

FLAC을 이용한 직접법 역해석 소프트웨어의 개발과 검증

김치환^{1)*}

Verification of Direct Back Analysis Software Using FLAC as a Subroutine

Chee-Hwan Kim

Abstract Direct back analysis software is coded based on Simplex method using FLAC as a subroutine. For the verification of the software, 12 different cases are assumed combining various displacements in different measuring locations around a tunnel. The number of displacements for cases varies from 3 to 240. It is verified that the exact elasticity and the primary stress state of rock around a tunnel could be found through iterative calculation regardless of the locations and number of displacements and initial values needed for the direct back analysis.

KeyWords Measurement during tunnel construction, Direct back analysis, Simplex method, FLAC

초 록 터널 시공 중 계속한 변위 등으로 터널의 안정성을 재평가하기 위해 심플렉스 이론을 기초로 직접법 역해석 소프트웨어를 개발하고 그 정확성을 12 가지 조건에서 검증하였다. 이 소프트웨어는 FLAC을 부프로그램(subroutine)으로 하고 그것에 내장된 전산언어를 이용한 것이다. 변위 수 3-240개로 구성된 여러 가지 변위조합에 대한 역해석 검증결과 터널 주변의 계측위치와 입력변위의 개수에 관계없이 암반의 탄성계수와 초기응력 비를 구할 수 있었고 반복계산을 위한 출발값의 탄성계수와 초기응력 비에 관계없이 정해에 안정적으로 수렴되는 것을 확인하였다.

핵심어 터널계측, 직접법 역해석, 심플렉스법, FLAC

1. 서 론

터널을 시공하면서 터널의 변형과 터널주변에서의 응력 및 터널 보강재에 발생하는 하중이나 응력을 계측하여 터널의 안정성을 확인하는 것이 일반적이다. 터널 계측의 종류는 터널 굴착 후 터널 내에 설치하는 천단 침하와 내공변위 계측이 일반적이고 필요에 따라서는 지중변위와 지중수평변위 및 슛크리트응력과 록볼트축력을 계측하기도 한다. 그런데 터널 시공 중 수행하는 계측은 굴진작업의 효율을 낮출 수 있다. 계측기를 설치하는 작업공간이 제한되어 있고, 설치에 필요한 장비를 적시에 동원하는 것이 쉽지 않으며 계측기 설치에 시간이 많이 소요되기 때문에 굴진과 보강에 필요한 시간을 잠식하게 된다. 또한 계측기 설치 후 측정작업 중에는 버력처리 등 통행이 빈번한 공사장비의 이동을 방해하기 때문에 시간손실도 적지 않다. 즉 터널 시공 중의 계측은 시간과 경비의 손실을 피할 수 없다.

한편 터널 시공 중 계속한 결과를 분석 활용하는 방법은 계측치의 변화경향을 추적하여 그 증가율이 감소하는지 여부를 판단하는 수준이 일반적이다. 이 경우에는 굴착을 계속 진행하면서 나타난 계측치의 변화를 추적해야 하므로 굴착 전에 굴착 중 발생할 수 있는 터널의 변형을 예측할 수 없다. 또 이에 수반하는 터널 주변에서의 응력변화와 보강재의 효과도 예측할 수 없다. 따라서 터널의 안정성이 역학적으로 불안정한 방향으로 변하고 있을 때에도 인지하지 못하므로 대처방안을 수립할 시간을 확보하지 못하게 된다. 전술한 것과 같이 터널 시공 중 계측치를 얻기 위해서는 공사에 방해가 될 수 있을 뿐만 아니라 경제적 손실을 감수해야만 한다. 그럼에도 불구하고 그 활용성이 낮아 터널의 안정성을 예측평가 할 수 없고 굴진이 계속되어 계측정보가 점점 축적되어 감에도 불구하고 터널굴진과 보강방안의 개선에 적절하게 활용을 할 수 없다면 계측은 비효율이고 비경제적일 것이다.

이를 극복하기 위해서는 계측치를 활용하되 터널의 굴진과 보강 중 나타날 수 있는 터널의 거동을 예측해 나가야 할 것이다. 계측자료가 하나 하나 축적됨에 따라 터널의 역학적 안정성을 재평가해야 한다. 터널의

¹⁾ 우석대학교 토목공학과 교수

* 교신저자 : kimcheen@korea.com

접수일 : 2005년 7월 29일

심사 완료일 : 2005년 8월 29일

변형뿐만 아니라 터널주변의 응력분포 변화와 보강이 필요한 이완영역 및 보강방법의 적절성을 수시로 평가하여야 한다. 또 필요 시 터널의 굴진방법과 보강영역 및 보강방법을 변경할 수 있어야 한다. 이 과정을 터널 계측치의 역해석이라 한다. 즉 역해석은 터널 시공 중 계측한 정보를 기초로 터널의 역학적 안정성을 재평가하는 것으로 터널 시공 단계 중 피이드 백(feedback)과정이다. 역해석에서는 터널 주변 암반의 탄성계수와 암반 내 초기응력의 크기를 구하는 것이 일반적이나 계측의 종류에 따라서는 암반의 강도를 구할 수도 있고 이를 입력불성으로 하여 터널의 응력해석까지 동시에 수행할 수 있다.

