

해수가 슬러리 쉴드 TBM 공법 적용성에 미치는 영향

유영무¹ · 김해만² · 김도형² · 이인모^{3*}

¹비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수로

²정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수로

³정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 정교수

Effect of seawater on the applicability of a slurry shield TBM

Young-Moo Ryu¹ · Hae-Mahn Kim² · Do-Hyung Kim² · In-Mo Lee^{3*}

¹Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

*Corresponding Author : In-Mo Lee, inmolee@korea.ac.kr

Abstract

Formation of filter cake with little slurry penetration into the tunnel face ground is an essential factor to successfully apply the slurry shield tunnel boring machine (TBM) for tunnelling work. However, when the bentonite slurry is in contact with seawater, it is not easy to guarantee the filter cake formation due to decrease of the swelling volume and viscosity of the slurry. In this study, in order to evaluate the effect of the seawater on the applicability of the slurry shield TBM method, the slurry injection tests were carried out with the variation of seawater percentage contained in the slurry samples as well as the variation of soil types. And then, the effect of these two factors on the slurry clogging phenomena was theoretically and experimentally figure out. As a result, it was found that the value of the slurry clogging criteria (SCC) indicating the applicability of the slurry shield TBM significantly decreases up to 67% as the percentage of seawater increases from 0% up to 20%. In addition, it was found to be necessary to take into account both the characteristics of slurry and soil types together when judging the applicability of the slurry shield TBM method by assessing the slurry penetration characteristics that will occur during tunnelling work.

Keywords: Slurry, Bentonite, Seawater, Clogging effect

초 록

슬러리 쉴드 TBM (Slurry shield TBM) 공법에서 벤토나이트 슬러리의 침투와 필터 케이크의 형성 여부는 공법의 적용성에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 그러나 벤토나이트

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(2)243-256(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.2.243>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received January 3, 2019

Revised January 31, 2019

Accepted February 12, 2019



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 © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

슬러리는 해수와 접촉하였을 때 팽윤성과 점도가 저하되어 공법에 대한 적용성을 확보하기 어렵다. 본 연구에서는 해수의 영향에 따른 슬러리 쉴드 TBM 공법의 적용성 변화를 평가하기 위해 슬러리의 해수 비율을 다르게 하여 주입 실험을 수행하였고 해수가 슬러리의 폐색 현상에 미치는 영향을 확인하였다. 그 결과, 해수의 비율이 0%에서 20%까지 증가할 수록 폐색 효과에 의한 슬러리 쉴드 TBM 공법의 적용성을 나타내는 slurry clogging criteria (SCC)가 최대 67%까지도 감소하는 것을 확인하였다. 또한 슬러리의 물리적 성질이 동일함에도 지반 조건에 따라 SCC값이 공법 적용에 문제가 없는 수준에서 공법 적용을 위해 슬러리에 추가적인 처리를 요하는 수준으로 변화하는 것을 통해 슬러리 쉴드 TBM의 적용성을 평가할 때 슬러리의 특성뿐만 아니라 지반 조건에 대한 고려도 필요함을 입증하였다.

주요어: 슬러리, 벤토나이트, 해수, 폐색현상

1. 서론

글로벌 시대를 맞이하며 대륙 간 또는 국가 간을 연결하여 접근성을 확보하는 것에 대한 필요성이 높아지면서 슬러리 쉴드 TBM (Slurry shield TBM) 공법을 사용한 해저터널 프로젝트가 많아지고 있다. 슬러리 쉴드 TBM 공법은 막장 전방으로 챔버 내의 슬러리를 가압하여 주입함으로써 막장의 안정성을 도모하며 굴착해 나가는 공법이다.

슬러리 쉴드 TBM 공법에서 막장의 안정성은 슬러리가 지반을 통과하며 간극에 흡착되면서 간극률을 감소시켜 폐색을 유발하고 나아가 막장면에 필터 케이크를 형성하는 것에 달려있기 때문에 슬러리의 침투깊이에 따른 막장의 안정성의 변화, 필터케이크를 더 잘 형성하기 위한 조건, 형성된 필터케이크의 내구성, 슬러리의 성능을 개선할 수 있는 첨가제 등에 관한 연구가 진행되었다(Anagnostou and Kovari, 1994; Min et al., 2014; Fritz, 2007). 그러나 공법의 안정성에 중대한 역할을 하는 슬러리는 해수와 접촉하였을 때 염분의 영향을 받아 팽윤성과 점도가 저하되어 성능이 떨어지는 문제가 있다. 이와 관련하여 실제 TBM 프로젝트에서 사용되었던 슬러리 품질관리 기준(Table 1)을 바탕으로 해수의 영향이 있는 현장에 적용할 수 있는 슬러리 관리 방안을 제안하는 연구가 진행되었다(Kim et al., 2017). 그러나 이 연구는 슬러리 자체의 상태 변화만을 고려한 슬러리 관리 기준을 나타내고 있어 실제 현장 지반의 입도 분포 등 다른 조건을 고려하지 못하는 한계가 있다.

