

# 점성토 지반에서의 실드 터널 시공에 따른 지표침하 예측 기법

A Prediction Method for Ground Surface  
Settlement During Shield Tunneling in Cohesive Soils

유    충    식\*1  
Yoo, Chung-Sik  
이            호\*2  
Lee, Ho

## Abstract

This paper presents a ground surface settlement prediction method for shield tunneling in cohesive soils. In order to develop the method, a parametric study on shield tunneling was performed by using a three-dimensional elasto-plastic finite element analysis, which can simulate the construction procedure. By using the results of the finite element analysis, the ground movement mechanism was investigated and a data base which relates the ground surface settlement and influencing factors was formed. The data base was then used to formulate semi-empirical equations for both surface settlement ratio above tunnel face and inflection point by means of a regression analysis. Furthermore, a prediction method for transverse and longitudinal surface settlement profiles was suggested by using the developed equations in conjunction with the normal probability curve. Effectiveness of the developed method was illustrated by comparing settlement profiles obtained by using the developed method with the results of finite element analysis and measured data. Based on the comparison, it was concluded that the developed method can be effectively used for practical applications at least within the conditions investigated.

## 요 지

본 논문에서는 점성토 지반에서의 실드 터널 시공에 따른 지표 침하 예측 기법을 제시하였다. 예측 기법을 개발하기 위해 실드 터널의 시공과정을 모사할 수 있는 3차원 유한요소해석기법을 이용하여 매개변수 변환 연구를 수행하였으며, 해석 결과를 이용하여 지반 거동메카니즘을 고찰하고 지반 거동과 영향 요소와의 관계를 나타내는 데이터 베이스를 구축 하였다. 구축된 데이터 베이스에 대한 다중 회귀분석을 통해 막장 상부에서의 지표 침하비와 변곡점의 위치를 결정하는

\*1 정희원, 성균관대학교 공과대학 토목공학과 조교수

\*2 성균관대학교 대학원 토목공학과 석사과정

반경험식을 개발하고 이를 기존의 정규확률분포함수와 접목시켜 횡단면 및 종단면 지표 침하 형상을 예측하는 기법을 제안하였다. 제안된 예측 기법은 유한요소 해석 결과 및 현장 계측 자료와의 비교를 통해 그 타당성이 입증되었으며, 따라서 제시된 예측 기법은 본 연구에서 고려한 경제 조건과 유사한 조건에서 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords :** Shield tunnel, Finite element analysis, Ground loss, Settlement trough, Settlement prediction

## 1. 서론

도심지역의 인구 과밀화 현상에 따라 전력구, 통신구, 상하수도관 및 교통시설 등 여러 가지 산업기반시설 확충의 필요성이 날로 높아 가고 있다. 도심 터널의 대부분은 기존의 건물 및 지하 매설물에 인접하여 건설되므로 터널시공이 주변환경에 미치는 영향이 터널설계시 고려되어야 할 가장 중요한 사항으로 대두되고 있으며, 부적절한 설계와 시공은 주변 구조물에 치명적인 구조적 손상은 물론 인명과 재산 피해 등을 가져오게 되는 등 국가산업경제에 지대한 영향을 미치게 된다.

일본, 미국 및 유럽 등지에서의 토사 지반 터널 시공은 주로 실드 터널 공법(shield tunneling method)으로 이루어지고 있다. 국내에서는 적용 실적이 그다지 많지 않으나 최근에 들어와서 전력구 및 통신구 건설에 그 적용 실적이 증가하고 있다. 실드공법은 타 공법에 견주어 볼 때 주변환경에 아주 적은 영향을 미친다는 장점이 있으나 실드공법의 특성상 터널 시공에 따른 지반의 움직임은 완벽하게 방지할 수는 없다. 일반적으로 실드터널시공은 대부분 인구밀집지역에서 이루어지므로 터널시공에 의한 지반의 움직임은 주변 건물 및 지하 매설물에 치명적인 구조적 손상을 야기시킬 수 있다. 따라서 도심지역에서의 터널 시공 과정에서는 터널 설계단계에서 터널시공에 따른 막장의 안정, 지표침하량 및 침하범위 등 제반 지반의 움직임에 대한 정확한 예측을 바탕으로 적절한 실드기종 및 시공방법을 선정하고,

주변구조물에 대한 보강 여부 및 보조공법의 채택 여부 등의 시공계획을 수립하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 점성토 지반에서의 실드 터널 시공에 따른 지반의 거동을 정성·정량적으로 평가할 수 있는 기준을 마련하기 위해 유한요소해석기법을 이용한 수치실험적 접근방법으로 터널 시공에 따른 주변지반의 거동에 관한 역학적 메카니즘을 고찰하고 그 결과를 토대로 실드 터널 시공에 따른 지표 침하를 예측할 수 있는 기법의 개발을 시도하였다.

## 2. 실드 터널 시공에 따른 지반 거동 및 지표 침하 예측 기법

### 2.1 실드 터널 시공에 따른 지반 거동

터널 시공중 발생하는 지반손실은 일반적으로 Cording과 Hansmire(1975)가 제안한 지반손실율로 표현되며, 이는 지반손실량( $V_1$ )을 단위길이당 터널의 체적의 백분율로 나타낸다. 한편 침하 트라프(settlement trough)는 단위길이당의 침하 트라프의 체적( $V_s$ )으로 나타낼 수 있으며, 터널 시공중에 흙의 체적변화가 발생하지 않는다면  $V_s = V_1$ 라고 할 수 있다.

Cording과 Hansmire(1975)는 계측결과를 토대로 총 지반손실량을 다음과 같이 근사적으로 표현하였다.

$$V_1 = S_s \cdot 2(r+y) \quad (1)$$

여기서:

$S_s$  = 터널 천단 상부 (약 0~2m)에서 측정된 지중 침하

r=터널의 반경

y=S<sub>v</sub>가 측정된 지점과 터널 천단부의 거리  
식 (1)은 y가 r보다 매우 작을 경우에 유효하며, y가 r에 근접하면 식(1)로 계산된 지반 손실량은 과대평가 되는 경향이 있다.

실드 터널 시공중에 발생하는 지반 손실은 단기 및 장기 손실로 대별되나 본 연구에서는 단기 손실에 국한하였으며, 단기 손실은 ① 막장 불안정, ② 실드 본체 상부 여굴, ③ 후미 여굴을 통해 발생한다.

### 1) 막장 불안정으로 인한 실드 전면부에서의 손실

실드 전면부에서의 지반 손실은 막장의 불안정으로 발생하는 지반손실로서 Clough와 Schmidt(1981)는 터널이 순간적으로 형성되고 반경방향의 변위만이 발생한다는 가정하에 다음과 같이 막장의 불안정으로 인한 지반 손실량 추정식을 제안하였다.

$$V_i = \frac{\Delta V}{V} = \left[ 2c_u \frac{(1+\nu)}{E_u} \right] \exp \left[ \frac{p}{c_u} - 1 \right] \quad (2)$$

여기서:  $\Delta V$  = 체적 감소량,

$V$  = 터널의 체적

$c_u$  = 비배수 점착력

$E_u$  = 탄성영역 內에서의 비배수 변형계수

$\nu$  = 포아송 비 (0.5)

$p$  = 터널 스프링 라인에서의 상재하중

막장의 안정성 검토는 Brom과 Bennermark(1967)가 제안한 식(3)으로 규정되는 안정계수(stability ratio) 혹은 과하중계수(overload factor)를 이용하여 정성적인 평가가 가능하다.

$$N = \frac{[\sigma_v - \sigma_T + \gamma(C + D/2)]}{C_u} \quad (3)$$

여기서  $\sigma_v$ 는 지표 상재하중,  $\sigma_T$ 는 터널 내압,  $\gamma$ 는 흙의 단위중량, 그리고 C와 D는 각각 터널의 토피와 직경을 나타낸다. Brom과 Bennermark는 점성토에서의 실험을 토대로 안정계수가 6.0 이상일 경우에는 막장의 불안정이 발생

할 수 있다는 결론에 도달하였다. 또한 Clough와 Schmidt(1981)는 안정계수가 2.0~5.0일 경우 총 지반손실의 약 1/3~1/4 정도가 터널의 막장을 통해서 발생한다고 보고하였으며, 안정계수가 5.0 이상이고 침하가 억제되어야될 필요성이 있는 경우 막장안정확보를 위한 대책마련이 필요하다고 제안하였다.

