J of Korean Tunn Undergr Sp Assoc 18(2)195-211(2016)
http://dx.doi.org/10.9711/KTAJ.2016.18.2.195
eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

지식기반 개념을 이용한 해저터널의 NATM 터널의 라이닝 설계

신춘원[1] · 우승주[2] · 유충식[3]*
[1]비회원, 성균관대학교 글로벌건설엔지니어링학과 석사과정
[2]비회원, 성균관대학교 글로벌건설엔지니어링학과 석사
[3]정회원, 성균관대학교 토목공학과 교수

A knowledge-based study on design of NATM lining for subsea tunnels

Chunwon Sin[1], Seungjoo Woo[2], Chungsik Yoo[3]*
[1]Graduate Student, Dept. of Global Construction Engineering, Sungkyunkwan University
[2]Master, Dept. of Global Construction Engineering, Sungkyunkwan University
[3]Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT: This paper concerns a study of a knowledge-based NATM tunnel lining design for subsea tunnels. Concept for tunnel automation designing system, the development of Artificial Neural Network based technology of the tunnel design system, the learning process and verification of the technology forecasting member forces were described. 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 using a FEM(finite element analysis). The lining member forces are predicted based on the ANN quickly and it helps designers determine its segmental lining dimension easily.

Keywords: NATM lining, ANN, Subsea tunnels

초 록: 이 논문에서는 해저터널의 특수성을 고려한 NATM 터널의 라이닝의 설계에 대한 내용을 다루었다. 해저터널 자동화 설계 시스템 개발의 요소기술인 인공신경망(Artificial Neural Network) 기반의 터널 설계 시스템에 대한 개념, 학습과정 및 검증과정과 예측된 부재력을 통한 최적 단면 설계에 대한 내용을 기술하였다. 부재력 평가가 정확하게 구현 가능한 인공신경망을 개발하기 위해서 다양한 설계 조건과 각 조건에 따른 해석 모델을 이용한 유한요소해석을 수행하여 단면 설계에 필요한 최대부재력의 학습DB를 구축하고 인공신경망을 통해 일반화하였다. 인공신경망을 이용해 산정된 부재력은 해저 터널의 라이닝 설계 시스템에 적용시켜 빠르고 쉽게 해저터널의 라이닝 설계에 적용이 가능하도록 하였다.

주요어: NATM 라이닝, 인공신경망, 해저터널

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

토목 공학 기술이 발전함에 따라 초장대 교량, 터널 등의 시공 및 설계 사례가 늘고 있으며, 글로벌화로 인한 물리적·지리적 장애물을 극복하고자 최신 토목 기술들이 적용되고 있는 추세이다. Park et al. (2007)의 해저터널의 조사 및 설계 기술 동향에 따르면 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 실제

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

Received February 23, 2016; **Revised** March 10, 2016; **Accepted** March 11, 2016

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.

로 터키나 일본, 영국 등의 선진국에서는 해저 터널을 시공 혹은 운용 중에 있다. 또한 Shin (2011)의 해저터널건설을 위한 주요 기술적과제와 Yoo and Choi (2014)의 인공신경망 기반의 TBM 터널 세그먼트 라이닝 부재력 평가 등 우리나라에서도 한중 해저 터널, 한일 해저 터널 등에 대한 타당성 연구가 활발히 진행되고 있으며 이와 같은 해저 터널에 대한 지속적인 관심과 연구 결과는 추후 제주도, 중국 및 일본으로의 해저 터널을 통한 육로 연결을 현실로 이루어낼 것으로 판단된다. 해저터널은 계획 수립시 장대화· 대단면화되는 조건으로 인해 여러 가지 터널 시공법 중 건넘선 구간과 같은 확폭 구간은 기존의 NATM (New austrian tunnelling method) 공법을 적용하고 본선구간은 TBM (Tunnel Boring Machine) 터널로 계획 및 시공되는 것이 일반화되고 있다.

해저터널에 있어서 공사비의 대부분을 차지하고 있는 것은 지보재로 사용되는 세그먼트 라이닝이며 이에 대한 최적 설계를 빠르게 수행할 수 있다면 투입 인력 및 수반되는 노력을 최소화하여 해저터널 NATM 라이닝의 경제적인 설계· 시공을 가능하게 할 것으로 판단된다. 유로 코드에서 라이닝 설계 시 설계자는 라이닝에 적용되는 하중들에 대해서 안전측으로 두께, 철근배근 등을 결정하고 있다(European Committee for Standardization, 2004). 해저터널의 설계과정에서 설계자는 그 굴착 공법에 따라 목적물의 지반 조건, 시공 조건 및 터널 조건을 토대로 이에 적합한 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 (Terzaghi, 1943). 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. Yoo et al. (2005, 2008)은 IT 기반의 터널 설계를 위한 연구를 수행하였다. 이러한 문제를 개선하고 효율적인 터널설계를 수행하기 위하여 해저터널의 굴착 공법에 따른 라이닝 설계의 공통적인 부분을 단순화하고 적정한 단면 DB를 선정하여 최적 단면을 설계할 수 있게 함으로써 설계자가 시간과 비용을 절약할 수 있도록 하며 각 공법에 따른 라이닝의 설계를 자동화함으로써 설계자가 쉽고 정확하게 터널 라이닝의 단면을 결정하도록 하는 로직을 정립하는 데 목적을 두고 있다. 이러한 지식기반 개념을 이용한 연구는 Yang and Zhang (1997, 1998)을 참고하였고 Beale et al. (2013)과 Garson (1991)의 연구를 통해 인공신경망의 정확도를 높이고 예측값과 결과값의 오차범위를 검증하였다.

1.2 연구 내용 및 범위

본 연구에서는 ANN (Artificial Neural Network, 인공신경망)을 기반으로 하여 해저터널의 설계· 시공에 큰 영향을 미치는 라이닝 설계에 대한 로직을 수립하고, 설계 인자인 최대부재력에 대해서 정확도 높은 예측 시스템을 구축하는 기초연구를 수행하였다. 해저터널에 대한 지반조건, 시공조건 및 터널조건에 따른 현장 자료를 통해 부재력을 정확히 예측하여 사용자가 별도의 수치해석 없이 부재력을 평가하고 라이닝 설계에 있어서 그 단면을 설계할 수 있도록 하였다. 이러한 ANN 기반의 부재력 예측 시스템 구축을 위한 이 논문의 연구 내용 및 범위는 다음과 같다.

1.2.1 해저터널 NATM 2차 라이닝의 해석 DB 구축

해저터널에 있어서 TBM 공법의 적용이 어려운 구난역이나 확폭이 필요한 건넘선 구간의 경우 일부 NATM 공법이 적용될 필요성이 있다. 이러한 현장 자료를 분석하여 일반화하고 일정 수준의 설계 조건을 케이스화하여 각 케이스에 대해서 수치해석을 통한 구조해석을 실시하여 2차 라이닝 설계에 필요한

최대부재력을 산출하는 것을 목적으로 ANN을 구축하였다. 이 연구는 본선에 대한 TBM 세그먼트 라이닝의 설계와 연계하여 해저터널 계획시 전체 구간에 대한 터널 라이닝 설계를 일관된 방법으로 시행할 수 있도록 하는 연구가 된다.

1.2.2 라이닝 단면검토 로직의 정립

터널 라이닝 설계에 있어서 원형이나 마제형으로 구성되어 있는 터널 라이닝의 횡단 단면 설계를 위해 단주설계로 단순화하고 이 결과는 실제 원형 설계에 비해 안정적인 설계가 가능하다. NATM에 대한 라이닝 설계시 정확히 예측된 부재력을 바탕으로 각각의 굴착 공법에 따른 라이닝 설계 로직을 수립하여 경제적인 라이닝 단면 설계가 가능하도록 연구하였다.

