

# GIS기반의 터널 시공에 따른 위험도 평가 시스템 개발 및 적용

## Development and Implementation of A GIS-based Tunnelling Risk Management System

유 충 식<sup>1</sup> Yoo, Chung-Sik

전 영 우<sup>2</sup> Jeon, Young-Woo

김 재 훈<sup>3</sup> Kim, Jea-Hun

박 영 진<sup>4</sup> Park, Young-Jin

유 정 훈<sup>5</sup> Yoo, Jung-Hun

### Abstract

A GIS-based tunnelling risk management system(GIS-TURIMS) was developed as a product of this study. The developed system uses ArcView 8.1 as a basic platform and the built-in interface(VBA) has been used to perform first-order simplified analyses for the prediction of tunnelling-induced ground movements and building damage assessment. The main emphasis of this study was to develop a working framework that can be used in the perspective of tunnelling risk management. The developed system is capable of carrying out computationally intensive analyses for ground movement prediction as well as buildings/utilities damage assessment taking full advantage of the GIS technologies. This paper describes the concept and details of the GIS-TURIMS development and implementation.

### 요 지

본 논문에서는 도심지에서의 터널 시공에 따른 지반거동을 평가하고 이에 따른 인접 건물 혹은 매설관의 위험도를 평가하는 GIS기반의 위험도 관리 시스템(GIS-TURIMS) 개발에 대한 내용을 다루었다. 본 시스템은 상용 GIS 소프트웨어인 ArcView 8.1을 기반으로 개발되었고, VB(Visual Basic)와 VBA(Visual Basic Application)를 사용하여 터널 시공으로 인한 지반거동과 건물 손상정도의 공학적 연산을 수행할 수 있도록 하였다. 개발된 시스템은 GIS기술의 장점을 최대한 활용하여 터널 시공으로 인한 지반거동, 건물/매설관 손상평가의 강력한 해석을 수행할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 GIS-TURIMS의 개요와 개발과정에 대하여 상세히 다루었다.

**Keywords :** Buildings/utilities damage assessment, GIS, Ground movement, Tunnelling

### 1. 서 론

도심지 개발의 급속한 성장과 이에 따른 인구의 과밀로 교통시설, 전력·통신구, 상·하수도관 등의 시설물 확충이 요구되고 있으나 공간의 협소함, 미관 등

의 이유로 이러한 시설물을 위한 지상공간 활용은 제한적일 수밖에 없다. 이에 지하철과 같은 지하 교통수단과 같이 이러한 각종 시설물을 위한 도심지 터널 시공이 요구되고 있고 시공 사례 또한 증가하고 있는 추세이다.

1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu)

2 성균관대학교 토목환경공학과 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environ Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

3 경동기술공사 지반공학부 (Engineer, Geotechnical Engrg., Dept. Kyoung Dong Engrg.)

4 (주)코오롱건설 토목환경공사팀 (Chief Engineer, KOLON ENGINEERING & CONSTRUCTION CO., LTD.)

5 (주)코오롱건설 건설환경연구팀 대리 (Senior Engineer, KOLON ENGINEERING & CONSTRUCTION CO., LTD.)

도심지에서의 터널 시공은 일반적인 터널 시공 등과 달리 터널 자체의 안정성 확보 외에도 지하매설물이나 인접 구조물에 대한 안정성을 확보하는 것 또한 매우 중요하다. 그러나 현재 도심지 터널은 인한 주변 구조물의 피해로 인한 경제적 손실과 환경피해에 대한 민원 등으로 시공여건이 매우 열악한 실정이며 앞으로 더욱 민감한 문제로 대두 될 것이다. 따라서 도심지 터널 시공으로 인한 주변영향을 최소화하고 과학적이고 합리적인 터널 설계 및 시공관리가 필요하다.

터널 설계/시공은 주변 지반의 거동 및 구조물의 영향을 검토하고 검토결과를 토대로 보강대책을 수립하여야 하며 시공 중에는 현장계측을 수행하여 설계 및 시공의 타당성을 확인하는 종합적인 안전관리를 수행하여야 도심지 터널 시공으로 인한 주변 건물의 피해 및 민원발생을 감소시킬 수 있다. 이를 위해서는 터널 시공 중 실시간 개념의 지반거동평가 및 구조물 손상평가를 수행하고 그 결과를 시공에 반영하는 정보화 개념의 시공관리가 요구된다. 이미 국외에서는 도심지 터널 시공에 따른 피해 및 보강대책에 대한 체계적인 관리를 위해 GIS를 이용한 위험도 관리 시스템을 개발하여 설계 및 시공에 적극 활용하고 있으며 네덜란드의 GIS-RMS와 이탈리아의 GD-GIS 시스템은 대표적인 예라 할 수 있다.

GIS-RMS는 Amsterdam North/South Metroline에 대한 침하위험도 관리를 위해 개발되었고 터널굴착으로 인한 주변건물의 상태평가, 침하위험도 평가 및 보조공법 선정 및 계측관리를 수행하는 시스템이며, GD-GIS는 굴착으로 인한 지반의 변위와 빌딩의 위험도와 손상정도를 분석하고, 실시간 모니터링을 통한 전문가해석을 통해 위험성 분석 및 해결방안을 제시하는 시스템으로써 종합적인 안정관리 기능을 보유한 명실상부한 터널 설계/시공 전문가 시스템이다.

이에 본 논문에서는 정보화 시공관리 개념을 도입하고 그 기반을 조성하기 위한 연구로 최근 다양한 분야에서 그 활용도가 무한하다 할 수 있는 GIS를 기반으로 하여 도심지 터널시공에 따른 지반 거동평가 및 주변 건물/매설관 손상평가가 가능한 위험도 관리시스템(GIS-TURIMS)을 개발하였다. 본 시스템은 향후 터널시공 현장에서 그 적용성 검토를 위해 현재 시공 중에 있는 ○○지하철 현장에 적용하여 설계/시공단계에서 주변지반의 거동 및 구조물 손상정도를 예측하고 이를 토대로 보강대책공법 적용여부를 결정하는 과정의 보조

도구로서의 적용성을 검토하였다.

## 2. GIS-TURIMS의 개발

### 2.1 시스템 개요

본 연구에서는 터널굴착으로 인한 지반의 거동 및 주변 건물의 피해를 평가 할 수 있는 시스템을 GIS(지리정보시스템)체계에 접목시켜 실시간으로 지반거동평가 및 건물 손상평가를 실시할 수 있는 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 상용 GIS 소프트웨어(ArcView8.1)를 기반으로 개발되었고 사용자를 위한 GUI(사용자 인터페이스)와 공학적 연산을 위한 VB(Visual Basic) 및 VBA(Visual Basic Application)를 사용하여 GIS 소프트웨어 내에 다양한 모듈을 구축함으로써 손상평가를 수행하고자 하는 현장에 대한 지반정보, 구조물 정보, 터널 정보 등의 효율적인 조회, 굴착 중, 굴착완료시의 지반거동, 건물손상도, 매설관 손상도의 평가가 가능하다. 또한 본 시스템은 지반거동 평가와 건물 손상평가를 수행하여 평가결과를 실 좌표계의 수치지도상에 시각적으로 표현하여 보다 현실적인 위험도 관리가 가능하도록 개발되었다.

