

## 이미지 프로세싱을 이용한 얇은 터널 모형실험과 수치해석의 비교

### Comparison of Shallow Model Tunnel Test Using Image Processing and Numerical Analysis

이 용 주<sup>1</sup> Lee, Yong-Joo

#### Abstract

In this study, 2D shallow tunnel model test using close range photogrammetric technique was conducted with aluminium rods simulating continuum granular material. Numerical analysis was also carried out in order to identify the behaviour of subsurface deformations caused by shallow tunnelling. Direction and magnitude of displacement vectors from the model test were identical to the result of numerical analysis based on the model data. In particular, it is shown that the vector direction was toward a point below the tunnel invert level. A narrow "chimney or tulip like" pattern of vertical displacement was confirmed by both the model test and numerical analysis. This behaviour is consistent with the field data. In addition to the qualitative comparison, the quantitative result of subsurface settlements according to 2D volume loss showed good agreement between the model test and numerical analysis. Therefore, close range photogrammetric technique applied in the model test may be used to validate the result from the continuum numerical analysis.

#### 요 지

본 연구는 사질토 지반에서의 얇은 터널굴착으로 인한 지반변형 거동을 규명하기 위해 연속체 사질토 지반을 모사하는 알루미늄 봉과 근거리 사진계측기법을 이용하여 2차원 실내모형실험을 실시하였다. 실험결과에 근거하는 수치해석으로부터 생성된 변위벡터의 방향과 크기는 모형실험 결과와 거의 일치하였다. 특히, 벡터의 방향은 터널의 인버트 아래 어느 한 점을 향하는 것으로 나타났다. 좁은 "굴뚝 또는 튜울립" 형태의 수직변위는 수치해석 및 모형실험 결과에서 확인할 수 있었다. 이러한 양상은 현장에서 측정된 결과와 잘 일치된다. 정성적인 비교와 더불어 지중에서의 2차원 지반손실에 따른 정량적인 침하량 비교 결과, 모형실험에서 측정된 지중침하량이 수치해석 결과 잘 일치됨을 보여 주었다. 따라서 본 모형실험에 적용된 근거리 사진계측기법은 수치해석 결과를 검증하는데 유용하게 사용될 수 있다.

**Keywords :** Aluminium rods, Close range photogrammetric technique, Continuum granular material, Numerical analysis, Shallow tunnel, Subsurface deformation

#### 1. 서 론

일반적으로 점성토 지반에서 터널굴착으로 인한 지표면 침하 폭은 터널 깊이의 약 3배 정도인 것으로 알려

져 있다(Burland et al., 2001). 그러나 사질토 지반의 경우 이러한 정량적인 침하 폭이 명확히 알려져 있지는 않으나, 점성토 지반에 비해 통상적으로 작은 침하 폭으로 나타남을 여러 현장 및 실험 자료를 통해 인지할 수

<sup>1</sup> 정회원, 포항산업과학연구원, 강구조연구소, 토목구조연구실 (Member, Steel Structure Research Laboratory, Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST), ucesyj199@rist.re.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

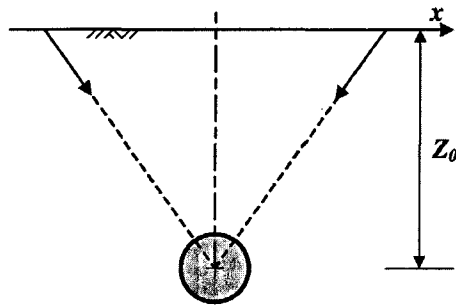
가 있다. 이러한 차이는 지반의 특성과도 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 점성토 지반에서는 터널 굴착시 체적의 변화가 없는 것으로 간주하지만, 사질토 지반의 경우 팽창을 동반하므로 체적이 변화된다. 따라서 지표면에서의 체적 손실은 터널 굴착으로 인한 전 체적 손실보다 작게 나타난다. 현재까지 점성토 및 사질토에 대한 지표면 침하에 대한 연구는 Peck(1969) 이래 많이 수행되어 왔으나, 특히 사질토 지반의 지중에서의 변형 특성과 관련된 실내모형실험은 미미한 실정이라 할 수 있다 (Potts, 1976; Cording et al., 1976; Atkinson and Potts, 1977).

