

IT 기반의 지하 대공간 설계/안정성 평가 시스템 개발

Development of IT-based Cavern Design/Stability analysis System

유충식¹⁾, Chungsik Yoo, 김선빈²⁾, Sunbin Kim, 조완기³⁾, Wangi Joe, 유광호⁴⁾, Kwangho Yoo, 박인준⁵⁾, Injun Park

1) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

2) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

3) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

4) 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg, University of Suwon.

5) 한서대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg, University of Suwon.

SYNOPSIS : This paper concerns the development of a IT-based tunnel design system within the framework of artificial neural networks(ANNs). The system is aimed at expediting a routine cavern design works such as determination of support patterns and stability analysis of the selected support patterns. The detailed system development process and functions of sub modules are provided in this paper.

Key words : IT-based system, artificial neural network(ANN), cavern design

1. 서 론

과거에는 지하공간의 개발이 터널 등과 같은 굴착단면이 비교적 크지 않은 소규모 구조물 위주로 시공되었으나, 최근에는 토지의 입체적 이용에 대한 사회적 요구가 증가함에 따라 지하에도 대규모 지하공간의 건설이 증가하는 추세에 있다. 일반적으로 지하 대공간 설계시에는 사용목적 및 현장조건에 적합한 단면을 선정하여 구조물의 시공위치, 굴착방법 및 지보패턴 등을 설계자가 경험적인 방법에 의해 결정하고, 이를 다양한 수치해석적 방법을 이용하여 안정성 검토를 수행함으로써 최종 설계를 완성하는 과정을 따른다.

본 연구에서는 일련의 지하공간 설계과정을 자동화하는 시스템을 개발하였다. 시스템 개발을 위해 굴착단면적이 400m² 이상인 대단면 지하공간 구조물을 대상으로 국내 암반 조건에 시공되는 다양한 경우에 대한 수치해석을 수행한 결과를 이용하여 안정성 평가를 위한 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN) 모델을 구축하였으며, 이를 시스템에 적용하여 지하공간 설계시 요구되는 각종 안정성 평가항목에 대한 자동예측을 가능하게 하였다. 아울러 지하공간 설계에 필요한 지반정보와 단면제원 입력을 용이하게 하였으며, 구조물 시공위치와 굴착방법, 지보패턴 적용 등의 각종 설계 항목 또한 효율적으로 결정할 수 있도록 하였다. 또 이와 같이 개발된 시스템은 선행연구에서 개발한 터널설계 시스템과 통합되어 구축되도록 하였다(유충식 등 2007).

본 논문에서는 개발된 시스템에 대한 소개와 함께 실제 현장을 대상으로 한 대단면 지하공간 설계에 적용함으로써 적용성을 검토한 내용을 다루었다.

2. ANN 기반의 터널설계 자동화 시스템

2.1 시스템 개요

본 시스템은 다양한 시공조건에 대해서 대단면 지하공간 구조물(캐번)의 설계와 시공중 안정성 평가를 가능하게 한 시스템으로서 시스템 내에서 대상현장의 지반정보와 지하공간 구조물의 단면정보에 대한 입력을 하여 대단면 지하공간 설계시 요구되는 지보패턴 항목을 직접 혹은 자동선정 하고 선정된 결과에 대해 시공중 안정성 평가가 수행되도록 구축되어 있다. 지보패턴은 Q-system에 근거하여 선정되도록 하였으며 시공중 안정성 평가는 선행연구로부터 검증된 인공신경망 모델을 이용하여 수행되도록 하였다(유충식 등 2006, 2007). 또한 사용자 중심의 Graphic User Interface(GUI)를 극대화하여 입력 및 연산, 출력 과정이 본 시스템 상에서 통합으로 운용될 수 있도록 시스템을 구축하였다.

한편, 본 시스템의 개발환경은 윈도우 기반의 응용프로그램으로서 향후 시스템 확장시 여타의 소프트웨어와의 연계가 용이하도록 하기 위해 인터페이스의 구축 및 연산에 탁월한 C++을 기반으로 코드화 작업을 하였으며, 프로그램 코드화에 사용된 컴파일러는 Microsoft사에서 개발한 Visual C++ .net을 사용하였다. 본 시스템에 대한 전체적인 시스템 구조도는 그림 1에 나타내었다.

