

---

## 터널굴착 현장에 인접한 지상구조물의 안전성 평가용 전문가 시스템의 개발

Development of a Network Expert System for Safety Analysis of Structures  
Adjacent to Tunnel Excavation Sites

배규진\* 김창용\*\*신휴성\*\*\*홍성환\*\*\*\*  
G.J.Bae, C.Y.Kim, H.S.Shin, S.W.Hong

---

### ABSTRACT

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 data base 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 Dulacskas 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 examples 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.

### 요 지

터널굴착으로 발생하는 지반침하하는 지상구조물의 변형을 유발할 수 도 있으므로 터널굴착전에 지

---

\* 한국건설기술연구원 지반연구실장  
\*\* 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원  
\*\*\*한국건설기술연구원 부원장

상구조물의 안전성 평가가 선행되어야 한다. 이리하여 본 연구에서는 전문가의 포함된 터널현장의 지표침하를 예측하고, 이를 기반으로 지상구조물의 안정성 평가를 수행하는 전문가 시스템 NESSS(Neural network Export System for Adjacent Structure Safety Analysis)를 개발하였다.

NESASS는 인공신경망을 이용하여 기존 터널현장의 지표침하 계측자료로 작성된 데이터베이스 자료를 학습자료로 하여 학습을 수행하고, 이를 기반으로 터널현장의 지표침하 트라프를 추론한다. 또한 추론된 지상구조물 기초부 변형을 기반으로 계산된 평가 매개변수(angular distortion 등)의 허용 한계치를 이용하여 건물의 안전성을 평가하고 Dulacska의 균열평가 모델을 이용하여 지상구조물의 균열양상을 예측한다.

따라서, 본 연구에서는 지표침하의 주 영향인자들을 선정하고 이를 분류항목으로 이용, 서울지하철 일부구간의 지표침하 계측자료를 수집, 정리하여 데이터베이스화를 추진하였다. 그리고 인공신경망 구조에 관련된 매개변수 연구를 수행하여 개발된 NESASS의 인공신경망 구조의 신뢰도를 확인하였으며 기수행된 침하계측 결과치와 비교하여 지표침하 예측능력도 조사하였다. 또한 NESASS를 이용하여 실제 터널현장을 모델로 설정, 지상구조물의 안전성 평가를 수행해 봄으로써 NESASS의 실무적용성을 아울러 확인하였다.

## 1. 서론

최근 들어 급속한 산업발달과 함께 인구증가로 인하여 우리 나라에서는 좁은 국토를 효율적으로 활용하기 위한 노력이 경주되고 있다. 따라서 각종 국가 기간 시설물(Infrastructures)들은 심각한 교통체증과 인구과밀 문제를 해결하기 위해서 대규모 지하 교통시설과 함께 전력 및 통신시설도 지하터널로 건설되고 있다. 이 밖에도 각 지역으로의 물류수송과 교통난은 해결하기위해 국토의 대동맥인 경부고속전철이 건설되고 있다.

이러한 국가 기간 시설물 건설에 필수적인 요건중의 하나가 공사중 안전성을 확보하는 것이다. 특히, 도심지에 터널굴착을 수행할 경우는 터널자체의 안전성 외에도 주변 기설 구조물들의 안전이 매우 중요하므로 터널 설계 시공시 이를 고려해야 하나, 서울지하철 5-0 공구 터널 공사중에 발생한 막장붕괴 사고와 대구 가스 폭발사고등과 같이 최근 인접구조물들의 피해사례는 계속 늘고 있는 실정이다. 이와같은 터널 굴착공사 중 사전 조사 부족에 의한 대형사고 외

에도 굴착 주변지반의 토압분포나 인접건물의 기초상태 및 지하수 영향 등을 정확히 파악하지 못하고 굴착시 지반변위가 과다하게 발생되어, 인접 건물의 침하 및 가스관, 상하수도관 등의 손상으로 많은 민원을 야기시키고 있다.

이에 부응하여 선진외국의 경우, 지반굴착시 인접구조물(지중매설관, 지상건물, 전력구, 통신구 등)에 대한 안전도 평가 기술 개발에 많은 연구비 및 연구인력을 투입하여 안전진단과 관련된 제기술들을 개발하고 있다.

특히, 1979년 Boscardin 등은 Washington, D.C내의 지하굴착 현장에서 구조물의 변형계측을 실시, 지상구조물의 안전도를 평가할 수 있는 요소들, 즉 angular distortion과 deflection ratio에 대한 적정성 검토를 수행한 바 있으며 1984년 영국의 Attewell 등은 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 제시한바 있다. 그러나 국내의 경우, 인접구조물에 대한

안전성 평가는 극히 분절적으로 수행되고 있으며, 객관성이 부족하여 신뢰도가 매우 낮은 것이 현실이다. 또한 안전성 평가를 위한 자료들이 체계적으로 제시되지 않아 경험이 부족한 기술자들이 많은 어려움을 겪고 있다.

따라서, 보다 합리적인 구조물의 안전성 평가를 수행하기 위해서는 현장여건과 연계된 안전성 평가 시스템의 개발이 필수적이다. 이에 대하여 본 연구에서는 최근 연구가 활성화되고 있는 인공신경망(neural network)을 활용한 인접 지상구조물 안전성 평가 전문가 시스템을 개발하고자 한다. 이를 위하여, 개축자료의 데이터베이스화과 이를 터널현장에 적용하는 방안을 연구하였으며, 이를 기반으로 인접 지상구조물의 안정성평가 기법 및 시스템구축 방안을 연구하였다.

## 2. 시스템 개발을 위한 이론적 연구

터널굴착에 기인한 지표침하를 예측하고, 지표침하에 의한 인접구조물 안전성을 평가하기 위해서 본 연구에 도입된 기초이론들을 연구하였다. 먼저 침하이론으로서 여러 침하분석 이론중 추계학적 해석기법을 채택하였으며, 이를 기반으로 구축된 지표침하 데이터 베이스를 효율적으로 터널설계에 적용하기 위한 방안으로 여러분야에서 활발히 응용되고 있는 인공신경망 이론을 도입하였다. 또한 기존 지상구조물의 여러 안전성평가 매개변수(angular distortion등)에 대한 허용한계치들을 수집, 정리하였으며, Dulacska의 균열평가 모델을 제시하였다.

### 2.1 추계학적 지표침하 해석

추계학적 이론의 개념은 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 것이다. 이 방법은 지반내의 응력 조건보다는 변위 조건을 위주로 해석하는 방법이다. 그림 1은 침하해석에 이용되는 추계학적 이론모형을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 교란부 중심으로부터 먼곳에 위치한 매체일 수록 하부 공극을 통과할 가능성이 작게 나타나기 때문에 하부에 위치한 구나 원반체를 제거하면 침하형상은 가우스 정규 분포함수의 형태로 나타나게 된다. 확률이론으로부터 좌표점( $X_0, Z_0$ )을 갖는 교란부의 영향으로 좌표점( $X, Z$ )에 있는 매체가 움직일 확률은 식(1)과 같다.

식 (1)

$$P(X_0, Z_0; X, Z) = \frac{1}{2B'(Z_0 - Z)(2\pi)} \exp \left[ -\frac{(X_0 - X)^2}{4B'(Z_0 - Z)} \right]$$

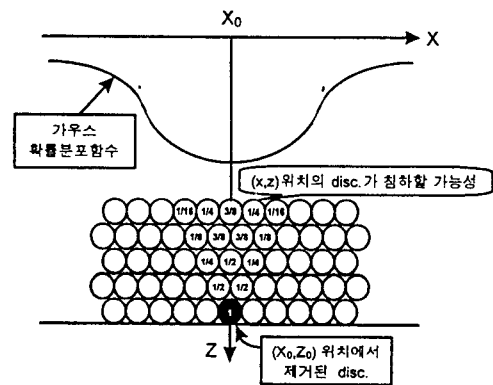


그림 1. 추계학적 이론모형

식(1)은 비압축성 매질이 갖는 가정사항들과 질량보존의 법칙에 근거를 두고 있으며, Sweet와 Bogdanoff가 제안한 이차분포함수(binomial

distribution function)와 Schmidt 제시한 누적 정규분포함수의 차를 한 개의 정규분포함수로 표현한 식을 이용해 다음과 같은 지반침하 산정식을 최종적으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta s(0, 0) &= \delta s_{\max} \\ \delta s(X, 0) &= \delta s_{\max} \exp\left(-\frac{X^2}{2i^2}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\delta s_{\max}$ 은 최대침하치,  $i$ 는 가우스 정규분포곡선의 중심선으로부터 변곡점까지의 거리를 나타낸다. 식(2) 최근까지 많은 학자들의 연구결과, 실제 터널굴착시 지표면의 침하형태를 가장 유사하게 표현해 주는 식으로 알려져 있다. 위 식의  $i$  값을 결정하기 위한 연구는 최근까지 모형실험 및 현장계측 등을 통하여 수행되어 왔으나 대부분 지반조건에 대한 영향만을 고려하여 값을 제안하고 있으며 또한 값의 제안범위가 상당히 넓어 이용에 어려움이 많다. 따라서 보다 정확한 상수값들의 결정을 위해서는 지반조건외에 지반침하의 크기에 영향을 미치는 주요 인자로 알려진 시공법(터널형태, 굴착공법, 보강공법 등)에 대해서도 함께 고려하여야 할 것으로 판단된다.

## 2.2 인공신경망과 전문가 시스템

### 2.2.1 전문가 시스템

전문가 시스템은 인공지능(artificial intelligence)의 응용분야 중의 하나이며 “전문가가 가지고 있는 지식을 인위적인 컴퓨터에게 부여함으로써 그 방면에 비전문가라 할지라도 그러한 전문가의 지식을 이용, 원하는 결과를 얻는 일종의 자문형(consulting) 컴퓨터 시스템이다”라고 정의할 수 있다. 또한 지식의 무한복제 및 전달이 가능하므로 시간과 공간의 제약이 없으며, 지

식의 활용에 따른 비용이 절감되고 전문지식을 체계화·구조화하였기 때문에 해당분야의 업무 파악 및 전수가 용이하여 동일 문제에 대한 일관성 있는 결론에 도달할 수 있다.

