

GIS 기반의 터널굴착시 건물/매설관 손상평가 시스템 개발 Development of A GIS-based Tunnelling-induced Building/Utility Damage Assessment System

유충식¹⁾, Chung-Sik Yoo, 김재훈²⁾, Jae-Hoon Kim, 박영진³⁾, Young-Jin Park,
유정훈⁴⁾, Jeong-Hoon Yoo

¹⁾ 성균관대학교 토목공학과 부교수, Prof. Dept. of Civil Engrg. Sungkyunkwan, Univ.

²⁾ 성균관대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg. Sungkyunkwan, Univ.

³⁾ 코오롱건설(주) 건설기술연구소 부장, General Manager, Institute of Construction Technology,
Kolon Engineering & Construction,

⁴⁾ 코오롱건설(주) 건설기술연구소 대리 Assistant Manager, Institute of Construction Technology,
Kolon Engineering & Construction,

SYNOPSIS : A GIS-based tunnelling risk management system (GIS-TURIMS) has been developed in this study. The developed system uses ArcView 8.2 as a basic platform and the built-in interface (VBA) has been used to perform first-order simplified analyses for prediction of tunnelling-induced ground movements and building damage assessment. The main emphasis in 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 with fully taking advantage of the GIS technologies. This paper describes the concept and details of the GIS-TURIMS development and implementation

Key words : GIS, tunnelling, ground movements, buildings/utilities damage assessment,

1. 서 론

도심지 개발이 급속히 성장함에 따라 교통수단 시스템과 지하 시설물들을 위해 새로운 터널공사가 필요 되어지고 있다. 이러한 환경으로부터 터널시공은 교통수단과 매설관망을 위해 지하공간을 구축하는데 있어 다른 건설공사 보다 흥미를 가져오고 있다.

터널시공 동안 터널주위의 지반의 응력상태가 변화되고, 지반의 손실이 부득이하게 발생한다. 이러한 응력의 변화와 지반의 손실은 지반거동을 통하여 지반을 깨닫게 해주고 결국 전이, 회전, 비틀림등 가능한 손상을 통하여 주변 건물과 매설관의 변형을 부과한다. 도심지 터널시공 계획의 비용 중 실질적인 부분은 지반의 거동을 막기 위해 쓰여 진다. 이러한 관점에서 지반거동의 예견과 인접 건물/매설관의 손상평가는 도심지 터널공사의 계획, 설계 그리고 시공에 중요한 부분이 되어왔다.

GIS는 방대한 데이터 조작이 요구되는 다양한 분야에서 유용한 도구로서 사용되고 있다. GIS를 활용함으로써 터널시공시 위험 관리를 보다 확실히 할 수 있다. 그리고 네덜란드에서 개발된 GIS기반의 침

하 위험 관리 시스템은 Amsterdam시의 지하철 시공에 사용(Netzel & Kallberg, 2000)되었지만, 이 시스템은 단순하며 보수적인 경향이 있다.

터널시공시 위험관리를 위한 보다 효율적인 도구를 개발하기 위한 지속적인 노력으로 인하여 본 연구에서 GIS기반의 터널굴착시 위험 관리 시스템(GIS-TURIMS)을 개발하였다. 이 시스템의 궁극적인 목적은 터널굴착시 지반의 거동과 이로 인한 주변 건물/매설관의 영향을 사용자가 미리 대비하고자 함이다. 이러한 목표를 성취하기 위해서 첫 단계로 터널굴착시 위험 관리를 할 수 있는 GIS기반의 모델을 개발하는데 노력하였다. 이 모델은 터널시공시 위험 관리를 할 수 있으며, GIS기반을 활용함으로써 사용자가 입력정보를 수정하고, 추가함으로써 시공단계에서 보다 실질적인 결과를 가져다준다. 이 시스템은 Netzel & Kallberg(2000)에 의해 개발된 시스템과 다르다. 철저한 분석기능을 가지고 있는 GIS 구조상에서 더욱 복잡한 지반거동 예측과 손상평가를 수행할 수 있다. 이 시스템의 개념과 개발과정은 본문에서 설명하였다.

