지식기반형 TBM 터널 세그먼트 라이닝 설계 프로그램의 개발 및 적용

정용준^{1*} · 유충식²

¹비회원, 성균관대학교 글로벌건설엔지니어링학과 석사과정

²정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

Development and implementation of a knowledge based TBM tunnel segment lining design program

Yong-Jun Jeong^{1*}, Chung-Sik Yoo²

¹Graduate Student, Dept. of Global Construction Engineering, Sungkyunkwan Univ.

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan Univ.

ABSTRACT: This paper concerns the development of a knowledge-based tunnel design system within the framework of artificial neural networks(ANNs). The system is aimed at expediting a routine tunnel design works such as computation of segment lining body forces and stability analysis of selected cross section. A number of sub-modules for computation of segment lining body forces and stability analysis were developed and implemented to the system. It is shown that the ANNs trained with the results of 3D numerical analyses can be generalized with a reasonable accuracy, and that the ANN based tunnel design concept is a robust tool for tunnel design optimization. The details of the system architecture and the ANNs development are discussed in this paper.

Keywords: TBM Tunnel, Segment lining, Finite element analysis, 2-Ring Beam-Spring Model, Artificial neural network

초 록: 본 논문에서는 인공지능 기술에 이용한 TBM 터널 세그먼트 라이닝의 설계 시스템 개발에 관한 내용을 다루었다. 먼저 개발 시스템에 대한 개념 및 개발 과정과 시스템을 구성하는 각 요소기술 및 개별 모듈 개발에 관한 내용을 기술하였다. 본 시스템의 요소기술인 ANN-기반의 세그먼트 라이닝 부재력 예측 시스템에 대해 그 개념과 ANN 학습과정 및 검증과정을 기술하였다. ANN-기반의 세그먼트 라이닝 부재력 예측은 유한요소해석을 토대로 구축한 DB를 ANN을 통해 일반화 한 후 개발된 엔진을 세부 모듈에 접목시켜 별도의 해석 없이 유사 단면 혹은 현장에 적용이 가능하도록 하였다. 또한 해석 대상 단면에 대하여 상용 유한요소해석 프로그램과 연계하여 해석 Input파일의 자동생성이 가능하도록 하였으며 유한요소해석 결과를 통한 단면 검토가 가능하도록 하였다.

주요어: 쉴드 터널, 세그먼트 라이닝, 유한요소해석, 지식기반, 인공지능망

1. 서 론

세그먼트 라이닝은 쉴드 TBM으로 시공되는 쉴드 터널에서 시공 중 터널의 안정성을 확보하고 시공 후 터널의 영구적인 라이닝의 역할을 한다. 세그먼트 라이닝은 운용 중에 작용하는 지반하중과 수압을 지

지해야 하며, 운반 및 적치 관련 하중, 이렉터에 의한 설치 시의 하중, 쉴드 TBM의 추력에 의한 반력 등에 대한 충분한 안정성을 가져야 한다. 또한 공사 중은 물론 운용 중에도 충분한 방수성능을 유지할 수 있어야 한다(KTA, 2008).

세그먼트 라이닝은 쉴드 터널의 직접공사비에서 약 25~40%로서 가장 큰 비중을 차지하며 현재와 같이 터널이 장대화 / 대단면화 되면서 그 비중이 더욱 증가하게 되므로 합리적이고 경제적인 세그먼트

***Corresponding author:** Yong-Jun Jeong
E-mail: jeongyongjune@hanmail.net

Received May 10, 2014; **Revised** May 23, 2014;
Accepted May 27, 2014

라이닝의 설계가 쉴드터널에서 중요한 사항이라고 할 수 있다(Chang 등, 2011).

쉴드 터널의 설계과정은 사용목적 및 현장조건에 적합한 세그먼트 라이닝의 단면과 철근량 등을 설계자가 경험적인 방법에 의해 산정한 후 이를 수치해석이나 이론해 등을 이용하여 안정성 검토 및 거동예측을 수행하며 그 결과를 토대로 하여 설계에 대한 적합성 여부를 판단하게 된다. 이때 수치해석을 통해 평가하는 방법은 대상구간의 복잡한 지질특성 및 시공조건을 반영하여야 한다. 그러나 터널이 장대화 / 대단면화 되는 경우 실제 현장 데이터를 입수하는데 한계가 있고 다량의 지반정보 및 설계정보를 분석해야하므로 정량적인 해석에 제한이 따르게 되며 많은 시간과 비용을 초래하게 된다. 이러한 문제를 개선하여 보다 효율적인 터널설계를 위하여 본 연구에서는 터널 설계과정을 자동화하는 시스템을 개발하였다.

세그먼트 라이닝 설계 자동화란 사용자가 대상 현장의 지반조건과 TBM 기계의 제원 및 시공조건, 설계정수 등의 정보를 입력하여 해당 입력 정보에 최적화된 세그먼트의 제원 이음부 정보, 분할 수 등의 세그먼트 라이닝 설계를 자동으로 수행하게 하고 동시에 설계결과에 대해 전 시공과정에 걸쳐 안정성 평가를 수행함으로써 최적화된 터널설계가 가능하도록 하는 것을 의미한다.

본 프로그램에서는 세그먼트 라이닝 설계 자동화를 위하여 입력정보를 바탕으로 세그먼트 라이닝의 최종 설계하중 산정을 자동화 하였으며, 부재력 산정 시 상용유한요소해석 프로그램의 Input 파일을 자동으로 생성하도록 하였으며 유한요소해석 결과를 프로그램에 Import하여 해석결과 확인 및 부재력 산정이 자동화가 가능하게 하였다. 또한 유한요소해석과 연계한 인공신경망 시스템을 도입하여 부재력 산정을 자동화하여 해석 및 설계에 소요되는 시간적·경제적 노력을 획기적으로 단축시켰다.

본 프로그램에서는 상기 기술한 터널설계의 자동화를 위한 방법으로 전문가 시스템 인공신경망(Artificial

Neural Network, ANN)기법을 적용하였다. 이를 위한 기초연구로서 인공신경망(ANN)과 유한요소해석(FEM)의 연계기법을 통한 터널 시공 중 안정성 평가 및 거동예측에 관한 연구를 수행하여 이러한 접근방법의 적용성과 효율성을 확인한 바 있으며, 관련 연구로서 ANN-FEM 연계기법을 적용한 평가결과를 GIS에 접목시켜 가시화함으로써 광역단위 현장에 대한 위험도 평가를 용이하도록 하는 연구가 수행된 바 있다(Yoo et al. 2004, 2006, 2008). 또한 인공신경망 학습 DB구축 시 효율성을 제고하기 위하여 Bae et al. (2005), Jiao and Hudson (1995), Kim et al. (2001)에 의해 연구가 수행된 상대강도효과(RSE) 분석을 수행하여 보다 효율적인 인공신경망 시스템의 구축이 가능하게 하였다.

