

## 터널굴착에 따른 모형말뚝의 기울기 정도 연구

이용주<sup>1</sup>, 황재욱<sup>2</sup>

### A study on degree of inclination of model pile due to tunnelling

Yong-Joo Lee, Jae-Wook Hwang

**ABSTRACT** In this study, both the model test and the numerical analysis were carried out to figure out the physical behaviour of the model pile during the tunnelling. As a result, both the vertical and the horizontal displacements were simultaneously occurred in the model pile which is subjected to the working load during the volume loss. Consequently, the phenomenon of inclination took place in the model pile. The degree of inclination of the model pile depends on volume loss due to tunnel excavation, pile tip's offset from the tunnel centre, and bearing ground conditions in which pile tip is located. Therefore, in the planning stage of urban tunnelling not only the ground behaviour with respect to the pile locations, but also the physical behaviour of pile itself should be carefully analysed to avoid damage of adjacent buildings.

**Keywords:** Tunnelling, model test, numerical analysis, degree of model pile inclination, ground loss

**요약** 본 연구는 기존 모형말뚝에 인접하여 터널을 굴착하는 경우 발생하는 모형말뚝에 대한 거동연구로 이를 규명하기 위해 모형실험과 수치해석을 수행하였다. 해석 결과, 모형터널의 굴착 정도인 지반손실에 따라 수직하중을 받고 있던 모형말뚝에 수직 및 수평변위가 동시에 발생하였으며, 이로 인해 모형말뚝이 기울어지는 현상이 발생하였다. 이러한 모형말뚝의 기울기 정도는 터널굴착으로 인한 지반손실, 터널중심으로부터 말뚝 선단부까지의 이격거리와 말뚝 선단부의 지지층 조건에 따라 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 도심지 터널굴착을 계획함에 있어 인접한 기존 말뚝의 위치에 따른 지반거동뿐만 아니라 말뚝 자체의 거동도 반드시 분석하여 상부구조물의 손상을 최소화해야 한다.

**주요어:** 터널굴착, 모형실험, 수치해석, 모형말뚝의 기울기 정도, 지반손실

---

접수일(2011.5.31), 수정일(2011.6.18), 게재확정일(2011.7.13)

<sup>1</sup>정회원, 국립서울과학기술대학교 건설공학부 교수

<sup>2</sup>학생회원, 국립서울과학기술대학교 건설공학부 학부연구생

\*교신저자: 이용주 (E-mail: [ucesyjl@seoultech.ac.kr](mailto:ucesyjl@seoultech.ac.kr))

## 1. 서론

최근 도심지 지상공간의 부족으로 인해 지하공간에 대한 개발이 확대되고 있다. 특히, 지상의 교통난을 해소하기 위한 대책으로 터널 건설이 많이 이루어지고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 도심지 특성상 초고층 빌딩 구조물이나 고가차도 등 주로 말뚝기초에 의해 상부하중을 지지하고 있는 경우, 이에 인접하여 터널을 굴착하는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 경우 터널굴착으로 인해 인접한 기존 말뚝기초의 역할인 상부구조물 하중에 대한 저항과 과다한 침하로 인해 빌딩의 사용성과 기능성에 심각한 문제가 발생하지 않도록 해야 한다. 한편, 이와는 대조적으로 기존 터널에 인접해 말뚝을 시공하는 경우도 생각해 볼 수 있다. 이 경우 새로운 말뚝시공으로 인해 기존 운행중인 터널 라이닝과 관련하여 내부의 하중변화 및 변형이 발생할 수 있다. 따라서 설계 시 이러한 상호거동을 반드시 고려하여 새로운 시공으로 인한 인접한 기존 구조물에서 발생하는 하중 및 변위를 반드시 정량적으로 분석하여야 한다(Potts, et al., 2002).

영국의 런던지하철공사(LUL: London Underground Limited)에서는 인접한 기존 터널에 타입공법으로 말뚝을 시공하는 경우는 기존 터널로부터 최소한 15 m 이상 떨어져 시공하며 천공공법으로 말뚝을 시공하는 경우는 최소한 3 m 이상 떨어져 시공하도록 요구하고 있다. 이와는 대조적으로 기존 말뚝기초에 근접하여 터널을 시공하는 경우, 말뚝 선단부 침하에 따른 영향권(Lee & Bassett, 2007)과 그림 2에서 보는 바와 같이 말뚝 선단부 위치에 따른 전단변형률 형성에 근간을 둔 개략적인 가이드라인을 제시하였다(이용주, 2008). 이러한 전단거동영역은 그림 2에서 보듯이 터널굴착으로 인해 직접으로 영향을 받는 상호적인 전단거동(interactive shear behavior)영역 1과 터널굴착으

