

터널의 지반계수 추정에 대한 Genetic Algorithms의 적용

The Application of Genetic Algorithms to Estimate the Geotechnical Parameters of Tunnels

현기환¹⁾, Ki Hwan Hyun, 김선명²⁾, Sun Myung Kim, 윤지선³⁾, Ji Sun Yoon

- 1) 인하대학교 지구환경공학부 암반공학연구실 석사과정, Graduate student, Division of Environmental and Geosystem Engineering, Inha University
- 2) 인하대학교 지구환경공학부 암반공학연구실 박사과정, Graduate student, Division of Environmental and Geosystem Engineering, Inha University
- 3) 인하대학교 지구환경공학부 교수, Professor, Division of Environmental and Geosystem Engineering, Inha University

SYNOPSIS : This study presents the application of genetic algorithms(GA) to the back analysis of tunnels. GA based on the theory of natural evolution, and have been evaluated very effective for their robust performances, particularly for optimizing structure problems. In the back analysis method, the selection of initial value and uncertainty of field measurements influence significantly on the analysis result. GA can improve this problems through a probabilistic approach. Besides, this technique have two other advantages over the back analysis. One is that it is not significantly affected by the form of problems. Another one is that it can consider two known parameter simultaneously. The propriety of this study is verified as the comparison in the same condition of the back analysis(Gens et al, 1987). In this study , it was performed to estimated the geotechnical parameters in the case of weak rock mass at the Kyung Bu Express railway tunnel. GA have been shown for effective application to a geotechnical engineering.

주요어(Key words) : genetic algorithms, back analysis, field measurements, probabilistic approach

1. 서론

터널 등의 지하공동의 설계에 있어서 굴착에 의한 주변암반의 거동문제를 수치해석에 적용함에 있어서 대상 암반체의 초기응력과 재료특성을 정확히 반영해야 한다. 그러나 실제 수치해석에 적용되는 값은 실험실 시험이나 현장시험에 의해 구해진 값에 의해 결정되고 있기 때문에 이것은 실내실험의 한계

성, 현장실험의 경제성 등 많은 문제점을 내포하고 있다. 그리고, 이렇게 산출된 값은 측정지점 주위의 국부적인 영역에 대한 결과이므로 현지의 지반조건을 제대로 반영하지 못하게 되어 해석자의 주관적인 판단이 반영되는 경우가 많다.¹⁾ 따라서 지반공학에 있어서 새로운 수치해석 기법에 대한 필요성이 요구되게 되었는데 이것이 역해석이다.¹⁾ 그러나, 기존 역해석의 최적화기법은 결정론적인 방법으로 그에 따르는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서 제안한 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)과 같은 확률론적 방법은 문제의 형식에 큰 영향을 받지 않고, 설계집단을 사용하여 확률론적인 탐색을 행함으로써 전체 최적점에 도달할 신뢰도가 크다는 장점이 있다.²⁾ 특히 매개변수 추정시 기존의 방법과 같이 어느 하나를 고정시키거나 선형화하지 않고도 다수의 매개변수를 연속적으로 동시에 최적화 할 수 있는 장점이 있다.³⁾

본 연구에서는 유전자 알고리즘의 검증을 위하여 기존의 역해석 사례와 같은 지반 모형에 대해 역해석을 실시하여 그 적용성을 살펴보았다. 이때에는 지하구조체의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 탄성계수와 축압계수를 그 대상으로 하였고, 나머지는 일정한 값으로 고정하였다.

또한 경부고속 철도 터널의 계측 자료를 사용하여 대상 지반의 물성치를 유전자 알고리즘을 이용한 역해석으로 추정하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 기존의 역해석 방법

터널의 역해석에 있어서 가장 많이 사용하는 기존의 최적화 기법으로는 역산법과 직접법 등 크게 두 가지 방법을 들 수 있다.^{1,5)} 역산법은 통상의 구조해석을 역으로 정식화하여 매개변수를 정의하는 방법이다. 그러므로 역해석 하고자 하는 매개변수에 따라 각각 다른 프로그램이나 계산방법이 필요하게 되고, 다양한 문제에 적용할 수 없다는 한계가 있다.¹⁾ 직접법은 변위의 계측치와 계산치의 오차를 목적함수로 정의하여, 이 함수가 최소가 되도록 수치해석과정의 반복연산을 통하여 매개변수를 추정하는 방법이다. 이 방법은 계산시간이 역산법에 비하여 많다는 단점과 비선형 문제에도 적용할 수 있다는 장점이 있다.⁵⁾

그밖에 역해석 기법에 관한 연구는 여러 가지가 보고되고 있고, 이들 방법들 모두 각각의 장단점을 가지고 있지만 아직까지 암반의 특성을 충분히 고려한 방법이 확립되어 있지 않는 실정이다.