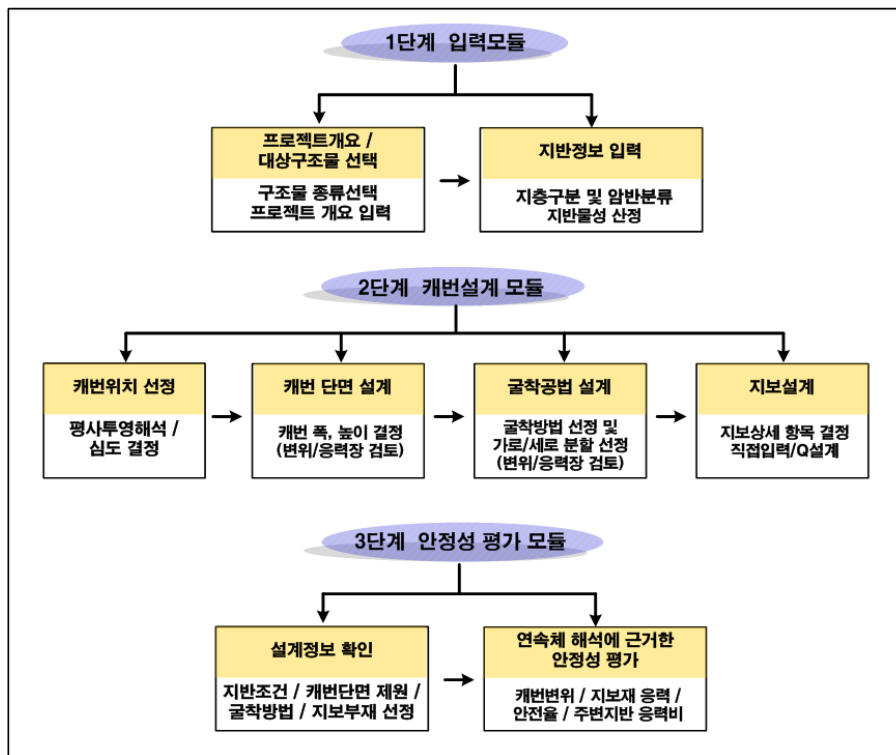


그림 1. 시스템 구조도

2.2 개발 시스템 모듈 구성

현재까지 개발된 본 시스템은 크게 3개의 모듈로서 입력모듈과 캐번설계모듈, 안정성 평가모듈로 구성되어 있다. 각각의 모듈별로 먼저 입력모듈에서는 프로젝트개요와 지반정보를 입력할 수 있도록 하였으며, 설계모듈에서는 그림 1에서 나타난 바와 같이 캐번위치와 단면제원, 굴착공법 및 지보부재를 선정할 수 있도록 하였다. 안정성 평가모듈에서는 선정된 결과에 대하여 연속체 해석에 근거하여 안정성 평가를 할 수 있도록 기능을 갖추었다. 다음의 각 절에서는 개별모듈에 대한 세부기능 및 모듈 구성안에 대하여 기술하였다.

2.2.1 입력모듈

본 모듈은 캐번설계를 위한 기본정보로서 프로젝트 전반에 대한 기본정보를 입력하는 프로젝트 개요 입력과 대상 현장의 지반/암반에 대한 정보를 입력하는 모듈로 구성되어 있다. 먼저 각 모듈에 대한 기본 포맷은 그림 2에서 보여준다. 그림 2(a)의 프로젝트 개요 입력에서는 프로젝트에 대한 기본정보인 프로젝트 명과 대상구간 위치, 내부용적, 공사기간, 설계자 정보 및 구조물 용도와 현장위치도, 프로젝트 기본방향 등을 입력할 수 있도록 기능을 갖추었다. 또 지반정보 입력에서는 시추공 정보 입력을 통해 지층수 → 표고 및 지반특성 → 불연속면 특성의 순으로 대상 현장의 지층분포 및 지질특성을 상세히 입력할 수 있도록 하였다. 그림 2(c)~(f)에서는 지반정보 입력과정을 보여주고 있으며, 그림 2(b)는 이와같이 입력된 대상현장의 지반정보를 요약한 결과를 보여준다.

