

# 실드 TBM의 장비 형상 및 굴진 데이터를 고려한 체적손실 산정 연구

박현구, 장석부\*, 이승복

## A Study of Shield TBM Tunnelling-induced Volume Loss Estimation Considering Shield Machine Configurations and Driving Data

Hyunku Park, Seokbue Chang\*, Seungbok Lee

**Abstract** Estimation of shield TBM tunnelling-induced volume loss is of great importance for ground settlement control. This study proposed a simple method for evaluation of volume loss during TBM tunnelling, which is able to take into account of shield machine configurations and main driving data in calculation. The method was applied to analyze the tunnelling cases with earth pressure balanced and slurry pressure balanced shielded TBM, and mostly, reasonable agreements with monitoring results were found. Additional discussions were made for some disagreements.

**Key words** Volume loss, Shield TBM, EPB TBM, SPB TBM, Tunnelling

**초 록** 본 논문에서는 실드 TBM 굴진 중 체적손실 산정과 관련한 기존 사례 및 정량적인 산정 방안에 대한 문헌 분석을 수행하여 장비 형상과 운전 중 주요 기계데이터를 활용한 산정 방안을 도출하였다. 도출된 방안은 기존 문헌에 보고된 토압식 및 이수식 TBM 굴진 사례 분석에 적용되었다. 전반적으로 예측 결과와 잘 부합하는 것으로 나타났으며 일부 차이에 대한 분석을 실시하였다.

**핵심어** 체적손실, 실드 TBM, 토압식 TBM, 이수식 TBM, 터널

### 1. 서 론

도심지 지하 및 해저·하저를 통과하는 교통(도로/철도)·전력/통신·상하수로 기반시설 구축을 위한 터널 시공 시 폐쇄형(Closed-type) 실드 TBM 적용이 확대되고 있다. 폐쇄형 실드 TBM은 막장면 지지방법에 따라 토압식(Earth Pressure Balanced, EPB)과 이수식(Slurry Pressure Balanced, SPB) TBM으로 나뉜다. 토압식은 굴착면 커터헤드(cutterhead) 후방 챔버(chamber) 내 굴착 토사 및 암반의 토압으로 막장면에 압력(토압)을 가하는 방식으로, 스크루컨베이어(screw conveyor)를 통한 배토 속도를 조절하는 것으로 막장압을 관리하며,

실드·점토지반과 같이 상대적으로 투수계수가 낮은 지반에 적용된다. 반면 이수식은 가압된 벤토나이트 슬러리(이수)를 이용하여 막장면을 지지하고 굴착토를 슬러리와 함께 배토하는 방식이며, 상대적으로 투수성이 큰 사질토 및 암반에 적용된다. 최근 들어서는 토압식 TBM에 대한 혼합재(conditioning foam) 성능 개선 및 이수식 TBM 슬러리 플랜트 관련 기술 개선으로 두 공법 모두 세립/조립 지반조건에 대한 적용이 확대되고 있다. 그러나 고수압 조건 및 파쇄대/연약대 등의 지반 변동이 큰 경우에 대해서는 고수압 대응 및 막장면 가압 효과가 우수한 이수식 TBM이 적용된다.

토압식 및 이수식 폐쇄형 실드 TBM은 공통적으로 막장면 가압 및 강제 원통형 실드로 굴착 중 지반을 지지하며, 실드 통과와 동시에 프리캐스트(precaster) 세그먼트 라이닝의 조립 및 설치를 수행하므로 기존 NATM 공법에 비해 효율적으로 지반 침하를 억제할 수 있다. 또한, 해저·하저터널과 같은 고수압 조건 시공 시 막장면 지지 유체(벤토나이트 슬러리 등)를 이용한 고수압 지지 및 지하수 유입 억제가 가능하여 파쇄대 및 연약

**Received:** Sep. 25, 2015

**Revised:** Oct. 7, 2015

**Accepted:** Oct. 8, 2015

**\*Corresponding Author:** Chang, Seokbue

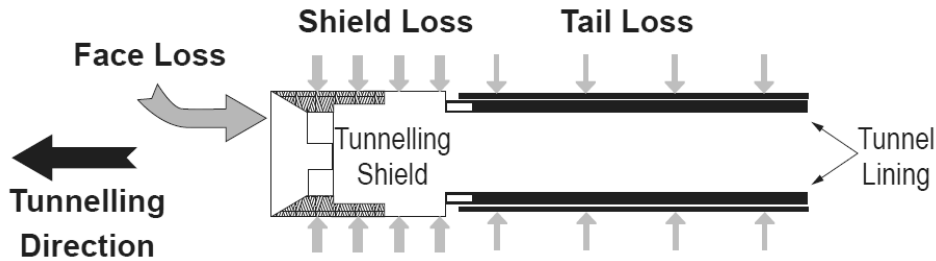
Tel) +8221457865, Fax) +8221456050

E-Mail) seok.chang@samsung.com

Samsung C&T Corp. Bldg, 14, 74Gil, Seocho-daero, Seocho-gu, Seoul, Korea

**Table 1.** Guidelines for estimation of volume loss in shield TBM tunnelling

Country	Condition	Volume Loss (%)
U.S. (FHWA,2009)	Good practice in firm ground; Tight control of face pressure within closed face machine in slowly raveling or squeezing ground	0.5
	Usual practice with closed face machine in slowly raveling or squeezing ground	1.0
	Poor practice with closed face in raveling ground	2.0
	Poor practice with closed face machine in poor (fast raveling) ground	3.0
	Poor practice with little face control in running ground	> 4.0
U.K. (Mair and Taylor,1997)	Shield TBM tunnelling (slurry, EPB) in sandy soil	0.5
	Shield TBM tunnelling (slurry, EPB) in clayey soil	1.0~2.0
	Slurry shield TBM tunnelling in Marine deposit	0.7
Hong Kong (MTR,2011)	Slurry shield TBM tunnelling in Alluvium deposit	0.4 (clayey) 0.45 (sandy)
	Slurry shield TBM tunnelling in Decomposed Granite deposit	0.3 (soil) 1.0 (mixed)
	Shield TBM tunnelling in Marine deposit	3.0
Singapore (LTA,2013)	Kallang formation in any part of the face	3.0
	Shield TBM tunnelling in Granite soil	1.0
	Shield TBM tunnelling in Granite rock	0.5
	Shield TBM tunnelling in mixed ground	1.5



**Fig. 1.** Development of volume losses during shield TBM tunnelling (Loganathan, 2011)

대 시공 시 굴진 안정성 확보를 도모할 수 있다.