Table 1. Slurry evaluation items and criteria (Kim et al., 2017)

Items	Density (ton/m ³)	Marsh funnel viscosity (sec/lit)	Water loss (mm)	Filter cake (mm)	Yield point (lbs/100 ft ²)	PH	Gel strength (lbs/100 ft ²)	
							10 sec	10 min
Criteria	≤ 1.15	>35	<25	2~4	2.5~17.5	7.5~9.5	2.5~15	2.5~22.5
Factor	Muck transportation		Maintaining pressure at the face		Muck transportation	Corrosion prevention	Muck transportation	

따라서 본 연구에서는 실내 주입 실험을 통해 슬러리에 의한 폐색 효과에 해수가 미치는 영향을 확인하고 Ryu et al. (2019)에서 제안된 지반의 입도분포, 슬러리의 물리적 성질, 주입 압력을 모두 고려할 수 있는 평가기준인 slurry clogging criteria (SCC)를 활용하여 슬러리 쉴드 TBM 공법의 적용성 변화를 정량적으로 확인하고자 한다.

2. 이론

2.1 슬러리 폐색 이론과 기준

벤토나이트 슬러리 입자의 침투로 인한 폐색 현상을 모사하기 위해 Fig. 1과 같이 지반 상태를 가정한다. 슬러리를 가압하면 벤토나이트 슬러리 입자는 지반으로 침투하게 되고 지반 내 간극에 퇴적될 것이다. 이러한 현상을 나타낸 지배 방정식은 식 (1)과 같다(Gruesbeck and Collins, 1982).

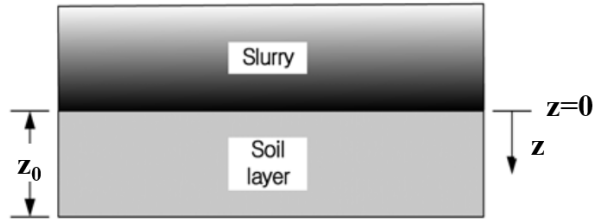


Fig. 1. Schematic view of slurry and face soil layers (Ryu et al., 2019)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

여기서, C 는 단위 간극 부피당 slurry의 농도, σ 는 단위 간극 부피당 퇴적량, V 는 간극유속 그리고 z , t 는 각각 시간과 공간의 좌표이다. 일반적으로 시간에 따른 퇴적량은 흐름 유체의 입자 농도에 비례하고 이는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda C \quad (2)$$

여기서, λ 는 deposition coefficient라고 정의하며, λ 값이 클수록 흡착이 잘 발생함을 의미한다. 식 (1)에 식 (2)를 대입하여 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial z} + \lambda C = 0 \quad (3)$$

특성 함수를 사용하여 식 (3)의 해를 구할 수 있다(Reddi and Bonala, 1997).

$$C(z, t) = C_0 e^{-\frac{\lambda z}{V}} U\left(t - \frac{z}{V}\right) \tag{4}$$

여기서, $U(\bullet)$ 는 Heaviside step function이며, C_0 는 슬러리의 초기 농도이다.

식 (4)를 식 (2)에 대입하여 편미분 방정식을 풀면, 단위 간극 부피당 퇴적된 슬러리 입자의 양을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma(z, t) = \lambda C_0 e^{-\frac{\lambda z}{V}} \left(t - \frac{z}{V}\right) \tag{5}$$

Reddi and Bonala (1997)는 입자의 확률론적 흡착 관점에서 λ 에 대한 closed-form solution을 제안했다(Fig. 2). 지반의 간극 반경, r 의 분포가 대수 정규 분포라고 가정하면, λ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

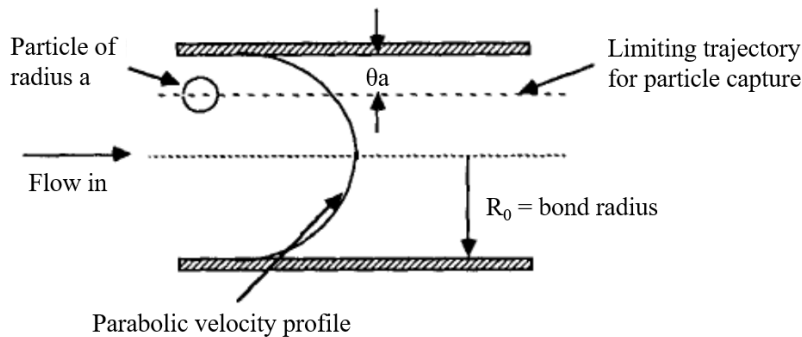


Fig. 2. Flow of small particles through a tube (Reddi and Bonala, 1997)

$$\lambda = \frac{V}{\alpha^* e^{2(b^2+m)}} \left[4(a \cdot \theta)^2 - 4(a \cdot \theta)^3 e^{\frac{(b^2-2m)}{2}} + (a \cdot \theta)^4 e^{2(b^2-m)} \right] \tag{6}$$

여기서, V 는 간극 유속, α^* 는 간극 튜브의 유효 길이, a 는 슬러리 입자의 크기, m 과 b 는 각각 흙의 간극 반경의 대수 정규 분포에서의 평균과 표준편차 그리고 θ 는 입자의 퇴적에 관여하는 몇 가지 입자 사이의 힘을 포괄적으로 고려한 lumped parameter를 의미한다. 인자들 중 간극 튜브의 유효 길이, α^* 는 Arya and Dierolf (1989)의 연구 결과에 의해 그 값을 0.911 cm로 하였을 때 실험 값과 예측 값이 가장 근접하는 것으로 나타났다. 또한 간극 반경의 입도 분포는 흙 입자의 입도 분포로부터 쉽게 유추할 수 있다(Arya and Dierolf, 1989).

