

실드 TBM 시공데이터와 지반침하 계측데이터 간 상관성 분석

정예림¹ · 남경민² · 김한얼³ · 하상귀⁴ · 윤지석¹ · 조재은¹ · 유한규^{5*}

¹학생회원, 한양대학교 스마트시티공학과 석사과정

²정회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 박사수료

³학생회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 박사수료

⁴정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사수료

⁵정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수

Analysis of correlation between shield TBM construction field data and settlement measurement data

Ye-Rim Jung¹ · Kyoung-Min Nam² · Han-Eol Kim³ · Sang-Gui Ha⁴ · Ji-Seok Yun¹ ·
Jae-Eun Cho¹ · Han-Kyu Yoo^{5*}

¹Master Student, Dept. of Smartcity Engineering, Hanyang University

²Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University

³Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University

⁴Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

⁵Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

*Corresponding Author : Han-Kyu Yoo, hankyu@hanyang.ac.kr

Abstract

The demand for tunnel construction is increasing as part of underground space development due to urban saturation. The shield TBM method minimizes vibration and noise and minimizes ground deformation that occurs simultaneously with excavation, and shield TBM is generally applied to tunnel construction in urban areas. The importance of urban ground settlement prediction is increasing day by day, and in the case of shield TBM construction, ground deformation is minimized, but ground settlement due to tunnel excavation inevitably occurs. Therefore, in this study, the correlation between shield TBM, which is highly applicable to urban areas, and ground settlement is analyzed to suggest the shield TBM construction factors that have a major effect on ground settlement. Correlation analysis was performed between the shield TBM construction data and ground settlement measurement data collected at the actual site, and the degree of correlation was expressed as a correlation coefficient "r". As a result, the main construction factors of shield TBM affecting ground settlement were thrust force, torque, chamber pressure, backfill pressure and muck discharge. Based on the results of this study, it is expected to contribute to the presentation of judgment criteria for major construction data so that the ground settlement can be predicted and controlled in advance when operating the shield TBM in the future.

Keywords: Shield TBM, Construction field data, Settlement, Correlation coefficient

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
24(1)79-94(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.1.079>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received November 15, 2021

Revised January 5, 2022

Accepted January 5, 2022



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

도심지 포화 상태로 인한 지하공간 개발의 일환으로 터널 건설의 수요가 증가하고 있다. 쉴드 TBM 공법은 진동과 소음을 최소화하며 굴착과 동시에 지반 변형을 최소화하는 공법으로, 국내 도심지 터널 시공은 대체로 쉴드 TBM이 적용되고 있다. 도심지 지반침하 예측의 중요성은 나날이 증가하고 있으며 쉴드 TBM 시공의 경우 지반 변형을 최소화 하지만 터널굴착에 의한 지반침하는 필연적으로 발생한다. 따라서 본 연구에서는 도심지 적용성이 높은 쉴드 TBM과 지반침하와의 상관성을 분석하여 지반침하에 주요한 영향을 미치는 쉴드 TBM 시공인자를 제시하고자 한다. 실제 현장에서 수집한 쉴드 TBM 시공데이터와 지반침하 계측데이터 간 상관관계 분석을 수행하였으며, 상관성 정도를 상관계수 “r”로 표현하였다. 그 결과 지반침하에 영향을 미치는 쉴드 TBM 주요 시공인자는 추력(Thrust force), 토크(Torque), 챔버압(Chamber pressure), 뒷채움압(Backfill pressure), 배토량(Muck discharge)으로 나타났다. 본 연구 결과를 통해 향후 쉴드 TBM 운용 시 지반침하를 사전에 예측 및 제어할 수 있도록 주요 시공데이터에 대한 판단 기준 제시에 기여할 것으로 기대된다.

주요어: 쉴드 TBM, 시공데이터, 지반침하, 상관계수

1. 서론

최근 인구증가와 도시화로 인해 지상은 포화상태에 이르렀으며 이로 인해 발생하는 인프라 부족, 교통 혼잡 등의 도시문제에 대한 해결책으로 도심지에 대한 지하공간 개발의 수요가 증가하고 있다. 지하공간 개발의 일환으로 터널 건설의 수요가 증가하고 있으며 도심지 터널 건설 시 진동과 소음을 최소화하는 TBM (Tunnel Boring Machine) 시공이 활발하게 이루어지고 있다. TBM 공법 중 특히 쉴드 TBM 공법은 터널 굴착과 동시에 쉴드 (Shield)로 상부 지반의 붕괴를 방지하면서 세그먼트 라이닝을 조립해 나가는 기술로 국내 TBM 시공사례의 많은 비중을 차지한다. 쉴드 TBM 공법은 굴착과 동시에 지보를 설치함으로써 지반의 변형을 최소화하지만 지반 거동에 있어 불확실성이 존재하기 때문에 굴착에 따른 지반거동에 대한 고려가 요구된다. 도심지 설계에서 중요한 지표침하 예측방안이 정립되지 못하고 있으며 대부분 기존 수치해석 방법 및 문헌자료를 이용하여 지표침하를 예측하고 있는 실정이다(Jun and Kim, 2015; 2018).

다양한 요인으로 인해 발생하는 지반침하, 인접 구조물의 손상, 지하매설물 파손 등의 영향을 사전에 예측할 수 있는 도심 안전 영향 평가 기술이 필요한 시점으로, 도심지에서의 지하공간 개발 시 지표침하 예측의 중요성이 대두되고 있다. 이에 따라, 많은 비중을 차지하는 쉴드 TBM 시공으로 인해 발생하는 지반 변형에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다.

