

## 시공 단계를 고려한 터널의 역해석에 관한 연구 Back Analysis of Tunnel for multi-step Construction

김선명<sup>1)</sup>, Sun-Myung Kim, 윤지선<sup>2)</sup>, Ji-Sun Yoon

<sup>1)</sup> 인하대학교 지구환경공학부 암반공학연구실 박사과정, Graduate student, Division of Environmental and Geosystem Engineering, Inha University

<sup>2)</sup> 인하대학교 지구환경공학부 교수, Professor, Division of Environmental and Geosystem Engineering, Inha University

**개요(SYNOPSIS)** : The reliable estimation of the system parameters and the accurate prediction of the system behavior are important to design tunnel safely and economically. Therefore, the back analysis using the field measurements data is useful to evaluate the geotechnical parameter for tunnel. In the back analysis method, the selection of initial value and uncertainty of field measurements influence significantly on the analysis result. In this paper, to overcome uncertainty of field measurements, we performed the back analysis using the displacement data gained at each step of excavation and support.

**주요어(Keywords)** : back analysis, genetic algorithm, tunnel, multi-step

### 1. 서론

터널을 굴착한 이후에 터널의 안정성 확인 등을 위해 다양한 계측이 이루어지게 된다. 이들 중에서 내공 변위, 지중 변위, 천단 침하 등의 변위 계측 자료가 터널 주변 암반의 거동 상태를 가장 잘 나타내 주는 것으로 알려져 있다.

최근 수치해석 기법의 발달에 따라 기존의 터널 계측 자료를 단순히 안정성 확인의 수단으로만 이용하지 않고 이를 이용하여 암반의 역학적 성질을 알아내려는 역해석에 관한 연구가 수행되고 있다. 역해석은 크게 직접법과 역순법으로 크게 분류된다. 먼저 직접법은 Gioda & Maier(1980)와 Cividini 등(1981)에 의해서 연구된 것으로 암반의 역학적 성질이나 초기응력을 변화시켜 가면서 해석을 수행하여 계측치와 계산치가 최소의 오차를 갖는 경우를 찾아 이 때 암반의 역학적 특성값이나 초기 응력을 추정하는 방법이다. 역산법은 Sakurai & Takeuchi(1983)에 의한 것으로 일반적인 응력해석과는 반대로 변위를 입력자료로 역산하여 암반의 역학적 성질이나 초기 응력 상태를 계산하는 방법이다.

이러한 역해석은 공통적으로 계측 자료 자체의 정확성이 올바른 해석 결과를 얻기 위한 전제 조건이 된다. 또한 정확성이 보장된다고 할지라도 터널의 굴착에 의해 발생한 총변위가 필요하지만 현장에서는 여러 가지 제약 조건 때문에 총변위의 일부분만이 계측되고 있는 경우가 대부분이며 회귀 분석식 등을 이용하여 계측변위로부터 총변위를 추정하려는 시도도 있지만 아직까지 모든 지반 조건과 시공조건 등에 적용될 수 있는 분석은 불가능하다. 따라서 계측자료 자체의 신뢰성에도 문제가 있으며 따라서 부정확한 역해석 결과를 얻을 가능성을 항상 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 터널의 굴착 및 보강 작업의 단계에서 이루어진 계측값을 통해 전체 변위량을 추정하는 방법이 아닌 각 단계에서 발생하는 변위의 변화량을 역해석의 입력값으로 선정하여 시공단계에 따른 역해석을 수행하였다. 이때 각 변위량 변화에 대한 오차함수를 선정하여 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 기법을 적용하여 역해석을 수행하였다.

## 2. 국내외 연구 동향

역해석에 대한 연구는 현재 지하 암반의 안정성 해석에 관한 문제를 포함한 여러 가지 문제에 관하여 연구되고 있다. 현재까지 역해석 방법으로는 직접법과 역산법이 많이 연구되고 있다.

직접법에 대한 연구는 Gioda & Maier(1980)에 직접법이 연구된 이후에, Cividini, Jurina and Gioda(1981)에 의하여 실측치와 계산치 사이의 오차를 목적 함수로 정의하여 이를 최소화함으로써 최적의 미지변수를 구하려는 연구가 있었다. 국내에서는 Jang and Kim(1998)은 실제 현장에서 시공 중 계측한 변위 자료로 직접법을 이용하여 역해석을 수행한 사례가 있다.

역산법에 대한 연구 현황을 살펴보면, Sakurai(1981)는 터널의 안정성 분석을 위하여 계측변위의 정량 해석을 도입한 직접 변형률 해석 기법을 제안하였고 Sakurai and Takeuchi(1983)는 역산법을 이용하여 지하 공동 구조체의 굴착시 실측한 변위로 암반의 탄성계수와 초기 지압을 추정하였다. 또한 국내에서도 Lee 등(1996)이 이러한 방법을 적용한 연구를 수행하였다.