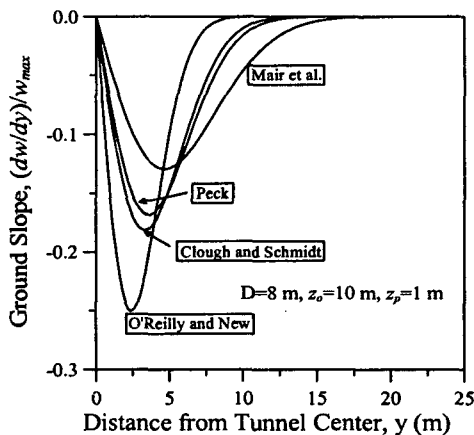
2. 지반거동 예측과 손상평가

2.1 지반 거동 예측

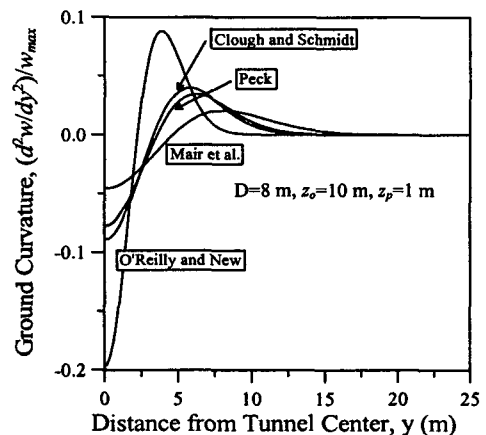
Peck (1969), O'Reilly & New (1982) and extended by New & O'Reilly (1991)에 의해 제안된 예측 방법을 터널시공 목적과 관련하여 지반거동의 크기와 범위를 예측하기 위해 GIS-TURIMS에 적용하였다. 변곡점 i 는 지반의 경사와 곡률에 중요한 영향을 가져다주므로 침하곡선 이내에 위치한 건물/매설관의 손상평가의 결과에 영향을 미친다. 표 1은 변곡점의 위치를 추정하는데 쓰이는 다양한 식을 보여주고 있다. 그림 1은 표 1에 제시된 변곡점 산정식을 토대로 지반 경사 및 곡률을 비교하고 있다. 보는 바와 같이 변곡점의 위치가 침하곡선에 미치는 영향을 알 수 있으며, 따라서 침하곡선을 추정할 경우 현장의 지반조건 및 시공조건에 고려하여 변곡점의 위치를 선정하여야 할 것이다.

표 1 다양한 변곡점(i) 제안식

제 안 자	제 안 식
Peck (1969)	$i = 0.2 (D + z_0)$
O'Reilly와 New (1982)	$i = 0.43(z_0 - z) + 1.1$ (점토) $i = 0.28(z_0 - z) - 0.1$ (모래)
Clough와 Schmidt (1982)	$i = \frac{D}{2} \left(\frac{z_0}{D} \right)^{0.8}$
Mair 등 (1993)	$i = z_0 \left[0.175 + 0.325 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right) \right]$



(a) 지반경사



(b) 지반곡률

그림 1 변곡점 위치에 따른 지반경사 및 곡률

2.2 건물손상평가

Burland(1995)에 의해 제안된 건물손상평가 과정을 GIS-TURIMS에 적용하였다. 이 과정은 건물을 집중하중에 의해 최대 처짐 Δ 가 발생하는 길이 L 과 높이 H 의 이상화된 단순보(simple beam)로 취급하였다. 등가보개념을 적용할 경우 지반침하로 인해 건물 중앙에 최대 처짐 Δ 가 발생할 경우 처짐비 (Δ/L)와 휨 변형률(ϵ_b)과 전단 변형률(ϵ_d)의 관계는 식 (1), (2)와 같다.

$$\frac{\Delta}{L} = \left\{ \frac{L}{12t} + \frac{3IE}{2tLHG} \right\} \epsilon_b \quad (1)$$

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

여기서, H 는 건물의 높이, L 은 변곡점 i 혹은 침하 트라프 범위내의 건물 길이를 나타내며 E 와 G 는 건물의 탄성계수 및 전단탄성계수를 의미한다. 또한 I 와 t 는 각각 등가보의 단면 2차 모멘트(sagging 영역에서는 $H^3/12$, hogging영역에서는 $H^3/3$) 및 중립축으로부터 보 모서리까지의 최대거리(sagging 영역에서는 $H/2$, hogging영역에서는 H)를 의미한다. 일반적으로 최대 휨 변형률 ϵ_b 와 경사변형률 ϵ_d 는 각각 보의 중심 및 건물길이의 1/4인 지점에서 발생한다. 한편, 강성비 E/G 를 선정하는데 있어 조적식 구조물의 경우 포아송비가 0.3인 등방성 재료라고 가정할 경우 $E/G=2.6$ 으로 간주하는 것이 일반적이다.