그림 1에서 보는 바와 같이 점성토 지반에서의 터널 굴착으로 인한 변위벡터의 방향은 초기에는 그림 1(a)의 경우처럼 터널 중심축을 향하는 것으로 Attewell(1977)과 O'Reilly and New(1982)가 제안하였지만, Taylor(1995)는 그림 1(b)로 수정하여 제안하였다. 이는 Dean and Bassett

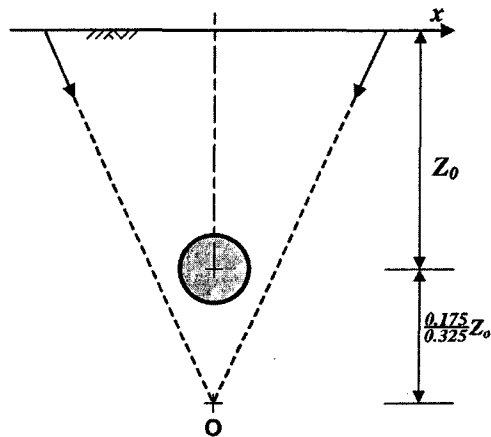
(1995)의 Heathrow Express trial 터널 현장의 측정 결과와도 잘 일치되는 현상이라 할 수 있다.

터널 굴착으로 인한 사질토 지반에서의 변위 벡터의 양상은 그림 2(b)와 2(c)에서 보는 것처럼 지표면에서 비교적 큰 침하와 더불어 침하 폭이 좁은 형태를 보여 준다. 이는 그림 2(a), 즉 점성토 지반의 거동과 대조적인 형태임을 알 수 있다. 여기서 특히 기억해야 될 점은 지하수위가 실험에 고려되지 않았다는 사실이다.

Centrifuge 모형실험 결과, 사질토 지반에서의 터널 굴착으로 인한 지반 파괴메카니즘은 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 “굴뚝 또는 튜올립” 모양을 나타낸다. 이는 위에서 언급한 변위 벡터의 양상과도 잘 일치하는 현상이다. 이와는 대조적으로 점성토 지반에서의 파괴 메카니즘은 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 터널 인버트로부터 시작하여 터널의 폭에 비해 파괴 폭이 상대적으로 넓게 나타났다. 이러한 파괴메카니즘 역시 위에서 언



Attewell, 1977; O'Reilly and New, 1982

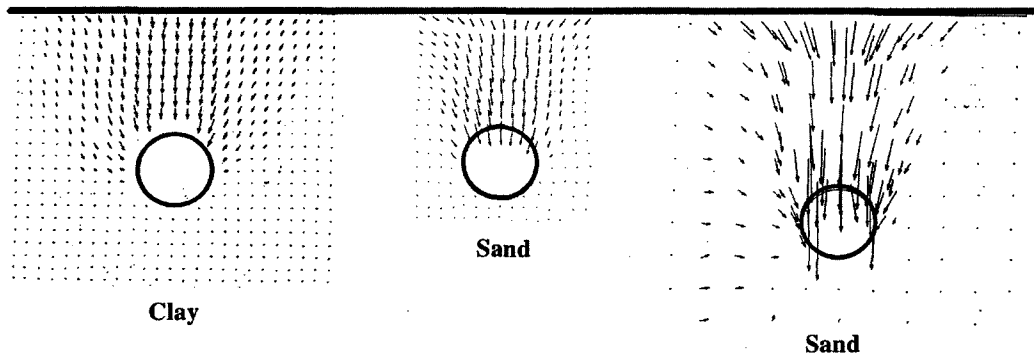


Taylor, 1995

(a) 벡터방향 터널 중심축을 향함

(b) 벡터방향 터널 인버트 아래 O점을 향함

그림 1. 터널굴착으로 인한 점성토 지반에서의 변위 벡터 방향



(a) Mair(1979)

(b) Potts(1976)

(c) Cording et al.(1976)

그림 2. 점성토 및 사질토 지반에서 모형터널 주변의 변위 벡터(축척 고려 안함)

