

IT 기반의 터널 최적 설계를 위한 시스템 개발

유충식¹, 김선빈^{2*}, 유광호³

Development of IT-based tunnel design system

Chung-Sik Yoo, Sun-Bin Kim, Kwang-Ho Yoo

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 determination of support patterns and stability analysis of selected support patterns. A number of sub-modules for determination of support patterns and stability assessment were developed and implemented to the system. It is shown that the ANNs trained with the results of 2D and 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: Information technology, artificial neural network, tunnel, finite element method, finite difference method, visual C++

요 지 본 논문에서는 IT 기술을 이용한 터널 자동화 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 터널 거동 예측 기술에 대해 그 개념과 ANN 학습과정 및 검증과정을 기술하였다. ANN-기반의 터널 거동 예측은 FEM 및 FDM 등 연속체 기반의 해석을 토대로 구축한 DB를 ANN을 통해 일반화 한 후 개발된 엔진을 세부 모듈에 접목시켜 별도의 해석 없이 유사 단면 혹은 현장에 적용이 가능하도록 하였다. 본 논문에서는 구체적인 개발과정과 향후 적용방향에 대해 구체적인 내용을 기술하였다.

주요어: IT기술, 인공신경망, 터널, 요한차분해석, 비주얼 C++

1. 서 론

일련의 터널설계 과정은 사용목적 및 현장조건에 적합한 터널단면과 지보패턴, 굴착공법 등을 설계자가 경험적인 방법에 의해 선정을 한 후 이를 수치해석 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 반영해야 하는데 터널이 장대화/대단면화 되는 경우 실제 현장 데이터를 입수하는데 한계가 있고, 다량의 지반정보 및 설계정보를 분석해야 하므로 정량적인 해석에 제한이 따르게 되며 많은 시간과 비용을 초래하게 된다. 이러한 문제를 개선하여 보다 효율적인 터널설계를 위하여 본 연구에서는

터널 설계과정을 자동화하는 시스템 개발을 목표로 하고 있다. 터널설계 자동화란 임의의 시공조건과 터널용도 등의 정보를 입력하여 터널설계를 자동으로 수행하게 하고 동시에 설계결과에 대한 시공중 안정성 평가를 수행함으로써 최적화된 터널설계가 가능하도록 하는 것을 의미한다.

이를 위한 기초연구로서 인공신경망(ANN)과 유한요소해석(FEM)의 연계기법을 통한 터널 시공중 안정성 평가 및 거동예측에 관한 연구를 수행하여 이러한 접근 방법의 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(유충식 등 2005a, 2005b, 2006; Yoo et al. 2007). 한편, 이와 유사한 연구로서 Cai et al.(1998)은 ANN 기법을 토대로 cavern의 최적설계에 관한 연구 결과를 제시하고 ANN의 지하공간/암반공학 분야에 효율적으로 적용될 수 있음을 보인바 있다. 또한 최근 들어 Rangel et al.(2005)

¹정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

²정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

³정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

*교신저자: 김선빈 (ksb9677@hanmail.net)

은 nero-fuzzy 기법을 도입하여 시공중 터널의 안정성을 평가하는 기법을 제시하였다. 여기서는 경험적 터널 설계/시공기술의 보완 기법으로서 ANN, 수치해석, 이론해 등을 종합적으로 적용하는 방안을 제시하였다. 아울러 Ren et al.(2005)은 지하공간의 형상을 결정하는데 있어 Evolutionary structural optimization(ESO) 기법을 제안하여 유한요소해석 기법을 토대로 지하공간 형상을 최적화 하는 방안을 제안하였다. 이와 같이 최근 들어 인공지능, 수치해석 등의 기법을 접목하여 경험적인 지하공간 설계 과정을 보완할 수 있는 방안을 강구하고 있는 추세이다.

본 논문에서는 FEM-ANN 연계기법을 제시한 유충식 등 (2006), Yoo et al.(2007)의 연구결과 확장의 일환으로 수행된 ANN 기반의 터널 설계 자동화 시스템 개발 내용을 다루었다. 먼저 개발된 시스템의 구조와 기능, 개발환경 등을 기술하였으며 아울러 시스템 모듈에 접목된 터널 설계 ANN 엔진 및 안정성 평가 엔진 구축 및 검증 과정을 상세히 다루었다.

2. IT-TUNNEL 개념 및 구성

2.1 시스템 개요

본 시스템은 임의 터널 설계조건에서 지보패턴 선정 및 안정성 평가의 일련의 과정을 자동화하는 시스템으로서 입력된 대상 현장의 지반정보와 터널단면정보를 토대로 지보패턴을 자동 선정 하고 선정된 결과에 대해 안정성 평가가 수행되도록 구축되어 있다. 지보패턴은 Q-system에 근거하여 선정하거나 기 설계 DB를 토대로 일반화된 ANN으로 선정할 수 있으며 선정된 지보패턴은 FEM 및 FDM으로 구축된 DB로 일반화된 ANN으로 안정성 검토가 이루어진다. 시스템은 사용자 중심의 Graphic User Interface(GUI)를 극대화하여 입력 및 연산, 출력 과정이 한 시스템 상에서 통합으로 운용될 수 있도록 시스템을 구축하였다.

한편, 본 시스템의 개발환경은 윈도우 기반의 응용프로그램으로서 향후 시스템 확장시 GIS 등 여타의 소프트웨어와의 연계가 용이하도록 하기 위해 인터페이스의 구축 및 연산에 탁월한 C++을 기반으로 코드화작업이 되었으며, 프로그램 코드화에 사용된 컴파일러는 Microsoft사에서 개발한 Visual C++.net을 사용하였다.

2.2 시스템 모듈 구성

IT-TUNNEL은 입력모듈과 설계모듈, 안정성 평가모듈 등 세 개의 모듈로 구성되어 있으며(그림 1) 본 절에서는 개별모듈에 대한 세부기능 및 모듈 구성안에 대하여 기술하였다.

2.2.1 지반정보 입력모듈

본 모듈은 터널설계를 위한 기본정보로서 대상 현장의 지반/암반에 대한 정보를 입력하는 모듈로서 현장에서 확보한 시추공 정보와 암반분류에 대한 정보를 입력하도록 하고 있다. 각각의 시추공 정보에 대한 입력을 완료하게 되면 대상구간의 종단면도가 출력이 되어 사용자가 지층형태를 확인하면서 설계단면을 구분할 수 있도록 기능을 갖추었다. 입력된 각 지층의 물성 추정 및 지보설계시 활용되는 암반의 Q값을 얻기 위하여 암반분류를 수행하게 되며 암반분류시 Q-system과 RMR 분류가 모두 가능하도록 하였다. 아울러 본 모듈에서는 암반분류 결과로부터 설계단면에 대한 안정성 평가에 활용되는 암반의 물성을 자동으로 산정할 수 있도록 하였다. 즉, 지반조사 결과를 토대로 Hoek-Brown 모델(Hoek & Brown 1990)의 암종과 GSI(Geological Strength Index), 일축압축강도(σ_c)와 암석계수(m_i)를 입력하면 식 (1)~(6)을 토대로 Mohr-Coulomb 파괴규준의 전단강도 정수로 변환하여 안정성 평가시 사용될 수 있도록 하였다(그림 2).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\tau_m^2}{\tau_m + m\sigma_c/8} \quad (2)$$

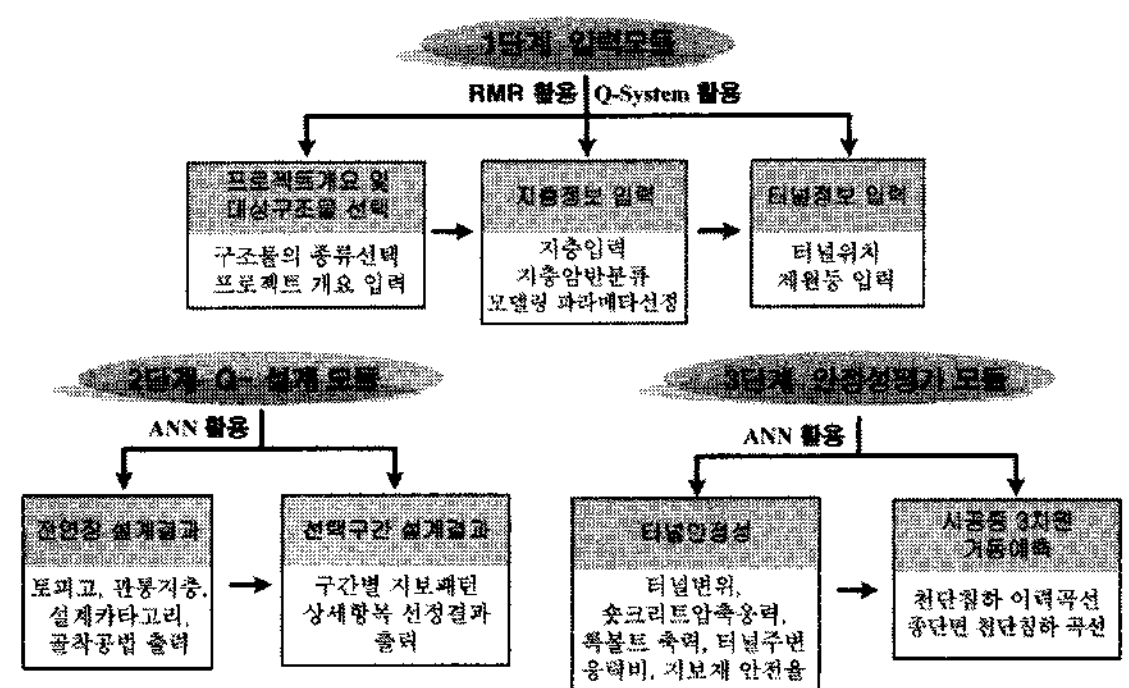


그림 1. 시스템 구조도

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sqrt{1 + m\sigma_c / 4\tau_m} \quad (3)$$

$$\tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4)$$

$$\sin\phi = \frac{k-1}{k+1} \quad (5)$$

$$c = \frac{\sigma_c}{2\sqrt{k}} \quad (6)$$

그림 3은 본 모듈의 예시를 보여주고 있다.

2.2.2 터널정보 입력모듈

본 모듈에서는 터널 설계단면에 대한 기본정보를 입력하는 모듈로서 설계단면별 터널심도와 단면형상 및 제원을 입력하도록 되어 있다. 그림 4에서는 터널정보 입력모듈에서 입력하는 설계단면별 터널 심도와 터널제원을 입력하는 과정을 보이고 있다. 보이는 바와 같이 현재까지의 개발된 시스템에서는 단면제원 입력시 마제형 터널로서 3개의 반지름을 갖는 단면에 입력이 가능하도록 구현하였으며, 입력을 완료한 후에는 각 설계단면