Deposition coefficient, λ 는 간극 유속, 유동입자의 크기, 간극을 흐르는 유체의 물리화학적 특성, 흙의 간극 반경의 분포에 관한 함수이다. Ryu et al. (2019)은 λ 가 지반의 종류뿐 아니라 간극 유속에 의해서도 변화하기 때문에 침투 특성을 평가하기 위해 간극유속으로 나누어 정규화하였고 이를 슬러리 폐색 기준(Slurry clogging criteria, SCC)이라고 정의하여 식 (7)과 같이 나타냈다. SCC 값이 클수록 폐색이 잘 발생하는 것을 의미한다.

$$SCC = \frac{1}{\alpha^* e^{2(b^2+m)}} \left[4(a \cdot \theta)^2 - 4(a \cdot \theta)^3 e^{\frac{(b^2-2m)}{2}} + (a \cdot \theta)^4 e^{2(b^2-m)} \right] \quad (7)$$

Ryu et al. (2019)은 SCC 값에 따라 침투유형을 3가지로 구분하였고 각각의 침투 유형별로 슬러리 실드 TBM 공법의 적용성을 서술하였는데 그 기준은 Table 2와 같다.

Table 2. Slurry clogging criteria

SCC (cm ⁻¹)	Penetration type	Description
Upper than 0.1	A	Suitable for slurry shield TBM operation
0.02 < SCC < 0.1	B	Not suitable for slurry shield TBM operation (additional treatment is required to apply)
Lower than 0.02	C	Not suitable for slurry shield TBM because of excessive slurry penetration

2.2 폐색 효과를 고려한 일차원 슬러리 침투 모델

본 논문의 실험과 연구는 모두 일차원 흐름을 기반으로 이루어졌으므로, Kim et al. (2009)의 폐색 효과를 고려한 그라우트 침투 모델 중 일차원 흐름에 대한 내용을 슬러리 실드 TBM에서의 슬러리 폐색 거동에 적용하여 일차원 슬러리 침투 해석에 대하여 단계적으로 설명하고자 한다.

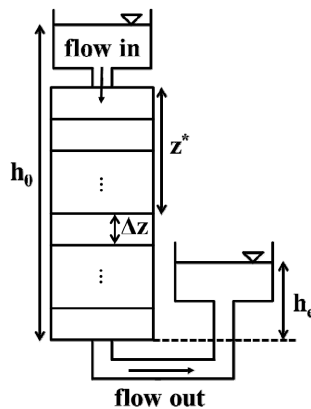


Fig. 3. One-dimensional flow of slurry (Ryu et al., 2019)

슬러리가 일차원 침투하는 경우는 Fig. 3과 같이 주입 영역을 미소 단위의 shell로 나누어 고려하고 각 shell에 주입이 완료되는데 소요되는 시간을 단위 주입시간으로 고려한다.

일차원 슬러리 침투 모델의 해석 과정을 단계적으로 설명하면 먼저 지반의 물성치(투수계수, 간극률, 간극 크기의 대수 정규 분포의 평균 및 표준편차), 슬러리의 물성치(초기농도, 벤토나이트 비중, 벤토나이트 입자의 유효 입경), 주입압 및 shell 두께를 설정하고 lumped parameter, θ 를 가정한다.

설정된 조건에서 실린더 형태의 주입 영역에 발생하는 일차원 흐름을 고려하였을 때 단위 shell을 채우는데 필요한 주입량 $Q_{i,j}$ 와 흐름 단면적 $A_{i,j}$ 는 각각 식 (8), 식 (9)와 같이 계산된다.

$$Q_{i,j} = (\pi R^2 \Delta z) \cdot n \tag{8}$$

$$A_{i,j} = \pi R^2 \tag{9}$$

여기서, i 는 위치, j 는 단위 시간을 의미하고, R 은 토조의 반경, n 은 지반의 간극률 그리고 Δz 는 단위 shell의 두께이다.

