

# 운영 중 터널 역해석을 위한 차분진화 알고리즘 최적화

안준상<sup>1</sup> · 김병찬<sup>2</sup> · 문현구<sup>2</sup> · 송기일<sup>3\*</sup> · Guo-Shao Su<sup>4</sup>

<sup>1</sup>비회원, 인하대학교

<sup>2</sup>비회원, 한양대학교

<sup>3</sup>정회원, 인하대학교

<sup>4</sup>비회원, Guangxi University

## DEA optimization for operating tunnel back analysis

Joon-Sang An<sup>1</sup>, Byung-Chan Kim<sup>2</sup>, Hyun-Koo Moon<sup>2</sup>, Ki-Il Song<sup>3\*</sup>, Guo-Shao Su<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Korea, INHA University, 100 Inha-ro, Incheon 22212

<sup>2</sup>Korea, HANYANG University, 222 Wangsimni-ro, Seoul, 04763

<sup>3</sup>Korea, INHA University, 100 Inha-ro, Incheon 22212

<sup>4</sup>China, GUANGXI University, Nanning 530004

**ABSTRACT:** Estimation of the stability of an operating tunnel through a back analysis is a difficult concept to analyze. Specially, when a relatively thick lining is constructed as in case of a subsea tunnel, there will be a limit to the use of displacement-based tunnel back analysis because the corresponding displacement is too small. In this study, DEA is adopted for tunnel back analysis and the feasibility of DEA for back analysis is evaluated. It is implemented in the finite difference code FLAC3D using its built-in FISH language. In addition, the stability of a tunnel lining will be evaluated from the development of displacement-based algorithm and its expanded algorithm with conformity of several parameters such as stress measurements.

**Keywords:** Differential Evolution Algorithm(DEA) Optimization, Back Analysis, FLAC3D, Operating Tunnel

**초 록:** 운영 중 터널의 역해석을 통한 안정성 평가는 다루기 어려운 개념이다. 특히, 해저터널처럼 라이닝이 상대적으로 두껍게 시공된 경우에 발생하는 내공변위가 작기 때문에, 일반적으로 터널 역해석에 사용되는 변위 기반의 터널 역해석에는 한계가 있을 것으로 판단된다. 여기서는 FLAC3D 프로그램에 내장된 FISH 언어를 사용해서, 다양한 역해석 알고리즘 중에 차분진화 알고리즘의 구조를 통한 터널 역해석에 대한 적용성을 확인하였다. 또한, 변위 기반의 알고리즘 구조와 더불어 응력 계측값 등 다양한 인자의 적합성을 확인하여 터널 라이닝의 안정성을 평가하고자 한다.

**주요어:** 차분진화 알고리즘(DEA) 최적화, 역해석, FLAC3D, 운영 중 터널

## 1. 서 론

터널의 운영 중 안정성 평가는 시공 중 안정성 평가와는 기본적인 접근 방식이 다르다. 특히, 쉘드터널은 시공 중 발생하는 변위를 거의 모두 발현시킨 이후에 라이닝 설계로 안정성을 확보한다. 그러므로 터널 운영 중에 발생할 수 있는 내공변위는 미소(微小)하다.

많은 연구자들이 터널의 안정성 평가를 위해서 변위 기반의 역해석에 대한 연구를 수행하여 왔으나, 이러한 연구에서는 시공 중에 상대적으로 크게 발생하는 내공변위를 바탕으로 역해석을 진행하였다. 이에 본 연구에서는 변위 이외에 터널 운영 중 획득할 수 있는 계측값을 역해석 알고리즘에 반영하여 적용성을 파악해보고자 한다.

많은 연구자들에 의해서 다양한 터널 시공 중 역해석에 관한 연구가 수행되었다. 터널의 설계 및 시공단계에서 그 거동을 합리적이고 현실적으로 판단하는

\*Corresponding author: Ki-Il Song

E-mail: ksong@inha.ac.kr

Received February 16, 2016; Revised March 3, 2016;

Accepted March 4, 2016

것이 안정성 평가에 중요한 역할을 한다. 다양한 수치 해석기법을 사용해서 터널의 거동을 예측하고자 하는 연구가 진행되어 왔지만, 해석에 사용되는 지반 물성치는 제한적인 조사와 실험을 통해서 산정된다. 이러한 불확실성을 줄이기 위해서 계측자료를 활용한 역해석기법(You and Kim, 2012; Hisataki and Ito, 1985; Sakurai and Takeuchi, 1983)이 연구되고 있다.

Kim and Jang (1995)은 현장계측자료를 활용하여 지반의 탄성계수와 정지토압계수를 산정하는 직접법에 근거한 역해석 프로그램을 개발하여 다른 역해석 프로그램과 비교 및 검증을 수행하였다. Yang and Jeon (2002)는 지반의 탄성계수와 정지토압계수를 산정할 수 있는 역해석 알고리즘을 개발하였다. 알고리즘 구축은 범용 유한차분해석 프로그램인 FLAC2D에 내장되어있는 FISH언어를 사용하였고, 최적화기법 중에 하나인 직접탐색법을 사용하여 알고리즘을 구축하였다. Kim and Lee (2013)는 유한차분법과 직접법의 하나인 로젠브록법(Rosenbrock Method)을 조합하여 터널역해석 프로그램을 개발하였다. Vardakos et al. (2012)은 차분진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)과 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 조합하여 터널 주변 지반의 물성치를 산정하기 위한 역해석 알고리즘을 구축하였다. 또한, FLAC2D 프로그램에 내장된 FISH언어를 사용하여 구축된 알고리즘을 검증하였다. 하지만, 이러한 연구는 변위 기반의 역해석 방법에 대한 것으로 터널 시공 중에 발생할 수 있는 상황에 대한 연구이다. 운영 중 실드터널의 경우에는 상대적으로 미소변위가 발생하는 상황이므로, 안정성 평가를 하기 위해서는 변위 기반의 역해석 기법만으로 평가하기에는 그 한계가 있을 것으로 판단된다.