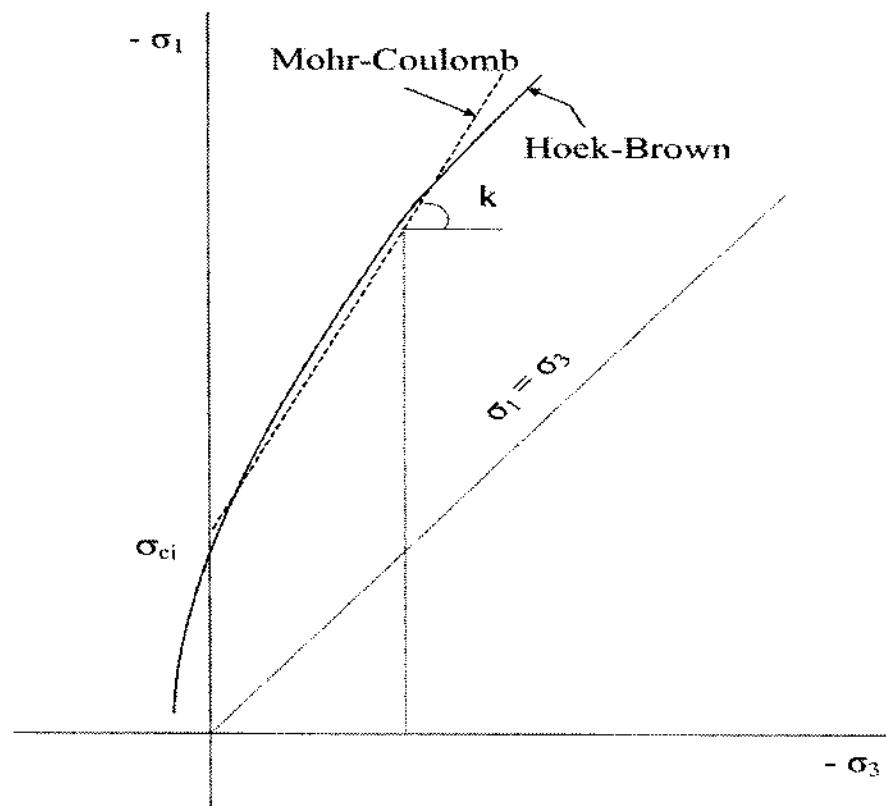


그림 2. Hoek-Brown과 Mohr-Coulomb의 파괴규준 비교

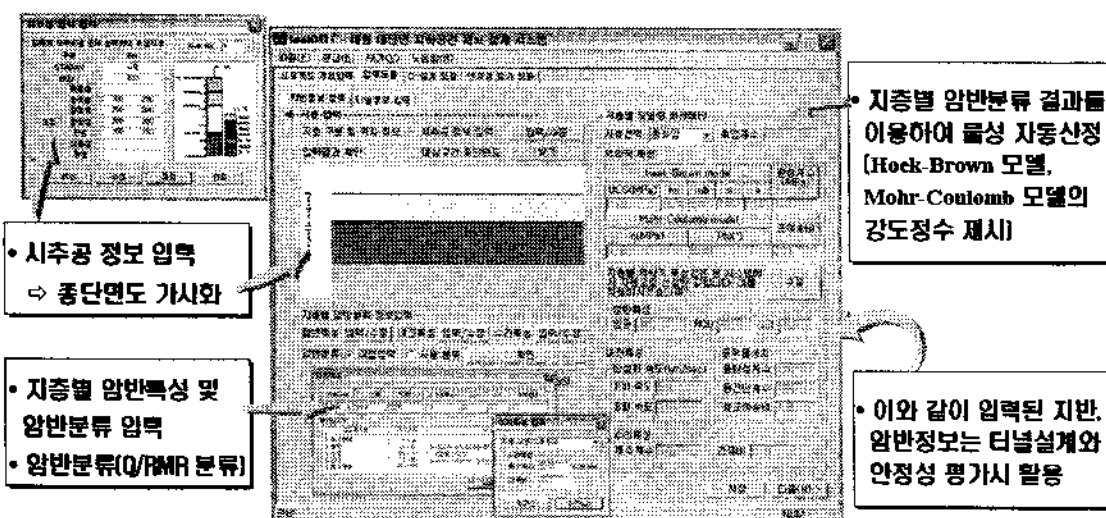


그림 3. 지반정보입력 모듈 예시

별로 굴착단면적이 자동으로 계산되도록 하였다. 또한 터널관통지층 및 터널상부 1.0D 지층의 종류를 시스템 상에서 자동으로 제시하여 Q-설계모듈과 안정성 평가모듈에서 입력정보로서 활용이 되도록 하였다.

2.2.3 Q-설계모듈

본 모듈은 앞서 입력된 지반정보와 터널정보 입력결과로부터 터널설계에 필요한 지보패턴의 상세항목을 자동으로 선정해주는 기능을 갖추고 있다. 지보패턴은 Q-system에 근거하여 그림 5에서 보이는 Q-설계차트를 이용하여 지보항목을 선정하도록 하였는데, ①~⑨까지의 설계카테고리(Design Category) 중 터널이 관통하게 되는 지층의 Q값과 터널 폭, 그리고 터널의 용도에 대한 ESR 값을 토대로 선정이 되도록 하였다. 또한 이완하중(P_{roof})과 무지보 굴착길이(L)은 지반정보 입력모듈과 터널정보 입력모듈에서 입력/산정 Q값, 절리군수(J_n),

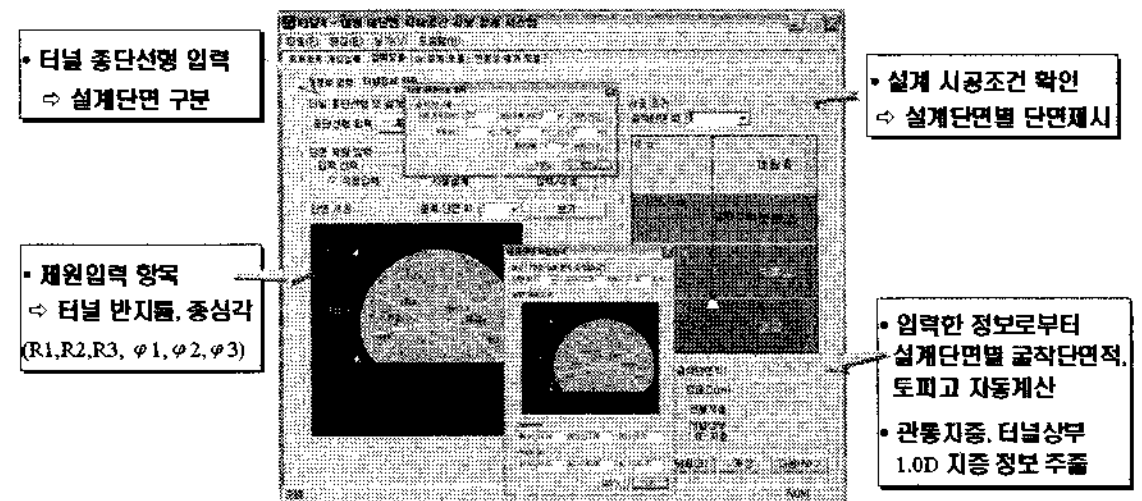
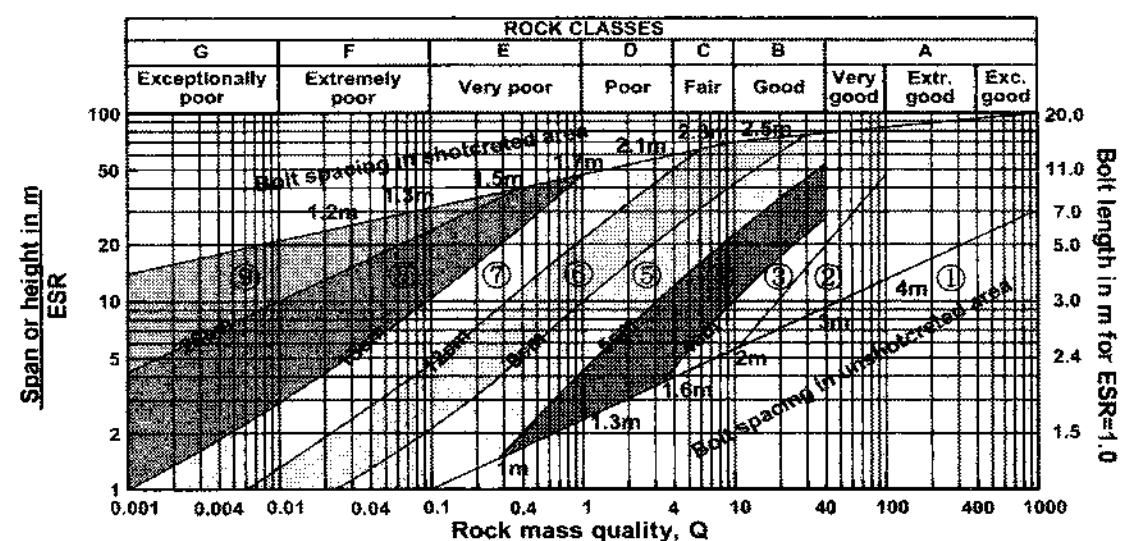


그림 4. 터널정보입력 모듈 예시



- ① 무지보(Unsupported)
- ② SB(Spot bolting)
- ③ B(System bolting)
- ④ 시스템볼트+샷크리트(40-100mm)
- ⑤ 강섬유보강샷크리트(50-90mm)+록볼트
- ⑥ 강섬유보강샷크리트(90-120mm)+록볼트
- ⑦ 강섬유보강샷크리트(120-150mm)+록볼트
- ⑧ 강섬유보강샷크리트(50-90mm)+록볼트+보강철근리브
- ⑨ 2차 라이닝

그림 5. Q-system을 이용한 지보설계

절리 거칠기(J_r), 터널폭(B), ESR 을 이용하여 다음의 식 (7)과 (8)에 제시된 형태로 산정할 수 있도록 하였다. 그림 6은 Q-설계모듈 예시를 보여주고 있다.

$$L = \frac{2 + 0.15B}{ESR} \quad (7)$$

$$P_{roof} = \frac{2\sqrt{J_n} Q^{-\frac{1}{3}}}{3J_r} \quad (8)$$

2.2.4 안정성 평가 모듈

본 모듈은 지반/터널정보모듈, Q-설계모듈에서 입력 혹은 선정된 정보를 토대로 설계단면에 대한 안정성 평가를 수행하여 설계의 적정성을 검토하는 모듈이다. 이후에 기술될 다양한 조건에 대한 FEM/FDM 해석을 통해 구축된 DB로 일반화된 ANN을 본 모듈에 연계하여 안정성 수치해석을 수행하지 않더라도 안정성 평가에 필요한 검토 항목에 대한 평가가 자동으로 수행되도록 하였다. 일반화된 ANN의 가중치(W)와 바이어스(b)를 추출하여 공학적 연산이 가능하도록 다음의 식 (9)의 연산모듈을 시스템 내에 구축하였다.

$$t_n = f_3[W_3 \times f_2\{W_2 \times f_1(W_1 \times p_n + b_1) + b_2\} + b_3] \quad (9)$$

여기서, p_n =입력값, t_n =목표값, $W_1 \sim W_3$ =weight(W), $b_1 \sim b_2$ =bias(b), $f_1 \sim f_3$ =전이함수

그림 7은 안정성평가모듈 예시를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 안정성 평가모듈은 터널 설계시 입력한 조건에 대한 결과를 평가항목별로 확인할 수 있도록 배치하였으며, 입력범위를 수정하여 재평가가 가능하게 하였다.

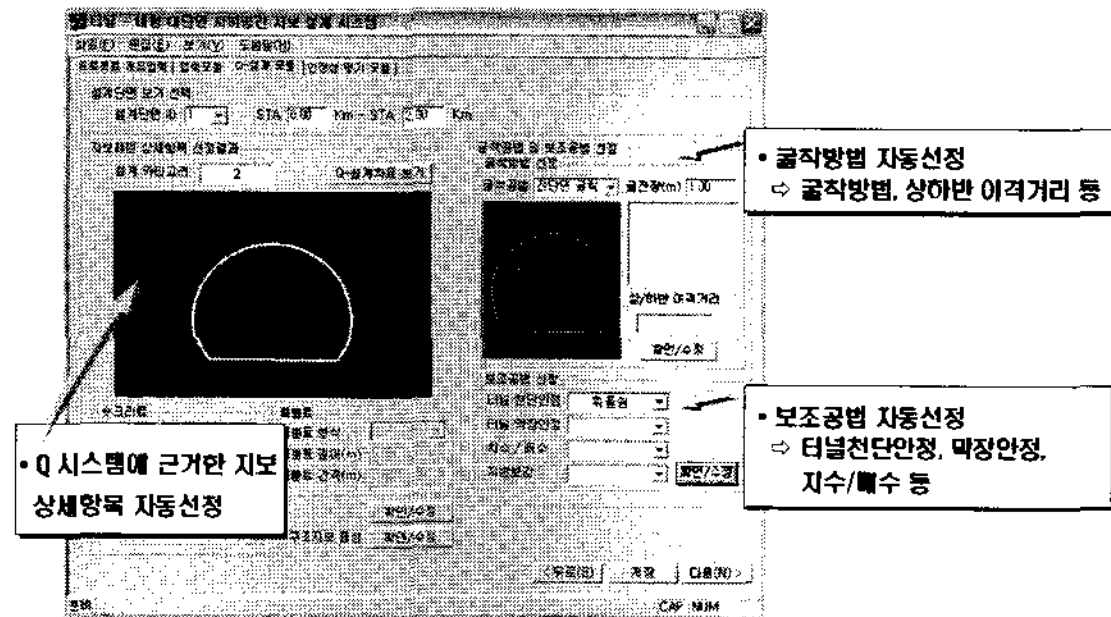


그림 6. Q-설계모듈 예시

3. 산악터널 설계단면에 대한 DB 구축

3.1 DB 개요

본 연구에서 수행한 터널 설계 및 안정성 평가 자동화 기술 개발에 있어 현장 적용성을 제고하기 위해 기 수행된 산악 도로터널을 대상으로 설계단면 및 지보패턴, 설계시 적용한 암종별 역학적 특성에 대한 DB를 구축하여 그 결과가 앞서 기술한 모듈 구축에 반영이 될 수 있도록 하였다.