Koh et al. (2011)은 쉴드 TBM 시공 시 발생하는 지표변위에 대해 영향을 주는 요인들을 분석하고 변형되는 지반의 양상과 영향범위를 검토하였다. 또한 Gap Parameter를 이용해 수치해석 결과와 실제 현장 시공데이터를 토대로 역해석을 수행하여 합리적인 지표침하 발생량 평가방안을 검토하였다. An et al. (2021)은 토압식 쉴드 TBM 시공 시 지반침하에 영향을 주는 주요 인자들과 침하 발생 메커니즘이 반영된 해석 모델(analytical model)을 제시

하였으며, 수치해석 기법을 통해 시공 중 조절 가능한 인자들에 대해 매개변수 해석을 수행하여, 결과적으로 시공 조건에 대한 침하 거동을 정량적으로 도출해 침하 해석 모델과 지반 조건에 따른 정성적인 경향성을 도시하였다.

실드 TBM 시공에 따른 지반거동에 관련된 선행연구들은 수치해석을 이용해 실드 TBM 터널 굴착에 따른 지반침하를 예측하거나 지반 조건과 터널 크기, 굴착 조건과 같이 시공 조건에 대해 주요 영향 인자를 제시하였다. 현재까지 실제 실드 TBM 시공데이터를 이용하여 지반거동과의 직접적인 상관성 분석을 수행한 사례는 부족하다. 또한 국내 TBM 운용의 경우, 별도의 기준없이 장비를 운용하는 운전자의 능력에 따라 시공 성능이 크게 좌우되고 있으며, TBM 운전자의 양성은 현장의 경험과 실무를 통해서 도제식으로 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 현장에서 수집된 실드 TBM 시공데이터와 지반침하 예측데이터 간 상관성 분석을 수행하고, 이를 통해 실드 TBM 시공인자 별 지반침하에 미치는 영향 정도를 파악하고자 한다. 본 연구의 상관성 분석을 통해 지반 침하에 주요하게 영향을 미치는 실드 TBM 시공인자를 도출할 수 있으며, 향후 실드 TBM 운용 시 지반침하를 사전에 예측 및 제어할 수 있도록 주요 인자에 해당하는 시공데이터에 대한 판단 기준을 제시하는 연구에 토대가 되고자 한다.

2. 실드 TBM과 지반침하

2.1 실드 TBM 개요 및 시공인자

터널 굴착 공법 중 기계화 공법에 속하는 TBM (Tunnel Boring Machine)은 기존 재래식 공법인 NATM (New Austrian Tunneling Method)공법에 비해 소음과 진동이 적어 도심지 적용 비중이 증가하고 있다. TBM은 지보의 여부에 따라 지보가 없는 개방형 TBM과 지보가 있는 실드 TBM으로 분류된다. 개방형 TBM의 경우 지반상태가 양호한 경우에 사용되고, 굴착하면서 굴진과 버력 처리의 자동화라는 장점이 있으며, 실드 TBM의 경우는 지반상태가 좋지 않은 경우에 또한 사용가능하며, 굴진 시 실드 TBM 자체로 지반의 붕괴와 지하수 유입을 방지하여 막장의 안정성을 도모한다. 또한 후미부에서 세그먼트로 지지하여 추진하는 공법이기에 때문에 안정성이 높고 적용지반이 아주 양호한 지반부터 불량한 암반까지 넓게 분포되어 적용성이 큰 공법이다(Chang, 2015). 실드 TBM은 굴진면 지지 방법과 추진반력에 따라 Single 실드 TBM, Double 실드 TBM, 토압식 실드 TBM 등 다양하게 분류된다.

본 연구에서 채택한 현장의 경우 굴착토로 굴진면을 지지하는 토압식 실드 TBM이 사용되었다. 본 현장의 경우 시공 시 뒷채움양, 뒷채움압, 터널 단면의 상·하·좌·우에 해당하는 챔버압, 추력, 토크, RPM에 대한 데이터를 굴진장에 따라 얻을 수 있도록 TBM이 제작되었다. 이처럼 TBM 굴착에 따른 시공인자는 다양하며 각 시공인자들은 다음과 같다.

2.1.1 추력(Thrust force)

추력은 실드 TBM과 지반과의 마찰력, 커터에 작용하는 하중, 막장압력으로 인한 하중에 저항하며 터널 굴진

방향으로 밀고 나아가는 힘으로, 장비의 굴진에 영향을 미치는 주요한 요소로서 커터헤드가 막장면을 굴진하기 위해 쉘드 TBM을 추진하는 힘을 의미한다. 쉘드 TBM의 추력은 커터헤드에 작용하는 하중 F_c , 굴진면의 지지압력으로 인한 하중 F_s , 쉘드 외판과 지반사이의 마찰력 F_f , 여유추력 ΔF 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$F_n = F_c + F_s + F_f + \Delta F \tag{1}$$

여기서, 커터헤드에 작용하는 하중 F_c 는 암반의 경우 디스크 커터에 작용하는 하중의 합으로 표현되며 토사지반의 경우 막장면에 작용하는 지반의 토압으로 나타낸다.

2.1.2 토크(Torque)

토크는 커터헤드가 회전하기 위해 굴진면에서 저항을 극복할 수 있는 힘을 의미하며 일반적으로 쉘드 TBM 구동을 위한 소요 토크는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M_D = M_C + M_S + \Delta M \tag{2}$$

여기서, M_c 는 굴진 등으로 인한 저항 토크이며 M_s 는 이수 또는 굴착토로 충만된 커터헤드의 회전에 의한 저항 토크로 커터의 압입깊이와 슬릿개수에 따라 변화하는 토크의 손실량이다. ΔM 은 안전을 위한 여유 토크이다.

2.1.3 막장압(Face-support pressure)

막장압은 쉘드 TBM 굴진 시 막장(Face) 전면에 가해지는 압력으로 이론적인 토압과 수압을 말한다. 굴착 시 막장의 토압 또는 슬러리압을 이용하여 안정성을 확보하며, 막장 안정성은 굴진면 붕괴방지, 지표면 침하 및 공동 발생을 방지하기 위해 쉘드 TBM 굴착 시 고려하는 가장 중요한 요인 중 하나이다. 막장압은 Terzaghi 이완하중을 고려하여 Table 1에 나타난 주동토압계수, 정지토압계수, 수동토압계수 적용에 따라 추정할 수 있다.