### 2.2 시스템 개발환경

본 시스템의 개발을 위하여 ESRI사에서 개발한 GIS 소프트웨어를 사용하여 GIS기반을 확보하였다. 개발을 위해 사용된 소프트웨어의 종류와 GIS-TURIMS에서의 기능을 살펴보면 다음과 같다.

#### 2.2.1 ArcView

GIS 소프트웨어인 ArcView는 직관적인 윈도우 유저 인터페이스로 설계되었고, 사용자를 위해 VBA(Visual Basic Application)를 포함할 수 있도록 개발되었다. ArcView는 표 1에 보이는 것과 같이 세 개의 데스크탑 어플리케이션 즉 ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox로 구성되어 있다. ArcMap은 데이터 디스플레이, 질의, 분석기능을 제공하며, ArcCatalog는 지리정보 데이터 및 테이블 데이터의 관리, 구축, 구성 기능을 제공하고, ArcToolbox는 기본적인 데이터 변환 기능을 제공한다. 이러한 세 가지 어플리케이션을 사용하여 사용자는 맵핑, 데이터 관리, 지리정보 분석, 데이터 편집, 지오 프

표 1. ArcView의 구성 및 기능

| 구성          | 기능   |
|-------------|--|
| ArcMap      | <ul style="list-style-type: none"> <li>지리정보 데이터를 이용하여 경향 및 분포, 새로운 통찰력의 획득 가능</li> <li>메시지 전달의 맵 제작이 용이, 맵상에 필요한 데이터를 생성하는데 필요한 도구를 제공하며 효과적으로 표현</li> <li>작업결과의 표시가 용이, 고품질의 맵 제작, 그래픽, 테이블, 그림, 사진 및 다른 요소가 데이터와 연결되는 디스플레이의 제작</li> <li>사용자 정의 환경을 통해 필요로 하는 인터페이스 설계, ArcMap 맵핑 컨포넌트 기반의 독립형 어플리케이션 개발 가능</li> </ul> |
| Arc Catalog | <ul style="list-style-type: none"> <li>지리정보, 테이블 데이터의 브라우징, 관리, 생성, 구성</li> <li>데이터 정보의 생성, 편집, 뷰를 가능하게 하는 메타데이터 지원</li> </ul>   |
| Arc Toolbox | <ul style="list-style-type: none"> <li>데이터 변환, 관리를 위한 36가지의 tool을 제공</li> <li>지오프로세싱에 사용되는 다양한 GIS tool 포함</li> </ul>  |

로세싱 등의 GIS 작업을 수행 할 수 있다. GIS 소프트웨어에서는 Shape 파일이나 Geodatabase Feature를 통해 ArcMap상에 디스플레이 할 수 있으며 ArcCatalog를 이용하여 데이터를 구축 혹은 관리할 수 있도록 되어있다. 따라서 GIS-TURIMS에서는 ArcToolbox를 이용하여 대상현장에 대한 수치지도 및 dwg파일을 ArcGIS를 위한 Shape파일 및 Geodatabase Feature로 데이터를 변환 하도록 되어있고 ArcMap은 이러한 변환된 파일들의 디스플레이, 분석기능이 가능하도록 한다. 또한 ArcCatalog는 ArcMap을 통해 디스플레이된 레이어들에 대한 다양한 데이터 및 테이블데이터를 구성하고 관리할 수 있는 실질적인 Database 기능을 제공한다.

2.2.2 Spatial Analyst

ArcGIS Spatial Analyst는 광범위의 강력한 공간 모델링 및 분석 기능을 제공한다. 셀 기반의 래스터 데이터의 생성, 질의, 지도제작 및 분석을 할 수 있으며, 벡터/래스터데이터를 통합적으로 분석, 기존 데이터로부터 새로운 정보의 도출, 다중 데이터 레이어에 대한 질의의 기능을 수행한다.

본 시스템에서 Spatial Analyst는 지반 거동에 대한 공학적 평가모듈을 통해 자동 생성 및 저장된 셀 기반의 래스터데이터를 분석하여 새로운 벡터데이터 레이어를 도출시키는 벡터데이터와 셀 기반 래스터데이터의 통합기능을 수행한다. 이러한 Spatial Analyst의 기능을 통해 평가 결과를 효과적으로 분석 및 보정하게 되었고 보다 시각적인 표현 또한 가능하게 되었다.

2.2.3 3D Analyst

ArcGIS 3D Analyst는 효과적인 표면 데이터를 시각화 및 분석 작업을 가능하게 한다. 3D Analyst를 통해 다중관점에서 표면을 시각화할 수 있으며, 선택 영역의

표면에서 볼 수 있는 지형, 건물 등을 파악하고, 표면 위로 실제와 동일한 이미지 래스터 및 벡터 데이터를 생성할 수 있다. 3D Analyst의 핵심은 ArcScene 어플리케이션으로 3차원 데이터의 다중 레이어의 시각화 및 표면 생성/분석을 위한 인터페이스를 제공한다.

본 시스템에서는 3D Analyst를 통해 대상 현장의 건물, 도로, 터널의 3차원 분석 및 시각화를, 다중 레이어의 래스터 데이터를 통해 시추공의 실제적인 표현을 그리고 각 레이어의 래스터 데이터를 통해 지층구성에 대한 표면형성을 가능하게 하였다. 또한 ArcScene을 통해 다중 레이어의 현장 벡터, 래스터 데이터를 통합하여 다중관점의 3차원 시각화를 가능하도록 하였다.

2.3 시스템 모듈

앞서 언급한 바와 같이 GIS-TURIMS는 GIS 소프트웨어인 ArcView8.1을 기반으로 하여 구동이 가능하도록 구성되어 있으며, 다양한 데이터베이스 및 공학적 연산모듈이 구축되어 있어 사용자가 개인 컴퓨터를 사용하여 데이터베이스에 접근하고 공학적 연산을 수행하는 데스크탑 모형으로 구축되어 있다. 그림 1은 GIS-TURIMS의 시스템 개념도를 보여주고 있다.

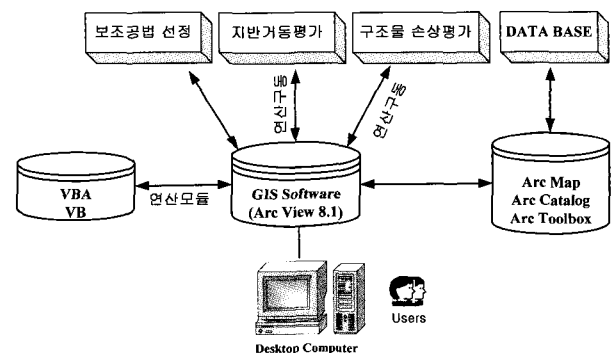


그림 1. GIS-TURIMS의 시스템 개념도

### 2.3.1 현장정보 조회모듈

사용자가 현장정보 조회 모듈을 통해 구축된 데이터베이스에 접근하여 건물/매설관 정보, 지반시추정보, 터널 설계/시공 정보, 현장도면 등 다양한 정보의 조회가 가능하도록 하였다.

그림 2는 현장정보 조회 모듈을 통해 조회 가능한 데이터 정보를 나타내고 있고 그림 3은 GIS-TURIMS내에 구축된 정보조회 모듈 중 대표적인 모듈을 보여주고 있다.

