

## GIS기반을 이용한 도심지 터널굴착에 따른 인접 구조물 손상평가 시스템 개발

### Development of GIS Based Risk Assessment System for Adjacent Structures Due to Tunnelling-Induced Ground Movements in Urban

윤효석<sup>1)</sup>, Hyo-Seok Yoon, 박용원<sup>2)</sup>, Yong-Won Park, 오영석<sup>3)</sup>, Young-Seok Oh, 김제규<sup>4)</sup>, Je-Gyu Kim

<sup>1)</sup> 명지대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D Student, Dept. of Civil Engrg., Myongji Univ.

<sup>2)</sup> 명지대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Myongji Univ.

<sup>3)</sup> 시설안전기술공단 지하시설실 차장, Manager, Korea Infrastructure Safety & Technology Co.

<sup>4)</sup> (주)동명기술공단 토질부 상무이사, Executive Director, Dongmyeong Engrg. Consultant. Co., Ltd

**SYNOPSIS :** The construction of bored tunnels in soft ground inevitably causes ground movements. In the urban environment these may be of particular significance, because of their influence on buildings, other tunnels and services. The prediction of ground movements and the assessment of the potential effects on the structures is therefore an essential aspect of planning, design and construction of a tunnelling project in the urban environment. In this study, to minimize the effect of tunnelling-induced ground movements on the adjacent structures, a system for the settlement risk management was developed. The GIS based risk assessment system for adjacent structures developed in this study consists of several modules such as building information module, settlement evaluation module, potential risk assessment module for adjacent structures, and analysis module for monitoring data. This system focuses on controlling and managing construction processes that may lead to settlement in the surrounding buildings and can contribute to producing the optimum technical and economic design.

**주요어(Key words) :** tunnelling, ground movement, adjacent structures, risk assessment system

## 1. 서 론

도심지에서의 터널굴착은 비교적 천층·연약지반에 건설되는 경우가 대부분이기 때문에, 일반 산악 터널이나 도심도 암반상에 건설되는 지하공동과는 달리 지반 변위가 터널설계를 지배하는 주요인자라 할 수 있다. 특히, 도심지에서의 터널굴착시 인접 구조물의 안정성 확보는 터널 설계 및 시공에서 매우 중요하나 지중 매설관 및 인접 구조물의 피해사례는 전력구, 지하철 터널 등과 같은 대규모 사회기반시설의 건설수요와 더불어 날로 증가하고 있는 실정이다. 또한 이러한 시설물들은 대부분 도심지역 지하에 건설되므로 도시의 밀집화, 건설공해 및 환경법규의 규제강화 등으로 인해 시공조건은 점점 열악해지고 있으며, 터널의 부적절한 설계 및 시공은 인접 구조물에 치명적인 구조적 손상은 물론 인명과 재산피해를 수반할 수도 있어 국가 산업경제에 미치는 영향이 크다 하겠다.

따라서, 도심지에서의 터널 설계단계에서 터널시공에 따른 지표침하량 및 침하 범위 등 지반 거동과 관련된 제반사항에 대한 정확한 예측을 바탕으로 적절한 시공방법과 인접 구조물에 대한 보강방법 및 범위 등을 채택하여 시공계획을 수립하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 도심지 터널굴착시 인접 구조물의 손상평가를 위한 데이터베이스 구축에 GIS 기법을 사용하였으며, 지반거동 평가시 기존의 지표침하 예측식을 3차원적으로 확장하여 인접 건물에 대한 지표침하량 및 침하범위의 예측과 손상정도를 평가하고 터널시공시 계측 데이터로부터 주변건물에 대한 손상정도를 재평가할 수 있는 시스템을 개발하였다.

## 2. 터널시공에 따른 인접 구조물 손상평가

### 2.1 지반침하 예측

터널굴착은 주변지반의 변형을 유발하게 되며, 특히 도심지역에서 천층터널 시공시에 발생하는 지표침하는 상부 구조물에 치명적인 결과를 초래할 수 있다. Attewell 등(1986)은 지표침하 트라프 형태가 그림 1에서 볼 수 있듯이, 터널 굴진이 진행되면서 침하 영역이 3차원적으로 분포하는 경향을 나타낸다고 하였다.