다음 단계에서는 흡착 현상에 의한 간극률의 변화를 반영하여 단위 shell의 주입시간을 계산하는데 이를 위해서 동수경사를 먼저 계산하여야 한다. 슬러리를 주입할 때의 동수경사는 흡착 현상에 의해 침투 깊이에 따라 변한다. 그러나 이 모든 변화를 이론적으로 반영하는 것에는 어려움이 있으므로 주입지점으로부터 임의의 한 지점 z^* 까지 선형적으로 동수경사가 감소한다고 가정하여 동수경사를 식 (10)과 같이 평균 동수경사의 형태로 표현할 수 있다.

$$\bar{i} = (h_0 - h^*) / z^* \tag{10}$$

여기서, \bar{i} 는 평균동수경사, h_0 는 주입면의 전수두, h^* 는 임의의 위치, z^* 에서의 전수두이다. 따라서 평균동수경사가 반영된 단위 shell의 주입시간은 식 (11)과 같다.

$$\Delta t_{i,j} = (Q_{i,j} \cdot n_{i,j}) / \left(\frac{(\gamma_{sl})_{i,j}}{\mu_{i,j}} \cdot K_{i,j} \cdot \bar{i} \cdot A_{i,j} \cdot n_{i,j} \right) \tag{11}$$

여기서, K 는 고유투수계수, μ 는 슬러리의 점도, γ_{sl} 는 슬러리의 단위중량, n 은 간극률이다. 동일한 j 값은 흐름이 동시에 발생하는 것을 의미하므로 $\Delta t_{1,j}$ 부터 $\Delta t_{i,j}$ 까지는 동일한 값을 가져야 한다. 그 중 단위 shell의 침투 소요시간이 가장 큰 경우가 지배적인 영향을 미치므로 j 번째 시간 step에서의 주입시간은 식 (12)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta t_j = \max(\Delta t_{1,j}, \Delta t_{2,j}, \dots, \Delta t_{i,j}) \quad (12)$$

각 시간 step에서의 주입시간이 계산되면 식 (13)과 같이 임의의 시간과 위치에서의 간극유속을 계산할 수 있다.

$$V_{i,j} = (Q_{j,j} \cdot n_{j,j}) / (\Delta t_j \cdot A_{i,j} \cdot n_{i,j}) \quad (13)$$

다음으로 deposition coefficient, λ 를 식 (6)과 같이 계산하고 식 (14)를 이용하여 일차원 슬러리 침투 발생 시 임의의 시간과 위치의 shell에서의 평균간극부피당 흡착량을 결정할 수 있다. 식 (14)는 식 (5)와 같은 수식으로 한 shell에서의 흡착량을 뜻한다.

$$\overline{\sigma}_{i,j} = \sum_{n=i}^{n=j} \lambda_{i,j} C_0 \exp\left[-\frac{\lambda_{i,j}}{V_{i,j}}\left(z_i + \frac{\Delta z}{2}\right)\right] \left(\Delta t_n - \frac{\Delta z}{2}\right) \quad (14)$$

여기서, C_0 는 슬러리의 초기 농도, V 는 z 방향 간극유속을 의미한다. 식 (14)는 임의의 shell에서의 흡착량은 침투 거리에 따라서 감소하지만, shell 두께가 충분히 작을 경우 그 값은 평균 단위간극부피당 흡착량과 동일하다는 가정을 포함한다.

마지막으로 식 (14)와 같이 임의의 시간, 위치에서의 슬러리 입자의 흡착량이 계산되면 식 (15)와 식 (16)을 이용하여 감소된 간극률과 투수계수를 계산한다.

$$n_{i,j+1} = n_0 - (\overline{\sigma}_{i,j}) / (G_{sl} \cdot \gamma_w) \quad (15)$$

$$K_{i,j+1} = K_{i,j} \cdot \frac{(1 - n_{i,j})^2}{(n_{i,j})^3} \cdot \frac{(n_{i,j+1})^3}{(1 - n_{i,j+1})^2} \quad (16)$$

위의 계산과정을 반복하여 시간-유출량 곡선을 도출하고 이 과정에서 lumped parameter, θ 를 변화시키면서 실험으로부터 얻은 시간-유출량 곡선과 일치하도록 lumped parameter, θ 를 결정한다. Fig. 4는 그 결과의 한 예로 시료 S1에 해수 비율이 5%인 슬러리(SL2)를 주입한 실험의 시간-유출량 곡선이다.

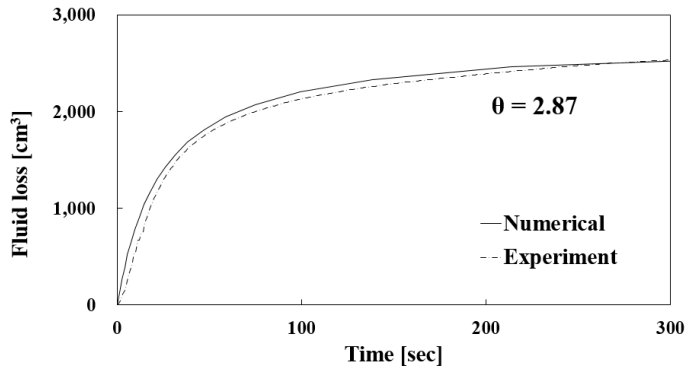


Fig. 4. Estimation of lumped parameter (θ) using slurry sample SL2 and soil sample S1

3. 실내 실험

3.1 실험 장비

실내 모형 실험 장비는 Ryu et al. (2019)이 사용하였던 것과 동일하며 크게 모형 지반을 형성하는 챔버, 슬러리를 교반하고 주입하기 위한 주입 장치와 압력을 가하기 위한 compressor, 압력을 제어하기 위한 regulator 그리고 시간에 따라 발생하는 유출수량을 측정하기 위한 load cell, power supply, data logger 등의 계측장비로 이루어진다. 실험에 사용된 장비의 개략적인 모습은 Fig. 5와 같다.