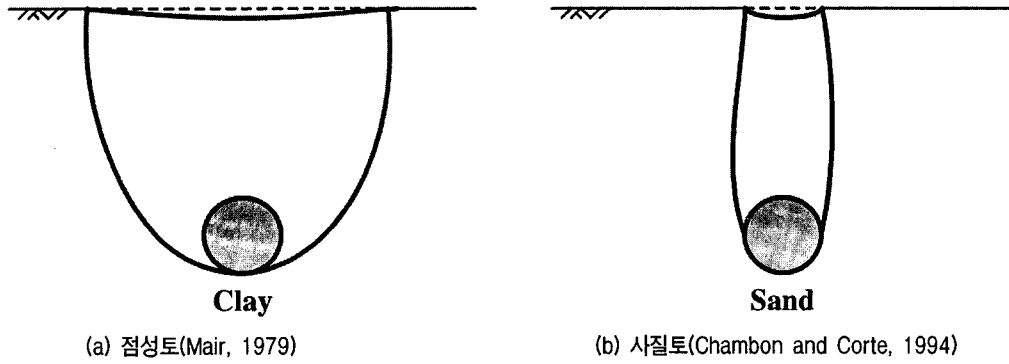


그림 3. Centrifuge 모형실험을 통해 관측된 파괴메카니즘

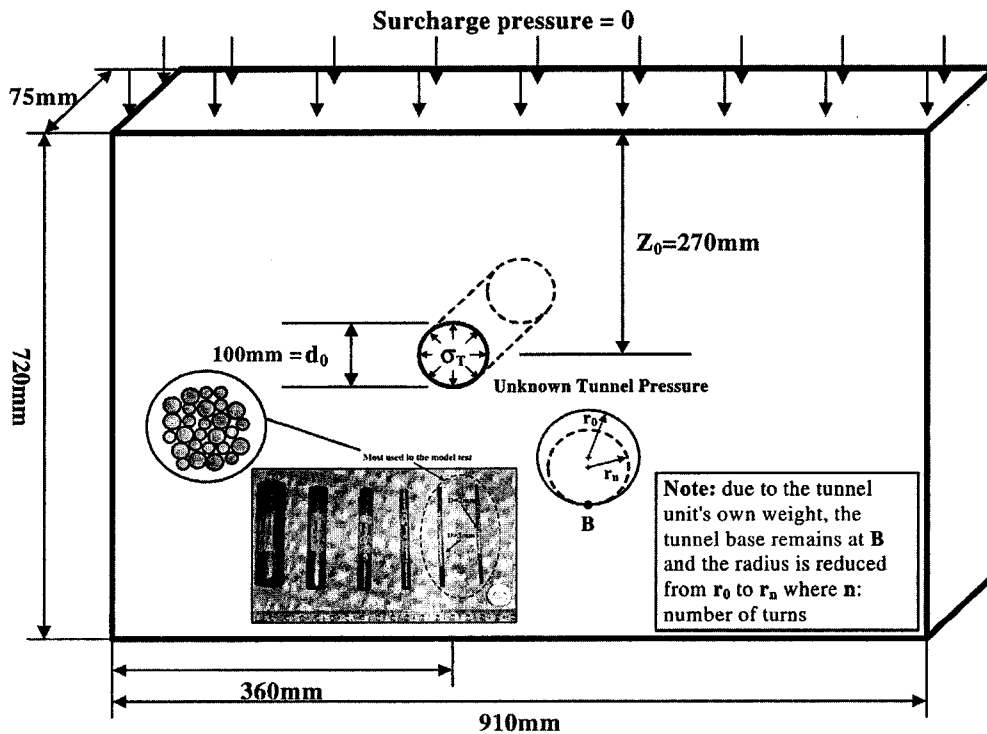


그림 4. 알루미늄 봉 재료를 이용한 얇은 터널에 대한 2차원 실내모형실험

급한 변위 벡터의 양상과도 잘 일치되는 현상이다.

## 2. 2차원 실내모형실험

2차원 실내모형실험을 모사하기 위해 사질토 지반으로 이상화된 알루미늄 봉 재료를 사용하였으며, 모형터널장비를 이용한 얇은 터널굴착에 따른 지중에서 발생하는 변위를 측정하기 위해서 근거리 사진계측기법을 사용하였다.

### 2.1 실험장비

그림 4와 같은 2차원 얇은 터널에 대한 모형실험을

실시하기 위해서 각각의 지름이 다른 알루미늄 봉 재료를 사용하였으며, 이들 중 지름이 2mm와 3mm인 알루미늄 봉을 모형터널 주변에 집중적으로 배치하였다. 아울러 상대적으로 지름이 큰 봉 재료는 터널과 많이 이격된 위치인 모형토조 주변에 주로 배치하였다. 여기서, 특이할 사항은 실제 현장조건에서는 터널위에 도로 및 인접건물 등 상부하중이 작용하는 조건이나 본 모형실험에서는 이러한 상부하중조건이 없는 Green field(or free field) 조건을 모사하였다.

그림 4에서 터널굴착에 대한 효과를 모사하기 위해 모형터널 장비를 고안하였다. 이러한 모형터널은 그림 5에서 보는 바와 같이 지름축소식으로 앞뒤의 손잡이인 knob를 조절하여 그 지름을 점진적으로 줄여 가면서 터

