

차분진화 알고리즘을 적용한 터널 지보패턴 최적화

강경남¹ · 안준상² · 김병찬³ · 송기일^{4*}

¹비회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정

²정회원, (주)베이스소프트 건설IT연구소 수석연구원

³정회원, (주)베이스소프트 건설IT연구소 연구소장

⁴정회원, 인하대학교 토목공학과 부교수

Optimization of tunnel support patterns using DEA

Kyung-Nam Kang¹ · Joon-Sang An² · Byung-Chan Kim³ · Ki-Il Song^{4*}

¹Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, INHA University

²Head Researcher Engineer, Construction IT Laboratory, BasisSoft, Inc

³Chief Engineer, Construction IT Laboratory, BasisSoft, Inc

⁴Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, INHA University

*Corresponding Author : Ki-Il Song, ksong@inha.ac.kr

Abstract

It is important to design tunnel support system considering the various loads acting on the tunnel because they have a direct impact on the stability of tunnels. In Korea, standardized support patterns are defined based on the rock mass classification system depending on the project, and it is stated that it should be modified appropriately considering the behavior of tunnel during construction. In this study, the tunnel support pattern optimization method is suggested based on the convergence-confinement method, earth pressure, axial force of rock bolt, and moment acting on the shotcrete. The length and spacing of the rock bolts and the thickness of the shotcrete were optimized by using the differential evolution algorithm (DEA) and the results were compared to the standard support pattern III for railway tunnel. Rock bolt length can be reduced and the installation interval can be widened for shallow tunnel. As the depth of tunnel increases, the thickness of shotcrete increases linearly. Therefore, the thickness of shotcrete should be thicker than the standard support pattern as the depth of tunnel increases to secure the stability of tunnel.

Keywords: Tunnel support pattern, Optimization, Differential evolution algorithm (DEA)

초 록

터널의 지보패턴 설계는 터널의 안정성에 직접적인 영향을 끼치기 때문에 터널에 작용하는 다양한 하중들을 적절히 고려하여야 한다. 국내에서는 프로젝트에 따라 암반분류

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(1)211-224(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.1.211>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 19, 2017

Revised January 2, 2018

Accepted January 8, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

법을 기반으로 표준 지보패턴을 정의하고 있으며, 시공 시 터널거동을 고려하여 적절히 수정되어야 한다고 기술되어 있다. 본 연구에서는 내공변위제어법, 토압, 록볼트의 축력 및 슛크리트의 모멘트 등을 종합적으로 고려하여 지보패턴을 최적화할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 차분진화알고리즘(DEA)을 적용하여 터널 심도에 따라 록볼트의 길이 및 간격, 슛크리트의 두께를 최적화하였으며, 도출된 결과를 철도터널의 표준지보패턴(3등급)과 비교하였다. 천층지반에서 록볼트의 길이는 표준지보패턴보다는 짧아질 수 있으며, 간격은 넓어질 수 있다. 터널의 심도가 깊어질수록 슛크리트의 두께는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 슛크리트의 두께는 심도가 깊어질수록 표준지보패턴보다는 두꺼워져야 터널의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

주요어: 지보패턴, 최적화, 차분진화 알고리즘

1. 서론

터널을 굴착하면 원 지반 응력이 재분배되어 3축응력상태에서 새로운 2축응력상태가 된다. 이 때, 소멸되는 응력 때문에 굴착면 주변의 변위가 굴착공동 내측으로 발생하게 되는데 이 변위를 제어하기 위하여 록볼트, 슛크리트, 강지보 등의 터널 지보재를 설치한다. 이러한 지보재는 터널의 안정성에 큰 영향을 미치기 때문에 적절한 지보재의 설계가 터널 설계자에게는 중요한 요소이다. 국토교통부 터널표준시방서(2015)에 따르면, 터널 지보재는 지반 분류에서 선정된 지반 등급에 따라 지보재와 지보패턴을 정하고, 시공 시에는 계측 결과에 따라 필요한 경우 실제 지반조건에 적합하게 변경해야 한다고 기술되어 있다. 현재 지보패턴은 기관 및 터널용도 등에 따라 다르게 정의되고 있으며, 일반적으로 암반 등급에 따라 지보패턴을 정하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 암반 분류에 의한 일률적 지보패턴 적용방식을 탈피하여 다양한 설계 안전율을 만족하는 보강재 배치, 보강재 길이 등을 최적화할 수 있는 기법을 제안하고자 하였다.

건설 분야에 관련된 최적 설계에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해서 진행되었다. Yin and Yang (2000)은 터널 지보 설계 시 보강재 최적 배치에 대한 연구를 수행하였다. 원 지반 응력 상태를 고려한 기하학적 최적화 방법을 사용하였으며, 이 연구를 통한 최적 설계 방법에 의해서 터널 변형의 50%를 감소시킬 수 있다고 제안하였다. Ryu et al. (2012)은 콘크리트 라이닝 최적화 설계에 관한 연구를 수행하였고, 이완하중에 대한 합리적인 산정방법을 제안하였다.