먼저 실험에 쓰인 지반 모사 장치는 직경 16 cm, 총 높이가 60 cm의 원주형 아크릴 챔버로 제작하였다. 두 번째로 슬러리 주입 장치는 교반을 위한 내부에 전동 프로펠러를 설치하였고 지반 모사 장치와 마찬가지로 아크릴로 제작되어 슬러리의 교반 및 주입 상태를 점검할 수 있도록 하였다. 세 번째 압력 조절 장치는 슬러리 주입 장치에서 지반 모사 장치로 압력을 가할 수 있도록 하는 장치로 compressor와 regulator로 이루어진다. 이 밖에 기타 장치로는 주입을 통해 발생하는 유출수를 받기 위한 수조와 그 양을 측정하기 위한 load cell과 data logger가 있다.

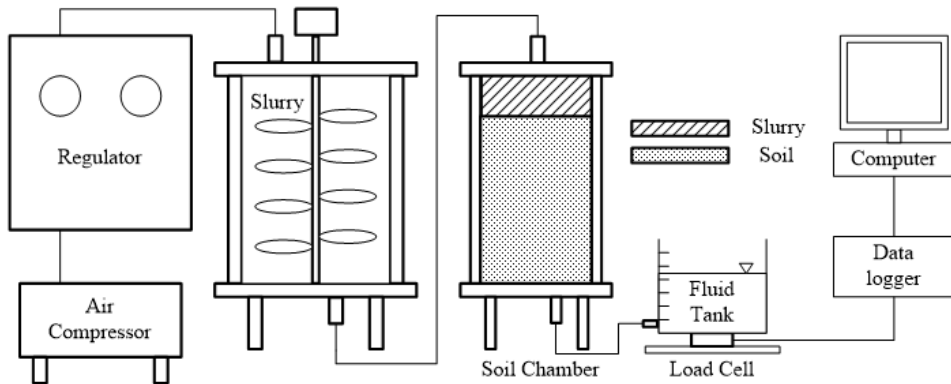


Fig. 5. Schematic diagram of experimental setup (Ryu et al., 2019)

3.2 시료 및 슬러리 물성치

실험에 사용한 시료의 입도 분포는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에는 Krause (1987)가 제안한 슬러리 쉴드 TBM 적용 범위도 함께 표시되어 있다.

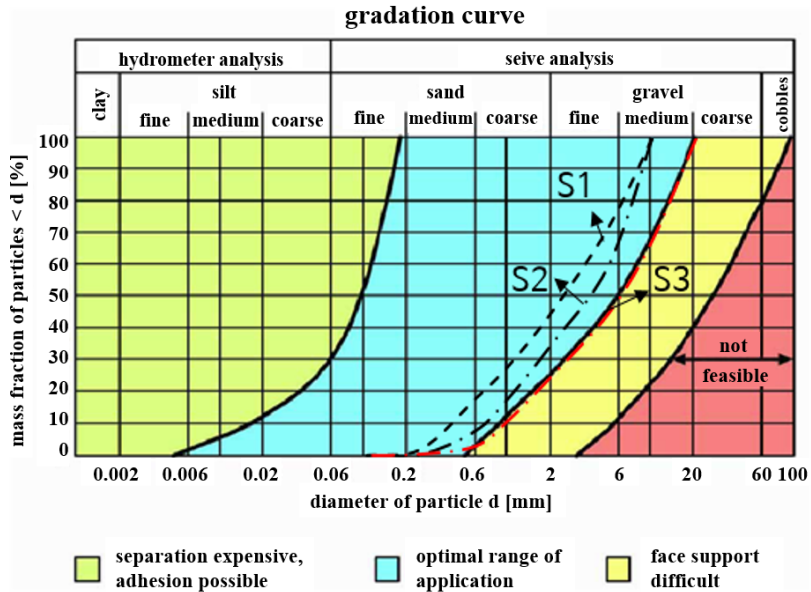


Fig. 6. Particle size distribution curves of soil samples along with the criteria proposed by Krause (1987)

해수의 유입에 따른 슬러리 폐색 효과의 변화를 확인하기 위해 Krause (1987)가 제안한 슬러리 쉴드 TBM 적용범위에서 최적 범위에 포함되도록 입도 분포를 맞추어 3가지 종류의 시료를 조성하였다. 시료의 기본적인 물리적 특성은 Table 3에 정리되어 있다.