또한 전문가 시스템은 토목분야와 같은 특정분야의 복잡한 문제를 해결할 수 있는 전문 기술자의 사고능력 및 이에 대한 전문가의 지식을 모방, 구현함으로써, 비 전문기술자가 소수의 전문기술자만이 수행할 수 있는 업무를 수행할 수 있도록 도와 준다. 여기서 전문 기술자의 능력과 비교하여 전문가 시스템의 특징으로는 첫째, 지식의 전달이 무제한적이며 둘째, 지식의 유지가 영구적이고 셋째, 지식의 일관성을 유지할 수 있으며 넷째, 계속적인 비용이 지출되는 전문가의 지식습득에 대하여 전문가시스템은 초기개발 비용이 과다하게 소요된다는 것이다. 또한 전문가 시스템의 일반적인 구성은 지식기반(knowledge base)에 전문가 지식(사실, 규칙)을 저장하고, 이 지식기반을 바탕으로 추론된 결과를 관계형 데이터베이스에서 저장·공유하고 사용자가 원하는 형식을 사용하여 원하는 결과물을 얻도록 구성되어 있다.

### 2.2.2 다층 역전파 인공 신경망

인공신경망이란 인간의 신경조직을 모델로 하여 간단한 기능의 처리기 사이를 서로 대규모로 연결시킨 네트워크 형태의 정보처리구조를 의미하며 자료를 통한 학습으로 작업을 수행한다.

또한 인공신경망은 분산저장방식을 사용하여 오류가 일부 포함된 정보에 대해서도 제대로 작동할 수 있는 결함허용 시스템(fault-tolerant system)의 특성을 제공해 주며, 분류작업을 수행하는데 필요한 특성들을 찾아낼 수 있다. 이러한 인공신경망의 구조는 그림 2와 같이 인간뇌의 기본단위인 뉴런(neuron)과 이의 연결부인 시냅스(synapse)를 모사하여 구성된다. 인공신경망

에서 가장 중요한 고려사항은 뉴런의 역학을 수행하는 처리기와 활성화함수(activation function)이며 시냅스는 강도를 조정할 수 있는 연결선으로 구성된다. 여기서 처리기들은 다른 처리기 혹은 입력장치로부터 N개의 입력신호를 받아들여 모두 합하고 임계값(threshold value)을 더하거나 뺀 후에 이 값을 활성화함수를 통해 출력하는 기능을 한다.

이러한 인공신경망은 상당히 긴 역사를 가지고 있지만 최근들어 이에 대한 연구가 폭발적으로 증가했고 이로 인해 다양한 인공신경망 모델들이 등장하였다. 또한 이외의 응용도 거의 모든 분야에 걸쳐 적용되고 실제 기업의 문제에도 적용되기도 하고 있다. 최근에는 인공신경망의 임의의 함수에 대한 근사(approximation) 능력과 일반화(generalization) 능력에 기반을 두고 예측(Forecasting)과 추정(estimation)등의 분야에서 많은 응용연구들이 진행되고 있으며 성과가 발표되고 있다.

따라서 본 연구에서는 여러 인공신경망이론 중, 다층 역전파 인공신경망(multi layer backpropagation 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.

### 2.3 인접 지상구조물의 안전성 평가

구조물은 외력에 의한 변위와 구조물 노후화에 기인하여 다음의 세가지 손상형태로 분류할 수 있다. 첫째, 외관상의 손상(architectural damage)으로 보통 구조물의 균열(회벽(plaster Wall)에서 0.5mm, 석재나 콘크리트 벽에서 1mm 폭 정도)등으로 발생되며 구조물 손상의 발단으로 간주된다. 둘째, 기능적 손상(functional damage)으로 문이나 창문이 닫히지 않거나 과도한 균열이 발생하고 회반죽이 떨어지고 벽이나 마루가 기울어지는 등의 손상으로 정의한다. 셋째, 구조적 손상(structural damage)으로 빔, 기둥과 하중지지벽으로 표현되는 주요 보강요소에 발생하는 균열이나 비틀림으로 정의한다. 따라서 본 연구에서는 터널굴착에 기인한 지표침하의 영향으로 발생하는 구조물의 안전성 여부를 평가하기 위하여 구조물의 기능과 구조적인 안전성을 주안점으로 안전성 평가를 수행하고자 한다.

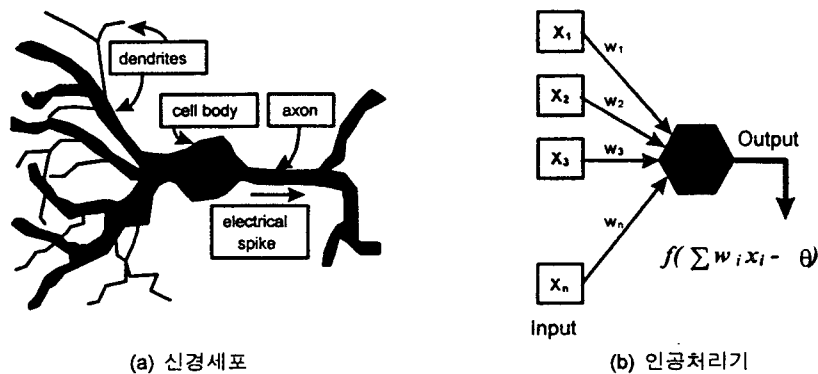


그림 2. 신경세포와 인공처리기

### 2.3.1 허용한계치를 이용한 안전성 평가

지상구조물의 distortion에는 다음과 같은 angular distortion과 deflection ratio등이 있다. 먼저 angular distortion은 구조물의 전단 비틀림 수준을 나타내며, 침하에 의해 발생하는 구조물 상의 두개의 관심지점으로 연결된 직선의 회전 각으로 표현된다. 일반적으로 계산된 angular distortion  $\psi_{build}$ 은 두 지점간 평균값이며 이의 정의는 식(3)과 같다(그림 3).

$$\text{Angular distortion, } \psi_{build} = \frac{(\omega_{fA} - \omega_{fB})}{l_{AB}} \quad (3)$$

여기서  $\omega_{fA,B}$ 는 A, B 지점의 침하량,  $l_{AB}$ 는 A지점과 B지점의 수평거리이다.

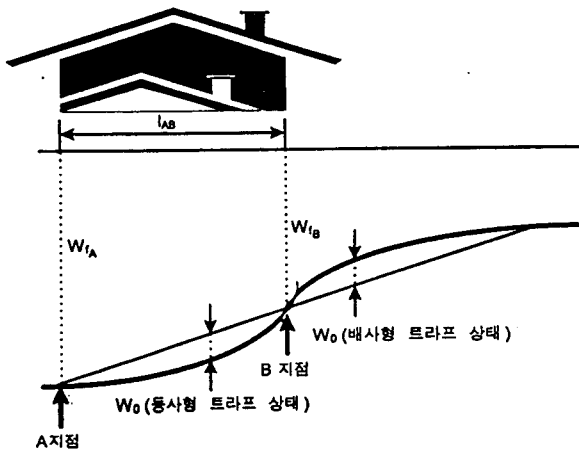


그림 3. Angular distortion과 deflection ratio

다음으로 deflection ratio는 관심있는 두 지점간을 연결한 직선과 그 구간에서 발생한 침하곡선간의 최대간격인 deflection  $\omega_0$ 을 구조물내 관심있는 두 지점간의 거리  $l_{AB}$ 로 나누어준 값이다. deflection ratio는 휨에 기인한 distortion과 관련

되어 있다. 또한 deflection은 그림 3에서와 같이 배사형의 deflection과 동사형의 deflection으로 분류되며 이러한 deflection의 영향으로 빔의 형태를 띤 지상구조물 기초부에 그림 4에서와 같이 힘과 전단 deflection을 유발하여 다양한 형태의 균열을 발생시킬 수 있다. 이러한 deflection ratio의 표현은 식 (4)와 같다.

$$\text{deflection ratio} = \omega_0 / l_{AB} \quad (4)$$

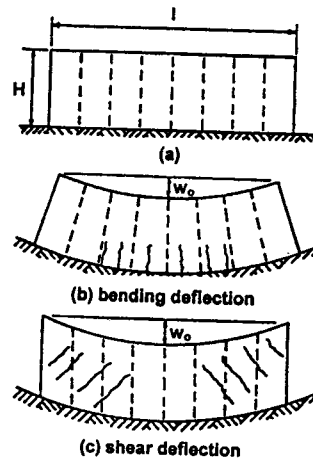


그림 4. Deflection의 양상

지상구조물들은 빔(beam)으로 분류되지 않는 비교적 유연한 구조물이기 때문에 이러한 구조물들은 터널굴착에 의해 초래되는 지반거동과 이반되게 거동하지 않는다. 따라서 구조물의 angular distortion은 지반침하 트라프의 구배와 같다고 가정하였다.