터널굴착에 의한 손상평가 방법은 'green field' 조건하에서 단설터널이 굴착될 경우에 대해, Peck (1969)이나 O'Reilly & New(1982)이 현장계측자료를 토대로 제시한 횡단면 지표침하 트라프가 가우스 정규분포 곡선을 잘 따른다는 가정하에 제시된 식(1)을 근거로 평가가 이루어졌다(그림 2).

$$S_r = S_{max} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right] \quad (1)$$

식(1)에서 최대침하량  $S_{max}$ 와 변곡점 위치  $i$ 의 결정이 무엇보다 중요하다 할 수 있는데, 변곡점 위치  $i$  결정에 관한 제안식은 Peck(1969)을 비롯하여 지금까지 여러 연구자에 의해 제시되어 왔다. 또한 터널 단위 굴진폭당 침하 트라프의 체적  $V_s$ 는 식(1)을 적분하면 다음과 같이  $V_s = \sqrt{2\pi} \cdot i S_{max}$ 로 나타낼 수 있고, 지반 손실량  $V_l$ 은 대개 터널굴착 면적에 대한 백분율로 표현할 수 있으며, 특히 원형터널에 대해서는  $V_s = V_l (\pi D^2/4)$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 침하트라프 체적  $V_s$ 와 지반 손실량  $V_l$ 을 조합하면 식(2)와 같이 최대침하량  $S_{max}$ 를 계산할 수 있다.

$$S_{max} = (0.31 V_l D^2)/i \quad (2)$$

식(2)는 터널이 완전히 굴착된 상태, 즉 침하가 완전히 수렴된 후 임의의 수직단면에서 발생하는 횡단면상의 침하 형태로서 터널 막장에 인접한 구조물에 대한 손상평가 적용에는 많은 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 지표면 임의 지점의 3차원적 침하 형태를 구현할 수 있도록 그림 3의 종단면 지표침하 트라프의 형태를 누적 가우스 정규분포 곡선으로 도시한 식(3)을 프로그래밍하였으며 또한, 터

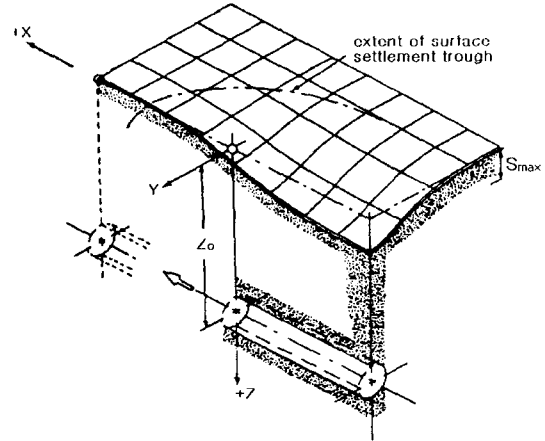


그림 1. 터널굴착으로 유발된 3차원적 침하 분포 (Attewell, et al., 1986)

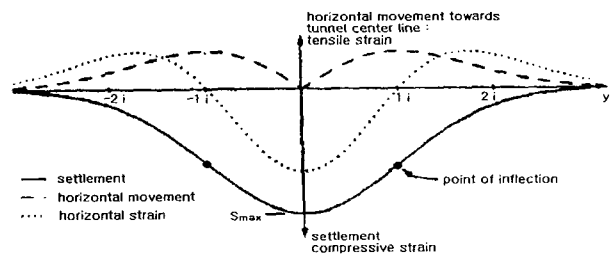


그림 2. 횡단면 침하 트라프

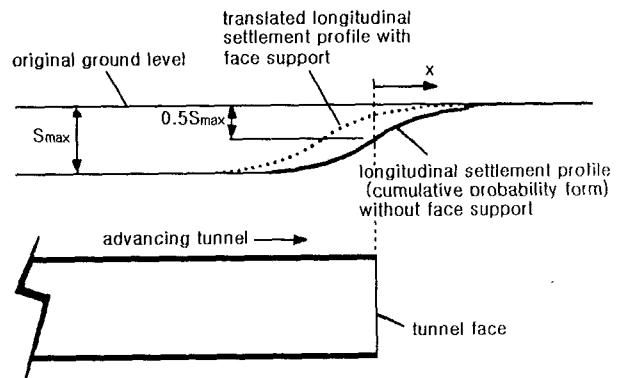


그림 3. 종단면 지표침하 트라프

널굴진 및 직각방향에 대한 수평변위( $u, v$ ) 및 변형률( $\epsilon_x, \epsilon_y$ ) 예측식을 함께 프로그래밍하여 지표면상의 3차원 거동예측이 가능하도록 하였다(Attewell & Woodman, 1982).