Table 3. Physical properties of soil samples

	S1	S2	S3
Saturated unit weight, γ_{sat}	20.45	20.63	20.77
Porosity, n	0.322	0.314	0.303
Permeability, k (cm/sec)	1.125	1.367	1.771
Mean of ln r, m	-1.180	-0.745	-0.026
Standard deviation of ln r, b	1.568	1.426	1.570

시료에 주입할 슬러리는 해수의 비율에 차이를 두어 4가지(0%, 5%, 10%, 20%)로 조성하였고 다른 영향을 배제하기 위해 벤토나이트 함유량과 밀도는 각각 60 kg/m^3 , 1.034 g/cm^3 로 조성하였다. Kim et al. (2017)은 해수의

비율이 20%를 초과하는 경우에 점도, 항복점, 겔강도, 침투수량이 기존 도심지 TBM 프로젝트에서 사용되었던 슬러리 품질 관리 기준을 만족하지 못하여 버력 처리 등에 문제가 생길 수 있으므로 해수 비율에 따라 성능을 유지하기 위한 첨가제 투입량을 제안하였다. 본 연구에서는 첨가제 사용은 고려하지 않으므로 해수 비율이 20%를 초과한 경우는 제외하였다. 슬러리 제조에 사용한 벤토나이트는 Na-벤토나이트이며 200번체 잔류량은 20% 이하이고 d_{85} 는 0.083 mm였다. 슬러리 제조에 사용한 해수의 염분 농도는 세계 해양의 평균 염분 농도 35‰이었으며 해수의 비율에 따른 벤토나이트의 팽윤도는 Table 4에, 슬러리의 점도는 Table 5에 나타내었다.

Table 4. Swelling volume of Na-bentonite with variation of seawater percentage

Percentage of seawater (%)	0	5	10	20	30	70	100
Swelling volume (ml/2 g)	20.0	14.0	11.5	10.5	10	6.5	4.5

Table 5. Viscosity of slurry with variation of seawater percentage

Type of slurry	SL1	SL2	SL3	SL4
Percentage of seawater (%)	0	5	10	20
Marsh funnel viscosity, t (sec)	36.0	32.0	29.5	28
Apparent viscosity, μ_{app} (cP)	10.77	7.51	5.28	3.87

벤토나이트의 팽윤도는 ASTM D5890에 따라 물로 채워진 실린더에 벤토나이트를 0.1 g씩 넣고 모두 침전될 때까지 약 10분간 대기하고 침전이 완료되면 다시 0.1 g을 넣는 방식으로 총 2 g을 넣은 후 24시간이 경과되었을 때 실린더의 눈금을 0.5 ml 수준까지 측정하였다. 그 결과 벤토나이트의 팽윤도는 해수의 비율이 10%에 이르는 때까지 급격하게 감소하고 그 뒤로 감소폭이 둔화되었다. 슬러리의 Apparent viscosity는 DIN 4127에 따라 규정된 Marsh funnel을 사용하여 Marsh funnel viscosity를 측정한 후, Almahdawi et al. (2014)이 제안한 식 (17)을 활용하여 계산하였다.

$$\mu_{app} = -0.0118t^2 + 1.6175t - 32.168 \quad (17)$$

여기서, μ_{app} 는 apparent viscosity (cP), t는 Marsh funnel viscosity (sec)이다.

3.3 실험 과정

먼저 지반 모사 장치에 57 cm 높이로 시료를 조성한 후, 해수로 포화되도록 하였다. 두 번째로는 슬러리 주입장치와 지반 모사 장치를 연결하고 조성한 시료 상부의 남은 공간을 슬러리로 채워주었다. 마지막으로 레귤레이터

를 조절하여 주입 압력을 50 kPa로 설정하여 모형 지반으로 슬러리가 주입되도록 하고 이 때 수조로 유출되는 수량을 load cell과 data logger를 통해 측정하였다.

4. 실내 실험 결과

실내실험 수행 결과를 정리하면 다음과 같다. 서로 다른 입도 분포를 가지는 3가지 시료(S1, S2, S3)에 해수의 비율에 따라 조성된 4가지 종류의 슬러리(SL1, SL2, SL3, SL4)를 주입한 실험 결과는 Fig. 7과 같다. 모든 경우에서 슬러리의 해수 비율이 0%에서 20%로 증가할수록 동일한 시간 동안 발생하는 유출수량이 증가하였으며 SCC 값은 감소하였다(Fig. 7, Table 6). 특히 시료 S2의 경우는 SCC값이 감소하여 penetration type이 공법 적용에 문제가 없는 A에서 적용을 위해 추가적인 처리가 필요한 B로 변화되었다.