수집된 자료는 총 18개 현장으로서 각 현장의 터널해석보고서, 지반조사보고서 및 CAD도면 등의 설계 자료

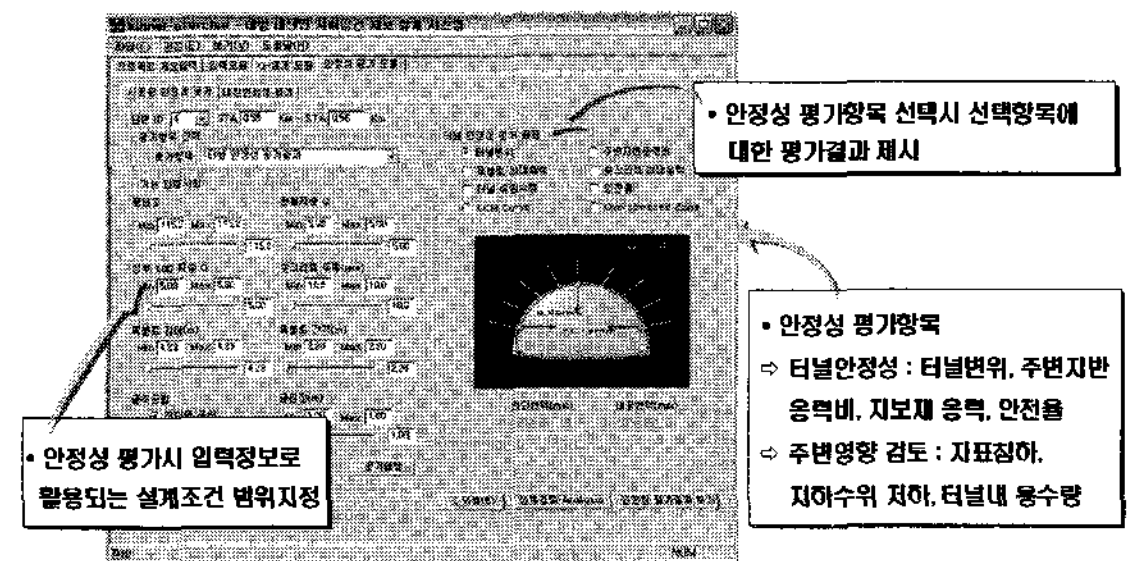


그림 7. 안정성평가모듈 예시

표 1. 구축된 DB 현장별 내역

현장	시공연장	터널직경	편평률
A	3.77km	13.49m	0.61
B	2.52km	11.80m	0.62
C	1.92km	12.73m	0.70
D	0.45km	13.27m	0.73
E	0.44km	11.50m	0.80
F	4.90km	14.83m	0.59
G	0.69km	11.75m	0.69
H	2.12km	11.79m	0.66
I	0.48km	11.56m	0.71
J	2.29km	11.56m	0.71
K	1.52km	11.56m	0.71
L	0.80km	12.35m	0.67
M	0.38km	12.35m	0.67
N	0.50km	12.35m	0.67
O	0.19km	12.07m	0.69
P	0.22km	12.07m	0.69
Q	1.60km	14.75m	0.66
R	0.83km	11.75m	0.67

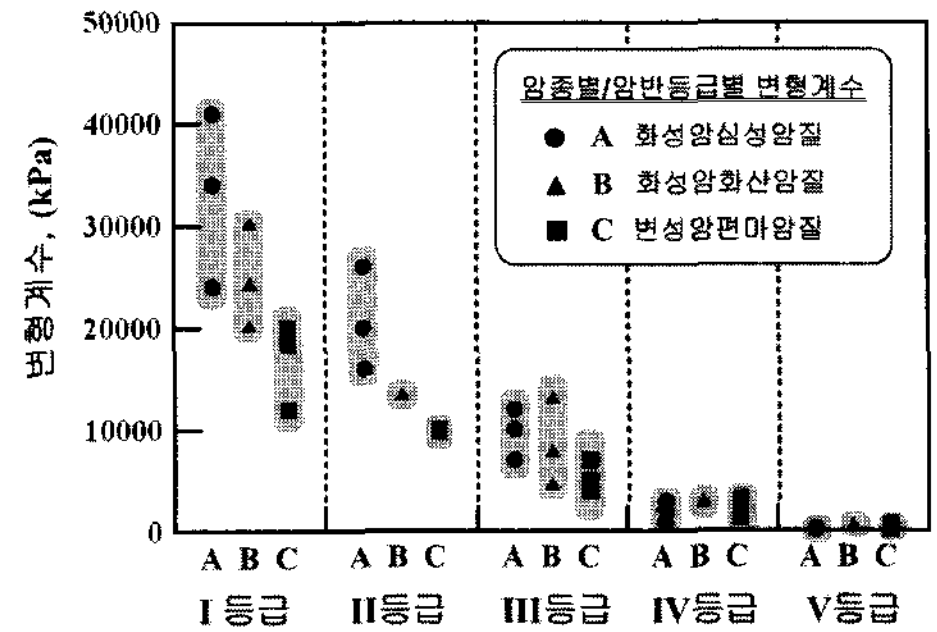
를 분석하였다. 각 현장에서 추가로 분석한 내용은 각 현장별 적용 지반물성과 지보패턴, 그리고 지보패턴별 지보시스템의 상세항목, 굴착공법, 보조공법 등이며 이를 암종별, 암반등급별로 구분하여 분석하였다. 표 1에서는 현장 개요를 보여주고 있는데 터널 시공연장 0.19~5.65 km, 터널 형식은 2차로~6차로로 다양하며, 터널직경은 11.50~14.75 m, 편평률을 0.59~0.90 정도로 적용한 것으로 분석되었다.

3.2 설계적용 암종별 물성

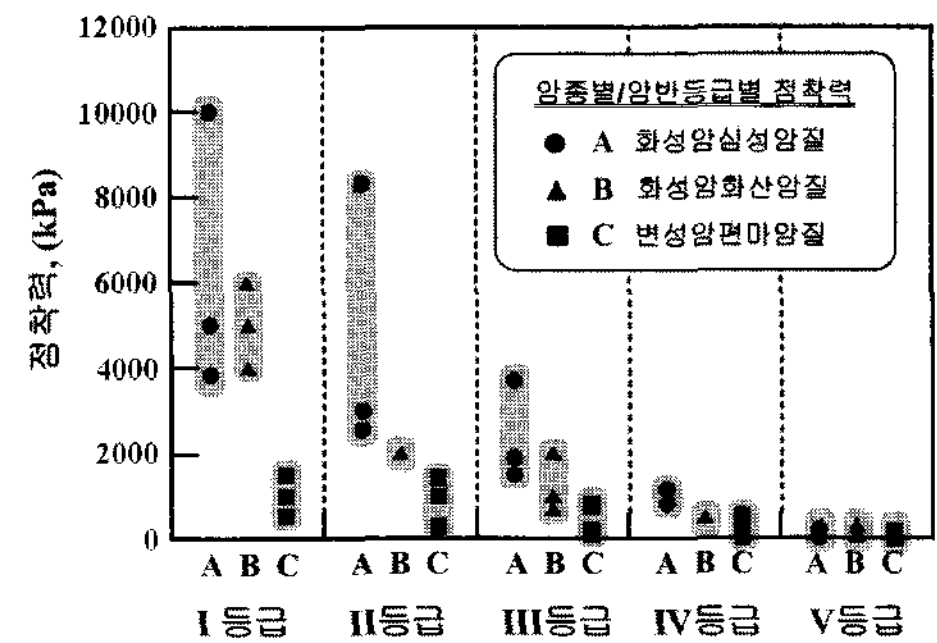
그림 8은 각 현장에서 적용한 암반등급별 암반물성을 세부 항목별로 정리하여 나타낸 그래프이다. 그림 8의 암반물성 적용현황 분석결과 그림 8(a)의 변형계수는 동일 암반등급에 대해서 3~22배, 그림 8(b)의 점착력은 19~166배, 그림 8(c)의 내부마찰각은 1.1~1.4배까지 차이가 발생하여 동일 암반 등급별 물성치가 오차범위를 초과하는 것으로 파악되었다. 동일 암반등급에 대해서 암반물성이 차이를 나타내는 원인을 분석한 결과 암종이 주요한 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 이를 분석한 결과 화성암 화산암질과 변성암 편마암질의 암반물성은 동일 암반등급 내에서의 차이가 6배 이하로 나타났으나 화성암 심성암질의 경우는 22배 이상까지 차이가 있는 것으로 나타났는데 이는 암반물성 산정 과정에서 설계사의 주관적 견해가 반영된 결과로 여겨지며 따라서 암반등급별/암종별 암반물성의 일반화가 요구된다고 하겠다.

3.3 지보패턴 상세 내역

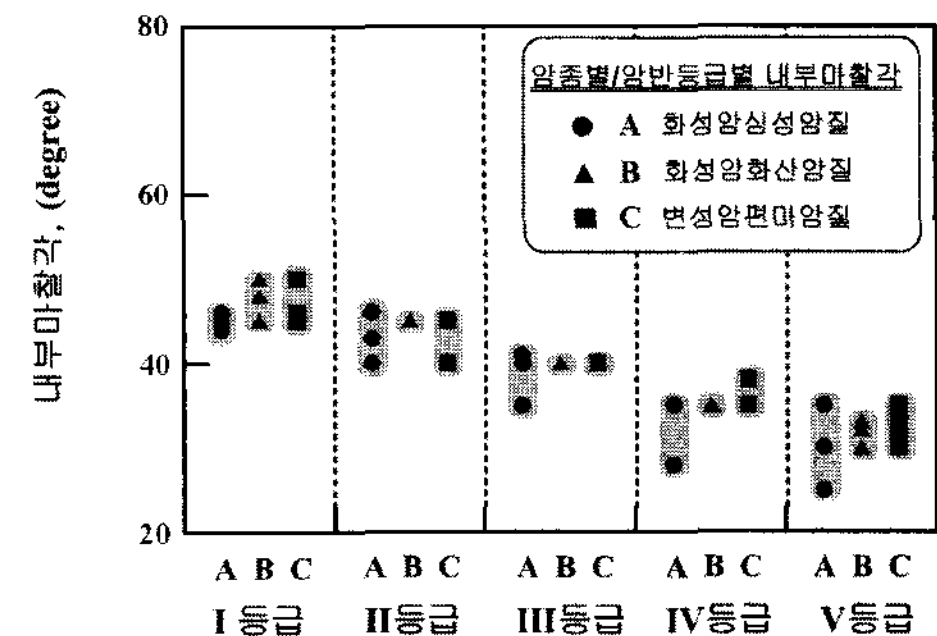
표 2에서는 수집된 터널설계자료의 지보패턴 개요도를 토대로 정리한 각 현장별 지보패턴 등급 선정조건을



(a) 변형계수



(b) 점착력



(c) 내부마찰각

그림 8. 암반등급별/암종별 암반물성

표 2. 암종별/현장별 지보패턴 상세항목

암종	적용현장	지보패턴	록볼트 길이(m)	록볼트간격(m)		숫크리트 두께(mm)	굴진장(m)		굴착공법	보조공법
				종간격	횡간격		상반	하반		
화성암 심성암질	A	1	4	Random	Random	50	2.5	4.0	상하분할	-
		2	4	2.0	2.0	80	2.0	3.0	상하분할	-
		3	5	1.5	1.5	120	1.5	3.0	상하분할	-
		4	5	1.2	1.2	160	1.2	1.2	상하분할	필요시휘폴링
		5	5	1.0	1.0	200	1.0	1.0	상하분할	휘폴링
		6	5	1.0	1.0	200	1.0	1.0	상하분할	휘폴링, 강관다단그라우팅

