J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc 18(1)13-30(2016)
http://dx.doi.org/10.9711/KTAJ.2016.18.1.013
eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

# TBM 세그먼트 라이닝 최적 설계 시스템 개발

우승주[1] · 정은목[2] · 유충식[3]*

[1]비회원, 성균관대학교 글로벌건설엔지니어링학과 석사과정
[2]비회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정
[3]정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

# Development of optimized TBM segmental lining design system

Seungjoo Woo[1], Eunmok Chung[2], Chungsik Yoo[3]*

[1]Graduate Student, Dept. of Global Construction Engineering, Sungkyunkwan University
[2]Graduate Student, Dept. of Global Construction Engineering, Sungkyunkwan University
[3]Professor, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan University

**ABSTRACT:** This paper concerns the development of an optimized TBM segmental lining design system for a subsea tunnel. The subsea tunnel is normally laid down under the sea water and submarine ground which consists of soil or rock. The design system is the series of process which can predict segmental lining member forces by ANN (artificial neural network system), analyze suitable section for the designated ground, construction and tunnel conditions. Finally, this lining design system aims to be connected with a BIM system for designing the subsea tunnel automatically. The lining member forces are predicted based on the ANN which was calculated by a FEM (finite element analysis) and it helps designers determine its segmental lining dimension easily without any further FE calculations.

**Keywords:** TBM Tunnel, Segmental lining design, FEM, 2 Ring Beam-Spring Model, ANN

**초 록:** 본 연구에서는 해저 터널의 특수성을 고려한 TBM 세그먼트 라이닝의 최적 설계 시스템을 개발하였다. 해저 터널은 일반적으로 일정 수압 하의 토사나 암반 등으로 구성된 해저 지반 내에 시공된다. 본 설계 시스템은 특정 해저 터널 단면에서의 지반 조건, 시공 조건 및 터널 조건을 고려하여 인공신경망 기반의 세그먼트 라이닝 부재력 예측 시스템을 구축하고, 시공성이 확보된 단면 DB를 구축하여 해저터널에서 최적 단면 설계가 가능하도록 구성하였다. 결과적으로 본 시스템은 해저 터널 설계에 사용되는 BIM과 연동되어 자동으로 설계가 가능하도록 하였다. 단면 검토 및 설계에 사용되는 세그먼트 라이닝 부재력 예측은 유한요소해석을 토대로 구축한 인공신경망을 통해 일반화한 후 BIM 시스템에 접목시켜 별도의 추가 해석이 필요없이 유사 단면의 해저 터널 설계에 적용이 가능하도록 하였다.

**주요어:** TBM 터널, 세그먼트 라이닝 설계, 유한요소해석, 2링빔–스프링 모델, 인공신경망

## 1. 서 론

토목 공학 기술이 발전함에 따라 초장대 교량, 초장대 터널 등의 시공 및 설계 사례가 늘고 있으며, 글로벌화로 인한 물리적·지리적 장애물을 극복하고자 최신 토목 기술들이 적용되고 있는 추세이다. 최근 전 세계적으로 교통 수단의 발달과 더불어 해협 등과 같은 지리적 장애물에 대한 극복 수단으로 해상 교량이나 해저 터널의 수요가 늘고 있으며 이에 대한 타당성 검토 및 설계·시공 등의 사례가 늘고 있다. 이에 부합한 터널 기술의 발달은 해저 터널과 같은 특수 조건에서의 설계·시공을 가능하게 하고 있으며 실제로 터키나 일본, 영국 등의 선진국에서는 해저 터널을 시공 혹은 운용 중에 있다. 또한 우리 나라에서도 한중 해저 터널, 한일 해저 터널 등에 대한 타당성 연구가 활발히 진행되고 있으며 이와 같은 해저 터널에 대한

***Corresponding author:** Chungsik Yoo
E-mail: csyoo@skku.edu

**Received** November 10, 2015; **Revised** December 4, 2015; **Accepted** December 14, 2015

www.kci.go.kr

Copyright ⓒ2016, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativescommons.org/license/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지속적인 관심과 연구 결과는 추후 제주도, 중국 및 일본으로의 해저 터널을 통한 육로 연결을 현실로 이루어낼 것으로 판단된다. 해저 터널은 계획 수립시 장대화·대단면화되는 조건으로 인해 여러 가지 터널 시공법 중 TBM (Tunnel Boring Machine) 터널로 계획 및 시공되는 것이 일반화되고 있다. 장대 TBM 터널에 있어서 공사비의 대부분을 차지하고 있는 것은 지보재로 사용되는 세그먼트 라이닝이며, 이에 대한 설계 최적화는 TBM 터널의 경제적인 설계·시공을 가능하게 할 것으로 판단된다. 특히 본 논문에서는 해남과 제주를 연결하는 제주 해저 터널에 대한 세그먼트 라이닝의 설계를 자동화하여 설계자가 쉽고 정확하게 세그먼트 라이닝의 단면을 결정하도록 하는데 목적을 두고 있다.

TBM 터널에서 세그먼트 라이닝은 영구적인 지보 기능을 하는 구조체이고, 라이닝 설계 시 설계자는 라이닝에 적용되는 하중들에 대해서 안전측으로 두께, 철근배근 등을 결정하고 있다(Lee et al., 2015). TBM 터널의 설계과정에서 설계자는 목적물의 지반조건, 시공 조건 및 터널 조건을 토대로 이에 적합한 세그먼트 라이닝의 단면과 철근량 등을 경험적인 방법에 의해 산정한 후 수치해석이나 이론해 등을 이용하여 부재력을 산출하고 이 부재력에 대한 단면 검토를 수행하여 설계에 대한 적합 여부를 판단하게 된다. 이때 수치해석을 통해 부재력을 산출하는 방법은 대상구간의 복잡한 지질특성 및 시공조건을 반영하여야 한다. 그러나 터널이 해저 조건에 있고 장대화·대단면화 되는 경우 실제 현장 데이터를 입수하는데 한계가 있고 다량의 지반정보 및 설계정보를 분석해야하므로 실제적인 해석에 있어서 시간과 비용의 제약을 초래한다. 이러한 문제를 개선하여 효율적인 터널설계를 수행하기 위하여 본 연구에서는 해저 터널의 TBM 세그먼트 라이닝 설계의 공통적인 부분을 단순화하고 적정한 단면 DB를 구축하여 최적 단면을 설계할 수 있게 함으로써 설계자가 시간과 비용을 절약할 수 있도록 하였다.

**Table 1.** Symbols used in this paper

| Symbol | Description | Symbol | Description |
|---|---|---|---|
| $\gamma_s$ | Unit weight of ground | $E_s$ | Young's modulus of ground |
| $\upsilon_s$ | Poisson's ratio of ground | $\phi$ | Internal friction angle of ground |
| $C$ | Cohesion of ground | $K_0$ | Lateral coefficient |
| $D_c$ | Centroid diameter of lining | $D_i$ | Inner diameter of tunnel |
| $H_c$ | Cover depth of ground | $H_w$ | Depth of seawater |
| $L$ | Length of lining segment | $h$ | Thickness of lining segment |
| $P_{vc}$ | Vertical earth pressure at tunnel crown | $P_{vr}$ | Vertical earth reaction pressure at tunnel invert |
| $B$ | Width of relaxed range over the tunnel | $M$ | Bending moment |
| $E_c$ | Elastic modulus of concrete | $G_c$ | Modulus of rigidity of concrete |
| $\upsilon_b$ | Poisson's ratio of bolt | $A_b$ | Area of bolt |
| $\theta$ | Rotation angle | $I$ | Secondary moment of segment |
| $d$ | Effective depth of section | $x$ | Depth between compressive extreme fiber and neurtral axis |
| $b'$ | Joint distance | $b$ | Segment width |
| $\phi P_n$ | Design axial force | $P_n$ | Required axial force |
| $\phi M_n$ | Design bending moment | $M_n$ | Required bending moment |
| $\phi V_n$ | Design shear force | $V_n$ | Required shear force |