Table 1. Compute coefficient of earth pressure

	Coefficient of active earth pressure	Coefficient of earth pressure at rest	Coefficient of passive earth pressure
Coefficient of lateral pressure	Rankin's formula (sand layer)	Jaky's formula (sand layer)	
	$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$	$K_0 = 1 - \sin\phi$	$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$
Value	0.35	0.52~1.0	2.88

2.1.4 챔버압(Chamber Pressure)

셴드 TBM 챔버 내의 가압 여부에 따라 밀폐형(Close) 및 개방형(Open)으로 구분되며 도심지 셴드 TBM의 경우 밀폐형으로 굴진되는 경우가 대부분이다. 특히 토압식 셴드 TBM이 국내외 도심지에서 적용성이 높은 공법으로 밀폐형에서의 챔버압은 종종 정지토압으로 고려해 막장면을 안정하게 유지해 변형을 최소화하는 관점으로 최적화될 필요가 있다. 챔버압은 Fig. 1과 같이 셴드 TBM 챔버 내 가해지는 전방의 토압과 수압에 대응하며 TBM 굴진방향 전방에 용기 및 붕괴를 방지하기 위해 실제 굴착 시 필요한 압력을 말하며 막장압과는 식 (4)와 같은 관계가 성립한다(Kim et al., 2021).

$$\text{막장압}(\sigma_T) = \text{토압}(P_h) + \text{수압}(P_w) \tag{3}$$

$$\text{챔버압} = (\text{토압} + \text{수압}) + \text{예비압} = \text{막장압} + \text{예비압} \tag{4}$$

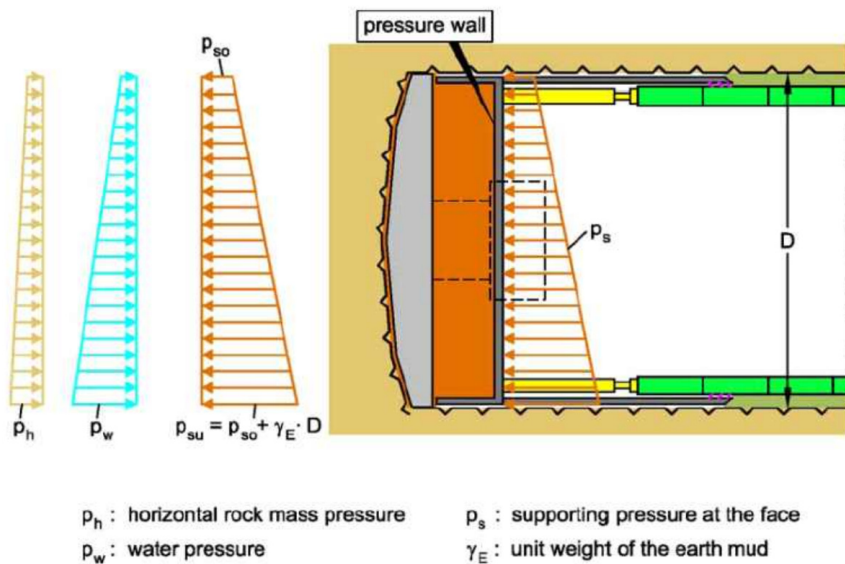


Fig. 1. EPB shield TBM excavation mechanism (Kim, 2020)

2.1.5 뒷채움압(Backfill Pressure)

셴드 TBM 터널 단면 굴착 시 터널 막장면 안정성 증대를 위해 굴착면과 세그먼트 라이닝 사이의 공간에 뒤채움재를 주입한다. 셴드 TBM 터널에서 뒤채움 주입은 셴드 TBM 터널에서 불가피하게 발생하는 테일 보이드의 변형을 억제하고, 지반 침하를 감소시키는데 중요한 역할을 하는 조정 요소이다. 세그먼트 배면에 존재하는 공간은 Fig. 2와 같이 셴드 TBM 굴착 및 라이닝 조립 후 지반 사이에서 생성되는 테일 보이드(Tail void)와 막장굴착에 따른 여굴 혹은 부분붕괴에 기인하는 공극 등을 원인으로 발생한다. 이러한 공간에 세그먼트가 셴드 테일에서

이탈하면서 주입재를 주입하여 충전시키는 기술이 뒷채움이며 이때 토압, 수압, 세그먼트의 강도 및 쉴드 TBM의 형식과 주입 재료의 특성을 종합적으로 판단하여 뒷채움을 주입할 경우 요구되는 압력이 뒷채움압이다(Oh et al., 2017; Moeller, 2006).

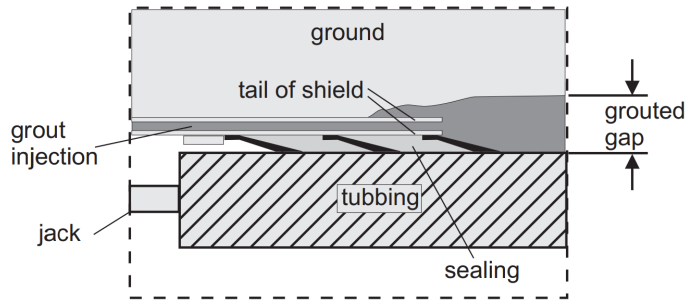


Fig. 2. Creating tail voids when excavating shield TBM tunnels (Moeller, 2006)

2.2 쉴드 TBM과 지반침하

쉴드 TBM 시공 시 터널 굴착과 동시에 지보를 설치하여 지반 변형을 최소화 하지만 지반거동에 불확실성은 필연적으로 존재한다. 쉴드 TBM 시공 시 터널 굴착에 따른 지표침하 발생원인은 크게 단기침하, 라이닝 변형, 장기침하 세 가지로 분류되며 대부분의 침하형태는 단기침하이다.