지반변위가 구조물에 미친 영향에 대해 연구된 과거의 많은 문헌들을 구조물의 자중에 기인하는 지반침하에 대한 구조물의 손상한계를 구조물의 angular distortion과 deflection ratio를 기반으로 제시하였다. 여기서 수평변형율과 시간에 따른 distortion에 기인한 구조물의 손상정도는 중요한 손상인자로 분류하지 않았다. 따라서 본

| 구 조 물                                       | 허용한계치                             |                           | 비 고                              | 참고문헌                                |
|---|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
|   | 시설토 또는 견고한 점토질<br>1/50<br>(0.007) | 소성점토<br>1/1000<br>(0.001) |                                  |                                     |
| 피복된 벽돌 열들의 끝단에 위치한 기둥기초                     |                                   |                           |                                  | Polishina and Tokan, Wahls          |
| 침하에 예민한 기계 기초의 작업곤란 한계                      | 1/750                             |                           |                                  | Bjerrum                             |
| 경사진 부재를 가진 뼈대의 위험 관계                        | 1/600                             |                           |                                  |                                     |
| 균열을 허용할 수 없는 빌딩에 대한 안전 한계                   | 1/500                             |                           |                                  |                                     |
| 토목용과 산업용건물의 기둥기초, 가구조물, 보강콘크리트 구조물          | 1/500                             |                           |                                  | Polshin and Tokan, Wahls            |
| 칸막이 벽에 첫 균열이 예상되는 한계                        | 1/300                             |                           |                                  |                                     |
| 뼈대 구조물내의 하중지지벽 또는 칸막이 벽, 원형강재 원유 또는 액체저장 탱크 | 1/300                             |                           | 균열이 발생, 일차 균열 발생                 | Skepton & McDonald<br>Bjerrum, Hunt |
| 고가 크레인의 작업 곤란이 예상되는 한계                      | 1/300                             |                           |                                  |                                     |
| 간성고층 빌딩의 전도가 눈에 띄일 수 있는 한계                  | 1/250                             |                           |                                  |                                     |
| 부등침하동안 부수변형이 일어나지 않는 구조물                    | 1/200                             |                           |                                  | Polshin and Tokan, Wahls            |
| 칸막이 벽이나 벽돌위의 상당한 균열 가소성 벽돌의 안전 한계           | 1/150                             |                           |                                  |                                     |
| 뼈대 구조물내의 하중지지벽 또는 칸막이 벽, 원형강재 원유 또는 액체저장 탱크 | 1/150                             |                           | 구조적 손상 발생 추정, 칸막이나 벽돌에 심각한 균열 발생 | Skepton & McDonald,<br>Bjerrum      |
| 일반적인 건물의 구조적 손상이 예상되는 한계                    | 1/150                             |                           |                                  |                                     |
| 연성 벽돌에 대한 안전 한계                             | 1/150                             |                           |                                  |                                     |

표 1. Angular distortion에 대한 구조물의 허용 한계치

| 구조물                                       | 허용한계치                                   |        | 비고                    | 참고문헌                 |
|---|---|--------|-----------------------|----------------------|
|   | 사질토와 견고한 점토                             | 소성점토   |                       |                      |
| 하중지지 벽돌벽                                  | 1/300                                   | 1/250  | L/H ≤ 3인 다층건물의 한계치    | Poshin & Tokav       |
| 하중지지 벽돌벽                                  | 1/2000                                  | 1/1500 | L/H ≥ 5인 다층건물의 한계치    |                      |
| 기중레일, 크레인레일                               | 0.003                                   | 0.003  | L:건물의 폭<br>H:건물의 높이   | 소련의 건축법규             |
| 단층공장, 단층 제철소 건물                           | 0.001                                   | 0.001  |                       | Mikhejev             |
| 연돌·수조탑, 링기초 굴뚝, 탑, 사이로 등                  | 0.004                                   | 0.004  |                       | Polshin and Tokav    |
| 강재 빔                                      | 1/200                                   |        | 빔 (beam)              | Alexander and Lawson |
| 보강 콘크리트 빔                                 | 1/250 or 30mm                           |        |                       |                      |
| 마루의 버팀력이 제거된 후에 설치된 벽돌이나 볼록 칸막이의 균열발생 가능성 | 1/500 or 15mm                           |        |                       |                      |
| 후에 설치된 경량의 칸막이벽 균열발생 한계치                  | 1/350 or 1/360 or 20mm                  |        |                       |                      |
| 단지 짧은시간에 부가된 활하중의 가시적인 휨 발생 가능성           | 1/360                                   |        |                       |                      |
| 프리캐뱀에 의한 상방향의 휨발생 가능성                     | 1/300                                   |        |                       |                      |
| 마루 또는 지붕                                  | 1/250 to 1/500                          |        |                       |                      |
| 목재마루                                      | 1/330                                   |        |                       |                      |
| 포장 또는 아스팔트 피복                             | 1/250                                   |        |                       |                      |
| 우연한 짧은 연장의 지붕 박판                          | 1/125                                   |        |                       |                      |
| 민감한 기계의 움직임 예상                            | 1 in 750 slope(for example)             |        | 첸틸레버 (Cantilever)     |                      |
| 짧은 시간에 부가된 하중에서 가시적인 휨                    | 1/800                                   |        |                       |                      |
| 마루의 버팀력이 제거된 후 모서리의 상태변위에 기인한 피복외장재의 균열   | 1/250 to Span/500 depending on cladding |        | 반침대 거더 (Gratrygirder) |                      |
| 짧은 시간에 부가된 하중에서 상부기중기의 비효율적인 교란           | 1/700                                   |        |                       |                      |

표 2. Deflection ratio의 구조물허용 한계치

| 구조물                           | 허용한계치 |      | 비고               | 참고문헌                         |
|-------------------------------|-------|------|------------------|------------------------------|
|                               | 사질토   | 소성점토 |                  |                              |
| 빌딩구조물                         |       |      | 최대부등침하량          | Skempton and MacDonald(1956) |
|                               | 30mm  | 45mm | 최대 침하량           |                              |
| 빌딩구조물                         | 50mm  | 75mm | L/H : 2.5(최대침하량) | Sower(1962)                  |
| 벽돌 벽체의 건물                     | 80mm  |      | L/H : 1.5        |                              |
| 철근 콘크리트나 철근                   | 100mm |      |                  |                              |
| 블럭으로 보강되고 블럭 벽체를 가진 건물 뼈대     | 150mm |      |                  |                              |
| 뼈대 건물                         | 100mm |      |                  |                              |
| 굴뚝, 사이로, 탑등의 견고하게 보강된 콘크리트 기초 | 300mm |      |                  |                              |

표 3. 부등침하와 최대침하량의 구조물 허용한계치



2.3.2 Dulacska 균열양상 평가 모델

Dulacska 모델은 지표침하에 의해 발생하는 구조물 기초부의 변형을 토대로 예상되는 구조물의 균열양상과 균열간격을 평가하기 위한 모델이다. 여기서 구조물 기초부에 발생하는 지표침하양상은 등사형 트라프 조건(trough condition)과 배사형 트라프 조건(saddle condition) 모델로 구분하여 균열 양상을 평가한다. 또한 벽체의 균열은 그들의 특성에 따라 수평인장에 의해 발생하는  $\sigma$ -crack과 전단변형(shear deformation)에 의해 발생하는  $\tau$ -crack으로 구분할 수 있다. 그림 5에서와 같이  $\sigma$ -crack은 구조물 중앙과 창틀모서리에서 수직방향으로 발생하며  $\tau$ -crack은 구조물 모서리 하부와 창틀 모서리에서 경사진 균열(inclined crack)로 나타난다. 따라서 구조물의 특성을 고려한 균열양상에 대한 각각의 균열간격의 결정은 다음과 같다.

가. 등사형 트라프상의 공간이 없는 벽체(solid wall)

본 트라프상에서 평가된  $\sigma$ -crack는 링 보강

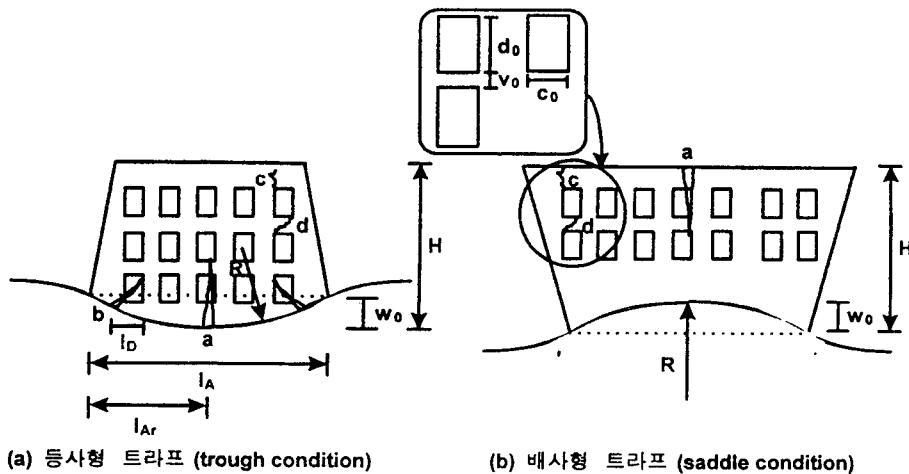
(ring reinforcement) 설치에 의해 억제되지 않으며 구조물의 하부에서 부터 진행된다. 또한 인장변형율은 지표면에 의해 억제되므로 구조물의 중앙에서 발생한 최대 균열폭은 트라프 곡선의 길이와 양끝점을 잇는 직선길이의 차보다 커질 수 없다.

따라서 트라프 곡선상의  $\sigma$ -crack의 균열간격  $\Delta\sigma^{ver}$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma^{ver} \leq \frac{8}{3} \left( \frac{\omega_0}{l_A} \omega_0 \right) - \Delta_{el, \lim} \equiv \frac{1}{24} \left( \frac{l_{Ar}}{R} \right)^2 l_{Ar} - \Delta_{el, \lim} \quad (5)$$

여기서  $\omega_0$ 는 deflection,  $l_A$ 는 구조물의 폭,  $l_{Ar}$ 은 구조물의 이격부까지의 수평거리,  $R$ 은 트라프의 곡률반경,  $\Delta_{el, \lim}$ 은 탄성한계변형을 의미한다. 또한 분리된 채움벽체와 석조벽체의  $\Delta_{el, \lim}$ 는 2mm, 벽돌벽체와 판콘크리트 벽체는 1mm로 설정한다.