www.kci.go.kr

본 연구에서 개발된 라이닝 설계 프로그램에서는 해저 터널에 대한 지반 조건, 시공 조건 및 터널 조건을 입력하고, 입력된 설계 조건에 대한 부재력을 산정함에 있어서 ANN (Artificial Neural Network, 인공신경망) 기법을 적용하였다. ANN은 Yoo et al. (2004; 2006; 2008)로부터 ANN-FEM (Finite Element Method, 유한요소해석) 연계 기법을 적용하여 위험도 평가를 용이하게 하는 연구를 통해 그 효용성이 입증된 바 있고, Jeong et al. (2014)의 연구를 통해 TBM 세그먼트 라이닝의 시공 중 안정성 평가 및 거동 예측에 관한 연구를 수행하여 그 적용성과 효율성을 확인한 바가 있다. 또한 학습 DB구축 시 효율성을 제고하기 위하여 Bae et al. (2005), Jiao et al. (1995), Kim et al. (2001)에 의해 연구가 수행된 상대강도효과(RSE) 분석과 Yoo et al. (2007)이 수행한 상대적 중요도(RI) 분석을 수행하여 보다 효율적인 ANN 시스템(System) 을 구축하고, 그 입력값이 부재력에 미치는 영향 정도를 RSE (Relative Strength Effect)와 RI (Relative Importance)를 통해 다각적으로 분석하고자 하였다. 결론적으로 본 프로그램은 시공성이 고려된 단면을 선정하고, 이에 대한 단면 DB 구축 후 해당 단면들을 차례로 단면 검토하여 설계자가 지정한 설계 조건에 있어서 가장 경제적인 단면을 설계하고 그 결과값을 출력하도록 하였다. 이와 더불어 본 프로그램의 향후 적용성 검증을 위해 현재 연구되고 있는 해남-제주간 해저터널의 설계에 적용하여 실제 해저 터널 설계·시공 단계에서 단면의 부재력 산정 및 안정성을 검토하였다. 이 프로그램은 추후 BIM과 연동되어 해저 터널 설계시 사용자가 별도의 구조해석 없이 원하는 위치의 설계조건을 토대로 경제적인 단면을 정확하고 신속하게 도출할 수 있도록 하여, 해저 터널 설계에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 기호 설명의 중복을 피하기 위해 아래 Table 1에 본 논문 내 주로 사용된 기호를 정리하여 나타냈다.

## 2. TBM 세그먼트 라이닝 최적 설계 시스템

### 2.1 시스템 개요

본 시스템은 설계자의 경험에 의한 설계에서 벗어나 보다 정확하고 신속한 설계가 가능하도록 하여 해저 터널 설계의 경제성과 안정성을 도모하고 추후 해저터널 BIM 시스템과 연계하여 손쉽게 세그먼트 라이닝의 단면 설계가 가능하도록 하는데 목적이 있다. 시스템의 구성은 크게 입력모듈, 단면검토 모듈,

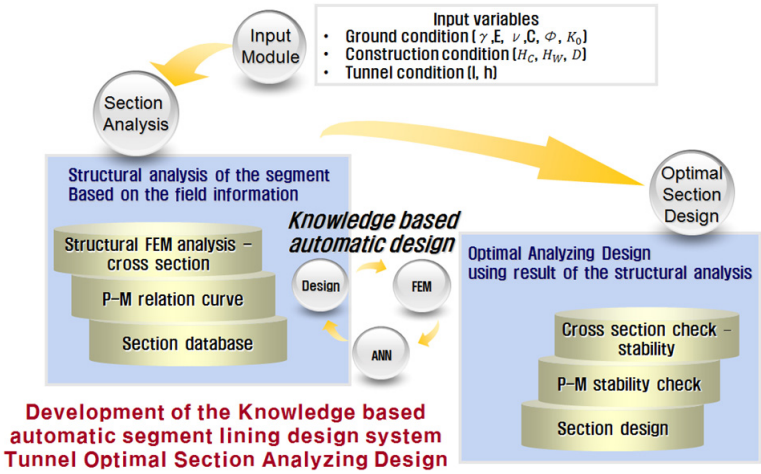



**Fig. 1.** System epitome

www.kci.go.kr

라이닝 최적단면 설계모듈 등 세 개의 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈에 대한 상세한 설명은 다음 절에 기술하였다.

한편, 본 시스템의 개발환경은 윈도우 기반의 응용프로그램으로서 향후 시스템 확장 시 여타의 소프트웨어와의 연계가 용이하도록 하기 위해 인터페이스와 구축 및 연산에 탁월한 Microsoft사의 C#을 기반으로 코드화 작업이 되었으며 .NET Framework 기반으로 설계되었다. Fig. 1은 본 시스템의 개념도를 나타냈다.

## 2.2 시스템 구성

해저 조건에 대한 TBM 터널의 설계·시공에 있어서 구축된 ANN을 바탕으로 부재력을 예측하고 예측된 부재력에 대해 구조 검토를 수행하고 라이닝 최적단면 설계 로직을 통해 TBM 라이닝 세그먼트를 설계하도록 하였다. 본 절에서는 FEM과 이와 접목된 부재력 예측을 위한 ANN 구축 과정을 다루었다.

### 2.2.1 FEM(유한요소해석)을 이용한 ANN(인공신경망) 학습 DB 구성

ANN은 설계 정보를 바탕으로 하는 단위중량, 변형계수, 포아송비, 점착력, 마찰각, 토압계수, 토피고, 수심, 터널직경, 세그먼트 길이 및 세그먼트 두께의 11개의 입력값을 정규화하여 입력하고 단면 검토를 위한 최대모멘트부와 최대축력부의 모멘트, 축력, 전단력과 최대전단부의 축력, 전단력의 8개 데이터로 구성된 최대부재력의 정규화 값을 출력하도록 구성하였다. 이 때 ANN은 앞서 기술한 8개의 최대부재력별로 각각 구축하여 정확도 높은 단면 검토가 가능하도록 하였다. ANN 구축시 기본이 되는 구조해석은 2링빔-스프링 모델을 사용하였고 유한요소해석에는 범용구조해석 프로그램인 Midas civil 2012+(Midas, 2012)를 사용하였다. 다음 Fig. 2는 ANN 학습 DB를 확보하기 위해 선정된 설계조건의 해석을 위한 2링빔-스프링 모델을 설명하고 있는데 이 그림에서와 같이 각 해석 조건을 고려하여 작용 하중을 산정한 후 터널의 조건에 맞는 이음부 스프링 계수를 계산하고 FEM을 수행하여 단면검토를 위한 TBM 세그먼트 라이닝의 최대부재력을 산정하였다. 산정된 부재력은 ANN 구축시 학습 DB로 사용하였다.

일반적으로 세그먼트 라이닝 설계시 이론해법을 이용하기도 하나 근래 수치해석 방법의 발달로 이론해를 이용한 해석적 방법은 실무에서는 개략적인 부재력을 산정하기 위해서만 주로 이용되고 있다. 수치해석 방법에는 지반을 반력 스프링으로 고려하는 빔-스프링(beam-spring) 모델과 탄소성 요소를 고려하는 연속체 모델이 있으며 세그먼트 라이닝의 부재력 산

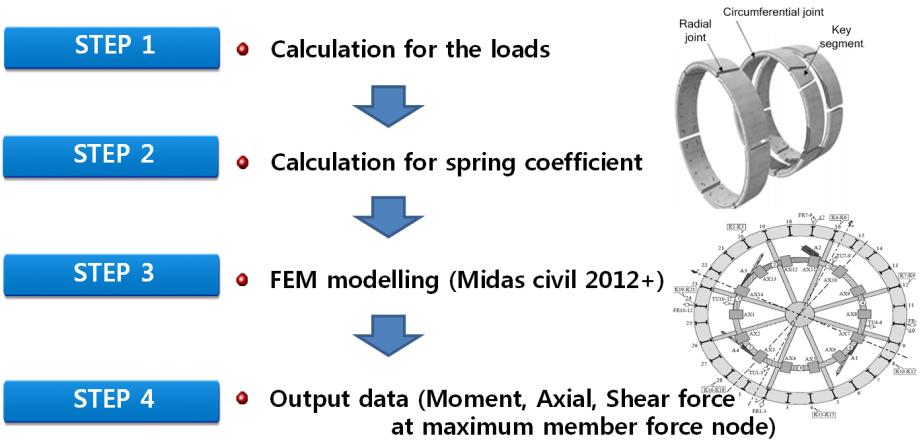



Fig. 2. FEM analyzing flow for 2 ring beam-spring model

www.kci.go.kr

정에는 주로 빔-스프링 모델이 사용되고 지반침하거동과 같은 해석에는 연속체 모델이 사용된다. 본 시스템에서는 정확한 부재력 계산을 위해 수치해석을 이용한 2링빔-스프링 모델을 활용하였고 그 결과를 ANN에 적용하여 프로그램 내에서 주어진 설계 조건에 대한 최대부재력이 자동 계산되도록 하는 방식으로 구성하였다. 2링빔-스프링 모델에서는 동일 링(Ring) 내의 세그먼트 간 연결을 모멘트에 대한 회전스프링을 가지는 것으로 고려하며, 링간 이음부는 반경방향과 접선방향으로 각각 전단 스프링을 이용하여 지그재그로 연결하고 지반반력스프링은 링을 구성하는 절점에 직각으로 1 m 이격하여 설치했다(KTA, 2008).

### (1) 이음부 스프링 상수의 결정

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

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

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

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

보의 변형 이론해에 의한 세그먼트 축 방향 이음의 전단강도 산정법은 식 (3), 식 (4)와 같이 나타냈다. 세그먼트 링간 이음부의 전단 스프링 계수($K_s$)는 반경방향과 접선방향 두 방향으로 나누어서 산정하게 되는데 Fig. 4를 바탕으로 반경반향의 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).