본 프로그램에서는 향후 쉴드 터널 현장에서 그 적용성 검토를 위해 ○○ 지하철 현장에 적용하여 설계/시공 단계에서 단면의 부재력 산정 및 안정성 검토 도구로서의 적용성을 검토하였다.

2. 지식기반형 자동화 설계 시스템

2.1 시스템 개요

본 시스템은 기존에 설계자의 경험에 의한 설계에서 벗어나 보다 정확하고 신속한 설계가 가능하도록 하여 터널 설계의 경제성과 안정성을 도모하는데 목적이 있다. 프로그램은 크게 입력모듈, 구조해석 모듈, 터널 설계모듈 등 세 개의 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈에 대한 상세한 설명은 다음절에 기술하였다.

한편, 본 시스템의 개발환경은 윈도우 기반의 응용 프로그램으로서 향후 시스템 확장 시 여타의 소프트웨어와의 연계가 용이하도록 하기 위해 인터페이스와 구축 및 연산에 탁월한 Microsoft사의 C#을 기반으로 코드화 작업이 되었으며 .NET Framework 4.0기반으로 설계되었다. 데이터베이스는 SQLite를 이용하여 DB구조를 설계하였고 총 14개의 테이블로 작성되었

Fig. 1. System conceptual diagram

다. 클래스의 개수는 총 112개이며 User Control인 인터페이스를 사용하는 클래스는 총 51개로 구성되었다. GUI 작업은 Data Grid View Control과 Graphic Device Interface로 수행되었다. Fig. 1은 시스템의 개념도를 나타냈다.

2.2 시스템 구성

최근 쉐드 TBM터널의 시공이 장대화/대단면화 됨에 따라 다양한 조건에서 시공되는 경우 경험을 토대로 하는 설계는 경제성이나 타당성에서 한계에 부딪히게 된다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하고자 Fig. 2에 제시한 일반적인 RC 세그먼트의 설계 흐름에 자동화 연산기능, FEM 연계기능, ANN 활용 기능을 접목시켜 신속하고 정확한 세그먼트 라이닝 설계가 가능하도록 하였다.

본 연구에서 수행된 개발 프로그램은 입력모듈에서 세그먼트 이음강도 평가와 일반하중의 산정에 대하여 입력정보를 토대로 자동으로 수행되도록 구성하였다. 구조해석 모듈에서는 상용 FEM 프로그램과 연계한 해석과 ANN을 활용한 자동화 해석이 가능하

도록 하였다. 결과분석 모듈에서는 구조해석 모듈의 해석 결과를 바탕으로 선택한 단면의 안정성 평가를 자동으로 수행하도록 구성하였다.

본 연구에서 개발된 프로그램을 이용하여 신속하고 정확한 세그먼트 라이닝 설계가 가능하도록 하였다. 다음의 절에서 개별 모듈에 대한 세부기능 및 모듈 구성안에 대하여 기술하였다.

2.3 입력 모듈

본 시스템의 입력모듈은 터널해석 및 설계를 위한 기본정보를 입력하는 모듈로서 현장에서 확보한 지반조사 정보를 토대로 지반정보를 입력하며 시공조건을 고려한 터널정보 및 하중정보를 입력하도록 하고 있다. 본 시스템에서는 사용자가 입력한 정보를 바탕으로 유한요소 해석에 사용되는 세그먼트 이음부의 스프링 계수를 자동으로 산정하며 세그먼트 라이닝에 작용하는 최종 설계하중을 자동으로 산정하도록 하였다.

세그먼트 이음부의 반경방향 회전스프링 계수(K_m)는 이음부에 인장부재가 없는 경우에 대하여 Fig. 3의 조건에 의해 식 (1)을 적용하였다.

Fig. 2. Flow chart for design of segment lining and program structure

$$K_m = \frac{M}{\theta} = \frac{x(3h-2x)bE_c}{24} \quad (1)$$

여기서, 압축외연에서 중립축까지의 거리 x 는 식 (2)로 산정하도록 하였다.

$$x = \frac{nA_b}{b} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2bd}{nA_b}} \right) \quad (2)$$

보의 변형 이론해에 의한 세그먼트 축 방향 이음의 전단강도 산정법은 평판형 RC 세그먼트를 대상으로 식 (3), 식 (4)과 같이 나타낸다. 세그먼트 링간 이음부의 전단 스프링 계수(K_s)는 반경방향과 접선방향 두 방향으로 나누어서 산정하게 되는데 Fig. 4를 바탕으로 반경방향의 전단스프링 계수(K_{sr})는 식 (3)을 이용하여 산정하였으며 접선방향의 전단스프링계수(K_{st})는 식 (4)를 이용하여 산정하도록 하였다(Yoo and Jeon, 2012).

$$K_{sr} = \frac{192EI}{(2b)^3} = \frac{24EI}{b^3} \quad (3)$$

$$K_{st} = \frac{b'hG}{b} = \frac{b'hE}{2b(1+v)} \quad (4)$$

세그먼트에 작용하는 최종 설계 하중 산정에 있어서는 사용자가 전토압 하중과 이완토압 하중을 선택하여 적용이 가능하도록 하였다.