$$S_v = S_{\max} \exp\left[\frac{-y^2}{2i^2}\right] \left\{ G\left(\frac{x-x_i}{i}\right) - G\left(\frac{x-x_f}{i}\right) \right\} \quad (3)$$

$$u = \frac{n \cdot i}{\sqrt{2\pi}} S_{\max} \exp\left[\frac{-y^2}{2i^2}\right] \left\{ \exp\left[\frac{-(x-x_i)^2}{2i^2}\right] - \exp\left[\frac{-(x-x_f)^2}{2i^2}\right] \right\} \quad (4)$$

$$v = \frac{-n}{z_o} y S_v \quad (5)$$

$$\epsilon_x = \frac{-n}{\sqrt{2\pi} z_o} S_{\max} \exp\left[\frac{-y^2}{2i^2}\right] \left\{ \left(\frac{x-x_i}{i}\right) \exp\left[\frac{-(x-x_i)^2}{2i^2}\right] - \left(\frac{x-x_f}{i}\right) \exp\left[\frac{-(x-x_f)^2}{2i^2}\right] \right\} \quad (6)$$

$$\epsilon_y = \frac{n}{z_o} S_v \left( \frac{y^2}{i^2} - 1 \right) \quad (7)$$

## 2.2 손상등급

터널굴착으로 인해 발생한 주변 구조물의 손상은 그동안 경험에 근거한 '구조물 손상지침'을 적용하여 평가되어 왔으며 특히 영국에서는 건물의 손상위험 및 평가를 위한 논리적이면서 실제적인 체계를 수립함으로써 손상분류체계의 발전에 기여하여 왔다. 표 1의 조적식 구조물에 대한 손상분류체계는 Burland 등(1977)에 의해 처음 제시되었으며 가시적 손상(visible damage)에 대한 '보수용이'에 근거하여 표 1. 벽체에 발생한 가시균열에 대한 분류체계(벽돌/석조건물의 석고에 의한 보수용이)

손상 등급	손상 정도	전형적인 손상형태 기술 (보수용이)
0	무시	약 0.1mm 이하의 미세균열
1	매우경미	전형적인 균열폭 1mm 이하 / 잔균열로 보수용이
2	경미	전형적인 균열폭 5mm 이하 / 균열 쉽게 채움 / 재보수 필요 / 재발생 균열은 도포처리
3	보통	전형적인 균열폭 5-15mm / 일부 균열발생 개시 / 벽돌공에 의한 보수
4	심각	전형적인 균열폭 15-25mm / 광범위한 보수 필요 / 일부 벽체단면 보강
5	매우심각	전형적인 균열폭 25mm 이상 / 주요 보수작업 필요 / 일부 혹은 전체 재건축

손상등급을 구분하여 나타낸 것으로서 균열폭을 토대로한 손상분류와는 상이하다고 할 수 있다. 표 1에서 관찰할 수 있는 바와 같이 손상등급은 손상정도에 따라 0-5등급까지 6단계로 구분되며 구조물의 손상평가지 손상등급 2와 3으로 구분되는 '경미(slight)'와 '보통(moderate)'의 손상에 대한 구분이 매우 중요하다. 많은 현장조사 사례에 의하면, 2등급까지의 손상은 예를들면 건물자체의 수축(shrinkage)이나 온도영향 혹은 지반거동과 관련된 영향, 혹은 두 가지 이상이 결합된 형태의 다양한 원인에 의한 결과로 나타날 수 있다.

한편 Burland와 Wroth(1974)는 구조물 균열 발생 여부를 결정하는 기본적인 파라메타로서 '한계인장변형률(critical tensile strain)' 개념을 제시하였으며 이는 그 후 Burland 등(1977)에 의해 '임계인장변형률,  $\epsilon_{lim}$ (limiting tensile

표 2. 손상등급과 임계 인장변형율,  $\epsilon_{lim}$ 의 관계

손상등급	손상 정도	임계 인장변형율, $\epsilon_{lim}$ (%)
0	무시	0-0.05
1	매우경미	0.05-0.075
2	경미	0.075-0.15
3	보통	0.15-0.3
4 to 5	심각 내지 매우심각	> 0.3

strain)'의 개념으로 대체되었다. Boscardin과 Cording(1989)은 현장사례 연구를 통해, 표 2에 제시된 손상등급과 건물에 유발된 인장변형률은 많은 연관이 있음을 확인하였으며 손상등급별 인장변형률의 범위를 표 2와 같이 제시하였다.

### 2.3 손상평가

#### (1) 대상 건물의 기하조건 설정

터널시공으로 인한 주변 구조물 손상평가지 대상 건물의 폭과 길이등 크기의 결정이 선행되어야 한다. 그림 2는 단설 터널 지표침하 트라프의 영향을 받는 건물의 개요도를 나타내고 있는데 일반적으로 건물 지붕은 무시한 채 건물기초에서부터 처마까지의 높이를  $H$ 로 간주한다. 한편, 건물길이  $L$ 의 선정에 있어서는 변곡점 위치  $i$ 를 기준으로 Hogging 영역의 길이  $L_h$ 와 Sagging 영역의 길이  $L_s$ 로 구분하여 평가하며 침하 트라프의 실제적 경계지점인  $2.5i$  ( $S_v/S_{max}=0.044$ ) 영역 밖에 위치한 부분은 무시한다.