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

$$K_{st} = \frac{b'hG_c}{b} = \frac{b'hE_c}{2b(1+v_b)} \tag{4}$$

### (2) 작용 하중

세그먼트에 작용하는 최종 설계 하중으로 연직토압, 수평토압, 수압 등을 고려하였으며 연직토압은 미고결층(토사)과 암반으로 구분하여 미고결층의 경우는 식 (5)의 Terzaghi 이완하중 산정식을 적용하고 암반의 경우에는 Choi et al. (2015)에서 적용한 Unal, Q-system, Terzaghi 이완하중식 중 가장 보수적으로 토압을 계산할 수 있도록 점착력을 고려하지 않은 Terzaghi 이완하중식을 적용하였다. 그 밖에 수평토압이나 수압 등의 하중산정은 ITA (2000)의 기준을 적용하였다. 프로그램에 적용한 점착력을 고려하지 않은 Terzaghi의 이완토압식은 식 (6)과 같다.

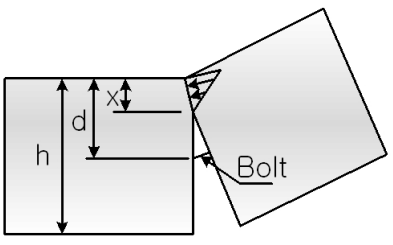



Fig. 3. Establishment condition of rotational spring constant

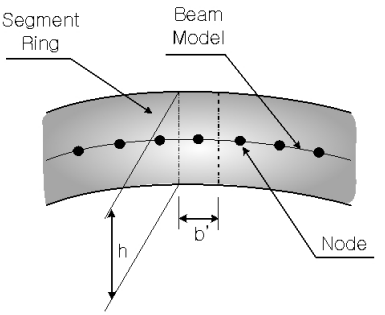



Fig. 4. Establishment condition of shear spring constant

www.kci.go.kr

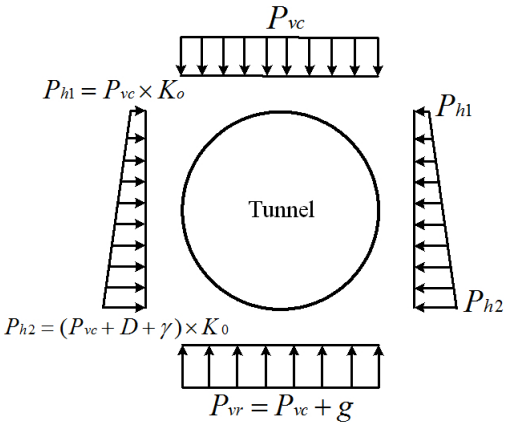



**Fig. 5.** Earth pressure model

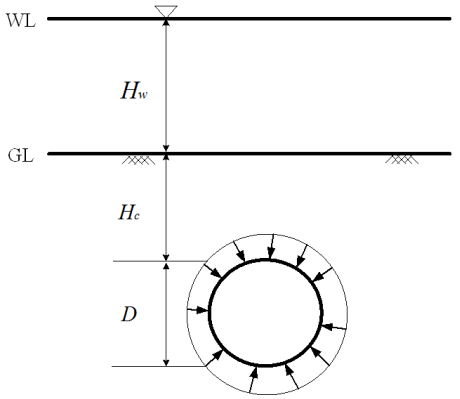



**Fig. 6.** Earth pressure model

$$P_{vc} = \frac{B(\gamma - C/B)}{K_0 \tan\phi} \cdot \left(1 - e^{-K_0 \tan\phi \cdot \frac{H_c}{B}}\right) \quad (5)$$

$$P_{vc} = \frac{B\gamma}{K_0 \tan\phi} \cdot \left(1 - e^{-K_0 \tan\phi \cdot \frac{H_c}{B}}\right) \quad (6)$$

수압은 암반의 경우에도 절리, 틈새 등 불연속면에 의해 수압이 작용될 수 있으므로 토수 분리의 개념을 적용하여 Effective stress 개념으로 토압과 수압을 따로 계산하여 Fig. 5, Fig. 6과 같이 각각 적용 하였다. 따라서 본 논문에서는 해저터널의 수압을 모사하기 위해 토피고와 수심을 합한 값에 물의 단위중량을 곱하는 방법으로 수압을 반영하였고, 해저 터널과 같은 고수압 조건에서 원형의 형상으로 인한 부재력 영향을 고려하기 위해 하중조합에 따른 모든 경우를 비교하여 최대부재력을 산정함으로써 해저 터널의 조건에서 라이닝 형상으로 인한 부재력 감소에 미치는 영향도 결과 값에 고려될 수 있도록 하였다.

### (3) 하중 조합

상기 절에 언급한대로 해저 터널에 작용하는 수압 및 토압의 영향을 적절히 고려하기 위해 콘크리트 구조설계 기준 2012(KCI, 2012)에 준하는 5개의 하중조합을 고려하여 부재력 계산에 Table 2와 같이 적용하였고, 각 Case 별 최대 부재력을 최대모멘트부, 최대축력부, 최대전단부로 구분 산출하여 DB화하고 ANN을 구축하였다.

### (4) 유한요소법(FEM)을 이용한 구조해석

2링빔-스프링 모델을 통해 라이닝 세그먼트를 1개의 링당 50개의 Beam 요소로 모델링하고 세그먼트와 세그먼트를 연결하는 이음부는 회전 스프링 요소로

**Table 2.** Load combination factor (KCI, 2012)

| Description | Dead Load | Earth pressure | | Water pressure |
|---|---|---|---|---|
| | | Vertical | Horizontal | |
| Case 1 | 0.9 | 0.9 | 1.6 | 0.9 |
| Case 2 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.9 |
| Case 3 | 1.2 | 1.6 | 1.6 | 1.2 |
| Case 4 | 1.2 | 1.6 | 0.8 | 1.2 |
| Case 5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

www.kci.go.kr

링과 링을 연결하는 이음부는 전단 스프링 요소로 모델링하였다. 해석케이스는 가상해저터널에 적용되는 토피고, 수심, 터널직경을 포함하는 218개의 Case를 Random 선정하여 각각의 Case에 대한 최대부재력을 산출하고 DB화 하였다. 선정 Case에 대한 입력값의 범위는 Table 3에 나타냈다. 라이닝 링에 대한 모델링은 각 세그먼트의 중량 및 크기를 고려하여 4.8 m 터널은 1+5분할, 7 m 터널은 1+6분할, 본선터널인 8.9 m와 10 m 터널은 1+8분할, 13 m 터널은 1+10분할을 적용하였다. 각 해석 Case 별 설계 조건은 Table 4에 나타냈고 유한요소해석을 수행하여 산출된 최대부재력은 Table 5에 나타냈다.

### 2.2.2 FEM 구조해석 결과를 이용한 ANN 엔진 구축

본 프로그램에서는 임의 지층조건에 대한 신속하고 경제적인 해석을 위해 ANN을 이용하였고 ANN은 지반조건, 시공조건 및 터널조건을 입력값으로 고려하고 이를 기준으로 각 입력값을 독립적으로 218개의 Random 해석 조건을 구축하여 입력값의 DB를 구축하였으며 이를 토대로 상용 유한요소해석 프로그램인

**Table 3.** The range of input value considered for ANN

| Desc'n | Ground condition | | | | | | Construction condition | | | Tunnel condition | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\gamma_s$ (kN/m$^3$) | $E_s$ (MPa) | $\nu_s$ | $C$ (kPa) | $\phi$ (deg) | $K_0$ | $D_i$ (m) | $H_c$ (m) | $H_w$ (m) | $L$ (m) | $h$ (m) |
| Min. | 18.5 | 16 | 0.20 | 0 | 30 | 0.5 | 4.8 | 20 | 0 | 1.0 | 0.4 |
| Max. | 26.8 | 35000 | 0.99 | 6000 | 45 | 2.0 | 13.0 | 100 | 200 | 1.5 | 0.6 |

**Table 4.** Input value for FEM analysis

| Case | Ground condition | | | | | | Construction condition | | | Tunnel condition | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\gamma_s$ (kN/m$^3$) | $E_s$ (MPa) | $\nu_s$ | $C$ (kPa) | $\phi$ (deg) | $K_0$ | $D_i$ (m) | $H_c$ (m) | $H_w$ (m) | $L$ (m) | $h$ (m) |
| 1 | 21.4 | 400 | 0.3 | 50 | 21 | 1 | 13 | 52 | 92 | 1.2 | 0.5 |
| 2 | 18.5 | 16 | 0.33 | 0 | 30 | 0.5 | 10 | 28 | 104 | 1.5 | 0.6 |
| 3 | 21.4 | 400 | 0.3 | 50 | 21 | 0.5 | 13 | 86 | 96 | 1.5 | 0.6 |
| | | | | | | | | | | | |
| 216 | 21.4 | 400 | 0.3 | 50 | 21 | 2 | 4.8 | 72 | 103 | 1 | 0.4 |
| 217 | 26.8 | 35000 | 0.2 | 6000 | 45 | 0.5 | 4.8 | 36 | 81 | 1.5 | 0.6 |
| 218 | 24.7 | 8000 | 0.24 | 700 | 38 | 0.5 | 4.8 | 96 | 128 | 1 | 0.4 |