Ranken과 Ghaboussi(1975)는 탄소성 유한요소해석기법을 이용한 연구에서 막장을 통한 지반손실을 평가하는 근사식을 식 (4)와 같이 제시하였다.

$$V_i = \frac{2\delta}{R} \quad (4)$$

여기서  $\delta$ 는 터널 막장에서의 평균 축방향 변위이며, R은 터널 반지름이다.

### 2) 실드 본체 상부를 통한 지반손실

실드 시공시에는 실드 본체에 부착된 over-cutter, teeth, bead 등의 부착물 및 상하요동(pitching)으로 인해 실드 본체 상부에 여굴이 발생하는데, Cording과 Hansmire(1975)는 상부 여굴을 통해 발생하는 지반손실량을 산정하는 방법으로 식 (5)를 제시하였다.

$$V_{sh} = \frac{\pi RL}{2} \cdot (\text{excess pitch}) \quad (5)$$

여기서: R=실드 반경, L=실드 본체 길이

### 3) 후미 여굴을 통한 지반손실

후미 여굴은 실드 외경과 라이닝 외경의 차이로 인해 발생하며, 굴착과 동시에 그라우팅을 수행함으로써 억제할 수 있다. 안정계수가 매우 높은 경우, 후미 여굴은 굴착 즉시 폐합되며, Clough와 Schmidt(1981)는 안정계수가 약 3.0~5.0 사이인 경우 라이닝타설과 동시에 그라우팅을 실시할 것을 제안하고 있다. 일반적으로 토압식 혹은 이수식 실드와 같은 현대식 실드의 경우 실드 후미에 설치된 마감장비 때문에 재래식 실드의 경우에 비해서 더 큰 후미 여굴을 유발시키므로, 후미 여굴로 인한 지반손실의 가능성은 재래식 실드보다 더 크다고 보고되고 있다.

## 2.2 지표 침하 예측 기법

지난 수년 동안 실드 터널 시공에 따른 지반의 움직임 예측할 수 있는 방법을 마련하기 위해 실험적(experimental) 방법, 해석적(analytic) 방법, 경험적(empirical) 방법, 수치실험적(numerical) 방법 등을 이용한 여러 연구가 진행되어 왔다. 터널굴착에 따른 지반의 거동 예측에 관한 체계적인 연구로는 Peck(1969)에 의해 수행된 연구를 들 수 있다. Peck은 다양한 현장조건에서 수집한 현장계측자료를 토대로 지표침하영역 예측기법의 개발을 시도하였으며 1969년 제7차 국제 토질 및 기초공학 학술회의(ICSMFE)에서 지표면의 침하형상은 그림 1에서 보이는 것과 같이 오차함수 또는 정규분포곡선을 따른다고 보고하였으며 정규분포곡선의 특성을 이용하여 터널 횡단면에서 지표면의 침하량을 결정하는 방법을 식 (6)과 같이 제시하였다.

$$\delta = \delta_{\max} \exp\left[-\frac{x^2}{2i^2}\right] \quad (6)$$

여기서  $\delta_{\max}$ 는 최대 침하량이며  $i$ 는 침하형상 곡선에서의 변곡점(inflexion point)을 나타낸다.

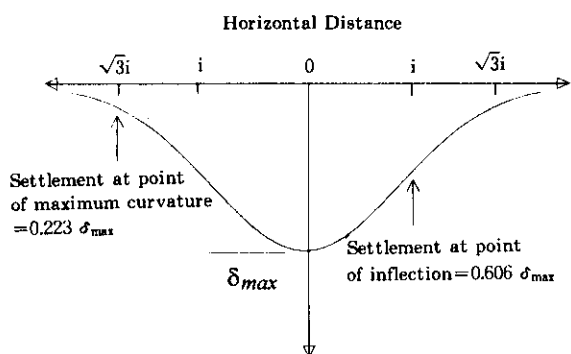


그림 1. 오차함수를 이용한 횡단면 침하형상 곡선

식 (6)을 이용할 경우  $i$ 의 선정이 가장 중요한 문제로 대두되는데 Schmidt(1974)는 현장 계측 자료를 분석한 결과를 토대로 다음과 같은 변곡점의 위치를 결정하는 식을 제안하였다.

$$\frac{2i}{D} = \left(C + \frac{D}{2}\right) \quad (7)$$

그 후, Cording과 Hansmire(1975)는 현장 계측 자료를 토대로 침하 곡선의 폭을 나타내는 각  $\beta$ 를 이용하여 침하곡선의 폭과 터널의 지하조건의 관계를 식 (8)과 같이 제시하였다.

$$\frac{2i}{D} = 0.8 \tan \beta \left(\frac{C}{D}\right) + 0.4 \quad (8)$$

한편 Attkinson과 Potts(1977)는 실내 시험 결과를 토대로 변곡점 산정식으로 식 (9)를 제시하고 모래지반의 경우  $C_1=0.5$ ,  $C_2=0.25$ 를 제안하였으며, 과압밀점토의 경우  $C_1=0.75$ ,  $C_2=0.125$ 를 제안하였다. 또한 횡단면에 있어서 최대 지표 침하와 천단 침하의 관계식을 식 (10)과 같이 제안하였다.

$$\frac{2i}{D} = C_1 \left(\frac{C}{D}\right) + C_2 \quad (9)$$

$$\frac{\delta_s}{\delta_c} = 1 - \alpha \left(\frac{C}{D}\right) \quad (10)$$

여기서  $\alpha$ 는 모래지반의 경우 0.4, 점토지반의 경우 0.13의 값을 취한다.

또한 Attewell(1981)은 재래식 실드 터널의 현장 계측 자료를 토대로 이용하여 포물선 개념에 입각하여 식 (11)을 제안하였으며, O'Reilly와 New(1982)는 영국 터널 계측 자료를 바탕으로 점성토에 적용할 수 있는 식 (12)를 제안하였다.

$$\frac{2i}{D} = K \left(\frac{C}{D}\right)^n$$

:K, n=지반조건에 따라 결정되는 상수 (11)

$$i = 0.43D + 1.1 \text{ (단위 m)} \quad (12)$$

최근에 들어 와서 Mair 등(1993)은 지중침하곡선은 지표침하곡선보다 넓은 형태를 나타내므로 지표침하곡선의 변곡점 산정식을 사용할 경우 변곡점의 위치를 과소평가할 수 있다고 보고하였으며, 식 (13)을 지중침하곡선의 변곡점 산정식으로 제안하였다.

$$\frac{i}{C} = 0.175 + 0.325 \left(1 - \frac{z}{C}\right) \quad (13)$$

여기서  $z$ 는 지표면으로부터의 깊이이다.