본 연구에서는 NATM 터널의 라이닝 부재력을 정확히 예측할 수 있는 ANN 엔진을 구축하고 엔진에 적용되는 입력값이 출력값의 부재력에 미치는 영향 정도를 RSE (Relative Strength Effect)와 RI (Relative Importance)를 통해 다각적으로 분석하고자 하였다. 결론적으로 예측된 부재력을 통해 시공성을 고려하여 미리 선정한 단면 DB를 구축하고, 단주설계법을 적용한 구조검토를 통해 설계자가 특정의 해저터널 설계조건에 있어서 가장 경제적인 단면을 설계하고 그 결과를 쉽게 알 수 있도록 하는데 효과적인 개념을 제시하고자 하였다. 이와 더불어 본 실제 그 타당성 연구가 진행되고 있는 해남-제주간 해저터널의 설계에 적용하여 실제 해저 터널 설계·시공 단계에서 단면의 부재력 산정 및 안정성을 검토하였다. 검증된 정확도 높은 부재력 예측과 실제 단면 설계법을 통하여 추후 연구될 해저터널에 대한 BIM 프로그램 등과 연동되어 해저 터널 설계시 사용자가 별도의 구조해석 없이 원하는 위치의 설계조건을 토대로 경제적인 단면을 정확하고 신속하게 도출할 수 있도록 하는데 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 연구하였다.

2. NATM 2차 라이닝의 설계

2.1 Winkler 모델을 이용한 2차 라이닝 모델링

해저터널에 있어서 장대 TBM 터널이 주로 고려되지만 일정 기준 간격의 구난역 설치가 불가피하고, 구난역 구간의 경우 건넘선 등의 확폭 구간이 존재하여 일부 구간의 NATM 시공이 불가피하다. 따라서 NATM 2차 라이닝에 대해서도 해저 터널의 특수성을 감안한 설계가 필요하다. NATM 터널의 라이닝 설계는 있어서 이완하중의 개념에 의거해서 작용하는 토압을 추정하고 주변 지반이 일반 구조물과 같이 이완토압을 지지하도록 설계하고 터널 굴착에 따라 주변 지반의 응력의 재분배에 의해 그 자체로 안정되도록 지보공을 구조 검토한다. 단면형상이 일정하고 사업량이 많은 철도터널이나 도로터널에서는 표준설계를 암반등급마다 설정하고 이를 적용하는 경우가 많다. 단, 피복두께가 얇은 암반, 막장 안정이 곤란하다고 생각되는 암반, 산사태 지역, 단층 파쇄대에 대해서는 별도의 지보패턴을 검토하는 것이 바람직하다. 이와는 별도로 유한요소법에 의해 해석을 실시하는 경우가 있는데, 유한요소해석(Finite Element Method, FEM)은 터널주변 암반을 작은 요소로 분할하고 그 절점에 작용하는 외력으로부터 변위를 구하고 이 변위로부터 각 요소의 변형률, 응력을 산출하는 기법이다. 대개는 숏크리트나 록볼트 같은 1차 지보재가 기능 상실시 2차 지보재로서 터널 대 작용하중에 저항하는 개념으로 2차 라이닝을 설계한다. 터널 라이닝 설계시 주로 수정 Terzaghi 암반 이완하중을 적용하여 과업구간의 지반에 적합한 2차 라이닝의 단면과 철근배근을 결정하며 단면 구조해석을 위해 수치해석을 실시한다. 수정 Terzaghi 암반 이완하중은 적용식 및 사용계수에 따라 다르게 적용되며 과다설계의 경향이 있어 최근에는 GLI (Ground-Lining Interaction) 모델을 이용하여 하중을 산정한다. 본 연구에서는 NATM 시공이 적용되는 해저터널의 고토피고의 특성을 고려하여

안전측으로 고려하고 토피고에 독립적으로 계산될 수 있도록 이완하중고에 암반단위중량을 곱해서 적용하는 이완하중을 작용 토압으로 고려했다.

2.1.1 암반 및 지보의 모델화

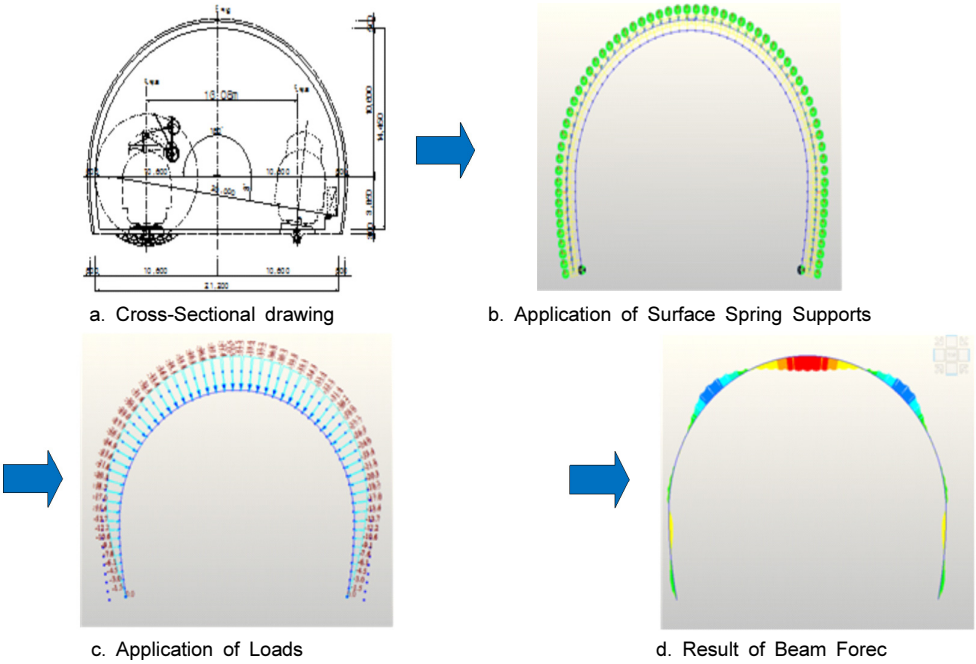
터널 굴착시 암반은 특히 터널의 막장 주변부에서 3차원적으로 거동하지만 수치해석은 일반적으로 2차원에서 수행한다. 따라서 평면변형률 모델을 적용하며 터널 종단방향의 해석시에는 주변암반의 탄성계수나 굴착에 상당하는 외력 또는 굴착부분의 탄성계수를 변화시키는 방법으로 유사 3차원 해석을 실시하는 것이 일반적이다.

2.1.2 2차 라이닝의 모델화

2차 라이닝은 일반적으로 터널의 변형이 수렴된 후 시공되므로 막장으로부터 떨어진 위치에서 시공한다고 가정하면 해석상 응력이 발생하지 않는다. 그러나 피복두께가 얇거나 상재하중 또는 장기적인 토압·수압을 추정해서 해석하며, 1차 지보재가 항복했다는 가정하에 안전측으로 해석을 실시한다. 이 경우 라이닝을 다각형의 2차원 보 요소로 모델화하고 암반을 용수철로 취급하며 해석시에는 지반용수철의 방향 및 크기, 부호에 주의해야 한다. 이때 라이닝을 직선인 보 요소로 모델링함에 따라 발생되는 오차를 줄이기 위해 두 요소의 연결각은 5°를 초과하지 않도록 하며 라이닝은 측벽하부까지 모델링 한 후 하부 경계조건은 힌지로 수직변위와 수평변위를 구속하였다.

