서는 본

연구의 결론을 요약한 것이다.

- (1) 시공중인 터널의 안정성을 평가하기 위해, Critical strain 개념을 도입하여 변형률로 평가하기 위한 해석적 기법에 대하여 새롭게 제안하였다.
- (2) 굴착변위를 이용하여 변형률을 산정하는 기법을 토대로 해석모듈을 새롭게 개발하였다. 개발된 해석모듈은 FEM 해석기법에 의한 역정식화를 실시한 것으로서, 지반의 초기응력상태, 변위계측값 그리고 주변지반의 물성치를 각각 연관시켜, 상대변위 활용 기법, 슛크리트 반영기법, 지반의 불연속적 특성을 반영하는 기법을 새롭게 제안하였다.
- (3) Pentagon-3D와 Flac-2D를 활용하여 동일한 해석조건에 대한 터널굴착변위를 상호 비교하여 상용프로그램의 활용성을 검토하였다. 또한 상용프로그램에 의한 해석결과를 개발된 해석모듈의 입력치로 활용하여, 본 연구에서 개발한 해석모듈의 타당성을 검

증하였다.

- (4) 해석모델의 타당성을 검증하기 위해서는, 마제형 터널에 대하여 슛크리트 라이닝이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 각각 검토하였다. 그 결과, 상용프로그램에 의한 변위 해석결과를 그대로 활용하여 초기 지반의 응력상태 및 지반물성치를 높은 정밀도로 추정하는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 지원에 의하여 건설핵심기술연구개발사업(과제관리번호 R&D/05건설핵심 D03-01) 주관으로 수행된 과제 내용의 일부를 정리한 것입니다. 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 박시현, 신용석 (2007), “한계변형률 개념을 활용한 터널 안정성 평가에 관한 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제23권 5호, pp. 29-41.
2. 에메랄드 소프트 (2004), *Pentagon-3D, 사용 설명서*.
3. 천병식, 남순성 (1996), “서울지하철 터널의 계측관리 기준치에 관한 연구”, *대한토목학회논문집*, 제16권, 제III-1호, pp.47-59.
4. 한국지반공학회 (1996), *지반공학시리즈 7 터널 구미서관*, 서울, pp.442.
5. 한국도로공사 (1995), *고속도로 터널설계 실무 자료집*, 한국도로공사 설계사업소, pp.349-380.
6. 櫻井春輔 (1982), “トンネル工事における變位計測結果の評価法”, *土木學會論文報告集*, 第 317号, pp.93-100.
7. 日本トンネル技術協會 (1983), *トンネル技術講演會テキスト*, pp. 63-71.
8. 清水建設株式会社 (1998), *トンネル施工マニュアル*.
9. 高山 昭 (1993), *NA T M의理論と實際*, 日本土木工学社, pp.31.
10. British Tunnelling Society (2004), *Tunnel lining design guide*, ICE.
11. Itasca Consulting Co. (1991), *FLAC-2D, User's Manual*.
12. Sakurai, S. (1997), “Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.12, No.4, pp.453-460.
13. Szechy, K. (1973), *The Art of Tunnelling*.

(접수일자 2007. 8. 6, 심사완료일 2007. 12. 10)