$\tau$ -crack은 벽체에 발생하는 angular distortion



(a) 등사형 트라프 (trough condition)

(b) 배사형 트라프 (saddle condition)

|                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| a : 구조물 몸체의 수직 인장균열,  | b : 구조물 몸체의 경사균열 |
| c : 공간(창문등) 주변의 수직균열, | d : 공간주변의 경사균열   |

그림 5. 구조물의 균열양상

$\phi_{build}$ 의 결과로써 발생한다.  $\tau$ -crack의 균열간격  $\Delta\sigma^{int}$ 은 다음과 같다.

$$\Delta\sigma^{int} = \frac{\psi_{build} \cdot l_D}{\sqrt{2}} - \Delta\sigma_{el,lim} \quad (6)$$

여기서  $l_D$ 는 수평에서 약 45° 정도 기울어진 균열의 수평 투영거리이다. 보통단층 구조물에서는  $l_D$ 를 구조물의 높이  $H$ 로 사용하여, 다층구조물에서는  $l_D$ 를 구조물의 수직 단면적  $A$ 의 1/2로 사용한다. 또한 경사균열은 구조물의 모서리부터 진전을 시작할 수 없는 것을 고려하여 계산상에서  $ID \approx 0.4A$  값을 사용할 수 있다.

나. 등사형 트라프상의 공간이 존재하는 벽체 (punctured wall)

공간(창틀등)이 존재하는 벽체에는 공간주위에  $\tau$ -crack이 발생한다. 구조물의 angular distortion  $\psi_{build}$ 에 의해 발생하는 수직 균열간격  $\Delta\sigma^{ver}$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\sigma^{ver} \approx \psi_{build} V_0 - \Delta\sigma_{el,lim} \quad (7)$$

또한 공간주위의 경사균열의 크기  $\Delta\sigma^{incl}$ 은 사각공간의 대각선 팽창으로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta\sigma^{incl} \approx \psi_{build} \frac{C_0 \cdot V_0}{\sqrt{C_0^2 + V_0^2}} - \Delta\sigma_{el,lim} \quad (8)$$

여기서  $V_0$ 는 공간간의 수직간격,  $C_0$ 는 공간의 폭이다.

다. 배사형 트리포상의 구조물 벽체

구조물의 상부에서부터 진전되는 수직  $\sigma$ -crack (개설균열, open-up)의 균열가격  $\Delta\sigma_{build}$ 과 발생 위치  $l_{Ar}$ 은 지표의 굴률반경  $R$ 과 구조물의 높이  $H$ 와 연관되어있다. 따라서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta\sigma_{build}}{H} = \frac{1}{R} \quad (9)$$

그러나 예기된  $\Delta\sigma_{build}$ 는 벽체의 링 보강에 따라 달라지며 공간이 존재하는 벽체의 경우는 전단 변형(shearing deformation)과 평균 변형율을  $\epsilon_{ave}$ 에 크게 영향을 받는다. 따라서 링보강에 의한  $\Delta\sigma_{build}$ 는 표 4의 상수  $\gamma_a$ 을 이용하여 얻어진다.

|   |                   |
|---|-------------------|
| 링보강이 없는 구조물                                 | $\gamma_a = 1.0$  |
| 결합바(tie bar)와 보강콘크리트(r/c crowing)으로 건설된 구조물 | $\gamma_a = 0.25$ |
| 골조 구조물(보강콘크리트 또는 강재)                        | $\gamma_a = 0.0$  |

표 4. 링보강의 영향

공간이 존재하는 벽체의 전단면형은 상수  $\rho$ 에 의해 보정할 수 있으며 선형보간(linear interpolation)을 통해 계산된다.

$$\rho = 1 - \frac{A_{hole}}{A_{full}} \quad (10)$$

여기서  $A_{full}$ 은 구조물 벽체의 전체 면적이  $A_{hole}$ 은 벽체공간 면적의 총합이다. 따라서 위의 공식을 사용하여, 구조물 개설균열(opening crack)은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta\sigma_{build} = \gamma_a \rho \frac{l_{Ar} \cdot H}{\sqrt{R}} - \Delta\sigma_{el,lim} \quad (11)$$

여기서 분리될 수 있는 벽체길이는 구조물 높이  $H$  이상이 될 수 없으며 배형 조건(saddle condition)에 존재하는 구조물의 폭의 1/2이상도 될 수 없는 것으로 보고되므로 항상  $l_{Ar}$  값은 균열이 발생한 구조물의 보다 짧은 부분을 참조한다.

$\gamma$ -crack은 지표 근처에서 윗방향으로 진전되는 경사균열의 벽체의 뒤틀림(distortion)에 의해

발생되는 동사형트라프 조건에서 처럼 단순한 형태로 계산될 수 있다. 또한 배사형 트라프조건의 경우에 angular distortion  $\varphi_{build, sadd}$  는 구조물의 팽창(elongation)에 의해 감소되며 다음과 같이 보정되어 표현된다.

$$\varphi_{build, sadd} = \eta \varphi_{build} - \frac{\Delta\sigma_{build}}{2H} \quad (12)$$

여기서  $\eta \approx 0.75$ 로 설정하여 공간 주위의 균열 간격( $\Delta\gamma^{verr}$ ,  $\Delta\gamma^{incl}$ )을 등사형 트라프 조건에서 사용한 식(7)과 식(8)로 계산할 수 있다.

지표부근의 경사 균열간격은  $l_p$ 로 부터 계산될 수 있으며  $l_p$ 는 균열  $\Delta\sigma_{build}$  에 의해 이격된 구조물의 길이  $l_{Ar}$ 의 1/2로 가정한다. 또한 경사 균열은 다음과 같이 평가된다.

$$\Delta\gamma^{incl} = \gamma_a \sqrt{2} \cdot 0.25 \omega o - \Delta el, lim = 0.175 \omega o \gamma a - \Delta el, lim \quad (13)$$

라. 분리된 체움벽체(filling and partition wall)

| 손상정도 | 전형적인 손상   | 균열폭(mm)              |
|------|---|----------------------|
| 무시가능 | 약 0.1mm 이하의 균열폭을 가진 실균열로 무시할 수 있는 균열로 분류  | 0.1 이하               |
| 매우미약 | 아마도 건물내부에 고립된 미소한 균열임, 외부 벽돌벽체에는 거의 관찰되지 않는 균열.<br>· 복구 및 대처 방안 : 정상적인 회반죽으로 쉽게 해결가능  | 1.0 이하               |
| 미약   | 여러 개의 미소한 균열들이 건물내에서 관찰되며 외부 관찰되지 않음.<br>· 복구 및 대처방안 : 균을 충전물로 채워줌, 회반죽이 요구, 재발되는 균열들은 적절한 라이닝에 의해 감출 수 있음.                                       | 5.0 이하               |
| 보통   | 문과 창문이 잘 닫히지 않음. 서비스 파이프들에 균열이 발생할 수 있음. 비바람에 견디는 능력이 손상됨.<br>· 복구 및 대처방안 : 균열들을 벗기고 석공 등에 의해 덧씌울 수 있다. 외부 벽돌의 메지를 다시 칠하고 약간의 벽돌을 다시 시공           | 5~15, 3개 이하의 균열      |
| 심각   | 창문과 문틀이 뒤틀림, 마루가 현저하게 기울, 벽체가 기울거나 현저하고 만곡됨, 빔의 지지력에 약간의 손상, 서비스 파이프들이 파손됨.<br>· 복구 및 대처방안 : 부수는 것을 포함한 폭넓은 복구작업 필요, 벽체, 특히 상부층의 문이나 창문들의 단면 재배치. | 15~25이지만 균열의 숫자와도 관련 |
| 매우심각 | 빔이 지지력을 잃고 벽체가 매우 심각하게 기울며 버팀목이 요구됨. 창문이 뒤틀려 부서지며 안정성이 위험.<br>· 복구 및 대처방안 : 부분적 또는 완전한 재건축을 포함한 근본적인 복구책이 필요                                      | 25이상이지만 균열의 숫자와도 관련  |

표 5. 회벽,벽돌 또는 석조구조물을 대상으로 한 가시적인 벽체손상 분류

하중을 지지하지 못하는 분리된 채움벽 구조물에서는  $\phi_{build}$ 에 의하여 벽체를 가로지르는 내각선으로 경사균열을 초래할 수 있다. 여기서 변형의 윗부분은 탄성변형이기 때문에 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta_{\tau}^{inl} = \phi_{build} \frac{ml}{\sqrt{m^2+1^2}} - \Delta_{et, lim} \quad (14)$$

여기서  $m$ 은 벽체의 높이,  $1$ 은 폭이다. 따라서 본 연구에서는 이상의 과정으로 예기된 균열양상을 이용하여 지표침하에 의한 구조물의 균열평가를 수행한다. 수행시 참고로 사용할 수 있도록 회벽이나 벽돌 및 석조구조물에 발생하는 균열에 대하여 구조물의 손상정도, 복구 및 대처방안 등을 문헌연구를 통해 제시하였다.

표 5에서 제시된 예상 균열폭은 손상정도만을 평가하기 위한 것이기 때문에 직접 손상의 척도로 사용하지 않아야 하며 손상정도를 평가하는데 있어서 구조물이나 구조물의 위치 및 기능을 충분히 고려하여야 한다.

### 3. 인접구조물 안전성 평가 전문가 시스템의 개발

본 연구서는 지표침하에 영향을 미치는 영향인자들에 대하여 고찰하고 구체적인 영향인자들의 선정하였다. 이를 기반으로 침하분석을 수행한 특정터널에 대하여 지반조건 및 보강형태, 굴착형태 등과 같은 설계자료와 계측치 등과 같은 분석자료를 분류 및 정리하여 일반화 작업을 수행하였다. 여기서 지반조건 및 굴착형태 등과 같은 각각의 포괄적인 요소들간의 상관관계들은 이론적으로 규명하기는 어렵기 때문에 상관관계가 불명확한 요소들의 관계들을 전문가의 직관 및 경험을 통해 규명하고자 하였고 이를 가시적

으로 구현하기 위하여 인공신경망을 이용하였다.