또한, 많은 연구자들에 의해서 최적화 알고리즘을 사용한 건설 분야 최적화 설계에 대한 연구가 진행되었다. Carbonell et al. (2011)은 3가지 휴리스틱 최적화 방법(multi-start global best descent local search, simulated annealing, meta-threshold acceptance)을 사용하여 도로 공사용 보강 콘크리트 최적 설계에 관한 연구를 수행하였고, multi-start global best descent local search 방법이 가장 효율성이 좋은 결과를 보였으며, 전통적인 설계 방법에 비해서 10%의 비용 절감이 가능하다고 제안하였다. Hong and Jeon (2005)은 터널 및 지하구조물 건설 시 필요한 지보 설계에 사용되는 지반조사 결과 중 암반 물성 정보가 부족한 경우에 대해서 이를 추계학적(stochastic)으로 예측하기 위한 연구를 수행하였고, 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 사용하여 최적화 과

정을 통해서 암반 물성을 획득하였다. Kim and Moon (2016)은 갱구사면 보강공법 중에 쓰일네일링 공법에 대한 데이터베이스를 구축한 후, FLAC3D 해석을 통한 안전율 기반의 최적보강배치 계획에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석 결과, 완전조합(Full combination, FC) 방식에 비해서 차분진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm, DEA) 기반의 최적화기법이 해석횟수가 8배 정도 감소하였다고 제안하였다.

본 연구에서는 터널 지보재 중에서 록볼트와 슛크리트의 최적 설계 기법을 구축하기 위해서 최적화 기법 중 하나인 차분진화 알고리즘(DEA)를 사용하였다. 알고리즘 구축은 FLAC3D 프로그램(Itasca, 2012)에 내장된 언어인 FISH를 사용하였고, 구축된 알고리즘을 통해 FLAC3D 수치해석을 수행하여 안정성을 확보하는 록볼트와 슛크리트의 최적 배치계획을 선정하도록 하였다.

최적화 문제 중 목적함수가 연속적이지 않고, 변수가 많은 경우, 유전자 알고리즘(GA)이 일반적으로 사용된다. 유전자 알고리즘은 세대가 지나면서 돌연변이(Mutation), 교배(Crossover), 선택(Selection)을 통하여 최적해에 수렴해가는 방법이다. 하지만 변수가 많아지면 해석시간이 증가한다. 이러한 한계를 개선한 많은 개량된 GA 방법들이 존재한다. 이런 이유로 본 연구에서는 수렴방향을 유도하는 과정이 단순하여 속도가 대폭 감소될 수 있는 DEA (Storn and Price, 1997)를 사용하여 최적화 알고리즘을 구축하였다.

2. 터널 지보 설계에 대한 고찰

2.1 터널 지보패턴

국내 터널지보패턴은 설계 기준별, 터널 용도별, 발주 기관 등 상황에 따라 다르게 적용되고 있는 실정이다. 여기서는 수치해석에 적용된 지보패턴의 사례 중 한 가지를 기술하였고, 본 연구에서 수행한 수치해석에서는 기술한 암반 및 지보재의 물성치 그리고 지보패턴을 동일하게 적용하였다.

Table 1. Support patterns (Park and Kang, 2010)

	Support patterns					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Excavation method	Full section	Full section	Full section	Upper and lower split	Upper and lower split	Upper and lower split
RMR	100~81	80~61	60~41	40~21	Below 20	Below 20
Q-system	More than 60	60~10	10~1	1~0.1	Below 0.1	Below 0.1
Upper excavation length (m)	3.5	2.5	2.0	1.5	1.2	1.0
Thickness of shotcrete (cm)	5 (general)	5 (steel fiber)	8 (steel fiber)	12 (steel fiber)	16 (steel fiber)	20 (steel fiber)
Length of rockbolt (m)	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Longitudinal interval of rockbolt (m)	Random	2.5	2.0	1.5	1.2	1.0
Transversal interval of rockbolt (m)	Random	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5

Table 2. Properties of rock mass (Park and Kang, 2010)

	Support patterns				
	P1	P2	P3	P4	P5
Unit weight (kN/m^3)	28	26	25	22	20
Deformation Modulus (MPa)	20,000	12,000	8,000	1,000	300
Cohesion (MPa)	5.0	2.0	0.8	0.15	0.03
Friction angle ($^\circ$)	47.0	42.0	38.0	34.0	31.0
Poisson's ratio	0.2	0.22	0.23	0.25	0.3

Table 3. Properties of supports (Park and Kang, 2010)

	Soft shotcrete	Hard shotcrete	Rock bolt
Unit weight (kN/m^3)	25	25	78.5
Elastic modulus (MPa)	5,000	15,000	200,000
Poisson's ratio	0.2	0.2	-
Specification	-	-	D25

Park and Kang (2010)은 시공과정 및 현장계측을 고려한 NATM 터널의 수치해석에 대한 연구를 수행하였고, 연구에 사용된 지보패턴 및 수치해석을 위한 물성치는 Table 1~3에서 보여주고 있다. 본 연구에서 가정한 지반은 3등급이다.