종단면 지표 침하 곡선의 예측 모델로서는

Attewell과 Woodman(1982)이 제안한 방법들을 수 있는데 이들은 터널의 종단면 침하 예측 모델로서 그림 2와 같은 누적확률함수(cumulative probability function)를 제안하고 터널 굴착시 체적변형이 발생하지 않는다는 가정을 토대로 식 (14)와 같은 종방향 지표 침하 곡선을 제안하였다.

$$\delta(x)_y = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \left[ G\left(\frac{y-y_f}{i}\right) - G\left(\frac{y-y_r}{i}\right) \right] \quad (14)$$

여기서  $V_s$ 는 터널굴진방향의 단위길이당 대 상 횡단면 지표침하형상곡선의 체적이며  $y_r$ 와  $y_f$ 는 각각 원점으로부터 터널굴착이 시작되는 시점 및 막장부의 거리를 의미한다. 또한 식 (14)의 함수  $G$ 는 식 (15)와 같이 표현되며, 표준확률표에서 그 값을 결정할 수 있다.

$$G(\alpha) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^{\alpha} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta \quad (15)$$

한편, 홍성완 등(1985)은 종방향 침하곡선을 예측하는 방법으로 지수함수를 바탕으로 식 (16)

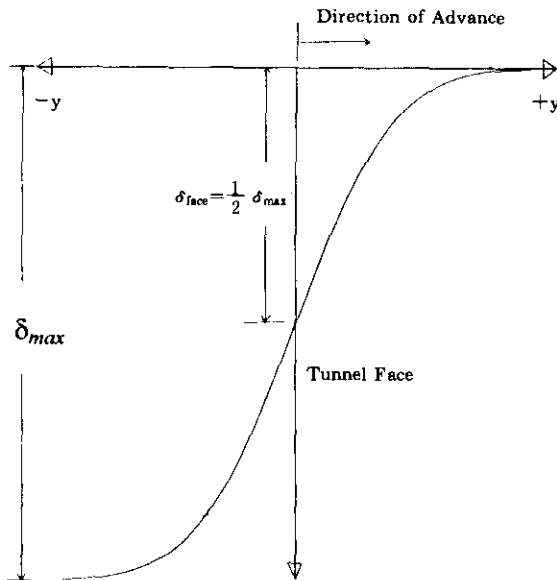


그림 2. 누적확률함수를 이용한 종단면 침하형상 곡선

을 제시하고 서울지하철 계측 자료를 토대로 쌍터널에 대해  $A=0.65$ ,  $B_1=B_2=1.5$ 를 제안하였으며, 그 후 배규진(1989)은 부산지하철 계측 자료의 분석 결과를 토대로 연약 점토 지반에서 외터널이 시공되는 경우  $A=0.5$ ,  $B_1=1.4$  및  $B_2=1.9$ 를 제안하였다.

$$\frac{\delta(x=0)_y}{\delta(x=0)_{s,max}} = 1 - A \exp\left(-B_1 \frac{y}{C}\right), \frac{y}{C} \geq 0$$

$$\frac{\delta(x=0)_y}{\delta(x=0)_{s,max}} = (1 - A) \exp\left(-B_2 \frac{y}{C}\right), \frac{y}{C} < 0 \quad (16)$$

한편 최근 들어 디지털 컴퓨터의 발달 및 수치해석 기법의 개발과 함께 수치 실험적인 기법을 이용하여 실드 터널시공에 따른 지반의 움직임에 관한 많은 연구가 수행되어져 왔다 (Ghaboussi 와 Ranken 1981, Shirasuna 1985, Lee 와 Rowe 1990, Rowe와 Lee 1992). 기존의 대부분의 연구에서는 Lee와 Rowe(1990)의 연구를 제외하고는 실드 터널 시공과정을 단순화된 2차원 평면 변형 문제로 모델링하고 터널시공에 따른 지반의 거동 메카니즘을 정성적으로 고찰하는데 주안점을 두었다. 따라서, 토사 터널 시공에서 주변 지반의 거동 예측은 설계 및 시공 단계에서 매우 중요한 사항임에도 불구하고 아직까지 3차원적 지반거동 예측기법이 존재하지 않고 있는 실정이다.

### 3. 실드 터널 시공과정의 3차원 유한요소 해석 모델링

실드 터널 공법에서는 실드 본체가 라이닝 세그먼트 길이 만큼 추진되면서 실드 전면부에서는 굴착이 이루어지고 후미부에서는 라이닝을 설치하는 과정이 계속 반복되는 방법으로 터널시공이 이루어진다. 따라서 유한요소해석에서는 막장압(face pressure) 작용⇒실드 본체 상부 여굴 폐합⇒실드 본체-지반 상호작용⇒후미 여굴 폐합⇒라이닝 타설 및 지반-라이닝 상호작용 등의 시공 과정을 효율적으로 묘사 하여야 한다.

본 연구에서는 Lee와 Rowe(1991)에 의해 제안된 GAP 파라메타 개념에 입각한 실드 터널 시공 과정 모델링 기법을 Yoo(1993)에 의해 개발된 GEOFE3D에 적용시켰다. GAP 파라메타는 그림 3에 나타난 바와 같이 실드 터널공법에서 발생하는 막장 손실, 실드본체 상부 여굴, 실드 후미 여굴을 통해 발생하는 변위를 정량화 시킨 수치를 의미하며 식 (17)로 표현된다.

$$G = 2\Delta + \delta + U \quad (U = U^*_{3D} + \omega) \quad (17)$$

식 (17)에서 보이는 바와 같이 G는 막장손실로 인해 발생하는 3차원적 움직임을 통해 유발되는 변위( $U^*_{3D}$ ) 및 인부의 숙련도 미숙으로

인해 실드기가 위·아래로 벗어나 발생하는 გადა 굴착으로 인한 변위( $\omega$ )로 구성되는 U와 실드본체의 외면과 라이닝사이의 공간 즉 후미공간(tail piece; $\Delta$ )과 라이닝을 설치하는데 필요한 공간( $\delta$ )으로 구성되는 후미 여굴( $2\Delta + \delta$ )로 구분 지을 수 있다. 여기서 후미 여굴( $2\Delta + \delta$ )은 실드기종 및 라이닝 종류가 결정되면 쉽게 계산될 수 있으며, 인부의 숙련도와 관련된 변위( $\omega$ )는 현장사태에 근거한 경험적 상관관계로부터 결정할 수 있다.