전술한 바와 같이, 터널의 시공 중 안정성 평가를 위한 역해석에 관한 연구는 다양한 역해석 방법에 대해서 이루어져 왔다. 하지만, 터널 시공 종료 후 운영 중에 안정성을 평가하기 위한 역해석에 관한 연구는 미흡한 실정이다. An et al. (2015)은 차분진화

알고리즘을 적용하여 시공 중 발생된 변위를 통해 터널 주변 지반의 물성을 획득할 수 있음을 확인하였다. 그러므로 본 연구에서는 터널 시공 중 설치될 계측기를 통해 획득할 수 있는 정보를 활용한 역해석 기법에 대해서 연구를 수행하고, 이를 바탕으로 알고리즘을 구축하고, 수치해석 프로그램을 통해서 적용성을 확인하고자 한다. 일반적으로 운영 중 터널에서는 변위 계측값은 쉽게 획득할 수 있는 반면에 응력 계측값은 특별한 경우에만 얻을 수 있는 한계가 있다. 본 연구에서 제시한 방법은 터널 시공 중 직면할 수 있는 취약구간에서 터널 보강 공법 시공 시 지중 또는 실드 터널 세그먼트 라이닝의 응력 측정이 가능한 경우 적용이 가능하다. 본 연구에서는 여러 가지 역해석 알고리즘 중에 차분진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)을 FLAC3D 프로그램에 내장된 FISH언어를 사용해서 변위 및 응력 기반의 터널 역해석 알고리즘을 구축하고, 적용성을 확인하고자 한다.

## 2. 역해석

일반적으로 정해석은 대부분 공학적 문제에서 하중 및 재료의 물성치를 설계 변수로 하여 구조계에 적합한 경계조건 하에서 응답변수인 응력, 변형률 및 변위를 구하는 것임에 반하여 역해석은 응력, 변형률 및 변위 등의 응답변수로부터 설계변수인 하중 및 재료의 물성치를 역으로 구한다. 이러한 역해석기법은 크게 나누어 시행착오법, 직접법, 역산법 그리고 통계학적 방법으로 분류된다(Gioda and Sakurai, 1987).

Sakurai (1997)는 Fig. 1과 같이 정해석과 역해석의 관계를 설명하였다.

Fig. 2에서는 역해석의 대표적인 방법들에 대한 개요를 설명하고 있다. 또한, Fig. 3에서는 본 연구에서 사용된 차분진화 알고리즘의 범주에 속하는 역산법(Inverse method)에 종류에 대해서 설명하고 있다.

Vesterström and Thomsen (2004)은 차분진화 알고리즘의 우수한 성능을 검증하기 위해서 다양한 역해

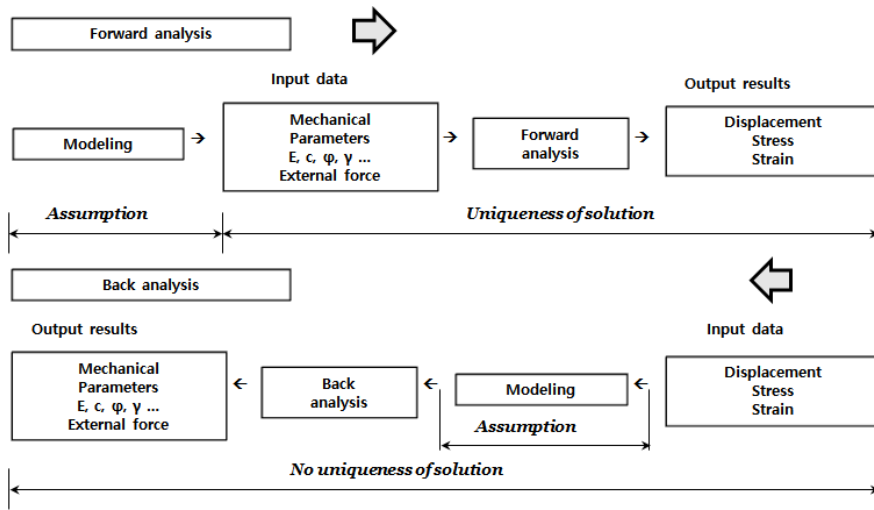


Fig. 1. Comparison between the procedure of forward analysis and back analysis (Sakurai, 1997)