2.2 암반하중에 의한 안전율

식 (1)을 통해 RMR로부터 암반이완하중을 얻을 수 있다(Unal, 1983).

$$p_r = \frac{100 - RMR}{100} \times \gamma_t \times b \tag{1}$$

여기서, p_r : 암반하중(kN/m^3)

RMR: 암반등급 (Bieniawski, 1973)

γ_t : 단위중량(kN/m^3)

b : 터널 폭(m)

식 (1)은 암반분류법에 따른 산술적인 공식으로서, 터널 굴착면 주변의 초기응력상태 및 지반과 지보재의 상호작용을 고려할 수 없는 한계점을 내포하고 있지만, 경험적인 안전율 산정 시에 사용되고 있다. 식 (2)에서는 암반하중에 대한 설계안전율(FS_{design})을 보여주고 있다.

$$FS_{design}^{rock\ load} = \frac{p_r}{p_s} \geq FS_{allowable} \quad (2)$$

여기서, p_s : 설계지보압(kN/m^2)

$FS_{allowable}$: 허용안전율(1.5~3.0)

설계지보압(P_s)은 Carranza-Torres and Fairhurst (2000)가 제안한 공식으로 획득할 수 있으며, 슛크리트와 록볼트의 설계지보압을 합산하여 산출한다. 허용안전율은 터널구조물의 중요도에 따라서 다르게 적용할 수 있으며, 본 연구에서는 1.5를 적용하였다. Fig. 1에서는 슛크리트와 록볼트의 대표적인 단면을 보여주고 있다. 또한, 슛크리트 및 록볼트의 최대지보압(p_s^{max})은 식 (3)과 (4)로부터 획득할 수 있다.

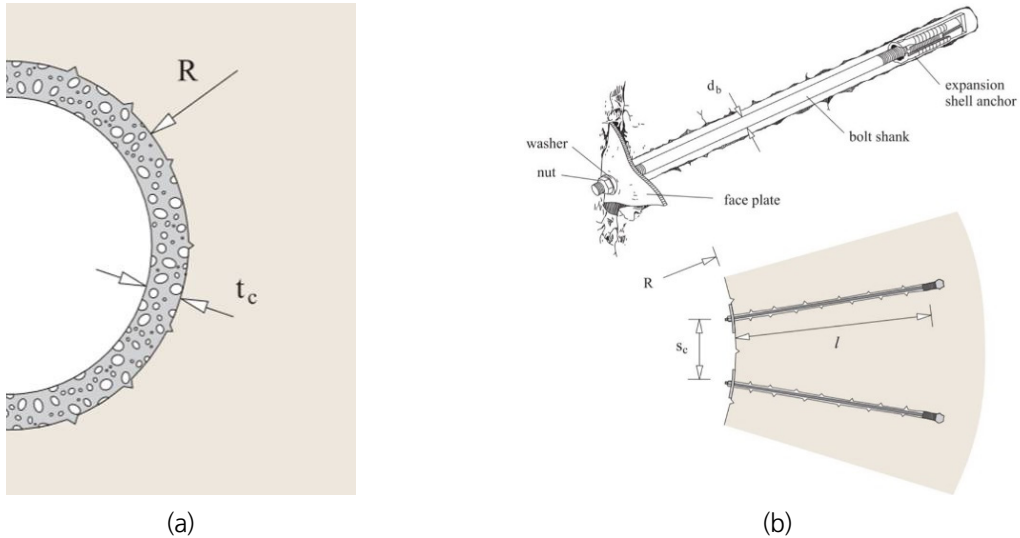


Fig. 1. Schematic representation of sections of shotcrete or concrete rings (a) and Representation of an ungrouted mechanical anchored bolt (b) (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000)

$$p_{shotcrete}^{max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[1 - \frac{(R - t_c)^2}{R^2} \right] \quad (3)$$

여기서, σ_{cc} : 슛크리트 일축압축강도(MPa)

t_c : 슛크리트 두께(m)

R: 터널반경(m)

$$p_{s_{rockbolt}}^{\max} = \frac{T_{bf}}{s_c s_l} \tag{4}$$

여기서, T_{bf} : 극한 인발하중(MN)

s_c : 횡방향 록볼트 간격(m)

s_l : 종방향 록볼트 간격(m)

2.3 내공변위제어법에 의한 안전율

내공변위제어법(convergence-confinement method, CCM)은 터널 굴진면 후방에서 지보재 설치 후에 발생하는 변위를 제어함으로써 터널 안정을 도모하는 방법을 말한다. 내공변위제어법은 터널 거동을 종단변형곡선(longitudinal deformation profile, LDP), 지반반응곡선(ground reaction curve, GRC), 지보재 특성곡선(support characteristic curve, SCC)으로 표현할 수 있다. Fig. 2는 Carranza-Torres and Fairhurst (2000)에 의해서 제안된 내공변위제어법을 설명하고 있다.

