

DOT 쉴드터널에서 지표침하를 이론적으로 예측하는 방법

# Tunnelling Technology

## DOT 쉴드터널에서 지표침하를 이론적으로 예측하는 방법



이용주

서울과학기술대학교  
건설시스템디자인공학과  
조교수

ucesyjl@seoultech.ac.kr

### 1. 개요

싱글 원형쉴드터널 굴착장비는 일반적으로 연약한 지층 조건에서 많이 적용되고 있다. 쉴드터널의 큰 장점은 일시적인 지보재 없이 쉴드의 보호 아래에서 굴착을 할 수 있다는 것이다. 따라서 안전성, 편의성, 굴착속도에 대한 개선과 더불어 지상에서 교통 혼잡과 상업적인 활동의 영향을 최소화 할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 여러 가지 요소 중 가장 중요한 요소는 굴착이 진행되는 동안 지표면 침하를 조절할 수 있다는 것이다. 특히, 초고층 빌딩과 더불어 교통 체증 및 지중에 매설되어 있는 다양한 서비스 관로 등을 포함하고 있는 도심지에서 굴착으로 인한 인접 구조물을 손상을 최소화 할 수 있다.

TBM을 이용하여 두 개의 터널을 동시에 나란히 굴착할 수 있는 방법은 1980년 초 일본에서 개발하였다. 이러

한 방법을 DOT(Double-O-Tube) 쉴드터널이라고 한다 (그림 1 참조).

DOT 쉴드터널은 1989년과 1994년 사이에 일본 히로시

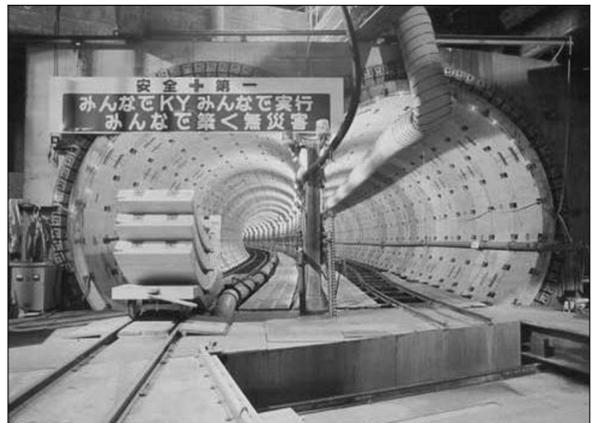


그림 1. DOT(Double-O-Tube) 쉴드터널로 완공한 지하철 단면

DOT 실드터널에서 지표침하를 이론적으로 예측하는 방법

마 프로젝트에 처음으로 적용되었다. DOT 실드터널은 토압식(EPB: Earth Pressure Balanced)으로 두 개의 커터헤드가 수레 바퀴의 살(spoke)과 같은 형태로 두 개의 기어 축을 중심으로 회전한다(그림 2 참조). 동시 제어(synchronous control) 시스템으로 두 개의 커터가 같은 속도로 회전하지만 헤드의 충돌을 방지하기 위해 서로 반대 방향으로 회전한다.

DOT 실드터널의 장점은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

- (1) 불필요한 면적을 최소화한 최적의 단면 형상을 가진다(효율적인 지하공간 창출, 그림 3 참조).

- (2) 원형실드터널과 비교했을 때 비교적 좁은 통로로 관통되며 인접한 구조물의 손상을 최소화 할 수 있다.
- (3) 두 개의 분리된 원형실드터널로부터 서로 교차하는 기존의 방법이 필요하지 않다.