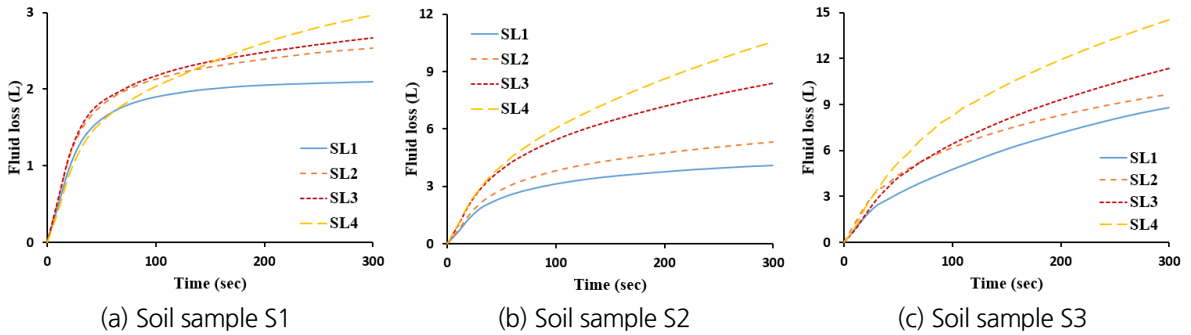


Fig. 7. Fluid loss curves with variation of seawater percentage contained in slurry

Table 6. Results of slurry penetration

	Soil sample S1				Soil sample S2				Soil sample S3			
	SL1	SL2	SL3	SL4	SL1	SL2	SL3	SL4	SL1	SL2	SL3	SL4
Lumped parameter, θ	3.10	2.87	2.83	2.73	3.64	3.38	2.94	2.75	5.60	5.57	5.40	5.05
SCC (cm^{-1})	0.498	0.365	0.345	0.298	0.157	0.117	0.068	0.052	0.052	0.051	0.045	0.035
Penetration type	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B

주입에 사용된 슬러리를 기준으로 정리하여 나타낸 시간-유출량 그래프는 Fig. 8과 같다. 모든 그래프에서 더 조립질인 시료에 주입한 경우일수록 유출수량이 크게 발생하였고 해수의 비율이 높을수록 유출수량의 차이는 크게 나타났다.

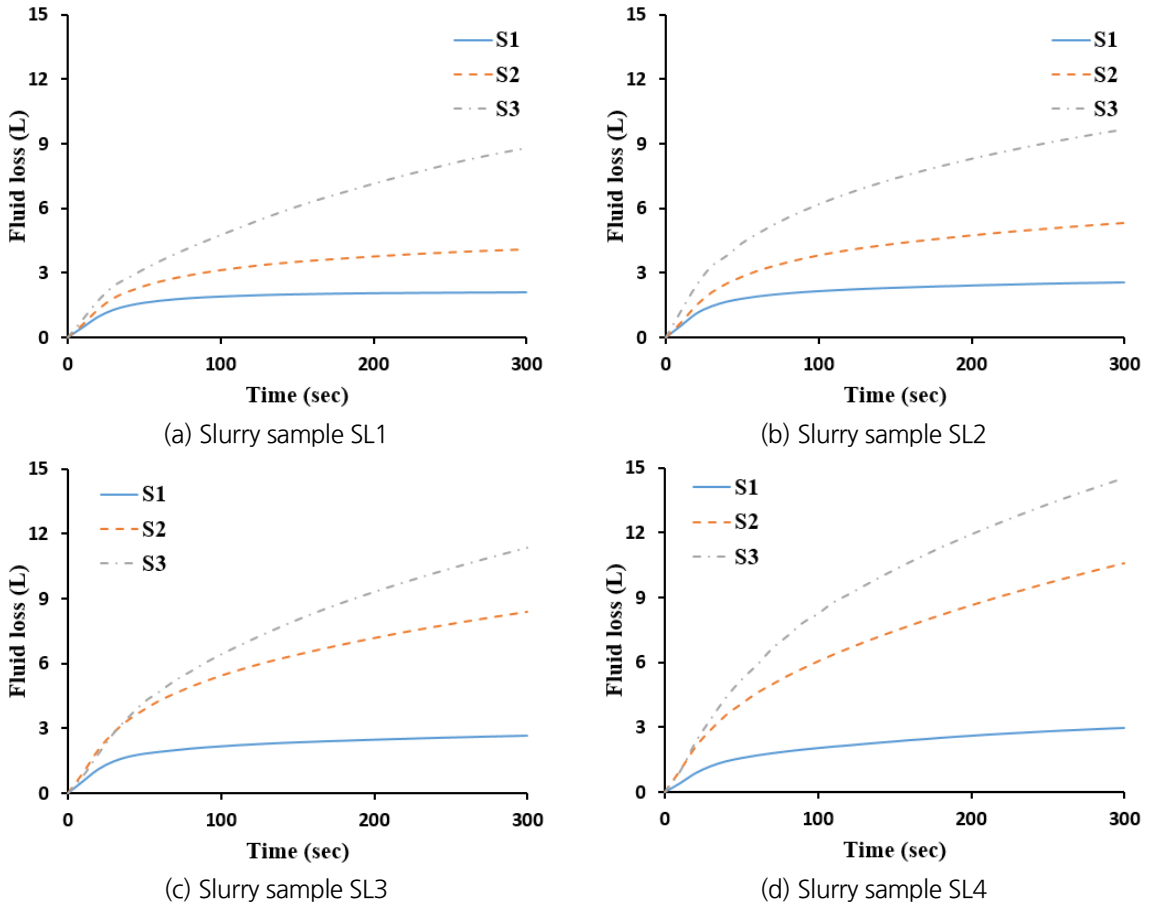


Fig. 8. Fluid loss curves with variation of particle size distribution of soil samples