2.2 유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)

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. Goldberg³⁾이다.

2.2.1 유전자 알고리즘의 연산자

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 selection³⁾을 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. 현세대에서 임의의 두 개의 개체를 선택한 후, (0, 1)사이에서 발생시킨 난수 값이 교배확률 P_c 보다 작으면 문자열의 길이보다 작은 임의의 수 k 를 선택하여 두 개체의 문자열의 k 오른쪽 부분을 서로 교환한다. 예를 들면 앞의 재생산 과정의 예에서 적합도가 가장 높은 ②와 ④가 선택되었다고 가정하고 $k=4$ 라고 가정하면, 이진수로 구성된 문자열의 초기상태는 ②와 ④이고, 교배후의 상태는 각각 ②'와 ④'로 된다.

$$\begin{aligned} \text{②} &= 1100 \mid 0 & \text{④} &= 1001 \mid 1 \\ \text{②}' &= 1100 \mid 1 & \text{④}' &= 1001 \mid 0 \end{aligned}$$

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.

2.2.2 Genetic Algorithm의 연산과정³⁾

그림 1.는 유전자 알고리즘으로 최적의 해를 구하기 위한 기본 계산과정을 flow chart로 나타낸 것이다.

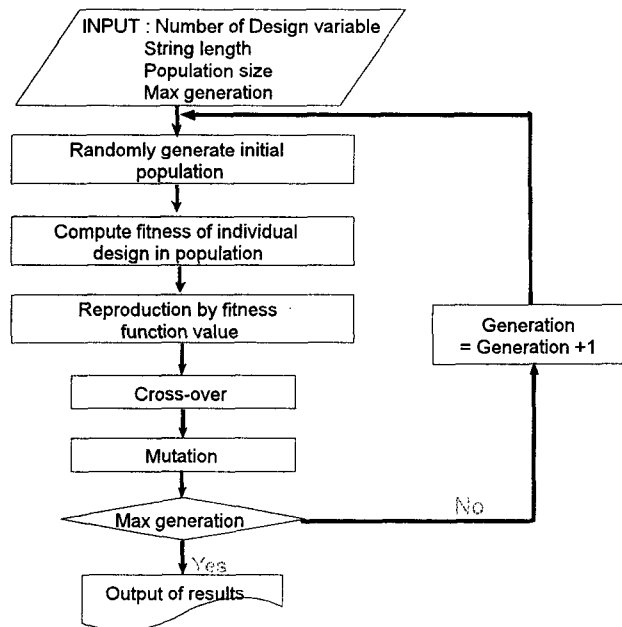


그림 1. 유전자 알고리즘의 흐름도

2.2.3 수렴기준

유전자 알고리즘 자체만을 사용하는 경우 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.

2.3 기존 역해석의 최적화 기법과 유전자 알고리즘의 비교

많은 국부최적점이 존재하는 경우 기존의 확률론적 방법에서는 설계공간과 초기점이 주어지면 최종결과가 결정되어지므로, 초기점의 선정이 매우 중요한 요인이 된다. 이러한 문제에 대해 확률론적 방법인 유전자 알고리즘은 최적해를 구하기 위해 사용자가 정의한 탐색영역 내에서 진화하므로 초기값에 따른 이상 수렴현상이 발생하지 않는다. 그리고 전자는 점에서 점으로의 이동에 의한 단일해를 평가하고 탐색해 나가는 국부적인 탐색방법이지만, 후자는 문제가 어떠한 형식으로 정식화되느냐에 큰 영향을 받지 않고, 하나의 설계점이 아닌 설계집단을 사용하여 확률론적인 탐색을 행함으로써 내재적인 병렬성을 가진다. 동시에 전체 최적점에 도달할 신뢰도가 크다.²⁾

기존 방법의 또 하나의 문제점은 입력자료의 오차에 대하여 수치모형기법이 안정한 경우에 사용될 수 있다.⁵⁾ 그러나 유전자 알고리즘은 계측결과의 불확실성(uncertainty)이 해석결과에 큰 영향을 미치게 되는 경우에 보다 효과적으로 적용할 수 있는 확률론적인 방법이다.