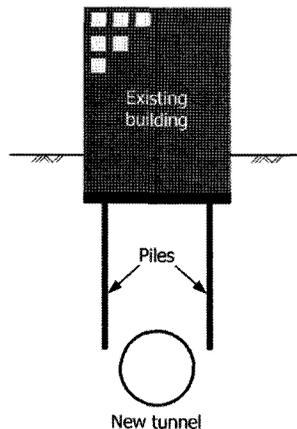


그림 1. 기존 말뚝기초에 인접한 터널굴착

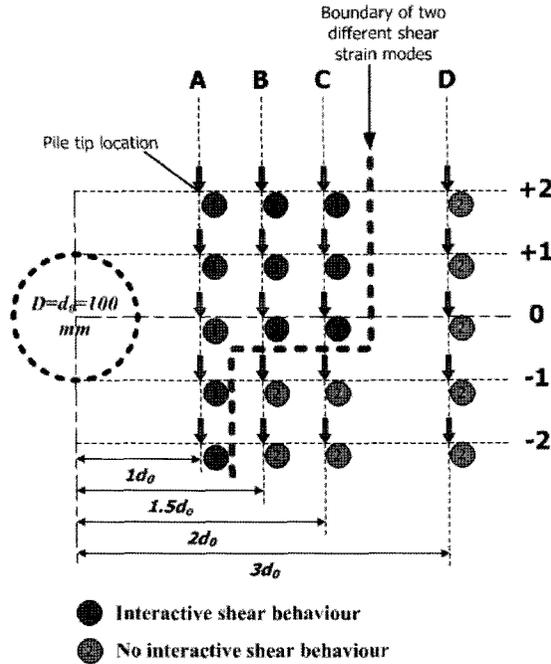


그림 2. 터널굴착으로 인한 전단거동영역의 경계선(이용주, 2008)

로 인한 그 영향이 미미한 비상호적인 전단거동(no interactive shear behavior)영역 2로 나누어진다.

터널굴착으로 인한 말뚝 선단부의 침하영향권과 전단거동영역을 종합적으로 분석해 보면 기존말뚝의 중심으로부터 터널 직경의 2배 이상 떨어져 터널을 시공하는 것이 터널굴착으로 인한 말뚝에 대한 영향을 최소화한다는 것을 알 수 있다. 참고로 이러한 기준은 다양한 지층조건과 지하수 등에 대한 영향이 고려되지 않은 사질토 기반에서의 터널굴착으로 인한 천공말뚝(bored pile)의 개략적인 가이드라인으로 활용할 수 있다.

국내의 경우 터널굴착으로 인한 인접한 말뚝거동에 대한 연구는 모형실험을 통한 연구보다는 대부분 실무적인 측면과 병행하여 수치해석을 통해 영향권을 예측하고 있다(이철주 등, 2005). 최근 최고니 등(2011)은 교량의 말뚝기초 인근에 터널이 시공이 되는 경우 3차원 유한요소해석을 수행하여 말뚝의 거동을 고찰하였다. 그 결과, 교량의 직하부에 터널 시공 시 터널중심에서 4.0D 외곽에 존재하는 주변 말뚝기초에 대한 터널 시공의 영향은 무시할 수 있으며, 또한 2.0D 정도 떨어진 말뚝기초는 터널굴착 직각방향의 수평변위가 작아 터널굴착으로 인한 영향은 미비한 것으로 판단된다고 보고한 바 있다.

본 연구에서는 사진계측을 통해 모형말뚝의 물리적 거동특성을 파악하기 위해서 건조된 사질토 기반을 이상화한 알루미늄 봉을 모형실험에 사용하였다. 따라서 실제적인 현장의 다양한 지반조건

및 지하수위 등과 더불어 3차원 거동을 고려하지 못한 제한조건이 있으나, 터널굴착에 따라 말뚝이 기울어지는 정도를 모형실험과 수치해석을 통해 규명하고 이를 서로 비교 및 분석하여 최종적으로는 터널굴착 정도인 지반손실에 따른 가이드라인을 제시하고자 한다.

## 2. 모형말뚝의 기울기 정의

터널굴착에 따른 모형말뚝의 기울어지는 정도를 그림 3에서 보는 바와 같이  $\theta$ 로 정의할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음의 식 (1)과 같다.

