

지반 및 라이닝 열화 계측 정보를 반영한 해저 터널의 안정성 평가

안준상¹ · 김병찬² · 문현구³ · 송기일^{4*}

¹비회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정

²비회원, 한양대학교 자원환경공학과 박사과정

³비회원, 한양대학교 자원환경공학과 교수

⁴정회원, 인하대학교 토목공학과 부교수

Estimation of subsea tunnel stability considering ground and lining stiffness degradation measurements

Joon-Sang An¹, Byung-Chan Kim², Hyun-Koo Moon³, Ki-II Song^{4*}

¹Korea, INHA University, Graduate student, Dept. of Civil Engineering

²Korea, HANYANG University, Graduate student, Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering

³Korea, HANYANG University, Professor, Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering

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

ABSTRACT: Efficiency for estimation of subsea tunnel safety can be increased through reflecting back analysis algorithm to displacement measurements besides other measurement information such as stress, water pressure and ground stiffness degradation. In this study, the finite difference code FLAC3D built-in FISH language is used. In addition, the stability of the 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, water pressure measurements, tunnel lining degradation measurements and ground stiffness degradation measurements. By using additional measurement information to assess the stability of subsea tunnel, it was confirmed that the error rate is reduced to the tunnel back analysis.

Keywords: Stiffness degradation (Ground, Lining), Differential evolution algorithm (DEA), Subsea tunnel

초 록: 해저 터널의 안정성 평가는 계측 범위 이외에도 응력, 수압 그리고 지반강성(열화) 등 다른 계측 정보를 사용해서 역해석 알고리즘에 반영하면, 그 효율성이 증대될 수 있다. 본 연구에서는 FLAC3D 프로그램에 내장된 FISH 언어를 사용해서, 기 구축된 변위-응력 기반의 차분진화 알고리즘을 수정 및 확장하였다. 확장된 차분진화 알고리즘에는 변위, 응력 정보 외에도 수압 및 지반 및 라이닝 열화 정보도 입력 인자로 사용되었다. 해저 터널 안정성 평가에 추가적인 계측 정보를 활용하면, 터널 역해석에 대한 오차율이 감소함을 확인할 수 있었다.

주요어: 강성 열화(지반, 라이닝), 차분진화 알고리즘(DEA), 해저 터널

1. 서론

운영 중 터널의 안정성 평가는 일반적으로 터널 역해석에 사용되고 있는 변위 기반의 알고리즘을 적용하면 한계가 있다. 운영 중 터널에서 발생하는 내공변위는

미소(微小)하기 때문에, 역해석 입력인자로 단독으로 사용하기에는 무리가 있다(An et al., 2016). 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 계측 값을 역해석 알고리즘에 반영하여 적용성을 파악해보고자 한다.

*Corresponding author: Ki-II Song

E-mail: ksong@inha.ac.kr

Received August 12, 2016; Revised August 30, 2016;

Accepted September 2, 2016

많은 연구자들에 의해서 다양한 터널 역해석에 관한 연구가 수행되었다. Su et al. (2008)은 차분진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)을 사용해서 터널 역해석 알고리즘을 구축하였고, FLAC3D 프로그램에 내장된 FISH언어를 사용하여 구축된 알고리즘을 검증하였다. Lee and Akutagawa (2009)는 NATM 터널의 변위 계측결과를 통한 역해석에 대한 연구를 수행하였다. ANN (Artificial Neural Network) 기법을 사용하여 역해석 알고리즘을 구축하였고, 이 연구를 통해서 터널 시공 전 부족한 정보로도 시공 완료 시 터널의 변형 정보를 예측 가능한 방법을 제안하였다. Vardakos et al. (2012)은 차분진화 알고리즘과 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 상대적으로 변위가 크게 발생하는 상황에 대한 연구이다. 운영 중 실드 터널의 경우에는 상대적으로 미소변위가 발생하는 상황이므로, 안정성 평가를 하기 위해서는 변위 기반의 역해석 기법만으로 평가하기에는 한계가 있다.

최근 해저터널의 특성을 고려한 계측 및 해저터널 주변 지반의 보강지반에 대한 연구도 활발하다. Park et al. (2013)은 해저터널은 육상의 지하구조물과 달리 시공 및 운영 중의 안전성을 확보하기 위해서는 기존 육상터널에 적용된 응력 및 변위 계측 이외에도 해저터널의 특성을 고려한 계측이 필수적으로 요구된다고 주장하였으며, 국부적으로 발생하는 해저터널 주변 암석과 지보재의 파괴를 파악할 수 있는 미소파괴음(Acoustic Emission) 및 미소지진음(Micro Seismic event) 계측을 연구하였다. Kim et al. (2016)은 해저터널 시공 중 단층, 파쇄대 및 미고결층 등의 취약구간에 대한 그라우팅 시공 시에 보강 지반의 강성 열화 특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 그라우팅 보강암반에 대한 보강 정도를 탄성과 속도를 통해서 추론하였다.