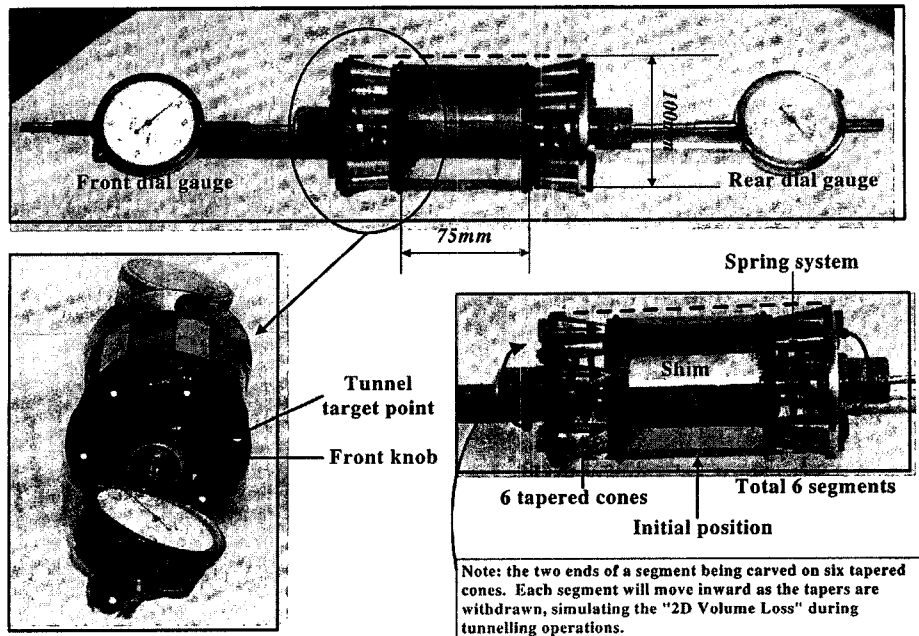


그림 5. 지름축소식 2차원 모형터널 장비

널굴착을 모사하는 방식이다. 이러한 터널굴착의 정도는 모형터널에 대한 검증시험으로부터 얻어진 2차원 지반손실( $V_L$ )로 표현된다(Lee, 2004). 모형터널을 손으로 작동시키기 때문에 모터로 작동시키는 자동시스템에 비해 터널의 지름축소 조절에 대한 정밀도는 떨어지지만 비용이 저렴하고 빠른 시간 내에 터널의 파괴를 유도하는데 유리하다는 장점이 있다.

## 2.2 이미지 프로세싱을 통한 측정의 삼각요소망 생성

근거리 사진계측기법을 이용하여 372개 측점에 대한 변위를 측정하였으며, 또한 이미지 프로세싱을 통해 그림 6과 같은 삼각요소망을 생성하였다. 이러한 사진계측 및 이미지 프로세싱에 대한 내용은 Lee and Bassett(2006)에 설명되어 있다. 본 모형실험에서 얻은 삼각요소망은 연속체에 근간을 두는 유한요소 수치해석의 유한요소망과 유사하다.

## 2.3 실험절차

모형실험을 수행하기 위한 절차는 먼저 알루미늄 봉과 모형터널을 준비하여 그림 6에서 보는 바와 같이 설치한다. 설치가 끝나면 327개의 측점이 부착된 알루미늄 봉을 모형터널 주변을 중심으로 배치해 나간다. 설치

가 완료되면 사진계측을 위해 초기상태에 대한 10개의 이미지를 기록한다. 다음은 모형터널 앞뒤의 손잡이를 회전시켜 터널 지름을 축소시킨다. 즉, 다이얼게이지 1회전에 해당하는 2차원 지반손실은 1.96%, 3회전은 5.83%, 6회전은 10.94%, 9회전은 15.21%이다. 이 때, 각각의 지반손실에 따른 사진계측도 실시한다. 여기서 유념해야 할 사항은 모형터널의 지름이 축소되는 동안, 터널 자체는 물리적으로 일정한 지점에 고정되지 않는다는 사실이다. 즉, 터널의 중심점이 움직이게 되는데 이렇게 변화되는 중심점을 터널 주변의 측정(target point)을 사진계측을 통해 측정하고 구명해 보면, 그림 7과 같이 굴착이 진행되는 동안 수평방향에 대해서는 변화가 없고, 단지 수직방향인 아래로 움직임을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 터널 깊이가 다른 모형실험( $Z_0=420\text{mm}$ ,  $Z_0=470\text{mm}$ )에서도 확인할 수 있었다. 그러나 만약 이러한 모형터널에 인접하여 약 80%의 하중을 말뚝 선단에서 받는 선단지지말뚝이 있는 경우, 터널의 물리적 중심점은 수직방향과 더불어 수평방향으로 움직이게 되는 사실을 Lee(2004)의 파일-지반-터널 굴착에 대한 모형실험 결과를 통해 확인할 수 있다. 위에서 언급한 터널의 중심점 변화는 수치해석에 있어 터널굴착을 모사하는데 매우 중요한 피드백 입력 자료로 활용된다.