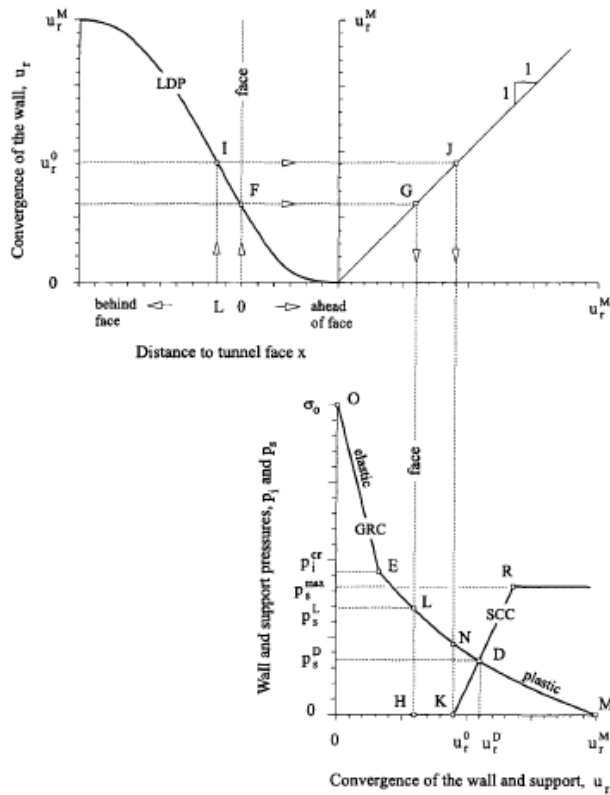


Fig. 2. Schematic representation of the convergence-confinement method (Carranza-Torres and Fairhurst, 2000)

LDP는 지보재가 설치되지 않았다는 가정 하에 터널 굴진면에서 종방향으로 굴진면 전, 후의 내공변위를 표현하고, GRC는 터널 내압(p_i)이 초기응력(σ_0)에서부터 감소됨에 따라서 내공변위가 증가됨을 보여주고 있다. 또한, SCC는 터널의 내공변위가 증가됨에 따라 지보재에 작용되는 지보압(p_s)의 증가됨을 나타내고 있다. 이러한 내공변위제어법은 $K = 1.0$ 인 원형터널 조건에서 제한적으로 적용되어왔다.

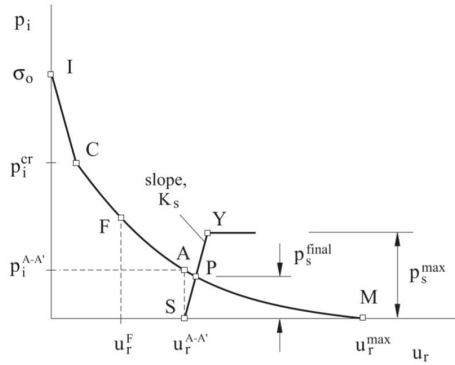


Fig. 3. Schematic representation of Ground Reaction Curve (GRC) and Support Characteristic Curve (SCC) for Factor of Safety (p_s^{max}/p_s^{final})

Fig. 3은 GRC와 SCC를 이용한 p_s^{max} 와 p_s^{final} 을 산정하는 방법을 보여주고 있다. 식 (5)로부터 지보재가 설치된 터널의 안전율을 내공변위제어법 기반으로 계산할 수 있다.

$$FS_{design}^{CCM} = \frac{p_s^{max}}{p_s^{final}} \geq FS_{allowable} \quad (5)$$

여기서, p_s^{max} : 최대지보압(kN/m^2)

p_s^{final} : 최종지보압(kN/m^2)

$FS_{allowable}$: 허용안전율(1.5~3.0)

2.4 수치해석에 의한 안전율

현재, 터널 설계 시 일반적으로 사용되고 있는 전산 프로그램을 이용한 수치해석의 결과로도 지보재의 안전율을 산정할 수 있다. 본 연구에는 터널 지보재 중에 록볼트 축력 및 숏크리트 모멘트에 대한 안전율에 대해서 연구를 수행하였다. 한국철도시설공단의 철도설계지침 및 편람(KR, 2012), [KR CODE 2012]의 터널지보재(KR C-12030) 편에 따르면, 록볼트용 이형봉강 내력표가 기술되어 있다. SD350 (D25)의 축방향 허용응력은 175 MPa, 항복강도는 350 MPa로 정의되어 있다. KR 설계기준에서는 축응력에 대한 허용안전율은 2.0을 적용하고 있다.

$$\sigma_{axial_{max}} = \frac{N_{cal_{max}}}{A_{bolt}} \quad (6)$$

$$FS_{axial} = \frac{\sigma_{allowable\ axial}}{\sigma_{axial_{max}}} \quad (7)$$

수치해석을 통해서 계산된 최대축력($N_{cal_{max}}$)과 록볼트 단면적(A_{bolt})으로부터 발생한 최대축응력($\sigma_{axial_{max}}$)은 식(6)과 같이 계산할 수 있으며, 록볼트 축응력에 대한 안전율은 식(7)과 같이 구할 수 있다. [KR CODE 2012]의 터널지보재(KR C-12030) 편에 따르면, 강섬유 보강 슛크리트의 휨강도는 4.5 MPa 이상으로 정의되어 있다.

$$\sigma_{bending_{max}} = \frac{M_{max}}{Z_{shotcrete}} \quad (8)$$

$$FS_{bending} = \frac{4.5MPa}{\sigma_{bending_{max}}} \quad (9)$$

수치해석을 통해서 계산된 최대모멘트(M_{max})와 슛크리트 단면계수($Z_{shotcrete}$)로부터 발생한 최대 휨응력($\sigma_{bending_{max}}$)은 식(8)과 같이 계산할 수 있다. 또한, 슛크리트 휨응력에 대한 안전율은 식(9)과 같이 구할 수 있다. 설계 안전율은 설계표준이나 시설물의 중요도에 따라 다를 수 있으나, 본 연구에서는 슛크리트에 대한 설계 안전율은 1.0으로 가정하였다.