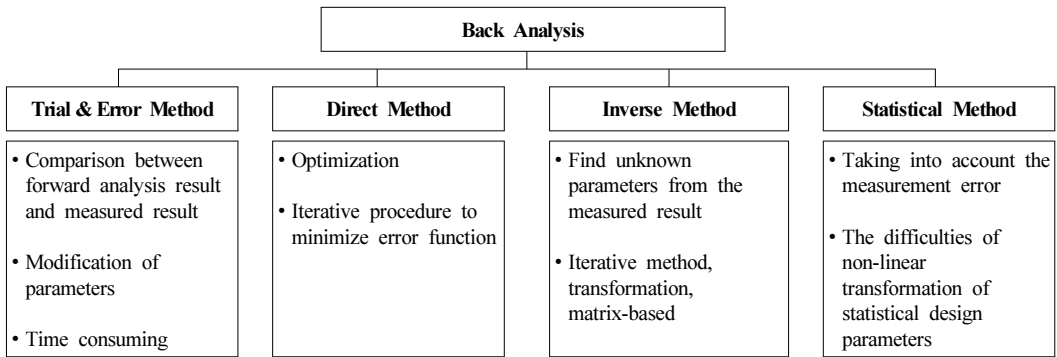


Fig. 2. Classification of back analysis

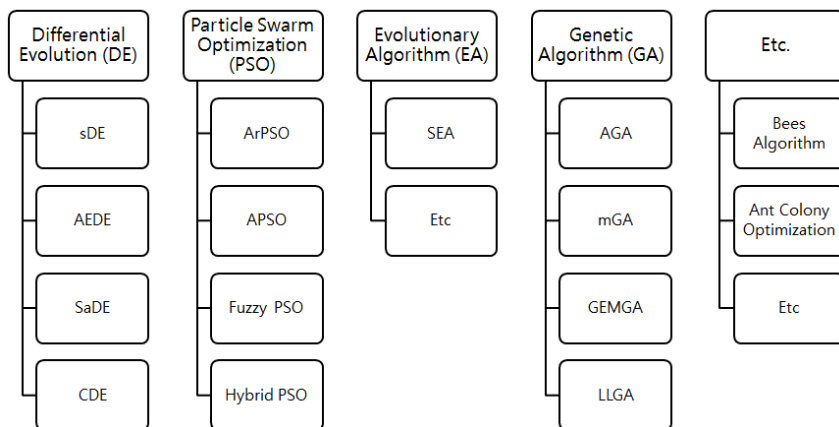


Fig. 3. Classification of inverse methods

석 알고리즘과 비교하였다. 34가지의 벤치마크 함수들의 선택에 따른 차분진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm, DEA)과 입자군 최적화기법(Particle Swarm Optimization, PSO) 그리고 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm, EA)의 성능을 분석하였다. 이 연구 결과, DEA가 PSO와 EA에 비해 훨씬 더 효율적이고, 강력한 역해석 알고리즘인 것으로 분석되었다. DEA는 최적화 문제에 대해서 다양한 분야에서 사용되고 있다는 사실에도 불구하고, 지반 공학 분야에서는 아직까지 널리 사용되지 않고 있다.

### 3. 차분진화 알고리즘 (Differential Evolution Algorithm)

차분진화 알고리즘은 비선형이고, 미분 불가능한 연속 공간 함수를 최적화하기 위해서 만들어졌다. 이 방법은 집단 크기의 목적변수 벡터를 사용하는 탐색 기법이다(Hwang, 2002). Storn and Price (1997)에 의하여 제안된 이 방법은 집단에 속한 개체 벡터의 거리와 방향 정보를 사용한다. 이 알고리즘은 구조와 연산이 대단히 단순하지만, 수렴성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 또한, 알고리즘 제어 파라미터가 적어서 사용하기 편리하고 병렬처리(Parallel processing)에도 적합하다. 차분진화 알고리즘은 진화 알고리즘과

기본적인 연산은 동일하다. 초기 개체군을 무작위로 생성하여 돌연변이(Mutation), 교배(Crossover), 선택(Selection)을 통해서 적합도가 개선되는 개체들을 추출하는 공통점이 있다. 하지만 차분진화 알고리즘은 개체들을 벡터로 표현하기 때문에 진화 알고리즘이 가지고 있는 코딩과정이 불필요하며 각 개체들의 산술적인 연산을 통해서 새로운 개체를 생성한다는 차이점이 있다. 차분진화 알고리즘은 돌연변이, 교배, 선택과 같은 연산을 사용하는 유전자 알고리즘과 유사하다. 두 가지 방법의 핵심적인 차이는 차분진화 알고리즘은 돌연변이 연산에 의존하고, 유전자 알고리즘은 교배 연산에 의존한다는 것이다(Su et al., 2008). Fig. 4에서는 차분진화 알고리즘의 주요 단계를 보여 주고 있다.

각각의 변화 대상 벡터  $X_G = [x_{1,G}, x_{2,G}, \dots, x_{NP,G}]$ 에 대해 집단에서 랜덤하게 선택된 서로 다른 3개의 벡터로부터 교배용 벡터를 식 (1)과 같이 생성한다. 여기서, NP는 집단의 크기이고, F는 돌연변이 상수로 0~2 사이의 값을 갖는다. 식 (2)는 교배단계에 대한 내용이다. 부모 벡터(parent vector)는 시행 벡터(trial vector)를 생성하기 위하여 돌연변이 벡터(mutant vector)와 교배된다. 여기서 rand는 변화에 사용될 벡터가 랜덤하게 선택됨을 의미하며, CR은 교배 상수로 0~1 사이의 값을 갖는다. Irand는 [1, 2, ..., D]의 무작위 정수(integer)이다.