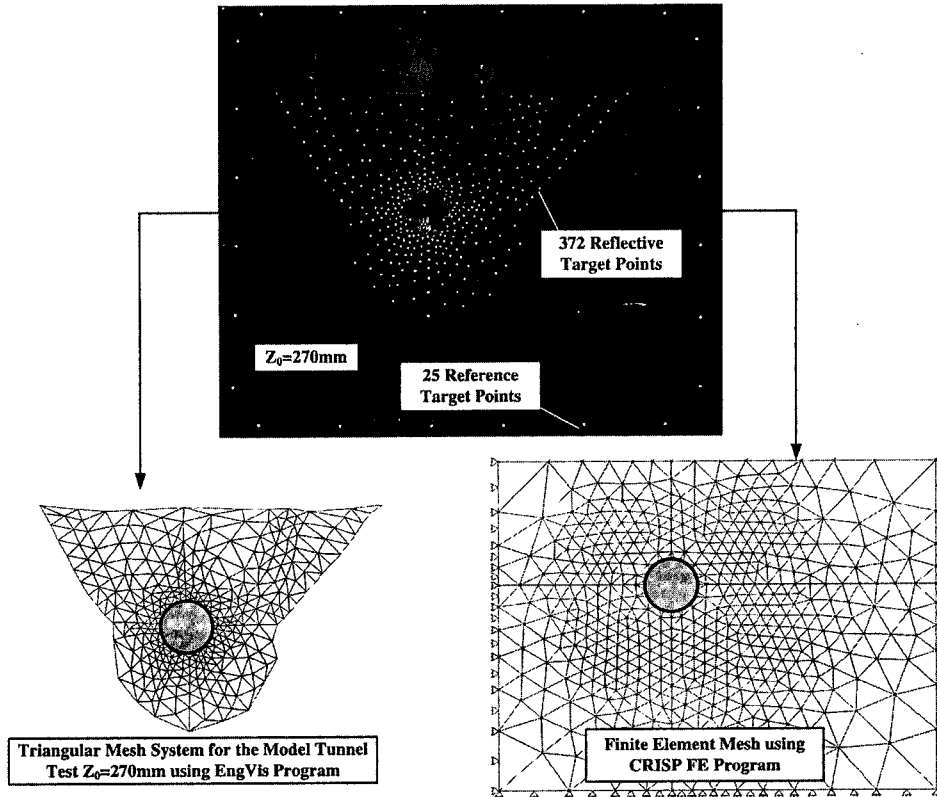


그림 6. 모형실험에 대한 이미지 프로세싱을 통한 삼각망과 수치해석을 위한 유한요소망

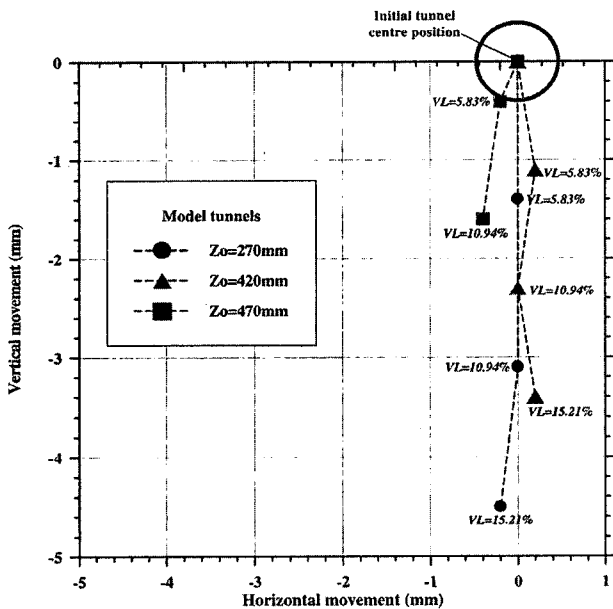


그림 7. 사진계측을 통한 모형터널의 중심점 변화 측정 결과

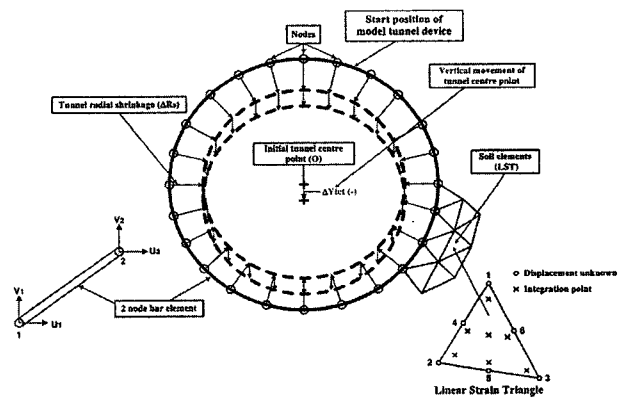


그림 8. 지름축소식 모형터널에 의한 터널굴착을 수치해석에 모사하는 방법

### 3. 수치해석

#### 3.1 2차원 터널굴착의 모사

모형터널의 중심점 변화를 2차원 수치해석으로 모사

하기 위해서는 2차원 지반손실에 해당되는 수직 및 수평변위의 값을 구해야 된다. 그림 7에서 보는 바와 같이 얇은 터널인  $Z_0=270\text{mm}$  경우, 수평변위가 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 수직변위( $\Delta Y_{tct}$ )와 지름이  $\Delta R_r$ 로 축소되는 과정을 그림 8에서 보는 바와 같이

강성이 지반에 비해 매우 큰 두 개의 절점으로만 구성되어 있는 Bar 요소(2 noded bar element)로 모사하였다.

### 3.2 해석조건

해석을 위해 사용된 유한요소프로그램은 Britto and Gunn(1987)에 의해 개발된 CRISP(ver 4.3)이며, 프로그램의 특성에 대해서는 Woods and Rahim(2001)에 의해 설명된 바 있다. 지반구성모델은 깊이에 따라 점착력(c)과 탄성계수(E) 값이 변하는 Gibson 지반에 기반을 둔 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 지반 및 Bar 요소에 대한 물성치는 표 1과 같다.

표 1에서 c는 점착력, v는 포아송 비,  $\Phi'$ 는 내부마찰각,  $\psi$ 는 팽창각,  $E_0$ 는 지표면에서 탄성계수,  $m_E$ 는 깊이에 따른 탄성계수 증가계수,  $m_c$ 는 깊이에 따른 점착력 증가계수,  $\gamma_{bulk}$ 는 알루미늄 봉의 단위중량이며  $A_{bar}$ 는 Bar 요소의 단면적이다.

수치해석을 위한 유한요소망은 그림 6과 같으며, 총 543개의 절점과 1,058개의 유한요소가 사용되었다. 여