$$\sin \theta = \frac{|\rho_{x(head)} + \rho_{x(tip)}|}{L_p} \quad (1)$$

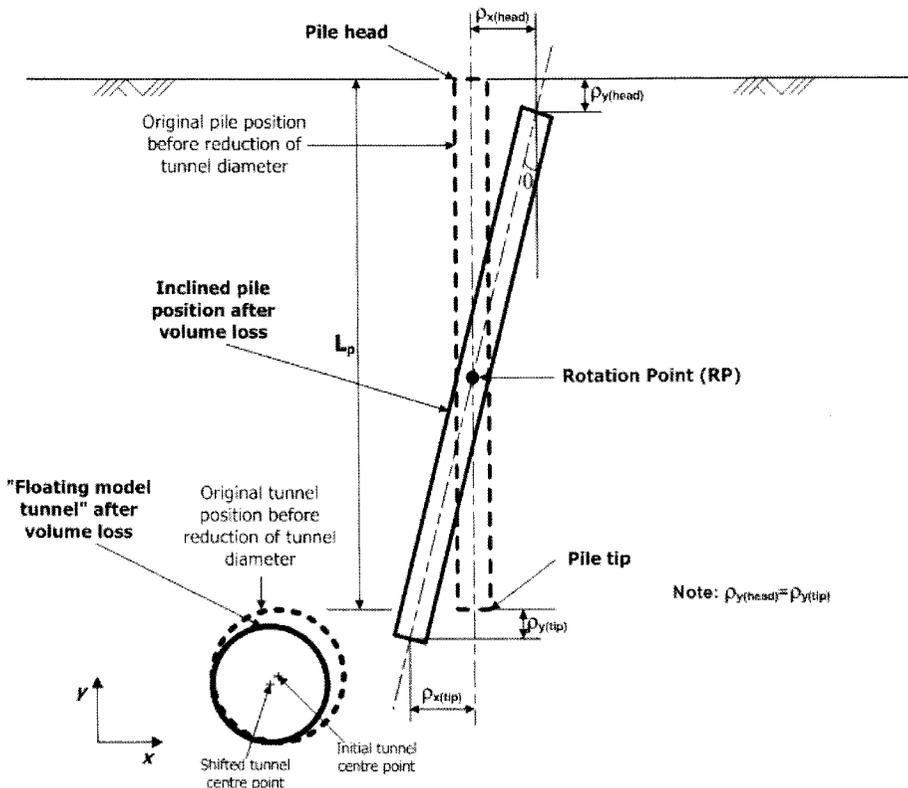


그림 3. 터널굴착으로 인한 모형말뚝의 이상화된 거동 모식도

여기서,

$\rho_{x(head)}$ : 모형말뚝 두부(pile head)의 수평변위(mm),  $\rho_{x(tip)}$ : 모형말뚝 선단부(pile tip)의 수평변위(mm),  $L_p$ : 말뚝의 근입길이(mm)

모형말뚝의 기울기 정도는 말뚝의 침하에 따른 회전점(rotation point)의 변화로 인한 말뚝 두부와 선단부에서의 수평변위에 비례한다는 것을 식 (1)에서 알 수 있다. 참고로 모형말뚝의 근입길이는 항상 일정한 370 mm이며, 말뚝 두부는 구속이 되지 않은 자유조건이다.

그림 3에서 보듯이 터널굴착으로 인해 모형터널의 중심이 모형파일의 선단부를 기준으로 좌측으로 이동(floating model tunnel)되는 물리적 현상이 실제적으로 모형실험 결과에서도 나타났다. 이러한 원인은 파일의 선단부에 작용하고 있던 지지하중인 수동하중이 터널굴착에 따라 모형터널로

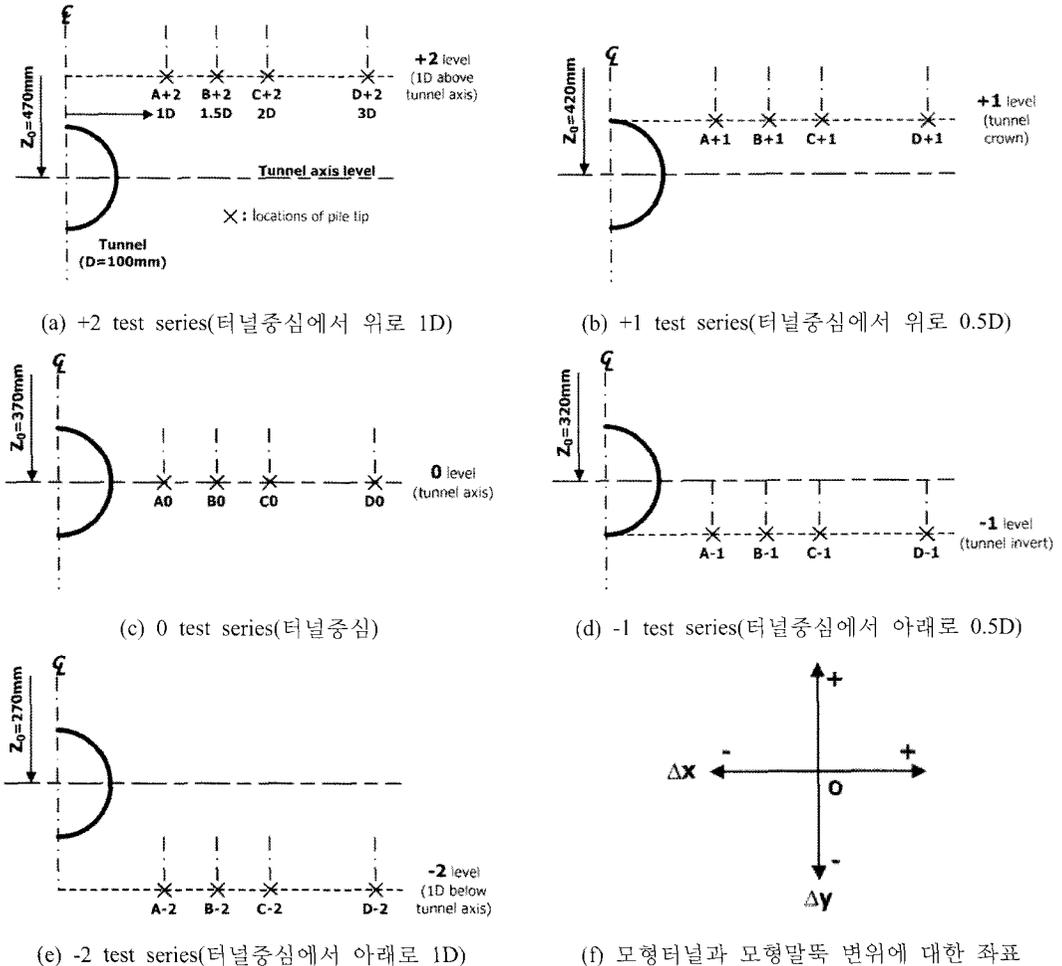


그림 4. 터널중심에서 이격된 모형말뚝의 위치(D: 터널의 직경)

전이되면서 모형터널을 밀어주기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 그림 4와 같이 모형터널의 중심(tunnel axis level)을 기준으로 총 20개의 서로 다른 말뚝 선단부 위치에 따른 모형실험과 수치해석을 수행하였으며, 이를 통해 나타난 모형말뚝의 기울기 정도를 등고선으로 표현하고자 한다.