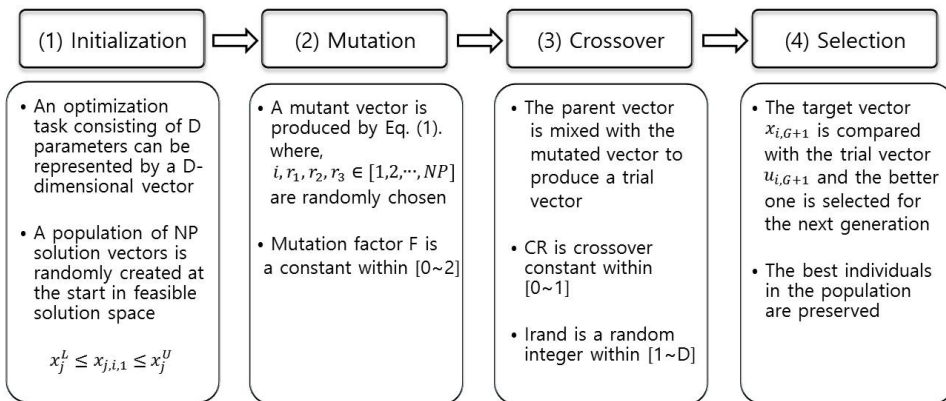


Fig. 4. Main stages of Differential Evolution Algorithm (Storn and Price, 1997)

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (1)$$

$$v_{j,G+1} = \begin{cases} v_{j,G+1} & \text{if } rand_j \leq CR \text{ or } j = I_{rand}, \\ v_{j,G} & \text{if } rand_j > CR \text{ or } j \neq I_{rand} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1} & \text{if } f(u_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}), \\ x_{i,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)은 선택 단계에 대한 내용이다. 목표 벡터 (target vector)  $x_{i,G+1}$  는 시행 벡터  $u_{i,G+1}$  와 비교된다. 그리고 다음 세대에는 우수한 형질의 개체가 선택된다. 그러므로 각각의 시행 벡터는 부모 벡터와의 비교를 통해 다음 세대에는 우수한 유전 형질을 전달하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 모집단에서 최고 우수한 개체들은 다음 세대에도 유지된다. 지정된 종료 기준에 도달 할 때까지 이러한 과정이 반복 수행된다. Fig. 5에서는 2차원 평면에서 돌연변이 벡터 생성 식 (1)의 과정을 보여주고 있다.

변위 기반의 터널 역해석은 서론에서 고찰한 바와 같이, 터널 시공 중에 변위가 상대적으로 많이 발생하는 경우에 한해서 다양한 기법을 통해서 연구가 진행되었다. 여기서는 터널 운영 중에 변위 발생이 미소한 경우의 안정성 평가에 대한 적용성을 파악하기 위해서 변위 외에 응력계측값을 차분진화 알고리즘에 반

영하여 연구를 수행하였다. 선행 연구에서 사용하였던, 변위기반의 차분진화 알고리즘의 확장을 위해서 우선, 변위에 대한 적합도와 응력에 대한 적합도를 동시에 사용할 수 있도록 공식을 무차원화하여 적용하였다. 또한, 해저터널 운영 중 추가적으로 획득할 수 있는 계측값(지반강성(열화), 수압 등) 또한 알고리즘에 반영할 수 있도록 알고리즘의 확장성을 부여하여 구축하였다.

#### 4. 변위 기반의 차분진화 알고리즘 구축 및 수치해석

변위를 이용한 역해석 문제에 접근하기 위해서 FLAC3D 프로그램에 내장된 FISH 언어를 사용해서 차분진화 알고리즘을 구현하였고, 이를 검증하기 위해서 가상 터널을 모델링하였다(An et al., 2015). 초장대, 고수압 조건의 해저터널을 모사하기 위해서, 터널 반경은 3 m, 5 m를 적용하였고, 10 MPa 및 20 MPa의 등방압력이 작용하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 또한, 가상 터널을 이상화하여  $K_0 = 1$  및 Fig. 6(a)에 제시된 바와 같이 등방압력이 1/4 모델에 작용하는 것으로 간주하였다. Fig. 6은 모델의 형상을 보여주고 있다. 변위에 대한 측정점은 Fig. 6에서 보는 것과 같이 굴착면을 따라 15° 간격으로 다섯 곳의 위치

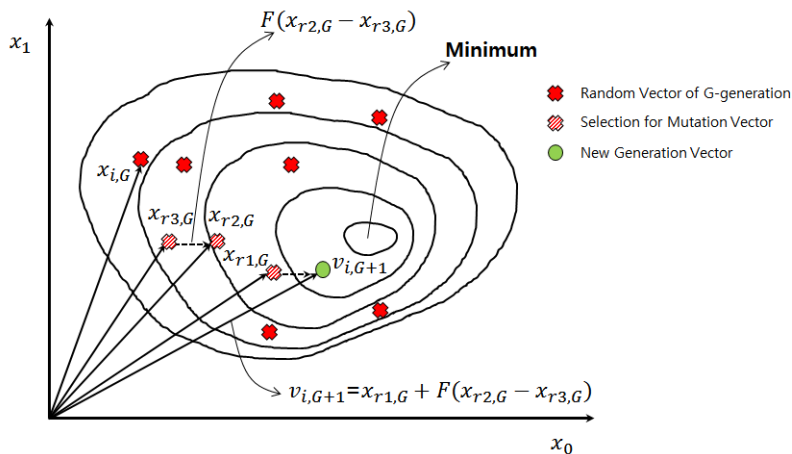


Fig. 5. DEAP process in two-dimensional space (Storn and Price, 1997)

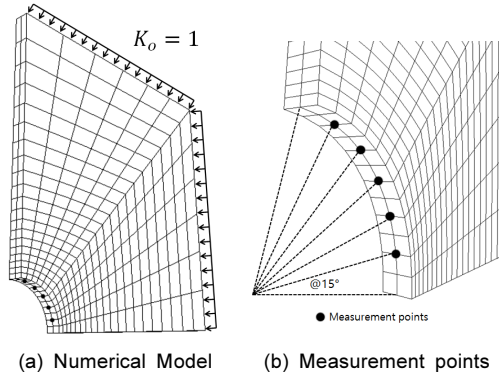


Fig. 6. Numerical model and measurement points for the feasibility study of displacement-based DEA