### 2.3.2 지반거동 평가모듈

본 모듈은 터널굴착 시 종 · 횡단면 지반침하를 평가하는데 있어서 식 (1)과 식 (2)로 표현되는 오차함수와 누적확률함수 기법(Peck 1969, Attewell & Woodman 1982)을 적용하였다. 구체적인 내용은 유충식(2001)의 논문에 언급되어 있다.

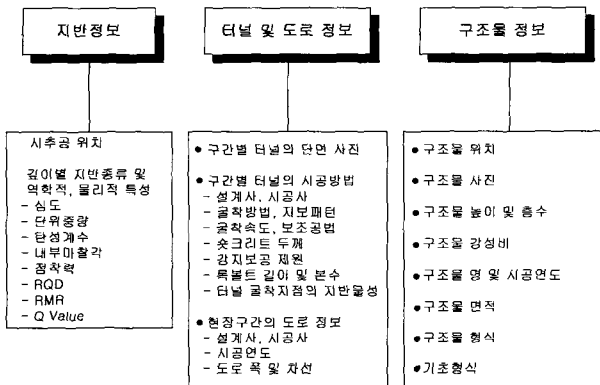


그림 2. GIS-TURIMS 데이터베이스 항목

$$s = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right] \quad (1)$$

$$s = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right] \left[ G\left(\frac{x-x_i}{i}\right) - G\left(\frac{x-x_f}{i}\right) \right] \quad (2)$$

여기서  $s$ 는 침하량,  $i$ 는 변곡점이며  $V_s$ 는 지반손실율로써 터널굴착면을 가로질러 발생하는 변위장의 체적으로 정의되며 터널의 단위길이당 체적 또는 터널단면 체적의 백분율로 표현한다. 종 · 횡단면 침하곡선의 특성은 변곡점  $i$ 의 위치에 좌우되며 따라서 침하곡선의 특성을 이용하여 주변 구조물 및 매설관의 손상정도를 평가할 경우 그 결과는 변곡점의 위치를 어떻게 산정하느냐에 따라 상당한 차이를 보일 수 있다. 지금까지 많은 연구자에 의해 변곡점의 위치를 추정하는 경험식들이 제안되었으며 식 (3)~(6)은 다양한 변곡점 추정식을 보여주고 있다.

$$i = 0.2(D + z_0) \quad (\text{Peck } 1969) \quad (3)$$

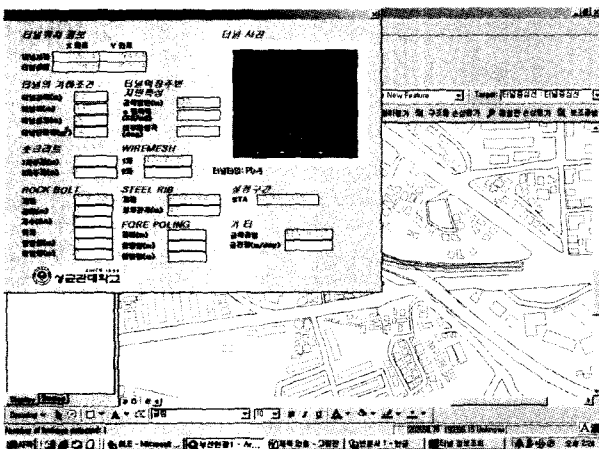
$$i = 0.43(z_0 - z) + 1.1, \text{ (점토) } (O'Reilly \& \text{New } 1982) \quad (4a)$$

$$i = 0.28(z_0 - z) - 0.1 \text{ (모래) } (O'Reilly \& \text{New } 1982) \quad (4b)$$

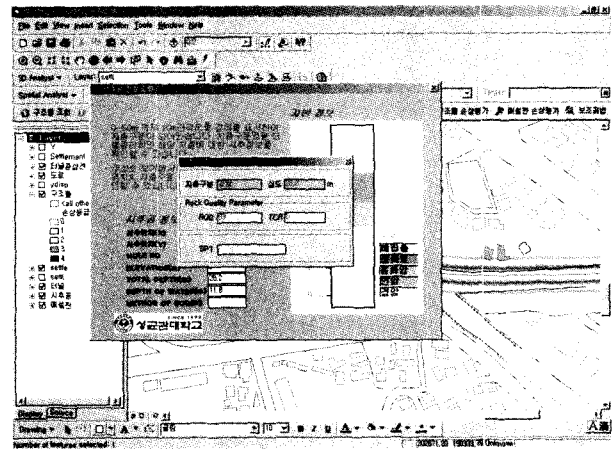
$$i = \frac{D}{2} \left( \frac{z_0}{D} \right)^{0.8} \quad (\text{Clough \& Schmidt } 1982) \quad (5)$$

$$i = z_0 \left[ 0.175 + 0.325 \left( 1 - \frac{z}{z_0} \right) \right] \quad (\text{Mair 등 } 1993) \quad (6)$$

위에서 제시된 식을 토대로 터널굴착으로 인한 지반의 변위를 계산하고자 VBA(Visual Basic Application)환경을 이용하여 ArcView내에 모듈을 구축하고 VB(Visual Basic)을 사용하여 공학적 연산을 수행할 수 있도록 하