터널 계측치를 역해석하는 방법은 역순법과 직접법이 많이 이용된다(김치환, 1990; 임한욱, 김치환, 2003). 역순법은 터널 응력해석의 역순으로 계측한 변위나 응력을 입력하고 미지변수인 암반의 탄성계수와 초기응력 조건을 구하는 방법으로 전용 소프트웨어를 만들어야 한다. 국내에서도 역순법에 의한 터널과 암반사면의 역해석에 관한 연구 보고가 있다(전병승 외, 1994; 김문겸 외, 1995; 이흥규, 1998; 장정범 외, 1998).

직접법은 계측치와 계산치와의 오차를 목적함수(object function)로 정의하고 이를 최소화하는 방법이다. 여기서 목적함수는 미지변수인 암반의 물성에 따라 변하는 함수이다. 그런데 목적함수는 일반적으로 비선형이며 해석적 방법으로 미분계수를 구하기 어려우므로 최적의 미지변수를 구하는 방법으로 직접탐색법(direct search method)을 많이 이용한다. 미분계수를 구하지 않고 직접탐색하는 방법으로는 심플렉스(Simplex)법 등이 있다(A. Cividini et al., 1981; M. Hisatake, 1988). 직접법은 기존의 터널 응력해석용 수치해석 소프트웨어에 최적화 기능을 추가하면 개발할 수 있고 적용성이 광범위하여 비선형문제에도 적용할 수 있다. 또 계측치의 개수가 적을 경우에도 역해석이 가능하다. 대신에 미지변수를 변경하여 반복계산을 해야 되므로 계산에 시간이 많이 소요된다. 또 직접법을 기본으로 하고 유전자 알고리즘을 이용하여 터널 계측치의 역해석에 대해 연구한 사례도 있다(김선명, 2002).

본 연구에서는 역해석 방법 중 직접법을 적용하여 터널 계측치를 역해석할 수 있도록 소프트웨어를 개발하였고 이에 대한 정확성을 검증하였다. 직접법 역해석 중 정해를 찾아가는 방법으로 직접탐색법의 일종인 심플렉스법을 이용하였다. 직접법에서는 터널 응력해석을 반복 수행하게 되므로 터널 응력해석용 소프트웨어가 필요하였다. 이 응력해석용 소프트웨어를 부프로그램으로 두고 정해의 탐색과정에서 부프로그램을 불러 반복

계산하되 목적함수가 최소화되는 방향으로 향하도록 미지변수를 변경해 나아가도록 하였다. 부프로그램인 응력해석용 소프트웨어는 범용성이 높은 FLAC을 사용하였다. FLAC에는 전산 프로그램 언어가 내장되어 있으므로 이 내장언어를 사용하여 직접법 역해석 소프트웨어를 구성하였다.

또 직접법 역해석 소프트웨어의 정확성을 검증하기 위하여 12가지 경우의 변위조합에 대해 역해석 결과를 검토하였다. 검증한 12가지 경우 중에는 터널 시공 중 계측하는 계측기의 종류와 위치를 고려한 것도 포함되어 시공 중의 이용에도 대비하도록 하였다. 검증과정에서는 계측치를 가정하여 입력하고 암반의 탄성계수와 암반 내 초기응력 비를 역해석으로 구하였다. 직접법에서는 터널 안정성해석이 반복 수행되므로 터널 주변에서의 변위뿐 만아니라 응력분포, 보강재의 효과 등도 함께 검토할 수 있다. 이번 검증에서는 계측한 변위를 가정하여 입력하였으나 만약 터널 주변에서 굴착 후 발생한 2차 혹은 3차 응력이나 터널 보강재에 발생한 하중이나 응력을 계측하였다면 이를 기초로 역해석도 가능하다. 계측결과로 가정한 변위는 탄성해석 조건에서 FLAC을 사용하여 계산한 것이다.

2. 직접법 역해석 이론

역해석 중 직접법은 현장 계측치와 계측점에 대응하는 곳에서의 계산치 사이의 차이가 최소화되도록 미지변수의 값을 구하는 방법이다. 계측치와 계산치의 차이를 나타내는 함수를 목적함수라 하고 목적함수가 최소가 되는 미지변수를 결정하게 되는데 이 과정에서 미지변수가 변경되면서 반복계산이 필요하다. 또 미지변수가 선형적으로 변하더라도 목적함수는 비선형함수이다. 목적함수는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \delta_i^*)^2}$$

여기서 ε : 목적함수

δ_i^* : 계측값

δ_i : 계산값

n : 계측변위 개수

직접법의 최적화 방법은 구배법(gradient method)과 직접탐색법으로 대별된다. 구배법은 미지변수를 최적화 방향으로 변경시키기 위하여 목적함수의 미지변수들에 대한 편미분을 구해야 한다. 그런데 목적함수에 대한 편미분을 해석적으로 구할 수 없는 경우가 많다. 직접

탐색법은 구배법과 달리 미분하지 않고 미지변수 값을 바꾸므로 최적해에 도달하는 수렴속도가 느리지만 출발값이 최적해에서 멀리 떨어져 있다라도 정해를 찾을 수 있다. 여러 직접탐색법 중 본 연구에서는 심플렉스법을 이용하였다. 이 방법은 Nelder와 Mead(1965)에 의해 개선되었고 그 내용은 다음과 같다.