### 3. 모형실험과 수치해석

실제 터널굴착으로 인한 지반거동은 3차원 거동이나 본 실험에서는 2차원 평면변형을 조건으로 가정하여 축소모형실험을 수행하였다. 본 모형실험의 특징은 사질토 지반을 모사하는 알루미늄 봉을 사용하여 근거리사진계측을 적용하는데 있다. 이러한 근거리사진계측기법은 모형지반 및 모형 구조물의 변위를 게이지 등 다양한 계측장비를 직접 사용하지 않고도 디지털 이미지 프로세싱을 통해 변위를 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 알루미늄 봉으로 모사한 모형지반의 특징과 입도분포, 모형터널을 비롯한 실험장비에 대한 자세한 사항은 이용주(2008)와 이용주 등(2010)에 의해 소개된 바 있다.

표 1. 수치해석에 적용된 물성치

구분	$c'$ (kPa)	$\nu$	$\phi'$ (°)	$\psi$ (°)	$E_0$ (kPa)	$m_E$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$Y_0$ (m)
지반	0.1	0.35	23	15	1,600	10,000	24	0.72
말뚝	-	0.2	-	-	$1.55 \times 10^7$	-	23	-
터널*	-	0.2	-	-	$1.55 \times 10^7$	-	-	-

$c'$ : 점착력,  $\nu$ : 포아송비,  $\phi'$ : 내부마찰각,  $\psi$ : 팽창각,  $E_0$ : 지표면에서 탄성계수,  $m_E$ : 깊이에 따른 탄성계수 기울기,  $\gamma$ : 단위 중량,  $Y_0$ : 지표면 위치, \*Bar 단면적: 0.003 m<sup>2</sup>

표 2. 수치해석 절차

Increment block No.	Increment block list	Time-Step (sec)	Number of increments (accumulated increments)
1	Installation of tunnel bar and pile elements	1	5(5)
2	Application of pile working load, $P_w$	1	550(555)
3	Tunnel excavation with supporting bar elements	1	100(655)
4	Tunnelling until $V_L=3.94\%$	1	100(755)
5	Tunnelling until $V_L=7.63\%$	1	50(805)
6	Tunnelling until $V_L=10.94\%$	1	100(905)
7	Tunnelling until $V_L=15.21\%$	1	50(955)
8	Tunnelling until $V_L=18.65\%$	1	100(1055)

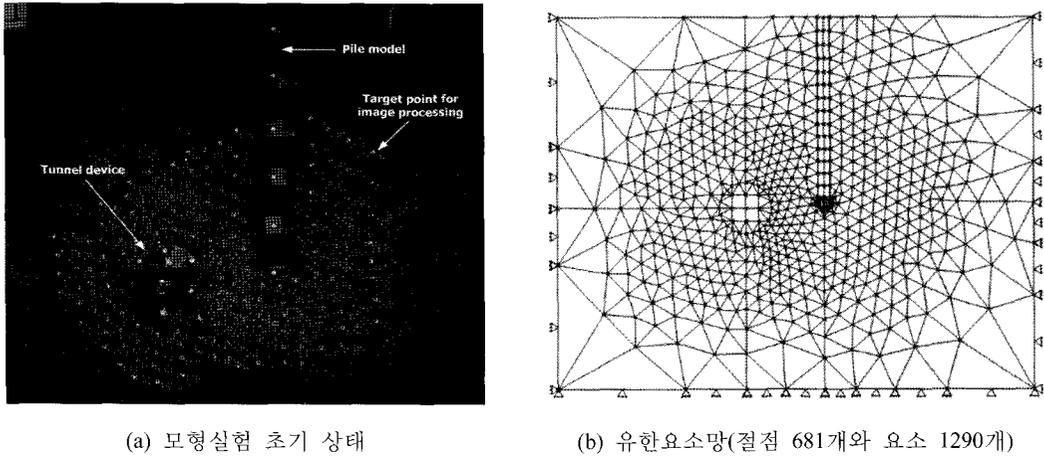


그림 5. 모형실험과 수치해석을 위한 유한요소망

수치해석과 관련하여서는 모형지반을 Mohr-Coulomb 구성모델, 모형말뚝은 탄성체, 모형터널의 경계면은 2절점을 가지는 Bar 요소로 각각 모사하였다. 모형지반, 모형말뚝 및 모형터널 경계면의 물성치는 다음의 표 1과 같다.

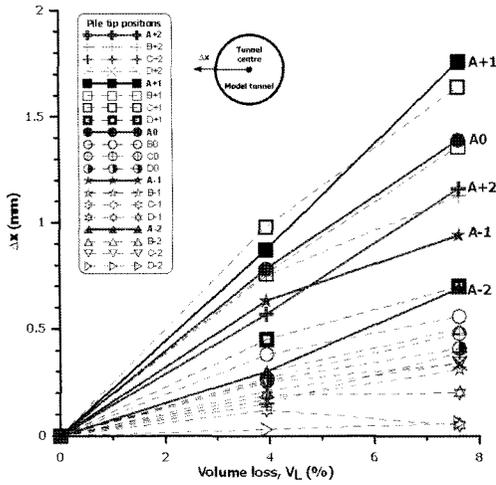
터널굴착 모델링은 총 4단계로 1단계는 초기단계로 모형터널의 외경이 축소되기 전의 절점을 나타내며 2단계는 모형터널의 외경이 모든 절점에서 축소되는 단계이다. 3단계는 모형말뚝의 선단 하중의 영향으로 인해 모형터널의 중심이 아래쪽으로 움직인 값을 절점에 적용한다. 끝으로 4단계는 3단계와 같은 방법으로 모형터널의 중심이 왼쪽으로 움직인 값을 절점에 적용한다. 이러한 현상은 본 논문의 4절에서 자세히 설명된다.