터널굴착으로 인해 발생하는 지반거동은 건물의 자중으로 발생하는 지반거동의 형태에 비해 매우 큰 수평변형률을 동반하게 되는데 이러한 수평변형률은 건물의 잠재적 손상을 발생시키는 매우 중요한 인자로 간주된다(Boscardin & Cording 1981). 한편, 지반변형에 의해 건물에 전달되는 수평변형률의 평가에 있어서는 국부적인 수평변형률 보다는 빌딩 전반에 걸쳐 발생하는 평균 수평변형률을 적용하는 것이 보다 합당하며 따라서 건물에 부과되는 평균 수평변형률 ϵ_h 는 식 (3)을 이용하여 건물에 발생하는 절대 수평변위 $|v_A - v_B|$ 를 계산한 후 이를 건물의 길이(l_{AB})로 나누어주는 방법으로 계산한다. 따라서 지표침하로 인해 건물에 유발되는 총 변형률은 식 (1)과 (2)로 계산된 휨 변형률 및 경사 변형률에 식 (3)으로 계산되는 수평변형률을 더하여 계산되며, 이중 큰 값이 건물의 손상도를 평가하는데 필요한 최대 인장변형률로 간주된다. 따라서 휨 변형으로 인한 총 변형률은 식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\epsilon_h = \frac{|v_A - v_B|}{l_{AB}} \quad (3)$$

$$\epsilon_H = \epsilon_h + \epsilon_b \quad (4)$$

한편, 전단변형에 의한 총 인장변형률은 Mohr's circle을 사용하여 계산할 수 있으며 포아송비를 0.3으로 가정할 경우 식 (5)와 같이 주어진다.

$$\epsilon_d = 0.35 \epsilon_h + [(0.65 \epsilon_h)^2 + \epsilon_d^2]^{0.5} \quad (5)$$

2.3 매설관 손상평가

Bracegirdle(1996)에 의해 제안된 방법을 GIS-TURIMS에 적용하였다. 이 방법은 지표침하곡선을 바탕으로 파이프의 강성과 위치를 고려하여 최악의 상태에서의 회전각, 인발을 계산할 수 있으며, 평균경사를 토대로 구축된 식 (6)과 (7)을 이용하여 근사적으로 계산할 수 있다.

$$\theta_y = 2 \tan^{-1} \left(\frac{V_s}{2\pi i^2} \right) \quad (6)$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(0.4 \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i^2}} \right) \quad (7)$$

한편, 조인트 자체의 인발저항력을 무시하고 관체는 강성이라고 가정하면 조인트에서의 인발변위는 횡·종단면상에서 지반의 수평변위를 토대로 결정할 수 있다. 즉, 매설관의 인발변위는 인접한 두 관의 중앙점에서의 상대 변위로 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 단일 관체의 길이라고 할 경우 터널과 직교하는 매설관 및 평행한 매설관의 최대 인발변위는 각각 식 (8)과 (9)를 토대로 평가할 수 있다. 표 2는 Attewell등(1986)에 의해서 제안된 허용 조인트 회전각 및 인발변위를 보여주고 있다.

$$R_y = |v_{\max}| - |v_{(y=i+L_j)}| = \left(\frac{0.242 V_s}{z_o - z} \right) \left\{ 1 - 1.65 \left(1 + \frac{L_j}{i} \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(1 + \frac{L_j}{i} \right)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

$$R_x = |u_{\max}| - |u_{(x=x_j+L_j)}| = \left(\frac{0.159 V_s}{z_o - z} \right) \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-L_j^2}{2i^2} \right] \right\} \quad (9)$$

표 2 매설관 종류에 따른 허용 증가 회전각 및 인발변위(After Attewell 등, 1986)

조인트 방식 및 상태	회전각 (degree)	인발변위 (mm)
Lead-yarn 조인트의 가스관 (초기누출 有)	0	0
Lead-yarn 조인트의 가스관 (초기누출 無)	1.0	10
Lead-yarn 조인트의 상수도관	1.5	15
고무 개스킷 조인트의 가스관 혹은 상수도관	2.0	25

관의 손상을 유발시키는 변형율은 인장변형율이며 이는 크게 지반의 부등침하로 인한 휨변형율과 매설관과 평행한 방향의 수평변위로 인한 수평 인장변형율로부터 발생한다. 따라서 매설관의 최대 인장변형율은 최대 곡률 및 수평변형율이 발생하는 지점(횡·종단면 각각 $y = \sqrt{3}i$ 및 $x - x_j = \pm i$)에서의 휨변형율(지반곡률)과 수평변형율을 조합하여 계산할 수 있다.