중국의 경우 2002년에 상하이 철도 프로젝트를 위해 DOT 기술과 장비가 상하이 Tunnel Engineering 회사에 의해 수입되었다. 또한, 대만의 경우 2009년에 Taoyuan 국제공항 연계 급속철도시스템 건설의 한 부분으로 일본의 Shimizu에 의해 수입되었다. 타이페이는 대만의 수도로 일본의 히로시마와 중국의 상하이에 이어 DOT 실드터널 공법을 적용한 세 번째 도시가 되었다. 이러한 DOT 실드터널과 관련하여 지표면 침하와 라이닝 거동에 대한 연구는 아직까지 매우 제한적이라고 할 수 있다. Chow (2006)는 연약지반에 적용한 DOT 실드터널에 대한 기술적인 내용에 대해 서술하고 시공 기술에 대해서도 기존의 원형실드터널과 비교하였다. Shen 등(2009)은 TBM 회전에 대한 교정 작업(rolling correction operation)으로 발생하는 터널 라이닝의 축력, 전단력, 휨모멘트에 대한 거동을 유한요소 프로그램인 Plaxis를 사용하여 분석하였다.

앞에서도 언급하였지만 DOT 실드터널은 기존의 원형 실드터널에 비해 비교적 새로운 터널굴착 공법이다. 이러한 이유로 DOT 실드터널 굴착에 따른 현장에서의 지표면 침하를 측정된 자료와 이러한 현장 자료와 비교할 수 있는 새로운 예측 기법은 현재까지 매우 제한적이라고 할 수 있다. 또한, DOT 실드터널 굴착에 의해 발생하는 지표면 침하를 수치해석으로 모사하는 연구도 현재까지 시도 되지 않았다. 따라서 지표면 침하를 기존의 경험 공식인 Gaussian 분포 곡선을 기본으로 적용하는 방법에 대해서 알아 보고 이와 더불어 굴착에 의한 응력 감소 정도(degree of stress reduction)에 따라 지표면 침하를 유한요소해석 프로그램인 Plaxis를 통해 모사하는 방법에 대해서도 알아 보고자 한다.

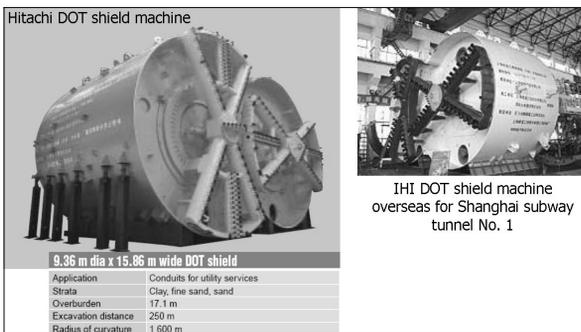


그림 2. 다양한 DOT(Double-O-Tube) 실드터널 장비

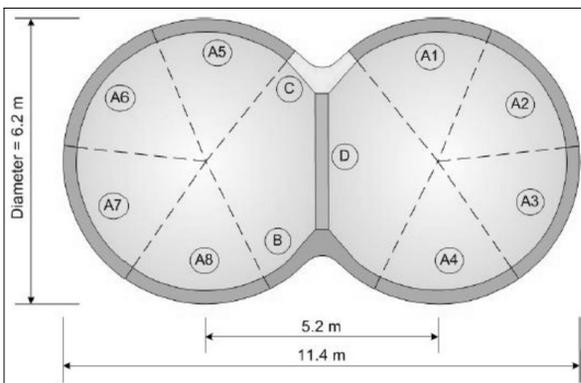


그림 3. DOT 실드터널의 전형적인 세그먼트 라이닝 단면(대만, Department of Rapid Transit System)

DOT 실드터널에서 지표침하를 이론적으로 예측하는 방법

## 2. 침하 해석

터널굴착으로 인한 지표면 침하에 대한 해석은 복잡한 경계면 조건을 반영하는 수치해석을 통해 접근하는 것이 일반화 되고 있다. 하지만, 수치해석에 있어 유한요소법(FEM)이나 차분법(FDM)을 사용하든지 간에 사용자는 반드시 재료의 구성모델과 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 깊은 지식을 가지고 있어야 한다. 따라서 실무자를 위한 간편하고 신뢰할 수 있는 지표면 침하 예측 방법이 필요하다. 특히, 원형이 아닌 DOT 터널과 같이 특이한 형상인 경우 라고 할 수 있다.

