

## 인공지능을 이용한 터널 인접구조물의 안전진단 시스템의 개발 Development of Artificial Intelligent Diagnosis System for Adjacent Structures of Tunnel Excavation Sites

배규진<sup>1)</sup>, Gyu-Jin Bae, 김창용<sup>2)</sup>, Chang-Yong Kim, 신휴성<sup>3)</sup>, Hyu-Soung Shin, 홍성완<sup>4)</sup>, Sung-Wan Hong

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구실 실장, Director, Geotechnical Engineering Div., KICT

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구실 팀장, Primary Investigator, Geotechnical Engineering Div., KICT

<sup>3)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Div., KICT

<sup>4)</sup> 한국건설기술연구원 부원장, Vice-President, KICT

**SYNOPSIS** : Ground settlements induced by tunnel excavation cause the foundations of the neighboring superstructures to deform. An expert system called NESASS was developed to analyze the structural safety of such superstructures. NESASS predicts the trend of ground settlements to be resulted from tunnel excavation and carries out a safety analysis for superstructures on the basis of the predicted ground settlements.

Using neural network techniques, NESASS learns a database consisting of the measured ground settlements collected from numerous actual fields and infers a settlement trend at the field of interest. NESASS calculates the magnitudes of angular distortion, deflection ratio, and differential settlement of the structure and, in turn, determines the safety of the structure. In addition, NESASS predicts the patterns of cracks to be formed on the structure using Dulacsas model for crack evaluation.

In this study, the ground settlements measured from the Seoul subway construction sites were collected and sorted with respect to the major factors influencing ground settlement. Subsequently, a database of ground settlement due to tunnel excavation was built. A parametric study was performed to verify the reliability of the proposed neural network structure. A comparison of the ground settlement trends predicted by NESASS with the measured ones indicates that NESASS leads to reasonable predictions. An example is presented in this paper where NESASS is used to evaluate the safety of a structures subject to deformation due to tunnel excavation near to the structure.

**KEYWORDS** : Surface settlements, Superstructures, Structural safety, Expert system, Neural network, Monitoring database, Safety analysis, Ground settlement-influencing major factors, Surface settlement prediction

### 1. 서 론

최근들어 도심지에는 많은 국가기간 시설물들이 서로 네트워크 형태로 건설되고 있고, 각 구조물 발주 및 관리 관청이 서로 달라서 구조물 건설에 많은 이해관계가 상충되고 있어 인접구조물에 피해를 입히는 사례도 자주 보고 되고 있다. 이러한 국가 기간 시설물 건설에 필수적인 요건중의 하나가 공사중 인접구조물 안전성을 확보하는 것이다. 특히, 도심지에 터널굴착을 수행할 경우는 터널자체의 안정성 외에도 주변 기설 구조물들의 안전이 매우 중요하므로 터널 설계 시공시 이를 고려해야 하나, 최근 서울지하철 ○-○공구 터널공사 중에 발생한 지표침하 및 도로 붕괴사고와 지표침하에 의한 가스관 폭발사고

등과 같이 최근 인접구조물들의 피해사례는 최근 지하구조물 건설수요에 비례하여 계속 늘고 있는 실정이다.

선진외국에서는 도시 발달과 함께 도심지 지반굴착시 인접구조물에 대한 안전도 평가기술 연구를 최근 까지 활발히 수행하고 있다. Boscardin 등(1978)은 Washington, D.C.내의 지하굴착 현장에서 구조물의 변형 계측을 실시, 지상구조물의 안전도를 평가할 수 있는 요소들, 즉 angular distortion과 deflection ratio에 대한 적정성 검토를 수행한 바 있으며, 영국의 Attewell 등(1984)은 구조물의 안전해석기술로서 Winkler 모델을 이용하여 지반굴착 방향과 수직 및 평행하게 위치한 지중매설관의 안전도를 평가할 수 있는 방법을 제안하고 구조물의 축조재료와 기초형식 등의 변화에 따른 안전도 평가표들도 제시한 바 있다. 또한 1994년도에 국내 기업체 연구소에서 터널굴착시에 인접매설관에 대한 이론적, 수치해석적 접근을 시도하여 안정성을 평가한 사례가 있다. 하지만 국내의 경우 안전성 평가와 관련된 구체적인 연구 활동이 미흡한 실정이며 정성적인 안전성 평가 위주로 평가작업이 수행되고 있고, 일반 기술자들이 현장에서 손쉽게 정량적인 안전성 평가를 수행할 수 있는 기법 개발이 이루어지지 않고 있어 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서, 보다 합리적인 구조물의 안전성 평가를 수행하기 위해서 본 연구에서는 현장여건과 연계된 인접구조물 안전성 평가 전문가시스템을 개발하였다.