(a) 프로젝트 개요입력

구분	암종	ROD (%)	일축압축강도 (MPa)	RMR 값	Q 값	GSI	축압계수	암반분류		
연암	편마암	50.00	85.00	58	3	5	5	25.00	0.80	조회
보통암	편마암	75.00	157.00	68	2	14	4	45.00	1.20	조회
경암	편마암	80.00	157.00	71	2	20	4	60.00	0.70	조회

(b) 지반정보 입력

(c) 지반정보 입력(지층정보 입력)

지층구분	암종	ROD(%)	UCS(MPa)	GSI	K0	주응력 방향
보통암	편마암	75.00	157.00	45.00	11.20	80.00

(d) 지반정보 입력(암반특성 입력)

번호	경사각	경사 방향	불연속면 특성
J1	70	160	입력/수정
J2	60	300	입력/수정
J3	70	50	입력/수정

(e) 지반정보 입력(절리/불연속면 입력)

(f) 지반정보 입력(절리/불연속면 특성 입력)

그림 2. 입력모듈 구성

한편, 시추공 정보의 암반특성 입력정보인 RMR과 Q, 암중, GSI 등의 정보를 이용하여 해석시 적용되는 기본물성, 즉 Hoek-Brown 정수와 Mohr-Coulomb 정수, 변형계수를 산정할 수 있도록 하였으며, 이에 관한 자세한 내용은 유충식 등(2007)에 제시되어 있다.

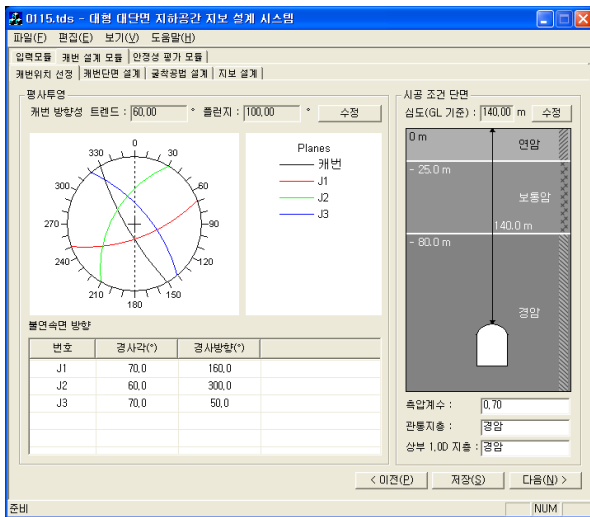
2.2.2 캐번설계 모듈

캐번설계 모듈은 캐번위치선정, 캐번단면 설계, 굴착공법 설계, 지보부재 설계의 항목으로 구성된다. 그림 3은 각 세부항목에 대한 기본포맷을 나타낸 것으로서 먼저 그림 3(a)의 캐번위치 선정 항목에서는 기 입력된 대상현장의 불연속면 정보를 이용하여 평사투영을 수행함으로써 캐번방향성을 결정하고, 지층단면과 비교하여 캐번심도를 결정할 수 있도록 하였다.

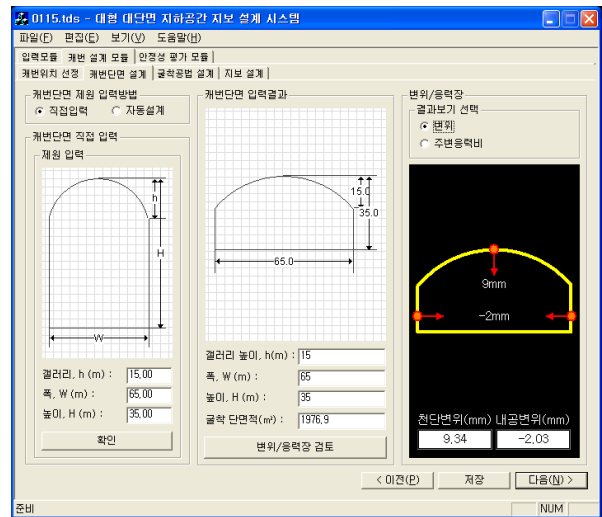
그림 3(b)의 캐번 단면설계에서는 단면제원인 갤러리(h), 폭(W), 전체높이(H) 입력을 통해 굴착단면적이 자동계산되고 시스템 내부적으로 구축되어 있는 ANN 엔진을 통해 변위/응력장 검토를 수행함으로써 설계자로 하여금 최적 단면제원을 선정할 수 있는 기준을 제시할 수 있도록 하였다.