3. 차분진화알고리즘(Differential Evolution Algorithm, DEA)

차분진화알고리즘은 최적화 문제 중 목적함수가 연속적이지 않고, 변수가 많은 경우에 적용할 수 있는 알고리즘이다. 차분진화알고리즘은 세대가 지나면서 돌연변이(Mutation), 교배(Crossover), 선택(Selection)을 통하여 최적해에 수렴해가는 진화 알고리즘이며, 특히 다변수 최적화 문제에서 수렴방향을 유도하는 과정이 단순하여 최적화 속도를 대폭 감소시킬 수 있는 최적화 알고리즘이다.

Fig. 4는 돌연변이 벡터 생성 과정을 보여주고 있다. 변화 대상 벡터 $X_G = [x_{1,G}, x_{2,G}, \dots, x_{NP,G}]$ 에 대해 집단에서 무작위로 서로 다른 3개의 벡터를 선택하고, 그로부터 교배용 벡터($\nu_{i,G+1}$)를 식(10)과 같이 생성한다. 여기서, NP는 집단의 크기(Number of Population)이며, F는 돌연변이 상수로 0~2 사이의 값을 갖는다.

$$\nu_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (10)$$

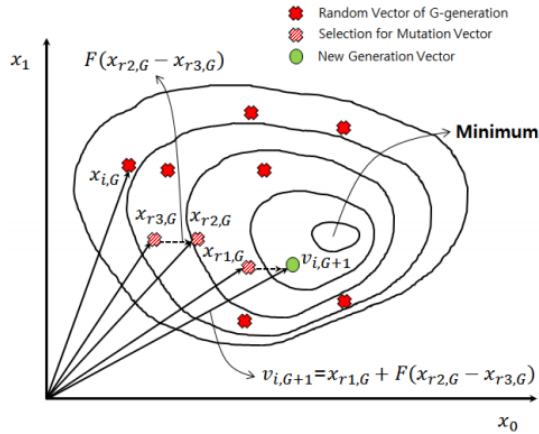


Fig. 4. The procedure of differential evolution algorithm in 2D space (Storn and Price, 1997)

식 (11)은 교배 단계에 대한 내용이다. 시행 벡터(trial vector)를 생성하기 위하여 부모 벡터(parent vector)는 돌연변이 벡터(mutant vector)와 교배 된다. 여기서 $rand$ 는 변화에 사용될 벡터가 무작위로 선택됨을 의미하며, CR은 교배 상수로 0~1 사이의 값을 갖는다. I_{rand} 는 $[1, 2, \dots, D]$ 의 무작위 정수이다.

$$v_{ji, G+1} = \begin{cases} v_{ji, G+1} & \text{if } rand_j \leq CR \text{ or } j = I_{rand} \\ v_{ji, G} & \text{if } rand_j > CR \text{ or } j \neq I_{rand} \end{cases} \quad (11)$$

식 (12)는 선택 단계에 대한 내용이다. 목표 벡터(target vector, $x_{i, G+1}$)는 시행 벡터($u_{i, G+1}$)와 적합도를 통하여 비교된다. 그리고 다음 세대에는 적합도가 우수한 형질의 개체가 선택된다. 그러므로 각각의 시행 벡터는 부모 벡터와의 비교를 통해 다음 세대에는 우수한 유전 형질을 전달하게 된다.

$$x_{i, G+1} = \begin{cases} u_{i, G+1} & \text{if } f(u_{i, G+1}) \leq f(x_{i, G}) \\ x_{i, G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

이러한 과정을 거쳐 모집단에서 최고 우수한 개체들은 다음 세대에도 유지되며, 지정된 종료 기준에 도달할 때까지 반복 수행된다.

4. 수치해석

터널지보패턴 최적화를 위한 수치해석 알고리즘은 Fig. 5와 같은 순서로 진행된다. 지반, 록볼트 및 슛크리트 등의 물성치, DEA의 변수를 정의한 후, 터널 보강에 필요한 보강재의 설계조건을 설정하여 모델링한다. 본 연구에서 사용한 설계정보는 Table 4에 정리하였다.