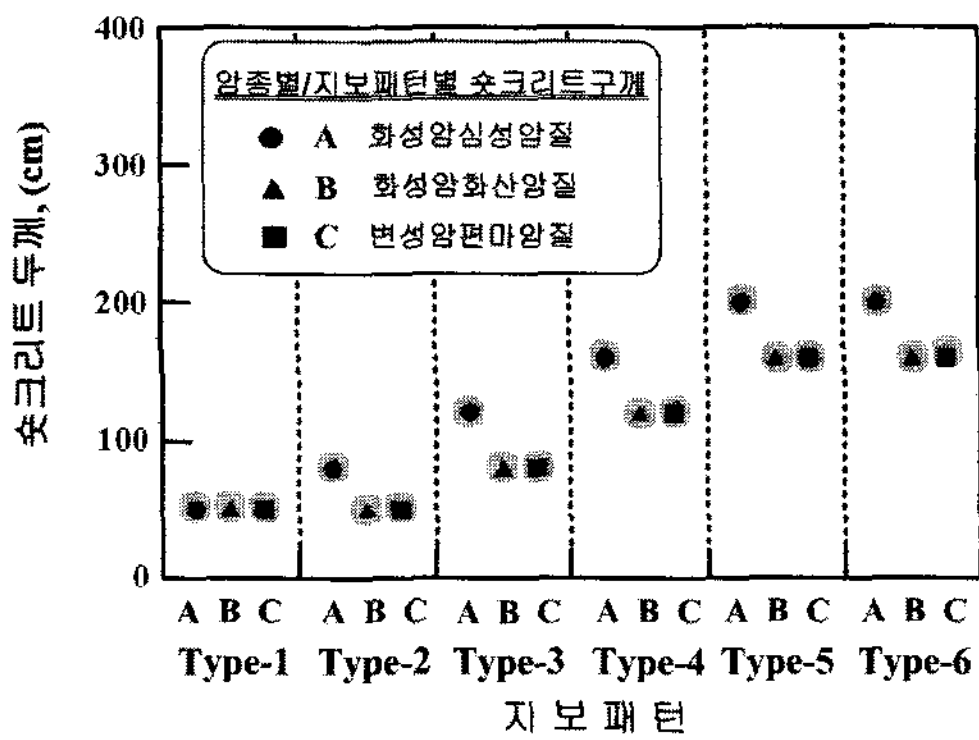
표 2. 암종별/현장별 지보패턴 상세항목(계속)

암종	적용현장	지보패턴	록볼트	록볼트간격(m)		숏크리트 두께(mm)	굴진장(m)		굴착공법	보조공법
			길이(m)	종간격	횡간격		상반	하반		
화성암 화성암질	B	1	4	2.0	2.0	50	3.5		전단면	-
		2	4	2.0	1.5	50	3.5		전단면	-
		3	4	1.5	1.5	80	2.0	2.0	전단면	-
		4	4	1.2	1.5	120	1.5	1.5	상하분할	필요시휘폴링
		5	4	1.0	1.5	160	1.2	1.2	상하분할	강관다단그라우팅
		6	4	1.0	1.5	160	1.0	1.0	상하분할	강관다단그라우팅
	C	1	3	Random	Random	50	3.5회(2회)		전단면	-
		2	3	2.0	2.0	50	3.5		전단면	-
		3	4	2.0	1.5	80	2.0		전단면	-
		4	4	1.5	1.5	120	1.5	3.0	상하분할	-
		5	4	1.2	1.5	160	1.2	1.2	상하분할	필요시휘폴링
		6	4	1.0	1.5	160	1.0	1.0	상하분할	시점부강관다단그라우팅, 휘폴링
2 변성암 변성암질 2	D	1	3	Random	Random	50	3.5	3.5	전단면	-
		2	3	2.0	2.0	50	3.5	3.5	전단면	-
		3	4	2.0	1.5	80	2.0	2.0	전단면	-
		4	4	1.5	1.5	120	1.5	3.0	상하분할	필요시그라우팅
		5	4	1.2	1.5	160	1.2	1.2	상하분할	필요시그라우팅, 휘폴링
		6	4	1.0	1.5	160	1.0	1.0	상하분할	필요시프리그라우팅, 휘폴링, 강관다단
	E	1	3	Random	Random	50	3.5회(2회)		전단면	-
		2	3	3.5	2.0	50	3.5		전단면	-
		3	4	2.0	1.5	80	2.0		전단면	-
		4	4	1.5	1.5	120	1.5	3.0	상하분할	-
		5	4	1.2	1.5	160	1.2	1.2	상하분할	필요시휘폴링
		6	4	1.0	1.5	160	1.0	1.0	상하분할	필요시휘폴링
	F	1	3	Random	Random	50	3.0		전단면	-
		2	3	3.0	2.0	50	3.0		전단면	-
		3	4	2.0	1.5	80	2.0		전단면	-
		4	4	1.5	1.5	120	1.5	1.5	상하분할	-
		5	4	1.2	1.2	160	1.2	1.2	상하분할	휘폴링
		6	4	1.0	1.2	160	1.0	1.0	상하분할	강관다단그라우팅, 휘폴링
	G	1	4	Random	Random	50	3.0	4.0	상하분할	-
		2	4	2.0	2.0	80	2.0	4.0	상하분할	-
		3	4	2.0	1.5	120	2.0	3.0	상하분할	-
		4	5	1.2	1.5	160	1.2	2.4	상하분할	필요시휘폴링
		5	5	1.0	1.2	160	1.0	1.0	상하분할	휘폴링
		6	5	0.8	1.0	160	0.8	0.8	상하분할	강관다단그라우팅
H	1	4	Random	Random	50	3.5(2회굴진)		전단면	-	
	2	4	2.0	2.0	50	3.5		전단면	-	
	3	4	2.0	1.5	80	2.0		전단면	-	
	4	4	1.5	1.5	120	1.5	3.0	상하분할	휘폴링(소규모파쇄대), 필요시강관다단그라우팅	
	5	4	1.2	1.5	160	1.2	1.2	상하분할	강관다단그라우팅	
	6	4	1.0	1.5	160	1.0	1.0	상하분할	강관다단그라우팅	

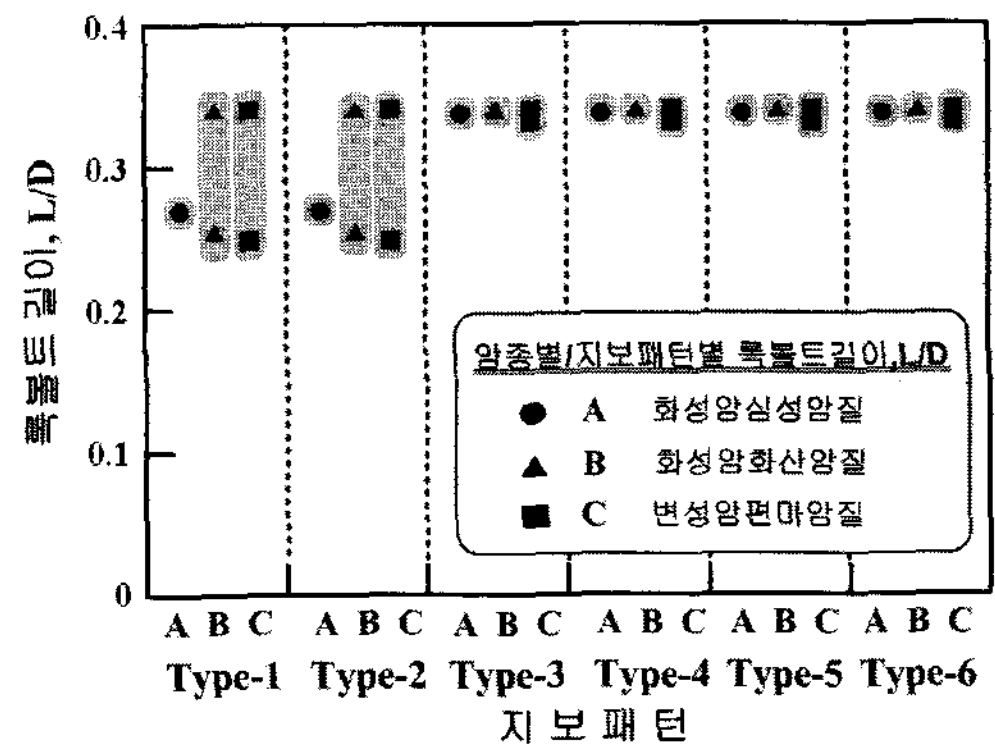
나타내고 있다. 현장별 지보패턴 선정기준을 분석한 결과 터널관통지층 및 터널 상부 0.5~1.0D(D=터널직경) 지층의 암반등급을 중요 영향인자로 고려하고 있으며, 설계사마다 다소 차이를 보이거나 토피고, 굴착단면적, 갱

구부/파쇄대 관통여부 등에 따라서도 지보패턴 등급이 변경될 수 있는 것으로 조사되었다.

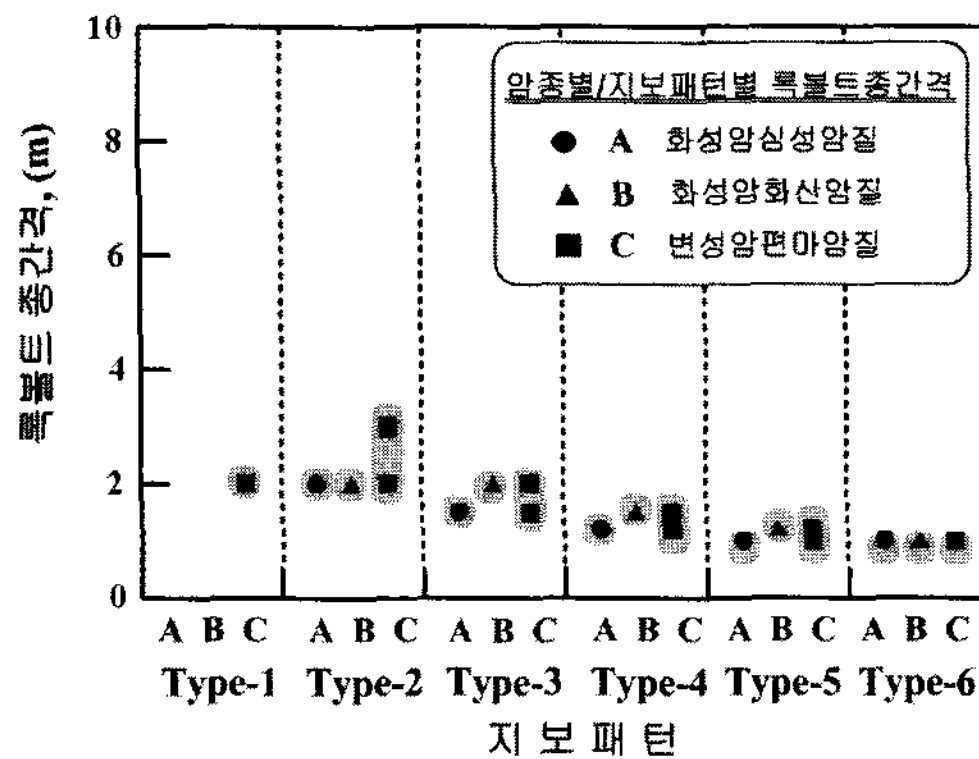
그림 9는 암종별/지보패턴별 지보재 상세항목을 도표로 나타내고 있는데 보이는 바와 같이 슛크리트는 최소 50