기서 터널의 중심이 대칭이 아니고 왼편에 치우쳐 위치하는 이유는 나중에 수행될 파일-지반-터널굴착의 모형 실험과 관련해 파일 선단부가 터널 중심축을 기준으로 주로 오른편에 위치하기 때문이다. 해석절차는 다음의 표 2와 같다.

### 4. 모형실험 및 수치해석 결과 비교

사진계측을 통해 얻어진 모형실험에 대한 변위 벡터와 수치해석 결과를 2차원 지반손실 10.94%에서 비교하면 그림 9와 같다. 그림 9에서 확인하는 바와 같이 비록 실험 및 수치해석에서의 2차원 지반손실이 실제 현장에서 실측되는 값(1~2%) 보다는 훨씬 큰 값이지만, 벡터의 방향은 터널 축을 향하는 것이 아니라 인버트 아래 어느 한 점을 향하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구결과에서 얻은 얇은 터널 굴착에 의한 변위 벡터의 방향은 Taylor(1995)와 Dean and Bassett(1995)이 제안한 내용과 잘 부합된다고 할 수 있다.

위에서 비교한 변위 벡터와 더불어 수직변위( $d_v$ )를 비

표 1. 수치해석에 적용된 재료의 물성치

재료	c (kN/m <sup>2</sup> )	v	$\Phi'$ (°)	$\psi$ (°)	$E_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	$m_E$ (kN/m <sup>2</sup> /m)	$m_c$ (kN/m <sup>2</sup> /m)	$\gamma_{bulk}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$A_{bar}$ (m <sup>2</sup> )
지반	0.1	0.35	23	15	1,600	10,000	0	24	-
Bar	-	0.2	-	-	$1.55 \times 10^7$	-	-	-	0.003

(주) 지표면 높이( $y_0$ ): 0.72m,  $K_0=0.66$

표 2. 해석 절차

순서	해석 및 사진계측 단계	$V_L$ (%)	Time-step	증가분 수(누적)
1	모형터널 삽입: 사진계측_0	0	1	100(100)
2	지름축소 1단계: 사진계측_1	5.83	1	50(150)
3	지름축소 2단계: 사진계측_2	10.94	1	50(200)
4	지름축소 3단계: 사진계측_3	15.21	1	50(250)