#### 3-1 지표침하 영향요소의 체계화

본 연구에서는 방만하게 산재되어 있는 침하계측 자료들을 여러 지표침하 방법 중에서 가우스 정규분포 곡선을 사용한 추계자료와 변위해석 방법을 이용하여 침하계측 자료들을 정리하였다. 따라서 최종 지표침하 트라프는 변곡위치  $i$ 와 침대침하량  $\delta_{amax}$ 으로 대표된다. 여기서 터널굴착에 의한 장기간의 지표침하 과정 중, 최종침하가 지상구조물의 안전성에 미치는 영향이 가장 크며, 터널이 지상구조물 하부를 완전히 관통한 뒤를 설정하고 터널축의 횡방향 침하거동만을 분석하여 지상구조물의 기초부 변형량을 결정하였다. 또한 지표침하의 수평평면 및 변형율도 지상구조물의 안전성에 영향을 미친다고 사료되나 본 연구에서는 횡방향 변위의 침하계측자료의 부족으로 지표침하 거동분석에서 제외시켜 지상구조물의 수직변위에 의한 안전성의 영향에 비해 수평변위해 의한 안전성의 영향이 비교적 미소하다고 가정하였다.

이와 같이 정리된 분석자료들의 적절한 데이터베이스화를 위해서 침하를 발생시킨 터널에 대한 정보 및 지반조건등의 필요하며, 이를 위하여 정규화된 인자들을 결정하고 정리하였다. 이때 결정된 인자값은 지표침하를 대표할 수 있는 적절한 인자들이어야 한다.

지하터널굴착에서 중요한 관점은 응력평형 상태를 이해하는 것이다. 터널이 굴착되는 동안 응력평형 상태가 깨지면서 응력재분배가 발생하게 되며 지반평형을 유발하여 점차적으로 지표상으로 변형거동이 진전되게 된다. 따라서 지표침하 트라프를 형성하며 응력평형 상태에 도달하게 된다. 이러한 지표분위의 정도와 트라프의 형태 및 크기는 터널주위의 지반조건과 암반의 층상구조, 지반강도 및 탄성계수, 토피의 두께·

지하수위, 터널의 깊이 및 크기, 적용되는 굴착 공법, 지보공법 등에 영향을 받는다. 또한 여러 계층자료 분석을 통하여 비교적 침하에 큰 영향을 미치는 것으로 나타난 인자는 지반강도(굴착면 및 토피의 지질상태), 용수상태, 필라목, 막장거리, 굴착속도, 막장정지, 그라우팅 등이며 그 밖에도 벤취(bench)장, 설계 패턴, 굴착방식 및 시공상태에 따른 영향이 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이상과 같은 주요 지표침하 영향요인들을 기반으로 인공신경망의 학습자료로 사용될 데이터베이스의 분류인자들을 결정하고 지표침하 계층자료의 데이터베이스화 작업을 수행하였다. 여기서 터널전문가들의 자문을 참조하였다. 본 연구에서 선정한 지표침하 주영향인자는 표 6과 같다. 여기서 암목분류는 다음과 같으며 각 항목마다 지표침하에 영향을 미칠 것으로 판단되는 항목을 세분하여 선정하였다. 첫째, 터널의 기하학적 조건 : 본 항목의 분류에서는 터널의 규모에 초점을 맞추었으며 극대점이 하나인 가우스 정규분포 곡선으로 표현되는 쌍굴터널도 고려할 수 있도록 터널 형태 항목을 추가하였다. 둘째, 지반조건 : 위에서 언급한 바와 같이 지표침하에는 기반암의 층상구조에 영향을 받으므로 구조적 특성이 다른 기반암 종류 항목을 고려하였으며, 지반의 강도특성을 표현하기 위해 암반과 토사로 분류하여 각각을 Attewell & Taylor 및 건설표준 품셈에서 제안하고 있는 지반분류기준으로 세부항목을 선정하여 해당항목 지반의 두께로 표현하였고 지하수의 영향도 고려하였다. 셋째, 굴착 및 보강조건 : 본 항목의 분류에서는 보강조건에 초점을 맞추었으며 특히 보조공법의 고려시 지반조건에 따라 수행될 수 있는 보조공법의 종류들을 강도별로 설정하였다. 또한 지표침하에 영향을 미칠 것으로 예상되는 지보재 설치시기 및 시공상태를 고려하였으나 이들의 현장자료 분류는 현장

여건상 상당히 어려울 것이라고 판단된다.

### 3.2 침하계층 자료 데이터베이스 구축

데이터베이스는 그 특성에 따라 다양한 자료를 이용하여 구축할 수 있다. 첫째, 실제자료의 획득이나 정리가 불가능하거나 현존해 있는 자료가 전무한 상태일 때 수치해석 기법 등을 이용해 매개변수 연구결과치를 데이터베이스화하는 방법이다. 둘째, 수치해석이나 이론식에 포함되어 있는 제한된 가정이나 조건들이 기반으로 해석되는 이론해가 지반이 가지고 있는 여러 가지 불확실성 등을 고려하여 문제가 있을 때 실내모형 실험을 통해 획득한 다양한 실험 결과치들을 데이터베이스화하는 방법이다. 셋째, 지반거동현상이 몇 개의 요인으로 발생하는 것이 아닌 여러 주요 요인들간의 상호영향으로 발생하게 되므로 규명하기 어려운 다양한 중요인자들의 상호영향을 고려하여 현상여건에 맞는 해석을 수행하고자 할 때 직접 현장시공조건에 관련된 자료와 계층자료를 토대로 데이터베이스를 구성하고 이를 설계시 이용하는 방안이다. 이러한 방법은 지반공학분야에서 최대 관건인 불확실성을 고려하는 하나의 방안이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 세번째 방안을 채택하여 국내에서 방만하고 비표침하 계층자료들을 정리, 분석된 자료를 이용하여 직접 데이터베이스화 작업을 수행하고 인공신경망의 학습자료로 활용하였다. 이러한 방안을 터널 설계시 기 수행된 터널시공 자료를 적절히 활용할 수 있는 합리적인 방안이라 사료된다. 따라서 설정된 지표침하의 주영향인자인 분류항목을 이용하여 인공신경망 학습시 사용된 데이터베이스를 구축하였다. 우선적으로 서울 지하철 3,4호선의 일부구간을 대상으로 지표침하계층자료의 지표침하 계층자료 및 터널시공정보들을 정리하였다.

|                           |                                  |                           |           |                           |
|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|-----------|---------------------------|
| 터널의 기하학적 조건               | (1)터널길이 (m)                      |                           |           |                           |
|                           | (2)굴착폭(m)                        |                           |           |                           |
|                           | (3)굴착높이(m)                       |                           |           |                           |
|                           | (4)터널 형상                         | 원 형                       |           |                           |
|                           |                                  | 난 형                       |           |                           |
|                           |                                  | 마제형                       |           |                           |
| 특수형                       |                                  |                           |           |                           |
| (5)터널 형태                  | (Single tunnel or Twin tunnel)   |                           |           |                           |
| (6)Pillar 폭(m)            |                                  |                           |           |                           |
| 지반조건                      | (7)기반암 종류                        | 화강암<br>편마암<br>풍화암         |           |                           |
|                           | (8)터널 상부의 피복암 종류(m)              | 연 암                       |           |                           |
|                           |                                  | 보통암                       |           |                           |
|                           |                                  | 경 암                       |           |                           |
|                           |                                  | 극경암                       |           |                           |
|                           | (9)터널 상부 토사지반의 종류(m)             | Cohesive soil             | Stiff     |                           |
| soft                      |                                  |                           |           |                           |
| Cohesionless soil         |                                  | Dense                     |           |                           |
|                           |                                  | Medium dense              |           |                           |
| (10)지하수위(m)               |                                  |                           |           |                           |
| (11)터널내 유입 지하수량(1/분 · km) |                                  |                           |           |                           |
| 굴착및 보강 조건                 | (12)지보제설치                        | 록볼트                       |           |                           |
|                           |                                  | 숏크리트                      |           |                           |
|                           |                                  | 강지보재                      |           |                           |
|                           | (13)굴착방법                         | TBM                       |           |                           |
|                           |                                  | Shield                    |           |                           |
|                           |                                  | Drill & Blasting          |           |                           |
|                           |                                  | Peak 굴착                   |           |                           |
|                           |                                  | 전단면 굴착                    |           |                           |
|                           | (14)굴착상태                         | 상,하반분할굴착                  | bench cut | short bench<br>long bench |
|                           |                                  |                           | ring cut  |                           |
|                           |                                  |                           | 가인버트 시공   |                           |
|                           |                                  | Single side wall drift 굴착 |           |                           |
|                           |                                  | Two side wall drift 굴착    |           |                           |
|                           | (15)보조공법의 적용                     | Forepoling                |           |                           |
|                           |                                  | 갱내 Grouting               |           |                           |
| 지상 Grouting               |                                  |                           |           |                           |
| Pipe-roof, 강관다단           |                                  |                           |           |                           |
| 수평 제트 Grouting            |                                  |                           |           |                           |
| (16)지보재 설치시기              | 조 기                              |                           |           |                           |
|                           | 적 절                              |                           |           |                           |
|                           | 지 연                              |                           |           |                           |
| (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)              |                           |           |                           |

표 6. 지표침하 주영향인자

### 3.3 전문가 시스템, NESASS

본 연구에서 개발한 인접구조물 안전진단 전문가 시스템 NESASS(Neural network Expert System for Adjacent Structure Safety analysis)는 방대한 현장 지표침하 계측자료를 정리, 관리할 수 있으며 정리된 데이터베이스를 이용한 인공신경망의 학습을 수행하고 대상 터널현장의 지표 침하를 추론하여 예측한다. 이를 기반으로 시공하려는터널에 인접해 있는 지상구조물의 정보가 입력되면 지상구조물의 안전성 평가 매개 변수들이 결정된다. 다음으로 기수립된 구조물의 허용한계치를 이용하여 지상구조물의 안전성 평가를 수행하고 결과치를 그래픽으로 제시하며, 구조물에 예상되는 각종 균열양상을 예측한다. 여기서 NESASS의 개발구도로 범용 프로그램