Sandrone and Labiouse (2010)는 Creep model을 사용하여 Rock mass와 라이닝의 역학적 물성치의 열화(Degradation)를 모사하여 지반 및 라이닝 강성에 대한 열화 정도에 따른 범위를 제시하였다. Han and Jeong (2014)은 각종 문헌조사 및 사례조사를 통해서 비교 분석 후, 터널 열화 특성을 반영한 수치해석을 수행하였고, 터널 공용 후 열화 특성에 대한 결과를 바탕으로 설계에 반영할 수 있는 정량적인 예측 기법을 제안하였다.

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. 일반적으로 운영 중 터널에서는 변위 계측 값은 상대적으로 쉽게 획득할 수 있는 반면에, 응력 계측값, 지반 및 라이닝 강성(열화) 계측값은 특별한 경우에만 얻을 수 있는 한계가 있다. 하지만, 해저터널의 운영 중 계측의 필요성에 대한 연구(Park et al., 2013; Kim et al., 2016)에 의하면, 특별한 상황에서 계측 값을 획득할 수 있기 때문에, 터널 시공 중 직면할 수 있는 보강이 필요한 지반을 대상으로 계측이 가능한 경우에는 본 연구에서 제시하는 방법이 적용 가능할 것으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 운영 중 터널의 안정성 평가에 대한 오차율을 감소시키기 위해서 선행 연구에서 구축된 변위-응력 기반의 운영 중 터널의 안정성 평가 알고리즘을 수정 및 확장하여 변위-응력-강성열화(지반-라이닝) 기반의 차분진화 알고리즘(Differential Evolution Algorithm)을 FLAC3D 프로그램(Itasca, 2012)에 내장된 FISH언어를 사용해서 구축하고, 적용성을 확인하고자 한다.

2. 터널 주변 지반 및 라이닝 강성 열화 특성

2.1 열화에 따른 하중 전이

Sandrone and Labiouse (2010)는 터널 구조물의

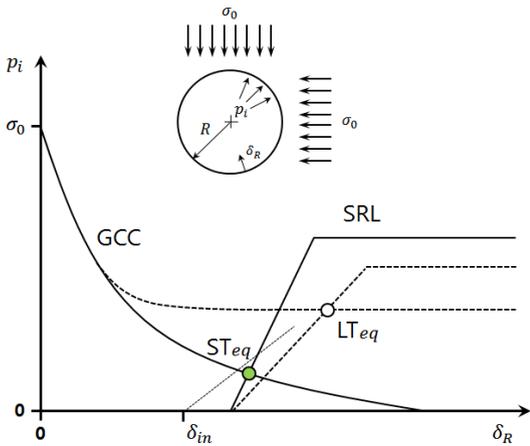


Fig. 1. Ground characteristic curve (GCC) and support reaction line (SRL) in a convergence-confinement method (CCM) graphical representation (Sandrone and Labiouse, 2010)

열화(degradation)에 따른 하중 전이의 개념으로 Fig. 1과 같은 개념도를 제안하였다. Fig. 1에서는 터널 구조물을 구성하는 요소인 터널 주변 지반, 숏크리트(shotcrete) 및 콘크리트 라이닝의 열화가 진행함에 따라 주변 지반의 거동 및 지보공에 작용하는 하중을 내공변위제어법(Convergence-Confinement Method, CCM)의 형식으로 지반특성곡선(Ground Characteristic Curve, GCC)과 지보반응선(Support Reaction Line, SRL)으로 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 공용 후 초기 상태에 대한 평형점(The equilibrium point for short-term conditions, ST_{eq})에서 시간이 경과함에 따라 터널 주변 지반 및 지보공에 열화가 발생해서 변위(δ_R)가 증가하며, 지보공이 받는 하중(p_i)이 증가해서 장기 하중 단계의 평형점(The equilibrium point for long-term conditions, LT_{eq})으로 하중 전이가 발생하는 상황을 보여주고 있다.

2.2 터널 주변 지반 및 콘크리트 라이닝의 열화

장기적으로 터널 운영 중에 발생하는 터널구조물의 열화 현상에 대한 원인은 물리적, 화학적 및 기타 요인으로 구분할 수 있다(Sandrone and Labiouse,

2010; Han and Jeong, 2014). 물리적 요인은 ageing 또는 creep 효과와 같이 시간이 경과함에 따라 특성의 변화가 발생하는 현상이며, 강성의 저하 또는 변형률의 증가를 발생시킨다. 화학적 요인은 풍화, 지하수 및 대기 오염 등에 따른 화학적 변화에 기인한 강도 및 역학적 특성을 감소시킨다. 기타 요인으로는 터널 구조물 주변 지반의 온도 상승 및 동결 그리고 화재 등이 포함된다. 여기서는 터널 주변 지반 및 라이닝의 강성(Stiffness), 주변 지반의 강도정수(점착력, 내부 마찰각)의 열화에 대한 내용을 언급하기로 한다. 지하수가 침투하면 터널이 지반 전체의 배수통로가 되어 주변 지반에 열화가 발생한다고 규정하고 있다(Deutsche Bahn AG, 2007). 따라서 터널 주변 지반의 열화는 터널 굴착으로 인하여 주변지반에 이완(소성)영역이 발생하고 장기적으로 지하수로 인한 유동 현상 및 화학적 침투 등 환경적인 여건에 따라 주변 지반의 역학적 특성의 변화와 강도 저하(degradation)가 발생하여 점진적으로 터널에 추가 변위가 진행된다. 콘크리트 라이닝의 경우는 일반 콘크리트 구조물과 같이 노출면이나 지하수면 하에서 열화가 진행되며 균열부를 통하여 열화가 확장된다. 일반적으로 콘크리트의 특성상 터널 운영 초기에는 강도가 증가하게 되나 장기적으로는 열화로 인한 노후화가 빠르게 진행된다. 지역에 따라 각각 다양한 열화 요인이 있으며, 주로 지하수의 영향이 주된 원인이라 할 수 있다(Han and Jeong, 2014).