를 설정하였다. 대상 암반에 대해서 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였고, 변형계수( $E$ )는 2.1 GPa, 포아송비( $\nu$ )는 0.2, 점착력( $c$ )는 1.1 MPa 그리고 내부마찰각( $\phi$ )는 30°를 적용하였다. 차분진화 알고리즘에 적용된 파라미터는 초기 무작위 개체군 수는 10, 돌연변이 상수는 0.8, 교배상수는 0.8, 최대 진화 반복횟수는 10을 적용하였다. 또한, 역해석에 의해 계산할 암반 물성 중 목표 값인 변형계수( $E$ )의 범위는 1.5 GPa  $\leq E \leq$  2.7 GPa로 적용하였다. 5장에서 기술한 변위 응력 기반의 해석과 동일한 물성 범위를 적용하기 위해서 최대 오차 범위 25% 수준으로 범위를 결정하였다. Table 1에서는 해석에 사용한 물성치를 정리하였다.

Fig. 7에서는 개발된 변위 기반 차분진화 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 우선 FLAC3D를 사용해서 Fig. 6과 같은 모델을 생성해서 수치해석을 수행한다.

이러한 정해석의 결과로 산정된 변위를 시공 중 계측된 변위라고 가정하고, 구축된 차분진화 알고리즘을 이용하여 계산된 변위를 입력 물성치로 반영하여, 터널 역해석을 수행하였다. 차분진화 알고리즘의 절차는 초기화, 돌연변이 벡터 생성, 선택, 재조합, 평가의 순서로 이루어진다(Su et al., 2008). 만약 평가 단계에서 시험 벡터의 적합도가 최대 허용 오차 이내인 경우, 또는 최대 진화할 수 있는 세대 수를 초과한 경우는 계산이 종료된다. 최소의 적합도를 갖는 벡터는 최적해로 간주한다. 그렇지 않다면, 새로운 세대를 얻기 위하여 선택 단계로 돌아가서 절차를 재수행한다.

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(dx_i - Dx_i)^2 + (dy_i - Dy_i)^2 + (dz_i - Dz_i)^2]} \quad (4)$$

여기서,  $dx_i, dy_i, dz_i$  : FLAC3D 계산 변위

$Dx_i, Dy_i, Dz_i$  : 현장 i 측정 지점 계측 변위

$n$  : 측정 지점의 총 수

식 (4)는 구축한 변위 기반 차분진화 알고리즘의 적합도를 표현하고 있다. FLAC3D 수치해석 모델에서 역해석으로부터 산정하기 위한 역학적 물성치들의 정보를 갱신한다. 각각의 목표 벡터와 시행 벡터의 적합도를 얻기 위하여 FLAC3D 수치계산을 수행한다. Fig. 8에서는 해석을 수행한 3가지 조건에 대해서 보여주고 있다. 해저터널 조건을 모사하여, 해석 case

Table 1. Parameters used in displacement-based back analysis

Rock		DE	
E (Elastic Modulus)	2.1 GPa	Range of Targer Values (Max. Error Range = 25%)	1.5 GPa $\leq E \leq$ 2.7 GPa
c (Cohesion)	1.1 MPa		
$\phi$ (Friction Angle)	30°		
$\nu$ (Poisson's ratio)	0.2	F (Mutant Constant)	0.8 (0-2)
K (Bulk Modulus)	$E / 3*(1-2\nu)$	CR (Crossover Constant)	0.8 (0-1)
G (Shear Modulus)	$E / 2*(1+\nu)$	NP (Number of population)	10
Model	Mohr-Coulomb	Itermax (Max. Iteration)	10

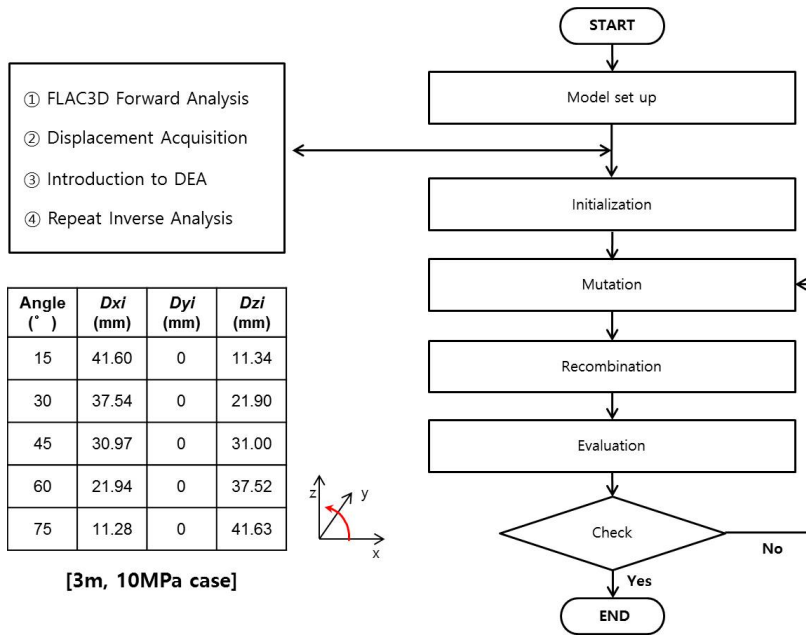


Fig. 7. Flowcharts of back analysis for initial input parameters (displacements)

Table 2. Results of displacement-based back analysis (during construction)

	$E$ (GPa)	Error (%) : $(B-I) \div I \times 100$ (%)	Conditions
Input (I)	2.1	-	(Radius, Pressure)
Output (B)	2.16	2.86	(3 m, 10 MPa)
	2.01	-4.29	(5 m, 10 MPa)
	2.13	1.43	(5 m, 20 MPa)

1, 2는 10 MPa의 등방압력을 받는 약 250 m 심도에 위치한 것으로 가정하였고, 해석 case 3는 20 MPa의 등방압력을 받는 약 500 m 심도에 위치한 것으로 모델링하였다.