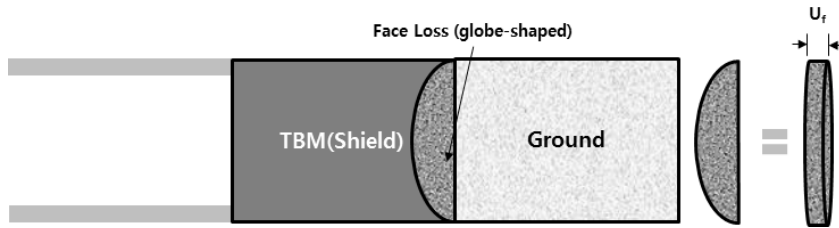
실드 TBM 터널 굴착은 터널 주변 지반 응력 이완을 유발하므로 실제 굴착 체적은 이론적인 굴착 체적보다 크며, 이로 인해 발생하는 추가적인 굴착량을 체적손실 (volume loss)이라고 정의한다. 기존 문헌에 따르면, 국가별로 기존 실드 TBM 굴진 사례를 기초로 하여 설계 시 고려되는 지반별 체적손실의 범위를 제시하고 있으며 Table 1은 미국, 영국, 싱가포르, 그리고 홍콩의 가이드라인을 요약한 것이다. Table 1에서 살펴볼 수 있듯이, 막장면 지반이 균질할 경우에는 지반이 연약할수록 큰 체적손실 값을 제시되고 있으며 막장면 지반이 토사와 암반으로 구성된 복합 지반 조건인 경우에는 토사 지반 체적손실 값의 1.5배 수준으로 적용되고 있음을 알 수 있다. 미국 FHWA의 가이드라인은 지반 조건 이

외에도 실드 TBM 굴진 시 막장압 관리가 잘 수행되지 않을 경우 최대 4% 이상의 체적손실이 발생할 수 있음을 제시하고 있다.

한편, 실드 TBM 터널 굴착 시 발생하는 체적손실은 크게 막장손실(face loss), 실드손실(shield loss), 그리고 후방손실 (tail loss)로 구분될 수 있으며 총 체적손실은 각 손실 값의 합과 같다(Fig. 1). 막장손실은 터널 굴착 중 막장면 토사 및 암반 제거로 인해 막장면이 굴진 반대 방향으로 변형 및 압출되면서 굴진 시 추가로 굴착되는 지반 체적을 굴착 면적으로 나눈 값을 의미한다. 다음으로 실드손실은 실드 전진에 의해 발생하는 터널 반경방향 체적손실로써, 실드 전진을 용이하게 위한 실드 전면부에서의 과굴착(overcut)과 실드의 형상 (conicity)으로 인한 실드 주변부 간극 발생에 기인한다.

**Table 2.** Volume loss factors and related parameters of shield TBM

Factor	related parameters
face loss	earth pressure, ground water pressure, stiffness/strength of ground, face pressure, frictional behavior at shield-ground interface
shield loss	earth pressure, ground water pressure, stiffness/strength of ground, overcut amount, shield taper amount, slurry pressure around shield skin
tail loss	earth pressure, ground water pressure, tail void thickness, volume and pressure of backfill grout, shrinkage of backfill grout



**Fig. 2.** Concept of face loss

마지막으로, 후방손실은 실드 외경과 세그먼트 라이닝 외경의 차이로 인해 형성되는 간극에 의해 발생하는 체적손실로써, 뒤채움재 충전 과정 및 뒤채움재 경화 과정에서 터널 반경방향으로 발생한다. 실드 TBM 굴진 중 체적손실은 지반과 TBM장비, 지반과 세그먼트라이닝 경계부에서 발생하는 상호거동에 기인하며, 기존 문헌(Rowe와 Lo, 1983; Lee등, 1992; Loganathan, 2011)에 따르면, 실드 TBM 굴진 중 체적손실과 관련 주요 지반·장비·기계 변수는 Table 2와 같다.

이와 관련하여, Rowe와 Lo(1983)는 실드 TBM 굴진 중 정량적인 체적손실 산정을 위한 Gap 모델을 제안하였으며, Lee(1989)와 Lee등(1992)은 막장면 변위로 인한 막장손실, 실드 후방 공극. 그리고 커터헤드에서의 과굴착의 합으로 정의되는 Gap 변수 산정방안을 제시하였다. 또한 Loganathan(2011)은 문헌에서 언급된 실드손실 및 뒤채움재의 수축거동을 고려하여 Gap모델을 개선한 체적손실 방안을 제안하였다. 그러나 Gap model에 대한 적용성 연구는 많이 수행되지 않은 상황이며, 기존의 연구에서는 막장압과 뒤채움압 등의 운용정보와 체적손실 간의 상관관계에 대한 정성적인 분석이 주로 이루어졌다(Jones 2010, Wongsaroj et al. 2013, Fargnoli et al. 2013). 본 논문에서는 문헌에 보고된 실드 TBM 굴진 중 체적손실 산정과 관련된 사례 및 정량적인 산정 방안을 조사하여 합리적인 산정방안을 도출하고, 이를 활용하여 기존 문헌에 보고된 토압식 및 이수식 TBM 굴진 중 체적손실에 대한 분석을 수행하여 체적

손실 산정방안의 적절성에 대해 논의하였다.