일반적으로 매설관 자체의 강성과 매설관-지반 경계면에서의 미끄러짐 현상, 그리고 매설관의 조인트는 관의 축방향 변형을 현저히 저하시키는 역할을 하므로 관에 평행한 지반의 움직임으로 인한 관체의 인장변형율을 평가하는데 있어서 이러한 사항을 무시하고 지반의 수평변형율을 관체의 인장변형율로 간주할 경우 보수적인 결과를 낳게 된다. 이러한 맥락에서 Attewell 등(1986)은 관체의 인장변

형상을 평가하는데 있어 매설관이 보유하는 강성을 고려하기 위해 Poulos와 Davis(1980)가 제안한 팽창성 지반에 시공되는 말뚝의 경우 지반의 수축 혹은 팽창으로 인해 발생하는 말뚝의 인장변형을 평가기법을 토대로 매설관의 강성으로 인한 변형을 감소계수 (RF_x, RF_y)를 제안하였다.

$K^* = E_p R_A / E_g$ 는 지반-매설관 강성계수로서 매설관과 지반의 상대적 강성을 나타내는 계수이며 여기서 E_p 와 E_g 는 각각 관 및 관 주변지반의 탄성계수, A_p 는 관벽의 단면적, 그리고 R_A 는 $A_p / \frac{1}{4} \pi d^2$ 로 표현되는 관의 단면적비로 정의된다(여기서 d 는 관의 외경). 따라서 횡·종단면상의 최대인장변형율은 식 (10)~(15)를 토대로 평가할 수 있다. 표 3은 Attewell 등(1986)과 Bracegirdle 등(1996)이 제안한 설계시 적용되는 설계변형을 및 손상평가지 적용할 수 있는 허용 변형을 증가량을 보여주고 있다.

횡단면)

- 휨변형율

$$\epsilon_{by} = \frac{d}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)_{\max} = \frac{V_s d}{\sqrt{2\pi} i^3} \exp\left[-\frac{3}{2}\right] = 0.089 \frac{V_s d}{i^3} \quad (10)$$

- 수평변형율

$$|\epsilon_{ay}| = RF_y \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{\max} = \frac{RF_y}{z_o - z} \frac{2 V_s}{\sqrt{2\pi} i} \exp\left[-\frac{3}{2}\right] = RF_y \frac{0.178 V_s}{(z_o - z) i} \quad (11)$$

- 총 인장변형율

$$\epsilon_{by} = \epsilon_{by} + |\epsilon_{ay}| \quad (12)$$

종단면)

- 휨변형율

$$\epsilon_{bx} = \frac{d}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_{\max} = \frac{\pm V_s}{2\pi i^3} \exp\left[-\frac{1}{2}\right] \frac{d}{2} = 0.097 \frac{V_s d}{i^3} \quad (13)$$

- 수평변형율

$$|\epsilon_{ax}| = RF_x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{\max} = \frac{RF_x}{z_o - z} \frac{V_s}{2\pi i} \exp\left[-\frac{1}{2}\right] = RF_x \frac{0.097 V_s}{(z_o - z) i} \quad (14)$$

- 총 인장변형율

$$\epsilon_{bx} = \epsilon_{bx} + |\epsilon_{ax}| \quad (15)$$

표 3 허용 변형을 증가 (After Attewell 등, 1986; Bracegirdle 등, 1996)

매설관 재질	설계 변형율($\mu\epsilon$)		허용 변형율 증가 ($\mu\epsilon$)	
	인장	압축	인장	압축
Pit 회주철 (pit cast grey iron)	370	1550	100	1200
Spun 회주철 (spun cast grey iron)	430~490	1770~2040		
연주철(ductile iron)	820	1020	500	700

3. GIS-TURIMS 개발

3.1 시스템 기반과 개요

GIS-TURIMS의 주 기반으로 ESRI에서 개발한 ArcView8.2를 사용하였다. ArcView는 데스크탑 GIS로 지질학적 데이터를 만들고 편집하는 통합능력과 데이터의 시각화, 질의, 분석을 수행하는 지도 제작 소프트웨어이다.