2.1 심플렉스법

미지변수의 개수가 n개인 목적함수의 n 차원 좌표공간에서 출발좌표를 P_0 라 하면 임의의 증분 δ 를 더한 좌표를 각각 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 이라 할 수 있고 $(n+1)$ 개의 모서리를 가진 다면체를 만들 수 있고 이를 심플렉스라 한다. 초기 심플렉스의 각 모서리 P_i 에서 목적함수 Y_i 를 구하고 그 중 최대값을 Y_h 라 할 때 목적함수가 최대인 좌표 P_h 를 변경하여 목적함수를 최소화되도록 하는 방법이다. P_h 를 효과적으로 변경하기 위해서는 반사(reflection), 연장(extension) 및 수축(contraction)을 선택적으로 이용한다.

반사는 $P_R = (1 + \alpha)\bar{P} - \alpha P_h$

여기서 \bar{P} : $i \neq h$ 인 모든 P_i 의 중심
 α : 반사계수

이고 연장은 $P_E = \gamma P_R + (1 - \gamma)\bar{P}$

여기서 γ : 연장계수 ($\gamma > 1$)

이며 수축은 $P_C = \beta P_h + (1 - \beta)\bar{P}$

여기서 β : 수축계수 ($0 < \beta < 1$)

이다.

먼저 P_h 를 변경시킬 새로운 모서리 좌표를 구하기 위하여 P_h 를 반대방향으로 반사시킨다. 이와 같이 구한 반사점 P_R 에 의해 결정되는 목적함수 값 Y_R 에 따라

P_h 는 바뀔 수 있다. 반사점에서의 목적함수 값 Y_R 와 초기 심플렉스에서의 목적함수 값들 중 최대치 Y_h 와 최소치 Y_l 의 크기를 비교하면 $Y_l < Y_R < Y_h$, $Y_R < Y_l$, $Y_h < Y_R$ 중 어느 한 경우가 될 것이다. $Y_l < Y_R < Y_h$ 인 경우에는 P_h 를 P_R 로 변경한다. $Y_R < Y_l$ 인 경우에는 연장하여 연장점 P_E 를 구한다. 연장점 P_E 에서의 목적함수 값 Y_E 가 Y_l 보다 작으면 P_h 는 P_E 로 변경된다. Y_E 가 Y_l 보다 크면 P_h 는 P_R 로 변경된다. $Y_h < Y_R$ 인 경우에는 수축해 주어야 한다. 반사점 P_R 을 새로운 최대점 P_h 로 변경하고 수축점 P_C 를 구한다. 만약 수축점에서의 목적함수 값 Y_C 가 Y_h 보다 작으면 P_h 는 P_C 로 변경된다. 그런데 Y_C 가 Y_h 보다 크면 모든 모서리 좌표 P_i 를 $(P_i + P_l)/2$ 로 변경한다.

그림 1은 위와 같은 순서에 따라 압반의 탄성계수와 초기응력을 2개의 미지변수로 하고 심플렉스법으로 터널 계측치를 역해석한 과정을 보인 것이다. 이것은 후술하는 직접법 역해석 소프트웨어의 정확성을 검증하는 과정 중 나타난 한 경우이다. 이 그림에서 가장 큰 삼각형의 심플렉스가 출발값의 심플렉스이고 최적화가 진행되면서 점점 작은 삼각형모양으로 심플렉스가 변하면서 정해진 탄성계수 $E = 1.0 \times 10^5 t/m^2$ 와 초기응력비 $K = 1.0$ 인 점으로 수렴해 가는 과정을 보인 것이다.

2.2 응력해석용 소프트웨어

직접법에서는 미지변수가 변경됨에 따라 터널 안정성 해석이 반복된다. 터널응력해석용 소프트웨어는 FLAC을 사용하였다. FLAC은 상업용 소프트웨어로 유한차분법 이론을 기초로 구성된 소프트웨어이다. FLAC에는 내장 프로그램언어로 FISH(Itasca, 2003)가 있고 이를 사용하여 직접법 역해석 소프트웨어를 개발하였다. 따라서 FLAC은 직접법 역해석 소프트웨어 중 하나의 부프로그램이 되는 것이다.