## 2. 시스템 개발을 위한 이론적 연구

### 2.1 추계학적 지표침하 해석

추계학적 이론의 개념은 그림 1에서와 같이 지반을 구(sphere)나 원반체(disk)를 쌓아 구성한 것으로 가정한 후, 하부의 어떤 구나 원반체를 제거할 때 중력에 의해 무너져 내리는 각 매체가 교란 중심부를 통과할 확률을 고려하여 지표침하 형태 및 크기를 분석하는 방법이다. 이 방법은 지반내의 응력조건보다는 변위 조건을 위주로 해석하는 방법이다

이러한 개념을 근간으로, Sweet와 Bogdanoff(1965)가 제안한 이차분포함수(binomial distribution function)와 Schmidt(1969)가 제시한 누적 정규분포함수의 차를 한 개의 정규분포함수로 표현한 식을 이용해 지표침하 산정식인 가우스 정규분포함수를 최종적으로 구할 수 있다.

$$\delta_s(0,0) = \delta_{smax}$$

$$\delta_s(X,0) = \delta_{smax} \exp\left(-\frac{X^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

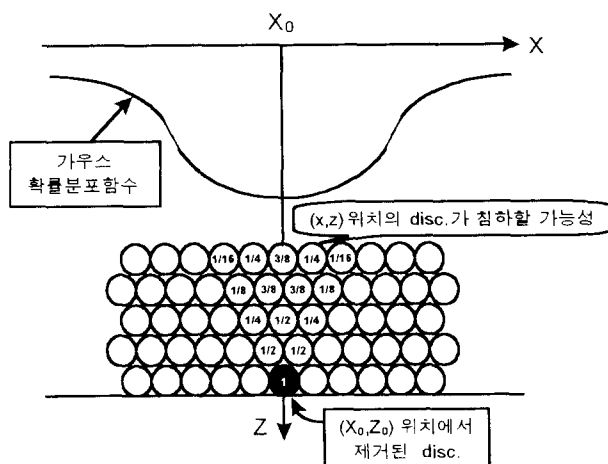


그림 1. 추계학적 이론모형

여기서  $\delta_{smax}$ 은 최대침하치,  $i$ 는 가우스 정규분포곡선의 중심선으로부터 변곡점까지의 거리를 나타낸다. 식 (1)은 최근까지 많은 학자들의 연구결과, 실제 터널굴착시 지표면의 침하형태를 가장 유사하게 표현해 주는 식으로 알려져 있다.

## 2.2 인공신경망과 전문가시스템

전문가시스템은 인공지능(artificial intelligence)의 응용분야 중의 하나이며 전문가가 가지고 있는 지식을 인위적으로 컴퓨터에게 부여함으로써 그 방면에 비전문가라 할지라도 그러한 전문가의 지식을 이용, 원하는 결과를 얻는 일종의 자문형(consulting) 컴퓨터 시스템이다. 따라서 전문가시스템은 토목분야와 같은 특정분야의 복잡한 문제를 해결할 수 있는 전문기술자의 사고능력 및 지식을 이용할 수 있도록 도와준다. 또한 전문가시스템의 일반적인 구성은 지식기반(knowledge base)에 전문가의 지식(사실, 규칙)을 저장하고, 이 지식기반을 바탕으로 추론된 결과를 사용자가 원하는 형식을 사용하여 결과물을 얻도록 구성되어 있다.

인공신경망이란 인간의 신경조직을 모델로 하여 간단한 기능의 처리기 사이를 서로 대규모로 연결시킨 네트워크 형태의 정보처리 구조를 의미하며 자료를 통한 학습으로 작업을 수행한다. 이러한 인공신경망의 구조는 그림 2와 같이 인간뇌의 기본단위인 뉴런(neuron)과 이의 연결부인 시냅스(synapse)를 모사하여 구성된다. 인공신경망에서 가장 중요한 고려사항은 뉴런의 역할을 수행하는 처리기와 활성화함수(activation function)이며 시냅스는 강도를 조정할 수 있는 연결선으로 구성된다. 이러한 인공신경망은 상당히 긴 역사를 가지고 있지만 최근 들어 이에 대한 연구가 폭발적으로 증가했고 이로 인해 다양한 인공신경망 모델들이 제안되었다.