세그먼트 라이닝에 작용하는 연직 이완토압 하중은 Terzaghi의 이완 토압식을 적용하였으며 측압이나 수압 등의 하중산정은 ITA (2000)의 기준을 적용하였다. 프로그램에 적용한 Terzaghi의 이완토압식은 식 (5)와 같다.

$$P_{VC} = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot \left(1 - e^{-K_0 \tan \phi \cdot \frac{H}{B_1}} \right) + P_0 e^{-K_0 \tan \phi \cdot \frac{H}{B_1}} \quad (5)$$

Fig. 3. Establishment condition of rotational spring constant

Fig 4. Establishment condition of shear spring constant

여기서,

p_{vc} : 세그먼트 링 천정부(Crown)에 작용하는 이완토압(kPa)

K_0 : 수평토압계수

γ : 흙의 단위중량(kN/m³)

ϕ : 흙의 내부 마찰각(°)

p_0 : 지표상재하중(kPa)

c : 흙의 점착력(kPa)

$2B_1$: 세그먼트 링 정상부의 이완폭(m)

H : 지층의 두께(m)

D_c : 세그먼트 링의 도심선 직경(m)

2.4 구조해석 모듈

2.4.1 횡단면 해석

1) 이론식을 이용한 구조해석

본 시스템에서는 부재력 산정을 위하여 세 가지의 이론식을 이용하였다. 세 가지의 이론식은 Guidelines

M : Bending moment

b : Segment width

A_b : Area of bolt

θ : Rotation angle

x : Depth between compressive extreme fiber and neutral axis

H : Segment thickness

d : Effective depth of section

n : Ratio of Young's modulus

E : Elastic modulus of concrete

I : Secondary moment of segment

b : Segment width

b' : Joint distance

h : Segment thickness

G : Modulus of rigidity

v : Poisson's ratio

for the Design of Shield Tunnel Lining (ITA, 2000)에서 제안한 Elastic Equation model 과 Muirwood (1975)가 제안한 탄성 모델, Duddeck and Erdmann (1985)이 제안한 연속체 해석 방법으로 세 가지 이론식의 해석 결과를 상호 비교 할 수 있도록 하였다.

① Elastic Equation model

종래부터 쉴드 터널의 부재력 산정에 많이 사용되어온 이론식인 Elastic Equation model은 관용계산법으로 잘 알려져 있다. 기존의 관용계산법에서 세그먼트 이음부에 의한 강성 저하를 고려하여 세그먼트를 동일한 휨강성 ηEI ($\eta \leq 1$)을 가지는 링(Ring)으로 생각하고 반력을 산정하는 수정관용계산법이 개발되었다. 이 η 를 휨 강성의 유효율이라 한다(ITA, 2000).

② Curtis-Muir wood model

이론해를 이용한 부재력의 두 번째 방법은 Muir Wood (1975)가 제안한 탄성 모델 이론식이다. 이 부재력 산정 모델에서는 세그먼트 링에 존재하는 이음부의 수에 따라 단면 2차 모멘트를 산정하게 되고 그에 따른 링 전체의 강성 저하를 고려할 수 있는 장점이 있다.

③ Duddek & Erdmann model

이 방법은 세그먼트 라이닝에 발생하는 뒷채움 주입압을 고려하여 지반과 세그먼트 라이닝 사이의 거동을 고려하였으며 위에서 제시한 두 가지 수식과 더불어 간단한 방법으로 기본 설계 단계에서 주로 이용된다. 최근에는 유럽지역에서 설계단계에서 자주 활용되고 있으나 얇은 매설심도의 터널에는 적용할 수 없다는 단점이 있다.

2) 유한요소법을 이용한 구조해석

본 프로그램에는 세그먼트 라이닝의 부재력 산정방법 중 두 번째로 유한요소해석 기능을 탑재하였다.

근래에는 수치해석 방법의 발달로 이론해를 이용한 해석적 방법은 실무에서는 개략적인 부재력을 산정하기 위해 초기 설계단계에서 주로 이용되고 있다. 일반적으로 수치해석 방법에는 지반을 반력 스프링으로 고려하는 빔-스프링(beam-spring) 모델과 탄소성 요소로 고려하는 연속체 모델이 있으며 세그먼트 라이닝의 부재력 산정에는 주로 빔-스프링 모델이 사용되고 지반침하거동과 같은 해석에는 연속체 모델이 사용된다. 본 시스템에서는 세그먼트 라이닝의 부재력 산정을 위해 빔-스프링 모델을 활용하여 구조해석을 수행하였다.

빔-스프링 모델은 세그먼트 링(Ring)을 휨모멘트에 대한 회전 스프링을 가지는 링으로 고려하는 방법이며 최근에는 기존의 빔-스프링 모델에서 진일보된 2링 빔-스프링 모델이 설계에 적용되고 있다. 2링 빔-스프링 모델은 반경방향 이음부는 회전스프링으로 고려하고 링 이음부는 전단스프링을 이용하여 지그재그로 연결된 2개 링의 구속조건을 고려하며 세그먼트에는 지반반력스프링이 연직으로 설치된다(KTA, 2008).

일반적으로 세그먼트 라이닝의 유한요소해석은 이론해를 이용한 해석에 비해 모델링과 해석에 상당히 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 프로그램에서는 사용자의 편의를 도모하기 위해 입력모듈에서 입력한 정보를 바탕으로 상용유한요소해석 프로그램인 SAP2000의 해석 input파일을 자동으로 생성하는 기능을 구축하였다. Fig. 5는 본 프로그램을 이용한 유한요소해석 프로그램과 연계한 프로그램 구조도를 나타냈다.

3) 인공지능망을 이용한 구조해석

본 시스템에서는 임의의 지층조건에 대한 신속하고 안전한 해석을 위해 지식기반형 구조해석 모듈을 탑재하였다. 인공지능망을 이용한 안정성 평가 시스템은 ANN-FEM 연계기법을 적용한 평가결과를 GIS에 접목시켜 가시화함으로써 광역단위 현장에 대한 위험

도 평가를 용이하도록 하는 연구가 수행된 바 있다 (Yoo et al. 2004, 2006, 2008). 본 시스템에서는 터널 직경, 토피고, 점착력, 내부마찰각, 탄성계수, 단위중량, 측압계수, 포아송비 등의 시공조건을 바탕으로 54개의 입력정보 DB를 구축하였으며 구축한 입력정보를 토대로 상용유한요소 프로그램인 SAP2000을 이용하여 축력, 전단력, 휨모멘트, 변위 등의 결과 DB를 구축하였다. 구축된 DB를 토대로 ANN 학습을 수행하기에 앞서 구축된 54개DB(100%)에 대해 Training set 41 (75%)개와 내적인자 연구를 위한 데이터 Testing set 8 (15%)개, 신뢰성 검증을 위한 데이터 Validation set 15 (10%)개로 분류하였으며, 내적인자