언어인 Delphi(PASCAL-language)를 사용하여 개발하였으며, 학습자료의 효율적인 사용 및 관리를 위하여 자료의 추가, 삭제, 변경작업을 자유롭게 수행할 수 있도록 데이터베이스 모듈을 구축하였다. 또한 데이터베이스 자료들 인공신경망이 인식할 수 있도록 자료변환(패턴화)을 자동으로 수행하며 객체지향 프로그래밍 기법을 사용함으로써 학습도중 수시로 학습상수들을 변경시키며 윈도우의 다이얼로그 상에서 쉽게 학습작업을 수행할 수 있다. 작업의 효율성을 위해 학습 종료후에도 저장된 가중치를 불러들임으로써 계속해서 추가학습을 시킬 수 있다. 그리고 지표침하 트라프등을 그래픽으로 화면상에 나타내며 각종 안전성 평가 내용들을 화면상에서 스크롤하며 볼 수 있다. 이러한 내용을 수

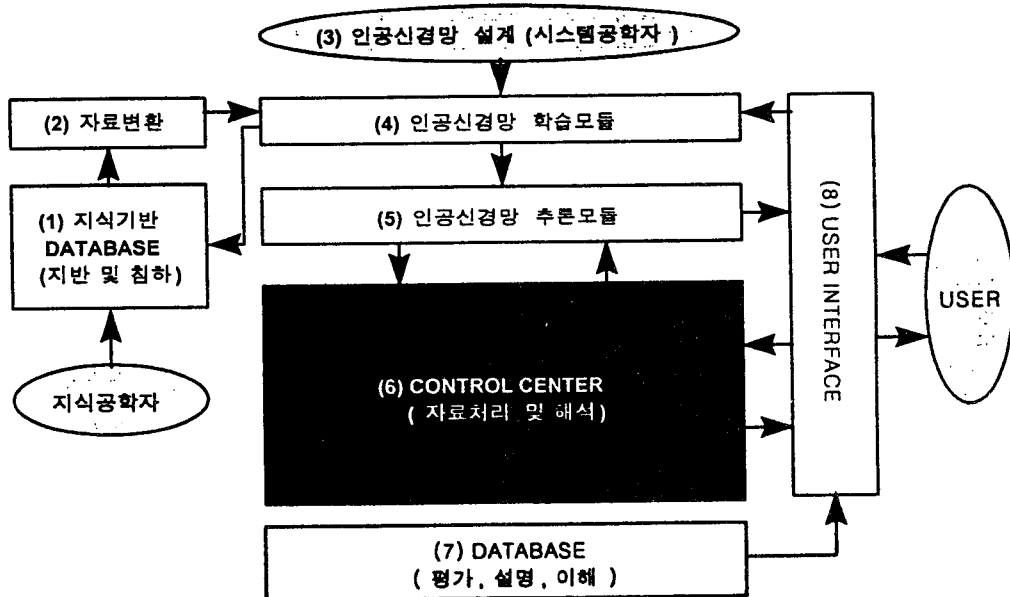


그림 6. NESASS의 시스템 구조도

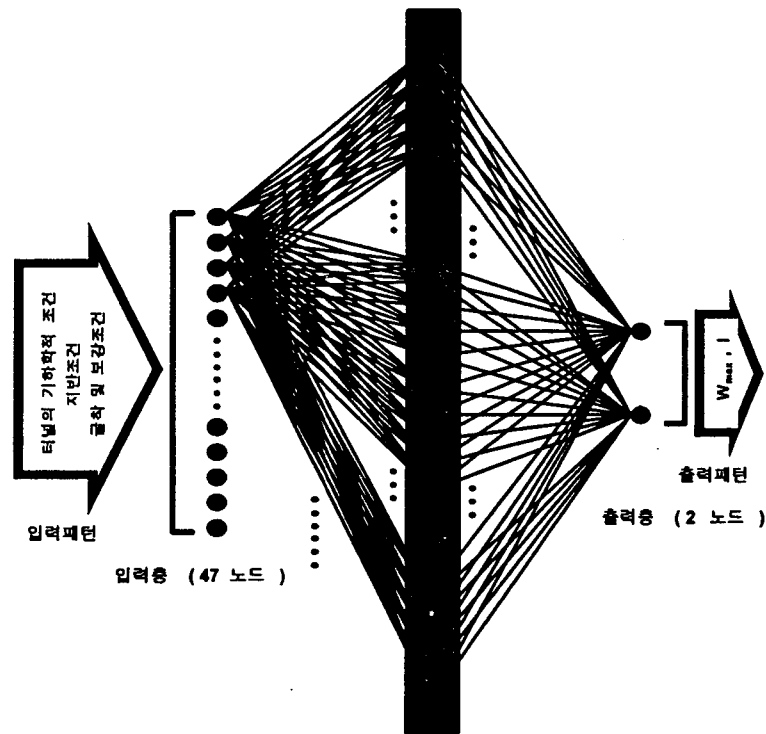


그림 7. NESASS의 인공신경망 구조

행하는 개개의 모듈들로 구성된 NESASS의 전체적인 시스템 구조도는 그림 6과 같다.

또한 NESASS의 인공신경망은 다양한 신경망 구조와 학습패턴을 가지고 학습과 추론 효율성을 분석한 결과를 바탕으로 그림 7과 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.

#### 4. 터널특성치 변화에 따른 신뢰성 검증

개발된 NESASS에 대한 적용실험을 통해서 본 시스템의 신뢰성과 현장 적용성을 파악하고자 하였다. 이를 위해서 문헌에서 제시된 여러 실측치 및 실내실험 결과치와 본 시스템에서 추론된 결과를 비교, 분석하여 NESASS의 신뢰성을

검증하였다.

또한 실제현장에서 수집된 자료를 이용, 추론 입력장치를 구성하고, 예측된 지표침하치와 시스템에서 추론된 결과를 상호 비교·검토하여 본 시스템의 현장 적용성을 파악하였다. 특히 본 터널현장 상부 지상구조물의 위치에 따른 안전성과 건물특성에 따른 안전성 변화를 본 연구에서 개발된 NESASS을 통해 분석해 보았다.

먼저 추론된 최대 침하치의 신뢰성을 검증하기 위하여 기보고된 다양한 지반조건에 대한 터널의 기하학적 제원과 침하비와의 관계식을 이용하였다. 여기서 사질토지반은 기하학적 제원 외에 지반의 체적변화의 특성에도 민감하기 때문에 비교적 터널의 기하학적 제원과 침하비와의 상관관계 규명이 용이한 점성토 지반에서의 상



관관계 규명이 용이한 점성토 지반에서의 상관관계식을 이용 제반영향요소들을 고려하여 추론된 침하자료와 비교하여 그림 8에 도시하였다. 여기서  $Z$ 는 터널의 중심축을 기준으로 한 터널의 깊이,  $a$ 는 터널의 환산반경,  $S_{max}$ 는 최대침하량,  $S_c$ 는 천단침하를 의미한다. 또한 추론을 위해 선택한 침하계측 터널현장은 서울지하철 4호선 일부계측구간으로써 암반층을 포함한 점성토사지반의 쌍굴터널 현장이다.

그림 8에서 NESASS에 의해 추론된 침하결과치는 점성토지반에서 보고된 결과치와 비교할 때 비교적 낮은 값을 보여주고 있지만 추론현장의 지반이 암반층인 경우 지하수 하강으로 인한 침하가 비교적 작게 나타나는 것을 고려한다면 도시된 지표침하 추론 결과는 현실적으로 타당성 있는 추론을 수행하였다고 판단된다.

다음으로 터널의 기하학적 제원에 대한 침하의 영향범위에 대해 보고된 자료를 이용하여 추론된 지표침하 트라프의 변곡위치의 신뢰성을알아보았다. 그림 9는 다양한 점성토지반에서 터널의 기하학적 제원에 대한 침하폭 매개변수  $i$  값의 분포를 나타낸 그림이며, NESASS에서 추

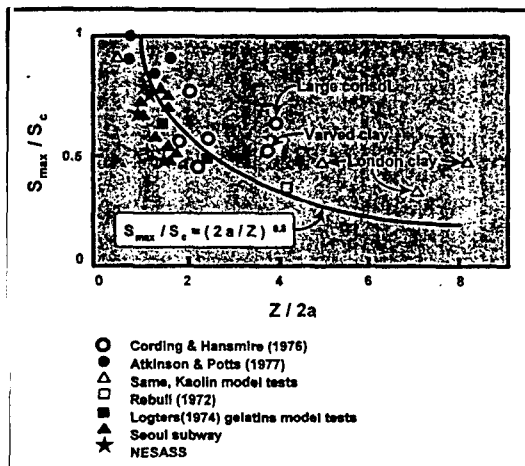


그림 8. 터널의 기하학적 제원과 침하비의 상관관계

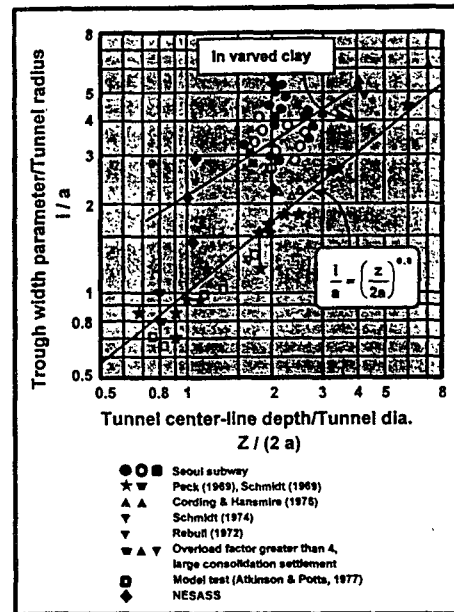


그림 9. 터널의 기하학적 제원과 침하폭 매개변수  $i$ 와의 상관관계

론된  $i$  값을 도시하여 비교하였다. 여기서 NESASS의 추론에 사용된 터널현장은 서울지하철 3호선 일부 계측현장이며 가우스 정규분포곡선으로 표현되는 침하가동을 보인 쌍굴터널이다. 그림 9에서와 같이 제시된 상관관계 산정식과 비교한다면 NESASS에서 제시된 결과치는 비교적 큰 침하폭을 보이는 것을 알 수 있으며 이는 NESASS의 추론에 사용된 터널현장이 비교적 지하수위가 낮으며 연암층을 포함한 점성토사지반임을 감안한다면 타당한 추론결과라 사료된다. 또한 그림에서 제시된 Cording & Hansmire의 실내실험치와 기타 서울지하철의 계측자료에서 분석된  $i$ 값의 분포 경향과는 비교적 부합되는 추론결과임을 알 수 있다.