Table 2에서는 해석 조건에 따른 정해석 입력 물성 값 대비 역해석에 의해 계산된 값의 오차율을 보여주

고 있으며, 역해석 결과값이 입력값에 근소한 것으로 판단되며, 구축된 알고리즘의 적용성을 확인하였다.

## 5. 변위-응력 기반의 차분진화 알고리즘 구축 및 수치해석

4장에서 살펴본 바와 같이, 시공 중 터널의 상대적으로 많이 발생하는 변위를 기반으로 하여 차분진화 알고리즘을 구축해서 분석한 결과, 그 적용성이 있음을 확인할 수 있다. 이 장에서는 운영 중의 미소(微小) 변위가 발생하는 터널을 모사하기 위해서 터널 굴착면에 라이닝을 모델링하였다.

Fig. 9에서는 라이닝을 모델링하고, 추가적인 역해

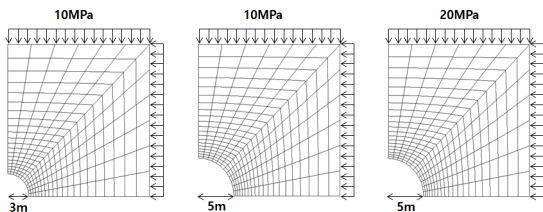


Fig. 8. Numerical model cases



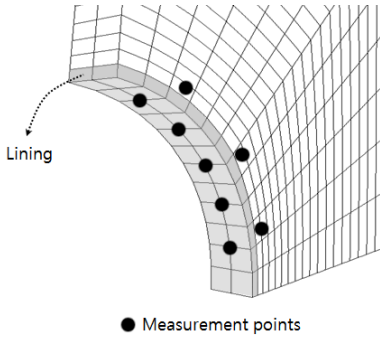


Fig. 9. Measurement points for the feasibility study of displacement-stress-based DEA

석 정보를 사용하기 위해서 라이닝 후면(後面)에 3곳의 응력 측정 포인트를 추가한 형상을 보여주고 있다. 콘크리트 라이닝 모사를 위해서, 20 cm 두께의 메쉬를 생성한 후, ( $E=24\text{GPa}$ ,  $\nu=0.18$ ,  $\gamma_t=25\text{kN/m}^3$ )의 콘크리트 물성을 탄성모델로 가정하여 적용하였다. 또한, 기구축된 변위기반의 차분진화 알고리즘을 확장하여 변위-응력 기반의 차분진화 알고리즘으로 수정하여 구축하였다.

4장에서 사용한 수치해석 모델링 상에 반영된 지반 물성치를 수정하지 않은 상태로, 미소변위 발생 상황을 적용하기 위해서 추가등방압( $\Delta p$ )을 가정하였다. Fig. 10에서는 미소변위 발생 case를 선정하기 위한 단계를 보여주고 있다. 굴착 및 라이닝 설치 단계에서 시공에 의한 변위를 발생시킨 이후에 등방압의 크기를 다양하게 적용시켜서 미소변위가 발생하는 결과를 차분진화 알고리즘에 적용하였다.

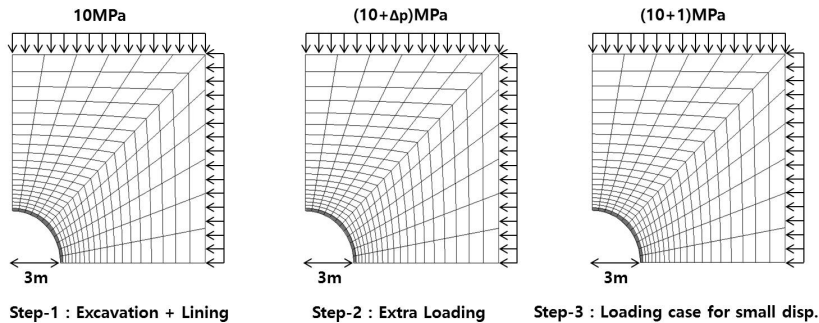


Fig. 10. Numerical analysis sequences of small displacement case

변위가 미소(微少)한 경우, 변위와 물성치(탄성계수)의 영향이 작아서 물성치가 변해도 변위는 민감하게 반응하지 않는 경향을 보였다. 다시 말하면, 변위의 차이는 아주 작기 때문에 수렴조건을 만족하지만, 물성치에 대한 목표 값(target value)는 정해를 벗어난 위치에서 값이 산정될 확률이 높은 것으로 나타났다. 구축된 알고리즘의 수렴에 대한 효율성의 표현을 증분으로 하는 것과, 오차율로 하는 것 중 어떤 방식이 수렴도 및 정확도를 표현할 수 있는지 검증을 통해서 후자로 결정해서 반영하였다. 오차율은 변위가 비율로 표현되기 때문에 변위의 절대 크기가 수렴효율성에 영향을 미치지 않았다. 증분으로 표현하면, 미소변위인 경우, 수렴효율성이 우수하다고 판단된다. 또한, 본 연구에서는 변위가 미소한 경우에 보완할 수 있는 방법으로 응력 계측값을 사용하였으므로, 적합도를 오차율로 정의하면 무차원값으로 정리되어 동일한 식으로 표현이 가능하다. 식 (5)와 식 (6)은 수정된 적합도 공식을 보여주고 있다.