3. 역해석 검증을 위한 입력변위의 생성

수치모델의 가로와 세로 변은 각각 20m이고 터널은 반지름이 약 2m로 가정하였다. 지표에서 터널 천단까지의 심도는 10m이다. 모델은 수평방향과 연직방향으로 각각 10개씩의 요소를 만들어 총 100개의 요소가 되도록 하였고 절점은 수평방향 및 연직방향으로 각각 11개가 되므로 총 절점수는 121개이다. 모델의 좌우경계선은 수평방향의 변위를 구속하였고 하부경계선은 연직방향의 변위를 구속하였다. 그림 2는 요소망과 경계조건을 보인 것이다.

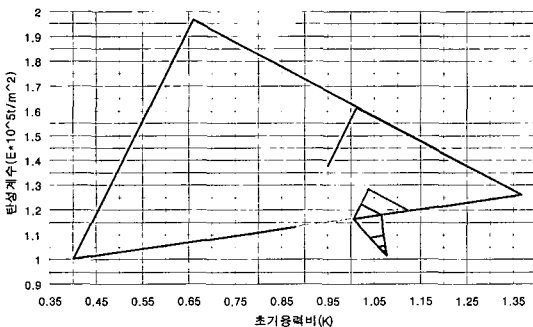


그림 1. 직접법 역해석 중 심플렉스의 변화 예

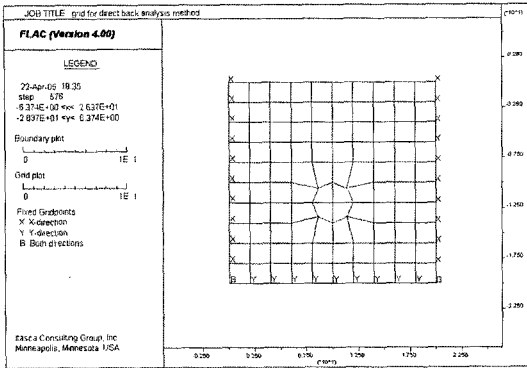


그림 2. 역해석과 응력해석용 요소망

역해석 프로그램의 검증은 위해서는 입력할 변위가 필요하므로 먼저 수치해석망의 절점을 계측점으로 가정하고 각 절점에서의 변위를 정해석으로 구하였다. 암반의 탄성계수는 $E = 1 \times 10^5 \text{ t/m}^2$ 으로 가정하였다. 포아송 비는 0.3, 단위중량은 2.6 t/m^3 로 가정하였다. 암반 내 초기응력 상태에 따른 역해석 소프트웨어의 신뢰도를 확인하기 위하여 암반 내 초기 응력비 K는 0.5, 1.0 및 1.5로 변하는 경우에 대한 변위를 활용하였다.

4. 직접법 역해석 소프트웨어의 검증

직접법 역해석 소프트웨어의 정확성을 검증하기 위하

여 계측점의 수와 위치를 다음 표 1과 같이 12가지 경우로 나누었다. 먼저 120개 측점에서 수평과 연직의 변위를 입력하고 터널주변 암반의 탄성계수와 초기응력을 역해석으로 구하였다. 역해석 중 출발값의 변화에 따라 목적함수가 국부적 극소값에 고립되는지를 확인하기 위하여 초기응력비와 탄성계수의 출발값을 몇 가지로 변화시켰다. 그 다음 계측점의 개수와 위치를 변경하였다. 실제 터널 시공 중에는 터널 내에서 내공변위와 천단침하를 주로 계측하므로 천단침하와 내공변위를 입력하고 검증을 수행하였다. 도심터널에서는 지표침하도 중요하므로 천단침하와 내공변위 외에 지표침하도 입력하여 역해석을 수행하였다. 지표침하는 터널축과 좌우로 각각 1개 측점에서 계측한 경우와 터널축 방향에 직교하여 11개 측점에서 지표침하를 계측한 경우를 고려하였다. 또 지중경사계로 터널주변의 수평방향 변위를 계측하는 경우를 고려하여 천단침하, 내공변위, 지표침하 외에 지중경사계로 측정할 수 있는 수평변위를 포함해서 역해석하는 경우도 고려하여 소프트웨어를 검증하였다.

검증에 활용한 변위 입력점을 그림 2를 이용하여 수평방향과 연직방향의 절점 순서로 표시한다. 그림 2의 요소망 왼쪽 아래 모서리로부터 오른쪽 방향과 윗방향 순서로 절점을 표시하면 천단침하 입력위치는 (6,6), 내공변위점은 (5,5)와 (7,5), 지표침하가 3개소인 경우 (1,11), (6,11), (11,11)이고 지표침하가 11개소인 경우는 (1에서 11까지, 11), 지중경사계측점은 (4, 1에서 10까지)이다.