본 연구에서는 추가적인 계측 정보를 사용해서 수치해석(역해석)의 입력 값으로 활용하였다. 추가적인 계측 정보의 대상은 시간 경과에 따른 터널 콘크리트 라이닝의 강성(Stiffness) 변화, 보강지반(터널 주변 지반)의 강성 변화 및 강도정수($c(t)$, $\phi(t)$)의 변화이고, 이를 위해서 이러한 항목의 열화 특성에 대한 문헌조사를 실시하였다. 터널 주변 지반에 대한 시간 경과에 따른 변형계수($E(t)$)의 열화 정도는 초기 값 대비해서 50% 이상의 열화를 보이는 것도 있었다(Ladanyi, 1974; Lenz et al., 2010; Marcher, 2011; Han and Jeong, 2014). Han and Jeong (2014)은 이러한

다양한 연구 결과를 비교하고 평균적인 열화 범위 값을 제시하였다. 시간 경과 대상은 터널 공용 후 100년 기준으로 산정된 값이고, 제안 식에 의한 예측 값 및 실측 자료를 통한 값의 오차 범위가 크기 때문에, 본 연구에서는 터널 주변 지반의 변형계수에 대한 열화 범위를 초기 값 대비 평균값 정도인 5~30%로 결정하여 반영하였다. 또한, 시간 경과에 따른 콘크리트 라이닝의 변형계수(탄성계수, $E_L(t)$)의 열화 정도는 초기 값 대비해서 100년 기준으로 20% 정도의 열화를 보이는 것으로 조사되었다(Yokozeki, 2004; Han and Jeong, 2014). 콘크리트 라이닝의 열화는 배면의 방수막 설치 여부에 따라 차이가 있으나, 방수막에 결함이 있는 상태를 기준으로 검토한 자료이며, 본 연구에서는 콘크리트 라이닝의 변형계수에 대한 열화 범위를 초기 값 대비 평균값(Han and Jeong, 2014) 정도인 5~20%로 결정하여 반영하였다. 터널 주변 지반의 강도 정수(점착력)에 대한 시간 경과에 따른 점착력($c(t)$)의 열화 정도는 초기 값 대비해서 80% 이상의 열화를 보이는 것도 있었다(Ladanyi, 1974; Sato and Kamemura, 1984; Guan et al., 2008; Matsunaga, 2008; Han and Jeong, 2014). 또한, 시간 경과에 따른 내부마찰각($\phi(t)$)의 열화 정도는 초기

값 대비해서 40% 이상의 열화를 보이는 것도 있었다(Ladanyi, 1974; Matsunaga, 2008; Guan et al., 2008; Han and Jeong, 2014). 터널 주변 지반의 강성 열화와 동일한 이유로 본 연구에서는 터널 주변 지반의 점착력, 내부마찰각에 대한 열화 범위를 초기 값 대비 평균값(Han and Jeong, 2014) 정도인 5~30% 및 5~20%로 결정하여 반영하였다.

3. 역해석 알고리즘 개선

3.1 선행 연구에 의한 차분진화 알고리즘 (변위-응력 기반)

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 (1995)에 의하여 제안된 이 방법은 집단에 속한 개체 벡터의 거리와 방향 정보를 사용한다. 이 알고리즘은 구조와 연산이 대단히 단순하지만, 수렴성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. An et al. (2016)은 FLAC3D 프로그램에 내장된 FISH함수를 사용하여 터널 시공 중에 상대적

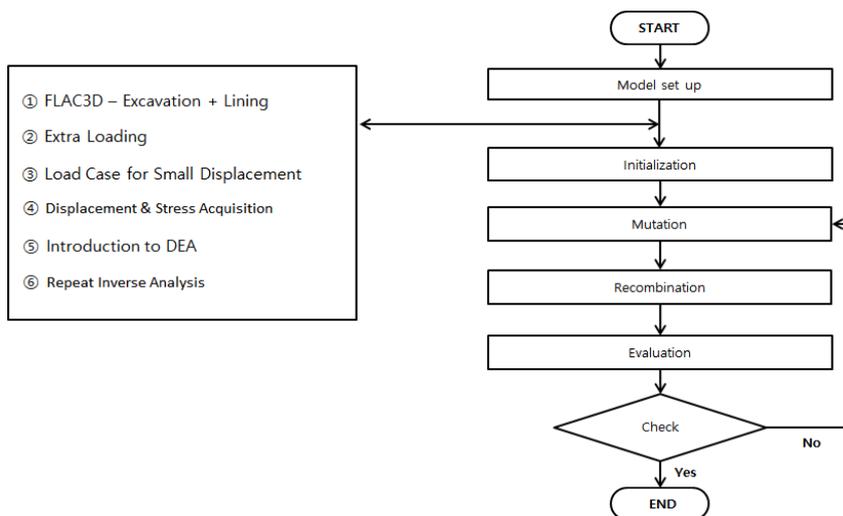


Fig. 2. Flowcharts of back analysis for initial input parameters (displacements and stresses) (An et al., 2016)