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{dx_i - Dx_i}{dx_i} \right)^2 + \left( \frac{dy_i - Dy_i}{dy_i} \right)^2 + \left( \frac{dz_i - Dz_i}{dz_i} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

여기서,  $dx_i, dy_i, dz_i$  : FLAC3D 계산 변위

$Dx_i, Dy_i, Dz_i$  : 현장 i 측정 지점 계측 변위

$n$  : 측정 지점의 총 수



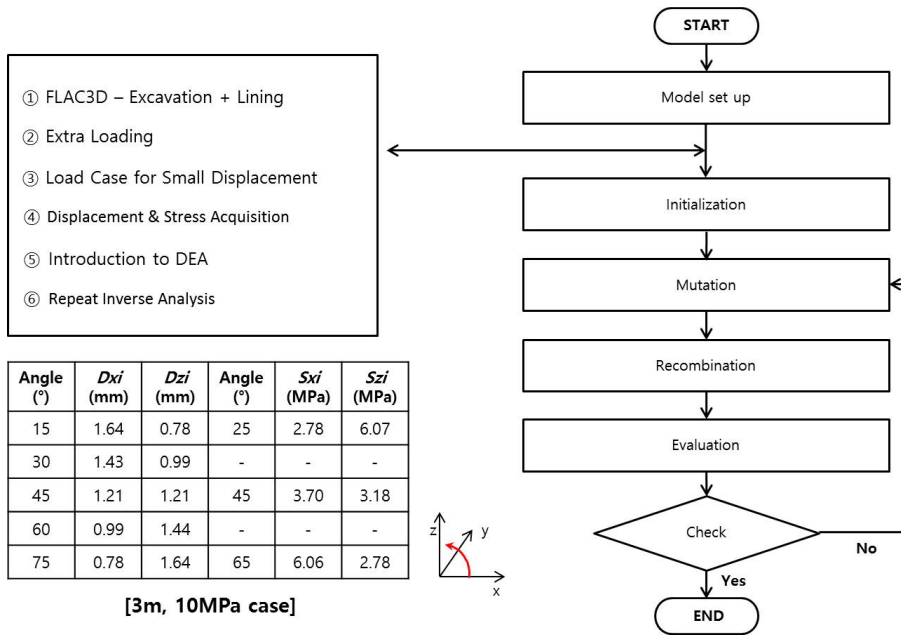


Fig. 11. Flowcharts of back analysis for initial input parameters (displacements and stresses)

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{sx_i - Sx_i}{sx_i} \right)^2 + \left( \frac{sy_i - Sy_i}{sy_i} \right)^2 + \left( \frac{sz_i - Sz_i}{sz_i} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

여기서,  $sx_i, sy_i, sz_i$  : FLAC3D 계산 응력  
 $Sx_i, Sy_i, Sz_i$  : 현장  $i$  측정 지점 계측 응력  
 $n$  : 측정 지점의 총 수

Fig. 11에서는 개발된 변위-응력 기반 차분진화 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 우선 FLAC3D를 사용해서 시행착오법을 통해 미소변위가 발생하는 상황을 모사하기 위해서 수치해석을 수행한다. 이후 정해석을 수행한 후, 결과로 산정된 변위 및 응력을 운영

중 계측된 변위 및 응력이라고 가정하고, 구축된 차분진화 알고리즘을 이용하여 계산된 변위 및 응력을 입력 물성치로 반영하여, 터널 역해석을 수행하였다.

### 5.1 미소변위 발생시 변위 기반 차분진화 알고리즘을 적용한 해석

미소변위 발생시 변위 기반 알고리즘으로 역해석을 수행해서 오차율을 분석한 결과를 Table 3에 정리하였다. 해석을 수행한 3가지 경우에서 평균 10.8% 정도의 오차율을 보였다. 미소변위 발생 시 역해석은 변위 값만을 사용해서는 해석의 신뢰도를 확보할 수 없는 것으로 판단된다.

Table 3. Results of displacement-based back analysis (during operation)

	$E$ (GPa)	Error (%) : $(I-B) \div B \times 100$ (%)	Conditions
Input (I)	2.1	-	(Radius, Pressure)
Output (B)	2.36	12.38	(3 m, 10 MPa + 1 MPa)
	2.29	9.05	(5 m, 10 MPa + 1 MPa)
	2.33	10.95	(5 m, 20 MPa + 1 MPa)

**Table 4.** Results of displacement-stress-based back analysis (during operation)

	$E$ (GPa)	Error (%) : $(I-B) \div B \times 100$ (%)	Conditions
Input (I)	2.1	-	(Radius, Pressure)
Output (B)	2.34	11.43	(3 m, 10 MPa + 1 MPa)
	2.20	4.76	(5 m, 10 MPa + 1 MPa)
	2.11	0.48	(5 m, 20 MPa + 1 MPa)

## 5.2 미소변위 발생시 변위-응력 기반 차분진화 알고리즘을 적용한 해석

5.1에서의 결과에 의해서, 변위 기반의 차분진화 알고리즘을 변위-응력 기반의 차분진화 알고리즘으로 확장해서 구축해서 수치해석을 수행하였다. 응력 계측값이 추가되어 알고리즘을 구축한 결과를 Table 4에 정리하였다. 미소변위 발생 시 변위값과 응력 계측값을 사용해서 알고리즘을 구축하여 운영 중 터널에 대한 안정성 검토를 수행한 결과, 오차율이 평균 5.5% 정도로 산정되었다. 변위 기반으로 계산한 결과보다 오차율이 평균 5.3% 정도 감소되었음을 확인할 수 있었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 고수압 초장대 해저터널의 운영중 안정성 평가 방법을 도출하기 위한 초기 연구로 역해석을 위한 차분진화 알고리즘의 구축 및 그 적용성을 확인하였다. 일반적으로 터널 역해석에 사용되고 있는 변위 기반의 알고리즘을 구축하여 적용성을 확인한 후, 변위-응력 기반의 알고리즘을 확장 구축하여 터널 역해석을 수행한 결과로 확인한 결론은 다음과 같다.