따라서 추론 결과치와 현장계측 및 실내 실험치에서 제시된 이론치와의 비교를 통하여 NESASS의 지표침하의 추론에 있어서 어느 정도 타당성 있는 침하정보를 추론하는 것으로 판단된다.

## 5. NESASS의 안전성 평가 적용실험

본 연구에서 개발된 NESASS의 현장 적용성을 알아보기 위하여 서울지하철 3호선 일부터널 현장자료를 이용하여 지표침하를 예측하고, 예측된 최대 지표침하량과 실제 현장계측을 통해 측정된 값을 비교하였다. 또한 추론된 최대침하량과 침하트래프의 변곡선위치  $i$  값과 NESASS의 지상구조물의 안전성 평가 모듈을 이용하여 가정된 지상구조물을 대상으로 안전성 평가 작업을 수행하였다.

### 5.1 터널현장의 지표침하 예측

본 NESASS의 현장적용실험에 사용된 터널현장은 그림 10에서와 같이 천부의 마계형 쌍굴터널이며 암반이 포함되지 않은 연약한 토사지반으로, 굴착시 short bench와 ring cut 굴착방식을 채택하여 forepoling의 보조작업이 적용된 터널현장이다. 이러한 터널현장정보를 NESASS의 입력정보로 사용하여 그림 11과 같이 예상되는 지표침하 트래프를 추론하였다. 추론된 최종, 최대침하량인 158,995mm를 실측치인 160mm에 비교하여 보면 0.003%의 오차율로 상당히 유사한 추론침하량임을 알 수 있다. 또한 비교된 실제 계측자료에서는 최대침하량만을 제시하였지만, 본 NESASS에서는 적용된 터널현장 정보를 이용하여 침하트래프의 변곡위치  $i$  값도 추론하여 제시하였다. 그림 12는 NESASS의 적용성 실험에 사용된 터널현장과 유사한 현장을 추론해낸 결과이다. 위에서 언급한 바와 같이 적용성 실험에 사용된 터널현장은 160mm의 상당히 큰 최대침하량을 보인 터널현장으로써, 유사한 현장으로 분류된 현장은 최대침하량 160mm, 136mm, 124mm으로 계측된 서울지하철 3호선 320공구의 계측구간들이다. 여기서 유사도가 높게 분류된 현장들은 큰 최대침하량이 계측된 터

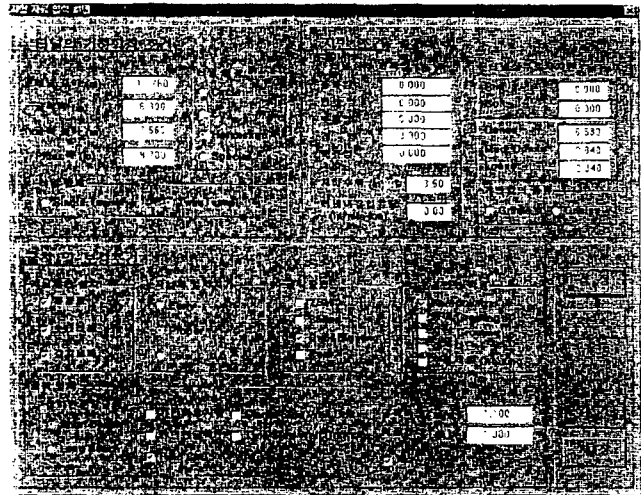


그림 10. NESASS의 적용성실험에서 사용된 터널현장 자료

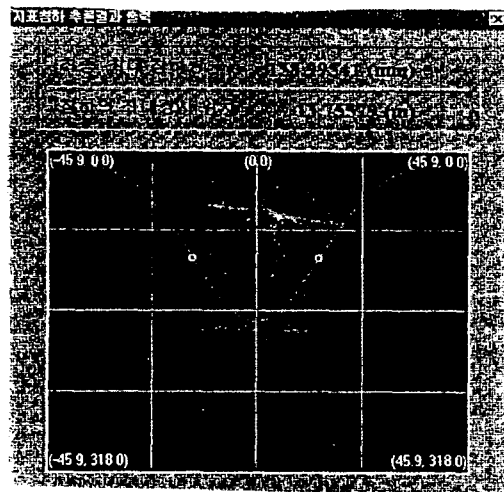


그림 11. NESASS의 지표침하 추론결과

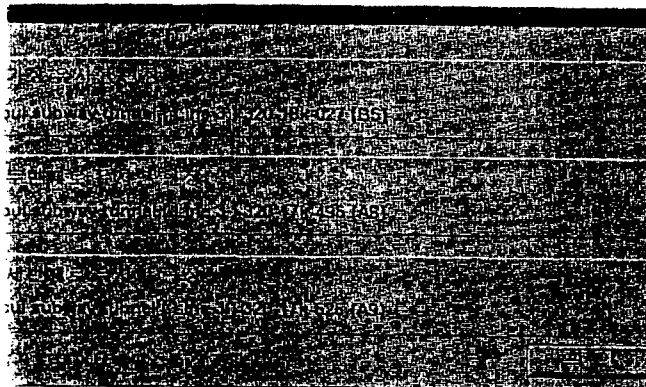


그림 12. NESASS에서 추론된 유사현장

측된 터널현장으로써, 이는 지반조건이 불량하여 큰 침하량을 보인 적용터널 현장과 비교해 보면 타당성있는 유사현장 분류가 수행되었다 사료된다.

## 5.2 구조물 안전성 평가적용 실험

추론된 지표침하 트라프를 이용하여 침하트라프상에 위치하는 지상구조물의 안전성 평가를 수행하였다. 본 실험에서는 그림 13와 같이 지상구조물을 터널직상부에 위치시키고, 폭이 10m, 높이 10m의 다층구조물로 가정하여 설정하였다. 그림 14는 설정된 지상구조물에 대한 NESASS의 구조물 평가 모듈의 수행결과이다. 여기서 전단비틀림 수준의 척도인 angular distortion 값은 "0"로 평가되었다. 이는 설정된 지상구조물의 트라프상의 위치가 최대 침하량이 발생한 지점상에 위치하기는 하나 구조물 하부 모서리간의 침하량이 같음으로 부등침하가 발생하지 않았기 때문이다. 또한 휨에 기인한 비틀림의 척도인 deflection ratio는 "0.001"정도로 평가되었다. 따라서 건물의 기울음에서 발생하는 전단비틀림에 의한 지상구조물의 불안전성은 예상되지 않으며 건물의 기초와 침하트라프와의 이격으로 발생하는 휨에 의한 비틀림 현상이 두드러져 지상구조물의 불안전성을 유발할 것으로 예상된다. 여기서 deflection ratio의 영향으로 지상구조물이 단층공장 및 단층제철소 건물일 경우에 불안전할 것으로 예측되었다.

표 7은 다양한 위치에 대하여 동일한 구조물과 침하트라프상에서의 안전성 평가를 수행한 결과이다. 구조물의 기울임이 비교적 큰 지상구조물 B, C의 경우, deflection ratio에 왕나 불안전 요인은 발생하지 않으며 angular distortion과 부등침하에 의한 불안정성이 높게 예측되었다. 또한 터널 현장고 상당히 떨어져 있는 지상구조물 D의 경우는 지표침하의 영향을 거의 받지 않는 것으로 평가되었다.

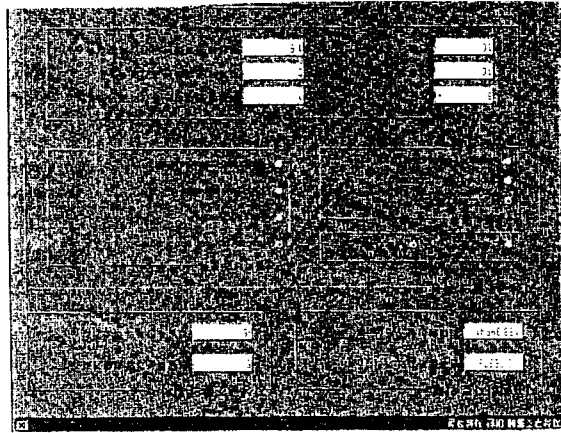


그림 13. NESASS의 안전성평가를 위한 지상구조물 정보

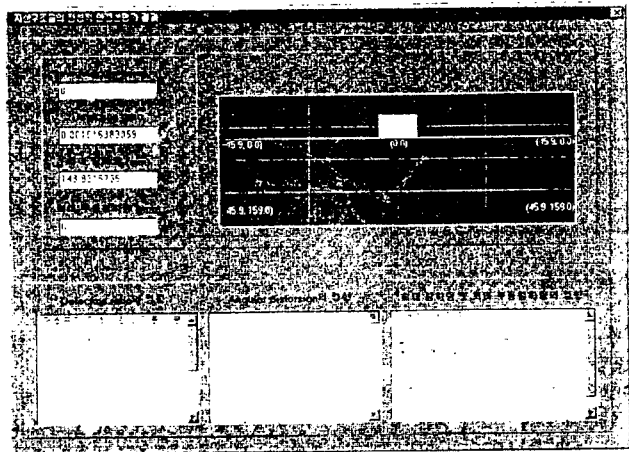


그림 14. NESASS의 안전성평가 결과

## 5.3 균열양상 평가실험

5.2절과 동일한 지상구조물을 대상으로 NESASS에서 구현된 균열양상 평가모듈을 이용하여 지상구조물의 균열양상을 평가하였다.