단기침하의 경우 지반굴착에 따라 발생하는 응력해방으로 인해 유도되는 침하로 굴진면의 안정성, 굴진속도, 세그먼트 라이닝 설치과정, 테일보이드 그라우팅 시점 등에 영향을 받으며 굴진면이 도달하기 전부터 발생하여 뒷채움 주입재가 주입되어 단면변형에 저항하는 능력이 확보될 때 까지 발생한다. Fig. 3은 단기 지표침하 발생 메커니즘이며 쉴드 TBM 터널 굴착에 따라 발생하는 침하 형태의 대부분에 해당한다.

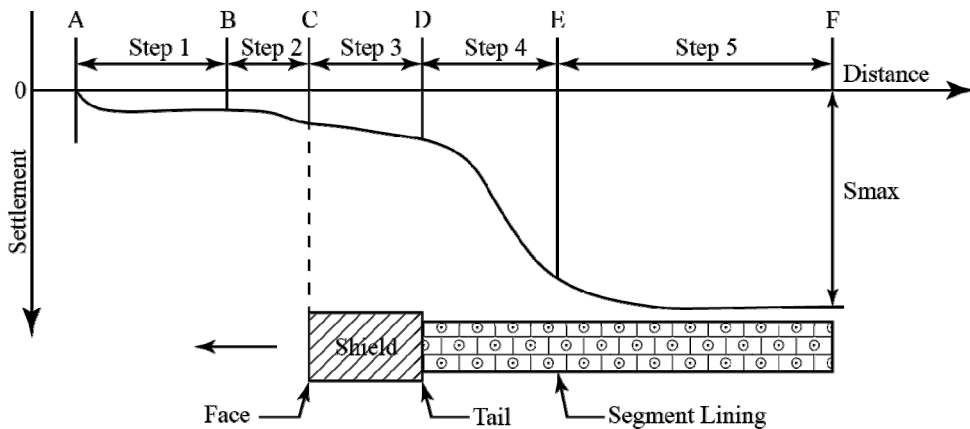


Fig. 3. Mechanism of occurrence of short-term ground settlement (modified from Sugiyama et al., 1999)

쉴드 TBM의 위치에 따라서 다른 침하양상을 보이며, 이는 지반 경계 조건의 변화, 쉴드 TBM 운전조건 및 장비조건에 따른 체적손실(막장손실, 쉴드손실, 테일부 손실)에 기인한다. Step 1은 선행침하로 지하수위 변화가 주원인인 경우가 많으며 쉴드 TBM 굴진의 영향권 밖에서 발생하는 침하로 밀폐형 쉴드 TBM의 경우 선행침하의 크기는 매우 미미하다. Step 2는 막장손실로 인한 침하로써 챔버 내 토압관리가 적절한 경우 막장 전 침하 발생은 크지 않다. Step 3는 쉴드 TBM이 통과할 때 발생하는 침하로 쉴드와 지반사이의 간극 크기와 Fig. 4에서 나타난 pitching, yawing과 같은 회전운동으로부터 쉴드 TBM의 자세제어에 의한 쉴드 손실에 의하여 발생한다. Step 4는 테일 보이드(tail void)에 의해 발생하는 침하로, 뒤채움 그라우팅 주입 및 이후 거동 특성에 따라 침하량이 결정된다. 마지막으로 Step 5는 후속침하로 쉴드 TBM 굴진에 의해 발생한 지반 내 간극수압의 소산되면서 발생하는 압밀침하가 대부분으로 투수성이 좋은 지반에서는 그 크기가 미미하다(Park et al., 2016).

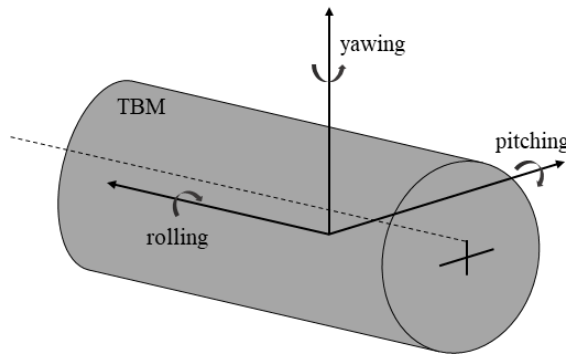


Fig. 4. The yawing, pitching, and rolling of a tunnel boring machine

2.3 터널 굴착으로 발생한 지반손실률

지반침하는 도심지 터널 설계 및 시공 시 필수적으로 고려해야 할 사항이다. 지반침하는 지반손실(Lost ground)로 표현하기도 하며, 터널 굴착에 의해 발생하는 현상으로 인접한 지중 및 지상 구조물에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 도심지 터널 설계 단계에서 지반침하를 예측하는 것은 필수적이며, 경험적 방법, 해석적 방법, 수치해석을 이용한 방법으로 산정한다. 이 중에서 가장 대표적인 것은 Peck (1969)이 제안한 경험식이며 현재까지 다양한 실험 및 현장데이터로 검증되었다. 지반침하는 주로 Gaussian 곡선으로 나타나며, 식 (5)는 Peck (1969)이 제안한 식으로써 최대 침하량과 변곡점의 함수로 표현할 수 있다.