따라서 본 연구에서 채택한 실드터널 모델링에서는 실드의 제원과 기타 시공조건을 토대로 식 (17)을 이용하여 GAP 파라메타를 결정하고

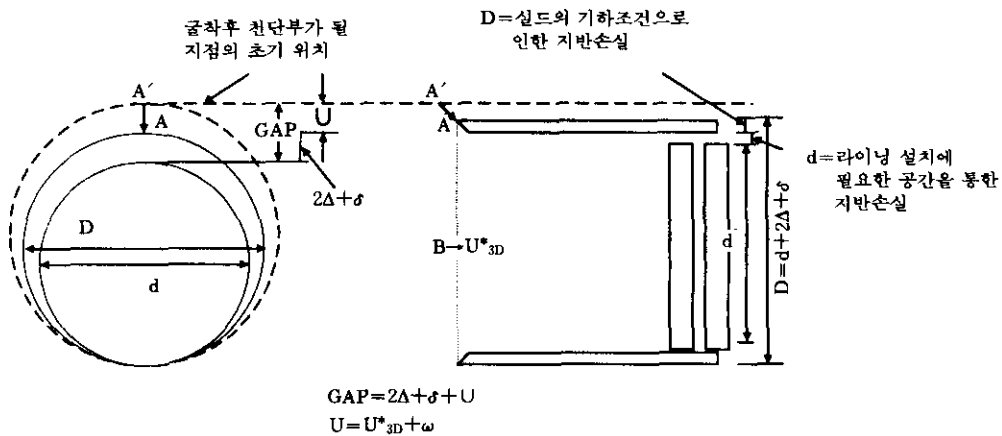


그림 3. GAP 파라메타의 정의

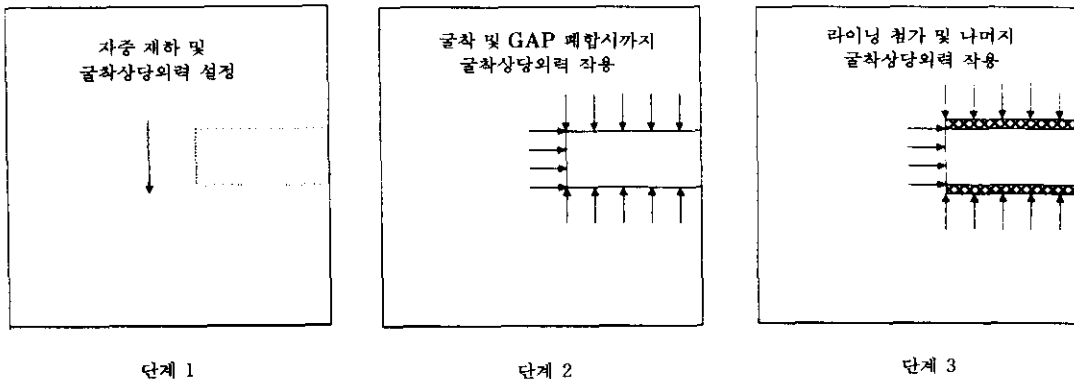


그림 4. 단순화된 실드 터널 시공 공정

이를 해석 입력 변수로 사용하며, 입력된 GAP 파라메타 만큼의 내공 변위가 발생할 때까지 굴착상당 외력을 작용시킨 후 라이닝을 설치하고 다시 남은 굴착상당외력을 작용시키는 단순화된 모델링 기법을 채택하고 있다. 한편, 본 모델링 기법은 막장에서의 응력 해방을 허용하므로 개방형 실드 공법을 모사 한다고 할 수 있다. 그림 4는 본 연구에서 채택한 모델링 기법을 도식적으로 나타내고 있으며 요약하면 다음과 같다.

- 단계 1: 자중재하 및 굴착상당외력 결정
- 단계 2: 내공변위가 G에 도달할 때까지 굴착상당외력 작용
- 단계 3: 라이닝 요소 첨가(자중 및 강성 적용) 및 잔존하는 굴착상당외력 작용

본 연구에서 개발된 GEOFE3D의 타당성 검증에 관한 내용은 본 논문의 지면 관계상 수록하지 못하였으며, 참고문헌(유충식 1996)에 자세히 언급되어 있다.

#### 4. GEOFE3D를 이용한 매개변수 연구

본 연구에서는 GEOFE3D를 이용하여 점성토 지반에서의 터널 시공시 지반조건을 반영하는 안정계수(N) 및 터널의 기하조건(C/D)에 대한 매개변수 연구를 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 터널 및 주변 지반 거동 메카니즘을 고찰하고 지표침하 예측 기법을 개발하기 위한 데이터 베이스를 구축하였다.

그림 5는 매개변수 변환연구에서 사용된 지반-터널 시스템의 개략도를 보여주고 있는데, 보이는 바와 같이 균질한 점성토 지반이 약 6.0m의 매립 지반 아래에 놓여 있는 것으로 가정하였다. 점성토의 비배수 전단강도( $c_u$ )와 변형계수( $E_u$ )는 기존의 연구결과(Clough와 Davidson 1977, Bjerrum 1973)를 바탕으로 각각  $c_u = 30 + 0.3\sigma'_v$  (kPa) 및  $E_u = 200c_u$ 의 관계를 따르는 것으로 가정하였다. 매개변수 연구에 있어서 지반의 비배수 전단강도 프로파일의 기울기를 조정하는 방법으로 안정계수를 변화

( $N=1.0\sim 6.0$ )시켰으며, 터널의 직경(D)은 4.0m로 고정시키고 토피 C를 변화시키는 방법으로 C/D를 변화시켰다.

한편 본 연구에서 채택한 실드터널 시공과정의 모사에서 필요한 GAP 파라메타는 실드기중 및 시공과정에 따라 선정하여야 하나 불리한 시공조건에서의 거동을 파악하기 위해 GAP 파라메타는  $G=150\text{mm}$ 로 가정하였다. 그림 6은 해석에 적용된 유한요소망을 보여주고 있는데 수평 및 수직 경계는 터널 직경의 5배 되는 지점에 설치하여 경계면 설치에 따른 오차를 최소화하였다. 한편 지반과 라이닝은 3절점 혹은 4절점 평면변형요소를 이용하여 이산화하였으며, 지반은 Drucker-Prager 항복규준을 따르는 탄소성 재료로, 그리고 라이닝은 탄성재료로 간주하였다. 라이닝의 역학적 특성치로는 콘크리트 라이닝의 재료 특성( $E=20\text{ GPa}$ ,  $A=0.11\text{m}^2/\text{m}$ ,  $I=1.11\times 10^{-4}\text{m}^4/\text{m}$ )을 사용하였으며, 실드터널에서 사용되는 세그먼트 라이닝의 경우 연결부로 인한 강성 저하 효과를 고려하기 위해 콘크리트의 1/10에 해당하는 탄성계수를 부여하였다.

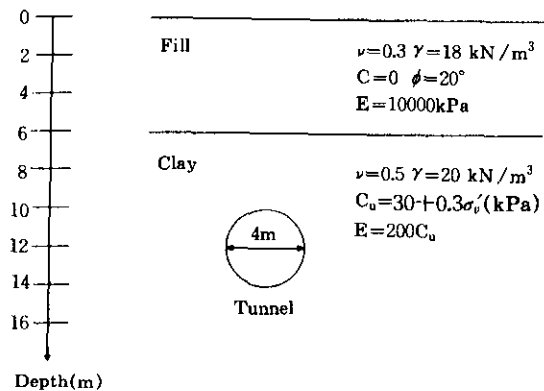


그림 5. 해석에 적용된 지반-터널 시스템 개략도

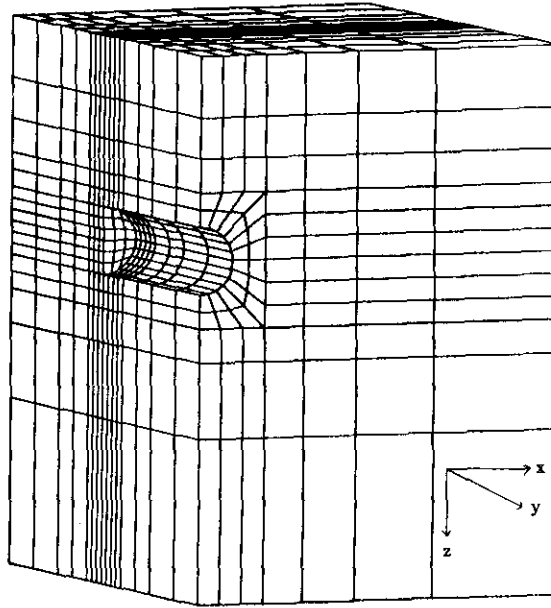


그림 6. 해석에 적용된 유한요소망

## 5. 터널 및 주변 지반 거동 특성

본 연구에서는 실드터널 시공에 따른 터널 및 주변지반 거동 특성을 고찰하기 위해 매우 불리한 시공조건이라고 할 수 있는  $C/D=3.0$  인 터널에 있어서  $N=4.0$  및  $6.0$ 의 경우에 대한 해석 결과를 바탕으로 횡단면 및 종단면 침하 특성을 고찰하였다.