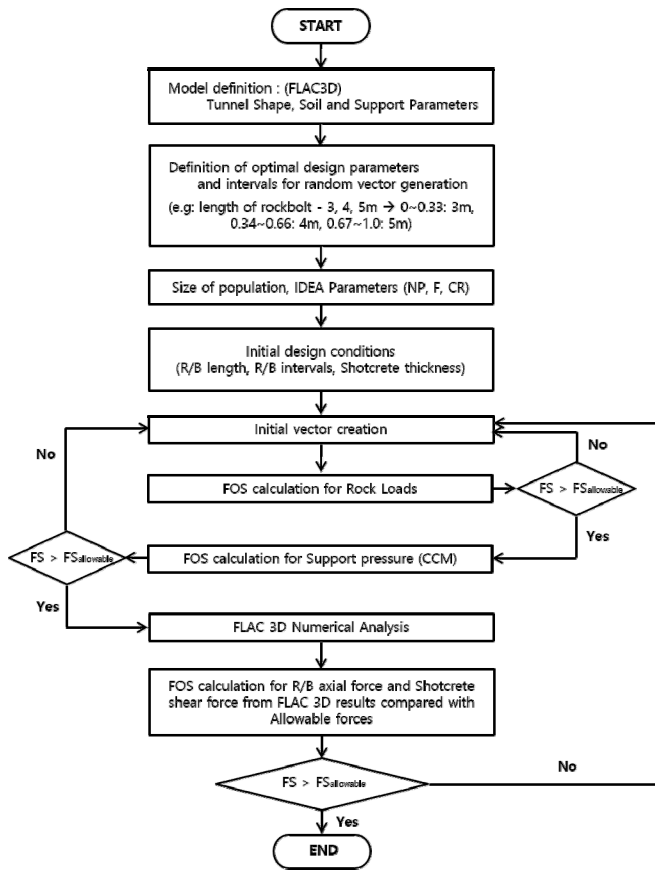


Fig. 5. Flowchart of DEA-based numerical analysis for optimal tunnel support design

Table 4. Conditions of design variables for tunnel reinforcement optimization

Support type			Conditions
Rock bolt	Length (m)		3.0, 4.0, 5.0
	Spacing (m)	Longitudinal	1.0, 2.0, 3.0
		Transversal	1.0, 2.0, 3.0
Shotcrete	Thickness (cm)		5, 10, 15, 20

DEA에서 사용하는 초기 벡터를 랜덤으로 0~1 범위 내에서 생성하고, 암반하중에 의한 안전율, 내공변위제어법에 의한 안전율 및 수치해석 결과로부터 각 지보재의 안전율을 계산한다. 본 연구에서는 암반하중에 의한 안전율, 내공변위제어법에 의한 안전율, 록볼트의 축응력에 대한 안전율 및 슛크리트의 휨응력에 대한 안전율은 각각 1.5, 1.5, 2.0, 1.0을 적용하여, 모두 만족하는 조건으로 탐색을 수행하였다. 안전율을 만족하지 못할 경우 초기 벡터를 교배, 돌연변이 과정을 거쳐 다음 세대에서 안전율을 다시 계산한다. 각 방법의 안전율을 모두 만족할 때까지 이 과정을 반복한다.

해석에 사용된 터널 형상은 DEA의 최적화 문제 적용성 파악에 대한 초기 연구이기 때문에, 최대한 단순한 형태인 직경 8 m의 원형터널로 가정하여 사용하였다. 또한, 시공 단계에 대한 정의도 동일한 이유를 적용하여, Fig. 6(b)와 같이 10 m 선형 굴착이 완료된 위치에서 시공이 진행되는 것으로 가정하여 사용하였다. 굴진면 후방은 지반보강이 완료된 상태로 가정하였다. 또한 굴진면으로부터 1회 굴착이 진행되는 상황만 고려하였고, 록볼트의 설치 위치는 굴진장의 중앙에서 설치하도록 구성하였다.

해석에 사용된 임반 및 DEA 물성치는 Table 5와 같다. 지보패턴 3에 대하여 수치해석을 수행하였다. 지층조건은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였고, 탄성계수(E)는 8 GPa, 단위중량(γ_t)은 25 kN/m^3 , 포아송비(ν)는 0.23, 점착력(c)은 0.8 MPa, 내부마찰각(ϕ)은 38° , K_0 는 1.0을 적용하였다. DEA에 적용한 파라미터는 해석 수렴결과에 따라 가변적으로 적용하였다. 개체수(NP)는 10~50, 돌연변이상수(F)는 0~2, 교배상수(CR)은 0~1, 최대 반복 횟수(Itermax)는 10~100의 범위로 적용하였다.