따라서 본 연구에서는 여러 인공신경망이론 중, 다층 역전파 인공신경망(multi layer back propagation neural network)을 이용하였다. 이용된 신경망은 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 중간층(은닉층, hidden layer)이 존재하는 층상 구조의 다층 퍼셉트론이며 전·역방향의 학습이 이루어진다.

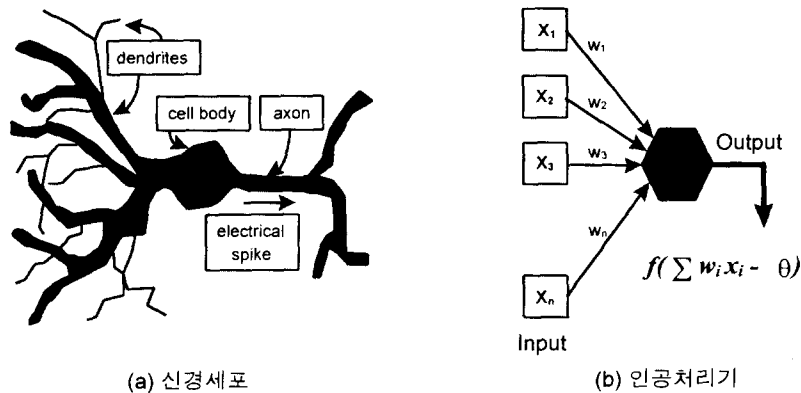


그림 2. 신경세포와 인공처리기

## 2.3 인접 지상구조물의 안전성 평가

### 2.3.1 허용한계치를 이용한 안전성 평가

지상구조물의 손상평가 지수로는 다음과 같은 angular distortion과 deflection ratio등을 대표적으로 들 수 있다. 여기서 angular distortion은 구조물의 전단 비틀림 수준을 나타내며, 그림 3에서와 같이 침하에 의해 발생하는 구조물상의 두 지점으로 연결된 직선의 회전각으로 표현된다. 또한 deflection ratio는 관심있는 두 지점간을 연결한 직선과 그 구간에서 발생한 침하곡선간의 최대간격인 deflection  $w_0$ 을 구조

물내 관심있는 두 지점간의 거리  $l_{AB}$ 로 나눈 값으로 정의된다. deflection ratio는 구조물의 휨에 기인한 손상을 평가하는 지수이다. 여기서 지상구조물들은 터널굴착에 의해 변위가 발생하게 되는 지반과 일체 거동하는 것으로 가정하여 해석할 수 있다.

여러 문헌에서 각각 특정한 구조물을 대상으로 제시하고 있는 다양한 허용 한계치들을 종합·재정리하고, angular distortion과 deflection ratio등과 같은 일반적인 안전성 평가 항목들을 대상으로 정리된 허용 한계치 분류표를 기 수행된 연구(배규진 등, 1996)에서 제시하였다.