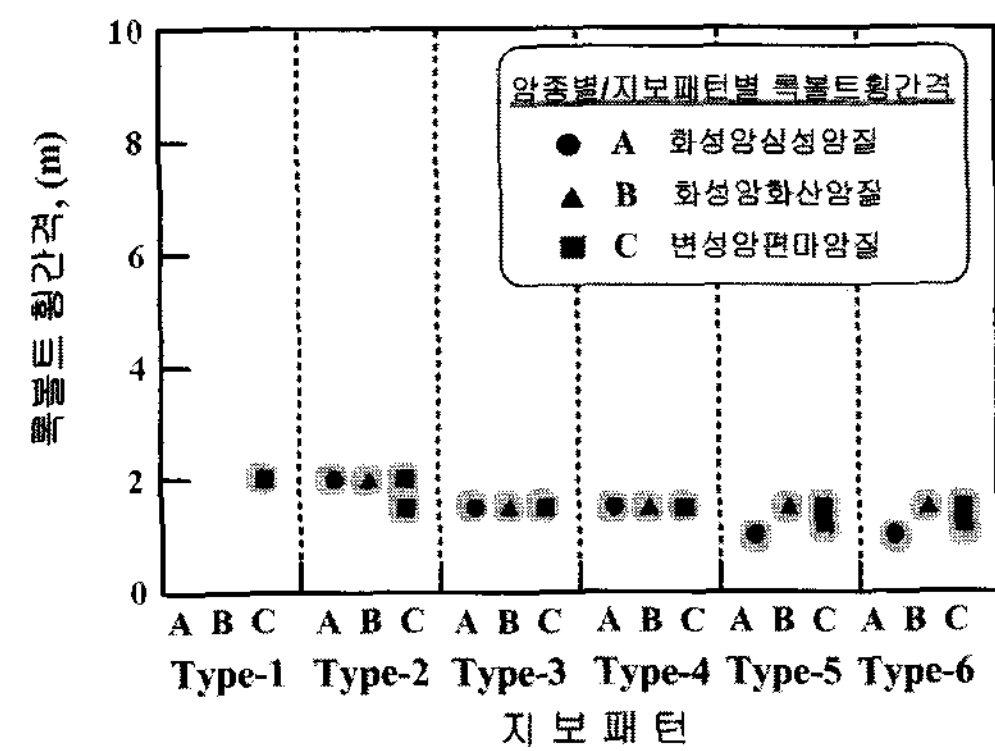
(a) 슛크리트 두께



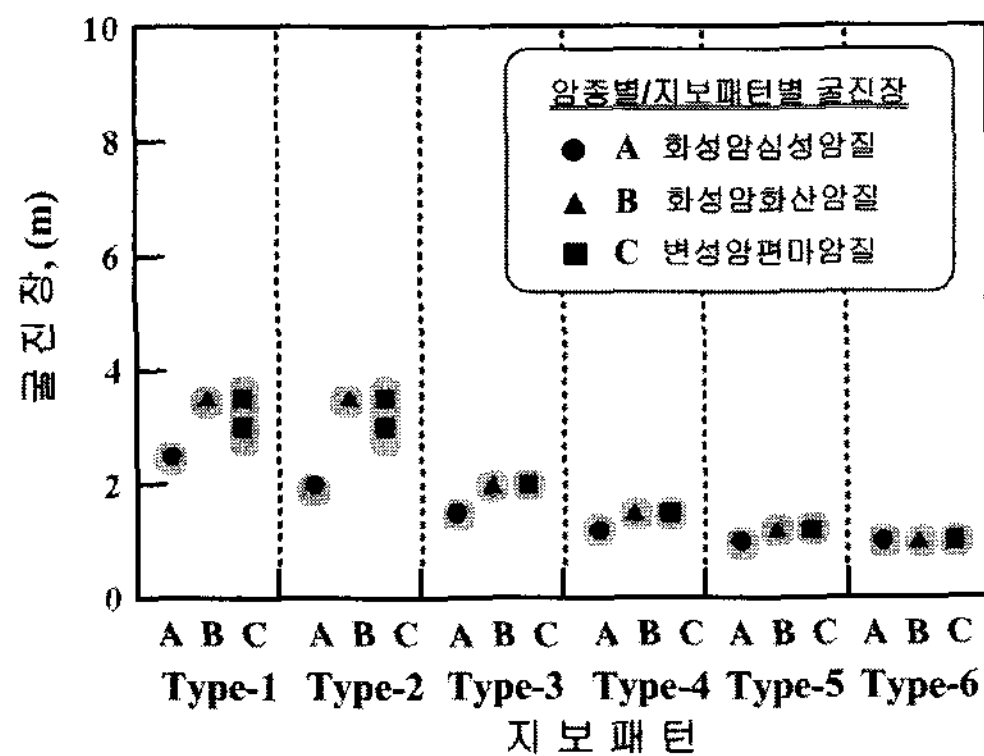
(b) 록볼트 길이



(c) 록볼트 종간격



(d) 록볼트 횡간격



(e) 굴진장

그림 9. 암종별/지보패턴별 상세항목

mm 최대 200 mm가 적용되는 것으로 나타났으며 록볼트의 길이는 0.3D(D=터널직경)이 적용된 것으로 분석되었다. 1회 굴진장은 Type-1과 2에서 최대 4 m, 그 이하의 패턴에서는 1~2 m 정도가 적용된 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 설계모듈 및 안정성평가 모듈을 위한 ANN 구축시 DB 분석 결과를 반영하여 본 개발 시스템의 현장 적용성을 제고하였다.

4. ANN 기반의 안정성 평가 모듈 구축

4.1 기본개념

본 절에서는 IT-Tunnel에 접목된 안정성평가를 위한 ANN 구축 과정을 다루었다. 앞서 기술한 바와 같이 구축된 DB를 토대로 선정된 우리나라의 산악 도로터널을 포괄하는 설계조건을 도출하고 FEM과 FDM을 이용하여 설계조건별 안정성에 관한 학습 DB를 구축하여 이를 토대로 일반화된 ANN을 구축하는 방법을 채택하였다. 본 연구에서는 지반조건을 토대로 터널 내공단면 및 지보패턴을 선정하는 ANN 엔진(ANN-Design)과 이에 대한 안정성 검토를 수행하는 엔진(ANN-Predict)을 개발

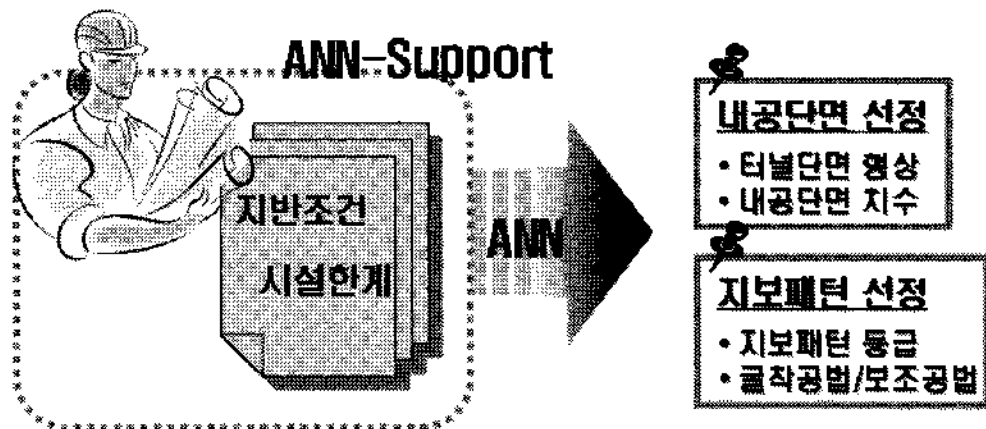


그림 10. ANN-Design

하였으며 개발 개념은 그림 10과 11에 제시되어 있다. ANN 엔진 개발에 있어 Math Works Inc.에서 개발한 Matlab 6.1(MATrix LABORatory 6.1) 프로그램을 이용하여 구축하였으며 일련의 연구에 적용된 ANN은 입력층과 출력층 사이에 은닉층이 존재하는 다층인식자(Multi-Layer Perceptron, MLP)신경망으로서 신경망의 학습은 MLP에 대표적으로 적용되는 오류역전파(Backpropagation) 알고리즘을 적용하였다. 본 절에서는 지면 관계상 ANN-Predict 개발 과정에 대하여 기술하였다.

4.2 ANN-Predict

4.2.1 구축과정

앞서 언급한 바와 같이 수집된 DB를 대변하는 대표단면을 선정 후 2차원 및 3차원 FEM 및 FDM 해석을 수행하여 안정성 평가와 3차원 터널 변위예측이 가능한 ANN-Predict 엔진을 구축하였다. 구체적인 과정은 아래 그림 12와 같다.

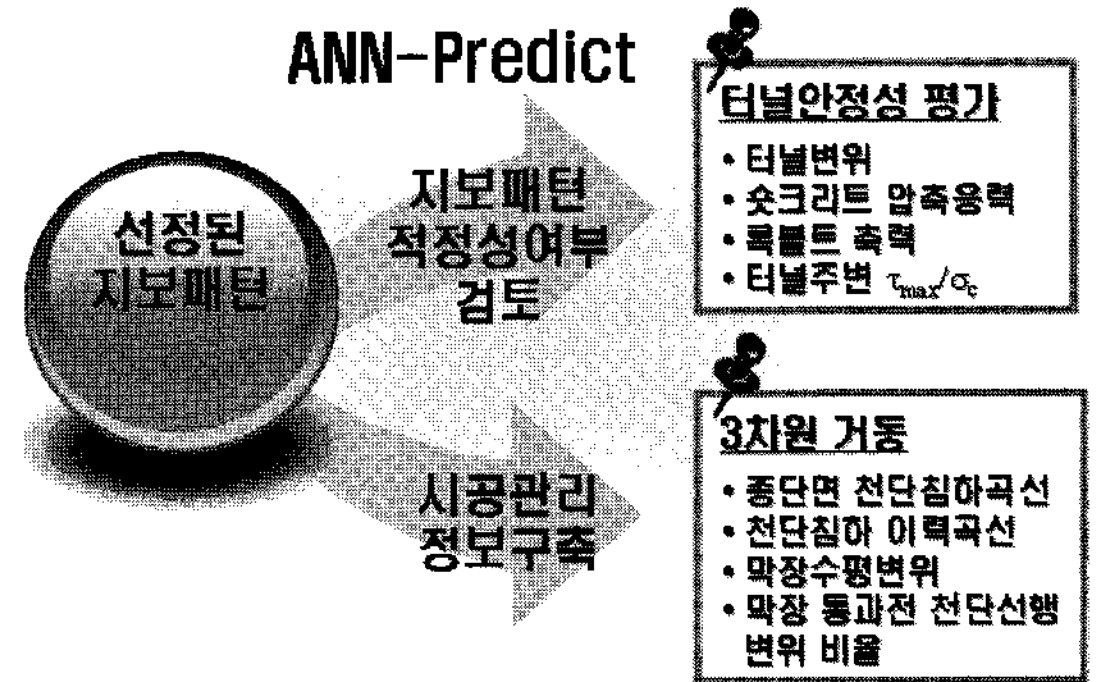


그림 11. ANN-Predict

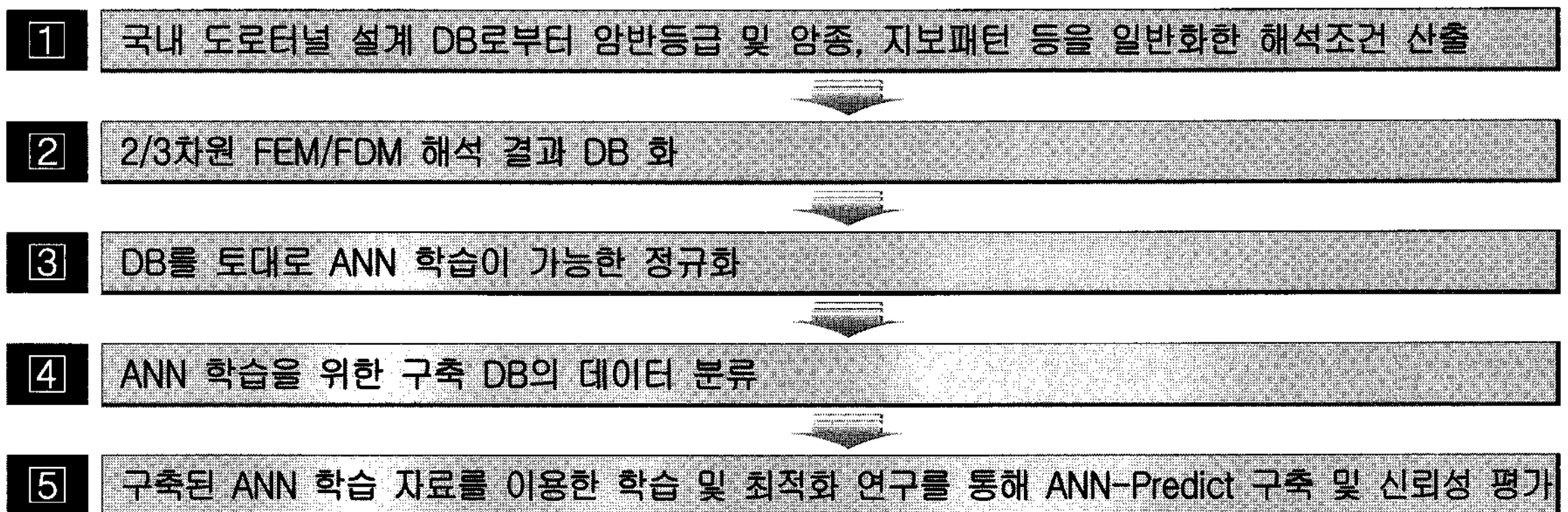


그림 12. ANN-Predict 개발 과정

4.2.2 학습 DB 구축

1) 대상 단면 설정

엔진구축에 앞서 ANN 학습 DB를 확보하기 위하여 수집된 DB로부터 국내 산악/도로터널을 대상으로 이를 일반화한 대표 해석조건을 선정하였다. 해석조건은 수

집된 터널설계 자료를 관통지층의 암종 및 암반등급으로 분류하여 각각 적용되는 지보패턴과 굴착공법, 굴진장을 분석한 결과를 토대로 선정하였다. 표 3과 같이 암종을 화성암 심성암질, 화성암 화산암질, 변성암 편마암질로 구분하였으며 터널관통지층이 I등급~V등급인 각