### 5.1 횡단면 침하 특성

그림 7은  $C/D=3.0$ ,  $N=6.0$ 의 조건에 있어서 지표면으로부터의 깊이에 따른 침하곡선을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 심도가 깊어질수록 침하량 자체가 증가함은 물론 침하곡선의 기울기 또한 급해지는 경향을 관찰할 수 있는데 이러한 경향은 터널 시공에 따른 지반의 움직임은 지표에 근접한 구조물 뿐만 아니라 상하수도관 및 가스관 등의 지하매설물에도 심각한 구조적 손상을 가져다 줄 수 있음을 알

수 있다.

그림 8에서는 횡단면의 막장으로부터의 위치에 따른 지표면 침하곡선의 변화경향을 보여 주고 있다. 보이는 바와 같이 침하곡선의 곡률 자체는 막장에 근접할수록 감소하는 경향을 볼 수 있으나, 각 침하곡선에서 최대 침하량의 약 60%가 발생하는 지점인 변곡점  $i$ 의 위치는 그다지 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이러한 경향은 다른  $C/D$ 에 대한 해석 결과에서도 관찰할 수 있어 횡단면 침하곡선의 특성은 횡단면의 막장으로부터의 위치에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

그림 9에서는 유한요소해석으로부터 얻어진 결과를 정규화률분포곡선의 특성을 이용하여 터널중심부에서의 최대 침하량( $\sigma_{s,max}$ )으로 정규화된 침하량에 대수를 취한 값을 터널 중심으로부터의 거리( $x^2$ )에 대하여 도시하였다. 보이는 바와 같이 횡단면의 위치에 관계없이 선형의 관계를 나타내고 있어 Peck의 침하형상 곡선과 잘 일치함을 알 수 있으며, 이러한 경향으로부터 Peck의 침하곡선은 침하곡선의 기울기 및 부등 침하율 등의 침하 특성을 알아보는 데 있어 횡단면의 위치에 관계없이 적용 될 수 있을 것으로 사료된다.

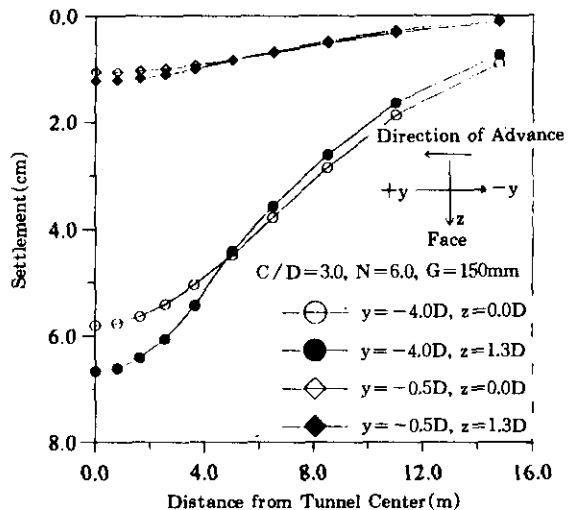


그림 7. 지표면으로부터의 깊이에 따른 횡단면 침하 곡선



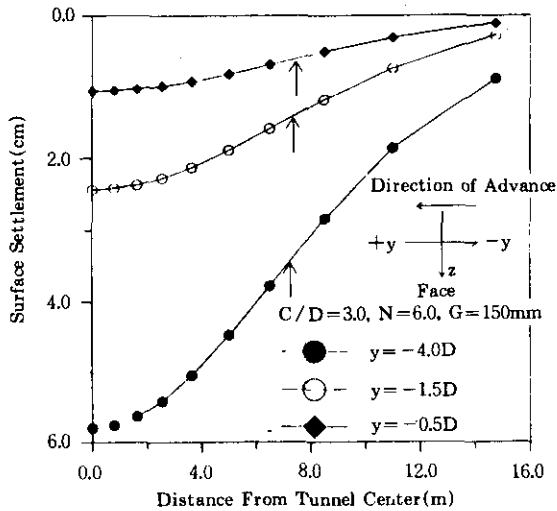


그림 8. 막장으로부터의 거리에 따른 횡단면 침하 곡선

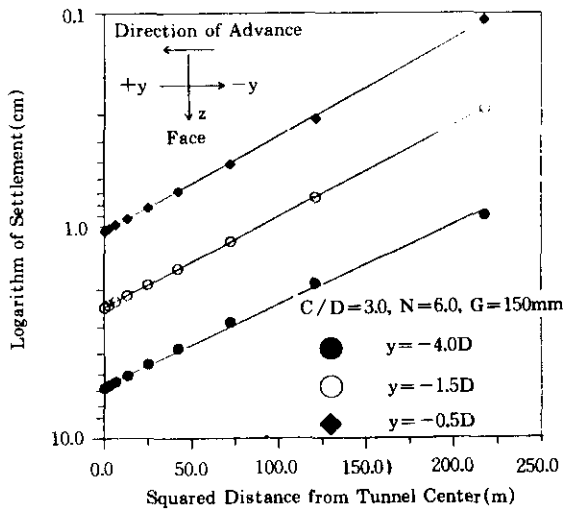


그림 9. 오차함수를 이용한 침하곡선

## 5.2 종단면 침하 특성

그림 10은 3차원적 변위 발생 경향을 침하 등고선을 이용하여 정성·정량적으로 보여 주고 있다. 보이는 바와 같이 터널굴착으로 인한 지반의 거동은 막장 전방 약 1.5D에서부터 시작하여 후방 약 3.0D의 위치에서 수렴하는 경

향을 관찰할 수 있으며, 영향영역은 막장에 접근할수록 좁아지는 경향을 관찰할 수 있다.

그림 11은 안정계수에 따른 막장에서의 천단침하( $\delta_{c,fc}$ )와 변위가 수렴된 평면변형단면에서의 천단침하( $\delta_{c,ps}$ ) 비의 변화 경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 침하비는 0.2~0.3의 범위를 나타내고 있으며, 안정계수가 증가할수록 즉 막장이 불안정할수록 침하비가 다소 증가하는 현상을 관찰할 수 있는데, 이러한 경향은 안정계수가 증가할수록 막장상부에서의 불안정으로 인해 막장손실이 증가하고 이에 따른 소성변형이 증가함에 기인하는 것으로 사료된다.