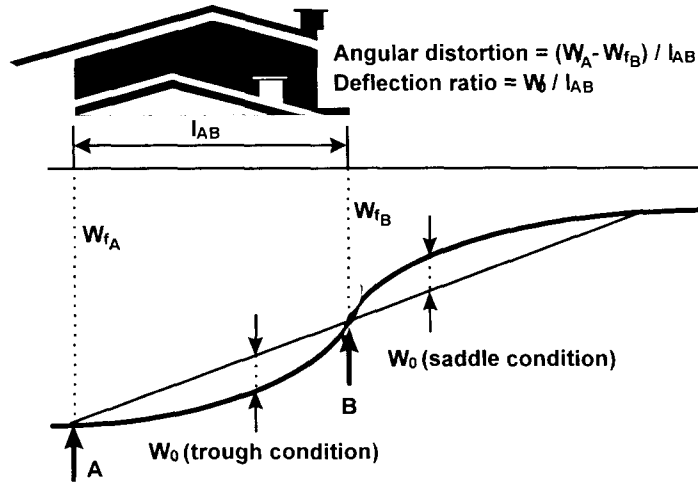


그림 3. Angular distortion과 Deflection ratio

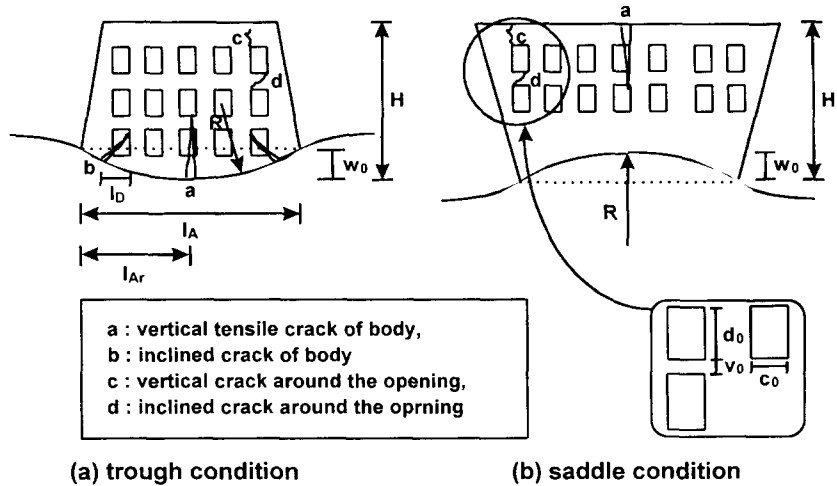


그림 4. 구조물의 균열양상

### 2.3.2 Dulacska 균열양상 평가 모델

Dulacska 모델은 Dulacska(1992)에 의해 지표침하에 의해 발생하는 구조물 기초부의 변형을 토대로 예상되는 구조물의 균열양상과 균열간격을 평가하기 위하여 개발되었다. 여기서 구조물 기초부에 발생하는 지표침하양상은 등사형 트라프 조건(trough condition)과 배사형 트라프 조건(saddle condition) 모델로 구분하여 균열양상을 평가한다. 또한 벽체의 균열은 그림 4와 같이 그들의 특성에 따라 수평인장에 의해 발생하는  $\sigma$ -crack과 전단변형(shear deformation)에 의해 발생하는  $\tau$ -crack으로 구분할 수 있다.

이러한 구조물의 다양한 균열형태에 대하여 제시된 모델을 이용, 균열양상을 예측하고, 구조물에 미칠 수 있는 영향을 예측할 수 있다.

### 3. 인접구조물 안전성 평가 전문가 시스템의 개발

#### 3.1 지표침하 영향 요소의 체계화

유용한 계측자료 데이터베이스를 구축하기 위해서는 데이터베이스의 분류인자들을 합리적으로 결정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 분류인자들을 지표침하에 크게 영향을 미치는 인자들을 근간으로 결정하였다. 또한 지표침하 계측자료들은 가우스 정규분포 곡선을 이용하여 침하계측 자료들을 분석·정리하였다. 따라서 최종 지표침하 트라프는 변곡위치  $i$ 와 최대침하량  $\delta_{smax}$ 으로 대표된다. 여기서 터널전문가들의 자문을 토대로 각 현장상황에 대한 데이터베이스화 작업을 수행하였으며 선정된 지표침하 주영향 인자는 표 1과 같다.

본 연구에서 지표침하는 지상구조물의 안전성에 미치는 영향이 가장 클것으로 예상되는 최종침하와 터널축의 횡방향 침하거동만을 분석하여 지상구조물의 기초부 변형량을 결정하였다. 또한 지반의 수평변위 및 수평변형율도 지상구조물의 안전성에 영향을 미치는 것은 사실이나, 본 연구는 횡방향 변위의 침하계측 자료의 부족으로 인접구조물의 안정에 주된 영향을 미치는 지표침하에 국한시켰다.

#### 3.2 침하계측 자료 데이터베이스 구축

본 연구에서는 국내에 방만한 지표침하 계측자료들을 정리, 분석된 자료를 이용하여 직접 데이터베이스화 작업을 수행하고 인공지능망의 학습자료로 활용하였다. 이러한 방안은 터널 설계시 기수행된 터널시공 자료를 적절히 활용할 수 있는 합리적인 방안이라 사료된다.

따라서 설정된 지표침하의 주영향인자인 분류항목을 이용하여 인공지능망 학습시 사용될 데이터베이스를 구축하였다. 우선적으로 그 동안 학회 논문발표 등으로 자료검증을 받은 서울지하철 지표침하계측 자료와 계측현장의 지질조사 보고서, 실시 설계서, 시공 종합보고서 및 기타문헌등을 기초로 27개소의 지표침하 계측자료 및 터널시공정보들을 정리하였다.