## 2. 체적손실 산정

### 2.1 장비특성 및 운전조건을 이용한 체적 산정

#### 2.1.1 막장손실 $V_f$

실드 TBM 굴진 중 막장손실은 굴착으로 인하여 막장면 내부로 밀려나오는 지반의 체적(Fig. 2)과 관련하며, 이에 대한 Lee(1989)의 막장손실 산정식은 식 (1)과 같다.

$$V_f(\%) = \frac{U_f}{R} \times 100 = \frac{k_s}{2R} \frac{\Omega RP_0}{E_u} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $E_u$ 는 지반의 비배수 탄성계수,  $R$ 은 굴착반경,  $U_f$ 는 막장면 내부로 밀려나오는 지반의 체적과 동일한 원통의 높이(Fig. 2),  $k_s$ 는 막장면 내부로 유입되는 지반과 실드 챔버 간 마찰 저항과 관련된 변수로서, 지반 조건에 따른  $k_s$ 값은 아래와 같다.

- 견고한 지반 ( $q_u > 100\text{kPa}$  또는 SPT N > 10):  $k_s = 0.7$
- 연약한 지반 ( $q_u = 25\sim 100\text{kPa}$  또는 SPT N = 3~10):  $k_s = 0.9$
- 매우 연약한 지반( $q_u < 25\text{kPa}$  또는 SPT N < 3):

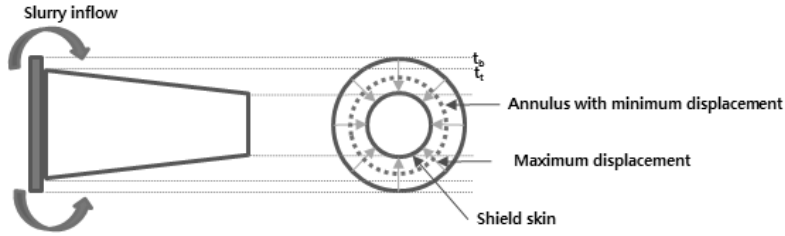


Fig. 3. Concept of shield loss estimation

$$k_s = 1.0$$

식 (1)의 결정계수  $\Omega$ 는 식 (2)와 같이 산정된다.

$$\Omega = \begin{cases} 1.12, & N_R < 3 \\ 0.63N_R - 0.77, & 3 < N_R < 5 \\ 1.07N_R - 2.55, & N_R > 5 \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $N_R$ 은 stability ratio로 식 (3)으로부터 산정되며, 식 (3)에서  $P_i$ 는 막장압,  $H$ 는 터널 스프링 라인의 심도, 그리고  $C_u$ 는 스프링 라인에서 막장면 지반의 비배수 전단강도이다.

$$N_R = (rH - P_i) / C_u \quad (3)$$

또한, 식 (1)의  $P_0$ 는 터널 막장에서 전응력(net pressure) 감소분이며 아래 식과 같이 산정된다.

$$P_0 = K_o P'_v + P_w - P_i \quad (4)$$

여기서,  $K_o$ 는 정지토압계수,  $P'_v$  및  $P_w$ 는 각각 터널 스프링 라인에서의 연직 유효 응력과 정수압, 그리고  $P_i$ 는 막장압을 의미한다.

한편, Table 1의 국가별 체적손실 산정 가이드라인에 따르면, 막장면의 지반이 토사와 암반으로 구성된 복합 지반(mixed) 조건인 경우 실제 발생하는 막장손실은 균질한 토사층에 대한 막장손실 값보다 크게 평가하는 것이 일반적이다. 따라서, 복합지반 조건에 대한 막장손실 값은 식 (5)와 같이 균질한 토사층에 대한 막장손실 값의 1.5배로 고려될 수 있다.

$$V_f(\%) = \frac{U_f}{R} \times 100 = 1.5 \times \frac{k_s}{2R} \frac{\Omega R P_0}{E_u} \times 100 \quad (5)$$

### 2.1.2 실드손실 $V_{sh}$

실드손실은 막장면에서 과굴착과 실드의 형상(conicity)

으로 인해 발생하는 지반과 실드 사이의 간극(gap)에 기인한다. 토사 지반에서 굴진하는 토압식 TBM의 경우, 간극 크기만큼 내공방향 지반 변위가 발생할 수 있으며, 이를 이론적인 최대 실드손실로 산정할 수 있다. 한편, 이수식 TBM의 경우에는 막장 슬러리가 실드 주면부로 유입되어 실드 주면 지반에 슬러리 압력을 가하게 되며 (Bezuijen와 Bakker, 2007), 이로 인해 실제 발생하는 실드손실은 간극 크기에 의해 결정되는 최댓값보다 작을 수 있다(Fig. 3). 따라서, 실드손실 산정 시 막장면에서 과굴착과 실드의 형상으로 인해 발생하는 지반-실드 간 간극과 실드 주면부 슬러리 압력을 고려한 내공방향 변위를 반영한 최대/최소 실드손실을 산정할 수 있으며, Loganathan(2011)은 실드의 conicity를 고려하여 최대/최소변형의 50%값을 체적손실에 반영하는 방안을 식 (6)과 같이 제안하였다.

$$V_{sh}(\%) = \begin{cases} \left( \frac{t_b + t_t}{2R} \right) \times 100, & \text{if } U_s > t_b + t_t \\ \frac{U_s}{2R} \times 100, & \text{if } U_s \leq t_b + t_t \end{cases} \quad (6)$$

여기서,  $t_b$ 는 과굴착 두께,  $t_t$ 는 실드 taper 두께(실드 시작부와 후방부의 외경 차이),  $U_s$ 는 실드 내공방향 변위로 식 (7)과 같고, 토압식 TBM의 경우  $P_i=0$ 으로 반영한다.