### 2.1 원형 실드

터널굴착으로 인한 지표면 침하는 경험공식이나 수치 해석을 통해 예측할 수 있다. 원형터널에 대한 횡방향 지표면 침하는 Peck(1969)에 의한 경험공식을 통해 결정할 수 있다. 이러한 지표면 침하에 대한 분포는 Gaussian 분포 곡선으로 나타낼 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S = S_{\max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

여기서,  $S$ 는 터널 중심으로부터 횡방향 거리  $x$ (m)에 해당되는 지표면 침하량을 나타내고  $S_{\max}$ 는 터널 중심에서 발생하는 최대 지표침하량이며  $i$ 는 지표면 침하의 폭을 나타내는 변수로 터널 중심에서 변곡점까지의 거리를 나타낸다. 일반적으로 실무에 있어서는 터널의 중심을 기준으로 지표면 침하에 대한 폭을  $2.5i$ 로 정하여 사용한다.

위에서 서술한 지표면 침하를 실무에서는 종종 지반손실(ground loss,  $\nu$ )로도 표현한다. 이러한 지반손실은 가상의 굴착된 터널 부피로 %로 표시한다. 단위 길이당 지

표면 침하에 대한 부피를  $V_s$ 로 정의하면 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_s = (2\pi)^{0.5} \cdot i \cdot S_{\max} \approx 2.5iS_{\max} \quad (2)$$

따라서, 지반손실( $\nu$ )은

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{V_s}{\text{cross-sectional area of the excavated tunnel}} \\ &= \frac{4V_s}{\pi D^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $D$ 는 터널의 직경을 나타낸다. 위의 식 (1), (2), (3) 모두 병합하면 다음과 같다.

$$S = \left[ \frac{V_s}{2.5i} \right] \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) = \left[ \frac{\pi\nu D^2}{10i} \right] \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (4)$$

지금까지 많은 연구자들에 의해  $i$ 값이 제안되어 왔다. 이 중에서 O'Reilly & New(1982)는 영국의 점성토 지반에 설치된 터널과 관련하여 현장에서 측정된 자료를 바탕으로 하는  $i$ 값은 다음과 같다.

$$i = 0.43z_0 + 1.1 \quad (5)$$

여기서,  $z_0$ 는 지표면 아래 터널 축에 대한 깊이를 나타낸다. 하지만, 대부분의 경우  $i$ 값은 다음의 식으로 가정하는 것이 타당하다.

$$i = Kz_0 \quad (6)$$

여기서,  $K$ 는 침하 폭에 대한 변수로 Rankin(1988)는  $K=0.5$ 로 제안하였다. 이 값은 영국을 포함해 전 세계적으로 현장에서 측정된 값과 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

DOT 쉘드터널에서 지표침하를 이론적으로 예측하는 방법

연약지반에서의 터널굴착과 관련해 Clough & Schmidt (1981)는  $i$ 와 관련해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$i = R \left( \frac{z_0}{2R} \right)^{0.8} \quad (7)$$

여기서,  $R$ 은 터널의 반경을 나타낸다.

원형터널에 있어 지표면 침하에 대한 Peck(1969)의 경험공식과 더불어 변수  $i$ 에 대한 정확성과 신뢰도를 검증하기 위해 현장에서 측정된 많은 자료가 사용되어 왔다. 위에서 언급한 Peck(1969)의 경험공식과 함께 Clough & Schmidt (1981)가 제안한  $i$ 값을 잘 적용하면 터널굴착으로 인한 지표면 침하 예측에 대한 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, DOT 쉘드터널과 같이 특이한 형상으로 인한 지표면 침하 예측에 대해서는 위의 공식을 그대로 사용하기에는 제한적 요소가 많다.

## 2.2 DOT 쉘드

위에서 언급한 Peck(1969)의 경험공식을 사용하여 DOT 쉘드터널에 의한 지표면 침하를 두 가지 방법에 의해서 예측할 수 있다. 첫 번째 방법은 그림 4에서 보는 바와 같이 각각의 원형터널에 대해 지표침하량을 구한 다음 이

두 개를 합치는 방법(superimposition method)이다.