표 3. 암종별/등급별 해석 적용 암반 물성

등급	변형계수(MPa)	점착력(kPa)	내부마찰각(°)	단위중량(kN/m ³)	프아송비	
화성암 심성암질 (화강암, 편마암)	I	28,000	6,920	46	27	0.20
	II	19,500	5,150	44	26	0.22
	III	10,500	2,350	39	25	0.25
	IV	2,950	1,230	35	24	0.28
	V	1,150	1,010	32	21	0.30
화성암 화산암질 (안산암, 응회암, 화강암)	I	25,000	5,000	46	27	0.20
	II	17,000	2,100	44	26	0.22
	III	8,750	1,350	39	25	0.25
	IV	2,428	575	35	24	0.28
	V	372	185	32	21	0.30
변성암 편마암질 (편마암)	I	16,000	1,160	46	27	0.20
	II	11,000	900	44	26	0.22
	III	6,000	460	39	25	0.25
	IV	2,145	270	35	24	0.28
	V	350	80	32	21	0.30

표 4. 암종별 적용 지보패턴

암종	지보 패턴	록볼트 길이(m)	록볼트간격(m)		숫크리트 두께(mm)	굴진장(m)		굴착공법	보조공법
			종간격	횡간격		상반	하반		
화성암 심성암질	1	4	Random	Random	50	2.5	4	상하분할	-
	2	4	2	2	80	2	3	상하분할	-
	3	5	1.5	1.5	120	1.5	3	상하분할	-
	4	5	1.2	1.2	160	1.2	1.2	상하분할	필요시휘폴링
	5	5	1	1	200	1	1	상하분할	휘폴링
	6	5	1	1	200	1	1	상하분할	강관다단그라우팅, 휘폴링
화성암 화산암질	1	3.5	Random	Random	50	35		전단면	-
	2	3.5	2	1.75	50	35		전단면	-
	3	4	1.75	1.5	80	2	2	전단면	-
	4	4	1.35	1.5	120	1.5	2.25	상하분할	필요시휘폴링
	5	4	1.1	1.5	160	1.2	1.2	상하분할	강관다단 그라우팅
	6	4	1	1.5	160	1	1	상하분할	강관다단 그라우팅
변성암 변성암질	1	3.4	Random	Random	50	3.3	3.5	전단면	-
	2	3.4	2.5	2	56	3.1	3.5	전단면	-
	3	4	2	1.5	88	2	2.2	전단면	-
	4	4.2	1.44	1.5	128	1.44	2.58	상하분할	필요시휘폴링
	5	4.2	1.16	1.38	160	1.17	1.16	상하분할	필요시프리그라우팅, 필요시강관다단그라우팅
	6	3.4	1	1.34	160	0.96	1	상하분할	필요시강관다단그라우팅

지 보 형 식	TYPE - I	TYPE - II	TYPE - III
표준지보패턴도			
지 보 형 식	TYPE - IV	TYPE - V	TYPE - VI (강구부)
표준지보패턴도			

그림 13. 지보패턴 분류도

각의 지반조건에 대하여 지보패턴, 굴착형태, 토피고, 굴진장을 각각 변화시켜 국내 산악/도로터널의 일반적인 시공조건을 대상으로 선정하였다.

2) 해석 모델링

각 조건에 대한 FEM/FDM해석은 터널안정성 측면과 터널의 3차원적 거동을 분석하는데 목적을 두어 2차원 및 3차원 해석모델을 채택하였다. 해석에서는 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되며 특히 지반공학분야에서 다양한 흙의 구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 매우 효율적인 알고리즘을 보유하는 것으로 알려진 범용 프로그램인 ABAQUS 6.4과 FLAC을 사용하였다. 유한요소해석 모델에 있어 지반 및 지보재의 이산화에 있어

지반의 경우 8절점 가감 적분 요소(CPE8R)를 적용하였으며 록볼트는 3절점 3차원 트러스요소(T2D3), 슛크리트는 3절점 보요소(B22)를 사용하여 해석에 적용하였다. 그림 14는 3차원 해석 모델을 보여주고 있다.

4.2.3 ANN 구조 최적화 및 학습

구축된 DB를 토대로 ANN 학습을 수행하기에 앞서 구축된 78개 DB(100%)에 대해 Training set 44(56%)개와 내적인자 연구를 위한 데이터 Testing set 19개(24%), 신뢰성 검증을 위한 데이터 Validation set 15개(20%)로 분류를 하였으며, 내적인자 연구를 통해 ANN을 최적화 하였다.

그림 15는 ANN-Predict의 내적인자 연구 결과를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 은닉층 뉴런수 4개, 모멘텀 상수 0.8, 학습률의 경우 0.2를 사용할 경우 입력과 출력간의 관계를 적절히 표현하는 것으로 나타났다. 또한 다층 출력구조 ANN 엔진의 적용을 위해 학습효과를 고려하여 은닉층의 수를 4개로 적용하였다.

1) 안정성 평가 엔진

이와 같이 최적화된 ANN 구조를 이용하여 ANN-Predict 중 지보패턴 적정성 검토 엔진을 구축하였으며, 이를 위한 터널안정성 평가항목에 대한 입력변수와 출력변수의 관계를 결정하였다. 출력변수로 제시된 슛크리트 응력과 록볼트 축력은 직접적인 지보재 안정성에 해당하는 항목이며, 천단침하와 내공변위는 시설한계 측면에서 기준치와 비교를 하기 위함이다. 천단측벽 응

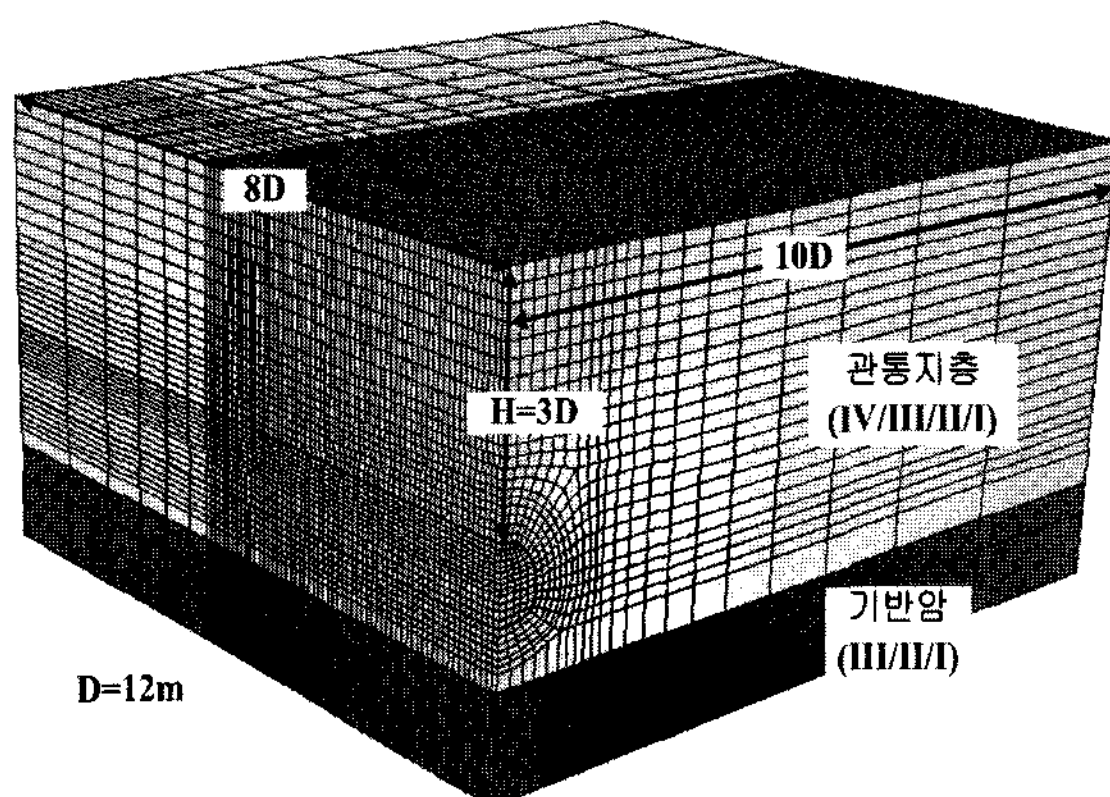
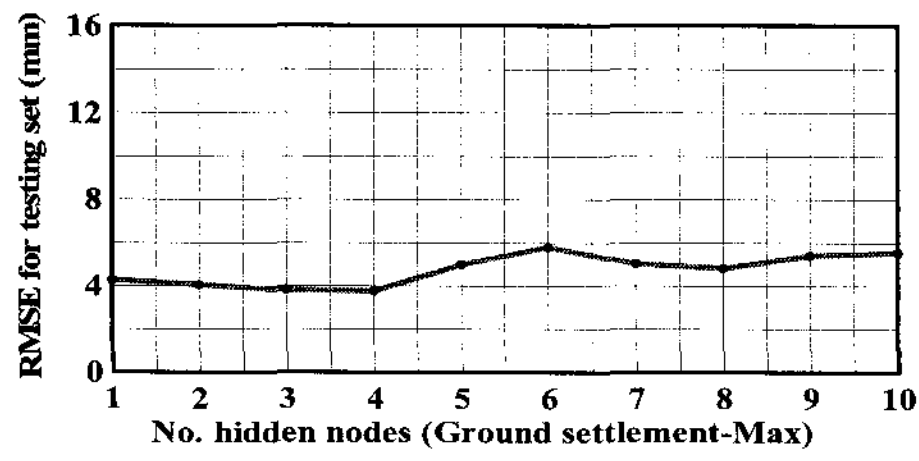
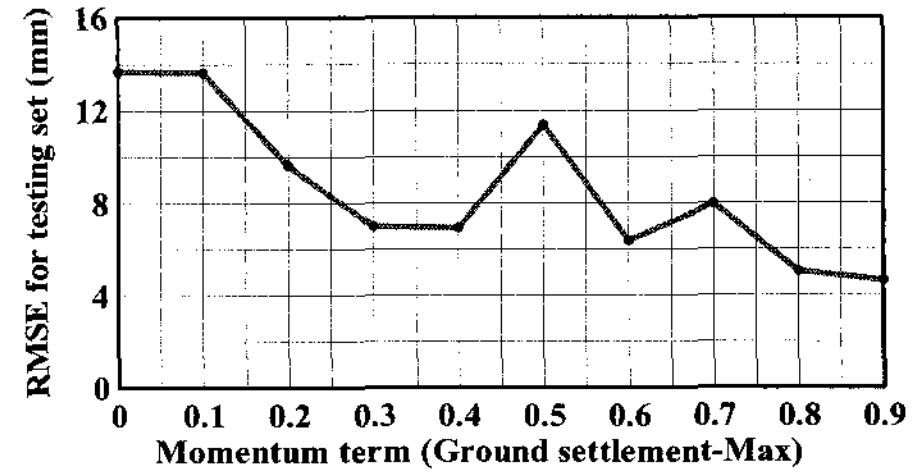


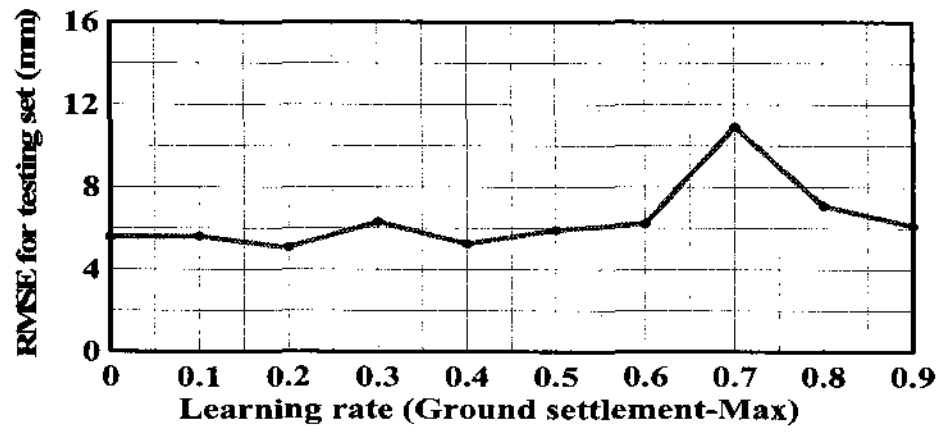
그림 14. 해석에 적용된 유한요소모델(전단면/상하분할 굴착 조건)



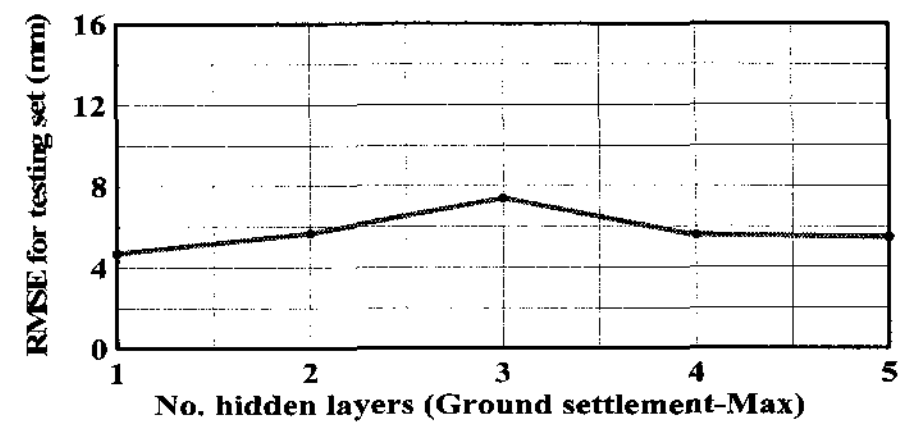
(a) No. of hidden nodes



(b) Momentum term



(c) Learning rate



(d) No. of hidden layers

그림 15. ANN 내적인자 연구결과

표 5. 지보패턴 적정성 검토를 위한 입력변수 및 출력변수

구분	출력변수	입력변수
지보패턴 적정성 검토 (터널 안정성 평가)	숏크리트 응력	지보패턴
	록볼트 축력	토피고
	천단침하	관통지층 암반등급
	내공변위	암종
	천단 응력비(τ_{max}/σ_c)	굴착공법
	측벽 응력비(τ_{max}/σ_c)	굴진장

력비는 터널주변 암반의 안정성 측면에서 항복여부를 확인하기 위한 항목이다. 표 5는 학습에 이용된 입력변수와 출력변수를 정리하여 보이고 있다.