그림 3(c)의 굴착공법 설계 항목에서는 벤치컷과 다분할 굴착방법을 선택하여 해당 굴착방법에서의 가로/세로분할에 대한 상세항목을 입력하고 그 결과를 신속히 가시화하여 보여줄 수 있도록 하였다.

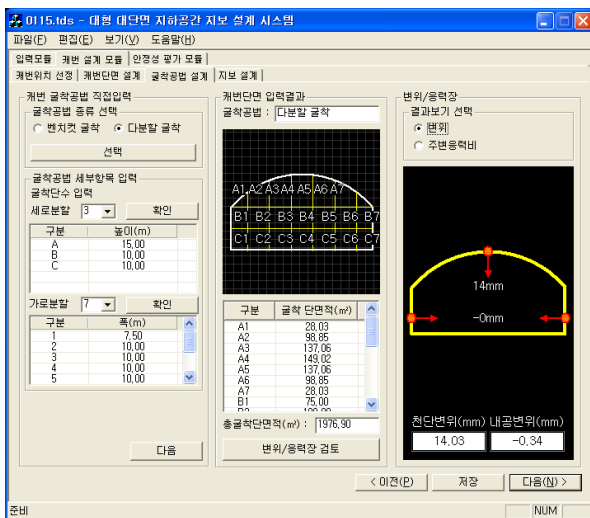
그림 3(d)에서 보여준 지보부재 설계항목에서는 Q-system에 근거한 Q-설계차트를 이용하여 기 입력된 지반정보와 단면제원을 토대로 지보부재를 자동으로 선정할 수 있도록 하였으며, 설계자가 직접입력을 통해 이를 수정할 수 있도록 기능을 갖추었다. 현재까지 개발된 본 시스템에서의 입력가능한 지보부재는 숏크리트와 록볼트, 케이블 볼트로써 그림 4의 지보부재 설계 입력항목에서 입력과정을 보여주고 있으며, 아울러 Q-설계차트를 이용한 Q-설계에 관한 자세한 내용은 유충식 등(2007)에 제시되어 있다.



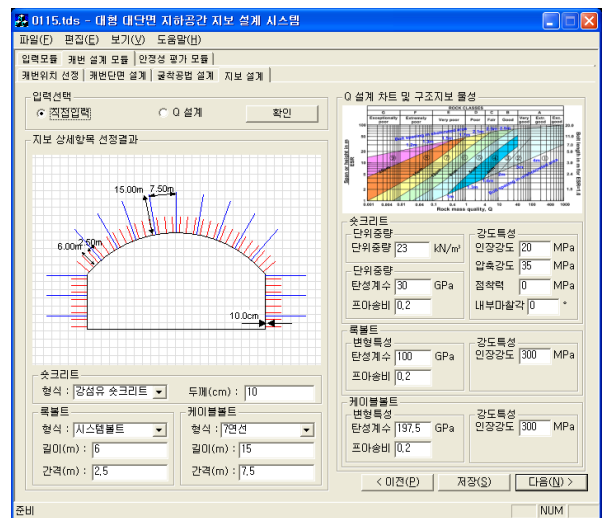
(a) 캐번위치 선정



(b) 캐번단면 설계



(c) 굴착공법 설계



(d) 지보부재 설계

그림 3. 캐번설계 모듈구성

(a) 지보부재 입력창

(b) 적용지보 세부사항 입력

(c) 구조지보 물성 입력

그림 4. 지보부재 설계 입력항목

2.2.3 안정성평가 모듈

본 모듈은 설계단면에 입력된 지반과 캐번정보로부터 최적의 상태로 구축된 ANN 엔진에 적용하여 시공중 안정성 평가를 수행하는 모듈이다. 본 시스템에서 안정성 평가시 필수적인 ANN 엔진을 구축하기 위해서 다양한 시공조건에 대해 연속체 개념에 근거한 FLAC 해석을 수행하였으며, 해석결과 중 안정성 평가항목에 해당하는 결과를 추출하여 DB화 하였다. 이와같이 구축된 DB를 ANN 학습에 적용하였으며 결과에 대한 타당성 및 합리성을 확보한 후 본 시스템에 적용하였다.