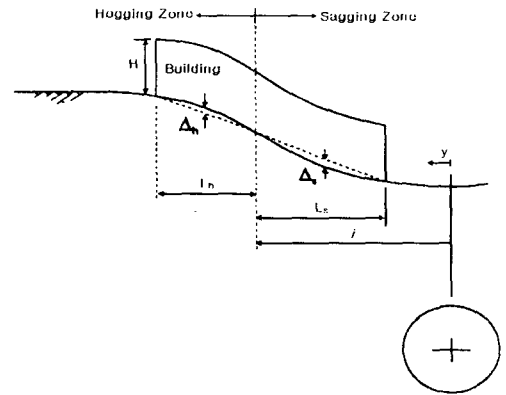


그림 4. 건물의 변형<sup>1)</sup>

#### (2) 휨 및 경사변형률의 평가

지반거동은 건물내에 대개 인장변형률을 유발시키며, 구조물은 이로 인해 균열과 손상을 받게 된다. 침하에 의한 건물손상에 관한 초기 연구는 Burland와 Wroth(1974)에 의해 수행되었는데, 그들은 건물을 집중하중에 의해 최대 휨변형  $\Delta$ 가 발생하는 길이  $L$ 과 높이  $H$ 의 이상화된 단순보(simple beam)로 취급하였다. 그 후 Burland 등(1977)은 최대 부등침하  $\Delta$ 가 발생할 경우 이로 인한 건물내의 변형률을 보 (beam)의 처짐비( $\Delta/L$ )와 최대 휨변형률( $\epsilon_b$ ) 및 최대 경사변형률( $\epsilon_d$ )의 관계를 식(8a)와(8b)로 표현하였다.

$$\frac{\Delta}{L} = \left\{ \frac{L}{12t} + \frac{3IE}{2tLHG} \right\} \epsilon_b \quad (8a)$$

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

여기서,  $H$ 는 건물의 높이,  $L$ 은 변곡점  $i$  또는 침하트라프내에 존재하는 건물길이를 나타내며  $E$ 와  $G$ 는 건물의 탄성계수 및 전단탄성계수를 의미한다. 또한  $I$ 와  $t$ 는 등가보의 단면2차모멘트(Sagging 영역에서는  $H^3/12$ , Hogging 영역에서는  $H^3/3$ ) 및 중립축으로부터 보 최하단까지의 거리(Sagging 영역에서는  $H/2$ , Hogging 영역에서는  $H$ )를 나타낸다.

#### (3) 지반의 수평변형률 및 총 변형률의 평가

지반의 평균 수평변형률은 각 영역에서 건물 양 끝단에서 발생한 수평 변위차를 건물 길이로 나누어 줌으로써 계산할 수 있고 이를 식(8a)와 (8b)에서 계산된 휨 및 경사변형률에 더하면 총변형률이 된다. 휨 및 경사변형에 의한 총변형률은 식(9a)와 (9b)를 이용하여 계산할 수 있다( $\nu=0.3$  가정).

$$\epsilon_{bt} = \epsilon_h + \epsilon_b \quad (9a)$$

$$\epsilon_{dt} = 0.35 \epsilon_h + [ (0.65 \epsilon_h)^2 + \epsilon_d^2 ]^{0.5} \quad (9b)$$

## 3. 터널시공에 따른 인접 구조물 손상평가 시스템

### 3.1 시스템 구성

본 연구에서 개발한 인접 구조물 손상평가 시스템은 설계단계에서 'green field' 조건하의 2D 및 3D 수치해석 결과나 기존 제안식으로 부터 최대 침하량( $S_{max}$ ) 혹은 지반손실량( $V_f$ )과 변곡점( $i$ )를 이용하여 터널상부 지표면상의 3차원 침하거동을 예측함과 아울러 터널굴진에 따른 인접 구조물의 손상정도를 평가할 수 있으며 지표침하 예측결과를 활용한 재평가가 가능하다.

본 시스템은 그림 5에서 볼 수 있듯이, 크게 건물 및 계측 DB 시스템, 계측분석 시스템, 침하예측 및 손상평가 시스템으로 구성되어 있다. 건물 DB 시스템은 1: 5,000의 수치지도를 기본도면으로 고려하고 검토대상 구간에 대한 x, y 좌표값을 텍스트 파일로 변환하여 손상평가 모형에 적용 가능한 입력형식으로 구축하였다. 침하예측 시스템은 Attewell 등(1982)이 제시한 식(3)~(7)을 토대로 하여 침하평가가 이루어지며 손상평가 시스템에서는 각 벽체에 대한 손상평가가 Burland 등(1977)이 제시한 손상평가 방법을 따르도록 구축하였다. 또한 계측 DB 시스템은 계측분석 시스템과 연계하여 현장에서 수집된 지표침하 자료들로부터 터널막장 후방 임의의 지점에서 100% 수렴된 침하량을 기준으로 횡단면상의 침하트라프를 결정한 후, 계측분석 시스템에서 최대 침하량 및 변곡점을 산출하여 지표면상의 3차원 침하예측 및 인접 구조물에 대한 손상평가가 가능하도록 구성하였다.