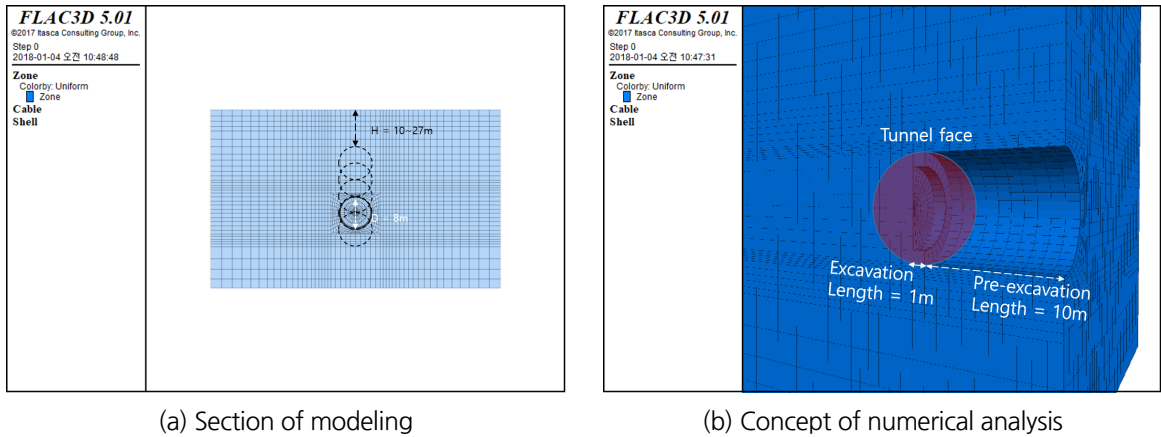


Fig. 6. Numerical model for optimization of tunnel support

Table 5. Rock mass and DEA parameters used in the feasibility numerical analysis

	P3	DEA	
E (elastic modulus)	8 GPa	Condition of support pattern Please refer Table 1 and 2	
γ_t (unit weight)	25 kN/m^3		
c (cohesion)	0.8 MPa		
ϕ (friction angle)	38°		
ν (poisson's ratio)	0.23	F (mutant constant)	0.8~1.0 (0~2)
K (bulk modulus)	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	CR (crossover constant)	0.8 (0~1)
G (shear modulus)	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	NP (number of population)	10~50
Model/Analysis type	Mohr-Coulomb	Itermax (max iteration)	10~100

5. 해석결과

FLAC3D에 내장된 FISH언어를 이용하여 Table 5의 조건으로 심도 변화(10, 15, 23, 25, 27)에 따른 지보패턴 변화에 대해서 해석한 결과를 Table 6에 나타내었다. 탐색 조건으로는 각 안전율 기준보다 안전율이 크면서, 록볼트의 개수와 슛크리트의 두께가 최소인 조건을 찾는 것으로 하였다.

Table 6. Optimized tunnel support system depending on the depth of tunnel

Depth of tunnel (m)		10	15	23	25	27	Standard
Rock bolt	Length (m)	3	3	3	4	4	4
	Longitudinal (m)	3	3	3	3	3	2
	Transversal (m)	3	3	3	2	2	2
Shotcrete	Thickness (cm)	5	8	10	10	15	8
Factor of safety	Rock load ($FS_{design}^{rockload}$)	2.72	5.99	7.46	7.51	11.09	1.5
	CCM (FS_{design}^{CCM})	1.89	2.00	1.62	1.50	2.05	1.5
	Axial force (FS_{axial})	38.21	38.21	25.14	15.63	18.25	2.0
	Bending moment ($FS_{bending}$)	1.41	1.34	1.78	2.06	1.85	1.0

Fig. 7은 최적화 알고리즘으로부터 획득한 터널 심도에 따른 록볼트의 길이 및 설치 간격의 변화를 나타낸 그래프이다. 본 연구에서 적용한 3등급 암반의 경우, 터널의 심도가 낮은 경우는 표준 지보패턴보다 더 짧은 록볼트도 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단할 수 있으며, 록볼트의 종방향 간격도 넓어질 수 있음을 나타낸다. 하지만, 심도가 20 m 이상으로 깊어지는 경우에는 기존의 표준지보패턴이 적용될 수 있을 것이다. 심도 30 m 이상의 대심도의 터널에 대해서는 최적화를 통해 합리적인 록볼트의 지보패턴을 도출해야할 것이다.

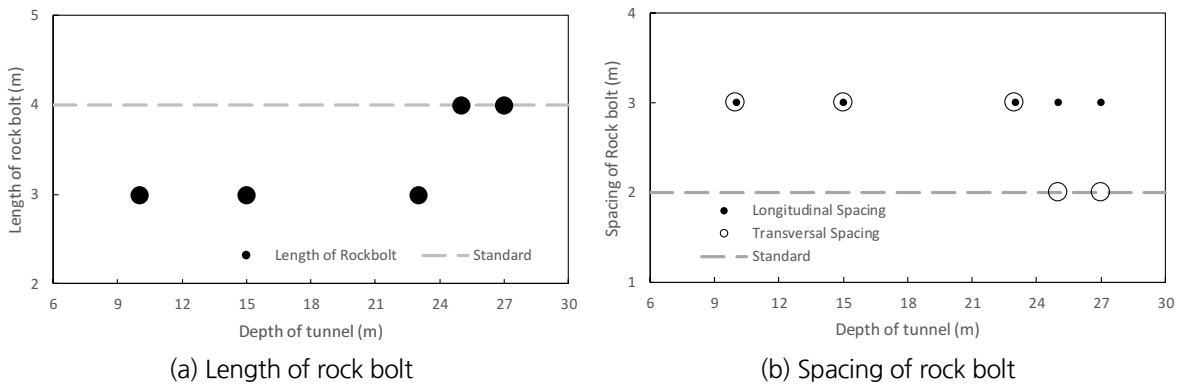


Fig. 7. The variation of rock bolt length and spacing depending on the tunnel depth

Fig. 8은 최적화 알고리즘으로부터 획득한 3등급의 지반에서 터널 심도에 따른 슛크리트의 두께를 나타내고 있다. 심도가 깊어질수록 슛크리트의 두께는 선형적으로 증가되는 것으로 나타난다. 기존의 3등급 표준지보패턴의 경우 심도가 15 m 내외의 터널에서 적용가능하지만 터널의 심도가 깊어진다면 보다 두꺼운 슛크리트가 필요함을 알 수 있다.