$$U_s = (R + t_b)(1 + \nu) \frac{(\gamma H + P_w - P_i)}{E_u} \quad (7)$$

### 2.1.3 후방손실 $V_g$

실드 후방부에서의 체적손실은 지반의 압밀거동을 고려하지 않을 경우, 크게 뒤채움재 주입 조건(압력/체적)과 뒤채움 그라우팅재료의 양생 중 수축(Shrinkage) 거동에 의해 결정된다. 동시 주입을 수행할 경우 후방간극(tail void)이 그라우팅 재료로 충전된다고 고려되므로 주입 조건에 따른 손실은 미미하게 되며, 대부분의

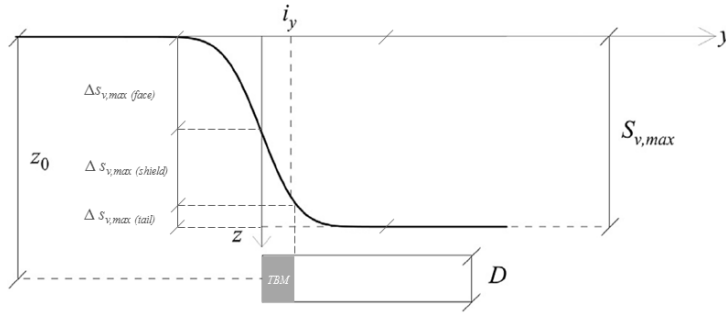


Fig. 4. Longitudinal distribution of ground settlement during shield TBM tunnelling

손실은 그라우팅 재료의 수축에 기인하게 된다(Loganathan, 2011). 이와 관련하여 Ingles(1972)와 Laerblad 등(2010)은 뒤채움 그라우트 체적 수축량은 통상적으로 3~7%, 최대 10%임을 실험적으로 확인하였다. 따라서 후방손실(tail loss)은 식 (8)과 같이 뒤채움 압력을 고려한 내공방향 변위와 그라우트 체적 수축량 10%에 해당하는 내공방향 변위 중 최소값으로 산정할 수 있다.

$$V_g(\%) = \begin{cases} \frac{0.1 \times t_v}{R} \times 100, & \text{if } U_g > 0.1 \times t_v \\ \frac{U_g}{R} \times 100, & \text{if } U_g < 0.1 \times t_v \end{cases} \quad (8)$$

여기서,  $t_v$ 는 후방 간극(tail void) 두께,  $U_g$ 는 뒤채움 부에서 내공방향 변위로 식 9와 같이 산정될 수 있으며,  $P_g$ 는 뒤채움 압력이다.

$$U_g = R(1 + \nu) \frac{(\gamma H + P_w - P_g)}{E_u} \quad (9)$$

## 2.2 지반침하계측 결과로부터 총 손실 산정

일반적으로 실드 TBM 굴진 중 유발되는 횡방향 지표 침하 분포는 터널 중심축을 중심으로 가우스분포(Gaussian distribution)를 나타내며(Peck, 1969; Schmidt 1969), 이때 지표 침하와 총 체적손실 간의 관계는 식 10과 같이 표현될 수 있다. 따라서, 지표침하 계측 결과에 대한 가우스곡선 회귀분석(Gaussian curve fitting)을 통해 위의 식 10의 총 체적손실( $V_L$ )과 trough factor (터널 중심축으로부터 지표침하곡선 변곡점까지의 거리)  $i_x$ 를 결정할 수 있다.

$$S_v(x) = \frac{V_L(\%) \times \pi R^2}{100 \times \sqrt{2\pi} i_x} \times e^{\left(\frac{-x^2}{2i_x^2}\right)} \quad (10)$$

한편, 막장면을 기준으로 한 종방향 침하분포는 Fig. 4와 같이 누적 가우스 분포(cumulative Gaussian distribution) 형태를 나타내게 되며, 막장굴착 → 실드통과 → 후방채움으로 이어지는 굴진 단계별 침하 발생 경향이 다르게 나타난다. 따라서, 터널 천단부에서 단계별 최대 침하량에 대해 식 (10)를 적용할 경우 인자별 체적 손실을 식 (11)과 같이 결정할 수 있다.

$$V_{at\ stage}(\%) = \frac{100 \times \sqrt{2\pi} i_x}{\pi R^2} \Delta S_{v,max} \quad (11)$$

여기서,  $\Delta S_{v,max}$ 는 굴진 단계별로 발생한 최대 침하량을 의미한다.

## 3. 사례 적용

### 3.1 토압식 TBM 사례 적용

#### 3.1.1 지반조건 및 장비 제원

체적손실 모델 적용성 검증을 위하여, 이탈리아 신 밀라노 지하철 5호선 토압식 TBM 시공 계측분석에 대한 Fagnoli 등(2013)의 연구를 대상 사례로 고려하였다. 해당 토압식 TBM은 Fig. 5에 도시된 바와 같이 터널 중심선 기준 지표하 15m 깊이의 자갈-실트질 모래 지반( $E=150\sim300\text{MPa}$ ,  $\phi'=30^\circ$ )에서 굴진을 수행하였고 터널 중심선은 지하수위 상부에 위치하였다. 토압식 TBM 장비의 제원은 Table 3과 같다.