(a) 터널 정보 조회모듈



(b) 지반시추 정보 조회모듈

그림 3. 다양한 현장정보 조회 모듈

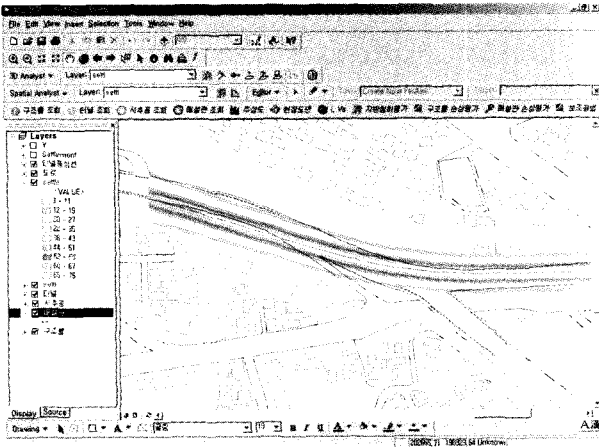


그림 4. 지반침하 분석결과

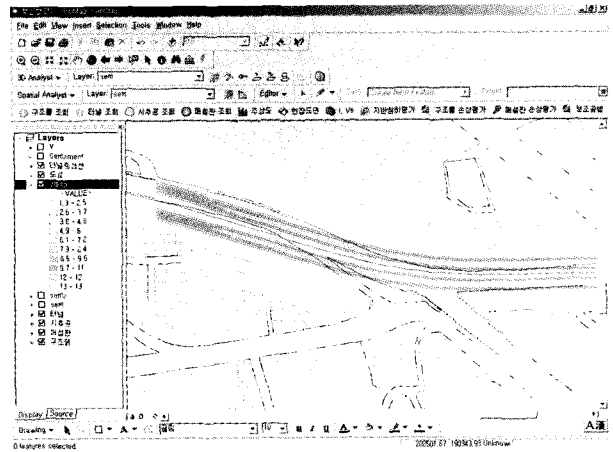


그림 5. 지반변위 분석결과

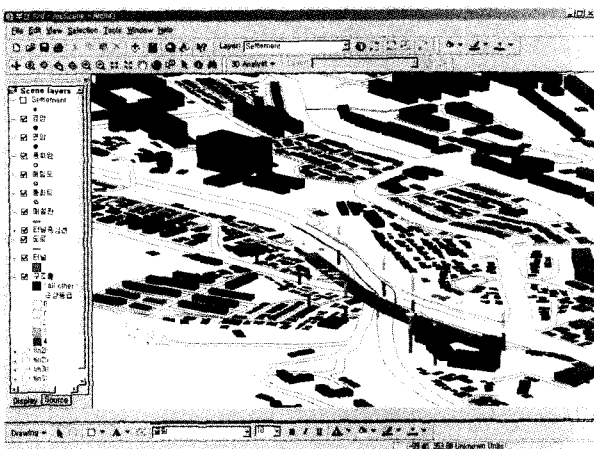


그림 6. 현장도면 3D 가시화

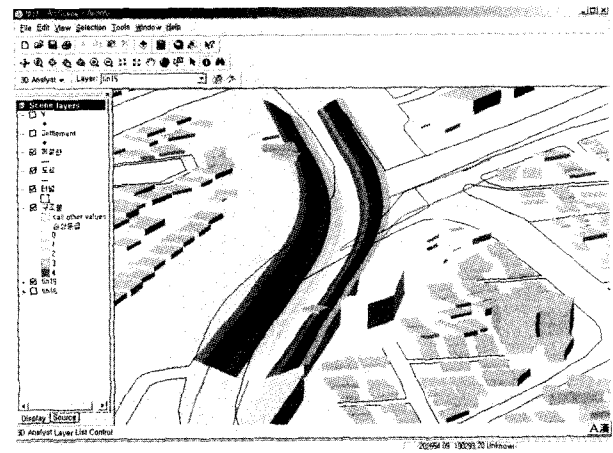


그림 7. 침하등고선의 3D 가시화

였다. 지반침하평가 모듈은 현막장 및 굴착 완료시로 구분하여 지반 침하량/수평변위를 산정할 수 있도록 하였다. 또한, 침하곡선의 특성을 좌우하는 변곡점(i) 추정식을 다양하게 선택하여 적용할 수 있도록 하여 여러 경우에 대해 적합한 추정식 적용이 가능하도록 하였다.

연산과정을 통하여 얻어진 지반 변위, 경사, 변형 등을 래스터 데이터로 만들어 ArcView의 확장 프로그램인 Spatial Analyst를 이용한 공간분석을 통해 보다 시각적이고 효과적으로 결과를 도출 시킬 수 있다. 지반변위의 연산과정을 간소화 하고자 터널을 일직선으로 간주하고 지반 변위를 얻고자 0.5m 길이로 종·횡방향을 연속적으로 분할하여 지반변위 연산을 수행하도록 하였다. 그림 4와 그림 5는 지반변위 분석의 결과를 Spatial Analyst를 사용하여 공간분석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 분석 결과는 사용자가 한눈에 위험지역을 확인할 수 있도록 등고선 형태로 표현되고 등고선과 레이어 테이블을 통해 정성·정량적인 판단 또한 가능하도록

하였다.

지반거동평가 후 GIS 소프트웨어의 확장 프로그램인 3D Analyst를 활용하여 앞서 구축된 터널 시공현장에 대해 구조물, 터널 등에 대한 3차원 가시화 기능을 제공하고 있고 또한 지반 거동평가 결과로 작성된 래스터 데이터를 토대로 3차원 분석을 수행하여 시각화가 가능하도록 하였다. 그림 6과 그림 7은 현장에 대한 수치지도의 3차원 가시화 및 지반침하 결과의 3차원 가시화 결과를 나타내고 있다.

### 2.3.3 건물/매설관 손상평가모듈

#### (1) 건물손상평가 기법

본 모듈은 터널 굴착으로 인한 주변 건물의 손상정도를 평가하는데 있어 지반침하곡선을 이용하여 건물에 부과되는 인장변형률을 계산하고 이를 임계인장변형률과 비교하여 건물의 손상정도를 평가하는 Burland(1995)의 기법을 사용한다. Burland의 기법은 등가보개념을 적

용할 경우 지반침하로 인해 건물 중앙에 최대 처짐  $\Delta$ 가 발생할 경우 처짐비( $\Delta/L$ )는 휨 변형률( $\epsilon_b$ )과 전단 변형률( $\epsilon_d$ )의 관계를 이용하여 식 (7), (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta}{L} = \left( \frac{L}{12t} + \frac{3IE}{2tLHG} \right) \epsilon_b \quad (7)$$

$$\frac{\Delta}{L} = \left( 1 + \frac{HL^2G}{18IE} \right) \epsilon_d \quad (8)$$

여기서 H는 건물의 높이, L은 변곡점 혹은 침하트라프 범위내의 건물 길이를 타나내며, E와 G는 건물의 탄성계수 및 전단탄성계수를 의미한다. 또한 I와 t는 각각 등가보의 단면 2차모멘트 및 중립축으로부터 보 모서리까지의 최대거리를 의미한다.

지반변형에 의해 건물에 전달되는 수평변형률의 평가에 있어서는 국부적인 수평변형률보다는 건물 전반에 걸쳐 발생하는 평균 수평변형률을 적용하는 것이 보다 합당하며 따라서 건물에 부과되는 평균 수평변형률( $\epsilon_h$ )은 식 (9)를 이용하여 건물에 발생하는 절대 수평변위를 계산한 후 이를 건물의 길이로 나누어주는 방법으로 계산한다. 따라서 지표침하로 인해 건물에 유발되는 총 변형률은 식 (7)과 (8)로 계산된 휨 변형률 및 경사변형률에 수평변형률을 더하여 계산되며, 이중 큰 값이 건물의 손상도를 평가하는데 필요한 최대 인장변형률로 간주된다. 따라서 휨 변형으로 인한 총 변형률은 식 (10)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\epsilon_h = \frac{|v_A - v_B|}{l_{AB}} \quad (9)$$

$$\epsilon_M = \epsilon_h + \epsilon_b \quad (10)$$

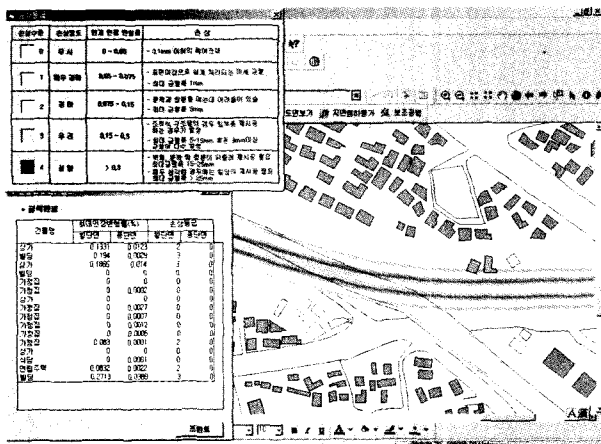


그림 8. 건물 손상평가

전단변형에 의한 총 인장변형률은 Mohr's circle을 사용하여 계산할 수 있으며 포아송비를 0.3으로 가정할 경우 식 (11)과 같이 주어진다. 자세한 내용은 유충식 등 (2002)의 논문에 제시되어 있다.