1. 차분진화 알고리즘의 터널역해석 적용을 위한 변위 기반의 알고리즘을 구축하여 수치해석을 통해서 확인한 결과, 역해석 결과값이 입력값에 근소한 것으로 판단되며, 구축된 알고리즘의 적용성을 확인하였다.
2. 변위가 미소(微小)한 경우, 변위와 물성치(탄성계

수)의 영향이 작아서 물성치가 변해도 변위는 민감하게 반응하지 않는 경향을 보였다. 적합도는 변위가 아주 작아도 %로 표현되는 오차율로 적용하였다. 변위가 미소한 경우에 보완할 수 있는 방법으로 응력 계측값을 사용하였고, 적합도를 오차율로 정의하면 무차원값으로 정리되어서 변위-응력 기반의 알고리즘 구축이 가능하였다.

3. 운영중 터널에서 획득할 수 있는 계측값 중에 변위 외에 응력 계측값을 추가하여 미소변위 상태에서 터널역해석의 안정성을 검토한 결과, 응력 계측값이 알고리즘에 반영되었을 경우가 반영하지 않았을 경우에 비해서 오차율이 감소하는 경향을 보였다. 변위기반의 역해석 알고리즘에서는 미소변위에 대한 역해석 결과의 신뢰성을 확보하기가 어려운 반면, 응력계측값을 역해석 관련인자로 추가한 알고리즘에 의한 해석 결과에서는 결과의 신뢰도가 올라간 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 터널 역해석 알고리즘의 적합성을 도출하기 위하여 운영 중 발생된 미소변위와 응력을 이용하였다. 단, 알고리즘의 적합성을 확인하기 위하여 가정된 물성치를 적용하였으며, 응력 측정이 가능한 경우에 적용이 가능한 한계점이 있다.

향후 연구에서는 응력계측값 이외에 수압계측값, 지반강성(열화)계측값 등을 추가한 알고리즘으로 운영 중 터널 역해석에 대한 적합성을 확인해 볼 예정이다. 또한, 미소변위 발생상황에 대한 수치해석적 모사를 추가등방압 적용이 아닌 터널 라이닝 열화를 고려한 해석을 수행할 예정이다. 그리고 실제 계측 자료를 통한 검증도 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2015년 건설기술연구사업의 ‘고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(13SCIP-B066321-01)’ 연구단 지원에 의해서 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

1. An, J.S., Lee, S.H., Lee, H.R., Song, K.I. (2015), “Application of differential evolution algorithm for tunnel back analysis: Feasibility study”, Korean Tunnelling and Underground Space Association. KTA 2015 Fall Symposium, pp. 157-158.
2. Hwang, H.S. (2002), “Function optimization and event clustering by adaptive differential evolution”, Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 12, No. 5, pp. 451-461.
3. Gioda, G., Sakurai, S. (1987), “Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in geomechanics”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 11, No. 6, pp. 555-583.
4. Hisataki, M., Ito, T. (1985), “Back analysis for tunnels by optimization method”, In International conference on numerical methods in geomechanics, pp. 1301-1307.
5. Itasca Consulting Group, Inc. (2012), FLAC3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Version 5.0. User Manual, Minnesota, USA.
6. Kim, M.K., Jang, J.B. (1995), “Back analysis of the measured displacements by the coupled method of finite elements – boundary elements in tunnel”, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 5, No. 3, pp. 205-213.
7. Kim, Y.J., Lee, Y.J. (2013), “Development of a back analysis program for reasonable derivation of tunnel design parameters”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 357-373.
8. Sakurai, S. (1997), “Lessons learned from field measurements in tunnelling”, Tunnelling and underground space technology, Vol. 12, No. 4, pp. 513-522.
9. Sakurai, S., Takeuchi, K. (1983), “Back analysis of measured displacements of tunnels”, Rock mechanics and rock engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 173-180.
10. Storn, R., Price, K. (1997), “Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces”, Journal of Global Optimization, Vol. 11, No. 4, pp. 341-359.
11. Su, G.S., Zhang, X.F., Chen, G.Q., Fu, X.Y.. (2008), “Identification of structure and parameters of rheological constitutive model for rocks using differential evolution algorithm”, Journal of Central South University of Technology, Vol. 15, Issue 1, pp. 25-28.
12. Vardakos, S., Gutierrez, M., Xia, C. (2012), “Parameter identification in numerical modeling of tunneling using the Differential Evolution Genetic Algorithm (DEGA)”, Tunnelling and underground space technology, Vol. 28, pp. 109-123.
13. Vesterstrøm, J., Thomsen, R. (2004), “A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems”, Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC '04), Vol. 2, pp. 1980-1987.
14. Yang, H.S., Jeon, Y.S. (2002), “Development of a back analysis program for rock tunnel using FLAC”, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 12, No. 1, pp. 37-42.
15. You, K.H., Kim, K.S. (2012), “A tunnel back analysis using artificial neural network technique and face mapping data”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 4, pp. 357-374.