침하곡선의 단위 길이 당 부피는 식 (5)를 적분함으로써 계산할 수 있고(Kim et al., 2014), 궁극적으로 지반손실률(Volume Loss, %)은 식 (7)과 같이 최종 터널 직경(D)의 단위부피 대비 침하곡선의 부피로 표현할 수 있다. 지반손실률은 이론적으로 지표침하곡선으로부터 산정한 지반이 손실된 양과 같지만 터널 굴착으로 인하여 발생한 터널의 지반손실량(V_t)이 지표면으로 전달되는 과정에서 지반의 종류에 따라 팽창되거나 수축되는 정도에 따라 실제 값은 달라질 수 있다(Fig. 5).

$$S_v(x) = S_{\max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (5)$$

$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v(x) dx = \sqrt{2\pi} (S_{\max} \cdot i) \quad (6)$$

$$V_L(\%) = \frac{4V_s}{\pi D^2} \cdot 100 \approx \frac{4V_t}{\pi D^2} \cdot 100 \quad (7)$$

여기서, S_v : 침하량

S_{\max} : 터널 중심에서의 최대 침하량

x : 터널 중심으로부터의 수평거리

i : 침하곡선에서의 변곡점

D : 최종 터널의 직경

V_s : 침하곡선의 부피

V_t : 터널의 지반손실량

V_L : 지반손실률

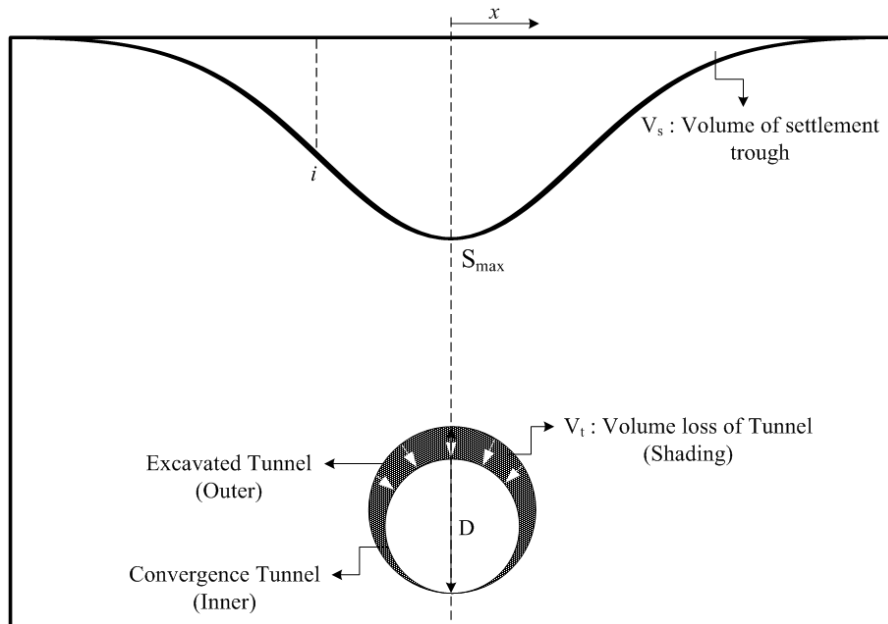


Fig. 5. Simple concept of volume loss

3. 데이터 분석

3.1 현장 개요

본 연구에서는 굴착토로 굴진면을 지지하면서 지반의 변형을 최소화하는 토압식 쉴드 TBM이 적용되었다. TBM 시공데이터의 경우 쉴드 TBM에서 계측된 총 4개의 쉴드 TBM 현장 데이터를 적용하였다. 쉴드 TBM 터널 통과구간은 주로 퇴적모래층이었으며, 점토층이 터널 통과구간에 일부 겹쳐있는 현장도 있었다. 네 현장 모두 지층 깊이는 다르지만 최상부 지층은 자갈이 주를 이루는 매립층으로 이루어져 있으며, 매립층 하부에 점토층이 위치하였다. 점토층 하부에는 퇴적모래층이 위치하며, 퇴적모래층 하부에는 풍화토와 풍화암이 위치하는 지반형태였다. 현장은 상선과 하선으로 구성되어 있으며, 터널 굴착 시 하선을 먼저 굴진한 후 U-turn하여 TBM을 재조립한 후 상선을 굴진하는 방식으로 시공되었다. 시공데이터의 경우, 쉴드 TBM이 전진하면서 굴진장에 따른 뒷채움양, 뒷채움압, 터널 단면의 상·하·좌·우에 해당하는 챔버압, 추력, 토크, RPM에 대해 기록한 데이터가 사용되었다. 현장 별 터널 단면의 직경, 토피고, 최대 지반침하량에 대한 정보는 Table 2에 구체적으로 나타내었다.

Table 2. Diameter of tunnel, cover depth and maximum settlement of each field site

Field data	①	②	③	④
Excavation diameter (m)	7.95	8.00	8.00	8.30
Cover depth (m)	18.0	20.0	20.0	23.5
Maximum settlement (mm)	20.537	18.047	22.467	23.105

본 연구에서는 쉴드 TBM의 시공인자와 지표침하에 대한 상관관계를 분석하고 상관관계가 있다고 판단되는 주요한 인자들에 대해 추가적으로 회귀분석을 진행하여 쉴드 TBM 시공데이터와 지반침하 계측데이터와의 상관성을 분석하였다.

3.2 쉴드 TBM 시공데이터와 지반침하 계측데이터 상관관계 분석

본 연구에서는 쉴드 TBM 시공데이터와 지반침하 간 상관성 분석을 위해 1차적으로 쉴드 TBM의 여러 시공인자들과 지반침하 계측데이터 간 상관관계분석을 수행하여 상관관계가 있는 인자들을 도출한 후 이러한 시공인자들을 위주로 회귀분석과 결과해석을 수행하였다.

상관분석은 두 변수 간 밀접도의 정도를 나타내는 것을 말하며, 상관분석을 통해 두 변수의 선형관계 유무를 판단할 수 있다. 두 지표의 연관 정도를 수치로 나타낼 수 있으며 상관관계의 강도는 상관계수(Correlation coefficient, r)라는 정량적 지표로 표현할 수 있다. 상관계수 r 은 상관분석을 통해 얻을 수 있으며, -1에서 1까지를 범위로 가지고 Table 3과 같이 $|r|$ 이 0에 가까울수록 관계가 약하고 1에 가까울수록 두 변수는 관계가 강한 것을 의미한다.