$$\epsilon_{dt} = 0.35 \epsilon_h + [(0.65 \epsilon_h)^2 + \epsilon_d^{0.2}]^{0.5} \quad (11)$$

위에서 설명한 기법을 토대로 건물 손상평가를 수행하기 위해서 손상의 위험이 있는 건물(터널 중심으로부터 3.0i 이내의 건물)을 미리 선정하여 그 건물들의 정보를 토대로 데이터베이스를 구축하였다. 건물의 모서리 아래의 지반변위는 건물의 변형과 비틀림을 계산하는데 사용되었고 이 결과들은 건물의 손상등급을 결정하는데 사용되었다. 각 건물들은 계산된 손상등급에 의해 특정한 색깔로 수치지도상에 표현된다. 조회하고자 하는 건물을 정보조회 모듈을 이용함으로써 상세한 계산 결과를 다른 윈도우창에 나타내는 것이 가능하다. 또한 각 건물에 대한 요약된 평가결과를 출력하는 것이 가능하도록 하였다. 그림 8 및 그림 9는 건물 손상평가 후의 손상등급 테이블/평가결과와 특정 건물의 세부적인 평가결과를 보여주고 있다.

## (2) 매설관 손상평가

본 모듈에서는 매설관의 손상평가를 수행하기 위하여 유충식(2001)에 의해 제안된 방법을 적용하였다. 유충식의 방법은 지표침하곡선을 바탕으로 파이프의 강성과 위치를 고려하여 최악의 상태에서 회전각( $\theta$ ), 인발(R)을 계산할 수 있으며, 평균경사를 토대로 한 식 (12)와 (13)을 이용하여 근사적으로 계산할 수 있다.

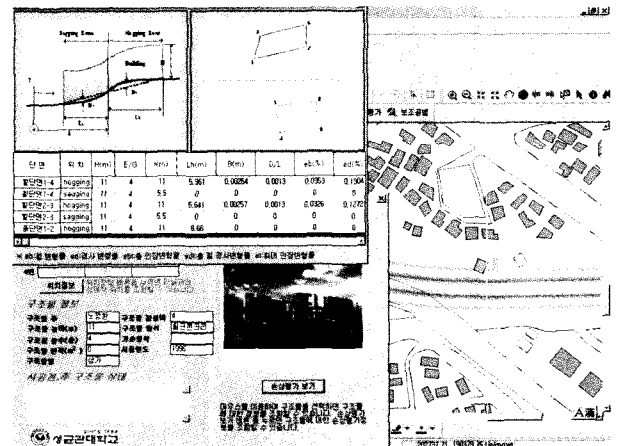


그림 9. 세부평가결과

$$\theta_y = 2 \tan^{-1} \left( \frac{V_s}{2\pi i^2} \right) \quad (12)$$

$$\theta_x = 2 \tan^{-1} \left( 0.4 \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i^2}} \right) \quad (13)$$

매설관의 인발변위는 인접한 두 관의 중앙점에서의 상대변위로 간주할 수 있으며, 따라서 발생 가능한 최대 인발변위는 임의의 관 중앙점이 최대 수평변위 발생지점에 위치할 경우 인접관과의 상대 수평변위를 계산함으로써 평가할 수 있다.  $L_j$ 를 단일관체의 길이라고 할 경우 터널과 직교하는 매설관 및 평행한 매설관의 최대 인발변위( $R$ )는 각각 식 (14)와 (15)를 토대로 평가할 수 있다. 위 식의 구체적인 손상평가와 적용방법은 유충식 (2001)의 논문에 제시되어 있다.

$$R_y = |v_{\max}| - |v_{(y=i+L_j)}| = \left( \frac{0.242 V_s}{z_0 - z} \right) \times \left\{ 1 - 1.65 \left( 1 + \frac{L_j}{i} \right) \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{L_j}{i} \right)^2 \right] \right\} \quad (14)$$

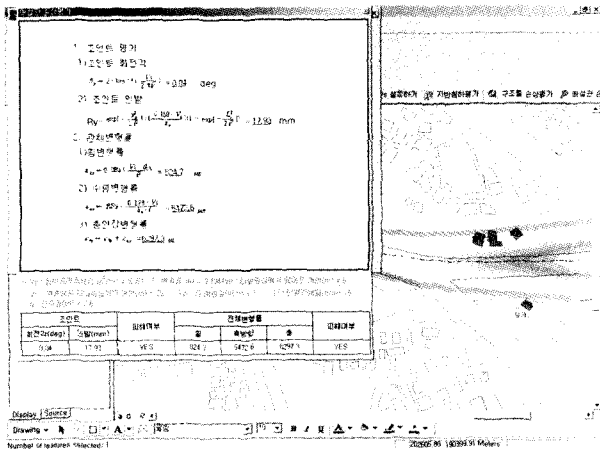


그림 10. 매설관 손상평가

$$R_x = |u_{\max}| - |u_{(x=x_j+L_j)}| = \left( \frac{0.159 V_s}{z_0 - z} \right) \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{L_j}{2i^2} \right] \right\} \quad (15)$$

위에서 설명한 매설관 손상평가 기법을 토대로 터널 주변의 매설관에 대한 손상도를 평가할 수 있도록 하였고 평가 항목으로는 조인트 및 관체 변형률에 대해 평가하여 각 항목에 대한 피해 여부의 판정이 가능하도록 하였고 매설관 정보조회 모듈과 매설과 손상평가 모듈 사이에 인터페이스를 작성하여 정보조회 모듈에서 매설관에 대한 정보를 조회함과 동시에 상세한 손상평가 결과의 조회가 가능하도록 하였다. 그림 10은 매설관 손상평가 수행 후 특정 매설관의 정보조회모듈과의 인터페이스를 통해 조회 가능한 손상평가 결과를 보여주고 있다.

### 2.3.4 보조공법 선정모듈

본 모듈은 다양한 지반 조건, 시공조건 및 현장 조건에 따른 보조공법 적용현황을 파악·데이터베이스화하여 인공지능망을 통하여 적절한 보조공법을 자동으로 선정해주는 준 전문가 시스템으로서 크게 터널의 천단 안정, 터널막장의 안정, 차수 및 지반 보강으로 분류하여 각 항에 해당하는 다양한 조건을 선택한 후 훈련된 인공지능망을 통해 입력된 조건에 적합한 보조공법을 선정할 수 있도록 하였다. 그림 11은 인공지능망을 이용하여 GIS-TURIMS에 구축된 보조공법 선정 모듈을 보여주고 있다.