다른 한 가지 방법은 그림 5에서 보는 바와 같이 두 개의 원형터널에 대한 면적의 합을 하나의 큰 원형터널 면적으로 환산하는 것이다.

DOT 쉘드터널에 의한 지표면 침하에 대한 부피인  $V_s$  (DOT)는 현장계측을 통해 구할 수 있다. 병합법인 그림 4로부터  $V_s$  (DOT)는 교차하는 두 개의 원형터널에 균등하게 분포한다고 가정하면 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$V_s = 0.5 V_{s(DOT)} \quad (8)$$

등가의 면적으로 환산한 하나의 큰 원형터널인 경우(그림 5 참조),  $V_s$ 는 다음과 같다.

$$V_s = V_{s(DOT)} \quad (9)$$

## 2.3 수치해석

수치해석에 있어 터널굴착을 모사하는 방법은 아래와 같이 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

- (1) Lining contraction method
- (2) GAP method

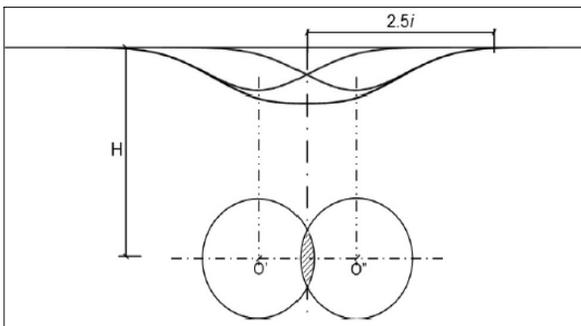


그림 4. 서로 교차하는 두 개의 원형터널의 병합(superimposition method)

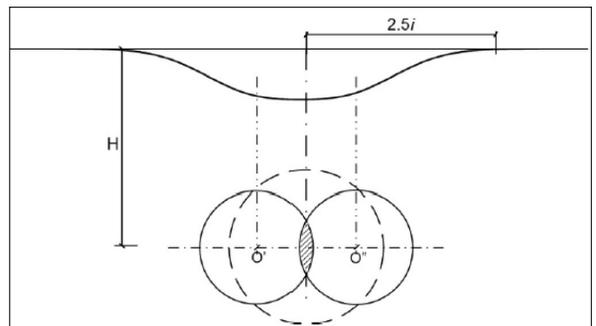


그림 5. 등가의 면적으로 환산한 큰 원형터널

## DOT 쉴드터널에서 지표침하를 이론적으로 예측하는 방법

(3) Stress reduction method -  $\beta$  method

첫 번째 방법은 굴착된 터널 전체 단면적에 대한 축소된 면적의 비로 정의할 수 있다. 이 때 터널 라이닝의 수축은 지반손실과 상응된다. 이러한 현상은 원형터널 시공에 있어 쉴드 꼬리(tail)의 틈(gap)이 닫히는 것에 기인한다(Vermeer & Brinkgreve, 1993). GAP 방법은 터널굴착으로 인해 발생하는 터널 주변의 변형을 나타내는 방법으로 쉴드 꼬리에 의해 지반과 라이닝 세그먼트 사이에 틈이 남게 되는 것을 의미한다. 이러한 GAP 방법은 Rowe 등(1983)에 의해 처음으로 제안되었다. 세 번째 방법인 응력감소법 또는  $\beta$  방법은 Miur Wood(1975)에 의해 처음으로 제안되었다고 볼 수 있다. 이 방법은 변형에 대해서는 특정하지 않고 터널 라이닝 설치 지연에 따른 주변 지반의 응력 이완을 모사하는 방법이다(Panet & Guenot, 1982).

일반적으로 위에서 언급한 세 가지 방법 중 원형터널 수치해석에 있어 터널굴착을 모사할 때 주로 적용하는 방법은 Lining contraction과 GAP이다. 반면에 원형이 아닌 NATM 터널인 경우에는 일반적으로  $\beta$  방법을 선호한다. 이와는 달리 네 번째 방법으로 “Grout pressure method”를 Möller & Vermeer(2008)가 제안하였다. 이 방법은 GAP 요소와 응력감소법을 조합하는 방법이다. 그 이유는 터널 라이닝 주변에 미리 설정된 그라우트 압력에 의해 주입이 되기 때문이다. 따라서 이러한 그라우트 압력에

의해 터널 주변지반의 초기응력이 대체된다고 본다.