2.1.3 해저터널에서의 설계

해저터널의 NATM 2차 라이닝 설계에서는 해면 아래 깊게 터널을 구축할 경우 터널 내의 용수를 전 영역에 허용하지 않으면 라이닝에 큰 수압이 작용하게 되며, 복공의 두께가 두꺼워지는 문제가 발생한다. 따라서 터널 주변에 주입영역을 설정하고, 암반의 투수계수를 낮게 하여 터널 내 용수량을 감소시키고 작용 수압이 굴착에 의한 이완영역 바깥쪽까지만 작용하도록 해야 한다. 주입영역의 바깥쪽에 작용하는 수압은 주로 주입영역 자체의 개량된 지반으로 지지



a. Cross-Sectional drawing
b. Application of Surface Spring Supports
c. Application of Loads
d. Result of Beam Forec

Fig. 1. Flow of structural analysis modeling

하고, 암반과 수압의 복합작용 외력은 터널 내의 1차 지보재와 2차 라이닝이 지지하도록 하여 주입 영역을 통과해 터널 내부로 들어오는 용수는 라이닝 배면을 통해 터널 내부로 배출시켜 라이닝에 작용하는 수압을 저감시켜야 한다.

2.2 지반 및 작용하중 산정

일반적으로 철근 콘크리트로 구성되는 NATM 터널의 2차 라이닝은 구조해석과 단면설계의 순서로 이루어지며, 작용하중이 구조물에 일으키는 응력과 변형을 구조해석으로부터 구하고 부재단면의 안전을 검토하여 주어진 하중작용에 대해 적합한 단면을 결정하는 절차로 이루어진다. 특히 NATM 공법에서 지보재는 주변 원지반과 영구복합구조체로 보고 설계한다.

NATM에서 2차 라이닝의 단면력을 구하기 위해 수행하는 모델링은 대개 범용 유한요소해석을 이용하고, 터널 2차 라이닝을 스프링이 연속적으로 분포하는 Winkler 모형으로 치환하고, 이러한 스프링에 둘러싸여 단순지지되는 2차 라이닝에 이완하중과 잔류수압이 사다리꼴 등분포하중으로 작용하는 것으로 모사한다. Winkler 스프링 모델에서는 터널과 지반의 상호작용을 독립된 스프링으로 치환하여 터널 2차 라이닝을 보로 모델링한다. Winkler 스프링 모델의 적절한 적용을 위해 터널 2차 라이닝의 곡선은 모델의 가정을 충족할 수 있고, 스프링의 불연속인 배치를 피하기 위해 0.25 m~0.5 m의 길이를 같은 미소보로 구성하고 각 절점은 1 m 이격된 가상의 고정점과 계산된 지반반력 스프링계수를 통해 압축만 작용하는 탄성연결이 되도록 한다. Winkler 스프링 모델에서의 가정은 다음과 같다.

- 각각의 스프링은 독립적이다.
- 터널 2차 라이닝의 전단 변형은 없다.
- 주변지반의 변형 추이는 1차원적으로 전달된다.

2.2.1 이완토압과 잔류수압

자중의 경우 콘크리트 라이닝 설계시 외력으로 적용하며 대개 프로그램내에서 자동으로 고려된다. 토압은 2차 라이닝에 직각으로 작용하는 이완하중으로 발파이완 하중값을 고려하며 터널경계선에서 제어발파를 실시하는 경우 발파공으로부터 약 0.5 m 떨어진 곳까지 발파에 의한 동적 손상을 받는 것으로 확인되었고(Lim, 1997) 발파에 의한 암반손상시의 발파진동 주파수 영역은 약 800 Hz 정도이며, 이를 근거로 발파로 인한 이완영역을 평면변형율 요소를 사용한 2차원 해석을 실시하여 수치해석적으로 검토시 발파하중 입력후 초기에는 소성영역이 점차로 증가하는 양상을 보이다가 0.6초 정도이후부터는 거의 일정한 패턴의 소성영역이 나타나며 그 크기는 대략 천단부에서 50 cm 정도로 발생된다. 따라서 암반 등급 4등급 이상의 경우 0.5 m 의 이완하중고를 적용한다. 작용하는 토압은 이완하중고 두께의 주변지반의 단위중량을 곱하여 모델링한다.

$$P_v = h_r \times \gamma_s \tag{1}$$

여기서, P_v : 천장부 이완토압 (kPa)
h_r : 이완하중고 (m)

잔류수압의 경우 배수층이 제 기능을 발휘하지 못할 경우를 고려하여 해석에 적용하며 수치해석 결과 부직포의 폐색으로 인한 장래 2차 라이닝에 예상되는 잔류수압은 암반 4등급 이상의 경우 터널 높이의 1/3, 암반 5등급 이하의 경우 터널 높이의 1/2을 적용했다. 단면설계시 적용하중의 조합이나 형태에 따라 최대단면력의 크기나 발생위치가 달라지며, 이 논문에서는 Fig. 2에서 케이스 7의 경우가 단면두께에 가장 큰 영향을 미치는 모멘트가 가장 크기 때문에 안전측으로 가장 불리한 형태인 케이스 7의 형태를 적용했다. 암반 이완 하중은 수평토압을 터널 높이에 따라 차등 적용하고, 수평 토압을 균등하게 적용하여 수치해석

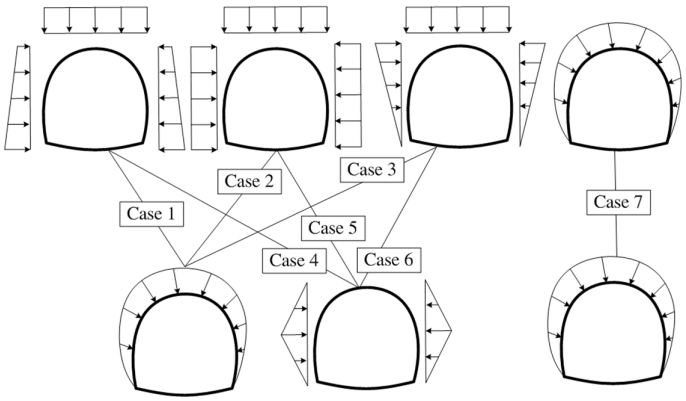


Fig. 2. Load combination of NATM lining analysis

에 적용되는 형태이다. 잔류수압의 작용 형태는 침투해석에 의한 형태이며 측면 배수기능이 원활한 경우를 나타낸다.

2.2.2 스프링 계수 산정

경계조건에 사용되는 스프링 계수는 주변지반의 변형 특성을 고려한 Wolfer 이론식을 Table 1과 같이 사용했다.

Table 1. Theory of coefficient of subgrade reaction

Classification	Content
Theory	$K_s = \frac{E_s}{[(1+\nu)R]} \cdot L, \quad R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ K_S : Coefficient of subgrade reaction E : Modulus of deformation ν : Poisson`s ratio R : Radius of the lining L : Length of member

2.2.3 기타 온도 하중

NATM 터널의 2차 라이닝 설계에서의 경우 건조수축 및 온도하중을 고려하며 터널 종방향으로 신축이음을 설치하여 건조수축 및 온도변화의 영향을 최소화하도록 계획하여 시공함으로써 그 영향은 무시하고 횡단면상의 건조수축 및 온도변화에 의한 영향만을 고려하여 범용 유한요소 프로그램 내의 System temperature 기능을 적용하고 내·외면 온도차 하중은 Temperature gradient 기능으로 고려한다. 본 연구에서 적용하는 온도하중은 Table 2에 나타냈다.

2.2.4 설계시 주요 고려사항

이전에 언급한 하중 외에 균열에 대한 사용성을 검토해야 하며, 공용성 측면에서도 라이닝의 역할을 고려해야 한다. 다음 Table 3에 2차 라이닝 설계시 고려사항에 대해 나타냈고, Table 4에 주요 고려사항을 나타냈다.