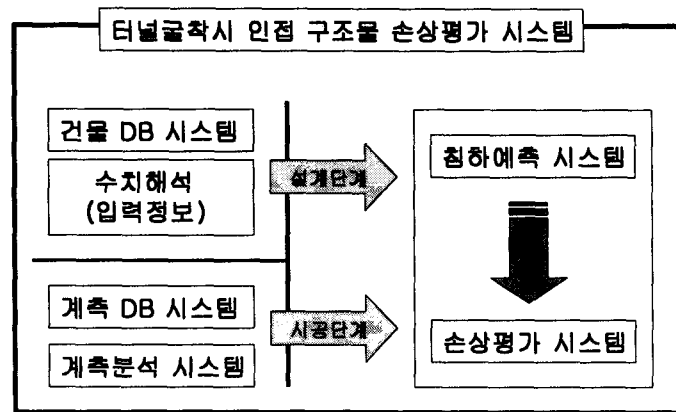


그림 5. 시스템의 구성

### 3.2 시스템의 특징

터널굴착시 인접 구조물 손상평가 시스템의 특징은 다음과 같다.

- 터널구간에 대한 건물 정보 제공(zoom in/out 기능)
- 터널 막장위치에서의 지표침하 등고선 및 횡·종단면 침하트라프 출력
- 건물의 각 벽체에 대한 손상평가 결과 출력
- 터널 막장위치 이동에 따른 건물의 손상평가 결과 변경 기능
- 건물의 변형도 출력
- 계측데이터 횡·종단면 작성
- 계측데이터 분석

본 시스템은 3차원적 지반거동에 따른 인접 구조물의 손상평가가 그동안 터널이 완전히 굴착된 상태, 즉 침하가 수렴된 상태하의 2차원 단면에 대해서 수행되고 있는 손상평가의 한계를 극복하는데 그 의미가 있으며, 손상평가의 영향인자인 angular distortion, deflection ratio, 부등침하량, 수평변위( $u, v$ ), 휨 및 경사 인장변형을 등이 터널굴착 진행에 따라 각 단계별로 평가가 이루어진다는 것이다. 이와 같은 손상평가 시스템의 장점은 여러 손상요인 중 건물손상에 주된 원인이 어느 인자에 의해 발생한 것인지 알 수 있을 뿐 아니라 어느 벽체에서 주된 손상이 발생하는지에 대한 평가가 가능하고 또한 시공 중의 계측결과를 활용하여 재평가함으로써 설계시 예측한 지표침하량 및 변곡점을 비교·분석할 수 있

나는 점이다.