Table 3. Correlation with ground settlement by TBM construction factor according to correlation coefficient

Correlation coefficient	Correlation
0.9 - 1.0	Very strong correlation
0.7 - 0.9	strong correlation
0.4 - 0.7	Moderate correlation
0.2 - 0.4	Slight correlation
0 - 0.2	Not applicable

본 연구에서는 두 변수간의 상관관계를 도출하기 위한 상관분석으로 피어슨 상관관계(Pearson Correlation)를 적용하였다. 상관분석에서 상관계수 r 은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며, 상관관계를 분석하는 중요한 이유 중 하나는 회귀분석을 준비하는 것이며, 상관관계 분석을 통해 쉘드 TBM 시공인자와 지반침하 간의 상관성을 수치적으로 제시하여 주요 시공인자를 도출할 수 있다.

$$r = \frac{S(xy)}{\sqrt{S(xx)S(yy)}} \quad (8)$$

여기서, $S(xx)$: x 의 편차제곱의 합

$S(yy)$: y 의 편차제곱의 합

$S(xy)$: x 와 y 의 편차제곱의 합

본 연구에서 사용한 쉘드 TBM 시공데이터의 경우 하루 평균 굴진 속도는 하선이 9.6 m, 상선이 11.5 m으로 상선과 하선 모두에 대한 시공데이터와 지반침하 계측데이터 간 관계를 조사하였다. 쉘드 TBM 시공에 의한 지반침하의 경우 단기침하가 주를 이루며, 시공데이터의 변화로 지반침하를 판단할 수 있는 단기침하에 대해 분석을 수행하였다. 따라서 쉘드 TBM 운용 시 시공데이터 변화를 바로 확인 가능한 인자들 10가지에 대해 상관관계를 분석하였다. 이에 해당하는 쉘드 TBM 현장 시공데이터는 굴진장에 따른 뒷채움양(backfill amount), 뒷채움압(backfill pressure), 터널 단면의 상·하·좌·우에 해당하는 챔버압(chamber pressure), 추력(thrust force), 토크(torque), 커터 RPM 그리고 스크류컨베이어 데이터에 해당하는 배토량, 압력, RPM, 토크이다. 위 시공인자들과 지반의 단기침하에 대한 상관성을 분석하고자, 시공 후 30일 경과동안의 지반침하 계측데이터를 분석하여 챔버 내 토압과 뒷채움 비율을 조정하여 막장압을 관리한 사례를 참고하여, 본 연구에서는 하루 평균 굴진 속도와 굴진 방향을 고려하여, 30일 동안의 시공데이터와 지반침하 계측데이터 간 상관관계 분석을 수행하였다.

3.3 실드 TBM 시공데이터와 지반침하 예측데이터 회귀 분석

상관관계 분석은 선형의 상관성에 대해서만 판단가능하다는 한계점이 있다. 그러나 실제 TBM의 거동과 지반 침하와의 관계는 선형관계를 초월하므로 추가적인 상관성 분석이 요구된다. 따라서 실드 TBM 시공데이터와 지반침하 예측데이터 간 회귀 분석을 시행하였다.

또한 TBM 시공인자와 지반침하 예측데이터 간 상관관계 분석을 위해 예측된 지반침하량과 TBM 터널의 정보를 바탕으로 앞서 언급한 식 (5), (6), (7)을 이용하여 지반손실률을 계산하였으며, 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Calculated volume loss for each field site

Field data	①	②	③	④
Volume loss (%)	1.29	1.25	1.55	1.76

계산된 지반손실률과 각 인자별 상관계수를 바탕으로 회귀분석을 진행하였으며, 각 인자들을 변수로 설정하고, 지반손실률을 최종 값으로 설정하여 회귀분석을 진행하였다. MATLAB의 회귀 학습기를 사용하였으며, 선형회귀모델, 가우스회귀모델, 신경망회귀모델 중 총 24가지의 회귀모델로 분석을 수행하였다(Table 5). 회귀분석 결과 가우스회귀모델 중 제곱지수모델이 가장 오류가 적은 것으로 나타났으며, 예측오차인 RMSE (Root Mean of Squared Errors)는 4.7635로 나왔다. 예측오차는 모형의 신뢰성 및 안정성을 평가하는 기준으로 적용되며 본 연구에서 적용한 RMSE는 그 값이 작을수록 신뢰도가 높다.

























일반적으로 가우스회귀모델은 다차원 정규분포를 무한차원으로 확장한 확률과정으로 다음과 같이 정의할 수 있다. 확률과정 $\{X_t : t \in T\}$ 의 임의의 유한시간 $\{t_1, \dots, t_k\} \subset T$ 에서의 확률변수가 항상 다차원 정규분포를 따를 때 확률과정을 가우스과정이라 한다. 가우스 과정의 성질은 평균함수와 공분산 함수에 의해 결정된다. 커널 함수 K 는 공분산 행렬을 잘 정의하기 위해 양정치임을 가정한다. 대표적인 커널함수는 다음과 같이 정의되는 제곱지수함수가 있다.

$$K(t, t') = \exp(- \| t - t' \|^2) \tag{9}$$

더 나아가서 이 가우스 모델의 회귀모형은 식 (10)의 함수 f 의 구조를 선형으로 제안할 때, 이 모형을 선형회귀 모형이라 한다.