#### 3.1.2 운전 정보 및 지표 침하 계측 결과

운전 중 막장압, 뒤채움압 및 추력 등의 기계데이터의 평균치는 Table 4와 같다. Fig. 6은 터널 노선과 계측 그리드를, Fig. 7은 침하 계측 결과를 나타내며, Table 5는 10개 계측 지점별 운전 정보(막장압, 뒤채움압)와 침하관련 변수(최대 침하값, trough factor  $i_x$ , 그리고 Gaussian

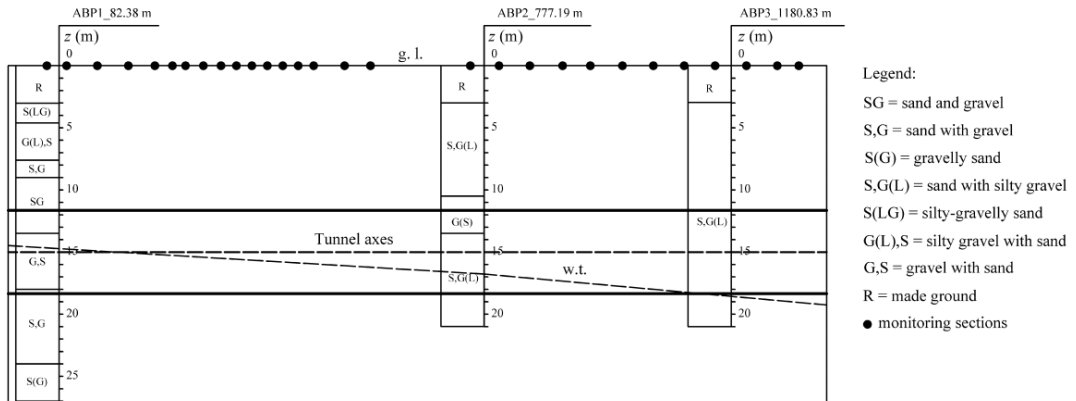


Fig. 5. Alignment and ground condition for TBM tunnelling (Fargnoli et al., 2013)

Table 3. Specifications of EPB TBM for new Milan underground line 5 (Fargnoli et al., 2013)

Item	Value
shield length (mm)	10,000
outer excavation diameter (mm)	6,710
shield outer diameter at face (mm)	6,690
shield outer diameter at tail (mm)	6,670
Taper amount of shield (mm)	10
outer diameter of segment lining (mm)	6,400
tail void gap (mm)	135

Table 4. Average values of monitored TBM driving parameters (Fargnoli et al, 2013)

Driving parameters	Average values
face pressure (kPa)	162
grouting Pressure (kPa)	169
machine stoppage time (hr)	0.7
installation time for one-ring tunnel lining (hr)	0.8
Machine thrust	16,265

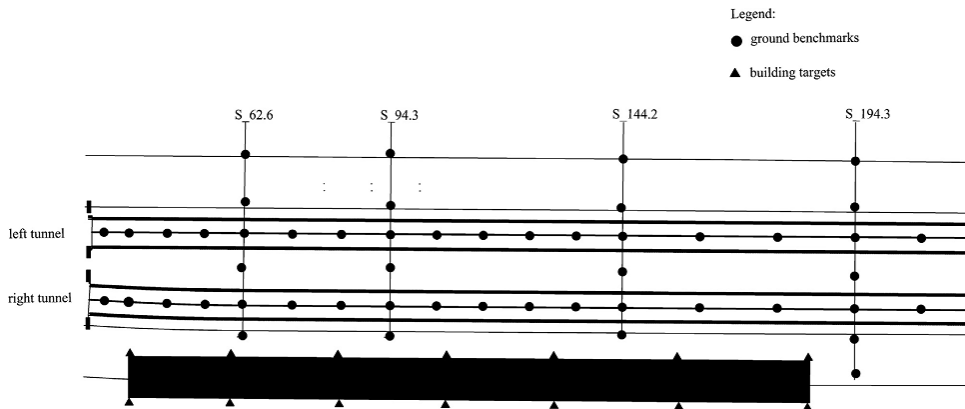
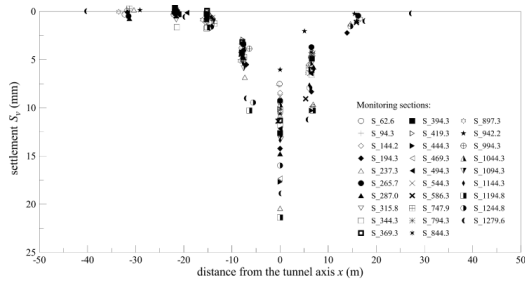
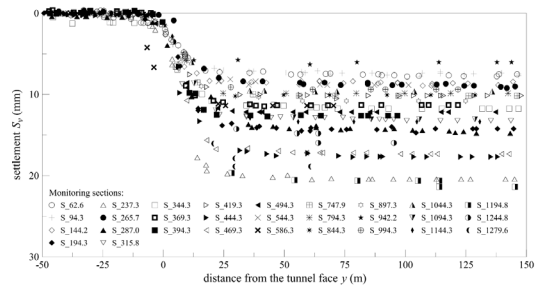


Fig. 6. Settlement monitoring grid (Fargnoli et al., 2013)



(a) Settlement measurements (transverse)



(b) Settlement measurements (longitudinal)

Fig. 7. Settlement measurement results (Fargnoli et al., 2013)

Table 5. Settlement monitoring results and related parameter values (Fargnoli et al., 2013)

Sections	face pressure $p_f$ (kPa)	backfill pressure $p_g$ (kPa)	max settlement $S_{v,max}$ (mm)	$V_L$ (%)	$i_x$ (m)
1	220	200	7.5	0.33	6.0
2	230	200	7.7	0.33	6.0
3	220	180	8.4	0.37	6.0
4	220	200	14.8	0.56	5.25
5	220	180	12.6	0.47	5.25
6	125	170	10.2	0.44	6.00
7	120	200	10.1	0.39	5.25
8	130	150	10.6	0.41	5.25
9	150	200	13.1	0.50	5.25
10	125	140	13.4	0.54	5.55
Average				0.434	5.58

곡선회귀분석을 통해 얻은 체적손실)를 요약한 것이다. 평균 총 체적손실  $V_L$ 은 0.43%로 통상적으로 토사지반에서 고려되는 체적손실 값에 해당하며, trough factor  $i_x = 5.58m$ 는 터널 심도의 0.3배 수준으로 사질토에 대해 Mair와 Taylor(1997)가 제안한 범위의 하한값에 해당하는 것으로 판단된다.