ArcView는 Windows 환경에서 사용할 수 있으며, VBA(Visual Basic Application)를 포함하고 있어 사용자가 원하는 모듈을 만들 수 있다. ArcView는 ArcMap, ArcCatalog, ArcToolbox 세가지로 구성되었다. ArcMap은 데이터의 표시, 질의 그리고 분석기능을 제공하고, ArcCatalog는 지리학적인 데이터를 수정, 추가등 관리를 하고 데이터를 만드는데 쓰인 모든 정보를 볼 수 있으며, ArcToolbox는 기존의 데이터를 과업에 맞게 전환시켜주는 기능을 제공한다. 이와 같이 ArcView 내의 세가지 기능을 사용함으로써 지도를 제작하고 데이터 관리, 지리학적 분석, 데이터 편집등 GIS과업을 수행하는데 필요로 하는 모든 기능을 사용할 수 있다.

GIS-TURIMS의 뚜렷한 양상은 터널시공 중에 더욱 효과적으로 데이터를 관리할 수 있으며, ArcView사용자가 원하는 모듈을 개발할 수 있도록 도와주는 VBA를 이용하여 지반거동의 예측과 건물/매설관 손상평가를 철저하게 수행할 수 있다. GIS-TURIMS의 세가지 모듈은 1) 정보조회; 2)지반 거동 분석; 3) 건물/매설관 손상평가 등으로 나누어진다. 각각의 모듈은 독립적인 기능을 가지지만 다른 모듈과 함께 연동된다. GIS기반은 지반거동의 예측과 손상평가를 수행하는데 있어 외부모듈을 연결하는데 사용할 수 있다.

3.2 현장정보모듈

이 모듈은 건물/매설관 정보, 지반정보, 터널설계/시공 정보등 다양한 정보를 사용자에게 보여준다. 이 정보들은 ArcView 내에 존재하는 VBA(Visual Basic Application)로 만들어진 폼에 의해 보여지게 된다. 이 모듈에서 이용할 수 있는 정보는 다음과 같다.

- (1) Building
 - 구조물 형식 • 기초형식 • 건물주, 시공연도 • 구조물 위치 • 구조물 사진
- (2) 매설관
 - 매설관 형식 • 조인트 형식 • 단일관체길이 • 시공자, 시공날짜 • 매설깊이
- (3) 지반
 - 시추정보 • 지질학적 성격(RQD, RMR, C, ϕ)
- (4) 터널
 - 설계구간 • 터널 폭 • 터널주변의 지반특성 • 터널타입 • 지보설계 • 보조공법

그림 2와 3은 현장정보 모듈을 보여주고 있다.

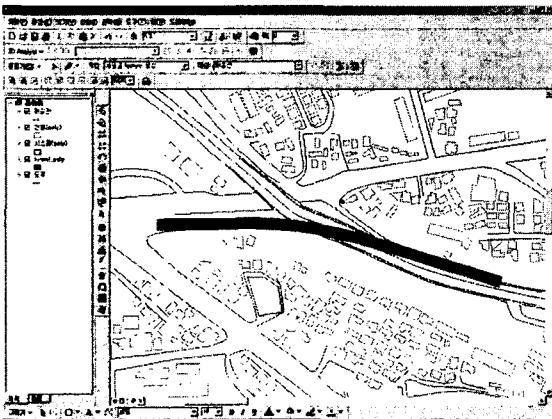


그림 2 현장정보 모듈(현장)

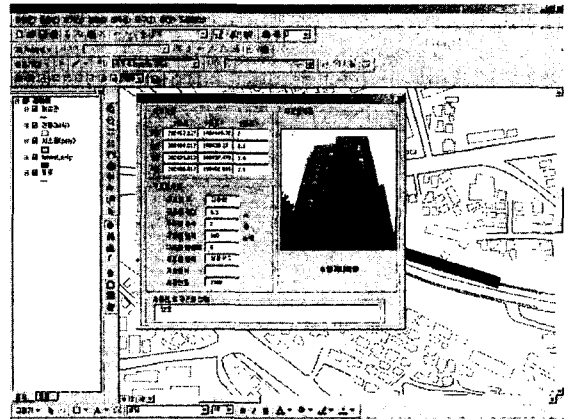


그림 3 현장정보 모듈(건물정보)