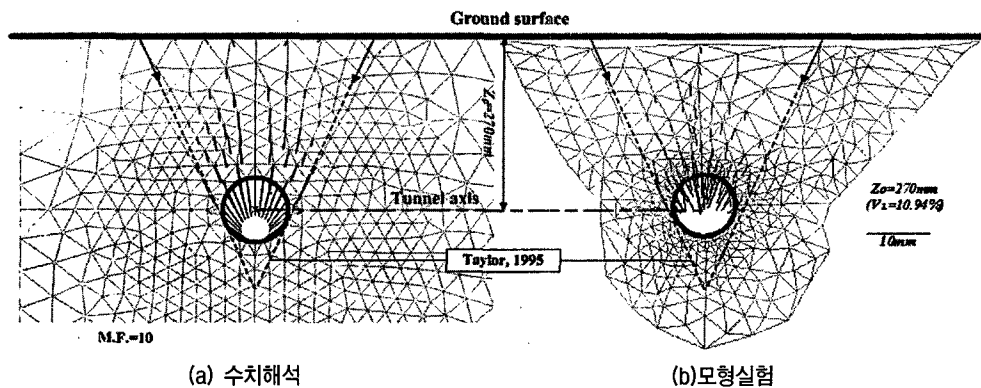


그림 9. 변위 벡터의 비교(2차원 지반손실=10.94%)

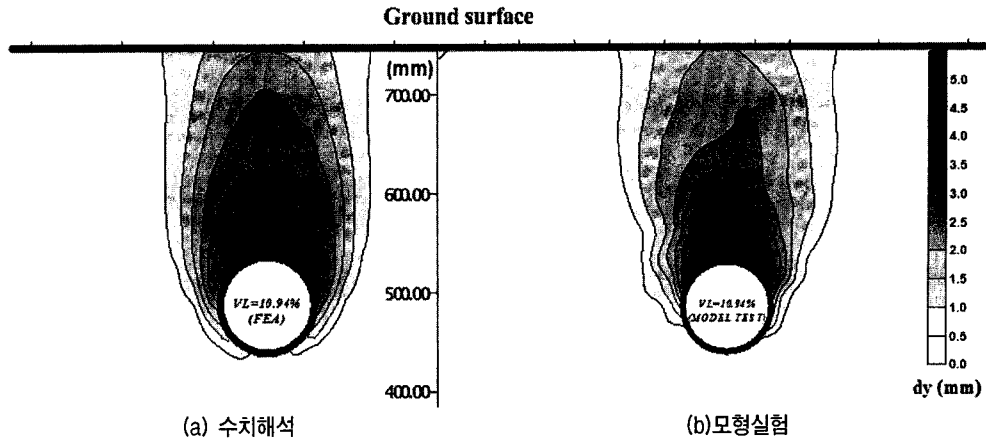


그림 10. 수직변위의 비교(2차원 지반손실=10.94%)

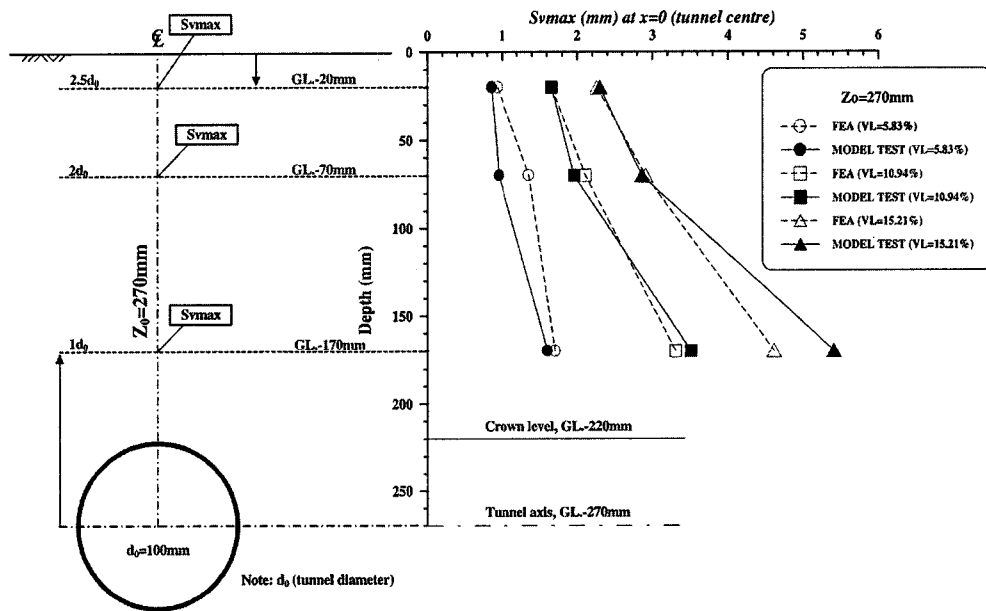


그림 11. 지반손실에 따른 지중에서의 최대침하량 비교

교하면 그림 10과 같다. 수치해석 결과는 모형실험 결과와 매우 유사하게 나타났다. 변위의 분포 및 양상에 있어서는 앞에서 언급한 기존의 연구결과와 같이 침하 폭이 점성토에 비해 상대적으로 좁고 “굴뚝 또는 튜울립” 형태와 같은 파괴형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

앞에서 비교한 그림 9와 그림 10은 정량적인 비교이기 보다는 정성적인 비교로서 변위에 대한 방향 및 경향에 초점을 맞추었다. 이를 보완하기 위해 그림 11과 같이 2차원 지반손실(VL)에 따른 지중에서의 최대침하량( $S_{vmax}$ )을 정량적으로 비교하였다.