으로 변위가 크게 발생하는 상황에 사용할 수 있는 변위 기반의 차분진화 알고리즘을 구축한 후, 터널 운영 중 미소 변위 발생 상황에 적용성이 있는 변위-응력 기반의 차분진화 알고리즘을 구축하였다. Fig. 2에서는 기 구축된 변위-응력 기반의 차분진화 알고리즘의 흐름도를 보여주고 있다. 기 구축된 변위-응력 기반의 차분진화 알고리즘에 대해서 터널 운영 중 미소 변위 상태에 대한 적용성을 확인한 결과, 오차율이 평균 5.5% 정도로 산정되었지만, 경우에 따라서는 10% 이상의 오차율이 발생하기도 하였다(An et al., 2016). 추가적인 계측 정보를 알고리즘에 반영하여

오차율을 감소시켜서 적용성을 확보할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.2 차분진화 알고리즘의 개선 (변위-응력-강성(열화) 기반)

3.1에서 살펴본 기 구축된 차분진화 알고리즘의 개선을 위해서 추가적인 계측 정보를 알고리즘에 반영하는 연구를 수행하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 변위계, 응력계 이외에 특수한 상황에서 계측 가능한 보강지반에 대한 강성 열화 계측기 및 콘크리트

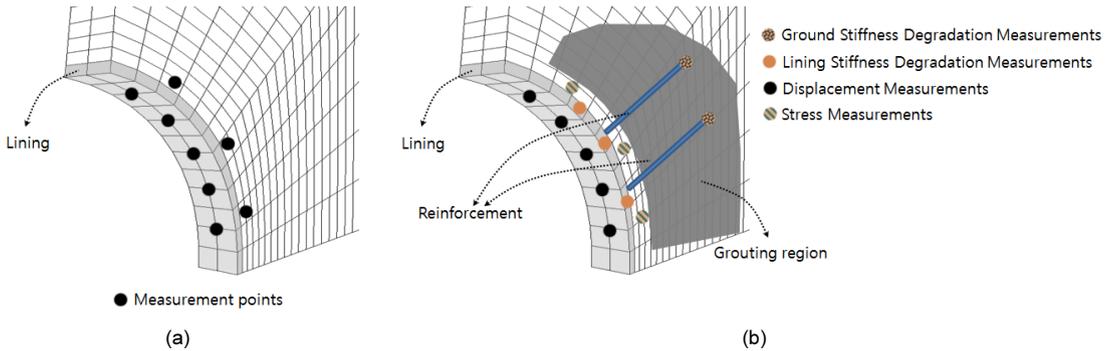


Fig. 3. The comparison of previous and current feasibility study for measurement points of DEA (a) displacement-stress based points (b) displacement-stress-stiffness degradation based points

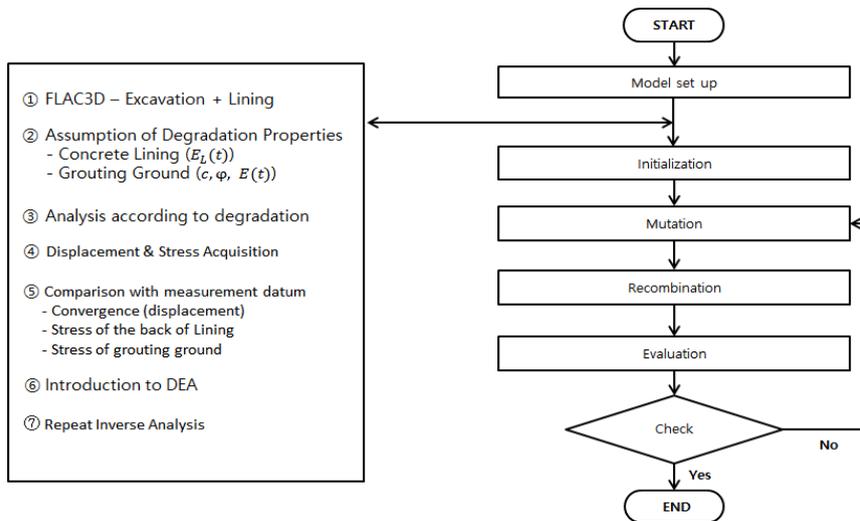


Fig. 4. Flowcharts of back analysis for initial input parameters (displacements, stresses and stiffness degradation)