#### 3.3 전문가시스템, NESASS

본 연구에서 개발한 인접구조물 안전진단 전문가시스템 NESASS (Neural network Expert System for Adjacent Structure Safety analysis)는 방대한 지표침하 계측자료들을 정리, 관리할 수 있으며, 정리된 데이터베이스를 이용하여 인공지능망의 학습을 수행하고 대상 터널현장의 지표침하를 예측한다. 이를 기반으로 시공하려는 터널에 인접해 있는 지상구조물의 정보가 입력되면 지상구조물의 안전성 평가 매개변수들이 결정된다. 다음으로 기수립된 구조물의 허용 한계치를 이용하여 지상구조물의 안전성 평가를 수행하고 결과치를 그래픽으로 제시하며, 구조물에 예상되는 각종 균열양상을 평가한다. 여기서 NESASS의 개발도구로 범용 프로그램 언어인 Delphi(PASCAL-language)를 이용, GUI환경의 전문가시스템을 구축하였다. NESASS의 전체적인 시스템 구조도는 그림 5에 나타내었다.

또한 NESASS의 인공지능망은 다양한 신경망 구조와 학습패턴을 가지고 학습과 추론 효율성을 분석한 결과를 바탕으로 그림 6과 같이 47개 입력패턴과 94개의 은닉패턴, 2개의 출력패턴 구조로 구축하였다. 또한 다양한 매개변수 연구를 통하여 결정된, 학습을 0.2 모멘텀 상수 0.5를 설정하여 학습을 수행하였다(배규진 등, 1996).

표 1. 지표침하 주영향인자

터널의 기하학적 조건	(1) 터널 깊이 ( m )			
	(2) 굴착 폭 ( m )			
	(3) 굴착 높이 ( m )			
	(4) 터널 형상	원형, 난형, 마제형, 특수형		
	(5) 터널 형태	( Single tunnel or Twin tunnel )		
	(6) Pillar 폭 ( m )			
지반 조건	(7) 기반암 종류	화강암, 편마암, 퇴적암		
	(8) 터널 상부의 피복암 종류 ( m )	풍 화 암, 연암, 보통암, 경암, 극경암		
	(9) 피복암 상부의 토사지반 종류 ( m )	Cohesive soil	Stiff, Soft	
		Cohesionless soil	Dense, Medium dense Loose	
	(10) 지하 수위 ( m )			
(11) 터널내 유입 지하수량 ( l/분-km )				
굴착 및 보강조건	(12) 지보재 설치	록볼트, 슛크리트, 강지보재		
	(13) 굴착 방법	TBM, Shield, Drill & Blasting, Peak 굴착		
	(14) 굴착 형태	전단면 굴착		
		상,하반 분할굴착	bench cut	short, long ring cut
		가인버트 시공, Single side wall drift 굴착 Two side wall drift 굴착		
	(15) 보조공법의 적용	Forepoling, 갱내 Grouting, 지상 Grouting Pipe-roof, 강관단단, 수평 제트 Grouting		
	(16) 지보재 설치시기	조기, 적절, 지연		
	(17) 굴착속도 ( m/일 )			
	(18) 막장거리 ( m )			
	(19) 배수 또는 비배수	( 배수, 비배수 )		
	침하를 대표하는 요인	(20) 최종, 최대 침하량 ( $\delta_{max}$ )		
(21) 침하의 최대경사 위치 ( $i$ )				