수치해석 절차는 표 2에서 정리한 바와 같이 총 8단계로 1, 2단계는 모형터널과 모형파일을 각각 셋팅하고 모형말뚝에 설계하중을 재하하는 단계로 이루어져 있다. 3단계 이후로는 점진적으로 모형터널의 외경이 축소됨에 따라 지반손실( $V_L$ )이 증가하는 단계로 구성되어 있다. 참고로 이러한 수치해석 단계는 모형실험의 수행절차에 부합되게 구성하였다.

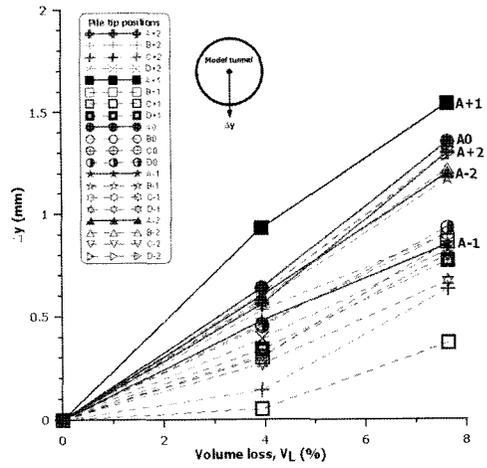
모형말뚝과 모형터널이 알루미늄 봉으로 모사한 지반모델 속에 설치가 완료된 모형실험의 초기 장면과 이를 수치해석을 위한 유한요소망으로 나타내면 그림 5와 같다.

#### 4. 모형터널의 거동

모형터널의 지름이 축소되는 동안 모형말뚝의 선단부 위치에 따라 모형터널이 좌측( $\Delta x$ ) 및 아래( $\Delta y$ )로 이동되는 현상이 발생하였다. 이러한 모형터널에 대한 중심점의 변화(initial tunnel centre



(a) 모형터널의 수평거동



(b) 모형터널의 수직거동

그림 6. 터널굴착에 따른 모형터널의 수평 및 수직거동

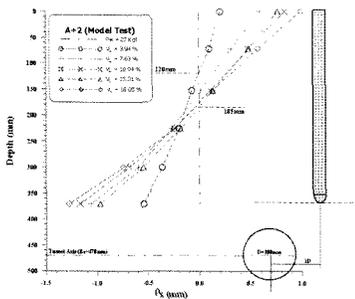
point → shifted tunnel centre point, 그림 3 참조)를 사진계측을 이용해 정량적으로 나타내면 다음의 그림 6과 같다. 예상한 바와 같이 말뚝의 선단부가 터널의 천단부 및 터널의 중심에서 수평으로 1D만큼 떨어져 위치하는 A+1에서 모형터널의 수평 및 수직변위가 가장 크게 발생하였다.

## 5. 모형말뚝의 거동

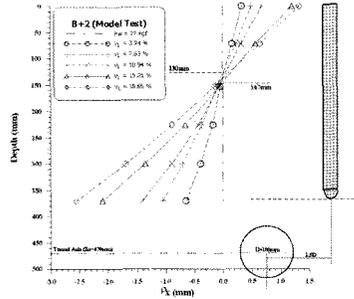
### 5.1 모형말뚝의 수평변위

터널굴착에 따른 20개 모형말뚝의 기울기 정도를 모형실험과 수치해석을 통해 비교하기 위해 먼저 모형말뚝의 수평변위( $\rho_x$ )에 대해 조사하였다. 모형실험 +2와 +1 시리즈 각각에 대한 결과는 그림 7과 그림 8에 해당된다. 지반손실에 따른 말뚝의 수평변위가 0이 되는 지점( $\rho_x = 0$ , 회전점)의 최상부(상한 값) 및 최하부(하한 값) 위치를 그래프에 표시하였다.

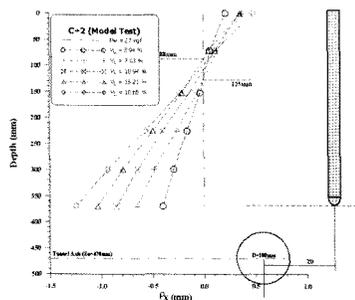
그림 7과 그림 8에서 보듯이 B+2와 D+1를 제외하고는 일반적으로 말뚝의 선단부가 터널의 중심에서 멀어질수록 수평변위가 0인 회전점이 지중에서 지표면으로 이동되는 것을 알 수 있다. 즉, +2 모형실험에서는 터널굴착으로 인한 지반손실이 3.94%인 경우, A+2는 120 mm, C+2는 88 mm, D+2는 60 mm로 나타났다. +1 모형실험에서도 터널굴착으로 인한 지반손실이 3.94%인 경우, A+1는 150 mm, B+1는 86 mm, C+1는 60 mm로 나타났다. 이러한 현상은 다음에 나오는 수치해석 결과인 그림 9와 그림 10에서 확인할 수 있다.