## 2.4 시스템 구축절차

본 시스템은 GIS를 기반으로 하고 있기 때문에 현장

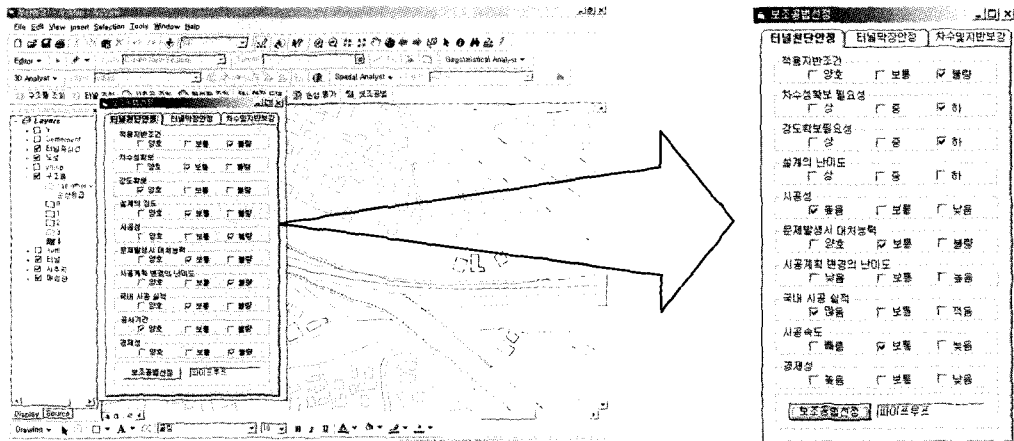


그림 11. 인공지능망을 이용한 보조공법 선정 모듈

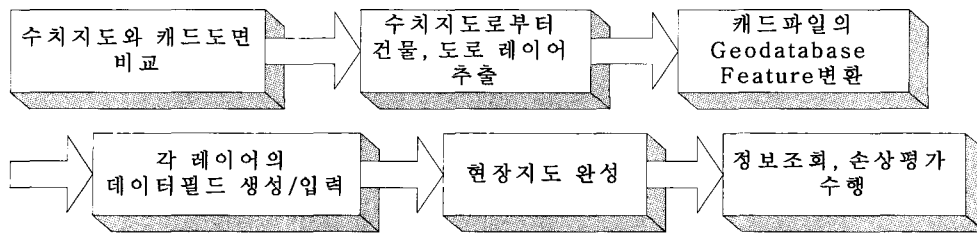


그림 12. 데이터 구축 흐름도

에 대한 여러 유용한 데이터를 쉽게 얻을 수 있는 반면 시스템 사용을 위한 데이터베이스를 구축하기 위해서는 많은 노력과 시간이 필요하다. 또, 확보된 데이터의 질은 손상평가 결과의 질을 결정하기 때문에 정확한 데이터의 확보가 무엇보다 우선되어야 한다. 본 장에서는 GIS-TURIMS 시스템 및 데이터를 구축하는 절차에 대하여 설명하였다. 그림 12는 GIS-TURIMS의 시스템 구축절차를 간략히 나타내고 있다.

### 3. 현장 적용

본 연구에서 개발된 GIS-TURIMS의 현장 적용성을 평가하기 위해 현재 ○○건설에서 시공하고 있는 ○○지하철 현장의 일부구간에 적용하여 평가를 수행하였다. 본 장에서는 이에 대한 내용을 상세히 다루었다.

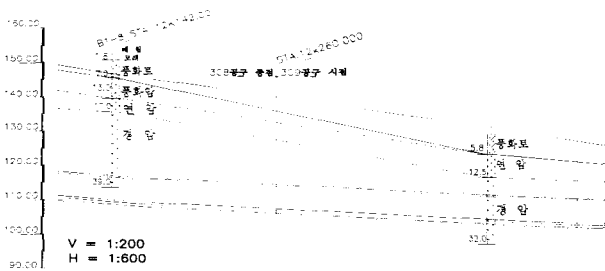


그림 13. 평가구간의 종단면도

표 2. 굴착 구간의 암반특성

| 비중   | 흡수율 (%) | 일축압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 탄성계수 (×10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> ) | 포 아 송 비 | 지 층 상 태 | 인장 강도 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 점착력 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 내부마찰각 (°) |
|------|---------|------------------------------|---|---------|---------|-----------------------------|---------------------------|-----------|
| 2.63 | 0.204   | 1,790                        | 7.61  | 0.21    | 경 암     | 145                         | 270                       | 57.9      |

표 3. 검토대상구간 시공조건

| 구간(STA)               | 터널단면 | 직경(m)  | 평균심도(m) | 굴착지반 | 비고   |
|-----------------------|------|--------|---------|------|------|
| 12K+260.00~12K+320.00 | PD-5 | 9.972  | 26      | 경암   | 단선병렬 |
| 12K+320.00~12K+463.70 | PD-4 | 10.052 | 23      | 경암   | 단선병렬 |

### 3.1 현장 개요

적용대상 구간으로는 터널 구간인 309공구 구간으로 STA. 12K+260.0~STA. 12K+463.7 구간으로 평가범위를 설정하였으며 터널구간의 종단면은 그림 13에 나타나 있다.

### 3.2 지반 특성

본 구간에는 1.2~2.5m 두께의 매립층 하부에 주로 자갈질 호박돌로 구성된 붕적층이 약 2.5~12.3m 두께로 발달되어 있으며 풍화대층이 매우 불규칙하게 분포되어 있다. 연암층은 풍화대층 하부에 화강암, 안산암, 규장암이 기반암으로 지표 하 5.8~18.2m의 두께로 분포되어 있으며 본선 터널이 통과하는 경암층은 신선한 하부 기반암으로 풍화상태는 신선한 상태이며 귀열상태는 보통내지 약간 귀열상태를 보인다. 표 2는 터널 구간의 암반특성을 요약하여 보여주고 있다.

### 3.3 터널 단면

표 3은 터널단면 및 지반조건 등을 나타내고 있으며 적용대상의 터널단면은 그림 14와 그림 15에 나타나고 있다.



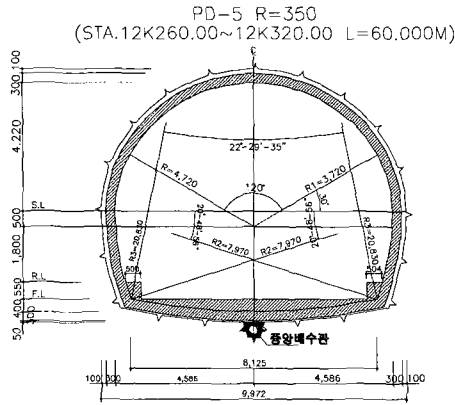


그림 14. PD-5 터널 단면도

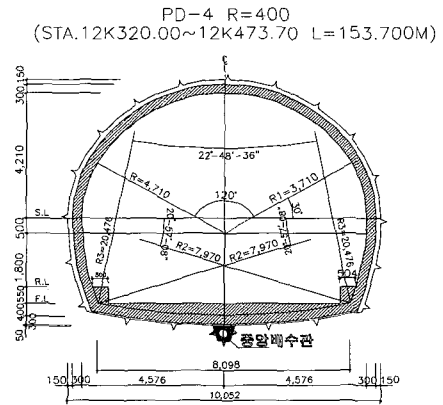


그림 15. PD-4 터널 단면도

### 3.4 평가조건

표 2의 터널구간의 암반특성에서 암반의 전단특성은 상당히 큰 수치를 보이고 있다. 하지만 이는 일반적으로 시추조사에 의해 획득된 무결암에 대한 실내실험결과를 나타낸 것으로 사료되며 다양한 절리가 형성되어 있는 실제 굴착지반의 전단특성을 대표한다고 할 수 없다. 따라서 본 평가에서는 실내실험 및 시추조사 결과 그리고 국내에서 일반적으로 적용되는 수치를 고려하여 산정하였다( $\phi = 37^\circ$ ,  $c = 200kPa$ ).