Table 2. Application of temperature load

Classification	Application	Content
Seasonal Temperature Load	± 15°C	• Thermal expansion coefficient of concrete α : 1.0×10^{-5} • Converted to −15°C thermal loads • ε : Concrete drying shrinkage (15×10^{-5}) $\Delta t = \frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{15 \times 10^{-5}}{1.0 \times 10^{-5}} = -15°C$
Load temperature difference between inside and outside surface	± 5°C	
Drying Shrinkage	− 15°C	

Table 3. Role of reinforced concrete secondary lining

Classification	Content
Performance	• Less leakage of water and Favorable of watertightness • Inspection and Improvement of repair effectiveness
Strength	• Providing binding required for stability of tunnel during construction of the concrete lining without convergence to the deformation of the tunnel • Support the external forces when situation(construction defects) occurred during construction • Improve the safety of the structure uncertain factors considered uncertainty factors(Uneven ground, quality degradation of support, depression of primary support) • Increase the durability against deterioration of the supports and change of external forces

Table 4. Consideration of the secondary lining design

Classification		Content
Cross section form and Application Load		• Consider a tunnel clearance limit and allowance • Secure usability and durability when depressed the primary supports
Design	Stability Check	• Application of blasting relaxed load • Consider change of temperature and drying shrinkage
	Prevention Cracks	• Reinforcement of small diameter rebar at appropriate intervals • Secure the position of reinforced joints and thickness of cover concrete • Compliance the reinforcement standards(Check spacing of reinforced rebars)

2.3 2차 라이닝 설계 흐름

일반적으로 콘크리트 구조물의 설계는 구조해석과 단면설계의 순으로 진행되며 작용되는 하중이 구조물에 일으키는 응력과 변형을 구조해석으로부터 구하고 부재단면의 안전을 검토하여 주어진 하중작용에 대해 적합한 단면을 결정하는 절차로 진행된다. Fig. 3에 2차 라이닝의 설계 흐름도를 나타냈다.

Fig. 3의 흐름도를 따라 2차 라이닝 단면계획에 의해 선정한 대표단면과 지반조건을 고려하여 계산한 네가지 적용하중을 이용하여 NATM 라이닝을 모델링하고 구조해석을 수행하였다. 사용된 유한 요소 프

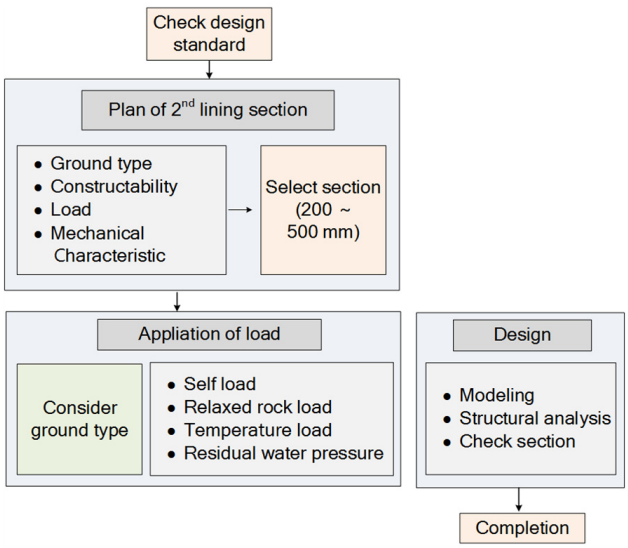


Fig. 3. Flow of NATM secondary lining design

로그램은 Midas civil 2012+(Midas, 2012)이며 터널을 빔 요소로 고려하는 빔 스프링 모델을 적용하였다. 대표단면의 2차 라이닝 단면도를 빔 스프링의 왜곡된 거동을 피하기 위해 0.25～0.5 m 가 되도록 절점을 분할하여 모델링 후 2.2장에서 설명한 산정이론식을 따라 계산하여 스프링 계수를 Elastic Link로 적용한다. 2차라이닝에 작용하는 하중은 이완하중으로 계산한 토압과 잔류수압으로 계산한 수압을 각각 적용하였다. 자중은 프로그램 자체적으로 적용되도록 하고, 온도하중은 건조수축, 내외면온도차 하중, 계절별 온도하중을 적용하여 유한요소해석을 위한 준비를 마친다. 해석 결과 중 Beam Force를 선택하여 최대부재력(모멘트, 축력, 전단력, 사용모멘트)을 추출한다.

3. ANN 기반의 해저터널 NATM의 라이닝 단면력 산정 및 최적 설계

3.1 ANN 기본 배경

인간이 가지고 있는 신체 기능의 대부분은 신경세포(Neuron) 들의 유기적 결합체인 신경망에 의해 통제된다. 신경망의 중추인 뇌에 대한 그 동안의 연구결과는 뇌의 복잡한 구조적인 특징과 신호처리 체계를 연구하여 고난도의 실제 문제들을 단순화하여 해결하는 연산기법을 개발하는 방식으로 발전되어 왔다.

ANN은 이러한 생물학적 신경망에 모티브를 두고 발전되어 왔으며 복잡한 실생활의 문제를 그래프 형태와 수학적인 알고리즘 형태로 모델링할 수 있게 되었다. ANN은 생물학적 뉴런을 모델링한 유닛들과 그 유닛들 사이의 가중치 연결들로 구성되며 각 ANN

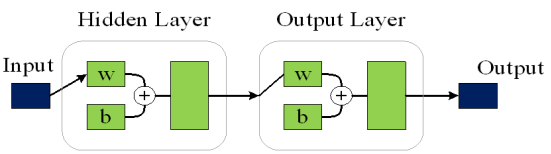


Fig. 4. Neural Network

모델에 따라 다양한 구조와 독창적인 학습 규칙을 얻는다. ANN은 은닉마디라 불리우는 독특한 구성요소에 의해 일반적인 통계론과는 다른 차원의 방법이며 은닉마디는 인간의 신경세포를 모형화한 것으로써, 각 은닉마디는 입력변수들의 결합을 수신하여 목표변수에 전달한다.

3.2 ANN의 구조

ANN에는 여러 가지 다양한 모형이 있다. MLP (Multiplayer Perceptron, 다층인식자) 신경망, RBF (Radial Basis Function, 원형기준함수) 신경망, EBF (Elliptical Basis Function, 타원형기준함수) 신경망의 세가지가 있으며 가장 널리 사용되는 모형은 MLP 신경망이다. MLP 신경망은 입력층, 은닉마디로 구성된 은닉층 그리고 출력층으로 구성된 전방향 신경망이다.

- 입력층 : 각 입력변수에 대응되는 마디들로 구성되어 있다. 명목형(norminal) 변수에 대해서는 각 수준에 대응하는 입력마디를 가진다.
- 은닉층 : 여러 개의 은닉마디로 구성되어 있다. 각 은닉마디는 입력층으로부터 전달되는 변수값들을 비선형함수(Nonlinear function)로 처리하여 출력층 또는 다른 은닉층에 전달한다.
- 출력층 : 목표변수(Target)에 대응하는 마디들을 갖는다. 여러 개의 목표변수 또는 세 개 이상의 수준을 갖을 경우 여러 개의 출력마디가 존재한다.

3.3 ANN의 특징

ANN은 단순한 기능을 가진 무수히 많은 신경세포 또는 처리소자들이 병렬연결된 연산구조로 되어 있다. 각 신경세포는 다른 신경세포들과 완전히 독립적이며 자신들과 연결된 연결강도를 통해 직접 전달되는 정보에만 의존하며 다른 정보들과는 무관하다. 이로인해 병렬처리가 가능하고 연산속도가 빠르다. 또

한 무수히 많은 연결강도를 가지고 있어 정보의 분산 표현 및 처리가 가능하다. 또, 중복성이 크므로 fault-tolerant 할 뿐 아니라 일부 정보로부터 전체를 얻을 수 있는 연산기억(Associative memory) 특성을 갖는다. ANN은 학습이나 훈련을 통해 연결강도를 조정함으로써 새로운 정보를 추가하거나 변경할 수 있는 적응 특성도 함께 가지고 있다.