### 3.1.3 모델 적용 및 비교

본 고에서 제안된 체적손실 산정방안을 통해 예측된 체적손실을 Fargnoli 등(2013)의 계측 역산값과 비교한 결과는 Table 6과 같다. 비교 결과, 전반적으로 총 체적손실 값이 일치하는 경향을 나타내었으나, 손실 인자별로는 다소 차이가 있음을 확인할 수 있다. 막장손실 산정 결과와 관련하여, 굴진 데이터상 막장압은 정지토압 이상으로 예측에 따르면 막장손실이 0이하 값으로 예측되어야 하나 실제 계측 결과는 0.1%정도 크게 발생하였다. 토압식 TBM의 경우 챔버 내 토압이 막장면에 가

해지는 압력보다 차이가 있을 수 있으며, 따라서, 막장손실이 더 크게 계측된 것은 실제 가해진 막장압이 챔버 내 토압에 비해 낮았기 때문으로 이해될 수 있다. 쉘드손실의 경우, 실제 발생치가 이론 예측치보다 다소 작으나 유사한 범위로 확인되었다. 토압식 TBM의 경우 이수식 TBM과는 달리 쉘드 주변부에 막장 유체 압력이 전달되지 않으나, 굴진 중 첨가제(conditioning foam) 및 굴착 토사 일부가 지반과 쉘드 사이 간극에 유입될 경우 쉘드 주변부 간극을 일부 지지하여 예상되는 쉘드손실보다 작은 값을 유발한 것으로 이해될 수 있다. 마지막으로 후방손실의 경우, 실제 발생치가 예측치보다 다소 과다한 것으로 나타났다. 일반적으로, 뒤채움 그라우팅 시 목표 압력에 도달할 때 까지 주입압력을 서서히 증가시키게 된다. 본 대상 사례의 굴진 지반이 사질토층임을 고려하면, 최종 주입압 도달 이전 주입압이 목표 주입 압력보다 낮은 시점에 내공방향 지반 변형이 과다하게 발생하여 체적손실 예측모델보다 큰

**Table 6.** Comparison of volume loss predictions and measurements for new Milano Metro Line 5

Section	Monitoring results								Predictions			
	Settlement (mm)				Volume loss (%)				Volume loss (%)			
	$S_{v,max}$	$S_{v,f}$	$S_{v,sh}$	$S_{v,t}$	$V_L$	$V_f$	$V_{sh}$	$V_g$	$V_L$	$V_f$	$V_{sh}$	$V_g$
1	7.5	1.9	3.4	2.2	0.33	0.08	0.14	0.09	0.33	-0.02	0.30	0.05
2	7.7	N/A	N/A	N/A	0.33	N/A	N/A	N/A	0.32	-0.02	0.30	0.04
3	8.4	2.3	3.9	2.2	0.37	0.10	0.17	0.09	0.34	-0.02	0.30	0.06
4	14.8	4.0	6.3	4.5	0.56	0.15	0.23	0.17	0.33	-0.02	0.30	0.05
5	12.6	1.1	8.0	3.5	0.47	0.04	0.30	0.13	0.34	-0.02	0.30	0.06
6	10.2	1.4	5.7	3.1	0.44	0.06	0.24	0.13	0.37	0.00	0.30	0.07
7	10.1	N/A	N/A	N/A	0.39	N/A	N/A	N/A	0.35	0.00	0.30	0.05
8	10.6	1.5	6.7	2.4	0.41	0.06	0.25	0.09	0.38	0.00	0.30	0.08
9	13.1	N/A	N/A	N/A	0.44	N/A	N/A	N/A	0.35	0.00	0.30	0.05
10	13.4	N/A	N/A	N/A	0.39	N/A	N/A	N/A	0.38	0.00	0.30	0.08

후방 손실이 발생하였을 것으로 추정될 수 있다. 이를 종합해보면, 토사층을 통과하는 토압식 TBM의 경우 챔버 내 토압은 예상 막장압보다 다소 크게 운영하는 것이 막장손실을 줄이는 데 도움이 될 것으로 사료되며, 뒤채움 시 목표 주입압력 도달 지연시간을 최소화함으로써 후방손실을 최적화할 수 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 이수식 TBM 사례 적용

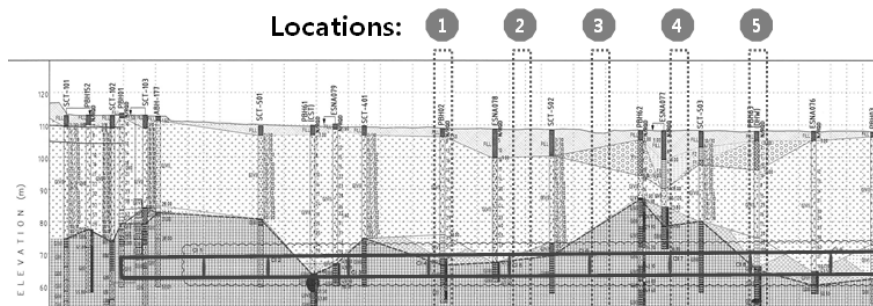
#### 3.2.1 지반 조건 및 실드 TBM 제한

대상 이수식 실드 TBM 터널은 차별 풍화가 진행된 화강암 지반의 지표 하 40~60 m 깊이를 통과하는 직경 5.8 m(라이닝 내경 기준)의 터널로서(Park et al., 2013), Fig. 8 및 Table 7은 각각 종단 지질도 및 토사/암반별 물성을 정리한 것이다. 굴진에 적용된 이수식 실드 TBM 장비 제한은 Table 8과 같다.