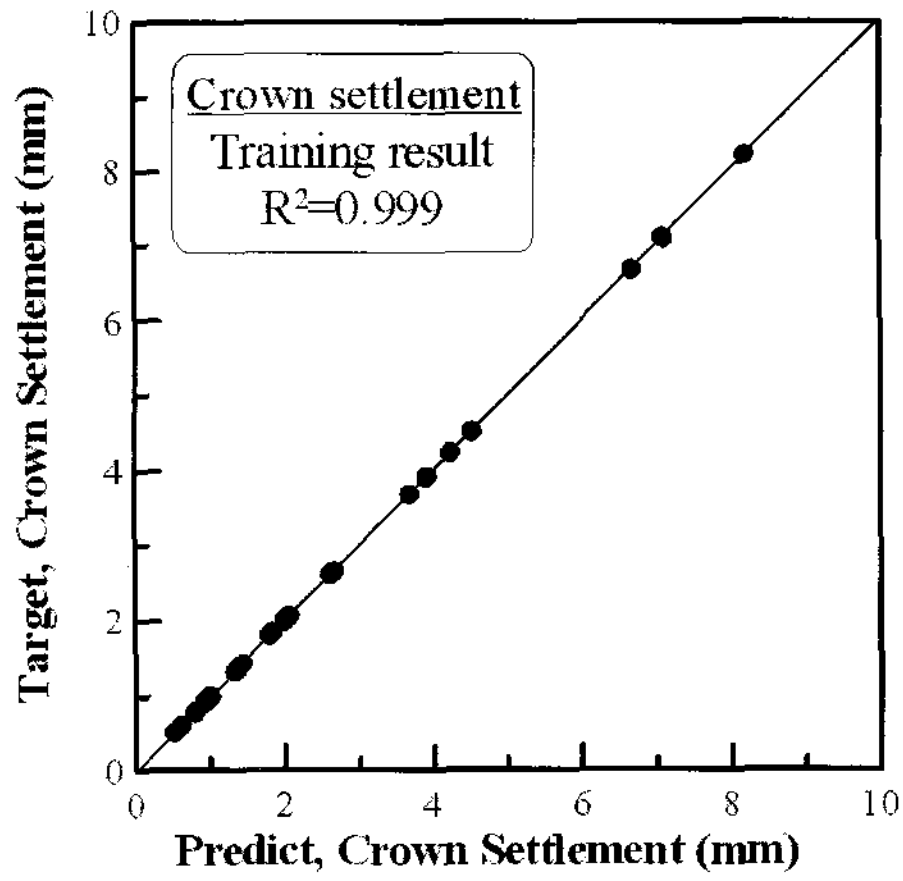
지보패턴 적정성 검토 ANN 엔진의 신뢰성을 검토하기 위하여 학습데이터 및 검증데이터에 대해 예측을 수행하여 실제값과 예측값을 비교하였으며, 회귀분석을 통한 결정계수와 평균제곱근오차, 평균절대값오차를 산

표 7. 평가 데이터 적용범위

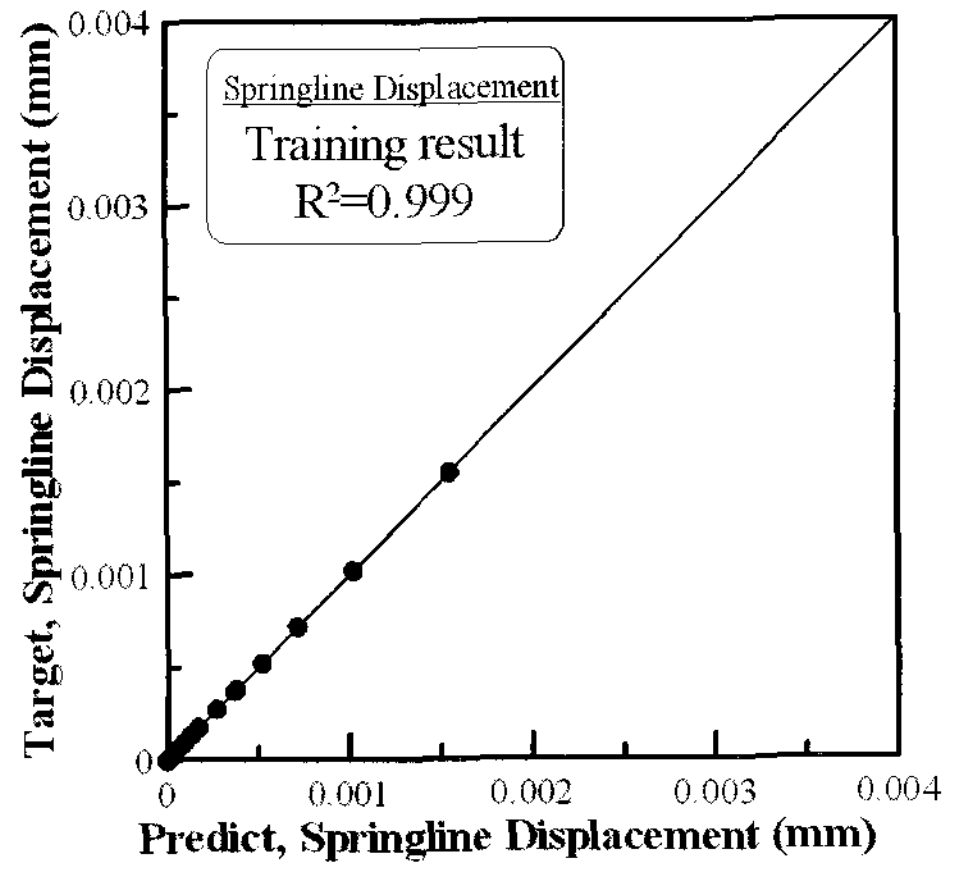
적용범위	천단변위 (mm)	내공변위 (mm)	숏크리트 압축응력 (kg/cm ²)	록볼트 축력 (ton)	천단 응력비 (τ_{max}/σ_c)	측벽 응력비 (τ_{max}/σ_c)
최대값	8.63	3.578×10^{-3}	14.02	16.83	5.515	4.975
최소값	0.5	2.51×10^{-9}	0.04	0.15	2.868	0.113

표 8. 지보패턴 적정성 검토 ANN 엔진 학습 및 검증결과

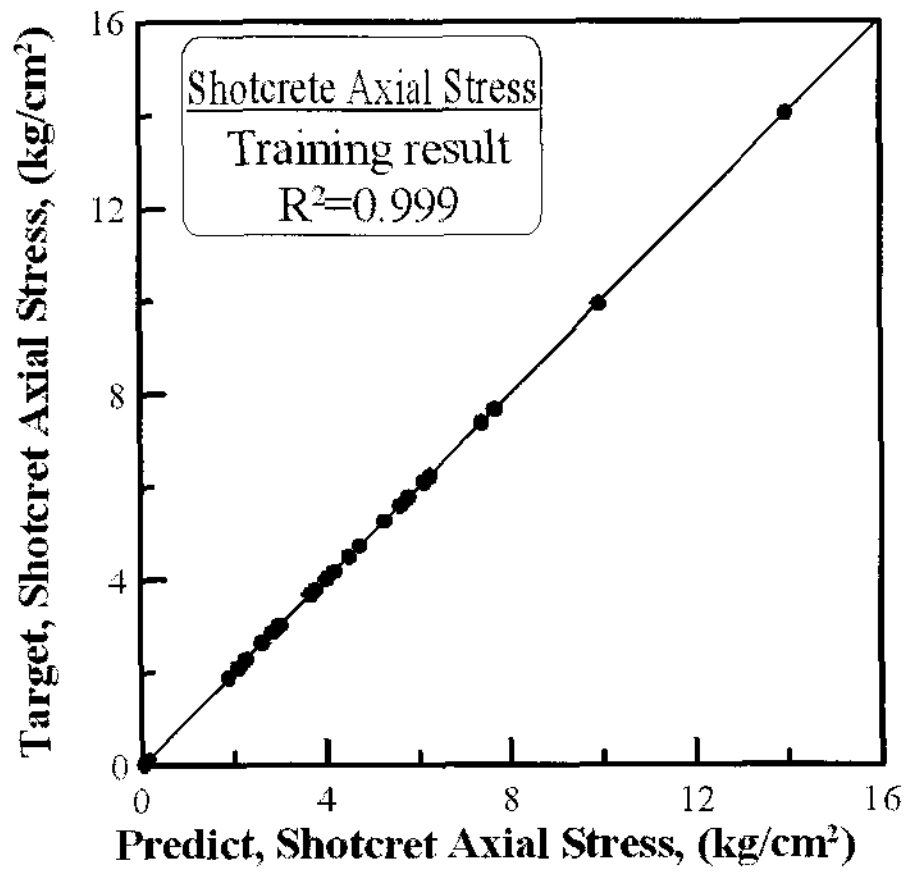
Category		천단변위 (mm)	내공변위 (mm)	숏크리트응력 (kg/cm ²)	록볼트축력(ton)	천단응력비	측벽응력비
R ²	Training	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	Testing	0.99	0.98	0.98	0.99	0.97	0.99
	Validation	0.96	0.99	0.98	0.93	0.96	0.96
RMSE	Training	0.002	0.000	0.007	0.013	0.002	0.000
	Testing	0.195	0.000	1.054	0.984	0.114	0.001
	Validation	0.654	0.00015	1.679	1.194	0.162	1.710
MAE	Training	0.032	0.000	0.052	0.084	0.026	0.001
	Testing	0.354	0.010	0.980	0.765	0.209	0.020
	Validation	0.722	0.0103	1.108	0.895	0.359	0.816



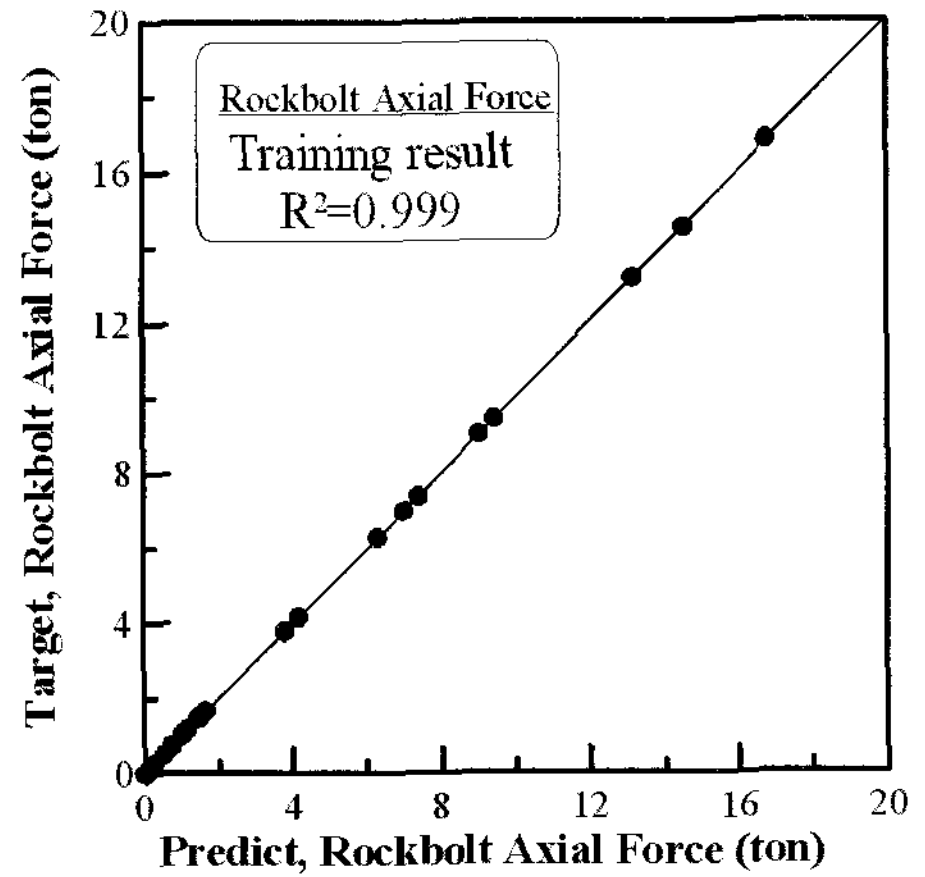
(a) 천단침하(max)