ANN은 주어진 문제의 입력패턴과 출력패턴의 예를 충분히 많이 생성하여 이들의 관계를 추출하며, 병렬 구조를 가지고 많은 양의 데이터를 사용하여 학습한다. 이와 같은 특징으로 인해 ANN은 신경회로 컴퓨터로 조직되어 패턴인식, 음성인식, 음성합성, 자동번역, 최적화, 적응제어, 수치해석 등 많은 분야에 응용되고 있다.

3.4 NATM 공법 적용 구간 모델링 DB 구축 및 설계 ANN 엔진 적용

Fig. 5는 일반적인 NATM 라이닝의 설계 흐름과 ANN 엔진을 적용하여 간편화된 설계 흐름을 비교할 수 있도록 제시된 그림이다. 설계조건에 Input Data만 확보한다면 하중산정과 구조해석에 소요되는 시간을 줄이고 설계자가 간편하게 설계단면을 확보할 수 있다. 구조해석을 대체한 ANN 엔진에서 출력된 최대부재력의 정확도가 예비설계단면을 선정할 때 가장 중요한 요소임을 고려하여 모델링 DB와 ANN 엔진 구축에 있어서 정확도를 높이는데 중점을 두었다.

3.4.1 ANN 엔진 구축 과정

Fig. 6은 NATM 2차 라이닝 최적 설계를 ANN 엔진을 구축하는 과정에 대한 이해를 돕기 위한 구축 순서도이다. 먼저 지반 조건, 라이닝 제원, 부재력 등 다양한 설계 조건을 고려한 구조해석 case를 선정하며 이때 ANN 엔진의 사용성과 정확도를 높이기 위하여 최대최소범위 및 case간의 다양성을 갖추도록 하였다. 본 연구에서는 총 80개의 case를 선정하였고 선정한 case의 구조해석을 수행하여 ANN 엔진의 DB를 구축하였다. 여기에서 출력 Parameter인 최대부재력과 연관성이 깊다고 판단되는 입력 Parameter를 검토하여 각각 정규화한 후 Matlab을 활용하여 ANN 엔진을 구축하였는데 이에 대한 자세한 내용은 3.5.3절에서 다루었다. 구축한 ANN 엔진은 RSE와 RI값을 계산하고 임의의 Validation Set으로 검증하여 완성하였다. 완성된 ANN 엔진을 통해 출력된 Output 값은 역정규화하여 예측한 최대부재력을 산출하는데 활용할 수 있게 된다.

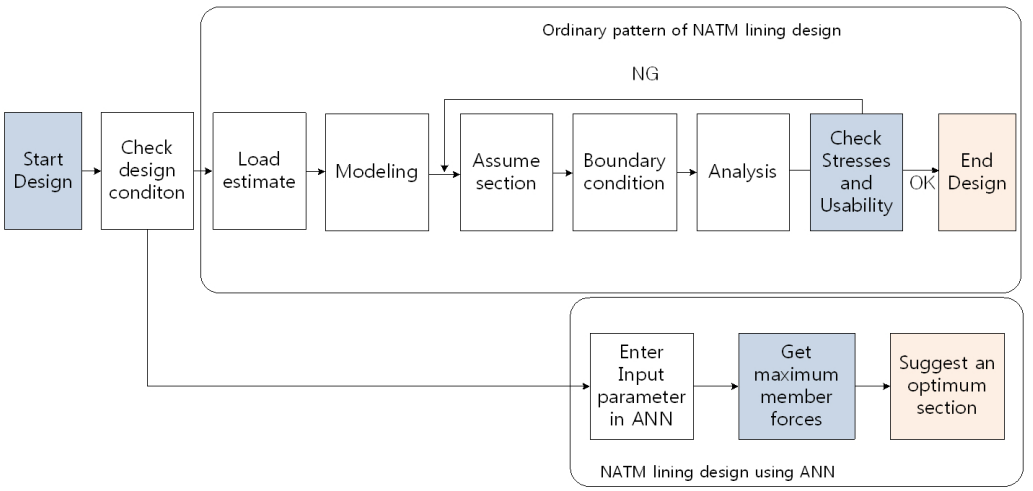


Fig. 5. Comparison of the flow of NATM secondary lining design after applying the ANN

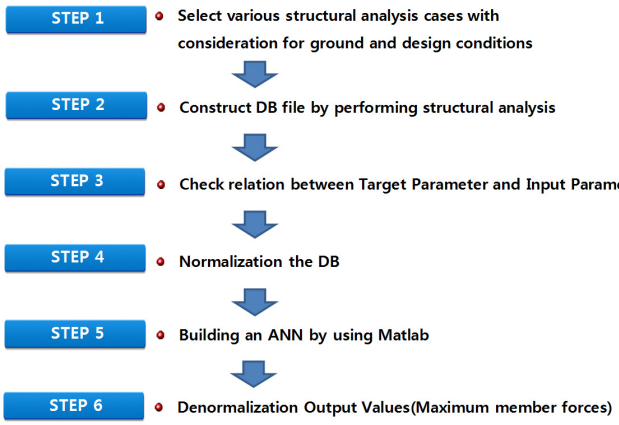


Fig. 6. Flow of building an ANN

3.4.2 해석 단면 선정

ANN 구성을 위하여 총 80 개의 선정된 설계 조건에 대해 최대모멘트, 최대축력, 최대전단력, 최대사용모멘트를 구조해석하고 DB를 구축하였다. ANN 구축에 사용된 입력변수의 범위는 Table 5에 나타냈다. 입력값 중 지반 조건은 해저터널 연구단의 서울대학교 연구실적을 참고하여 대표 지반 물성값을 설계 조건에 따라 Table 6과 같이 암반 1등급~5등급의 5가지로 구분하였고, 추후 연구를 위해 지반조건 확장은 가능하도록 하였다. 이는 해저터널에서 NATM 공법을

Table 5. The range of input value considered for ANN

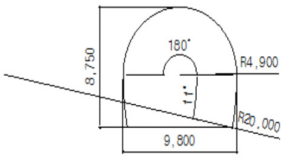
Classification	Breadth (m)	Height (m)	Lining thickness (m)	Ground Type
Max	21.2	14.45	0.5	5
Min	9.8	8.75	0.2	1

Table 6. Input value for FEM analysis

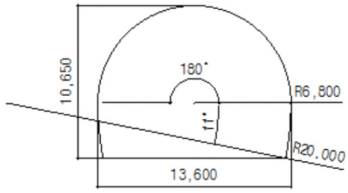
Ground Type	γ_s (kN/m^3)	E_s (MPa)	ν_s	C (kPa)	ϕ ($^\circ$)
Rock I	26.8	35000	0.20	6000	45
Rock II	25.7	22000	0.22	2000	40
Rock III	24.7	8000	0.24	700	38
Rock IV	23.2	1500	0.27	200	27
Rock V	21.4	400	0.30	50	21

Table 7. Load combination factor

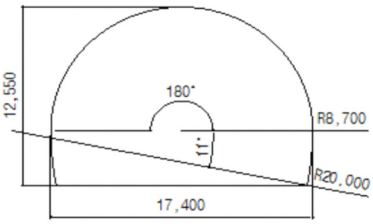
Description		Dead Load	Relaxed Rock Load	Residual Water Pressure	+ Temperature Load	− Temperature Load	Drying Shrinkage
Strength	C1	0.9	0.9	1.6	-	-	-
	C2	1.2	1.6	1.6	1.2	-	-
	C3	1.2	1.6	1.6	-	1.2	1.2
Usability	U1	1.0	1.0	1.0	-	-	-
	U2	1.0	1.0	1.0	1.0	-	-
	U3	1.0	1.0	1.0	-	1.0	1.0