그림 6은 DOT 쉴드터널에 대해 유한요소법인 Plaxis 프로그램을 사용하여 유한요소망을 모사한 그림을 나타낸다.

## 3. 결론

앞에서 원형터널에 대한 지표면 침하를 예측하는 일반적인 방법과 이를 응용하여 원형이 아닌 DOT 쉴드터널에 대해서 지표면 침하를 예측하는 두 가지 방법인 병합법(superimposition method)과 등가면적 환산법에 대해 알아 보았다.

국내의 경우 국토의 효율적 이용을 위한 다양한 터널의 수요가 급증함에도 불구하고 제도 및 기술, 지반 조건 등 여러 조건으로 인해 기계화 및 자동화 TBM 터널인 DOT 쉴드터널이 적용이 되지 못하고 있다는 문제점이 있다. 따라서 이를 극복하기 위해 위에서 서술한 도심지 및 연약한 지반에서뿐만 아니라 특히, 하저 및 해저와 같이 특수한 환경에서도 안정성이 우수한 DOT 쉴드터널에 대한 지속적인 연구와 더불어 체계적이고 합리적인 설계법과 시공법이 필요할 것으로 사료된다.

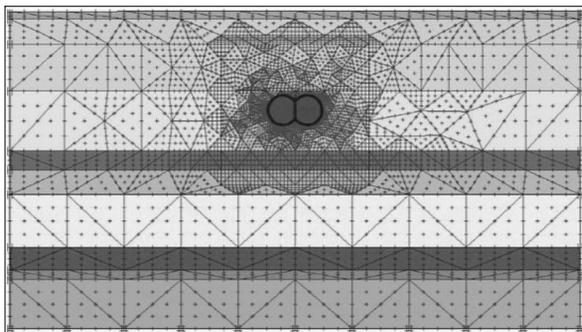


그림 6. DOT 쉴드터널의 수치해석

## 참고문헌

1. Chow, B. (2006), Double-O-tube shield tunnelling technology in the Shanghai Rail Transit Project, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 21, pp. 594-601.
2. Clough, W. and Schmidt, B. (1981), Design and performance of excavations and tunnels in soft clay, *Soft Clay Engineering*, E. W. Brand and R. P. Brenner Editors, Elsevier, Oxford, pp. 569-634.
3. Möller, S. C. and Vermeer, P. A. (2008), On numerical simulation of tunnel installation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 461-475.

## DOT 실드터널에서 지표침하를 이론적으로 예측하는 방법

4. Muir Wood, A. M. (1975), The circular tunnel in elastic ground, *Geotechnique*, Vol. 25, No. 1, pp. 115–127.
5. O'Reilly, M. P. and New, B. M. (1982), Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction, *Tunnelling'82*, London: IMM, pp. 173–181.
6. Panet, M. and Guenot, A. (1982), Analysis of convergence behind the face of a tunnel, *Tunnelling'82*, London: IMM, pp. 197–203.
7. Peck, R. B. (1969), Deep excavations and tunnelling in soft ground: state-of-the-art report, *Proceedings of 7th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, Aug. 25–29, 1969, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 225–290.
8. Rankin, W. J. (1988), Ground movements resulting from urban tunnelling, *Proceedings of Conference on Engineering Geology Underground Movements, Nottingham*, London Geological Society, pp. 79–92.
9. Rowe, R. K., Lo, K. Y. and Kack, G. J. (1983), A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, No. 1, pp. 11–22.
10. Shen, S. L., Horpibulsuk, S., Liao, S. M. and Peng, F. I. (2009), Analysis of the behaviour of DOT tunnel lining caused by rolling correction operation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, pp. 84–90.
11. Vermeer, P. A. and Brinkgreve, R. (1993), *Plaxis Version 5 Manual*, A. A. Balkema, Rotterdam.