그림 15는 지상구조물 A를 대상으로 균열평가를 수행한 결과이며 구조물 B,C,D에 대한 평가 결과는 표 8에 나타내었다. 구조물 A는 지상구

| 지상구조물의 종류<br>항목    | A   | B   | C  | D                      |
|--------------------|---|---|--|------------------------|
| 터널축선과의 최대거리<br>(m) | -5  | 10  | 25   | 100                    |
| 터널축선과의 최소거리<br>(m) | -5  | 0   | 15   | 90                     |
| Angular distortion | 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   | $8.0 \times 10^{-8}$   |
| 불안정요소 평가           | *Deflection ratio의 영향<br>단층공장, 단층<br>제철소 건물이<br>불안정 | *Angular distortion의 영향<br>-소성점토질 지반상에 위치한<br>피복된 벽돌열들의 끝단에 위<br>치한 기둥기초가 불안정<br>-침하에 예민한 기계기초가 불<br>안정<br>-경사진 부재를 가진 뼈대가 불<br>안정<br>-균열을 허용할 수 없는 빌딩이<br>불안정<br>-토목용과 산업용건물의 기둥기<br>초, 강구조물, 보강콘크리트 구<br>조물이 불안정<br>-칸막이 벽에 첫 균열이 예상<br>-뼈대구조물내의 하중지지벽 또<br>는 칸막이벽, 원유 또는 액체저<br>장 원형강재탱크에 균열이 발생<br>-고가 트레인의 작업곤란이 예상<br>*부등침하 관련<br>-사질토질 지반상의 빌딩구조물<br>이 불안정 | *Angular distortion의 영향<br>-소성점토질 지반상에 위치한<br>피복된 벽돌열들의 끝단에 위<br>치한 기둥기초가 불안정<br>-침하에 예민한 기계기초가 불<br>안정<br>-균열을 허용할 수 없는 빌딩<br>이 불안정<br>-토목용과 산업용건물의 기둥<br>기초, 강구조물, 보강콘크리트<br>구조물이 불안정<br>-칸막이 벽에 첫 균열이 예상<br>-뼈대구조물내의 하중지지벽<br>또는 칸막이벽, 원유 또는 액<br>체저장 원형강재탱크에 균열<br>이 발생<br>-고가트레인의 작업곤란이 예<br>상<br>-강성고층빌딩의 전도가 눈에<br>뜨일 수 있음<br>-부등침하동안 부수변형이 일<br>어나지 않는 구조물이 불안정<br>*부등침하 관련<br>-시질토질 지반상의 빌딩구조<br>물이 불안정<br>-점토질 지반상의 빌딩구조물<br>이 불안정 | 불안정 요소<br>없음           |

표 7. 지상구조물의 안전성 평가결과

조물의 기울음보다는 지표침하 트라프와의 이격에 기인한 휨 거동이 크게 예상되고 지상구조물 기초부터의 양 모서리부에 집중하중을 받아 모서리부의 전단응력에 의한 균열이 큰 폭으로 발생할 것으로 예상된데 따라 NESASS의 평가결과는 전단응력에 의한 경사균열폭이 51.902mm로 상당히 크게 예측되었다. 하지만 실제 안전성 평가에서는 이와 같은 균열폭을 실제현장에 적용하는 것보다 예측된 균열폭을 기반으로 기타

지상구조물의 특성 및 기능을 고려하여 안전성 평가를 수행하여야 한다고 사료된다.

## 6. 결 과

본 연구를 통해 얻은 세부 결론은 다음과 같다.

- (1) 인공 신경망 기법을 이용하여 지하굴착시의 지상구조물의 안전진단용 전문가 시스템인 NESASS를 개발하였다.
- (2) NESASS는 파스칼 언어를 근간으로 델파이를 이용하여 개발되었으며 모든작업을 화면상에서 직접 수행할 수 있는 사용자 환경(User interface)을 구현하여 예기된 지표침하에 기인한 지상구조물의 안정성 평가작업을 보다 용이하게 수행 할 수 있게 하였다.
- (3) 본 연구에서는 지표침하 계측자료를 본시스템의 인공신경망의 학습자료로 적절히 이용하기 위해서 계측자료를 가우스 정규 분포함수 로써 표현하였고, 현장조사 및 전문가 등을 통해 지표침하에 주요하게 영향을 미치는 인자들을 결정하였다. 또한 지표침하 자료의 체계적인 분류를 실시, 데이터베이스화하였다. 또한 데이터 베이스의 새로운 활용방안으로 인공신경망 기법

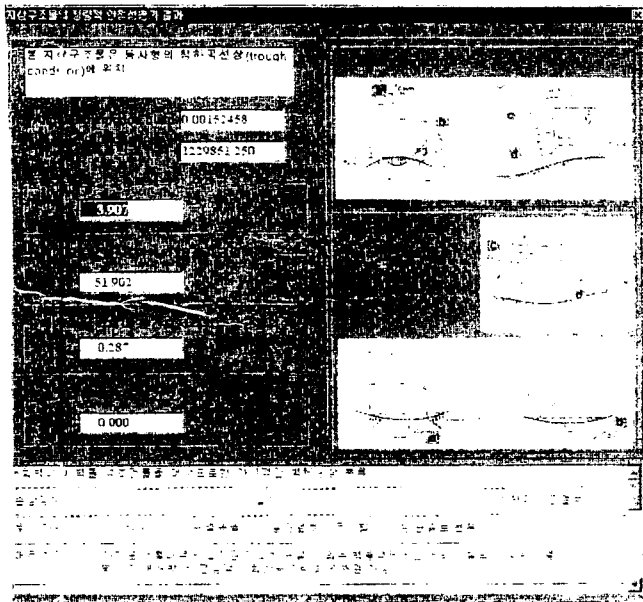


그림 15. NESASS의 균열양상 평가결과

| 지상구조물의 종류           |                 | A                  | B                 | C                  | D                     |
|---------------------|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
| 항 목                 |                 |                    |                   |                    |                       |
|                     | 터널축선과의 최대거리 (m) | -5                 |                   |                    |                       |
|                     | 터널축선과의 최소거리 (m) | -5                 |                   |                    |                       |
|                     | 기초부 변형형상        | trough condition   | trough condition  | saddle condition   | saddle condition      |
|                     | 트라프의 곡률반경       | $1.30 \times 10^6$ | $1.5 \times 10^6$ | $3.22 \times 10^6$ | $3.30 \times 10^{14}$ |
| 예기되는<br>균열폭<br>(mm) | a 모드            | 0                  | 0                 | 0                  | 0                     |
|                     | b 모드            | 51.902             | 45.549            | 0                  | 0                     |
|                     | c 모드            | 0.289              | 0.017             | 0                  | 0                     |
|                     | d 모드            | 0                  | 0                 | 0                  | 0                     |

표 8. 지상구조물의 균열양상 평가 결과

을 도입함으로써 계측자료의 데이터베이스를 터널설계에 직접 활용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

- (4) Dulacska의 균열양상 평가모델을 프로그램화 하여 NESASS에 구현함으로써 지상구조물의 종류에 따른 발생균열 양상의 해석이 가능하도록 하였다.
- (5) NESASS에 구축된 인공신경망의 추론 신뢰성을 알아보기 위하여 다양한 점성토 지반에서 측정된 계측치 분석결과와 서울지하철 3,4호선 일부구간을 대상으로 본 NESASS에서 추론한 지표 침하치를 비교·평가한 결과, 추론현상이 연암층을 포함한 점성 토사지반임을 감안한다면 터널 기하학적 특성에 대한 최대 침하량 및 지표침하와 변곡위치의 상관관계 분석치와 비교적 일치하는 것으로 나타나고 있어 개발된 NESASS의 현장 적용성이 높은 것으로 판단된다.
- (6) 지상구조물의 안전성 평가 매개변수(angular distortion ratio 등)의 변화경향을 분석한 결과, 지상구조물 위치에 따라 안전성 평가 매개변수들의 변화가 일관성을 보여줌으로써 허용 한계치를 이용한 안전성 평가의 타당성을 제시하였다. 또한 NESASS를 사용하여 가상 지상구조물의 예상 균열양상 및 균열폭을 결정해 봄으로써 보다 구체적인 지상구조물의 안전성 평가작업을 수행 할 수 있는 계기를 마련하였다.
- 따라서 앞으로의 연구는 개발된 prototype NESASS의 각 모듈의 보완 및 신뢰성 검토 그리고 해석의 신뢰도를 높일 수 있도록 지속적인 지표침하 자료수집·정리 등을 추진하여 보다 신뢰성 있는 시스템이 될 수 있도록 하고 지상구조물 이외의 인접구조물(지하매설관, 인접터널)의 안전성 평가에 확대·적용되어야 한다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Attewell, P.B. and I.W.Farmer(1974), "Ground deformations resulting from shield tunnelling in London clay", Cnadian Geotech. Vol. 11, pp.380~395
2. Attewell. P.B. & Taylor. R.K.(1984), "ground movement and their effects on structures", Surrey University press, USA.
3. 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

\* 본 논문은 한국 건설기술연구連載地盤分野, 1997」에서 轉載한 것으로 감사드립니다.

## News

우리학회 許 埴 會長 ;  
APEC Engr. 總會 한국대표 참석

지난 10월 7일 ~9일 於 香港에서 개최된 동남아 태평양 공학회연합(NGO, FEISEAP) 總會에서 許 埴 부회장이 2000.3~2002.3 기간의 회장으로 선임되었다. 따라서 내년에는 회장직으로 총회 유치가 예정된다. 事務總長에는 한국 기술사회 國際協力 委員長 全 相 伯 部委員長이 지명되었다. 明年 3月 Malaysia에서 개최는 정기총회에서 認准될 예정이다.

오는 11월 5일, 6일 Sydney에서 개최예정인 APEC Engr. 총회(GO)에 참석하였다. 이번 총회에서 각국의 審査評價 書가 제출되면 明年 하반기부터는 APEC Engr. 相互交換 契約交渉이 착수될 것으로 기대된다.