라이닝 강성 열화 계측기(변형율계)로 정보를 획득하는 것으로 가정하여 알고리즘을 개선하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 추가적인 계측 정보를 획득할 수 있는 계측점(point)을 고려하였다. 기존 알고리즘에 비해서 라이닝 및 보강지반의 강성열화 정보를 반영할 수 있도록 알고리즘을 개선하였다. 이러한 접근법으로 인해서 지반에 대한 역해석뿐만 아니라 콘크리트 라이닝의 상태를 역해석을 통해서 확인할 수 있게 되었다. 또한, 이러한 추가 계측 정보를 역해석에 사용하여 운영 중 터널의 안정성을 평가에 대한 오차율을 감소시켜서 신뢰성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 4에서는 개발된 변위-응력-강성열화 기반의 차분진화 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 우선 FLAC3D에서 모델을 생성해서 수치해석을 수행하였다. 이러한 해석의 결과로 산정된 변위를 초기화하여 터널 운영 중 상태라고 가정하고, 라이닝 및 그라우팅 지반의 열화된 물성 값을 참고문헌(Sandrone and Labiouse, 2010; Han and Jeong, 2014)을 통해서 가정하였다. 이후에 개선된 차분진화 알고리즘에 의해 계산된 변위를 입력 물성 값으로 하여, 터널 역해석을 수행하였다. 열화에 따른 변형을 계산해서 계측 값과 비교한 후, 차분진화 알고리즘에 의해서 열화된 물성 값을 진화시켜 오차율이 기준 값 이내로 나올 때까지 반복 계산하였다. 이러한 과정에 의해서 열화된 물성 값을 파악할 수 있었다.

4. 변위-응력-강성(열화) 기반의 차분진화 알고리즘 구축 및 수치해석

변위, 응력 및 강성 열화 계측정보를 이용한 역해석 문제에 접근하기 위해서 선행 연구(An et al., 2015, 2016)에 의하여 이미 구축되어 있는 차분진화 알고리즘을 개선하였고, 이를 검증하기 위해서 가상 터널을 모델링하였다. 초장대, 고수압 조건의 해저터널을 모사하기 위해서, 터널반경은 5 m를 적용하였고, 10 MPa의 등방압력이 작용하는 것으로 가정하여 해석을 수

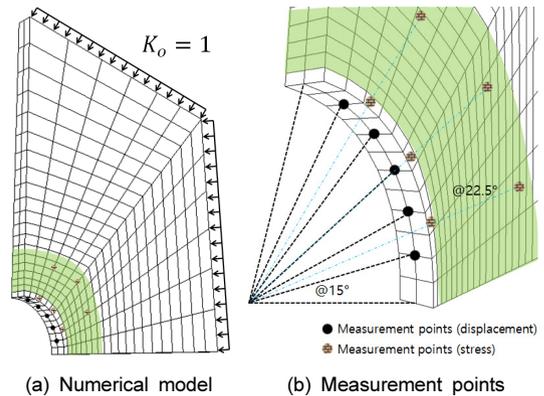


Fig. 5. Numerical model and measurement points for the feasibility study of displacement-stress-stiffness degradation based DEA

행하였다. 또한, 가상 터널을 이상화하여 $K_0 = 1$ 및 Fig. 5(a)에 제시된 바와 같이 등방압력이 1/4 모델에 작용하는 것으로 간주하였다. Fig. 5는 모델의 형상을 보여주고 있다. 변위에 대한 측정점은 Fig 5에서 보는 것과 같이 굴착면을 따라 15° 간격으로 다섯 곳의 위치를 설정하였다. 또한, 라이닝 및 그라우팅 지반에 대한 강성 열화 측정점은 22.5° 간격으로 세 곳의 위치를 설정하였다. 대상 암반 및 그라우팅 지반에 대해서는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였고, 암반의 변형계수(E)는 1.8 GPa, 포아송비(ν)는 0.22, 점착력(c)는 0.8 MPa, 내부마찰각(ϕ)는 28°를 적용하였다. 그라우팅 지반의 변형계수(E)는 2.1 GPa, 포아송비(ν)는 0.2, 점착력(c)는 1.1 MPa, 내부마찰각(ϕ)는 30°를 적용하였고, 콘크리트 라이닝은 탄성모델(Elastic Model)을 사용하고, 변형계수(E_L)는 24 GPa, 포아송비(ν)는 0.18을 적용하였다. 차분진화 알고리즘에 적용된 파라미터는 초기 무작위 개체군 수는 10, 돌연변이 상수(F)는 0.8, 교배상수(CR)는 0.8, 최대진화 반복 횟수는 20을 적용하였다. 또한, 역해석에 의해 계산할 물성 중 목표 값의 범위 등 그 외에 값은 Table 1에 정리하였다.