DB구축시 대상으로 한 시공조건은 굴착단면적이 435~2,200m² 인 캐번이며, 캐번이 관통하는 지층의 Q값은 20~40인 범위로 심도는 100~250m, 축압계수는 0.75~3.0 범위로 고려하였다. 또한 굴착형태는 벤치컷 굴착과 다분할 굴착방법으로 시공되는 조건을 대상으로 하였다. 적용 지보항목으로서는 숏크리트 두께 5~15cm, 록볼트 길이와 간격 각각 7~13m, 2~3m로 국한하였다. 이와같은 시공조건을 고려하여 총 120개 해석조건을 선정하여 2차원 해석을 수행하였고 해석결과로부터 표 2에 제시한 시공중 안정성 평가항목을 분석하여 DB화 하였다. 안정성 평가항목 중 안전율은 지보재의 파괴가 고려된 안전율로써 유광호 등(2001)이 제시한 전단강도감소기법을 이용하여 산정하였다.

표 2. 시공중 안정성 평가항목

구분	항목
캐번변위	천단변위, 내공변위
지보재 안정성	숏크리트 압축응력, 록볼트 축력, 캐번의 안전율
주변지반 안정성	천단부/측벽부 지반 응력비

인공신경망 모델을 구축과정은 유충식 등(2005, 2006)이 제시한 방법을 이용하였으며, 본 시스템 개발시 ANN 학습에 적용된 입력 파라메타와 출력 파라메타는 표 3에 제시하고 있다.

표 3. 연속체 해석에 근거한 안정성 평가 ANN 입·출력 파라메타

입력 파라메타	출력 파라메타
관통지층 Q, 토피고, 축압계수 편평율, 굴착단면적, 굴착방법 록볼트 길이/간격, 숏크리트 두께	캐번변위(천단/내공) 숏크리트 압축응력, 록볼트 축력, 안전율 주변지반응력비(천단부/측벽부)

다음의 그림 5는 시공중 터널 안정성 평가 항목에 대한 ANN 학습결과를 보여주고 있는데 모든 항목에 걸쳐 결정계수(R^2)가 99% 이상으로 분석되어 본 시스템에 적용된 ANN 엔진은 높은 신뢰성을 확보하는 것으로 평가되었다.