연구를 통해 ANN을 최적화 하였다. 이와 같이 최적화된 ANN구조를 이용하여 사용자가 임의의 시공조건을 입력하였을 때 별도의 수치해석을 수행하지 않더라도 자동으로 부재력을 산정해주도록 하는 시스템을 구축하였다. 인공신경망을 이용한 구조해석 결과는 이론식을 이용한 해석, 유한요소 해석의 결과와 비교하여 각 해석결과의 타당성을 검증하는데 이용되며 시간에 제한을 받게 되는 설계 단계에서 신속하고 정확하게 부재력을 산정할 수 있도록 하는 시스템이다. 일반화된 ANN의 가중치(W)와 바이어스(b)를 추출하여 공학적 연산이 가능하도록 식 (6)의 연산모듈을 시스템 내에 구축하였다. 본 프로그램에 구축된

Fig. 5. Structure chart of establishing member forces linked with FEM program

인공신경망을 이용한 부재력 산정 흐름도는 Fig. 6과 같다.

$$t_n = [f_2\{W_2 \times f_1(W_1 \times p_n + b_1) + b_2\}] \quad (6)$$

여기서, p_n 은 정규화 된 입력값, t_n 은 정규화 된 목표값이며, W_1 , W_2 는 weight (W), b_1 , b_2 는 bias (b), f_1 , f_2 는 전이함수이다. f_1 은 은닉층의 활성화함수로 식 (7)의 Tansigmoid 함수를 나타낸 것이며 입력값을 -1~1로 정규화 시켜주는 함수이며, f_2 는 출력층 활성화함수로 식 (8)의 Purelin 함수로 정의하였다(Beale et al. 2013).

$$f_1 = \tanh(n) = y = \frac{2}{1 + \exp(-2n)} - 1 \quad (7)$$

$$f_2 = y = f(x) \quad (8)$$

(1) 인공신경망 학습을 위한 DB 구성

본 논문에서는 다층 퍼셉트론 역전파 학습 알고리즘을 적용하여 인공신경망 학습을 수행하였다.

세그먼트 라이닝의 부재력 산정을 위해서 상용 유한요소해석 프로그램인 SAP 2000을 사용하였으며, 일반적으로 세그먼트 라이닝의 부재력 산정에 사용되

는 2 ring-beam 모델을 적용하여 모델링 하였다.

인공신경망 구성을 위하여 총 54개 시공조건에 대해서 세그먼트 라이닝에 작용하는 전단력, 모멘트, 축력을 산정하였다. 각각의 시공조건은 터널직경, 토 피고, 점착력, 내부마찰각, 변형계수, 단위중량, 측압 계수, 포아송비, 지하수위 등 총 9가지 입력변수에 따라 작성되었으며, 지층조건에 따라 사질토, 풍화토, 풍화암, 점성토 등 4가지로 구분하였다. 입력변수의 범위는 Table 1과 같다.

세그먼트 라이닝에 작용하는 부재력 산정을 위하여 재하하중 산정기준(ITA, 2000)에 근거하여 이완하중을 산정하고 이를 2-Ring Beam 모델에 적용하는 방법으로 해석을 수행하였다. Fig. 7은 상용 구조해석 프로그램과 연계한 ANN 시스템의 구조도를 나타냈다.

구축한 DB를 활용하여 학습을 수행한 인공신경망은 Input layer에 9개의 입력뉴런, 1개의 Hidden layer에 10개의 은닉뉴런, Output layer에 1개의 출력뉴런으로 구성된다. 학습결과 각각의 뉴런들 사이의 연결에는 연결가중치(Weight)가 부여되며 Hidden layer와 Output layer의 뉴런에는 역치(Bias)가 부여된다. 본 논문에서는 다층 퍼셉트론 역전파 학습 알고리즘을 적용하였으며 Hidden Layer와 Output layer의 활성화 함수는 Matlab 2012b 프로그램에 내장된 Tansig함수를 사용하였다(Beale et al. 2013).

Fig. 6. Flow chart of establishing member forces using ANN system

구축한 인공신경망 구조를 적용한 54개 학습조건에 대한 학습 결과는 다음 Fig. 8과 같이 나타났다.

Table 2는 결정계수(R^2), 평균제곱근오차(RMSE), 평균절대오차(MAE) 등 세 가지 통계변수를 이용한 인공신경망 학습 결과를 보여준다. 인공신경망 학습 결과는 Table 2에서와 같이 전단력, 모멘트, 축력에 대한 학습결과 결정계수(R^2)가 0.997, 0.998, 0.999로

나타나 뛰어난 학습률을 보인다. 또한 Fig. 8에 나타난 바와 같이 전단력, 모멘트, 축력에 대한 인공신경망 예측 값과 학습에 사용된 값은 상당히 높은 상관관계를 보인다. Table 2에 나타난 통계변수들은 학습에 적용된 인공신경망이 2 Ring-beam 모델을 이용한 유한요소 해석 결과를 상당히 신뢰할 수준으로 적용하였음을 보여준다.

Fig. 7. Structure of ANN system used for training

Table 1. Range of design variables considered

Input factor	B^a (m)	H^b (m)	c^c (kPa)	ϕ^d (°)	E^e (MPa)	γ^f (kN/m ³)	K_0^g	ν^h	H_W^i (m)
Data range	5-10	7.5-35	2-50	0-35	20-70	18-23	0.3-1	0.25-0.5	3.75-35

^a B , Tunnel Diameter

^b H , Depth of soil

^c c , Cohesion

^d ϕ , Friction angle

^e E , Young modulus

^f γ , Unit weight

^g K_0 , Lateral earth pressure

^h ν , Poisson ratio

ⁱ H_W , Ground water table

Table 2. Performance of ANN

Classification	R^2^a	RMSE ^b	MAE ^c
Shear force(kN)	0.997	16.53887	-10.0271
Bending moment(kN·m)	0.998	5.015831	-0.23483
Axial force(kN)	0.999	3.115358	0.036766

^a R^2 , Coefficient of determination

^b RMSE, Root Mean Square Error

^c MAE, Mean Absolute Error

Fig. 8. Comparison of computed versus predicted values for validation

(2) 상대강도효과(RSE)의 개념 및 결과 분석

본 프로그램에서는 인공신경망을 이용한 부재력 산정 시스템의 효율을 제고하기 위해 상대강도효과(RSE)의 개념을 도입하여 학습 DB에 대한 분석을 수행하였다.