최적화 하고자 하는 변수의 종속도가 심한 비선형 문제의 경우, 특히 기존의 방법으로 미지 매개변수 추정시 어느 하나를 일정하게 두거나 선형화시켜서 나머지를 추정하는 방법을 사용했지만, 유전자 알고리즘을 이용하면 복수의 매개 변수를 연속적으로 동시에 최적화 시킬 수 있는 장점이 있다.

3. 기존의 터널 역해석 사례와의 비교

3.1 해석모형과 지반물성

기존의 역해석 사례 중 Gens의 역해석 결과(1987)⁽⁸⁾와 비교·검토함으로써 본 연구의 타당성을 검증하였다. Gens의 역해석 프로그램은 유한요소 해석을 정해석 도구로 하여 Gauss-Newton method를 사용함으로써 오차함수를 최소화시키는 최적해를 찾는 것이다. Gens가 사용한 해석모형은 Fig.3과 같고, 해석영역의 지반물성은 표 1.과 같으며, 탄성계수와 축압계수를 매개변수로 가정하였다. 여기서는 Gens의 해석결과와 비교하기 위하여 동일한 조건으로 탄성계수와 축압계수를 추정하였다.

표 1. 역해석 모델에 사용된 물성치

elastic modules	10MPa
unit weight	20kN/m
poison's ratio	0.49
field stress ratio	1.0

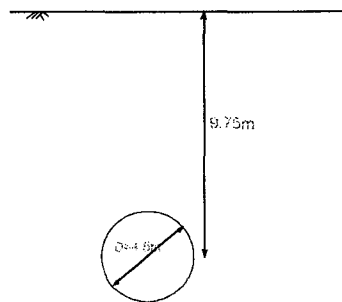


그림 2. 해석 모델

3.2 해석결과 및 비교

Gens의 방법 중 첫 번째의 경우가 해석결과와 계측결과로 정의되는 일반적인 오차함수에 계측장비 및 계측결과의 오차를 통계학적으로 고려한 것이고, 두 번째의 경우가 오차함수에 계측결과의 오차만을 통계학적으로 고려한 것이다.⁽⁸⁾ 이상의 과정을 수행한 결과를 Gens의 해석결과와 비교한 것을 표 2.에

나타내었다. 이 표의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 탄성계수는, 기존의 방법의 경우 9.4MPa와 9.2MPa로 실제값(E=10MPa)에 대하여 각각 6%와 8%의 오차를 나타냈고, GA의 경우 10.18MPa로 1.8%의 오차를 보였다. 축압계수는, 기존의 방법의 경우 0.99와 1.3으로 실제값(K₀=1.00)에 대하여 각각 1%와 30%의 오차를 보였고 GA의 경우 1.038로 3.8%의 오차를 나타내어 근사해를 구하였다.

표 2. Gens의 해설결과와 본 연구 결과와의 비교

	Gens' method		Genetic Algorithm (GA)	True value
	1	2		
E	9.2MPa	9.4MPa	10.18 MPa	10MPa
Error (E)	6%	8%	3.8%	
K ₀	0.99	1.3	1.038	1.0
Error (K ₀)	1%	30%	3.8%	

4. 현장 계측 자료를 이용한 역해석

4.1 현장 해석 모형

해석을 수행한 현장은 경부 고속철도 J터널을 대상으로 하였다. 이 터널은 Pilot 터널에 의한 선진 도갱 굴진 후에 상하반을 굴착하는 공법을 채택하였으며 본 해석에서는 Pilot 터널 굴착 후 초기 spring line에서의 내공 변위를 측정된 자료를 해석에 사용하였다.

해석 지반의 모형은 그림 3과 같다. 또한 해석에 사용한 요소망을 그림 4에 나타내었다. 해석 지반의 각 층에 대한 물성치는 표 3과 같다. 추정하는 지반 물성치는 연암층의 값만을 대상으로 하였다

해석 모형의 역해석 추정시의 탐색 범위는 표 4와 같이 선정하였고 터널 굴착 후 1차 슛크리트와 2차 슛크리트 시공 단계까지를 해석하였다.