굴착, 라이닝 시공, 지반 보강, 열화 등 시공단계별 해석을 수행하기 위해서 수치해석에 이를 반영하였

Table 1. Parameters used in displacement-stress-stiffness degradation based back analysis

	Lining	Rock	Grouting Ground	DE	
γ_t (Unit Weight)	25 kN/m ³	20 kN/m ³	21 kN/m ³	Range of Target Values	
E (Elastic Modulus)	24 GPa	1.8 GPa	2.1 GPa	Lining	Grouting Ground
c (Cohesion)	-	0.8 MPa	1.1 MPa	15GPa ≤ $E_L(t)$ ≤ 24GPa	1.0GPa ≤ $E(t)$ ≤ 2.1GPa
ϕ (Friction Angle)	-	28°	30°		0.55MPa ≤ $c(t)$ ≤ 1.1MPa
ν (Poisson's ratio)	0.18	0.22	0.2	F (Mutant Constant)	0.8 (0-2)
Model	Elastic	Mohr-Coulomb		CR (Crossover Constant)	0.8 (0-1)
K (Bulk Modulus)	E / 3*(1-2 ν)			NP (Number of population)	10
G (Shear Modulus)	E / 2*(1+ ν)			Itermax (Max. Iteration)	20

다. 1번째 단계로 굴착과 라이닝 시공을 고려하였고, 2번째 단계에서 지반보강을 고려했으며, 3번째 단계에서 터널 운영 중 상태를 모사하기 위해서 추가등방압(Δp)을 가해서 미소변위를 발생시켰다. 마지막 단계에서 열화를 고려한 후에 차분진화 알고리즘을 통해 열화 정도를 찾도록 반복 해석을 수행하였다. 이와 같이 개선된 알고리즘은 여러 시공 단계를 고려한 해석이 가능하도록 수정되었다.

변위가 미소(微小)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(An et al., 2016). 식 (1)과 식 (2)는 사용된 적합도 공식을 보여주고 있다.

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

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

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

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

Table 2에서는 수치해석 수행 Cases를 보여주고 있다. Case 1~3은 라이닝 열화만 고려한 해석, Case 4~6은 그라우팅된 보강지반 열화만 고려한 해석 그리고 Case 7~10은 두 가지 경우를 동시한 고려한 해석을 수행하였다. 라이닝 및 보강지반의 동시 최대열화 및 상호 다른 열화 상태를 고려할 수 있도록 선택하였다. Fig. 6(a)에서는 라이닝 강성 열화를 반영한 해석 모델링 형상을 보여주고 있다. 미소변위 발생 시 변위응력 강성 열화(Stiffness degradation) 기반의 알고리즘을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 라이닝의 강성 열

화 정도를 초기 값 대비 10%, 15%, 20%로 고려하여 해석을 수행하였고, Table 3에 결과를 정리하였다. 라이닝이 열화됨에 따라서 상대적으로 낮은 오차율을

보이는 결과가 산정되었고, 전반적으로 5% 미만의 오차율을 보였다. 운영 중 터널의 라이닝 열화가 상당히 진행된 경우에는 계측 정보를 사용한 안정성 평가에 더 효율적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Cases of analysis

	Degradation targets and input values (I)	
	Lining	Reinforced ground
Case-1	○ : 20% (I=19.2)	×
Case-2	○ : 15% (I=20.4)	×
Case-3	○ : 10% (I=21.6)	×
Case-4	×	○ : 30% (I=1.47)
Case-5	×	○ : 20% (I=1.68)
Case-6	×	○ : 10% (I=1.89)
Case-7	○ : 20% (I=19.2)	○ : 30% (I=1.47)
Case-8	○ : 20% (I=19.2)	○ : 10% (I=1.89)
Case-9	○ : 10% (I=21.6)	○ : 30% (I=1.47)
Case-10	○ : 10% (I=21.6)	○ : 10% (I=1.89)

Fig. 6(b)에서는 그라우팅된 보강지반의 강성 열화를 반영한 해석 모델링 형상을 보여주고 있다. 보강지반의 강성 열화 정도를 초기 값 대비 10%, 20%, 30%로 고려하여 해석을 수행하였고, Table 4에 결과를 정리하였다. 보강된 운영 중 터널 주변 지반이 열화됨에 따라서 더 낮은 오차율을 보이는 결과가 산정되었지만, 오차율 감소폭이 Case 1~3에 비해서는 적게 나타났다. 전반적으로는 5% 미만의 오차율을 보이는 결과가 산정되었다.

Fig. 6(c)에서는 라이닝과 그라우팅된 보강지반의 강성 열화를 동시에 반영한 해석 모델링 형상을 보여주고 있다. 라이닝 및 보강지반이 동시에 진행되는

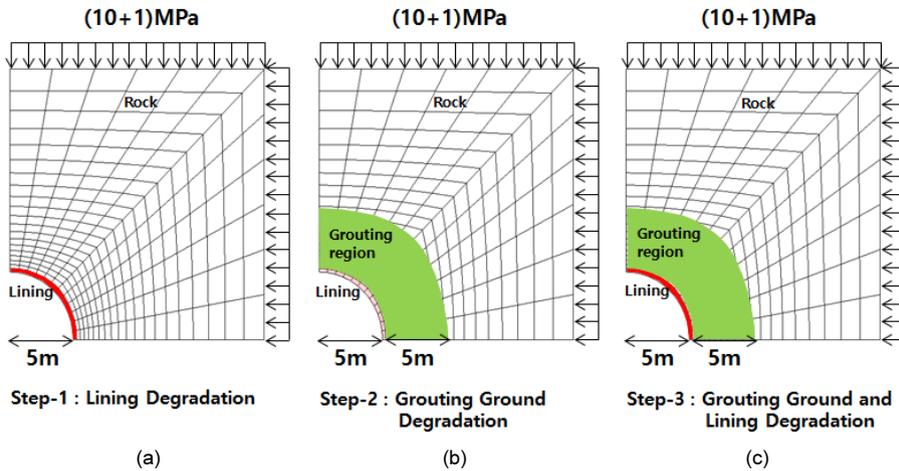


Fig. 6. Numerical Model for the feasibility study of displacement-stress-stiffness degradation based DEA (a) considering concrete lining stiffness degradation (b) considering grouting ground stiffness degradation (c) considering case (a) and (b) simultaneously