**Table 5.** Maximum sectional member forces by FEM analysis

| Case | Max moment node | | | Max axial force node | | | Max shear force node | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Moment (kN·m) | Axial (kN) | Shear (kN) | Moment (kN·m) | Axial (kN) | Shear (kN) | Axial (kN) | Shear (kN) |
| 1 | 272.8 | 6710.6 | 321.0 | 147.7 | 7733.2 | 228.7 | 7086.3 | 651.6 |
| 2 | 1941.3 | 16287.7 | 160.9 | 952.0 | 22559.6 | 515.9 | 21043.2 | 2301.5 |
| 3 | 740.3 | 16315.9 | 1347.8 | 471.4 | 16655.9 | 1166.6 | 16174.6 | 1383.1 |
| | | | | | | | | |
| 216 | 294.0 | 4599.6 | 171.6 | 271.5 | 6551.8 | 354.7 | 6439.2 | 684.4 |
| 217 | 365.5 | 7328.9 | 467.1 | 365.5 | 7328.9 | 467.1 | 6694.9 | 745.6 |
| 218 | 261.0 | 7984.2 | 610.9 | 205.0 | 8186.9 | 592.3 | 7806.5 | 729.9 |

www.kci.go.kr

Midas civil 2012+(Midas, 2012)를 이용하여 최대모멘트부와 최대축력부의 모멘트, 축력, 전단력 및 최대전단부의 축력, 전단력으로 구성된 결과 DB를 함께 구축하였다. 이와 같이 구축된 DB를 정규화하여 ANN을 각 최대부재력 별로 구축하여 최적화하고자 하였다. 최적화된 ANN의 구조를 이용하여 사용자가 임의 해저 터널 설계 조건을 입력하였을 때 별도의 수치해석을 수행하지 않더라도 자동으로 부재력을 정확히 예측하도록 하였다. 이를 위해서 ANN을 이용한 구조해석 예측 결과를 실제 유한요소 해석의 결과와 비교하여 타당성을 검증하였으며 결과적으로 본 프로그램을 이용함으로써 시간·공간의 제한을 받게 되는 기본 설계 단계에서 신속하고 정확하게 부재력을 산정할 수 있도록 하였다.

ANN 모델은 구축 방법의 하나인 역전파(Back Propaganda Neural Network) 알고리즘을 적용하였으며 이는 일반화된 델타 규칙을 적용한다. 이는 출력 뉴런들의 전체 자승오차를 감소시키기 위해 설계되었으며 오차의 최소값을 구하기 위해 가중치 표면의 기울기를 사용하는 최급 하강법이 사용된다. 오차를 계산하기 위한 알고리즘은 오차 표면의 기울기를 검사하는데 이는 오차 표면의 가장 큰 기울기의 방향을 찾는 것으로서 오차를 줄이기 위한 방향을 결정하는데 사용된다. 이 알고리즘은 가장 가파른 방향의 기울기에서 음의 부호를 갖는 기울기를 선택하여 신경망 뉴런의 가중치와 임계치의 조절을 통해 최소 오차의 지점을 찾아 가는 방법을 취한다. 본 연구에서는 이와 같은 이론을 바탕으로 입력 노드와 출력 뉴런 사이에

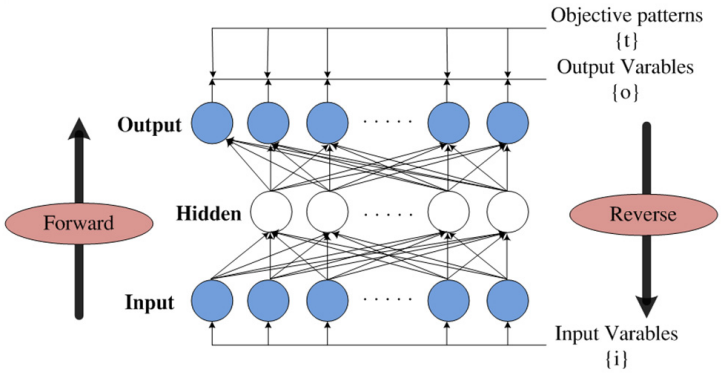



**Fig. 7.** Structure of ANN

**Table 6.** Training sequence for ANN

| Step | Description for training |
|---|---|
| 1 | Intialization for connection strength and critical function |
| 2 | Setting for the training pattern |
| 3 | Determining of $net_j$ for hidden layer |
| 4 | Determining of $net_k$ for output layer |
| 5 | Determining of delta($d_k$) for output layer |
| 6 | Determining of delta($d_j$) for hidden layer |
| 7 | Amending the connection strength and critical function between j of hidden layer and k of output layer |
| 8 | Amending the connection strength and critical function between i of input layer and k of output layer |
| 9 | Training for the all patterns |
| 10 | Termination under condition of designated error range |

www.kci.go.kr

하나의 은닉층이 존재하는 구조를 선택하였으며, 학습률, 모멘텀과 은닉층의 뉴런 수를 조절하여 최적화된 예측이 가능하도록 ANN 모델을 구축하였다. Fig. 7은 역전파 알고리즘의 ANN 구조를 나타냈으며 Table 6은 ANN의 학습과정을 나타냈다.

본 논문에서는 위에 기술한 ANN 개념을 바탕으로 가중치(W)와 바이어스(b)를 추출하여 공학적 연산이 가능한 연산모듈을 사용하였고 이에 대한 흐름도를 Fig. 8에 나타냈다. 본 논문에서는 다층 퍼셉트론 역전파 학습 알고리즘을 적용하여 ANN 학습을 진행하였다. ANN 구성을 위하여 총 218개 Random 설계 조건에 대해 세그먼트 라이닝에 작용하는 최대부재력을 산정하였다. 입력값 중 지반 조건은 설계 조건에 따라 Table 7과 같이 미고결층, 연약대 및 파쇄대, 암반 1등급~5등급의 7가지로 구분하였다. ANN 구축에 사용된 입력변수의 범위는 Table 8과 같다.

구축한 DB를 활용하여 학습을 수행한 ANN은 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 프로그램(Matlab, 2012)에 내장된 Tansig함수를 사용하였다(Beale et al., 2013).

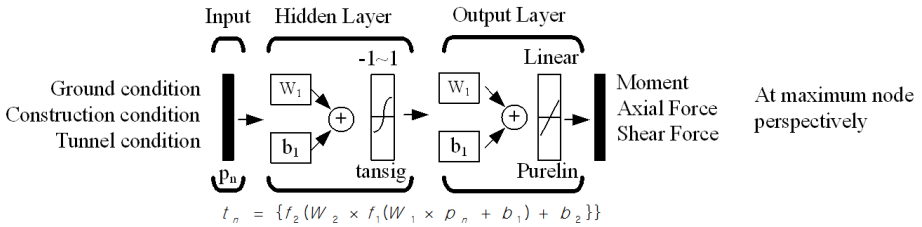



**Fig. 8.** Flow chart of establishing member forces using ANN system

**Table 7.** Ground condition variables considered

| Ground grade | | $\gamma_s$ (kN/m$^3$) | $E_s$ (MPa) | $\nu_s$ | $C$ (kPa) | $\phi$ (°) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Soil | | 18.5 | 16 | 0.33 | 0 | 30 |
| Weak / Failure | | 21.4 | 400 | 0.30 | 50 | 21 |
| Rock | I | 26.8 | 35000 | 0.20 | 6000 | 45 |
| | II | 25.7 | 22000 | 0.22 | 2000 | 40 |
| | III | 24.7 | 8000 | 0.24 | 700 | 38 |
| | IV | 23.2 | 1500 | 0.27 | 200 | 27 |
| | V | 21.4 | 400 | 0.30 | 50 | 21 |