#### 3.2.2 지표 침하 예측 및 예측 모델 비교 결과

Fig. 8에 표기된 5개소에서 측정된 터널 천단 최대 지표침하는 Table 9와 같다. 막장 조건이 균질한 경우에 대하여 막장 지반이 토사층(GV, GVI)일 경우 암반층인 경우에 비해 침하가 더 크게 유발되었으며, 막장조건이 복합지반 조건인 경우 더 큰 침하가 발생하였음을 알 수 있다. 지표침하 결과로부터 체적손실을 역산정한 결과 암반(GI~GIV)구간에서는 0.2~0.3%, 토사(GV, GVI)구간에서는 0.5~1.6% 수준으로 산정되었다. 복합지반 구간에서 1%이상, 최대 1.6%의 체적손실이 발생한 것으로 추정되었으며, 이는 싱가포르, 홍콩 가이드라인에서 제시된 복합지반 구간 체적손실 값 1.5%와 유사한 것으로 판단된다.

계측 지점별 실제 운전 조건(막장압 및 뒤채움압)을 이용하여 예측된 체적손실 값을 계측 결과와 비교한 결과는 전반적으로 예측값이 실제 결과와 유사한 것으로

**Fig. 8.** Geological profile for slurry TBM tunnelling



**Table 7.** Geotechnical properties of soil and rocks for slurry TBM tunnelling

Ground Type		unit weight $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	cohesion $c'$ (kPa)	friction angle $\phi'$ ( $^{\circ}$ )	Young's modulus (MPa)	coefficient of earth pressure at rest $K_0$
Fill		18	0	30	1.5N+	0.5
Alluvium		18	0	30	1.5N+	0.7
GVI	weathered granite soil	18.5	3	30	1.5N+	0.8
GV		19	30	30	1.5N+	0.8
GIV	weathered granite rock	23	50	35	300	0.8
GIII		24	400	38	4000	0.8
GII		25	600	45	6000	0.8
GI		25	1000	50	15000	0.8

N = blow count of standard penetration test

**Table 8.** Specifications of Slurry shield TBM

Item	Value
shield length (mm)	12,000
outer excavation diameter (mm)	7,000
shield outer diameter at tail (mm)	6,900
Taper amount of shield (mm)	50
outer diameter of segment lining (mm)	6,600
tail void gap (mm)	150

**Table 9.** Comparison of settlement / volume loss predictions and measurements for slurry TBM case

Location	Face condition		Actual Operation		Prediction					Measurement	
			Pf (kPa)	Pg (kPa)	$S_{v,max}$ (mm)	$V_L$ (%)	$V_f$ (%)	$V_{sh}$ (%)	$V_g$ (%)	$S_{v,max}$ (mm)	$V_L$ (%)
1	Almost Uniform	GIV-GIII	432	505	2.4	0.26	0.007	0.095	0.155	1.6	0.22
2	Mixed	GVI-GIII	422	400	7.3	0.70	0.013	0.176	0.281	7.4	1.03
3	Uniform	GVI	435	295	5.2	0.55	0.012	0.171	0.364	3.7	0.50
4	Uniform	GIII	428	268	0.3	0.04	0.001	0.011	0.026	2.2	0.30
5	Mixed	GV-GIII	405	280	8.3	0.93	0.013	0.177	0.430	11.8	1.59

나타났으나, 복합 지반 조건(지점 2와 지점 5)의 경우와 연암(GIII층)이 균질하게 분포하는 경우(지점 3)에서는 과소한 체적손실이 예측되었다. 이러한 차이는 터널단면 내 토사층과 암반층의 물성 차이와 암반의 특성 때문으로 설명될 수 있으며, 지점 1의 경우 Fig. 6에서 살펴볼 수 있듯이 복합지반 막장조건이나 GIV와 GIII층으로 물성차이가 크지 않아 과굴착 및 체적손실이 거의 유발되지 않았을 것으로 판단된다. 반면 지점 2 및 지점 5에서는 풍화토층인 GV와 GVI층이 터널단면에 분포하여 기반암인 GIII층과 물성차이가 크므로 막장면에서의 과굴착 및 추가 체적손실이 과다하게 발생한 것으로

사료된다. 반면, 지점 3의 터널 심도에서 GIII층은 파쇄 정도가 다른 계층 지점의 기반암에 비해 불량하며, 이로 인해 예측보다 큰 체적손실 및 지표침하가 발생한 것으로 이해될 수 있다.

또한, 직접적인 비교는 어려우나 굴진 단계별 손실 발생경향을 살펴보면 뒤채움부에서 가장 큰 체적손실이 발생하고 그 다음으로 쉴드 손실, 그리고 막장 손실은 0.02% 미만으로 매우 작은 범위로 유발되었음을 알 수 있다. 특히 토사층 또는 복합지반 조건의 막장을 통과하는 지점 3 및 지점 5에서의 뒤채움압력은 막장압의 2/3 수준으로 작용함으로 인해 0.3~0.4%의 큰 후방손