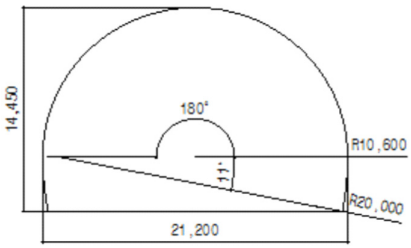
a. Starting point (B*H=9800*8750)



b. The widening A (B*H=13600*10650)



c. The widening B (B*H=17400*12550)



d. The widening C (B*H=21200*14450)

Fig. 7. Cross-sectional drawing of NATM lining (Unit : mm)

적용하는 구간의 특성 때문인 것으로, 해저터널의 경우 구난역이나 환기시설에 존재하는 확폭구간 즉 TBM 공법의 적용이 불가능한 지역에 한해 국부적으로 NATM 공법을 적용하기 때문이다. 해저터널에서 구난역이나 환기시설 등 확폭구간이 필요한 지점은 주로 섬이나 인공섬 등 지반 조건이 비교적 양호한 구간에 해당된다. 수치해석시 적용한 하중조합은 Table 7에 나타냈다. Fig. 7은 구조해석에 사용한 대표 단면 4가지에 대한 그림을 나타냈다.

3.4.3 학습 DB 구축

NATM 2차 라이닝의 ANN은 설계 정보를 바탕으로 하는 터널 폭, 터널 높이, 라이닝 두께 및 지반등급의 4개 입력값을 정규화하여 입력하고 단면 검토를 위한 최대 모멘트, 최대 축력. 최대 전단력 및 최대 사용 모멘트를 예측함에 있어서 각각의 ANN을 구성한다. 보다 정확한 설계는 터널 라이닝을 천장부, 어깨부, 측벽부로 구분하여 각 부위에 대한 최대 모멘트부와 최대 축력부의 모멘트, 축력 및 전단력을 판단하여 각 부위 별로 철근배근을 달리할 수 있으나 본 연구에서는 단순화된 최대 부재력을 고려하여 정확도를 높이고자 하였다.

Fig. 8에서와 같이 각 해석 조건을 고려하여 이완하중과 잔류수압을 정한 후 터널 주변 지반의 등급에

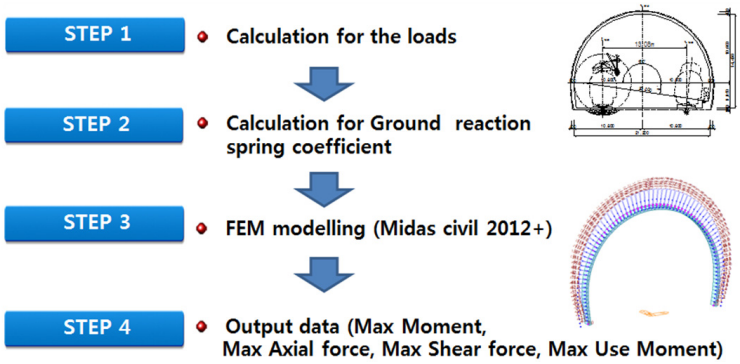


Fig. 8. FEM analyzing flow for NATM secondary lining

Table 8. Input and Output parameters

Input Parameter	Output Parameter
Breadth	Max Moment
Height	Max Axial Force
Lining thickness	Max Shear Force
Ground type	Max Using Moment

따른 지반 반력 계수를 계산하고 수치해석을 수행하여 단면검토를 위한 NATM 2차 라이닝의 최대부재력을 산정하였고, 산정된 부재력은 ANN 구축시 학습 DB로 사용하였다. 해저터널의 특성을 고려하여 구난역 혹은 환기시설에 해당하는 80개의 학습조건을 고려한 해석 케이스를 선정하였다. 다음 Table 8에는 NATM 2차 라이닝 최대부재력 ANN 구축시 적용되는 입력값과 출력값을 나타냈다.

3.4.4 NATM ANN 구축

ANN. 엔진 구축시 은닉층의 수는 1~10 범위 내에서 사용되는데 10에 가까울수록 구축된 DB의 인자에 대해서만 정확한 값을 출력한다. 본 연구에서는 적합한 NATM ANN 모델 구축에 사용할 내적인자 수를 결정하기 위해 TBM 세그먼트 라이닝 ANN 구축시 ANN의 예측치에 대한 RMSE 값의 비교를 수행하였고 은닉층의 뉴런수는 2개, 모멘텀은 0.8, 학습률은 0.2를 사용하였다. 구축한 DB를 활용하여 학습을 수행한 ANN은 Input layer에 4개의 입력뉴런, 1개의 Hidden layer에 2개의 은닉뉴런, Output layer에 1개의 출력뉴런으로 구성했다.

먼저 설정된 DB 출력값의 최대·최소값을 Table 9에 나타냈다. Table 10에서는 결정계수(R^2), 평균제곱근오차(RMSE), 평균절대오차(MAE) 등 세 가지 통계변수를 이용해 ANN의 학습 평가 결과를 보여주는데 각 부재력의 최대최소값을 고려하였을 때 오차범위가 크지 않다고 판단된다. NATM ANN의 구축 결과는 다음 Fig. 9에 나타냈다. 이 학습 평가 결과는 최대모멘트, 최대축력, 최대전단력 및 최대사용모멘트에 대한 학습결과 결정계수(R^2)가 각각 0.9770, 0.9614, 0.9880, 0.9009로 나타나 각 최대 부재력에 대한 ANN 예측 값과 학습에 사용된 값은 높은 상관관계를 보여준다.

Table 9. Maximum and Minimum sectional forces by ANN

Classification	Maximum value	Minimum value
Max Moment ($kN \cdot m$)	575.8	20.8
Max Axial Force (kN)	4907.8	629.1
Max Shear Force (kN)	260.4	27.8
Max Using Moment ($kN \cdot m$)	372.1	15.5

Table 10. Result of building an ANN

Classification	R^2 (Coefficient of determination)	RMSE (Root Mean Square Error)	MAE (Mean Absolute Error)
Max Moment ($kN \cdot m$)	0.9770	12.2	8.4
Max Axial Force (kN)	0.9614	166.3	13.8
Max Shear Force (kN)	0.9880	5.4	4.0
Max Using Moment ($kN \cdot m$)	0.9009	88.3	66.8