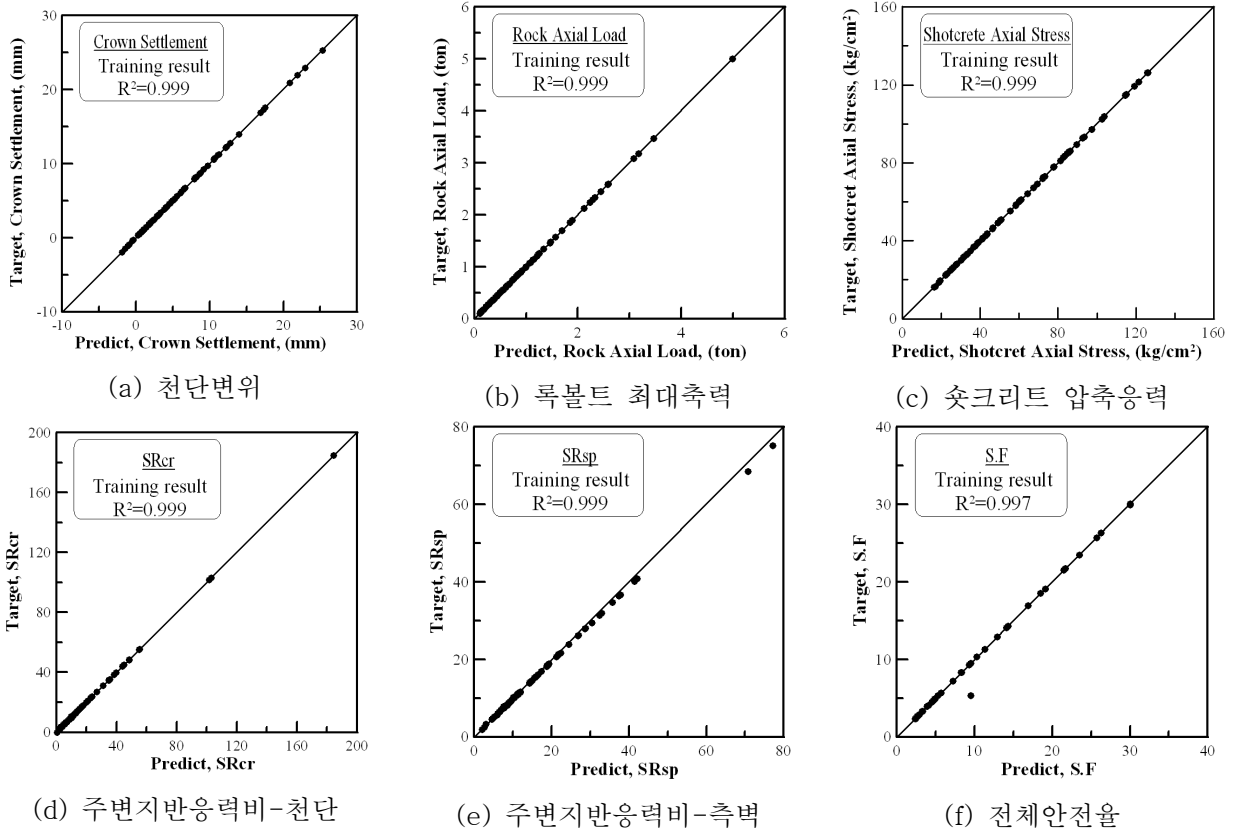
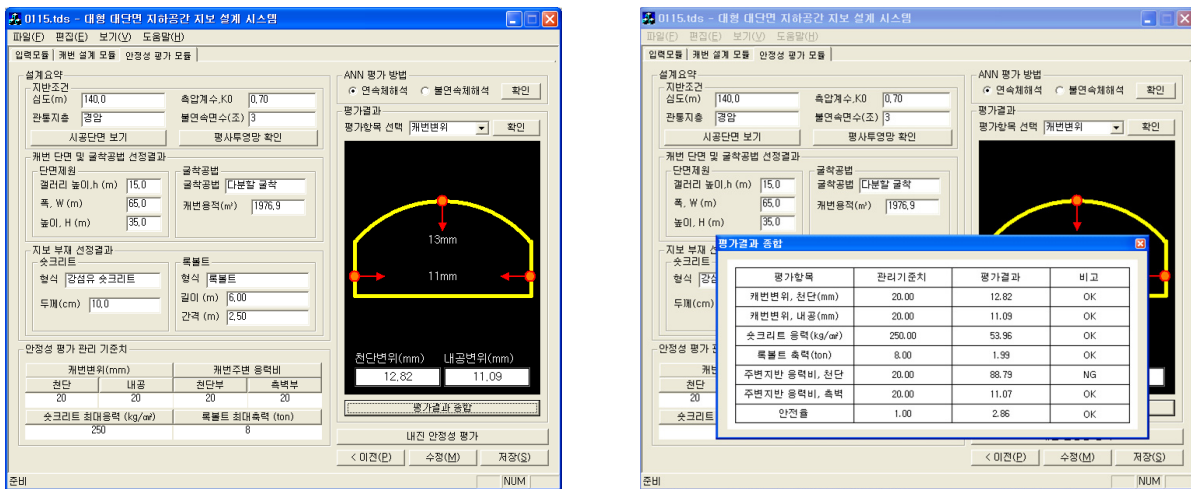


그림 5. 시공중 안정성 평가에 적용된 ANN 엔진의 ANN 학습결과

이와같이 구축된 ANN 엔진을 시스템에 적용하였으며, 이에 대한 과정은 유충식 등(2007)에 제시되어 있다. 한편, 그림 6은 임의의 시공조건에 대하여 안정성 평가 모듈을 이용한 안정성 평가 결과 적용 예를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 안정성 평가모듈은 캐번 설계시 입력한 조건에 대한 결과를 평가항목별로 확인할 수 있도록 배치하였으며, 평가결과를 종합하여 테이블로 제시될 수 있도록 하였다.