지반손실은 일반적으로 시공의 숙련도에 따라 많은 차이를 보이기 때문에 적절한 시기에 적절한 지반보강은 지반손실을 최소화 할 수 있다. 지반손실률은 시공수준에 따라 보통 약 1~2%정도를 보이는 것으로 알려져 있으며(Attewell, P. B., J. Yeates, and A. R. Selby) 2% 이상의 지반손실이 발생할 경우 터널의 안정성에 문제가 있는 것으로 간주된다. 이에 본 평가에서는 지반손실률 1%, 2%, 3%에 대한 매개변수 연구를 수행하여 각

지반손실률에 따른 지반 거동 및 주변 건물에 대한 손상 평가를 수행하였다.

### 3.5 지반 거동 평가

지반 거동 평가 시 가장 큰 영향인자 중 하나인 지반 손실률  $V_s(\%)$ 와 변곡점의 위치  $i$ 는 데이터 구축에서 이미 입력된 데이터를 토대로 Clough & Schmidt(1982)의 추정식을 적용하여 0.5m간격의 종단면에 대해 자동으로 계산되도록 하였다. 이는 일반적으로 터널의 심도가 일정하지 않기 때문에 0.5m 간격으로  $V_s$ (지반손실률)와  $i$ (변곡점)를 계산하기 위해서이다. 그림 16과 그림 17은 지반손실률 3%에 대한 시공 완료 후의 지반거동 평가 결과를 보여주고 있다. 표 4는 지반손실률에 따른 최대 침하량 및 최대수평변위를 보여주고 있다. 지반손실률에 따른 결과를 통해 알 수 있듯이 최대침하량은 지반손실률 1%에서 57mm, 2%에서 115mm, 3%에서 172mm가 발생하는 것으로 나타났으며 수평변위의 경우 지반

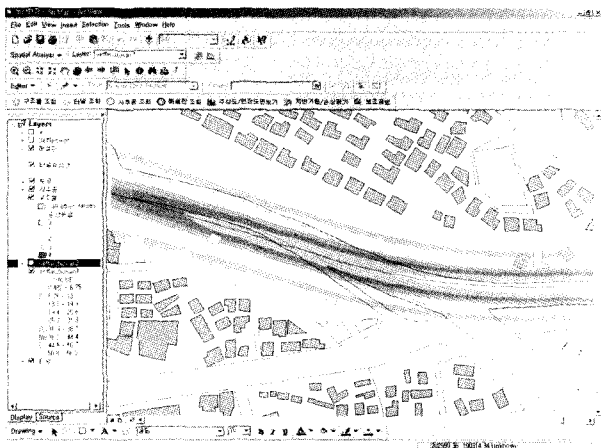


그림 16. 횡단면 침하평가 결과

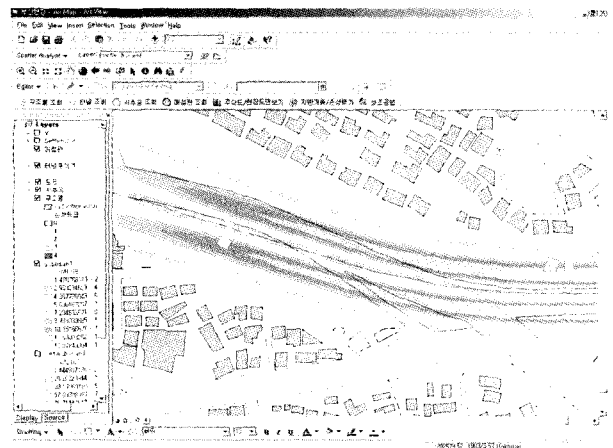


그림 17. 수평변위 평가 결과

표 4. 지반손실률에 따른 지반거동 평가결과

|                     |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|
| Vs(%)               | 1.0  | 2.0  | 3.0  |
| i(m)                | 9.74 | 9.74 | 9.74 |
| $\omega_{max}$ (mm) | 57   | 115  | 172  |
| $y_{max}$ (mm)      | 15   | 29   | 44   |

손실률 1%에서 15mm, 2%에서 29mm, 3%에서 44mm가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 최대침하 발생 지점의 변곡점은 9.74m로 모두 동일하게 나타나고 있다. 지반손실률 2% 이상에서 상당히 큰 침하와 수평변위를 보이고 있어 구조물손상평가 시 그 영향이 상당히 클 것으로 예상된다.

### 3.6 건물 손상평가

앞 절의 침하평가 결과를 토대로 검토대상 구간의 건물손상평가를 수행한 결과가 그림 17과 그림 18에 나타나 있다. 건물의 손상평가결과는 지반거동 뿐만 아니라 건물의 탄성계수와 전단계수의 비(강성비 E/G), 건물의 높이에 따라 현저한 차이가 발생하는데 본 검토에서는 현장건물의 대다수가 콘크리트(조적식) 건물임을 고려하여 E/G = 3.5를 적용하였다.

그림 18과 그림 19는 지반손실률 3%에 대한 굴착완료시점에서의 결과를 보여주고 있으며, 표 5는 검토대상구간에 존재하는 모든 건물에 대한 최대 인장변형률