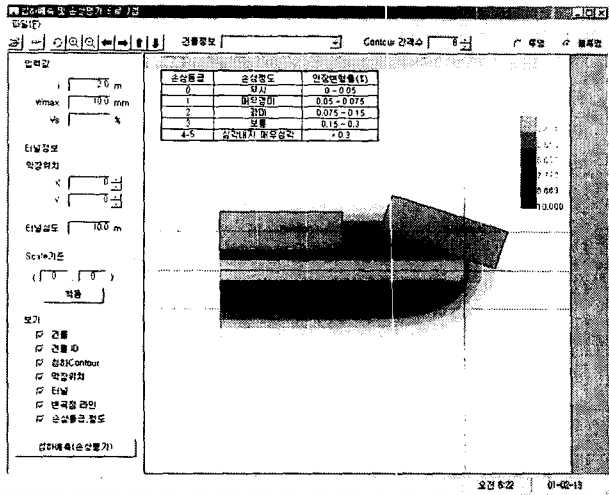


그림 6. 3차원 침하예측 결과

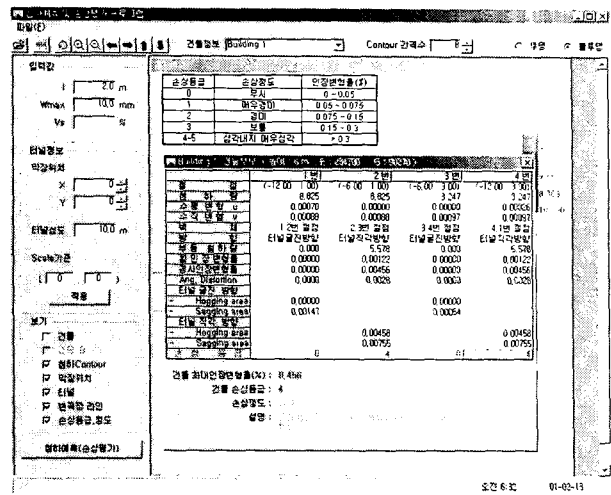


그림 7. 1번 건물의 손상평가 결과

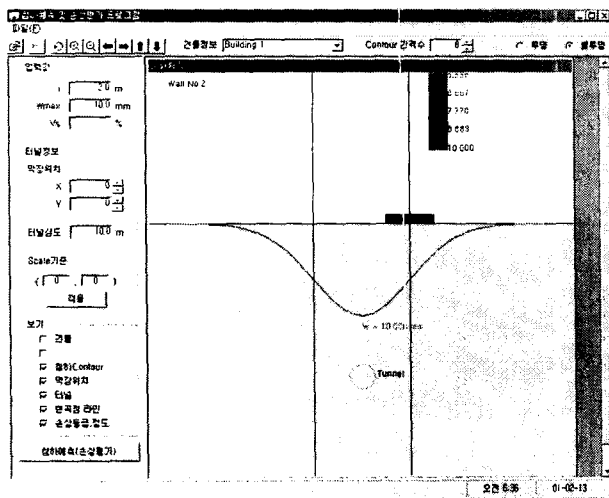


그림 8. 2번벽체에 대한 횡단면 침하트라프

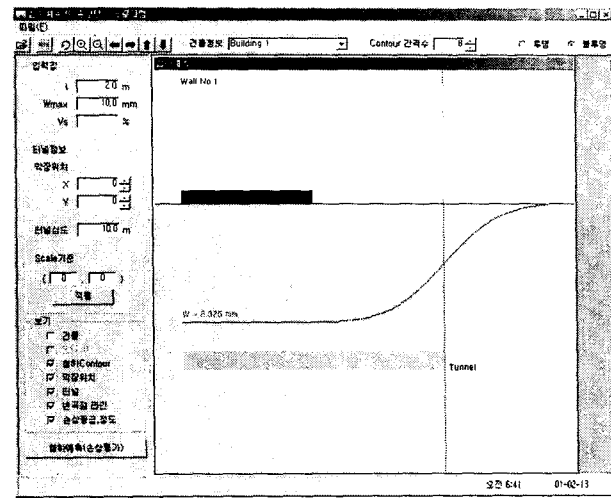


그림 9. 1번벽체에 대한 종단면 침하트라프

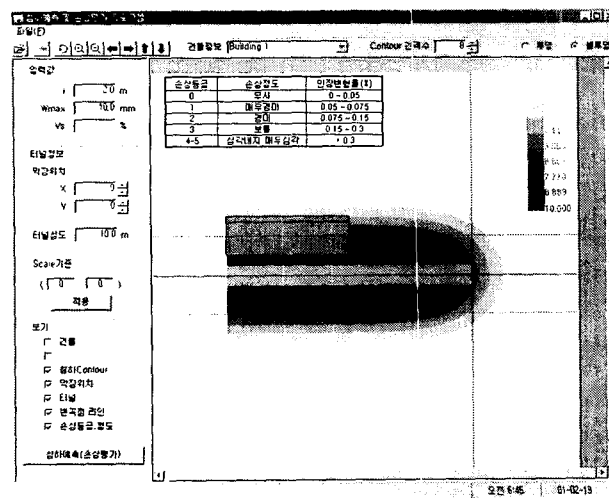


그림 10. 1번 건물의 변형도

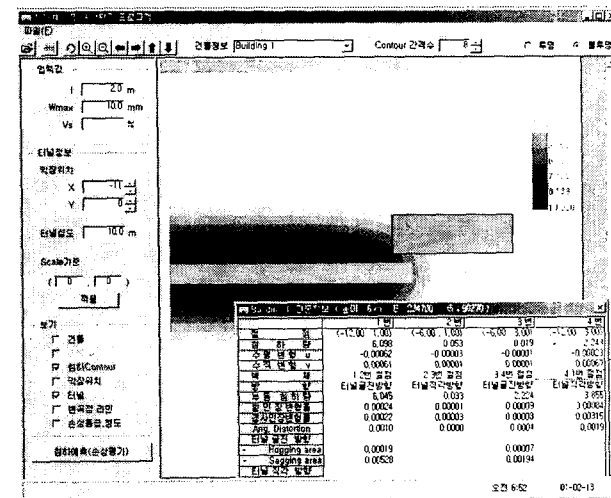


그림 11. 1번건물에 대한 터널막장 이동

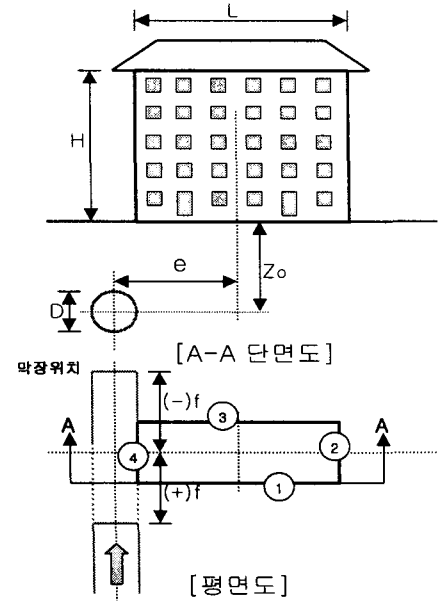
## 4. 적용 예

### 4.1 검토조건

그림 13에서와 같이 지표면에서  $Z_0=15\text{m}$ 의 깊이에 위치한 직경  $D=10\text{m}$ 의 터널상부에  $H$ 와  $L$ 이 각각  $15\text{m}$ 이고 폭이  $7.5\text{m}$ 인 조적식 5층건물이 터널 및 건물 중심선과의 이격거리  $e$  만큼 떨어져 위치할 경우를 선정하여 터널막장 위치  $f$ 에 따라 각 벽체에 발생하는 손상정도를 비교·검토하였다. 