표 3. 해석지반의 물성치

parameter	풍화토층	풍화암층
elastic modulus(kgf/m ²)	2.00e6	5.00e7
poisson's ratio	0.35	0.30
density(kgf/m ²)	1890	2260
friction angle	30	35
cohesion(kgf/m ²)	3.00e3	2.50e4
tension cut-off(kgf/m ²)	8.00e2	2.40e3

표 4. 역해석에 사용된 연암층의 지반 물성치 탐색 범위

parameter	physical properties value
elastic modulus E (kgf/m ²)	1.00e8~5.00e8
cohesion C (kgf/m ²)	100e3~40e3
poison's ratio ν	0.2~0.35
internal friction angle (ϕ)	38~48
tension cut-off (kgf/m ²)	2e3~25e3
field stress ratio K ₀	0.43~1.3

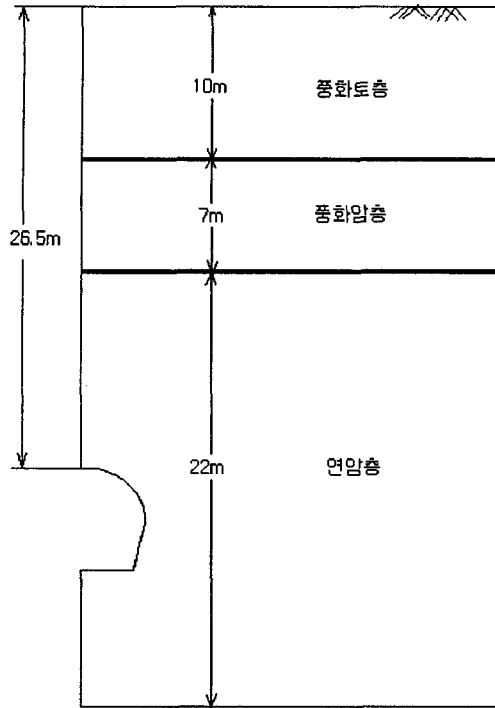


그림 3. 해석 지반 모형

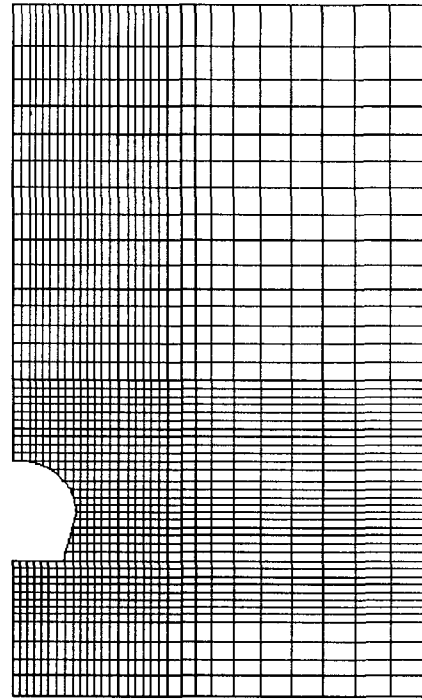


그림 4. 사용된 요소망

4.2 유전자 알고리즘에 적용된 설계상수

유전자 알고리즘에 적용된 설계상수는 많은 실험에서 사용되고 있는 테스트 함수⁽³⁾에 대해 좋은 성능을 보장한다고 알려진 값들을 사용하여, 실제로 이 값들을 약간의 시행착오를 거쳐 적용한 것이 표 5에 나타나 있다.

표 5.. 유전자 알고리즘에 적용된 제어 파라미터

Parameter	value
crossover probability(P_c)	0.95
mutation probability(P_m)	0.02
population size	28
string length	38
maximum generation	100

4.3 해석결과분석

유전자 알고리즘의 탐색과정에서 생성된 초기세대로부터 마지막 100세대까지의 진화과정에서 나타난 각 세대 적합도의 최대값과 평균값을 구하여 세대가 진행됨에 따라 양호한 적합도 함수값으로 수렴해 가는 양상을 나타내었다(그림 5 참조).

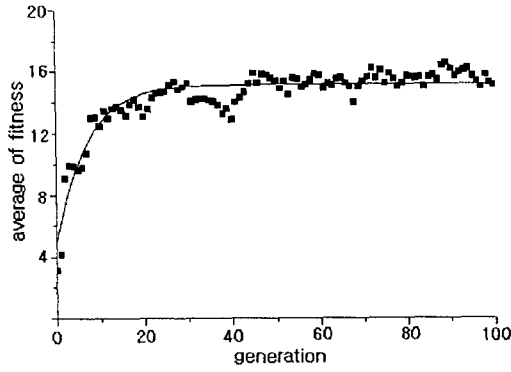


그림 5. 세대 진행에 대한 적합도 함수의 수렴

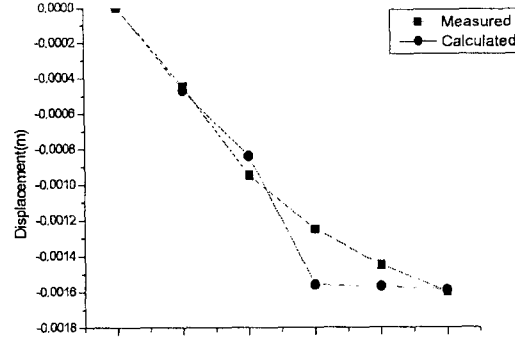


그림 6. 계측변위와 계산된 변위의 비교

표 6은 역해석에 의해서 산출된 지반의 물성치를 나타낸 것이다. 이를 입력 데이터로 하여 정해석을 실시하여 다시 현장 계측 자료와 비교하였다. 이것을 그림 6에 제시한다.