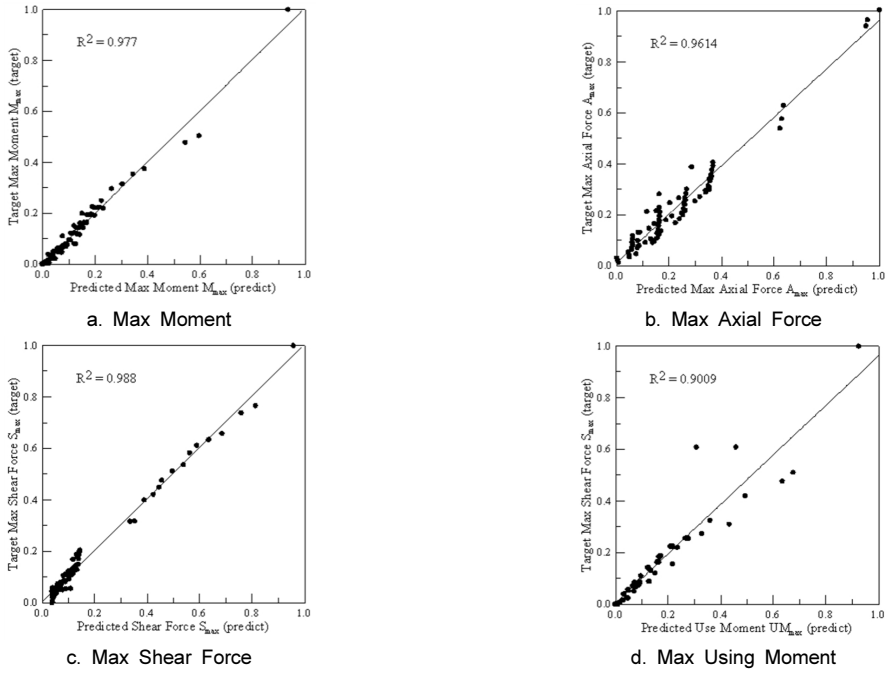


Fig. 9. Comparison of computed versus predicted values for training

3.4.5 NATM ANN 민감도 분석

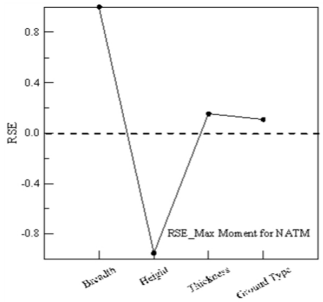
구축된 NATM ANN에 대해서 TBM 세그먼트에서와 같은 방법으로 RSE (Relative Strength Effect)와 RI (Relative Importance)를 분석하였다. Fig. 10에서는 각 부재력에 대한 RSE를 나타냈고, 실제 값을 Table 11에 표시했다.

Table 11에 나타난 바와 같이 전단력을 제외한 경우 터널내측 폭에 가장 큰 영향을 받는 것으로 검토되었다. 터널 내측 높이에 대해서 최대축력과 모멘트, 최대사용모멘트는 (-)의 부호로 영향 받는 것으로 나타났다.

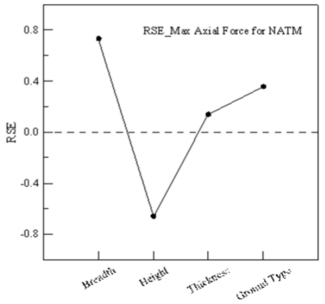
추가적으로 RSE와 마찬가지로 각 최대부재력에 대한 구축된 ANN의 RI를 검토하여 Fig. 11에 RI를 나타냈다. RI는 RSE와는 다른 방식으로 분석하는 입력값의 결과값에 대한 민감도 지표로써 RI 분석 결과 지반등급이 모든 최대부재력에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났으며 라이닝 두께가 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 RSE의 결과와도 다소 일치하는 것으로 터널이 위치하게 되는 지역의 지반 상태가 NATM 2차 라이닝의 단면 설계에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 향후에는 지반 조건에 대한 분류를 통해 다양한 지반 조건 중 어떤 요소가 단면 설계에 큰 영향을 미치는지 연구해보는 것도 좋을 것으로 사료된다.

Table 11. RSE of Maximum member forces

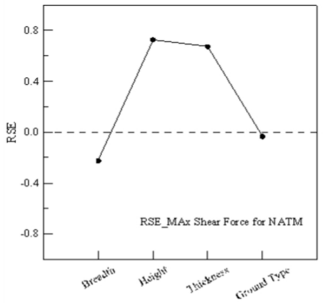
Classification	Breadth	Height	Thickness	Ground Type
Max Moment	1.000	-0.952	0.153	0.107
Max Axial Force	0.731	-0.658	0.139	0.358
Max Shear Force	-0.223	0.727	0.674	-0.032
Max Using Moment	1.000	-0.987	0.025	0.085



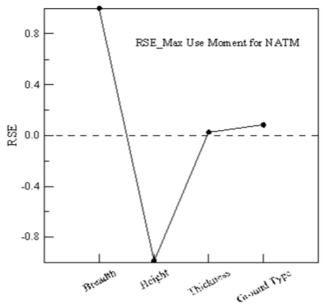
a. Max Moment



b. Max Axial Force

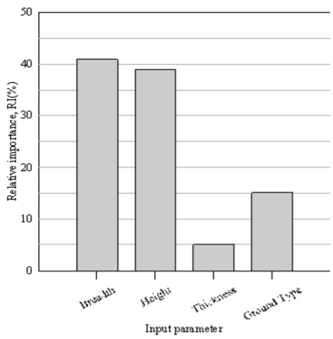


c. Max Shear Force

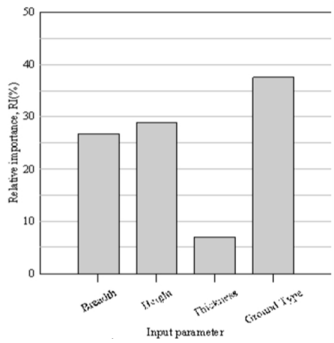


d. Max Using Moment

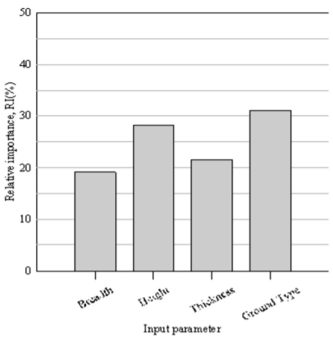
Fig. 10. RSE



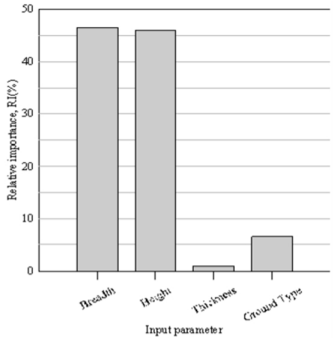
a. Max Moment



b. Max Axial Force



c. Max Shear Force



d. Max Using Moment

Fig. 11. RI

3.4.6 NATM ANN 부재력 예측 결과 검증

이 절에서는 NATM ANN을 이용한 부재력 산정 시스템의 효율을 제고하고 정확도를 검증하기 위해 4개 케이스를 Validation set으로 설정하고 이를 Table 12에 나타내고 부재력 검증을 수행하여 그 결과를 Table 13에 나타냈다. 선정된 케이스에서 ANN의 부재력 평균 예측 오차는 최대모멘트는 4.6%, 최대축력은 4.9%, 최대전단력 5.1%, 최대사용모멘트 7.4%로 나타나 실제 예측 수준이 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 최대사용모멘트의 경우 일부 경우에 있어서 15%의 오차 수준을 보이는 것이 있지만, 최대사용모멘트는 계수하중의 최대 모멘트보다 크기가 작고 단면의 선정에는 고려되지 않는 요소이며 또한 오차의 절대값 자체가 작은 경우로 실제 단면 설계에는 영향을 미치지 않았다.

3.5 NATM 2차 라이닝의 설계

NATM의 2차 라이닝의 설계는 콘크리트 구조기준 (2012) 설계법에 따라 하중조합하여 3.5.1 절의 Table 18과 같은 하중조합을 사용하며 이완하중과 잔류수압을 고려한 배수터널로 가정하여 설계하였다. NATM 공법 적용 구간은 구난역이나 환기 시설에 적용되므로 대부분 섬에 위치해 있고 토피고가 해저 구간보다 크고, 주변 지반이 양호하여 육상 시공 조건과 비슷한 것으로 간주할 수 있기 때문이다. 최초 무근 적용성을 검토하여 단면력이 허용응력 내에 존재하는 경우 무근 콘크리트로 설계하며, 이외의 경우 적절한 철근배근을 계획하였다. 철근의 피복두께, 최소간격, 배력철근은 설계조건에 맞는 배근을 고려하며 콘크리트 구조기준 (2012)에 따랐다. 철근배근 가정 후에는 계수

Table 12. Input values for ANN verification

Classification	Breadth (m)	Height (m)	Lining thickness (m)	Ground type
1	13.6	10.65	0.5	5
2	17.4	12.55	0.5	3
3	21.2	14.45	0.4	2
4	21.2	14.45	0.5	5