표 1. 직접법 역해석 검증을 위한 여러 가지 변위입력 조건

구분	정해		역해석 입력조건			
	탄성계수 E ($\times 10^5 \text{ t/m}^2$)	초기 응력비 K	탄성계수 E ($\times 10^5 \text{ t/m}^2$)	초기 응력비 K	변위	
경우 1	1.0	0.5	0.1	0.2	절점 120 개소의 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 2	1.0	0.5	0.1	2.0	절점 120 개소의 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 3	1.0	0.5	10.0	2.0	절점 120 개소의 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 4	1.0	0.5	10.0	0.2	절점 120 개소의 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 5	1.0	1.0	0.1	1.5	절점 120 개소의 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 6	1.0	1.0	1.0	0.4	절점 120 개소의 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 7	1.0	1.5	10.0	5.0	절점 120 개소의 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 8	1.0	1.5	0.1	3.0	절점 120 개소의 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 9	1.0	1.5	0.5	1.0	천단침하와 내공변위 입력	
경우 10	1.0	1.5	0.5	1.0	천단침하, 내공변위, 지표침하 3개소 변위 입력	
경우 11	1.0	1.5	0.5	1.0	천단침하, 내공변위, 지표침하 11개소 변위 입력	
경우 12	1.0	1.5	0.5	1.0	천단침하, 내공변위, 지표침하 11개소, 지중경사 10개소 변위 입력	

각 경우의 검증 결과는 그림 3부터 그림 14와 같다. 소프트웨어의 정확성을 검증하기 위하여 경우 1과 경우 4와 같이 탄성계수와 암반 내 초기응력비의 출발값을 정해의 탄성계수나 초기응력비보다 작은 경우와 큰 경우를 조합하였다. 즉 탄성계수가 정해보다 큰 경우에 대해 초기응력비를 정해보다 큰 경우와 작은 경우로 또 탄성계수가 정해보다 작은 경우에 대해 초기응력비가 정해보다 큰 경우와 작은 경우로 나누었다. 검증에서는 다음과 같이 입력변위에 대한 정규화 오차를 이용하였다.

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i - \delta_i^*}{\delta_i^*} \right)^2}$$

여기서 δ_i^* 는 계측값, δ_i 는 계산값이고 n 는 계측변위의 개수이다.

그림 3부터 그림 6을 보면 출발값으로 입력한 암반의 탄성계수와 초기응력비의 위치에 관계없이 정해에 수렴하였다. 이때 계산이 반복된 횟수는 27-49번이고 입력한 변위에 대한 최대 정규화 오차는 2.32×10^{-5} 이었다.

탄성계수와 초기응력비가 정해에 수렴되는 속도는 탄성계수가 초기응력비에 비하여 빨랐다. 경우 1에서 탄성계수는 11번의 반복계산 후에 정해에 수렴되었지만 초기응력비는 27번의 반복계산 후 수렴되었다. 이와 같이 탄성계수가 정해에 먼저 수렴되는 현상은 12개 모든 경우에서 나타났다.

그림 7과 그림 8은 경우 5와 경우 6의 결과로 초기응력비의 정해가 1인데 탄성계수와 초기응력비의 출발값을 두 가지로 다르게 입력한 것이다. 출발값이 정해에 가까우면 반복계산 횟수는 감소하여 빨리 정해에 수렴하였으나 출발값이 정해에서 멀리 떨어진 조건인 경우 5에서는 반복계산 횟수가 증가하였다. 이는 경우 5와 경우 6의 정규화 오차를 같은 기준으로 적용한 것이다.

그림 9와 그림 10의 결과 인 경우 7과 경우 8은 초기응력비가 1.5인데 역해석의 출발값이 정해보다 크거나 작더라도 정해에 수렴하였다. 또 경우 3, 경우 4, 경우 5와 같이 반복계산 횟수를 충분히 증가시키면 정확성이 높아져 입력변위에 대한 정규화오차는 1.53×10^{-5} 으로 0.00153% 이내로 나타났다.

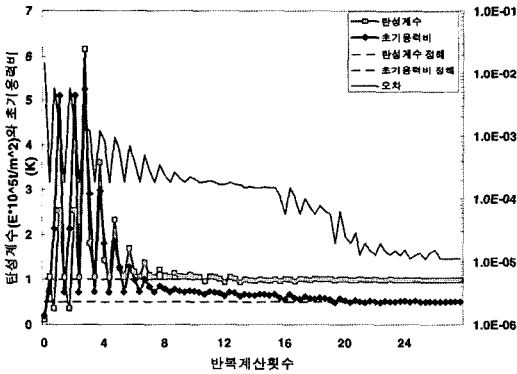


그림 3. 직접법 역해석 검증결과(경우 1)

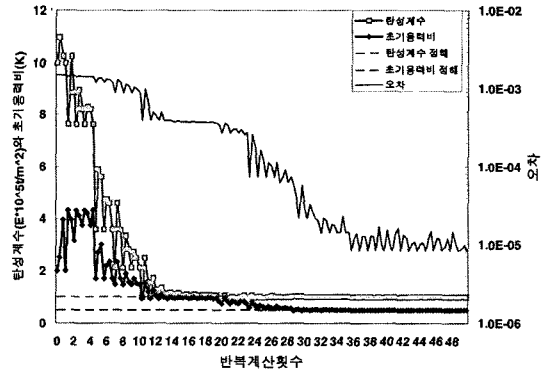


그림 5. 직접법 역해석 검증결과(경우 3)