그림 11에서 보는 바와 같이 GL.-20mm에서의 수치해석 결과는 모형실험과 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 심도가 깊어질수록 모형실험 결과가 좀 더 커지는 경향으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 얇은 터널에 대한 지중침하 특성을 규명하기 위해서 2차원 연속체 사질토 지반을 모사하는 알루미늄 봉 재료와 근거리 사진계측기법을 이용한 2차원 실내모형실험과 더불어 2차원 연속체에 근간을 둔 수치해석을 수행하였다. 모형실험 및 수치해석 결과 나타난 변위 벡터의 방향과 크기는 서로 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 2차원 지반손실에 따른 지중에서의 최대침하량 비교도 정량적으로도 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구의 모형실험에 적용된 근거리 사진계측기법은 연속체 수치해석의 결과를 검증하는데 유용한 도구로 사용할 수 있다. 본 모형실험에서 유념할 사항은 지하수위를 고려하지 않은 건조된 상태라고 가정하고

실험을 수행하였다는 점이며, 이는 도심지에서 터널을 제외한 제반 구조물 축조를 위한 가시설 굴착을 통해 이미 지하수위가 터널 인버트 아래로 떨어져 터널굴착으로 영향을 받지 않는다는 시나리오에서 실험 및 수치 해석을 실시하였음을 의미한다.

## 참 고 문 헌

1. Atkinson, J. H. and Potts, D. M. (1977), "Subsidence above shallow tunnels in soft ground", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.103, No.GT4, pp.307-325.
2. Attewell, P. B. (1977), "Ground movements caused by tunnelling in soil", *Proc. of Int. Conf. on Large Movements and Structures*, Geddes, J. D. (ed), London, pp.812-948.
3. Britto, A. and Gunn, M. (1987), *Critical Soil Mechanics via Finite Elements*, Ellis Horwood, Chichester.
4. Burland, J. B., Standing, J. R. and Jardine, F. M. (2001), "Building responses to tunnelling - Case studies from construction of the Jubilee Line Extension", *CIRIA 2001*, CIRIA Special Publication 200, Thomas Telford, London, pp.23-43.
5. Chambon, J. F. and Corté, J. F. (1994), "Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel safe", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.120, No.7, pp.1150-1163.
6. Cording, E. J., et al. (1976), "Displacements around tunnels in soil", Report to U.S. Department of Transportation prepared at the University of Illinois at Urbana-Champaign, DOT-TST-76T-22.
7. Dean, P. A. and Bassett, R. H. (1995), "The Heathrow Express trial tunnel", *Proc. of the Institution of Civil Engineers*, Vol.113, July, pp.144-156.
8. Lee, Yong-Joo (2004), *Tunnelling adjacent to a row of loaded piles*, PhD Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University College London.
9. Lee, Y. J. and Bassett, R. H. (2006), "Application of a photogrammetric technique to a model tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.21, Issue No.01, pp.79-95.
10. Mair, R. J.(1979), *Centrifuge modelling of tunnel construction in soft clay*, Ph.D Thesis, University of Cambridge.
11. O'Reilly, M. P. and New, B. M. (1982), "Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction", *Tunnelling '82*, Jones, M. J.(ed), The Institution of Mining and Metallurgy, pp.173-181.
12. Peck, R. B. (1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground", *Proc. of 7th International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, State of the Art Volume, pp. 225-290.
13. Potts, D. M. (1976), *Behaviour of lined and unlined tunnels in sand*, Ph.D Thesis, University of Cambridge.
14. Taylor, R. M. (1995), "Tunnelling in soft ground in the UK", *Underground Construction in Soft Ground*, Fujita, K. and Kusakabe, O. (eds), Balkema, pp.123-126.
15. Woods, R. and Rahim, A. (2001), *SAGE-CRISP Technical manual*, Version 4, <http://www.mycrisp.com/demo/TECHMAN.pdf> : The CRISP Consortium Ltd.

(접수일자 2006. 4. 14, 심사완료일 2006. 6. 18)