한편, 안정계수에 따른 막장 상부의 지표침하( $\delta_{s,fc}$ )와 평면변형단면에서의 지표침하( $\delta_{s,ps}$ ) 비의 변화 경향이 그림 12에 나타나 있는데 일반적으로 천단침하의 경우와 유사한 경향을 볼 수 있으나 침하비가 0.35~0.45의 범위에서 나타나고 있으며, N 및 C/D가 증가함에 따라 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 본 연구에서는 평면변형단면에서의 지표침하로부터 막장 상부의 지표침하를 예측할 수 있는 모델을 제시하고자 다중회귀분석을 통해 그림 11과 12에 나타난  $\delta_{s,fc}/\delta_{s,ps}$ 를 C/D 및 N의 함수로 나타내었으며, 식 (18)이 유도되었다( $R^2=95\%$ ). 다중회귀분석 내용을 검토한 결과 C/D가 N에 비해 지표침하비에 더 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 식 (18)은 다음절에서 제시될 종단면 침하 예측 모델에서 매우 효율적으로 사용된다.

$$\frac{\delta_{s,fc}}{\delta_{s,ps}} = 0.213 + 0.258 \log \frac{C}{D} + 0.007N \quad (18)$$

## 6. 지표 침하 예측 모델

본 연구에서는 전 절에서 언급한 1반 거동 특성을 종합적으로 분석하고 그 결과를 토대로 3차원적 지표 침하를 예측할 수 있는 모델을 제시하였으며, 본 절에는 그에 대한 내용을 다루었다.

### 6.1 횡단면 지표 침하 예측 모델

지반 거동 특성을 분석한 결과 막장에 근접할수록 침하량 자체는 감소하나 침하곡선의 형태는 거의 유사하며, 정규확률분포함수에 근거한 Peck의 침하형상곡선으로 큰 무리 없이 추정될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)로 표현되는 Peck의 침하형상곡선을 횡단면 지표 침하 예측 모델의 기본 모델로 채택하고 침하형상곡선의 특성을 결정하는 변곡점  $i$ 를 터널의 기하조건과 안정계수로 표현되도록 하였다.

그림 13은 유한요소해석으로부터 얻어진  $i/D$ 와  $C/D$ 의 관계를 타 연구자에 의해 제안된 변곡점 산정식과 함께 나타내고 있는데 보이는 바와 같이 유한요소해석의 결과가 타 연구자에 의해 제시된 변곡점 산정식의 범위 내에 위치하는 경향을 관찰할 수 있다. 또한

$C/D$ 가 증가할수록  $i/D$ 가 증가하는 현상을 관찰할 수 있으며, 안정계수는 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그림 13에 나타난 유한요소해석 결과에 대한 회귀분석 결과  $i/D$ 와  $C/D$ 의 관계는 식 (19)와 같이 표현될 수 있으며, 결정계수가 약  $R^2=94\%$ 로 나타나 실무에서 매우 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

$$\frac{i}{D} = 0.70 \frac{C}{D} \left( 1 - 0.05 \frac{C}{D} \right) - 0.01 \quad (19)$$

그림 14에서는 유한요소해석으로부터 얻어진 지표침하곡선과 식 (19)로부터 결정된  $i/D$ 를 이용하여 추정된 지표침하곡선을 비교하고 있는데 보이는 바와 같이 다소의 차이를 관찰할 수 있으나 침하곡선의 특성인 곡선의 기울기 및 침하폭을 결정하는데는 큰 무리가 없음을 보여주고 있어 매우 효율적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