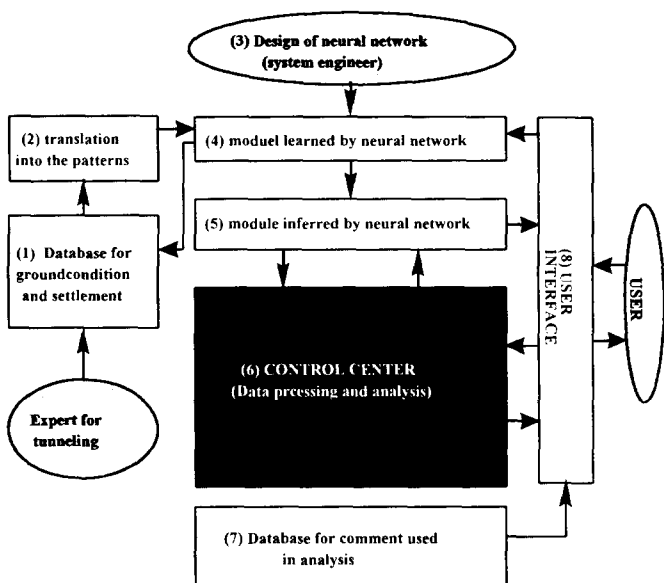


그림 5. NESASS의 시스템 구조도

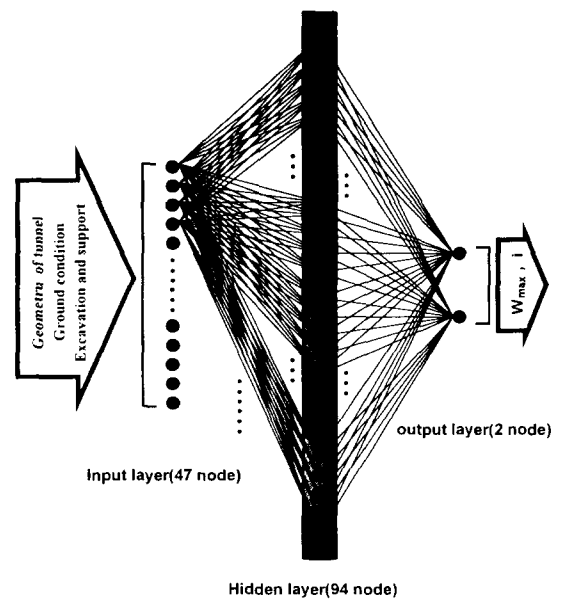


그림 6. NESASS의 인공신경망 구조

## 4. NESASS를 이용한 인접구조물 안전성 평가

### 4.1 터널현장의 지표침하 예측

본 NESASS의 현장적용실험에 사용된 터널모델은 연약한 사질토 지반을 대상으로한 마제형 쌍굴터널으로, 터널굴착시 short bench와 ring cut 굴착방식을 채택하여 forepoling의 보조공법이 적용된 터널현장으로 가정하여 설정하였다. 또한 설정된 터널은 폭 6.3m, 높이 7.66m, 터널심도 11.55m이다.

그림 7는 NESASS를 이용하여 예측된 지표침하 트라프이다. 여기서, 최종, 최대침하량은 158,995mm 추론되었으며 침하트라프의 변곡위치  $i$  값은 13.76m로 예측되었다. 또한 NESASS는 해석하고자 하는 터널현장과 유사한 현장들을 기 구축되어 있는 D/B내에서 검출해 낼 수 있다.

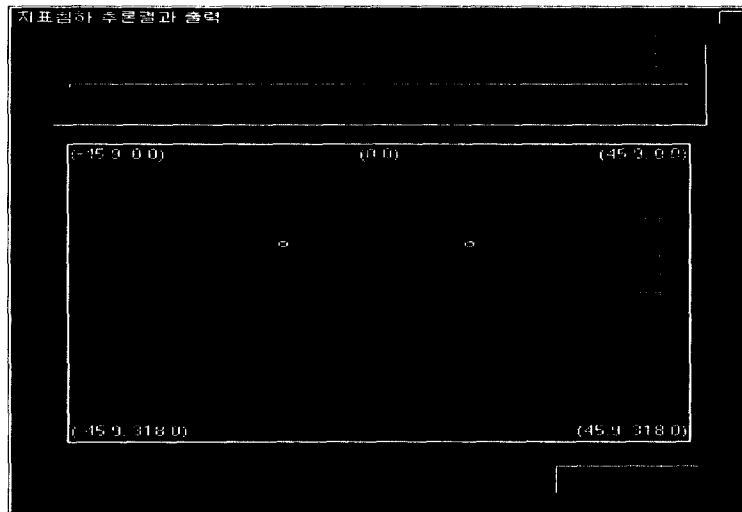


그림 7. NESASS의 지표침하 추론결과

### 4.2 구조물 안전성 평가 및 균열양상 예측

NESASS는 인접구조물 안전성 평가 모듈을 이용하여 추론된 지표침하 트라프를 적용, 지상구조물의 안전성 평가를 수행한다. 실험 대상 지상구조물은 폭이 10m, 높이 10m, 석재 분리벽(masonry partition and filling wall)의 다층구조물로 가정하여 설정하였다.