(a) 설계정보 요약 및 평가항목별 결과

(b) 평가결과 종합

그림 6. 안정성 평가 모듈 구성

3. 적용 예

3.1 대상 현장 및 시공조건

본 연구에서 개발한 시스템의 현장 적용성 확인을 위해 ○○ 현장을 대상으로 적용성 검토를 수행하였다. 대상구조물은 지하공연장으로서 제원은 폭 60m, 높이 35m이며, 대상지역은 편마암 지대로서 심도가 100m 정도 확보되어 굴착압반의 Q값이 20 정도인 지반조건이다. 이 지역에 대한 절리/불연속면 조사결과 N70E/70SE, N30E/60SE, N40W/70NE 방향에 형성된 것으로 나타나 있다. 대상구조물의 단면제원과 굴착방법 및 지보부재 현황은 그림 7과 표 4에 제시하였다.

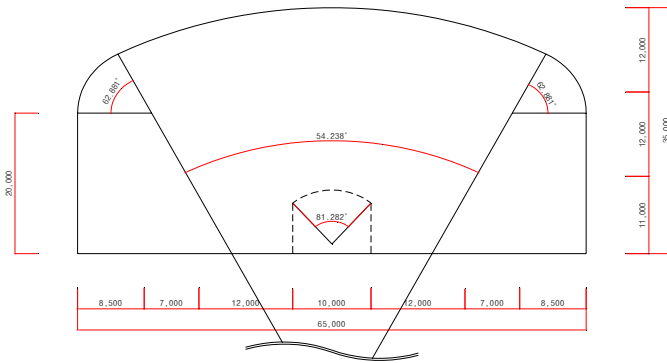


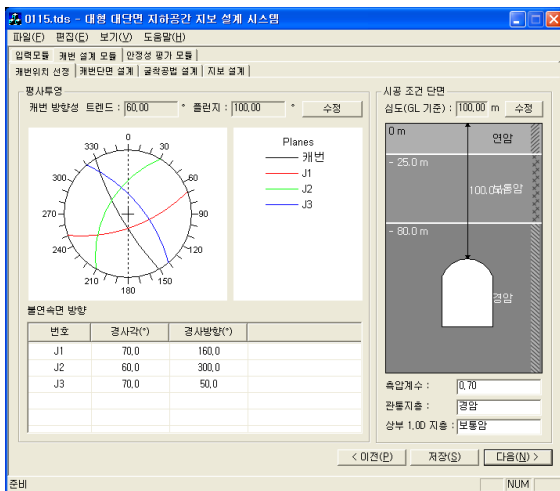
그림 7. 대상 구조물 단면제원

표 3. 굴착방법 및 지보부재 적용안

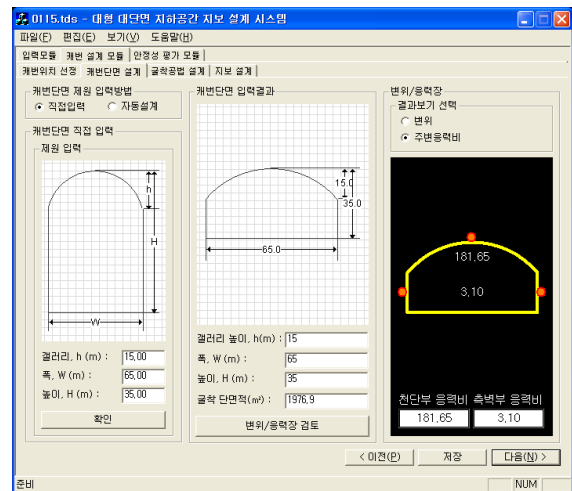
구분		적용안	
굴착공법		다단계 분할굴착	
숏크리트두께(mm)		강섬유 100	
록볼트	길이(m)	6.0	
	횡간격(m)	2.5	
케이블볼트	천단부	길이(m)	15.0
		횡간격(m)	5.0
	측벽부	길이(m)	12.0
		횡간격(m)	5.0

3.2 개발 시스템을 이용한 시공중 안정성 평가

다음은 대상 구조물에 대한 시공조건을 시스템에 적용하는 과정 및 결과를 요약하여 나타내고 있다. 먼저 현장에 대한 지반조사 결과를 토대로 한 지반정보를 입력모듈에서 입력을 완료한 후 캐번 설계모듈에서 그림 8(a)~8(c)에 제시한 바와 같이 캐번위치 선정 → 단면제원 선정 → 지보부재 선정 과정을 거치게 된다. 이와같은 과정을 통해 시스템에 저장된 지반정보와 캐번정보를 토대로 연속체 개념에 근거한 안정성 평가를 시스템 내부에 구축된 ANN 엔진을 통해 수행한 결과 그림 8(d)에 나타낸 바와 같이 모든 평가항목에서 관리기준치를 초과하지 않는 것으로 제시되고 있음을 볼 수 있다. 이상과 같이 본 시스템을 적용하는 경우 비교적 간단한 방법으로 대상 구조물에 대한 안정성 검토를 효과적으로 수행할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