Table 13. Maximum sectional forces by ANN and FEM analysis for verification

Classification		Max Moment (kN·m)	Max Axial (kN)	Max Shear (kN)	Max Use Moment (kN·m)
1	FEM	229.1	2194.9	170.1	165.3
	ANN	235.8	2371.2	164.7	190.9
	ERR	3%	8%	-3%	15%
2	FEM	130.0	2078.7	60.6	96.5
	ANN	123.4	1866.2	56.6	92.0
	ERR	-5%	-10%	-7%	-5%
3	FEM	100.3	1750.1	61.9	73.5
	ANN	96.2	1736.8	57.7	71.9
	ERR	-4%	-1%	-7%	-2%
4	FEM	575.8	4907.8	260.4	372.1
	ANN	539.3	4931.8	250.3	344.8
	ERR	-6%	0%	-4%	-7%
Average absolute error		4.6 %	4.9 %	5.1 %	7.4 %

하중에 대하여 천장부, 어깨부, 측벽부에 대한 구조검토를 각각 실시하고 사용모멘트에 의한 사용성 검토를 수행하여 가정단면의 적정성 여부를 판단한다. 사용성 검토는 구조물 또는 부재가 사용기간 중 기능과 성능을 유지하기 위하여 외력에 대하여 안전해야 하므로 사용 하중하에서 사용성 및 내구성을 검토해야 한다.

NATM의 2차 라이닝의 설계는 무근안정성 검토 후 철근보강이 필요하다고 판단되면 단면을 가정하고 강도설계법으로 안정성을 검토했다. 콘크리트 라이닝에 철근을 보강하지 않고 무근으로 설계하기 위해서는 휨응력($f = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{Z}$)과 전단응력이 콘크리트의 허용응력보다 작거나 같아야 하며 이에 따른 콘크리트의 허용응력은 Table 14에 나타냈다. 여기서 사용되는 강도감소계수는 무근콘크리트의 휨모멘트, 압축력, 전단력에 해당되는 0.55를 사용했다.

강도설계는 부재의 파괴상태 또는 파괴에 가까운 상태를 기초로 하는데 이런 상태에 가까이 있는 부재의 강도를 극한강도라 하며, 기 설명된 TBM 세그먼트 라이닝의 설계법과 동일하다. 강도검토시 가정단면의 철근에 대해 철근 중심간격과 배력 철근의 설계기준을 검토해야 한다. 사용성 검토는 인장철근의 간격제한으로 균열을 제어하도록 콘크리트 구조기준(2012)에 개정되었다.

Table 14. Check allowable stress of concrete

Classification	Check allowable stress of concrete
Allowable bending compressive stress	$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{M_u}{\phi M_n} \le 1$
Allowable bending tensile stress	$\frac{M_u}{S} - \frac{P_u}{A_g} \le 0.42\phi\sqrt{F_{ck}}$
Allowable bending shear stress	$V_u = \phi 0.11\sqrt{f_{ck}}bh$

P_u : Axial force, M_u : Moment, P_n : Nominal axial force, M_n : Nominal moment, S : Section modulus, A_g : Area, V_u : Shear force, b : Breadth, h : Thickness

4. 결론 및 향후 연구 계획

이 논문에서는 해저터널에서 적용되는 NATM 터널의 라이닝 최적설계 시스템에 관한 내용을 다루었다. 최적설계를 위해 관련 선행 연구에서 그 적용성이 확인된 바 있는 ANN을 도입하여 시공 조건, 지반조건 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 해저터널의 제한된 조건에 대해 각 굴착 공법에 따른 라이닝의 설계가 가능하도록 하였다. 구축된 인공신경망은 설계자가 쉽게 터널 라이닝 설계에 접근할 수 있을 것으로 기대된다. 일반적으로 터널 라이닝의 유한요소해석은 모델링과 해석에 상당히 많은 시간이 소요되기 때문에 이 논문에서 구축된 ANN은 사용자에게 시간적· 공간적 제한을 상당부분 해소해 주어 경제적인 라이닝 설계를 가능하게 할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 향후 해저터널의 BIM 개발 등의 추가 연구에 있어서 특정 구간의 라이닝 설계와 연동할 수 있을 것으로 기대되며 Input parameter에 대한 추가적인 연구를 통해 단면의 설계에 가장 영향이 큰 요소인 지반 조건을 세분화하고 더 정밀한 ANN 엔진을 구축하는 연구를 수행할 예정이다. 연구의 구체적인 내용은 다음과 같다.

1. 해저터널의 설계· 시공에 있어서 장대화 됨에 따라 환기 및 방재 측면에서 구난역의 필요성이 규정되어 있다. 이에 구난역에서의 시공은 TBM 공법만으로는 시공성을 확보하기 어렵기 때문에 일부 구간의 NATM 터널이 계획되는 실정이고, NATM 터널의 개략적이 2차 라이닝 설계를 위한 ANN을 구축하였다. 해저터널의 설계에 있어서 NATM 터널 라이닝의 설계시 추가의 수치해석 없이 정확도 높은 부재력을 얻을 수 있어 사용자가 쉽게 적용할 수 있도록 하였다.

2. ANN으로 정확히 예측된 최대부재력을 바탕으로 시공성이 확보된 단면의 DB를 구축하고 각 단면의 구조검토를 통하여 해당 단면의 적정성을 평가하였다.
3. ANN에 대한 검증 결과 상용유한요소해석 프로그램을 이용한 부재력 결과와 90% 이상 일치하는 것으로 검증되어 장대화 및 대단면화 된 해저 터널의 해석 및 설계에 효과가 극대화 될 것으로 기대되며, 본 연구로 구축된 ANN을 통해 가상 터널의 시공조건을 고려한 터널의 라이닝 부재력 평가 및 단면 설계를 가능하도록 하였다.

본 연구를 통해 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. 또한 추후에는 본 연구를 더욱 발전시켜 ANN엔진의 부재력 산출 정확도를 높인다면 추가적인 구조해석 없이 최적단면설계를 가능하게 할 수 있을 것으로 고려된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부-국토교통과학기술진흥원-국토교통기술연구개발사업(2013년이후)[52-B991]의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Beale, M.H., Hagan, M.T., Demuth, H.B. (2013), Neural Network Toolbox User's Guide, Mathwork Inc.
2. European Committee for Standardization, (2004). “Eurocode 2: design of concrete structures – part 1-1: general rules and rules for buildings”.
3. Garson, G.D. (1991), “Interpreting neural-network connection weights”, AI Expert, Vol. 6, No. 7, pp. 47-51.
4. Lim, S.B. (1997), “Evaluation of dynamic damage adjacent to a blasthole in tunnel excavations”, Kyunghee Univ. PhD dissertation.
5. Midas users manual version 2012+ (2012), MIDAS IT Co., Ltd.
6. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012), “Standard concrete construction specification 2012”.
7. Park, E.S., Shin, H.S., Hong, E.S. (2007), “Trends of investigation and design for subsea tunnels”, KSCE Tunnel Committee Special Conference 27th Dec. pp. 29-41.
8. Shin, H.S. (2011), “Technology aspects of subsea tunnels”, Proceedings of the Korean Society for Rock Mechanics Conference 2011.9, pp. 35-43.
9. Terzaghi, K. (1943), “Theoretical soil mechanics”, J. Wiley & Sons, New York.
10. Yoo, C.S., Choi, J.H. (2014), “Prediction of TBM tunnel segment lining forces using ANN technique”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 1, pp. 13-24.
11. 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.
12. Yoo, C.S., Kim, J.M., Kim, J.H. (2005), Application of Information Technology in Tunnel Design - A case study, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association pp. 105-116.
13. 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.
14. 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.