그림 8은 설정된 지상구조물에 대한 NESASS의 구조물 평가 모듈의 수행결과이다. 터널 직상부에 위치한 구조물 A는 부등침하에 기인하는 angular distortion의 영향에는 안전하지만 휨에 의한 deflection ratio에 대해서는 심각한 것으로 평가되었다. 표 2는 다양한 위치에 대하여 동일한 구조물과 침하트라프 상에서의 안전성 평가를 수행한 결과이다. 구조물의 기울음이 비교적 큰 지상구조물 B, C의 경우, deflection ratio에 의한 불안전 요인은 발생하지 않으며 angular distortion과 부등침하에 의한 불안전성이 높게 예측되었다. 또한 터널현장과 상당히 떨어져 있는 지상구조물 D의 경우는 지표침하의 영향을 거의 받지 않는 것으로 평가되었다.

그림 9은 지상구조물 A를 대상으로 균열평가를 수행한 결과이며 구조물 B, C, D에 대한 평가결과는 표 3에 나타내었다. 구조물 A는 지상구조물의 기울음보다는 지표침하 트라프와의 이격에 기인한 휨 거동이 크게 예상되고 지상구조물 기초부의 양 모서리부에 집중하중을 받아 모서리부의 전단응력에 의한 균열이 큰 폭으로 발생할 것으로 예상됨에 따라 NESASS의 평가결과는 전단응력에 의한 경사균열폭이 51.902 mm로 상당히 크게 예측되었다. 하지만 실제 안전성 평가에서는 이와같은 균열폭을 실제현장에 적용하는 것보다 예측된 균열폭을 기반으로 기타 지상구조물의 특성 및 기능을 고려하여 안전성 평가를 수행하여야 한다고 사료된다.