상대강도효과(Relative Strength of Effect)는 Yang and Zhang (1997, 1998)에 의해 제안되었으며 입력항과 출력항간의 관계정도를 상대적으로 표시하는 값으로서 학습패턴 집합 S 에 대하여 역전파 학습을 수행한 경우 식 (9)와 같은 수학적 계산을 거쳐 정의된다.

$$S = s_1, s_2, s_3, \dots, s_j, \dots, s_r \quad (9)$$

여기서, $s_j = X, Y$

$$X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$$

$$Y = y_1, y_2, y_3, \dots, y_q$$

$$RSE_{ki} = C \sum_{j_n} \sum_{j_{n-1}} \dots \sum_{j_1} W_{j_n k} G(e_k) W_{j_{n-1} j_n} G(e_{j_n}) \\ \times W_{j_{n-2} j_{n-1}} G(e_{j_{n-1}}) W_{j_{n-3} j_{n-2}} G(e_{j_{n-2}}) \\ \dots W_{i j_1} G(e_{j_1})$$

여기서 C 는 출력변수 k 에 대한 입력변수 i 의 RSE_{ki} 최대값의 절대값을 '1'로 변환시키기 위한 스케일화 상수이다. 그리고 함수 G 는 활성화 함수(Activation function)의 미분 함수이며 W 는 각 층에 해당하는 가중치에 해당한다.

상대강도효과는 정규화 과정을 제외하면 출력층에 대한 미분과 같은 개념으로 보이지만 실제로 상대강도효과는 출력층에 대한 입력층의 상대적인 영향도를 평가하는 수단으로 사용된다. 상대강도효과의 계산방법은 Yang and Zhang (1998)의 논문에 제시되어 있다.

본 연구에서는 세그먼트 라이닝 설계 시 필요한 부재력 전체(축력, 모멘트, 전단력)에 대한 RSE를 산정하였다. 검토 결과 각 부재력에 대한 상대적인 영향도가 다소 다르게 나타났으나 본 고에서는 설계 결과에 가장 영향을 많이 미치는 부재력인 축력에 대한 RSE 검토 결과를 제시하였다.

축력에 대한 상대강도효과 분석 결과 세그먼트 라이닝에 작용하는 축력에 대한 영향인자의 상대적인 영향도는 다음 Table 3과 같다. Table 3에 제시된 바와 같이 54개 조건의 축력에 대한 영향인자의 상대

Table 3. Hierarchical analysis of axial force cases according to RSE

Hierarchy	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Input variable	c (+)	γ (+)	K_0 (-)	B (+)	H (+)	H_W (+)	ϕ (+)	ν (+)	E (+)

Fig. 9. RSE result of axial force cases

적인 영향도는 점착력, 단위중량, 터널직경 순서로 양의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 양의 영향을 주는 영향인자는 변수의 값이 증가하면 출력 변수인 축력이 증가함을 의미한다. 반면에 영향인자 중 측압계수는 음의 영향을 주는 것으로 나타났으며 이 경우는 변수의 값이 증가하면 출력변수인 축력이 감소함을 의미한다. 축력에 대한 영향인자의 상대적인 영향도 검토 결과를 영향인자 적용 범위에 따라 사질토, 풍화토, 풍화암, 점성토 등으로 구분하여 분석

한 결과 영향인자의 상대적인 영향도가 다르게 나타났다.

지층 종류에 따른 영향인자의 축력에 대한 상대적인 영향도는 Fig. 9와 같이 나타났다. 54개 조건의 전체 평균에서는 점착력의 상대적인 영향도가 가장 큰 것으로 나타났으나 사질토나 풍화토, 점성토 지층 조건에서는 점착력의 상대적인 영향도가 가장 큰 것으로 나타났으며 풍화암 지층조건에서도 두 번째로 영향이 큰 것으로 나타났다.

2.4.2 종단면 해석

본 프로그램에서는 실드 터널의 축방향 침하를 검토하기 위해서 터널의 종단면 해석을 수행하였다. 세그먼트 라이닝으로 지보된 실드 터널은 일반적인 NATM 터널과 달리 세그먼트 링 사이에 이음부가 존재하며 실제 터널에서는 이음부에 변형이 집중적으로 일어난다. 실드 TBM 터널 구간의 지반조건이 급격하게 변화하거나 실드 TBM 터널 상단의 지표 높이가 급격하게 변하는 경우에는 터널 부등침하의 영향으로 단면에 부재력이 발생할 수 있기 때문에 이음부의 존재를 고려한 종단면 해석을 통해 터널의 침하 검토가 필요하다. 터널의 침하를 검토하는 방법은 여러

Fig. 10. Structure of longitudinal analysis using FEM

가지가 있으나 본 프로그램에서는 등가 강성 치환 보 모델을 이용하여 이음의 존재에 따라 터널 축 방향으로 불균일한 강성을 지지하는 터널을 모델링 하였다. 등가 축 강성 및 휨 강성의 산정은 다음의 식 (10)~(12)를 적용하였다(日本鐵道總合技術研究所, 2003).

Fig. 10은 FEM과 연계한 종단면 해석의 구조도를 나타냈다.

$$\text{압축} : (EA)_{eq}^C = EA \quad (10)$$

$$\text{인장} : (EA)_{eq}^T = \frac{k_u}{k_u + EA/b} \times EA \quad (11)$$

$$\text{휨} : (EI)_{eq} = \frac{\cos^3 \phi}{\cos \phi + (\pi/2 + \phi) \sin \phi} \times EI \quad (12)$$

여기서, $\phi : \frac{\cos \phi + \phi}{\pi} = \frac{1}{2} + \frac{k_u b}{EA}$ 을 만족하는 값

$$A : \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4}$$

$$I : \frac{\pi(D_o^4 - D_i^4)}{64}$$

b : 세그먼트 폭

D_o : 세그먼트 외경

D_i : 세그먼트 내경

E : 세그먼트의 탄성계수

2.4.3 기타하중 해석

본 프로그램에서는 쉘드 터널의 설계 시 일반적으로 고려되는 하중 이외에 특수하게 작용하는 하중에 대한 검토 모듈을 구축하였다. 검토 항목은 총 네 가지로 구성되어 있으며 그 종류는 잣 추력에 대한 저항검토, 잣 추력에 대한 안정 검토, 뒷채움 주입압에 따른 안정 검토 그리고 적치 및 운반에 대한 검토이다.

잣 추력에 대한 저항 검토는 세그먼트 라이닝에 추력을 가하여 굴진하는 쉘드기의 굴진 시 쉘드기에

작용하는 저항과 쉘드기의 추력을 비교 검토하여 쉘드기 추진 저항에 대한 안정성을 검토하였다.

잣 추력에 대한 안정검토는 세그먼트라이닝에 가해지는 추력에 대해서 허용압축응력에 대해서 안정성을 검토하고 잣의 편심량을 계산하여 최대허용편심을 산정하도록 구성하였다.