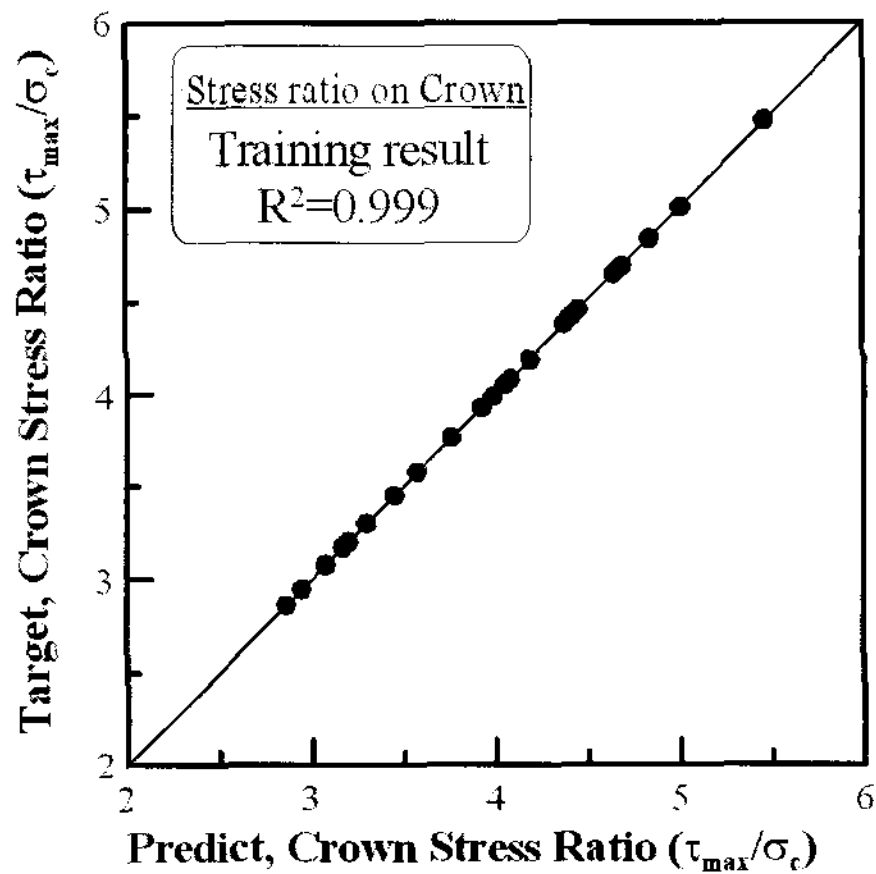
(b) 내공변위(max)



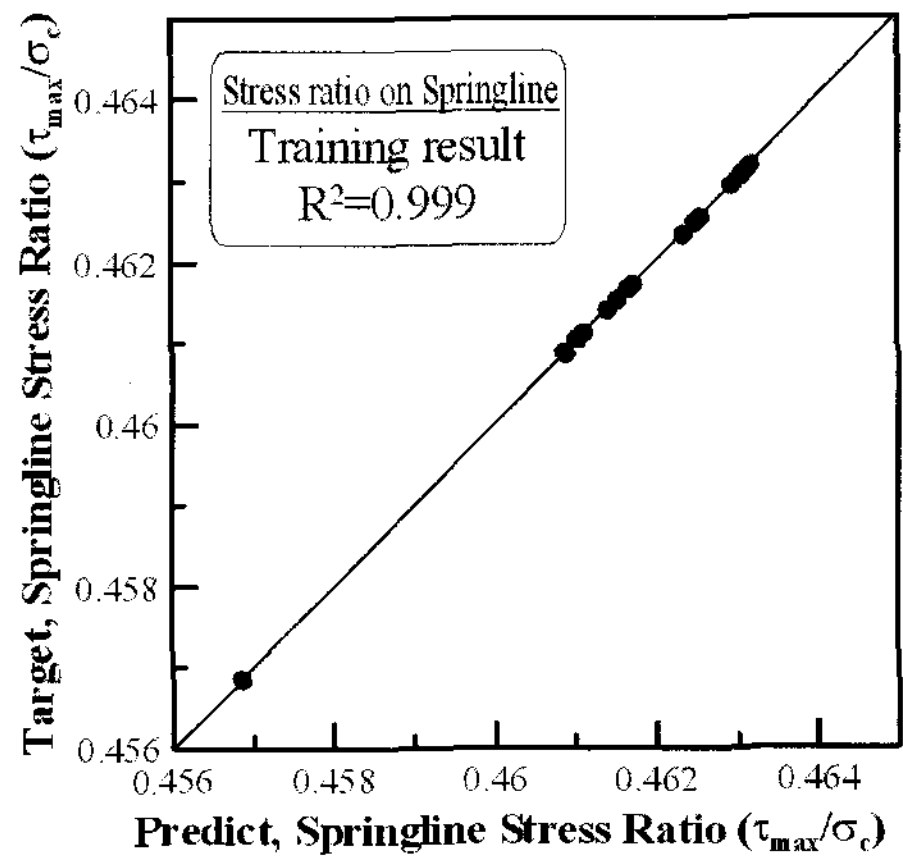
(c) 슛크리트 응력(max)



(d) 록볼트 축력(max)



(e) 천단 응력비



(f) 측벽 응력비

그림 16. ANN-Predict 학습결과

정하여 그 결과를 비교하였다.

그림 16은 각 출력변수별로 학습 및 검증데이터에 대해 실제값과 예측값을 비교한 결과를 보이고 있으며 표 7과 8은 각각 검증에 사용된 데이터의 범위와 결정계수, RMSE, MAE의 산정을 통한 ANN 엔진의 신뢰성 검토 결과를 보이고 있다. 보이는 바와 같이 학습데이터에 대한 예측 결과 평균 99% 이상의 결정계수를 보여 상당한 신뢰도를 확보한 것으로 평가된다. 또한 구축된 ANN 엔진 자체의 신뢰도 및 적용성을 판단하기 위해 데이터 분류를 통해 산정된 검증 데이터에 대한 결과와 비교시 92%이상의 결정계수를 보여 높은 신뢰도를 보임을 알 수 있다. 한편, 적용 data의 범위와 RMSE, MAE 값을 비교, 분석할 때 모든 예측항목에 있어 RMSE는 천단변위 0.3 mm, 내공변위 0, 슛크리트 응력 3.5 kg/cm², 록볼트 축력 3.50 ton, MAE는 천단변위 0.4 mm, 내공변위 0.01 mm, 슛크리트 응력 1.7 kg/cm², 록볼트 축력 1.3ton 등으로 그 범위에 비해 매우 미미하게 나타나 구축된 ANN은 학습에 사용된 DB와 동일한 정확도를 갖는다고 할 수 있다.

이와 같이 신뢰성 검증을 통해 구축된 ANN 엔진이 지보패턴 적정성을 검토하는데 있어 최적화되었음을 확인할 수 있었다. 따라서 실제 현장 적용시 ANN-Design 과 ANN-Predict의 연계를 통해 전 연장에 대한 신속하고 신뢰성 있는 터널설계를 수행할 수 있으리라 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 지식기반의 터널설계 자동화 시스템 IT-Tunnel 개발에 관한 내용을 다루었다. 본 시스템은 ‘암반분류 지보패턴선정-안정성평가’의 일련의 과정으로 이루어져 있는 터널 설계 과정을 자동화하는데 의미를 둔 시스템으로서 지보패턴 선정 및 안정성 평가에 있어서 ANN 개념을 접목시켜 예비설계단계에서의 충분한 적용성을 확보할 수 있도록 하였다. 이를 위해 먼저 국내 도로터널을 대상으로 설계 DB를 구축하여 ANN 구축시 국내 설계 여건을 반영하도록 하였으며 본 시스템 개발을 위해 관련 선행연구를 통해 그 적용성이 확인된 바 있는 수치해석과 인공신경망 기법을 연계하는 기술을 도입하였다. 그 외에 각종 지식기반의 설계자동화 연구를 통해 본 제한된 설계대상 조건에 한해 터널

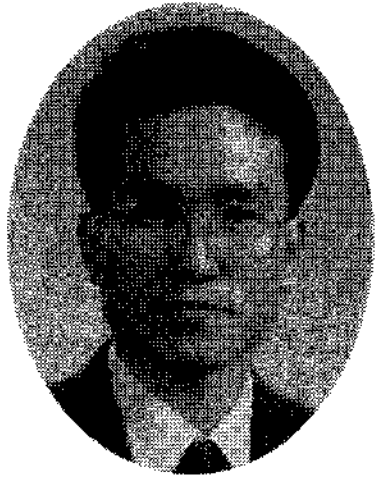
설계와 시공중 터널 안정성 평가가 가능한 시스템을 개발하였다. 구축된 시스템은 향후 대상 시공조건 범위를 확장하고 현장 적용 등을 통해 기존의 설계과정을 자동화하는 효율적인 설계 수단으로 활용되도록 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출현한 IT 기반의 지하공간 지보시스템 설계기술 개발(과제번호: C104A 1010001-05A0501-00220)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

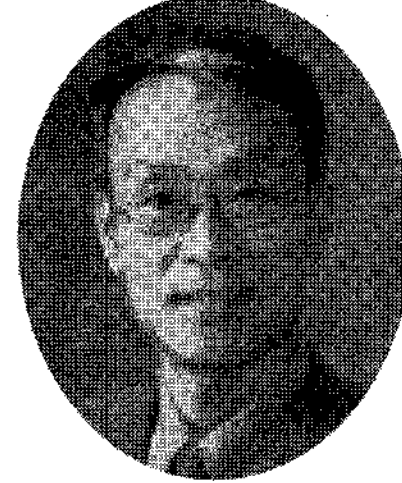
1. 유충식, 김주미, 김선빈, 정혜영 (2006), "GIS-ANN 기반의 도심지 터널 설계/시공 위험도평가", 대한토목학회 논문집, 제26권, 제1C호, pp. 63-72.
2. 유충식, 김주미, 김진하 (2005), "정보기술(IT)의 터널설계 분야에의 적용사례", 한국터널공학회 정기학술발표회 논문집, pp. 105-116.
3. 유충식, 정혜영, 김주미 (2005), "인공신경망을 이용한 지보패턴 예측 시스템 개발 연구", 대한토목학회 정기학술대회, pp. 5528-5531.
4. Cai, J.G., Zhao, J. and Hudson, J.A. (1998), "Computerization of rock engineering systems using neural networks with an expert system", Rock Mech. Rock Engng., Vol. 31, No. 3, pp. 135-152.
5. Hoek, E. (1990), "Estimating mohr-coulomb friction and cohesion values from the hoek-brown failure criterion", Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 12(3), pp. 227-229.
6. Rangel, J.L., Iturrán-Viveros, U., Ayala, A. and Cervantes, F. (2005). "Tunnel stability analysis during construction using a neuro-fuzzy system", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol. 29, No. 15, pp. 1433-1456.
7. Ren, G., Smith, J.V., Tang, J.W. and Xie, Y.M. (2005), "Underground excavation shape optimization using an evolutionary procedure", Computers and Geotechnics, Vol. 32, No. 2, pp. 122-132.
8. Yoo, C. and Kim, J.M. (2007), "Tunneling performance prediction using an integrated GIS and neural network", Computers and Geotechnics, Vol. 34, No. 1, pp. 19-30.



유 충 식
성균관대학교
건설환경시스템공학과
교수
E-mail: csyoo@skku.edu



김 선 빈
성균관대학교
건설환경시스템공학과
박사과정
E-mail: ksb9677@hanmail.net



유 광 호
수원대학교
토목공학과
교수
E-mail: khyou@suwon.ac.kr