실이 발생하였음을 알 수 있다. 실드 손실의 경우 주변 지반의 변형 특성 및 막장압 크기에 따라 결정됨을 고려하면, 변형계수가 작은 토사층이 분포하는 지점 2, 3, 및 5에서 큰 실드 손실이 유발된 것으로 이해될 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 실드 TBM 굴진 중 손실 산정과 관련한 기존 사례 및 정량적인 산정 방안에 대한 문헌 분석을 통해 장비 형상과 운전 중 기계데이터를 활용한 산정 방안을 도출하고, 이를 활용하여 기존 문헌에 보고된 토압식 및 이수식 TBM 굴진 중 체적손실에 대한 분석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 실드 TBM 굴진 중 체적손실과 관련한 미국, 영국, 싱가포르, 그리고 홍콩의 가이드라인을 조사하였다. 막장면 지반이 균질할 경우, 지반이 연약할수록 큰 체적손실 값이 제안되며, 막장면 지반이 토사와 암반과 같이 복합 지반으로 구성되는 경우에는 토사 지반 손실값에 비해 1.5배 이상 증가함을 확인하였다.
2. 기존 문헌에서 제시된 Gap모델 관련 연구 및 실드 주변부 지반 거동에 대한 문헌 분석을 통하여 장비 종류(토압식/이수식), 장비 형상(면판 직경, 실드 concity, 후방 간극) 및 운전 정보(막장압, 뒤채움압)를 고려한 합리적인 체적손실 산정 모델을 도출하였다.
3. 사질토 지반에 대한 토압식 실드 TBM 굴진 사례에 대하여 체적손실 산정 모델을 적용한 결과, 예측된 총 체적손실량과 최대 침하량은 일치하는 경향을 나타내었으나, 손실 인자별(막장손실, 실드손실, 후방손실)로는 차이가 있음을 확인할 수 있다. 해당 차이는 토압식 실드 TBM의 막장압력과 chamber 토압의 불일치로 인한 막장손실 발생, 실드 주변부로의 conditioning foam 또는 굴착토 유입으로 인한 실드손실 저감, 그리고 주입 압력의 점진적인 증가에 기인한 초기 변형 및 후방손실 증가 등으로 추정되었다. 따라서 토사지반을 굴진하는 토압식 실드 TBM의 경우 chamber 토압을 목표 막장압 대비 상향 관리 및 목표 뒤채움 주입 압력 도달 시간을 최소화함을 통해 체적손실을 저감하는 것이 가능할 것으로 사료된다.
4. 차별풍화된 화강풍화암 지반을 굴진하는 이수식 실드 TBM 대한 사례 연구를 수행하였으며, 전반적으로 예측값이 실제 결과와 유사한 것으로 나타났다. 복합 지반 조건 및 파쇄정도가 큰 지반에서는 예측

모델이 체적손실을 과소평가하였으며, 이러한 차이는 복합 지반 내 토사층과 하부 암반 간 큰 물성차이로 인한 과굴착 및 균질한 암반의 파쇄로 인한 추가 굴착에 의한 체적손실 증가로 파악될 수 있었다. 따라서 토사층과 암반층의 강도차이가 큰 복합지반의 경우에는 과굴착에 의한 막장손실에 대한 할증을 1.5 배 이상으로 증가시키는 것이 요구되며, 암반의 파쇄정도가 큰 지반에서는 보수적인 체적손실 산정이 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### References

- Benzuien, A. and Bakker, K.J. (2007), "Bentonite and grout flow around a TBM", *Proceedings of WTC 2007, Prague*.
- Fargnoli, V., Boldini, D. and Amorosi, A., 2013, TBM tunnelling-induced settlements in coarse-grained soils: The case of the new Milan underground line 5, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 38, 336-347.
- FHWA, 2009, Road Tunnel Manual (FHWA-NHI-09-010)
- Ingles O.G., 1972, Soil Stabilization, Butterworths, Sydney, Australia
- Jones, B.D., 2010, Low-volume-loss tunnelling for London ring main extension, *Geotechnical Engineering*, Vol. 163, 167-185.
- Lagerblad, B., Fjallberg, L. and Vogt, C., 2010, Shrinkage and durability of shotcrete, *Proceedings of shotcrete elements of a system*, ED: Bernard, E.S., 2010, Taylor & Francis Group, London, U.K., 173-180.
- Land Transport Authority, 2013, Particular Specification, Thomson Line Contract T212.
- Lee, K. M., 1989, Prediction of ground deformation resulting from shield tunnelling in soft clays, PhD thesis, The University of Western Ontario, Canada.
- Lee, K.M., Rowe, R.K. and Lo, K.Y., 1992, Subsidence owing to tunneling. I. estimating the gap parameter, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, 929-940.
- Loganathan N., 2011, An innovative method for assessing tunnelling-induced risks to adjacent structures, Parsons Brinckerhoff Inc. New York, United States.
- Mair, R.J. and Taylor, R.N., 1997, Bored tunneling in ther urban environment, In proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany.
- MTR Corportion Ltd, 2011, Consultancy Agreement No. C1105 - Shatin to Central Line.

- Park, H., Chang, S., Lee, S., Kim, d. and Jeon, K. C., 2013, Case study of ground settlement prediction for SPB-TBM advance in Bukit Timah Granite Rock, KTA 2013 Fall Symposium, Seoul, Korea, 71-74.
- Peck, R.B., 1969, Deep excavations and tunneling in soft ground, State-of-art report, in Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, volume State-of-the-Art Volume, Mexico City, Mexico, 225-290.
- Rowe, R.K. and Lee, K.M., 1992, An evaluation of simplified techniques for estimating three-dimensional undrained ground movements due to tunnelling in soft soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, 39-52.
- Schmidt, B., 1969, Settlements and ground movements associated with tunneling in soil, PhD thesis, University of Illinois, Urbana, United States.
- Wongsaroj, J., Borghi, E. X., Soga, K., Mair, R. J., Sugiyama, T., Hagiwara, T., & Bowers, K. H., 2013, Effect of TBM driving parameters on ground surface movements: Channel Tunnel Rail Link Contract 220., In Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the 5th International Symposium TC28. Amsterdam, the Netherlands, 15-17 June 2005 (p. 335). CRC Press.

---

### 박현구



2003년 한국과학기술원 건설환경공학과  
공학사  
2011년 한국과학기술원 건설환경공학과  
공학박사

Tel: 02-2145-7927  
E-mail: bowstringnine@gmail.com  
현재 삼성물산 건설부문 기반기술팀 과장

---

### 장석부



1990년 한양대학교 공과대학 자원공학과  
공학사  
1992년 한양대학교 공과대학 자원공학과  
공학석사  
1997년 한양대학교 공과대학 자원공학과  
공학박사

Tel: 02-2145-7865  
E-mail: seok.chang@samsung.com  
현재 삼성물산 건설부문 기반기술팀 부장

---

### 이승복



1986년 인하대학교 공과대학 토목공학과  
공학사  
1988년 인하대학교 공과대학 토목공학과  
공학석사

Tel: 02-2145-6007  
E-mail: seungboklee@samsung.com  
현재 삼성물산 건설부문 기반기술팀 팀장

---