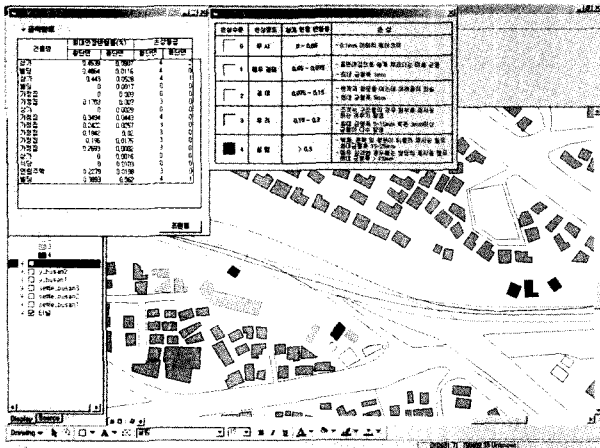


그림 18. 전체평가

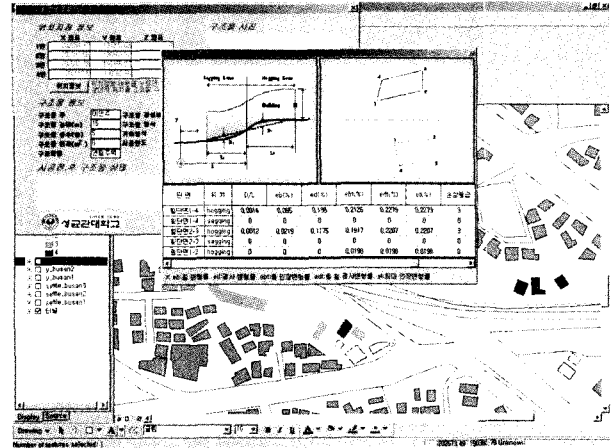


그림 19. 건물별 상세평가

표 5. 지반손실률에 따른 건물 손상평가 결과

| 건물명 | Vs=1% |        |        | Vs=2.0% |        |        | Vs=2.5% |        |        |   |
|-----|-------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---|
|     | 횡단면   | 종단면    | 손상등급   | 횡단면     | 종단면    | 손상등급   | 횡단면     | 종단면    | 손상등급   |   |
| 1   | 상가    | 0.1513 | 0.0302 | 3       | 0.3026 | 0.0604 | 4       | 0.4539 | 0.0907 | 4 |
| 2   | 빌딩    | 0.1621 | 0.0039 | 3       | 0.3243 | 0.0077 | 4       | 0.4864 | 0.0116 | 4 |
| 3   | 상가    | 0.1477 | 0.0176 | 2       | 0.2953 | 0.0352 | 3       | 0.443  | 0.0528 | 4 |
| 4   | 빌딩    | 0      | 0.0006 | 0       | 0      | 0.0011 | 0       | 0      | 0.0017 | 0 |
| 5   | 가정집   | 0      | 0.001  | 0       | 0      | 0.002  | 0       | 0      | 0.003  | 0 |
| 6   | 가정집   | 0.0568 | 0.0023 | 1       | 0.1135 | 0.0047 | 2       | 0.1703 | 0.007  | 3 |
| 7   | 상가    | 0      | 0.001  | 0       | 0      | 0.002  | 0       | 0      | 0.0029 | 0 |
| 8   | 가정집   | 0.1165 | 0.0148 | 2       | 0.2329 | 0.0295 | 3       | 0.3494 | 0.0443 | 4 |
| 9   | 가정집   | 0.0807 | 0.0086 | 2       | 0.1615 | 0.0171 | 3       | 0.2422 | 0.0257 | 3 |
| 10  | 가정집   | 0.0647 | 0.0067 | 1       | 0.1294 | 0.0133 | 2       | 0.1942 | 0.02   | 3 |
| 11  | 가정집   | 0.0653 | 0.0058 | 1       | 0.1306 | 0.0116 | 2       | 0.196  | 0.0175 | 3 |
| 12  | 가정집   | 0.0898 | 0.0001 | 2       | 0.1795 | 0.0001 | 3       | 0.2693 | 0.0002 | 3 |
| 13  | 상가    | 0      | 0.0006 | 0       | 0      | 0.0012 | 0       | 0      | 0.0018 | 0 |
| 14  | 식당    | 0      | 0.0034 | 0       | 0      | 0.0068 | 0       | 0      | 0.0103 | 0 |
| 15  | 연립주택  | 0.076  | 0.0066 | 2       | 0.1519 | 0.0132 | 3       | 0.2279 | 0.0198 | 3 |
| 16  | 빌딩    | 0.1298 | 0.0207 | 2       | 0.2595 | 0.0413 | 3       | 0.3893 | 0.062  | 4 |

평가결과표 및 손상등급을 보여주고 있다. 지반손실률에 따른 손상평가 결과는 지반손실률 1%의 경우 터널과 상당히 근접한 2개의 건물에 대해 손상수준 '3'으로 평가되었으며 그 외 대부분이 손상수준 '2' 이하로 평가되어 경미한 손상을 보이고 있다. 그러나 지반손실률 2%에서는 8개의 건물이, 3%에서는 11개의 건물이 손상수준 '3' 이상으로 평가되었다. 결과를 통해 알 수 있듯이 지반손실률 1%의 경우 터널굴착으로 인한 피해는 미미한 것으로 나타나고 있으나 2%이상부터 상당수의 건물이 손상수준 '3' 이상으로 상당한 피해가 예상되고 특히 3%의 경우 상당수의 건물이 손상수준 '4'로 평가되어 매우 심각한 피해가 예상된다. 이에 손상수준 '3' 이상의 건물에 대해서는 별도의 '엄밀평가' 수행이 요구되고 평가 결과에 따른 적절한 보강대책이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 이러한 평가 결과에 근거하여 터널 시공 시에는 지반손실률을 1%이하로 억제할 경우 주변 건물에 대한 피해를 최소화할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 정보화 시공관리의 도입을 위해 정보화 기법을 터널 분야에 접목시키는 방안의 일환으로서 GIS기반의 터널시공 시 위험도 관리 시스템을 개발하였다. 개발된 GIS-TURIMS는 방대한 데이터를 효율적으로 관리 및 조작할 수 있으며 데이터의 시각화라는 장점을 가진 GIS와의 접목을 통해 터널설계 및 시공자료, 지반 및 지질정보, 구조물 정보 등을 보다 효과적으로 관리/조작 할 수 있도록 하였다. 또한 GIS 데이터베이스와의 연동은 진보된 GUI기능을 가능케 하여 다양한 시공정보, 침하평가 및 손상평가결과를 그래픽으로 확인 할 수 있도록 하였다. 이러한 사용자의 편의성 도모를 통해 본 시스템은 사용자가 GIS프로그램에 친숙도가 낮더라도 터널굴착 시 지반거동과 건물/매설관 손상여부를 1차적으로 검토할 수 있게 함으로써 위험도를 사전에 평가하고 이에 대비하는데 적용될 수 있다.

아울러 GIS-TURIMS에는 시공조건 등의 입력조건을 토대로 적합한 보조공법을 자동으로 선정할 수 있도록 인공지능망을 이용하여 모듈화 하여 사용자가 모듈상의 다양한 시공조건 및 현장 조건을 선택하여 현장조건

에 합당한 보조공법을 선정할 수 있는 준 전문가 시스템으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 개발된 GIS-TURIMS를 지하철 시공현장에 적용하여 설계/시공 단계에서 터널굴착으로 인한 지반거동을 평가하고 건물의 손상위험도 평가를 통해 시공대책 수립에 있어서의 적용성을 검토하였으며 그 결과 터널현장에 그 활용도가 매우 높을 것으로 사료된다.

본 연구에서 개발된 시스템은 다양한 정보화 기법을 터널분야에 성공적으로 접목시켰다는데 큰 의의가 있으며 현대 터널 시공이 주변 환경에 미치는 영향을 최소화해야 한다는 요구조건을 만족시키는데 필요한 평가 시스템으로써 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 코오롱건설 주식회사와 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터(SAFE)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 유충식, 김재훈, 박영진, 유정훈 (2002), "GIS기반의 터널굴착시 건물/매설관 손상평가 시스템 개발", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 311-318.
2. 유충식 (2001), "터널시공에 따른 지반거동에 의한 지중매설관 손상 평가", 한국지반공학회 논문집, 제17권 4호, 2001년 8월, pp.71-86.
3. Attewell, P. B. and Woodman, J. P. (1982), "Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil", *Ground Engineering*, Vol.15, No.8, pp.13-22.
4. Attewell, P. B., Yeates, J, and Selby, A. R. (1986), *Soil Movements Induced by Tunnelling and their Effects on Pipelines and Structures*. Blackie, New York.
5. Clough, G. W. and Schmidt, B. (1981), "Design and performance of excavations and tunnels in soft clay", *In Soft Clay Engineering*, Elsevier, pp.569-634.
6. Peck, R. B. (1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground", State of the Art Report, *Proc. 7th Int. Conf. SMFE*, Mexico City, State of the Art Volume, pp.225-290.
7. Burland, J.B. (1995), "Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavations", Invited Special Lecture to IS-TOKYO '95: 1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering.

(접수일자 2003. 9. 14, 심사완료일 2003. 12. 1)