3.3 지반침하 분석 모듈

이 모듈은 2.1절에서 설명한 과정을 토대로 터널굴착시 지반거동을 계산한다. 터널굴착으로 인한 지반의 변위를 계산하고자 VBA(Visual Basic Application) 환경을 이용하여 ArcView 내에 모듈을 개발하였다. 계산과정을 토하여 얻어진 지반 변위, 경사, 변형등의 데이터를 그리드 파일 형식으로 만들어 ArcView의 확장 프로그램인 ArcView Spatial Analyst를 사용하여 사용자가 보다 입체적으로 결과를 볼 수 있도록 하였다.

지반변위 계산과정을 간소화 하고자 터널을 일직선으로 간주하고 이에 맞추어 터널깊이와 지반정보를 수정하였다. 지반변위를 얻고자 1.0m길이로 횡방향을 연속적으로 나누어 2D 분석을 수행하였으며 종방향 변위의 영향은 이 시스템에서 고려하지 않았다. 이러한 간소화 과정은 터널굴착시 종방향 변위가 횡방향 변위보다 인접 건물과 매설관 손상에 영향을 덜 부과한다는 사실을 기반으로 수행하였다. 지반변위 분석의 결과는 사용자가 한눈에 위험 지역을 정확히 판단하고자 등고선 형태로 지도위에 표현하였다. 그림 4는 지반변위 분석의 결과를 보여준다.

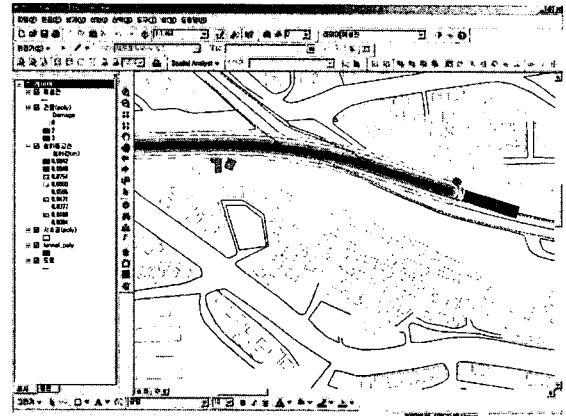


그림 4 지반변위 분석 결과(침하)

3.4 건물/매설관 손상평가 모듈

이 모듈 또한 VBA(Visual Basic Application)를 사용하여 개발하였으며 손상이 가능한 건물(터널중심으로 부터 2.5i 이내의 건물)을 미리 선정하여 그 건물들의 정보를 입력하였다. 입력된 정보를 바탕으로 변형과 비틀림을 계산하여, 침하와 경사가 1cm, 1/500보다 큰 지역안의 건물에 대해서는 좀더 상세한 분석을 수행하였다. 건물의 코너 아래의 지반변위는 건물의 변형과 비틀림을 계산하는데 사용되어졌고 이 결과들은 건물의 손상등급을 결정하는데 사용되었다. 각 건물들은 계산된 손상등급에 의해 특정한 색깔로 지도상에 표시된다. 또한 중요한 건물을 더블 클릭함으로써 상세한 계산 결과를 다른 윈도우창에 나타내는 것이 가능하다. 매설관 역시 같은 평가 방법으로 수행했다. 그림 5와 6은 건물/매설관 평가 모듈을 보여주고 있다.

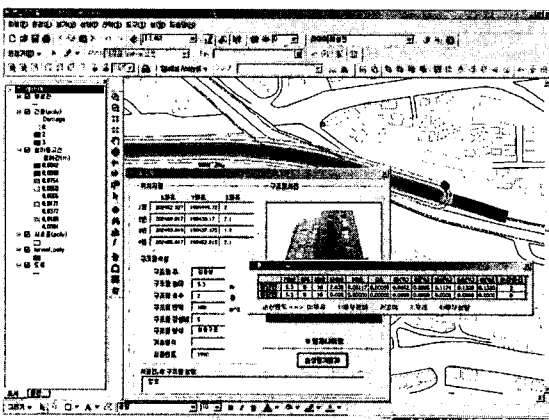


그림 5 건물/매설관 손상평가 모듈(건물)