본 논문에서는 터널굴착에 따른 손상평가를 위해 최대침하량  $S_{\text{max}}$  및 변곡점  $i$ 의 위치를 표 3에 제시한 3가지 경우를 가정하였고 또한 터널굴진 막장위치  $f$ 와 터널과 건물 중심선간 이격거리  $e$ 에 따른 영향을 관찰하였다.

표 3. 건물의 구조적 특성 및 변수

구분	case 1	case 2	case 3	비고
최대침하량 ( $S_{\text{max}}$ , mm)	165.2	82.6	41.3	침하거동 비교
변곡점 ( $i$ , m)	15.0	7.5	3.75	
구분	단면2차모멘트 ( $I$ )	도심거리 ( $t$ )	탄성계수 ( $E$ )	E/G=2.6 가정 K=0.25
건물	281.25 (sag) 1125.00 (hog)	7.5 (sag) 15.0 (hog)	234,700	



### 4.2 결과분석

터널 막장위치  $f$ 가  $-4i$  및  $0$ 인 지점에서 이격거리  $e$ 에 따른 1번 및 4번 벽체에 발생하는 angular distortion의 변화 경향을 세 경우에 대해 검토한 결과는 다음과 같다. 그림 13-14에서 볼 수 있듯이  $f = -4i$ 일 때 1번 벽체의 경우, 건물의 크기에 비해 침하 영향이 넓게 분포할수록 최대 angular distortion