또한 Cho(1996)는 Sakurai가 개발한 역해석 기본모델에 Gerrard and Pande 및 Cho et al(1991)에 의해 수립된 절리 암반의 연속체적 거동에 대한 수치 해석기법을 도입하여 불연속면의 공간적 속성과 역학적 특성이 고려될 수 있는 역해석 모델에 대한 연구를 하였다.

그러나 역해석의 직접법과 역산법은 측정오차를 고려하지 못하기 때문에 이를 보완하기 위하여 확률론적인 이론을 이용한 Bayesian법이 보고 되고 있다. 국내에서는 이 등(1997)에 의해 확장된 Bayesian 방법을 이용한 역해석의 연구가 보고되고 있다.

그리고 Akutagawa(1991)은 탄성지반내에 단계적 분할 굴착이 실시될 경우, 임의 굴착 단계에서 발생한 증분변위만을 이용하여 초기지압을 역산하는 방법을 제시하였고 이 등(1997)은 증분 변위만을 이용하여 암반의 초기 응력 혹은 탄성계수를 역산할 수 있는 2차원 탄성 역해석 프로그램을 작성하는 등의 연구가 진행되었다.

## 3. 유전자 알고리즘

본 연구의 역해석과정 중의 최적화 기법으로 유전자 알고리즘을 이용하였다.

유전자 알고리즘은 1975년에 John Holland에 의해서 개발된 병렬적이고 전역적인 탐색 알고리즘으로서 다윈이 주장한 자연진화의 법칙인 적자생존과 자연도태의 원리를 토대로 하여 정립되었다. 이 개념을 공학적으로 적용하기 시작한 것은 David E. Goldberg이다.

유전자 알고리즘은 다음과 같이 3가지 기능을 가지고 여러 가지 문제에서 전역적인 최적해를 구한다. 재생산(reproduction) 또는 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)를 유전자 알고리즘의 연산자라 부른다.

① 재생산(선택) - 각각의 개체가 가지는 적합도에 따라 그 개체를 복제하는 과정으로, 적합도가 높은 개체일수록 다음 세대에 더 많은 자손을 가질 확률이 높게되는 원리를 구현한 것으로, 본 연구에서는

roulette-wheel selection을 사용하였다. 이 과정에서 선택확률이 큰 개체는 여러 번의 교배에 참가하기 때문에 그 개체는 집단 중에 확산되어 간다.

② 교배 - 재생산 과정에서 선택된 적합도가 높은 개체들을 빠르게 결합하여 전역에 확산시켜 가장 좋은 설계점 주위로 다수의 설계점을 집중시키는 역할을 한다.

이러한 과정은 다른 최적화 알고리즘에 없는 가장 중요하고 독특한 과정이다.

③ 돌연변이(mutation) - 이 과정은 현재 집단에 존재하지 않는 새로운 정보를 제공해 줄 뿐 아니라, 교배에 의해 설계점들이 너무 한쪽 방향으로 치우치는 것도 보완하게 된다. 이것은 아주 낮은 돌연변이율( $P_m$ )로 스트링의 한 비트를 0(1)에서 1(0)로 우연히 바꿈으로써 구현된다.

유전자 알고리즘의 수렴에 있어서 설계점들이 거의 같은 수준으로 수렴하는 데에는 많은 시간이 소비되는 경향이 있다. 따라서, 새로이 형성된 설계점들의 적합도가 더 이상 향상되지 않거나 또는 처음에 설정한 최대세대수를 초과하면 계산을 종료하게 된다.

## 4. 연구 내용

본 연구에서는 모형지반을 선정하여 기지의 지반 물성값을 입력값으로 정해석을 수행하였다. 여기에 서 나온 변위 양상을 계측값이라고 가정한 후에 역해석의 수행 과정을 거쳐서 지반물성값을 추정하고자 하였다.

터널은 먼저 터널단면을 굴착 후 1차 숏크리트와 2차 숏크리트 시공 단계까지를 해석하였으며 계측값이 획득되는 단계는 터널이 굴착된 후, 그리고 soft shotcrete 타설 후, hard shotcrete 타설 후의 변위량이며 이는 계측이 시작된 단계를 시작으로 각 단계에 따른 변화량만으로 역해석을 실시하였다. 역해석은 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 기법을 적용하였으며 각 단계에서의 계측치와 계산치에 대한 오차로 목적함수를 구성하였다.

본 해석에 사용된 해석 도구는 FLAC 3.3을 사용하였다.

### 4.1 해석 모형

해석 지반의 모형은 그림 3과 같이 3개의 layer로 구성하였으며 각 지반의 물성치는 표 1에서 제시한 것과 같다. 본 해석에 사용한 요소망을 그림 1에 나타내었다.