**Table 8.** Range of design variables considered

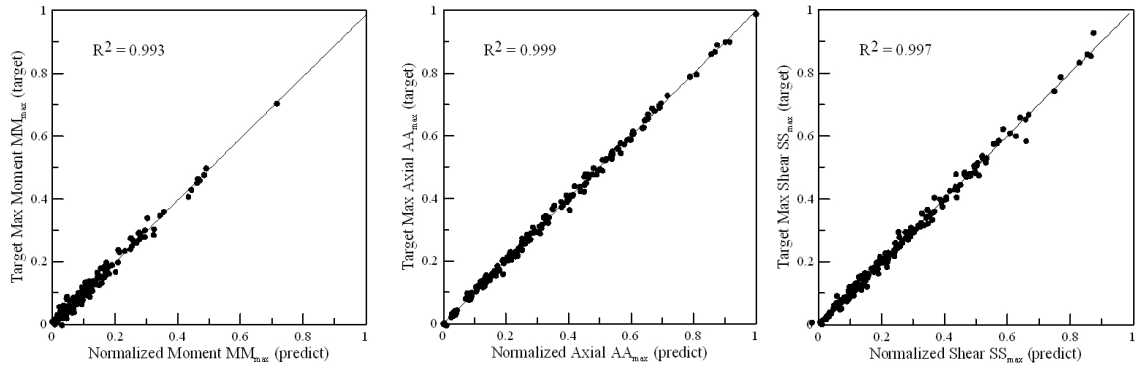
| Input factor | $D_i$ (m) | $H_c$ (m) | $K_o$ (−) | $H_w$ (m) | $L$ (m) | $h$ (m) | $\gamma_s$ (kN/m$^3$) | $E_s$ (MPa) | $\nu_s$ (−) | $C$ (kPa) | $\phi$ (°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Max. value | 13 | 100 | 2.0 | 200 | 1.5 | 0.6 | 26.8 | 35000 | 0.33 | 6000 | 45 |
| Min. value | 4.8 | 20 | 0.5 | 20 | 1 | 0.4 | 18.5 | 16 | 0.20 | 0 | 21 |

www.kci.go.kr

구축한 ANN 구조를 적용한 218개 학습조건에 대한 학습 결과는 대표적으로 최대 모멘트부의 모멘트와 최대 축력부의 축력, 최대 전단부의 전단력을 다음 Fig. 9와 같이 나타났다. Table 9는 결정계수($R^2$), 평균제곱근오차(RMSE), 평균절대오차(MAE) 등 세 가지 통계변수를 이용해 ANN의 학습 평가 결과를 보여준다. 이 학습 평가 결과는 최대모멘트부와 최대 축력부의 모멘트, 축력, 전단력 및 최대전단부의 축력, 전단력에 대한 학습결과 결정계수($R^2$)가 각각 0.993, 0.997, 0.966, 0.990, 0.999, 0.987, 0.998, 0.997로 나타나 뛰어난 학습률을 보이며 각 최대 부재력에 대한 ANN 예측 값과 학습에 사용된 값은 높은 상관관계를 보여 학습에 적용된 ANN이 2링빔-스프링 모델을 이용한 유한요소 해석 결과를 상당히 신뢰할 수준으로 적용하였음을 보여준다.

### 2.2.3 구축된 ANN DB의 정확도 검증

본 절에서는 ANN을 이용한 부재력 산정 시스템의 효율을 제고하고 정확도를 검증하기 위해 해석 Case의 20%에 해당하는 별도의 39개 Case를 Validation set으로 설정하고 이를 Table 10에 나타냈고 부재력 검증을 수행하여 그 결과를 Table 11에 나타냈다. 선정된 39개 케이스에서 ANN의 부재력 평균 예측 결과는 최대모멘트부의 모멘트에서 10.2%, 축력 2.8%, 전단력 9.5%이고, 최대축력부의 모멘트에서 10.0%, 축력 2.0%, 전단력 24.8%, 최대전단부의 축력에서 2.2%, 전단력에서 4.6%로 나타나 실제 예측 수준이 거의 차이가 없음을 알 수 있다.




(a) Bending moment at Max moment node (b) Axial force at Max axial node (c) Shear force at Max shear node

**Fig. 9.** Comparison of computed versus predicted values for validation

**Table 9.** Performance of ANN

| Classification | | $R^2$ (Coefficient of determination) | RMSE (Root Mean Square Error) | MAE (Mean Absolute Error) |
|---|---|---|---|---|
| Max Moment Node | Moment (kN·m) | 0.993 | 74.8 | -2.5 |
| | Axial force (kN) | 0.997 | 555.2 | 158.9 |
| | Shear force (kN) | 0.966 | 58.9 | 7.6 |
| Max Axial Node | Moment (kN·m) | 0.990 | 47.0 | 5.1 |
| | Axial force (kN) | 0.999 | 387.6 | -142.9 |
| | Shear force (kN) | 0.987 | 73.5 | -9.1 |
| Max Shear Node | Axial force (kN) | 0.998 | 478.3 | -44.0 |
| | Shear force (kN) | 0.997 | 56.0 | 2.4 |

www.kci.go.kr

**Table 10.** Input value for ANN verification

| Case | Ground condition | | | | | Construction condition | | | Tunnel condition | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\gamma_s$ (kN/m$^3$) | $E_s$ (MPa) | $\nu_s$ | $C$ (kPa) | $\phi$ (deg) | $D_i$ (m) | $H_c$ (m) | $H_w$ (m) | $L$ (m) | $h$ (m) |
| 1 | 24.7 | 8000 | 0.24 | 700 | 38 | 10 | 85 | 44 | 1 | 0.4 |
| 2 | 21.4 | 400 | 0.3 | 50 | 21 | 13 | 68 | 75 | 1.5 | 0.6 |
| 3 | 25.7 | 22000 | 0.22 | 2000 | 40 | 13 | 96 | 126 | 1.2 | 0.5 |
| 34 | 24.7 | 8000 | 0.24 | 700 | 38 | 4.8 | 34 | 138 | 1.2 | 0.5 |
| 35 | 24.7 | 8000 | 0.24 | 700 | 38 | 4.8 | 34 | 138 | 1.2 | 0.6 |
| 36 | 21.4 | 400 | 0.3 | 50 | 21 | 4.8 | 22 | 50 | 1.2 | 0.5 |

**Table 11.** Maximum sectional forces by ANN and FEM analysis for verification

| Case | | Max moment node | | | Max axial force node | | | Max shear node | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Moment (kN·m) | Axial (kN) | Shear (kN) | Moment (kN·m) | Axial (kN) | Shear (kN) | Axial (kN) | Shear (kN) |
| 1 | FEM | 282.0 | 7471.5 | 575.1 | 55.0 | 10036.0 | 525.0 | 9477.3 | 752.5 |
| | ANN | 235.0 | 7875.8 | 529.5 | 67.0 | 10080.4 | 640.2 | 9458.1 | 791.4 |
| | ERR | -16.7% | 5.4% | -7.9% | 22.0% | 0.4% | 21.9% | -0.2% | 5.2% |
| 2 | FEM | 2627.6 | 17613.0 | 101.9 | 1078.2 | 25081.6 | 442.5 | 22808.8 | 2763.0 |
| | ANN | 2632.2 | 17581.2 | 105.5 | 1106.3 | 25030.2 | 464.1 | 22755.2 | 2686.6 |
| | ERR | 0.2% | -0.2% | 3.6% | 2.6% | -0.2% | 4.9% | -0.2% | -2.8% |
| 3 | FEM | 1116.1 | 24882.0 | 1905.3 | 181.6 | 25242.2 | 1137.9 | 24608.5 | 2097.0 |
| | ANN | 1168.0 | 24489.9 | 1674.9 | 174.2 | 25580.6 | 1809.1 | 24553.9 | 2133.4 |
| | ERR | 4.7% | -1.6% | -12.1% | -4.0% | 1.3% | 59.0% | -0.2% | 1.7% |
| 37 | FEM | 195.4 | 5680.4 | 342.5 | 193.2 | 7365.4 | 514.8 | 7141.0 | 592.6 |
| | ANN | 240.0 | 5547.4 | 315.6 | 195.3 | 7047.0 | 418.9 | 6761.5 | 575.3 |
| | ERR | 22.8% | -2.3% | -7.9% | 1.1% | -4.3% | -18.6% | -5.3% | -2.9% |
| 38 | FEM | 252.4 | 5805.9 | 345.3 | 240.5 | 7511.9 | 528.3 | 5719.3 | 628.4 |
| | ANN | 233.4 | 5490.6 | 337.0 | 259.9 | 7518.6 | 448.5 | 6029.1 | 588.7 |
| | ERR | -7.5% | -5.4% | -2.4% | 8.0% | 0.1% | -15.1% | 5.4% | -6.3% |
| 39 | FEM | 250.9 | 3923.3 | 294.7 | 250.9 | 3923.3 | 294.7 | 2936.3 | 413.9 |
| | ANN | 211.8 | 3793.2 | 233.5 | 217.1 | 3889.4 | 170.2 | 3127.0 | 407.4 |
| | ERR | -15.6% | -3.3% | -20.8% | -13.4% | -0.9% | -42.3% | 6.5% | -1.6% |

## 2.3 프로그램 모듈 구성

본 프로그램은 입력 모듈, 단면검토 모듈, 최적단면 설계 모듈의 3 개의 모듈로 구성되어 있다. 입력모듈은 터널 해석 및 설계를 위한 기본정보를 입력하는 모듈로써 현장에서 확보한 지반조사 정보를 토대로 지반정보를 입력하며 시공조건을 고려한 시공정보 및 터널정보를 입력하도록 하고 추후 해저 터널 BIM과 연동하여 설계자가 선택한 지점의 설계 정보가 자동으로 입력되도록 할 계획이다. 단면검토 모듈은 콘크

www.kci.go.kr

리트 학회가 발행한 콘크리트 구조설계기준 2012 (KCI, 2012)를 적용하였으며 통상적으로 실제 설계에서 적용되고 있는 단주 설계법을 적용하여 작용 부재력에 대한 계수 축력과 계수 모멘트를 비교하여 단면의 안정성을 판단한다. 입력 모듈에서 입력된 세그먼트 두께 정보를 토대로 설계자가 원하는 세그먼트 두께의 단면들을 단면 DB 내에서 찾아 구조검토를 수행하고 그 결과를 표시하도록 하였다. Fig. 10에는 단면검토의 순서도를 나타냈다.