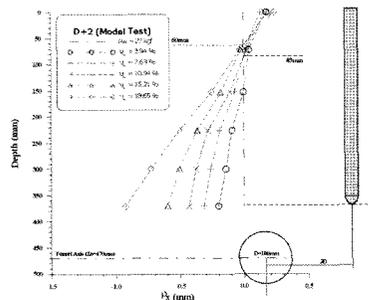
(a) 모형실험 A+2



(b) 모형실험 B+2

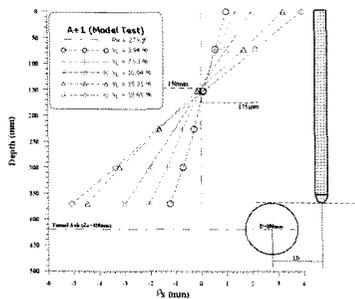


(c) 모형실험 C+2

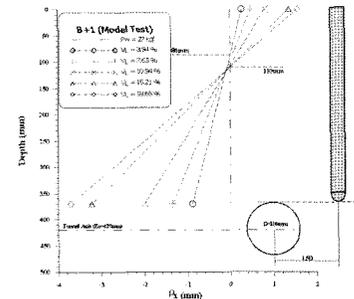


(d) 모형실험 D+2

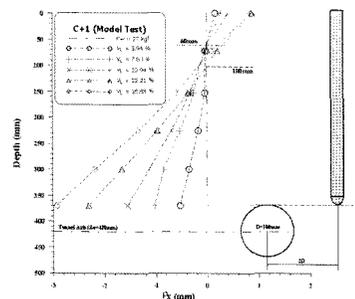
그림 7. 터널굴착에 따른 모형말뚝의 수평변위(+2 모형실험)



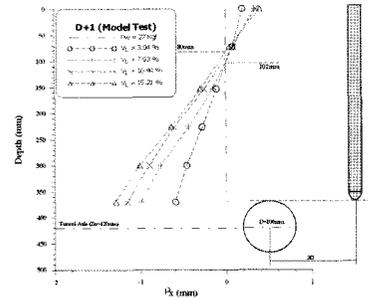
(a) 모형실험 A+1



(b) 모형실험 B+1

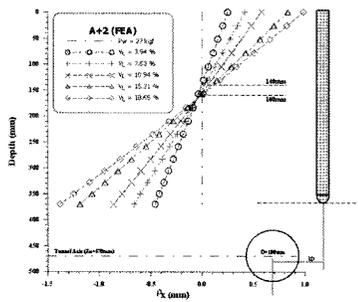


(c) 모형실험 C+1

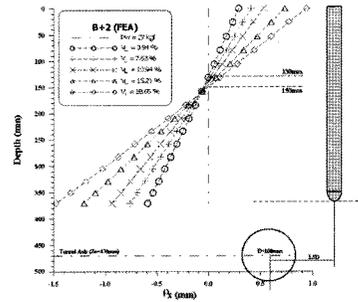


(d) 모형실험 D+1

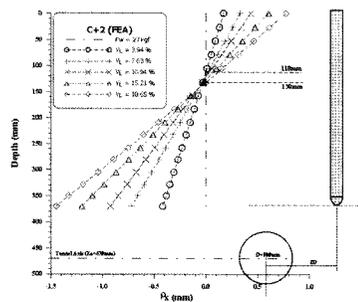
그림 8. 터널굴착에 따른 모형말뚝의 수평변위(+1 모형실험)



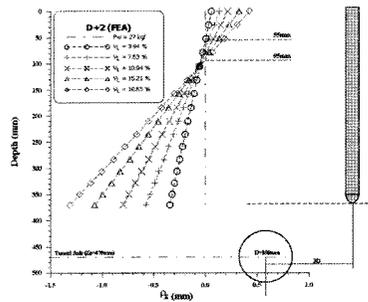
(a) 수치해석 A+2



(b) 수치해석 B+2

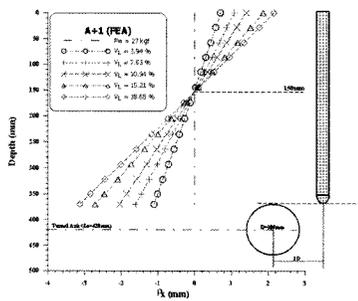


(c) 수치해석 C+2

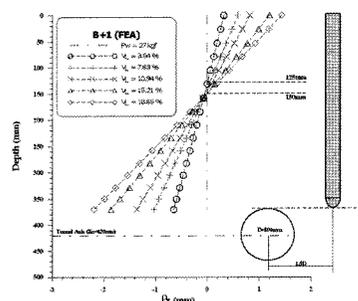


(d) 수치해석 D+2

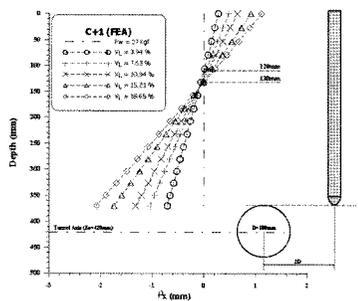
그림 9. 터널굴착에 따른 모형말뚝의 수평변위(+2 수치해석)