$$y = f(x) + \epsilon, \epsilon \sim N(0, \sigma^2) \tag{10}$$

Table 5. RMSE value classification according to regression models using MATLAB

Regression models	Shape	Classification of regression model	RMSE value	Regression models	Shape	Classification of regression model	RMSE value
1 2 3 4 Linear regression		Simple linear	4.9176	14 15 Tree ensemble		Boosting tree	5.1185
		Interaction linear	4.7987			Bagging tree	5.2844
		Robust linear	4.9337	16 17 Gaussian process regression (GPR)		Squared exponential	4.7635
		Step-by-step linear	4.8038			Matern 5/2 GPR	4.7687
5 6 7 Tree		Dense tree	5.9611	18 19 20		Exponential GPR	4.8503
		Intermediate tree	5.4199			Rational quadratic GPR	4.7735
		Sparse tree	5.1151		21 22 23 24 Neural-network regression		Narrow neural-network
8 9 10 11 12 13 SVM (support vector machine)		Linear SVM	5.1052			Intermediate neural-network	5.3951
		2nd SVM	5.0705			Wide neural-network	6.1869
		3rd SVM	5.2075			Double layer neural-network	5.2883
		Dense gaussian SVM	6.1399			Triple layer neural-network	5.4971
		Intermediate gaussian SVM	5.1652				
	Sparse gaussian SVM	4.9896					

4. 쉘드 TBM 시공데이터와 지반침하 계측데이터 간 상관성분석 결과

본 연구에서 사용한 쉘드 TBM 현장 시공데이터는 굴진장에 따른 뒷채움양(backfill amount), 뒷채움압(backfill pressure), 터널 단면의 상·하·좌·우에 해당하는 챔버압(chamber pressure), 추력(thrust force), 토크(torque), 커터 RPM 그리고 스크류컨베이어 데이터에 해당하는 배토량, 압력, RPM, 토크 총 10가지이며, 상관관계 분석 결과 쉘드 TBM의 시공인자들 중 지반침하와 가장 밀접하게 관련이 있는 것은 추력(Thrust Force), 챔버압(Chamber

Pressure), 뒷채움압(Backfill Pressure), 토크(Torque), 배토량(Muck discharge) 5가지로 나타났다. 네 현장 계측 데이터를 바탕으로 상관계수를 도출한 결과는 Table 6과 같으며, 같은 현장이라 하여도 상선과 하선의 상관관계 값이 상이하며, 시공인자별로도 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

Table 6. Distribution of correlation coefficients between construction factors and ground settlement by each field data

Field data	① Site		② Site	
	Upward	Downward	Upward	Downward
Thrust force	0.3551	0.2792	0.4156	0.5498
Chamber pressure	0.5067	0.5939	0.8636	0.1477
Backfill pressure	0.4389	0.3054	0.6572	0.7457
Torque	0.6092	0.1961	0.7774	0.8113
Muck discharge	0.4281	0.1037	0.6956	0.2960
Field data	③ Site		④ Site	
	Upward	Downward	Upward	Downward
Thrust force	0.6199	0.5225	0.8297	0.1423
Chamber pressure	0.8753	0.0918	0.0939	0.1610
Backfill pressure	0.5577	0.7085	0.0090	0.6272
Torque	0.7904	0.7245	0.2993	0.3351
Muck discharge	0.8046	0.2621	0.5733	0.2582

네 현장의 상선과 하선 상관계수의 평균은 Table 7과 같다. 상선에서 모든 시공인자에 대해 “상관관계가 있음”으로 나타났으며, 하선의 경우 추력과 챔버압, 배토량의 경우 “약한 상관관계”, 뒷채움압과 토크의 경우 “상관관계가 있음”으로 나타났다. 대체로 상선이 하선보다 높은 상관관계를 보이는 것을 알 수 있었다.

Table 7. Average data distribution of correlation coefficients between construction factors and ground settlement (upward, downward)

Field data	①,②,③,④ Site average	
	Upward	Downward
Thrust force	0.5551	0.3735
Chamber pressure	0.5849	0.2486
Backfill pressure	0.4157	0.5967
Torque	0.6191	0.5168
Muck discharge	0.6254	0.2300

상선과 하선의 평균을 통해 추력, 챔버압, 뒷채움압, 토크, 배토량 시공인자를 각 현장에 대해 정리한 결과 Table 8과 같으며, 네 시공인자 모두 “상관관계가 있음”으로 나타났다. 하지만 시공인자 별 상관계수 분석결과 토크(Torque)의 상관계수 값이 가장 컸으며, 토크(Torque)가 지표침하와 가장 상관관계가 높은 시공인자임을 알 수 있었다.

Table 8. Average distribution of correlation coefficients for major construction factors

Field data	①,②,③,④ Site average
Thrust force	0.4643
Chamber pressure	0.4167
Backfill pressure	0.5062
Torque	0.5679
Muck discharge	0.4277

가우스모델 회귀모형은 대표적인 비모수 베이지 회귀모형으로 함수 f 의 사전분포로 가우스 과정 $GP(\mu, K)$ 를 가정한 것이다. 즉, 함수 f 가 가우스 과정을 따르고, f 와 입력 x 가 주어질 때 y 의 조건부 분포가 정규분포 $N(f(x), \sigma^2)$ 라 가정한 모형이다. 가우스 과정 회귀모형은 함수의 형태를 제한하지 않은 비모수 회귀모형이므로 특정한 형태가 없다. 본 연구에서는 회귀 학습 결과에서 신뢰도가 가장 높은 제곱지수 가우스회귀모형을 선택하였으며, 형태는 앞서 언급한 바와 같이 제곱지수 커널함수(Squared exponential)이다. 특정한 형태가 없지만 일반적으로 제곱지수 커널함수는 식 (11)과 같다.

$$k(x_i, x_j | \theta) = \sigma_f^2 \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}{\sigma_i^2} \right] \quad (11)$$

이때 Beta는 12.1199의 값이 나왔으며, Sigma는 4.7170이 도출되었다.