그리고 역해석을 통해 추정하고자 하는 대상 지반은 연암층에 대한 지반 물성치는 표 2에 제시한 것과 같다. 이렇게 구성된 지반에서의 터널 굴착 및 shotcrete를 타설에 대한 정해석을 수행하고 여기에서 얻어진 spring line에 선정된 계측점에서의 변위량의 변화 양상을 계측 data로 가정하였다.

표 1. 해석지반 중 풍화토층과 풍화암층의 물성치

parameter	풍화토층	풍화암층
elastic modulus(kgf/cm <sup>2</sup> )	2.00×10 <sup>2</sup>	5.00×10 <sup>3</sup>
poisson's ratio	0.35	0.30
density(tf/m <sup>3</sup> )	1.89	2.26
friction angle(°)	30	35
cohesion(kgf/cm <sup>2</sup> )	0.3	2.5
tension cut-off(kgf/cm <sup>2</sup> )	0.08	0.24

표 2. 역해석에 대상이 되는 연암층의 지반 물성치

parameter	physical properties value
elastic modulus $E$ ( kgf/cm <sup>2</sup> )	$1.00 \times 10^9$
field stress ratio $K_0$	1.0
poison's ratio $\nu$	0.3
friction angle ( ° )	45
cohesion $C$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) t	4
ension cut-off (kgf/cm <sup>2</sup> )	2

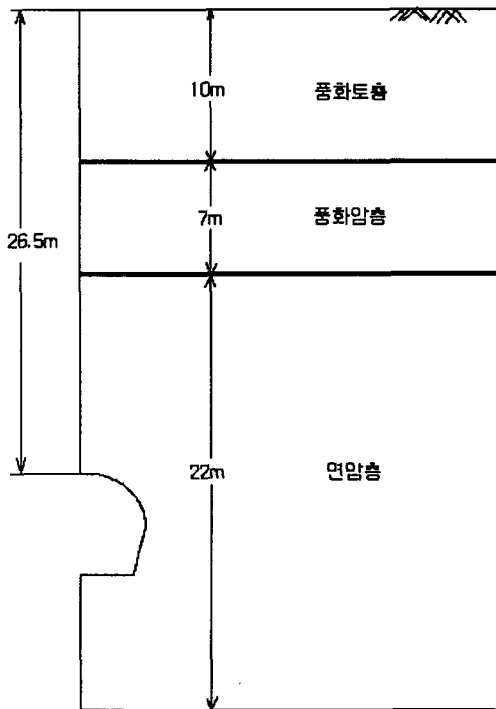


그림 1. 해석 지반 모형

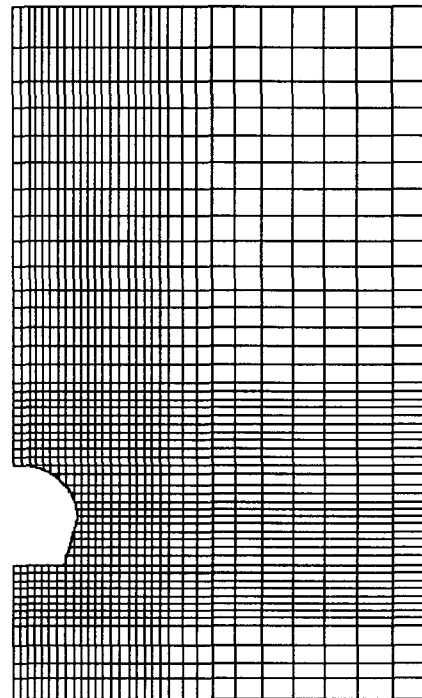


그림 2. 사용된 요소망

#### 4.2 역해석 과정

연암 지반의 물성치 중에서 elastic modulus와  $K_0$ 만을 역해석을 통해서 추정하고자 하는 값으로 정했으며 그 탐색 구간은 표 3에 제시한 것과 같다.

표 3. 연암 지반의 추정 물성치의 탐색 구간

parameter	physical properties value
elastic modulus $E$ ( kgf/cm <sup>2</sup> )	$5.00 \times 10^4 \sim 5.00 \times 10^9$
field stress ratio $K_0$	0.43 ~ 1.5

유전자 알고리즘에 적용된 제어 파라미터는 많은 실험에서 사용되고 있는 테스트 함수에 대해 좋은 성능을 보장한다고 알려진 값들 중에서 약간의 시행착오를 거쳐 적용하였으며 이를 표 4에 나타내었다.