Table 3. Results of displacement-stress-stiffness degradation based back analysis (lining degradation)

		$E_L(t)$ (GPa)	Error(%) : $(I-B) \div B \times 100(\%)$	Conditions
Input (I)		24	-	(Radius, Pressure)
Output (B) (Degree of degradation)	Case-1	19.55	1.823	(5m, 10MPa+1MPa)
	Case-2	21.18	3.824	
	Case-3	22.51	4.167	

Table 4. Results of displacement-stress-stiffness degradation based back analysis (Grouting ground degradation)

Input (I)		$E(t)$ (GPa)	Error(%) : $(I-B) \div B \times 100(\%)$	Conditions
		2.1	-	(Radius, Pressure)
Output (B) (Degree of degradation)	Case-4	1.515	3.061	(5m, 10MPa+1MPa)
	Case-5	1.735	3.274	
	Case-6	1.811	4.180	

Table 5. Results of displacement-stress-stiffness degradation based back analysis (lining and grouting ground degradation)

Input (I)		$E_L(t)$ (GPa)	$E(t)$ (GPa)	Error(%) : $(I-B) \div B \times 100(\%)$	Conditions
		24	2.1	-	(Radius, Pressure)
Output (B) (Degree of degradation)	Case-7	19.056	1.485	$(0.750+1.034) \div 2 = 0.892$	(5m, 10MPa+1MPa)
	Case-8	18.830	1.860	$(1.925+1.578) \div 2 = 1.752$	
	Case-9	21.859	1.437	$(1.200+2.243) \div 2 = 1.721$	
	Case-10	21.230	1.940	$(1.711+2.622) \div 2 = 2.167$	

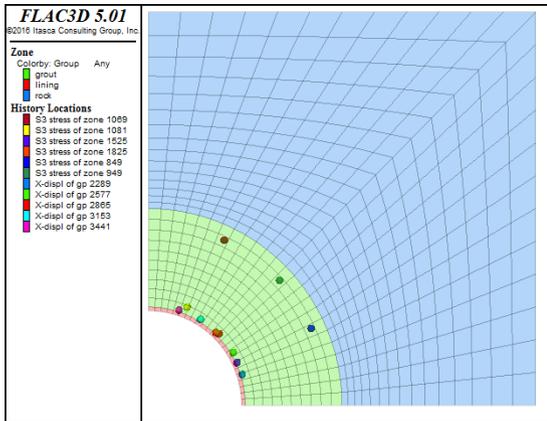


Fig. 7. FLAC3D Numerical Model and measurement points of displacement-stress-stiffness degradation based DEA

4가지 Case를 선정하여 해석을 수행하였고, Table 5에 결과를 정리하였다. 라이닝과 보강지반이 동시에 열화되는 경우에 대해서 해석한 결과, 미지수가 많아진 경우에도 오차율이 5% 미만으로 산정됨을 알 수 있었다. 본 연구를 통해서 구축된 알고리즘을 통해서 역해석을 수행한 결과로부터, 터널 주변 보강지반 및 라이닝의 열화 정도에 대한 계측 정보를 획득할 수 있는 경우에는 운영 중 터널의 안정성 평가가 가능할 것으로 판단된다. Fig. 7에서는 FLAC3D 모델링 형상 및 계측 정보를 수신하는 측정점을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 고수압 초장대 해저터널의 운영 중 안정성 평가 방법을 도출하기 위해서 선행 연구에 의해 구축된 변위-응력 기반의 차분진화 알고리즘을 바탕으로 하여 지반 및 라이닝의 강성 열화 정보를 활용할 수 있게 알고리즘을 개선하였다. 기존 알고리즘을 개선하여 변위-응력-강성(열화) 기반의 알고리즘으로 확장 구축하고, 터널 역해석을 수행한 결과로 확인한 결론은 다음과 같다.

1. 개선된 차분진화 알고리즘을 통해서 여러 개의 미지수 (라이닝 변형계수, 보강지반 변형계수, 점착력, 내부마찰각)에 대한 Degradation(열화) 정보를 고려한 역해석을 수행한 결과, Table 3~5에서 보는 바와 같이, 평균 5% 미만의 오차율을 보였다. 미지수가 많은 상황에서도 개선된 차분진화 알고리즘의 성능이 우수하다는 것을 확인하였다.
2. 터널굴착, 라이닝 시공, 지반 보강, 열화 등 시공 단계별 해석을 수행할 수 있도록 기존 알고리즘에 비해서 개선되었다. 1번째 단계로 굴착과 라이닝 시공을 고려하였고, 2번째 단계에서 지반보강을 고려했으며, 3번째 단계에서 터널 운영 중 상태를

모사하기 위해서 추가등방압(Δp)을 가해서 미소 변위를 발생시켰다. 마지막 단계에서 열화를 고려한 후에 차분진화 알고리즘을 통해 열화 정도를 찾도록 반복 해석을 수행하였다. 이와 같이 개선된 알고리즘은 여러 시공 단계를 고려한 해석이 가능하도록 수정되었다.