뒷채움 주입압에 대한 검토는 세그먼트 라이닝 시 공시 발생하는 테일보이드에 뒷채움을 주입하는 경우 세그먼트 뒷채움 주입압에 의해 발생하는 세그먼트의 안정성을 검토하는 항목이며 뒷채움 주입압에 의해 발생하는 축력, 모멘트, 전단력을 검토하여 세그먼트의 안정성을 검토하도록 구성하였다.

마지막으로 적치 및 운반에 대한 검토는 세그먼트의 적치 및 운반시에 가해지는 하중에 대하여 적치 시 최하단에 위치한 세그먼트의 안정성을 검토하는 항목이다. 기타하중 해석에서 고려된 입력정보를 바탕으로 네 가지 검토 항목에 대해서 상용 구조해석 프로그램인 SAP2000을 활용하여 구조해석을 수행하게 되며 설계의 안정성을 검토하게 된다.

2.5 결과분석 모듈

세그먼트 라이닝은 조립 시 및 그 직후부터 하중을 받거나 변위를 일으키므로 터널 공용기간 중 장기간에 걸쳐 안정성의 확인뿐만 아니라 시공도중 일시적인 상태에 대한 안정성을 확인할 필요가 있다. 더욱이 주변의 토지 이용이나 지형·지하수 등의 큰 변화가 예상되는 경우에는 필요에 따라 설계상의 여유를 둘 필요가 있다. 따라서 본 모듈에서는 앞서 해석된 결과를 바탕으로 구조물의 안정성 평가와 추가적으로 검토되어야 할 사항들을 분석하고 최종적으로 설계를 수행하여 최종 결과를 출력하는 부분이다. Fig. 11은 세그먼트 라이닝 단면 검토의 흐름도를 나타냈다.

세그먼트 라이닝 설계는 축력과 모멘트를 받는 빔으로 가정하여 설계하는 것이 일반적이며, 어떤 부재가 구조적으로 견딜 수 있는 축력과 모멘트 조합의 한계를 나타내는 도표로서 P-M상관도를 이용한다.

일반적인 P-M상관도의 작성 방법과 동일하게 세그먼트 라이닝에 발생하는 축력-모멘트 조합에 의한 하중을 P-M상관도에 표시하고 표시된 점이 파괴포락선 안에 위치하는지 검토하는 것으로 단면검토를 수행하였다. 또한 입력모듈에서 입력된 철근 정보와 이론해, 유한요소해석, ANN 등 각 해석방법에 따른 축력과 휨모멘트 결과를 이용하여 일반적인 강도설계법에 의한 P-M 상관도를 프로그램 자체에서 작성 가능하도록 구성하였으며 각 해석방법에 따른 차이를 비교 및 분석 할 수 있도록 구성하였다.

결과분석 모듈에서는 단면 안정성 검토와 더불어 세그먼트 라이닝의 변형에 대한 검토를 수행한다. 식 (13)은 터널의 반경방향 변위를 나타내며 Muir wood (1975)를 참고하였다.

$$u_1 = \frac{R_{ex}^4}{18 \cdot E_{long} \cdot I_{stiff}} \cdot (2 \cdot S_n + S_t) \quad (13)$$

여기서, R_{ex} : 세그먼트 라이닝의 외경(m)

E_{long} : 세그먼트 탄성계수(kPa)

I_{stiff} : 세그먼트 2차 단면모멘트(m⁴/m)

S_n : 법선방향 응력(kPa)

S_t : 접선방향 응력(kPa)

Fig. 11. Flow chart of cross section review

3. 프로그램을 이용한 현장 적용성 평가

3.1 대상 현장 및 시공 조건

본 연구에서 개발한 시스템의 현장 적용성을 평가하기 위해 ○○ 현장을 대상으로 적용성 검토를 수행하였다. 대상구조물은 지하철 현장으로서 터널 심도는 36.8 m, 터널도심 직경은 11.67 m, 세그먼트 폭은 1.5 m, 세그먼트 두께는 0.3 m 이다. 대상 단면은 터널 상부는 모래와 점토가 분포하고 터널은 모래와 실트 자갈층을 통과 하는 지반조건이다. 대상단면의 지층 구성과 지반조건을 Fig. 12와 Table 4에 제시하였으며 터널 시공조건을 Table 5에 제시하였다.

3.2 프로그램을 이용한 세그먼트 라이닝 해석

3.2.1 프로그램을 이용한 하중 산정

본 연구에서는 사용자가 입력한 조건을 바탕으로 세그먼트 라이닝에 작용하는 하중을 자동으로 산정하는 시스템을 구축하였다. 세그먼트 링 상반부에 작용하는 연직토압은 등분포 하중으로서 일반적으로 전도압 하중을 적용하나, 흙의 강도정수를 평가할 수 있는

Fig. 12. Schematic view of cases considered

경우에는 Terzaghi의 이완 토압식을 적용할 수 있다. 하중의 산정에 있어서 수압도 토압의 일부로 포함하는 방식(토수 일체)과 수압을 분리해 별도로 산정하는 방식(토수 분리)의 2가지 적용방식 사용되고 있으며, 일반적으로 점성토 지반에서는 토수 일체 방법을 적

용하며 사질토 지반에서는 토수 분리 방법을 적용하는 경우가 많다(日本鐵道總合技術研究所, 2003).

본 절에서는 전토압 방법을 적용한 결과와 이완토압 방법을 적용한 하중 산정 결과를 비교하였으며 지하수위가 지표면에 위치한 경우와 지하수위가 존재

Table 4. Geotechnical material parameters

Classification		Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio
Sedimentary layer	Clay	17	42	0	9.8	0.38
	Sand	17.5	0	26.4	23	0.35
	Silty gravel	19	0	35	70	0.35
Soft rock		20	35	33	120	0.30

Table 5. Segment lining structural parameters

Classification	Data	Classification	Data
Tunnel depth	36.82 m	Segment width	1.5 m
Coefficient of rotational spring	131,224 kN/joint	Segment thickness	0.5 m
Coefficient of shear spring (tangential direction)	1,098,495 kN/joint	No. Segment	1K+1B+1C+7A
Coefficient of shear spring (radial direction)	585,864 kN/joint	Outer diameter	11.67 m

Table 6. Earth pressure calculated by developed program

Classification		Total pressure (kPa)	Loosening pressure (kPa)
Ground water table	Full	174.63	118.86
	N/A	292.33	196.65

Fig. 13. Interface of design load calculation module

하지 않을 때의 연직하중 산정 결과를 비교하였다.