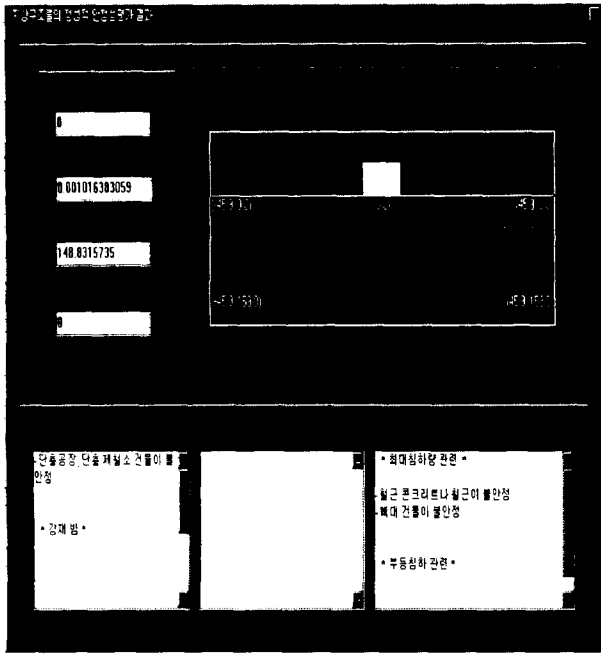


그림 8. NESASS의 안정성평가 결과

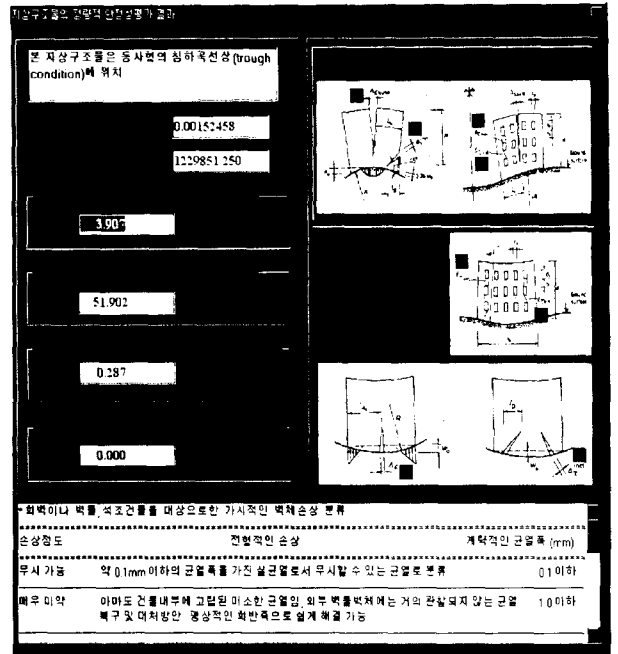


그림 9. NESASS의 균열양상 평가 결과

표 2. 지상구조물의 안전성 평가 결과

항목 \ 지상구조물의 종류	A	B	C	D
터널축선과의 최대거리 (m)	-5	10	25	100
터널축선과의 최소거리(m)	-5	0	15	90
Angular distorsion	0	0.0037	0.0057	$8.0 \times 10^{-12}$
deflection ratio	0.001	0.00083	0.00039	$3.78 \times 10^{-12}$
최대침하량 (mm)	148	159	88	$8.05 \times 10^{-8}$
부등침하량 (mm)	0	36.92	57.247	$8.0 \times 10^{-8}$

표 3. 지상구조물의 균열양상 평가 결과

항목 \ 지상구조물의 종류	A	B	C	D
터널축선과의 최대거리 (m)	-5	10	25	100
터널축선과의 최소거리(m)	-5	0	15	90
기초부 변형형상	trough condition	trough condition	saddle condition	saddle condition
트라프의 곡률반경	$1.2 \times 10^0$	$1.5 \times 10^0$	$3.22 \times 10^0$	$3.30 \times 10^{14}$
예기되는 균열폭 (mm)	a 모드	3.907	4.741	0
	b 모드	51.902	45.549	13.354
	c 모드	0.289	0	0
	d 모드	0	0	0



## 5. 결론

본 연구를 통해 얻은 세부 결론은 다음과 같다.

- (1) 인공신경망 기법을 이용하여 지하굴착시의 지상구조물의 안전진단용 전문가시스템인 NESASS를 개발하였다.
- (2) NESASS는 파스칼 언어를 근간으로 한 델파이를 이용하여 개발되었으며 모든 작업을 화면상에서 직접 수행할 수 있는 사용자 환경(user interface)을 구현하여 예기된 지표침하에 기인한 지상구조물의 안전성 평가작업을 보다 용이하게 수행할 수 있게 하였다.
- (3) 본 연구에서는 계측자료를 가우스 정규분포함수로써 표현하고, 현장조사 및 전문가 의견조사 등을 통해 지표침하에 주요하게 영향을 미치는 인자들을 합리적으로 결정하고, 지표침하자료를 데이터베이스화 하였다. 또한 데이터베이스의 새로운 활용방안으로 인공신경망기법을 도입함으로써 계측자료의 데이터베이스를 터널설계에 직접 활용할 수 있는 가능성을 제시하였다.
- (4) Dulacska의 균열양상 평가모델을 프로그래밍하여 NESASS에 구현함으로써 지상구조물의 종류에 따른 발생균열양상의 해석이 가능하도록 하였다.

## 6. 향후 연구과제

- (1) 이상과 같은 과정을 통해 구축된 NESASS의 신뢰성을 검증하기 위하여 향후 지속적으로 진행될 연구에서는 인공신경망 모델의 추론능력 검증작업과 현장 적용성 평가를 위한 실제 현장 자료와의 비교검토작업을 수행할 계획이다.
- (2) 앞으로의 연구는 개발된 prototype NESASS의 각 모듈의 보완 및 신뢰성 검토 그리고 해석의 신뢰도를 높일 수 있도록 지속적인 지표침하 자료 수집·정리 등을 추진하여 보다 신뢰성 있는 시스템이 될 수 있도록 하고 지상구조물이외의 인접구조물(지하매설관, 인접터널)의 안전성 평가에 확대·적용되어야 한다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 배규진, 김창용, 신휴성, 홍성완(1996), “지하 생활공간 개발 요소기술 연구, 지반굴착기술분야(IV)”, p. 216., 한국건설기술연구원 정책연구보고서.
2. 대우엔지니어링 건설기술 연구소(1995), “터널굴착에 따른 지반침하, 특성에 관한 연구개발 보고서”, p. 124.
3. Attewell. P. B. & Taylor. R. K.(1984), “Ground movements and their effects on structures”, Surrey University press, USA.
4. Boscardin, M. D. & Cording, E. J., O'Rourke, T. D.(1978), “Case studies of building behavior in response to adjacent excavation”, U.S. Department of Transportation, pp. 1-3~3-32.
5. Dulacska, E.(1992), “Soil settlement effects on building”, Development in Geotechnical Engineering 69, Elsevier Science, Amsterdam, p. 447.