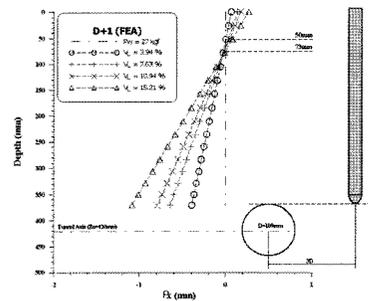
(a) 수치해석 A+1



(b) 수치해석 B+1

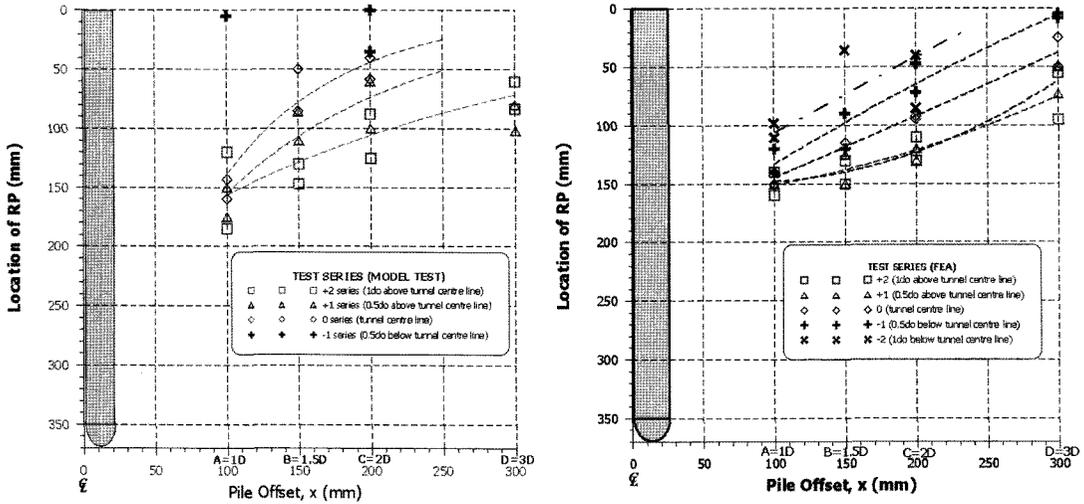


(c) 수치해석 C+1



(d) 수치해석 D+1

그림 10. 터널굴착에 따른 모형말뚝의 수평변위(+1 수치해석)



(a) 모형실험을 통한 모형말뚝의 회전점(RP) 위치 (b) 수치해석을 통한 모형말뚝의 회전점(RP) 위치

그림 11. 모형말뚝의 회전점 위치 비교

### 5.2 모형말뚝의 회전점 비교

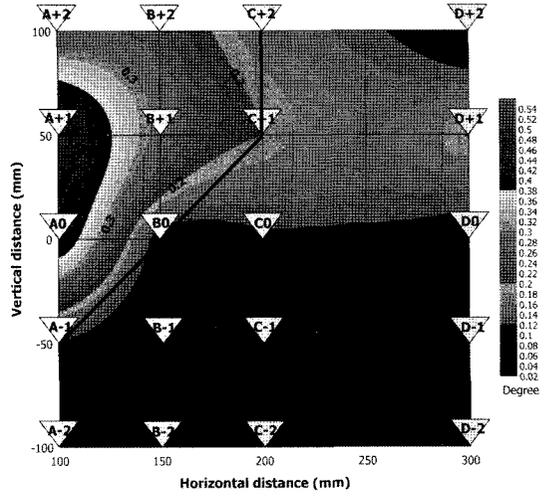
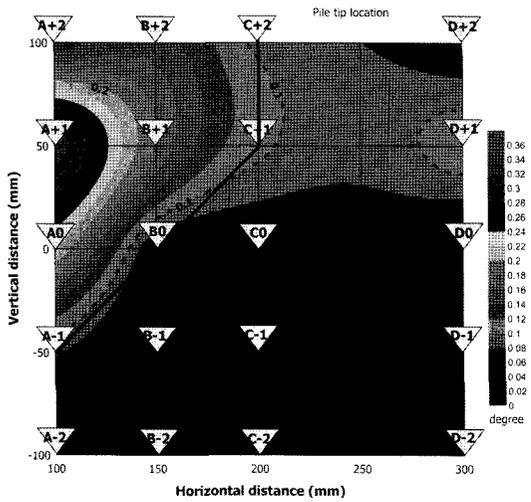
앞의 그림 3에서 정의한 회전점(RP)을 모형실험에서 나타난 결과와 수치해석과 비교하면 그림 11과 같다. 모형실험 및 수치해석 결과 모두, 모형말뚝의 선단부가 터널의 중심에서 멀어질수록 회전점은 지표면을 향해 이동된다는 사실을 확인할 수 있다.

모형실험에서는 회전점이 비선형적으로 증가되는 반면, 수치해석에서는 거의 직선적으로 증가됨을 알 수 있으며 말뚝의 선단부(pile tip) 위치가 터널의 중심에서 멀어질수록 터널굴착에 의해서 말뚝이 기울어지는 정도가 미미함을 모형실험과 수치해석을 통해 확인할 수 있다. 이와 더불어 말뚝의 선단부가 터널 인버트 아래에 위치하는 경우, 터널 벤치의 상부에 위치하는 경우보다 회전점이 지표면에 가까이 위치하며 터널굴착으로 인한 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