전토압 방법을 적용한 경우에 만수위 조건에서는 174.63 kPa, 지하수위가 없는 조건에서는 292.33 kPa의 연직토압이 산정되었으며, 이완토압 방법을 적용한 경우에 만수위 조건에서는 118.86 kPa, 지하수위가 없는 조건에서는 196.65 kPa의 연직토압이 산정되었다. 연직토압 방법에 비해 전토압 방법의 하중이 크게 산정되었으며, 지하수위 조건에 따라서는 지하수위가 없는 조건에서 연직하중이 크게 산정되었다. Table 6에 하중 산정 결과를 제시하였다.

본 해석 대상 단면은 사질토 지층을 포함하고 있으므로 토수 분리 방식이 적용되었으며 연직토압의 산

정에 있어서 수압을 따로 계산하므로 연직토압이 상대적으로 작게 산정되었다. Fig. 13은 입력정보를 바탕으로 계산 최종 설계하중을 계산하는 하중산정 결과모듈을 나타냈다.

3.2.2 프로그램을 이용한 부재력 산정

본 프로그램의 입력모듈에서 세그먼트 라이닝에 작용하는 최종 설계하중을 산정한 후에는 구조해석 모듈에서 세그먼트 라이닝에 작용하는 부재력 산정을 수행한다. 본 프로그램은 사용자의 편의를 극대화하기 위하여 입력정보를 바탕으로 상용 구조해석 프로그램의 해석 Input 파일을 자동으로 생성하고 유한요

Fig. 14. Comparison of predicted section forces by ANN with computed by FEM

소해석 결과를 프로그램에 Import하여 해석결과를 요약하여 제시하는 기능을 탑재하였다. 또한 FEM 해석 DB를 바탕으로 구축한 인공신경망 부재력 예측 시스템을 도입하여 사용자가 별도의 해석 수행을 하지 않더라도 해석 결과를 확인할 수 있도록 하여 해석 및 설계에 소요되는 시간적·경제적 노력을 최소화 할 수 있도록 하였다. 앞서 수행한 조건에 대하여 자동으로 생성된 상용 구조해석 프로그램 Input 파일을 이용하여 해석을 수행하고 인공신경망 시스템을 이용한 결과와 비교를 수행하였다. Fig. 14는 상용 유한요소 해석을 이용한 부재력 산정 결과와 인공신경망 시스템을 이용한 부재력 산정 결과를 비교하여 나타냈다.

상기 기술한 조건에 대한 부재력 산정 결과 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 부재력 산정 결과와 인공신경망 시스템을 이용한 부재력 산정 결과는 99% 이상 일치하는 것으로 나타났다. 이와 같이 인공신경망을 이용한 부재력 산정 시스템은 상용유한요소 해석에 소요되는 시간을 획기적으로 단축할 수 있으며, 입력정보를 토대로 자동연산이 가능하도록 하여 설계자의 편의를 극대화 하였다.

3.2.3 프로그램을 이용한 단면 검토

본 연구에서는 개발된 프로그램을 이용한 해석 단면의 안정성 검토가 가능하도록 결과 분석 모듈을

Table 7. Result of cross section review using developed program

Classification	Developed program			Common use program		
	Design strength	Required strength	Result	Design strength	Required strength	Result
Max. plus bending moment	ϕPn^a (kN)	Pu^d (kN)	O.K.	ϕPn (kN)	Pu (kN)	O.K.
	9638.88	1687.62		9891.86	1687.62	
	ϕMn^b (kN·m)	Mu^e (kN·m)		ϕMn (kN·m)	Mu (kN·m)	
	1384.62	242.28		1420.11	242.28	
	ϕVn^c (kN)	Vu^f (kN)		ϕVn (kN)	Vu (kN)	
	997.18	127.16		983.56	127.16	
Max. minus bending moment	ϕPn (kN)	Pu (kN)		ϕPn (kN)	Pu (kN)	
	10803.16	1815.58		11097.47	1815.58	
	ϕMn (kN·m)	Mu (kN·m)		ϕMn (kN·m)	Mu (kN·m)	
	1343.37	225.72		1379.68	225.72	
	ϕVn (kN)	Vu (kN)		ϕVn (kN)	Vu (kN)	
	1004.54	192.19		990.93	192.19	
Max. axial force	ϕPn (kN)	Pu (kN)		ϕPn (kN)	Pu (kN)	
	12973.65	1781.06		13377.12	1781.06	
	ϕMn (kN·m)	Mu (kN·m)		ϕMn (kN·m)	Mu (kN·m)	
	1199.41	164.58		1236.11	164.58	
	ϕVn (kN)	Vu (kN)		ϕVn (kN)	Vu (kN)	
	1002.56	345.59		988.94	345.59	

^a ϕPn , Design axial force(kN)

^b ϕMn , Design bending moment(kN·m)

^c ϕVn , Design shear force(kN)

^d Pu , Required axial force(kN)

^e Mu , Required bending moment(kN·m)

^f Vu , Required shear force(kN)

Fig. 15. Interface of cross section review module

구축하였다. 결과 분석 모듈에서는 이론식을 이용한 안정성검토와 유한요소해석 결과를 이용한 안정성 검토가 가능하도록 하였다.

세그먼트 라이닝의 단면 검토는 산정된 부재력의 정과 부의 최대 모멘트와 그 위치에서의 축력을 조합한 것과 최대 축력으로 한다(日本鐵道總合技術研究所, 2003).

본 연구에서는 상기 기술한 지반조건과 단면검토 조건에 대하여 단면 검토를 수행하였으며 프로그램 자체적으로 작성된 P-M상관도를 이용하여 단면의 안전성을 검토하였다.

본 연구에서는 지하수위가 지표면에 위치한 경우에 대하여 이완도압 하중에 의한 부재력 산정 결과를 적용하였다. 상용 단면검토 프로그램과 개발 프로그램의 단면검토 결과를 비교하였으며 검토 결과를 Table 7에 제시하였으며 개발된 프로그램을 이용한 단면검토 모듈은 Fig. 15와 같다.