그림 12. 검토대상 건물 및 터널위치

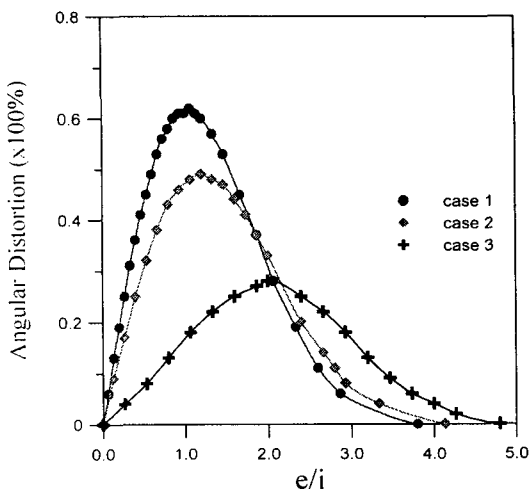


그림 13.  $e/i$ 에 따른 angular distortion의 변화 경향 (1번 벽체) -  $f = -4i$

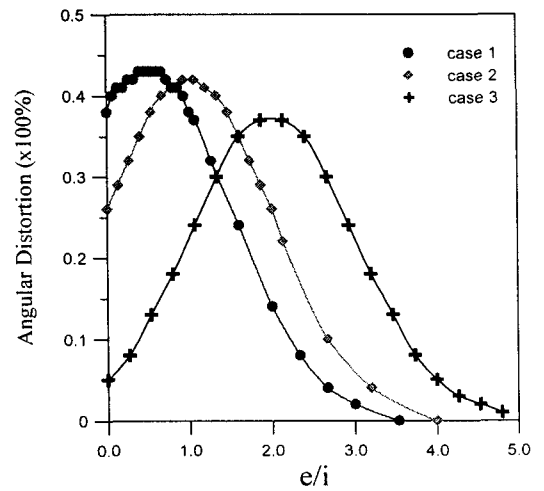


그림 14.  $e/i$ 에 따른 angular distortion의 변화 경향 (4번 벽체) -  $f = 0$

은  $e=1.0 i$  위치에서 발생한 반면 침하영향이 좁게 분포할수록  $e>1.0 i$ 의 위치에서 최대 angular distortion이 나타나는 경향을 관찰할 수 있었다. 또한  $f=0$ 일 때 4번 벽체에서는 세 경우 모두 이격거리  $e=7.5m$ 를 통과할 시 최대 angular distortion이 발생하였다. 한편  $e=0$  및  $7.5m$ 인 경우, 터널 굴진막장위치  $f$ 에 따른 건물 손상평가 결과는 그림 15-16에서 볼 수 있듯이 건물크기에 비해 침하영향이 넓게 분포할 시(case 1),  $f=+1.5 i$  부근에서 손상 4등급이 발생한 반면 침하영향이 좁게 분포한 case 3의 경우에는 건물 중심 부근에서 손상 4등급이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 상기 결과로부터 건물크기와 침하분포 크기는 밀접한 관계가 있으며 터널굴진에 따른 보강시점도 달리 적용되어야 할 것으로 판단된다.

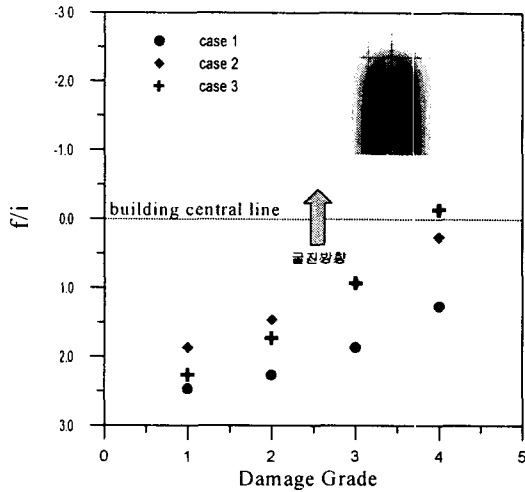


그림 15.  $f/i$ 에 따른 손상등급의 변화( $e=0$ )

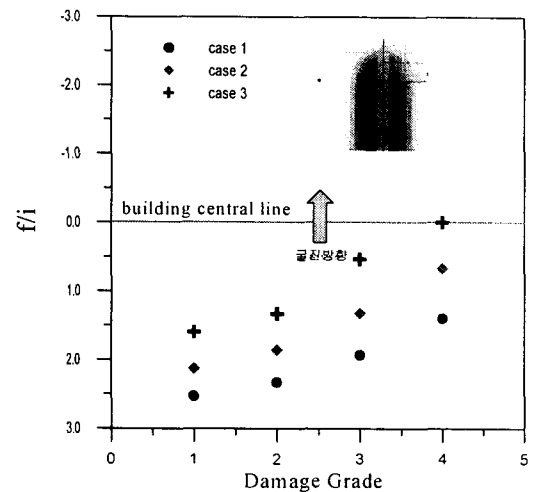


그림 16.  $f/i$ 에 따른 손상등급 변화( $e=7.5$ )

## 5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 도심지 터널 굴착에 따른 3차원적 지표 침하량 및 범위, 수평 변형률 등 지반거동과 관련된 제반사항에 대한 정확한 예측을 바탕으로 적절한 시공방법과 인접 구조물의 보강방법 및 시기 등을 결정할 수 있는 인접구조물 손상평가 시스템의 개발에 관한 내용을 다루었다. 현재 지속적으로 개발중인 본 시스템은 건물에 대한 정보를 GIS기법을 도입하여 데이터베이스화 할 수 있는 기능과 계측 DB 및 분석 기능, 터널 굴진에 따른 침하예측 및 인접 구조물 손상평가 기능 등을 부여하여 최소한의 입력정보( $S_{max}$  혹은  $V_s, i$ )만으로 설계/시공시 인접 구조물의 손상인자에 대한 평가 및 손상등급 제시가 가능하게 하였다. 한편, 향후 연구를 통해 터널 굴착에 따른 인접 구조물에 미치는 영향 평가시 터널보강 보조공법 선정과 계측 모니터링, 터널 시공의 과학적인 안전관리가 가능한 인터넷-GIS 환경 기반의 통합관리 기능을 부여한 터널시공 위험도 관리시스템으로의 발전을 모색하고 있다.

## 참고문헌

1. Attewell, P.B. and Woodman, J.P. (1982) Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil, *Ground Engineering*, Vol.15, No.8, pp. 13-22.
2. Attewell, P.B., Yeates, J. and Selby, A.R. (1986) Soil Movements Induced by Tunnelling and their Effects on Pipelines and Structures, *Blacki and Son Ltd.*, London.
3. Kaalberg, F.J. and Netzel, H. (1999) Amsterdam's North/South Metroline, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.14, No.2, pp. 191-210
4. Peck, R.B. (1969) Deep excavations and tunnelling in soft ground, SOA Report, 7th Int. Conf. SMFE, Mexico City, State of the Art Volume pp. 225-290