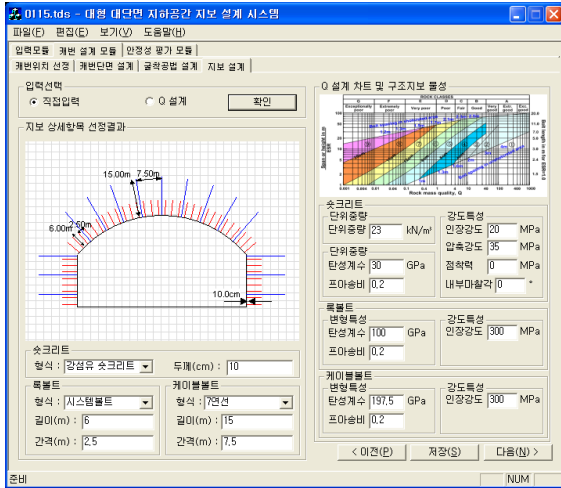


(a) 캐번위치 선정

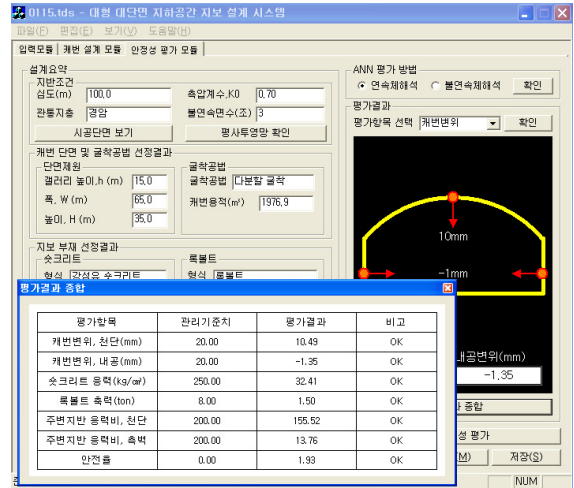


(b) 단면제원 입력

그림 8. 개발된 시스템을 적용한 캐번설계 및 안정성 평가 수행 과정(계속)



(c) 지보부재 입력



(d) 안정성 평가결과

그림 8. 개발된 시스템을 적용한 캐번설계 및 안정성 평가 수행 과정

4. 결론

본 논문에서는 IT기반의 캐번설계 및 안정성 평가 시스템 개발에 관한 내용을 다루었다. 시스템 개발을 위해 관련 선행연구를 통해 그 적용성이 확인된 바 있는 인공지능망 적용기법을 도입하였으며, 그 외에 각종 지식기반의 설계자동화 연구를 통해 제한된 시공조건에 한해 캐번설계와 시공중 안정성 평가가 가능한 시스템을 개발하였다. 구축된 시스템은 향후 대상 시공조건 범위의 확장을 통하여 기존의 설계과정을 개선한 효율적인 수단으로 활용될 것으로 기대된다.

감사의글

본 연구는 2005년 건설교통부가 출현한 IT 기반의 지하공간 지보시스템 설계기술 개발(과제번호 : C104A1010001-05A0501-00220)에 의한 것이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유광호, 박연준, 배규진 (2001), “터널 안정성 평가의 정량화 기법 제안”, *한국암반공학회 터널기술분과위원회 기술세미나 논문집*, pp. 82-95.
2. 유충식, 김선빈, 유광호 (2006), “지식기반의 터널설계 자동화 시스템 개발”, *한국지반공학회 학술발표회 논문집*, pp. 1413-1420.
3. 유충식, 김주미, 김선빈, 정혜영 (2006), “GIS-ANN 기반의 도심지 터널 설계/시공 위험도 평가”, *대한토목학회 논문집*, 제26권, 제1C호, pp. 63-72.
4. 유충식, 김주미, 김진하 (2005), “정보기술(IT)의 터널설계 분야에의 적용사례”, *한국터널공학회 정기학술발표회 논문집*, pp. 105-116.