표 6. 역해석에 의해 산출된 지반의 추정 물성치

Geotechnical parameters	physical properties value
elastic modulus E (kgf/m^2)	4.70e8
cohesion C (kgf/m^2)	4.33e4
poisson's ratio ν	0.24
internal friction angle (φ)	38
tension cut-off (kgf/m^2)	1.50e4
field stress ratio K_0	0.66

그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 유전자 알고리즘을 이용한 역해석을 통해 얻어진 지반의 추정 물성치를 이용한 해석결과 비교적 유사한 변위를 보임을 알 수 있었다.

5. 결론 및 연구방향

본 연구에서는 인공지능 기법의 한 종류인 Genetic Algorithms를 이용하여 터널의 역해석시 미지의 지반 입력 매개변수를 추정하는 데 적용하였다. 유전자 알고리즘의 가장 큰 장점은 탐색과정이 단지 적합도 함수의 정보만을 요하고, 탐색이 확률적이고 병렬적으로 이루어지기 때문에, 문제의 형식에 별다른 영향을 받지 않는다는 것과 전역 최적해를 찾을 확률이 매우 높다는 것이다. 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 기존의 역해석 사례를 적용하여 비교한 결과, Gens의 1 및 2의 방법은 E값의 경우 각각 8%와 6%, K_0 값의 경우 각각 1%와 30%의 오차가 있었고, 유전자 알고리즘을 이용한 역해석은 E값의 경우 1.8%, K_0 값의 경우 3.8%의 낮은 오차로 근사해를 구하였다. 보통압을 대상으로 한 모델시험의 역해석 결과, E값은 6.8%, K_0 값은 1.0%의 적은 오차로 양호한 결과를 나타내었다.

2. 실제 현장의 내공변위 계측 자료에 대한 역해석을 실시한 결과 추정된 지반의 물성치는 elastic modulus(E) $4.70 \times 10^8 \text{kgf}/\text{m}^2$, field stress ratio(K_0) 0.66, Poisson's ratio(ν) 0.24, friction angle 38° , cohesion $4.33 \times 10^3 \text{kgf}/\text{m}^2$ 의 값을 얻었으며 이를 해석에 적용한 결과 계산된 변위는 실제로 계측된 변위와 비교적 비슷한 값을 보였다.

본 연구의 결과, 기존의 방법이 가지는 초기 시작점의 선정에 따른 국소해로의 수렴문제와 매개변수 상호간의 종속도 문제를, 유전자 알고리즘을 이용한 역해석은 전 구간의 동시탐색과 다수의 매개변수

설정을 통해 보완할 수 있었다.

6. 참고문헌

- (1) Sakurai, S. and Takeuchi, K., 1983, "Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels", *Rock Mech. Rock Eng.* 16, pp173~180.
- (2) 김기화, 1996. "유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)", *전산구조 공학회*. 제9권 제2호. pp.28~35
- (3) Goldberg, D. E, 1989, "*Genetic Algorithm in Search, Optimization & Machine Learning*" Addison-Wesley. pp.1~88
- (4) Hoek, E. & Brown, E. T, 1980. "*Underground Excavations in Rock*" Institution of Mining and Metallurgy. pp.493~511
- (5) Cividiai, A., Jurina, L. and Gioda, G., 1981. "Some Aspects of Characterization Problems in Geomechanics", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* 18, pp.487~503.
- (6) Srinivas, M., Patnaik, L. M., 1994. "Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms", *IEEE Trans on SMC*, Vol. 24, No. 2, pp.656~667.
- (7) Chamber, L., 1995, "*Practical Handbook of Genetic Algorithms*" Vol. 1, CRC Press, Inc., pp. 436~440.
- (8) Gens, A., Ledesma, A. and Alonso, E. E., 1987, "Maximum Likelihood Parameter and Variance Estimation in Geotechnical Back Analysis", *Proc. 5th Int. Conf. Applications of Statistics and Prob. in soil and Struct. Eng.*, pp.613~621.