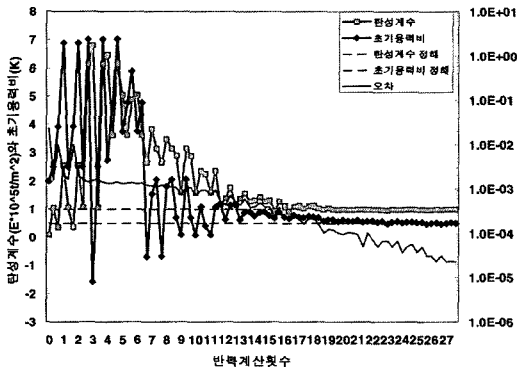


그림 4. 직접법 역해석 검증결과(경우 2)

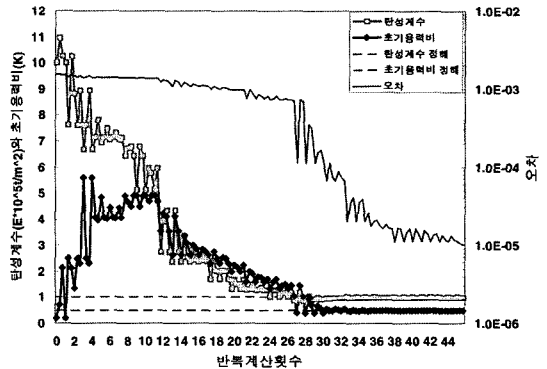


그림 6. 직접법 역해석 검증결과(경우 4)

시공 중의 계측실무를 고려하여 입력변위의 개수를 줄여 소프트웨어의 정확성을 검증하였다. 실제 터널 시공 중에는 터널 주변의 몇 개 측점에 계측기를 설치하고 계측관리를 하고 있기 때문이다. 계측의 종류는 주로 터널의 천단침하와 내공변위, 지표침하, 지중경사 외에 여러 종류가 있으나 본 연구에서는 천단침하, 내공

변위, 지표침하, 지중경사의 계측결과를 가정하고 역해석 검증을 수행하였다.

터널의 천단침하와 내공변위를 입력하여 검증한 결과인 그림 11의 경우 9와 같이 38번의 반복계산 후 정해에 수렴하였고 입력변위에 대한 정규화오차는 1.07×10^{-5} 이었다. 이 그림에서 16번의 반복계산 후 정해를 구하

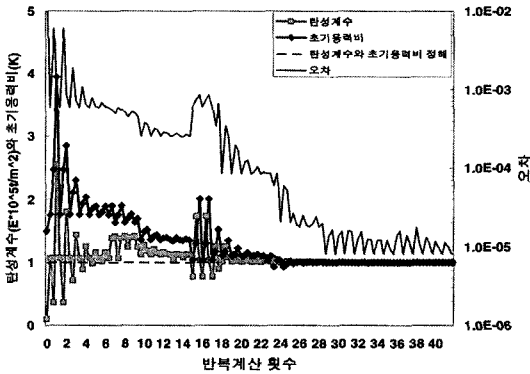


그림 7. 직접법 역해석 검증결과(경우 5)

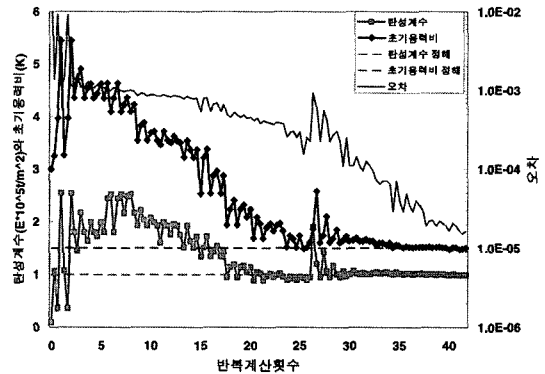


그림 10. 직접법 역해석 검증결과(경우 8)

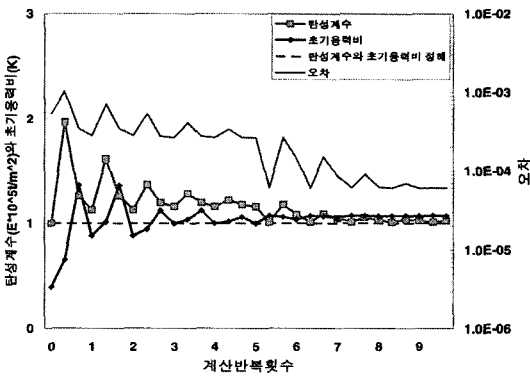


그림 8. 직접법 역해석 검증결과(경우 6)

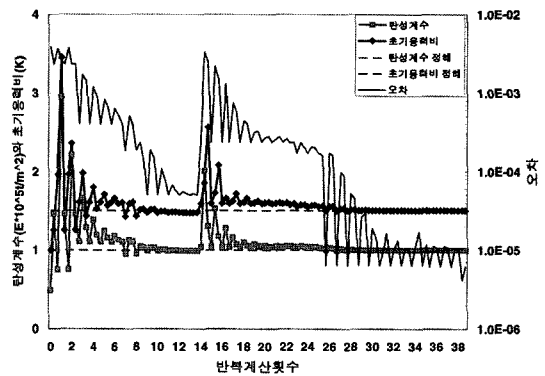


그림 11. 직접법 역해석 검증결과(경우 9)