세그먼트 라이닝 설계는 해당 단면의 작용 축력-모멘트 조합에 의한 계수축력과 계수모멘트를 P-M 상관도에 나타내고 작용 부재력을 x-축에 모멘트, y-축에 축력으로 포인트로 나타낸 후 작용 부재력의 포인트가 단면 파괴선 내에 위치하는지의 여부를 검토하여 파괴선 내에 위치하는 경우에만 안정한 것으로 판단하는 로직으로 단면검토를 수행하게 하였다. 입력모듈에서 입력된 입력값에 따른 최대부재력을 이용하여 일반적인 강도설계법에 따라 P-M 상관도를 프로그램 자체에서 작성 가능하도록 구성하였으며 그 결과를 출력하도록 구성하였다.

본 프로그램에서는 해저 터널의 라이닝 설계를 위하여 기 구축된 단면 DB 상의 단면을 대상으로 단면검토를 수행하여 경제적인 라이닝 설계가 가능하도록 구성하였다. 결론적으로 최적 설계는 기 구축된 단면 DB 상의 모든 단면을 구조검토하고, 검토 결과 적합하다고 판단된 단면 중 가장 경제적인 단면을 선정하여 출력한다. 설계자가 최적 설계된 단면 정보를 출력창을 통해 볼 수 있도록 하고, P-M 상관도를 출력하여 제시된 단면이 적절한지 시각적으로 검토할 수 있도록 하였다. 이러한 프로그램의 전체적인 흐름과 실제 화면을 Fig. 11에 나타냈다.

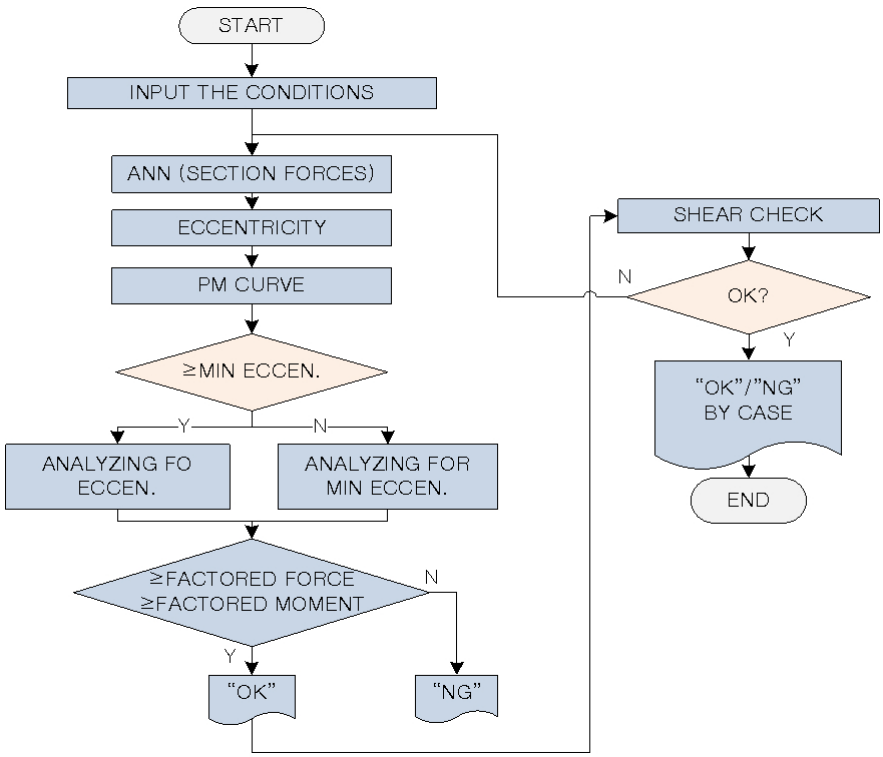



**Fig. 10.** Flow of the checking the sectional stability

www.kci.go.kr

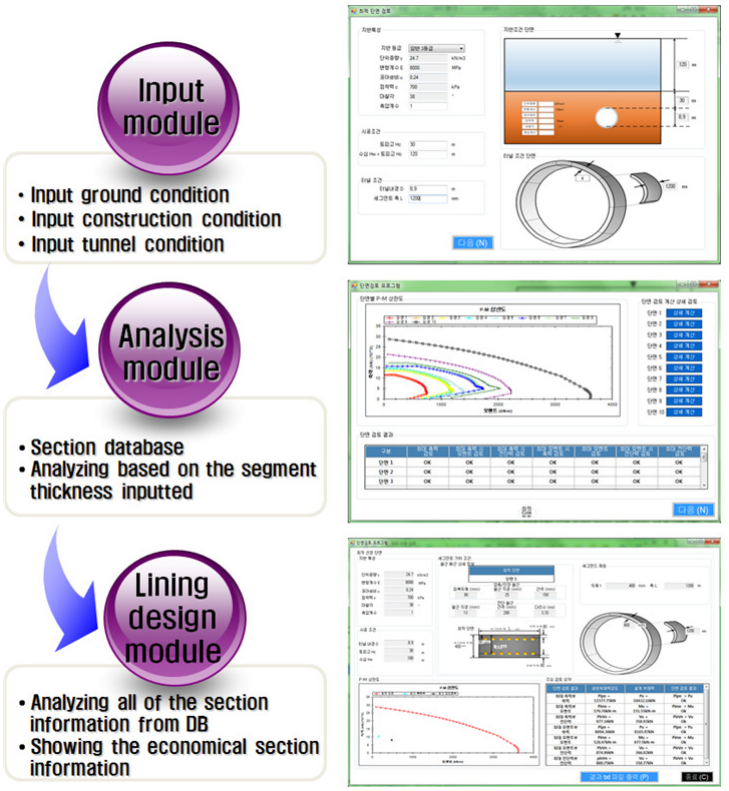



**Fig. 11.** Structural chart of establishing member forces linked with FEM program

## 3. 프로그램을 이용한 현장 적용성 평가

### 3.1 검토 대상 현장의 지반 조건, 시공 조건 및 터널 조건

본 연구에서 개발한 프로그램을 해남-제주간 가상 해저 터널의 설계에 적용하였으며 대상구조물은 해남-제주간 연장 108 km 노선에서 4개로 구성된 구간 중 취약 구간인 최대수압 작용 지점, 연약대 및 파쇄대 지점을 각각 적용하여 본선 터널인 터널 내경 8.9 m 와 서비스 터널인 4.8 m 의 경우의 라이닝 설계를 수행하였다. 노선도는 Fig. 12에 나타냈으며 해남과 제주를 기점으로 보길도, 추자도, 화도에 TBM 발진기지가 설립된다는 가정 하에 A 구간, B 구간, C 구간 중 추자도~화도 구간, 화도~제주 구간 최대 수압 지점 고려하였다. 즉, 토피고와 수심을 고려한 지점과 연약대 및 파쇄대가 존재하는 지점을 각각 선정하여 구간별 2개소씩 총 8개소의 단면 검토 지점을 선정하였다. 대상단면의 지층구성과 지반조건은 Table 12에 나타냈다.

### 3.2 프로그램을 이용한 TBM 세그먼트 라이닝 최적 설계

#### 3.2.1 프로그램을 이용한 부재력 산정 및 정확도 검증

본 프로그램은 설계자가 입력한 설계 조건을 바탕으로 세그먼트 라이닝에 작용하는 최대 부재력을 기 구축된 ANN을 통해 자동으로 산정한다. ANN 엔진 구축을 위한 유한요소해석의 모델링은 앞서 2.2.1 절에 소개한 바와 같고 부재력 정확도 검증을 위해 프로

www.kci.go.kr

그램을 이용해 산정된 최대부재력과 실제 유한요소해석 프로그램의 해석을 통한 최대부재력에 대한 비교를 수행하고 그 결과를 다음 Table 13에 표시했다. 절대값의 평균오차는 모멘트가 10.0%, 축력이 3.1%, 전단력이 5.2% 로 예측의 정확도가 높으며 본 프로그램을 통해 세그먼트 단면의 최적 설계가 가능할 것으로 판단된다.