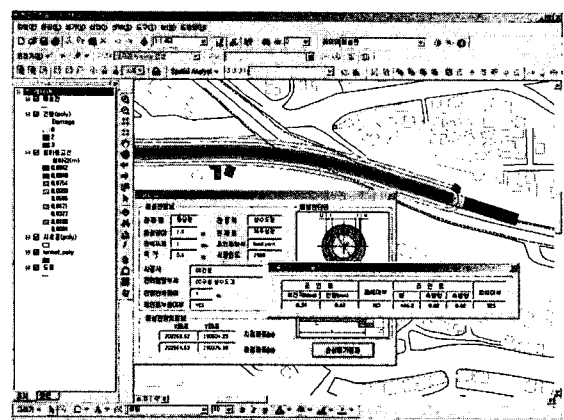


그림 6 건물/매설관 손상평가 모듈(매설관)

4. 향후개발

유용한 데이터를 제공하기 위해 개발한 GIS기반의 시스템은 터널시공시 위험도를 관리하는데 사용될 수 있다. 이 시스템은 사용자가 인터넷을 이용하여 사용할 수 있는 웹기반의 시스템으로 확장시키고, 보조공법의 선정을 위한 인공신경망(Artificial Neural Network) 기반의 모듈을 추가 할 것이다.

지반변위분석과 손상평가에 적용한 간소화 분석의 한도를 더욱 정교한 분석 과정을 통하여 정확한 위험 평가를 수행하고자 한다. 터널굴착시 지반 변위를 능률적으로 예측하고자 인공신경망 모듈 도구를 개발하는데 노력 할 것이다. 최근에 생겨난 GIS 기술사용을 향후에는 더욱 발전시켜 건물/매설관의 위험 평가를 가능성에 근거한 구조 틀 안에서 수행 할 것 이다. 이러한 노력들은 최종적으로 웹기반의 터널 시공 관리 시스템을 개발을 가져올 것 이다.

5. 결론

이 논문은 GIS기반의 터널굴착시 건물/매설관 손상평가 시스템(GIS-TURIMS)을 설명하고 있다. 이 시스템은 사용자가 간단히 사용할 수 있고, 터널굴착시 지반거동 예측과 건물, 매설관의 손상평가를 유용하게 할 수 있도록 GIS기술을 토대로 개발되었다. GIS-TURIMS는 모든 유용한 방법 안에서 방대한 양의 데이터 조작을 가능하게 하는 GIS의 장점을 이용하여 지반거동 예측과 건물/매설관 손상평가를 사용자가 수행하도록 하였다. 이 시스템은 터널 기술자에게 터널굴착시 지반거동과 건물/매설관의 손상 지역을 미리 확인시켜 주어 터널굴착 단계에 있어서 발생하는 위험을 미리 대비하도록 하였다.

GIS-TURIMS는 데스크탑에서 구동되는 시스템으로 ArcView8.1이상의 버전을 개인 컴퓨터에 설치를 하여야만 사용을 할 수 있으나, 향후 웹기반 시스템을 개발하여 인터넷이 사용되어 지는 모든 곳에서 사용자가 원하는 현장의 지반거동과 건물/매설관의 손상평가를 수행할 수 있도록 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 코오롱 건설 주식회사와 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE)의 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Attewell, P.B. et al. 1986. *Soil Movements Induced by Tunnelling and their Effects on Pipelines and Structures*. Blackie, New York.
2. Boscardin, M.D. & Cording, E.G. 1987. "Building response to excavation-induced settlement", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE. 115(1), pp.1~21.
3. Bracegirdle, A., et al. 1996. "A methodology for evaluating potential damage to cast iron pipes induced by tunnelling", *Proc. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London*, pp. 659~664.
4. Burland, J.B. & Wroth, C.P. 1974. "Settlement of buildings and associated damage", SOA Review, *Conf. Settlement of Structures*, Cambridge. Pentech Press. London, pp.611~654.
5. Netzel, H. & Kallberg, F.J. 1999. "Numerical damage risk assessment studies on masonry structures due to TBM-tunnelling in Amsterdam", *Proceedings Geotechnical Aspects on*
6. O'Reilly, M.P. & New, B.M. 1982. "Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction". *Proc. Tunnelling '82*, Inst. Mining & Metallurgy, London, pp.173~188.