3. 주변 지반 및 라이닝의 강성 열화 계측값 정보를 반영한 개선된 알고리즘은 적합성을 가지는 오차율을 보였다. 개선된 변위-응력-강성(열화) 기반의 역해석 알고리즘에서 결과의 신뢰도가 올라간 것을 확인할 수 있었고, 이 알고리즘을 사용하면 다양한 계측정보를 활용한 운영 중 터널의 안정성 평가 및 라이닝의 상태 평가도 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 터널 역해석 알고리즘의 적합성을 도출하기 위하여 운영 중 발생된 미소변위, 터널 주변 지반 응력, 지반 및 라이닝의 강성 열화 정보를 이용하였다. 단, 알고리즘의 적합성을 확인하기 위하여 가정된 물성치를 적용하였으며, 응력 측정이 가능한 경우에 적용이 가능한 한계점이 있다.

향후 연구에서는 개선된 차분진화 알고리즘을 활용하여 변위계측값, 응력계측값, 보강지반강성(열화)계측값, 라이닝강성(열화)계측값 등 다양한 실제 계측 정보를 역해석의 입력인자로 받을 수 있도록 독립적인 프로그램으로 개발하여 실제 현장에 적용할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2016년 건설기술연구사업의 ‘고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(13SCIP-B066321-01)’ 연구단 지원에 의해서 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. An, J.S., Kim, B.C., Moon, H.K., Song, K.I., Su, G.S. (2016), “DEA optimization for operating tunnel back analysis”, *Journal of Korean Tunn Undergr Sp Assoc*, Vol. 18, No. 2, pp. 183-193.
2. 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.
3. Deutsche Bahn, A.G. (2007), “Richtlinie 853-Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten”, *Frankfurt am Main*.
4. Guan, Z., Jiang, Y., Tanabashi, Y. (2008), “Rheological parameter estimation for the prediction of long-term deformations in conventional tunnelling”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, No. 3, pp. 250-259.
5. Han, Y.C., Jeong, S.S. (2014), “A Study on the Concrete Lining Behavior due to Tunnel Deterioration”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 30, No. 4, pp. 21-34.
6. 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.
7. Itasca Consulting Group, Inc. (2012), *FLAC3D-Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Version 5.0. User Manual*, Minnesota, USA.
8. Kim, J.W., Hong, E.S., Cho, G.C. (2016), “Assessment of elastic-wave propagation characteristics in grouting-improved rock mass around subsea tunnels”, *Journal of Korean Tunn Undergr Sp Assoc*, Vol. 18, No. 2, pp. 235-244.
9. Ladanyi, B. (1974), “Use of the long-term strength concept in the determination of ground pressure on tunnel linings”, *Proceedings of the 3rd international congress on rock mechanics*, National Academy of Sciences, Denver, pp. 1150-1156.
10. Lee, J.H., Akutagawa, S. (2009), “Quick prediction of tunnel displacements using Artificial Neural Network

- and field measurement results”, International Journal of the JCRM, Vol. 5, No. 2, pp. 53-62.
11. Lenz, F., Marcher, T. Neumayr, T. (2010), “A9 Bosruck Tunnel-design approaches for swelling rock”, Geomechanics and Tunnelling, Vol. 3, Issue 5, pp. 597-608.
 12. Marcher, T. (2011), “Tunnel Design and Construction Practice: Technical Solutions in Swelling Ground”, Workshop UPC: Tunnelling through Saline and Swelling Ground, iLF Consulting Engineers.
 13. Matsunaga, T. (2008), “Study on Prediction of Tunnel Deformation and Rationalization of Measures”, PhD These, Kyoto University (in Japanese).
 14. Park, E.S., Shin, H.S., Cheon, D.S., Jung, Y.B. (2013), “Management and concept of the monitoring system considering the characteristics of subsea tunnels”, Journal of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol. 15, No. 5, pp. 523-536.
 15. Sandrone, F., Labiouse, V. (2010), “Analysis of the evolution of road tunnels equilibrium conditions with a convergence-confinement approach”, Rock mechanics and rock engineering, Vol. 43, No. 2, pp. 201-218.
 16. Sato, M., Kamemura, K. (1984), “A Study on Time Dependency of Rock Strength”, Japanese Geotechnical Society, Vol.19, pp. 783-784 (in Japanese).
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. Yokozeki, K., Watanabe, K., Sakata, N., Otsuki, N. (2004), “Modeling of leaching from cementitious materials used in underground environment”, Applied Clay Science, Vol. 26, Issues 1-4, August 2004, pp. 293-308.