본 프로그램에서는 입력모듈에서 설계조건을 입력한 후 검토하고자 하는 단면을 선택하고 각 선택된 단면에 대해 입력조건에 해당하는 최대부재력을 확인할 수 있다. 설계자가 입력한 설계 조건에 대한 부재력 산정을 별도의 유한요소해석 프로그램 구동 없이 기 구축한 ANN을 이용하여 산정함으로써 부재력을 계산하기 위해 상용유한요소 해석에 소요되는 시간을 획기적으로 단축할 수 있으며 입력정보를 토대로 자동 연산이 가능하도록 하여 설계자의 편의를 극대화

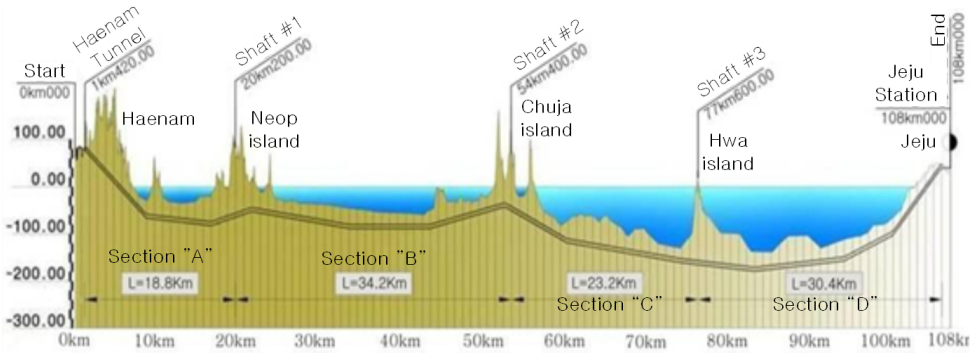



**Fig. 12.** Longitudinal view of subsea tunnel

**Table 12.** Geotechnical material parameters for virtual subsea tunnel

| Case | Ground condition | | | | | | | Construction condition | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ground grade | $\gamma_s$ (kN/m3) | $E_s$ (MPa) | $\nu_s$ | $C$ (kPa) | $\phi$ (deg) | $K_0$ | $H_c$ (m) | $H_w$ (m) | $D_i$ (m) |
| 1 | Fracture | 21.4 | 400 | 0.3 | 50 | 21 | 1 | 22 | 18 | 8.9 |
| 2 | | | | | | | | | | 4.8 |
| 3 | Rock III | 24.7 | 8000 | 0.24 | 700 | 38 | 1 | 60 | 15 | 8.9 |
| 4 | | | | | | | | | | 4.8 |
| 5 | Rock III | 24.7 | 8000 | 0.24 | 700 | 38 | 1 | 60 | 21 | 8.9 |
| 6 | | | | | | | | | | 4.8 |
| 7 | Fracture | 21.4 | 400 | 0.3 | 50 | 21 | 1 | 67 | 5 | 8.9 |
| 8 | | | | | | | | | | 4.8 |
| 9 | Rock III | 24.7 | 8000 | 0.24 | 700 | 38 | 1 | 23 | 130 | 8.9 |
| 10 | | | | | | | | | | 4.8 |
| 11 | Rock III | 24.7 | 8000 | 0.24 | 700 | 38 | 1 | 34 | 138 | 8.9 |
| 12 | | | | | | | | | | 4.8 |
| 13 | Fracture | 21.4 | 400 | 0.3 | 50 | 21 | 1 | 30 | 90 | 8.9 |
| 14 | | | | | | | | | | 4.8 |
| 15 | Weak zone | 21.4 | 400 | 0.3 | 50 | 21 | 1 | 22 | 50 | 8.9 |
| 16 | | | | | | | | | | 4.8 |

www.kci.go.kr

하여 본 프로그램을 통해 경제적이고 간편한 설계가 이루어질 수 있도록 하였다.

### 3.2.2 프로그램을 이용한 단면검토

단면검토 모듈에서는 산정된 최대부재력을 토대로 DB 상의 단면들과 연동하여 각 단면에 해당되는 최대 부재력이 작용하였을 때의 단면 검토 후 그 결과를 이용한 세그먼트 안정성 검토가 가능하도록 하였다. ANN을 통해 산정된 최대모멘트부의 모멘트와 축력 및 최대 축력부의 단면 검토를 수행하여 그 결과를

**Table 13.** Maximum sectional forces calculated by developed program

| Case | Segment thickness (mm) | Moment (kN·m) | | | Axial Force (kN) | | | Shear Force (kN) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | FEM | Prog. | Error | FEM | Prog. | Error | FEM | Prog. | Error |
| 1 | 400 | 136.1 | 109.5 | -20% | 5568.5 | 5623.6 | 1% | 228.9 | 240.8 | 5% |
| | 500 | 194.0 | 164.2 | -15% | 5617.5 | 5497.0 | -2% | 225.7 | 252.7 | 12% |
| | 600 | 252.0 | 217.2 | -14% | 5662.6 | 5570.1 | -2% | 225.2 | 201.6 | -10% |
| 2 | 400 | 158.7 | 192.2 | 21% | 2644.1 | 2637.7 | 0% | 193.4 | 222.7 | 15% |
| | 500 | 232.1 | 217.9 | -6% | 2703.7 | 2531.7 | -6% | 212 | 227.1 | 7% |
| | 600 | 301.1 | 289.8 | -4% | 2760.2 | 2663.9 | -3% | 230.7 | 235.3 | 2% |
| ⋮ | | | | | | | | | | |
| 14 | 400 | 213.1 | 205.7 | -3% | 5739.9 | 5819.8 | 1% | 404.9 | 393.3 | -3% |
| | 500 | 302.6 | 277.1 | -8% | 5864.7 | 5527.2 | -6% | 429.9 | 418.0 | -3% |
| | 600 | 385.8 | 376.3 | -2% | 5986.3 | 6340.4 | 6% | 455.3 | 440.6 | -3% |
| 15 | 400 | 149.9 | 134.7 | -10% | 7698.2 | 7792.0 | 1% | 355.6 | 353.7 | -1% |
| | 500 | 210.7 | 206.5 | -2% | 7769.9 | 7552.4 | -3% | 353.3 | 326.2 | -8% |
| | 600 | 271.3 | 263.1 | -3% | 7838.0 | 7905.8 | 1% | 354.2 | 375.6 | 6% |
| 16 | 400 | 174.7 | 192.8 | 10% | 3840.2 | 4005.5 | 4% | 274.5 | 277.0 | 1% |
| | 500 | 250.9 | 230.4 | -8% | 3923.3 | 3780.8 | -4% | 294.7 | 286.0 | -3% |
| | 600 | 322.2 | 309.9 | -4% | 4002.9 | 4182.1 | 4% | 315.2 | 298.1 | -5% |

**Table 14.** Result of cross section review using developed program

| Description | | Developed program | | Common use program | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Value | Result | Value | Result |
| Part of Max. bending moment | $\phi Pn(kN)$ | 9729.9 | O.K. | 9597.7 | O.K. |
| | $Pu(kN)$ | 4808.9 | | 4808.9 | |
| | $\phi Mn(kN{\cdot}m)$ | 442.7 | | 437.3 | |
| | $Mu(kN{\cdot}m)$ | 219.1 | | 219.1 | |
| | $\phi Vn(kN)$ | 723.3 | | 723.3 | |
| | $Vu(kN)$ | 364.3 | | 364.3 | |
| Part of Max. axial force | $\phi Pn(kN)$ | 11331.8 | | 11029.4 | |
| | $Pu(kN)$ | 5623.6 | | 5623.6 | |
| | $\phi Mn(kN{\cdot}m)$ | 370.6 | | 384.5 | |
| | $Mu(kN{\cdot}m)$ | 109.5 | | 109.5 | |
| | $\phi Vn(kN)$ | 760.1 | | 760.1 | |
| | $Vu(kN)$ | 240.8 | | 240.8 | |

www.kci.go.kr

나타낸다. 단면 검토 모듈에서는 프로그램 자체적으로 작성된 P-M 상관도를 이용하여 단면의 안전성을 검토하여 결과를 출력한다. 추가적으로 본 프로그램의 단면 검토 로직 적정성을 비교 검토하기 위해 전절의 1번 Case에 대한 400 mm 세그먼트 두께의 설계조건을 적용한 상용 단면 검토 프로그램과 본 프로그램의 결과를 비교하였으며 그 결과를 Table 14에 나타냈다.