### 5.3 모형말뚝의 기울기 비교

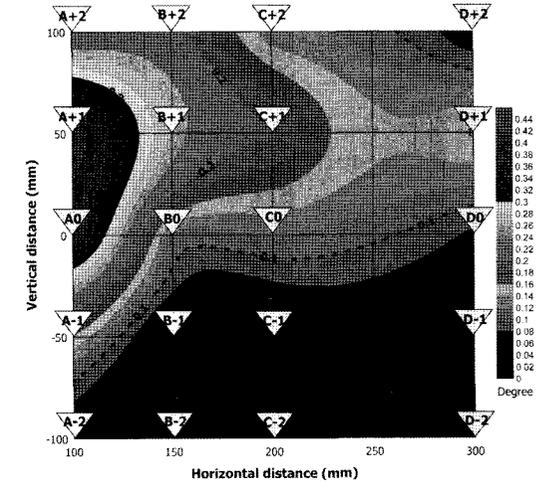
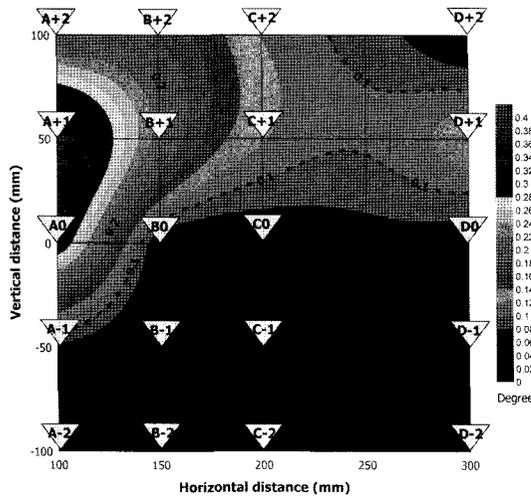
모형실험과 수치해석 결과, 터널굴착 정도, 즉 지반손실에 따른 모형말뚝의 기울기( $\theta$ ) 정도를 말뚝의 선단부 위치에 따라 등고선으로 나타내면 그림 12와 그림 13과 같다.

실제 사질토 지반에서의 터널굴착으로 지반손실이 5% 미만임을 감안할 때 그림 12를 통해 말뚝의 선단부가 터널의 중심에서 2D 이내에 위치하는 경우, 터널굴착으로 인해 말뚝의 기울어지는 정도가  $0.1^\circ$  이상으로 나타남을 알 수 있다. 그림 13에서는 터널굴착에 따른 지반손실이 증가함에 따라 말뚝의 기울기 정도가  $0.1^\circ$ 보다 크게 증가됨을 알 수 있다.



(a) 모형실험을 통한 모형말뚝의 기울기 정도(단위: 도)      (b) 수치해석을 통한 모형말뚝의 기울기 정도

그림 12. 모형말뚝의 기울기 정도 비교( $V_L=3.94\%$ )



(a) 모형실험을 통한 모형말뚝의 기울기 정도      (b) 수치해석을 통한 모형말뚝의 기울기 정도

그림 13. 모형말뚝의 기울기 정도 비교( $V_L=7.63\%$ )

## 6. 결론

본 연구는 터널굴착 정도, 즉 지반손실에 따른 인접한 모형말뚝의 기울기 정도를 파악하기 위해 모형실험과 수치해석을 수행하였으며 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 말뚝의 선단부 위치에 따라 터널굴착을 모사하는 모형터널의 거동에도 영향을 주는 것으로 나타났다.
2. 모형실험 및 수치해석 결과 모두, 모형말뚝의 선단부가 터널의 중심에서 멀어질수록 회전점은 지표면을 향해 이동된다는 사실을 확인할 수 있다.
3. 말뚝의 선단부의 위치가 터널의 중심에서 멀어질수록 터널굴착에 의한 영향을 받지 않음을 모형 실험과 수치해석을 통해 확인할 수 있었다.
4. 말뚝의 선단부가 터널 인버트 아래에 위치하는 경우, 터널 벤치의 상부에 위치하는 경우보다 회전점이 지표면에 가까이 위치하며 터널굴착에 대한 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.
5. 실제 사질토 지반에서의 터널굴착으로 지반손실이 5% 미만임을 감안할 때 말뚝의 선단부가 터널의 중심에서 2D 이내에 위치하는 경우, 터널굴착으로 인해 말뚝의 기울어지는 정도가 0.1° 이상으로 나타남을 알 수 있다. 따라서 실제 기존 말뚝에 인접하여 터널을 굴착하는 경우 말뚝의 영향을 최소화하는 터널의 위치는 말뚝의 중심에서부터 터널직경의 2배 이상이다.
6. 말뚝의 기울기 정도는 터널굴착으로 인한 지반손실, 터널중심으로부터 말뚝 선단부까지의 이격 거리와 말뚝 선단부의 지지층 조건에 따라 크게 영향을 받는 것을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다. 따라서 도심지 터널굴착에 있어 인접한 기존 말뚝의 위치에 따른 지반거동뿐만 아니라 말뚝 자체의 거동도 반드시 분석하여 상부구조물의 손상을 최소화해야 한다.

## 참 고 문 헌

1. 이용주(2008), “기존 파일기초에 근접한 터널굴착으로 인한 전단변형률 형성에서의 경계선”, 한국터널공학 회논문집, Vol. 10, No. 3, pp. 283-293.
2. 이용주, 류창열(2010), “터널모형실험을 통한 사질토 지반에서의 K값의 산정”, 한국터널공학회논문집, Vol. 12, No. 1, pp. 87-94.
3. 이철주, 이재연, 김지성, 류남열(2005), “터널 굴착에 의한 주변 말뚝의 거동 분석”, 한국지반공학회 가을학 술발표회 논문집, pp. 227-236.
4. 최고니, 우승재, 유충식(2011), “교량 직하부에 시공되는 터널에 의한 말뚝기초의 거동변화”, 한국터널공학 회논문집, Vol. 13, No. 1, pp. 51-69.
5. Lee, Y.J., Bassett, R.H. (2007), “Influence zones for 2D pile-soil-tunnelling interaction based on model test and numerical analysis”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, No. 3, pp. 325-342.
6. Potts, D.M., Axelsson, K., Grande, L., Schweiger, H., Long, M. (2002), “Guidelines for the use of advanced numerical analysis”, Thomas Telford Limited, London, pp. 13-14.