5. 결론

본 연구에서는 도심지 쉘드 TBM 수요 증가에 따른 지표침하 예측방안 정립의 초기 연구 단계로, 쉘드 TBM 시공인자가 지반침하에 미치는 영향을 파악하기 위해서 쉘드 TBM 시공데이터와 지표침하 예측데이터 간 상관성 분석을 실시하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 상관관계 분석 결과 쉘드 TBM의 시공인자들 중 지반침하와 가장 밀접하게 관련이 있는 것은 추력(Thrust Force), 챔버압(Chamber Pressure), 뒷채움압(Backfill Pressure), 토크(Torque), 배토량(Muck discharge) 5

가지로 나타났다. 추력의 경우 가장 높은 상관계수는 0.8297이며, 챔버압의 경우 최대 상관계수가 0.8753, 뒷채움압 0.7457, 토크 0.8113, 배토량 0.8046으로 상관계수의 최대값을 비교한 결과 모두 지반침하와 강한 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다.

2. 쉴드 TBM 시공인자 별 평균 상관계수는 추력 0.4643, 챔버압 0.4167, 뒷채움압 0.5062, 토크 0.5679, 배토량 0.4277로 평균 상관계수 또한 다른 시공인자 대비 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 또한 지반침하와의 상관관계는 토크, 뒷채움압, 추력, 배토량, 챔버압 순으로 높은 것을 확인하였다.
3. 이론식을 활용하여 각 현장 별 쉴드 TBM 공법에서의 굴착 직경, 토피고, 최대 지표침하량을 이용하여 지반손실률을 계산하였으며, 회귀분석 방법을 이용하여 시공인자를 이용하여 지반손실률을 산정할 수 있었다. 총 24가지의 회귀모델 중 예측오차 RMSE 값 4.7635로 가장 낮은 가우스회귀모델 중 제곱지수 커널함수 형태가 가장 신뢰도가 높으며 적합한 형태로 판단되었다. 결과적으로 $Beta = 12.1199$, $Sigma = 4.7170$ 이 도출되어, 궁극적으로 쉴드 TBM 시공인자 중 지표침하와 상관성이 있는 추력, 챔버압, 뒷채움압, 토크, 배토량 5가지 변수를 통해 사전에 지반손실률을 산정할 수 있음을 확인하였다.
4. 본 연구에서는 쉴드 TBM 시공데이터와 지반침하 계측데이터 간 상관성 분석을 수행하였으며, 그 결과 지반침하와 가장 연관성이 높은 쉴드 TBM 시공인자는 토크임을 확인하였다. 그러나 지반침하와 연관성이 높은 주요 시공인자를 일반화하기 위해 향후 추가적인 현장 데이터 분석이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업의 ‘도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구(21UUTI-B157787-02)’ 연구단의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

저자 기여도

정예림은 원고작성 및 상관성분석을 수행하였고, 남경민은 원고작성 및 회귀분석을 수행하였고, 김한얼과 하상귀는 데이터분석 및 회귀분석을 수행하였고, 윤지석과 조재은은 데이터분석 및 원고작성을 하였고, 유한규는 연구개념 및 원고검토를 하였다.

References

1. An, J.B., Kang, S.J., Kim, J.J., Kim, K.Y., Cho, G.C. (2021), “A preliminary study for numerical and analytical evaluation of surface settlement due to EPB shield TBM excavation”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 23, No. 3, pp. 183-198.
2. Chang, S.H. (2015), “A consideration for mechanical rock excavation focusing on TBM and roadheader”, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 52, No. 5, pp. 531-548.

3. Jun, G.C., Kim, D.H. (2015), “A study on key factors of ground surface settlement due to shield TBM excavation using 3-dimension numerical analysis”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 305-317.
4. Jun, G.C., Kim, D.H. (2018), “Study on the 3 dimensional numerical analysis method for shield TBM tunnel considering key factors”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 2, pp. 513-525.
5. Kim, W.S. (2020), A study on chamber pressure of EPB shield TBM with measurement data analysis of under the river, Ph.D. Thesis, Woosong University, pp. 6-12.
6. Kim, Y.D., Hwang, B.H., Cho, S.W., Kim, S.H. (2021), “A study on the soil conditioning behaviour according to mixing method in EPB shield TBM chamber”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 23, No. 4, pp. 233-252.
7. Kim, Y.J., Im, C.G., Kang, S.G., Lee, Y.J. (2014), “A study on surface settlement characteristics according to the cohesive soil depth through laboratory model tests”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 6, pp. 507-520.
8. Koh, S.Y., Kwon, S.J., Hwang, C.H., Kim, S.I., Choo, S.Y. (2011), “A study on gap parameter and influence area of ground settlement using back analysis constructed by shield TBM with shallow depth”, *Proceedings of the 2011 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Hoengseong, pp. 1509-1518.
9. Moeller, S.C. (2006), Tunnel induced settlements and structural forces in linings, Ph.D. Thesis, University of Stuttgart, pp. 3-35.
10. Oh, J.Y., Park, H.K., Kim, D.H., Chang, S.B., Lee, S.B., Choi, H.S. (2017), “Study on the effect of tail void grouting on the short- and long-term surface settlement in the shield TBM Tunneling using numerical analysis”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 2, pp. 265-281.
11. Park, H.K., Oh, J.Y., Chang, S.B., Lee, S.B. (2016), “Case study of volume loss estimation during slurry TBM tunnelling in weathered zone of granite rock”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 1, pp. 61-74.
12. Peck, R.B. (1969), “Deep excavations and tunnelling in soft ground”, *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, pp. 225-290.
13. Sugiyama, T., Hagiwara, T., Nomoto, T., Nomoto, M., Ano, Y., Mair, R.J., Bolton, M.D., Soga, K. (1999), “Observations of ground movements during tunnel construction by slurry shield method at the Docklands Light Railway Lewisham extension—East London”, *Soils and Foundations*, Vol. 39, No. 3, pp. 99-112.