본 프로그램을 적용한 결과와 상용 단면 검토 프로

**Table 15.** Section DB

| No | Segment thickness (mm) | Compression / Tension reinforcement | | | Shear reinforcement | | | Remark |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Cover (mm) | Diameter (mm) | Distance (mm) | Diameter (mm) | Distance (mm) | Leg (EA) | |
| 1 | 400 | 80 | 25.4(D25) | 150 | 12.7(D13) | 200 | 3.33 | |
| 2 | | 80 | 25.4(D25) | 100 | 12.7(D13) | 200 | 5 | |
| 3 | 500 | 80 | 25.4(D25) | 150 | 12.7(D13) | 200 | 3.33 | |
| 4 | | 100 | 28.6(D29) | 150 | 12.7(D13) | 200 | 3.33 | |
| 5 | | 80 | 25.4(D25) | 100 | 12.7(D13) | 200 | 5 | |
| 6 | 600 | 80 | 25.4(D25) | 150 | 12.7(D13) | 200 | 3.33 | |
| 7 | | 100 | 28.6(D29) | 150 | 12.7(D13) | 200 | 3.33 | |
| 8 | | 80 | 25.4(D25) | 100 | 12.7(D13) | 200 | 5 | |
| 9 | | 80 | 25.4(D25) | 100 | 12.7(D13) | 100 | 5 | 1 lyr. |
| | | 160 | 25.4(D25) | 100 | | | | 2 lyr. |
| 10 | | 80 | 38.1(D38) | 100 | 19.1(D19) | 100 | 5 | 1 lyr. |
| | | 160 | 38.1(D38) | 100 | | | | 2 lyr. |

**Table 16.** Result of section analysis using developed program

| Section | Case | Ground condition | | Construction condition | | | Optimal section analyzed | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ground grade | $K_0$ | $H_c$ (m) | $H_w$ (m) | $D_i$ (m) | Segment thickness (mm) | Section no. of DB |
| A | 1 | Fracture | 1 | 22 | 18 | 8.9 | 400 | 1 |
| | 2 | | | | | 4.8 | 400 | 1 |
| | 3 | Rock III | 1 | 60 | 15 | 8.9 | 400 | 1 |
| | 4 | | | | | 4.8 | 400 | 1 |
| B | 5 | Rock III | 1 | 60 | 21 | 8.9 | 400 | 1 |
| | 6 | | | | | 4.8 | 400 | 1 |
| | 7 | Fracture | 1 | 67 | 5 | 8.9 | 400 | 1 |
| | 8 | | | | | 4.8 | 400 | 1 |
| C | 9 | Rock III | 1 | 23 | 130 | 8.9 | 500 | 3 |
| | 10 | | | | | 4.8 | 400 | 1 |
| | 11 | Rock III | 1 | 34 | 138 | 8.9 | 500 | 4 |
| | 12 | | | | | 4.8 | 400 | 1 |
| D | 13 | Fracture | 1 | 30 | 90 | 8.9 | 400 | 1 |
| | 14 | | | | | 4.8 | 400 | 1 |
| | 15 | Weak zone | 1 | 22 | 50 | 8.9 | 400 | 1 |
| | 16 | | | | | 4.8 | 400 | 1 |

www.kci.go.kr

그램을 적용한 계산 결과는 1~2%의 미소한 차이를 보였으며 이는 내부 연산 과정에서 소수점 이하의 숫자를 취급하는 차이에서 기인한 것으로 설계 단면 선정에 있어서 무시할 수 있는 오차이기 때문에 위의 결과를 근거로 본 프로그램이 수행하는 라이닝 설계가 정확하고 신속한 결과를 내고 있는 것으로 판단된다.

### 3.2.3 프로그램을 이용한 최적설계

위와 같이 미리 구축한 단면 DB 상의 단면들에 대해 검토된 결과를 이용하여 각 케이스 별로 그 결과를 정리하고, 단면 DB 중 적합하다고 판단하는 단면들 중 가장 경제적인 단면을 선정하여 그 결과를 Table 16에 나타냈다. 설계 단면의 단면 번호를 알 수 있도록 하기 위해 구축된 단면 DB를 Table 15에 표시했다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 해저 터널에서 적용되는 TBM 세그먼트 라이닝의 최적 설계 시스템 개발에 관한 내용을 다루었다. 프로그램 개발을 위해 관련 선행 연구에서 그 적용성이 확인된 바 있는 ANN을 도입하여 시공조건, 지반 조건 및 터널 조건 입력값을 바탕으로 별도의 응용프로그램 해석 없이 부재력을 정확히 예측하여 단면검토에 적용될 수 있도록 하였고, 기 구축된 단면에 대한 구조검토와 그 결과에 따른 라이닝의 최적 단면 선정 로직을 포함하여 해저 터널의 제한된 조건에 대해 TBM 세그먼트 라이닝의 최적 설계가 가능하도록 하였다. 구축된 시스템은 향후 가상 해저 터널의 BIM 구축과 연동되어 기존의 설계과정을 개선한 효율적인 수단으로 사용자가 쉽게 세그먼트 설계에 접근할 수 있도록 활용될 것으로 기대된다. 일반적으로 세그먼트 라이닝의 유한요소해석은 모델링과 해석에 상당히 많은 시간이 소요된다. 따라서 본 프로그램에서는 사용자의 편의를 도모하기 위해 유한요소 해석 결과를 바탕으로 한 ANN을 구축하였고, 이는 설계자에게 시간적·공간적 제한을 상당부분 해소해 주어 경제적인 라이닝 설계를 가능하게 할 것이라 판단되며 개발된 프로그램의 구체적인 내용은 다음과 같다.

1. 입력 모듈에서는 실제 구조해석 프로그램 사용시 적용하는 인자인 2링빔 모델의 하중조건, 경제조건에 입력하는 요소들을 고려하여 지반조건, 시공조건 및 터널조건의 11개의 값을 입력 값으로 설정하고 입력된 정보를 바탕으로 ANN 엔진을 통해 최대부재력을 정확하게 산정할 수 있도록 구성하였다.
2. 단면검토 모듈에서는 입력 모듈에서 입력된 정보를 바탕으로 산정된 최대부재력을 바탕으로 기 구축된 단면 DB 내의 입력 세그먼트 두께에 대한 단주설계의 개념으로 구조검토를 수행하여 해당 단면의 적정을 평가하였다. 최적단면 설계모듈에서는 단면 DB 내의 모든 단면에 대해 구조검토를 수행하고 설계조건에 대해 가장 경제적인 단면을 출력할 수 있도록 하여 설계자가 설계 조건 입력시 별도의 구조 해석을 수행하지 않고 적정 세그먼트 라이닝 단면을 설계할 수 있도록 구성하였다.
3. ANN에 대한 검증 결과 상용유한요소해석 프로그램을 이용한 부재력 결과와 99%이상 일치하는 것으로 검증되어 장대화 및 대단면화 된 해저 터널의 해석 및 설계에 효과가 극대화 될 것으로 기대되며, 본 프로그램을 통해 가상 터널의 시공조건을 고려한 세그먼트 라이닝 부재력 평가 및 단면 설계를 가능하도록 하였다.
4. 추후 해저터널 가상설계에 대한 BIM과 연동시켜 추가적인 구조해석이 없이 정확도 높은 ANN의 예측 부재력을 통해 설계가 가능한 프로그램의 장점을 극대화시키고, 설계자가 최적화된 세그먼트 라이닝 단면에 대해 간편하고 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 건설기술혁신사업인 “해저터널 기술개발”(과제번호 13건설연구T01) - “Mechanical-Hydraulic Coupling이 고려된

www.kci.go.kr

BIM 기반하의 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. (2005), "Development of technologies for minimizing and preventing the disaster on tunnel construction 2", KICT, pp. 73-87.
2. Beale, M.H., Hagan, M.T., Demuth, H.B. (2013), Neural Network Toolbox User's Guide, Mathwork Inc.
3. Choi, J.H., Yoo, C.S. (2015), "TBM segment lining section design of hypothetical subsea tunnels", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 1, pp. 49-63.
4. Garson, G.D. (1991), "Interpreting neural-network connection weights", AI Expert, Vol. 6, No. 7, pp. 47-51.
5. 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.
6. Jeong, Y.J., Yoo, C.S. (2014), "Development and implementation of a knowledge based TBM tunnel segment lining design program", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 3, pp. 321-339.
7. 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.
8. KCI (2012), Korean Design Standards on Structural Concrete 2012, Korea Concrete Institute.
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. KTA (2008), "3rd Mechanized tunnel construction tunnel design service technical conference", Korean Tunnelling Association, pp. 3-458.
11. Lee, Y.J., Kim, K.L., Jeong, K.W., Hong, E.J., Kim, S.H., Jun, D.C. (2015), "A study on the design of shield tunnel lining in high water pressure condition", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 3, pp. 227-236.
12. Matlab user manual version R2012b (2012), MathWorks, INC.
13. Midas users manual version 2012+ (2012), MIDAS IT Co.,Ltd.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Yoo, C.S., Kim, J.M., Kim, S.B., Jung, H.Y. (2006), "Tunnel design/construction risk assessment based on GIS/ANN", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 1C, pp. 63-72.
19. Yoo, C.S., Kim, S.B. (2007), "A sensitivity analysis on the influencing factors affecting ground surface settlements caused by tunnelling", Korean Geotechnical Society Autumn Conference 2007.
20. 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.


www.kci.go.kr