해석 대상 단면에 대한 단면검토 결과 본 연구에서 개발된 프로그램을 적용한 결과와 상용 단면 검토 프로그램을 적용한 계산 결과는 1~2%의 미소한 차

이를 보였으며, 이는 프로그램 내부 연산 과정에서 소수점 이하의 숫자를 취급하는데 있어서의 차이에서 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 지식기반형 쉘터널 자동화 설계 시스템 개발에 관한 내용을 다루었다. 시스템 개발을 위해 관련 선행연구를 통해 그 적용성이 확인된 바 있는 인공지능망 적용기법을 도입하였으며, 그 외에 각종 지식기반의 설계 자동화 연구를 통해 제한된 시공조건에 한해 터널 설계와 시공 중 터널 안정성 평가가 가능한 시스템을 개발하였다. 구축된 시스템은 향후 대상 시공조건 범위의 확장을 통하여 기존의 설계과정을 개선한 효율적인 수단으로 활용될 것으로 기대된다. 구체적인 내용은 다음과 같다.

1. 입력 모듈에서는 해석 및 설계 대상이 되는 지층조건 및 세그먼트 라이닝의 제원과 분할 정보 등을 입력 하고 입력된 정보를 바탕으로 최종 설계하중

을 자동으로 산정해 주도록 구성하였다.

2. 구조해석 모듈에서는 입력 모듈에서 입력된 정보를 바탕으로 세 가지 이론식을 이용한 부재력 산정 및 2 Ring-beam 모델을 이용한 유한요소해석을 수행하였으며 지식기반형 인공신경망 모듈을 구성하여 부재력 산정을 보다 신속하고 정확하게 할 수 있도록 구성하였다.
3. 결과 보기 모듈에서는 구조해석 모듈에서 수행된 결과를 각 해석방법별 및 각 부재력 별로 표현이 가능하도록 구성하였으며 각각의 해석 결과를 상호 비교할 수 있도록 구성하였다.
4. 결과 분석 모듈에서는 구조해석 모듈에서 수행된 결과와 입력모듈에서 입력된 정보를 바탕으로 세그먼트 라이닝의 안정성 검토를 수행하였으며, P-M 상관도를 활용한 분석과 세그먼트 라이닝의 변형에 대한 분석을 수행할 수 있도록 구성하였다.
5. 상대강도효과 개념을 이용하여 세그먼트 라이닝에 작용하는 부재력을 산정한 결과 영향인자들의 상대적인 영향도는 부재력의 종류에 따라 다르게 나타났다. 전단력의 경우에는 점착력, 포아송비, 축압계수 순으로 영향도가 큰 것으로 나타났으나, 모멘트의 경우에는 내부마찰각, 축압계수, 터널직경 순으로 영향도가 큰 것으로 나타났다. 또한 축력의 경우에는 점착력, 단위중량, 축압계수 순으로 영향도가 큰 것으로 나타났다.
6. 구축한 인공신경망을 이용하여 영향인자들의 상대적인 영향도 평가결과 출력변수에 따라 영향인자들의 영향도 순위가 다르게 나타났으며 같은 출력변수에 대해서도 입력변수의 적용범위에 따라 영향인자들의 상대적인 영향도가 다르게 나타났다.
7. 인공신경망 시스템에 대한 검증 결과 상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 부재력 결과와 99%이상 일치하는 것으로 검증되어 장대화 및 대단면화된 터널의 해석 및 설계에 효과가 극대화 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E09) - ”세그먼트 라이닝의 지식 기반형 자동화 설계 시스템 개발”와 “해저터널 기술개발”(과제번호 13건설연구T01) - “Mechanical-Hydraulic Coupling이 고려된 BIM 기반 하의 안정성 자동화 해석 기술”의 일환으로 작성되었습니다.

References

1. Bae, G.J., Shin, H.S., Kim, D.G., Chang, S.H., Lim, J.J., Lee, G.P., Choi, S.W., KICT (2005), “Development of technologies for minimizing and preventing the disaster on tunnel construction 2”, KICT, pp. 73-87.
2. KTA (2008), “3rd Mechanized tunnel construction tunnel design service technical conference”, KTA, pp. 3-7, 393-399, 457-458.
3. Yoo, C.S., Kim, J.M., Kim, S.B., Jung, H.Y. (2006), “Tunnel design/construction risk assessment based on GIS-ANN”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 1C, pp. 63-72.
4. Yoo, C.S., Kim, S.B., Yoo, K.H. (2008), “Development of IT-based tunnel design system”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 2, pp. 153-166.
5. Yoo, C.S., Jeon, H.M. (2012), “A comparative study on methods for shield tunnel segment lining sectional forces”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 3, pp. 159-181.
6. Yoo, C.S., Jeon, Y.W., Kim, J.H., Park, Y.J., Yoo, J.H. (2004), “Development and implementation of a GIS-based tunnelling risk management system”, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 20, No. 1, pp. 49-59.
7. Chang, S.H., Lee, G.P., Choi, S.W., Bae, G.J.

- (2011), "State of the art of segment lining in shield tunnel and statistical analysis of its key design parameters", *Journal of Korean Society of Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 6, pp. 427-438.
8. Japan society of civil engineers (2007), *Standard specifications for tunneling-2006 : Shield tunnels*, Japan society of civil engineers.
9. Kim, C.Y., Bae, G.J., Hong, S.W., Park, C.H., Moon, H.K., Shin, H.S. (2001), "Neural network based prediction of ground surface settlements due to tunneling", *Computers and Geotechnics*, Vol. 28, pp. 517-547.
10. Duddeck, H., Erdmann, J. (1985), "Structure design for tunnels", *Tunnel82, Proceedings of the 3rd international symposium*, Brighton, 7-11 June 1982, pp. 83-91.
11. International Tunnelling Association Working Group No. 2. (2000), "Guidelines for the design of shield tunnel lining", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 303-331.
12. Muirwood, A.M. (1975), "The circular tunnel in elastic ground", *Geotechnique*, Vol. 25, No. 1, pp. 115-127.
13. Mark Hudson Beale, Martie T. Hagan, Howard B. Demuth (2013), *Neural Network Toolbox User's Guide*, Mathwork Inc.
14. Jiao, Y., Hudson, J.A. (1995), "The fully-coupled model for rock engineering system", *Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, Vol. 32, Issue 5, pp. 491-512.
15. Yang, Y., Zhang, Q. (1997), "A hierarchical analysis for rock engineering using artificial neural networks", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 30, Issue 4, pp. 207-222.
16. Yang, Y., Zhang, Q. (1998), "The application of neural networks to rock engineering system (RES)", *Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 35, Issue 6, pp. 727-745.