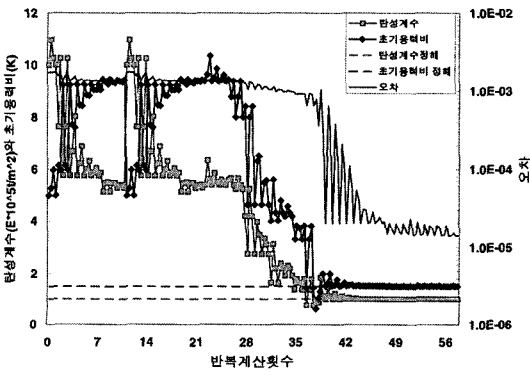


그림 9. 직접법 역해석 검증결과(경우 7)

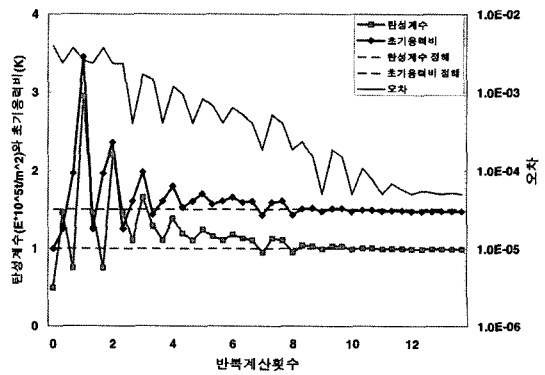


그림 12. 직접법 역해석 검증결과(경우 10)

였으나 입력변위에 대한 오차가 크기 때문에 반복계산을 38번까지 더 수행한 결과 오차가 감소한 것을 보인다. 따라서 적은 위치에서 3개의 변위 만 입력하여 역해석하더라도 정해를 구할 수 있는 것을 확인하였다.

천단침하와 내공변위 외에 3 측정점에서 측정한 지표침하를 입력하고 검증한 것이 경우 10이다. 지표침하 측정점이 11개로 늘어날 때 검증한 것이 경우 11이고 여기에 지중경사 측정결과를 입력하고 역해석 검증한 것이 경우 12이다. 검증 과정 12개 중 경우 9까지 충분한 정확성을 검증하였으므로 경우 10부터 경우 12까지는 계산의 반복횟수를 13번 이하로 줄였다. 그 결과는 그림 11에서 그림 14와 같다.

아래의 표 2는 검증 결과를 요약한 것이다. 여기서 보는 것과 같이 입력변위 조합이 다르더라도 직접법 역해석을 통하여 정해에 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 또 계산의 반복횟수를 증가시키면 그 정확성이 더 향상되는 것도 확인하였다. 직접법 역해석에 입력하는 출발값의 위치에 관계없이 정해에 도달할 수 있는 것도 확인하였다. 따라서 직접법으로 구성된 역해석 소프트웨어의 유효성이 검증 된 것으로 판단되었다.

5. 결 론

역해석 방법 중 직접법으로 만든 소프트웨어를 검증

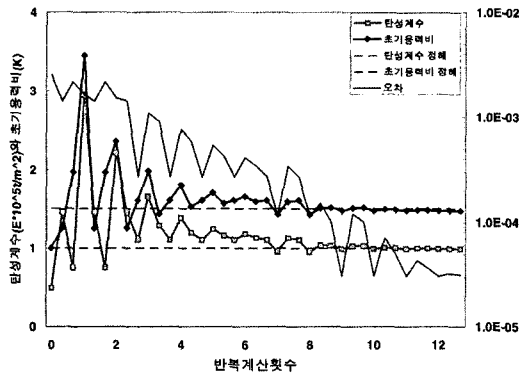


그림 13. 직접법 역해석 검증결과(경우 11)

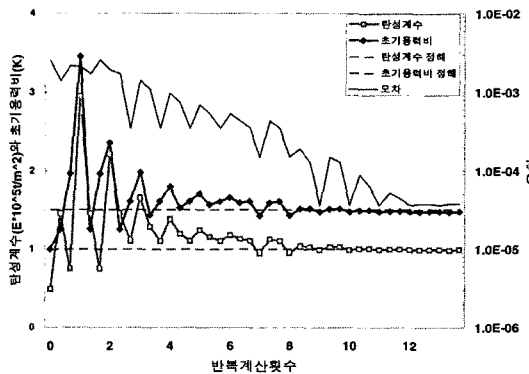


그림 14. 직접법 역해석 검증결과(경우 12)