표 4. 유전자 알고리즘에 적용된 제어 파라미터

Parameter	value
crossover probability( $P_c$ )	0.95
mutation probability( $P_m$ )	0.02
population size	28
string length	25
maximum generation	50

### 4.3 해석 결과 및 분석

역해석을 실시한 결과 유전자 알고리즘의 수렴 조건 중 최대 세대수 이후에 해석을 종료하는 수렴 조건을 만족시키는 범위에서 종료되었으나 최적해를 탐색하는데 여전히 흠어짐이 많이 발생하였다. 최대 세대수 100세대 이후에 가장 좋은 적합도를 나타내는 해와 찾고자 하는 참값은 다음의 표 5와 같았다.

표 5. 추정된 연암 지반의 물성치

parameter	physical properties value	real value
elastic modulus E ( kgf/cm <sup>2</sup> )	$1.3 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5$
field stress ratio $K_0$	1.1	1.0

먼저 이러한 결과에서 최적해로 수렴되지 않는 문제가 발생되었는데 이는 유전자 알고리즘 상의 각 population을 평가하는 evaluation function의 선정에 문제가 있었다고 생각된다. 간략히 spring line 상의 계측점의 변위 변화량 만으로 적합도를 결정하는 것은 해의 정밀도에 큰 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

또한 해석 대상으로 고려된 지반의 변위의 변화량이 1mm 이하의 작은 양이었기 때문에 이러한 적합도를 결정하는데에는 너무 작은 양이어서 민감하게 반응하지 않은 것으로 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 터널의 굴착 및 보강 작업의 단계에서 수행된 계측값을 통해, 전체 변위량을 추정하는 방법이 아닌 각 단계에서 발생하는 변위의 변화량을 역해석의 입력값으로 선정하여 시공단계에 따른 역해석을 수행하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

먼저, 역해석을 수행해서 추정된 지반의 elastic modulus는  $1.3 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>이었고  $K_0$ 는 1.1이었는데 이는 찾고자 하는 참값과는 차이를 보였다. 더욱이 역해석 수행과정에서 최적해로 수렴하지 않고 흠어짐을 보이는 문제점이 발생하였다.

따라서 향후 연구에서는 적합도 함수에 대한 새로운 고려와 계측점의 추가 선택이 필요하다고 생각되며 실제 터널 현장에서 문제가 되는 큰 변위를 발생시킬 수 있는 풍화암이나 풍화토 지반을 대상으로 한 연구가 필요하다고 생각된다.

## 6. 참고문헌

1. 김기화, 1996. "유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)", 전산구조 공학회지, 제9권 제2호. pp.28~35
2. 이연규, 이정인(1997), "다단계 터널 굴착시 계측된 증분변위를 이용한 역해석 기법의 개발", 한국지반

공학회지, Vol. 13 No. 1, pp. 123-136

3. 이인모, 김동현, 이우진(1997), "지하공간 건설시 탄·소성 모델에 의한 지반계수 추정", 한국지반공학회지, Vol. 14 No. 4, pp. 85-94
4. 장정범, 김문겸(1998), "역해석에 의한 지하구조체의 거동예측에 관한 연구", 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 8, pp. 139-145
5. 조태진(1996), "철리암반의 역학적 특성 분석을 위한 역해석 모델 개발", 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 6, pp. 19-29
6. Akutagawa, S., Meek, J. L. and Brown, E. T.(1991), "The Back Analysis of in-situ Stresses in a Multiple stage Excavation Problem", Proc. 7th Int. Confer. on Computer Methods and Advances in Geomech., Cairns, pp. 937-942
7. Chamber, L., 1995, "Practical Handbook of Genetic Algorithms" Vol. 1, CRC Press, Inc., pp. 436~440.
8. Cividini, A. and Nappi, A.(1983), "Parameter Estimation of a Static Geotechnical Model Using a Bayes' approach", Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 18, pp. 487-503
9. Gens, A., Ledesma, A. and Alonso, E. E.(1988), " Back Analsis Using Prior Information - Application to the Staged Excavation of Cavern in Rock, Numerical Methods in Geomech., Innsbrck, pp. 2009-2016
10. Gioda, G and Marier(1980), "Direct Search Solution of an Inverse Problems in Elastoplasticity : Identification of Cohesion, Friction Angle and In-situ Stress by Pressure Tunnel Tests, Int. J. Num. Meth. Engng. Vol. 15, pp. 1823-1848
11. Goldberg, D. E, 1989, "Genetic Algorithm in Search, Optimization & Machine Learning" Addison-Wesley. pp.1~88
12. Lee, C. I., Lee, Y. K. and Kim C. H.(1996), "Back analysis of displacements measured during Excavation of Underground Storage Caverns", J. of Korean Geotech. Society, Vol. 12, pp. 83-97
13. Sakurai, S. (1981), "Direct Strain Evaluation Technique in Construction on Underground Opening", Proc. 22nd U. S. Rock Mech. Symp., MIT, pp. 278-282
14. Sakurai, S. and Takeuchi, K.(1983), Back Analsis of Measured Displacements of Tunnels, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 16/3, pp. 173-180