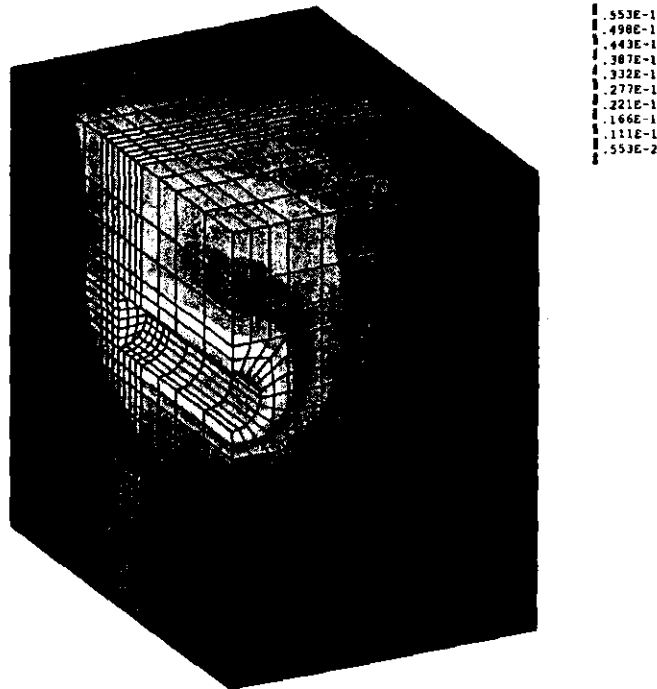


그림 10. 종단면 지표 침하 발생 경향

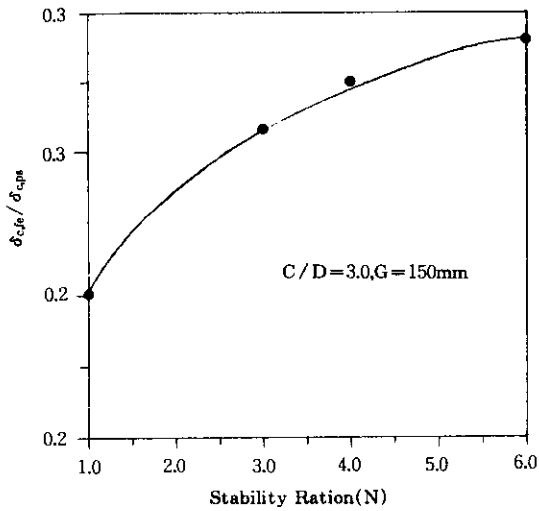


그림 11. 안정계수(N)에 따른 침단 침하비 변화 경향

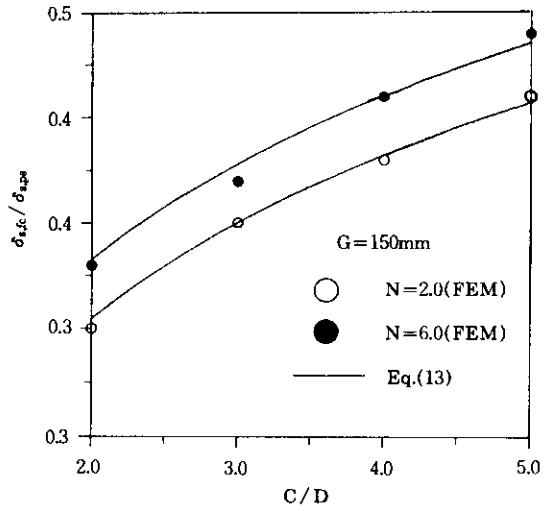


그림 12. C/D에 따른 지표침하비 변화 경향

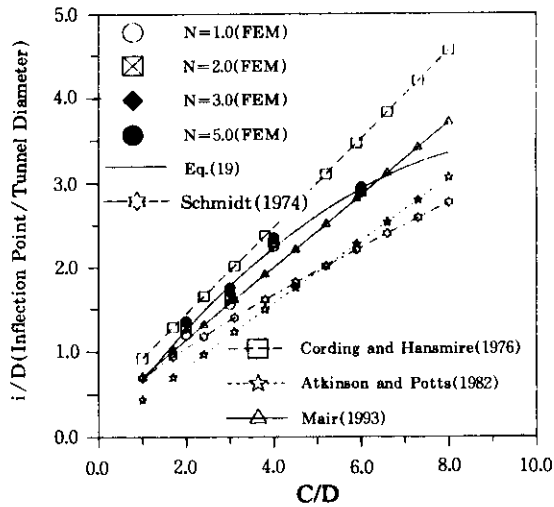


그림 13. C/D에 따른 변곡점 변화 경향

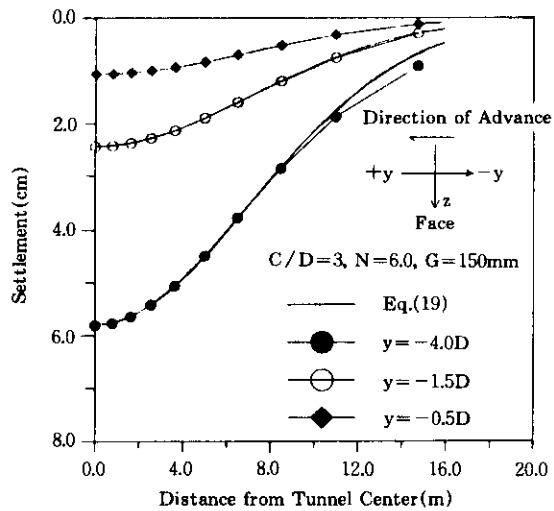


그림 14. 횡단면 침하예측 모델과 유한요소해석 결과의 비교

## 6.2 종단면 지표 침하 예측 모델

앞에서 언급한 Attewell과 Woodman(1982)의 종단면 지표 침하 예측 모델을 이용하기 위해서는 고려 대상 횡단면에서의 지표침하곡선의 체적  $V_s$ 와 침하곡선의 변곡점  $i$ 가 필요하다.

침하곡선의 체적  $V_s$ 는 Schmidt(1969)가 제안한 방정식  $V_s = \sqrt{2\pi}^2 \delta_{s,max}$ 으로 근사화 될 수 있으므로 이를 식 (14)에 대입하면 식 (20)이 얻어진다.

$$\frac{\delta(x)_y}{\delta(x)_{s,max}} = \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \left[ G\left(\frac{y-y_i}{i}\right) - G\left(\frac{y-y_l}{i}\right) \right] \quad (20)$$

식 (20)은 결국 Peck의 침하형상곡선식 형태로 귀착되며, 종단면(y-z 평면)의 침하량 산정보다는 침하 분포 곡선을 추정하는데 유용하게 적용될 수 있다.

그림 15에서는 C/D=3.0, N=6.0의 경우에 대해 식 (20)을 이용하여 추정된 터널의 중심축과 일치하는 종단면 지표침하곡선을 유한요소해석 결과와 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 식 (20)에 의해 추정된 침하곡선은 누적확률함수의 특성으로 인해 막장 상부에서는 터널의 기하조건이나 지반조건에 관계없이 평면변형 횡단면 침하의 50%가 발생하여 유한요소해석 결과와는 다소 차이가 나는 경향을 관찰할 수 있다. 그러나 막장 상부의 지표 침하가 유한요소해석 결과로부터 얻어진 곡선과 일치하도록 수평 이동시킨 곡선은 유한요소해석으로부터 얻어진 곡선과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과는 식 (18)을 이용하여 막장 상부 지표 침하량을 결정한 후 침하곡선의 막장 상부 지표 침하가 이 값에 일치하도록 침하곡선을 수평 이동시킴으로써 중방향 침하 곡선을 추정할 수 있음을 의미한다. 또한 이 그림에는 배규진(1989)에 의해 제안된 식 (16)에 의해 추정된 침하곡선이 함께 도시되어 있다.

이상의 결과를 토대로 본 연구에서 얻어진 결과와 Attewell과 Woodman의 제안식을 이용하여 다음과 같은 종단면 지표 침하곡선 예측 기법을 제시하고자 한다.

단계 1: 종단면에서의 침하 추정 지점을 선택한다. (즉 x, y 설정)

단계 2: 식 (19)를 이용하여 평면변형 횡단면 지표 침하곡선의 변곡점(i)을 결정한다.

단계 3: 단계 1 및 2를 반복하면서 식 (20)을 이용하여 침하곡선을 추정한다.

단계 4: 식 (18)을 이용하여 막장 상부 지표 침하비( $\delta_{s,l}/\delta_{s,m}$ )를 결정한다.

단계 5: 단계 3에서 얻어진 침하곡선의 막장부 지표 침하값이 단계 4에서 얻어진 막장 상부 지표 침하비와 일치하도록 침하곡선을 수평 이동시킨다.

중방향 침하곡선은 이와 같이 단계 1~5를 적용함으로써 추정할 수 있으며, 이로부터 침하곡선의 특성, 즉 곡률 및 부등침하율 등을 결정할 수 있다. 또한 수치해석을 통해 평면변형 단면에서의 최대 지표 침하량( $\delta_{s,m}$ )을 산정하고 이를 침하곡선식에 곱함으로써 정량적인 침하량 산정 또한 가능하다.

본 연구에서 제안된 종단면 지표침하곡선 예측 기법의 유효성을 검증하기 위해 C/D=3.0, N=6.0, G=150mm의 경우에 대해서 식 (20)을 이용하여 종단면 침하곡선을 추정하고 그 결과를 유한요소해석 결과와 비교하였다. 그림 16에서 보이는 바와 같이 식 (20)을 이용한 침하곡선은 특히 막장부에서 유한요소해석 결과와 다소 차이가 나는 경향을 관찰할 수 있으나, 식 (18)로부터 계산된 막장 지표 침하비( $\delta_{s,l}/\delta_{s,m}=0.36$ )를 이용하여 막장부에서의 침하비가 0.36이 되도록 수평 이동시킨 침하곡선은 유한요소해석 결과와 좋은 일치를 보이는 경향을 관찰할 수 있다.

한편, 그림 17은 1976년도 캐나다에서 EPB 실드로 시공된 Thunder Bay 터널(Lee와 Rowe 1991)의 계측 결과를 식 (20)으로 추정된 침하곡선과 비교하고 있다. Thunder Bay 터널은 Ontario주 Thunder Bay에 시공된 직경 2.5m, 연장 3.3km의 하수터널로서 약 40kPa의 비배수전단강도를 보유하는 점성토에 시공되었으며 C/D=4.0, N=3.0의 조건에 해당한다. 그림 17에서 관찰할 수 있는 바와 같이 터널 막장 직 상부에서의 지표 침하( $\delta_{s,l}/\delta_{s,m}=0.15$ )는 본 연구에서 제안한 식(18)을 이용하여 계산된 값( $\delta_{s,l}/\delta_{s,m}=0.38$ )과 많은 차이를 보이고 있는데 이는 식 (18)이 개방형 실드를 대상으로한 결과를 바탕으로 유도된 반면

Thunder Bay 터널은 막장 손실을 극소화하는 EPB 실드에 의해 시공되었기 때문에 판단된다. 그럼에도 불구하고 이 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 식 (20)을 이용하여 유추된 침하곡선을 계측 결과의 막장 지표 침하에 일치하도록 수평 이동시킬 경우 계측된 종단 침하곡선과 비교적 잘 일치하는 경향을 관찰할 수 있다.