5. 결론

본 논문에서는 서로 다른 입도분포를 가지는 3가지 시료를 대상으로 해수의 비율이 다른 4가지 슬러리를 주입하는 실내 실험을 수행하였다. 단, 해수의 비율은 Kim et al. (2017)의 연구를 바탕으로 20% 이내로 제한하였다. 실험 결과를 slurry clogging criteria (SCC)를 활용하여 정량적인 수치로 계산하여 해수가 슬러리 쉴드 TBM 공법 적용성을 저하시키며 공법의 적용성을 평가할 때 슬러리의 상태만으로 평가하는 것에 한계가 있음을 확인하였다. 연구 수행 결과를 종합해 보면 다음과 같다.

1. 해수의 비율, 즉 염분의 농도가 증가할수록 벤토나이트의 팽윤도는 감소하고 이에 따라 슬러리의 점도 역시 감소하였다. 특히, 팽윤도의 감소는 해수의 비율이 10%에 이르기까지 급격하게 감소하고 그 이후로는 감소폭이 둔화되는 것을 알 수 있었다.

2. 주입 실험 결과, 모든 시료에서 해수 비율이 증가할수록 slurry clogging criteria (SCC) 값이 감소하는 것으로 나타났다. 심지어, 해수의 비율이 증가하자 penetration type이 공법 적용에 문제가 없는 Type A (즉, filter cake 형성)에서 공법 적용을 위해 슬러리에 추가적인 처리가 필요한 Type B (즉, 제한적 슬러리 침투 발생)로 변화되는 경우도 존재함을 알 수 있었다. 이로부터 슬러리에 해수가 유입될 경우 슬러리에 의한 폐색 효과가 감소되어 슬러리 쉴드 TBM 공법 적용성이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 해수의 비율이 20% 이하인 경우에도 나타난 현상으로서, 해수의 비율이 20%를 상회하는 경우는 더욱 적용성에 문제가 있음을 쉽게 추론할 수 있다.
3. 해수 비율이 같은 슬러리를 서로 다른 입도분포의 시료에 주입한 결과, 슬러리의 물리적인 성질이 동일하지만 지반 조건에 따라 SCC값에 차이가 있으며 이에 따라 penetration type이 다르게 나타나는 경우도 발생하였다. 이로부터 슬러리 쉴드 TBM 공법의 적용성을 평가하는데 슬러리 자체만을 평가기준으로 사용하는 것에 한계가 있음을 확인하였다. 따라서 해수의 영향을 고려하여 슬러리 쉴드 TBM 공법의 적용성을 평가할 때도 슬러리의 특성뿐만 아니라 지반의 입도분포도 함께 고려하여야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발 (18SCIP-B066321-06)” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Almahdawi, F.H.M., Al-Yaseri, A.Z., Jasim, N. (2014), “Apparent viscosity direct from marsh funnel test”, *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 51-57.
2. Anagnostou, G., Kovari, K. (1994), “The face stability of slurry-shield-driven tunnels”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 9, No. 2, pp. 165-174.
3. Arya, L.M., Dierolf, T.S. (1989), “Predicting soil moisture characteristics from particle-size distribution: an improved method to calculate pore radii from particle radii”, *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, University of California, Riverside, CA, pp. 115-124.
4. ASTM (2018), “Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. DIN 4127 (2014), “Earthworks and foundation engineering - test methods for supporting fluids used in the construction of diaphragm walls and their constituent products”, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
6. Fritz, P. (2007), “Additives for slurry shield in highly permeable ground”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp. 81-95.

7. Gruesbeck, C., Collins, R.E. (1982), "Entrainment and deposition of fine particles in porous media", *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 22, No. 6, pp. 847-856.
8. Kim, D.Y., Lee, J.W., Jung, J.H., Kang, H.B., Jee, S.H. (2017), "A fundamental study of slurry management for slurry shield TBM by sea water influence", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 3, pp. 463-473.
9. Kim, J.S., Lee, I.M., Jang, J.H., Choi, H. (2009), "Groutability of cement-based grout with consideration of viscosity and filtration phenomenon", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 33, No. 16, pp. 1771-1797.
10. Krause, T. (1987), *Schildvortrieb mit flüssigkeits-und erdgestützter ortsbrust*, Ph.D. Thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelina, pp. 1-155.
11. Min, F.L., Zhu, W., Xia, S., Wang, R., Wei, D., Jiang, T. (2014), "Test study on airtight capability of filter cakes for slurry shield and its application in a case", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014, pp. 1-8.
12. Reddi, L.N., Bonala, M.V.S. (1997), "Analytical solution for fine particle accumulation in soil filters", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No.12, pp. 1143-1152.
13. Ryu, Y.M., Kwon, Y.S., Kim, T.H., Lee, I.M. (2019), "Slurry clogging criteria for slurry shield tunnelling in highly permeable ground", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Under Review.