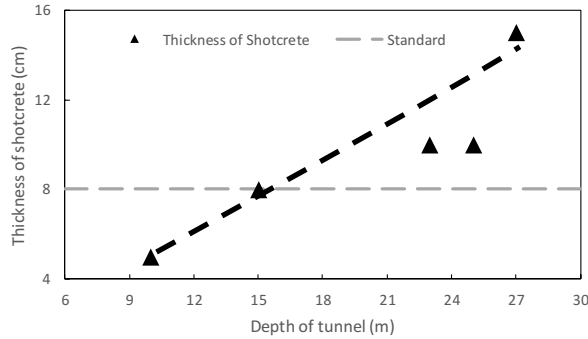


Fig. 8. Change of shotcrete thickness depending on the tunnel depth

6. 결론

본 연구에서는 최적화 기법을 적용한 터널의 지보패턴 설계를 위한 초기연구로서, 터널 심도가 지보패턴 설계에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. FLAC3D를 이용하여 터널 및 지반을 모델링하고, 차분진화 알고리즘을 이용하여 지보재의 안정성을 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

터널 지보패턴의 설계를 위해 암반하중에 의한 안전율, 내공변위제어법 기반의 최대지보압과 최종지보압에 대한 안전율, 록볼트의 축응력에 대한 안전율, 슛크리트의 모멘트에 대한 안전율 등을 종합적으로 고려하여 터널의 안정성을 확보하면서 지보량을 최소화 할 수 있는 최적화 알고리즘을 구축하였다.

구축된 최적화 알고리즘의 적용성을 분석하기 위하여 3등급 지반에서 터널의 심도에 따른 최적 지보패턴을 도출하였고, 표준지보패턴과 비교 분석을 수행하였다.

터널의 심도가 얇은 경우, 표준지보패턴의 슛크리트 두께보다는 얇아질 수 있으며, 록볼트의 길이는 짧아질 수 있으며, 종방향 및 횡방향 설치 간격도 넓어질 수 있어 본 연구에서 제안한 지보패턴의 최적화를 통해 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

표준지보패턴은 암반분류법을 기반으로 암반의 등급에 따라 일률적으로 정해지고 있다. 하지만 터널 심도 등 안정성에 미치는 다양한 영향에 대한 고려가 지보패턴 결정시 요구되며, 이는 터널 설계 시 경험식, 이론식 및 수치해석적 분석이 종합적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다. 더불어, 본 연구에서 제시한 최적화 알고리즘과의 결합을 통해 보다 효과적으로 지보패턴 설계가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Bieniawski, Z. T.(1973), “Engineering classification of jointed rock masses”, *Civil Engineer in South Africa*, Vol. 15, No. 12, pp. 343-353.
2. Carbonell, A., Fernando, G.V., Víctor, Y. (2011), “Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization”, *Advances in Engineering Software*, Vol. 42, No. 4, pp. 151-159.
3. Carranza-Torres, C., Fairhurst, C. (2000), “Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No. 2, pp. 187-213.
4. Hong, C.W., Jeon, S.W. (2005), “Optimal estimation of rock mass properties using genetic algorithm”, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 15, No. 2, pp. 129-136.
5. Kim, B.C., Moon, H.K. (2016), “A study on the optimization technique for the plan of slope reinforcement arrangement of soil-nailing in tunnel portal area”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 6, pp. 569-579.
6. KR (2012), “Tunnel support, KR C-12030”, KR (Korea Rail Network Authority). (in Korean)
7. MOLIT (2015), “Tunnel standard specification”, MOLIT (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (in Korean)
8. Park, C.S., Kang, M.H. (2010), “A study on the numerical analysis of a NATM tunnel with consideration of construction procedure and field measurement”, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 20, No. 1, pp. 28-38.
9. Ryu, D.H., Kim, S.C., Lee, C.J., Park, J.Y., Lim, J.G., Moon, J.W. (2012), “A study on the application based on the equations of loosening loads for the optimized design of concrete lining”, *Korean Society for Railway*, pp.7-18.
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. Unal, E. (1986), “Empirical approach to calculate rock loads in coal mine roadways”, *Proceedings of the 5th Annual Conference on Ground Control in Mining*, WV University, pp. 234-241.
12. Yin, L., Yang, W. (2000), “Topology optimization for tunnel support in layered geological structures”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 47, No. 12, pp. 1983-1996.