표 2. 여러 가지 변위 조합에 대한 직접법 역해석 검증결과

구 분	정 해		역해석 결과					입력 변위
	탄성계수 E ($\times 10^5 t/m^2$)	초기 응력비 K	탄성계수 E ($\times 10^5 t/m^2$)	초기 응력비 K	오차 ($\times 10^{-5}$)	반복 계산 횟수		
경우 1	1.0	0.5	0.9978	0.5056	1.13	27	절점 120 개소에서 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 2	1.0	0.5	0.9885	0.4928	2.32	27	절점 120 개소에서 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 3	1.0	0.5	0.9979	0.502	0.854	49	절점 120 개소에서 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 4	1.0	0.5	0.9979	0.503	1.02	45	절점 120 개소에서 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 5	1.0	1.0	0.9977	1.0	0.80	41	절점 120 개소에서 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 6	1.0	1.0	1.024	1.072	6.05	9	절점 120 개소에서 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 7	1.0	1.5	1.001	1.509	1.43	57	절점 120 개소에서 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 8	1.0	1.5	0.9976	1.492	1.53	41	절점 120 개소에서 연직 및 수평방향 변위를 모두 입력	
경우 9	1.0	1.5	1.0	1.50	1.07	38	천단침하와 내공변위 입력	
경우10	1.0	1.5	0.9940	1.478	5.02	13	천단침하, 내공변위, 지표침하 3 개소 변위 입력	
경우11	1.0	1.5	0.9915	1.475	3.07	12	천단침하, 내공변위, 지표침하 11개소 변위 입력	
경우12	1.0	1.5	0.9915	1.475	3.62	13	천단침하, 내공변위, 지표침하 11개소, 지중경사 10개소 변위 입력	

하였다. 직접법은 심플렉스 방법을 적용하였고 최적화에 필요한 반복적인 응력해석을 위해 FLAC과 내장된 전산언어 FISH를 사용하였다. 이 소프트웨어를 검증하기 위하여 12가지 변위조합에 대하여 역해석을 수행하였다. 역해석의 대상터널은 직경이 4m이고 터널 천단까지의 심도는 10m로 가정하였다. 결론은 다음과 같다.

- 1) 터널 굴착 후 역해석용 모델의 절점은 120개인데 모든 절점에서 수평 및 연직 변위를 입력하고 역해석한 결과 출발값으로 입력한 암반의 탄성계수와 암반 내 초기응력에 따라 9-57회의 반복계산 후 정확한 암반의 탄성계수 E와 암반 내 초기응력 비 K를 구할 수 있었다. 이때 최대오차는 정규화 변위로 표시하여 약 6.05×10^{-5} 이내의 작은 값이었다.
- 2) 터널 시공 중 예측하는 것과 같이 내공변위와 천단침하 등 예측점의 개소가 적은 경우를 가정하여 121개의 절점 중 3-24개의 절점에 변위를 입력하고 역해석한 결과 12-38회의 반복계산 후 최대 5.02×10^{-5} 의 정규화 변위 오차로 암반의 탄성계수와 초기 응력비를 구할 수 있었다.
- 3) 직접법 역해석에서 반복계산을 시작하기 위한 탐색 출발값이 필요한데 심플렉스법을 적용한 이번 검증에서 출발값의 탄성계수와 초기응력 비에 관계없이 안정적으로 정해에 수렴해 가는 것을 확인하였고 반복계산의 횟수가 증가하면 정규화 변위 오차는 감소되는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. 김치환, 1990, 현장계측치의 역해석에 의한 지하공동 주위 암반의 응력해석 및 변형거동에 관한 연구, 서울대 박사학위 논문.
2. 임한옥, 김치환, 2003, 터널공학, 구미서관, pp.158-164.
3. 전병승, 이상도, 나경웅, 김문겸, 1994, 다층구조계내 터널 거동의 역해석, 터널과 지하공간, Vol.4, pp.17-23.
4. 김문겸, 장정범, 1995, 유한요소-경계요소 조합에 의한 터널 계측결과 역해석, 터널과 지하공간, Vol.5, pp.205-213.
5. 이흥규, 1998, 터널 갱구부 주변의 산사태를 고려한 역해석법에 관한 검토, 터널과 지하공간, Vol.8, pp.46-52.
6. 장정범, 김문겸, 1998, 역해석에 의한 지하구조체의 거동예측에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol.8, pp.139-145.
7. A. Cividini, L. Jurina and G. Gioda, 1981, Some aspects of 'Characterization' problems in geomechanics, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol.18, pp.487-503.
8. M. Hisatake, 1988, Determination of optimum tunnel shape by three dimensional back analysis, Numerical Methods in Geomech., Innsbruck, pp.2059-2063.
9. 김선명, 2002, 유전자 알고리즘을 이용한 현장계측치의 역해석, 인하대학교 박사학위 논문.
10. J. A. Nelder and R. Mead, 1965, A simplex method for function minimization, Computer J., 7, pp.308-313.
11. Itasca, 2001, Fast lagrangian analysis of continua manual, ver.4.00.

김치환



1983년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 062-290-1468
E-mail: kimcheen@korea.com
현재 우석대학교 토목공학과 교수