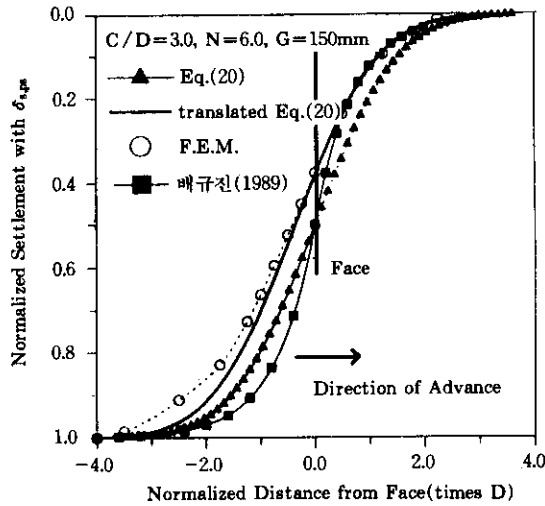


그림 15. 종단면 침하예측 모델과 유한요소해석 결과의 비교

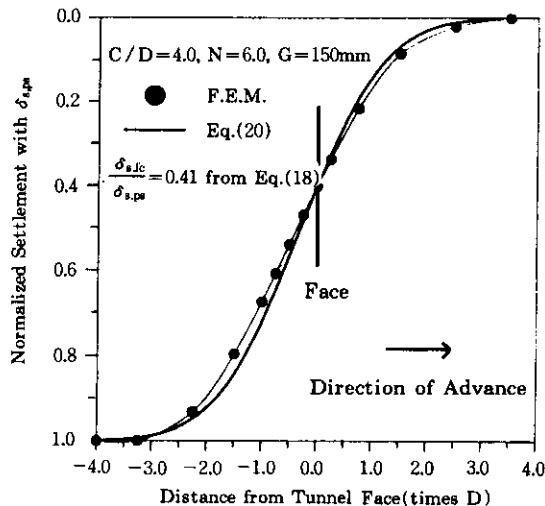


그림 16. 종단면 침하예측 모델 적용 예

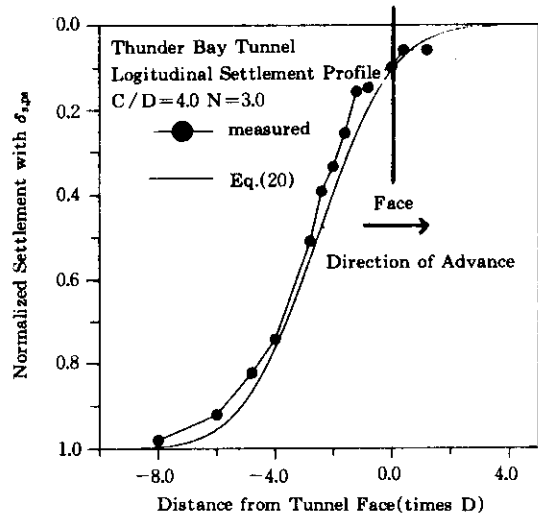


그림 17. Thunder Bay Tunnel 종단면 침하 비교

## 6. 결론

본 연구에서는 실드 터널 시공에 따른 터널 및 주변지반 거동 메카니즘을 고찰하고 그 결과를 토대로 실드 터널 시공에 따른 지표 침하 예측 기법의 개발을 시도하였다. 이를 위해 먼저 실드 터널의 시공과정 모사 하는 알고리즘을 3차원 유한요소해석 프로그램 GEOE3D에 적용시키고 이를 이용하여 터널의 기하조건 및 지반조건을 달리하는 다양한 경계조건에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 그 결과를 이용하여 실드터널 및 주변지반의 거동 메카니즘을 알아보았으며, 실드터널 시공에 따른 지표 침하를 예측할 수 있는 횡·종단면 지표 침하 예측 모델을 제시하였다.

본 연구에서 제시된 침하 예측 모델은 유한요소해석 결과와 좋은 일치를 보이고 있어 현장 문제에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 사료되나 다양한 적용성을 확보하기 위해 다음과 같은 향후 연구가 뒤따라야 할 것이다.

- 보다 다양한 지반조건 및 터널의 기하조건에 대한 매개 변수 연구
- 포화 점토층의 장기 거동 예측 기법의 개발

- 다양한 현장 계측 자료를 이용한 제시된 예측 기법의 검증

## 감사의 글

본 논문은 1995년 한국과학재단의 목적기초 연구비 지원(KOSEF 951-1202-009-1)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 배규진(1989), "토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위 예측에 관한 연구," 박사학위논문, 연세대학교
- 유충식(1996), "토사터널 시공에 따른 지반의 움직임에 관한 연구," 최종보고서, 한국과학 재단
- 홍성완, 이상은, 배규진, 구본효, 정하익(1985), "지반침하 방지공법에 관한 연구", 연구보고서, 85-W-2, 한국건설기술연구원, pp. 1-214.
- Atkinson, J. H. and D. M. Potts (1977) "Subsidence above Shallow Tunnels in soft Ground," *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 103, No. GT4, pp. 307-325.
- 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. 32-41.
- Bjerrum, L. (1973) "Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils (Collapsible, Expansive and Others)," *Proc. of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1. 1, pp. 39-49.
- Broms, B. B. , Bennermark, H. (1967) "Stability of Clay at Vertical Openings," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 93, No. SM1, pp. 611-654.
- Cording, E. J. and Hansmire, W. H. (1975) "Tunnels in soils-General Report", *Proceedings, 5th Pan Amer. Conf. of SMFE, session IV, Buenos Aires, Argentina*
- Clough, G. W. , and Davidson, R. R. (1977) "Effect on Construction on Geotechnical Performance," *Proc. Specialty Session III, Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp 15-53.
- Clough, G. W. , Schmidt, B. (1981) "Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay," *Soft Clay Engineering*, Elsevier Scientific Publishing Company
- Lee, K. M. and Rowe, R. K. (1991) "An analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay tunnel," *Canadian Geotechnical Journal*, 28, pp. 25-41.
- Lee, K. M. and Rowe, R. K. (1990) "Finite Element Modelling of The Three-Dimensional Ground Deformations Due To Tunnelling in Soft Cohesive Soils: Part II - Results," *Computers and Geotechnics*, Vol. 10, pp. 111-138.
- Mair, R. J. , Taylor, R. N. and Bracegirdle, A. (1993) "Surface settlement profiles above tunnels in clays," *Geotechnique*, Vol. 43, No. 2, pp. 315-320.
- O'Reilly, M. P. , and New, B. M. (1982) "Settlement above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction," *Tunnelling '82*, pp. 173-181.
- Ranken, R. E. and Ghaboussi, J. (1975) "Tunnel Design Considerations: Analysis of Stresses and Deformations Around Advancing Tunnels," *U.S. Department of Transportation, Report FRA-OR&D 75-84, August*
- Rowe, K. M. and Lee, K. M. (1992) "An evaluation of simplified techniques for estimating three-dimensional undrained ground movements due to tunnelling in soft soils," *Canadian Geotechn. Journal*, 29, pp 39-52.
- Peck, R. B. (1969) "Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground. " *Seventh International Congress of Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of Art Report*
- Schmidt, B. (1974) "Prediction of Settlements Due to Tunnelling in Soil: Three Case Histories," *Proceedings, 2nd Rapid Excavation Tunnelling Conference, San Francisco*.

Vol. 2, pp. 1179-1199.

19. Shirasuna, T. (1985) "Finite Element Analyses on Cohesive Soil Behavior Due to Advanced Shield Tunneling", Ph. D. Thesis, Stanford University

20. Yoo, C. S. (1993) "Interaction between Shallow Foundations and Unlined Soft Ground Tunnels", Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA.

(접수일자 1997. 9. 23)